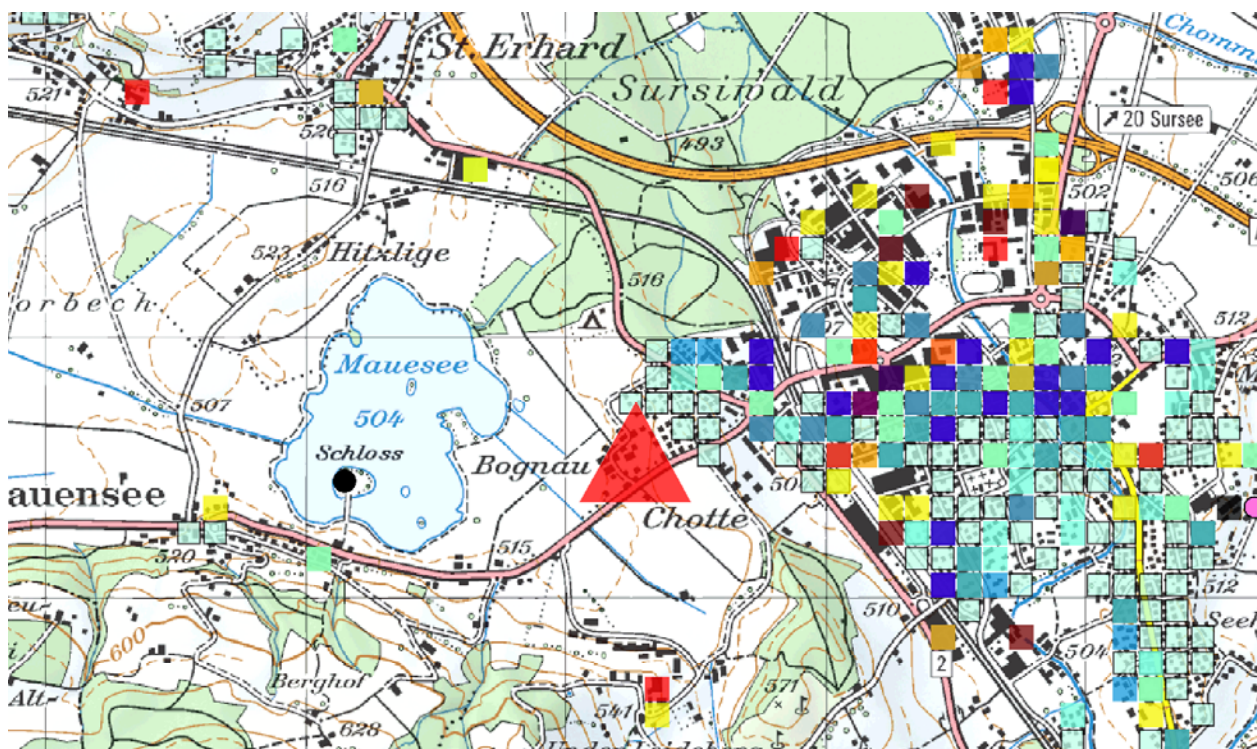




ABWÄRMENUTZUNG IN LANDWIRTSCHAFTLICHEN BIOGASANLAGEN SCHLUSSBERICHT



Ausgearbeitet durch

Stephan Gutzwiller

stephan.gutzwiller@eicher-pauli.ch

Dr. Eicher+Pauli AG

Gräubernstrasse 14, 4410 Liestal

www.eicher-pauli.ch

eicher+pauli

Planer für Energie- und Gebäudetechnik

Titelbild: Biogasanlage Lampart, Mauensee LU, Quelle: Dr. Eicher+Pauli AG, 2008

Begleitgruppe:

Bruno Guggisberg, Bundesamt für Energie, Programmleiter Sektion Erneuerbare Energien

Joachim Maier, IWK Integrierte Wärme und Kraft AG

Jean-Louis Hersener, Ingenieurbüro Hersener

Den Mitgliedern der Begleitgruppe wird an dieser Stelle für ihre Mitarbeit herzlich gedankt!

Impressum

Projektnummer: 07.1071

Datum: 23. Januar 2009

Im Auftrag des Bundesamt für Energie

Sektion Erneuerbare Energien, Forschungsprogramm Biomasse

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 40, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Bruno.Guggisberg@bfe.admin.ch

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	5
2. Ausgangslage und Ziel.....	13
2.1 Ausgangslage.....	13
2.2 Zielsetzung	13
3. Vorgehen und Methodik	15
3.1 Vorgehen.....	15
3.2 Bewertungsmethoden	16
3.2.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	16
3.2.2 Bewertung Technologien: SWOT-Analyse	16
3.2.3 Bewertung Abwärmenutzungsvarianten: Multikriterielle Bewertung	17
4. Rahmenbedingungen landwirtschaftliche Biogasanlagen.....	19
4.1 Charakteristik landwirtschaftlicher Betriebe	19
4.2 Technische Annahmen und Einschränkungen	20
4.3 Ökonomische Annahmen und Einschränkungen.....	22
4.3.1 Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV).....	22
4.3.2 Betreibermodelle zur Abwärmenutzung.....	23
5. Kosten für periphere Installationen zur Abwärmenutzung.....	25
5.1 Auskoppelung von Abwärme	25
5.2 Energiespeicherung	25
5.3 Energietransport.....	27
6. Bewertung von Technologien zur Abwärmenutzung.....	31
6.1 Übersicht Wirtschaftlichkeit der untersuchten Technologien	31
6.2 Referenz Wärmeerzeugung: Ölkessel	33
6.2.1 Kurzbeschreibung der Technologie	33
6.2.2 SWOT-Analyse	33
6.2.3 Fazit	33
6.3 Referenz Kälte: Kompressionskältemaschine	34
6.3.1 Kurzbeschreibung der Technologie	34
6.3.2 SWOT-Analyse	34
6.3.3 Fazit	34
6.4 Kälteerzeugung: Absorptionskälte	35
6.4.1 Kurzbeschreibung der Technologie	35
6.4.2 SWOT-Analyse	36
6.4.3 Fazit	36
6.4.4 Hersteller / Lieferanten (Auswahl).....	37
6.5 Kälteerzeugung: Dampfstrahlkältetechnik	38
6.5.1 Kurzbeschreibung der Technologie	38
6.5.2 SWOT-Analyse	39
6.5.3 Fazit	39
6.5.4 Hersteller / Lieferanten (Auswahl).....	40
6.6 Kälteerzeugung: Adsorptionskälte	41
6.6.1 Kurzbeschreibung der Technologie	41
6.6.2 Fazit	42
6.6.3 Hersteller / Lieferanten.....	42

6.7	Stromerzeugung: Organic Rankine Cycle (ORC)	43
6.7.1	Kurzbeschreibung der Technologie	43
6.7.2	SWOT-Analyse	44
6.7.3	Fazit	44
6.7.4	Produzenten (Auswahl).....	44
6.8	Stromerzeugung: Kalina-Kreisprozess	45
6.8.1	Kurzbeschreibung der Technologie	45
6.8.2	Fazit	45
7.	Bewertung von ausgewählten Abwärmenutzungen.....	47
7.1	Grundlegende Leistungsbedarfsprofile	47
7.1.1	Graphische Charakterisierung der Profile.....	48
7.1.2	Exkurs zum Spezialfall von Profil G: Heutrocknung	67
7.1.3	Spezifische Nutzungen der Leistungsbedarfsprofile.....	70
7.2	Ausgewählte Abwärmenutzungsvarianten	71
7.2.1	Beschreibung S1: Standardbetrieb 1	72
7.2.2	Beschreibung S2: Standardbetrieb 2	73
7.2.3	Beschreibung S3: Standardbetrieb 3	74
7.2.4	Beschreibung G1: Gemüsebetrieb 1.....	75
7.2.5	Beschreibung G2: Gemüsebetrieb 2.....	76
7.2.6	Beschreibung F1: Fischbetrieb 1	77
7.2.7	Beschreibung F2: Fischbetrieb 2	78
7.2.8	Beschreibung F3: Fischbetrieb 3	79
7.2.9	Beschreibung K1: Käsereibetrieb	80
7.2.10	Beschreibung T1: Tourismusbetrieb 1	81
7.2.11	Beschreibung T2: Tourismusbetrieb 2	82
7.2.12	Beschreibung Gr1: Grossbetrieb 1	83
7.2.13	Beschreibung Gr1b: Grossbetrieb 1 mit ORC-Stromerzeugung	84
7.2.14	Beschreibung Gr2: Grossbetrieb 2	85
7.2.15	Beschreibung Gr3: Grossbetrieb 3	86
7.3	Ergebnisse der Bewertung und Fazit.....	87
7.3.1	Grundlegende Leistungsbedarfsprofile	87
7.3.2	Ausgewählte Abwärmenutzungsvarianten.....	91
8.	Abkürzungsverzeichnis.....	95
9.	Literaturverzeichnis	97
9.1	Publikationen.....	97
9.2	Internetseiten.....	98
10.	Anhang	99
10.1	Kurzportraits der besichtigten Anlagen	99
10.1.1	Lampart, Mauensee LU	99
10.1.2	Jakob Bösch AG, Herisau AI	100
10.1.3	Wartmann, Bissegg TG.....	101
10.1.4	Stalder, Visp VS.....	103
10.1.5	Schürch, Madiswil BE	104
10.2	Kostenberechnungen Abwärmenutzungen: Bsp. Profil K1	106
10.3	Kostenberechnungen Konversionstechnologien.....	107

1. Zusammenfassung

In der Schweiz waren im Jahr 2005 71 landwirtschaftliche Vergärungsanlagen in Betrieb. Das darin gewonnene Biogas wird auf 45 landwirtschaftlichen Betrieben in Wärmekraftkopplungs-Anlagen (BHKW-Anlagen, typischerweise ca. 35 % elektrischer Wirkungsgrad, 83 % totaler Wirkungsgrad) in Strom und Wärme umgewandelt. Der Strom von Biogasanlagen kann problemlos genutzt werden. Bei der Wärme hingegen sieht es anders aus: Neben der benötigten Wärme zum Heizen des Fermenters der Vergärungsanlage (ca. 30 % der Bruttowärmeproduktion) sowie für die Warmwasseraufbereitung und das Heizen der Räume auf dem Hof, bleibt meist ein grosser ungenutzter Wärmeanteil übrig.

Ausgangslage

Ziel ist, die anfallende überschüssige Abwärme besser zu nutzen. Dazu soll ein Instrumentarium zur Verfügung gestellt werden, welches einem konkreten Biogasanlagenbetreiber resp. -abwärmenutzer für ein spezifisches „Abwärme-Problem“ (bestehend aus anfallender Abwärme, Wärmebedarfsprofil, Energietransport und -speicherung sowie nötige Spitzenabdeckung) eine systematische Evaluation der optimalen Abwärmenutzung ermöglichen soll.

Ziel

In einem ersten Schritt werden die technischen, ökonomischen und strukturellen Rahmenbedingungen von landwirtschaftlichen Biogasanlagen erarbeitet. Dazu dienen zum einen die Besichtigung von fünf typischen Anlagen in der Schweiz, zum anderen Recherchen zu peripheren Technologien der Abwärmenutzung (u.a. Energiespeicher, Transportleitungen) sowie eine detaillierte Beschreibung und Bewertung neuer Technologien zur Konversion von Abwärme aus einem Biogasmotor in Nutzenergie (Wärme, Kälte, Strom), welche technisch ausgereift, jedoch noch nicht etabliert sind.

Vorgehen

→ *Bewertungsmethoden: Wirtschaftlichkeitsrechnung, SWOT-Analyse*

In einem zweiten Schritt werden Abwärmenutzungen (AWN) identifiziert und beschrieben, welche in der Landwirtschaft sinnvoll sind. Diese AWN sind Kombinationen aus typischen Jahresbedarfsprofilen (z.B. Winterprofil: Beheizung Wohngebäude, Sommerprofil: Heutrocknung). Aus diesen Angaben lassen sich anschliessend die Auslegung der AWN-Anlage und damit alle kostenrelevanten Komponenten (nötige Konversionstechnologie, Speicher, Spitzenkessel, Fernwärmeleitung) ableiten.

Im dritten Schritt werden die ausgewählten Abwärmenutzungsvarianten bewertet (ökonomisch, technisch, ökologisch). Es werden zunächst alle quantitativen Beurteilungsgrössen je Abwärmenutzungsvariante ermittelt: Investitionskosten, Gesteuerungskosten und Nutzungsgrad der Bruttowärmeproduktion. Die Bewertung erfolgt jeweils im Vergleich mit einer konventionellen Nutzenergiebereitstellung = Referenzvariante (Heizwärme: Ölkessel, Kälte: Kompressionskältemaschine, Stromproduktion: Gesteuerungskosten vs. Einspeisevergütung).

→ *Bewertungsmethoden: Wirtschaftlichkeitsrechnung, multikriterielle Bewertung*

Details zu den verwendeten Bewertungsmethoden und zu allen zugrundeliegenden Annahmen sind im Kapitel 3.2 dokumentiert.

Methodik

In der Schweiz liegen die typischen Biogas-BHKW-Grössen im Bereich von 65 bis 120 kW.e. Für künftige Biogas-BHKW-Anlagen ist ein Leistungsbereich von 125 kW.e bis 500 kW.e Nennleistung interessant. In vorliegender Arbeit wird daher ausschliesslich dieser Anlagebereich berücksichtigt. Folgende Tabelle definiert die Anlagenstruktur genauer.

CH-Biogas-anlagen

Anlagengrösse: Nennleistung (7'000 h/a) [kW.e]	125	250	500
kontinuierliche Biogasproduktion [kW.gas]	275	550	1100
Äquivalenzleistung (8760 h/a) elektrisch [kW.e]	100	200	400
Bruttostromproduktion [kWh/a]	876'000	1'752'000	3'504'000
Nettostromproduktion (15% Eigenbedarf) [kWh/a]	744'600	1'489'200	2'978'400
Äquivalenzleistung thermisch [kW.th]	125	250	500
Äquivalenzleistung Abgas (Abkühlung auf 150°C) [kW.th]	56	111	222
Äquivalenzleistung Motor (Abkühlung auf 65°C) [kW.th]	69	139	278
Bruttowärmeproduktion [kWh/a]	1'095'000	2'190'000	4'380'000
Nettowärmeproduktion (30% Eigenbedarf) [kWh/a]	766'500	1'533'000	3'066'000
Co-Substratanteil 20% (Höchstanteil für KEV*) [Tonnen/a]	2'000	4'000	8'000
nötige Grossvieheinheiten [GVE]	375	750	1'500

Tabelle A: Leistungsdaten und Betriebsstruktur der untersuchten Biogasanlagen. Die Umrechnung von Gasertrag in Co-Substratmengen resp. Grossvieheinheiten basieren auf den Annahmen des online-KEV-Rechners auf www.biomasseenergie.ch.

Für die Bewertung der Abwärmenutzungsvarianten werden eine Reihe technischer und ökonomischer Annahmen getroffen, welche im Detail in den Kapiteln 4.2 und 4.3 dokumentiert sind. Einige der Wichtigsten werden hier erläutert.

- Gasmotor-BHKW mit folgenden Wirkungsgraden (bzgl. Biogasinput):
 - elektrisch ab Generator: 35 % bis Anlagen < 252 kW elektrische Äquivalenzleistungen, darüber 38 % (Vorgabe der KEV¹)
 - Bruttostromproduktion: 35 % bis 38 % des Biogasinputs
 - thermisch ab Motorkühlwasserwärmetauscher, ca. 65°C: 25 %
 - thermisch ab Abgaswärmetauscher, ca. 150°C: 20 %
 - Bruttowärmeproduktion: 45 % des Biogasinputs
- Eigenbedarf Biogasanlage: Strom (Rührwerke) 15 % der Bruttostromproduktion, Wärme (Fermenter) 30 % der Bruttowärmeproduktion.
- Redundanz: Für alle betrachteten Nutzungen wird ein konventioneller Wärmeerzeuger (Ölkessel) als Redundanz mit einer Wärmeleistung entsprechend des maximalen Leistungsbedarfs der betrachteten Nutzung bereitgestellt.
- Kalkulationszinssatz für Investitionen: 5.0 %
- Nutzungsdauer: Anlagen 15 bis 20 Jahre, Fernleitungen 40 Jahre
- Energiepreise (exkl. MWSt), fix:
 - Elektrizität Rückspeisung: Tarife nach KEV (Details in Kap. 4.3.1)
 - Elektrizität Bezug: 14.7 Rp./kWh, Hochpreisszenario: 22.1 Rp./kWh
 - Heizöl EL: 120 CHF/100 l → 12 Rp./kWh (Preis per September 2008), Hochpreisszenario: 180 CHF/100 l

Technische Annahmen

Ökonomische Annahmen

¹ Kostendeckende Einspeisevergütung für Strom aus erneuerbaren Energien, per 1.1.2009 in Kraft.

In vorliegender Arbeit beschränkt sich die Kostenermittlung der Abwärmenutzung auf folgende Systemkomponenten: Spezielle Konversionstechnologie bei Kälte- oder Stromproduktion (Kapitel 6), Abgaswärmetauscher, Wärmeverteiler sowie Energiespeicher und -transportleitungen (je nach Nutzungsdynamik und -distanz). Daraus ergeben sich die Gesamtkosten für eine spezifische Abwärmenutzung (Kapitel 7). Die Kosten für den Bau der Biogasanlage sowie des Biogas-BHKW inkl. Motorwärmetauscher werden nicht berücksichtigt; es wird davon ausgegangen, dass diese Anlagenteile auch ohne AWN wirtschaftlich gebaut sind.

System- grenzen

Eine Abwärmenutzung lässt sich über ein Jahresleistungsbedarfsprofil charakterisieren. Die optimale Abwärmenutzung hat ein konstantes Jahresleistungsprofil auf dem identischen Niveau der von der Biogasanlage verfügbaren Abwärme. Dies ist jedoch in der Realität praktisch nie vorhanden. Daher werden sieben grundlegende Profile definiert, welche die Charakterisierung aller denkbaren Abwärmenutzungen ermöglichen:

Leistungs- bedarfs- profile

Profil A: Aussentemperaturabhängige Beheizung Gebäude auf 20°C

Profil B: Beheizung Fischzuchtbecken / Fermenter auf 16°C, 23°C, 29°C / 50°C

Profil C: Aussentemperaturabhängiges Kühlen Gebäude auf 20°C

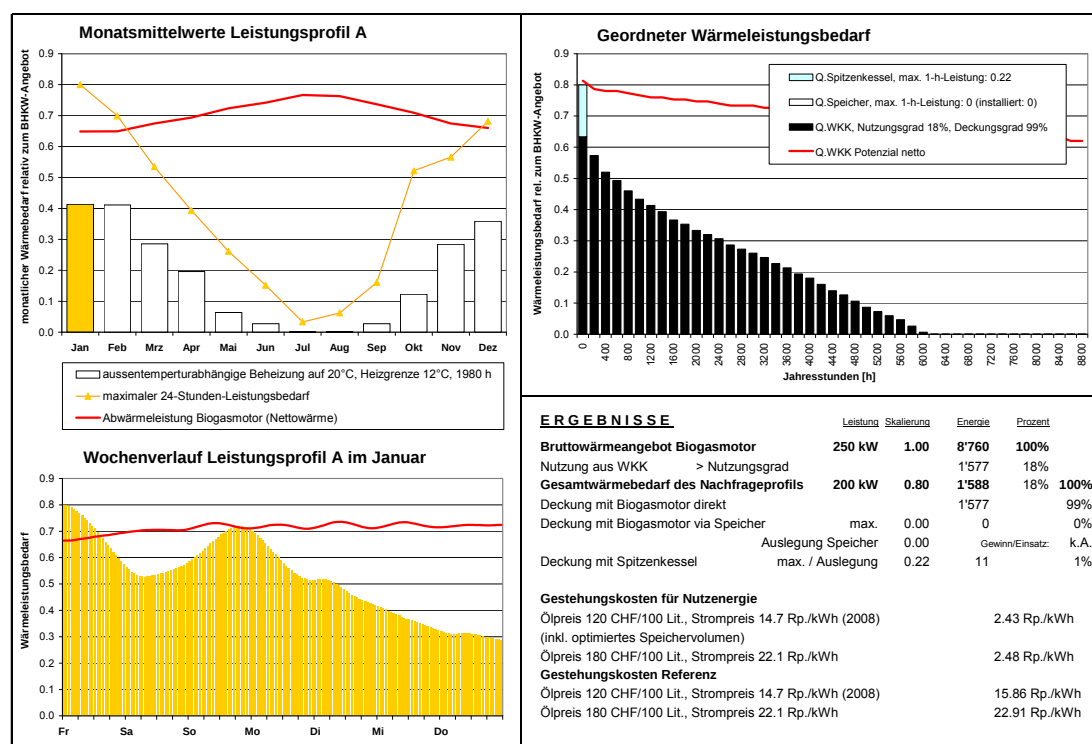
Profil D: Aussentemperaturabhängiges Kühlen Lagerhalle auf 5°C

Profil E: Aussentemperatur- und strahlungsabhängige Beheizung Gewächshaus

Profil F: Ganzjährig konstant (Bandlast), z.B. Stromerzeugung mittels ORC

Profil G: Zyklisch konstant: monatsweise, wochentagsweise, tagesstundenweise

Beispiel der graphischen Charakterisierung für Profil A:



Erklärungen zur Graphik

- **Gestehungskosten der Nutzenergie:** Kosten der Biogasabwärmenutzung bei heutigen Energiepreisen (2008) und bei um 50 % höheren Preisen (inkl. Speicherkosten).
- **Gestehungskosten Referenz:** Kosten für die Bereitstellung der nötigen Nutzenergie mittels Referenz-Technologie (Ölkessel, Kompressionskältemaschine, etc.) 2008 und plus 50 %.

Beschreibung der ausgewählten Abwärmenutzungsvarianten

Folgende 15 Nutzungsvarianten - konkrete Kombinationen aus den Profilen A bis G - werden in dieser Arbeit beschrieben und bewertet. Details finden sich auf den Seiten 72 bis 86. Es handelt sich nicht um eine abschliessende Liste, sondern um exemplarische Abwärmenutzungsvarianten, welche in der Praxis sehr häufig auftreten:

- S1: Standardbetrieb 1: Heizen 2 Wohnhäuser, Brauchwarmwassererwärmung
- S2: Standardbetrieb 2: Heizen 2 Wohnhäuser, Brauchwarmwassererwärmung, Heizen Stall, Prozess Heutrocknung Eigenbedarf
- S3: Standardbetrieb 3: Heizen 2 Wohnhäuser, Brauchwarmwassererwärmung, Heizen Stall, Prozess Heutrocknung Eigenbedarf, Heizen 10 Wohnhäuser
- G1: Gemüsebetrieb 1: S2, Heizen Gewächshaus Feldsalat
- G2: Gemüsebetrieb 2: S1, Heizen Gewächshaus, Kühlen Kühlhaus 5°C
- F1: Fischbetrieb 1: S1, Heizen Aquakultur Forelle, Kühlen Kühlhaus 5°C
- F2: Fischbetrieb 2: S1, Heizen Aquakultur Egli/Zander, Kühlen Kühlhaus 5°C
- F3: Fischbetrieb 3: S1, Heizen Aquakultur Tilapia, Kühlen Kühlhaus 5°C
- K1: Käsereibetrieb: S2, Prozess Heutrocknung Durchlauf, Prozess Heizen Käserei (P3), Kühlen Klimakälte 5°C
- T1: Tourismusbetrieb 1: S2, Heizen Agritourismus
- T2: Tourismusbetrieb 2: S2, Heizen Wellnesshotel, Heizen Schwimmhalle
- Gr1: Grossbetrieb 1: S2, Grundlast Fernwärmenetz, Heizen Wohnsiedlung
- Gr1b: Grossbetrieb 4: S2, Stromerzeugung mittels ORC-Prozess, Heizen Wohnsiedlung
- Gr2: Grossbetrieb 2: S2, Grundlast Fernwärmenetz, Heizen Wohnsiedlung, Kühlen Klimakälte 20°C
- Gr3: Grossbetrieb 3: S2, Heizen Büro- und Wohngebäude, Kühlen Bürogebäude 20°C, Trocknen Heu

Bewertungsergebnisse der grundlegenden Leistungsbedarfsprofile

Alle Profile werden in Kapitel 7.1 auf den Seiten 50 bis 69 im Detail beschrieben. In den folgenden ABC-Analysediagrammen liegen die besten Nutzungen jeweils im hellgrünen Quadranten A. Alle Aussagen gelten für die mittlere der drei betrachteten BHKW-Leistungsgrössen (200 kW elektrische Leistung), für optimierte Skalierung der Profile und ohne allfällig nötige Fernwärme- oder -kälteleitungen.

ABC-Analyse Gesteungskosten versus Nutzungsgrad

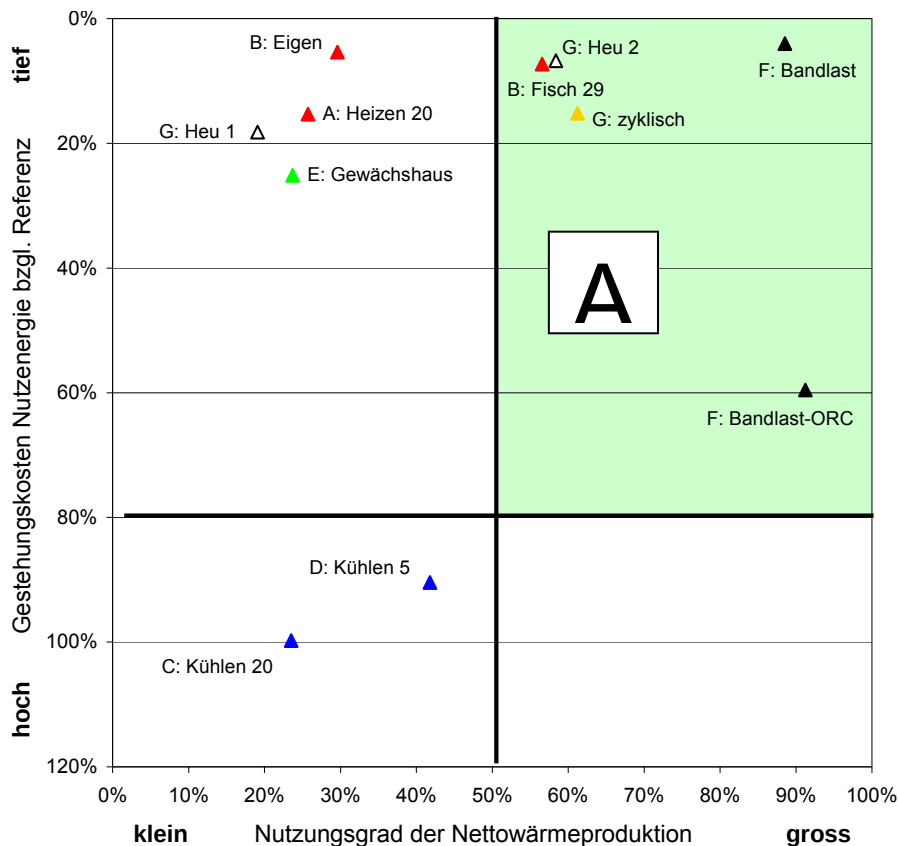


Abbildung I

Gesteungskosten versus Nutzungsgrad der Nettowärmeleistung der grundlegenden Leistungsbedarfsprofile. Im hellgrün hinterlegten Quadranten A befinden sich die besten Abwärmeverwendungsvarianten (Erklärung der Kürzel auf folgender Seite), welche sowohl tiefe Gesteungskosten als auch einen grossen Nutzungsgrad aufweisen.

Spezialfall B: Eigen (= Profil B: Beheizung Fermenter): Der Nutzungsgrad bezieht sich in diesem Fall auf die Bruttowärmeleistung. Er beträgt damit genau den angenommenen Eigenbedarf der Biogasanlage von 30%.

Spezialfall F: Bandlast-ORC (= Profil F: Ganzjährig konstant, Stromerzeugung mittels ORC): Die Gesteungskosten-Referenz ist der Einspeisetarif nach KEV ohne Landwirtschaftsbonus

ABC-Analyse Investitionskosten versus Nutzungsgrad

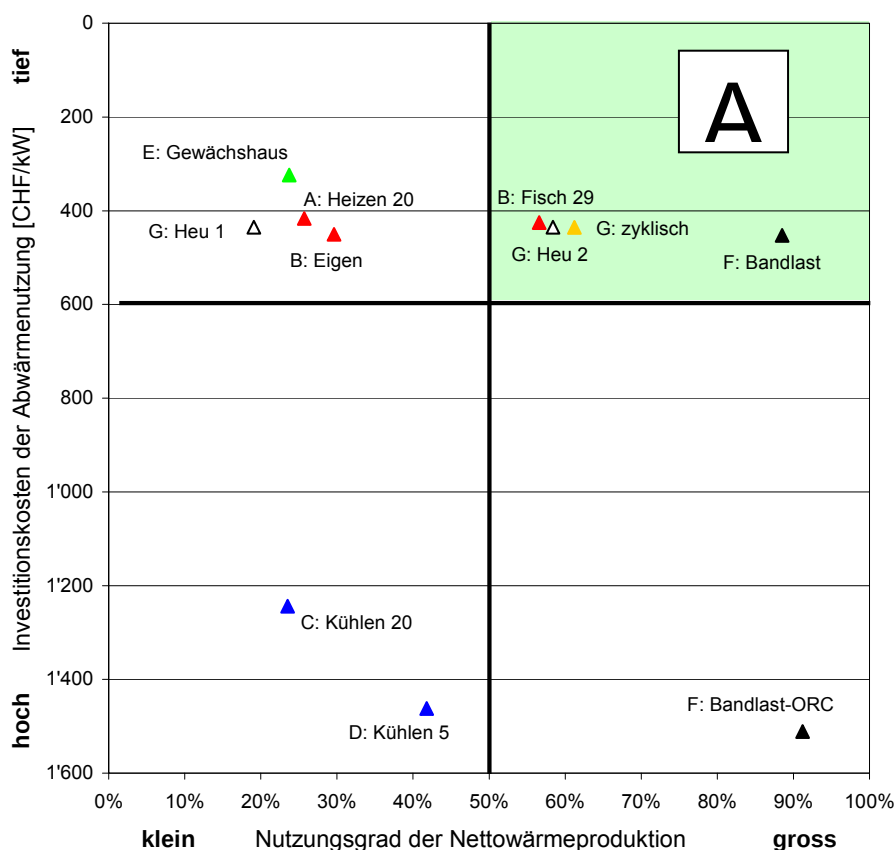


Abbildung II:

Investitionskosten versus Nutzungsgrad der Nettowärmeleistung. Im hellgrün hinterlegten Quadranten A befinden sich die besten Abwärmeverwendungsvarianten (Erklärung der Kürzel auf folgender Seite), welche sowohl tiefe Investitionskosten als auch einen grossen Nutzungsgrad aufweisen.

Die Investitionskosten sind pro kW Abwärmeleistung gerechnet, welche nutzbar gemacht werden.

Erklärung zu den verwendeten Kürzeln in vorangehenden Abbildungen I und II

A: Heizen 20	= Profil A: Aussentemperaturabhängige Beheizung Gebäude auf 20°C
B: Eigen	= Profil B: Eigenbedarf Fermenter
B: Fisch 29	= Profil B: Beheizung Fischzuchtbecken auf 16°C, 23°C, 29°C
C: Kühlen 20	= Profil C: Aussentemperaturabhängiges Kühlen Gebäude auf 20°C
D: Kühlen 5	= Profil D: Aussentemperaturabhängiges Kühlen Lagerhalle auf 5°C
E: Gewächshaus	= Profil E: Beheizung Gewächshaus
F: Bandlast	= Profil F: Ganzjährig konstant: Wärmebandlast
F: Bandlast-ORC	= Profil F: Ganzjährig konstant: Stromerzeugung mittels ORC
G: Heu 1	= Profil G: Heutrocknung Eigenbedarf
G: Heu 2	= Profil G: Heutrocknung Durchlauf
G: zyklisch	= Profil G: Zyklisch konstant: monats-, wochentags-, tagesstundenweise

Fazit zu den Grundprofilen

Gestehungskosten der Nutzenergie

- Heizen ist am wirtschaftlichsten: Für alle Heizprofile liegen die Gestehungskosten für Heizwärme ab BHKW im Regelfall bei ≤ 25 % der Referenz (Ölkessel).
- Stromerzeugung mittels ORC-Prozess ist mit Gestehungskosten von 13.6 Rp./kWh wirtschaftlich interessant (40 % unter dem Einspeisetarif nach KEV ohne Landwirtschaftsbonus).
- Kühlen mittels Absorptionskältemaschine ist unter optimalen Voraussetzungen knapp wirtschaftlich. Je tiefer die Temperatur der Nutzkälte (min. 5°C), desto grösser wird der Jahresnutzungsgrad der Nettowärmeproduktion (siehe unten), desto besser ist die Wirtschaftlichkeit (bei 5°C bis 20 % günstiger als die Referenzkälte aus Kompressionskältemaschinen).

Investitionskosten der Abwärmenutzung

- AWN-Installationen für reine Heizzwecke verursachen die geringsten Investitionen von CHF 320 bis 450 pro kW installierter Wärmeleistung. Es sind dies: Wärmetauscher, Fernwärmeverteiler sowie Redundanz und Spitzenerzeuger (Ölkessel).
- AWN-Installationen für ORC-Anlagen sind am kostenintensivsten: ca. CHF 1'500 pro kW Abwärmeleistung, die nutzbar gemacht wird. Pro installiertem kW elektrischer Leistung belaufen sich die Kosten auf CHF 9'000.
- AWN-Installationen für Absorptionskältemaschinen: Nutzkälte 20°C: CHF 1'250 pro kW Abwärme (CHF 2'000 pro kW Nutzkälte). Nutzkälte 5°C: CHF 1'500 pro kW Abwärme (CHF 3'000 pro kW Nutzkälte).

Nutzungsgrad der Nettowärmeproduktion

- Bandlast-Profile erzielen naturgemäss die höchsten Nutzungsgrade (bis 90 %). Ein Nutzungsgrad von 100 % kann nur von einem Profil mit einem dem Eigenbedarf zu 1 komplementärem Verlauf erreicht werden.
- Zyklische Profile, welche Tagesspeicher effizient nutzen können, erzielen Nutzungsgrade zwischen 50 und 70 %
- Aussentemperaturabhängige Profile erreichen eher tiefere Nutzungsgrade. Diese sind jedoch sehr stark abhängig von der gewünschten SOLL-Temperatur. Je grösser die Differenz zwischen der SOLL- und der mittleren Aussentemperatur, desto höher ist der Nutzungsgrad:
Kühlen 20°C: 24 %, Heizen 20°C: 26 %, Kühlen 5°C: 42 %, Heizen 29°C: 57 %.

Replikationspotenzial der Abwärmenutzung

- Heizen:
 - Wohngebäude: überall realisierbar, Nutzungsgrad limitiert (3)
 - Heutrocknung: überall realisierbar, Nutzungsgrad limitiert (3)
 - Gewächshaus: nur an bestimmter Lage realisierbar (2)
 - Fischzucht: nur unter speziellen Bedingungen realisierbar (1)
 - Bandlast z.B. Einspeisung in Fernwärme: nur in Einzelfällen realisierbar (0)
- Stromerzeugung mittels ORC-Prozess: überall mit beliebigem Nutzungsgrad realisierbar (4)
- Kühlen Gemüselager 5°C: überall realisierbar, Nutzungsgrad limitiert (3)
- Kühlen Gebäude 20°C: nur an bestimmter Lage realisierbar (2)

Technische Reife und Umweltauswirkungen der Technologie

Details zur eingesetzten unkonventionellen Konversionstechnologie finden sich in Kapitel 6

- ORC-Prozess siehe Abschnitt 6.7 auf Seite 43.
- Absorptionskältemaschine siehe Abschnitt 6.4 auf Seite 35.

Abwärmenutzungsvarianten mit bester Bewertung

Die am besten bewerteten Abwärmenutzungsvarianten mit einem Nutzungsgrad > 50 % sind:

- F1: Fischbetrieb 1: S1, Heizen Aquakultur Forelle, Kühlen Klimakälte 5°C
- T2: Tourismusbetrieb 2: S2, Heizen Wellnesshotel, Heizen Schwimmhalle
- Gr1: Grossbetrieb 1: S2, Grundlast Fernwärmenetz, Heizen Wohnsiedlung
- Gr1b: Grossbetrieb 1b: S2, Stromerzeugung mittels ORC-Prozess, Heizen Wohnsiedlung

Generelles Fazit

Das übergeordnete Ziel dieser Studie ist eine bessere Nutzung der in landwirtschaftlichen Biogasanlagen anfallenden überschüssigen Abwärme. Neben den Gestehungskosten, welche selbstverständlich in einem wirtschaftlichen Bereich liegen müssen, ist demzufolge dem Bewertungskriterium „Nutzungsgrad der Nettowärmeproduktion“ sehr hohe Priorität beizumessen.

Die Untersuchungen der verschiedenen Abwärmenutzungsvarianten hat gezeigt, dass höchste Nutzungsgrade erzielt werden können, wenn:

- Winterbedarfsprofile (z.B. Gebäudeheizung) mit Sommerbedarfsprofilen (z.B. Gebäudekühlung, Heubelüftung) kombiniert werden können → AWN S3 (Seite 8)
- konstante Bedarfsprofile mit einer Leistungsskalierung von 100 % erschlossen werden können. Dies könnte z.B. eine vollständige Nutzung zur Verstromung im ORC-Prozess sein, was jedoch mit einem tiefen Exergieerhalt von $2.5 * 0.16 = 40 \%$ einhergeht (sofern die Abwärme von 35°C nicht mehr weiter genutzt wird, z.B. als Grundlast für ein Gewächshaus).
- konstante Bedarfsprofile (z.B. Warmwasserfischzuchten) als Sockellast mit weiteren Profilen kombiniert werden können. Dies wurde bei der AWN Gr2 (Seite 8) berücksichtigt. Sie erreicht mit 78 % den höchsten Nutzungsgrad, schneidet jedoch aufgrund der relativ hohen Gestehungskosten (92 % der Referenz) trotzdem schlecht ab.
- für Verbrauchsprofile mit sehr hohen Auslegeleistungen mit einer der BHKW-Abwärmeleistung identischen Sockellast (z.B. Fernheizungsnetze) die Sockellast geliefert werden kann (Wärmelieferung an Dritte).
- andauernde, zyklische Lastprofile im Rhythmus von 1 bis 8 Stunden und einer doppelten Nennleistung im Vergleich zur BHKW-Abwärmeleistung (z.B. Warmwasseraufbereitung, Käseerei) zur Verfügung stehen, welche mit einem somit optimal dimensionierbaren Speicher überwiegend mit BHKW-Abwärme versorgt werden können.
- kleine Biogasanlage wirtschaftlich realisiert werden können: Für die untersuchte AWN S1 (Heizung Wohnhaus und BWW) mit dem grössten Replikationspotenzial dürfte die Anlage nicht grösser als 25 kW.th sein, um einen Nutzungsgrad von 60 % zu erreichen, was weit unter dem hier untersuchten Bereich liegt.

Die Beispiele und Erläuterungen zeigen, dass der Trade-off zwischen den verschiedenen Kriterien je nach Abwärmenutzungsvarianten (AWN) sehr unterschiedlich sein kann. Für eine abschliessende Beurteilung einer AWN ist daher die Gewichtung der einzelnen Kriterien unbedingt vom Betreiber einer Anlage selber vorzunehmen.

2. Ausgangslage und Ziel

2.1 Ausgangslage

In der Schweiz waren im Jahr 2005 71 landwirtschaftliche Vergärungsanlagen in Betrieb. In diesen Anlagen wird der hofeigene Dünger vergärt, teilweise zusammen mit von Dritten angelieferten organischen Reststoffen. Das so gewonnene Biogas wird auf 45 landwirtschaftlichen Betrieben in Wärmekraftkopplungs-Anlagen (BHKW-Anlagen, typischerweise ca. 35 % elektrischer Wirkungsgrad, 83 % totaler Wirkungsgrad - ohne Eigenbedarf der Biogasanlage) in Strom und Wärme umgewandelt und in 26 Fällen in Brennern verwertet. Der Strom von Biogasanlagen kann problemlos genutzt werden: Abdeckung des Eigenbedarfs der Biogasanlage (Rührwerke und Pumpen, ca. 15 %), Eigenbedarf des landwirtschaftlichen Betriebs und - zum grössten Anteil - Einspeisung ins öffentliche Stromnetz. Die Wärmenutzung hingegen ist schwieriger: Nebst rund 30 % für die Beheizung des Fermenters der Vergärungsanlage wird i. d. R. nur ein geringer Anteil (< 10 %) für die Warmwasseraufbereitung und das Heizen der Wohn- und Betriebsgebäude verwendet. Mehr als 50 % der anfallenden Abwärme bleibt folglich meist ungenutzt. Bei den bestehenden Anlagen in der Schweiz summierte sich diese ungenutzte Abwärmemenge im Jahr 2005 auf rund 9 GWh Wärmeenergie - erneuerbare Wärmeenergie für rund 260 Einfamilienhäuser.

Im Rahmen einer Vorabklärung im Auftrag des BFE² wurde die heutige Situation bei den landwirtschaftlichen Biogasanlagen untersucht. Dabei wurden insbesondere die ungenutzten Potenziale abgeschätzt, mögliche Nutzungsarten und Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt sowie eine erste Bewertung bzw. Rangierung der Varianten vorgenommen.

2.2 Zielsetzung

Übergeordnetes Ziel ist die bessere Nutzung der in landwirtschaftlichen Biogasanlagen anfallenden überschüssigen Abwärme. In vorliegender Arbeit werden die in der erwähnten Vorabklärung untersuchten Abwärmenutzungsvarianten exemplarisch mit einer alternativen Methode bewertet. Die Basis bildet eine Bewertung von neuen Technologien zur Abwärmenutzung. Ergänzend wird ein Instrumentarium zur Verfügung gestellt, welches einem Biogasanlagenbetreiber fallweise dienen soll, eine systematische Situationsanalyse (anfallende Abwärmemengen, potenziell erschliessbare Wärmenachfrager) durchzuführen und eine wirtschaftliche Anlagenauslegung (Energietransport, -speicherung, Spitzenkesseldimensionierung) zu planen.

² Quelle: Bundesamt für Energie, BiomassEnergie, Landwirtschaftliche Biogasanlagen - Perspektiven für die Wärmenutzung, 21 März 2007.

3. Vorgehen und Methodik

Zu Beginn der Arbeit wurden das Vorgehen und die Methodik stark in Anlehnung der Vorabklärung des BFE entwickelt. Im Verlaufe der Projektarbeit und nach Begehung von fünf Anlagen in der Schweiz wurde angesichts der komplexen Problemstellung eine deutlich abgewandelte Methodik entwickelt. Das Ziel der besseren Abwärmenutzung (AWN) ist dadurch unverändert; jedoch resultiert keine statische Empfehlungsliste für AWN-Varianten, sondern eine Checkliste mit Verweisen zu hier beschriebenen Instrumenten, mit Hilfe dieser in Abhängigkeit vom betrachteten landwirtschaftlichen Betrieb resp. dessen Abwärmenachfrage eine wirtschaftlich interessante Abwärmenutzung abgeleitet werden kann.

3.1 Vorgehen

- Studium der technischen, ökonomischen und strukturellen **Rahmenbedingungen** von landwirtschaftlichen Biogasanlagen in der Praxis. Dazu werden Grundlagen zur landwirtschaftlichen Situation recherchiert sowie fünf typische Anlagen in der Schweiz besucht und die Betreiber interviewt. Aus den Erkenntnissen werden sinnvolle **Annahmen** für die weiteren Arbeiten abgeleitet.
- Bezifferung der Kosten für periphere Technologien zur Abwärmenutzung: **Wärmeauskopplung** aus dem Biogasmotor (Kühlwasser, Abgas), **Energiespeicher** und **Transportleitungen**.
- Beschreibung und **Bewertung neuer Technologien zur Konversion von Abwärme** aus einem Biogasmotor in Nutzenergie (Wärme, Kälte, Strom), welche technisch ausgereift, jedoch noch nicht etabliert sind. Diese Technologien werden bezüglich Wirtschaftlichkeit sowie mittels SWOT-Analyse bezüglich technischer Einsatzgrenzen und Risiken beurteilt. Zum Vergleich werden in analoger Weise konventionelle Technologien beurteilt (Heizwärme: Ölkessel, Kälte: Kompressionskältemaschine).
- Identifizierung und Beschreibung von Energiedienstleistungen in der Landwirtschaft, für welche die Nutzung von Abwärme aus Biogasanlagen in Frage kommt (inkl. Lieferungen an Dritte in einem Wärmeverbund). Diese sog. **Abwärmenutzungen** (AWN) werden vordefinierten typischen **Leistungsbedarfsprofilen** zugeordnet, für welche jeweils ein typisches Jahresprofil der nachgefragten Wärmeleistung charakterisiert wird. Daraus lassen sich sinnvolle Überlagerungen von Leistungsbedarfsprofilen ableiten, welche kombinierte Abwärmenutzungsvarianten ergeben (z.B. Beheizung Wohngebäude und Heutrocknung). Aus diesen Angaben lassen sich anschliessend die Auslegung der AWN-Anlage und damit alle kostenrelevanten Komponenten (nötige Konversionstechnologie, Speicher, Spitzenkessel, Fernwärmeleitung) ableiten.
- **Bewertung** (ökonomisch, technisch, ökologisch) **der Abwärmenutzungsvarianten** als Grundlage für eine Empfehlung. Es werden zunächst alle quantitativen Beurteilungsgrössen je Abwärmenutzungsvariante ermittelt: Investitionskosten, Gestehungskosten und Nutzungsgrad der Bruttowärmeproduktion. Die Beurteilung erfolgt jeweils im Vergleich mit einer konventionellen Nutzenergiebereitstellung = Referenzvariante (Heizwärme: Ölkessel, Kälte: Kompressionskältemaschine, Stromproduktion: Gestehungskosten vs. Einspeisevergütung). Abschliessend erfolgt die Gesamtbeurteilung der Nutzungsvarianten mittels multikriterieller Bewertung, welche auch eine systematische Bewertung von sog. weichen Faktoren ermöglicht. Die Dokumentation erfolgt in Spinnendiagrammen. Dazu werden die einzelnen Kriterien normiert, jedoch nicht gewichtet, damit eine höchstmögliche Transparenz gewährleistet ist. Im anschliessenden Kapitel werden die verwendeten Bewertungsinstrumente erläutert.

3.2 Bewertungsmethoden

3.2.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse

In der vorliegenden Studie wird die Wirtschaftlichkeit mit Hilfe der Annuitätenmethode ausschliesslich für die dem Gasmotor nachgeschaltete Abwärmenutzung beurteilt. Die Wirtschaftlichkeit der Vergärungsanlage und des Gasmotors inkl. Kühlwasserwärmetauscher und Notkühler (jedoch ohne Abgaswärmetauscher) wird nicht untersucht. Wichtigste Zielgrösse sind die Nutzenergiegestehungskosten, welche für **Konversionstechnologie**, **Energiespeicherung** und **Energietransport** gesondert ermittelt werden. In der Summe ergeben sich die Gestehungskosten einer spezifischen **Abwärmenutzungsvariante** (z.B. Beheizung Kuhstall). Zur Beurteilung werden die Gestehungskosten der jeweiligen konventionellen Referenzvariante (Details siehe folgenden Abschnitt) gegenübergestellt. Ist die Referenzvariante günstiger, gilt die Abwärmenutzung als unrentabel.

Nebst den Gestehungskosten der Nutzenergie (Rp./kWh) werden auch die Investitionen (CHF) und der Nutzungsgrad der Bruttowärmeproduktion ausgewiesen, welche in die zusammenfassende Bewertung der Abwärmenutzungsvarianten (Abschnitt 3.2.3) einfließen. Neben fixen technischen und ökonomischen Annahmen (siehe Kapitel 4) sind folgende Parameter variabel und führen zu variablen Ergebnissen:

- **Anlagengrösse.** Es werden Biogasanlagen im Leistungsbereich bzgl. elektrischer Äquivalenzleistung³ von 100 kW.e bis 400 kW.e berücksichtigt.
- Nutzungsabhängige Jahresprofile der **nachgefragten Wärmeleistung**. Daraus ergibt sich die Anlagenauslegung, welche die genutzte Wärmemenge ab BHKW, die benötigte Spitzenkesselenergie, das Speichervolumen und die Leitungslänge für den Energietransport definiert.
- **Öl- und Strompreise** im Bereich von heute bis 2030 (Annahmen für Preisentwicklung).

Alle Parameter werden im Abschnitt 4 ab Seite 19 im Detail erläutert.

