

Wärme­kraftkopplung

Gasmotor-Blockheizkraftwerke
effizient planen, bauen und betrei-
ben

RAVEL im Wärmesektor
Heft 4



Impulsprogramm RAVEL
Bundesamt für Konjunkturfragen

«RAVEL im Wärmesektor» in 5 Heften

Gesamtleitung: Hans Rudolf Gabathuler

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 «Wärme­kraft­kopplung» – können sich deshalb Planerinnen und Planer auf diesem zukunfts­trächtigen Gebiet weiterbilden. Die dazu erscheinende Publikationsreihe «RAVEL im Wärmesektor» besteht aus fünf Heften. Diese 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: Wärme­kraft­kopplung (Best.-Nr. 724.358d)

Heft 5: Standardschaltungen (Best.-Nr. 724.359d)



Wichtige Merkmale



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



Weiterführende Literatur



Softwarehinweise



Fallbeispiel in 9 Teilen



Benennungen, Formelzeichen und Abkürzungen auf Seite 58

INDEX

Index auf Seite 59/60

Autoren

Hanspeter Eicher, Dr. Eicher + Pauli AG,
Oristalstrasse 85, 4410 Liestal

Jürg Weilenmann, Dr. Eicher + Pauli AG,
Hirschmattstrasse 16, 6003 Luzern

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

Schweizerischer Fachverband für Wärme­kraft­kopplung
(WKK), Bodenackerstrasse 19, 4410 Liestal

Patronatsorganisationen

Schweizerische Beratende Haustechnik- und Energie-Ingenieure (SBHI), Ittigen – Schweizerischer Energie-Konsumentenverband von Industrie und Wirtschaft (EKV), Basel – Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren (SWKI), Bern – Verband der Schweizerischen Gasindustrie (VSG), Zürich – Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE), Zürich – Verband Schweizerischer Heizungs- und Lüftungsfirmen (VSHL), Zürich

Begleitkommission

H. U. Bruderer (Saurer Thermotechnik AG, WKK-Fachverband) – Ch. Erb (Dr. Eicher + Pauli AG) – E. Längin (EBM) – E. Nussbaumer (ADEV) – P. Renaud (Planair, französischsprachige Umsetzung) – G. Schäfer (EBM) – A. Spalinger (IWB) – M. Stadelmann (VSG) – R. Uetz (Infoenergie) – Th. Wälchli (EBM)

Copyright © Bundesamt für Konjunkturfragen,
3003 Bern, Mai 1994. Auszugsweiser Nachdruck unter
Quellenangabe erlaubt. Zu beziehen bei der Eid-
genössischen Drucksachen- und Materialzentrale, 3000
Bern. (Best.-Nr. 724.358d)
Form. 724.358d 5.94 2000 U11759

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 drei- bis viermal 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 Eid-

genössischen 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, Ruedi Messmer, Jürg Nipkow, Ruedi Spalinger, Dr. Daniel Spreng, Felix Walter, Dr. Charles Weinmann, Georg Züblin 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.

Mai 1994

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

Inhaltsverzeichnis

1. Technik	Fehler! Textmarke nicht definiert.		
1.1 RAVEL und die Wärmekraftkopplung.....	5	Energiepreissteigerung.....	32
1.2 Begriffe, Systematik.....	5	Wartungskosten.....	32
1.3 Gasmotor-Blockheizkraftwerke.....	5	Wärmegestehungskosten.....	34
λ-1-Motor mit Katalysator.....	5	3.5 Weitere Komponenten.....	34
λ-1-Motor mit Abgasrückführung und Katalysator.....	6	Spitzenkesselanlage.....	34
Magermotor.....	7	Speicheranlage.....	35
1.4 Dieselmotor-Blockheizkraftwerke.....	7	4. Umweltverträglichkeit.....	36
1.5 Gasturbinen-Blockheizkraftwerke.....	8	4.1 Beurteilungskriterien.....	36
1.6 Total-Energie-Anlagen.....	8	4.2 Energienutzung und CO ₂ -Emissionen.....	36
1.7 Gas- und Dieselmotorwärmepumpen.....	9	4.3 Schadstoffemissionen.....	37
1.8 Spezielle Techniken.....	9	Gasmotor-BHKW's mit Dreiwegkatalysator.....	37
Abgaskondensation beim Gasmotor-BHKW.....	9	Gasturbinen mit Entstickung.....	38
Rückgewinnung der Strahlungsabwärme.....	10	4.4 Vergleichende Bewertung.....	38
Abgaskondensation und/oder Rückgewinnung der Strahlungsabwärme?.....	10	5. Planungshinweise.....	39
Heisskühlung.....	11	5.1 Planungsablauf.....	39
Produktion von Niederdruckdampf.....	11	Vorabklärung.....	39
1.9 Zukunftstendenzen.....	11	Machbarkeitsstudie.....	39
Gasmotor-Blockheizkraftwerke.....	11	Gesamtkonzept mit Pflichtenheft.....	39
Dieselmotor-Blockheizkraftwerke.....	11	Projekt und Ausführungsplanung.....	40
Stirlingmotor-Blockheizkraftwerke.....	12	Betrieboptimierung und Erfolgskontrolle.....	40
Brennstoffzelle.....	12	5.2 BHKW-Aggregat.....	40
2. Einsatzmöglichkeiten.....	12	Heizzentrale.....	40
2.1 Einsatzbereiche.....	12	Aufstellung.....	40
Dienstleistungsbereich.....	14	Schallschutz.....	40
Wohnbereich.....	14	Erdgasversorgung.....	41
Wärmeverbund.....	16	Propanversorgung.....	41
Industriebereich.....	16	Heizölversorgung.....	41
2.2 Energiekonzept.....	17	Schmierölversorgung.....	42
Wärmekraftkopplung als Element eines Energiekonzepts.....	17	Lüftungsanlage.....	42
Wärmegeführte Wärmekraftkopplungsanlagen.....	18	5.3 Hydraulische Einbindung.....	43
Stromgeführte Wärmekraftkopplungsanlagen.....	20	Unterschiede zu einer konventionellen Anlage.....	43
Wärmekraftkopplungsanlage als Notstromanlage.....	21	Wärmeabgabe.....	43
2.3 Brennstoffe.....	21	Parallelschaltung.....	44
Erdgas.....	21	Teilparallelschaltung.....	44
Klärgas.....	22	Serieschaltung.....	45
Deponiegas.....	23	Speicher.....	45
Flüssiggas.....	23	Ein- und Ausschaltwerte.....	45
Heizöl EL.....	23	Getrennte Speicheranschlüsse.....	46
Holz.....	24	Intervallbetrieb der Fernleitung.....	46
2.4 Gesetzliche Rahmenbedingungen.....	24	Wassererwärmung.....	47
Energienutzung.....	24	Abgaskondensation.....	47
Elektrizität.....	25	Umluftwärmepumpe.....	47
Schadstoffemissionen.....	26	5.4 Elektrische Einbindung.....	49
2.5 Trägerschaften.....	26	Einspeisung und Messung.....	49
2.6 Energielieferverträge.....	26	Sicherheitseinrichtungen.....	49
Erdgas.....	26	Notstromversorgung.....	50
Elektrizität.....	27	5.5 Steuerung und Regelung.....	50
Wärme.....	27	Steuerungsprinzip.....	50
3. Auslegung.....	22	Aufbau der Steuerung.....	50
3.1 Grundlagen.....	22	Dynamische Effekte.....	51
3.2 Grobauslegung.....	23	5.6 Instrumentierung.....	51
Grobdimensionierung.....	23	6. Betrieb.....	53
Spezifische Investitionen.....	24	6.1 Einfluss auf Wirtschaftlichkeit.....	53
Wirtschaftlichkeitsabschätzung.....	24	6.2 Wartung.....	53
3.3 Detailauslegung.....	26	6.3 Betriebsüberwachung.....	54
Ermittlung der energietechnischen Daten mit Computerprogramm.....	27	6.4 Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle.....	54
Ermittlung der energietechnischen Daten mit Hilfe des Summenhäufigkeitsdiagrammes.....	28	Anhang.....	56
Energiebilanz.....	29	A1 Adressen.....	56
3.4 Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	29	Verbände.....	56
Berechnungsmethoden.....	30	Lieferanten von Wärmekraftkopplungsanlagen.....	56
Betrachtungszeitraum.....	30	Trägerschaften.....	56
Baukontenplan.....	31	A2 Kopiervorlage für die Tabelle «Wärmegestehungskosten».....	57
Kalkulationszinssatz.....	31	Benennungen, Formelzeichen, Abkürzungen.....	58
Kapitalkosten.....	31	Index.....	59
Inflationsrate.....	31		
Energiekosten und -erträge.....	32		

1. Technik

1.1 RAVEL und die Wärmekraftkopplung

RAVEL sieht die Wärmekraftkopplung als Teil eines Gesamtkonzeptes zur effizienten Wärme- und Elektrizitätsproduktion: Die Realisierung von Wärmekraftkopplungs- und Wärmepumpenanlagen soll so erfolgen, dass sich eine Umweltstrategie ergibt. Dies ist möglich, wenn mindestens ein Drittel der in Wärmekraftkopplungsanlagen produzierten Elektrizität in Elektro-Thermo-Verstärkern eingesetzt wird (Bild 1). Der klassische Fall eines Elektro-Thermo-Verstärkers ist die Wärmepumpe.

+ Heft 1, Abschnitte 2.5 und 3.4

1.2 Begriffe, Systematik

Wärmekraftkopplung (Abkürzung: WKK) bedeutet kombinierte Produktion von Wärme (für Heizung und Prozesse) und Kraft meist zur Elektrizitätsproduktion. Ein Blockheizkraftwerk (Abkürzung: BHKW) ist die kompakte Bauart eines Wärmekraftkopplungsmoduls, welches hauptsächlich in den Leistungsbereichen bis 1 MW_{el} mit Verbrennungsmotoren und von 1 bis 10 MW_{el} mit Gasturbinen eingesetzt wird. Die verwendeten Kennzahlen zeigt Kasten 2 und eine komplette Systematik der Wärmekraftkopplung ist in Tabelle 4 zusammengestellt.

1.3 Gasmotor-Blockheizkraftwerke

Als Antriebsaggregate für Gasmotor-BHKW's (Bild 3) werden Industrie-Gasmotoren mit einer Lebensdauer von mindestens 100'000 Betriebsstunden eingesetzt. Diese stehen für einen Leistungsbereich von 20...1000 kW_{el} zur Verfügung. Größere Anlagen werden aus mehreren Modulen zusammengesetzt. Gasbetriebene Klein-BHKW's für einen Leistungsbereich von 5 bis 20 kW_{el} basieren auf umgebauten Fahrzeugmotoren, deren Lebensdauer wesentlich tiefer ist. Die Wirtschaftlichkeit ist jedoch vergleichbar, weil Fahrzeugmotoren preisgünstiger sind. Mit standardisierten BHKW's ist ein nahezu vollautomatischer und kostengünstiger Betrieb ohne permanente Überwachung durch Personal möglich.

λ-1-Motor mit Katalysator

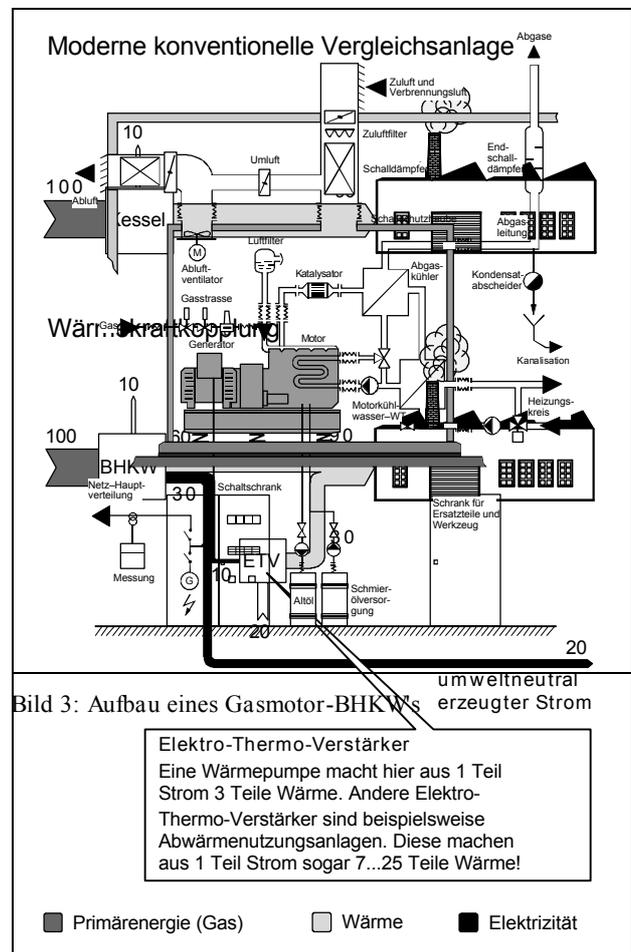


Bild 1: Mit Blockheizkraftwerken in Verbindung mit Elektro-Thermo-Verstärkern – hier eine Wärmepumpe – kann praktisch umweltneutral Strom produziert werden. Dabei müssen Blockheizkraftwerk und Wärmepumpe nicht zwingend im gleichen Objekt gebaut werden.

Kennzahlen

Elektrische Leistung	P_{el}	[kW, MW]
Thermische Leistung	Q	[kW, MW]
Brennstoffleistung	Q_{BR}	[kW, MW]
Stromkennzahl	$s = P_{el}/Q$	[-]
Gesamtwirkungsgrad	$\eta = (P_{el}+Q)/Q_{BR}$	[-]
Wirkungsgrad elektrisch	$\eta_{el} = P_{el}/Q_{BR}$	[-]
Wirkungsgrad thermisch	$\eta_{th} = Q/Q_{BR}$	[-]

Die Brennstoffleistung (Q_{BR}) wird auf den unteren Heizwert (H_u) bezogen!

Kasten 2

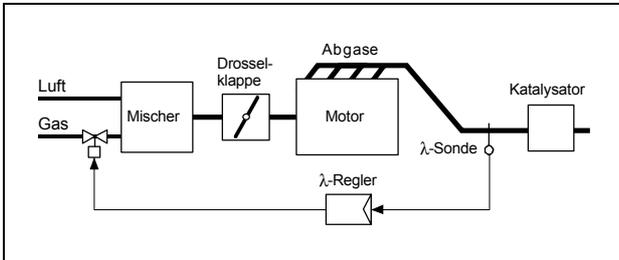


Bild 5: λ -1-Motor mit Katalysator

Der Gasmotor wird ohne Luftüberschuss betrieben (Luftüberschusszahl $\lambda = 1$). Dies ist Voraussetzung, damit im nachgeschalteten Katalysator (Dreiwegkatalysator, nichtselektive katalytische Reduktion) die Schadstoffe reduziert werden können (Bild 5). Diese Technik kann als ausgereift bezeichnet werden. Bei entsprechender Planung, Überwachung und Wartung lassen sich sehr tiefe Schadstoff-Emissionswerte und Katalysatorstandzeiten von über 20'000 Stunden erreichen.

λ -1-Motor mit Abgasrückführung und Katalysator

Durch Beimischung von gekühlten Abgasen zur Verbrennungsluft entsteht – im Vergleich zu einem λ -1-Motor ohne Abgasrückführung – eine wesentlich tiefere Primärstickoxidemission. Dies ermöglicht einen wesentlich kleiner dimensionierten Katalysator. Zudem ist die Leistungsdichte des Motors höher und der mechanische Wirkungsgrad besser. In der Schweiz sind erste Versuchsanlagen in Betrieb. Die bisherigen Betriebserfahrungen bestätigen die Erwartungen.

	Heizkraftwerke (HKW)		Blockheizkraftwerke (BHKW)		
	Heizkraftwerk mit Dampfturbine	Kombi-Heizkraftwerk	Blockheizkraftwerk mit Gasturbine	Blockheizkraftwerk mit Industriemotor	Klein-BHKW mit Automotor
Antriebssystem	Dampfturbine(n)	Gasturbine(n) und Dampfturbine(n) kombiniert	Gasturbine	Industrie-Ottomotor mit Dreiwegkatalysator, Magermotor oder Dieselmotor mit SCR-Katalysator ⁴	
Brennstoff	Kohle, Schweröl (Wirbelschichtfeuerung); Erdgas, Heizöl (konvent. Dampfkessel)	Erdgas/Flüssiggas, Heizöl EL, vergaste Kohle (in Zukunft)		Erdgas/Flüssiggas, Biogas (Kläranlagen, Landwirtschaft, Deponiegas) Heizöl EL/Biotreibstoff	
Hauptsächlicher Einsatzbereich (Beispiele)	Fernwärmeverbund (z.B. mit Kehrichtverbrennung)	Fernwärmeverbund	Prozesswärme für Industrie, Spitäler (Dampf, Heisswasser)	Nahwärmeverbund, grössere Einzelgebäude	EFH-Siedlung, Einzelgebäude (z.B. Schulhaus, Hotel, Gewerbebau)
Leistungsbereich	5...1000 MW _{el}	20...100 MW _{el}	1...10 MW _{el}	20...1000 kW _{el} Standard-BHKW: 150...200 kW _{el} ^{2,3}	5...15 kW _{el} ³
Stromkennzahl ¹	0,3...0,6	0,8...1,2	0,4...0,6	0,55...0,65	0,35...0,45
Gesamtwirkungsgrad	0,85	0,85	0,75...0,85	0,85...1,05	0,80...1,00

¹ Stromkennzahl = Elektrizitätsproduktion/Wärmeproduktion
² Günstiger Leistungsbereich in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Einsatzpotential
³ Zusammenschaltung mehrerer Einheiten für grössere Leistungen möglich
⁴ SCR-Entstickung mit Harnstoff

Tabelle 4: Systematik der Wärmekraftkopplung

Magermotor

Der Magermotor wird mit hohem Luftüberschuss betrieben, so dass bei der Verbrennung des Gases im Motor wenig Stickoxide entstehen. Mit diesem Konzept lassen sich Emissionswerte von $400 \text{ mg/m}^3_{\text{N}} \text{ NO}_x$ (bezogen auf 5% Restsauerstoff) unterschreiten, was den Anforderungen der Luftreinhalteverordnung für Klärgas, Biogas und Deponiegas, nicht aber für Erdgas oder Flüssiggas als Treibstoff entspricht. Werden tiefere Stickoxid-Grenzwerte gefordert, so können die Stickoxide durch einen nachgeschalteten Katalysator reduziert werden (selektiv-katalytische Reduktion, SCR, mit Harnstoff- oder Ammoniak-Eindüsung). Tabelle 6 zeigt einen Vergleich zwischen λ -1-Motor und Magermotor.

1.4 Dieselmotor-Blockheizkraftwerke

Das Dieselmotor-BHKW (Bild 7) unterscheidet sich vom Gasmotor-BHKW im wesentlichen durch die Motorenbauart, den Brennstoff und die Abgasreinigung. Der Dieselmotor wird mit Dieselöl (entspricht Heizöl EL) oder – als sogenannter Zündstrahlmotor – mit einem Gemisch aus Dieselöl (mindestens 5%) und Gas (Erdgas, Flüssiggas, Deponie- oder Klärgas) betrieben. Der wesentliche Unterschied zum Gasmotor besteht darin, dass eine Selbstzündung durch die Kompression des Brennstoff-Luft-Gemisches erfolgt. Der Dieselmotor braucht deshalb keine Fremdzündung mittels Zündanlage und Zündkerzen. Moderne, einwandfrei eingestellte Dieselmotoren erreichen Emissionswerte für NO_x und CO, welche mit Gas-Magermotoren, nicht aber mit λ -1-Gasmotoren mit Katalysator vergleichbar sind. Sehr viel problematischer sind die Emissionen von Kohlenwasserstoffen, weil unter anderem polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) emittiert werden, welche als krebsfördernd gelten.

Die Elektrizitätsproduktion (und somit die Stromkennzahl) ist gegenüber dem Gasmotor höher. Der Gesamtwirkungsgrad hängt von der Nutzung der Abgaswärme ab.

Werden die Abgase im Abgaswärmetauscher unter 180°C abgekühlt, treten zwei Probleme auf:

- Die durch Kondensation von SO_2 entstehende Säure greift das Material des Abgaswärmetauschers an
- Durch die Kondensation hochsiedender Kohlenwasserstoffe verschmutzt der Abgaswärmetauscher

	λ -1-Motor	Magermotor
Motoren-Bauart	Gas-Ottomotor Fremdzündung	Gas-Ottomotor Fremdzündung
Luft-überschuss	$\lambda = 1$	$\lambda = 1,6 \dots 1,8$
Katalysator	NSCR-Katalysator (Dreiweg)	SCR-Katalysator
Reduktionsmittel	Keines	Harnstoff oder Ammoniak
Reduzierte Schadstoffe	NO_x , CO, HC	NO_x
Erreichbare Werte (bei 5% O_2)	$\text{NO}_x < 10 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ CO < $60 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ HC < $10 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$	$\text{NO}_x < 50 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ (abhängig von der Auslegung des Katalysators)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr tiefe Emissionen • Kein Betriebsmittel nötig • Grosse Erfahrungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiefe Anfahremissionen • Geringe Primärproduktion von Schadstoffen • Wenig anfällig auf Schwankungen der Betriebsparameter
Probleme	<ul style="list-style-type: none"> • Anfällige λ-Sonde • Katalysator anfällig auf Betriebsstörungen • Katalysator ist anfällig auf Gasverunreinigungen (Deponiegas, Klärgas) • Anfahremissionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Betriebsmittelverbrauch • Schlechtes Anfahrverhalten • Wenig Erfahrungen • Platzbedarf

Tabelle 6: Vergleich der Motoren- und Abgasreinigungskonzepte für Gasmotor-BHKW's

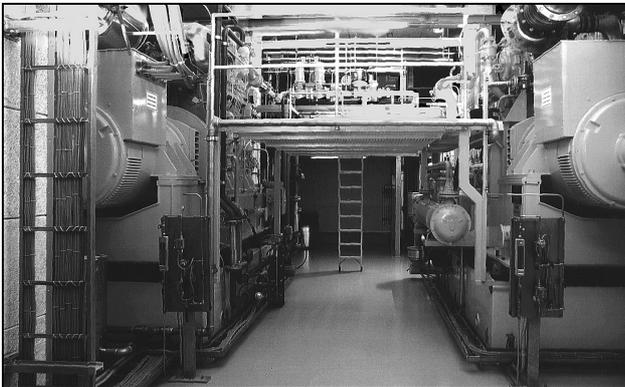


Bild 7: Zwei Dieselmotor-BHKW's mit SCR-Katalysator, elektrische Leistung je 580 kW (Foto: SBV)

<p>Vorteile und Probleme des Dieselmotor-BHKW's</p> <p>Gegenüber dem Gasmotor-BHKW hat das Dieselmotor-BHKW folgende Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Höhere Stromkennzahl – Nicht an Gasleitungsnetz gebunden <p>Dem stehen aber zahlreiche Probleme gegenüber:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Diesel-Partikelfilter sind weltweit nicht befriedigend im Dauerbetrieb; zudem haben etliche Firmen die Entwicklung solcher Filter eingestellt – Produktion von krebserregenden polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) – 2- bis 4mal häufigere Ölwechsel infolge Verunreinigungen im Brennstoff bedeuten höhere Wartungs- und Unterhaltskosten – Höherer Reinigungsaufwand für Abgaswärmtauscher – Tieferer Gesamtwirkungsgrad (rund 82%) aufgrund der erforderlichen hohen Abgastemperatur und des hohen Luftüberschusses – Sehr wenig Betriebserfahrungen in der Schweiz mit Anlagen im Dauerbetrieb 	
--	--

Kasten 8

Massnahme	Probleme, erreichbare Werte
Wasser- oder Dampfneidung in Brennraum	Hoher Wartungsaufwand
SCR-Katalysator (Harnstoff oder Ammoniak)	Teuer NO _x < 10 mg/m ³ _N
Low-NO _x -Brennkammern	In Entwicklung NO _x < 50 mg/m ³ _N (15% O ₂)
Konstant-Volumen-Verbrennung	In Entwicklung NO _x < 50 mg/m ³ _N (15% O ₂)

Tabelle 9: Möglichkeiten zur Reduktion der Stickoxide bei Gasturbinen

Um diese Probleme zu vermeiden, dürfen die Abgase nicht unter 180°C abgekühlt werden.

Für die Abgasreinigung sind zwei Verfahren nötig:

- Entstickung der Abgase mit SCR-Katalysator (analog Gas-Magermotor)
- Russpartikelfilter vor dem SCR-Katalysator (zur Zeit in Entwicklung)

Vorteile und Probleme des Dieselmotor-BHKW's sind in Kasten 8 zusammengestellt.

1.5 Gasturbinen-Blockheizkraftwerke

Für industrielle Einsatzgebiete oder für grössere Wärmeversorgungen mit Temperaturen von über 120°C stehen Gasturbinen im Vordergrund. Wirtschaftlich einsetzbar sind solche Anlagen jedoch erst ab einer elektrischen Leistung von 1 MW.

Die Standardisierung von Gasturbinen-Blockheizkraftwerken ist noch nicht soweit fortgeschritten wie diejenige von Gasmotoren. Verschiedene Firmen bieten jedoch anschlussfertige Module an.

Die Anforderungen an die Schadstoffemissionen von Gasturbinen erfordern spezielle Massnahmen (siehe Tabelle 9).

1.6 Total-Energie-Anlagen

Eine Total-Energie-Anlage (Abkürzung: TEA) ist ein um eine Wärmepumpe erweitertes BHKW, das heisst, Gasmotor, Generator und Wärmepumpenverdichter sind auf einer Welle aufgebaut (Bild 10). Damit ist ein Betrieb als BHKW, als Gasmotorwärmepumpe oder als Elektromotorwärmepumpe möglich.

Der Einsatz einer TEA ist technisch und planerisch anspruchsvoll und bietet folgende Probleme:

- Je nach Betriebsweise (BHKW, Gas- oder Elektromotorwärmepumpe) sind unterschiedliche thermische Leistungen vorhanden, so dass die Anlage nur auf eine Betriebsweise optimal dimensioniert werden kann
- In Zeiten mit hohem Wärmebedarf und hohem Elektrizitätstarif (im Winter tagsüber) ist sowohl ein Betrieb als Gasmotorwärmepumpe (hohe Wärmeproduktion) als auch als BHKW (hohe Elektrizitätsproduktion) erwünscht (Zielkonflikt!)
- TEA sind anlagespezifische Einzelanfertigungen und deshalb teurer als getrennte Aggregate (BHKW und

Elektromotorwärmepumpe), welche standardmässig erhältlich sind

1.7 Gas- und Dieselmotorwärmepumpen

Die Gasmotorwärmepumpe ist ein Spezialfall der Wärmekraftkopplung – mit der mechanischen Energie des Gasmotors wird nicht Elektrizität produziert, sondern der Verdichter einer Wärmepumpe angetrieben (Bild 11).

Einer Gasmotorwärmepumpe sollte immer eine Lösung mit BHKW und Elektromotorwärmepumpe gegenübergestellt werden (Bild 12). Damit erfolgt die Kraftübertragung vom Gasmotor zum Verdichter der Wärmepumpe über den «Umweg» des elektrischen Netzes. Dies weist folgende Vorteile auf:

- Für BHKW und Elektromotorwärmepumpe sind standardisierte Aggregate erhältlich, so dass eine wesentlich höhere Betriebssicherheit und nur unwesentlich höhere Investitionen resultieren
- Höhere Flexibilität bezüglich Elektrizitäts- und Wärmeproduktion

Nachteilig ist der etwas tiefere Gesamtwirkungsgrad durch die Umwandlung in Elektrizität sowie der grössere Platzbedarf. Voraussetzung ist ein genügend dimensionierter elektrischer Netzanschluss.

Für die Dieselmotorwärmepumpe gilt bezüglich Anlagentechnik im wesentlichen das gleiche wie für die Gasmotorwärmepumpe, bezüglich Antriebsmotor und Abgasreinigung das gleiche wie für das Dieselmotor-BHKW.

1.8 Spezielle Techniken

Abgaskondensation beim Gasmotor-BHKW

Analog einem Gaskondensationskessel kann bei einem Gasmotor-BHKW die latente Wärme des Wasserdampfes in den Abgasen genutzt werden (Bild 13). Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz eines Abgaskondensators sind tiefe System-Rücklauftemperaturen (maximal 45...50°C). Es müssen folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Bei der Dimensionierung des Abgaskondensators muss die Abgaszusammensetzung (Luftüberschuss) berücksichtigt werden
- Der Abgaskondensator muss für pulsierende Motorabgase geeignet sein (Gefahr von Ermüdungsbrüchen durch Schwingungen)

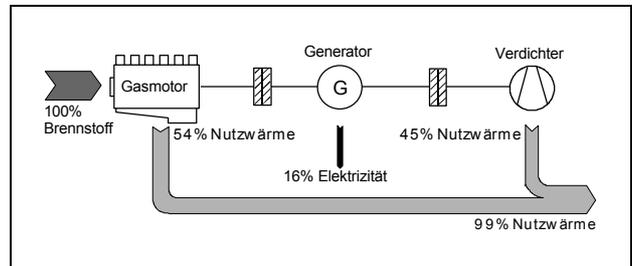


Bild 10: Total-Energie-Anlage

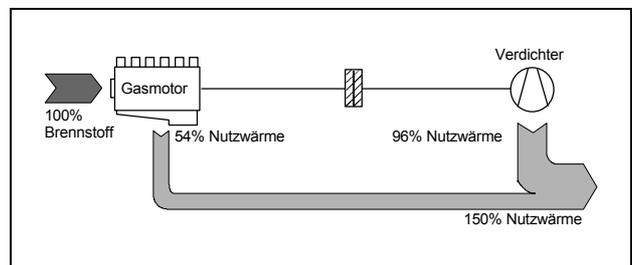


Bild 11: Gasmotorwärmepumpe

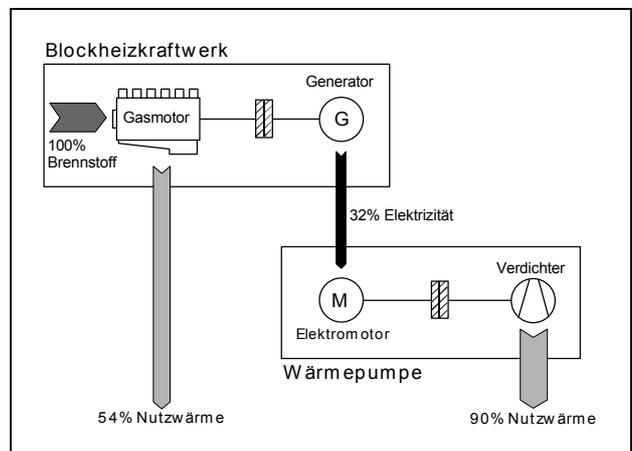


Bild 12: Blockheizkraftwerk und Wärmepumpe elektrisch gekoppelt

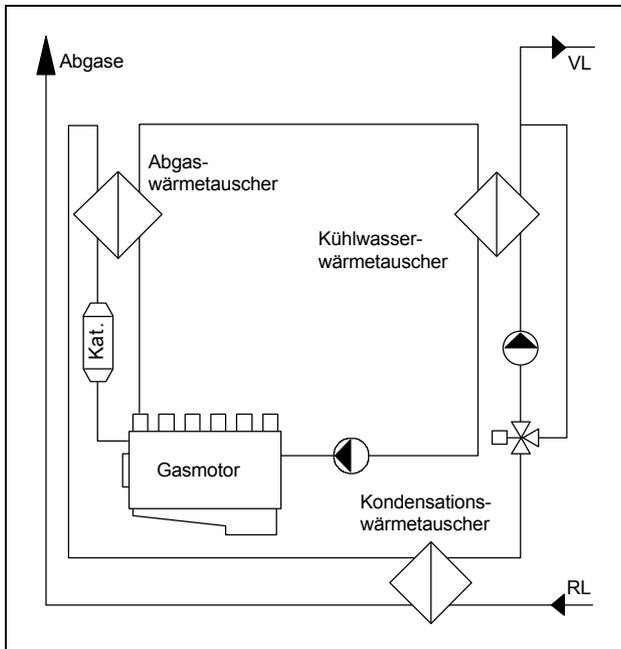


Bild 13: Gasmotor-BHKW mit Abgaskondensation

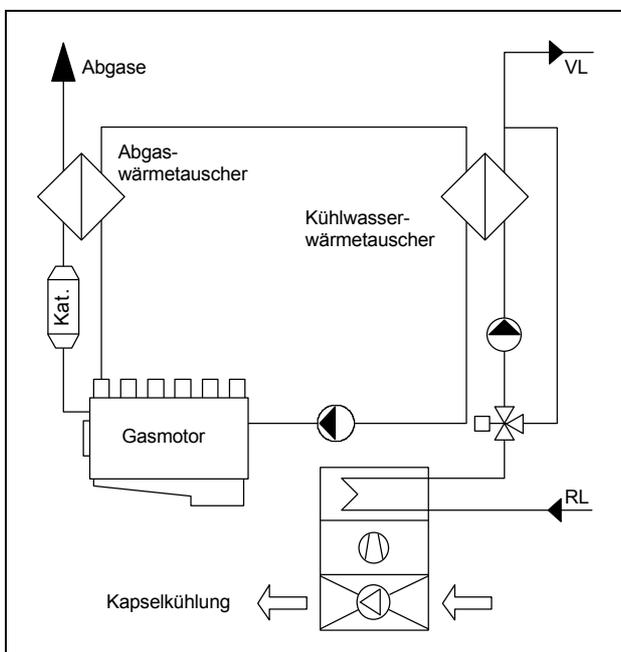


Bild 14: BHKW mit Wärmepumpe zur Rückgewinnung der Strahlungsabwärme

- Der Abgaskondensator muss so aufgebaut sein, dass er gut gereinigt werden kann
- Geeignete Materialwahl für saures Kondensat

Rückgewinnung der Strahlungsabwärme

Unter der Haube eines BHKW's oder im Aufstellungsraum (Anlage ohne Haube) fällt die Strahlungswärme des Gasmotors sowie die Kühlluftwärme des Generators an. Diese Abwärme kann wie folgt abgeführt werden:

- Aus der Haube in den Aufstellungsraum und von dort durch die Raumlüftung ins Freie (möglich bei Aggregaten mit einer elektrischen Leistung bis etwa 100 kW)
- Durch eine BHKW-eigene Lüftungsanlage direkt ins Freie

Dies führt zu Verlusten in der Größenordnung von 6...8% (der Brennstoffleistung). Diese Abwärme lässt sich, je nach objektspezifischen Verhältnissen, mit einer der folgenden Methoden nutzen:

- Wärmepumpe, welche die Wärme der Kapselluft entzieht und in den Rücklauf des Heizsystems einspeist (Bild 14). Voraussetzung dafür ist, dass die Temperatur des Rücklaufes dauernd kleiner ist als die maximal zulässige Verflüssigungseintrittstemperatur der Wärmepumpe.
- Vorwärmung des Warmwassers mit Umluftwärmetauscher. Dies bedingt während des BHKW-Betriebs einen hohen Warmwasserbedarf.
- Kapselkühlung durch ein objektseitiges Kältesystem. Dies ist nur sinnvoll, wenn die Abwärme der Kälteerzeugung während des BHKW-Betriebs immer genutzt werden kann.

Wenn gewährleistet ist, dass während des BHKW-Betriebs die Strahlungsabwärme jederzeit durch eines der aufgeführten Systeme abgeführt wird, kann die Lüftungsanlage des BHKW's sehr stark reduziert werden (nicht sinnvoll, falls das BHKW für Notstrombetrieb konzipiert ist).

Eine zusätzliche Wärmepumpe benötigt Elektrizität. Bei hohen Elektrizitätstarifen ergibt sich deshalb ein Zielkonflikt zwischen energetisch-ökologischer und wirtschaftlicher Optimierung der Anlage.

Abgaskondensation und/oder Rückgewinnung der Strahlungsabwärme?

Beide Systeme erhöhen den Gesamtwirkungsgrad des BHKW-Moduls, sind jedoch auf tiefe System-Rücklaufemperaturen angewiesen. In Tabelle 15 sind die wichtigsten Charakteristiken der beiden Systeme miteinander verglichen.

Die Realisierung beider Systeme in einer Anlage ist nur bei sehr tiefer Rücklauftemperatur (bis etwa 35°C) empfehlenswert. Beide Systeme sind dann hydraulisch in Serie zu schalten.

Heisskühlung

Gasmotoren verschiedener Fabrikate können (mit relativ geringen Mehrinvestitionen) für Heisskühlung ausgerüstet werden. Der Kühlwasserkreislauf kann damit Vorlauftemperaturen von bis zu 130°C erbringen. Damit lassen sich heizungsseitig, bei entsprechender Auslegung der Wärmetauscher, Vorlauftemperaturen bis 125°C erreichen.

Produktion von Niederdruckdampf

Bei Gasmotoren verschiedener Fabrikate können die Zylinder-Kühlkammern so ausgebildet werden, dass darin direkt Niederdruckdampf mit einer Temperatur von bis zu 130°C produziert werden kann. Parallel zum Gasmotor muss ein Dampfbehälter mit Niveauregelung installiert werden.

1.9 Zukunftstendenzen

Gasmotor-Blockheizkraftwerke

Gasmotor-BHKW's weisen einen hohen Entwicklungsstand auf. In naher Zukunft wird eine Entwicklung in den folgenden Bereichen stattfinden:

- Permanente Überwachung der Schadstoffemissionen
- Tiefe Anfahremissionen durch Anfahrtoptimierung oder Katalysatorheizung
- Optimierung Abgasreinigung beim Magermotor
- Entwicklung eines Klein-BHKW's mit einer elektrischen Leistung im Bereich 3...6 kW
- Wirkungsgradverbesserungen durch Optimierung der Module
- Wassergekühlte Generatoren

Dieselmotor-Blockheizkraftwerke

Wenn Dieselmotor-BHKW's auf breiter Basis eingesetzt werden sollen, müssen Lösungen für die folgenden Hauptprobleme gefunden und in der Praxis erprobt werden:

- Funktionstüchtige Diesel-Partikelfilter
- Erhöhung der Wartungsintervalle durch geeignete Massnahmen in der Schmierölversorgung auf mindestens 1000 Betriebsstunden (heute noch 200...400 Betriebsstunden)

	Abgaskondensation	Rückgewinnung der Strahlungsabwärme
Mehrleistung Wärme (bezügl. Gasverbrauch)		10...12%
Hilfsenergie Elektroheizung		3...4%
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Verschmutzung • Keine Ölverschmutzung • Keine Abgasreinigung • Keine Abgasreinigung 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Wärmeleistung • Kleine Lüftung • Tiefe Rücklauftemperatur nötig • Reduktion der Stromkennzahl
Probleme	<ul style="list-style-type: none"> • Ma... • Verschmutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiefe Rücklauftemperatur nötig • Reduktion der Stromkennzahl
BWd	Ab ca. 100 kW _{el}	Ab ca. 200 kW _{el}
Stromkennzahl	50% ¹	43% ²
Gesamtwirkungsgrad		
– bei $\vartheta_{RL} = 40^\circ\text{C}$	96...98%	98...102%
– bei $\vartheta_{RL} = 50^\circ\text{C}$	94...96%	96...100%
¹ Die Reduktion der Stromkennzahl ist nur eine Folge der höheren Wärmeleistung ² Die Stromkennzahl ist aufgrund der höheren Wärmeleistung und niedrigeren Elektrizitätsproduktion tiefer		

Tabelle 15: Abgaskondensation und/oder Rückgewinnung der Strahlungsabwärme mit Wärmepumpe?

Brennstoffzellen

Zur Zeit sind drei mit Erdgas betriebene Brennstoffzellensysteme in Erforschung und Entwicklung. Sie unterscheiden sich insbesondere durch die Art des Elektrolyten, in welchem der elektrochemische Prozess abläuft. Alle Zellentypen weisen gegenüber WKK-Anlagen mit thermodynamischen Maschinen den Vorteil auf, dass die Elektrizitätserzeugung geräuschlos und praktisch ohne Schadstoffemissionen erfolgt.

Phosphorsäure-Brennstoffzelle: Als Brennstoff für die Elektrizitätsproduktion wird Wasserstoff benötigt, welcher in einer Vorstufe zur Brennstoffzelle (Reformer) durch einen chemischen Prozess aus Erdgas gewonnen wird. Eine Pilotanlage mit einer elektrischen Leistung von 200 kW ist seit 1993 in Genf erfolgreich in Betrieb. Der elektrische Wirkungsgrad liegt bei 40...43%. Die erreichbare Vorlauftemperatur ist 75°C, wobei der Rücklauf maximal 50°C betragen darf.

Karbonatschmelze-Brennstoffzelle: Analog zur Phosphorsäure-Brennstoffzelle muss zuerst aus Erdgas Wasserstoff produziert werden. Zur Zeit befindet sich dieser Zellentyp noch im Forschungsstadium.

Feststoffelektrolyt-Brennstoffzelle: Dieser Zellentyp stellt das aussichtsreichste Konzept dar, obwohl auch diese Zelle das Forschungslabor noch nicht verlassen hat. Als Elektrolyten werden Keramik- oder Polymermembranen eingesetzt. Der grosse Vorteil der Zelle mit Keramikmembran ist die direkte Verwendung von Erdgas als Brennstoff ohne den «Umweg» über Wasserstoff. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Prozess ohne korrosive oder toxische Substanzen arbeitet.

Stirlingmotor-Blockheizkraftwerke

Der Stirlingmotor ist seit langer Zeit eine vielversprechende Alternative zum Gas- oder Dieselmotor, weil die Verbrennung nicht im Motor selbst, sondern extern erfolgt (Bild 16). Es wurden verschiedene Motor-konzepte mit Helium, Wasserstoff und Luft als Arbeitsmittel realisiert. Heute bestehen noch folgende Probleme:

- Helium und Wasserstoff sind Arbeitsmittel, mit welchen theoretisch ein guter mechanischer Wirkungsgrad möglich ist. Wegen des geringen Molekulargewichtes dieser Gase bestehen jedoch grosse Dichtungsprobleme bei den Arbeitskolben, für welche bis heute noch keine befriedigenden Lösungen vorhanden sind.
- Wasserstoff ist explosiv. Bei Undichtigkeiten besteht deshalb Explosionsgefahr.
- Luft ist zwar ein unproblematisches Arbeitsmittel, es lässt sich aber nur ein geringer mechanischer Wirkungsgrad erreichen.

Brennstoffzelle

In der Brennstoffzelle werden Wärme und Kraft nicht in einer thermodynamischen Maschine erzeugt, sondern Elektrizität entsteht durch einen elektrochemischen Prozess unter Abgabe von Abwärme. Eine Übersicht gibt Kasten 17.

Kasten 17

2. Einsatzmöglichkeiten

2.1 Einsatzbereiche

Wärmeerkopplungsanlagen erzeugen in erster Priorität Wärme für ein bestimmtes Objekt. Die produzierte Elektrizität wird im gleichen Objekt verwendet oder ins Netz des Elektrizitätswerkes eingespeisen. Das Elektrizitätserzeugungspotential ist deshalb durch den Wärmebedarf des zu versorgenden Objekts bestimmt. Bild 18 zeigt die möglichen Einsatzbereiche für Wärmeerkopplungsanlagen in der Schweiz. Der wesentliche Wärmebedarf besteht aus Prozess- und Raumwärme. Letztere teilt sich in die Anwendungssektoren Wohnen, Dienstleistung sowie Industrie und Gewerbe auf.

Ob eine Wärmeerkopplungsanlage realisiert wird, hängt praktisch immer von deren Wirtschaftlichkeit ab. Das Elektrizitätserzeugungspotential (Bild 19) ist deshalb davon abhängig, wie teuer die produzierte Elektrizität sein darf. Tiefe Elektrizitätsgestehungskosten ergeben sich bei sorgfältiger Auslegung und günstigen Randbedingungen (Kasten 20).

+ Auslegung, Wirtschaftlichkeit siehe Kapitel 3

Dienstleistungsbereich

Im Dienstleistungsbereich (Bürogebäude, Verwaltung, Spitäler, Schulen, Hotels usw.) können Blockheizkraftwerke je nach Randbedingungen bereits bei einem Wärmeleistungsbedarf des Objektes von 500...800 kW wirtschaftlich sein, da hier der Elektrizitätsverbrauch und die Tarife meistens recht hoch liegen. Bei Gebäuden mit hohen internen Wärmelasten oder einem hohen Anteil passiver Sonnenenergienutzung (Bild 21) muss die Auslegung sehr sorgfältig durchgeführt werden.

Wohnbereich

Im Wohnbereich sind grössere Einzelüberbauungen, benachbarte Mehrfamilienhäuser oder Einfamilienhaus-Siedlungen für den Einsatz von Wärmeerkopplungsanlagen geeignet. Die Wirtschaftlichkeit hängt dabei nicht in erster Linie von der Grösse der Anlage ab, sondern von den Wärmeverkaufsbedingungen. Können beispielsweise mehrere Objekte zu einem Wärmeverbund zusammengeschlossen und somit mehrere Heizkesselanlagen gespart werden, kann dies einen wesentlichen Beitrag an die Investitionen einer Wärmeerkopplungsanlage ausmachen.

In Einzelobjekten sind, je nach Randbedingungen, Anlagen mit einer elektrischen Leistung im Bereich von 150...200 kW_{el} wirtschaftlich. Dies bedingt einen

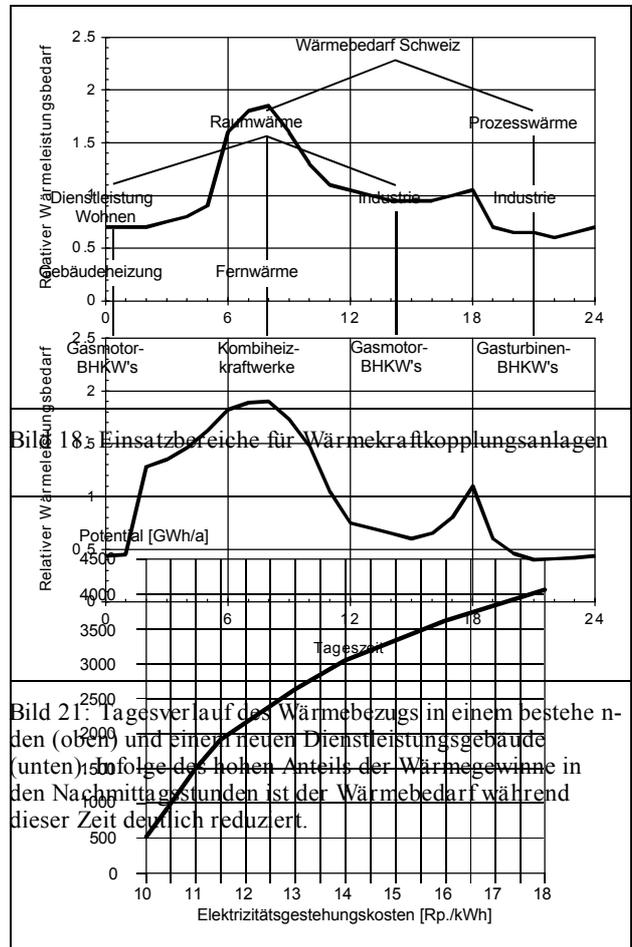


Bild 18: Einsatzbereiche für Wärmeerkopplungsanlagen

Bild 21: Tagesverlauf des Wärmebezugs in einem bestehenden (oben) und einem neuen Dienstleistungsgebäude (unten) infolge des hohen Anteils der Wärmegewinne in den Nachmittagsstunden ist der Wärmebedarf während dieser Zeit deutlich reduziert.

Bild 19: Elektrizitätserzeugungspotential in Funktion der möglichen Elektrizitätsgestehungskosten

Günstige Randbedingungen für den Einsatz einer Wärmeerkopplungsanlage

- Erdgasanschluss bereits im Objekt vorhanden oder mit geringem Aufwand erstellbar.
- Raum für Anlage und Speicher vorhanden (tiefe Raumkosten).
- Systemtemperatur im Auslegepunkt nicht höher als 80...85°C.
- Der Wärmeleistungsbedarf des Objekts (und gegebenenfalls weiterer angeschlossener Objekte) ist höher als 1000 kW, entsprechend rund 2000 MWh/a.
- Wärmebezug mit hoher Benutzungsdauer.
- Hoher Eigenbedarf an Elektrizität.
- Hohe Elektrizitätstarife für Bezug und gegebenenfalls für Rücklieferung.
- Bereitschaft entsprechende Investitionen zu tätigen.

Kasten 20

Wärmeleistungsbedarf des Objekts von 700...1000 kW. Der gleichmässige Tagesverlauf des Wärmebezuges sowie eine allfällige Wassererwärmung wirkt sich positiv auf die Betriebsstunden der Anlage aus. Ungünstig bezüglich Wirtschaftlichkeit ist jedoch, dass die gesamte produzierte Elektrizität an das Elektrizitätswerk zurückgeliefert werden muss, weil der Anlagebetreiber (Hausbesitzer, Trägerschaft) juristisch eine andere Partei ist als die Elektrizitätsbezüger (Mieter, Stockwerkeigentümer); dies gilt natürlich nicht, wenn die Rücklieferatarife höher sind als die Bezugstarife.

Wärmeverbund

Mehrere nahe beieinanderliegende Gebäude können durch Wärmeverteilungen zu einem Wärmeverbund zusammengefasst werden (Bild 22 zeigt ein Beispiel). Je grösser der Wärmeverbund ist, desto wirtschaftlicher wird die Wärmekraftkopplungsanlage und desto teurer wird aber auch das Wärmeverteilsystem. Die optimale Grösse ist von sehr vielen Randbedingungen abhängig und muss objektspezifisch ermittelt werden.

Industriebereich

In der Industrie bestehen günstige Voraussetzungen für den Einsatz von Wärmekraftkopplungsanlagen, wenn gleichzeitig ein grosser Bedarf für Prozesswärme und Elektrizität besteht. Aufgrund hoher Systemtemperaturen besteht in der Industrie das grösste Einsatzpotential für Gasturbinen zur Erzeugung von Prozesswärme (beispielsweise in den Branchen Papier und Chemie). Durch die Luftreinhalteverordnung (LRV) und vermehrt noch durch die kantonalen Massnahmenpläne sind Sanierungen von bestehenden Dampferzeugungsanlagen zu erwarten. In diesem Zusammenhang ist es empfehlenswert, jeweils den Einsatz einer Gasturbine oder einer Kombianlage (Gas- und Dampfturbine kombiniert) zu prüfen.

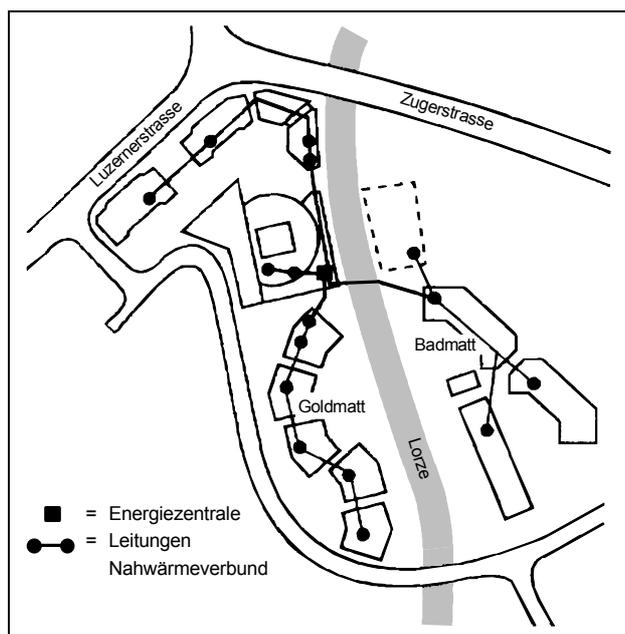


Bild 22: Beispiel eines Wärmeverbunds in Cham

2.2 Energiekonzept

Wärmekraftkopplung als Element eines Energiekonzepts

Wärmekraftkopplung ist eine Technik, bei der die heute noch vorwiegend zu Heizzwecken verbrannten Energieträger (Öl, Gas) unter bestmöglicher Nutzung der Exergie (Wertigkeit) in Wärme und Elektrizität umgewandelt werden. Dabei wird weder der Wärmebedarf noch der Elektrizitätsbedarf des betreffenden Objektes reduziert. Deshalb sollten immer die Punkte

gemäss Kasten 23 geprüft und gegebenenfalls berücksichtigt werden. Bild 24 zeigt, wie komplex die Einbindung einer Wärmekraftkopplung in einem Energiekonzept ist.

Wärmegeführte Wärmekraftkopplungsanlagen

Die Mehrzahl der in der Schweiz realisierten Anlagen, insbesondere im elektrischen Leistungsbereich bis 1000 kW_{el}, sind wärmegeführt (Bild 25). Die Anlagen werden in erster Priorität dann betrieben, wenn ein Wärmebedarf der zu versorgenden Objekte besteht. Der Betrieb kann, je nach objektspezifischen Gegebenheiten, wie folgt eingeschränkt werden:

- Sperrung der Wärmekraftkopplungsanlage in Zeiten mit tiefem Elektrizitätstarif für Bezug und/oder Rücklieferung (z. B. Sommerhalbjahr, Niedertarifzeit), wenn die Betriebskosten (Energie und Wartung) den Erlös für die produzierte Elektrizität übersteigen
- Teillastbetrieb der Wärmekraftkopplungsanlage, wenn der Wärmebedarf der zu versorgenden Objekte gering ist
- Teillastbetrieb der Wärmekraftkopplungsanlage, wenn der Wärmebedarf der zu versorgenden Objekte zwar hoch, der Elektrizitätsbedarf jedoch tief ist und aus tariflichen Gründen auf eine Rücklieferung der überschüssig produzierten Elektrizität verzichtet wird

Mit einem genügend grossen Speicher kann ein unterschiedliches Profil von Elektrizitäts- und Wärmebedarf ausgeglichen werden. Die in wärmegeführten Wärmekraftkopplungsanlagen produzierte Elektrizität wird in der Regel im versorgten Objekt selbst verwendet und der Überschuss ins Netz des Elektrizitätswerkes zurückgeliefert. Eine direkte Versorgung von Dritten bietet Probleme:

- Die Elektrizitätswerke verbieten oft den Verkauf von Elektrizität an Dritte (siehe Werkreglement des betreffenden Elektrizitätswerkes)
- Der Betreiber der Wärmekraftkopplungsanlage muss die Infrastruktur für die Messung der bezogenen Elektrizität (Privatzähler) erstellen, betreiben und den Bezügem Rechnung stellen

Reduktion des Energiebedarfs und WKK-Einsatz

In vielen Fällen lassen sich Energieeinsparungen erzielen, welche energetisch sinnvoller und/oder wirtschaftlicher sind als der Einsatz einer Wärmekraftkopplungsanlage:

- Ist die Gebäudehülle (Aussenwände, Dach, Boden, Fenster) gut wärmegeklämt (zum Beispiel Zielwerte gemäss SIA-Norm 380/1 «Energie im Hochbau»)? Insbesondere bei Neubauten lässt sich mit relativ geringem Mehraufwand eine wärmetechnisch bessere Gebäudehülle realisieren. Eine optimale Gebäudehülle hält während der gesamten Lebensdauer des Objektes den Wärmebedarf und somit die Wärmekosten tief!
- Ist das (bestehende oder neu zu erstellende) System zur Wärmeverteilung optimal isoliert? Kann die Wärmeabgabe durch entsprechende Regelgeräte («intelligente» Heizungsregler, Einzelraumregelungen, Thermostatventile usw.) den effektiven Komfortansprüchen angepasst werden?
- Sind sparsame und optimierte elektrische Anlagen vorhanden oder vorgesehen (Bedarfsgerechte Lüftungs- und Beleuchtungsanlagen, Pumpen, Kälteanlagen usw.)?



Die genannten Massnahmen sollen jedoch nicht anstelle einer Wärmekraftkopplungsanlage, sondern in erster Priorität vor der Realisierung einer Wärmekraftkopplungsanlage untersucht und realisiert werden!

Kasten 23

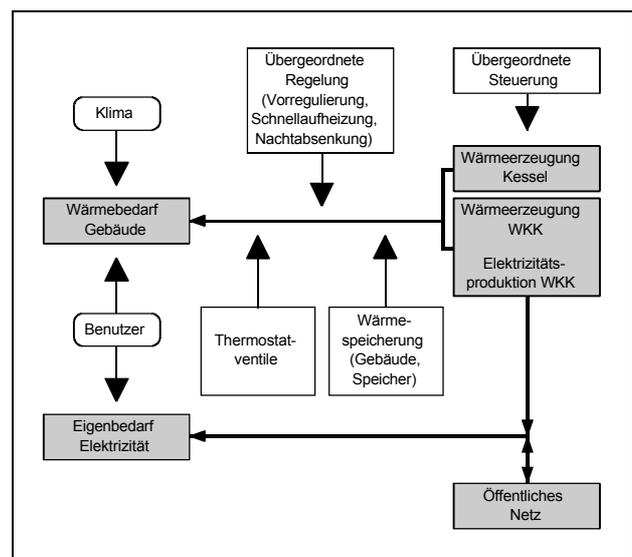


Bild 24: Wärmekraftkopplung als Element eines Energiekonzepts

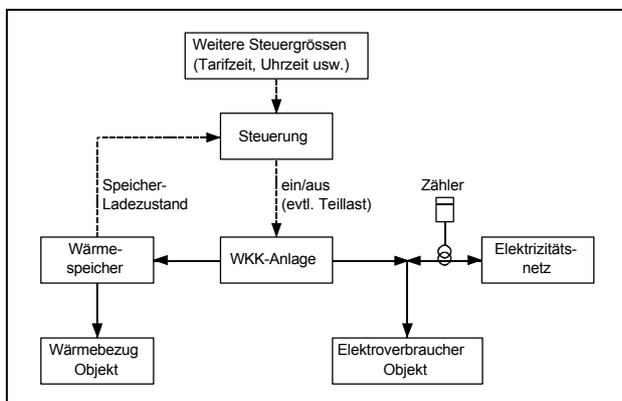


Bild 25: Wärmegeführte Wärmekraftkopplungsanlage

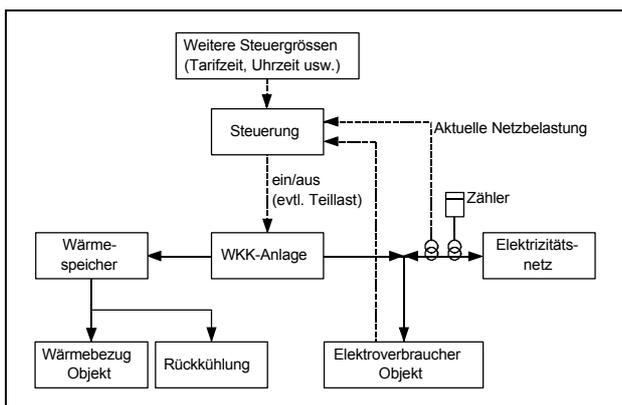


Bild 26: Stromgeführte Wärmekraftkopplungsanlage

Probleme bei stromgeführten Wärmekraftkopplungsanlagen

- Besteht während der Betriebszeit der Anlage kein Wärmebedarf und ist der Wärmespeicher geladen, so muss die Wärme an die Umgebung abgegeben werden können. Dies mag aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll sein, entspricht jedoch nicht den Grundsätzen einer rationellen Energienutzung und ist deshalb oft verboten (z. B. in der Stadt Zürich).
- Elektrizitätswerke sind nicht verpflichtet, Elektrizität aus fossil betriebenen Wärmekraftkopplungsanlagen ohne Wärmenutzung zu übernehmen.
- Wird auf eine Rücklieferung von Elektrizität verzichtet, muss die Leistung der Wärmekraftkopplungsanlage dem effektiven Verbrauch angepasst werden. Dies kann dazu führen, dass die Anlage im Teillastbetrieb (z. B. unter 70%) mit wesentlich schlechterem Wirkungsgrad betrieben wird.
- Das elektrische Netz muss plötzlich auftretende elektrische Laständerungen trotzdem aufnehmen.

Kasten 27

Stromgeführte Wärmekraftkopplungsanlagen

Stromgeführte Anlagen werden aufgrund des Elektrizitätsbedarfs des zu versorgenden Objektes betrieben (Bild 26). Dabei kann die Anlage bei einer bestimmten Schwelle des Elektrizitätsbedarfs ein- und ausgeschaltet werden, oder die Leistung der Anlage wird so geregelt, dass der Elektrizitätsbedarf gedeckt werden kann und nichts ins Netz des Elektrizitätswerkes eingespielen werden muss. Stromgeführte Wärmekraftkopplungsanlagen wurden bisher in der Schweiz praktisch nicht realisiert, weil damit viele Probleme verbunden sind (Kasten 27).

Bei stromgeführten Anlagen muss unbedingt darauf geachtet werden, dass durch entsprechende Dimensionierung und Bewirtschaftung des Wärmespeichers sämtliche Wärme genutzt werden kann. Ist dies nicht möglich, muss abgeklärt werden, ob eine Elektrizitätsproduktion ohne Wärmenutzung – von Wärmekraftkopplung kann dann nicht mehr gesprochen werden! – aufgrund der geltenden Energiegesetze überhaupt erlaubt ist. Die Betriebszeiten der Anlage ohne Wärmenutzung sind auf das absolut notwendige Minimum zu begrenzen.