3.2.2 Bewertung Technologien: SWOT-Analyse

Ergänzend zur Wirtschaftlichkeitsanalyse (siehe oben) wird für eine umfassende Bewertung der Technologien zur Konversion von Abwärme eine sog. SWOT-Analyse durchgeführt. Eine SWOT-Analyse berücksichtigt auch sog. weiche (nicht quantifizierbare) Kriterien und umfasst eine Stärken-Schwächen-Analyse (S= Strength; W=Weakness) sowie eine Chancen-Risiko-Analyse (O=Opportunities; T=Threats). Die SWOT-Analyse bezeichnet von den einzelnen Technologien die Stärken und die Schwächen wie Einsatzgebiet, Komplexität des Verfahrens, Marktreife, rechtliche Situation, Erfahrung etc. und stellt sie den Chancen und Risiken der externen Rahmenbedingungen wie politische Entscheidungen, Zukunftsszenarien, Energieabgaben, Preisentwicklung, etc. gegenüber. Sie gilt als nichtformalisierte Bewertungsmethode. In vorliegender Studie wird sie ausschliesslich auf die Technologien und nicht auf die einzelnen Abwärmenutzungsvarianten angewendet.

³ Jahresstromproduktion in Kilowattstunden dividiert durch 8'760 Stunden.

3.2.3 Bewertung Abwärmenutzungsvarianten: Multikriterielle Bewertung

Die Gesamtbeurteilung von spezifischen Abwärmenutzungsvarianten erfolgt mittels multikriterieller Bewertung. Bei der multikriteriellen Bewertung werden neben monetär quantifizierbaren Kriterien (hier die Kennzahlen aus der Wirtschaftlichkeitsanalyse) ebenso wie bei der SWOT-Analyse auch weiche Kriterien berücksichtigt, welche qualitativ beschrieben und erfasst werden. Diese Methode gelangt als komplementäres Verfahren zur monetären Bewertung zur Anwendung, da die so optimierten Resultate den Anliegen von grösseren Interessengruppen gerecht werden. Sie gilt als formalisierte Bewertungsmethode. In vorliegender Studie wird sie verwendet, um eine zusammenfassende Bewertung der verschiedenen Abwärmenutzungsvarianten (jeweils bestehend aus Konversionstechnologie, Energiespeicher und Energietransport) vorzunehmen. Folgende sieben Kriterien werden bei der Bewertung berücksichtigt (siehe auch Tabelle 1):

- **Investitionskosten** der Abwärmenutzung: Investitionskosten pro nutzbar gemachter Abwärmeleistung (Äquivalenzleistung) des BHKW
- **Gestehungskosten** der Nutzenergie: Gestehungskosten für die erzeugte Nutzenergie aus der BHKW-Abwärme dividiert durch die Gestehungskosten aus der Referenztechnologie (bei einem Wert > 100 % ist die Abwärmenutzung unrentabel)
- **Nutzungsgrad** der Bruttowärmeproduktion: Anteil der genutzten BHKW-Abwärme an der Bruttowärmeproduktion
- **Exergieausnutzung**: Umrechnung der produzierten Nutzenergie aus der BHKW-Abwärme auf ihr Erdgasäquivalent. Umrechnungsfaktoren: Strom 2.5 (Referenz: Erdgaskraftwerk mit Wirkungsgrad 40 %), Wärme von 60°C bis 90°C: 1.18 (Referenz: Erdölkessel mit Wirkungsgrad 0.85), Nutzkälte 2.5 / COP_{KKM}. Diese Definition macht einen Wert > 100 % möglich (siehe Tabelle 1, normierte Bewertung 5).
- **Replikationspotenzial** der Abwärmenutzung, qualitatives Kriterium: Potenzial der Übertragbarkeit auf alle landwirtschaftlichen Betriebe, eingeschränkt durch räumliche, politische und technische Restriktionen.
- **Technische Reife** der Konversionstechnologie, qualitatives Kriterium: Erprobung, Marktdurchdringung, Technologierisiko
- **Umweltauswirkungen**, qualitatives Kriterium: Lärm, Geruch, Landschaft, Transport

Kriterium	Einheit	normierte Bewertung				
		0	1	2	3	4
Investitionskosten der Abwärmenutzung	[CHF/kWth]	>2000	<2000	<1500	<1000	<500
Gestehungskosten der Nutzenergie	[%]	>115	<115	<100	<85	<70
Nutzungsgrad der Bruttowärmeproduktion	[%]	<10	>10	>25	>50	>90
Exergieausnutzung	[%]	<15	>15	>50	>80	>100
Replikationspotenzial der Abwärmenutzung	[--] qualitativ	nur in Einzelfällen realisierbar	nur unter speziellen Bedingungen realisierbar	nur an bestimmter Lage realisierbar	überall realisierbar, Nutzungsgrad limitiert	überall mit beliebigem Nutzungsgrad realisierbar
Technische Reife der Technologie	[--] qualitativ	in Forschungsphase	in P&D-Phase	ein bis wenige kommerzielle Anbieter	grosse Marktdurchdringung	Standardtechnologie
Umweltauswirkungen	[--] qualitativ	sehr belastend	belastend	mässig	gering	vernachlässigbar

Tabelle 1: Definition und Normierung auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut) der sieben Beurteilungskriterien für die multikriterielle Bewertung von spezifischen Abwärmenutzungsvarianten.

Damit eine schnelle visuelle Beurteilung der Abwärmenutzungsvarianten möglich ist, werden alle sieben gewählten Kriterien auf einen Wert von 0 (sehr schlecht) bis 4 (sehr gut) normiert und graphisch in einem Spinnendiagramm dargestellt. Die Normierung der einzelnen Kriterien erfolgt gemäss Tabelle 3 auf vorangehender Seite. Dabei wurde versucht, die Schwellenwerte für die Normierung derart festzulegen, dass bei einer Bewertung mit 1 oder 0 jedes Kriterium zu einer No Go-Situation führt, die betrachtete Abwärmenutzungsvariante somit als nicht realisierbar eingestuft werden muss.

Beispiel: Betragen die Investitionen für die Nutzung von 100 kW thermischer Äquivalenzleistung ab BHKW 120'000 CHF (= 1'200 CHF/kW), werden die Investitionen mit 2 bewertet (da < 1'500 CHF/kW).

In folgender Abbildung 1 wird für ein fiktives Beispiel das Spinnendiagramm illustriert. Es gilt: Je grösser die Fläche im Diagramm desto besser ist die Variante. Dabei ist zu beachten, dass die Kriterien jeweils nach absteigender Bewertung sortiert werden und im Spinnendiagramm von oben (12 Uhr) im Uhrzeigersinn angeordnet werden, damit jeweils die maximal mögliche Fläche aufgespannt wird und ein direkter Flächenvergleich möglich ist.

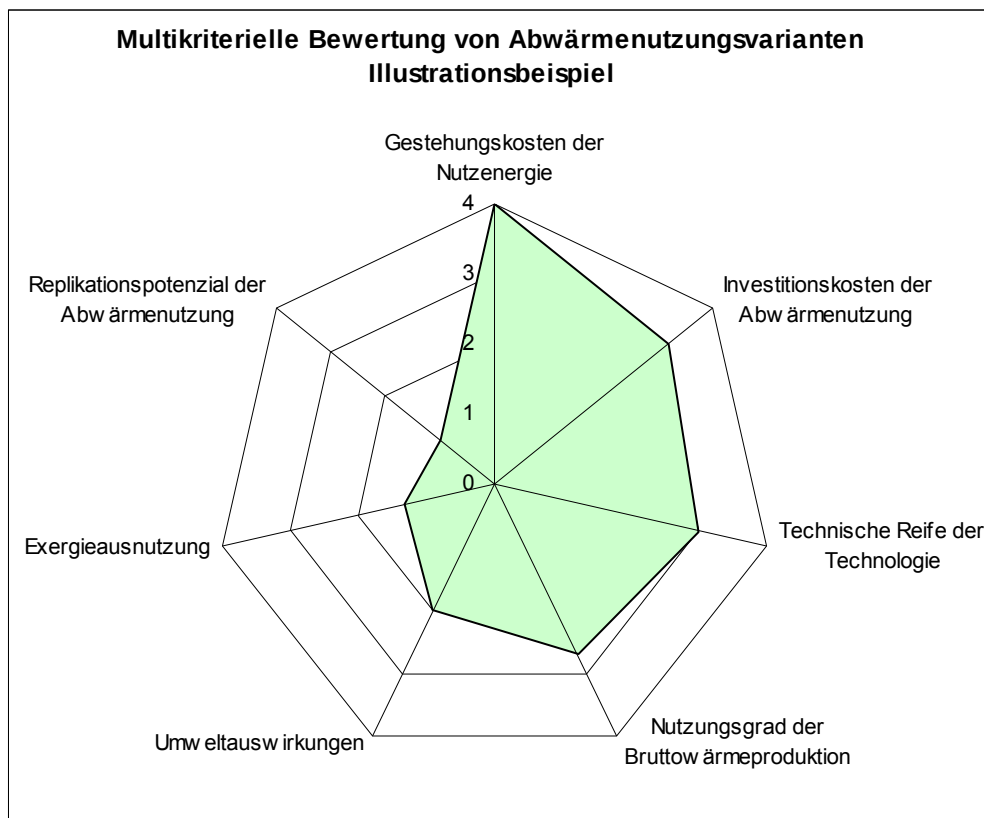


Abbildung 1: Spinnendiagramm zur Visualisierung der Bewertungsergebnisse von spezifischen Abwärmenutzungsvarianten. Je grösser die aufgespannte Fläche, desto besser ist die Abwärmenutzungsvariante. Ist eines der sieben berücksichtigten Kriterien mit 2 oder 1 bewertet (hier im Beispiel die Investitionskosten), ist die Variante mit grosser Sicherheit nicht realisierbar.

Aus Gründen der Transparenz werden alle Beurteilungskriterien auch ohne Normierung (wo möglich quantitativ) angegeben. So können die Kriterien-Ergebnisse (für die ersten vier Kriterien sind dies Zahlenwerte) nach eigenem Gutdünken resp. im Kontext der spezifischen realen Situation beurteilt werden.

4. Rahmenbedingungen landwirtschaftliche Biogasanlagen

4.1 Charakteristik landwirtschaftlicher Betriebe

In der Schweiz verfügte der durchschnittliche Landwirtschaftsbetrieb im Jahr 2005 über 14 Hektaren Nutzfläche. Von insgesamt 64'000 Betrieben verfügten 6'500 Betriebe über 30 bis 50 Hektaren und 1'600 über mehr als 50 Hektaren. Tendenziell liegen diese grossen Betriebe in der Talregion (Mittelland) und sind besonders relevant: Hier können Biogas-BHKW-Anlagen im interessanten Leistungsbereich von 100 kW.e (mittlere Anlage) bis 400 kW.e (sehr grosse Anlage) realisiert werden. Dieser Bereich orientiert sich nicht an der heute in der Schweiz typischen BHKW-Grösse von 65 bis 120 kW.e sondern an der künftig zu erwartenden Anlagengrösse; Neuanlagen aus dem Jahr 2006 weisen alle Leistungen von über 100 kW.e auf. In Tabelle 2 sind die entsprechenden Leistungsdaten und die daraus abgeleiteten Betriebsstrukturen (Co-Substratmenge und Betriebsgrösse) zusammengestellt. Die Biogaserträge aus hofeigenem Substrat und Co-Substrat (externem, hoffremdem Substrat), welche in dieser Tabelle verwendet werden, resultieren aus mittleren Annahmen für Gülle-, Mist-, und Abwasseranfall und einem Mittelwert von 100 m³ Biogas pro Tonne landwirtschaftlichem Co-Substrat⁴. Im Einzelfall können beide Ertragswerte deutlich vom Mittelwert abweichen.

Anlagengrösse: Nennleistung (7'000 h/a) [kW.e]	125	250	500
kontinuierliche Biogasproduktion [kW.gas]	275	550	1100
Äquivalenzleistung (8760 h/a) elektrisch [kW.e]	100	200	400
Bruttostromproduktion [kWh/a]	876'000	1'752'000	3'504'000
Nettostromproduktion (15% Eigenbedarf) [kWh/a]	744'600	1'489'200	2'978'400
Äquivalenzleistung thermisch [kW.th]	125	250	500
Bruttowärmeproduktion [kWh/a]	1'095'000	2'190'000	4'380'000
Nettowärmeproduktion (30% Eigenbedarf) [kWh/a]	766'500	1'533'000	3'066'000
Co-Substratanteil 20% (Höchstanteil für KEV*) [Tonnen/a]	2'000	4'000	8'000
nötige Grossvieheinheiten [GVE]	375	750	1'500
nötige Betriebsfläche bei 20% Co-Substrat [ha]	200	400	800
Co-Substratanteil 50% [Tonnen/a]	3'000	6'000	12'000
nötige Grossvieheinheiten [GVE]	150	300	600
nötige Betriebsfläche bei 50% Co-Substrat [ha]	75	150	300

Tabelle 2: Leistungsdaten und Betriebsstruktur der untersuchten Biogasanlagen. Die Umrechnung von Gasertrag in Co-Substratmengen resp. Grossvieheinheiten basieren auf den Annahmen des online-KEV-Rechners auf www.biomasseenergie.ch. Zur Bestimmung der nötigen Betriebsfläche wurde mit 2 Grossvieheinheiten (GVE) pro Hektare gerechnet. Dies trifft für Betriebe im Tal zu; bei Bergbetrieben liegt die Dichte bei rund 1 GVE pro ha, weshalb sich für diese Gebiete die nötige Betriebsfläche resp. die Anzahl Lieferbetriebe verdoppelt. Falls ein Betrieb nebst Hofdünger wesentliche Mengen an anderer landwirtschaftlicher Biomasse (Ernterückstände, Reststoffe aus der landwirtschaftlichen Produktion) nutzen kann, reduziert sich die erforderliche Betriebsfläche entsprechend.

*KEV = Kostendeckende Einspeisevergütung für Strom aus erneuerbaren Energien, per 1.1.2009 in Kraft.

⁴ Die Annahmen wurden dem online-KEV-Rechner auf www.biomasseenergie.ch entnommen.

Aus der Tabelle 2 geht hervor, dass der Co-Substratanteil einen grossen Einfluss auf die erforderliche Betriebsgrösse hat. In jedem Fall muss davon ausgegangen werden, dass ein rentabler Bau und Betrieb von Biogasanlagen künftig überbetrieblich organisiert werden muss. Mit der KEV verschärft sich der Zwang zum Zusammenschluss mehrerer Betriebe zusätzlich, da für die Vergütung des erheblichen Landwirtschaftsbonus der Co-Substratanteil von heutigen 30 % bis 45 % auf unter 20 % reduziert werden muss, und entsprechend die landwirtschaftlichen Substrate angehoben werden müssen. Der Bau von solchen Gemeinschaftsanlagen erfordert einerseits die Kooperation verschiedener Landwirtschaftsbetriebe, was ein Realisierungshemmnis sein kann. Er ermöglicht andererseits eine gezieltere Standortwahl bei wärmenachfragenden (Industrie)-Betrieben, was einer verbesserten Abwärmenutzung dient.

4.2 Technische Annahmen und Einschränkungen

- Gasmotor-BHKW: Zur möglichen Vergleichbarkeit und der Einfachheit halber wird immer von einem identischen Gasmotor-BHKW mit folgenden Wirkungsgraden (bzgl. Biogasinput) ausgegangen:
 - elektrisch ab Generator: 35 % bis Anlagen < 252 kW elektrische Äquivalenzleistungen, darüber 38 % (Vorgabe der KEV)
→ Bruttostromproduktion: 35 % bis 38 % des Biogasinputs
 - thermisch ab Motorkühlwasserwärmetauscher, ca. 90°C: 25 %
 - thermisch ab Abgaswärmetauscher, ca. 450°C: 20 %
→ Bruttowärmeproduktion: 45 % des Biogasinputs
- Eigenbedarf Biogasanlage: Strom (Rührwerke) 15 % der Bruttostromproduktion, Wärme (Fermenter) 30 % der Bruttowärmeproduktion.
- Leistungsbereich: In vorliegender Arbeit werden nur Anlagen mit einer BHKW-Leistung (elektrische Äquivalenzleistung) von 100 kW.e, 200 kW.e und 400 kW.e berücksichtigt. Für kleinere Anlagen ist die Wirtschaftlichkeit der gesamten Biogasanlage unsicher, grössere Anlagen sind aufgrund der schweizerischen Landwirtschaftsstrukturen kaum zu realisieren (siehe Abschnitt 4.1). Für die in dieser Studie untersuchten Nutzleistungen ergeben sich aus den obigen Annahmen für den Gasmotor somit folgende Leistungsbereiche:
 - Wärmeleistung (Motorabwärme 56 %, Abgas 44 %): 25⁵, 125, 250 und 500 kW.th
 - Kälteleistung (50 % der Wärmeleistung⁶): 25⁷, 63, 125, 250 kW.k
 - Strom aus Organic Rankine Cycle (ORC, siehe Seite 41): 25, 50, 100 kW.e
- Jahresprofil der anfallenden Abwärme: Da künftige Kompakt-Biogasanlagen über weniger Speicherkapazität für Biogas verfügen werden und die Einspeisevergütung gemäss KEV keine Tarifunterscheidung zwischen Tag/Nacht und Sommer/Winter kennt, ist mit einem kontinuierlichen Betrieb des Biogasmotors und damit einer kontinuierlichen Abwärmeabgabe (abzüglich dem leicht aussentemperaturabhängigen Eigenbedarf) zu rechnen.

⁵ Die kleinste in dieser Studie berücksichtigte Wärmeleistung ist 25 kW.th und entspricht 20 % der potenziellen Wärmeleistung des kleinsten betrachteten Biogasmotors mit 100 kW.e.

⁶ Die potenzielle Kälteleistung ist nur 50 % der potenziellen Wärmeleistung (= Kälteverhältnis der Konversionstechnologie * Wirkungsgrad Motor- und Abgaswärmetauscher von ca. 90 %). Für die untersuchte Absorptionstechnologie für Klimakälte ist dies ein konservativer Wert; sie erreicht Kälteverhältnisse von 70 % (* 0.9 = 63 % > 50 %).

⁷ Die kleinste berücksichtigte Kälteleistung ist 25 kW.k und entspricht 40 % der potenziellen Kälteleistung des kleinsten betrachteten Biogasmotors mit 100 kW.e (kleinere Kälteleistungen sind auf dem Markt heute kaum verfügbar).

- Redundanz: Die Verfügbarkeit von Abwärme aus Biogasanlagen ist nicht jederzeit zu 100 % sichergestellt. Daher wird für alle betrachteten Nutzungen ein konventioneller Wärmeerzeuger (Ölkessel) als Redundanz mit einer Wärmeleistung entsprechend des maximalen Leistungsbedarfs der betrachteten Nutzung bereitgestellt. Dies gilt ebenso für die Kälteerzeugung aus Abwärme mittels Absorptionsanlage, da die Investitionskosten für eine konventionelle Kompressionskälteanlage als Redundanz unverhältnismässig hoch sind im Vergleich zur grundsätzlich sehr hohen Verfügbarkeit der Abwärme aus Biogasanlagen.
- Referenztechnologie: Für alle betrachteten alternativen Technologien zur Abwärmenutzung werden zum Vergleich die Gestehungskosten für die Nutzenergie aus einer konventionellen Referenztechnologie ermittelt (nur Konversionstechnologie, ohne allfällige Speicherung und Verteilung).
 - Referenztechnologie für Wärme: Ölkessel, vor Ort des Verbrauchers
 - Referenztechnologie für Kälte: Kompressionskältemaschine, vor Ort des Verbrauchers
 - Referenz für Elektrizität aus dem ORC-Prozess: Einspeisetarif der KEV
- Referenz Abwärmenutzung: Für alle betrachteten spezifischen Abwärmenutzungen werden zum Vergleich die Gestehungskosten für die Nutzenergie aus der Referenztechnologie (siehe oben) ermittelt (inkl. allfällige Speicherung und Verteilung ab zentralem BHKW).
Spezialfall Heutrocknung: Referenz ist die Kaltbelüftung, welche einen höheren Ventilationsbedarf hat als bei einer Vorwärmung der Zuluft.
- Temperaturniveau Nutzenergie: Zur Vergleichbarkeit der verschiedenen Technologien gelten für alle die gleichen Temperaturreichweitenbedingungen
 - Wärmeerzeugung: 35°C (Raumtemperierung), 70°C (Raumheizung), 140°C (Prozess)
 - Kälteenergie: 4/0°C (Kühlung Lagergebäude), 12/6°C (Raumklimatisierung),
Rückkühlung über Aussenluft, d.h. Kondensationstemperatur 35°C
- Skalierung der Auslegewärmeleistung bzgl. BHKW-Bruttoabwärmeleistung: In der Praxis schwankt das Jahresprofil einer nachgefragten Wärmeleistung mehr oder weniger. Das Ausmass dieser Schwankung sowie der höchste Leistungsbedarf einer spezifischen Abwärmenutzung definiert in Abhängigkeit eines allfälligen Bivalenzpunktes⁸ die Auslegewärmeleistung. Für die Bewertung wird eine mögliche Auslegewärmeleistung in einem Bereich von 20 % bis 400 % der BHKW-Bruttowärmeleistung berücksichtigt (Skalierung von 20 % bis 400 %). Eine Skalierung > 100 % bedingt zwingend eine Spitzenabdeckung (bivalente Anlage) resp. einen Speicher.
 - Beispiel 1: BHKW mit Bruttowärmeleistung von 125 kW.th vorhanden. Nutzung: Beheizung von zwei Wohnhäusern → benötigte Wärmeleistung ca. 25 kW = 20 % der äquivalenten Wärmeleistung → Leistungsskalierung = 20 %.
 - Beispiel 2: BHKW mit Bruttowärmeleistung von 125 kW.th vorhanden. Nutzung: Beheizung von 20 Wohnhäusern → benötigte Wärmeleistung ca. 250 kW = 200 % der äquivalenten Wärmeleistung → Leistungsskalierung = 200 %. In diesem Fall ist eine bivalente Anlage zwingend: 125 kW wird mit dem Biogas-BHKW gedeckt, weitere 125 kW im Auslegefall (-8°C Aussentemperatur) werden von einem Ölspitzenkessel geliefert.

⁸ Bivalenzpunkt: Punkt, bei welchem ein Wärmenachfrager das Leistungsangebot eines Grundlasterzeugers (hier BHKW) übersteigt und die zusätzlich benötigte Wärmeleistung aus einem Spitzenerzeuger – hier immer ein Ölkessel - geliefert werden muss. Der Ölkessel kann somit nicht nur als Redundanz, sondern auch als Spitzenerzeuger eingesetzt werden, falls eine bivalente Wärmeversorgung aufgrund eines Lastprofils angezeigt ist.

4.3 Ökonomische Annahmen und Einschränkungen

- Kalkulationszinssatz für Investitionen: 5.0 %
- Nutzungsdauer: Anlagen 15 bis 20 Jahre, Fernleitungen 40 Jahre
- Energiepreise (exkl. MWSt): Da die Wirtschaftlichkeitsrechnungen für die gesamte Schweiz gültig sein sollten, wurde auf eine Differenzierung der Energiepreise im Nieder-/Hochtarif resp. Arbeits-/Leistungspreis verzichtet. Für die einzelnen Energieträger wurden folgende Einheits-tarife verwendet:
 - Elektrizität Rückspeisung: Tarife nach KEV, jeweils mit und ohne Landwirtschaftsbonus (abhängig vom Co-Substratanteil)
 - Elektrizität Bezug: 14.7 Rp./kWh (Quelle: Elektrizitätsstatistik Schweiz 2007, durchschnittlicher Endverbraucherpreis), Hochpreisszenario: 22.1 Rp./kWh (plus 50 %)
 - Heizöl EL: 120 CHF/100 l → 12 Rp./kWh (Preis per September 2008), Hochpreisszenario: 180 CHF/100 l (plus 50 %, angesichts des starken Preiserückgangs bis November 2008, möglicherweise eine etwas hohe Annahme).
- Co-Substratanteil⁹ und Stromeinspeisetarife nach KEV (Details folgen in Abschnitt 4.3.1): Bei den heutigen Biogasanlagen liegt der Co-Substratanteil (bezogen auf die Frischmasse) meist im Bereich 30 % bis 45 %, da der Gasertrag dieser Substrate i. d. R. viel höher ist als jener aus hofeigenen Reststoffen (z.B. Gülle). Daher galt bis heute: Je höher der Co-Substrat-Anteil, desto wirtschaftlicher die Anlage. Die Einführung der KEV und die sinkenden Erlöse aus der Co-Substrat-Verwertung wird diese Situation umkehren; der in der KEV vorgesehene Landwirtschaftsbonus im Umfang von 11 bis 15 Rp./kWh wird nur vergütet, falls der Co-Substratanteil kleiner als 20 % ist. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung wird daher für beide Fälle (KEV mit und ohne Landwirtschaftsbonus) ausgewertet. Die Referenz wird dabei immer mit WKK-Bonus berechnet. Dies ist eine konservative Annahme, da angenommen werden kann, dass Anlagen ohne spezielle AWN-Massnahmen eine externe Abwärmenutzung > 20 % - Bedingung für den WKK-Bonus - i. d. R. nicht erreichen.
- Kostengenauigkeit: Die Kostenangaben basieren auf qualitativ unterschiedlichen Quellen (Daten von realisierten Anlagen, Produkt- und Offertangaben). Die Angaben haben daher eine Genauigkeit von rund ± 20 %.

4.3.1 Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV)

Für die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage ist die erzielbare Stromeinspeisevergütung entscheidend. Mit der Einführung der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) ab dem 1. Januar 2009 spielt der Co-Substratanteil - wie oben bereits erwähnt - eine wichtige Rolle. Die totale Einspeisevergütung für landwirtschaftliche Biogasanlagen setzt sich aus Grundvergütung, Landwirtschaftsbonus und WKK-Bonus zusammen (Tabelle 3 auf folgender Seite). Vergütet wird nicht der überschüssige Strom, sondern die Bruttoproduktion während 20 Jahren (ohne Absenkung). Die Höhe der Vergütung ist abhängig von der Äquivalenzleistung. Diese errechnet sich aus der jährlichen Bruttostromproduktion dividiert durch 8'760 Stunden.

⁹ zugeführte organische, nicht-landwirtschaftliche Abfälle (z.B. Schlachtabfälle, Grünschnittabfälle).

Geltende Bedingungen

- Grundvergütung (Mindestanforderungen für KEV):
 - Neuanlagen ab 1.1.2006 resp. Erweiterung mit Investitionen > 50 % einer Neuanlage oder Erweiterung mit Mehrproduktion von 25 %
 - Elektrischer Wirkungsgrad: 24 % bei 0 kW.e, linear ansteigend bis 38 % ab 252 kW.e
 - Co-Substratanteil < 50 % (= landwirtschaftliche Biogasanlage): Eigenbedarf der Biogasanlage (ca. 30 % der Bruttowärmeproduktion) muss mit Abwärme gedeckt werden.
- Landwirtschaftsbonus: Co-Substratanteil < 20 % resp. landwirtschaftliche Biomasse > 80 % (Gülle, Mist, Ernterückstände, Reststoffe aus der landwirtschaftlichen Produktion). Die landwirtschaftliche Biomasse darf auch aus benachbarten Landwirtschaftsbetrieben stammen. Die maximal zulässige Fahrdistanz beträgt für landw. Substrate 15 Kilometer, für nicht landw. Co-Substrate 50 Kilometer.
- WKK-Bonus: Externe Abwärmenutzung > 20 % der Bruttowärmeproduktion. Für eine durchschnittliche Biogasanlage, bei welcher die Beheizung der Fermenter und allfällige Hygienisierung von Co-Substraten etwa 30 % der Bruttowärmeproduktion beansprucht, bedeutet dies eine Nutzung der Wärme zu mehr als 50 %.

Äquivalenzleistung	Grundvergütung	Landwirtschaftsbonus	WKK-Bonus
[kW.e]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]	[Rp./kWh]
50	24.0	15.0	2.0
100	21.5	13.5	2.0
500	19.0	11.0	2.0
5'000	16.0	4.0	2.0
ab 5'000	15.0	0.0	2.0

Tabelle 3: Zusammensetzung der kostendeckenden Einspeisevergütung für Strom aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Der WKK-Bonus wird nur vergütet, falls mehr als 20 % der Bruttowärme extern genutzt wird.

Rechenbeispiel: Anlage mit 150 kW.e (äquivalent): 36.7 Rp./kWh

→ Grundvergütung: $(50 \cdot 24.0 + 50 \cdot 21.5 + 50 \cdot 19.0) / 150 = 21.5$ Rp./kWh

→ Landwirtschafts-Bonus: $(50 \cdot 15.0 + 50 \cdot 13.5 + 50 \cdot 11.0) / 150 = 13.2$ Rp./kWh

→ WKK-Bonus: 2.0 Rp./kWh

4.3.2 Betreibermodelle zur Abwärmenutzung

In der Praxis kann es sinnvoll sein, dass die Abwärmenutzung durch externe Partner (Contractoren, Wohngenossenschaften, Gewächshausbetreiber, landwirtschaftsverwandte Industrien) finanziert und/oder betrieben wird und der Landwirt seine Abwärme zu einem verhandelbaren Tarif absetzt. Für vorliegende Betrachtungen werden diese möglichen Betreibermodelle nicht berücksichtigt, sondern jeweils die Wirtschaftlichkeit für eine komplette, funktionsfähige Abwärmenutzung berechnet. Mögliche Vorteile von Contractor-Lösungen werden bei investitionsintensiven Abwärmenutzungen (z.B. grosser Wärmeverbund) lediglich erwähnt.

5. Kosten für periphere Installationen zur Abwärmenutzung

In der vorliegenden Studie wird die dem Gasmotor nachgeschaltete Abwärmenutzung beurteilt. Systemgrenze bildet ein Standardgasmotor mit Kühlwasserwärmetauscher und Notkühler. Für eine optimale Abwärmenutzung sind neben einer speziellen Konversionstechnologie bei Kälte- oder Stromproduktion (Kapitel 6) verschiedene periphere Installationen erforderlich: Abgaswärmetauscher, Wärmeverteiler, Energiespeicher und -transportleitungen (je nach Nutzungsdynamik und -distanz), welche weitere Investitionen notwendig machen. In diesem Kapitel werden diese Investitionskosten für alle nötigen peripheren Installationen zusammengestellt und in knapper Form erläutert. Die in den folgenden Tabellen ausgewiesenen Kosten werden zu den Kosten der Konversionstechnologie (Kapitel 6) dazugerechnet; daraus ergeben sich die Gesamtkosten für eine spezifische Abwärmenutzung (Kapitel 7).

5.1 Auskoppelung von Abwärme

Für die Auskoppelung der gesamten Abwärme sind folgende Installationen und deren spezifischen Investitionen für drei BHKW-Leistungen nötig:

Installation für Wärmeauskoppelung	Investitionen für 3 BHKW-Leistungen		
	100 kW.e	200 kW.e	400 kW.e
Abgaswärmetauscher: Nachrüstung bei einem Wärmebedarf auf einem Temperaturniveau höher als 90°C oder zur Erschliessung der gesamten Bruttowärmeproduktion.	40 - 47 CHF / kW.e	29 - 34 CHF / kW.e	21 - 25 CHF / kW.e
Wärmeverteiler: primäre Wärmeverteilung ab zentralem BHKW an die Abnehmer (beinhaltet Verteilbalken, Pumpen, Steuerung analog Fernwärmeanschluss; ohne Fernleitungen)	260 - 290 CHF / kW.th	180 - 200 CHF / kW.th	115 - 130 CHF / kW.th
Dampferzeuger: nur nötig, falls die Nutzung oder Konversionstechnologie Dampf benötigt.	325 - 350 CHF / kW.th	200 - 220 CHF / kW.th	170 - 190 CHF / kW.th

5.2 Energiespeicherung

Aufgrund einer spezifischen Abwärmenutzung ergibt sich je nach Nutzungsdynamik ein unterschiedlicher Bedarf für Energiespeicherung. In folgender Tabelle sind die Speicherkosten für verschiedene Volumen pro Kubikmeter benötigtes Speichervolumen ausgewiesen. Das benötigte Volumen ergibt aus der Kostenoptimierung von Speicherkosten und Betriebskosten des Spitzenenerzeugers¹⁰ einer spezifischen Abwärmenutzung (Kapitel 7).

Annahmen

- **Speicherbewirtschaftung:** Der Speicher wird bei überschüssiger Abwärme geladen, bei Abwärmedefizit (Abwärmenachfrage grösser als Abwärme aus Biogasanlage) prioritär (vor dem Spitzenkessel) entladen.

¹⁰ Es liegt ein Trade-off zwischen Speichervolumen und Spitzenenergiebedarf resp. Nutzungsgrad der Bruttowärmeproduktion vor: Je grösser der Speicher desto kleiner ist der Spitzenenergiebedarf (hier Erdöl EL) resp. desto grösser ist der potenzielle Nutzungsgrad (da weniger Abwärmeleistung für die Spitzenabdeckung reserviert werden muss).

- Temperaturspreizung max. 30 Kelvin (85/55°C)
- Speichergrosse: Volumina bis max. 100'000 Liter werden berücksichtigt (max. Bezug von 500 kW.th während 8 Stunden = 4'000 kWh Speicherkapazität (bei Verwendung von Wasser). Der Speicher wird jeweils analog zum Profil bezüglich BHKW-Leistung skaliert. Ein Speicher mit Skalierung 1.0 ist derart dimensioniert, dass er bei gefülltem Zustand gerade die BHKW-Bruttowärmeleistung während einer Stunde zur Verfügung stellen kann.
- Verluste Speicher: 5 % pro Tag (d.h. ein voll geladener Speicher ist nach 20 Tagen Stillstand wieder leer)

Installation für Energiespeicherung	Investitionen CHF/m ³
Wasserspeicher 2 bis 5 m³: Universalenergiespeicher inkl. Isolation	2'500.--
Wasserspeicher 5 bis 10 m³: Universalenergiespeicher inkl. Isolation	2'000.--
Wasserspeicher 10 bis 50 m³: Universalenergiespeicher inkl. Isolation	1'500.--
Latentspeicher¹¹: nicht näher untersucht. Es gibt sehr interessante, verfügbare Systeme (z.B. www.powertank.de). Latentspeicher eignen sich in erster Linie zur Speicherung von unregelmässig anfallender Wärme ohne sehr grosse Leistungsspitzen auf tiefem Temperaturniveau (z.B. Solarkollektorenergie). Dies trifft für Abwärme aus landwirtschaftlichen Biogas-Motoren nicht zu. Interessant wird hier der Einsatz, falls ▪ Speicher notwendig ist und gleichzeitig ein Platzproblem vorhanden ist; Paraffin-Latentspeicher (Dichte 0.9) haben bei einer Temperaturdifferenz von 15 K eine bis zu viermal grössere Speicherkapazität (pro kg) als Wasser. ▪ ein verhältnismässig kleiner Wärmebezüger auf tiefem Temperaturniveau (ca. 60°C) vorhanden ist, der mehr als ca. 2 km (Grenzdistanz ist eine Frage der Kostenoptimierung) entfernt liegt und mit einem Anschluss mittels Fernwärmeleitung deutlich teurer ist. Besonders interessant könnte beispielsweise in einem solchen Fall sein, wenn ein Nachbar-Landwirt bereits Substrat anliefert und mit der gleichen Fahrt die Latentspeicherzellen zur Beheizung seiner Gebäude hin- und hertransportieren könnte.	

¹¹ Ein Latentwärmespeicher speichert Energie bei konstanter Temperatur verlustarm mit vielen Wiederholzyklen und über lange Zeit. Man nutzt sogenannte „Phasenübergangsmaterialien“ (Phase Change Materials, PCM), deren latente Schmelzwärme oder Lösungswärme wesentlich grösser ist als die spezifische Wärmekapazität der gleichen Menge eines Stoffes ohne Phasenumwandlung. Die Ausnutzung des Phasenübergangs fest-flüssig ist dabei das am häufigsten genutzte Prinzip. Da dieser Vorgang reversibel ist, gibt das Speichermedium genau diese Wärmemenge beim Erstarren wieder ab.

5.3 Energietransport

Aufgrund einer spezifischen Abwärmenutzung ergibt sich je nach Nutzungsdistanz ein unterschiedlicher Bedarf für Energietransportleitungen. Dabei ist nebst Wärmetransport auch Kälte-transport denkbar. Aus technischen Gründen (Anforderungen an Korrosionsschutz, geringe Temperaturspreizung bis 6 K) sind Fernkälteleitungen deutlich teurer (ca. 100 % für gleiche Durchmesser) als Fernwärmeleitungen. In folgender Tabelle sind die Kosten für drei unterschiedliche Übertragungsleistungen angegeben. Alle Kostenangaben gelten für eine Verlegung der Leitungen in unbebautem Gelände (Flur) und basieren auf der entsprechenden Kostenkurve in Abbildung 2. Die höheren Kosten im Falle einer Verlegung in einer Strasse sind darin ebenfalls aufgeführt (gestrichelte Kurven). In der Abbildung 3 sind die spezifischen Kosten für flurverlegte Fernleitungen in Rappen pro übertragener kWh dargestellt. Dabei wird deutlich, dass eine möglichst hohe Auslastung der Leitungen anzustreben ist; Fernleitungen, die hohe Leistungen in nur wenigen Stunden pro Jahr übertragen, sind tendenziell unrentabel.

Installation für Energietransport	Investitionen für 3 BHKW-Leistungen		
	100 kW.e	200 kW.e	400 kW.e
Fernwärmeleitung: Kunststoffmantelrohre (KMR) mit Stahlinnenrohr, Temperaturspreizung Vor- / Rücklauf: 90°C – 60°C = 30 K, durchschnittlicher Druckverlust 100 Pa pro Meter	125 kW.th: → Flur: 520 CHF/m	250 kW.th: → Flur: 580 CHF/m	500 kW.th: → Flur: 675 CHF/m
Fernkälteleitung: KMR mit Kunststoffinnenrohr (Verhinderung Korrosion) → Annahme 100 % teurer als Wärmeleitung, Temperaturspreizung 6 K, durchschnittlicher Druckverlust 100 Pa pro Meter.	63 kW.k ¹² : → Flur: 1'000 CHF/m	125 kW.k: → Flur: 1'215 CHF/m	250 kW.k: → Flur: 1'535 CHF/m
Direkt-Biogasleitung: nicht untersucht Von Interesse ist diese Option nur bei grossen Wärmenachfragern in einer Distanz von mehr als ca. 2 Kilometern. Hier stellt sich bei Neuanlagen immer die Frage, die gesamte Biogasanlage allenfalls direkt vor Ort der Nachfrage zu errichten.	k. A.	k. A.	k. A.
Einspeisung ins Erdgasnetz: nicht untersucht Für die betrachteten landwirtschaftlichen Biogasanlagen ist diese Option nur in Spezialfällen von Interesse (Anlage zu klein im Vergleich zu Investitionen, kein Erdgasanschluss vorhanden)	k. A.	k. A.	k. A.

¹² Die Halbierung der Kälteleistung gegenüber der Wärmeleistung folgt aus dem Kälteverhältnis der Kälteerzeugung (Kälte zu benötigter Wärme, z.B. bei einer einstufigen Absorptionskältemaschine 0.7), welches hier für alle Technologien auf konservative 0.5 gesetzt wird.

Weitere Annahmen

- Stromverbrauch Pumpen Fernwärme: 4 % der umgesetzten Heizwärme.
- Verluste Fernwärmeleitungen: Physikalisch besteht eine Abhängigkeit von der Leitungslänge und vom Leitungsdurchmesser. Da diese i. d. R. mit der abgesetzten Energiemenge korrelieren, wird pauschal mit 15 % Verlust gerechnet.

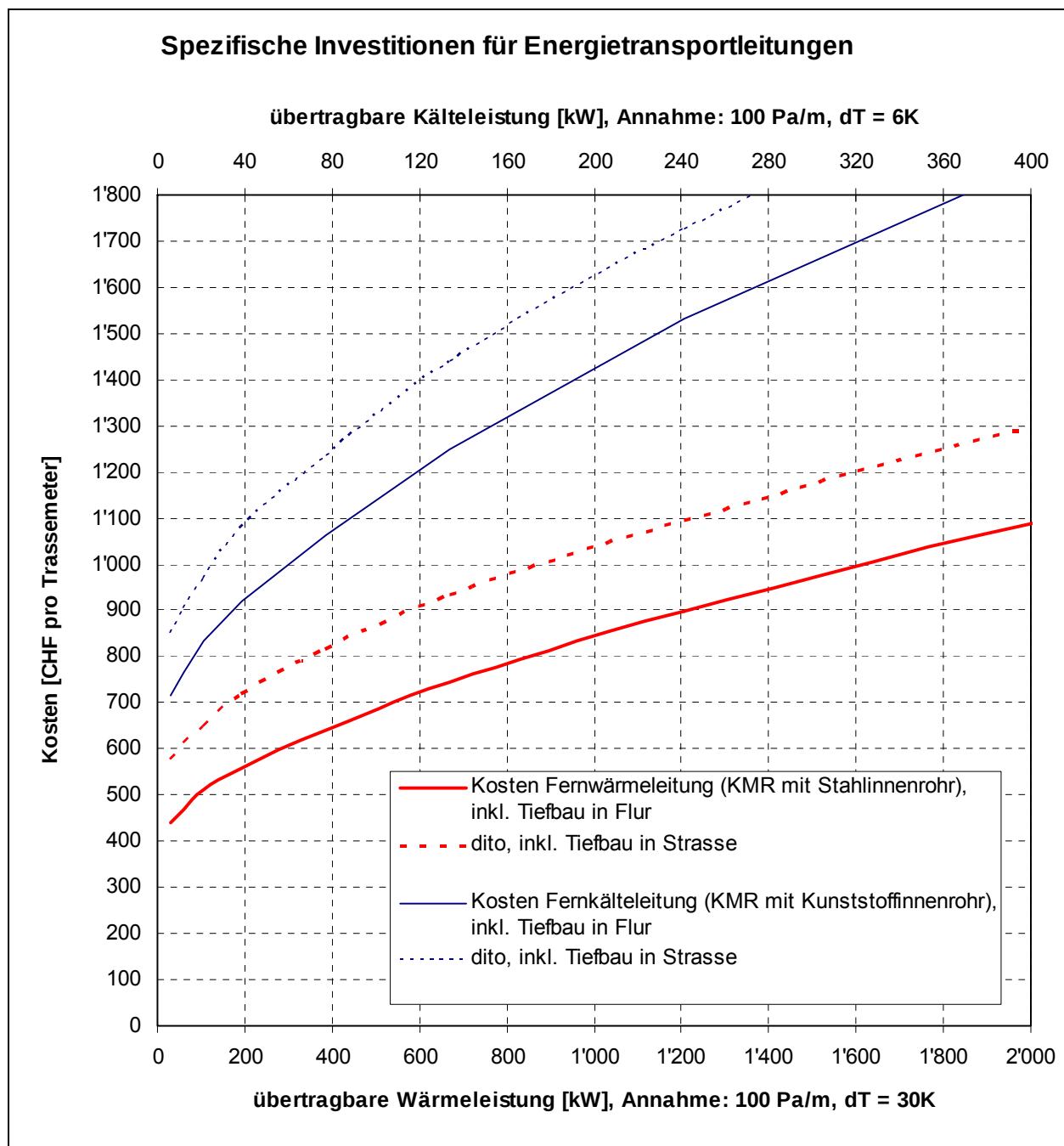


Abbildung 2: Spezifische Investitionen (CHF pro Trasse meter) für Fernleitungen für Wärme- und Kälteverteilung in Abhängigkeit der übertragbaren Leistung. Annahmen: Temperaturspreizung Vor- / Rücklauf 30 K; durchschnittlicher Druckverlust 100 Pa pro Meter; Tiefbau Strasse: Entfernung des Asphalts und Aushub des Kieskoßers inkl. Rückbau nach Verlegung, ohne Komplikationen durch Werksleitungen. Die Kosten für Fernkälteleitungen wurden aus jenen der Fernwärmeleitungen abgeleitet (Rohrmaterial wegen nötigem Korrosionsschutz Faktor 2 teurer, Verlegung identisch). Quelle: Dr. Eicher+Pauli AG.

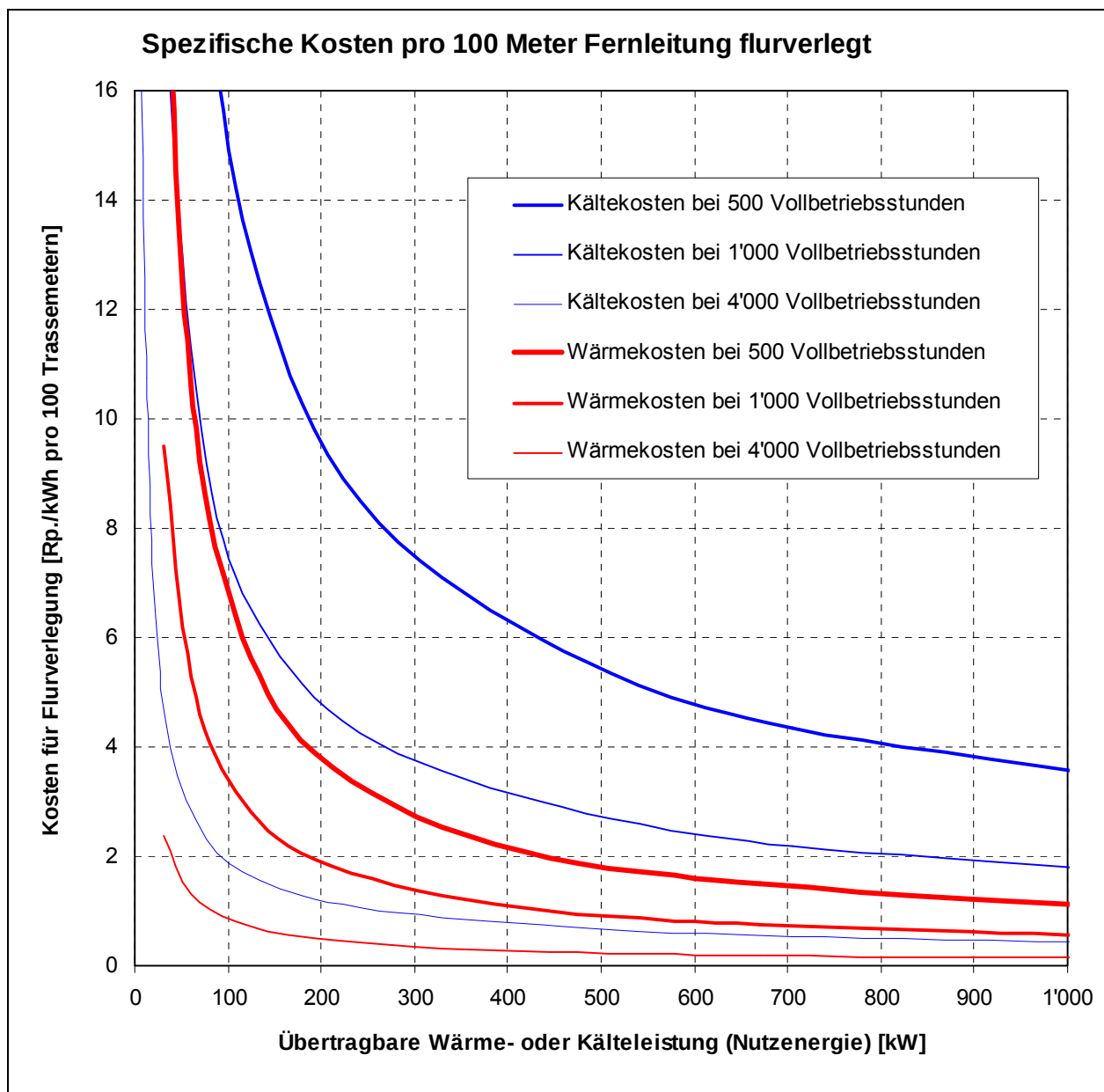


Abbildung 3: Spezifische Kosten für flurverlegte Fernleitungen (Rp./kWh pro 100 Meter Trasse) für Wärme- und Kälteverteilung in Abhängigkeit der übertragbaren Leistung. Annahmen: Lebensdauer Leitung 40 Jahre, Zinssatz 5 %. Quelle: Dr. Eicher+Pauli AG.

6. Bewertung von Technologien zur Abwärmenutzung

In diesem Kapitel werden Technologien in ihrer technischen Funktionsweise beschrieben, welche auf dem Markt verfügbar sind, jedoch für die Konversion von Abwärme aus Biogasmotoren in Nutzkälte und Strom heute noch nicht etabliert sind. Im Weiteren werden die wichtigsten Vor- und Nachteile beschrieben und die Wirtschaftlichkeit für den untersuchten Leistungsbereich ausgewiesen. In einem kurzen Fazit werden die wichtigsten Erkenntnisse abschliessend zusammengefasst.