Wärmekraftkopplungsanlage als Notstromanlage

Wärme- und stromgeführte Wärmekraftkopplungsanlagen können so ausgerüstet werden, dass bei Netzausfall der Bedarf der notstromberechtigten Elektrizitätsverbraucher gedeckt werden kann. Dies ist deshalb interessant, weil dadurch die Investitionen für eine konventionelle Notstromanlage entfallen und damit als Investitionsbeitrag für die Wärmekraftkopplungsanlage zur Verfügung stehen. Beim Einsatz einer Wärmekraftkopplungsanlage als Notstromanlage müssen die in Kasten 28 aufgeführten Punkte beachtet werden (welche übrigens auch für konventionelle Notstromanlagen gelten!).

2.3 Brennstoffe

Erdgas

Erdgas eignet sich für den Einsatz in allen Wärmekraftkopplungsanlagen. Nur bei Zündstrahlmotoren ist wenigstens ein kleiner Anteil an Heizöl EL notwendig. Folgende Punkte sind zu beachten:

- Bei Objekten mit bestehendem Gasanschluss muss abgeklärt werden, ob die Kapazität und der Gasdruck des Anschlusses genügt, um sowohl die bestehenden Verbraucher als auch die Wärmekraftkopplungsanlage mit Erdgas zu versorgen.
- Gasturbinen benötigen einen erhöhten Gasdruck (10...15 bar), so dass zusammen mit der hohen Anschlussleistung ein Mitteldruckanschluss notwendig ist (1 oder 5 bar).
- Die Anpassung des Netz-Gasdruckes an den erforderlichen Anlagedruck erfolgt durch Druckerhöhungs- bzw. Druckreduzierstationen (Bild 29).
- Die meisten Gaswerke haben unterschiedliche Tarife für abschaltbaren und nicht abschaltbaren Gasbezug. Für Anlagen mit Gasmotor-BHKW besteht oft ein separater Tarif oder es kann ein Spezialtarif vereinbart werden. Anlagen mit Gasturbinen sollen für Zweistoffbetrieb konzipiert werden.
- Wird die Spitzenkesselanlage auch mit Erdgas befeuert, lohnt sich, je nach Gastarif, der Einsatz eines Zweistoffbrenners Öl/Gas (ausser bei Kleinanlagen bis etwa 200 kW Wärmeleistungsbedarf).
- Für die Ausschreibung der Wärmekraftkopplungsanlage ist beim Gaswerk die Methanzahl anzufragen und abzuklären, ob zu Spitzenzeiten Flüssiggas (Propan, Butan) beigemischt wird.

Klär gas

Klär gas eignet sich sehr gut für den Antrieb von Gasmotor-BHKW's mit Magermotor (Bild 30). Klär gas gilt als erneuerbare Energie und darum ist der Emissionsgrenzwert für Stickoxide ($400 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$) höher als bei erdgasbetriebenen BHKW's. Dieser Grenzwert lässt sich mit einem Magermotor erreichen. Tiefere Stickoxidemissionen sind mit λ -1-Motoren mit Dreiwegkatalysatoren möglich. Dann müssen allerdings detaillierte Abklärungen bezüglich Gehalt von Schwefel, Fluor und weiteren Fremdstoffen im Klär gas gemacht werden, weil diese Stoffe die Wirksamkeit des Abgaskatalysators beeinträchtigen.

Deponiegas

Die motorische Verbrennung von Deponiegas kann infolge der im Gas vorhandenen Fremdstoffe nur in einem Gasmotor-BHKW mit Magermotor erfolgen. Der Emissionsgrenzwert für Stickoxide beträgt gemäss LRV $400 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$.

Wärmekraftkopplungsanlage als Notstromanlage

- Die Verfügbarkeit des Brennstoffs der Wärmekraftkopplungsanlage muss den Anforderungen der Notstrombereitschaft entsprechen.
- Die Verfügbarkeit der Wärmekraftkopplungsanlage muss den Anforderungen der Notstrombereitschaft entsprechen. Die Verfügbarkeit kann dadurch erhöht werden, dass eine Wärmekraftkopplungsanlage mit mehreren Aggregaten realisiert wird.
- Die Unterhaltsarbeiten der Anlage müssen zu Zeiten gemacht werden, in welchen eine reduzierte oder gar keine Notstrombereitschaft notwendig ist.
- Für den Notstrombetrieb ist eine vom Heizsystem unabhängige Notkühlung zwingend nötig.
- Die Wärmekraftkopplungsanlage muss genügend schnell vom Netz getrennt werden können.

Kasten 28

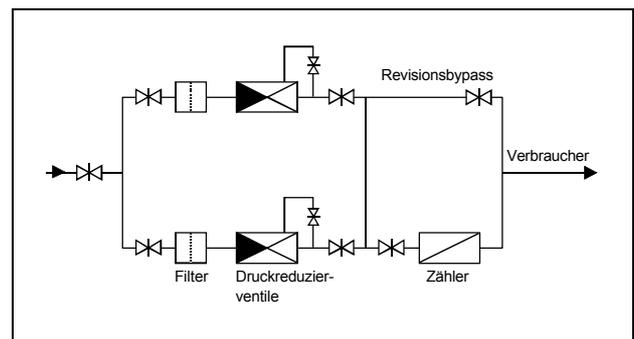


Bild 29: Gasdruckreduzier- und Messstation (DRM-Station)

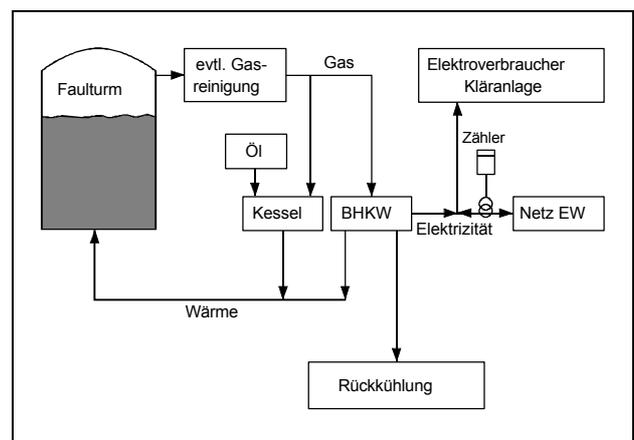


Bild 30: BHKW mit Klär gas

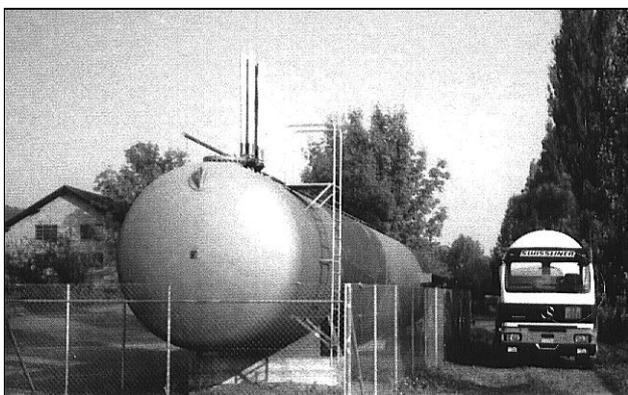


Bild 31: Beispiel einer oberirdischen Propangasversorgung (Foto: Basler + Hofmann AG)

Flüssiggas

- Bei Gasmotoren ist aufgrund der niedrigen Oktanzahl von Propan und Butan mit einer Reduktion der Motorleistung zu rechnen.
- Flüssiggas kann in oberirdischen oder erdüberdeckten Tanks gelagert werden. Bei Anlagen mit einem maximalen Füllgewicht über 20 Tonnen ist ein Sicherheitsnachweis gemäss Störfallverordnung nötig.
- Flüssiggas eignet sich besonders für Wärmekraftkopplungsanlagen, die für Notstrombetrieb konzipiert sind.
- Flüssiggas kann bei erdgasbetriebenen Motoren als Brennstoff eingesetzt werden. Dem Vorteil eines tieferen Gstarifs (abschaltbar) sind die Mehrkosten für die Flüssiggas-Infrastruktur gegenüberzustellen. Zusatzeinrichtungen und Betriebseinschränkungen sind fabrikat-spezifisch und müssen beim Gasmotor-Lieferanten angefragt werden.

Kasten 32

Flüssiggas

Wenn ein Objekt, in welchem eine Gasmotor-BHKW-Anlage erstellt werden soll, nicht mit Erdgas versorgt werden kann, ist die Realisierung einer Flüssiggasversorgung (Propan, Butan) zu prüfen. Flüssiggas kann in oberirdischen (Bild 31) oder in erdverlegten Vorrattanks gelagert werden. Oberirdische Tanks können von den Flüssiggaslieferanten gemietet, erdverlegte müssen gekauft werden. Die Anlieferung des Flüssiggases erfolgt normalerweise per Lastwagen; falls das zu versorgende Objekt in der Nähe eines Industrie-Anschlussgeleises oder eines Güterbahnhofs liegt, ist die Anlieferung per Bahn günstiger. Was beim Einsatz von Flüssiggas in Gasmotor-BHKW's zu beachten ist, ist in Kasten 32 zusammengestellt.

Heizöl EL

Heizöl EL kann in Dieselmotor- und in Gasturbinen-BHKW's eingesetzt werden.

- + Die Probleme des Dieselmotor-BHKW's sind in Abschnitt 1.4 ausführlich dargestellt

Holz

Holz ist ein erneuerbarer Energieträger, welcher vielerorts in grösseren Mengen vorhanden ist. Die Wärmekraftkopplung mit Holz als Brennstoff kann auf zwei Arten erfolgen:

- Das Holz wird in Dampfkesseln verbrannt, und der Dampf wird danach zum Antrieb einer Dampfturbine oder eines Dampfmotors genutzt. Der mechanische Wirkungsgrad ist stark abhängig von der Kondensationstemperatur des Dampfkreislaufes, also vom Temperaturniveau der Wärmenutzung. Er bewegt sich im Bereich von 12...16%.
- Das Holz wird in einem Holzvergaser zersetzt, danach gereinigt und gekühlt und in einem Gasmotor verbrannt. Die bisher durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die Reinigung des Holzgases wesentliche Probleme bietet, welche nur durch sehr aufwendige Gasreinigungssysteme gelöst werden können.

2.4 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Energienutzung

Auf Bundesebene ist im Energienutzungsbeschluss und der dazugehörigen Verordnung (Kasten 33) lediglich der Grundsatz «jede Energie ist möglichst sparsam und rationell zu verwenden» festgelegt. Detailliertere Anforderungen an Wärmekraftkopplungsanlagen sind nicht vorgesehen.

Ähnliche Grundsätze sind auch in Energiegesetzen auf Kantons- Gemeindeebene vorhanden. Konkrete, spezifische Bestimmungen über Wärmekraftkopplungsanlagen gibt es beispielsweise im Kanton Zürich: Bei Objekten mit einem Wärmeleistungsbearf ab 2 MW kann eine Wärmekraftkopplungsanlage vorgeschrieben werden. Viele Energiegesetze verbieten einen Betrieb von Wärmekraftkopplungsanlagen ohne gleichzeitige Wärmenutzung (beispielsweise die Stadt Zürich). Auskunft geben die kantonalen Energiefachstellen oder die Energieberatungsstellen der Gemeinden.

Elektrizität

Auf Bundesebene verpflichtet der Energienutzungsbeschluss die Elektrizitätswerke, den Netzparallelbetrieb von Wärmekraftkopplungsanlagen zu bewilligen, die produzierte Elektrizität ins Netz zu übernehmen und eine Vergütung zu bezahlen. Diese Vergütung richtet sich

- für nicht erneuerbare Energien «nach den Bezugspreisen für gleichwertige Energie aus dem regionalen Übertragungsnetz» und
- für erneuerbare Energien «nach den Kosten für die Beschaffung gleichwertiger Energie aus neuen inländischen Produktionsanlagen».

Was unter «erneuerbarer» und «nicht erneuerbarer» Energie zu verstehen ist, zeigt Kasten 34. Eine vom Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) eingesetzte Kommission hat Empfehlungen für die Höhe der Vergütung erarbeitet (vgl. Kasten 33). In einigen Kantonen (beispielsweise Basel-Land) legen die kantonalen Energiegesetze höhere Rückliefertarife fest.

Schadstoffemissionen

In der Schweiz gelten allgemein die Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung (Kasten 33, Tabelle 35). In Gebieten mit übermässigen Immissionen gelten verschärfte Grenzwerte (Massnahmegebiete gemäss LRV).

2.5 Trägerschaften

Gesetze, Verordnungen, Empfehlungen



Bundesbeschluss für eine sparsame und rationelle Energienutzung (Energienutzungsbeschluss, ENB) vom 14. Dezember 1990. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern)



Verordnung über eine sparsame und rationelle Energienutzung (Energienutzungsverordnung, ENV) vom 22. Januar 1992. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern)



Empfehlungen für die Berechnung und die Festlegung der Vergütung der von Selbstversorgern abgegebenen Elektrizität. Bern: EVED, Dezember 1992. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern)



Luftreinhalteverordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985, Stand 1. Januar 1992. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern)

Kasten 33

Erneuerbare oder nicht erneuerbare Energie?

Gemäss Energienutzungsbeschluss (Kasten 33) sind erneuerbare Energien:

- Wasserkraft (Einschränkung: bis 1 MW)
- Sonnenenergie
- Windenergie
- Biomasse
- Holz
- Klärgas
- Geothermie

Nicht erneuerbare Energie sind dagegen:

- fossile Brennstoffe
- Kehricht (Deponiegas, Verbrennung)

Kasten 34

Emissionsgrenzwerte (Bezugs-Sauerstoffgehalt)	Gas- motor ¹ [mg/m ³ _N] (5%)	Diesel- motor ² [mg/m ³ _N] (5%)	Gastur- bine ³ [mg/m ³ _N] (15%)
Emissionsgrenzwerte ge- mäss LRV:			
– CO	650	650	100
– Feststoffe	100	100	–
– Russzahl	–	–	2...4
– NO _x			
Fossile Brennstoffe	80	400	120
Klär-, Deponie-, Biogas	400	400	120
Spezielle Emissions- grenzwerte für NO _x :			
– ZH (ohne Stadt)	80	120	LRV
– Stadt Zürich	50	50	45
– BE ⁴	80	120	LRV
– SG ⁵			
Allgemein	80	120	LRV
Klär- und Biogas	150	–	LRV
– BL/BS ⁶			
Gas	70	–	40
Heizöl	--	110	50

¹ LRV: ab Brennstoffverbrauch 10 kg/h (40 kW_{el})
² LRV: ab Brennstoffverbrauch 50 kg/h (200 kW_{el})
³ LRV: bis 60 MW Feuerungswärmeleistung
⁴ Region Bern, Biel, Thun, Langenthal
⁵ Region St. Gallen, Rorschach, Linthgebiet, Wil
⁶ Stadt Basel sowie unteres Baselbiet

Tabelle 35: Emissionsgrenzwerte für Wärmekraftkopplungsanlagen

In vielen Fällen baut und betreibt der Objektinhaber die Wärmekraftkopplungsanlage. Es gibt jedoch Gründe, welche diesen dazu bewegen können, die Wärmekraftkopplungsanlagen nicht selbst zu bauen und/oder zu betreiben:

- Der Objektinhaber kann oder will nicht einen grösseren Betrag in eine Wärmekraftkopplungsanlage investieren, obwohl sie wirtschaftlich wäre
- Der Objektinhaber hat keine Erfahrung mit dem Bau und/oder Betrieb einer Wärmekraftkopplungsanlage
- Der Objektinhaber möchte kein Risiko finanzieller und/oder technischer Art eingehen

In solchen Fällen kann eine (fremde) Trägerschaft die Finanzierung, den Bau und/oder den Betrieb der Wärmekraftkopplungsanlage übernehmen. Die Beziehungen zwischen der Trägerschaft und dem Objektinhaber werden vertraglich geregelt.

In einigen Regionen der Schweiz bieten Elektrizitätswerke, Anlagebauunternehmen, Ingenieurunternehmungen, Finanzierungsinstitute und Genossenschaften die Dienstleistung einer Trägerschaft an (Tabelle 36). Die Unternehmungen bieten, je nach Kundenwunsch, verschiedene Dienstleistungen an, wie Pikettdienst, Fernüberwachung, Störungsbehebung usw.

2.6 Energielieferverträge

Erdgas

Bei grösseren Anlagen wird oft eine spezielle vertragliche Vereinbarung bezüglich Gaslieferung für den Betrieb der Wärmekraftkopplungsanlage und gegebenenfalls der Spitzenheizkessel getroffen. Bei kleineren Anlagen gelten meist Werkreglemente und Tarife, so dass hier auf eine spezielle Vereinbarung verzichtet werden kann.

Elektrizität

Gemäss Energienutzungsbeschluss wird der Anschluss einer Wärmekraftkopplungsanlage an das Netz vertraglich geregelt. Den Inhalt des Anschlussvertrages legt das Elektrizitätswerk fest.

Wärme

Ein Wärmeliefervertrag kommt zur Anwendung, wenn der Betreiber der Wärmekraftkopplungsanlage die produzierte Wärme nicht selbst braucht, sondern an Dritte verkauft. Dies ist insbesondere der Fall, wenn eine Trägerschaft die Anlage baut und betreibt. Der Wärmeliefervertrag enthält Bestimmungen über die

Pflichten des Lieferanten und des Bezügers, technische Anschlussbedingungen und insbesondere die finanziellen Bestimmungen über den Wärmeverkauf. Der Wärmepreis besteht aus folgenden Hauptelementen (vgl. auch Kasten 37):

- Ein Anschlussbeitrag wird für die gesamte Vertragsdauer einmal bezahlt. Er kann beispielsweise aufgrund der vom Wärmebezüger durch Verzicht auf eine eigene Wärmeerzeugung eingesparten Investitionen ermittelt werden.
- Der Grundpreis wird dem Lieferanten jährlich bezahlt. Er kann in Abhängigkeit der abonnierten Wärmeleistung (Leistungspreis) festgelegt werden, ist jedoch unabhängig von der effektiv bezogenen Wärmeenergie.
- Der Arbeitspreis wird pro Einheit der effektiv bezogenen Wärmeenergie festgelegt (z. B. in Rp./kWh). Er wird als Formel in Funktion von Gaspreis, Ölpreis und Elektrizitätstarifen festgelegt, gegebenenfalls unter Einbezug von Wartungs-, Bedienungs-, Unterhalts- und Versicherungskosten oder auch von Kapital- und Verwaltungskosten.

Arbeitspreis und Grundpreis sollen so festgelegt werden, dass die Wärmekosten aus rund 70% Arbeitspreis und 30% Grundpreis bestehen:

- Der Grundpreis soll nicht zu hoch sein, weil er unabhängig vom Wärmebezug bezahlt werden muss, also kein Anreiz zum sparsamen Wärmeverbrauch darstellt.
- Der Grundpreis kann allerdings auch nicht zu tief sein, weil gewisse Aufwendungen des Lieferanten unabhängig vom Wärmebezug sind, also auch dann anfallen, wenn der Wärmebezug kleiner ist als erwartet oder im Laufe der Zeit infolge Sparmassnahmen sinkt.

Organisation	Region	Anlagen
Elektra Birseck Münchenstein (EBM)	Versorgungsgebiet EBM	11
Elektra Baselland (EBL)	Versorgungsgebiet EBL	4 in Planung
Bernische Kraftwerke (BKW)	Kanton BE	2
Centralschweizerische Kraftwerke (CKW)	Kanton LU ohne Stadt	3 in Planung
IWK AG, Zürich	Schweiz und Ausland	1 in Planung
Schmeik + Schindler AG, Münchenstein	Schweiz	–
Enerplan Invest AG, Luzern	Schweiz	5
Arbeitsgemeinschaft für dezentrale Energieversorgung (ADEV), Liestal und Bern	Schweiz	10

Tabelle 36: Trägerschaftsorganisationen (Adressen siehe Anhang)

Wärmeverkaufsbedingungen (Beispiel)		
Reiheneinfamilienhaus, Wärmeleistungsbedarf 10 kW		
Anschluss an Wärmeverbund:		
– Anschlussbeitrag (30 Jahre)	Fr.	10'000.–
– Grundkosten	Fr.	350.–
– Arbeitspreis = 1,4 ¹ x Gaspreis	Rp./kWh	5,2
Konventionelle Gaskesselanlage:		
– Investitionen (Kessel, Gas, Kamin; 15 Jahre)	Fr.	8'000.–
– Fixkosten (Grundpreis Gas, Kaminfeger)	Fr./a	350.–
– Gaskosten = 1,1 ² x 1/0,85 ³ x Gaspreis	Rp./kWh	4,8
Jahreskosten [Fr./a]	Wärmeverbund	Gaskessel
– Kapitalkosten	810.–	880.–
– Fixkosten	350.–	350.–
– Wärmekosten (15'000 kWh/a)	780.–	720.–
– Total Jahreskosten	1'940.–	1'950.–
¹ Vereinbarer Wärmepreisfaktor ² Umrechnungsfaktor Heizwert Gas H _h auf H _u ³ Jahresnutzungsgrad Gaskessel		

Kasten 37

3. Auslegung

Grundlagen für die Grobauslegung (Machbarkeitsstudie, Gesamtkonzept)

Neubauten:

- Wärmeversorgungskonzept
- Umbautes Volumen und/oder Energiebezugsfläche
- Zu erreichende Energiekennzahlen für Wärme und Elektrizität

Daraus kann der approximative Wärmeleistungsbedarf gemäss SIA 384/2 und der approximative Jahreswärmebedarf berechnet werden.

Bestehende Bauten:

- Analyse Wärmeversorgungssystem
- Ausbau- und/oder Sanierungsvorhaben
- Jahres-Endenergieverbrauch der letzten fünf Jahre (Grundlage: Öl-, Gas-, Elektrizitäts-Rechnungen)

Daraus kann der Jahreswärmebedarf und der approximative Wärmeleistungsbedarf gemäss SIA 384/2 berechnet werden.



Der grosse Vorteil bestehender Anlagen ist die Möglichkeit zur Durchführung von Messungen. Deshalb sind unverzüglich Messungen der wichtigsten Betriebsdaten zu veranlassen (Energiekennlinien und Heizkurven). Die Kosten für die Messungen können problemlos durch kleinere Komponenten und geringere Anschlussgebühren amortisiert werden (Wegfall unnötiger Sicherheitszuschläge).

Grundlagen für die Detailauslegung (Projekt, Ausführung)

Neubauten:

- Wärmeversorgungskonzept
- Detaillierte Wärmeleistungsbedarfsrechnung gemäss SIA 384/2
- Detaillierte Berechnung des Jahreswärmebedarfs durch eine zweite unabhängigen Methode (z. B. gemäss SIA 380/1)
- Detaillierte Ermittlung des Elektrizitätsbedarfs (Monatswerte oder Sommer- und Winterwerte für Hoch- und Niedertarif)

Bestehende Bauten:

- Detaillierte Analyse des Wärmeversorgungssystems
- Messtechnisch ermittelte Energiekennlinien und Heizkurven
- Tagesgang des Wärmebezuges (typische Tagesgänge bei normalen Nutzungen, detaillierte Messungen bei Objekten mit ungewöhnlichen Tagesgängen)
- Verifizierter Jahreswärmebedarf (Grundlage: Jahres-Endenergieverbrauch der letzten fünf Jahre)
- Elektrizitätsbedarf (Monatswerte oder Sommer- und Winterwerte für Hoch- und Niedertarif; in komplexeren Fällen: Messwerte)

3.1 Grundlagen

Die Dimensionierung der Wärmekraftkopplungsanlage hat einen entscheidenden Einfluss auf das Betriebsverhalten, auf die jährliche Laufzeit sowie auf die Anwendungen für die Wartung. All diese Faktoren wiederum beeinflussen die Wirtschaftlichkeit in beträchtlichem Ausmass. Die Auslegung besteht aus den folgenden Elementen:

- Dimensionierung: Bestimmen der Leistungen
 - Wirtschaftlichkeitsrechnung: Ermittlung der Wärme- und/oder Elektrizitätsgestehungskosten
- Die Auslegung erfolgt mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad in den verschiedenen Realisierungsphasen:
- Vorabklärungen: Es wird keine rechnerische Auslegung, sondern eine Einschätzung der Randbedingungen durchgeführt
 - Machbarkeitsstudie, Gesamtkonzept: Grobauslegung durch Grobdimensionierung mit Faustformeln und Ermittlung der Elektrizitätsgestehungskosten (keine Durchführung einer detaillierten Jahreskostenrechnung)
 - Projekt, Ausführung: Detailauslegung, insbesondere durch detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnung und Ermittlung der Wärme- und Elektrizitätsgestehungskosten

Basis für die Auslegung sind genaue Grundlagen des mit Wärme und Elektrizität zu versorgenden Objektes. Diese müssen umfassend ermittelt und kritisch beurteilt werden. Je nach Planungsphase werden diese Grundlagen in verschiedenem Detaillierungsgrad benötigt (Kasten 38). Zusätzlich haben folgende Faktoren einen entscheidenden Einfluss auf die Auslegung:

- Tarifsituation des betreffenden Elektrizitätswerkes (Bezugstarife für Arbeit und Leistung, Rücklieferstarife für ins Netz eingespeiste Elektrizität)
- Notstrombedarf, sofern die Wärmekraftkopplungsanlage auch zur Notstromversorgung verwendet wird
- Infrastruktur (Anschlussmöglichkeiten für Gas und Elektrizität sowie vorhandene Platzverhältnisse)



Wesentlich bei der Auslegung sind genaue und fundierte Grundlagen – die Berechnungsgenauigkeit spielt eher eine untergeordnete Rolle!

3.2 Grobauslegung

Für das Erarbeiten von Machbarkeitsstudien, Konzepten, Vorstudien und Vorprojekten genügt eine Grobauslegung:

- Die Grobdimensionierung erfolgt durch Anwendung der Faustformeln in Kasten 39
- Die Wirtschaftlichkeitsabschätzung erfolgt mit Hilfe der spezifischen Investitionen gemäss Bild 41 und des Nomogramms «Elektrizitätsgestehungskosten» in Bild 42.

Grobdimensionierung

Die Grobdimensionierung basiert auf Erfahrungswerten, welche bei vielen ausgeführten Anlagen, bei welchen der überwiegende Anteil des Wärmebedarfs aussentemperaturabhängig ist, eine optimale Wirtschaftlichkeit ergeben haben.

Die Grobdimensionierung berücksichtigt die folgenden Punkte nicht:

- Jahres- und tageszeitlicher Verlauf des Wärmebedarfs
- Sperrung der Wärmekraftkopplungsanlage, beispielsweise aufgrund von Tarifzeiten

Die Angabe einer Faustformel für Nichtwohnbauten ist schwieriger. Bei folgenden Randbedingungen sollte die Grobdimensionierung gemäss Kasten 39 eher an der unteren Grenze des Leistungsbereichs erfolgen:

- Geringer Anteil nicht witterungsabhängiger Verbraucher
- Hoher Anteil Wärmegewinn (gute passive Solarenergienutzung, hohe interne Lasten)
- Längere Zeiträume mit reduziertem Wärmebedarf (Schulen)

In den folgenden Fällen kann die Grobdimensionierung eher an der oberen Grenze des Leistungsbereichs erfolgen:

- Hoher Anteil nicht witterungsabhängiger Verbraucher
- Hoher Anteil des Wärmebedarfs für Lüftungsanlagen mit langen Betriebszeiten (aber: können diese reduziert werden, existiert eine WRG?)
- Hohe Raumlufttemperaturen (Spitäler, Heime)
- Hohe Elektrizitätstarife (Bezug, Rücklieferung)

Kasten 40 zeigt die Grobdimensionierung anhand des ersten Teils eines Fallbeispiels.

Faustformeln zur Grobdimensionierung

Benötigt werden dazu (allenfalls Schätzwerte, die diesen Werten entsprechen, vgl. Kasten 38):

- Wärmeleistungsbedarf gemäss SIA 384/2 ohne jegliche Zuschläge (Warmwasser, Verteilverluste usw.) oder gemessener Wärmeleistungsbedarf inkl. Sicherheitszuschlag
- Jahreswärmebedarf durch eine unabhängige zweite Methode berechnet (z. B. SIA 380/1) gegebenenfalls mit Warmwasser oder gemessener Jahreswärmebedarf

Wohnbauten ohne Wassererwärmung:

- Leistung WKK = 0,35 mal Wärmeleistungsbedarf
- Leistung WKK = 0,70 mal Jahreswärmebedarf geteilt durch 4250 Betriebsstunden

Wohnbauten mit Wassererwärmung:

- Leistung WKK = 0,40 mal Wärmeleistungsbedarf
- Leistung WKK = 0,70 mal Jahreswärmebedarf geteilt durch 4750 Betriebsstunden

Nichtwohnbauten:

- Leistung WKK = 0,25...0,40 mal Wärmeleistungsbedarf
- Leistung WKK = 0,70 mal Jahreswärmebedarf geteilt durch 4500 Betriebsstunden

Die beiden Formeln müssen jeweils Werte im gleichen Bereich ergeben. Elektrische Leistung WKK = 0,55 mal thermische Leistung der ausgewählten Wärmekraftkopplungsanlage.