Für Nutzwärme aus Abwärme wird keine spezielle Konversionstechnologie benötigt; die hierfür entstehenden Kosten sind im vorangehenden Kapitel 5 „Kosten für periphere Installationen“ zusammengestellt. Für die Redundanzforderung (Abschnitt 4.1 auf Seite 19) und Spitzenlastabdeckung wird mit den Kosten für einen Ölkessel gerechnet (Referenztechnologie).

6.1 Übersicht Wirtschaftlichkeit der untersuchten Technologien

REFERENZTECHNOLOGIE				
Wirtschaftlichkeit für 3 BHKW-Leistungen		100 kW.e	200 kW.e	400 kW.e
NUTZWÄRME ¹³	25 kW.th	125 kW.th	250 kW.th	500 kW.th
Ölkessel: Erzeugung von Raum- und Prozesswärme, Standardtechnik für alle Leistungsbereiche, sehr tiefe Investitionen, hohe Betriebskosten.				
Investitionskosten [CHF/kW] 1)	575	395	335	285
Gestehungskosten 2008 [Rp./kWh] für 2'250 Vollbetriebsstunden pro Jahr	16.6	15.8	15.6	15.4
davon Betriebskosten ¹⁴ [Rp./kWh] 2)	14.6	14.4	14.4	14.3
NUTZKÄLTE ¹⁵	25 kW.k	63 kW.k	125 kW.k	250 kW.k
Kompressionskältemaschine (KKM): Kälteerzeugung bis -40°C, Standardtechnik für alle Leistungsbereiche, tiefe Investitionen, hohe Betriebskosten, Gütegrad (COP.real/COP.carnot) = 40%				
Investitionskosten [CHF/kW] 1)	4'200	2'700	2'000	1'400
Gestehungskosten 2008 Rp./kWh für:				
4/0°C (Kühlraum, JAZ = 3.0, 1'830 h)	48.0	32.9	25.1	19.5
2/6°C (Raumklima, JAZ = 4.0, 760 h)	106.9	70.8	52.1	38.7
davon Betriebskosten ¹⁶ [Rp./kWh] 2)				
4/0°C (Kühlraum)	13.1	10.2	8.8	7.7
12/6°C (Raumklima)	23.3	16.5	12.9	10.3

1) Investitionskosten: Beinhaltet Anlage (inkl. Steuerung), Wärmetauscher und Installationskosten.

2) Betriebskosten: Energiekosten (Wärme aus BHKW = 0), Instandhaltung, Bedienung, Wartung.

¹³ Siehe Leistungsbereichsdefinition in Abschnitt 4.1 auf Seite 9.

¹⁴ Erdölpreis 2008: 12 Rp./kWh. Wirkungsgrad Ölkessel 85 %.

¹⁵ Siehe Leistungsbereichsdefinition in Abschnitt 4.1 auf Seite 9.

¹⁶ Strompreis 2008: 14.7 Rp./kWh

ABWÄRMENUTZUNGSTECHNOLOGIEN				
Wirtschaftlichkeit für 3 BHKW-Leistungen		100 kW.e	200 kW.e	400 kW.e
NUTZKÄLTE	25 kW.k	63 kW.k	125 kW.k	250 kW.k
Absorptionskältemaschine (AKM): Abwärmenutzung (hier 120°C) zur Kälteerzeugung (hier bis 0°C mit Wasser als Kältemittel), Verhältnis Kälteoutput zu Wärmeinput (Kälte-COP) bis 0.7 (einstufig) bis 1.4 (zweistufig, hier nicht betrachtet), träges Regelverhalten, etabliert und erprobt, viele Anbieter jedoch Kleinanlagen noch nicht lange auf Markt.				
Investitionskosten einstufig ¹⁷ [CHF/kW] 4/0°C (Kühlraum, WV = 0.55) 12/6°C (Raumklima, WV = 0.7)	nicht verfügbar	5'100 4'900	3'600 3'500	2'500 2'500
Gestehungskosten 2008 [Rp./kWh] für: 4/0°C (Kühlraum, WV = 0.55, 1'830 h) 12/6°C (Raumklima, WV = 0.7, 760 h)		30.4 70.9	21.4 49.5	15.1 34.7
davon Betriebskosten 2008 [Rp./kWh] 4/0°C (Kühlraum, WV = 0.55, 1'830 h) 12/6°C (Raumklima, WV = 0.7, 760 h)		8.1 19.0	5.6 13.1	3.9 9.1
Dampfstrahlkältemaschine (DSKM): Abwärmenutzung (hier 140°C) zur Kälteerzeugung (hier 6°C), hohe Investitionen (Dampferzeuger nötig), Kälteverhältnis stark von der Verdampfungs- und Kondensationstemperatur abhängig (hier 0.5), gute Regelbarkeit, Leistungen < 200 kW.k kommerziell verfügbar jedoch sehr wenig Erfahrung → keine verlässlichen Kostenangaben				
Investitionskosten [CHF/kW.k] ¹⁸ 12/6°C (Raumklima, WV = 0.40)	2'500	1'250	1'000	650
Adsorptionskältemaschine: Abwärmenutzung zur zyklischen Kälteerzeugung (6°C) ab 60°C, leicht schlechteres Kälteverhältnis als AKM, Technik sehr einfach und zuverlässig, in Entwicklung und z. Z. nur in teuren Kleinserien verfügbar (→ keine Kostenangaben).				
STROM	10 kW.e	20 kW.e	40 kW.e	80 kW.e
Organic Rankine Cycle (ORC): Abwärmenutzung zur Stromerzeugung ab 100°C, Wirkungsgrad bis max. 21 %, für Leistungen > 1 MW.e erprobt und etabliert, Leistungen von < 100 kW.e seit kurzem auf dem Markt verfügbar.				
Investitionskosten [CHF/kW]	15'000	10'500	7'500	5'500
Gestehungskosten 2008 für 7'000 Vollbetriebsstunden pro Jahr [Rp./kWh]	21.2	15.1	10.8	7.7
Davon Betriebskosten [Rp./kWh]	7.5	5.4	3.8	2.7
Kalina Kreisprozess: Abwärmenutzung zur Stromerzeugung bereits ab 90°C, bis 60 % höherer Wirkungsgrad als ORC, heute nur in grossen geothermischen Kraftwerken im Einsatz (→ keine Kostenangaben).				

¹⁷ Wärmeverhältnis WV bei 4°C = 0.55, bei 12°C = 0.7, inkl. Investitionen für Ölkessel als redundante Wärmequelle.

¹⁸ Basierend auf Richtpreisen der Firma Koerting AG vom 5.12.2008. Nicht zum Lieferumfang gehören: Pumpen für Kaltwasser und Kühlwasser, Armaturen, zu- und abführende Rohrleitungen, Fundamentarbeiten, Montage Inbetriebnahme.

6.2 Referenz Wärmeerzeugung: Ölkessel

6.2.1 Kurzbeschreibung der Technologie

Öl- und Gaskessel sind heute (noch) die am weitesten verbreiteten Erzeuger für (Raum)-Wärme. Für Wärmeleistungen bis ca. 10 MW_{th} werden Monoblockbrenner eingesetzt. Bei diesen ist das Verbrennungsluftgebläse im Brenner integriert. Der flüssige Brennstoff Öl muss im Brennraum möglichst fein zerstäubt werden, um eine grosse Oberfläche für die Verbrennungsreaktion mit Luftsauerstoff zu erreichen (homogene und emissionsarme Verbrennung). Bei kondensierenden Ölkesseln werden die Verbrennungsgase unter die Taupunkttemperatur von 45°C abgekühlt, das je nach Schwefelgehalt sehr saure Kondensat (pH 2.5) wird in eine Neutralisationsbox geführt. Kondensierende Ölbrenner erreichen einen Gesamtwirkungsgrad (inkl. Bereitstellungsverluste) von über 95 %. In dieser Studie wird als Referenz ein ‚normaler‘ Kessel ohne Kondensation verwendet (Gesamtwirkungsgrad 85 %), da häufig die bestehenden älteren Kessel weiterverwendet werden können.

6.2.2 SWOT-Analyse

Stärken	Chancen
▪ Geringe Investitionskosten ▪ Für alle Leistungsbereiche und Nutztemperaturen einsetzbar ▪ Sehr gute Lastregulierung	▪ Gestehungskosten dominiert durch Betriebskosten, daher gut geeignet für Spitzenabdeckung
Schwächen	Risiken
▪ Hohe Betriebskosten (Heizöl) ▪ Platzbedarf für Tanklager und Kamin ▪ Teillastbetrieb mit geringen Abstrahlverlusten verbunden	▪ Entwicklung Ölpreis ▪ Luftreinhaltevorschriften

6.2.3 Fazit

Konventionelle Ölkessel sind seit Jahrzehnten auf dem Markt und sind technologisch 100 % ausgereift. Sie eignen sich gut für Spitzenbedarfsabdeckung, da sie verhältnismässig geringe Bereitschaftsverluste aufweisen, sehr geringe Investitionen erfordern und gut reguliert werden können. Für die Bereitstellung von Band-Niedertemperaturwärme dürfte der Ölkessel hingegen trotz Kondensationstechnologie stark an Bedeutung einbüßen (schlechte CO₂-Bilanz, unberechenbarer Ölpreis, Vernichtung wertvoller Exergie und Rohstoffe für die Petrochemie).

6.3 Referenz Kälte: Kompressionskältemaschine

6.3.1 Kurzbeschreibung der Technologie

Die heutige Standardtechnologie zur Erzeugung von Nutzkälte ist die Kompressionskältemaschine (KKM). Dem Kaltwasser (Nutzkälte-Kreis) wird - wie bei allen hier untersuchten Kältemaschinen - durch Verdampfung eines Kältemittels bei tiefem Druck Wärme entzogen. Mittels mechanischer Verdichtung wird der Kältemitteldampf anschliessend auf ein höheres Druckniveau angehoben, wo er sich im Kondensator bei höheren Temperaturen verflüssigt. Die durch die Kondensation freigesetzte Wärme muss an die Umgebung abgegeben werden. Kompressorkältemaschinen werden i. d. R. mit Elektro- selten auch mit Gas-/Dieselmotoren betrieben.

Technische Spezifikationen für diese Studie:

- Kondensation bei 35°C (Rückkühlung der Abwärme über Aussenluft, sommerdominiert)
- Gütegrad der Anlage: 40% ($\text{COP}_{\text{real}} / \text{COP}_{\text{Carnot}}$, daraus folgt:
- COP für Raumklimatisierung (12/6°C): 4.0
- COP für Kühlung Lagergebäude (4/0°C): 3.0

6.3.2 SWOT-Analyse

Stärken	Chancen
▪ Geringe Investitionskosten ▪ Für alle Leistungsbereiche und Nutzttemperaturen einsetzbar ▪ Kompakte Anlage	▪ Gestehungskosten dominiert durch Betriebskosten, daher gut geeignet für Spitzenabdeckung ▪ Natürliche Kältemittel: Ammoniak, CO₂, Wasser
Schwächen	Risiken
▪ Bewegliche, verschleissbelastete Komponenten: hoher Wartungsaufwand ▪ Hohe Betriebskosten (Strom) ▪ Teillast oft nur mit stark sinkendem COP ▪ Treibhausgaswirkung der teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoff-Kältemittel ▪ Hoher elektrischer Anschlusswert ▪ Geräuschemissionen	▪ Entwicklung Strombezugstarife

6.3.3 Fazit

Kompressionskältemaschinen (KKM) haben einen einfachen, standardisierten, apparativen Aufbau und sind heute im Markt klar dominierend und technologisch ausgereift. Ausserdem sind viele verschiedene Kältemittel verfügbar, so dass sich eine sehr grosse Anwendungs- und Einsatzbreite ergibt. Durch Verringerung des Temperaturhubes resp. der Druckdifferenz (Erhöhung Nutzkälte- resp. Verdampfungstemperatur, Verminderung Kondensationstemperatur) durch optimierte Systemeinbindung kann die Effizienz der KKM noch verbessert werden.

6.4 Kälteerzeugung: Absorptionskälte

6.4.1 Kurzbeschreibung der Technologie

Eine Absorptionskältemaschine (AKM) ist eine Kältemaschine, bei der im Gegensatz zur KKM die Verdichtung durch eine temperaturbeeinflusste Lösung des Kältemittels erfolgt. Man bezeichnet dies auch als thermischen Verdichter. Das Kältemittel (Wasser) wird im **Absorber** in einem Lösungsmittelkreislauf bei geringer Temperatur in einem zweiten Stoff (Ammoniak oder Lithiumbromid) absorbiert. Anschliessend wird die nun verdünnte Lösung in den **Austreiber** gepumpt, wo das Kältemittel bei höheren Temperaturen unter Zufuhr von Wärme (z.B. BHKW-Abwärme) ausgedampft resp. desorbiert und die Lösung somit wieder aufkonzentriert wird. Danach gelangt das Kältemittel in den **Kondenser**, in welchem der Kältemittel-(Wasser-) Dampf an den Kühlrohren verflüssigt wird. Das flüssige Kältemittel strömt nun zum **Verdampfer**. Hier wird das Kältemittel durch das durchfliessende Kaltwasser bei 8 mbar und 4°C verdampft. Die dazu erforderliche Verdampfungswärme wird dem Kaltwasser entzogen, es wird abgekühlt und der Nutzung zugeführt.

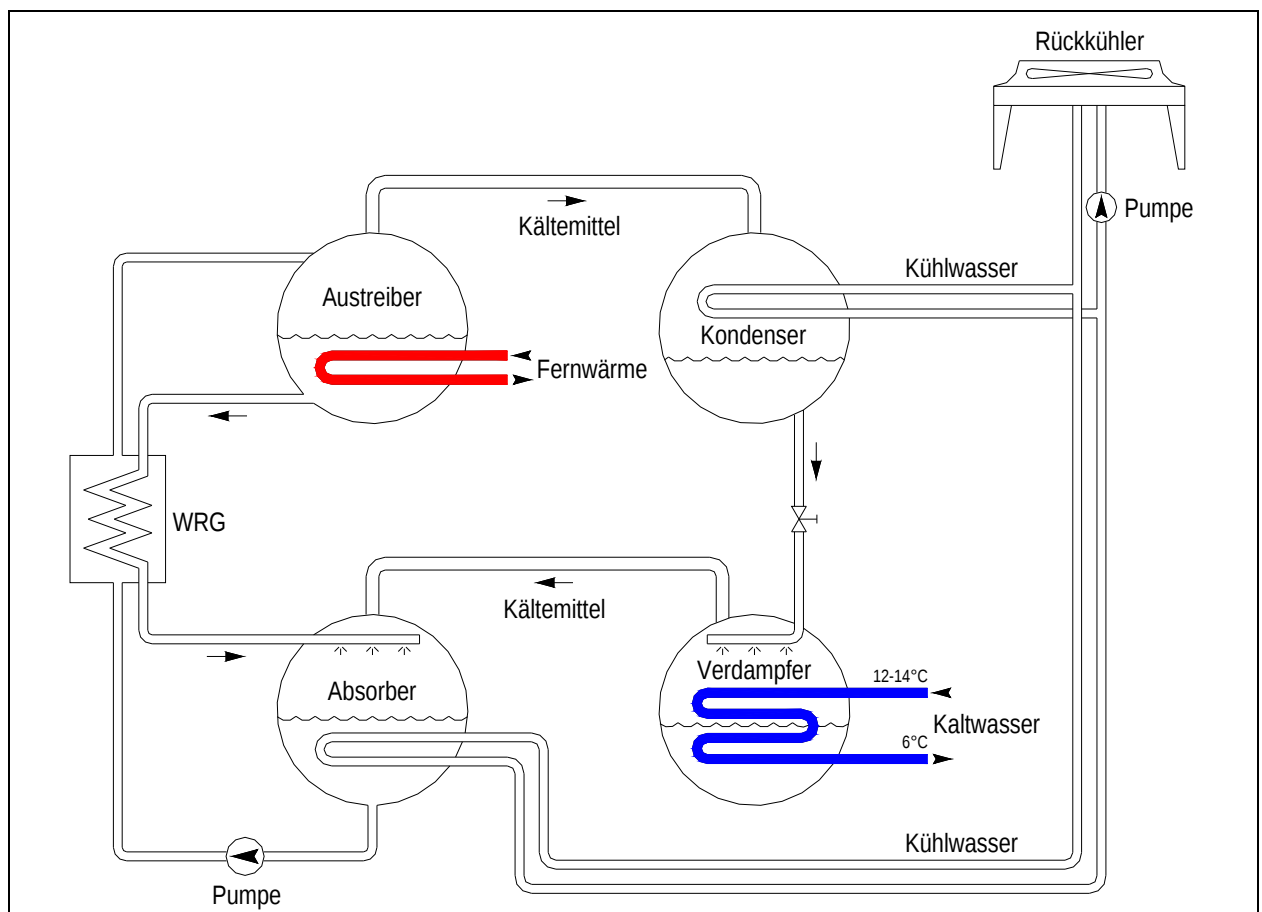


Abbildung 4: Funktionsprinzip einer Absorptionskälteanlage, Quelle: [Dr. Eicher+Pauli AG]

Absorptionsanlagen arbeiten mit sogenannten „natürlichen“ Kältemitteln, hauptsächlich mit den Arbeitsstoffpaaren Ammoniak/Wasser und Wasser/Lithiumbromid. Während ersteres überwiegend zur Erzeugung von Nutzkälte bis min. -30°C verwendet wird, wird letzteres - mit Wasser als Kältemittel und mit Kaltwasseraustrittstemperatur von 6°C - in der Regel im Klimabereich eingesetzt. Die Eintrittstemperatur des Heizmediums (Heisswasser, Wasserdampf) für den Austreiber kann zwischen 80 und 180°C liegen. Das Wärmeverhältnis ζ (Verhältnis produzierte Kälte zu aufgewendeter Wärme) liegt bei einstufigen AKM zwischen 0.5 und 0.7 , bei 2-stufigen AKM liegt es zwischen 1.0 bis 1.4 .

6.4.2 SWOT-Analyse

Stärken	Chancen
▪ Hohe Langlebigkeit ▪ Keine beweglichen, verschleissbelasteten Komponenten: geringer Wartungsaufwand ▪ Sehr gutes Teillastverhalten (stufenlos bei besser werdendem COP) ▪ Geringe Geräuschemissionen ▪ Kälte- und Lösungsmittel ökologisch unbedenklich ▪ Kühlwasser bei $> 35^{\circ}\text{C}$ noch nutzbar ▪ kleiner elektrischer Anschlusswert	▪ Verbesserung des Absorbers (Reduzierung der Investitionen, Reduzierung der Erschütterungsempfindlichkeit) ▪ Bei günstiger Abwärme sehr geringe Betriebskosten ▪ Die Investitionskosten sinken mit steigenden Heisswassertemperaturen ▪ Technologie erprobt
Schwächen	Risiken
▪ Hohe Investitionskosten ▪ Empfindlichkeit der üblichen Absorber gegen mechanische Erschütterungen ▪ Voluminöse Anlagenkomponenten ▪ Träges Regelverhalten (evtl. Kältespeicher bei hohen Lastwechseln nötig)	▪ Kleinstanlagen erst seit kurzem auf dem Markt verfügbar

6.4.3 Fazit

Absorptionskältemaschinen (AKM) eignen sich gut für die Nutzung von Wärme, welche im Temperaturbereich von $80 - 200^{\circ}\text{C}$ kontinuierlich anfällt. Wenn gar überschüssige Abwärme vom BHKW nutzbar gemacht werden kann und der Kühlbedarf keine grossen Schwankungen aufweist, ist der Einsatz in jedem Fall interessant. Grossen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben die erzielbaren Vollbetriebsstunden, was sich aus den hohen Investitionskosten ergibt. Diese wirken sich grundsätzlich nachteilig auf eine grosse Verbreitung aus, weil der Markt v.a. kleine Systeme mit Kühlleistungen von weniger als 30 kW nachfragt und besonders preisempfindlich ist. Die Problematik ist bekannt und in den vergangenen Jahren wurden weltweit viele neue Kleinstanlagen im Bereich 15 bis 50 kW auf den Markt gebracht. Abgesehen von diesen Kleinstanlagen birgt die Technologie heute keinerlei Risiken und ist bestens erprobt.

6.4.4 Hersteller / Lieferanten (Auswahl)

Hohe Kälteleistungen:

Broad (China), www.gasklima.de	175 bis 23'000 kW
Trane Schweiz GmbH (USA, CH):	400 bis 6'000 kW
York Schweiz (USA, CH):	400 bis 5'000 kW
Carrier GmbH (DE)	
Vertrieb: Walter Meier AG, www.waltermeier.com (CH)	250 bis 1'800 kW

Mittlere Kälteleistungen:

Yazaki, www.yazakienergy.com (USA)	
Vertrieb: Walter Meier AG, www.waltermeier.com (CH)	35 bis 350 kW

Kleine Leistungen:

SolarNext AG (DE), www.solarnext.de	12 kW
EAW GmbH (DE), www.eaw-energieanlagenbau.de	15 bis 200 kW
ROTARICA (S), www.rotartica.com	5 bis 10 kW



Abbildung 4:

Beispiel einer Absorptionskältemaschine (chiller chillii® PSC12, Kälteleistung: 12 kW.k)

Quelle: www.solarnext.eu

6.5 Kälteerzeugung: Dampfstrahlkältetechnik

6.5.1 Kurzbeschreibung der Technologie

In einer Dampfstrahlkältemaschine (DSKM) wird der mechanische Verdichter einer Kompressionskältemaschine durch einen **Dampfstrahlverdichter** ersetzt. In diesem wird die Druckenergie des Treibdampfes in Strömungsenergie umgesetzt. Durch sogenannten Impulsaustausch wird Kältemitteldampf (Wasserdampf) aus dem **Verdampfer** angesaugt. Das verdampfende Kältemittel entzieht dem Kaltwasser Energie und kühlt es dadurch ab. Dabei können auch Temperaturen unter 0°C erreicht werden, i. d. R. 6°C . Eine Trennung des Kaltwassernetzes von der DSKM durch einen Wärmetauscher wie bei anderen Kältemaschinen ist nicht erforderlich. Bei Austritt aus dem Dampfstrahlverdichter wird die kinetische Energie des Dampfes wieder in Druckenergie umgesetzt, so dass der Dampf im **Kondensator** bei höherer Temperatur niedergeschlagen werden kann. Die Wärme wird ans **Kühlwasser** abgegeben. Das **Kondensat** fließt in den Verdampfer zurück.

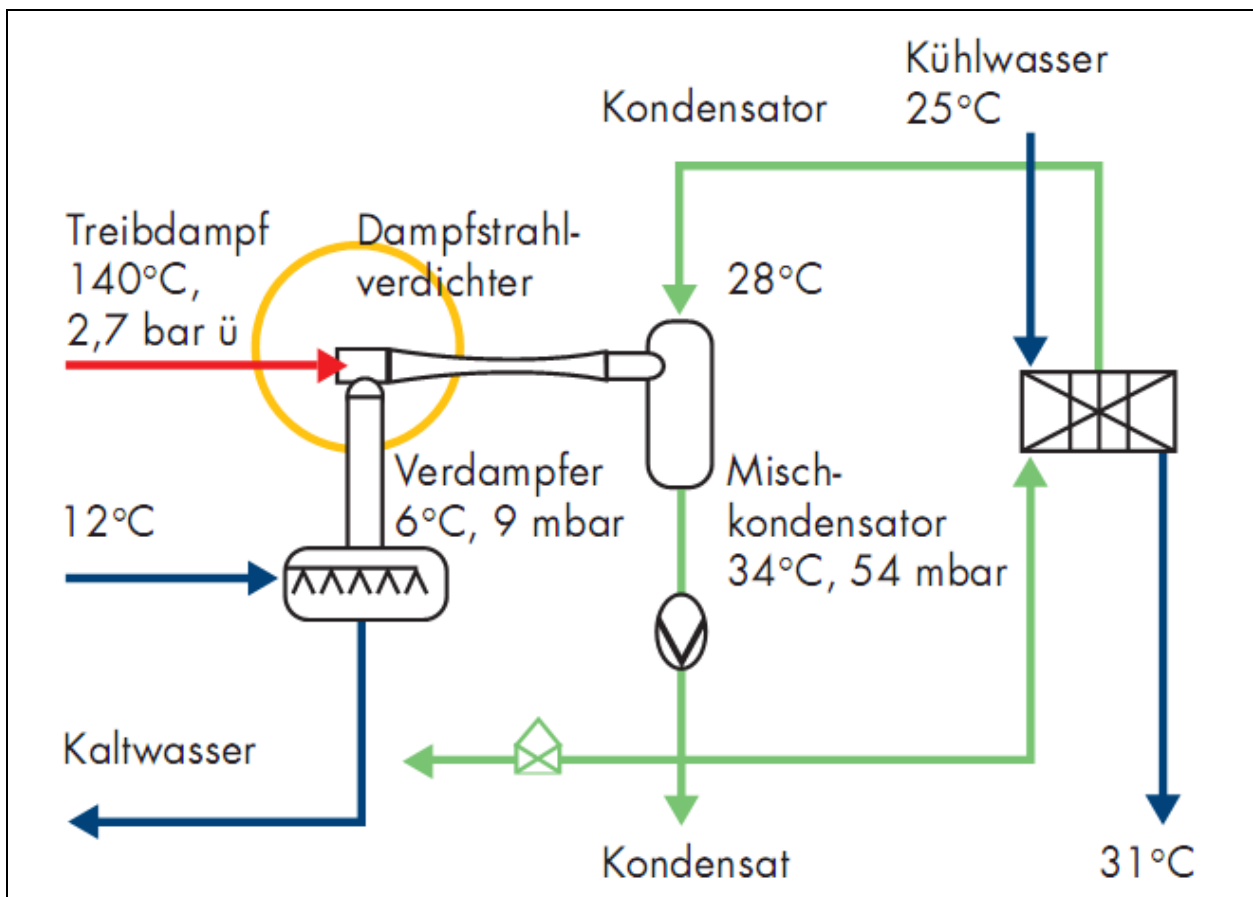


Abbildung 5: Funktionsprinzip einer Dampfstrahlkälteanlage mit dem Strömungsverlauf eines Strahlverdichters.
 Quelle: Fraunhofer UMSICHT, Feddeck Paul: Neue Anwendungen der Dampfstrahlkältetechnik. BINE – Information und Ideen zu Energie & Umwelt.10/2002.

Das Kälteverhältnis (COP) einer DSKM hängt stark vom Kondensatordruck und damit von der Rückkühlwassertemperatur ab. Diese wird wiederum vom Zustand der Umgebungsluft bestimmt. Im Hochsommer bei hoher Luftfeuchtigkeit und hoher Aussentemperatur ist das Kälteverhältnis schlechter als bei Absorptionskältemaschinen (AKM). Im Jahresmittel liegen die Kühlwassertemperaturen jedoch deutlich unter diesen Bedingungen, so dass ein mittlerer COP (=JAZ) von 1 erreicht werden kann. Ebenso hängt der COP wesentlich von der Treibdampf Temperatur ab; bei konstanten Kondensatordruckbedingungen steigt der COP für den sommerlichen Auslegungsfall mit Kaltwassertemperaturen von 16/8°C von 0.3 (bei einer Treibdampf Temperatur von 100°C) auf bis zu 0.7 (bei Treibdampf von 200°C) an.

6.5.2 SWOT-Analyse

Stärken	Chancen
▪ Einfache Technik, keine bewegten Anlagenteile ▪ Geringer Wartungsaufwand ▪ Sehr gutes Teillastverhalten ▪ Gute Regelbarkeit (schnelle Leistungsabgabe bei Leistungsanforderung) ▪ Grosser Leistungsbereich (10 kW - 30 MW) ▪ Kältemittel (Wasser) völlig unproblematisch (billig, ungiftig und ungefährlich) ▪ Sehr hoher Teillastwirkungsgrad	▪ Bei günstig verfügbarem Heissdampf sehr geringe Betriebskosten ▪ Kühlbedarf im Winter ermöglicht deutlich besseres Kälteverhältnis
Schwächen	Risiken
▪ Hohe Investitionskosten (geringfügig mehr als bei AKM) ▪ Kühlwasser thermisch kaum mehr nutzbar, da tiefes Temperaturniveau	▪ COP hängt stark von der Kühlwasser- und Kaltwassertemperatur ab ▪ Anlagen v.a. in der Industrie zur Prozesskühlung als grosse Einzelanlagen etabliert; Anlagen zur Klimatisierung ziemlich unbekannt, keine Standardisierung

6.5.3 Fazit

Dampfstrahlkältemaschinen (DSKM) eignen sich für die Nutzung von Wärme, welche im Temperaturbereich von 100 - 200°C anfällt, bevorzugt sind Temperaturen > 140°C, da sich darunter das Kälteverhältnis deutlich verschlechtert. Die Investitionskosten sind hoch und liegen bei Anlagen um 200 kW leicht über jenen für Absorptionskälte. Kleinere Anlagen sind prinzipiell günstiger und haben daher ein grösseres Verbreitungspotenzial als AKM. Dennoch ist die Technologie bis heute erst in grossen Industriebetrieben, in welchen gleichzeitig viel Abwärme anfällt und Prozesskälte nachgefragt wird (z.B. Destillationsfabriken), etabliert und erprobt. Für kleinere Anlagen im Klimabereich gibt es noch wenig Erfahrung, doch werden seit wenigen Jahren standardisierte Produkte angeboten. Insgesamt birgt die Technologie wenige Risiken und ist kommerziell verfügbar.

6.5.4 Hersteller / Lieferanten (Auswahl)

Körting Hannover AG (DE), www.koerting.de

10 bis 28'000 kW

GEA Jet Pumps GmbH (DE), www.geajet.de

20 bis 15'000 kW

Schutte & Koerting (USA), www.s-k.com



Abbildung 6:

Beispiel einer 2-stufigen Dampfstrahlkälteanlage in Kompaktbauweise

Kälteleistung: ca. 1'000 kW.k,

Quelle: GEA Jet Pumps GmbH

6.6 Kälteerzeugung: Adsorptionskälte

6.6.1 Kurzbeschreibung der Technologie

Die Adsorptionskältemaschine besteht aus vier Hauptbestandteilen: dem Desorber / Adsorber 1, dem Kondensator, dem Verdampfer und dem Desorber / Adsorber 2. Durch Wärmezufuhr (bei 60 bis 90°C) wird das Adsorbens (z.B. Silikagel) getrocknet. Wasserdampf wird freigesetzt (desorbiert), strömt in den **Kondensator** und wird dort verflüssigt, wobei Wärme abgegeben wird. Ist das Material ausreichend getrocknet, wird die Wärmezufuhr im **Desorber** gestoppt. Nach einer Abkühlungsphase erfolgen die Rückreaktion und die Verdampfung des flüssigen Kondensats im **Verdampfer**: Das getrocknete Adsorbens (**Adsorber 2**) saugt Wasserdampf an. Durch die Verdampfung wird Kaltwasser (Nutzkälte) erzeugt. Während des Adsorptionsprozesses wird Wärme freigesetzt, die abgeführt werden muss. In einem abschliessenden Schritt wird das Kondensat wieder dem Verdampfer zugeführt und der Kreislauf geschlossen.

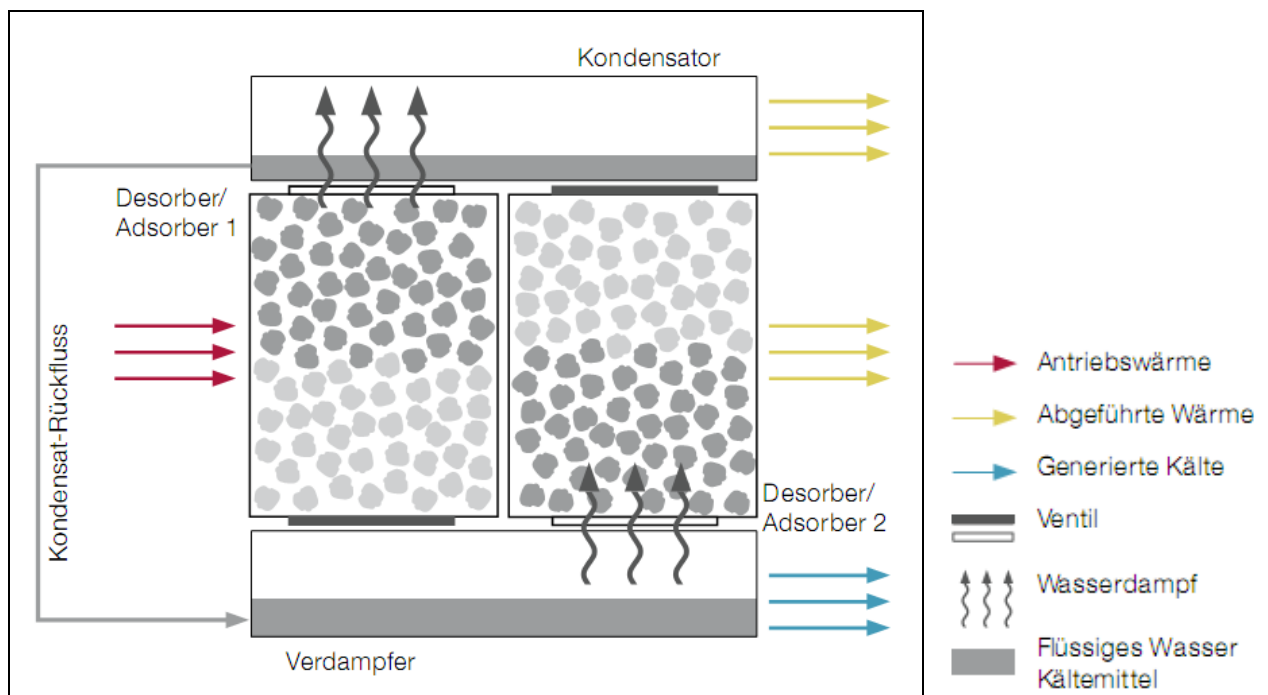


Abbildung 7: Funktionsprinzip einer Adsorptionskälteanlage. Quelle: www.solarnext.eu

Da das Adsorbens nicht in einem Kreislauf umgewälzt werden kann, kann der Prozess nur diskontinuierlich ablaufen und eignet sich daher auch zur Kältespeicherung. In der Regel wird das beschriebene Zweikammersystem eingesetzt, bei welchem innerhalb eines Arbeitszyklus (6 bis 10 Minuten) die Ad- und Desorption parallel verläuft. Nach Beendigung des Arbeitszyklus werden Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr zu den beiden Kammern getauscht (Umschaltung, ca. 1 min.). Dann beginnt die Ad- und Desorption erneut parallel. Dadurch kann eine fast gleichmässige Kälteerzeugung mit einem Kälteverhältnis von 0.5 bis 0.7 (ähnlich wie bei der einstufigen Absorptionskältemaschine) ermöglicht werden.

6.6.2 Fazit

Die Adsorptionskältemaschine vereint viele Vorteile der Absorptionskältemaschine (einfache Bauweise, hohe Zuverlässigkeit bei hoher Langlebigkeit, ökologisch unbedenkliches Wasser als Kältemittel). Ein zusätzlicher Vorteil ist die mögliche Nutzung von Antriebswärme unter 80°C (attraktiv für Solarwärme) und das leicht bessere Teillastverhalten - allerdings wirkt sich das zyklische Anlagenverhalten gegenwärtig diesbezüglich noch nachteilig aus. Sind höhere Temperaturen verfügbar, sollten angesichts des etwas schlechteren Kälteverhältnisses und der ab 100°C einsetzenden Degeneration des zumeist verwendeten Adsorbens Silicagel Absorptionsmaschinen bevorzugt werden. Zudem führt die noch vorherrschende Kleinserieherstellung dazu, dass Adsorptionsanlagen deutlich teurer sind als Absorptionsanlagen und auch noch kein kalkulierbarer Marktpreis besteht. Die Entwicklung der Technologie ist insgesamt noch nicht abgeschlossen und birgt damit gewisse Restrisiken.

6.6.3 Hersteller / Lieferanten

SorTech AG (DE), www.sortech.de	7.5 bis 15 kW
Firmen Nishiyodo und Mayekawa Mfg. (Japan)	50 bis 350 kW



Abbildung 8:

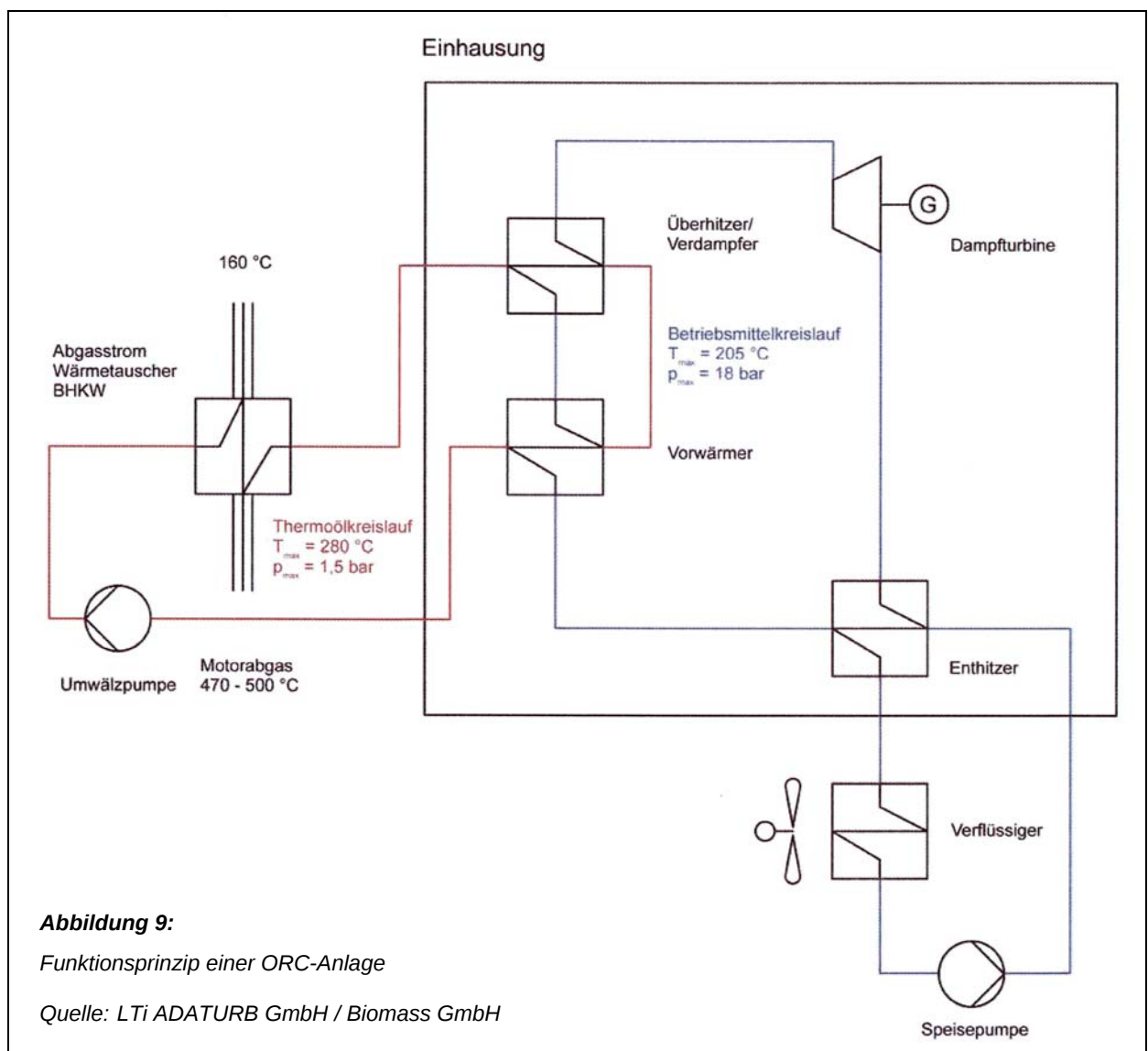
Beispiel einer Adsorptionskältemaschine (chillii® STC15, Kälteleistung: 15 kW.k)

Quelle: www.solarnext.eu

6.7 Stromerzeugung: Organic Rankine Cycle (ORC)

6.7.1 Kurzbeschreibung der Technologie

Der Organic Rankine Cycle (ORC) macht sich prinzipiell den gleichen Dampfkreisprozess zu-nutze wie eine Dampfturbine. Anstelle von Wasser wird als Arbeitsmedium eine organische Flüssigkeit mit einer tieferen Verdampfungstemperatur eingesetzt. Dies ermöglicht die Nutzung von Wärmequellen mit deutlich geringerer Temperatur. Das Arbeitsmedium Ammoniak erlaubt beispielsweise einen Betrieb zwischen 100°C (Wärmequelle) und 18°C (Wärmesenke). Im Ge-gensatz zum konventionellen Dampfprozess erfolgt beim ORC die Verdampfung des Arbeitsme-diums nicht in einem mit Brennstoff direkt beheizten Dampferzeuger, sondern zweistufig über einen getrennten **Thermoölkreislauf** von der Wärmequelle (z.B. BHKW-Abgaswärmetauscher) im **Vorwärmer** und anschliessend im **Verdampfer**. Der erzeugte Dampf wird in einer **Dampf-turbine** entspannt. Der Abdampf wird darauf im **Enthitzer** und **Verflüssiger** wieder kondensiert und mittels Speisepumpe wieder auf den Frischdampfdruck gebracht (siehe folgendes Verfah-rensschema zum ORC-Modul TG 30 der LTi ADATURB GmbH).



6.7.2 SWOT-Analyse

Stärken	Chancen
▪ Nutzung von Abwärme ab 100°C möglich ▪ Externe Beheizung erlaubt breite Brennstoffpalette ▪ Eignung für Leistungen von < 100 kW.e ▪ Gut geeignet für Teillastbetrieb ▪ Tiefe Arbeitstemperatur und -druck	▪ Kaskadennutzung von Abwärme (abhängig vom Arbeitsmedium), auch Geothermie oder Solarwärme ▪ Gute Kombinationsmöglichkeit mit Gasturbinen oder Gasmotoren
Schwächen	Risiken
▪ Geringer Wirkungsgrad (10 - 20 %) ▪ Hohe spezifische Investitionskosten	▪ Wirkungsgradpotenzial fast ausgeschöpft ▪ Arbeitsmedien (Kohlenwasserstoffe) sind z.T. giftig (FCKW: Treibhausgas, Aromate: krebserregend)

6.7.3 Fazit

ORC-Turbinen eignen sich sehr gut für eine Wärmenutzung im Temperaturbereich von 150 - 300°C. Die hohen Investitionskosten und der bereits ausgeschöpfte tiefe Wirkungsgrad (max. 21 %) wirken sich nachteilig auf eine grosse Verbreitung aus. Wenn allerdings Abwärme aus industriellen Prozessen oder von bestehenden BHKW nutzbar gemacht werden können, ist der Einsatz sehr interessant. Neben einer Miniaturisierung ist auch eine Vereinfachung und fortschreitende Verwendung von Standardkomponenten bemerkbar. Die Technologie ist v. a. im grossen Leistungsbereich sehr erprobt und birgt keine technologischen Risiken.

6.7.4 Produzenten (Auswahl)

GMK GmbH (DE), www.gmk.info

500 bis 5'000 kW.e

Turboden (I), www.turboden.it

200 bis 2'000 kW.e

LTi ADATURB GmbH (DE), www.adaturb.lt-i.com

30 bis 90 kW.e

Freepower Ltd. (UK), www.freepower.co.uk

6 bis 120 kW.e

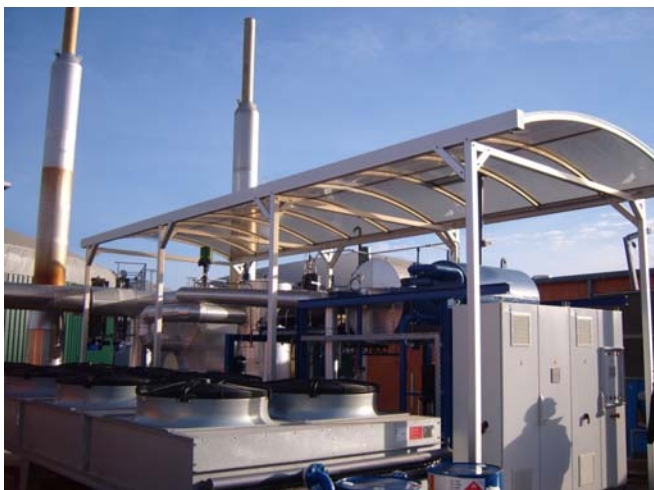


Abbildung 10:

Beispiel einer landwirtschaftlichen ORC-Anlage in Wasmerslage (DE) der Firma *agri.capital GmbH*

Quelle: www.pressebox.de

6.8 Stromerzeugung: Kalina-Kreisprozess

6.8.1 Kurzbeschreibung der Technologie

Technisch verwandt mit dem Organic Rankine Cycle (ORC, siehe oben) entspricht der Kalina-Kreisprozess einem Binärverfahren mit indirekter Nutzung der Wärmequelle ab bereits 90°C. Gegenüber einem ORC soll der Wirkungsgrad 10 bis 60 % höher sein. Im Verdampfer wird die „Arbeitslösung“, ein Gemisch aus Ammoniak und Wasser, verdampft und in der Turbine auf einen Druck entspannt, der niedriger liegt, als der bei der Kühlwassertemperatur mögliche Kondensationsdruck für das Ammoniakgemisch. Damit dennoch Kondensation stattfinden kann, wird eine „arme“ Ammoniaklösung aus dem Austreiber zum Turbinendampf zugemischt (Anhebung der Siedetemperatur). Dadurch wird das Druckgefälle über der Turbine erhöht und der Wirkungsgrad erhöht.

6.8.2 Fazit

Zur Zeit arbeiten weltweit nur wenige geothermische Kraftwerke nach diesem Prinzip. Da eignet es sich besonders gut, weil sich die Bohrtiefen und damit -kosten durch die Senkung der Arbeitstemperatur auf 90°C erheblich reduzieren lassen. Für kleinere Anlagen mit höheren Abwärmeequellen wie dies bei Biogas-BHKW der Fall ist, ist der Kalina- dem ORC-Prozess unterlegen.



Abbildung 10:

Beispiel einer Kalina-Anlage zur Nutzung von Geothermie.

Quelle: www.geothermie-unterhaching.de

7. Bewertung von ausgewählten Abwärmenutzungen

7.1 Grundlegende Leistungsbedarfsprofile

Für den untersuchten Leistungsbereich für künftige Biogasanlagen fallen an einem Standort jährlich rund 750 bis 3'000 MWh Abwärme an (70 % der Bruttowärmeproduktion gemäss folgender Tabelle), welche zur Nutzung zur Verfügung steht.

Anlagengrösse: Nennleistung (7'000 h/a) [kW.e]		125	250	500
kontinuierliche Biogasproduktion	[kW.gas]	275	550	1100
Nettostromproduktion (15% Eigenbedarf)	[kWh/a]	744'600	1'489'200	2'978'400
Äquivalenzleistung thermisch	[kW.th]	125	250	500
Äquivalenzleistung Abgas (Abkühlung auf 150°C)	[kW.th]	56	111	222
Äquivalenzleistung Motor (Abkühlung auf 65°C)	[kW.th]	69	139	278
Bruttowärmeproduktion	[kWh/a]	1'095'000	2'190'000	4'380'000
Nettowärmeproduktion (30% Eigenbedarf)	[kWh/a]	766'500	1'533'000	3'066'000

Eine Abwärmenutzung lässt sich über ein Jahresleistungsbedarfsprofil charakterisieren. Die optimale Abwärmenutzung hat ein konstantes Jahresleistungsprofil auf dem identischen Niveau der von der Biogasanlage verfügbaren thermischen Nettoabwärmeleistung. Ein solches Bedarfsprofil ist jedoch in der Realität praktisch nie vorhanden. Daher werden im Folgenden sieben grundlegende Profile definiert, welche die Charakterisierung aller denkbaren Abwärmenutzungen ermöglichen:

Profil A: Aussentemperaturabhängige Beheizung Gebäude auf 20°C
Heizgrenze schlecht/gut isolierter Gebäude: 14°C/10°C

Profil B: Beheizung Fischzuchtbecken auf 16°C, 23°C, 29°C

Profil C: Aussentemperaturabhängiges Kühlen Gebäude auf 20°C
Annahme Glasanteil: 30 %

Profil D: Aussentemperaturabhängiges Kühlen Lagerhalle auf 5°C
Annahme Glasanteil: 0 %

Profil E: Aussentemperatur- und strahlungsabhängige Beheizung Gewächshäuser
Annahme Glasanteil: 100 %

Profil F: Ganzjährig konstant (Bandlast), z.B. Stromerzeugung mittels ORC-Prozess

Profil G: Zyklisch konstant: monatsweise, wochentagsweise, tagesstundenweise

Für jedes dieser Profile lässt sich bei gegebener Leistungsskalierung¹⁹ der mögliche Nutzungsgrad der Bruttowärmeproduktion, der Anteil an zusätzlich nötiger Spitzenenergie (hier Heizöl) sowie die optimale Dimensionierung eines allfälligen Speichers berechnen. Im folgenden Abschnitt werden die Profile graphisch illustriert.