Kasten 39

Fallbeispiel Teil 1 – Grobdimensionierung

Faustformel «Wohnbauten ohne Wassererwärmung»:

- Wärmeleistungsbedarf aus gemessener Energiekennlinie (Auslegefall inkl. Sicherheit) 1375 kW
- Gemessener Jahresverbrauch Heizöl 325'000 l/a
- Geschätzter Jahresnutzungsgrad 0,85

Leistung WKK aus Wärmeleistungsbedarf:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{Objekt}} &= 1375 \text{ kW} \\ \dot{Q}_{\text{WKK}} &= 0,35 \cdot \dot{Q}_{\text{Objekt}} = 480 \text{ kW} \quad (\text{Kasten 39}) \end{aligned}$$

Leistung WKK aus Jahreswärmebedarf:

$$\begin{aligned} Q_{\text{Nutzwärme}} &= 325'000 \frac{\text{l}}{\text{a}} \cdot 0,84 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \cdot 0,85 \cdot 11,86 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \\ Q_{\text{Nutzwärme}} &= 2'750'000 \text{ kWh} \\ \dot{Q}_{\text{WKK}} &= 0,70 \frac{Q_{\text{Nutzwärme}}}{4250 \text{ h}} = 450 \text{ kW} \quad (\text{Kasten 39}) \end{aligned}$$

Leistung ausgewählte Wärmekraftkopplungsanlage:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{WKK}} &= 450 \text{ kW} \\ P_{\text{el}} &= 0,55 \cdot 450 \text{ kW} = 250 \text{ kW} \end{aligned}$$

Kasten 40

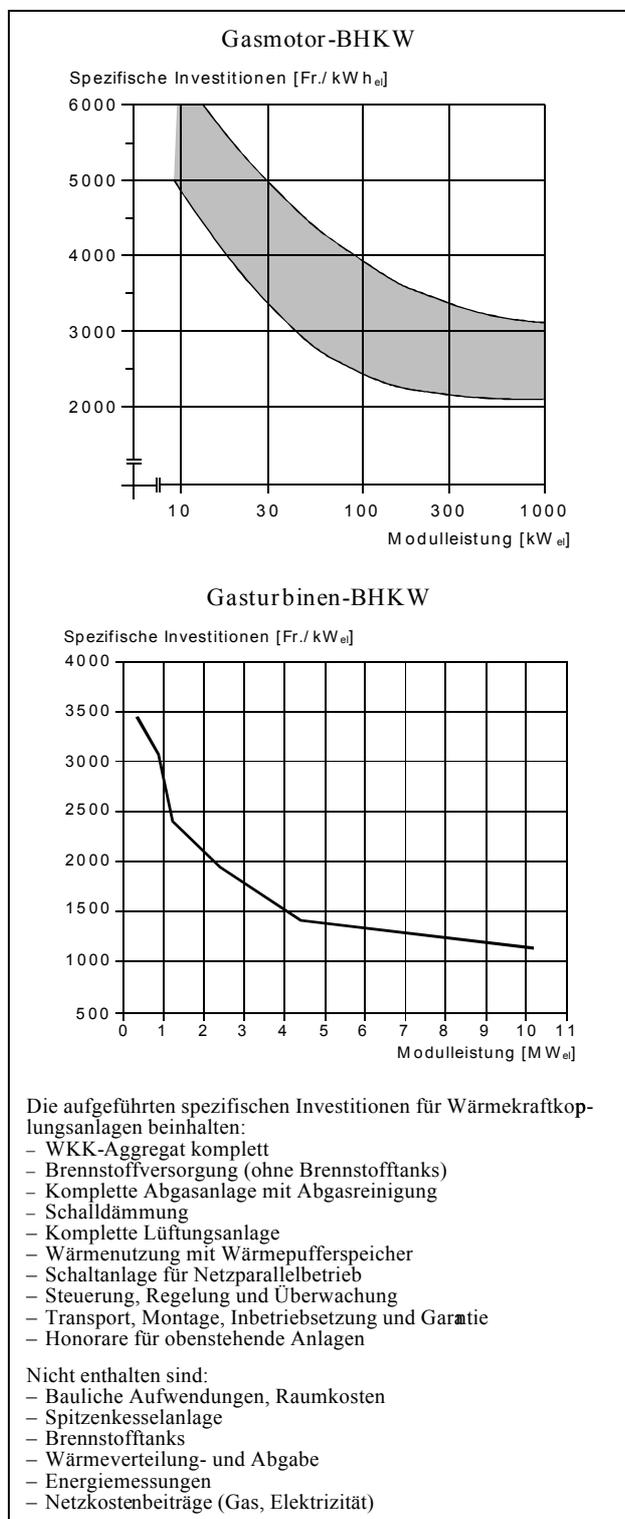


Bild 41: Spezifische Investitionen

Spezifische Investitionen

Die Investitionen für Gasmotor- und Gasturbinen-BHKW's sind hauptsächlich abhängig von der elektrischen Leistung der Anlage: Je grösser die Anlage, desto kleiner sind die spezifischen Investitionen (Investitionen pro installierter Leistung). Für Vorabklärungen und Machbarkeitsstudie genügt eine Ermittlung mit Hilfe von Bild 41 oder eine Richtpreisanfrage (Genauigkeit 20%).

Die in Bild 41 dargestellten Investitionen für Gasmotor-BHKW's beruhen auf Erfahrungswerten vieler ausgeführter Anlagen. Sie basieren auf dem Preisstand 1993. Je nach objektspezifischen Randbedingungen und Marktsituation liegen die Investitionen in der angegebenen Bandbreite.

Für Investitionen von Gasturbinen-BHKW's sind relativ wenig Erfahrungswerte vorhanden. Die in Bild 41 angegebenen Investitionen sind daher als Richtwerte für grobe Abschätzungen zu betrachten. Für Machbarkeitsstudien sollte unbedingt ein Richtpreis beim Anlagelieferanten angefragt werden.

Wirtschaftlichkeitsabschätzung

Um die Elektrizitätsgestehungskosten zu ermitteln müssen nicht sämtliche Jahreskosten bekannt sein, sondern es genügen die für die Wärmekraftkopplungsanlage relevanten Angaben:

- Spezifische Investitionen (aus Bild 41)
- Annuität (aus Betrachtungszeitraum und Kalkulationszinssatz gemäss Tabelle 55)
- Jährliche Betriebsstunden (aus Grobdimensionierung gemäss Kasten 39)
- Brennstoffpreis unter Berücksichtigung der Teuerung (Mittelwertfaktor gemäss Tabelle 55)
- Wartungskosten (aus Bild 56) unter Berücksichtigung der Teuerung (Mittelwertfaktor gemäss Tabelle 55)

Die Bestimmung mit dem Nomogramm «Elektrizitätsgestehungskosten» in Bild 42 ist sehr einfach und schnell. Tabelle 43 zeigt dies anhand des Fallbeispiels. Es sind folgende Punkte zu beachten:

- Das Nomogramm berücksichtigt nur die «elektrische Seite» der Wärmekraftkopplungsanlage (Elektrizitätsproduktion und Mehrverbrauch Brennstoff infolge Elektrizitätsproduktion).

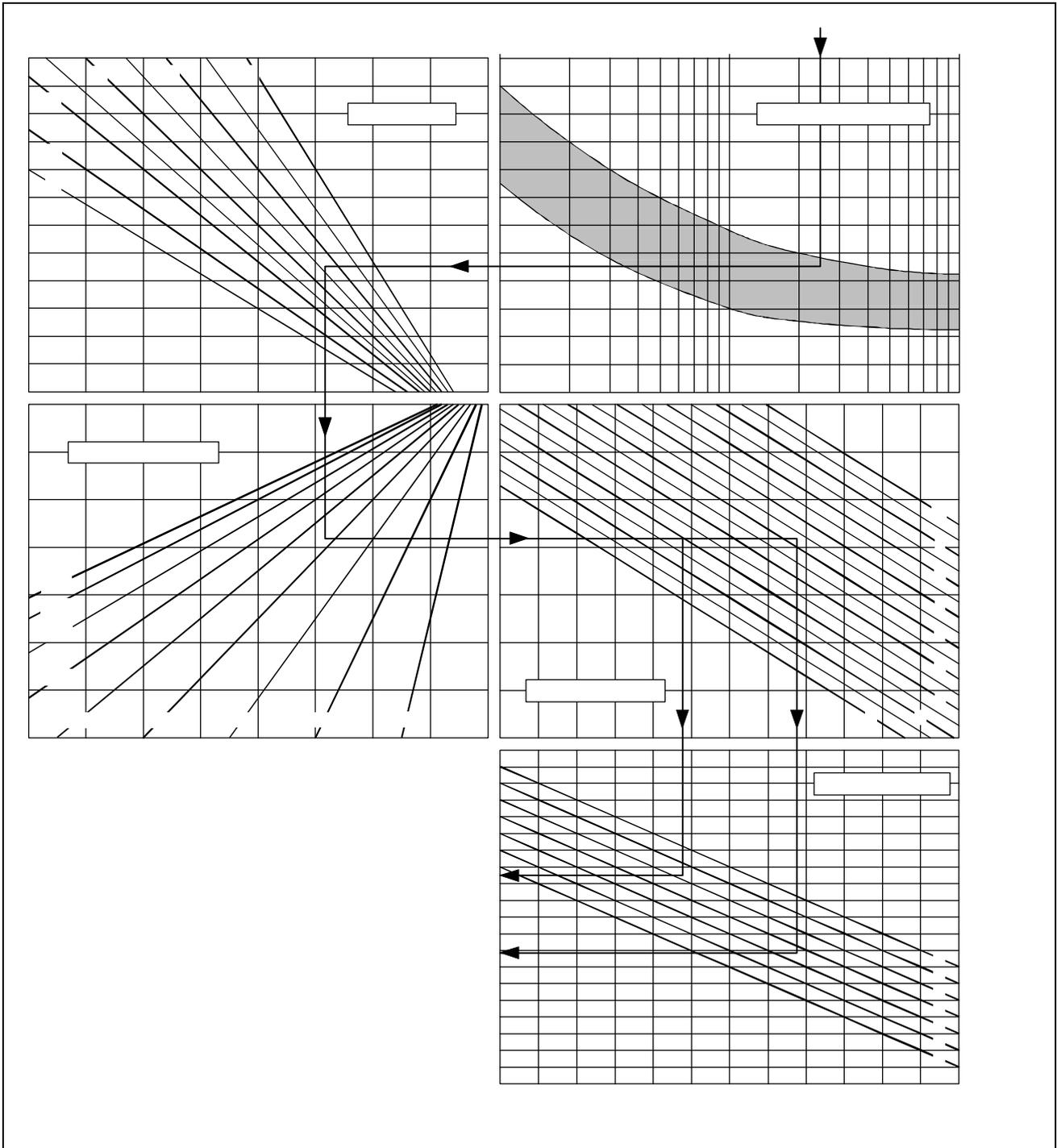


Bild 42: Nomogramm zur Bestimmung der Elektrizitätsgestehungskosten (eingezeichnetes Beispiel: vgl. Tabelle 43)

Fallbeispiel Teil 2	1. Jahr	Mittelwertfaktor	Mittel über 20 Jahre ³
Spezifische Investition aus Bild 41 [Fr./kWh _{el}] – BHKW 250 kW _{el}	3250	–	3250
Annuität aus Tabelle 55 – Betrachtung 20 Jahre – Kapitalzinssatz 6%	0,087	–	0,087
Betriebsstunden [h/a]	4250	–	4250
Erdgaspreis [Rp./kWh]	4,0	1,581 ¹	6,3
Spezifische Vollwartungskosten aus Bild 56 [Rp./kWh _{el}]	3,7	1,463 ²	5,4
Elektrizitätsgestehungskosten [Rp./kWh _{el}] aus Nomogramm Bild 42	15,5	–	20,2

¹ 20 Jahre, 5% Energiepreissteigerung (Tabelle 55)
² 20 Jahre, 4% Wartungskostensteigerung (Tabelle 55)
³ Laufende Preise

Tabelle 43: Fallbeispiel Teil 2 – Wirtschaftlichkeitsabschätzung mit Hilfe von Nomogramm Bild 42

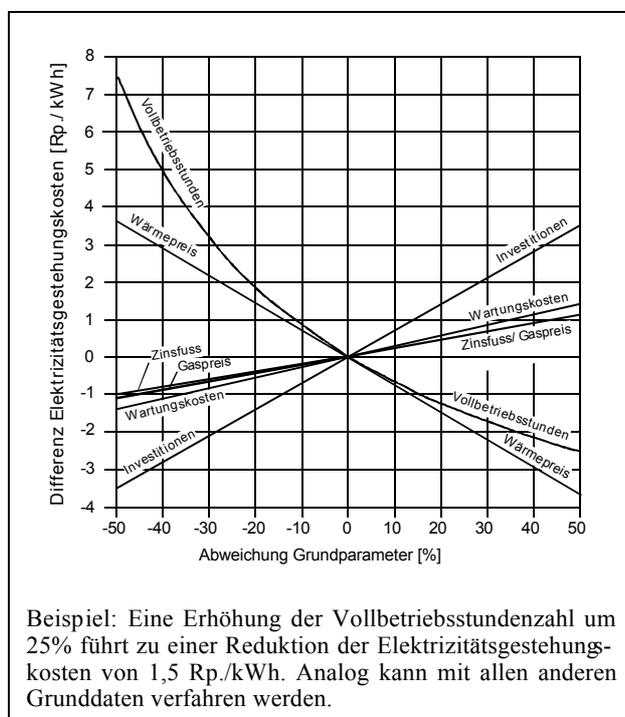


Bild 44: Sensitivitätsanalyse. Änderung der Elektrizitätsgestehungskosten in Funktion der Grundparameter.

- Das Nomogramm geht davon aus, dass die Heizkesselanlage mit und ohne Wärmekraftkopplungsanlage gleiche Investitionen und Wartungskosten aufweist. Bei den Investitionen sind darum nur die Mehrinvestitionen gegenüber einer konventionellen Kesselanlage zu berücksichtigen.
- Die Kosten für Energie und Wartung (heutige Preise) müssen für den Mittelwert über den Betrachtungszeitraum mit dem entsprechenden Mittelwertfaktor multipliziert werden.

Die Sensitivitätsanalyse erlaubt es, für eine einmal durchgeführte Wirtschaftlichkeitsberechnung Abweichungen der Elektrizitätsgestehungskosten bei sich ändernden Grundparametern zu ermitteln. Die bei der Grundberechnung verwendeten Basisdaten werden um $\pm 50\%$ variiert und die sich dadurch ergebenden Änderungen der Elektrizitätsgestehungskosten dargestellt. Falls sich mehrere Parameter gleichzeitig ändern, können die sich ergebenden Änderungen der Elektrizitätsgestehungskosten einfach addiert werden. Bild 44 zeigt die Änderung der Elektrizitätsgestehungskosten in Funktion der Grundparameter.

3.3 Detailauslegung

Für die Projektierung und Ausführungsplanung muss die Auslegung der Wärmekraftkopplungsanlage detailliert durchgeführt werden:

- Detaildimensionierung: Ermittlung der energietechnischen Daten (insbesondere Vollbetriebsstundenzahl während den unterschiedlichen Tarifzeiten und daraus detaillierte Verbrauchs- und Produktionsdaten)
- Wirtschaftlichkeitsrechnung: Berechnung der Jahreskosten aus den energietechnischen Daten und Ermittlung der Wärmegestehungskosten im ersten Betriebsjahr und im Mittel über den Betrachtungszeitraum

Für die Detailauslegung werden die folgenden Grundlagen benötigt:

- Wärmeleistungsbedarf (Berechnung gemäss SIA 384/2 bei Neubauten oder Messung der Energiekennlinie bei bestehenden Bauten)
- Jahreswärmebedarf unter Berücksichtigung der Wärmegewinne (Berechnung beispielsweise gemäss SIA 380/1 oder Ermittlung aus gemessenem Brennstoffverbrauch)
- Wärmebedarf für Wassererwärmung
- Tages- und jahreszeitlicher Verlauf des Nutzwärmebedarfs sowie des Elektrizitätsbedarfs

Die Auslegung wird wie folgt durchgeführt:

- Mit Hilfe der Grobdimensionierung wird die thermische Leistung der Wärmekraftkopplungsanlage grob ermittelt (Kasten 39)
- Die energietechnischen Daten werden mittels Computerprogramm oder mit Hilfe des Summenhäufigkeitsdiagramms «von Hand» berechnet und dienen als Basis für die Jahreskostenrechnung
- Je nach Resultat und Erfahrung werden gegebenenfalls weitere Berechnungen mit grösserer oder kleinerer Leistung durchgeführt

Ermittlung der energietechnischen Daten mit Computerprogramm

Die folgenden beiden Programme verwenden den Tagesgang für den Wärmebedarf des Objektes und erlauben somit eine genaue Berechnung der energietechnischen Daten:



Wärmeerzeugungsanlagen-Kalkulationsprogramm «W-CALC», bestehend aus den Modulen «WP-CALC» für Wärmepumpenanlagen und «WKK-CALC» für Wärmekraftkopplungsanlagen. Bern: Bundesamt für Energiewirtschaft und Bundesamt für Konjunkturfragen, 1994. (Bezugsquelle: Infoenergie, 5200 Windisch)

Dieses Programm wurde im Auftrag des Bundes entwickelt. Das Modul «WKK-CALC» berücksichtigt, neben dem Tagesgang des Wärmebezuges (Bild 45), insbesondere auch den Tagesgang des Elektrizitätsbedarfs des Objektes, was eine Unterteilung der Elektrizitätsproduktion in Eigenbedarf und Rücklieferung ermöglicht. Ferner ist die Berechnung der Wärmegeheimhaltungskosten (gemäss Methode «RAVEL zahlt sich aus») für das erste Betriebsjahr sowie im Mittel über den Betrachtungszeitraum integriert.



Computerprogramm «BHKW». (Bezugsquelle: Elektra Birseck Münchenstein, Weidenstrasse 27, 4142 Münchenstein)

Dieses Programm wurde von der Elektra Birseck entwickelt. Eine Unterscheidung von selbst genutzter und ins Netz zurückgelieferter Elektrizität ist nicht möglich. Die Wirtschaftlichkeit wird als Jahreskostenbilanz im ersten Betriebsjahr dargestellt.

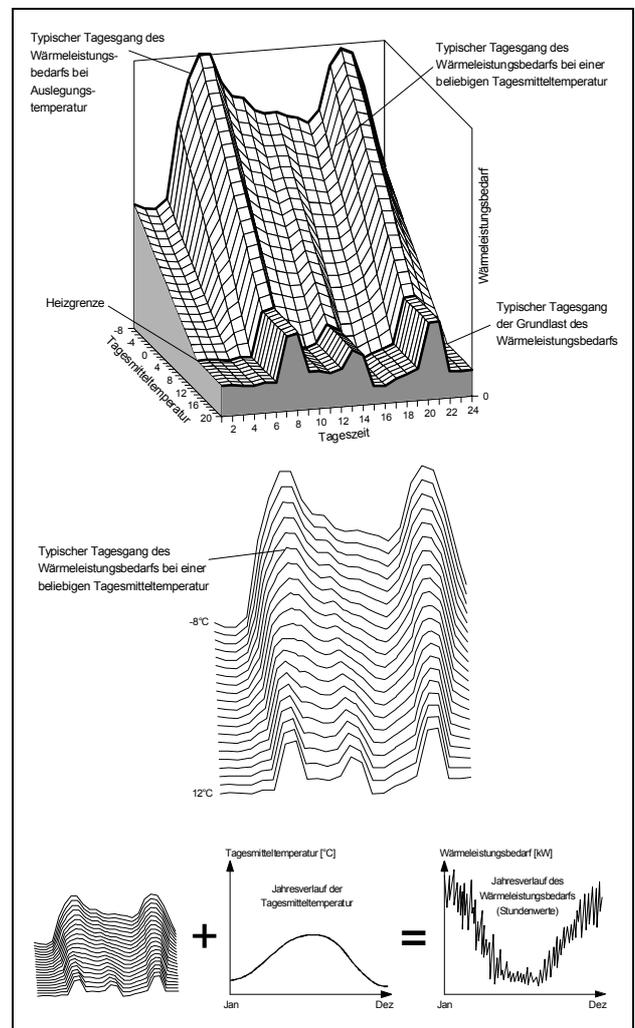


Bild 45: WKK-CALC verwendet einen für das zu untersuchende Objekt typischen Tagesgang des Wärmeleistungsbedarfs, dessen Verlauf über das Jahr konstant bleibt. Mit Hilfe der Energiekennlinie werden die für das Objekt typischen Tagesgänge für bestimmte Tagesmitteltemperaturen gebildet (oben und Mitte). Aufgrund des Aussentemperatur-Jahresverlaufs werden daraus Stundenwerte für den Wärmeleistungsbedarf berechnet (unten). Damit kann nun für jede einzelne Stunde des Jahres (für welche eine entsprechende Tarifzeit definiert werden kann) die Laufzeit der Wärmekraftkopplungsanlage und die Wärmeproduktion des Spitzenkessels berechnet werden.

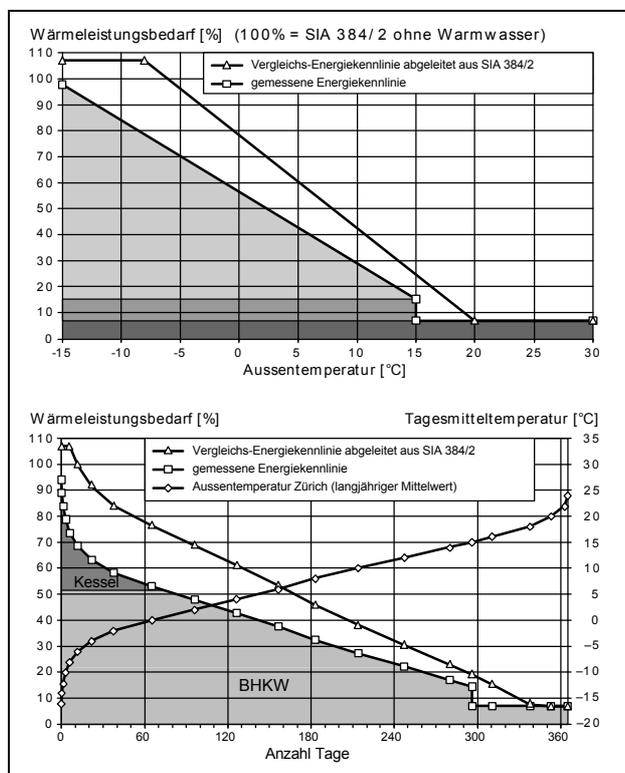


Bild 46: Die Energiekennlinie (oberes Diagramm) stellt den mittleren täglichen Wärmeleistungsbedarf in Funktion der Aussentemperatur dar. Die untere Kennlinie im oberen Diagramm wurde an einer ausgeführten Anlage gemessen. Es ergeben sich drei Bereiche:

- ein witterungsabhängiger Teil bis zur Heizgrenze (Transmissions- und Lüftungsverluste),
- ein relativ grosser nicht witterungsabhängiger Teil bis zur Heizgrenze (Verteilungsverluste, Zwangsheizung, dynamische Effekte durch die witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung) und
- ein nicht witterungsabhängiger Teil über das ganze Jahr (Wassererwärmung).

Die Vergleichs-Energiekennlinie darüber entspricht der Wärmeleistungsbedarfsrechnung gemäss SIA 384/2 um den Warmwasseranteil parallel nach oben verschoben (Heizgrenze und Wärmegewinne nicht berücksichtigt). Die Summenhäufigkeitskurve (unteres Diagramm) stellt dar, während wievieler Tage ein bestimmter Wärmeleistungsbedarf besteht. Dargestellt sind die aus den beiden Energiekennlinien berechneten Summenhäufigkeitskurven. Die Fläche unter der Kurve entspricht jeweils der Wärmemenge ($\text{kW} \cdot \text{h} = \text{kWh}$). Die gerasterte BHKW-Fläche unter der gemessenen Kurve hätte eine BHKW-Betriebsstundenzahl von 5100 h/a ergeben müssen; tatsächlich erreicht wurden 4200 h/a (siehe Text). Trotz relativ hoher Auslegung des BHKW's auf 51% des SIA-Wärmeleistungsbedarfs kann die erreichte Betriebsstundenzahl als gut bezeichnet werden.

Ermittlung der energietechnischen Daten mit Hilfe des Summenhäufigkeitsdiagrammes

Im Rahmen der Auslegung einer Wärmepumpenanlage wurde das Summenhäufigkeitsdiagramm und die damit verbundenen Probleme bereits ausführlich beschrieben.

✦ Heft 3 «Wärmepumpen» Kapitel 4

Das Summenhäufigkeitsdiagramm ist für die Auslegung einer Wärmekraftkopplungsanlage schlecht geeignet, weil nur die jährliche Betriebsstundenzahl ermittelt werden kann. Deren Aufteilung auf die verschiedenen Tarifstufen muss mit Hilfe weiterer Annahmen abgeschätzt werden, was einen grossen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung haben kann. Deshalb wird hier auf eine Beschreibung mit Fallbeispiel verzichtet. Stattdessen ist in Bild 46 die tatsächlich gemessene Energiekennlinie einer ausgeführten Anlage einer aus dem Wärmeleistungsbedarf gemäss SIA 384/2 hergeleiteten Vergleichs-Energiekennlinie gegenübergestellt. Dabei sind folgende Erkenntnisse wichtig:

- Der Wärmeleistungsbedarf gemäss SIA 384/2 ist nur zur Dimensionierung von Spitzenkessel und Wärmeabgabesystems im Auslegungspunkt geeignet
- Die Herleitung einer Energiekennlinie bzw. einer Summenhäufigkeitskurve allein aus der Wärmeleistungsbedarfsrechnung gemäss SIA 384/2 ist praktisch nicht möglich, weil keine plausible Regel zur Berücksichtigung des nicht witterungsabhängigen Teils des Wärmeleistungsbedarfs sowie der Wärmegewinne angegeben werden kann
- Die Berechnung der BHKW-Betriebsstundenzahl aus der Summenhäufigkeitskurve ist ungenau, weil viele Einflussgrössen nicht berücksichtigt werden (Sommer-Winter-Umschaltung, Freigabe Spitzenkessel, Verfügbarkeit, Klima usw.)



Die Widersprüchlichkeit der Lastverhältnisse in Theorie und Wirklichkeit zeigt WKK-CALC wie folgt:

- Für Neubauten müssen folgende Grössen bekannt sein:
 - Wärmeleistungsbedarf gemäss SIA 384/2 (zur Darstellung einer Vergleichs-Energiekennlinie)
 - Jahreswärmebedarf durch eine unabhängige zweite Methode berechnet (z. B. SIA 380/1)
 - Heizgrenze mit einem dazugehörigen nicht witterungsabhängigen Wärmeleistungsbedarf
 - Wärmebedarf für Wassererwärmung
 - Wärmebedarf für Prozesswärme

Das Programm berechnet die dem gesamten Jahreswärmebedarf entsprechende Energiekennlinie und stellt diese einer dem SIA-Wärmeleistungsbedarf entsprechenden Vergleichs-Energiekennlinie gegenüber. Die beiden Energiekennlinien müssen in einem plausiblen Verhältnis zueinander stehen. Ist dies nicht der Fall, muss durch kritische Überprüfung der Grundlagendaten die Diskrepanz eruiert werden.

· Für bestehende Bauten wird grundsätzlich eine messtechnische Bestimmung der Energiekennlinie empfohlen. Diese kann durch sukzessive Anpassung der beschriebenen Parameter ins Programm eingegeben werden. Die Vergleichs-Energiekennlinie wird hier nicht benötigt.

Energiebilanz

Die energietechnischen Daten werden aufgrund der Detaildimensionierung berechnet – «von Hand» oder mit Computer (Fallbeispiel Teil 3, Tabelle 47). Sie dienen insbesondere zur Bestimmung folgender Größen:

- Dimensionierung sämtlicher Anlagenteile
- Berechnung der Wartungskosten
- Berechnung der Energiekosten
- Berechnung der Erträge aus der Elektrizitätsproduktion

Das Energieflussdiagramm zeigt in sehr anschaulicher Weise die energietechnischen Daten grafisch auf (Fallbeispiel Teil 4, Bild 48).

3.4 Wirtschaftlichkeitsrechnung

Wärmeleistungskopplungsanlagen sind kapitalintensiv. Die Mehrinvestitionen gegenüber einer konventionellen Vergleichsanlage müssen durch die Produktion von hochwertiger Elektrizität amortisiert werden können. In der Wirtschaftlichkeitsrechnung wird dieser Sachverhalt quantifiziert. Dabei müssen heutige Investitionen sowie zukünftige jährliche Kosten und Erträge betrachtet werden. Für die Ermittlung zukünftiger Geldflüsse bieten sich zwei Hauptprobleme:

- Für zukünftige Kosten und Erträge muss die Teuerung berücksichtigt werden
- Ein Franken ist heute mehr Wert als in 5 Jahren (abgesehen von der Teuerung), da er zinsbringend angelegt werden könnte

Um zukünftige Geldflüsse mit heutigen Investitionen korrekt vergleichen zu können, muss eine dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt werden. Kasten 49 zeigt RAVEL-Literatur dazu.

Fallbeispiel Teil 3	Leistung	in %
Wärmeleistungsbedarf		
– SIA 384/2 bei $\vartheta_a = -8^\circ\text{C}$	1375 kW	100
– Messung bei $\vartheta_a = -13^\circ\text{C}$	1250 kW*	91
– Messung bei $\vartheta_a = 15^\circ\text{C}$	125 kW*	9
Jahreswärmebedarf Objekt	2750 MWh/a	100
– Heizung witterungsabhängig	2100 MWh/a	76
– Heizung nicht witterungsabhängig (Heizgrenze: 15°C)	650 MWh/a	24
– Prozesswärme	–	
– Wassererwärmung	–	
Jahreselektrizitätsbedarf	1000 MWh/a	
Wärmeleistung		
– BHKW	450 kW	33
– Spitzenkessel	1375 kW	100
Elektrische Leistung BHKW	250 kW	
Brennstoffleistung		
– Erdgas BHKW (H_u)	780 kW	
– Erdgas Spitzenkessel (H_u)	1530 kW	
– Heizöl EL Spitzenkessel (H_u)	1530 kW	
Wärmeproduktion	2750 MWh/a	100
– BHKW	2000 MWh/a	73
– Spitzenkessel Gasbetrieb	650 MWh/a	23
– Spitzenkessel Ölbetrieb	100 MWh/a	4
Elektrizitätsproduktion BHKW	1100 MWh/a	100
– Eigenbedarf	600 MWh/a	55
– Rücklieferung	500 MWh/a	45

* Messtechnisch ermittelte Energiekennlinie ohne Sicherheitszuschläge

Tabelle 47: Fallbeispiel Teil 3 – energietechnische Daten

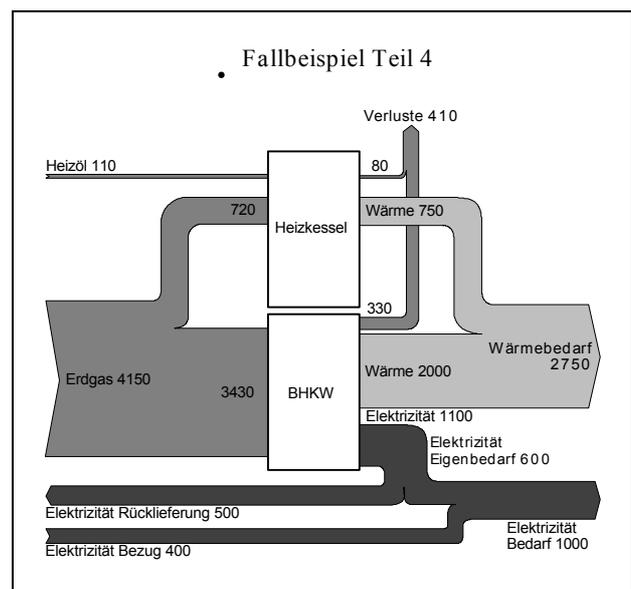


Bild 48: Fallbeispiel Teil 4 – Energieflussdiagramm (Einheit: MWh/a)

RAVEL-Literatur zur Wirtschaftlichkeit

 Leemann, Robert: Grundbegriffe der Energiewirtschaft (Glossar). Bern: Bundesamt für Konjunkturfragen, 1992. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, Best.-Nr. 724.397.12.51.1d)

 Müller, André und Felix Walter: RAVEL zahlt sich aus. Bern: Bundesamt für Konjunkturfragen, 1992. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, Best.-Nr. 724.397.42.01d)

Kasten 49

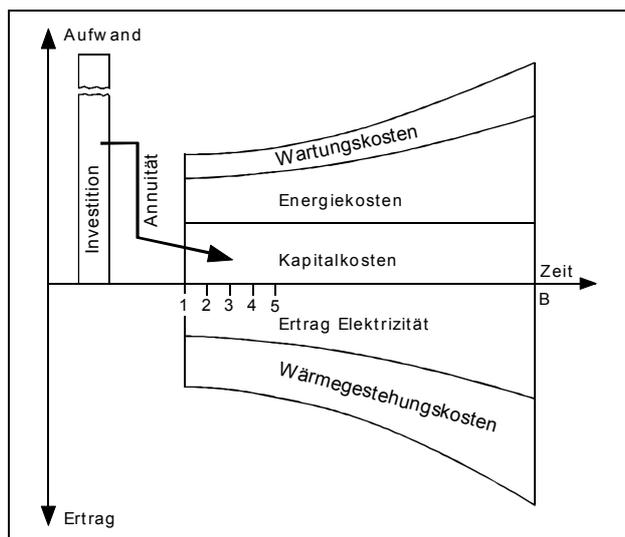


Bild 50: Aufwand und Ertrag

Mittelwertfaktor

Der Mittelwertfaktor gibt das Verhältnis an zwischen dem mittleren Aufwand (bzw. Ertrag) während des Betrachtungszeitraumes und dem Aufwand (bzw. Ertrag) im ersten Betriebsjahr. Er ist abhängig vom Betrachtungszeitraum, Kalkulationszinssatz und Steigerungsfaktor des betrachteten Aufwands (bzw. Ertrags).