¹⁹ Leistungsskalierung = maximaler Wärmeleistungsbedarf des Profils im Verhältnis zur konstanten Bruttoabwärmeleistung des Biogasmotors (siehe auch Abschnitt 4.2 auf Seite 18).

7.1.1 Graphische Charakterisierung der Profile

Jedes der sieben Profile kann bezüglich Leistungsskalierung variieren. So kann das Profil für die Beheizung von einem Wohngebäude auf einem Bauernbetrieb z.B. nur 25 kW.th benötigen, obwohl der Biogasmotor rund um die Uhr 250 kW.th zur Verfügung stellt. In diesem Fall beträgt die Leistungsskalierung des Wärmebedarfsprofils gegenüber der BHKW-Abwärme 0.1. In diesem Kapitel werden alle Profile im definierten Skalierungsbereich von 0.2 bis 4.0 betrachtet (siehe Abschnitt 4.2 auf Seite 20). Bei einer Skalierung grösser der Nettowärmeleistung des BHKW wird zudem eine kostenoptimale Auslegung von Spitzenkessel und Speicher vorgenommen. Unter einer Skalierung von 0.62 (entspricht der winterlichen Nettowärmeleistung des BHKW = Bruttowärme 1.0 abzüglich Wärmebedarf des Fermenters, siehe auch anschliessenden Abschnitt 7.1.1.1) kann immer alle nachgefragte Wärme mit dem Biogasmotor abgedeckt werden. In diesem Fall kann auf einen Spitzenkessel und Speicher verzichtet werden. Die kostenoptimale Auslegung wird für jedes Profil mittels Darstellung der Summenhäufigkeit aller Jahresleistungen (= absteigend geordneter Leistungsbedarf) illustriert. In Abbildung 11 ist beispielhaft das Heizprofil für ein typisches Gebäude in der Schweiz abgebildet. Der maximale Leistungsbedarf beträgt hier 200 kW (Skalierung 0.8 bzgl. der Brutto-BHKW-Wärmeleistung von 250 kW). Davon wird bis 0.62 alles mit dem Biogasmotor abgedeckt. Darüber gleicht der Spitzenkessel mit einem allfälligen Speicher die Leistungsdifferenz aus. Zu beachten gilt, dass die Leistungsbalken jeweils für 200 Stunden stehen und die obere Leistungsgrenze im 200-h-Intervall markieren. D.h. die maximale Leistung könnte z.B. nur während einer Stunde im Jahr auftreten, wird hier aber in einer Dauer von 200 Stunden abgebildet.

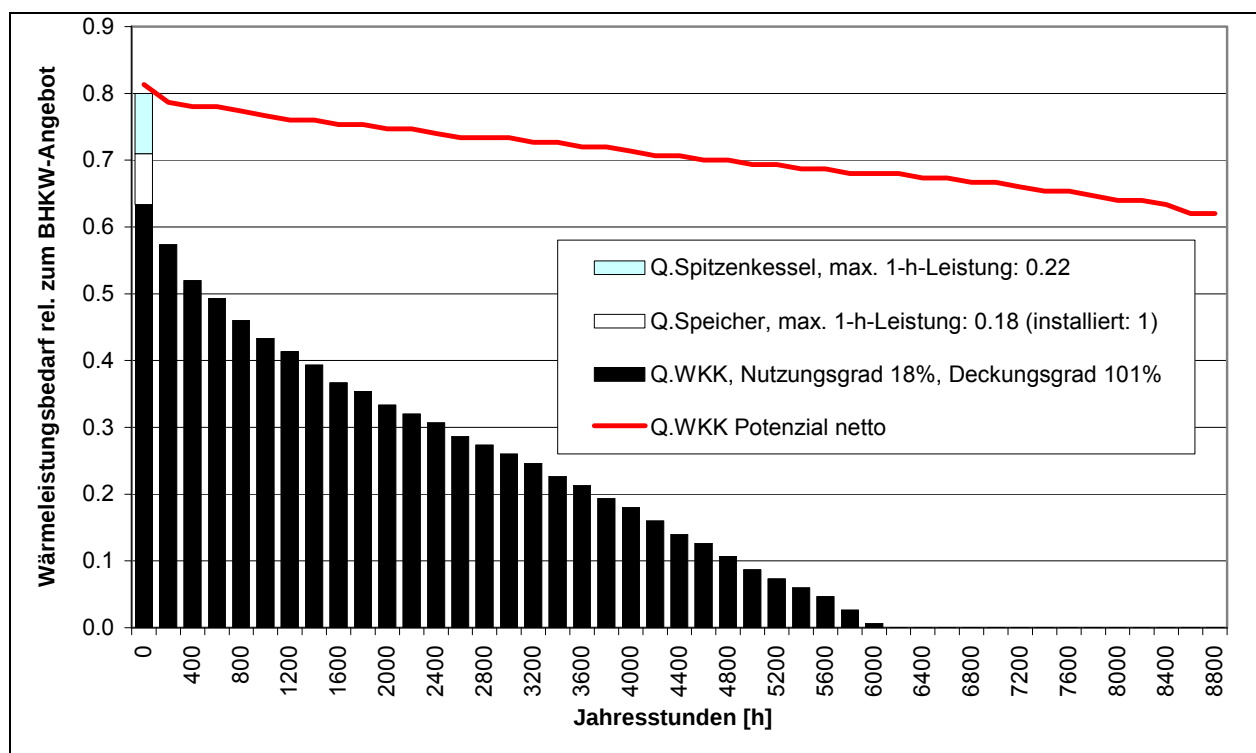


Abbildung 11: Illustration der Summenhäufigkeit aller Jahresleistungen (= absteigend geordneter Leistungsbedarf) für ein typisches Gebäude in der Schweiz.

Jeder graphischen Profil-Charakterisierung ist jeweils eine Ergebnistabelle gemäss folgendem Beispiel beigelegt. Der maximale Leistungsbezug aus Spitzenkessel und Speicher ist meist nicht zeitgleich mit dem maximalen Leistungsbedarf des Profils, weshalb die entsprechenden Balkenlängen in Abbildung 11 kaum je mit den effektiven max. Auslegungswerten in der Ergebnistabelle übereinstimmen – so auch in vorliegendem Beispiel.

<u>ER G E B N I S S E</u>				
	<u>Leistung</u>	<u>Skalierung</u>	<u>Energie</u>	<u>Prozent</u>
Bruttowärmeangebot Biogasmotor	250 kW	1.00	8'760	100%
Nutzung aus BHKW			1'599	18%
Gesamtwärmebedarf des Nachfrageprofils	200 kW	0.80	1'588	18% 100%
Deckung mit Biogasmotor direkt			1'577	99%
Deckung mit Biogasmotor via Speicher	max.	0.18	4	0%
Auslegung Speicher		1.00	Gewinn/Einsatz:	18%
Deckung mit Spitzenkessel	max. / Auslegung	0.22	7	0%
Gestehungskosten für Nutzenergie				
Ölpreis 120 CHF/100 Lit., Strompreis 14.7 Rp./kWh (2008) (inkl. optimiertes Speichervolumen)				2.91 Rp./kWh
Ölpreis 180 CHF/100 Lit., Strompreis 22.1 Rp./kWh				2.94 Rp./kWh
Gestehungskosten Referenz				
Ölpreis 120 CHF/100 Lit., Strompreis 14.7 Rp./kWh (2008)				15.86 Rp./kWh
Ölpreis 180 CHF/100 Lit., Strompreis 22.1 Rp./kWh				22.91 Rp./kWh

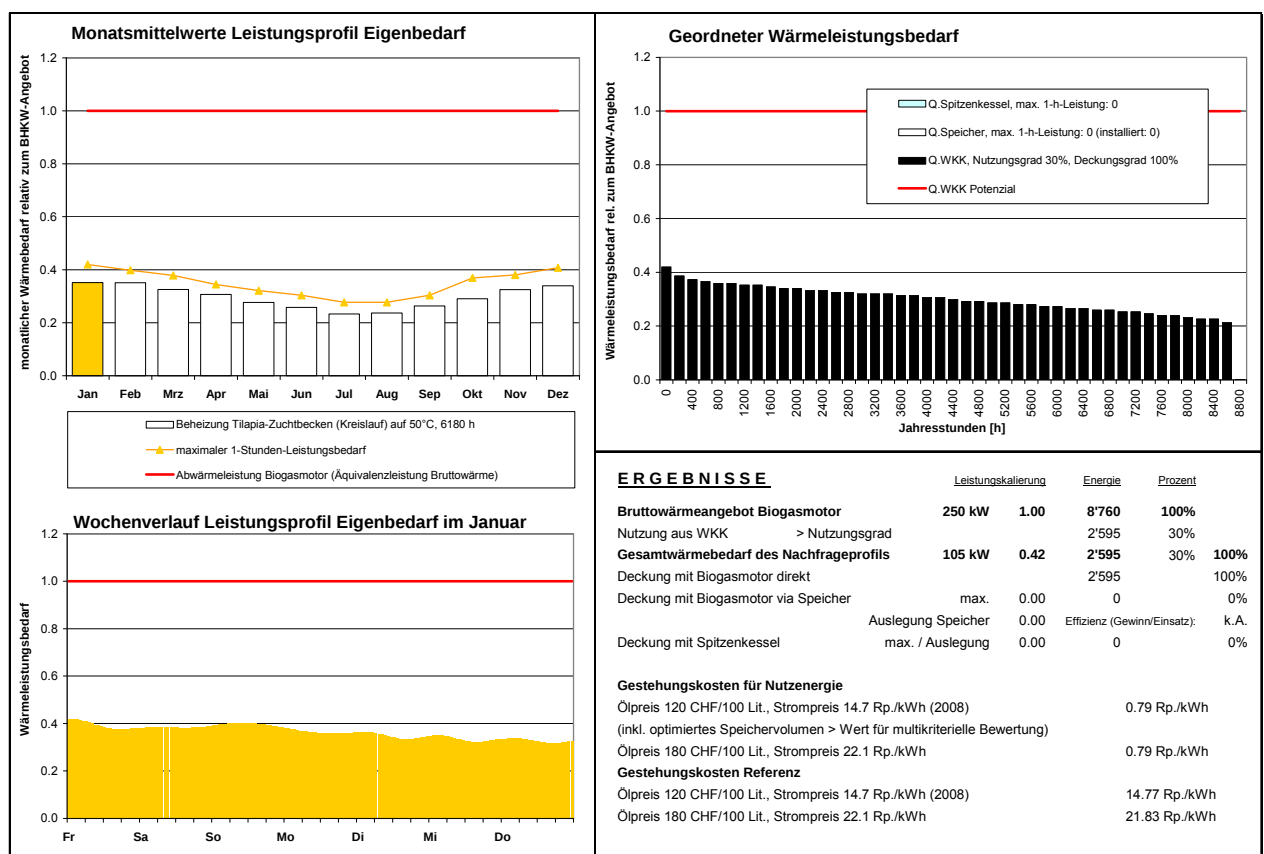
Erklärungen

- Bruttowärmeangebot Biogasmotor: Die Bruttowärmeleistung ist fix 1.0 (absolut: hier 250 kW). Daraus folgt die Jahresproduktion von 8'760 (einheitslos, absolut: hier 2'190 MWh). Darunter ist der für das Profil mögliche Nutzungsgrad ausgewiesen (18 %).
- Gesamtwärmebedarf des Nachfrageprofils: Die Leistung ist variabel skalierbar (hier 0.8). Darunter wird die Deckung des Gesamtbedarfs aus den drei möglichen Wärmequellen: Biogasmotorabwärme direkt, Biogasmotorabwärme via Speicher und Wärme aus dem Spitzenölkessel verstanden. Die „Auslegung Speicher“ von hier 1.0 bedeutet, dass der Speicher bei gefülltem Zustand während 1.0 Stunden die Biogasmotorleistung zu 100% liefern kann. Die effektiv maximal während einer Stunde im Mittel bezogene Wärmeleistung am Speicher beträgt 0.18 (45 kW).
- Speichereffizienz = Gewinn/Einsatz: Verhältnis von Nutzwärme zu aufgewendeter Abwärme aus dem Biogasmotor, hier 18 %. Wirtschaftliche Werte liegen meist über 70 %. Das primäre Kriterium für die Speicherdimensionierung sind immer die Gestehungskosten der Nutzenergie. Für unser Beispiel-Profil macht ein Speicher definitiv keinen Sinn; dies ist auch daran zu erkennen, dass mittels Speicher << 1 % des Gesamtwärmebedarfes zusätzlich aus der Biogasmotorabwärme gedeckt werden kann.

- Gestehungskosten der Nutzenergie: Kosten der Biogasabwärmenutzung bei heutigen Energiepreisen (2008) und bei um 50 % höheren Preisen. Die Kosten für einen allfälligen Speicher sind hier auch eingerechnet, jedoch werden keinerlei Kosten für Fernwärmeleitungen berücksichtigt.
- Gestehungskosten Referenz: Kosten für die Bereitstellung der nötigen Nutzenergie mittels Referenz-Technologie (Ölkessel, Kompressionskältemaschine, etc.) bei heutigen Energiepreisen (2008, ‚Tiefpreisszenario‘) und bei um 50 % höheren Preisen („Hochpreisszenario“).

7.1.1.1 Spezialfall zu Profil B: Eigenbedarf der Biogasanlage zur Fermenterbeheizung

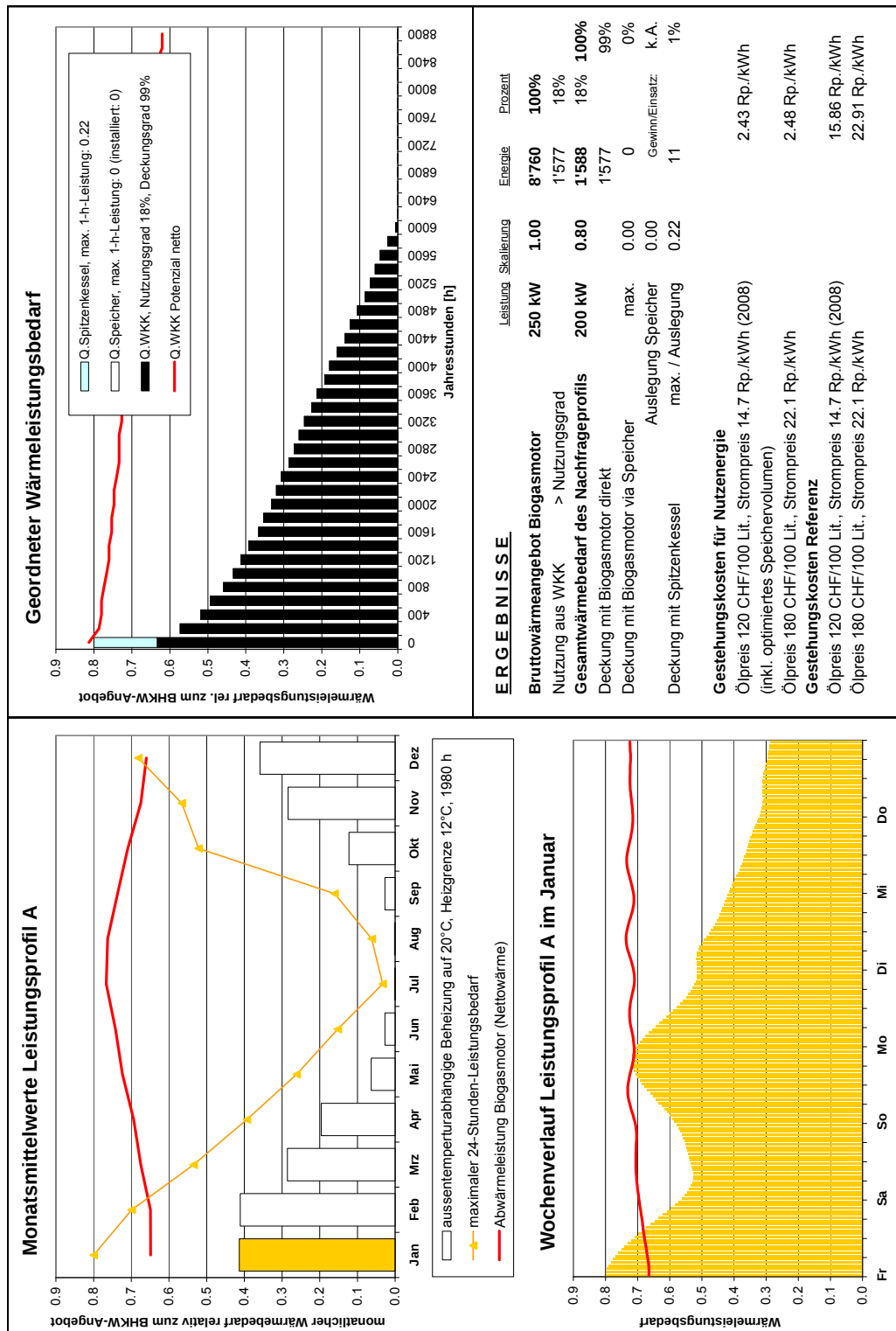
Eine Biogasanlage benötigt für die Beheizung des Fermenters durchschnittlich 30 % der Bruttowärme. Dieser Wert wurde für alle nachfolgenden Profilrechnungen verwendet. In der Realität schwankt dieser Anteil je nach Energiedichte des Substrats (die das Verhältnis von Fermentervolumen zu Abwärmemenge vorgibt) und Fermenter-Isolationsqualität. Bei Annahme einer konstanten Fermentertemperatur von 50°C ergibt sich für das Fermenter-Wärmebedarfsprofil eine leichte Aussentemperaturabhängigkeit. Das Ergebnis zeigt folgende Graphik.



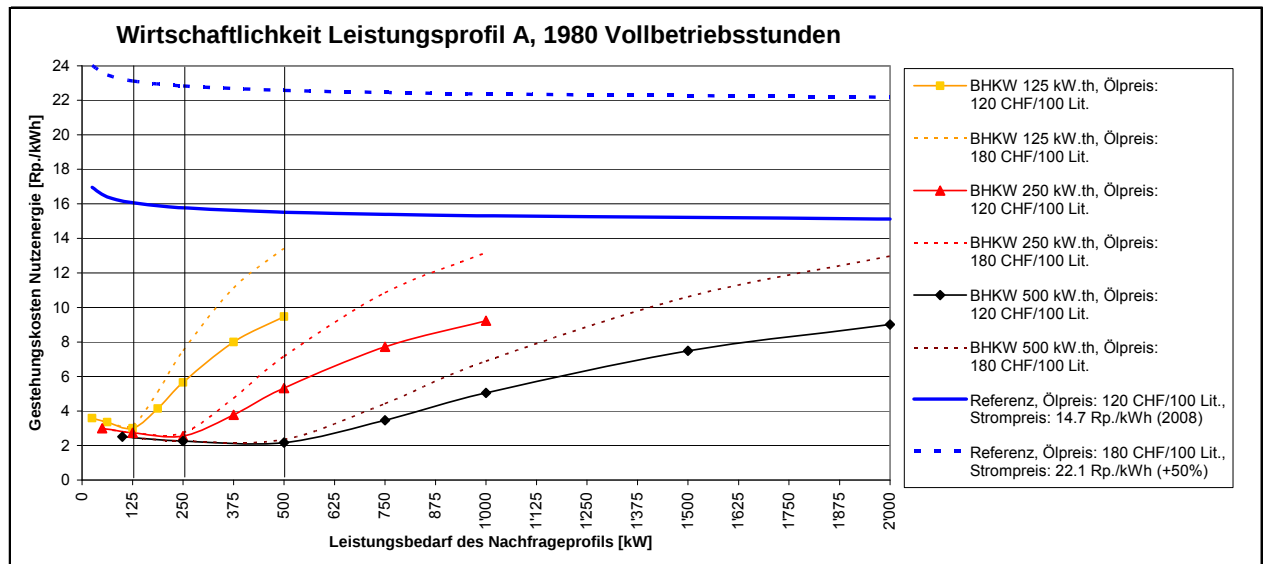
Für alle weiteren Betrachtungen von Abwärmenutzungen wird dieser Eigenbedarf von der Bruttowärmeproduktion abgezogen, so dass nur die effektiv verfügbare Nettoproduktion berücksichtigt wird.

7.1.1.2 Profil A: Aussentemperaturabhängige Beheizung Gebäude auf 20°C

Dieses Profil entspricht der heute am häufigsten realisierten Nutzung (Beheizung Wohn- und Betriebsgebäude). Es ist geprägt von starken saisonalen Schwankungen (Sommermonate Null, Wintermonate Maximum). Folgende Darstellung zeigt für ein 250 kW.th-BHKW das bezüglich Gesteungskosten optimal skalierte Profil:



Graphisches Ergebnis der Gestehungskosten aus der Parameterstudie für die drei untersuchten BHKW-Leistungen (Profilskalierung jeweils 0.2 bis 4.0):

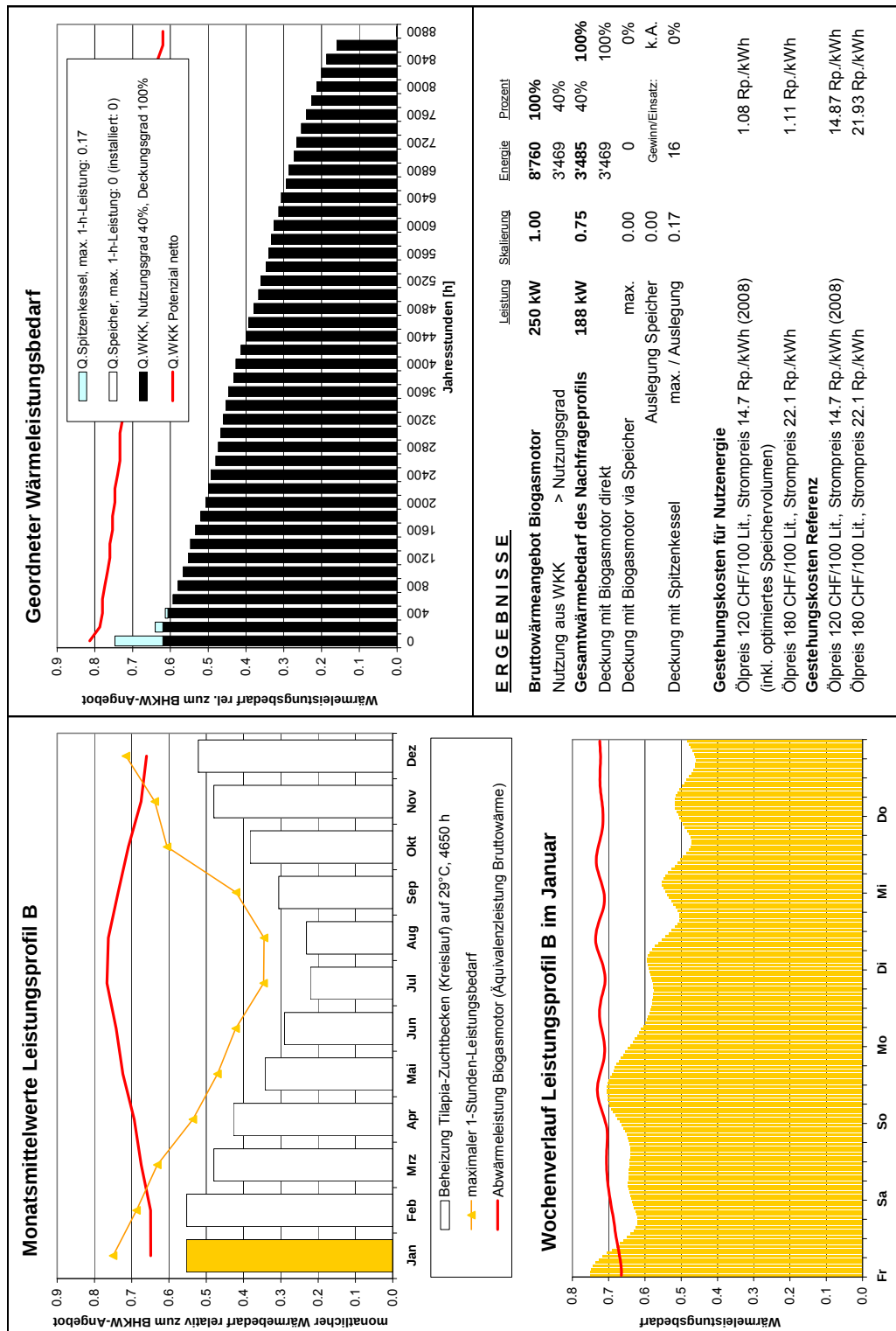


Fazit

- **Die Beheizung von Gebäuden ist äusserst wirtschaftlich.**
- Die tiefsten Heizwärmegestehungskosten liegen für die grösste BHKW-Kategorie (500 kW.th) bei 2.0 Rp./kWh, was weit unter den 15 - 17 Rp./kWh der Tiefpreis-Referenz (Ölkessel mit Ölpreis 12 Rp./kWh) liegt.
- Das Optimum der Gestehungskosten liegt für Energiepreise von 2008 bei einer Skalierung von 0.8. Bei einer höheren Skalierung wird der Gewinn durch die zusätzlich genutzte Gratisabwärme von den Kosten für das Heizöl des Spitzenkessels übertroffen; die Gestehungskosten steigen auf tiefem Niveau langsam an.
- Unterhalb des Optimums sind die Gestehungskosten wenig sensitiv bezüglich Anlagengrösse und Skalierung. Grund sind die generell sehr geringen Kosten für die Nutzbarmachung der Abwärme zu Heizzwecken (nur ein Anschluss ab Wärmetauscher sowie Installation eines Abgaswärmetauschers bei Skalierung > 0.5 nötig).

7.1.1.3 Profil B: Beheizung Fischzuchtbecken: Tilapia ganzjährig 29°C, Kreislauf

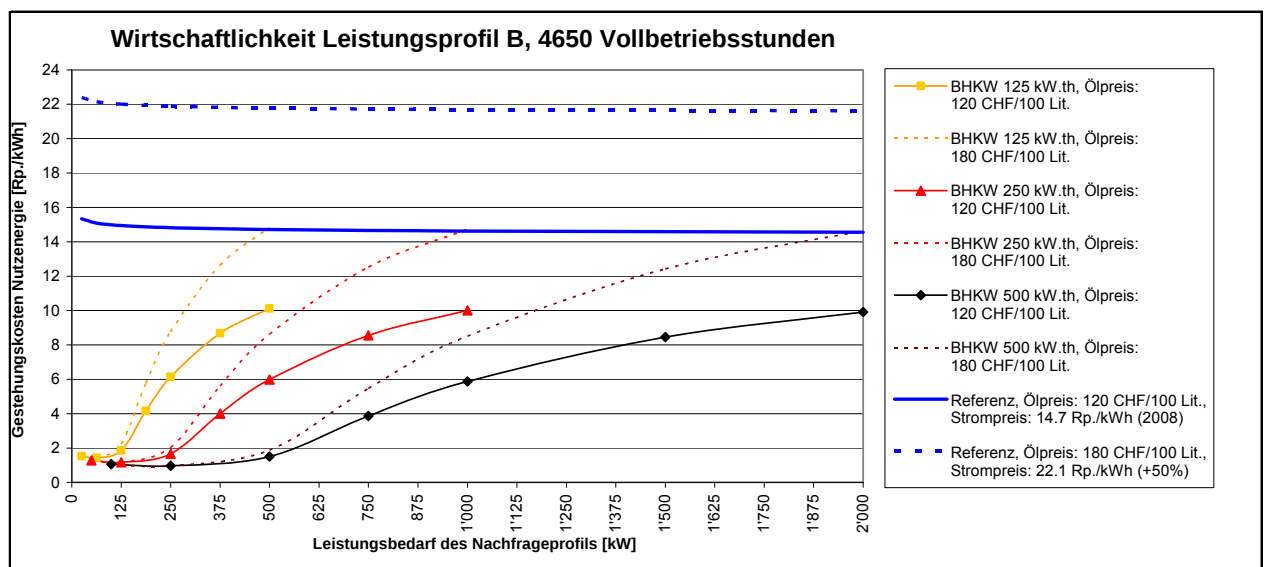
Dieses Profil steht stellvertretend für alle beheizten Wasserbecken (Kaltwasserfische, Schwimmbecken). Je höher die Wassertemperatur, desto weniger stark ausgeprägt ist die saisonale Schwankung, was sich positiv auf den potenziellen Nutzungsgrad auswirkt. Folgende Darstellung zeigt für ein 250 kW.th-BHKW das bezüglich Gestehungskosten optimal skalierte Profil:



Bemerkungen

- Fischzuchten im Durchlaufbetrieb mit einer Frischwassererneuerung von 1 Beckenvolumen pro Stunde (Forellenzucht siehe Kapitel 7.2.6) benötigen ca. 99 % Wärme für die Wassererwärmung und nur 1 % für die Transmissionsverluste.
- Warmwasserfischzuchten (hier Tilapia, 29°C) werden meist im Kreislauf-System mit einer Wassererneuerungsrate von 10 % pro Tag betrieben. In diesem Fall verursachen die Wassererwärmung rund 35 %, die Transmissionsverluste rund 65 % des Wärmebedarfs.

Graphisches Ergebnis der Gestehungskosten aus der Parameterstudie für die drei untersuchten BHKW-Leistungen (Profilskalierung jeweils 0.2 bis 4.0):

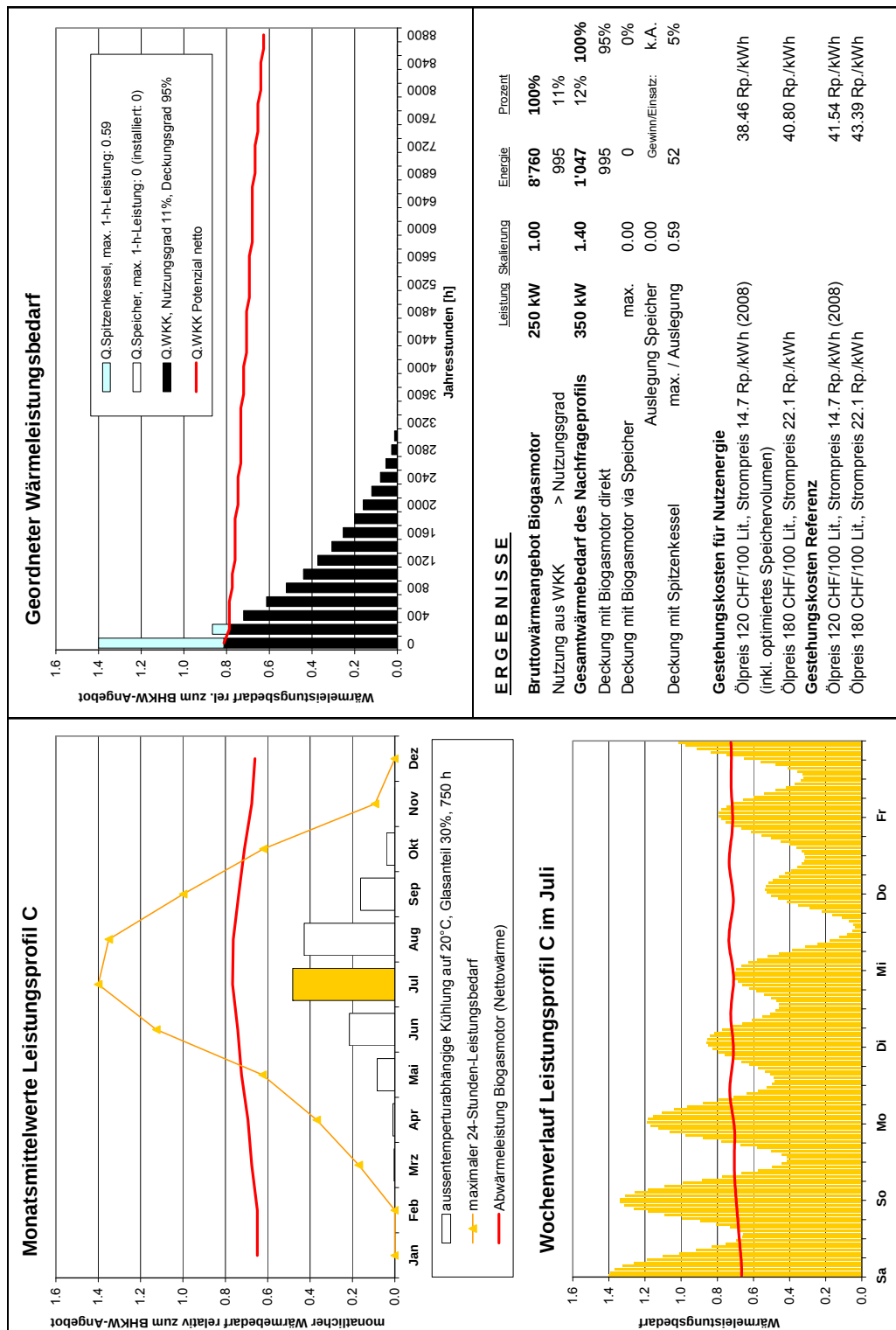


Fazit

- **Die Beheizung von ganzjährig warmen Wasserbecken ist äusserst wirtschaftlich.**
- Die tiefsten Heizwärmegestehungskosten liegen für die grösste BHKW-Kategorie (500 kW.th) bei 1.0 Rp./kWh, was weit unter den 15 - 17 Rp./kWh der Tiefpreis-Referenz liegt. Dieses Profil liefert günstigere Gestehungskosten als das Gebäudeheizprofil, was sich aus dem höheren Nutzungsgrad ergibt (Ausdehnung des Wärmebedarfs in die Sommermonate aufgrund der hohen SOLL-Temperatur von 29°C).
- Das Optimum der Gestehungskosten liegt für Energiepreise von 2008 bei einer Skalierung von 0.75. Bei einer grösseren Auslegung des Profils (= höhere Skalierung) wird der Gewinn durch die zusätzlich genutzte Gratisabwärme durch die Kosten für das Heizöl des Spitzenkesels übertroffen.
- Unterhalb des Optimums sind die Gestehungskosten sehr wenig sensitiv bezüglich Anlagen-grösse und Skalierung.

7.1.1.4 Profil C: Aussentemperaturabhängiges Kühlen Gebäude auf 20°C

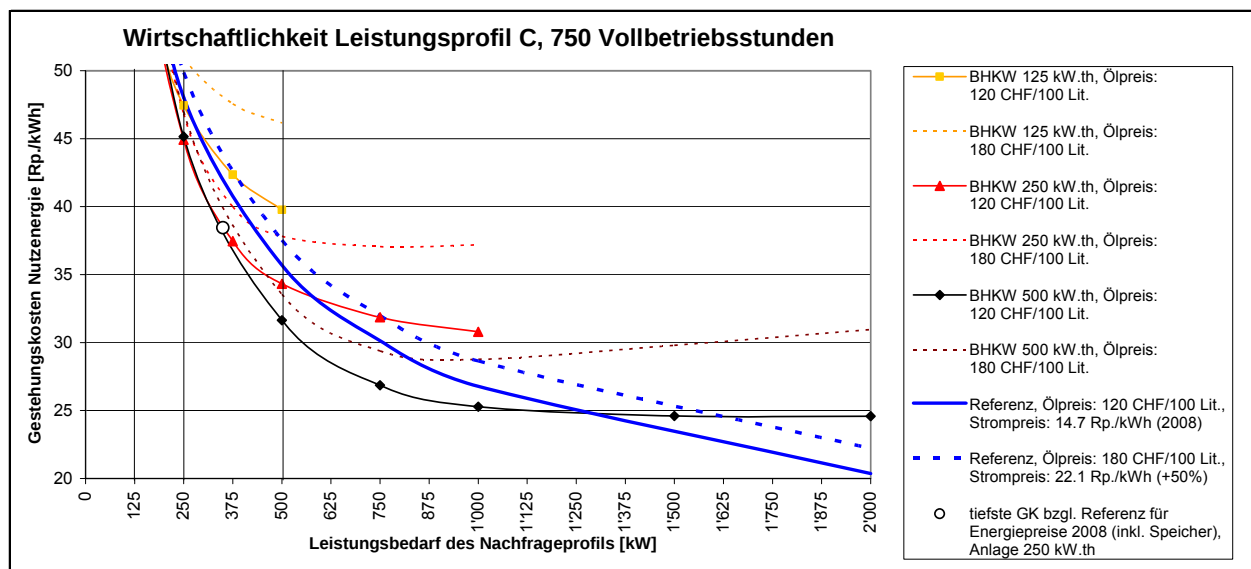
Dieses Profil entspricht einer Nutzung, die vor allem bei Dienstleistungsgebäuden vermehrt zum Einsatz kommen wird, welche jedoch nur für landwirtschaftliche Betriebe in Agglomerationsnähe erschliessbar sind. Es ist geprägt von sehr starken saisonalen Schwankungen (Sommermonate hohe Spitzen, Wintermonate kein Bedarf). Folgende Darstellung zeigt für ein 250 kW.th-BHKW das bezüglich Gestehungskosten optimal skalierte Profil:



Bemerkungen

- Die Kälteerzeugung erfolgt mittels Absorptionskältemaschine (Wärmeverhältnis 0.7, günstigste Technologie zur Konversion von Wärme zu Kälte).
- Erst bei höherer Skalierung des Kühllastprofils wird der Einsatz eines Speichers interessant.

Graphisches Ergebnis der Gestehungskosten aus der Parameterstudie für die drei untersuchten BHKW-Leistungen (Profilskalierung jeweils 0.2 bis 4.0):



Fazit

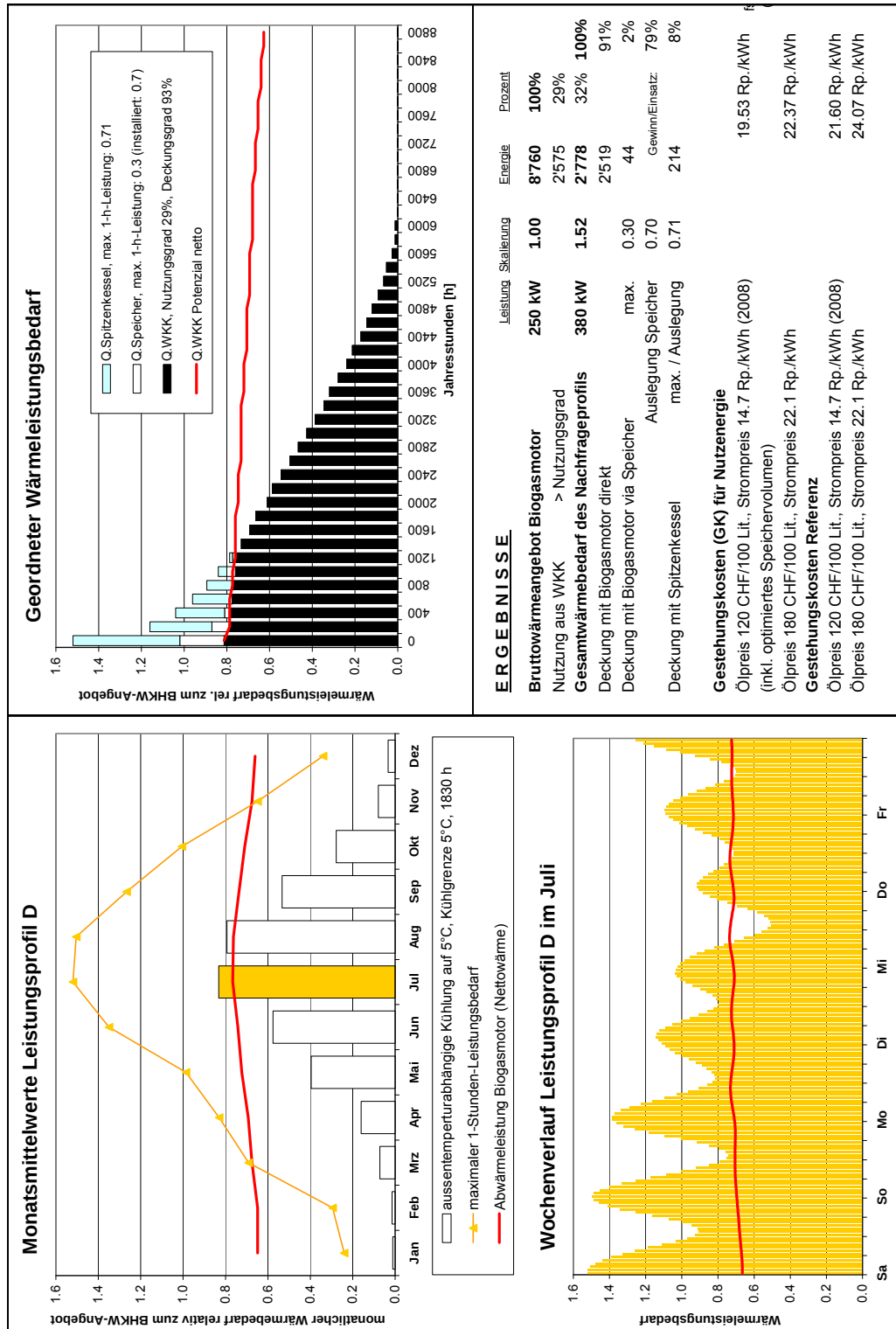
- Die Bereitstellung von Klimakälte mit einer AKM ist unter bestimmten Voraussetzungen wirtschaftlich.
- Die Gestehungskosten der Absorptionskältemaschine (GK_{AKM}) liegen immer sehr nahe bei jenen der Referenz (Kompressionskältemaschine).
- Die tiefsten Kältegestehungskosten bezüglich Tiefpreis-Referenz liegen bei einer Skalierung von 1.4 (38.5 Rp./kWh.k für ein 250 kW-BHKW, 93 % der Referenz mit 41.5 Rp./kWh.k).
- Je grösser die Kälteleistung, desto besser schneidet die AKM gegenüber der KKM ab.
- Oberhalb einer Skalierung von 2.4 (d.h. für das 250 kW-BHKW = $2.4 \cdot 250 \text{ kW} = 600 \text{ kW}$) beginnen die AKM-Gestehungskosten jene der KKM zu übersteigen. Beim Hochpreisszenario wird diese Preisparität bereits bei Skalierungen von 1.5 bis 2.0 erreicht.

Zusatzbemerkung

Alle Kalkulationen der Gestehungskosten berücksichtigen keine Fernleitungen. Es ist jedoch anzunehmen, dass solche in der Praxis zur Erschliessung von Klimakälteabnehmern notwendig sind. Für unser Beispiel (350 kW.th, $GK_{AKM} = 38.5 \text{ Rp./kWh.k}$) bleiben noch 3 Rp./kWh.k (= 2 Rp./kWh.th) übrig, um eine Fernleitung zu betreiben. Gemäss Abbildung 3 auf Seite 27 könnten damit bei Übertragung von Wärme zu einer dezentralen AKM bei 750 Vollbetriebsstunden rund 100 Meter Fernwärmeleitung wirtschaftlich realisiert werden.

7.1.1.5 Profil D: Aussentemperaturabhängiges Kühlen Lagergebäude auf 5°C

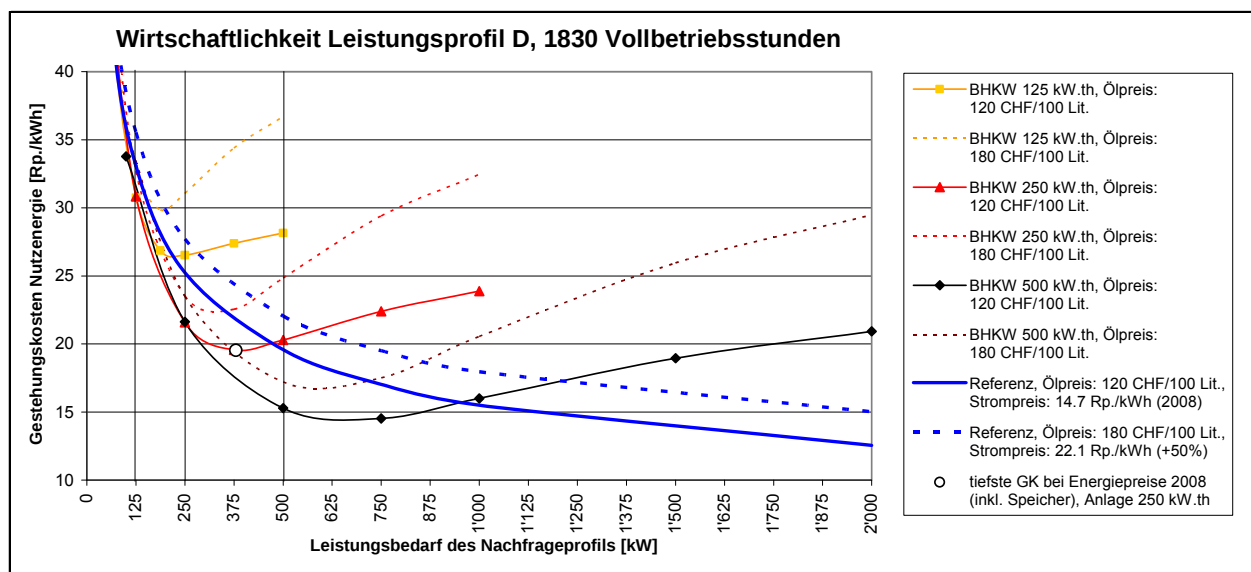
Dieses Profil entspricht einer interessanten Nutzung, welche vor Ort zur Kühlung von Gemüse-lagerhallen o.ä. umgesetzt werden kann. Gegenüber dem Klimakälte-Profil schwankt es saisonal weniger stark und weist auch in den Übergangszeiten noch Bedarf auf. Folgende Darstellung zeigt für ein 250 kW.th-BHKW das bezüglich Gestehungskosten optimal skalierte Profil:



Bemerkungen

- Die Kälteerzeugung erfolgt wiederum mittels Absorptionskältemaschine (Wärmeverhältnis 0.55).
- Annahme Gebäudehülle: 100 % opak mit durchschnittlichem U-Wert von $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Ein Speicher ist wirtschaftlich interessant (Skalierung $0.7 = 5'000 \text{ Liter}$ oder 1 h -Leistung von 175 kW.th) und spart 2 % Spitzenenergie aus dem Ölkessel.