+ Einige ausgewählte Mittelwertfaktoren enthält Tabelle 55, ausführliche Tabellen in «RAVEL zahlt sich aus» (vgl. Kasten 49)

Kasten 51

Berechnungsmethoden

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung von Wärmekraftkopplungsanlagen basiert auf jährlichen Kosten und Erträgen (Bild 50). Dabei werden in erster Linie nicht heutige Kosten und Erträge betrachtet, sondern über den gesamten Betrachtungszeitraum gültige Geldflüsse. Zu diesem Zweck müssen die für das erste Betriebsjahr ermittelten Werte für Energie- und Wartungskosten sowie für die Erträge aus der Elektrizitäts- und Wärmeproduktion mit einem Mittelwertfaktor multipliziert werden (Kasten 51).

Je nach Planungsphase eignet sich eine der folgenden Darstellungen, um die Wirtschaftlichkeit von Wärmekraftkopplungsanlagen beurteilen zu können:

- Wärmegestehungskosten: Sie bestehen aus dem Gesamtaufwand abzüglich dem Ertrag aus der Elektrizitätsproduktion. Die spezifischen Wärmegestehungskosten lassen sich ermitteln, indem die Wärmegestehungskosten durch die produzierte Wärme dividiert werden. Die Wärmegestehungskosten eignen sich im besonderen für die Wirtschaftlichkeitsrechnung im Rahmen der Detailauslegung sowie für den Vergleich verschiedener Varianten der Wärmeerzeugung; damit lässt sich auch die Wärme aus dem Spitzenheizkessel berücksichtigen. Die Software «WKK-CALC» berechnet die Wärmegestehungskosten.
- Jahreskostenbilanz: Sie besteht aus Gesamtertrag minus Gesamtaufwand. Ist sie positiv, ist die Anlage wirtschaftlich. Die Jahreskostenbilanz eignet sich dann, wenn Wärme an Dritte verkauft wird. Die Software «BHKW» berechnet die Jahreskostenbilanz für das erste Betriebsjahr.
- Elektrizitätsgestehungskosten: Die Elektrizitätsgestehungskosten eignen sich besonders für die schnelle Beurteilung der Wirtschaftlichkeit im Rahmen der Grobauslegung, wie bereits in Abschnitt 3.2 gezeigt wurde. Die Berechnung erfolgt vorzugsweise mit Hilfe des Nomogramms «Elektrizitätsgestehungskosten» in Bild 42. Die Wärmeproduktion der Wärmekraftkopplungsanlage wird ausser Betracht gelassen, indem nur die zusätzlichen Energiekosten infolge der Elektrizitätsproduktion berücksichtigt werden.

Betrachtungszeitraum

Der Betrachtungszeitraum ist die wichtigste Grösse für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit (Kasten 52). Sämtliche Geldflüsse werden darauf bezogen. Er soll der Nutzungsdauer der massgebenden Elemente entsprechen (Tabelle 53).

Baukontenplan

Insbesondere bei grösseren Bauvorhaben erfolgt eine Aufgliederung gemäss Baukontenplan (BKP) in Einzelpositionen (Tabelle 53). Diese Aufgliederung erlaubt eine vereinfachte Kostenkontrolle, insbesondere in der Ausführungsphase.

Kalkulationszinssatz

Der Kalkulationszinssatz für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit wird mit dem Auftraggeber vereinbart. Üblicherweise gelten für Wohnungsbau, Dienstleistung und Gewerbe sowie für Industrie verschiedene Zinssätze (Tabelle 54). Bei der Festlegung des Kalkulationszinssatzes muss beachtet werden, dass die Differenz zur Inflationsrate immer 2 bis 3% beträgt.

Kapitalkosten

Die Kapitalkosten werden ermittelt, indem die Investitionen mit dem sogenannten Annuitätsfaktor multipliziert werden. Bestehen die Investitionen aus Anteilen mit verschiedenen Nutzungsdauern, so sind diese Anteile getrennt zu berechnen. Der Annuitätsfaktor ist abhängig von der Nutzungsdauer und vom Kalkulationszinssatz (Tabelle 55).

Inflationsrate

Die Herleitung einer realistischen Annahme für die Inflationsrate kann sich nur an der Vergangenheit orientieren. Sie ist gemäss «RAVEL zahlt sich aus» (Kasten 49) mit 3% in die Wirtschaftlichkeitsberechnung einzusetzen (Tabelle 54).

Betrachtungszeitraum	
Nahwärmeverbund für Wärmekraftkopplungsanlage.....	30 Jahre
Wärmekraftkopplungsanlage mit Verbrennungsmotor.....	20 Jahre
Die Nutzungsdauer von Verbrennungsmotoren liegt bei rund 10 Jahren oder 40'000 Betriebsstunden. Danach erfolgt ein Ersatz des Motors oder eine Generalrevision (Kosten 10...20% des Modulpreises), so dass mit weiteren 40'000 Betriebsstunden gerechnet werden kann, bis auch die restlichen Komponenten des Moduls ihre Nutzungsdauer erreicht haben.	

Kasten 52

BKP	Anlageteil	Nutzungsdauer [Jahre]	Wartungskosten ¹ [%]
10	Vorbereitungsarbeiten	B ²	–
20	Baugrubenaushub	50	–
21	Rohbau 1	50	1,0
22	Rohbau 2	50	1,0
231	Starkstromanlagen	25	1,5
232	Starkstrominstallation	25	1,5
235	Leitsystem	15	1,5
241.1	Gasversorgung	50	1,0
241.2	Tankanlage	25	1,5
242	Wärmeerzeugung 1	15	3,0
242	Wärmeerzeugung 2	30	3,0
243	Wärmeverteilung	30	1,0
244	Lüftungsanlage	15	3,5
245	Kälteanlagen	15	3,0
247.5	Kaminanlage	20	1,5
247.6	BHKW-Anlage	20	³
25	Sanitäranlagen	30	1,5
26	Transportanlagen	30	1,5
27	Ausbau 1	40	1,0
28	Ausbau 2	40	1,0
29	Honorare	B ²	–
50	Unvorhergesehenes übrige Baunebenkosten	B ²	–

¹ Wartungskosten in % der Investitionen
² B = Betrachtungszeitraum
³ Siehe Bild 56

Tabelle 53: Nutzungsdauer und Wartungskosten nach Baukontenplan (BKP) geordnet

Preissteigerung	Minimal	Mittel	Maximal
Elektrizität Bezug	3%	4%	5%
Elektrizität Rücklieferung	3%	4,5%	6%
Heizöl EL	3%	5%	7%
Erdgas	3%	4,5%	6%
Fernwärme	3%	4%	5%
Holz	3%	3%	3%
Wartungskosten	3%	4%	5%
Inflationsrate			3%
Kalkulationszinssatz	Wohnbereich		6%
	Dienstleistung/Gewerbe		6,5%

Tabelle 54: Grundlagen zur Wirtschaftlichkeitsrechnung

Annuitätsfaktoren				
Nutzungs- dauer	Kalkulationszinssatz			
	5%	6%	7%	
10 Jahre	0,130	0,136	0,142	
15 Jahre	0,096	0,103	0,110	
20 Jahre	0,080	0,087	0,094	
Mittelwertfaktoren für Kalkulationszinssatz 6%				
Nutzungs- dauer	Preissteigerung			
	4%	5%	6%	7%
10 Jahre	1,225	1,290	1,359	1,431
15 Jahre	1,331	1,433	1,544	1,666
20 Jahre	1,463	1,581	1,744	1,927

Erklärung:
 Investitionskosten x Annuitätsfaktor = jährl. Kapitalkosten
 Wartungskosten x Mittelwertfaktor = mittl. jährl. Wartungskosten
 Energiekosten x Mittelwertfaktor = mittl. jährl. Energiekosten

Tabelle 55: Ausgewählte Faktoren zur Wirtschaftlichkeitsrechnung. Ausführliche Tabellen in «RAVEL zahlt sich aus» (vgl. Kasten 49).

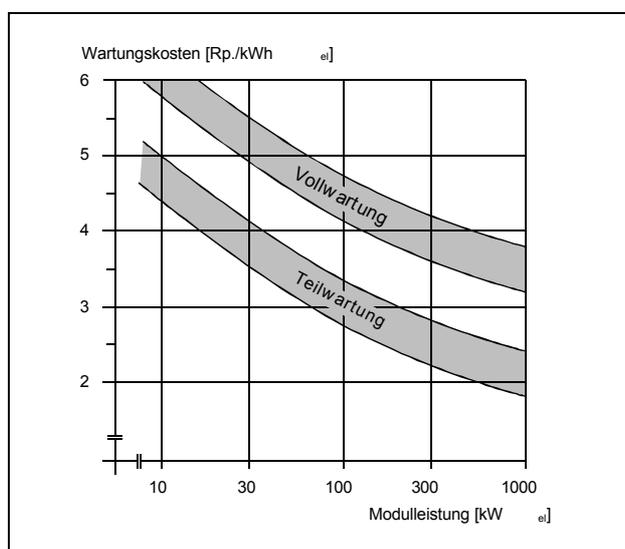


Bild 56: Wartungskosten für BHKW-Anlagen

Energiekosten und -erträge

Für die Ermittlung der Energiekosten müssen immer objektspezifische Abklärungen bei den betreffenden Werken gemacht werden. Insbesondere sind die folgenden Punkte zu beachten:

- Für WKK- und Spitzenkesselanlage gelten, je nach Abschaltbarkeit, unterschiedliche Erdgasstarife
- Bei Erdgas sind Grund- und Leistungspreise sowie die Heizwertdifferenz (H_o zu H_u) zu berücksichtigen
- Bei Objekten, in welchen Wärmekraftkopplungsanlagen realisiert werden, gelten meist Sommer- und Wintertarife für Bezug und Rücklieferung von Elektrizität
- Je nach Objekt und Anlage sind Kosten für elektrische Blindleistung zu berücksichtigen

Energiepreissteigerung

Eine Prognose über die zukünftige Energiepreissteigerung ist mit grossen Unsicherheiten behaftet. RAVEL legt deshalb eine Bandbreite mit drei Steigerungsraten fest (Tabelle 54). Für die konkrete, objektspezifische Berechnung ist die zu wählende Variante mit dem Auftraggeber zu vereinbaren. Wichtig ist dabei, dass für alle Energieträger die gleiche Variante (minimal, mittel oder maximal) festgelegt wird, damit keine Verzerrungen entstehen.

Wartungskosten

In den Wartungskosten sind alle jährlichen Kosten, die nicht für Kapitaldienst oder Energie aufgewendet werden müssen, zu berücksichtigen (Bild 56):

- Wartungskosten der Wärmekraftkopplungsanlage gemäss Servicevertrag
- Wartungskosten der Spitzenkesselanlage und weiterer Anlageteile (Kaminfeger, Tankreinigung, Brennerservice usw.)
- Bedienung
- Versicherungen (soweit nicht im Wartungsvertrag enthalten)
- Verwaltungskosten

Die Wartungskosten von Wärmekraftkopplungsanlagen sind in erster Linie von den Betriebsstunden abhängig und in zweiter Linie von der produzierten elektrischen oder mechanischen Energie. Fixe Kostenanteile (Überwachung, Reinigung und dergleichen) spielen eine untergeordnete Rolle.

• Fallbeispiel Teil 5	Basis	Ansatz	Jahreskosten im ersten Betriebsjahr	Mittelwertfaktor	Jahreskosten im Mittel über Betrachtungszeitraum
Betrachtungszeitraum 20 Jahre					
Kalkulationszinssatz 6%					
Preissteigerung Mittel					
Kaptialkosten	Investitionen	Annuität			
Nutzungsdauer 15 Jahre	193'000 Fr.	0,103	19'900 Fr./a	–	19'900 Fr./a
Nutzungsdauer 20 Jahre	892'000 Fr.	0,087	77'600 Fr./a	–	77'600 Fr./a
Nutzungsdauer 25 Jahre	77'000 Fr.	0,078	6'000 Fr./a	–	6'000 Fr./a
Nutzungsdauer 30 Jahre	83'000 Fr.	0,073	6'100 Fr./a	–	6'100 Fr./a
Nutzungsdauer 40 Jahre	44'000 Fr.	0,066	2'900 Fr./a	–	2'900 Fr./a
Nutzungsdauer 50 Jahre	<u>163'000 Fr.</u>	0,063	<u>10'200 Fr./a</u>	–	<u>10'200 Fr./a</u>
Total Kapitalkosten	1'452'000 Fr.		122'700 Fr./a		122'700 Fr./a
Energiekosten	Energiedaten	Ansatz			
Gas BHKW					
– Grundpreis	–	0 Fr.	0 Fr./a	1,522	0 Fr./a
– Leistungspreis	780 kW	8,3 Fr./kW	6'500 Fr./a	1,522	9'900 Fr./a
– Arbeitspreis Winter	2'820 MWh	3,5 Rp./kWh	98'700 Fr./a	1,522	150'200 Fr./a
– Arbeitspreis Sommer	610 MWh	2,3 Rp./kWh	14'000 Fr./a	1,522	21'300 Fr./a
Gas Kessel					
– Grundpreis	–	0 Fr.	0 Fr./a	1,522	0 Fr./a
– Leistungspreis	1'530 kW	8,3 Fr./kW	12'700 Fr./a	1,522	19'300 Fr./a
– Arbeitspreis Winter	690 MWh	3,5 Rp./kWh	24'200 Fr./a	1,522	36'800 Fr./a
– Arbeitspreis Sommer	30 MWh	2,3 Rp./kWh	700 Fr./a	1,522	1'100 Fr./a
Heizöl	9,3 t	400 Fr./t	3'700 Fr./a	1,581	5'800 Fr./a
Elektrizität Bezug (Zentrale)					
– Grundpreis	–	0 Fr.	0 Fr./a	1,463	0 Fr./a
– Leistung	0 kW	12,2 Fr./kW	0 Fr./a	1,463	0 Fr./a
– Winter Hochtarif	5,8 MWh	15,9 Rp./kWh	900 Fr./a	1,463	1'300 Fr./a
– Winter Niedertarif	1,3 MWh	6,8 Rp./kWh	100 Fr./a	1,463	150 Fr./a
– Sommer Hochtarif	0,5 MWh	15,9 Rp./kWh	100 Fr./a	1,463	150 Fr./a
– Sommer Niedertarif	0,1 MWh	6,8 Rp./kWh	0 Fr./a	1,463	0 Fr./a
Total Energiekosten			161'600 Fr./a		246'000 Fr./a
Wartungskosten					
WKK-Anlage fix	–	–	5'000 Fr./a	1,463	7'300 Fr./a
WKK-Anlage variabel	1'100 MWh	3,2 Rp./kWh	35'200 Fr./a	1,463	51'500 Fr./a
Andere Anlagen fix	–	–	<u>16'100 Fr./a</u>	1,463	<u>23'600 Fr./a</u>
Total Wartungskosten			56'300 Fr./a		82'400 Fr./a
Total Aufwand			340'600 Fr./a		451'100 Fr./a
Ertrag Elektrizität					
Eigenbedarf					
– Leistung	– kW	0 Fr./kW	0 Fr./a	1,463	0 Fr./a
– Winter Hochtarif	350 MWh	15,9 Rp./kWh	55'700 Fr./a	1,463	81'500 Fr./a
– Winter Niedertarif	150 MWh	6,8 Rp./kWh	10'200 Fr./a	1,463	14'900 Fr./a
– Sommer Hochtarif	70 MWh	15,9 Rp./kWh	11'100 Fr./a	1,463	16'200 Fr./a
– Sommer Niedertarif	30 MWh	6,8 Rp./kWh	2'000 Fr./a	1,463	2'900 Fr./a
Rücklieferung					
– Winter Spitzentarif	80 MWh	25 Rp./kWh	20'000 Fr./a	1,522	30'400 Fr./a
– Winter Hochtarif	200 MWh	19 Rp./kWh	38'000 Fr./a	1,522	57'800 Fr./a
– Winter Niedertarif	130 MWh	11 Rp./kWh	14'300 Fr./a	1,522	21'800 Fr./a
– Sommer Spitzentarif	20 MWh	19 Rp./kWh	3'800 Fr./a	1,522	5'800 Fr./a
– Sommer Hochtarif	50 MWh	11 Rp./kWh	5'500 Fr./a	1,522	8'400 Fr./a
– Sommer Niedertarif	20 MWh	7 Rp./kWh	1'400 Fr./a	1,522	2'100 Fr./a
Total Ertrag Elektrizität			162'000 Fr./a		241'800 Fr./a
Wärmegestehungskosten			178'600 Fr./a		209'300 Fr./a
Spez. Wärmegest.-kosten					
Wärmeproduktion: 2750 MWh/a			6,5 Rp./kWh		7,6 Rp./kWh

Tabelle 57: Fallbeispiel Teil 5 – tabellarische Berechnung der Wärmegestehungskosten

Spezifische Wärmegestehungskosten

Die spezifischen Wärmegestehungskosten werden wie folgt definiert:

$$\frac{\text{Aufwand} - \text{Ertrag}}{\text{Elektrizitätsproduktion}} \\ \text{produzierte Wärme}$$

Die Einheit ist [Rp./kWh] oder [Fr./MWh].

Kasten 58

Spitzenkessel – Öl, Gas oder Zweistoff?

Je nach Grösse des Objektes, Energietarifen und weiteren Randbedingungen lohnt sich eine detaillierte Betrachtung bezüglich Brennstoff des Spitzenkessels. Positive und negative Kriterien sind (Annahme: Objekt mit Erdgas versorgt):

- | | | |
|--------------------|---|--|
| Heizöl EL | + | zweiter Energieträger |
| | + | lagerfähig |
| | + | preiswerter Brenner |
| | - | Raum für Tank |
| Erdgas | + | tiefe Investitionen (kein Tank, preiswerter Brenner) |
| | - | nur ein Energieträger für Gesamtanlage |
| | - | hoher Gastarif wegen der nicht abschaltbaren Vollversorgung (meist auch für Wärmekraftkopplungsanlage) |
| Zweistoff (Öl/Gas) | + | zweiter Energieträger |
| | + | lagerfähig |
| | + | günstiger Gastarif |
| | - | Raum für Tank (allerdings kleiner als bei Einstoffbetrieb mit Heizöl EL) |
| | - | hohe Investitionen (Tank, Gasanschluss, teurerer Brenner) |

Kasten 59

In den Wartungskosten müssen die folgenden Kostenelemente vorhanden sein:

- Wartungs-, Service- und Kontrollarbeiten
- Revisionsarbeiten
- Ersatz- und Verschleissteile (z.B. Katalysator)
- Schmieröl und weitere Betriebsmittel (z.B. Reduktionsmittel für katalytische Abgasreinigung)
- Altölsorgung
- Störungsbehebungen
- Versicherungen (Maschinenbruchversicherung)

Die meisten BHKW-Lieferanten bieten Wartungsverträge an, welche an die Bedürfnisse des Anlagebetreibers angepasst werden können.



Wartungsverträge für BHKW's schliessen die Generalüberholung oder den Motorersatz meist aus. Die Nutzungsdauer einer BHKW-Anlage übertrifft jedoch die Nutzungsdauer eines Motors um das Doppelte, so dass entsprechende Rückstellungen gemacht werden müssen (siehe Kasten 52).

Die Wartungskostensteigerung wird gemäss Tabelle 54 gewählt.

Wärmegestehungskosten

Zur Berechnung der Wärmegestehungskosten müssen sämtliche Jahreskosten bekannt sein. Die spezifischen Wärmegestehungskosten berechnen sich gemäss Kasten 58. Die Jahreskosten im ersten Betriebsjahr und im Mittel über den Betrachtungszeitraum können mit Hilfe von Tabelle 57 (Fallbeispiel Teil 5) ermittelt werden. Eine analoge Darstellung liefert das Programm «WKK-CALC».

✚ Kopiervorlage für die Tabelle «Wärmegestehungskosten» im Anhang

3.5 Weitere Komponenten

Spitzenkesselanlage

Die Wärmekraftkopplungsanlage deckt bei richtiger Auslegung nur einen Teil des Wärmebedarfs. Der Rest wird durch eine Spitzenkesselanlage erbracht (Kasten 59). Deren Dimensionierung hat keinen entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch oder den Gesamtnutzungsgrad, weil ihre Betriebsdauer von untergeordneter Bedeutung ist. Vielmehr spielt die Versorgungssicherheit eine Rolle, die mit entsprechend höheren

Investitionen erkaufte werden muss. Als Anhaltspunkte für die Dimensionierung der Spitzenkesselanlage gelten (in Prozent des maximalen Wärmeleistungsbedarfes des Objektes):

- 100%ige Versorgungssicherheit bei vertraglich festgelegter Wärmelieferung, Spitäler usw.
- 80...90%ige Versorgungssicherheit bei Wohnbauten, Schulen, Verwaltung, Dienstleistung usw.

In jedem Fall muss die Leistung von Wärmekraftkopplungsanlage und Spitzenkessel zusammen 100% betragen. Bei Anlagen mit mehreren Modulen soll auch bei Ausfall oder Revision eines Moduls 100% Leistung erbracht werden können.

Speicheranlage

Häufiges Einschalten schadet der Wärmekraftkopplungsanlage (Kasten 60). Deshalb muss eine Speicheranlage vorgesehen werden. Deren Dimensionierung erfolgt so, dass bei der niedrigsten zu erwartenden Wärmebezugsleistung eine minimale Einschaltdauer von einer Stunde gewährleistet ist.



Für die Dimensionierung des Speichers können die effektiven Temperaturverhältnisse während des betreffenden kritischen Zeitraumes berücksichtigt werden (tiefere Systemrücklauftemperatur).

Die Dimensionierung des Speichers für das Fallbeispiel zeigt Kasten 61. Es ist zu beachten, dass die Berechnung das nutzbare Volumen ergibt, also das Volumen zwischen den Ein- und Ausschaltfühlern. Das effektive Speichervolumen muss deshalb etwas grösser gewählt werden (10...20%).

In Zeiten mit geringem Wärmebedarf kann die Wärmekraftkopplungsanlage mit Teillast betrieben werden. Dies hat zwar den Nachteil eines etwas schlechteren Wirkungsgrades, dafür kann aber die Speicheranlage kleiner dimensioniert werden und die Wärmekraftkopplungsanlage ist einem geringeren Verschleiss ausgesetzt. Bei Verbrennungsmotoren ist ein Teillastbetrieb im Bereich von 70...100% sinnvoll.

Verschleiss beim Start

Bei einem Start der Wärmekraftkopplungsanlage erfolgt der gleiche Verschleiss wie bei:

Gas-Ottomotor.....	5	Betriebsstunden
Dieselmotor.....	5	Betriebsstunden
Gasturbine.....	25	Betriebsstunden

Einige Hersteller tendieren deshalb dazu, die Wartung nicht nur in Abhängigkeit der Betriebsstunden, sondern auch in Abhängigkeit der Startvorgänge zu verrechnen.

Kasten 60

Fallbeispiel Teil 6 – Speicher

Thermische Leistung BHKW	450 kW
Teillastbereich BHKW	80...100%
Betriebsdauer	1 h
Ladetemperatur	80°C
Rücklauftemperatur zur kritischen Zeit	35°C

Folgende Speicherkapazität Q_{SP} ist für 80% Teillast und 1 h Betriebsdauer erforderlich:

$$Q_{SP} = 0,8 \cdot 450 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} = 360 \text{ kWh}$$

Die Berechnung des notwendigen nutzbaren Speichervolumens V_{SP} erfolgt dann nach der Formel:

$$V_{SP} [\text{m}^3] = 0,86 \cdot \frac{Q [\text{kWh}]}{\Delta\vartheta [\text{K}]} = 0,86 \cdot \frac{360 \text{ kWh}}{(80 - 35) \text{ K}}$$

$$V_{SP} [\text{m}^3] = 6,9 \text{ m}^3 \text{ (nutzbares Volumen!)}$$

✚ In Heft 3 «Wärmepumpen» wird in Abschnitt 3.4 das Thema «Speicher» ausführlich behandelt

Kasten 61

4. Umweltverträglichkeit

CO ₂ -Emission fossiler Brennstoffe	
Heizöl EL	73 kg/GJ
Erdgas.....	55 kg/GJ
Flüssiggas.....	65 kg/GJ

Kasten 62

4.1 Beurteilungskriterien

Die Umweltverträglichkeit von Wärmekraftkopplungsanlagen muss nach verschiedenen Kriterien beurteilt werden. Eindeutig im Vordergrund stehen Betrachtungen zur Luftreinhaltung. Von grosser Bedeutung ist jedoch auch der Primärenergieverbrauch und damit verbunden die CO₂-Emissionen für die Bereitstellung der gewünschten Nutzenergie.

4.2 Energienutzung und CO₂-Emissionen

In Wärmekraftkopplungsanlagen wird aus dem Brennstoff – neben Wärme – auch hochwertige mechanische Energie produziert, welche meist zur Elektrizitätsproduktion verwendet wird. Die Elektrizität kann in Wärmepumpen oder anderen Prozessen dazu verwendet werden, um fossile Energie einzusparen (Elektro-Thermo-Verstärker).

⊕ Diese Zusammenhänge sind in Heft 1 «Elektrizität und Wärme» ausführlich beschrieben

Für Wärmekraftkopplungsanlagen sind bezüglich Energienutzung folgende Tatsachen wichtig:

- Für eine gute Energienutzung ist ein hoher Gesamtnutzungsgrad sowie eine hohe Stromkennzahl wichtig
- Die Berücksichtigung der Wertigkeit verschiedener Energieformen erlaubt es, die Energienutzung einer Wärmekraftkopplungsanlage unabhängig davon zu beurteilen, ob im gleichen Objekt Elektro-Thermo-Verstärker (Wärmepumpe, Wärmerückgewinnung usw.) realisiert werden oder nicht

Die CO₂-Emissionen hängen einerseits direkt mit der Energienutzung zusammen, andererseits sind sie auch von der Wahl des Brennstoffes abhängig: Pro Energieeinheit werden bei Einsatz von Erdgas 20% weniger CO₂ freigesetzt als bei Heizöl EL (Kasten 62).

4.3 Schadstoffemissionen

Gasmotor-BHKW's mit Dreiwegkatalysator

Messungen an Gasmotor-BHKW's mit Dreiwegkatalysator haben folgende Resultate ergeben:

- Sie können äusserst geringe Schadstoffemissionen aufweisen, wenn sie optimal eingestellt und betrieben werden
- Die Emissionsfaktoren der einzelnen Anlagen können hingegen sehr verschieden sein

Sowohl die Hersteller als auch die Planerinnen und Planer haben die Möglichkeit, die Emissionsfaktoren durch folgende Massnahmen zu beeinflussen:

- Wenig Startvorgänge durch Optimierung von Speicher, Steuerung und Regelung
- Definierte Stellung des Luft/Gas-Gemisches für den Startvorgang (Bild 63)
- Überwachung der Schadstoffreduktion durch Kontrolle der Temperaturdifferenz über dem Katalysator und der Lambdasondenspannung

Bezüglich der einzelnen Schadstoffe haben sich folgende Ergebnisse gezeigt:

- Stickoxide (NO_x): Die Umwandlung des im Abgas enthaltenen Stickstoffmonoxides NO lässt sich problemlos realisieren. Die Konversionsraten sind über 99%, falls Katalysator und Regelung ordnungsgemäss funktionieren.
- Kohlenmonoxid (CO): Die Konversion von CO reagiert sensibel auf Störeinflüsse (schlecht eingestelltes Lambda-Fenster, ungenügend dimensionierter Katalysator). Bei einer optimal eingestellten Anlage sind Konversionsraten von über 95% zu erreichen.
- Methan (CH_4): Die Konversionsrate von Methan liegt im Bereich von 50%. Die Methanemission ist jedoch nicht sehr relevant, da beim Transport von Erdgas bis zu 100mal mehr Methan entweicht als später im Abgas vorhanden ist.
- Kohlenwasserstoffe (VOC): Die höheren Kohlenwasserstoffe werden im Gegensatz zu Methan besser konvertiert. Die Konversionsraten für Kohlenwasserstoffe (als Summe, ohne Methan) liegen um 80%. Im weiteren ist es wichtig festzustellen, dass im Abgas nur diejenigen Kohlenwasserstoffe gefunden wurden, die bereits im Erdgas enthalten waren. Auch hier gilt, dass die Emissionen in den Abgasen im Vergleich zu denjenigen bei der Gewinnung und beim Transport von Erdgas unbedeutend sind.

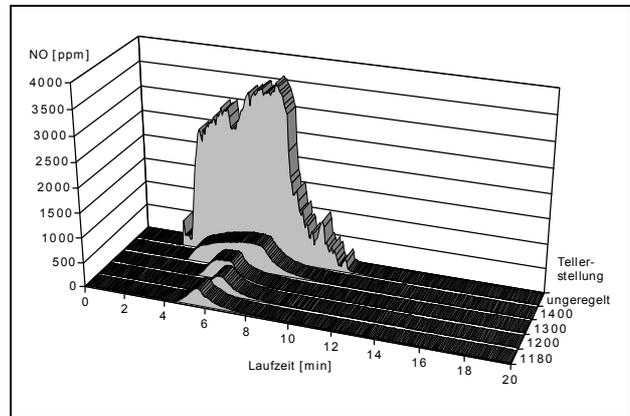


Bild 63: Die Anfahr-Emissionen von Gasmotor-BHKW's mit Dreiwegkatalysator sind bei unreguliertem Luft/Gas-Gemisch sehr hoch

Schadstoffreduktion bei Gasturbinen

- Dampf- bzw. Wassereinspritzung bewirkt eine tiefere Verbrennungstemperatur, was die Stickoxidemissionen reduziert. Die mechanische Leistung der Turbine erhöht sich. Der mechanische Wirkungsgrad erhöht sich bei Dampfeinspritzung, bei Wassereinspritzung reduziert er sich (Grössenordnung 1% bei 1 kg Wasser/Dampf pro 1 kg Brennstoff).
- Bei Low-Nox-Brennkammern wird der Brennstoff in einer Vorkammer mit der Verbrennungsluft gemischt. Dadurch können örtliche Spitzentemperaturen vermieden und dadurch die Stickoxidemissionen reduziert werden.
- Selektiv katalytische Reduktion (SCR-Katalysator) mit Eindüsung von Ammoniak oder Harnstoff.

Kasten 64

Anlagentyp Brennstoff	NO _x	CO	VOC ^{2,3}	CO ₂	SO ₂	Feststoff ³
	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]	[kg/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]
Gasmotor ¹ – Erdgas	15	45	20	55	0,5	0,1
Dieselmotor – ohne SCR, Oxi.-Kat.	1444	225	150	73	66	59
– mit SCR, Oxi.-Kat.	32	16	8	73	66	13
Kessel – Erdgas	30	50	10	55	0,5	0,1
– Heizöl EL	60	20	10	73	66	0,2
Low-NO _x -Kessel – Erdgas	20	15	8	55	0,5	0,1
– Heizöl EL	30	10	4	73	66	0,2
Gasturbine ⁴ – Erdgas	30	50	5	55	0,5	0,1

¹ Mit Dreiwegkatalysator im Stationärbetrieb nach 3000 bis 4000 Betriebsstunden
² Mit Methan
³ Gefährlichkeit je nach Brennstoff verschieden
⁴ Mit SCR-Katalysator

Tabelle 65: Emissionsfaktoren

Schadstoff	Bewertungsfaktor	
	Gas	Öl
NO _x	1	1
CO	0,0125	0,0125
VOC	0,2	1
SO ₂	1	1
Feststoffe	1	1

Tabelle 66: Bewertungsfaktoren

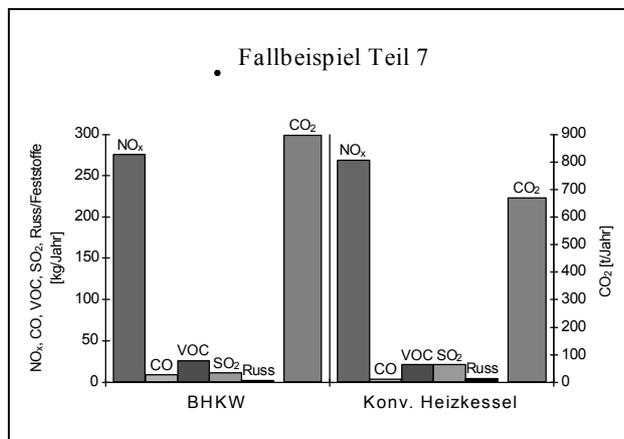


Bild 67: Fallbeispiel Teil 7 – bewertete Schadstoffemissionen

Gasturbinen mit Entstickung

Die Entwicklungsarbeiten bei Gasturbinen hatten bisher vor allem das Ziel, höhere Wirkungsgrade zu erzielen. Dies erfolgte durch Erhöhung der Turbineneintrittstemperatur und durch Verbesserung der Komponenten (Turbinen, Verdichter). Vorschriften bezüglich Schadstoffemissionen haben nun aber auch dazu geführt, dass die Hersteller von Gasturbinen verschiedene Massnahmen zur Schadstoffreduktion vorsehen (Kasten 64).

4.4 Vergleichende Bewertung

Die Schadstoffemissionen einer Wärmekraftkopplungsanlage (BHKW mit Spitzenkessel) werden mit einer konventionellen Heizkesselanlage verglichen. Die produzierte Elektrizität wird nicht berücksichtigt. Der Vergleich geht also davon aus, dass die Elektrizität ohne Schadstoffemissionen produziert wird.

Die Schadstoffemissionen werden berechnet, indem die im jeweiligen Wärmeerzeuger verbrauchten Energieträger mit dem entsprechenden Emissionsfaktor (Tabelle 65) multipliziert werden.

Nicht alle Schadstoffe sind gleich schädlich; es drängt sich daher eine Bewertung auf. Als Mass für die Schädlichkeit der verschiedenen Schadstoffe können die Immissionsgrenzwerte gemäss Luftreinhalteverordnung (LRV) betrachtet werden: Je höher die Schädlichkeit des Schadstoffes ist, desto kleiner ist der Immissionsgrenzwert gemäss LRV. Die Bewertungsfaktoren (Tabelle 66) werden proportional zu den Immissionsgrenzwerten der LRV festgelegt. Der Bewertungsfaktor für VOC bei Erdgas wurde mit 0,2 festgelegt, weil aufgrund von Messungen festgestellt wurde, dass der überwiegende Teil der VOC-Emissionen aus Methan besteht.

Die beiden Auslegungsprogramme «WKK-CALC» und «BHKW» ermöglichen die Berechnung der Schadstoffemissionen und den Vergleich zu einer konventionellen Vergleichsanlage (das Programm «BHKW» nimmt jedoch keine Bewertung vor). Bild 67 zeigt den Vergleich der Schadstoffemissionen für das Fallbeispiel, berechnet mit dem Programm «WKK-CALC».

5. Planungshinweise

5.1 Planungsablauf

In diesem Kapitel werden wichtige Punkte der Planung von BHKW's mit Verbrennungsmotoren behandelt.

Die Aussagen gelten aber sinngemäss auch für BHKW's mit Gasturbinen.

Grundsätzlich ist der Planungsablauf für die Realisierung einer Haustechnikanlage durch die SIA-Honorarordnung 108 geregelt. Zielsetzung und Leistungsbeschreibung des Ingenieurs sind darin beschrieben.

- + Einige wichtige Aspekte werden durch die SIA-Honorarordnung nur unvollständig abgedeckt. Siehe dazu Heft 1, Kapitel 6 «Qualitätssicherung im Planungsablauf»

Bei einer BHKW-Anlage ist es aus wirtschaftlichen Gründen nicht nur wichtig, dass sie läuft, sondern wie sie läuft. Deshalb ist in den einzelnen Planungsphasen ein differenziertes Vorgehen nötig.

Vorabklärung

Ein potentieller BHKW-Betreiber soll nicht gleich bei der ersten Anfrage, ob in seinem Objekt ein BHKW einsetzbar sei, mit hohen Kosten für eine Studie abgeschreckt werden. Schon in einer Viertelstunde kann nämlich per Telefon abgeklärt werden, ob ein BHKW grundsätzlich einsetzbar ist. Anhand dieser Vorabklärung wird festgestellt, ob eine Wärmekraftkopplungsanlage sinnvoll in das Objekt integriert werden kann. Sind die Punkte gemäss Kasten 68 mehrheitlich erfüllt, so sind die Randbedingungen für den Einsatz einer BHKW-Anlage günstig.

Machbarkeitsstudie

Sind die Randbedingungen der Vorabklärung erfüllt, empfiehlt es sich, als nächsten Schritt eine Machbarkeitsstudie durchzuführen (Kasten 69). Je nach Grösse und Komplexität muss mit Honorarkosten von etwa 5'000...15'000 Franken gerechnet werden. Die Machbarkeitsstudie gibt dem Bauherrn alle notwendigen Daten, die er für den Grundsatzentscheid zum Einsatz eines BHKW's benötigt.

Gesamtkonzept mit Pflichtenheft

Wenn der Grundsatzentscheid für eine Wärmekraftkopplungsanlage gefällt ist, wird im Rahmen eines Gesamt-Energiekonzept eine der Problemstellung angepasste optimale Lösung erarbeitet. Die Anforderungen des Gesamt-Energiekonzeptes werden in einem

Vorabklärung

Günstige Randbedingungen für den Einsatz einer Wärmekraftkopplungsanlage sind:

- Die Heizzentrale verfügt über einen Gasanschluss (Erdgas oder Flüssiggas) oder ein solcher kann mit geringem Aufwand erstellt werden.
- Es ist genügend Aufstellungsraum vorhanden. Für ein BHKW mit einer elektrischen Leistung von 150...200 kW muss beispielsweise eine Fläche von mindestens 40 m² bei einer Raumhöhe von 3,0...3,5 m zur Verfügung stehen (ohne den Platzbedarf für Heizkessel und Speicher). Vielfach kann dieser Platz durch Wegfall eines bestehenden Heizkessels gewonnen werden.
- Das Wärmeabgabesystem hat eine maximale Vorlauftemperatur von 80...85°C – je tiefer desto besser. Für höhere Vorlauftemperaturen von 110...125°C muss ein modifiziertes BHKW gewählt werden. Sofern sichergestellt werden kann, dass die Rücklauftemperatur 70°C nicht übersteigt, kann die Vorlauftemperatur auch durch einen in Serie geschalteten Spitzenkessel erhöht werden.
- Der Wärmeleistungsbedarf des Objektes (und allenfalls weiterer angeschlossener Objekte) ist höher als 1000 kW, entsprechend einem Jahreswärmebedarf von etwa 2000 MWh/a.
- Wärmebezug mit hoher Nutzungsdauer.
- Hoher Eigenbedarf an Elektrizität.
- Hohe Elektrizitätstarife für Bezug und gegebenenfalls für Rücklieferung.
- Bereitschaft entsprechende Investitionen zu tätigen.

Kasten 68

Machbarkeitsstudie

- Grundlagen:
 - Bedarfsdaten Objekt (Wärmeleistungsbedarf, Jahreswärmebedarf, Elektrizitätsbedarf)
 - Energietarife
 - Wirtschaftlichkeitsparameter
- Anlagekonzept
- Grobdimensionierung Wärmekraftkopplungsanlage
- Investitionen (Genauigkeit 20%)
- Wirtschaftlichkeit (Elektrizitätsgestehungskosten)
- Eventuell Umweltaspekte
- Empfehlungen für weiteres Vorgehen

Kasten 69

Projekt und Ausführungsplanung

- Grundlagen gemäss Machbarkeitsstudie und Gesamt-Energiekonzept aktualisieren
- Detailauslegung der Wärmekraftkopplungsanlage
- Hydraulik:
 - Prinzipschema (mit Auslegungsgrössen)
 - Funktionsbeschrieb Steuerung/Regelung
- Elektrische Einbindung:
 - Abklärungen mit Werk
 - Prinzipschema (mit Auslegungsgrössen)
- Gasversorgung (Abklärungen mit Werk)
- Gesuche, Bewilligungen:
 - Baugesuch
 - Anschlussgesuch Elektrizitätswerk
 - Planvorlage Starkstrominspektorat
- Projekt- und Ausführungspläne

Kasten 70

Pflichtenheft festgehalten. Dieses bildet die Grundlage für die Erfolgskontrolle.

Projekt und Ausführungsplanung

Die Leistungen des Ingenieurs für Projektierung und Ausführungsplanung sind grundsätzlich in der SIA-Honorarordnung 108 festgelegt. Speziell berücksichtigt werden müssen die Punkte gemäss Kasten 70.

Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle

Nach Inbetriebsetzung und Abnahme der Anlage muss eine Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die Anlage tatsächlich gemäss Pflichtenheft arbeitet.

+ Näheres siehe Abschnitt 6.4 «Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle»

5.2 BHKW-Aggregat

Literaturhinweise zum Thema «Flüssiggas»



Flüssiggas. Teil I: Behälter, Lagern, Umschlagen und Abfüllen. Bern: Eidg. Koordinationskommission für Arbeitssicherheit (EKAS), 1990. (Bezugsquelle: SUVA, Stabsabteilung Arbeitssicherheit, Postfach, 6002 Luzern)



Flüssiggasrichtlinien. Teil II: Verwendung von Flüssiggas in Haushalt, Gewerbe und Industrie. Zürich: SVGW, 1977. (Bezugsquelle: SUVA, Stabsabteilung Arbeitssicherheit, Postfach, 6002 Luzern)



Ex-Zonen. Grundsätze des Explosionsschutzes mit Beispielsammlung. Luzern: SUVA, 1993. (Bezugsquelle: SUVA, Stabsabteilung Arbeitssicherheit, Postfach, 6002 Luzern)



Rahmenbericht Flüssiggas-Tankanlagen. Zürich: Basler + Hofmann AG, 1992. (Bezugsquelle: Basler + Hofmann AG, Forchstrasse 395, 8029 Zürich)

Kasten 71

Heizzentrale

Ein Blockheizkraftwerk kann meist in grössere bestehende Wärmeerzeugungsanlagen integriert werden. Anlagen im oberen Leistungsbereich (z. B. Gasturbinen) weisen einen grösseren Platzbedarf auf und es muss objektspezifisch untersucht werden, ob der zur Verfügung stehende Platz für die Aufstellung genügt. Falls BHKW und Spitzenkessel nicht in einem Raum untergebracht werden können, ist es auch möglich, sie in nahe beieinander gelegenen Räumen unterzubringen.

Aufstellung

Bei der Aufstellung müssen die vom Anlagelieferanten angegebenen Mindestabstände beachtet werden. Diese sind so bemessen, dass eine gute Zugänglichkeit gewährleistet ist. Bei engen Platzverhältnissen ist eine Abweichung auf Kosten der Zugänglichkeit möglich. Gegebenenfalls kann darauf verzichtet werden, dass alle vier Seitenwände geöffnet werden können oder demontierbar sind. Einige zusätzliche Hinweise für den Einsatz von Zweimodulanlagen gibt Kasten 72.

Schallschutz

Für die Definition der Schallschutzmassnahmen und die Dimensionierung der Schallschutzelemente ist –

besonders in Fällen mit hohen Anforderungen – ein Akustiker beizuziehen. Dessen Anforderungen sind im Pflichtenheft der BHKW-Anlage zu integrieren, und die Einhaltung der Werte ist bei der Abnahme zu prüfen.

Zu- und Fortluftschalldämpfer sowie Abgasschalldämpfer sind so auszulegen, dass die Immissionsgrenzwerte am nächstgelegenen Fenster oder öffentlich zugänglichen Punkt eingehalten werden (Lärmschutzverordnung).

Ein schweres, schwimmend gelagertes Fundament reduziert die Gefahr der Schwingungsübertragung vom Motor auf den Baukörper. Ist die Realisierung eines solchen Fundamentes infolge Statik oder fehlender Raumhöhe nicht möglich, sollte unbedingt ein Akustikspezialist beigezogen werden. Wichtig zur Vermeidung von Körperschallübertragung ist in jedem Fall eine konsequente doppelte schalltechnische Trennung des Aggregates von der Peripherie (Bild 73) sowie eine sehr sorgfältige Montage.

Erdgasversorgung

Bei bestehenden Gasanschlüssen muss beim Gaslieferanten abgeklärt werden, ob genügend Kapazität für die Versorgung der BHKW-Anlage vorhanden ist. Falls für BHKW und Spitzenkessel verschiedene Tarife gelten, sind separate Gaszähler nötig.

Propanversorgung

Propan wird flüssig in speziellen Tanks mit einem Überdruck von etwa 8 bar gelagert. Für Anlagen mit Propan sind folgende Punkte wichtig:

- Oberirdische Tanks können gemietet oder gekauft werden
- Erdüberdeckte Tanks können nur gekauft werden
- Weil Propangas schwerer ist als Luft, muss verhindert werden, dass sich bei einem Störfall (Gasaustritt) ein «Propangas-See» bilden kann
- Tankanlagen ab einem maximalen Füllgewicht von 20 Tonnen sind der Störfallverordnung unterstellt

Es ist ratsam, sich von Fachleuten der Flüssiggaslieferanten beraten zu lassen. Literatur dazu zeigt Kasten 71.

Heizölversorgung

Für Tankanlagen von Dieselmotor-BHKW's gelten die gleiche Vorschriften und Empfehlungen wie für Heizkesselanlagen. Ein Tagestank, welcher in der Nähe des BHKW's aufgestellt wird, sollte für eine Laufzeit von 5...10 Betriebsstunden ausgelegt sein.

Zweimodulanlagen

Ob die erforderliche Leistung der BHKW-Anlage durch ein oder zwei Module erbracht werden soll, muss durch einen detaillierten Systemvergleich objektspezifisch abgeklärt werden. Folgende Vorteile (+) und Nachteile (–) gelten für Zweimodulanlagen:

- + Die Wärmeerzeugerleistung kann besser dem Bedarf folgen
- + Kleineres Speichervolumen möglich
- + Wesentlich höhere Verfügbarkeit
- Höhere Investitionen durch höheren spezifischen Modulpreis
- Größerer Platzbedarf für Module (nicht aber für den Speicher!)
- Aufwendigere übergeordnete Steuerung



Bei Zweimodulanlagen wird bei genügenden Platzverhältnissen mit Vorteil für jedes Modul eine eigene Schalldämmhaube realisiert. Eine gemeinsame Haube ist möglich, doch die Praxis zeigt, dass während der Revision eines Moduls das andere wegen des Lärms auch abgeschaltet wird, obwohl dieses weiter in Betrieb stehen könnte.

Kasten 72

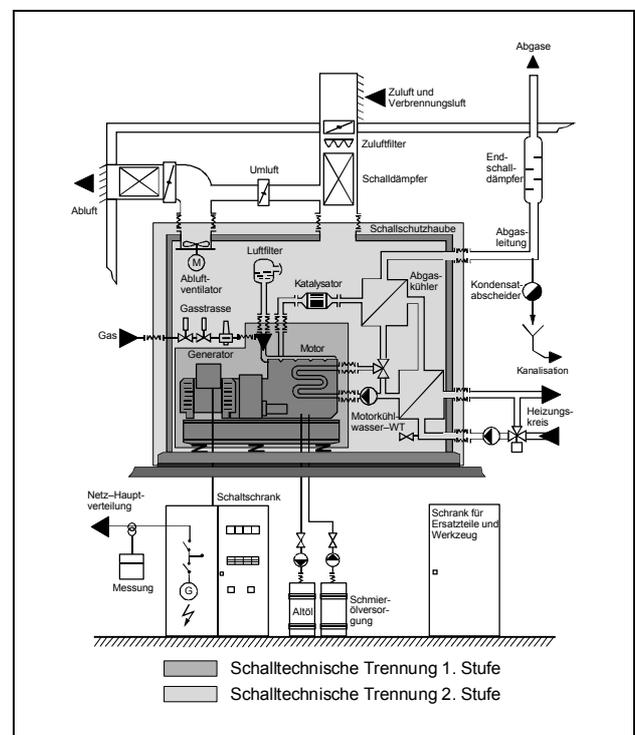


Bild 73: Konsequente schalltechnische Trennung in zwei Stufen

Mindestluftwechsel Gasmotor-BHKW's

Es gelten die gleichen Vorschriften wie für Gaskesselanlagen:

Luftwechsel bei Stillstand.....konvektiv
Mindestluftwechsel im Betrieb.....3fach pro Stunde

Kasten 74

Schmierölversorgung

Der Schmierölverbrauch von Gasmotor-BHKW's beträgt 0,4...0,6 g pro produzierter Kilowattstunde Elektrizität. Die Schmierölversorgung soll so ausgelegt sein, dass während mindestens 14 Tagen kein Schmieröl nachgefüllt werden muss. Ein Vorratstank mit einer Jahreskapazität und ein Altöltank erfordern zwar zusätzliche Investitionen, dafür ist aber ein komfortabler Unterhalt möglich. Der Schmieröltank ist idealerweise 2...3 m über dem Motor anzuordnen, so dass das Schmieröl ohne Pumpe in den Motor fließen kann. Je nach Anforderung des Betreibers sind einfache oder komfortable, manuelle oder vollautomatische Systeme zur Schmierölfüllung und -entleerung erhältlich.

Lüftungsanlage

Die Lüftungsanlage erfüllt zwei Funktionen:

- Minimal-Luftwechsel bei Gasmotor-BHKW, damit sich bei Gasaustritt kein zündfähiges Gas-Luft-Gemisch bilden kann (Kasten 74)
- Abführen der Strahlungswärme des Motors und der Verlustleistung des Generators

Bei der Auslegung ist zu beachten:

- Befindet sich die Gassicherheits- und Regelstrecke («Gasstrasse») in der Schallschutzhaube, so muss nur die Schallschutzhaube den Mindestluftwechsel aufweisen.
- Die Luftwechselrate bei Stillstand kann konvektiv erfolgen. Dazu sind die Luftklappen zu öffnen.
- Bei Rückgewinnung der Strahlungsabwärme kann die Luftmenge auf das sicherheitstechnische Minimum dimensioniert werden. Dabei ist zu beachten, dass in diesem Fall bei Ausfall der Wärmerückgewinnung (beispielsweise der Wärmepumpe) das BHKW nicht weiter betrieben werden kann.
- Wird die Strahlungsabwärme über die Lüftungsanlage abgeführt, so sind die Temperaturverhältnisse beim Betrieb der Anlage massgebend (z.B. +15°C Aussentemperatur, wenn das BHKW nur während der Heizsaison in Betrieb ist).
- Durch Einblasen der Zuluft beim temperaturempfindlichsten Anlageteil (Generator) und Absaugen über dem Motor kann die Temperaturdifferenz erhöht, respektive Luftmenge und Ventilatorleistung tief gehalten werden.
- Durch Umluftbeimischung oder Reduktion der Luftmenge kann vermieden werden, dass die Temperatur in der Schallschutzhaube zu stark sinkt (hohe Wärmeverluste und Einfriergefahr). Die sicherheit-

stechnische Mindestluftmenge darf jedoch nicht unterschritten werden.

5.3 Hydraulische Einbindung

+ Heft 1, Kapitel 4 «Planungsgrundlagen» und Kapitel 5 «Schaltungstechnik»

+ Heft 5 «Standardschaltungen»

Unterschiede zu einer konventionellen Anlage

Die hydraulische Einbindung einer Wärmekraftkopplungsanlage stellt einige besondere Anforderungen, welche sich grundsätzlich von denen einer konventionellen Wärmeerzeugung mit Heizkessel unterscheiden. Um eine lange Lebensdauer und geringe Wartungskosten zu erreichen, muss das BHKW möglichst wenige Starts aufweisen. Da ein BHKW im allgemeinen mit konstanter Leistung betrieben wird, wird ein Speicher eingesetzt, der eine Laufzeit von mindestens einer Stunde pro Einschaltung sicherstellt. Diese Forderung kann aber nur erfüllt werden, wenn zwischen Vor- und Rücklauf der Wärmeabgabe eine möglichst grosse Temperaturdifferenz besteht, und die ergibt sich nur mit der richtigen hydraulischen Schaltung. Zur Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades kann das BHKW mit einer Umluftwärmepumpe zur Rückgewinnung der Strahlungsabwärme und/oder mit einem Abgas-Kondensationswärmetauscher ergänzt werden. Diese beiden Lösungen funktionieren aber nur ordnungsgemäss, wenn das Heizwasser mit einer genügend tiefen Rücklauftemperatur zum BHKW gelangt.

Wärmeabgabe

Um eine möglichst tiefe Rücklauftemperatur der Wärmebezüge zu erreichen, muss der hydraulischen Schaltung der Wärmeabgabe besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Insbesondere bei bestehenden hydraulischen Systemen ist eine genaue Analyse sehr wichtig. Dabei reicht es nicht, nur die hydraulische Schaltung in der Heizzentrale (Hauptverteiler) zu kontrollieren. Zusätzlich muss überprüft werden, ob nicht ausserhalb der Heizzentrale (z.B. in Unterstationen) unzulässige Schaltungen vorhanden sind. Geeignet sind:

Anpassung bestehender Schaltungen

➔ Vorsicht beim Umbau eines Einspritzverteilers mit Dreiwegventilen auf einen Einspritzverteiler mit Durchgangsventilen!

Die regelungstechnische Forderung nach der Einhaltung einer genügenden Ventilautorität hat zur Konsequenz, dass in der Regel ein Umbau der Dreiwegventile auf Durchgangsventile nicht allein durch das Abblinden des Bypasses gelöst werden kann. Die Ventilautorität würde völlig ungenügend. Eine genügende Ventilautorität kann nur erreicht werden, wenn im Ventilquerschnitt bei Nenn-durchfluss die gleiche Druckdifferenz abgebaut wird wie im Teilstück des Primärkreises mit variablem Durchfluss. Dieses Teilstück darf bei der Schaltung mit Durchgangsventil einen viel grösseren Druckabfall aufweisen als bei der Schaltung mit Dreiwegventil.

➔ Zulässiger Druckverlust über dem Primärkreis von Beimischverteilern ohne Hauptpumpe beachten!

Ein Beimischverteiler ohne Hauptpumpe kann nur ordnungsgemäss funktionieren, wenn der Druckverlust auf der Primärseite nicht zu gross ist, weil sich sonst die Gruppen gegenseitig beeinflussen. Als Faustregel gilt: Der zulässige Druckverlust auf der Primärseite (bei Nenn-durchfluss) darf nicht höher sein als 20 % der Förderhöhe der kleinsten Gruppenpumpe.

Kasten 75

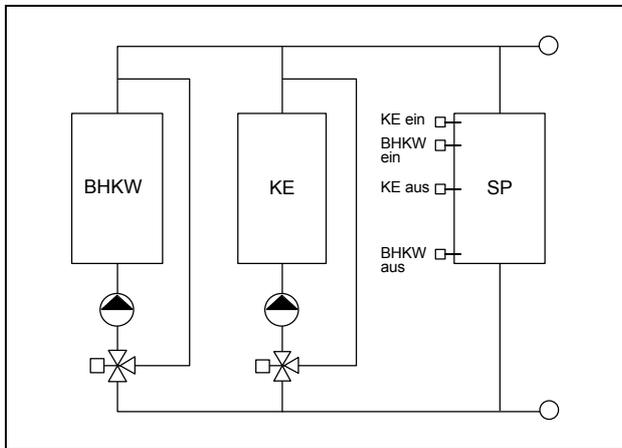


Bild 76: Parallelschaltung

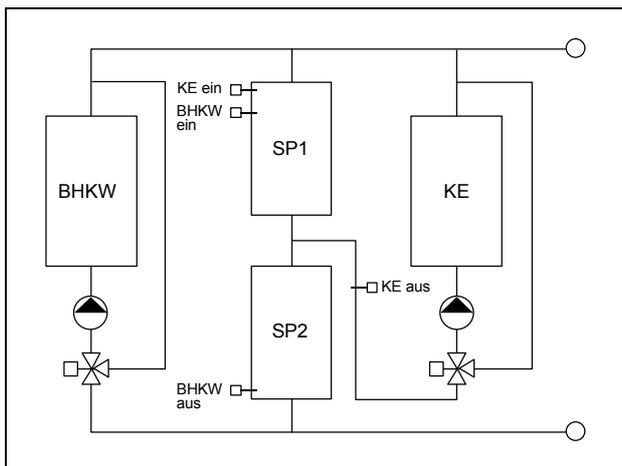


Bild 77: Teilparallelschaltung

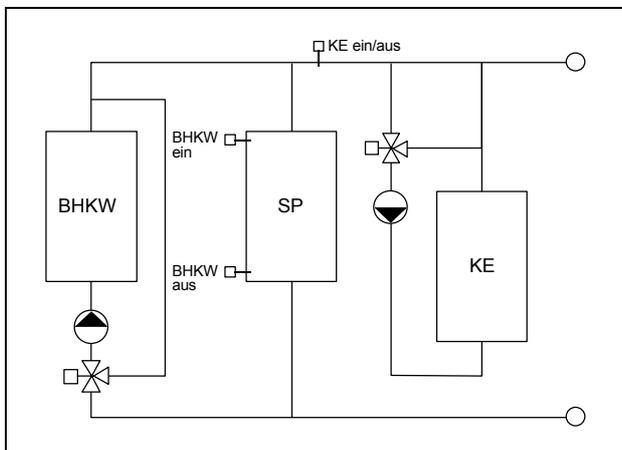


Bild 78: Serieschaltung

- Einspritzverteiler mit Durchgangsventilen und druckdifferenz geregelter Hauptpumpe
 - Beimischverteiler ohne Hauptpumpe
 - Gruppen in Einspritzschaltung mit Durchgangsventil
 - Gruppen in Beimischschaltung ohne Primärbypass
- Es müssen vermieden werden:
- Einspritzverteiler mit Dreiwegventilen
 - Beimischverteiler mit Hauptpumpe (sogenannte «drucklose Verteiler»)
 - Gruppen in Einspritzschaltung mit Dreiwegventil
 - Gruppen in Beimischschaltung mit Primärbypass
 - Gruppen in Umlenkschaltung
 - Druckdifferenzregler, die nach dem Überströmprinzip funktionieren
 - Bypässe jeglicher Art, die heisses Vorlaufwasser unkontrolliert in den Rücklauf umlenken
 - Ferner sollten Verteiler mit breitflächig zusammengeschweisstem Vorlauf- und Rücklaufbalken vermieden werden, weil auch hier die Rücklauftemperatur unkontrolliert angehoben wird
- Einige wichtige Hinweise zur Anpassung bestehender Schaltungen gibt Kasten 75.

Parallelschaltung

Die Parallelschaltung (Bild 76) ist die Grundschialtung und für die Mehrheit der Fälle geeignet. Dabei werden das BHKW und der Kessel parallel zum Speicher angeordnet und mit den gleichen Betriebstemperaturen betrieben. Die Vorteile sind:

- Steuerungs- und regelungstechnisch einfach beherrschbar
- Für den Kessel ist eine minimale Laufzeit pro Einschaltung gewährleistet

Die Parallelschaltung hat aber auch Nachteile:

- Der Kessel arbeitet auf den Speicher; mit abnehmendem Wärmebedarf bei Aussentemperaturen um den Bivalenzpunkt resultiert deshalb ein Laufzeitverlust für das BHKW
- Bei zu hoher Ausschalttemperatur des Kessels kann das BHKW infolge Übertemperatur auf Störung gehen

Teilparallelschaltung

Als Variante der Parallelschaltung ist die Teilparallelschaltung möglich (Bild 77). Beim Einsatz von 2 Speichern ist gegenüber der Parallelschaltung kein Zusatzaufwand nötig. Vorteil: Bei zu hoher Ausschalttemperatur des Kessels wird nur ein Speicher durchgeladen.