Graphisches Ergebnis der Gestehungskosten aus der Parameterstudie für die drei untersuchten BHKW-Leistungen (Profilskalierung jeweils 0.2 bis 4.0):

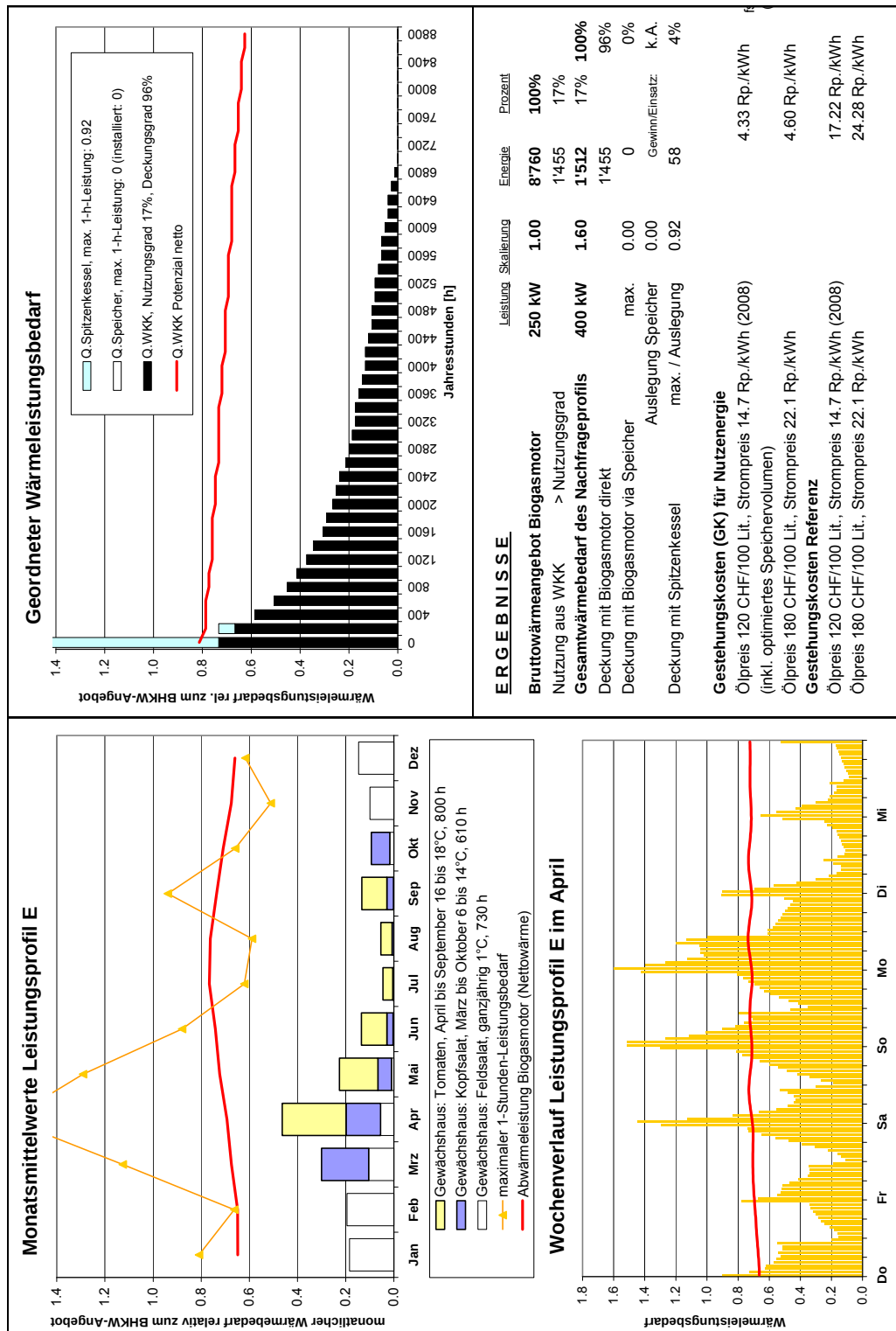


Fazit

- **Die Bereitstellung von Klimakälte mit einer Absorptionskältemaschine ist bei optimaler Skalierung knapp wirtschaftlich.**
- Die Gestehungskosten der Absorptionskältemaschine (GK_{AKM}) liegen immer sehr nahe bei jenen der Referenz (KKM).
- Im Vergleich zum Profil C (Klimakälte 20°C) schneidet dieses Profil (Produktkühlung 5°C) im unteren Skalierungsbereich besser (höhere Vollbetriebsstunden), im oberen Skalierungsbereich hingegen schlechter (tieferes Wärmeverhältnis) ab als die Referenz.
- Die tiefsten Kältegestehungskosten bezüglich Tiefpreis-Referenz liegen bei einer Skalierung von 1.5 (19.5 Rp./kWh.k für ein 250 kW-BHKW, 90 % der Referenz mit 21.6 Rp./kWh.k).
- Je grösser die Kälteleistung, desto besser schneidet die AKM gegenüber der KKM ab.
- Oberhalb einer Skalierung von 1.9 beginnen die AKM-Gestehungskosten jene der KKM zu übersteigen. Beim Hochpreisszenario wird diese Preisparität bereits bei leicht tieferen Skalierungen erreicht.

7.1.1.6 Profil E: Aussentemperatur- und strahlungsabhängige Beheizung Gewächshaus

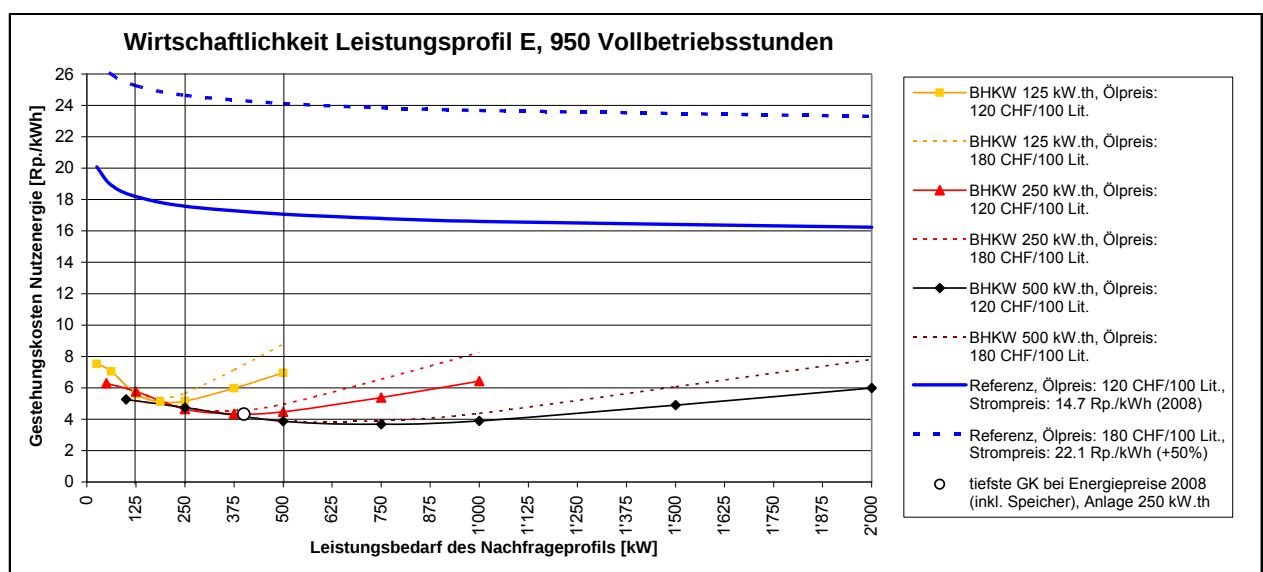
Dieses Profil ist für grössere Gemüsebetriebe relevant. Es ist geprägt von saisonalen Schwankungen mit Spitzen im Winter und v.a. während der Frühjahresmonaten. Zudem treten aufgrund der Vollverglasung hohe Tagesschwankungen auf. Folgende Darstellung zeigt für ein 250 kW-BHKW das bezüglich Gestehungskosten optimal skalierte Profil:



Bemerkungen

- 100 % verglaste Hülle mit U-Wert von $3.0 \text{ W/m}^2\text{K}$, Luftwechsel 2.0 h^{-1}
- Annahme Sommerbetrieb: Überschüssige Wärme (Einstrahlung) wird immer weggelüftet.
- Eine Speicherbewirtschaftung ist meist unwirtschaftlich, da die Lastschwankungen (v.a. aufgrund der Strahlung) sehr unregelmässig sind und entweder von einem Sockelwärmebedarf ausgehen (Regenerierung des Speichers sehr selten möglich) oder unterhalb der Kapazitätsgrenze des BHKW liegen. Erst bei sehr hohen Skalierungen kann ein Speicher die ohnehin flachverlaufende Kostenkurve (siehe folgende Graphik) noch weiter dämpfen.

Graphisches Ergebnis der Gestehungskosten aus der Parameterstudie für die drei untersuchten BHKW-Leistungen (Profilskalierung jeweils 0.2 bis 4.0):

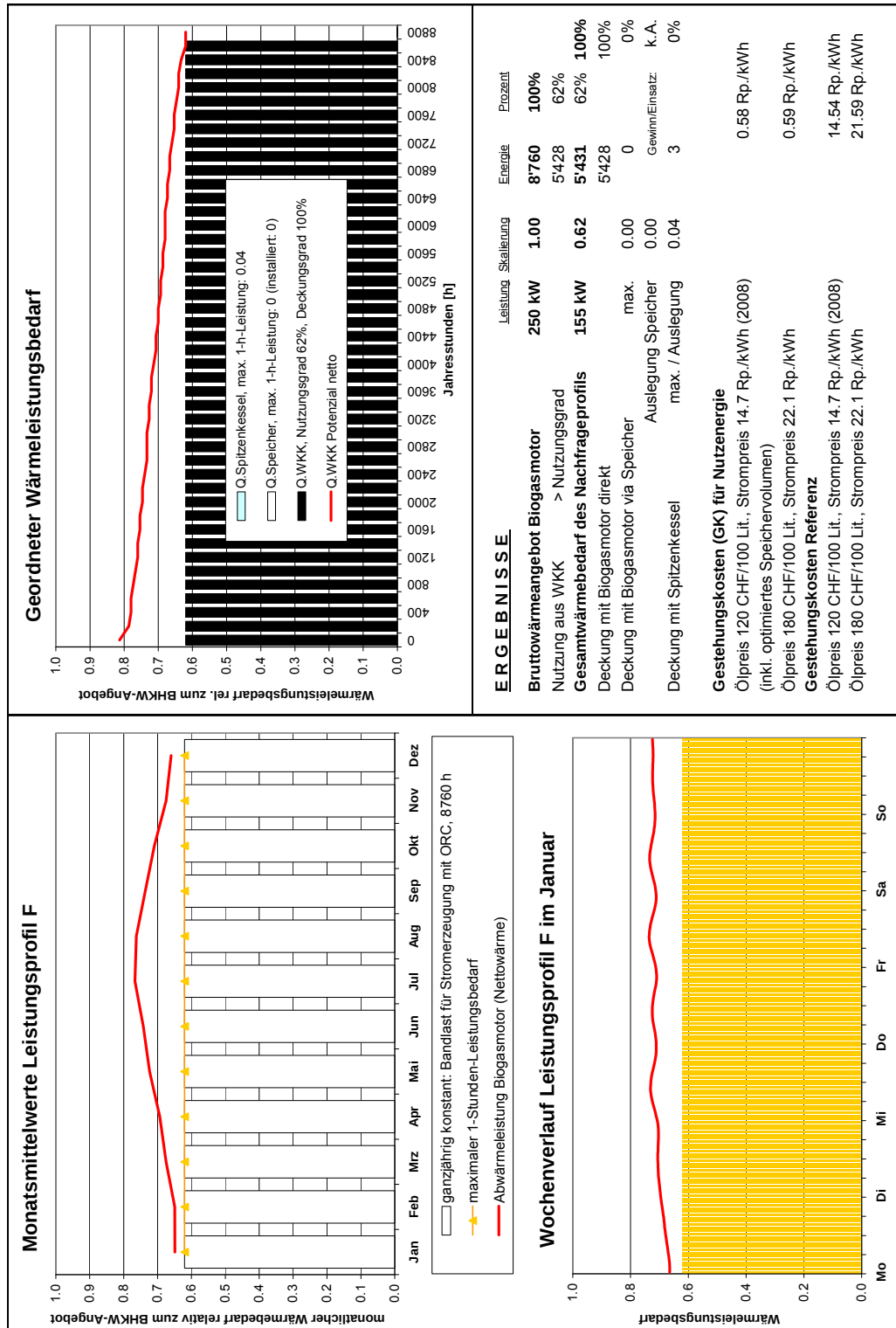


Fazit

- **Die Beheizung von ganzjährig betriebenen Gewächshäusern ist sehr wirtschaftlich.**
- Die tiefsten Heizwärmegestehungskosten liegen für die grösste BHKW-Kategorie (500 kW.th) bei 3.8 Rp./kWh, was weit unter den 16 - 20 Rp./kWh der Tiefpreis-Referenz (Ölkessel mit Ölpreis 12 Rp./kWh) liegt. Dieses Profil liefert höhere Gestehungskosten als das Gebäudeheizprofil, was sich aus den tieferen Vollbetriebsstunden ergibt.
- Das Optimum der Gestehungskosten liegt für Energiepreise von 2008 bei einer Skalierung von 1.6. Die tiefen Vollbetriebsstunden (resp. sehr hohen, kurzzeitigen Spitzen) führen dazu, dass die Sensitivität der Gestehungskosten sehr gering bezüglich der Skalierung ist.

7.1.1.7 Profil F: Ganzjährig konstant, Bandlast

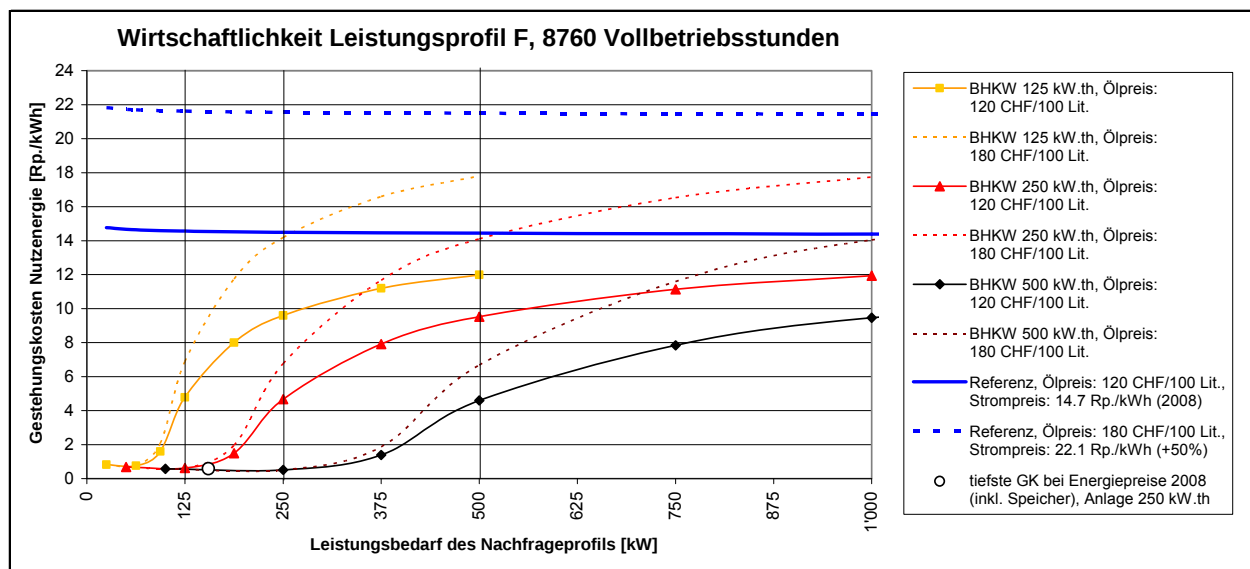
Dieses Profil ist für die Nutzung von BHKW-Abwärme optimal, wird jedoch in der Praxis sehr selten anzutreffen sein. Es weist einen ganzjährig konstanten Verlauf auf und ermöglicht den höchsten Nutzungsgrad. Folgende Darstellung zeigt für ein 250 kW.th-BHKW das bezüglich Gesteungskosten optimal skalierte Profil:



Bemerkungen

- Der Nutzungsgrad liegt auch für dieses Profil unter 100 %, da aufgrund des leicht saisonal abhängigen Eigenbedarfs des Fermenters im Winter das Nettowärmeangebot um ca. 20 % tiefer ist als im Sommer.

Graphisches Ergebnis der Gestehungskosten aus der Parameterstudie für die drei untersuchten BHKW-Leistungen (Profilskalierung jeweils 0.2 bis 4.0):



Fazit

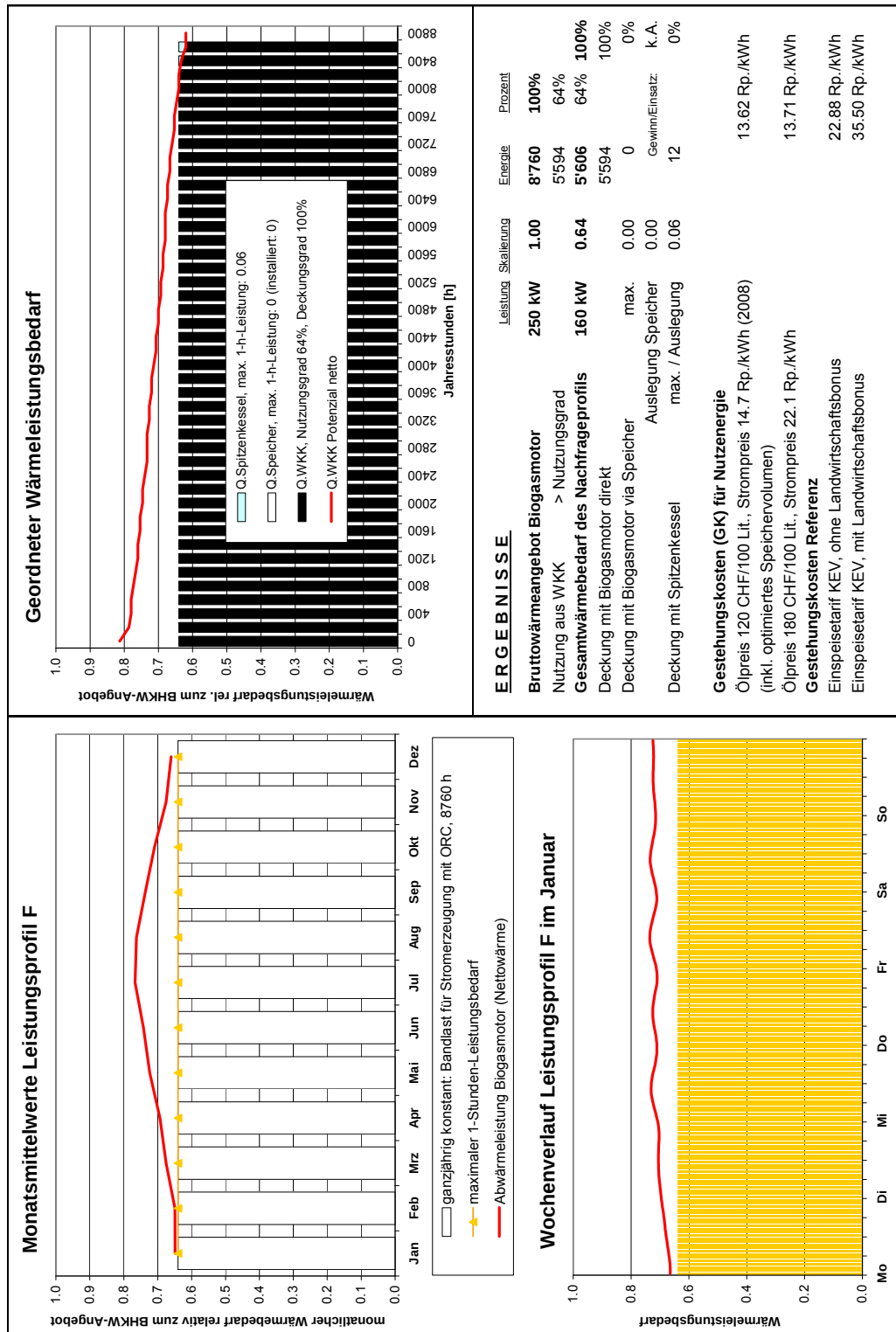
- Die Bereitstellung von Bandlast-Heizwärme ist höchst wirtschaftlich.**
- Die tiefsten Heizwärmegestehungskosten liegen bei 0.5 Rp./kWh, was erwartungsgemäss der tiefste Wert aller Profile ist und lediglich 3.5 % der Kosten der Tiefpreisreferenz von 14.5 Rp./kWh ausmacht.
- Das Optimum der Gestehungskosten liegt aufgrund des Eigenbedarfs des Fermenters bei einer Skalierung von 0.62 (maximale Nettowärmeleistung im Winter). Bei einer höheren Skalierung steigen die GK sprunghaft an, da bis auf wenige Sommermonate jede zusätzliche Wärmeenergie mit Heizöl erzeugt werden muss.

Zusatzbemerkung

Alle Kalkulationen der Gestehungskosten berücksichtigen keine Fernleitungen. Für die Erschließung einer Bandlast ist dies jedoch in der Praxis meist notwendig (siehe auch Profil C). Für unser Beispiel (150 kW.th, GK = 0.6 Rp./kWh.th) bleibt eine Differenz zur Tiefpreis-Referenz von 13.9 Rp./kWh.th, die für die Finanzierung einer Fernwärmeleitung zur Verfügung steht. Gemäss Abbildung 3 auf Seite 27 kostet die Übertragung von 150 kW.th bei 8'760 Vollbetriebsstunden ca. 0.2 Rp./kWh pro 100 Meter Fernwärmeleitung. Somit liessen sich 7 Kilometer Fernwärmeleitung wirtschaftlich realisieren.

7.1.1.8 Spezialfall zu Profil F (Bandlast): Stromerzeugung mittels ORC

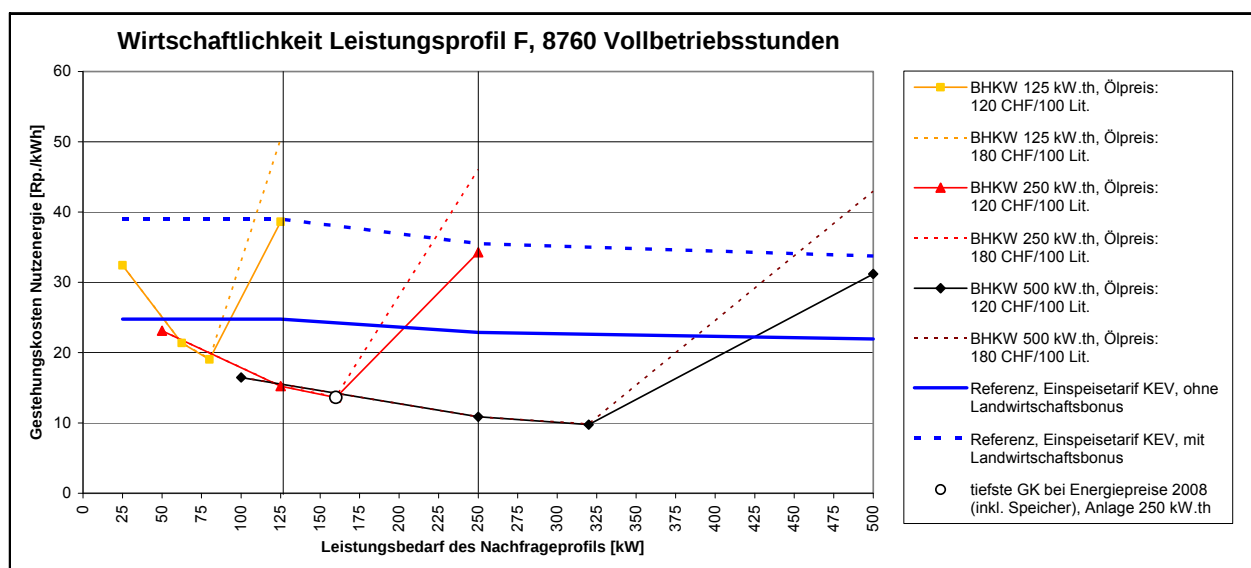
Dieses Profil hat den identischen Verlauf der in vorangehendem Abschnitt erläuterten Bandlast. Es ist in der Praxis jedoch leichter, in Betriebsnähe zu realisieren. Folgende Darstellung zeigt für ein 250 kW.th-BHKW das bezüglich Gestehungskosten optimal skalierte Profil:



Bemerkungen

- Für alle Berechnungen wurde ein elektrischer Wirkungsgrad des ORC-Prozesses von 16 % verwendet (inkl. Verluste des Abgaswärmetauschers).
- Dieser Wirkungsgrad wird nur erreicht, wenn heisse Abwärme aus dem Abgas genutzt werden kann. Daher ist jeweils höchstens rund zwei Drittel der BHKW-Abwärme (Mischung von Abgas- und Motorenabwärme) für den ORC nutzbar. Da der Eigenbedarf des Fermenters jedoch mit der kühleren Motorenabwärme gedeckt werden kann, fällt die Nettowärme auf genug hohem Temperaturniveau an, um im ORC-Prozess vollständig genutzt werden zu können.
- Weitere technische Details zum ORC-Prozess finden sich in Kapitel 6.7 auf Seite 43, die Technologiekosten sind auf Seite 32 zusammengefasst.

Graphisches Ergebnis der Gestehungskosten aus der Parameterstudie für die drei untersuchten BHKW-Leistungen (Profilskalierung jeweils 0.2 bis 2.0):



Fazit

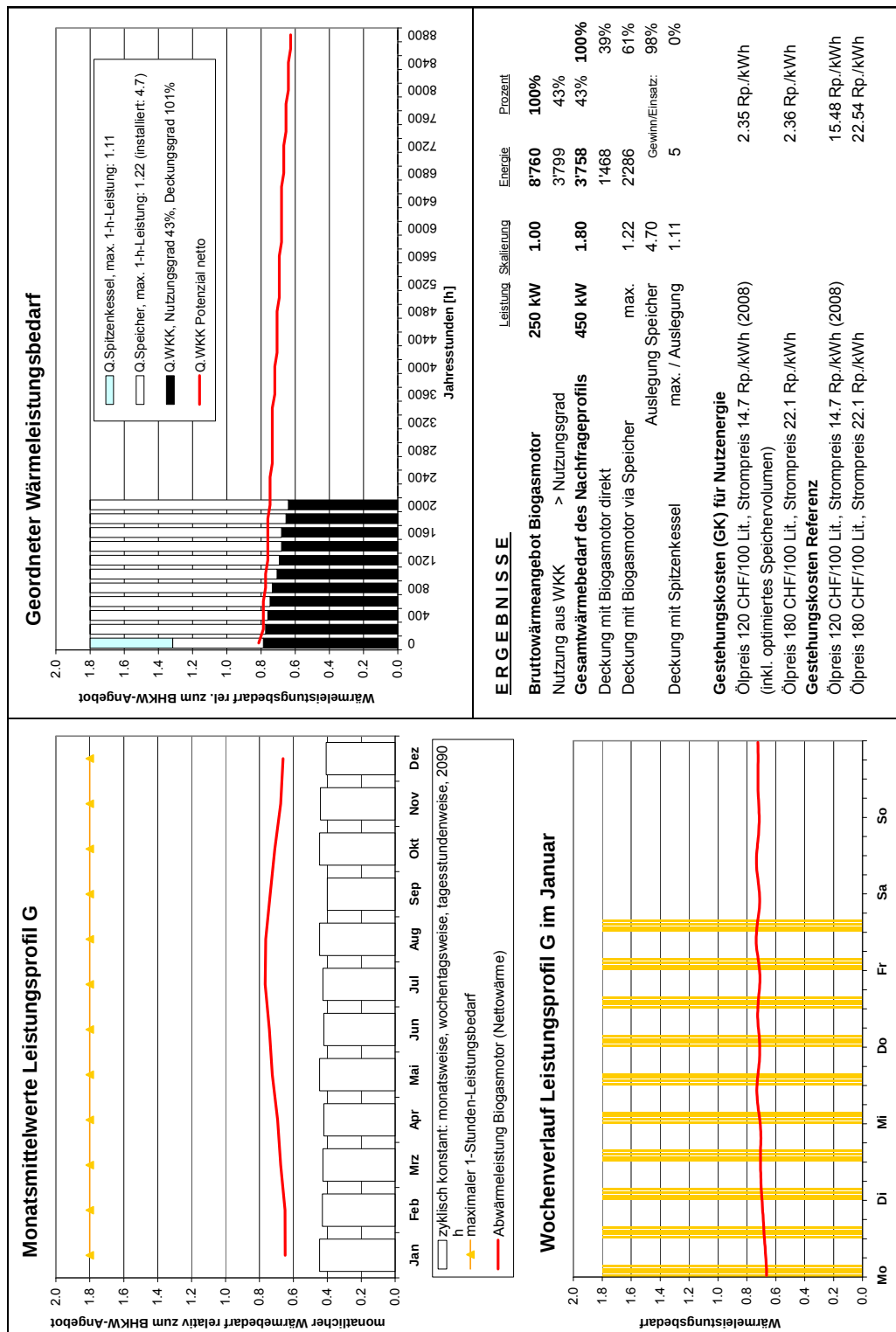
- **ORC ist bei KEV wirtschaftlich – je grösser die Anlage desto besser**
- In einem 500 kW.th-BHKW lassen sich via ORC Stromgestehungskosten von 10 Rp./kWh erzielen. Als Referenz dient der Tarif nach KEV, welcher auch ohne Landwirtschaftsbonus mit 21.9 Rp/kWh mehr als doppelt so hoch liegt.
- ORC-Anlagen sind bei einer KEV *mit* Landwirtschaftsbonus bereits ab einer thermischen Leistung von 25 kW (Stromgestehungskosten 32.4 Rp./kWh) wirtschaftlich.

Zusatzbemerkungen

- Für den ORC-Prozess ist die Darstellung der Gestehungskosten ab einer Skalierung von 0.62 - d.h. ab Zuschaltung eines Spitzenölkessels – rein virtuell, denn selbstverständlich wird für Strom aus einem ölbetriebenen ORC-Prozess keine KEV ausbezahlt.
- Beim ORC-Prozess fällt sehr viel Wärme bei niedrigen Temperaturen (35°C) an. Ideal wäre, den ORC-Prozess mit einer entsprechenden Niedertemperaturnutzung zu kombinieren (z.B. Grundlast via Luftbeheizung für ein Gewächshaus).

7.1.1.9 Profil G: zyklisch konstant: monatsweise, wochentagsweise, tagesstundenweise

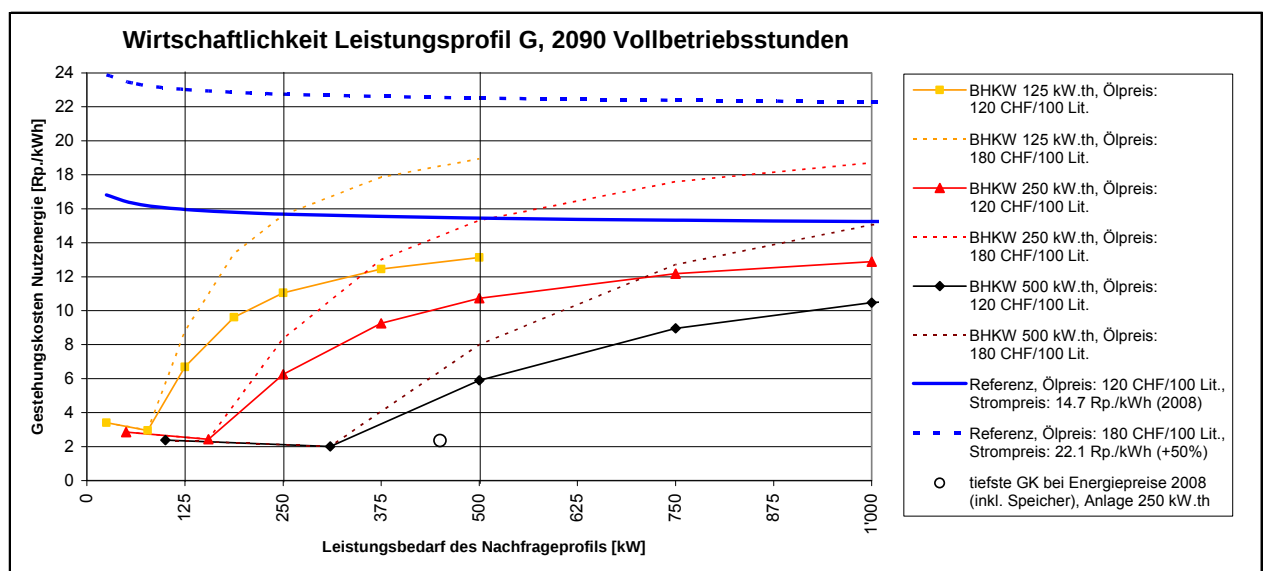
Dieses Profil entspricht Nutzungen unterschiedlichster Anwendungen. Es ist geprägt von diskreten Wärmelasten zwischen Null und Maximum, welche mit unterschiedlichen Zyklen auftreten. Für das Illustrationsbeispiel wurde ein Profil definiert, welches dem Wärmebedarf einer Käserei oder der Brauchwarmwassererwärmung entsprechen kann. Folgende Darstellung zeigt für ein 250 kW.th-BHKW das bezüglich Gestehtungskosten optimal skalierte Profil.



Bemerkungen

- Zyklische Wärmelasten, die diskret zwischen Null und Maximum wechseln, eignen sich am besten für den Einsatz von Speichern. Je kürzer der Zyklus, desto kleiner kann der Speicher dimensioniert werden. Je grösser die Skalierung (im Beispiel 4.7, Erklärung siehe unten), desto länger muss die Lastlücke für die Regenerierung des Speichers sein (im Beispiel 8 Stunden).
- Speichergrosse im Beispiel: Skalierung 4.7 = $4.7 \cdot 250 \text{ kW.th} = 1'175 \text{ kW.th}$ Abgabeleistung während einer Stunde (entspricht 33'600 Liter Wasserinhalt, welches über eine Temperaturdifferenz von 30 K nutzbar ist, siehe auch Kapitel 5.2 auf Seite 25).

Graphisches Ergebnis der Gestehungskosten aus der Parameterstudie für die drei untersuchten BHKW-Leistungen (Profilskalierung jeweils 0.2 bis 2.0):



Fazit

- **Zyklische Lastprofile sind wirtschaftlich interessant, benötigen jedoch eine sorgfältige Auslegungsplanung**
- Die tiefsten Wärmegestehungskosten liegen bei 2.0 Rp./kWh, was den Kosten des Gebäudeheizprofils aufgrund der ähnlichen Vollbetriebsstunden entspricht.
- Das Optimum der Gestehungskosten *ohne Speicher* läge bei einer Skalierung von 0.62 (Untergrenze der Nettowärmeleistung). Bei einer höheren Skalierung steigen die GK sprunghaft an, da bis auf wenige Sommermonate jede zusätzliche Wärmeenergie mit Heizöl erzeugt werden muss (analog Bandlast-Profil, da das Profil letztlich ein zyklisch unterbrochenes Bandlastprofil ist).
- Die richtige Dimensionierung des Speichers ist zentral. Im vorliegenden Beispiel kann damit die Nutzung der Abwärmemenge zu gleichem Gestehungspreis um den Faktor 3 gesteigert werden. Voraussetzung ist, dass das Verhältnis von Lastspitze zu BHKW-Wärmeleistung möglichst gleich dem Verhältnis von BHKW-Wärmeproduktion während der Lastlücke zu BHKW-Wärmedefizit während der Lastspitze ist. Zudem sollte ein Zyklus weniger als 24 Stunden dauern, um zu grosse Speicher zu vermeiden.

7.1.2 Exkurs zum Spezialfall von Profil G: Heutrocknung

Bei der Heutrocknung wird Luft mittels Gebläse durch das geschichtete Heu gepresst. Die (trockene) Luft nimmt Feuchtigkeit aus dem frisch eingelagerten Heu mit einer Restfeuchte von 60 % auf, bis das Heu genügend trocken für eine langfristige Lagerung ist (15 % Restfeuchte). In der Regel wird direkt Luft aus der Umgebung verwendet. Diese sog. Kaltbelüftung stellt hier die Referenztechnologie für den Vergleich mit der Biogas-BHKW-Abwärmenutzung zur Luftvorwärmung dar. Annahmen für 100 kg Heu (Jahresbedarf einer Kuh: 700 kg Heu = 1 GVE)²⁰:

100 kg Heu, Restfeuchte 60%	Kaltbelüftung	AWN - Luftvorwärmung
Lufteintrittstemperatur	18°C	18°C
Lufteintrittstemperatur Heu	18°C	28°C
rel. Feuchte Eintritt	55 %	55 %
Luftaustrittstemperatur	16.7°C	22.7°C
rel. Feuchte Austritt	70 %	70 %
Strombedarf Ventilation	20 kWh	5.3 kWh
Ventilationsdauer	240 h	63 h ²¹
Wärmebedarf Vorwärmung	0 kWh	82.5 kWh
Trocknungskapazität	1	3.8

Die Gestehungskosten der Kaltlüftung (= Referenztechnologie) lässt sich aus obiger Bilanz wie folgt berechnen:

Eingesparter Strom pro aufgewendeter Abwärme * Strompreis

(20 – 5.3) kWh / 82.5 kWh * Strompreis, d.h. für das Jahr 2008:

$1 / 5.6 * 14.7 \text{ Rp./kWh} = 2.62 \text{ Rp./kWh}$.

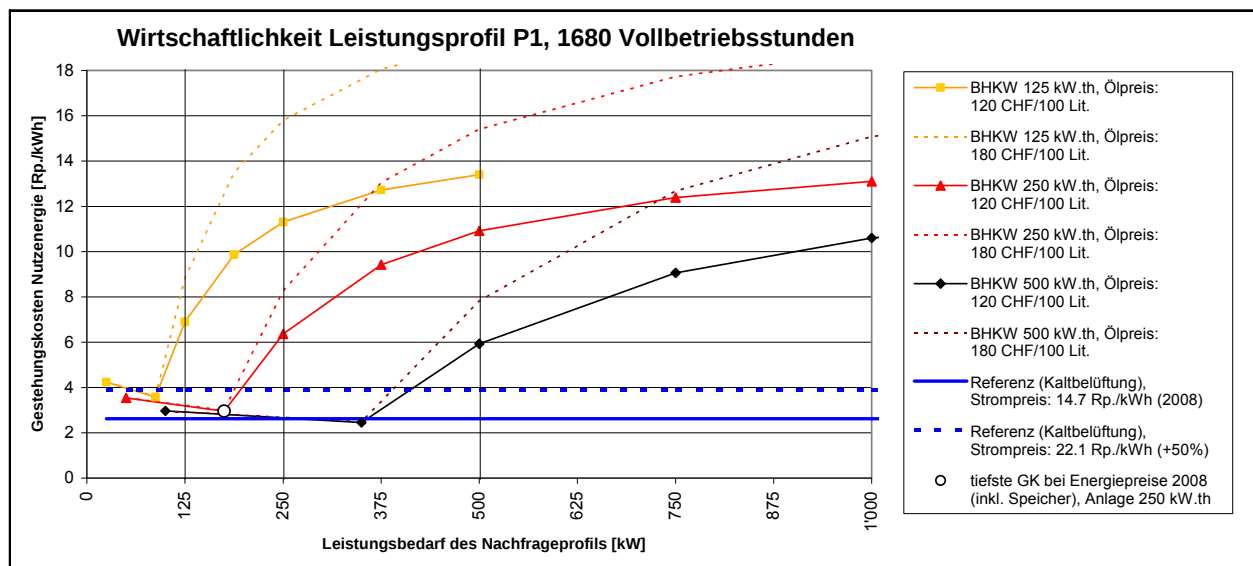
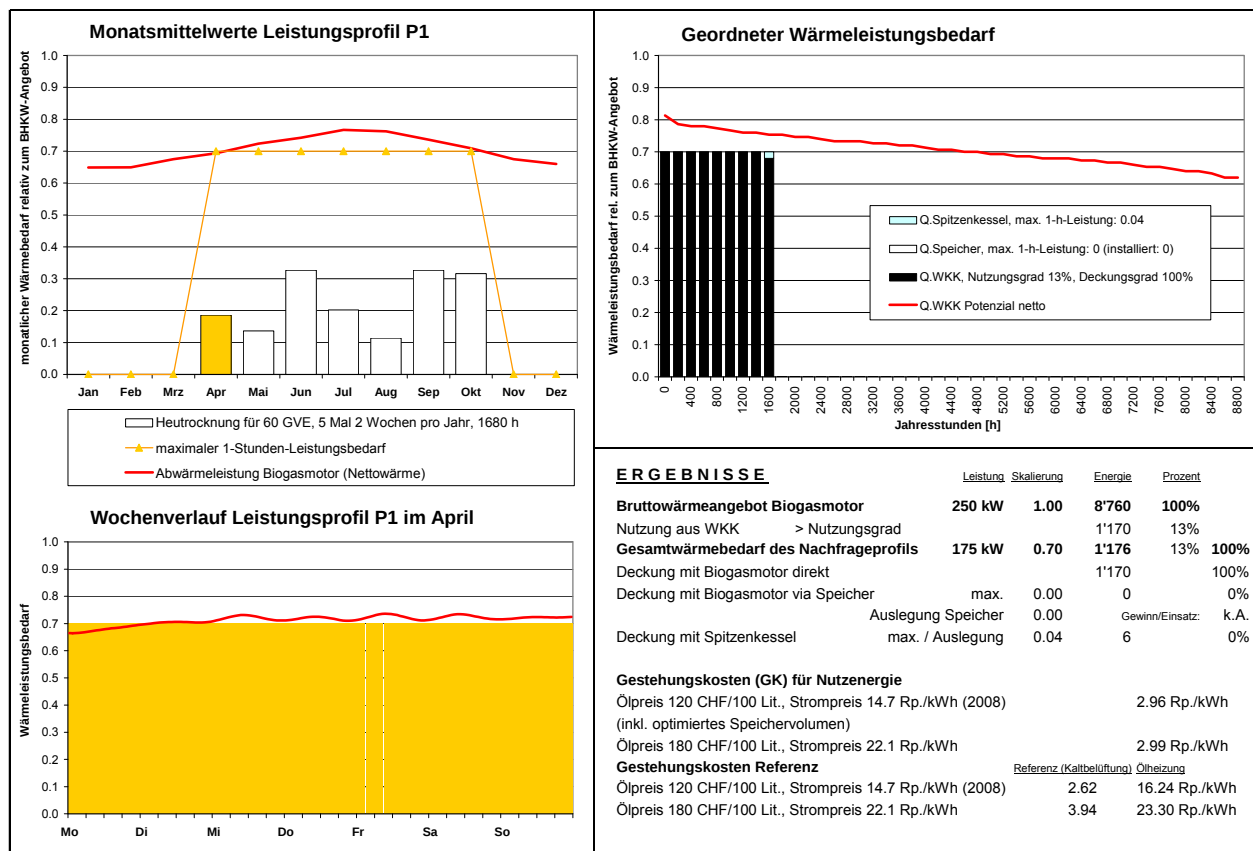
Dies bedeutet, dass die Wärmegegestehungskosten der Abwärmenutzung unter 2.6 Rp./kWh liegen müssen, damit die Heutrocknung wirtschaftlich ist.

Für die zwei untersuchten Heutrocknungsregimes (P1: Eigenbedarf, P2: Durchlauf) ergeben sich folgende Profile inkl. Gestehungskosten:

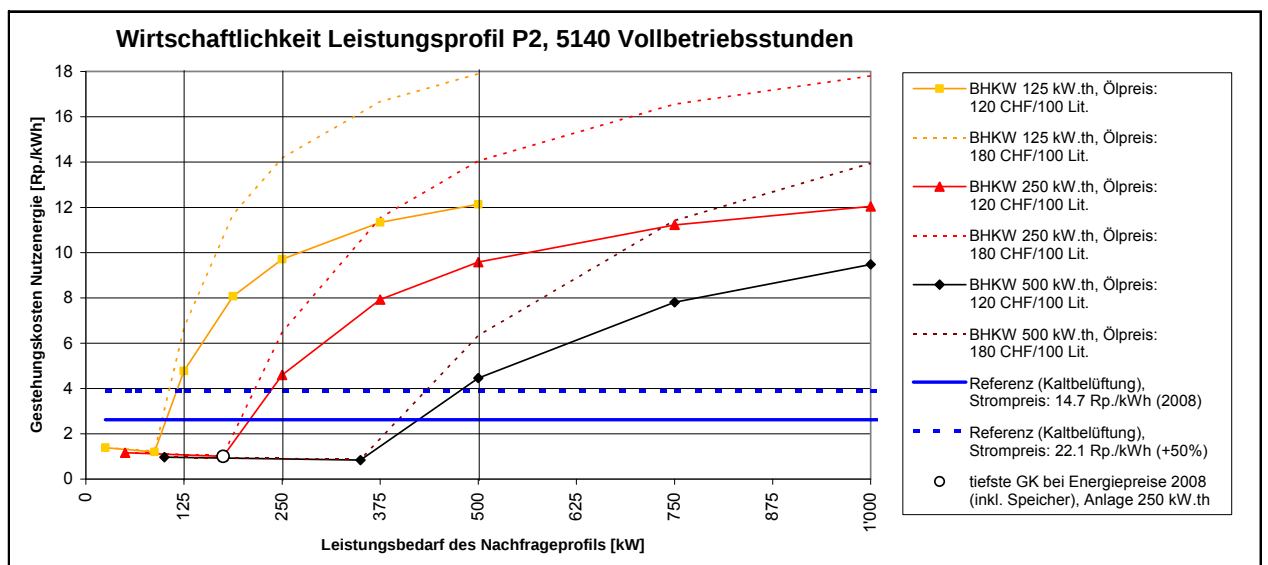
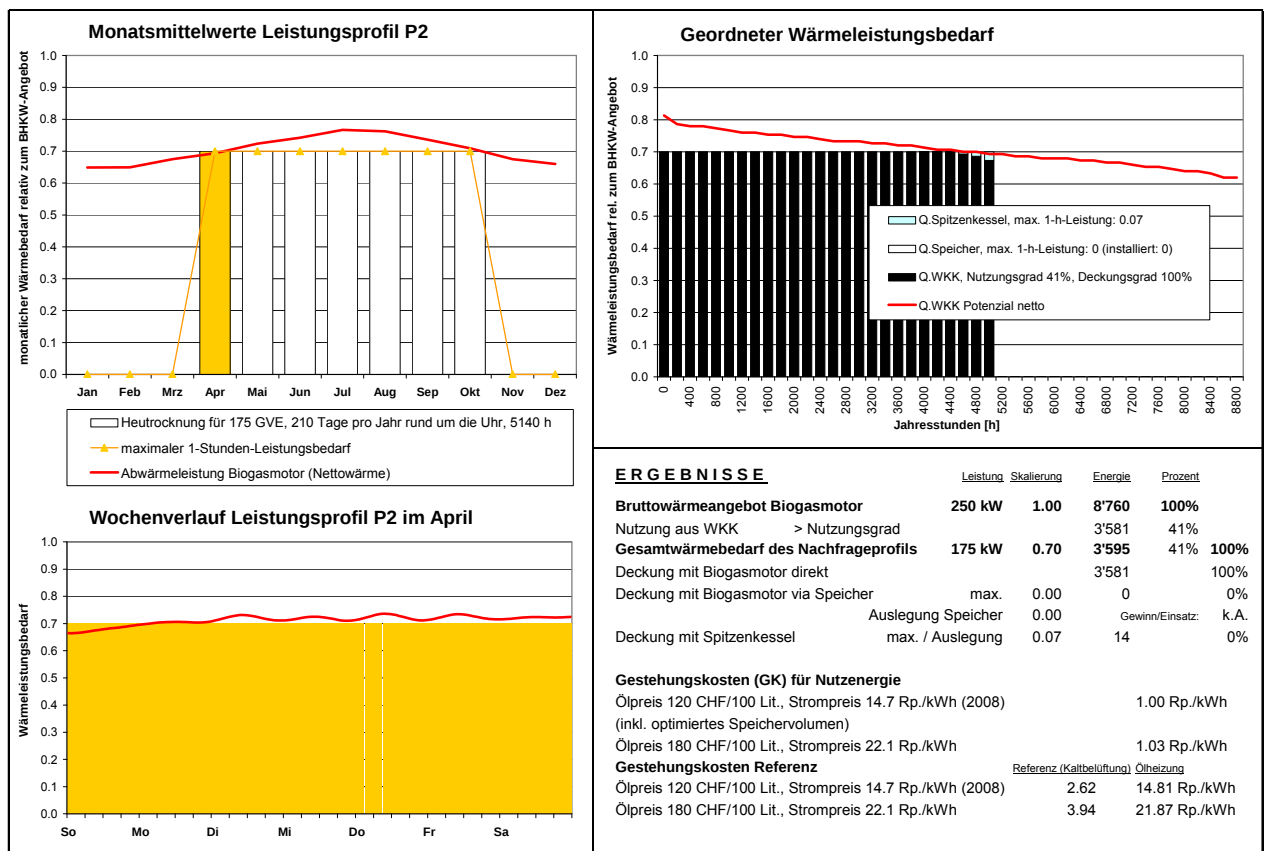
²⁰ Quelle: Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik (FAT), 1989.

²¹ Erhöhung der Trocknungskapazität gegenüber der Kaltlufttrocknung um Faktor 3.8

7.1.2.1 Spezialfall zu Profil G: Heutrocknung, Eigenbedarf (P1)



7.1.2.2 Spezialfall zu Profil G: Heutrocknung, Durchlauf (P2)

**Fazit**

Die rund-um-die-Uhr-Heutrocknung mittels Abwärmenutzung ist auch bei den heute tiefen Strompreisen wirtschaftlich.

Zusatzbemerkung: Eine Fernwärmeleitung kostet bei den hohen Vollbetriebsstunden von 5'140 h für 250 kW.th lediglich 0.23 Rp./kWh pro 100 Meter.

7.1.3 Spezifische Nutzungen der Leistungsbedarfsprofile

Mit den im vorangehenden Abschnitt charakterisierten Leistungsbedarfsprofilen (inkl. ihrer vier Spezialfälle) und den Ergebnissen zu den Kosten von Konversionstechnologie, Transport und Speicherung lassen sich nun für alle denkbaren Abwärmenutzungen durch entsprechende Kombination die Gestehungskosten der jeweiligen Nutzenergie (Wärme, Kälte, Strom) berechnen.