Serieschaltung

Bei der Serieschaltung (Bild 78) arbeitet nur das BHKW auf den Speicher. Der Kessel wird in Serie im Vorlauf zu den Wärmebezügern eingebunden. Dies ergibt folgende Vorteile:

- Mit dem Kessel kann die Hauptvorlauftemperatur höher angehoben werden als die Vorlauftemperatur des BHKW; Voraussetzung dazu ist allerdings, dass die Rücklauftemperatur den für das BHKW zulässigen Wert nicht überschreitet
- Kein Laufzeitverlust für das BHKW mit abnehmendem Wärmebedarf bei Aussentemperaturen um den Bivalenzpunkt

Dem stehen folgende Nachteile gegenüber:

- Hydraulisch, steuerungs- und regelungstechnisch anspruchsvoller als die Parallelschaltung
- Kurze Laufzeit des Kessels bei Aussentemperaturen um den Bivalenzpunkt

Speicher

Der Speicher garantiert eine minimale Laufzeit des BHKW's und er dient als hydraulische Entkopplung zwischen Wärmeerzeuger und Wärmeabgabe. Zusätzlich wird er zur übergeordneten Steuerung der Wärmeerzeuger verwendet. Dies erfordert eine gute Schichtung. Damit sich diese einstellt und auch erhalten bleibt, müssen folgende Dimensionierungsgrundsätze eingehalten werden:

- Verhältnis Höhe zu Durchmesser grösser als 2,5
- Tiefe Eintritts- und Austrittsgeschwindigkeiten (d.h. grosse Anschlussquerschnitte)
- Einbauten für gleichmässige Verteilung des einströmenden Wassers (Sprührohr, Lochblech usw.)
- Alle Anschlüsse einwandfrei isolieren und Wärmedämmung gut anliegend montieren (verhindert eine Umschichtung durch Konvektion an der Speicherinnenseite)

Der Übergang zwischen dem wärmeren Vorlaufwasser (z. B. 80°C) und dem kälteren Rücklaufwasser (z. B. 50°C) kann in einem teilweise geladenen Speicher nicht schlagartig passieren. Zwischen diesen beiden Zonen ergibt sich eine mehr oder weniger grosse Mischzone, in welcher die Temperaturänderung stetig verläuft. Je besser der Speicher konstruiert ist, desto kleiner ist diese Mischzone.

Ein- und Ausschaltwerte

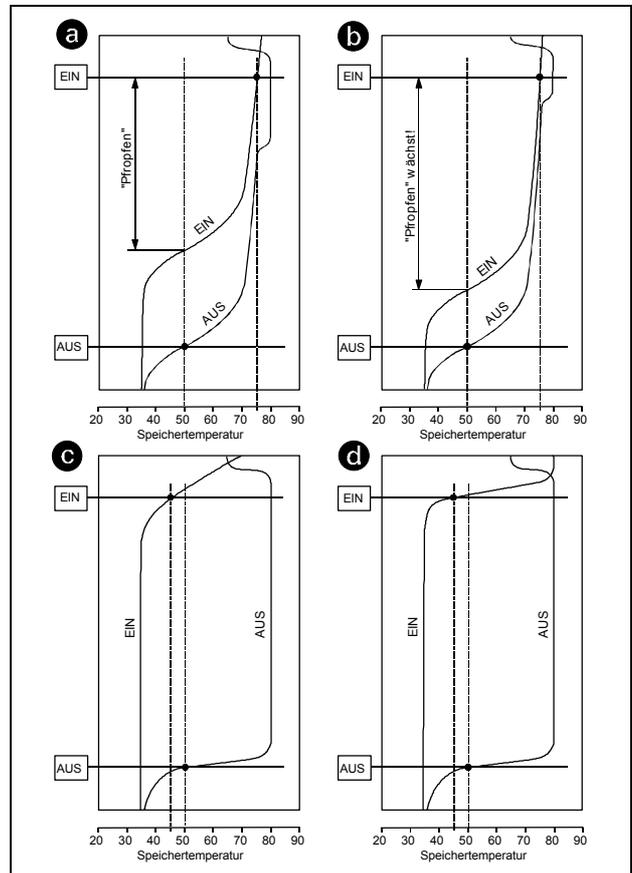


Bild 79: Falsche Einstellung (a, b) und richtige Einstellung (c, d) der Ein- und Ausschaltwerte (siehe Text)

Die Werte für die Ein- und Ausschaltung des BHKW's werden oft nach falschen Kriterien eingestellt:

- EIN, wenn Speichertemperatur tiefer als Speicherladedetemperatur, z. B. $\vartheta_{\text{EIN}} = 75^\circ\text{C}$
- AUS, wenn Speichertemperatur zulässige BHKW-Eintrittstemperatur überschreitet, z. B. $\vartheta_{\text{AUS}} = 50^\circ\text{C}$

Dabei wird aber übersehen, dass mit diesen Einstellungen ein «Pfropfen» mit Speicherwasser zwischen 50°C und 75°C nicht aus dem Speicher abgeführt werden kann. Dies führt, vor allem bei kleiner Last, zu folgender Störung:

- Wenn der teilweise gefüllte Speicher nur geringfügig auf 75°C auskühlt, schaltet das BHKW ein und – je nach «Pfropfengrösse» – nach relativ kurzer Laufzeit wieder aus (Bild 79a).
- Durch das kältere Nachlaufwasser und/oder weitere Auskühlung schaltet das BHKW schon bald wieder ein und nach kurzer Laufzeit wieder aus (Bild 79b). Der «Pfropfen» wird immer grösser, und die Zeitintervalle immer kürzer und kürzer – das BHKW taktet!

Wenn die Einstellregeln gemäss Kasten 80 befolgt werden, passiert dies nicht: Der Speicher wird sauber durchgeladen, der «Pfropfen» mit Wasser unter 45°C wird ausgestossen (Bild 79c), und das Speichervolumen wird optimal genutzt (Bild 79d). Kasten 81 zeigt die Berechnung für das Fallbeispiel.

Getrennte Speicheranschlüsse

In heiklen Fällen (BHKW mit Umluftwärmepumpe) ist es ratsam, den Rücklaufeintritt der Verbraucher und den Austritt zum BHKW im Speicher getrennt anzuordnen (z. B. Rücklauf Verbraucher mit Sprührohr auf 1 m Höhe und Rücklauf BHKW mit Rohrbogen ganz nach unten geführt). Das Volumen zwischen den beiden Eintritten führt zu einer «Glättung» der Temperatur im Rücklauf zum BHKW. Mit dieser Anordnung können jedoch nur kurzfristige Überschreitungen der zulässigen Rücklauftemperatur abgefangen werden.

Intervallbetrieb der Fernleitung

Insbesondere bei Nahwärmesystemen mit wenig Verbrauchern (5...10) möchte man die Fernleitung zur Reduktion der Verluste im Sommer so wenig wie möglich in Betrieb nehmen (1- bis 2mal im Tag). Bei dieser Betriebsweise muss man sich aber bewusst sein, dass sich nach jedem Abstellen der Fernleitungspumpe das Wasser im Vorlaufrohr bis zur nächsten Einschaltung soweit abkühlt, dass es nicht mehr für die Wassererwärmung genutzt werden kann (Wassererwärmer

Einstellregeln für die Ein- und Ausschaltwerte

Damit der in Bild 79 beschriebene «Pfropfen» nicht entsteht, muss eine erste Regel eingehalten werden:

$$\vartheta_{\text{EIN}} \leq \vartheta_{\text{AUS}}$$

Die Ausschalttemperatur ϑ_{AUS} ist durch die maximal zulässige BHKW-Eintrittstemperatur $\vartheta_{\text{BHKW,E,MAX}}$ begrenzt (speziell mit Umluftwärmepumpe), also gilt:

$$\vartheta_{\text{AUS}} \leq \vartheta_{\text{BHKW,E,MAX}}$$

Damit auf der Wärmenutzungsseite ein «Leerdurchgang» auf Rücklaufstemperaturniveau sicher verhindert wird, muss die Einschalttemperatur ϑ_{EIN} mindestens so hoch wie die maximale Rücklauftemperatur $\vartheta_{\text{RL,MAX}}$ sein. Deshalb gilt weiter:

$$\vartheta_{\text{EIN}} \geq \vartheta_{\text{RL,MAX}}$$

Im ungünstigsten Fall kann damit eine relativ tiefe Vorlauftemperatur knapp über ϑ_{EIN} auftreten, was sich aber normalerweise nicht störend auswirkt, weil es im regulären Betrieb kaum vorkommt (Vorsicht allenfalls bei Lüftung ohne WRG und bei Wassererwärmung).

Kasten 80

würden ausgekühlt). Dieses Problem kann wie folgt gelöst werden:

- Selbstregelnde elektrische Begleitbandheizung für das Vorlaufrohr (bei kleineren Anlagen)
- Ausstossen des zu kalten Vorlaufwassers in den Rücklauf, bis eine genügend hohe Vorlauftemperatur bei den Wassererwärmern ankommt (Achtung: das ausgestossene Wasser kann eine Temperatur haben, welche über der zulässigen Eintrittstemperatur der BHKW-Anlage liegt)

➔ Falls ein Intervallbetrieb der Fernleitung realisiert wird, sind Massnahmen zu ergreifen, welche es erlauben, eine beschränkte Menge Rücklaufwasser mit erhöhter Temperatur ohne Betriebsstörungen aufzunehmen (siehe Abschnitt «Getrennte Speicheranschlüsse»).

Wassererwärmung

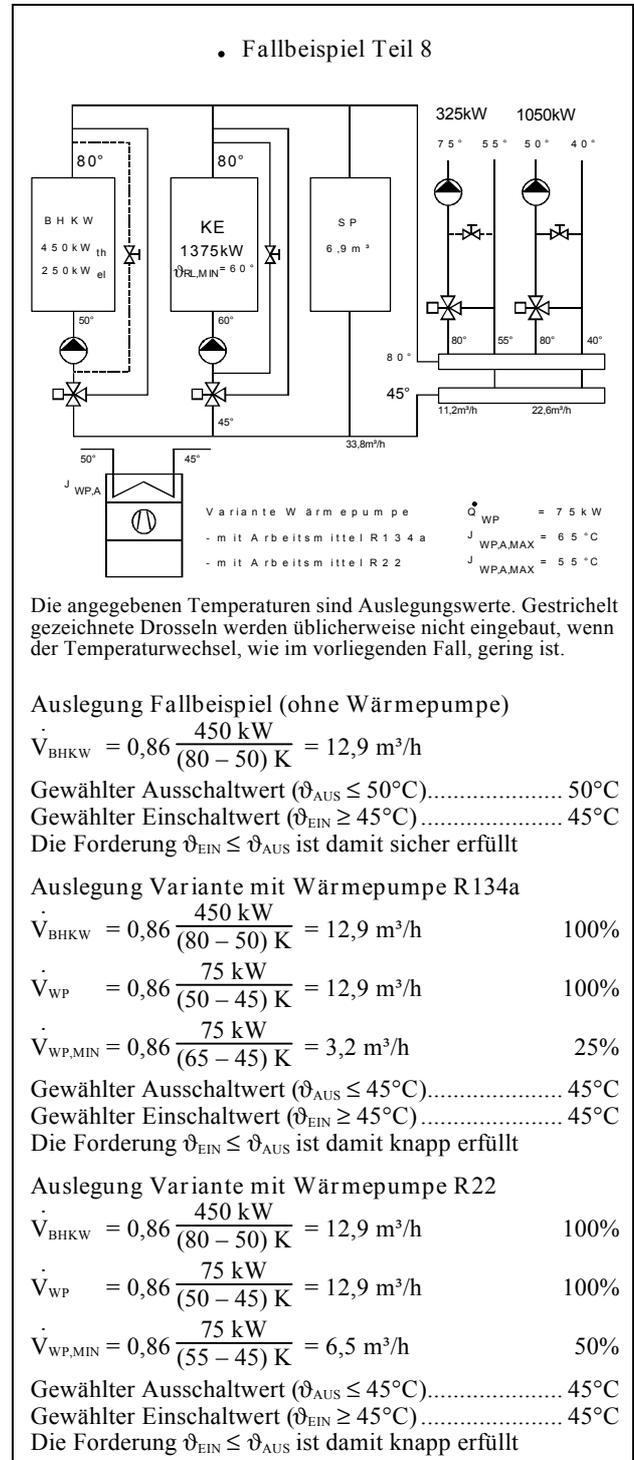
Sofern eine tiefe Rücklauftemperatur (z.B. Umluftwärmepumpe) zwingend notwendig ist, führt die Wassererwärmung immer wieder zu Problemen. Ein innenliegendes Heizregister kann die Forderung nach einer tiefen Rücklauftemperatur nicht einhalten. Ein Ladesystem mit externem Wärmetauscher (Plattenwärmetauscher) ist zwingend. Dabei ist auf eine richtige Auslegung zu achten (z. B. 30/60°C auf der Sekundärseite).

Abgaskondensation

Die Einbindung des Abgas-Kondensationswärmetauschers erfolgt in Serie zum BHKW vor dem Ventil der Laderegelung (Bild 82). Durch die Anordnung im kalten Rücklaufwasser wird die Wärmerückgewinnung maximal.

Umluftwärmepumpe

Beim Einsatz einer Umluftwärmepumpe zur Rückgewinnung der Strahlungsabwärme des BHKW's (Bild 83) muss die maximale Rücklauftemperatur zwingend eingehalten werden. Grosse Beachtung muss dem Ein- und Ausschalten geschenkt werden. Beim Einschalten des BHKW's darf die Wärmepumpe erst in Betrieb gesetzt werden, wenn ein Minimaldurchfluss durch den Verfüssiger sichergestellt ist.



Kasten 81

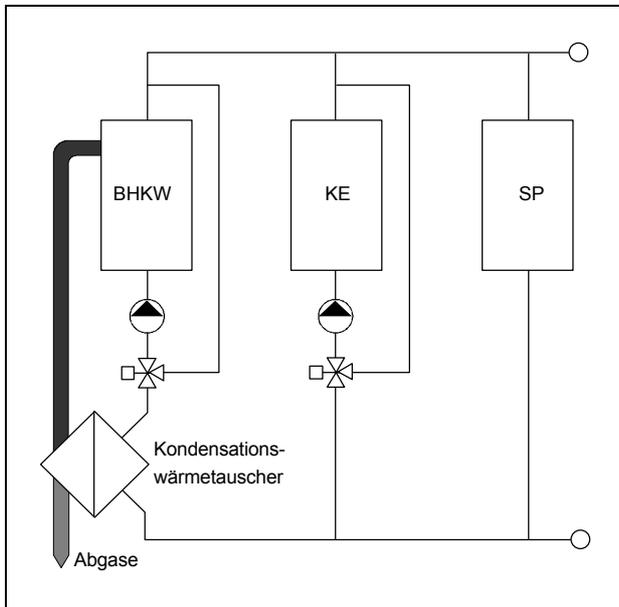


Bild 82: Abgaskondensation

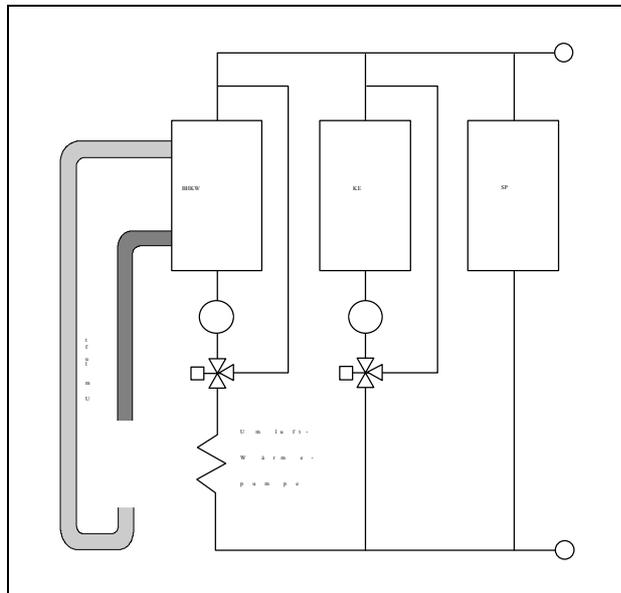


Bild 83: Umluftwärmepumpe

Beim Ausschalten des BHKW's ist ein Nachlauf der Wärmepumpe notwendig, damit die Restwärme noch abgeführt wird (etwa 10 Minuten). Dazu muss im unteren Bereich des Speichers ein entsprechendes «Nachlaufvolumen» freigehalten werden. Das heisst, der Ausschaltfühler darf nicht zuunterst im Speicher plaziert werden. Das Regelventil der Laderegelung geht allmählich zu, und der Durchfluss durch die Wärmepumpe sinkt. Die Wärmepumpe wird abgeschaltet, wenn der maximal zulässige Verflüssigungsdruck erreicht ist. Sind längere Nachlaufzeiten erforderlich, kann durch eine auf das Regelventil wirkende Verflüssigungsdruckregelung konstant mit maximal möglicher Ladetemperatur gefahren werden. In jedem Falle muss genau untersucht werden, wie weit ein Absinken der Ladetemperatur zulässig ist. Komplizierte Lösungen mit Nachlaufpumpe und separaten Leitungen zum Speicher sollten nur in Ausnahmefällen verwendet werden.

In Kasten 81 sind, neben dem Fallbeispiel, auch Varianten für Umluftwärmepumpen mit Arbeitsmittel R134a und R22 berechnet worden. R134a hat gegenüber R22 den Vorteil, dass mit einer höheren maximalen Verflüssigeraustrittstemperatur von 65°C und mit einem tieferen Minimaldurchfluss von 25% gefahren werden kann (R22: 55°C und 50%).

5.4 Elektrische Einbindung

Einspeisung und Messung

Grundsätzlich können Blockheizkraftwerke netzparallel oder im Inselbetrieb betrieben werden. Normalerweise wird eine Anlage netzparallel betrieben; nur wenn sie bei Netzausfall als Notstromgruppe benötigt wird, läuft sie im Inselbetrieb.

Bei Netzparallelbetrieb stellt sich die Frage, wie die produzierte Elektrizität eingespeist werden soll. Da der Betreiber dem Elektrizitätswerk für die bezogene Elektrizität meist mehr bezahlt als ihm dieses für die Rücklieferung vergütet, wird er in erster Linie seinen Eigenbedarf decken und nur die überschüssige Elektrizität (falls vorhanden) ins Netz zurückliefern (Bild 84).

Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- Dieses Messprinzip kann grundsätzlich nur dann angewendet werden, wenn der Betreiber der Wärmekraftkopplungsanlage juristisch dieselbe Partei ist wie der Verbraucher. Ist dies nicht der Fall, muss beim betreffenden Werk abgeklärt werden, ob der Betreiber als einziger Bezüger gegenüber dem Werk auftreten und den Verbrauchern die bezogene Elektrizität verrechnen kann. Sonst muss eine vollständige Rücklieferung der produzierten Elektrizität ans Netz erfolgen (Bild 85).
- Die vom Generator produzierte Elektrizität muss in jedem Fall gemessen werden (für die Elektrizitätsstatistik). Das Werk bestimmt, ob dafür ein Privatähler oder ein Werkzähler eingesetzt werden muss.
- Damit Netzausfälle zuverlässig und schnell erkannt werden, wird der Generator mit einem Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) von 0,92 bis 0,95 (induktiv) betrieben (bei Synchron- und bei Asynchrongeneratoren, vgl. Tabelle 86). Dies bewirkt, dass die bezogene Blindleistung im Verhältnis zur Wirkleistung steigt.

Sicherheitseinrichtungen

Bei Netzstörungen oder Netzausfall muss das BHKW unverzüglich vom Netz getrennt werden. Ist es für Notstrombetrieb ausgerüstet, läuft es weiter und versorgt die Notstromverbraucher (Inselbetrieb). Der Generator ist über einen Generatorschalter sowie einen Kuppelschalter mit dem Netz verbunden. Damit bei Netzbauarbeiten gefahrlos gearbeitet werden kann, ist eine dem Werk zugängliche Trennstelle nötig. Zum Schutz von Personen und Sachen sind Massnahmen zu treffen (z.B. bei Netzausfall, Spannungs- und Frequenzänderungen, Kurzunterbrechungen, Zu- und Abschalt-

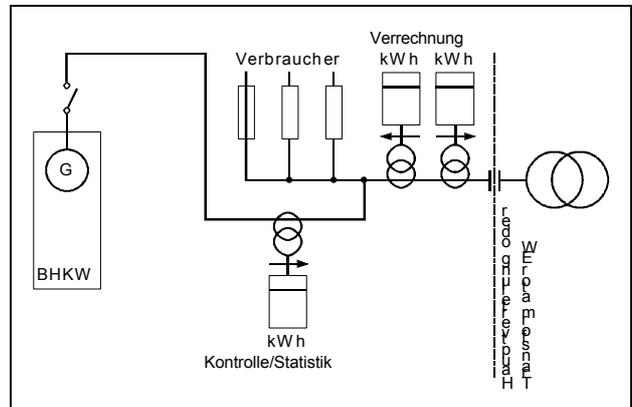


Bild 84: Deckung des Eigenbedarfs und Rücklieferung des Überschusses ins Netz.

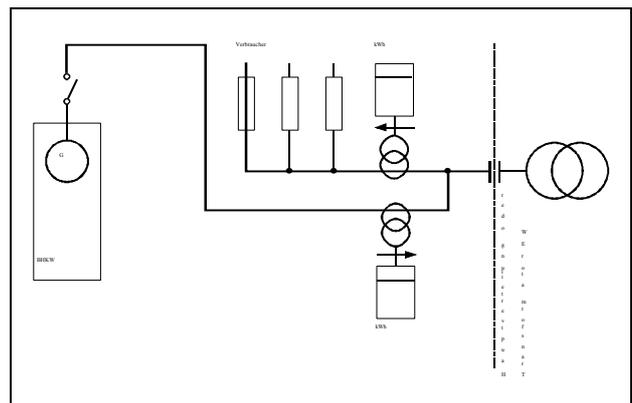


Bild 85: Vollständige Rücklieferung der produzierten Elektrizität ins Netz

	Synchron-generator	Asynchrongenerator
Einsatzbereich	Alle Leistungen	Bis 100 kW _{el}
Leistungsfaktor	Beliebig wähl- und regelbar, kapazitiv oder induktiv	Unkompensiert 0,75...0,8 kompensiert 0,92...0,95 induktiv
Synchronisierung	Nötig	Nicht nötig
Inselbetrieb, Notstrombetrieb	Möglich	Nicht möglich
Wirtschaftlichkeit	Ab 100 kW _{el}	Bis 100 kW _{el}

Tabelle 86: Synchron- und Asynchrongenerator

Sicherheitseinrichtungen

Bei spannungslosem Netz darf keine Zuschaltung des Kuppelschalters an das Netz erfolgen (Verriegelung). Es wird eine Entkopplungseinrichtung verlangt, die den Kuppelschalter unverzüglich auslöst:

- Minimal- und Maximal-Spannungszeitrelais, dreiphasige Überwachung ($\pm 10\%$, Auslösungszeit 0,1...0,3 Sekunden)
- Frequenzrelais für Unter- und Überfrequenz ($\pm 1\%$, Auslösungszeit 0,1...0,3 Sekunden)

Auf den Generatorschalter müssen folgende Schutzfunktionen wirken:

- Überlastungsschutz
- Kurzschlusschutz, der Generatorschalter muss in der Lage sein, sowohl vom Generator als auch vom Netz gespeisene Kurzschlüsse abzuschalten (Auslösungszeit $< 0,15$ Sekunden)
- Maximalspannungsschutz
- Rückleistungsschutz (fakultativ zum Schutz der Maschine, Auslösungszeit 0,1...0,3 Sekunden)

Vermeidung störender Rückwirkungen auf das Netz (Einsatz entsprechender Schwungmassen zur Vermeidung möglicher «Flicker» beim Antrieb von Generatoren mit Kolbenmaschinen).

Kasten 87: Sicherheitseinrichtungen

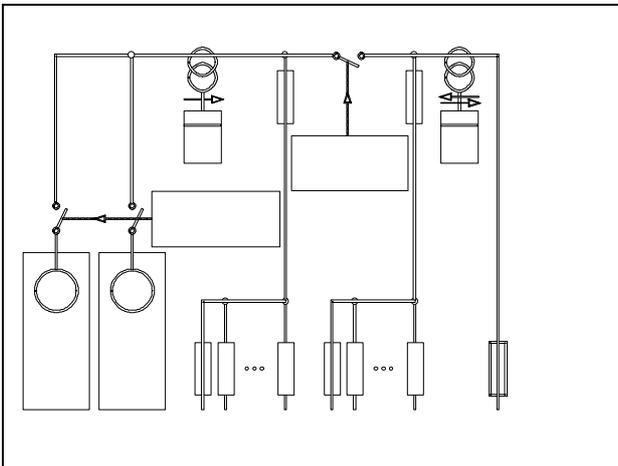


Bild 88: Prinzipschema Sicherheitseinrichtungen

tung der Generatoren, Oberwellen, Blindleistungskompensation). Weitere Hinweise geben Kasten 87, Bild 88 und Kasten 89.

Bei Anlagen ohne Notstrombetrieb kann der Generatorschalter die Funktion des Kuppelschalters übernehmen, es ist deshalb nur ein Schalter nötig.

Notstromversorgung

Wird eine BHKW-Anlage zur Notstromversorgung eingesetzt, so sind die folgenden Punkte zu beachten:

- Die Brennstoffversorgung (Erdgas, Dieselöl) muss bei Netzausfall (gegebenenfalls auch bei Brandausbruch) gewährleistet sein.
- Der Generator muss Wirk- und Scheinleistung der angeschlossenen Notstromverbraucher liefern können. Je nach Spezifikationen sind kurzzeitige Überlastungen zulässig (10-Minuten-Bereich).
- Die Bereitschaftszeit des BHKW's (Startbefehl bis Notstrombereitschaft) muss den Anforderungen der Notstromverbraucher entsprechen.
- Das BHKW braucht einen Batterie-Anlasser.
- Das BHKW braucht eine Notkühlung. Diese muss unabhängig sein vom Heizsystem (zusätzlicher Luftkühler oder Trinkwasserkühler im Motorkühlwasserkreislauf).
- Je nach Anforderung der Notstromverbraucher ist bei Netzzurückkehr eine unterbrechungsfreie Rücksynchronisation der Notnetzspannung auf die Netzspannung nötig.

5.5 Steuerung und Regelung

Steuerungsprinzip

Solange der Wärmeleistungsbedarf des Objektes größer ist als die BHKW-Leistung, ist das BHKW als Grundlastdeckung im Dauerbetrieb, und die zusätzlich notwendige Leistung wird vom Spitzenheizkessel übernommen (Bild 90).

Wenn der Wärmeleistungsbedarf des Objektes geringer ist als die BHKW-Leistung, wird das BHKW in Abhängigkeit des Speicherladungszustandes ein- und ausgeschaltet. Durch Einbezug weiterer Steuerungskriterien (Tarifzeit usw.) kann eine eigentliche Speicherbewirtschaftung erfolgen.

Aufbau der Steuerung

Grundsätzlich muss zwischen BHKW-Steuerung und der übergeordneter Steuerung unterschieden werden. Wichtig ist die systematische Trennung dieser beiden Funktionen (hard- und softwaremässig). Die BHKW-Steuerung ist für die Funktion des BHKW-Aggregats verantwortlich (Kühlwasser, Abgaskatalysator, elektrische Leistung, Netzüberwachung usw.). Die Planerin oder der Planer legt die notwendigen Randbedingungen fest, und die Steuerung wird dann vom BHKW-Lieferanten als Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) realisiert. Die übergeordnete Steuerung ist anlagespezifisch und muss von der Planerin oder dem Planer festgelegt werden (vgl. auch Kasten 91). Sie beinhaltet folgende Funktionen:

- Zu- und Wegschaltbefehle für BHKW und Kessel (ggf. Kessel-Stufenschaltung)
- Freigabe bzw. Sperrung über Tarifzeiten
- Reserve für Morgenaufheizung

Folgende Punkte sind sowohl bei der BHKW-Steuerung wie bei der übergeordneten Steuerung wichtig:

- Einfaches Konzept
- Klare Schnittstellen
- Vollständige Dokumentation
- Änderungen an den Betriebsparametern müssen jederzeit ohne aufwendige Softwareanpassungen möglich sein

Dynamische Effekte

Unbeabsichtigte dynamische Effekte (z. B. Takten) treten vor allem auf, wenn die BHKW-Wärmeleistung gleich gross oder grösser ist als der Wärmeleistungsbedarf des Objektes, also in der Übergangszeit und im Sommer. Beim Entwurf der Steuerung muss deshalb speziell den schwer vorhersehbaren dynamischen Effekten Rechnung getragen werden.

5.6 Instrumentierung

Für eine einwandfreie Qualitätssicherung mit Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle sind folgende Zähler notwendig:

- Brennstoffzähler BHKW
- Betriebsstundenzähler BHKW
- Startimpulszähler BHKW
- Elektrozähler BHKW
- Wärmezähler BHKW
- Brennstoffzähler Spitzenkessel
- Betriebsstundenzähler Spitzenkessel

SEV Normen



Bezüglich der Netzurückwirkungen in den Stromversorgungsnetzen gelten folgende Normen:

- SEV/EN 50006
- SEV 3600-1
- SEV 3600-2
- SEV 3601-1/2/3

(Bezugsquelle: SEV, Seefeldstrasse 301, Postfach, 8034 Zürich)

Kasten 89

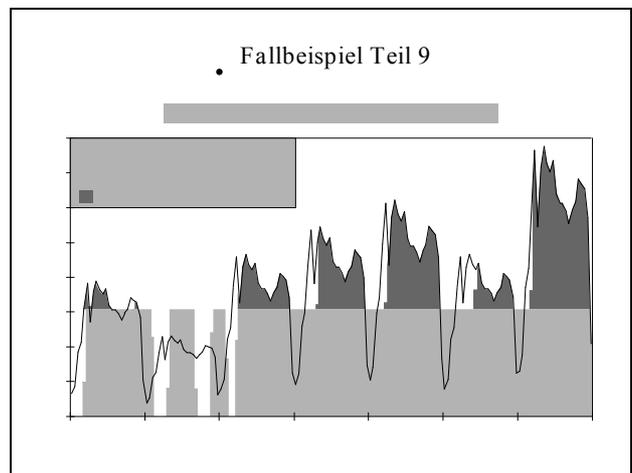


Bild 90: Fallbeispiel Teil 9 – Tagesgang Wärmeerzeugung und Wärmebezug

Gebäudeleitsysteme

In grösseren Objekten sind oft Gebäudeleitsysteme vorhanden oder vorgesehen. Bezüglich Wärmekraftkopplungsanlagen müssen folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Ein Leitsystem eignet sich gut zur Übernahme der Funktion der übergeordneten Steuerung und für die Verarbeitung und Weiterleitung von Stör- und Warnmeldungen
- Die BHKW-Steuerung muss zwingend durch eine selbständige, durch den BHKW-Lieferanten zu erstellende SPS realisiert werden
- Die BHKW-Steuerung soll so ausgerüstet (oder zumindest vorbereitet) werden, dass sämtliche relevanten Daten über eine serielle Schnittstelle an ein Gebäudeleitsystem übergeben werden können

Kasten 91

- Startimpulszähler Spitzenkessel

Damit allenfalls temporäre Messungen mit automatischer Datenaufzeichnung durchgeführt werden können, ist darauf zu achten, dass nur Zähler mit Impulsausgang mit sinnvoller Auflösung eingesetzt werden (bedeutungsloser Mehrpreis). Alle Zähler müssen mechanische Zählwerke oder batteriegestützte LCD-Anzeigen haben (Datensicherheit).