Folgende spezifische Nutzungen der Leistungsbedarfsprofile sollen im Anschluss in 15 verschiedenen Kombinationen näher untersucht werden. Diese Profilnutzungen basieren alle auf den sieben erarbeiteten grundlegenden Profilen, sind nun jedoch fix skaliert, weisen also einen der Nutzung entsprechenden festen Leistungs- und Energiebedarf auf.

Alle Energieangaben beziehen sich auf den Wärmebedarf ab Blockheizkraftwerk (Endenergie).

7.1.3.1 Profilnutzungen in unmittelbarer Nähe des Biogasmotors

- B1: Brauchwarmwassererwärmung, zwei Bauernhäuser inkl. Stall (10 MWh/Haus*a) Profil G
- H1: Heizen zwei Bauernhäuser (je 200 m² à 150 kWh/m²*a = 30 MWh/Haus*a) Profil A
- H2: Heizen Stall (7 m² pro GVE, 150 kWh/m²*a²² = 1 MWh/GVE*a) Profil A
- H3: Heizen Agritourismus, vier Wohnhäuser (30 MWh/Haus*a) Profil A
- E1: Stromerzeugung mittels ORC-Prozess Profil F

7.1.3.2 Profilnutzungen in mittelbarer Nähe des Biogasmotors (200 Meter Leitung)

- B2: Brauchwarmwassererwärmung, Weiler = 10 Wohnhäuser (6.5 MWh/Haus*a) Profil G
- H4: Heizen Weiler = 10 Wohnhäuser (200 m² à 150 kWh/m²*a = 30 MWh/Haus*a) Profil A
- H5: Heizen Gewächshaus Feldsalat (ganzjährig, 6°C, 200 kWh/m², 730 h) Profil E
- H6: Heizen Gewächshaus Kopfsalat (Mrz. - Okt., 6 - 14°C, 160 kWh/m²*a, 610 h) Profil E
- H7: Heizen Gewächshaus Tomaten (Apr. - Sept., 16 - 18°C, 240 kWh/m²*a, 800 h) Profil E
- H8: Heizen Aquakultur, Forelle (Durchfluss 1 h⁻¹, 16°C, 30'000 kWh/m³*a, 2'400 h) Profil B
- H9: Heizen Aquakultur, Egli (Kreislauf 0.0042 h⁻¹, 23°C, 850 kWh/m³*a, 3'600 h) Profil B
- H10: Heizen Aquakultur, Tilapia (Kreislauf 0.0042 h⁻¹, 29°C, 1'300 kWh/m³*a, 4'600 h) Profil B
- P1: Prozess Heutrocknung Eigenbedarf (5 mal 2 Wochen pro Jahr, 1'680 h) Profil G
- P2: Prozess Heutrocknung Durchlauf (210 Tage pro Jahr, 5'140 h) Profil G
- P3: Prozess Heizen Käserei, 20 Liter Milch/(Tag*GVE), 4-mal tägl. 15 K erwärmen Profil G
- K1: Kühlen Lebensmittellagerhalle (ganzjährig 5°C, 135 kWh/m²*a, 1'830 h) Profil D

7.1.3.3 Profilnutzungen in Umgebung des Biogasmotors (200 bis 2'000 m Leitung)

- B3: Brauchwarmwassererwärmung / Grundlast bestehendes Fernwärmenetz Profil F
- H11: Heizen Gebäude (MFH/Hotel 100 kWh/m²*a, Büro 75 kWh/m²*a, 2'250 h) Profil A
- H12: Heizen Schwimmhalle (BWW 100 kWh/m²*a, Halle 100 kWh/m²*a, 4'400 h) Profil B
- K3: Kühlen Bürogebäude (ganzjährig 20°C, 50 kWh/m²*a²³, 950 h) Profil C

²² Wert im Vergleich zu Wohngebäuden: Geringere Luftdichtigkeit eines Stalls wird durch tiefere Temperatur kompensiert.

7.2 Ausgewählte Abwärmenutzungsvarianten

Im Folgenden werden 15 ausgewählte Abwärmenutzungsvarianten exemplarisch beschrieben und bewertet. In Klammern sind jeweils die Kürzel der auf Seite 70 definierten Profilnutzungen aufgeführt. Die Liste ist nicht komplett; sie stellt eine repräsentative Auswahl dar, die aufgrund der Besichtigung von fünf Landwirtschaftsbetrieben in der Schweiz eine grosse Mehrheit aller möglichen Fälle abdecken kann.

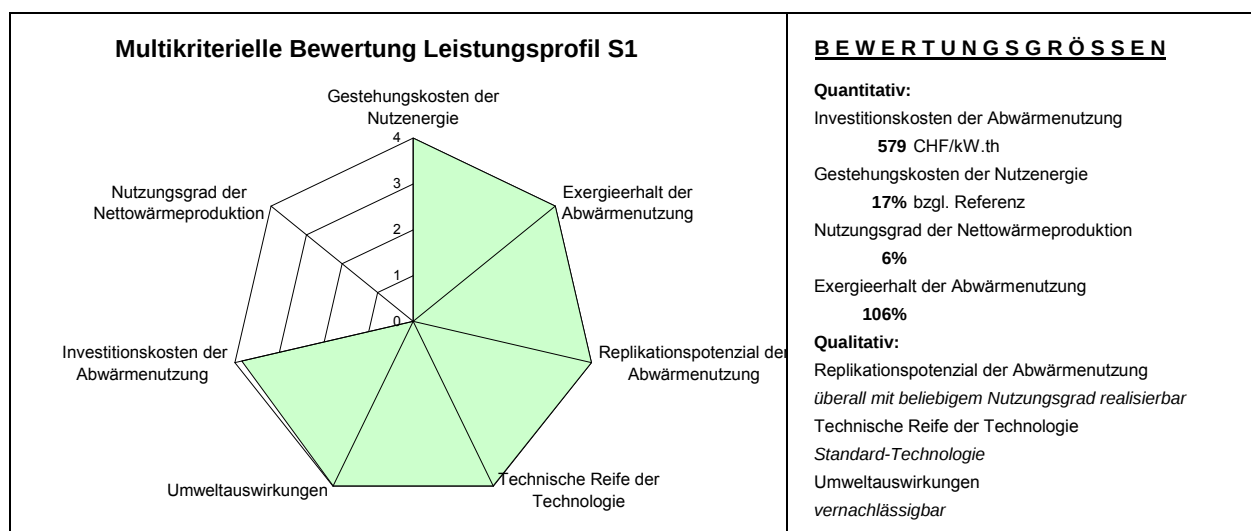
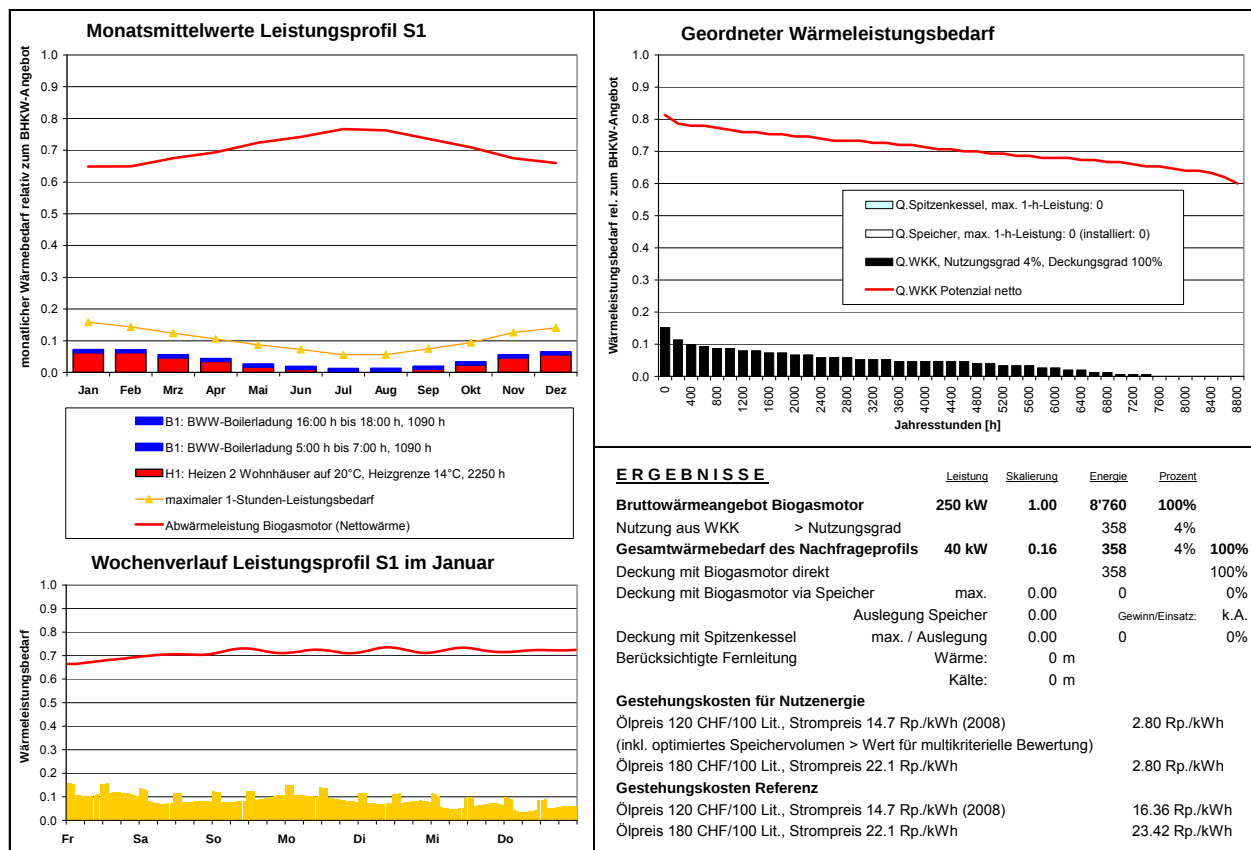
- S1: Standardbetrieb 1: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1)
- S2: Standardbetrieb 2: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1), Heizen Stall (H2), Prozess Heutrocknung Eigenbedarf (P1)
- S3: Standardbetrieb 3: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1), Heizen Stall (H2), Prozess Heutrocknung Eigenbedarf (P1), Heizen 10 Wohnhäuser (H4)
- G1: Gemüsebetrieb 1: S2, Heizen Gewächshaus Feldsalat (H7)
- G2: Gemüsebetrieb 2: S1, Heizen Gewächshaus (H5, H6, H7), Kühlen Kühlhaus 5°C (K1)
- F1: Fischbetrieb 1: S1, Heizen Aquakultur Forelle (H8), Kühlen Kühlhaus 5°C (K1)
- F2: Fischbetrieb 2: S1, Heizen Aquakultur Egli/Zander (H9), Kühlen Klimakälte 5°C (K1)
- F3: Fischbetrieb 3: S1, Heizen Aquakultur Tilapia (H10), Kühlen Kühlhaus 5°C (K1)
- K1: Käsereibetrieb: S2, Prozess Heutrocknung Durchlauf (P2), Prozess Heizen Käserei (P3), Kühlen Klimakälte 5°C (K1)
- T1: Tourismusbetrieb 1: S2, Heizen Agritourismus (H3)
- T2: Tourismusbetrieb 2: S2, Heizen Wellnesshotel (H11), Heizen Schwimmbad (H12)
- Gr1: Grossbetrieb 1: S2, Grundlast Fernwärmenetz (B2), Heizen Wohnsiedlung (H11)
- Gr1b: Grossbetrieb 1b: S2, Stromerzeugung mittels ORC-Prozess (E1), Heizen Wohnsiedlung (H11)
- Gr2: Grossbetrieb 2: S2, Grundlast Fernwärmenetz (B2), Heizen Wohnsiedlung (H11), Kühlen Klimakälte 20°C (K3)
- Gr3: Grossbetrieb 3: S2, Heizen Büro- und Wohngebäude (H11), Kühlen Bürogebäude 20°C (K3), Trocknen Heu (P2)

²³ Bezieht sich auf die Nutzenergie Kälte (die Abwärmemenge ab BHK ist um Faktor 2 höher)

7.2.1 Beschreibung S1: Standardbetrieb 1

Die Abwärmenutzungsvariante ‚Standardbetrieb 1‘ kombiniert folgende Profile:

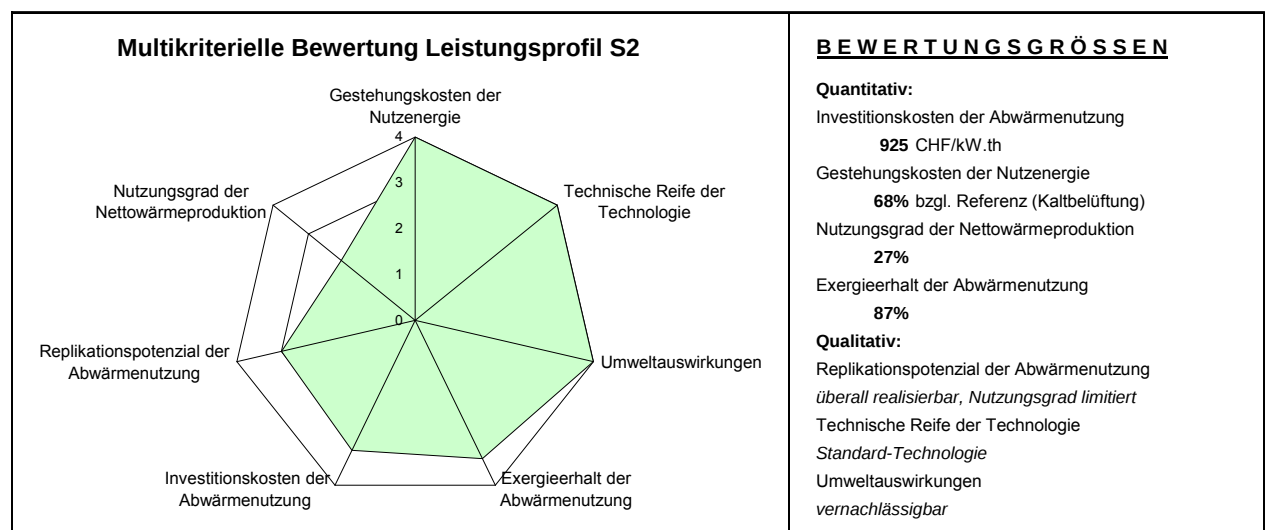
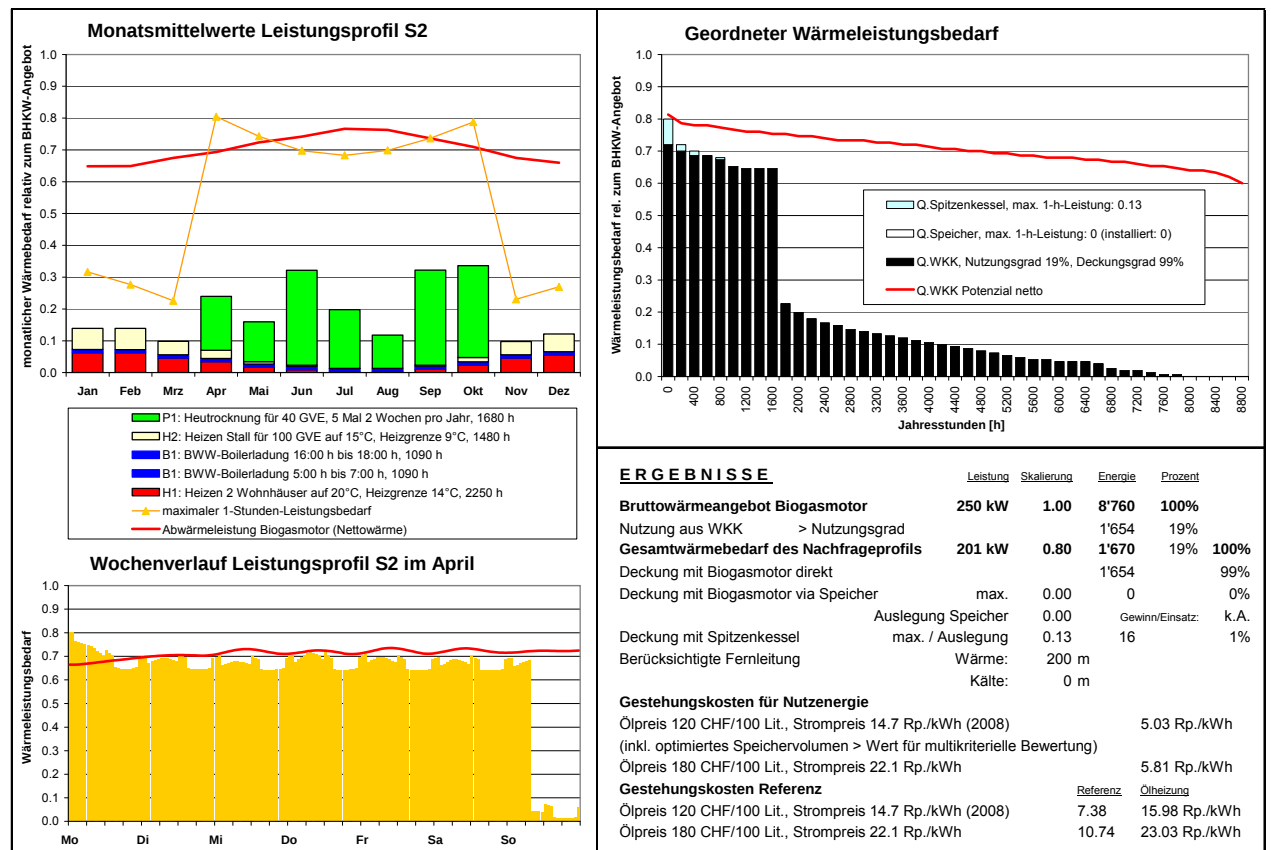
- H1: Heizen zwei Bauernhäuser (je 200 m² à 150 kWh/m²*a = 30 MWh/Haus*a) Profil A
- B1: Brauchwarmwassererwärmung, zwei Bauernhäuser inkl. Stall (10 MWh/Haus*a) Profil G



7.2.2 Beschreibung S2: Standardbetrieb 2

Die AWN-Variante ‚Standardbetrieb 2‘ kombiniert folgende Profile: (inkl. 200 Meter Fernleitung):

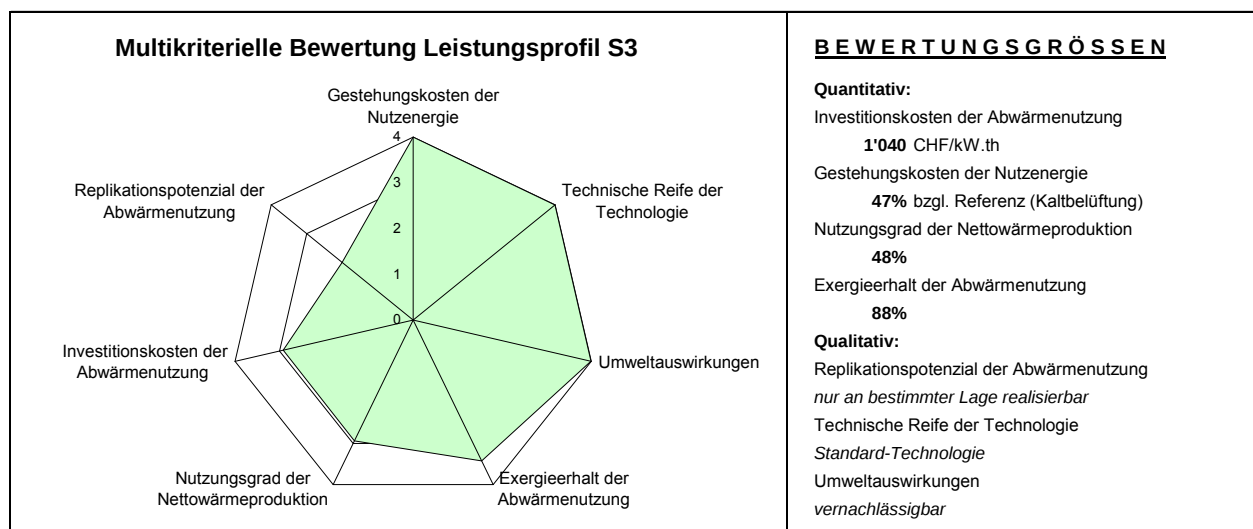
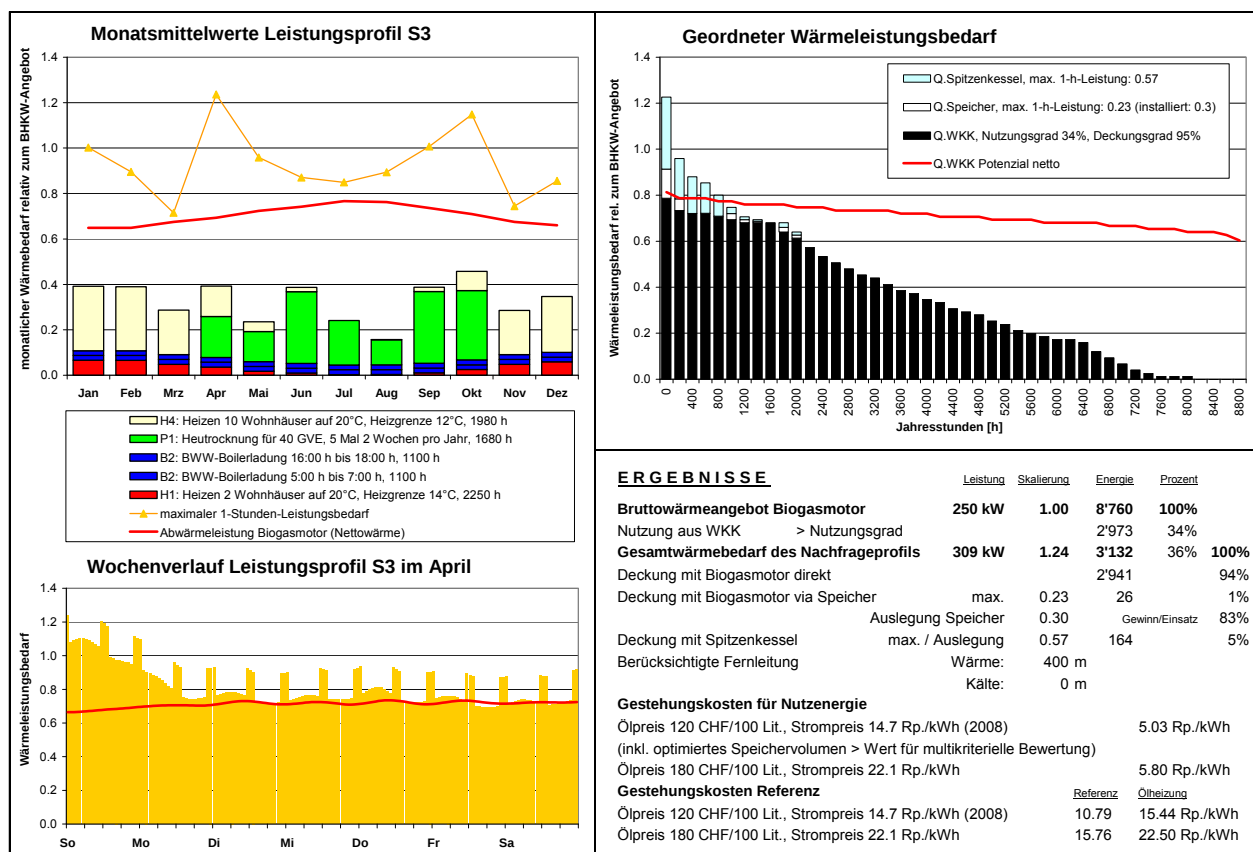
- H1: Heizen zwei Bauernhäuser (je 200 m² à 150 kWh/m²*a = 30 MWh/Haus*a) Profil A
- B1: Brauchwarmwassererwärmung, zwei Bauernhäuser inkl. Stall (10 MWh/Haus*a) Profil G
- H2: Heizen Stall (7 m² pro GVE, 150 kWh/m²*a = 1 MWh/GVE*a) Profil A
- P1: Prozess Heutrocknung Eigenbedarf (5 mal 2 Wochen pro Jahr, 1680 h) Profil G



7.2.3 Beschreibung S3: Standardbetrieb 3

Die AWN-Variante ‚Standardbetrieb 3‘ kombiniert folgende Profile: (inkl. 400 Meter Fernleitung):

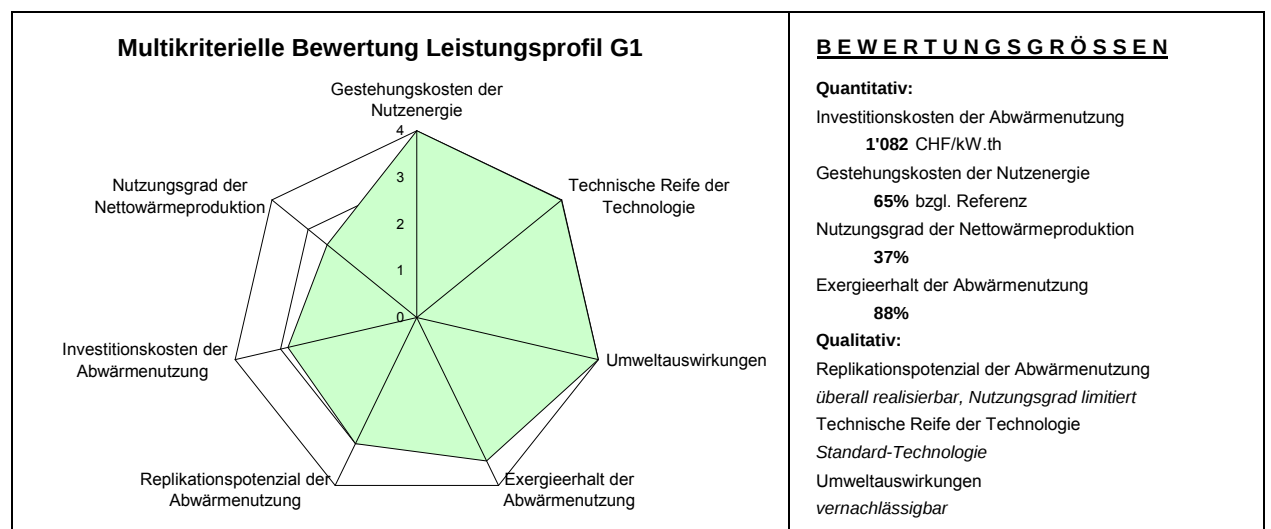
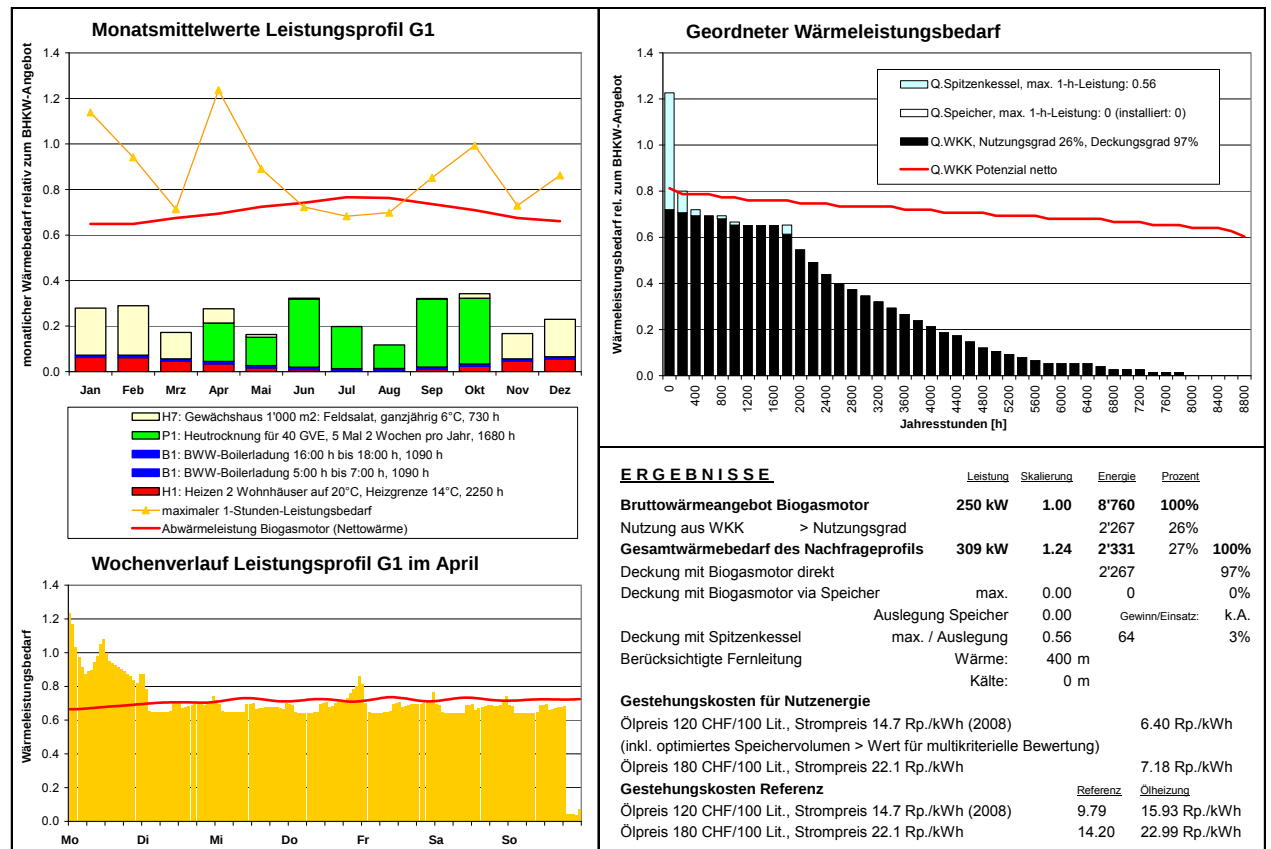
- H1: Heizen zwei Bauernhäuser (je 200 m² à 150 kWh/m²*a = 30 MWh/Haus*a) Profil A
- B1: Brauchwarmwassererwärmung, zwei Bauernhäuser inkl. Stall (10 MWh/Haus*a) Profil G
- H2: Heizen Stall (7 m² pro GVE, 150 kWh/m²*a = 1 MWh/GVE*a) Profil A
- P1: Prozess Heutrocknung Eigenbedarf (5-mal 2 Wochen pro Jahr, 1'680 h) Profil G
- H4: Heizen Weiler = 10 Wohnhäuser (200 m² à 150 kWh/m²*a = 30 MWh/Haus*a) Profil A



7.2.4 Beschreibung G1: Gemüsebetrieb 1

Die AWN-Variante ‚Gemüsebetrieb 1‘ kombiniert folgende Profile (inkl. 400 Meter Fernleitung):

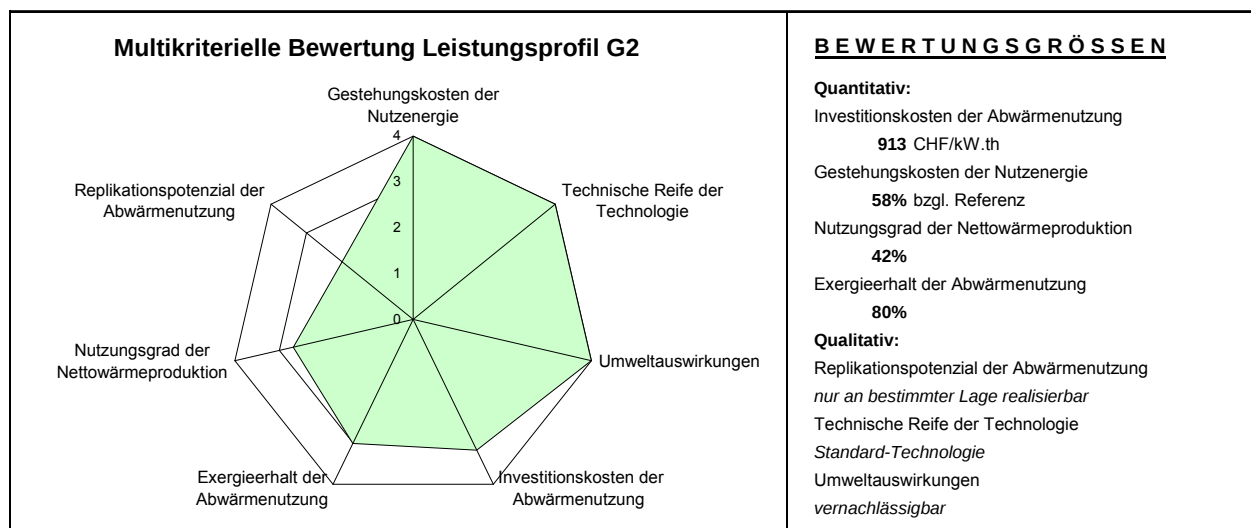
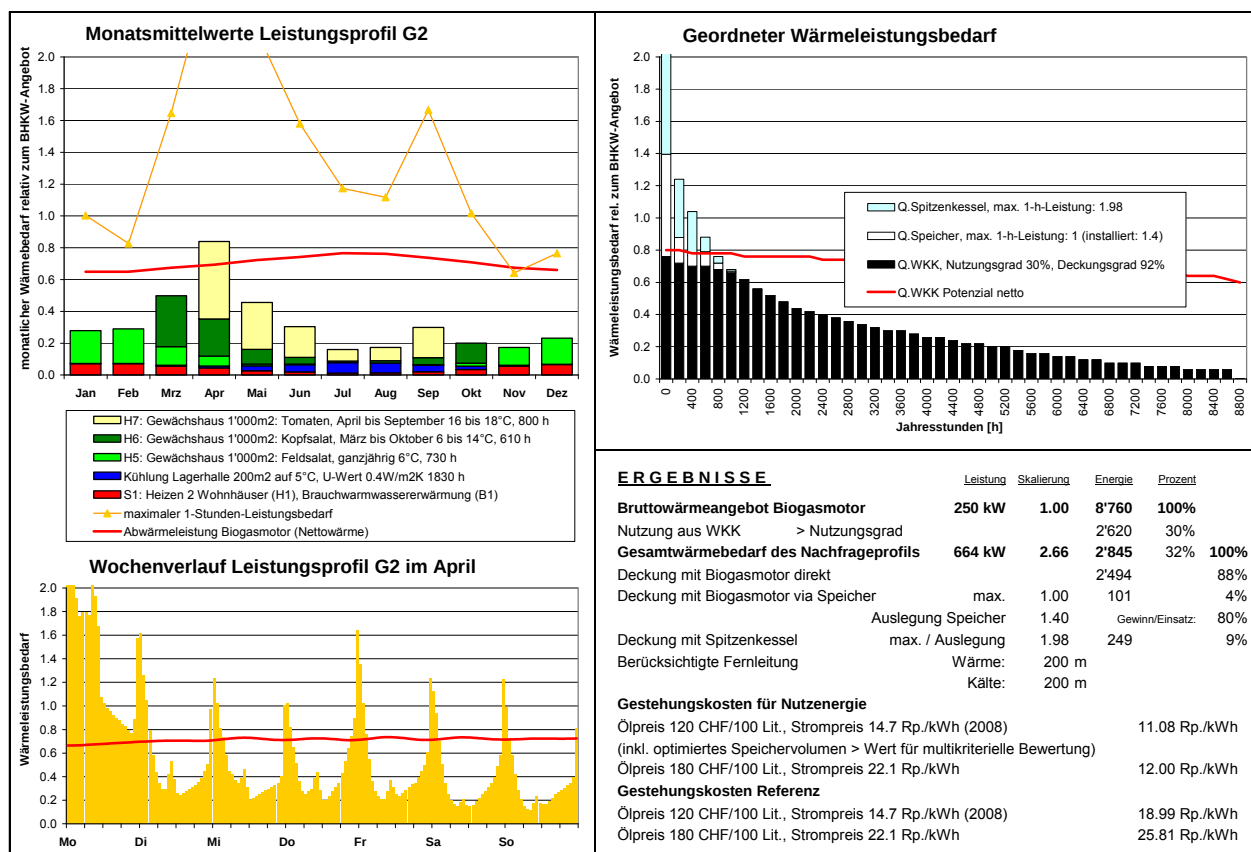
- S2: Standardbetrieb 2: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1), Heizen Stall (H2), Prozess Heutrocknung Eigenbedarf (P1)
- H7: Heizen Gewächshaus Tomaten, 1'000 m² (Apr. - Sept., 16 - 18°C, 800 h) Profil E



7.2.5 Beschreibung G2: Gemüsebetrieb 2

Die AWN-Variante ‚Gemüsebetrieb 2‘ kombiniert folgende Profile (inkl. 400 Meter Fernleitung):

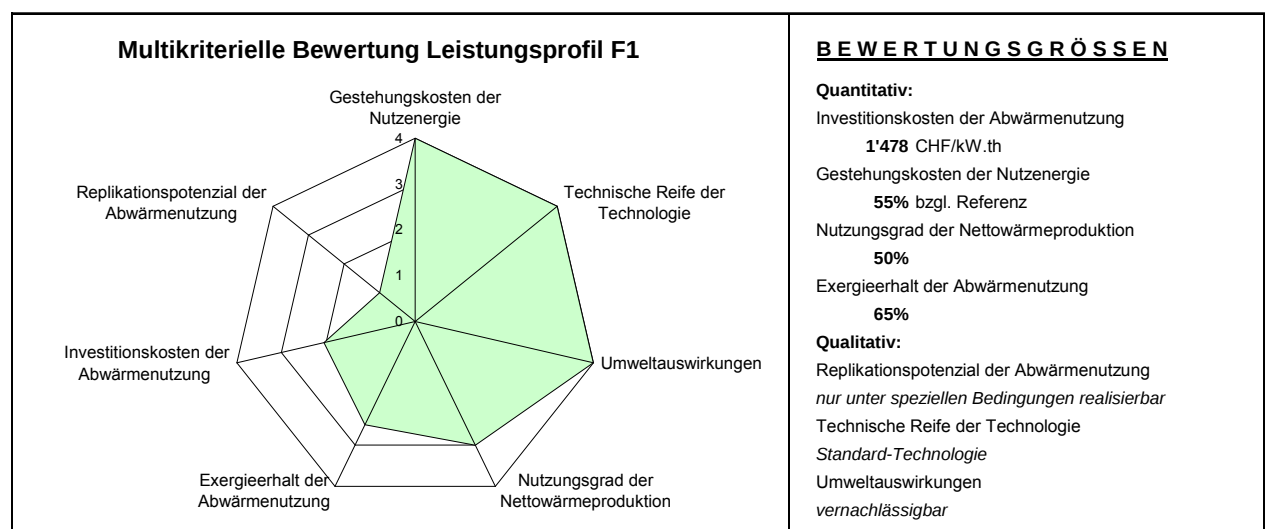
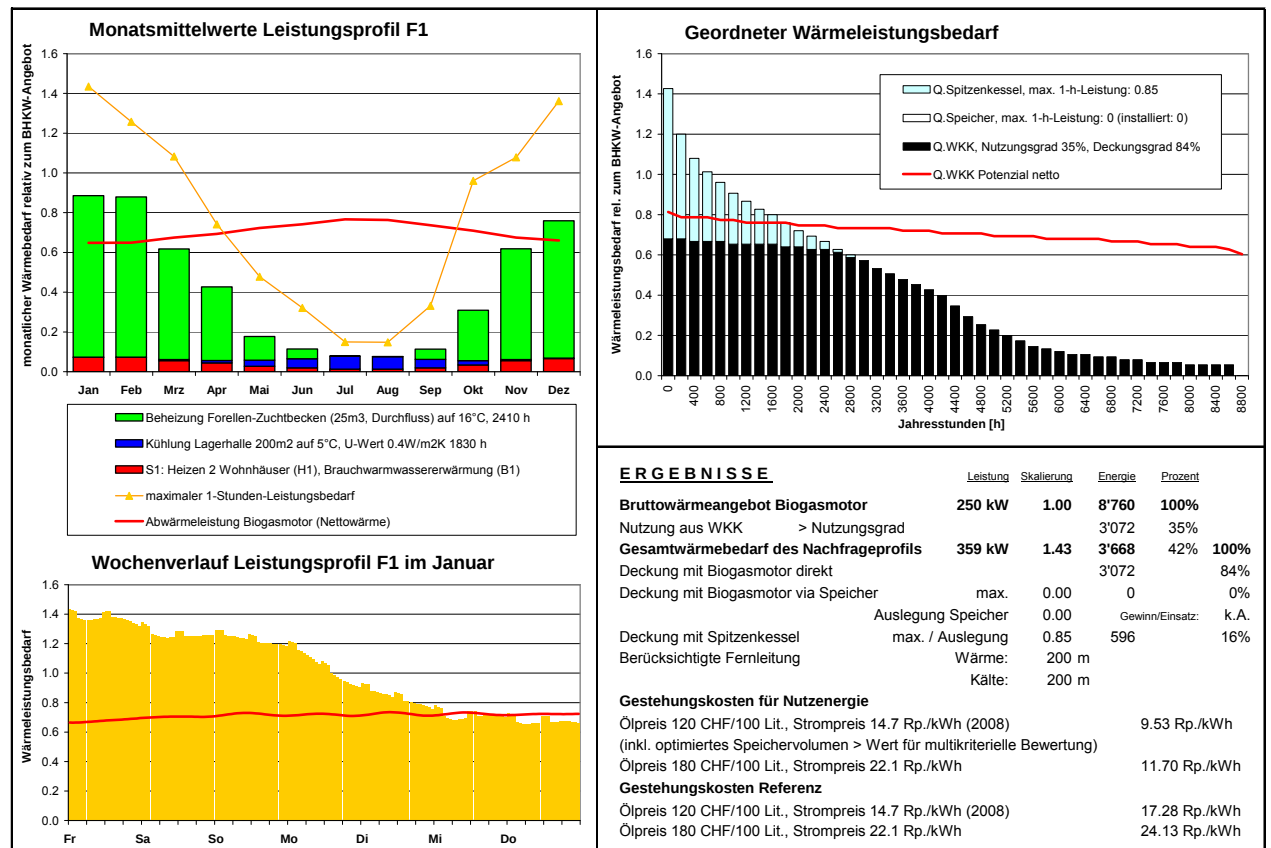
- S1: Standardbetrieb 1: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1)
- H5: Heizen Gewächshaus Feldsalat, 1'000 m² (ganzjährig, 6°C, 730 h) Profil E
- H6: Heizen Gewächshaus Kopfsalat, 1'000 m² (Mrz. - Okt., 6 - 14°C, 610 h) Profil E
- H7: Heizen Gewächshaus Tomaten, 1'000 m² (Apr. - Sept., 16 - 18°C, 800 h) Profil E
- K1: Kühlen Lebensmittellagerhalle, 200 m² (ganzjährig 5°C, 1'830 h) Profil D



7.2.6 Beschreibung F1: Fischbetrieb 1

Die AWN-Variante ‚Fischbetrieb 1‘ kombiniert folgende Profile (inkl. 400 Meter Fernleitung):

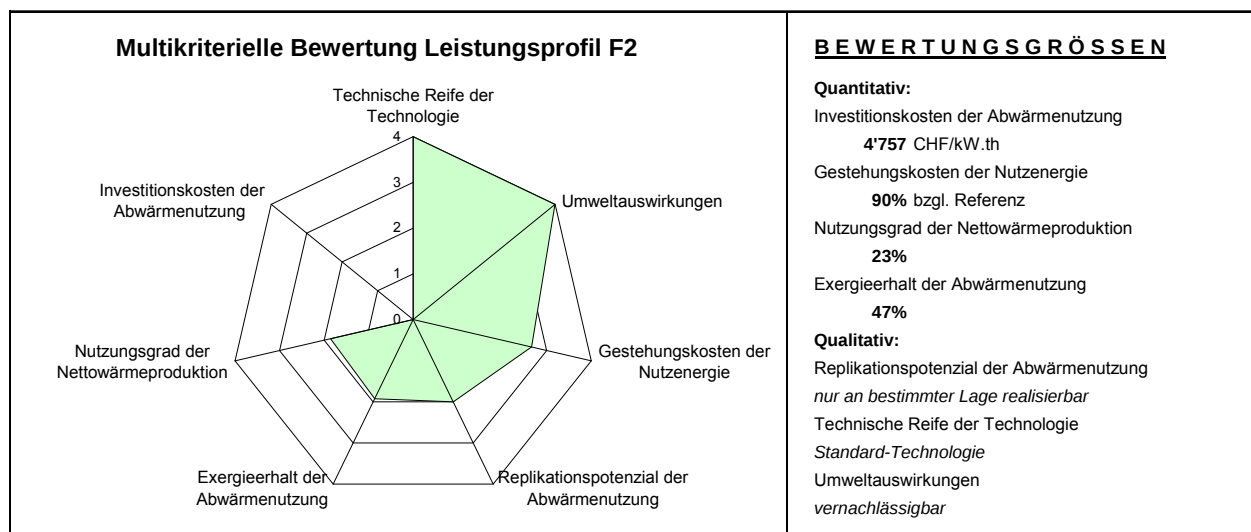
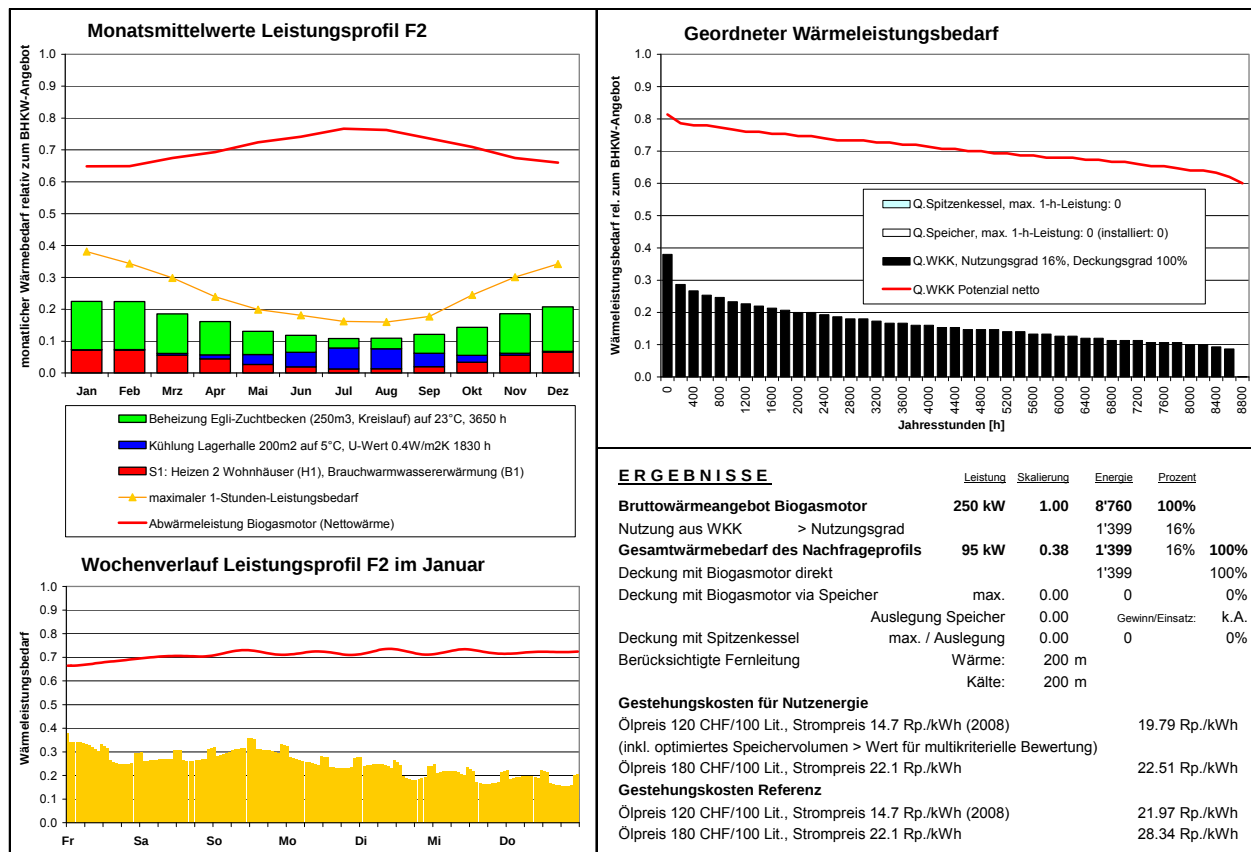
- S1: Standardbetrieb 1: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1)
- H8: Heizen Aquakultur, Forelle, 25 m³ (Durchfluss 1 h⁻¹, 16°C, 2'400 h) Profil B
- K1: Kühlen Lebensmittellagerhalle, 200 m² (ganzjährig 5°C, 1'830 h) Profil D



7.2.7 Beschreibung F2: Fischbetrieb 2

Die AWN-Variante ‚Fischbetrieb 2‘ kombiniert folgende Profile (inkl. 400 Meter Fernleitung):

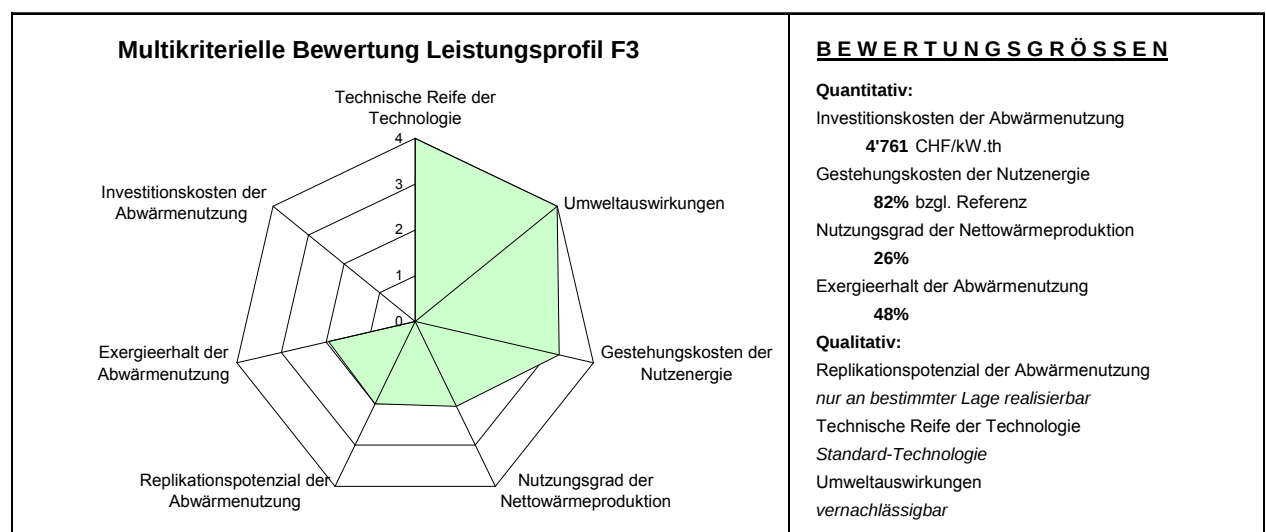
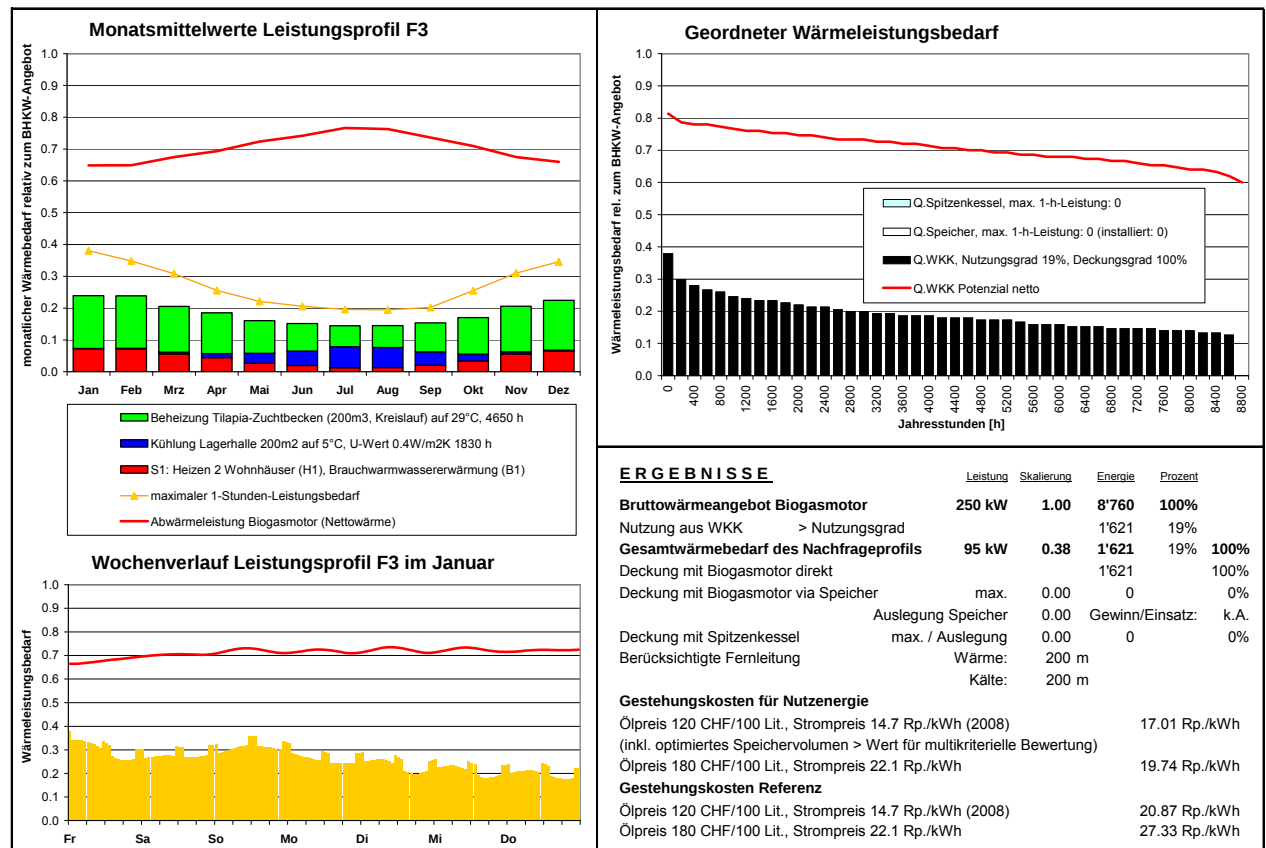
- S1: Standardbetrieb 1: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1)
- H9: Heizen Aquakultur, Egli, 250 m³ (Kreislauf 0.0042 h⁻¹, 23°C, 3'600 h) Profil B
- K1: Kühlen Lebensmittellagerhalle, 200 m² (ganzjährig 5°C, 135 kWh/m²*a, 1'830 h) Profil D



7.2.8 Beschreibung F3: Fischbetrieb 3

Die AWN-Variante ‚Fischbetrieb 3‘ kombiniert folgende Profile (inkl. 400 Meter Fernleitung):

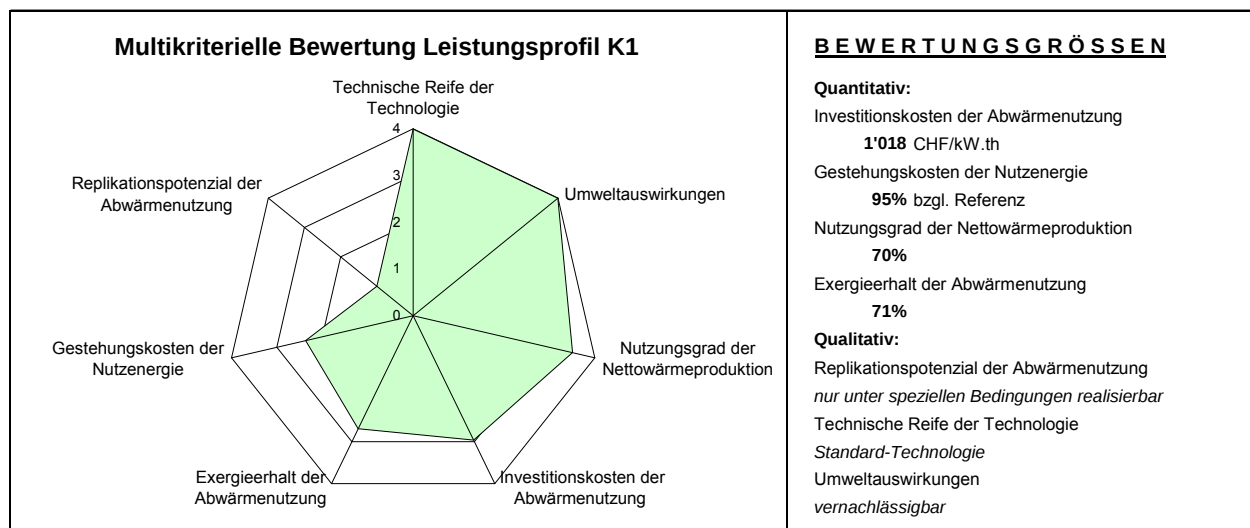
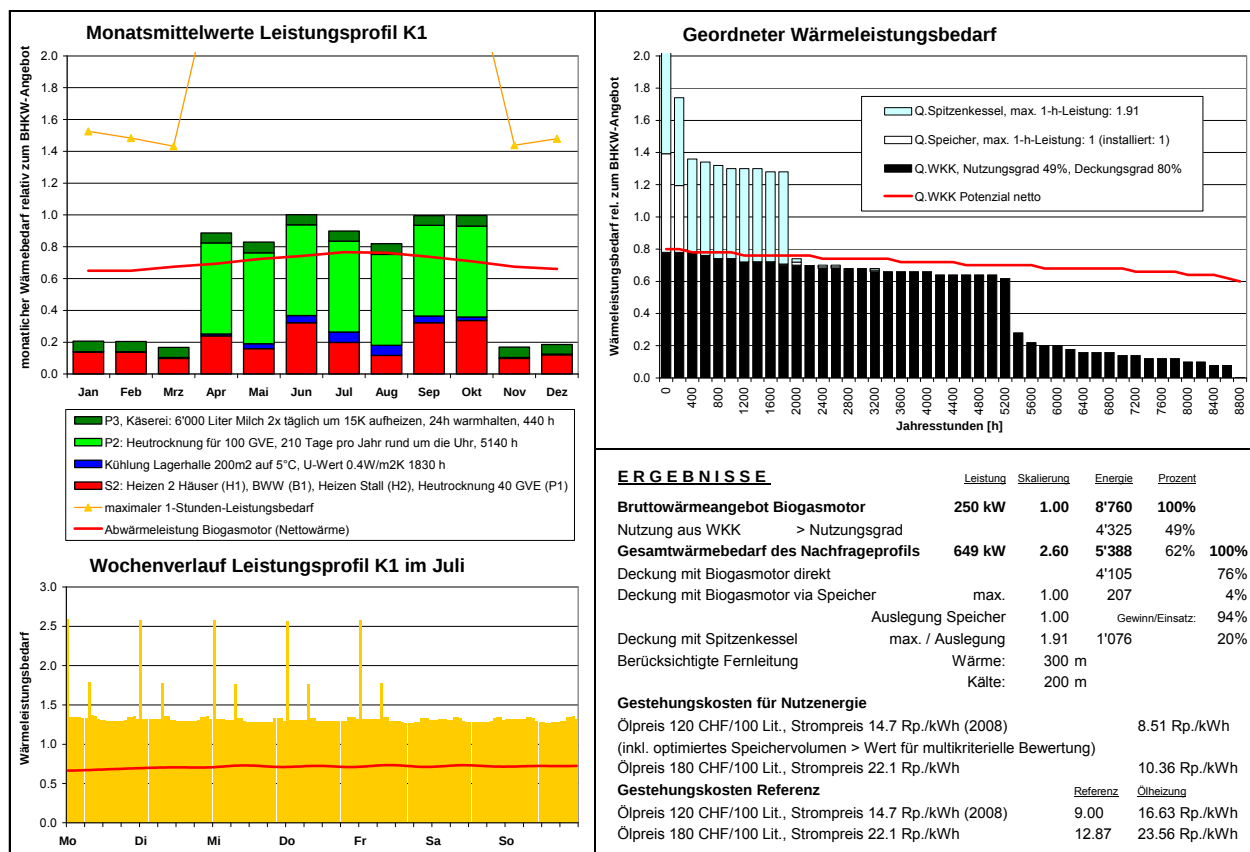
- S1: Standardbetrieb 1: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1)
- H10: Heizen Aquakultur, Tilapia, 200 m³ (Kreislauf 0.0042 h⁻¹, 29°C, 4'600 h) Profil B
- K1: Kühlen Lebensmittellagerhalle 200 m² (ganzjährig 5°C, 1'830 h) Profil D



7.2.9 Beschreibung K1: Käsereibetrieb

Die AWN-Variante ‚Käsereibetrieb‘ kombiniert folgende Profile (inkl. 500 Meter Fernleitung):

- S2: Standardbetrieb 2: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1), Heizen Stall (H2), Prozess Heutrocknung Eigenbedarf (P1)
- P2: Prozess Heutrocknung Durchlauf, für 100 GVE (210 Tage pro Jahr, 5'140 h) Profil G
- P3: Prozess Heizen Käserei, 6'000 l Milch/Tag = 300 GVE, 4 x um 15 K erwärmen Profil G
- K1: Kühlen Lebensmittellagerhalle, 200 m² (ganzjährig 5°C, 1'830 h) Profil D

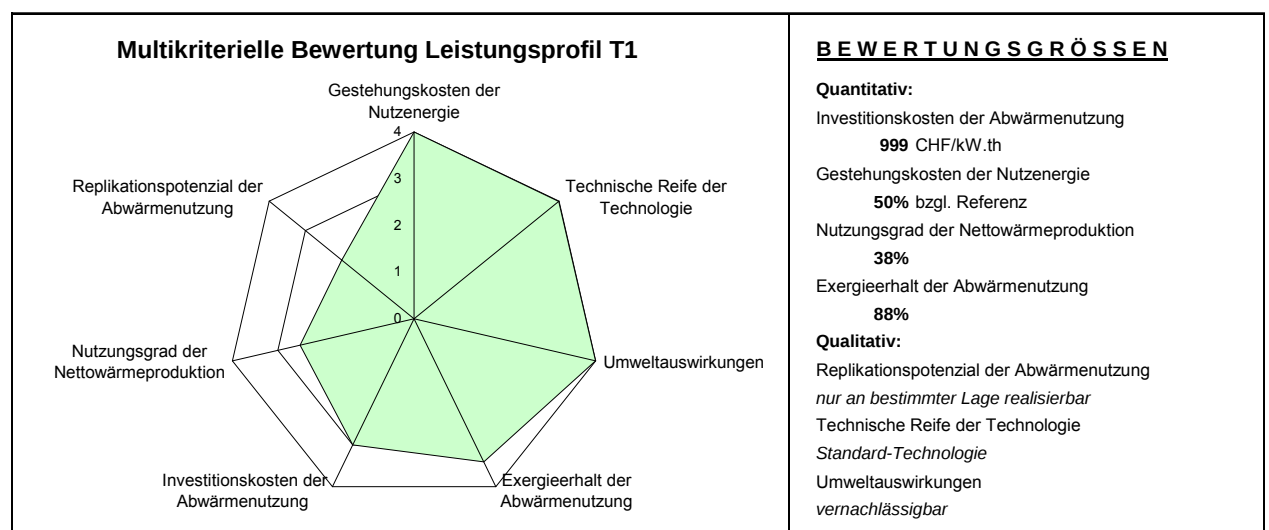
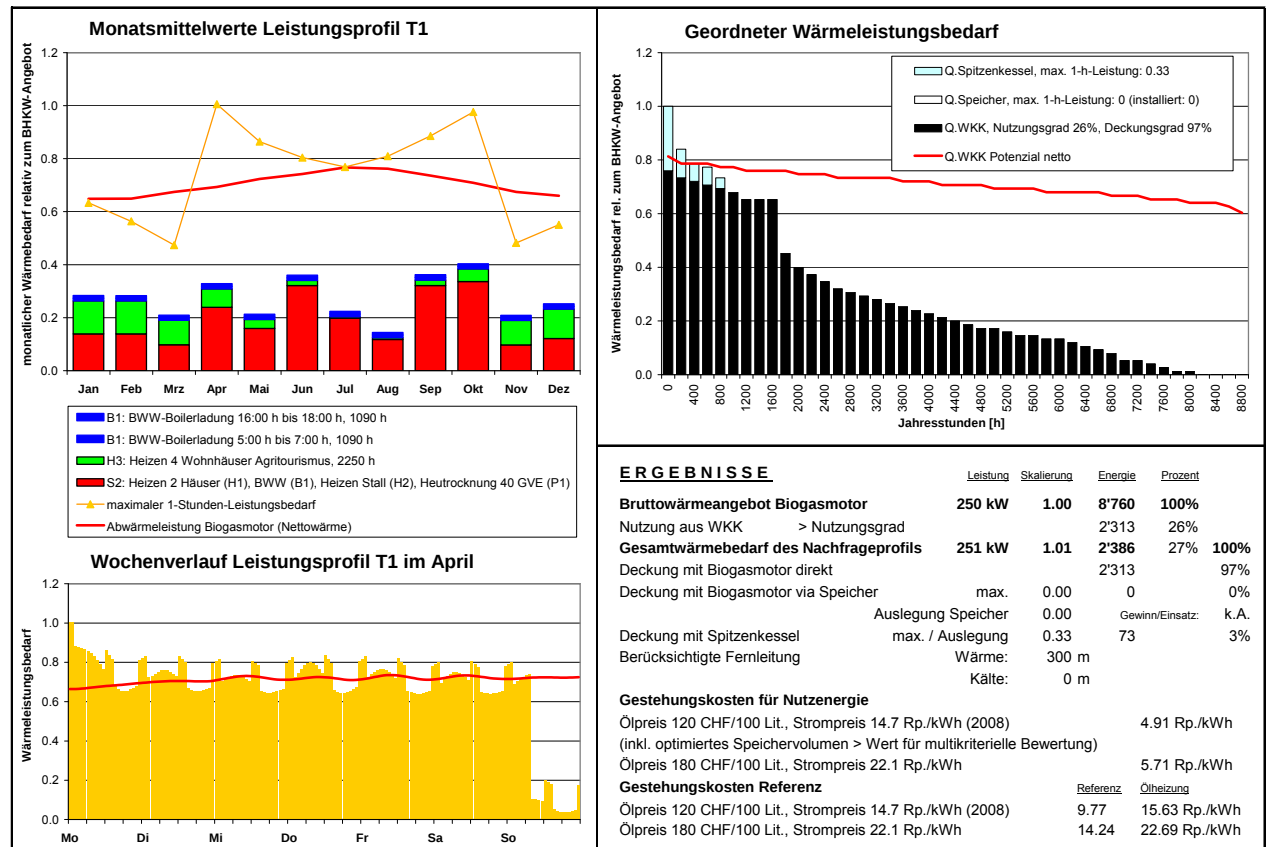


7.2.10 Beschreibung T1: Tourismusbetrieb 1

Die AWN-Variante ,Tourismusbetrieb 1' kombiniert folgende Profile (inkl. 300 Meter Fernleitung):

- S2: Standardbetrieb 2: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1), Heizen Stall (H2), Prozess Heutrocknung Eigenbedarf (P1)
- H3: Heizen Agritourismus, vier Wohnhäuser (30 MWh/Haus*a)

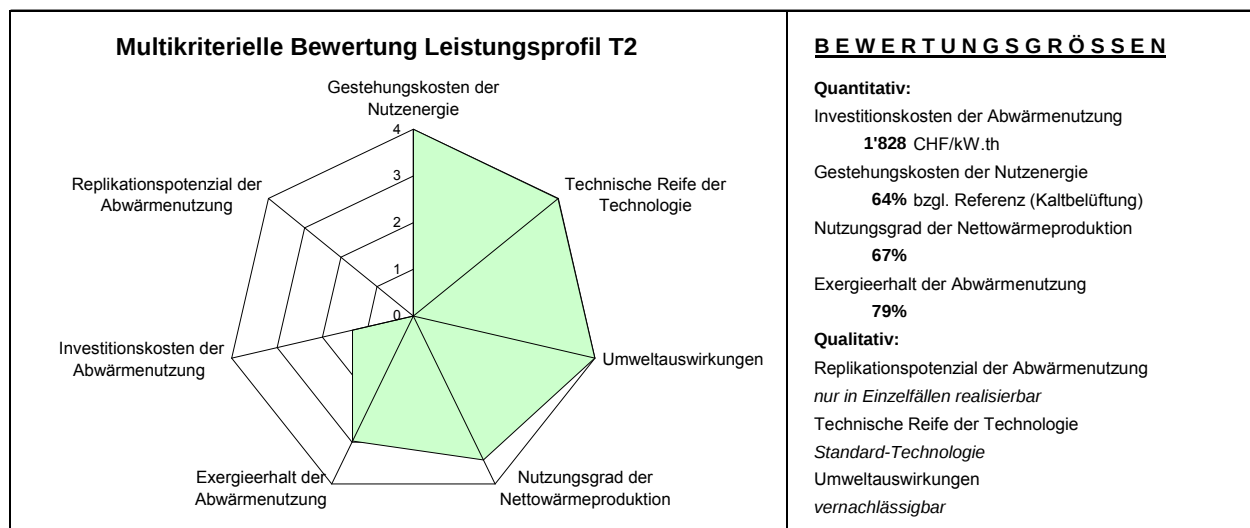
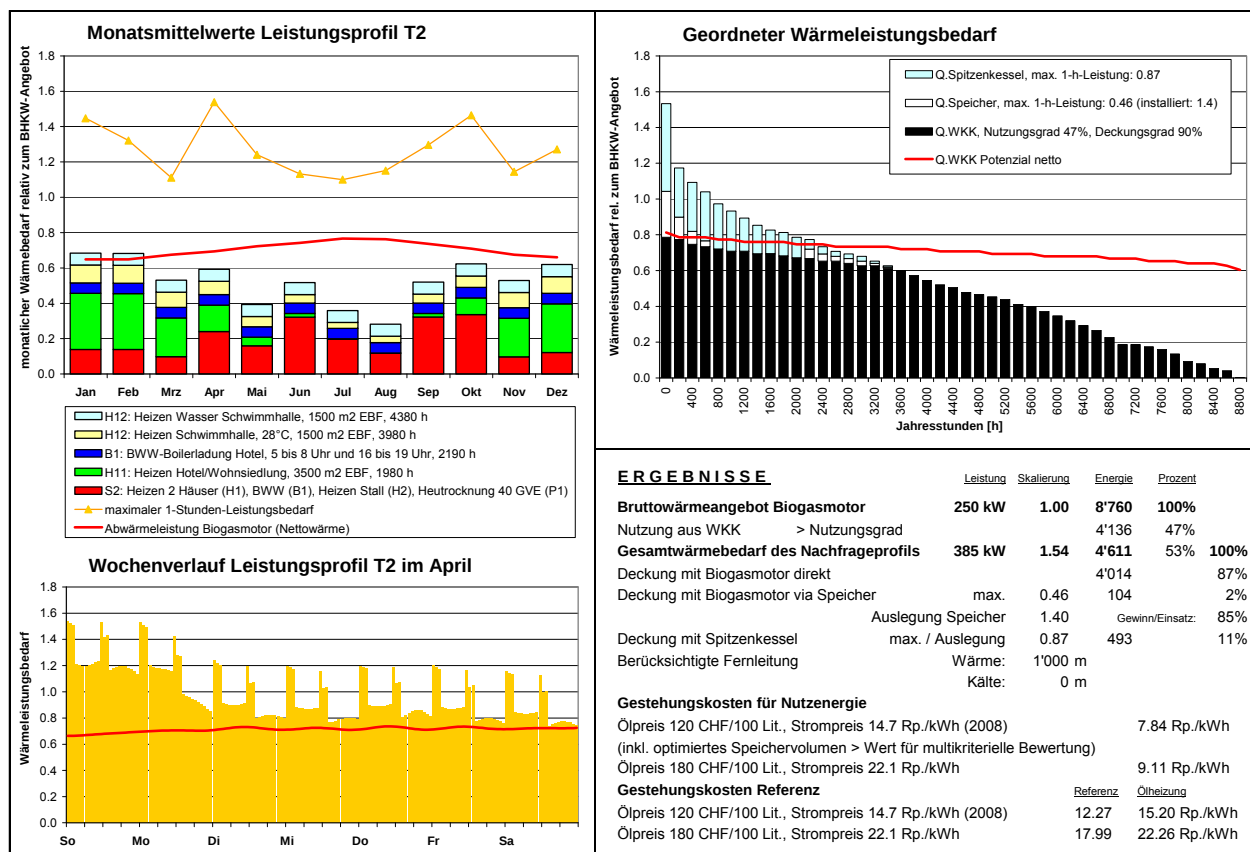
Profil A



7.2.11 Beschreibung T2: Tourismusbetrieb 2

Die AWN-Variante ,Tourismusbetrieb 2' kombiniert folgende Profile (inkl. 1'000 m Fernleitung):

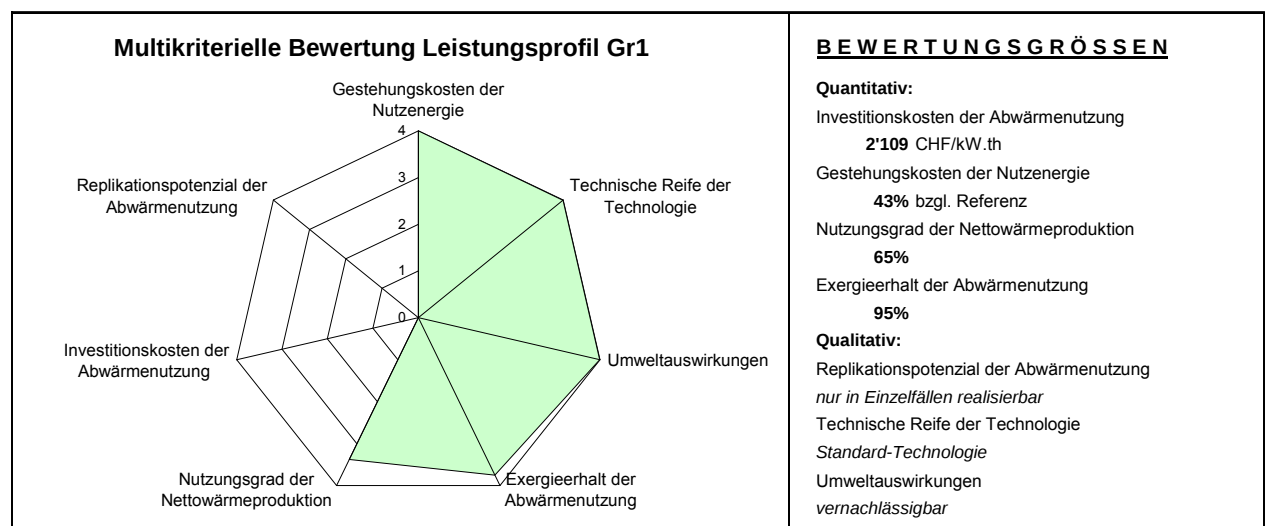
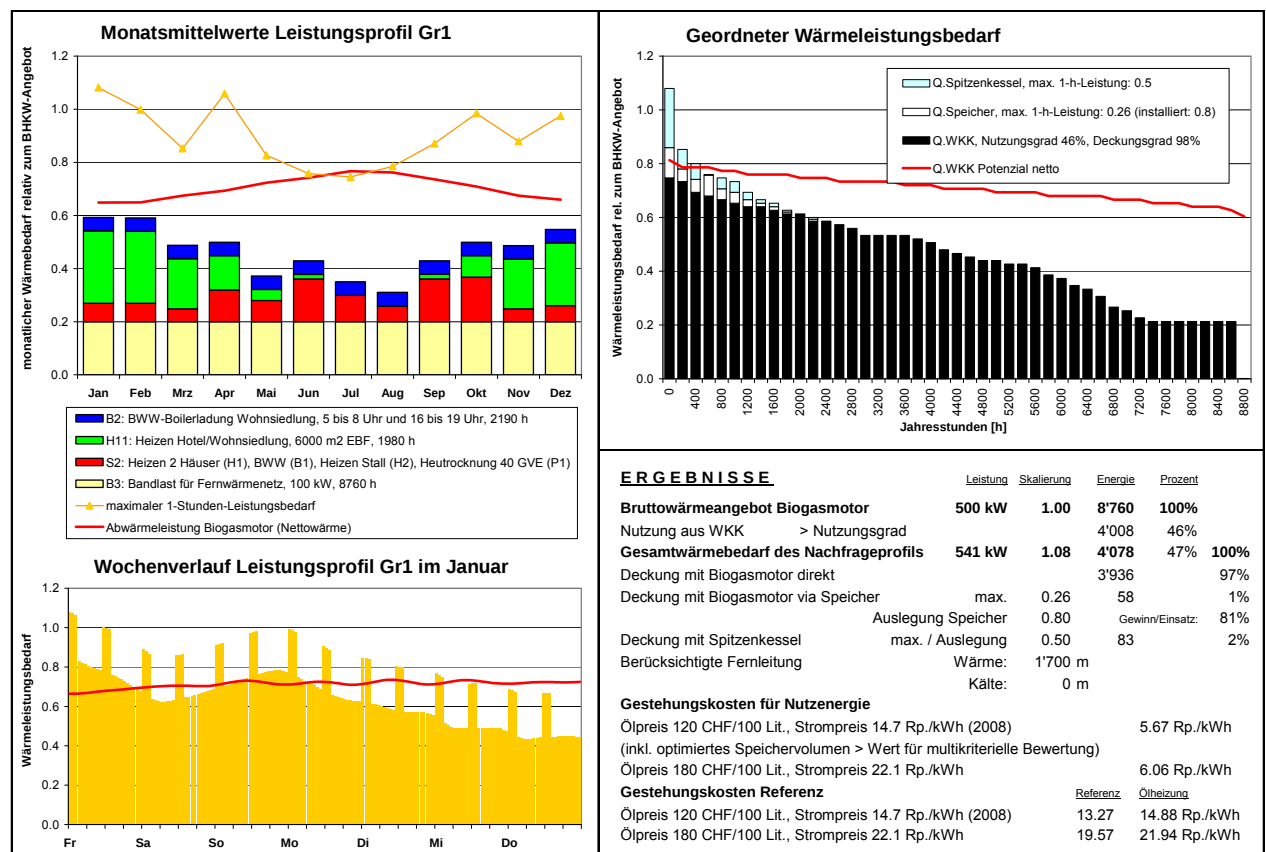
- S2: Standardbetrieb 2: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1), Heizen Stall (H2), Prozess Heutrocknung Eigenbedarf (P1)
- H11: Heizen Hotel/Wohnsiedlung, 3'500 m² (Hotel 100 kWh/m²*a, 1'980 h) Profil A
- B1: Brauchwarmwassererwärmung Hotel/Wohnsiedlung, 3'500 m² Profil G
- H12 Heizen Schwimmhalle/Becken, 1'500 m² (davon BWW 100 kWh/m²*a, 4'400 h) Profil B



7.2.12 Beschreibung Gr1: Grossbetrieb 1

Die AWN-Variante „Grossbetrieb 1“ kombiniert folgende Profile (inkl. 1'700 m Fernleitung):

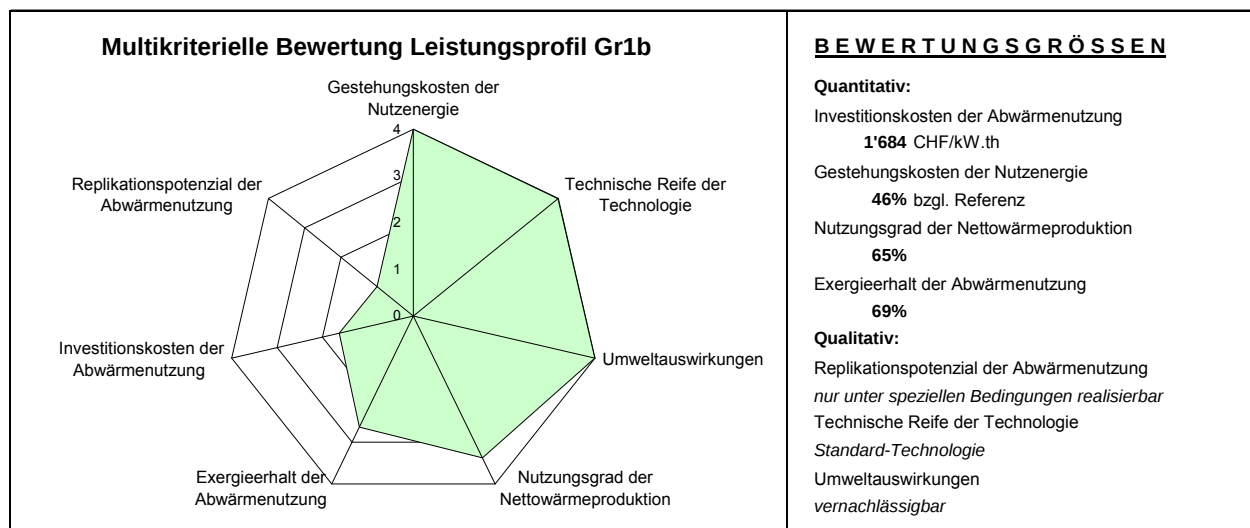
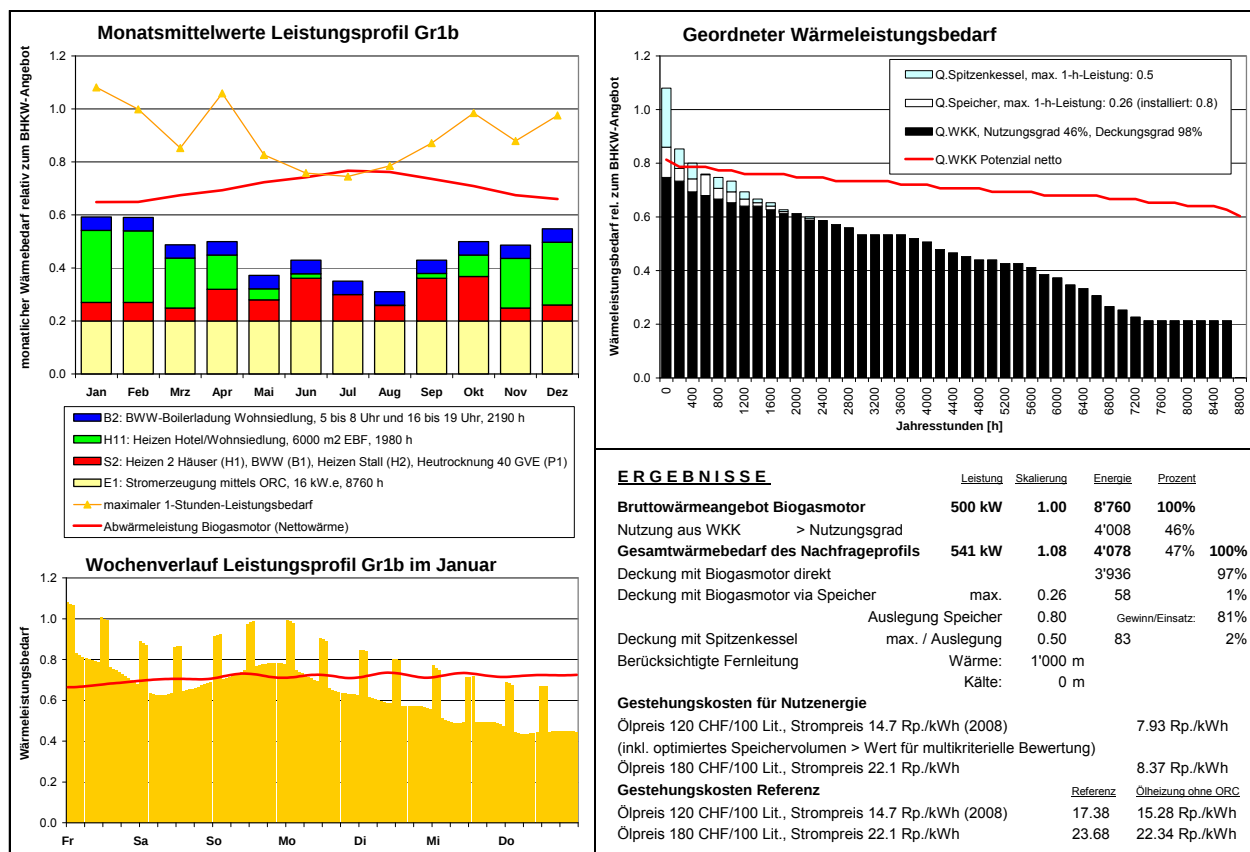
- S2: Standardbetrieb 2: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1), Heizen Stall (H2), Prozess Heutrocknung Eigenbedarf (P1)
- H11: Heizen Hotel/Wohnsiedlung, 6'000 m² (1'980 h) Profil A
- B2: Brauchwarmwassererwärmung Hotel/Wohnsiedlung, 6'000 m² (2'190 h) Profil G
- B3: Grundlast für bestehendes Fernwärmenetz, 100 kW (6'780 h) Profil F



7.2.13 Beschreibung Gr1b: Grossbetrieb 1 mit ORC-Stromerzeugung

Die AWN-Variante ‚Grossbetrieb 1b‘ kombiniert folgende Profile (inkl. 1'000 m Fernleitung):

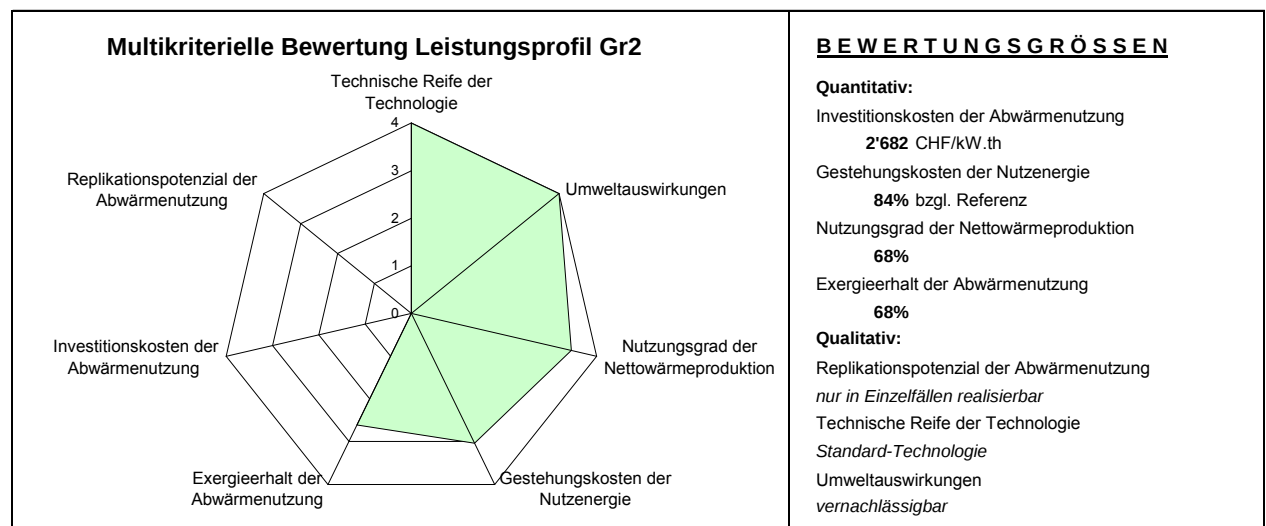
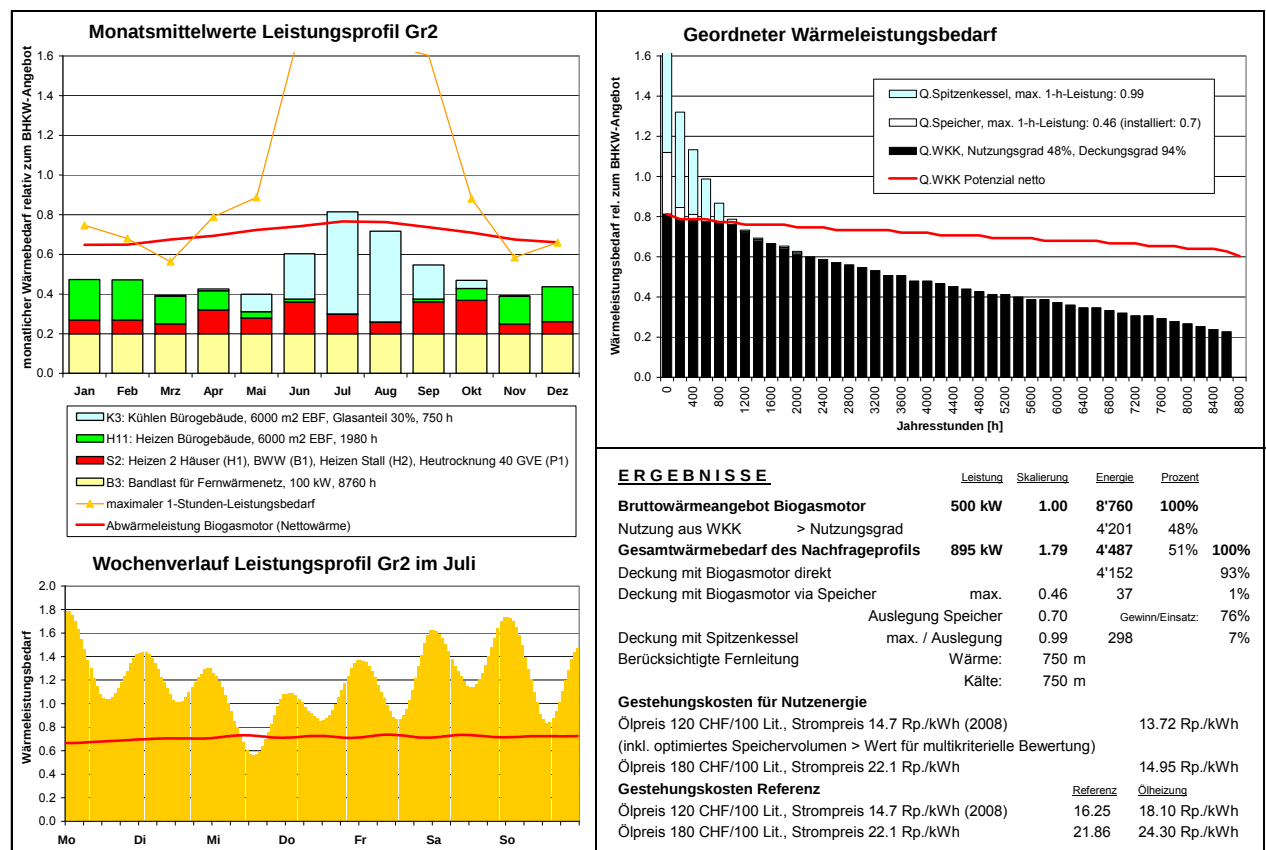
- S2: Standardbetrieb 2: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1), Heizen Stall (H2), Prozess Heutrocknung Eigenbedarf (P1) Profil A
- H11: Heizen Hotel/Wohnsiedlung, 6'000 m² (1'980 h) Profil G
- B2: Brauchwarmwassererwärmung Hotel/Wohnsiedlung, 6'000 m² (2'190 h) Profil F
- E1: Stromerzeugung mittels ORC-Prozess, 100 kW (8'760 h)



7.2.14 Beschreibung Gr2: Grossbetrieb 2

Die AWN-Variante ‚Grossbetrieb 2‘ kombiniert folgende Profile (inkl. 1'700 m Fernleitung):

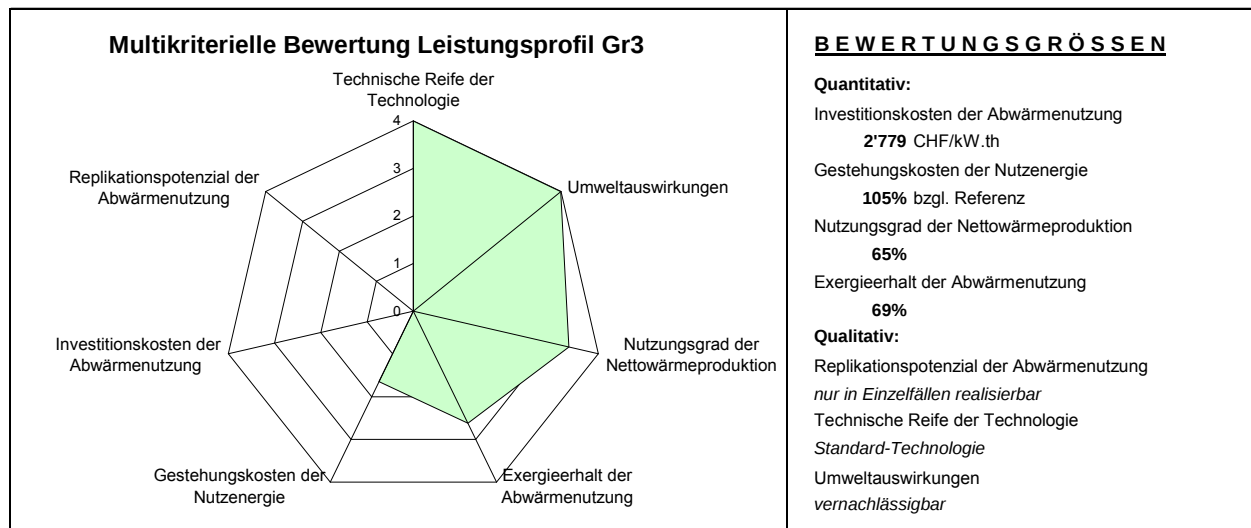
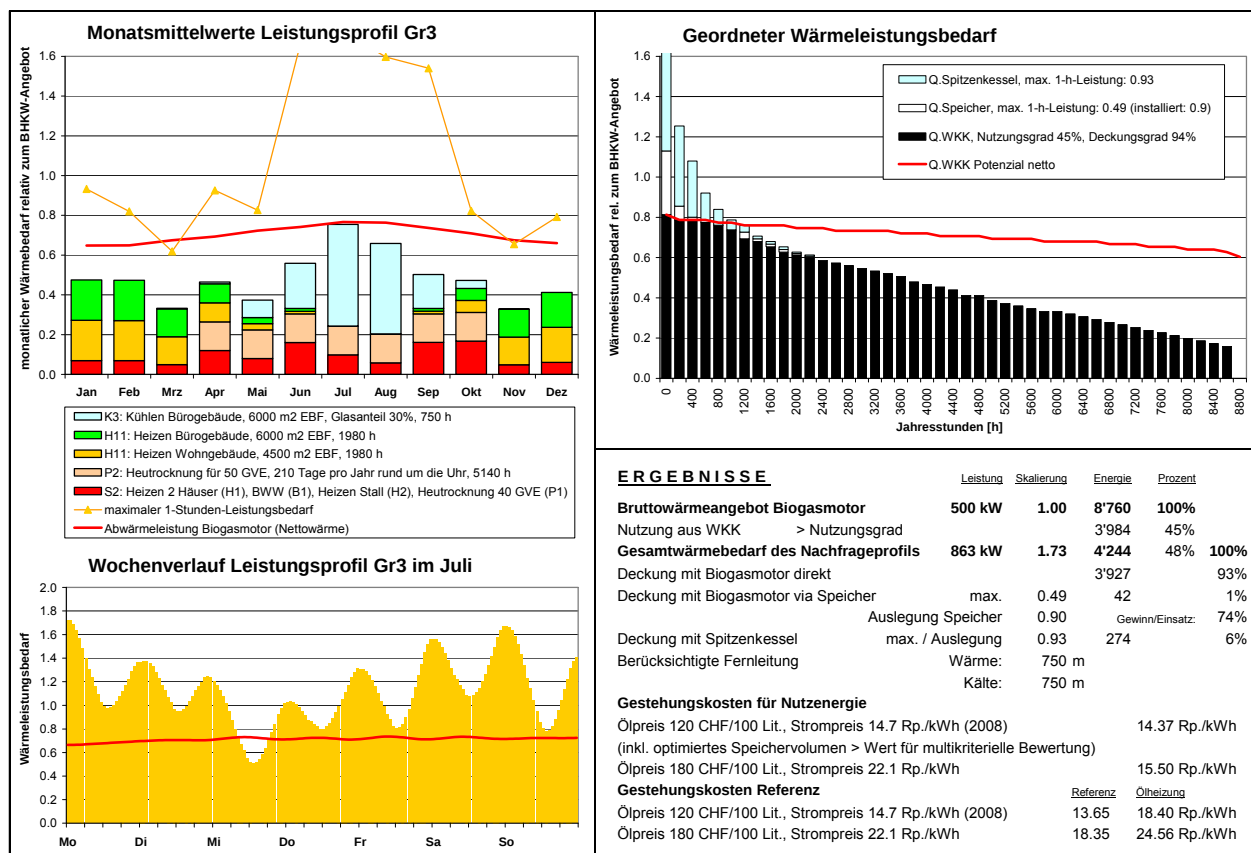
- S2: Standardbetrieb 2: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1), Heizen Stall (H2), Prozess Heutrocknung Eigenbedarf (P1) Profil A
- H11: Heizen Bürogebäude, 6'000 m² (1'980 h) Profil C
- K3: Kühlen Bürogebäude, 6'000 m² (ganzjährig 20°C, 750 h) Profil F
- B3: Grundlast für bestehendes Fernwärmenetz, 100 kW (6'780 h)



7.2.15 Beschreibung Gr3: Grossbetrieb 3

Die AWN-Variante ‚Grossbetrieb 3‘ kombiniert folgende Profile (inkl. 1'500 m Fernleitung):

- S2: Standardbetrieb 2: Heizen 2 Wohnhäuser (H1), Brauchwarmwassererwärmung (B1), Heizen Stall (H2), Prozess Heutrocknung Eigenbedarf (P1) Profil A
- H11: Heizen Wohnsiedlung, 4'500 m² (1'980 h) Profil A
- H11: Heizen Bürogebäude, 6'000 m² (1'980 h) Profil C
- K3: Kühlen Bürogebäude, 6'000 m² (ganzjährig 20°C, 750 h) Profil G
- P2: Prozess Heutrocknung Durchlauf für 50 GVE (210 Tage pro Jahr, 5'140 h)



7.3 Ergebnisse der Bewertung und Fazit

In den vorangehenden Kapiteln 7.1 und 7.2 wurden sieben grundlegende Leistungsbedarfsprofile definiert und beschrieben. Darauf basierend wurden 15 Abwärmenutzungsvarianten ausgewählt und mittels vier quantitativen und drei qualitativen Kriterien bewertet. Im Folgenden werden die quantitativen Kriterien (welche sich als die sensitivsten herausgestellt haben) in drei verschiedenen xy-Graphiken für alle Profile und ausgewählten Nutzungsvarianten gegenübergestellt. Darin lassen sich die besten Nutzungen jeweils im hellgrünen Quadranten A auf einen Blick erkennen (ABC-Analyse).