Auf den BHKW-Wärmezähler wird oft mit der Begründung verzichtet, dass die Wärmezählertoleranz keine zuverlässige Bestimmung des Nutzungsgrades erlaube. Dem muss aber entgegengehalten werden, dass ein Wärmezähler eichfähig ist – ganz im Gegensatz zu einem BHKW.



Grundsätzlich soll der Bauherr entscheiden – und nicht der Planer! –, ob er auf den BHKW-Wärmezähler als Mittel zur Qualitätssicherung und Betriebsüberwachung verzichten will. Hauptzweck des BHKW-Wärmezählers ist die laufende Kontrolle der Wärme- und Energiebilanz. Bei der Bestimmung der BHKW-Nutzungsgrade aus Gasverbrauch, Elektrizitäts- und Wärmeproduktion muss unbedingt beachtet werden, dass Messwerte immer mit den Toleranzen der Messgeräte behaftet sind!

Wichtige Messstellen müssen mit Analog-Anzeigeelementen ausgerüstet sein:

- Öldruck Motor
- Kühlwassertemperatur Motor
- Abgastemperatur (nach Wärmetauscher)
- Ein- und Austrittstemperatur BHKW
- Rücklauf- und Austrittstemperatur vor Laderegelventil
- Ein- und Austrittstemperatur Spitzenkessel
- Speichertemperatur (oben, Mitte, unten)
- Hauptvorlauf- und Hauptrücklauf- und Hauptabgabetemperatur des Wärmeabgabesystems

Für den temporären Einsatz von Messgeräten sind vorbereitete Messpunkte vorzusehen (Drosselventile mit Druckdifferenzmessung für den hydraulischen Abgleich, Passstücke, Tauchrohre usw.).



6. Betrieb

6.1 Einfluss auf Wirtschaftlichkeit

Der Erfolg einer Wärmekraftkopplungsanlage besteht nicht allein darin, «dass es warm wird», sondern, dass die Wirtschaftlichkeit der Anlage den Erwartungen entspricht. Die Wirtschaftlichkeit ihrerseits ist stark von der erreichten Betriebsstundenzahl abhängig. Neben der richtigen Dimensionierung und einer gewissenhaften Betriebsoptimierung der Anlage können Betriebsausfälle infolge von Störungen die jährliche Betriebsstundenzahl wesentlich beeinflussen. Um Anzahl und Dauer der Betriebsstörungen klein zu halten, sind folgende Massnahmen nötig:

- Regelmässige Wartung der Wärmekraftkopplungsanlage
- Rasches Eingreifen nach Auftreten einer Betriebsstörung; dies wird ermöglicht durch regelmässige Kontrollgänge oder indem die Störmeldung an ein Leitsystem, ein System zur Fernüberwachung oder an den Pikettdienst des Anlagebetreibers oder der Servicefirma weitergeleitet wird
- Führen einer Betriebsausfallstatistik; tritt die gleiche Störung mehrmals auf, ist deren Ursache detailliert abzuklären

6.2 Wartung

Wenn nicht auf betriebseigenes Personal mit entsprechender Ausbildung in Motoren- und Regelungstechnik zurückgegriffen werden kann, ist es ratsam, einen Wartungsvertrag mit der Wärmekraftkopplungsanlage-Lieferfirma abzuschliessen. Da grössere Revisionsarbeiten erst bei 15'000...30'000 Betriebsstunden anfallen, sollte ein langfristiger Vertrag über mindestens 5 oder – besser! – 10 Jahre abgeschlossen werden. Der Wartungsvertrag muss gleichzeitig mit dem Kauf- oder Werkvertrag abgeschlossen werden.

Die Lieferanten von BHKW-Anlagen bieten einen Vollwartungsvertrag auf Basis eines vom WKK-Fachverband herausgegebenen Mustervertrages an. Der Vollwartungsvertrag beinhaltet sämtliche Leistungen, welche für den Betrieb der Anlage nötig sind. Je nach Vereinbarung mit dem Lieferanten ist auch die Generalrevision des Motors eingeschlossen.

Die Lieferanten bieten auch Teilwartungsverträge an, bei welchen gewisse Leistungen (im Vertrag zu vereinbaren) durch den Betreiber selbst erbracht oder nach Aufwand dem Lieferanten vergütet werden.

Die wichtigsten Unterschiede zwischen Voll- und Teilwartungsvertrag zeigt Kasten 92. Die Wartungsko-

Voll- oder Teilwartungsvertrag?

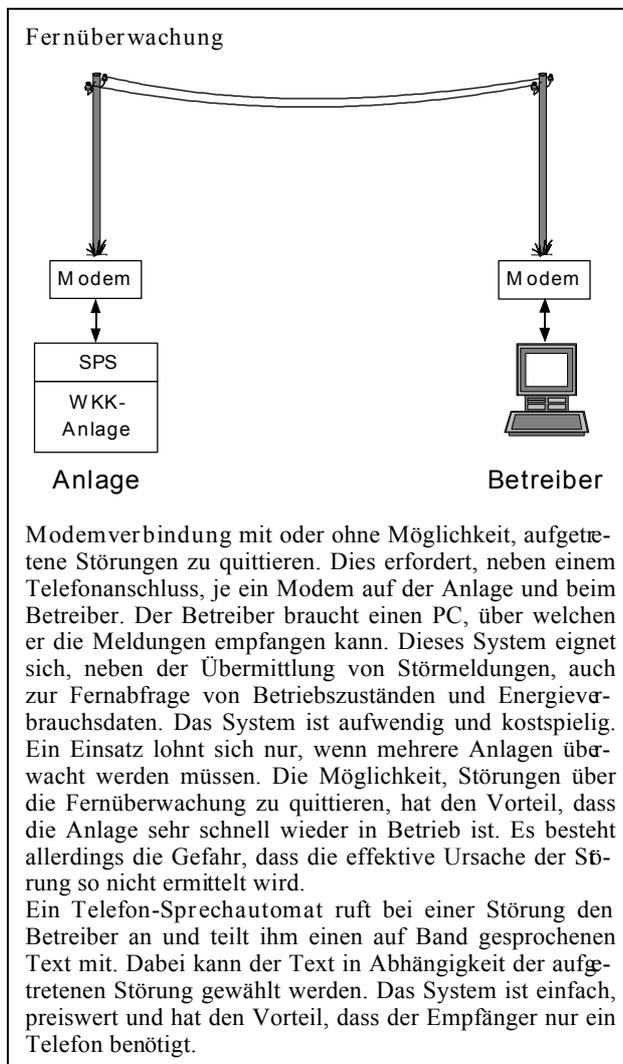
Der Leistungsumfang eines Vollwartungsvertrags umfasst:

- Arbeit und Ersatzteile für Wartungsarbeiten
- Arbeit und Ersatzteile für Teilrevisionen
- Nach spezieller Vereinbarung auch Arbeit und Material für Generalrevision oder Motorersatz
- Ersatzkatalysator (falls vorhanden)
- Schmierölversorgung und dessen Entsorgung
- Maschinenbruchversicherung
- Garantie für Betriebstauglichkeit

Beim Teilwartungsvertrag können folgende Leistungen ausgeschlossen werden:

- Arbeit und Ersatzteile für Wartungsarbeiten
- Arbeit und Ersatzteile für Generalrevision oder Motorersatz
- Ersatzkatalysator (falls vorhanden)
- Schmierölversorgung und dessen Entsorgung
- Maschinenbruchversicherung
- Garantie für Betriebstauglichkeit

Kasten 92



Kasten 93

sten bei Abschluss eines Vollwartungsvertrages sind tendenziell eher höher als bei Abschluss eines Teilwartungsvertrages plus zusätzlichen Rückstellungen für die ausgeschlossenen Leistungen, dafür liegt das finanzielle Risiko (Gewinn oder Verlust) beim Betreiber.

6.3 Betriebsüberwachung

Grundsätzlich werden Blockheizkraftwerke für den vollautomatischen Betrieb ausgerüstet. Für jede Anlage muss jedoch eine betriebsverantwortliche Person bezeichnet werden, die durch den Planer oder die Planerin und den Anlagelieferanten instruiert wird. Diese Person kennt die Anlage, nimmt periodisch Kontrollgänge vor und quittiert Störungen, deren Ursache nicht bei der Wärmekraftkopplungsanlage selbst liegt. In Industrie- oder Dienstleistungsbetrieben kann dies jemand sein, der auch sonst für die haustechnischen Anlagen verantwortlich ist. In Wohnüberbauungen kann diese Aufgabe dem Hauswart oder der Hauswartin übertragen werden.

Bei Anlagen ohne Überwachungspersonal (beispielsweise Heizzentrale mit Nahwärmeverbund) ist eine Fernüberwachung der Anlage empfehlenswert. Der Betreiber der Anlage wird dadurch sofort über den Betriebsausfall informiert. Je nach Anforderungen des Betreibers bestehen unterschiedliche Möglichkeiten der Fernüberwachung (Kasten 93).

6.4 Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle

Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle (Kasten 94) sind ein wichtiger Teil der Qualitätssicherung.

+ Heft 1, Kapitel 6 «Qualitätssicherung im Planungsablauf»

+ Abschnitt 5.6 «Instrumentierung»

Mit Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle werden insbesondere folgende Punkte, die häufig den gestellten Anforderungen nicht genügen, überprüft:

- Übergeordnete Steuerung
- Leistungsdaten der Anlage

Dazu müssen die folgenden Ablesedaten wöchentlich, möglichst immer zum gleichen Zeitpunkt, erfasst werden:

- Brennstoffverbrauch BHKW
- Betriebsstunden BHKW
- Startimpulse BHKW
- Elektrizitätsproduktion BHKW
- Wärmeproduktion BHKW
- Brennstoffverbrauch Spitzenkessel
- Betriebsstunden Spitzenkessel
- Startimpulse Spitzenkessel
- Abgastemperatur nach der Wärmenutzung

Die folgenden Grössen dienen, im Vergleich zu den Auslegungsdaten, zur Beurteilung der Funktion der übergeordneten Steuerung:

- Monatliche Betriebsstunden des BHKW
- Monatliche Startimpulse des BHKW
- Monatliche Betriebsstunden Spitzenkessel
- Monatliche Startimpulse Spitzenkessel

Folgende Grössen dienen, im Vergleich zu den Auslegungsdaten, der Beurteilung der Leistungsdaten der Wärmekraftkopplungsanlage:

- Brennstoffbezugsleistung (Brennstoffbezug pro Betriebsstunde)
- Elektrische Leistung (Elektrizitätsproduktion pro Betriebsstunde)
- Elektrischer Nutzungsgrad (Elektrizitätsproduktion zu Brennstoffbezug)
- Thermischer Nutzungsgrad (Wärmeproduktion zu Brennstoffbezug)
- Abgastemperatur des BHKW

Die Messung der Abgastemperatur dient als Indikator für die thermische Leistung der Wärmekraftkopplungsanlage (analog der Abgastemperatur eines Heizkessels zur Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades). Ist die Abgastemperatur zu hoch, lässt dies auf verschmutzte Wärmetauscher schliessen.

Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle

- Bereits in der Konzeptphase müssen die für die Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle notwendigen Messinstrumente eingeplant werden. In den RAVEL-Standardschaltungen sind die notwendigen Messinstrumente, Tauchhülsen usw. eingezeichnet.

✦ Heft 5 «Standardschaltungen»

- Die Aufzeichnung der notwendigen Betriebsdaten erfolgt am besten wöchentlich (evtl. für eine gewisse Zeit auch täglich) durch den Betreiber auf vorbereiteten Formularen. Dieser sendet die Unterlagen dann monatlich an die Planerin bzw. den Planer, die/der die Daten sofort auswertet und entsprechende Optimierungsschritte veranlasst.
- Bei grösseren und komplexeren Anlagen – und immer wenn Probleme auftreten – ist eine automatische Aufzeichnung mittels Datalogger sinnvoll. Wenn die dafür notwendigen Signale von Anfang an auf eine gut zugängliche Klemmleiste im Schaltschrank geführt werden, hält sich der Aufwand durchaus in vernünftigen Grenzen.
- Eine andere Lösung besteht darin, die (ohnehin bestehende) Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) der Wärmekraftkopplungsanlage mit einem relativ einfachen Messdatenerfassungs- und Auswertungsmodul zu erweitern. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode ist es, dass über die SPS eine Warnung ausgegeben werden kann, wenn gewisse Grenzwerte über- respektive unterschritten werden. Bei einem Objekt mit Gebäudeleitsystem kann die Erfassung der Energiedaten durch dieses erfolgen. In jedem Falle muss ein Abruf der wichtigsten Betriebsgrössen als Datenfile (z.B. ASCII) zur Eingabe in ein Tabellenkalkulationsprogramm möglich sein. Wichtig ist bei Lösungen mit SPS oder Gebäudeleitsystem, dass die Randbedingungen von Anfang an im Pflichtenheft festgehalten werden.
- In der ersten Heizperiode läuft die Anlage oft noch nicht wirklich regulär (unvollständige Nutzung, Bau-austrocknung usw.); wenn möglich ist deshalb eine zwi-jährige Betriebsoptimierungsphase mit abschliessender Erfolgskontrolle anzustreben.
- Die Grenzwerte (Garantiewerte) und Zielwerte (Planungswerte) für die Erfolgskontrolle müssen zuvor in einem Pflichtenheft festgehalten worden sein.

Kasten 94

Benennungen, Formelzeichen, Abkürzungen

Benennungen und Formelzeichen

Ausschalttemperatur [°C].....	ϑ_{AUS}
Blindleistung [var, kvar].....	P_q
Brennstoffleistung.....	\dot{Q}_{BR}
Druck [Pa, kPa].....	p
Druckdifferenz [Pa, kPa].....	Δp
Durchfluss, Massenstrom [kg/s, kg/h].....	\dot{m}
Durchfluss, Volumenstrom [l/s, l/h, m³/h].....	\dot{V}
Einschalttemperatur [°C].....	ϑ_{EIN}
Elektro-Thermo-Verstärkung [-].....	ETV
Energie, allg. [J, MJ, Ws, kWh].....	W
Energiekennzahl [MJ/m²a].....	E
Förderstrom [l/s, l/h, m³/h].....	\dot{V}
Geschwindigkeit [m/s].....	v
Heizwert, oberer [kWh/kg, kWh/m³].....	H_o
Heizwert, unterer [kWh/kg, kWh/m³].....	H_u
hydraulische Leistung [W, kW].....	$P_{\text{hydraul.}}$
Jahresarbeitszahl.....	JAZ
Kosinus Phi, Leistungsfaktor [-].....	$\cos \varphi$
k_v -Wert (Durchflusskoeffizient) [m³/h].....	k_v
Leistung, allg. [W, kW].....	P
Leistung, elektrische.....	P_{el}
Leistung, thermische [W, kW].....	Q
Leistungsfaktor, Kosinus Phi [-].....	$\cos \varphi$
Leistungszahl [-].....	ε
Masse [kg].....	m
Massenstrom [kg/s, kg/h].....	\dot{m}
Nutzungsgrad [-].....	η
Rücklauftemperatur [°C].....	ϑ_{RL}
Scheinleistung [VA, kVA].....	P_s
Spannung [V].....	U
Spez. Wärmekapazität [J/kgK, kWh/kgK].....	c
Strom [A].....	I
Stromkennzahl [-].....	s
Temperatur [°C].....	ϑ
Temperatur, absolut [K].....	T
Temperaturdifferenz [K].....	$\Delta\vartheta, \Delta T$
Volumen [l, m³].....	V
Volumenstrom [l/s, l/h, m³/h].....	\dot{V}
Vorlauftemperatur [°C].....	ϑ_{VL}
Wärmeleistung, allg. [W, kW].....	Q
Wärmemenge, allg. [J, MJ, Ws, kWh].....	Q
Wärmestrom [W, kW].....	Q
Widerstand [Ω].....	R
Wirkleistung [W, kW].....	P
Wirkungsgrad, allg. [-].....	η
Wirkungsgrad, elektrischer [-].....	η_{el}
Wirkungsgrad, thermischer [-].....	η_{th}
Zeit [s, h].....	t

Abkürzungen (auch als Indizes verwendet)

Abwärmennutzung.....	AWN
Blockheizkraftwerk.....	BHKW
Brennstoff.....	BR
elektrisch.....	el
Elektro-Thermo-Verstärker.....	ETV
Energiebezugsfläche.....	EBF
Energienutzungsbeschluss.....	ENB
Energienutzungsverordnung.....	ENV
Kessel.....	KE
Luftreinhalteverordnung.....	LRV
Maximalwert.....	MAX
Minimalwert.....	MIN
Nennwert.....	N
Rücklauf.....	RL
Speicher.....	SP
thermisch.....	th
Total.....	TOT
Total-Energie-Anlage.....	TEA
Vorlauf.....	VL
Wärmeleistung.....	WKK
Wärmepumpe.....	WP
Wärmerückgewinnung.....	WRG
Warmwasser.....	WW

+ Vollständiges Verzeichnis in Heft 1!

Index

- Abgaskondensation 10; 43; 48
Abgasreinigung 7
Abkürzungen 58
Adressen 56
Anfahr-Emissionen von Gasmotor-BHKW's 37
Annuitätsfaktor 31; 32
Anschlussbeitrag 21
Arbeitspeis 21
Asynchrongenerator 49
Aufstellung 40
Ausführungsplanung 40
Auslegung 22
Baukontenplan 31
Begriffe 5
Benennungen 58
Betrachtungszeitraum 31
Betrieb 53
Betrieboptimierung 40; 54; 55
Betriebsüberwachung 54
Bewertungsfaktoren 38
Blockheizkraftwerk 6
Blockheizkraftwerk (Begriffsdefinition) 5
Brennstoffe 17
Brennstoffleistung 5
Brennstoffzelle 12
Computerprogramm 27; 28
Dampfeinspritzung 37
Dampfkessel 18
Deponiegas 18
Detailauslegung 22; 26
Detaildimensionierung 26
Dienstleistungsbereich 13
Dieselmotor-Blockheizkraftwerk 7; 12; 20
Dieselmotor-Wärmepumpe 9
Dimensionierung 22
Dreiwegkatalysator 6; 37
dynamische Effekte 51
Ein- und Ausschaltwerte 46
Einheiten 58
Einsatzbereiche 13
Einsatzmöglichkeiten 13
Einspeisung 49
Einstellregeln für die Ein- und Ausschaltwerte 46
elektrische Einbindung 49
elektrische Leistung 5
Elektrizitätsgestehungskosten 24; 25; 30
Elektro-Thermo-Verstärker 5
Emissionsfaktoren 38
Emissionsgenzwerte 20
Empfehlungen 19
Energiebilanz 29
Energieflussdiagramm 29
Energiegesetze 19
Energiekennlinie 28
Energiekonzept 15
Energiekosten 32
Energielieferverträge 20
Energienutzungsbeschluss 19
Energienutzungsverordnung 19
Energiepreissteigerung 32
energetische Daten 27; 28; 29
Erdgas 17; 20; 41
Erfolgskontrolle 40; 54; 55
erneuerbare Energie 19
Fahrzeugmotor 5
Fallbeispiel Teil 1 23
Fallbeispiel Teil 2 26
Fallbeispiel Teil 3 29
Fallbeispiel Teil 4 29
Fallbeispiel Teil 5 33
Fallbeispiel Teil 6 35
Fallbeispiel Teil 7 38
Fallbeispiel Teil 8 47
Fallbeispiel Teil 9 51
Faustformeln zur Grobdimensionierung 23
Fernüberwachung 54
Feststoffelektrolyt-Brennstoffzelle 12
Flüssiggas 18; 42
Formelzeichen 58
Gasmotor-Blockheizkraftwerk 5; 20; 24
Gasmotor-Wärmepumpe 9
Gasturbinen 37; 38
Gasturbinen-Blockheizkraftwerk 8; 20; 24
Gesamt-Energiekonzept 39
Gesetze 19
Grobauslegung 22; 23
Grobdimensionierung 23
Grundpreis 21
Heisskühlung 11
Heizkraftwerk 6
Heizöl EL 18; 42
Heizzentrale 40
Holz 18
Holzvergaser 18
hydraulische Einbindung 43
Impulsausgang 52
Indizes 58
Industriebereich 14
Industrie-Gasmotor 5
Inflationsrate 31
Instrumentierung 51
Intervallbetrieb der Fernleitung 47
Jahreskostenbilanz 30
Jahreswärmebedarf 23
Kalkulationszinssatz 31; 32
Kapitalkosten 31
Karbonatschmelze-Brennstoffzelle 12
Katalysator 6
Kennzahlen 5
Klärgas 17
Klein-Blockheizkraftwerk 5; 6
Kohlendioxid-Emission fossiler Brennstoffe 36
Kohlenmonoxid 37
Kohlenwasserstoffe 37
Kombi-Heizkraftwerk 6
Kopiervorlage «Wärmegestehungskosten» 57
Lambda-1-Motor 6
Lärmschutzverordnung 41

- Leistungsdaten 55
- Lieferanten von Wärmekraftkopplungsanlagen 56
- Literaturhinweise 19; 30; 42; 51
- Low-Nox-Brennkammern 37
- Luftreinhalteverordnung 19; 20; 38
- Lüftungsanlage 42
- Machbarkeitsstudie 22; 39
- Magermotor 7
- Methan 37
- Mindestluftwechsel Gasmotor-BHKW's 42
- Mittelwertfaktor 30; 32
- Modem 54
- Netzurückwirkungen 51
- Niederdruckdampf 11
- Notstromanlage 16; 17; 50
- Nutzungsdauer 31
- Parallelschaltung 44
- Phosphorsäure-Brennstoffzelle 12
- Planungsablauf 39
- Planungshinweise 39
- Propan 41
- Qualitätssicherung 51; 54
- Regelung 50
- Rückgewinnung der Strahlungsabwärme 10
- Schadstoffe 37; 38
- Schallschutz 41
- Schmierölversorgung 42
- Selektiv katalytische Reduktion 37
- Sensitivitätsanalyse 26
- Serieschaltung 45
- Sicherheitseinrichtungen 49; 50
- Software 27; 28
- Speicher 35; 43; 45
- spezielle Techniken 10
- spezifische Investitionen 24
- spezifische Wärmegestehungskosten 34
- Spitzenkessel 34
- Standard-BHKW 5
- Steuerung und Regelung 50
- Stickoxide 37
- Stirlingmotor-Blockheizkraftwerk 12
- stromgeführte Wärmekraftkopplungsanlagen 16
- Stromkennzahl 5
- Summenhäufigkeitsdiagramm 28
- Synchrongenerator 49
- Systematik 5
- Teillastbetrieb von BHKW's 35
- Teilparallelschaltung 45
- Teilwartungsvertrag 53
- Telefon-Sprechautomat 54
- thermische Leistung 5
- Total-Energie-Anlage 8
- Trägerschaften 20; 56
- übergeordnete Steuerung 51; 55
- Umluftwärmepumpe 43; 47; 48
- Umweltstrategie 5
- Umweltverträglichkeit 36
- Verbände 56
- Verordnungen 19
- Vollwartungsvertrag 53
- Vorabklärungen 22; 39
- Wärmeabgabe 44
- wärmegeführte Wärmekraftkopplungsanlagen 15
- Wärmegestehungskosten 30; 34; 57
- Wärmekraftkopplung (Begriffsdefinition) 5
- Wärmeleistungsbedarf 23
- Wärmeliefervertrag 21
- Wärmepumpe zur Rückgewinnung der Strahlungsabwärme 10
- Wärmeverbund 14
- Wärmeverkaufsbedingungen 21
- Wartung 53
- Wartungskosten 31; 32
- Wartungsvertrag 53
- Wassereinspritzung 37
- Wassererwärmung 47
- W-CALC (Software) 27
- Wirkungsgrad, elektrisch 5
- Wirkungsgrad, thermisch 5
- Wirtschaftlichkeit 22; 24; 26; 29; 32; 53; 57
- WKK-CALC (Software) 27; 28
- Wohnbereich 13
- WP-CALC (Software) 27
- Zähler 51
- Zweimodulanlagen 41

Anhang

A1 Adressen

Verbände

Schweizerischer Fachverband für Wärme- kraftkopplung (WKK-Fachverband)	Bodenackerstrasse 19 4410 Liestal	Tel: 061 / 922 03 87 Fax: 061 / 921 99 25
Verband der Schweizerischen Gasindustrie (VSG)	Grütlistrasse 44 8027 Zürich	Tel: 01 / 288 31 31 Fax: 01 / 202 18 34
Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)	Bahnhofplatz 3 8023 Zürich	Tel: 01 / 211 51 91 Fax: 01 / 221 04 42

Lieferanten von Wärmekraftkopplungsanlagen

Amman Baumaschinen AG	Energiesysteme 4900 Langenthal	Tel: 063 / 29 61 61 Fax: 063 / 22 68 03
DIMAG Dieselmotoren AG	Bachmatten 5 4435 Niederdorf	Tel: 061 / 951 24 24 Fax: 061 / 951 24 58
Integrale Wärme Kraft AG (IWK)	Bellerivestrasse 35 8022 Zürich	Tel: 01 / 385 24 36 Fax: 01 / 385 25 55
Sauber + Gisin AG	Wildbachstrasse 5 8340 Hinwil	Tel: 01 / 937 22 22 Fax: 01 / 937 46 64
Saurer Thermotechnik AG	Schlossgasse 9320 Arbon	Tel: 071 / 46 92 12 Fax: 071 / 46 67 05
Share Tech AG	Tösstalstrasse 91 8493 Saland	Tel: 052 / 46 17 71 Fax: 052 / 46 32 86
Tuma Turbomach SA	6533 Lumino	Tel: 092 / 29 11 13 Fax: 092 / 29 34 31

Trägerschaften

Elektra Birseck Münchenstein (EBM)	Weidenstrasse 27 4142 Münchenstein	Tel: 061 / 415 41 41 Fax: 061 / 415 46 46
Elektra Baselland (EBL)	Mühlemattstrasse 6 4410 Liestal	Tel: 061 / 926 11 11 Fax: 061 / 921 15 82
Bernische Kraftwerke AG (BEW)	Viktoriaplatz 2 3013 Bern	Tel: 031 / 330 51 11 Fax: 031 / 330 56 35
Centralschweizerische Kraftwerke AG (CKW)	Hirschengraben 33 6002 Luzern	Tel: 041 / 26 51 11 Fax: 041 / 26 50 66
Integrale Wärme Kraft AG (IWK)	Bellerivestrasse 35 8022 Zürich	Tel: 01 / 385 22 11 Fax: 01 / 385 25 55
Schmeik + Schindler AG	Grabenstrasse 8 4142 Münchenstein	Tel: 061 / 415 87 87 Fax: 061 / 415 87 88
Enerplan Invest AG	Rösslimattstrasse 6 6005 Luzern	Tel: 041 / 44 93 70 Fax: 041 / 44 00 70
Arbeitsgemeinschaft für dezentrale Energieversorgung (ADEV)	Oristalstrasse 85 4410 Liestal	Tel: 061 / 921 94 50 Fax: 061 / 922 08 31

A2 Kopiervorlage für die Tabelle «Wärmegestehungskosten»

Objekt:	Basis	Ansatz	Jahreskosten im ersten Betriebsjahr	Mittelwertfaktor	Jahreskosten im Mittel über Betrachtungszeitraum
Betrachtungszeitraum	Jahre				
Kalkulationszinssatz	%				
Kaptialkosten	Investitionen	Annuität			
Nutzungsdauer	Jahre	Fr.	Fr./a	–	Fr./a
Nutzungsdauer	Jahre	Fr.	Fr./a	–	Fr./a
Nutzungsdauer	Jahre	Fr.	Fr./a	–	Fr./a
Nutzungsdauer	Jahre	Fr.	Fr./a	–	Fr./a
Nutzungsdauer	Jahre	Fr.	Fr./a	–	Fr./a
Nutzungsdauer	Jahre	Fr.	Fr./a	–	Fr./a
Total Kapitalkosten	Fr.		Fr./a	–	Fr./a
Energiekosten	Energiedaten	Ansatz			
Gas BHKW					
– Grundpreis	–	Fr.	Fr./a		Fr./a
– Leistungspreis	kW	Fr./kW	Fr./a		Fr./a
– Arbeitspreis Winter	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
– Arbeitspreis Sommer	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
Gas Kessel					
– Grundpreis	–	Fr.	Fr./a		Fr./a
– Leistungspreis	kW	Fr./kW	Fr./a		Fr./a
– Arbeitspreis Winter	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
– Arbeitspreis Sommer	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
Heizöl	t	Fr./t	Fr./a		Fr./a
Elektrizität Bezug (Zentrale)					
– Grundpreis	–	Fr.	Fr./a		Fr./a
– Leistung	kW	Fr./kW	Fr./a		Fr./a
– Winter Hochtarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
– Winter Niedertarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
– Sommer Hochtarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
– Sommer Niedertarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
Total Energiekosten			Fr./a		Fr./a
Wartungskosten					
WKK-Anlage fix	–	–	Fr./a		Fr./a
WKK-Anlage variabel	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
Andere Anlagen fix	–	–	Fr./a		Fr./a
Total Wartungskosten			Fr./a		Fr./a
Total Aufwand			Fr./a		Fr./a
Ertrag Elektrizität					
Eigenbedarf					
– Leistung	kW	Fr./kW	Fr./a		Fr./a
– Winter Hochtarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
– Winter Niedertarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
– Sommer Hochtarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
– Sommer Niedertarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
Rücklieferung					
– Winter Spitzentarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
– Winter Hochtarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
– Winter Niedertarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
– Sommer Spitzentarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
– Sommer Hochtarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
– Sommer Niedertarif	MWh	Rp./kWh	Fr./a		Fr./a
Total Ertrag Elektrizität			Fr./a		Fr./a
Wärmegestehungskosten			Fr./a		Fr./a
Spez. Wärmegest.-kosten					
Wärmeproduktion:	MWh		Rp./kWh		Rp./kWh