7.3.1 Grundlegende Leistungsbedarfsprofile

Zu den sieben grundlegenden Profilen gibt es vier Spezialfälle, welche hier ebenso berücksichtigt werden und wie alle übrigen Profile in Kapitel 7.1 beschrieben wurden (Übersicht auf Seite 47, Details auf den Seiten 50 bis 69):

- 1 Spezialfall zu Profil B: Fermenterbeheizung auf 50°C, Kürzel: B: Eigen (Eigenbedarf)
- 1 Spezialfall zu Profil F: Stromerzeugung mittels ORC (F: Bandlast-ORC)
- 2 Spezialfälle zu Profil G: Heutrocknung Eigenbedarf und Durchlauf (G: Heu 1 und G: Heu 2)

Zur Erinnerung: Alle folgenden Aussagen gelten für die mittlere der drei betrachteten BHKW-Leistungsgrößen (200 kW elektrische Leistung), für optimierte Skalierung der Profile und ohne allfällig nötige Fernwärme- oder -kälteleitungen.

ABC-Analyse Gestehungskosten versus Nutzungsgrad

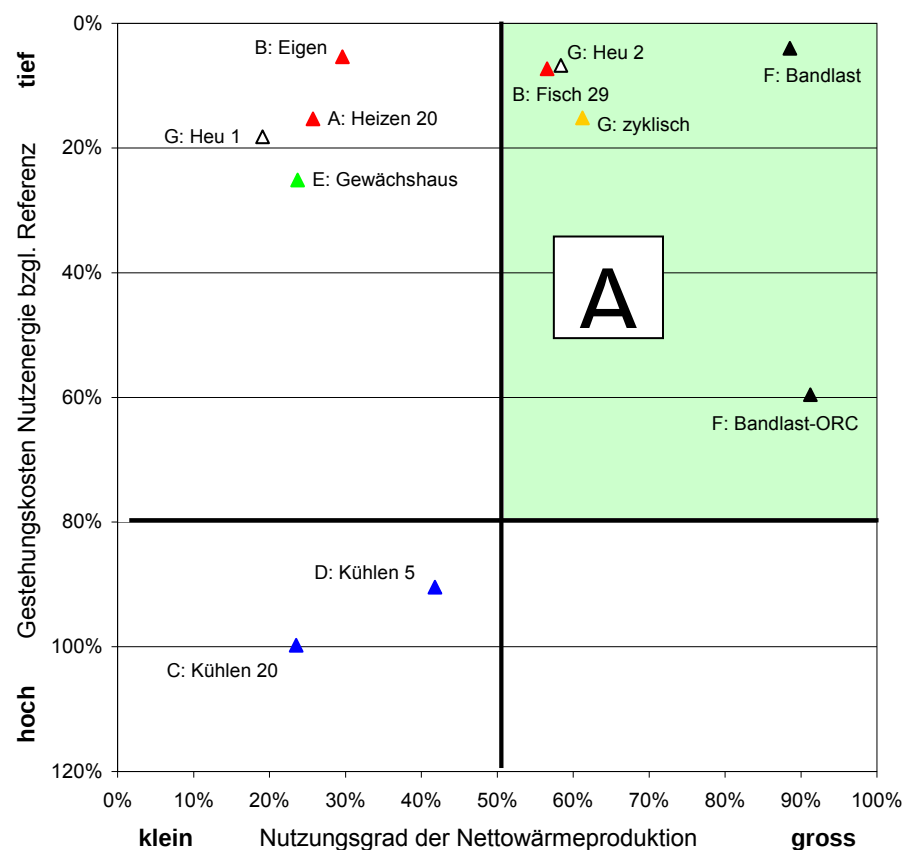


Abbildung 12:

Gestehungskosten versus Nutzungsgrad der Nettowärmeproduktion der grundlegenden Leistungsbedarfsprofile. Im hellgrün hinterlegten Quadranten A befinden sich die besten Abwärmenutzungsvarianten, welche sowohl tiefe Gestehungskosten als auch einen grossen Nutzungsgrad aufweisen.

Spezialfall B: Eigen: Der Nutzungsgrad bezieht sich in diesem Fall auf die Brutwärmeproduktion. Er beträgt damit genau den angenommenen Eigenbedarf der Biogasanlage von 30 %.

Spezialfall F: Bandlast-ORC: Die Gestehungskosten-Referenz ist der Einspeisetarif nach KEV ohne Landwirtschaftsbonus

ABC-Analyse Investitionskosten versus Nutzungsgrad

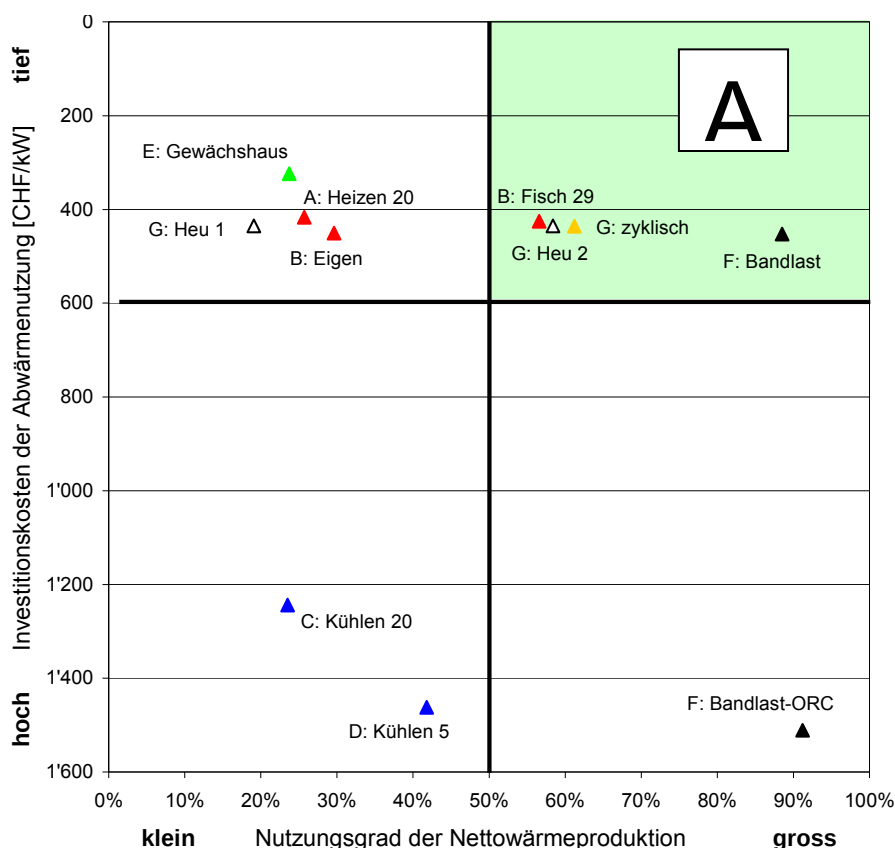


Abbildung 13:

Investitionskosten versus Nutzungsgrad der Nettowärmeleistung. Im hellgrün hinterlegten Quadranten A befinden sich die besten Abwärmenutzungsvarianten, welche sowohl tiefe Investitionskosten als auch einen grossen Nutzungsgrad aufweisen.

Die Investitionskosten sind pro kW Abwärmeleistung gerechnet, welche nutzbar gemacht werden.

ABC-Analyse Exergieerhalt versus Nutzungsgrad

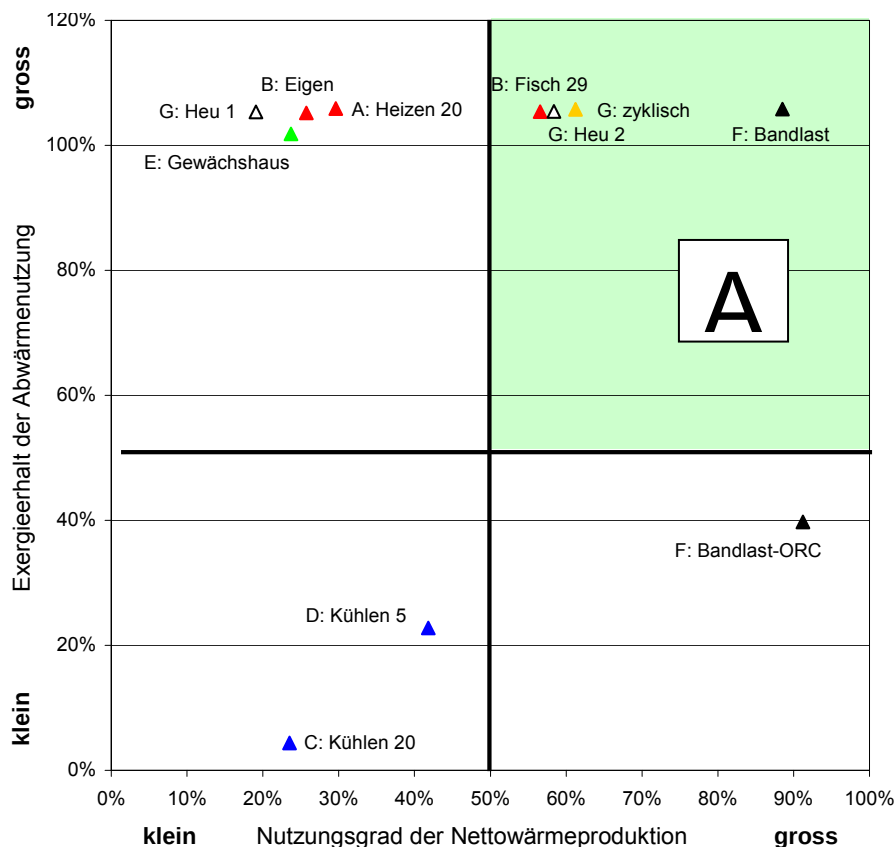


Abbildung 14:

Exergieerhalt versus Nutzungsgrad der Nettowärmeleistung. Im hellgrün hinterlegten Quadranten A befinden sich die besten Abwärmenutzungsvarianten, welche sowohl einen grossen Exergieerhalt als auch einen grossen Nutzungsgrad aufweisen. Der Exergieerhalt liegt für alle AWN-Varianten wo Heizwärme bereitgestellt wird bei knapp 118 %, d.h. im Vergleich zur Referenz (Erdölkessel mit Wirkungsgrad 0.85) kann entsprechend $1/0.85 = 118\%$ Endenergie Erdöl für 100 % Nutzwärme eingespart werden.

7.3.1.1 Best bewertete Profile

- Profil B: Beheizung Fischzuchtbecken 29°C
- Profil G: Zyklisch tagesstundenweise, z.B. Warmwasserbereitung
- Profil G: Heutrocknung Durchlauf („rund-um-die-Uhr“)
- Profil F: Bandlast Heizen und - nur bzgl. Gestehungskosten - Bandlast mit ORC

7.3.1.2 Fazit zu den Bewertungskriterien

Gestehungskosten der Nutzenergie

- Heizen ist am wirtschaftlichsten: Für alle Heizprofile liegen die Gestehungskosten für Heizwärme ab BHKW bei sehr tiefen 4 % bis 25 % gegenüber der Referenz (Ölkessel).
- Stromerzeugung mittels ORC-Prozess ist mit Gestehungskosten von 13.6 Rp./kWh wirtschaftlich interessant (40 % unter dem Einspeisetarif nach KEV ohne Landwirtschaftsbonus).
- Kühlen mittels Absorptionskältemaschine ist unter optimalen Voraussetzungen knapp wirtschaftlich. Je tiefer die Temperatur der Nutzkälte, desto grösser wird der Nutzungsgrad (siehe unten), desto besser ist die Wirtschaftlichkeit (bei 5°C bis 20 % günstiger als die Referenzkälte aus Kompressionskältemaschinen)

Investitionskosten der Abwärmenutzung

- AWN-Installationen für reine Heizzwecke verursachen die geringsten Investitionen von CHF 320 bis 450 pro kW installierter Wärmeleistung. Es sind dies: Wärmetauscher, Fernwärmeverteiler sowie Redundanz und Spitzenerzeuger (Ölkessel).
- AWN-Installationen für ORC-Anlagen sind am kostenintensivsten: ca. CHF 1'500 pro kW Abwärmeleistung, die nutzbar gemacht wird. Pro installiertem kW elektrischer Leistung belaufen sich die Kosten auf CHF 9'000.
- AWN-Installationen für Absorptionskältemaschinen: Nutzkälte 20°C: CHF 1'250 pro kW Abwärme (CHF 2'000 pro kW Nutzkälte). Nutzkälte 5°C: CHF 1'500 pro kW Abwärme (CHF 3'000 pro kW Nutzkälte).

Nutzungsgrad der Nettowärmeproduktion

- Bandlast-Profile erzielen naturgemäss die höchsten Nutzungsgrade (bis 90 %). Ein Nutzungsgrad von 100 % kann nur von einem Profil mit einem dem Eigenbedarf zu 1 komplementärem Verlauf erreicht werden.
- Zyklische Profile, welche Tagesspeicher effizient nutzen können, erzielen Nutzungsgrade zwischen 50 und 70 %.
- Aussentemperaturabhängige Profile erreichen eher tiefere Nutzungsgrade. Diese sind jedoch sehr stark abhängig von der gewünschten SOLL-Temperatur. Je grösser die Differenz zwischen der SOLL- und der mittleren Aussentemperatur, desto höher ist der Nutzungsgrad:
 - Profil C, Kühlen 20°C: 24 %
 - Profil A, Heizen 20°C: 26 %
 - Profil D, Kühlen 5°C: 42 %
 - Profil A, Heizen 29°C: 57 %

Exergieerhalt der Abwärmenutzung (Definition siehe Kapitel 3.2.3 auf Seite 17)

- Heizwärmebereitstellung erhält die Exergie der Abwärme vollständig. Werte über 100 % erklären sich daraus, dass die angenommenen Verluste der Abwärmenutzung 90 % betragen (Wärmetauscher-Wirkungsgrad), jene der Referenz jedoch nur bei 85 % (Kesselwirkungsgrad).
- Stromerzeugung mittels ORC-Prozess nutzt die Exergie der Abwärme ziemlich schlecht (40 %). Der geringe Wirkungsgrad von 16 % vernichtet das hohe Exergiepotenzial des erzeugten Stroms (Gewichtung 2.5). Folgerung: Hinsichtlich dieses Kriteriums sollte die auf ca. 35°C anfallende Abwärme des ORC-Prozesses unbedingt weiter genutzt werden (z.B. Direktbeheizung Gewächshaus).
- Kühlen mittels Absorptionskältemaschine vernichtet am meisten Exergie:
 - Profil C, Kühlen 20°C: Exergieerhalt 4 %
 - Profil D, Kühlen 5°C: 24%Kühlen auf 5°C ist entsprechend dem deutlich höheren Nutzungsgrad besser

Replikationspotenzial der Abwärmenutzung

- Heizen:
 - Wohngebäude: überall realisierbar, Nutzungsgrad limitiert (3)
 - Heutrocknung: überall realisierbar, Nutzungsgrad limitiert (3)
 - Gewächshaus: nur an bestimmter Lage realisierbar (2)
 - Fischzucht: nur unter speziellen Bedingungen realisierbar (1)
 - Bandlast z.B. Einspeisung in Fernwärme: nur in Einzelfällen realisierbar (0)
- Stromerzeugung mittels ORC-Prozess: überall mit beliebigem Nutzungsgrad realisierbar (4)
- Kühlen:
 - Gemüselager 5°C: überall realisierbar, Nutzungsgrad limitiert (3)
 - Gebäude 20°C: nur an bestimmter Lage realisierbar (2)

Technische Reife und Umweltauswirkungen der Technologie

Details zur eingesetzten unkonventionellen Konversionstechnologie finden sich in Kapitel 6

- ORC-Prozess siehe Abschnitt 6.7 auf Seite 43.
- Absorptionskältemaschine siehe Abschnitt 6.4 auf Seite 35.

7.3.2 Ausgewählte Abwärmenutzungsvarianten

Die 15 exemplarischen Nutzungsvarianten wurden in Kapitel 7.2 beschrieben (Übersicht auf Seite 71, Details auf den Seiten 72 bis 86). Die vier Nutzungen ‚Grossbetriebe 1 bis 3‘ wurden auf Basis der grössten Anlagenkategorie (400 kW.e) ausgewertet, alle übrigen Nutzungen auf Basis 200 kW.e. Dies bedeutet, dass die absolut genutzte Abwärmemenge von Gr1 bis Gr3 bei gleichem Nutzungsgrad doppelt so gross ist als jene aller übrigen.

Bemerkungen

Es handelt sich hier um exemplarische Abwärmenutzungsvarianten, welche die am häufigsten auftretenden oder einige wichtige Nutzungen abdecken. Mit dem entwickelten Werkzeug zur Profilüberlagerung ist es jedoch möglich, beliebige weitere Nutzungen und Nutzungskombinationen rasch zu beurteilen.

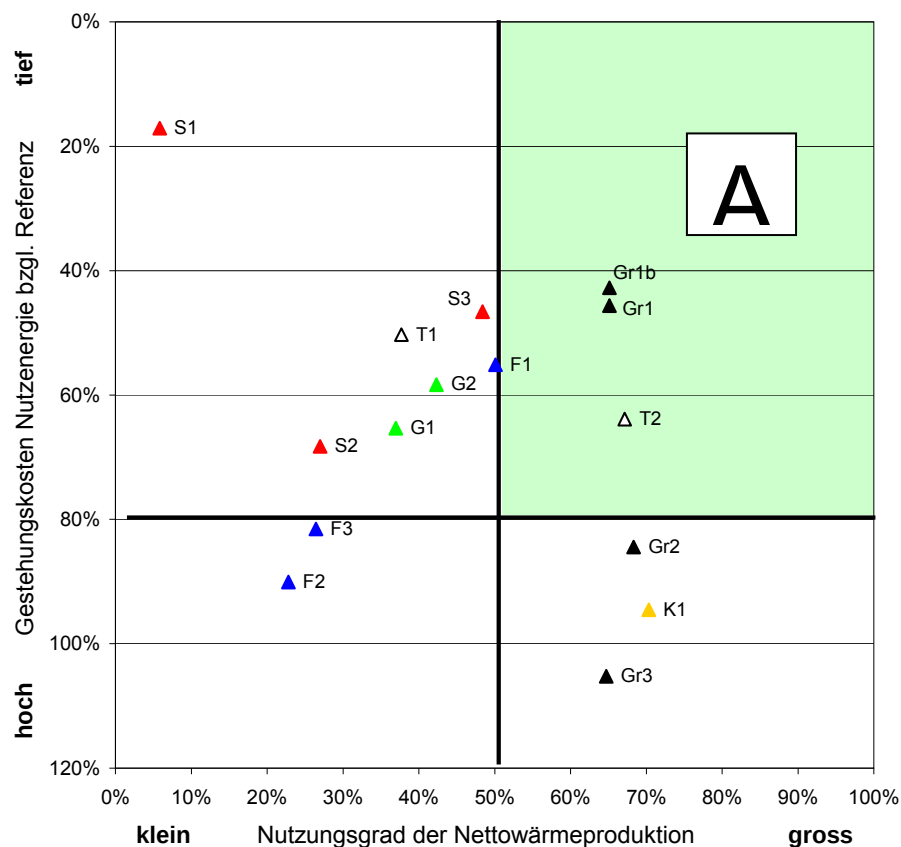


Abbildung 15:

Gestehungskosten versus Nutzungsgrad der Nettowärmeproduktion ausgewählter Abwärmenutzungsvarianten. Im hellgrün hinterlegten Quadranten befinden sich die besten Abwärmenutzungsvarianten, welche sowohl tiefe Gestehungskosten als auch einen grossen Nutzungsgrad aufweisen.

Die Definitionen der verwendeten Kürzel lassen sich in Abschnitt 7.2 auf Seite 71 nachlesen.

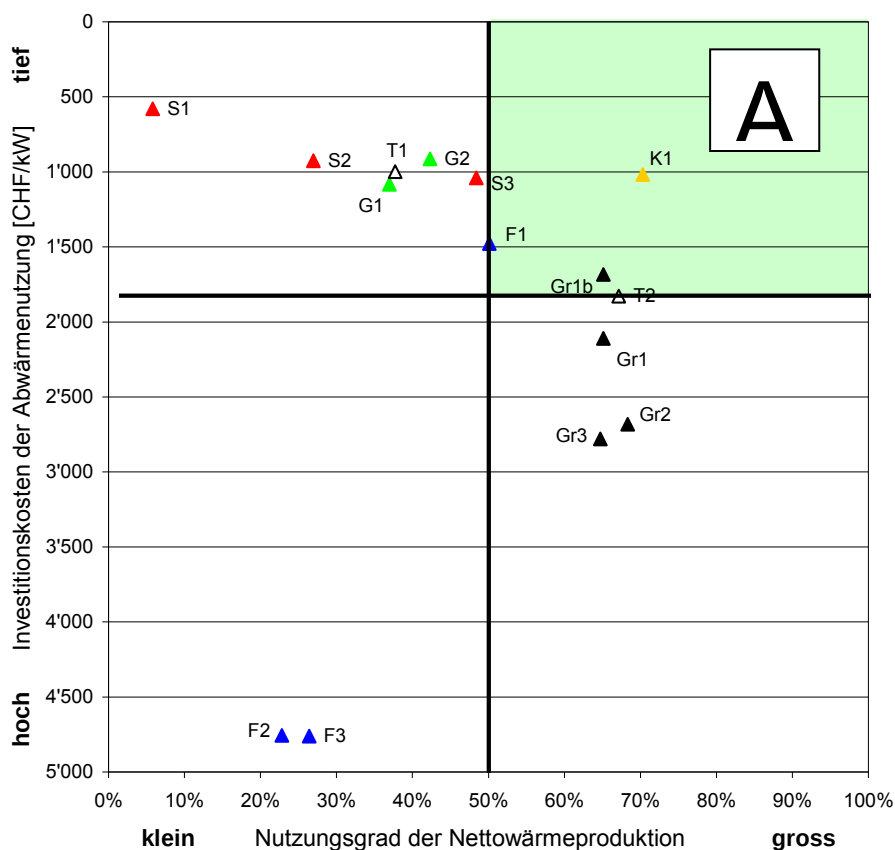


Abbildung 16:

Investitionskosten versus Nutzungsgrad der Nettowärmeproduktion. Im hellgrün hinterlegten Quadranten befinden sich die besten Abwärmenutzungsvarianten, welche sowohl tiefe Investitionskosten als auch einen grossen Nutzungsgrad aufweisen.

Die Definitionen der verwendeten Kürzel lassen sich in Abschnitt 7.2 auf Seite 71 nachlesen.

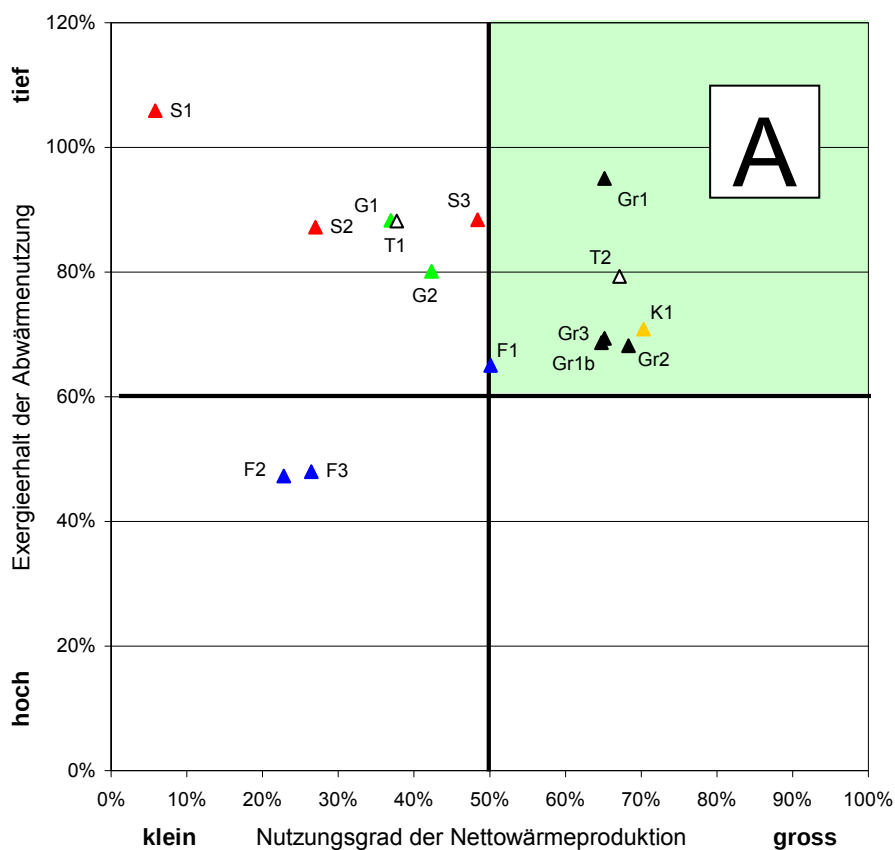


Abbildung 17:

Exergieerhalt versus Nutzungsgrad der Nettowärmeproduktion. Im hellgrün hinterlegten Quadranten befinden sich die besten Abwärmenutzungsvarianten, welche sowohl einen grossen Exergieerhalt als auch einen grossen Nutzungsgrad aufweisen.

Die Definitionen der verwendeten Kürzel lassen sich in Abschnitt 7.2 auf Seite 71 nachlesen.

7.3.2.1 Best bewertete Abwärmenutzungsvarianten mit Nutzungsgrad > 50 %

- F1: Fischbetrieb 1: S1, Heizen Aquakultur Forelle (H8), Kühlen Klimakälte 5°C (K1)
- T2: Tourismusbetrieb 2: S2, Heizen Wellnesshotel (H11), Heizen Schwimmhalle (H12)
- Gr1: Grossbetrieb 1: S2, Grundlast Fernwärmenetz (B2), Heizen Wohnsiedlung (H11)
- Gr1b: Grossbetrieb 1b: S2, Stromerzeugung mittels ORC-Prozess (E1),
Heizen Wohnsiedlung (H11)

7.3.2.2 Generelles Fazit

Das übergeordnete Ziel dieser Studie ist eine bessere Nutzung der in landwirtschaftlichen Biogasanlagen anfallenden überschüssigen Abwärme. Nebst den Gestehungskosten, welche selbstverständlich in einem wirtschaftlichen Bereich liegen müssen, ist demzufolge dem Bewertungskriterium „Nutzungsgrad der Nettowärmeproduktion“ sehr hohe Priorität beizumessen.

Die Untersuchungen der verschiedenen Abwärmenutzungsvarianten hat gezeigt, dass höchste Nutzungsgrade erzielt werden können, wenn:

- Winterbedarfsprofile (z.B. Gebäudeheizung) mit Sommerbedarfsprofilen (z.B. Gebäudekühlung, Heubelüftung) kombiniert werden können → AWN S3 (Seite 71).
- konstante Bedarfsprofile mit einer Leistungsskalierung von 100 % erschlossen werden können. Dies könnte z.B. eine vollständige Nutzung zur Verstromung im ORC-Prozess sein, was jedoch mit einem tiefen Exergieerhalt von $2.5 \cdot 0.16 = 40 \%$ einhergeht (sofern die Abwärme von 35°C nicht mehr weiter genutzt wird, z.B. als Grundlast für ein Gewächshaus).
- konstante Bedarfsprofile (z.B. Warmwasserfischzuchten) als Sockellast mit weiteren Profilen kombiniert werden können. Dies wurde bei der AWN Gr2 (Seite 71) berücksichtigt. Sie erreicht mit 78 % den höchsten Nutzungsgrad, schneidet jedoch aufgrund der relativ hohen Gestehungskosten (92 % der Referenz) trotzdem schlecht ab.
- für Verbrauchsprofile mit sehr hohen Auslegeleistungen mit einer der BHKW-Abwärmeleistung identischen Sockellast (z.B. Fernheizungsnetze) die Sockellast geliefert werden kann (Wärmelieferung an Dritte).
- andauernde, zyklische Lastprofile im Rhythmus von 1 bis 8 Stunden und einer doppelten Nennleistung im Vergleich zur BHKW-Abwärmeleistung (z.B. Warmwasseraufbereitung, Käseerei) zur Verfügung stehen, welche mit einem somit optimal dimensionierbaren Speicher überwiegend mit BHKW-Abwärme versorgt werden können.
- kleine Biogasanlage wirtschaftlich realisiert werden können: Für die untersuchte AWN S1 (Heizung Wohnhaus und BWW) mit dem grössten Replikationspotenzial dürfte die Anlage nicht grösser als 25 kW.th sein, um einen Nutzungsgrad von 60 % zu erreichen, was weit unter dem hier untersuchten Bereich liegt.

Die Beispiele und Erläuterungen zeigen, dass der Trade-off zwischen den verschiedenen Kriterien je nach Abwärmenutzungsvarianten (AWN) sehr unterschiedlich sein kann. Für eine abschliessende Beurteilung einer AWN ist daher die Gewichtung der einzelnen Kriterien (und damit die Lage der Quadranten-Trennlinien in den xy-Graphiken) unbedingt vom Betreiber einer Anlage selber vorzunehmen.

8. Abkürzungsverzeichnis

ABC-Analyse	hier: Graphische Darstellung von Abwärmenutzungsvarianten als Punkte in Abhängigkeit von jeweils zwei Beurteilungskriterien, welche die x- und y-Achse der Graphik bilden. Die Beurteilung erfolgt aufgrund der Lage der Punkte in den Quadranten A (sehr gut), B (gut) und C (mässig) und D (schlecht). Varianten, welche im Quadranten D zu liegen kommen, werden nicht berücksichtigt.
AKM	Absorptionskältemaschinen
AWN	Abwärmenutzung, Abwärmenutzungsvariante
BHKW	Blockheizkraftwerk, Wärmekraftkopplungsanlage (→WKK)-Anlagen
BWW	Brauchwarmwasser
COP	Coefficient of Performance, Leistungszahl bei Kompressionskältemaschinen (→KKM). Verhältnis von erzeugter Kälteenergie zu eingesetztem Strom. Analog zum Wärmeverhältnis (→WV) bei Absorptionskältemaschinen (→AKM)
DSKM	Dampfstrahlkältemaschine
GK	Gestehungskosten
GVE	Grossvieheinheit
i. d. R.	in der Regel
JAZ	Jahresarbeitszahl, mittlere Leistungszahl (→COP) während eines Jahres
k. A.	keine Angaben
KEV	Kostendeckende Einspeisevergütung für Strom aus erneuerbaren Energien, per 1.1.2009 in Kraft
KKM	Kompressionskältemaschine
kW.e	Leistung in Kilowatt Strom (elektrisch)
kW.k	Leistung in Kilowatt Kälte
kW.th	Leistung in Kilowatt Wärme (thermisch)
MWSt	Mehrwertsteuer
ORC	Organic Rankine Cycle: thermodynamischer Kreisprozess (z.B. in einer Dampfturbine), welcher anstelle von Wasser als Arbeitsmedium eine organische Flüssigkeit mit einer tieferen Verdampfungstemperatur verwendet
SWOT-Analyse	Stärken-Schwächen-Chancen-Risiken-Analyse
U-Wert	Wärmedurchgangszahl für Bauteile einer Gebäudehülle [$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$]
WKK	Wärmekraftkopplung
WT	Wärmetauscher
WV	Wärmeverhältnis, Leistungszahl bei Absorptionskältemaschinen (→AKM). Verhältnis von erzeugter Kälteenergie zu eingesetzter Wärmeenergie

9. Literaturverzeichnis

9.1 Publikationen

- Banga D. (2006). Fische direkt ab Bauernhof – kein Aprilscherz. Schweizer Bauer 13. Mai 2006.
- Baumgartner J. (1989). Heu- und Maistrocknung mit Luftentfeuchter-Wärmepumpen. Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik (FAT).
- BiomassEnergie (2005). Biogasanlagen in der Landwirtschaft - Leitfaden zur Entscheidungsfindung. Bundesamt für Energie BFE.
- BiomassEnergie (2006): Energieproduktion in der Landwirtschaft – Chancen und Risiken. Sondernummer Erneuerbare Energien 7/06.
- BiomassEnergie, (2006). Vision Bioenergie 2020. Sondernummer erneuerbare Energien 7/06.
- Braun S. (2007). Fischzuchtanlagen für Gärtnereien, Betreiber von Biogas – Anlagen und Landwirte: Empfehlungen für interessierte Betreiber. Diplomarbeit bei Graber A., Hochschule Wädenswil ZFH.
- Bundesamt für Energie BFE (2007). Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2007.
- Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft (1979). Bundesgesetz über die Raumplanung RPG (Stand 2008).
- Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK (2008). Richtlinie und FAQ Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV). Bundesamt für Energie BFE.
- Eisenmann W. et al. (2005). Wärme und Kälte aus der Sonne - Solare Nahwärme und saisonale Speicherung. FVS • LZE Themen 2005.
- FAL. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau, GRUDAF (2001). Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Zürich-Reckenholz (FAL; heute Agroscope ART)
- Feddeck P. (2002). Neue Anwendungen der Dampfstrahlkältemaschine. BINE – Informationen und Ideen zu Energie & Umwelt, Projektinfo 10/02.
- Frischknecht P. (2001). Einführung in den Umgang mit Umweltsystemen - Bewertungen. ETH Zürich.
- Gassel A. (2002). Die Adsorptionskältemaschine - Betriebserfahrungen und thermodynamische Berechnung. Erneuerbare Energien 2/02.
- Haudenschild R. (2006). Bioforellen sind eine gute Nische. Schweizer Bauer 13. April 2006.
- Kopf E. (2006). Eglifilets fangfrisch vom Schweizer Bauern. Schweizer Bauer 13. April 2006.
- Kötting, J., Schweigler, C. (1998). Biomasse-Heizkraftwerke mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. 10 th European Conference and Technology Exhibition "Biomass for Energy and Industry", Würzburg.
- Kühn A., Petersen S., Ziegler F. (2008). Nutzung von Niedertemperaturwärme zur Kälteerzeugung, TU Berlin International, Nr. 62, Juli 2008.
- Meier D. Wärmeversorgung von Gewächshäusern mit einer Holzheizung, Fact Sheet (2006). EnergieSchweiz.

Noeres P. Fraunhofer UMSICHT (2006). Thermische Kälteerzeugung mit Dampfstrahlkältemaschinen - Konzepte und Erfahrungen. KI Luft- und Kältetechnik 11/2006.

Schmid M., Gaegauf C., Sattler M. (2007). Dezentrale Stromerzeugung mit Feststoffbiomasse. Ökozentrum Langenbruck.

Schulz W. et al. (2007). Leitfaden Verwertung von Wärmeüberschüssen bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen. www.bremer-energie-institut.de. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.

Serafimova K. (2007). Landwirtschaftliche Biogasanlagen - Qualität und Sicherheit. Fachzeitschrift gwa - Gas Wasser Abwasser 5/2007.

Sommerhalder M.; Engeli, H. (2006): Landwirtschaftliche Biogasanlagen – Perspektiven für die Wärmenutzung. Sondernummer Erneuerbare Energien 7/06.

Turboden, www.turboden.it (2003). ORC Turbogenerator – Organic Rankine Cycle (ORC) betrieben mit Thermoöl.

9.2 Internetseiten

www.agrigate.ch: Umrechnungsfaktoren Grossvieheinheiten

www.aramis.admin.ch

www.biomasseenergie.ch: KEV-Rechner

www.genesys.ch: Biogasanlagen

www.geothermie-unterhaching.de: Kalinaprozess

www.koerting.de, www.geajet.de: Dampfstrahlkältemaschinen

www.powertank.de: Latentspeicher

www.solarnext.eu, www.sortech.de: Adsorptionskältemaschinen

www.turboden.it, www.adaturb.it-i.com: ORC-Anlagen

www.waltermeier.com, www.yazakienergy.com, www.solarnext.de: Absorptionskältemaschinen

10. Anhang

10.1 Kurzportraits der besichtigten Anlagen

10.1.1 Lampart, Mauensee LU

Betriebsverhältnisse

Betreiber	Fam. Lampart
Standort	Mauensee LU
Inbetriebsetzung	2006, 140 kW.e
Vermarktung	Ökostrom Schweiz

Anlagedaten

Die Anlage wurde 2006 um einen Gasmotor mit 140 kW.e erweitert. Der alte Zündstrahlmotor mit 65 kW.e ist ausser Betrieb und wird als Diesel-Notstromaggregat verwendet (selten auch mit Biogasbetrieben, um den Gasspeicher in der Nacht vollständig zu leeren).

Lieferant Biogasanlage	Genesys
Lieferant Gasmotor	Avesco
Planer Abwärmenutzung	Eigenleistung mit Sanitär
Elektrischer Wirkungsgrad	ca. 38 %
Gesamtwirkungsgrad	k. A., Annahme 85 % → 173 kW.th
Jahresstromproduktion	ca. 590'000 kWh (80 % Leistung, 15 h pro Tag, 350 Tage pro Jahr).
davon Eigenbedarf	140'000 kWh (23 %)

Bestehende Abwärmenutzungen

Der Motor verfügt nur über einen Motorkühlwasser-Wärmetauscher und liefert ca. 120 kW Abwärme, welche wie folgt genutzt wird:

- Heizen von drei Wohnhäusern
- Heizen Ferkel- und Pferdestall
- Trocknen vergorenes Substrat (Trommeltrocknung)

Abwärmenutzungsprojektideen, welche (noch) nicht realisiert worden sind:

- Trocknen von Brot für Schweinefutter: wegen zu hohem Strombedarf nicht realisiert
- Stromausbeute erhöhen: ORC nicht rentabel, da Anlage < 500 kW.e
- Heizen Gewächshaus: Überwinterung von Pflanzen (2 - 4°C), zu teuer, da ein Speicher von 400 m³ nötig gewesen wäre.
- Heizen Mehrfamilienhaus: Überbauung mit 60 Wohnungen. Der Bauherr bot an, die Erschliessung mittels einer 500 Meter langen Wärmeleitung zu übernehmen, falls das Heizen gratis bezogen werden kann → uninteressant für Biogasanlagenbetreiber.
- Heizen Beerenzucht: in Abklärung

Substrat: In- und –Output

Die Co-Substratmenge beträgt heute ca. 20 %.

Rinder- u. Schweinegülle, Pferde- u. Hühnermist	ca. 3'000 t/a
Co-Substrate	kommunale Grünabfälle

Die Anlage liefert ein homogenes, geruchsfreies Substrat, welches kostenlos an eine Gärtnerei abgegeben wird. Der Düngerwert beträgt rund 30 CHF pro 100 kg. Die Vermarktung und entsprechende Verpackung als offizielles Düngerprodukt ist knapp rentabel.

Wirtschaftlichkeit

Die Hochschule Zollikofen verfasste für die Biogasanlage eine Wirtschaftlichkeitsstudie, welche hier jedoch nicht berücksichtigt wird. Nach Aussage von Hr. Lampart wurde generell sehr viel Eigenleistung erbracht. Die Co-Substratvergütungen seien zwar sinkend, jedoch nicht entscheidend. Der wichtigste Wirtschaftlichkeitsfaktor seien die Einspeistarife (heute im Jahresschnitt 18,3 Rp./kWh). Für eine lohnende Abwärmenutzung müsste die Abwärme deutlich besser entschädigt werden. Aus heutiger Sicht würde er die Anlage nicht mehr bauen.

Spezielles

- Der neue Gasmotor nahm an einer Studie der EMPA teil, die den Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Versichtungsverhältnisses untersuchte.
- Geruchsemissionen sind ab und zu ein Problem (Störfall). Daher ist ein Biofilter geplant.

10.1.2 Jakob Bösch AG, Herisau AI*Betriebsverhältnisse*

Mit einer Leistung von 1'065 kW.e ist die Anlage der Jakob Bösch AG die grösste Biogasanlage der Schweiz.

Betreiber	Jakob Bösch AG
Standort	Schwellbrunn AI
Inbetriebsetzung	2006, 1'065 kW.e
Vermarktung	

Anlagedaten

Lieferant Biogasanlage	AAT, Biogas, Abwasser- und Abfalltechnik GmbH, Wolfurt (A)
Lieferant Gasmotor	IWK
Planer Abwärmenutzung	Wolfgang Maurer, Arbon
max. elektrische Leistung	1'065 kW.e
Ausbaugrösse	1'600 kW.e
Abwärmeleistung	609 kW (Wasser), 444 kW (Dampf)
Gesamtnutzungsgrad	83,2 %
Jahresstromproduktion	9'000'000 kWh (> 8'000 h pro Jahr)
davon Eigenbedarf	
Bruttowärmepotenzial	9'000'000 kWh

Bestehende Abwärmenutzungen

- Heizen Schweineställe
- Heizen: zwei externe Wohngebäude (ca. 60 kW)
- Heizen Büro und vier Wohnungen
- Heizen von Warmwasser für Wohnen und Betrieb
- Dampf für Tierfutteraufkochung und Abfallfleischhygienisierung (Substituierung von ca. 100'000 Liter Heizöl resp. 1'000'000 kWh pro Jahr)

Die brachliegende künftige Abwärmeleistung beträgt ca. 500 bis 800 kW. Daher sind weitere Abwärmenutzungsprojekte angedacht, z.B.:

- Fernwärme Schwellbrunn: ca. 600 Meter Fernwärmeleitung
- Spital Herisau: direkte Gasleitung auf BHKW im Spital
- Einspeisung ins Erdgasnetz in 2 Kilometer Entfernung

Substrat: In- und –Output

Die Co-Substratmenge beträgt heute ca. 70 %.

Schweinegülle	7'850 m ³ /a (1'000 Mast- und 250 Mutter-schweine)
Co-Substrate	18'250 to/a: Gemüserüst- und Speiseab-fälle, Schlachtabfälle Raum Ostschweiz

Nach dem Vergärungsprozess wird das Gärsubstrat (Produktgülle, 100 Gewichts-%) in Fest- und Flüssigstoffe getrennt. Die Feststoffe (15 %) dienen als organische Dünger, die im Ackerbau Verwendung finden. Die Flüssigstoffe werden mittels Ultrafiltration und anschliessender Umkehrsmose in konzentrierten Flüssigdünger (20 %) und Brauchwasser (65 %) aufbereitet. Damit reduziert sich das Transportgewicht zur Abführung der Gärsubstrate auf 35 % und die Düngerqualität wird stark aufgewertet.

Wirtschaftlichkeit

Wie bei praktisch allen Anlagen ist auch hier die Wärmenutzung fast ausschliesslich mit Eigenleistungen realisiert worden. Daher liegen keine verwendbaren Zahlen vor. Die Vergütung für die Entsorgung der Schlachtabfälle ist rückläufig, was den wirtschaftlichen Betrieb erschwert.

Spezielles

- Lage: ehem. Landwirtschaft, Umzonung in Industrie für Bau nötig

10.1.3 Wartmann, Bissegg TG*Betriebsverhältnisse*

Die Biogasanlage steht auf einem Schweine- und Viehbetrieb mit angegliederter Tilsiter Käserei.

Betreiber	Käserei Holzhof, Fam. Wartmann
Standort	Bisegg TG
Inbetriebsetzung	1999, neues Aggregat 2007, 190 kW.e
Vermarktung	Ökostrom Schweiz

Anlagedaten

Die Anlage wurde 2007 um einen Gasmotor mit 190 kW.e erweitert. Die alten Aggregate von 1999 mit 75 resp. 80 kW.e (Schnell-Motoren) sind weiterhin in Betrieb, der gleichzeitige Betrieb mit 265 kW.e ist jedoch erst ab September 2008 möglich, da die Einspeiseleitung ins Netz des Elektrizitätswerks bis anhin nur eine Kapazität von 150 kW aufweist.

Lieferant Biogasanlage	Lipp GmbH
Lieferant Gasmotor	IWK
Planer Abwärmenutzung	Eigenleistung, Sanitär, Käsereiplaner
max. elektrische Leistung	265 kW
max. Abwärmeleistung	220 kW (ohne Abgas-WT)
Jahresstromproduktion	neues Aggregat: ca. 1'200'000 kWh
davon Eigenbedarf	ca. 20 %

Bestehende Abwärmenutzungen

- Heizen von einem Wohnhaus und einem Doppel Einfamilienhaus
- Heizen Gartenhaus mit Gartenbad
- Heizen Schweinemastställe (Bodenheizung)
- Heizen Ferkelstall (30°C)
- Trocknen Heu: 200 kW Anschlussleistung, ca. 750 h pro Jahr

Abwärmenutzungsprojektideen, welche (noch) nicht realisiert worden sind:

- Projekt Prozess Heizen Käserei, Verarbeitung von 6'000 Liter Milch pro Tag: Ersatz des ölbeheizten Dampfkessels mit Heisswasser (2 x täglich Erhitzung von 6'000 Liter Wasser von 31°C auf 45°C in 20 min.).
- Idee Kühlen: Käselager, Ladevittrinen, Klimatisierung Kühlzelle (heute mit Kompressions-KM). Insgesamt sind 9 kW Kälte erforderlich, was für eine Absorptions-KM nicht interessant ist.

Substrat: In- und Output

Die Co-Substratmenge beträgt heute ca. 50 %.

Gülle	4'000 m ³ /a: 35 Kühe, 800 Mastschweine, 170 Mutterschweine, 500 Ferkel
Co-Substrate	ca. 4'000 t/a: 1'500 t Darm, 500 t Pansen, 1'000 t Rüstabfälle, 500 t Fett, 500 t Diverses

Die angelieferten Schlachtabfälle erfüllen bereits die Hygienisierungsanforderungen; eine Behandlung vor Ort ist nicht nötig. Die Anlage liefert flüssige Gülle, welche konventionell mit einem Güllewagen auf die Felder - auch weiter entfernter Betriebe - ausgebracht werden. Da die Gülle auch nach der Qualitätsverbesserung in der Biogasanlage (u.a. geruchsfrei) als „Abfall“ behandelt werden muss, ist der Absatz schwierig.

Wirtschaftlichkeit

Wie bei praktisch allen Anlagen ist auch hier die Wärmenutzung fast ausschliesslich mit Eigenleistungen realisiert worden. Daher liegen keine verwendbaren Zahlen vor. Die Vergütung für die Entsorgung der Schlachtabfälle ist rückläufig, was den wirtschaftlichen Betrieb erschwert.

Spezielles

- Geruchsemissionen führten trotz vorhandenem Biofilter zu Einsprachen und Nachbarskonflikten.

10.1.4 Stalder, Visp VS*Betriebsverhältnisse*

Die Anlage wird von vier Milchwirtschaftsbetrieben betrieben resp. mit Rindergülle und –mist beliefert. Zwei Betriebe liegen zehn Kilometer, der dritte zwei Kilometer entfernt.

Betreiber	Max Stalder
Standort	Visp VS
Inbetriebsetzung	2004 (100 kW), 2007 (190 kW)
Vermarktung	Ökostrom Schweiz

Anlagedaten

Die Anlage wurde 2006 um einen weiteren Gasmotor mit 190 kW.e erweitert. Beide Aggregate verfügen sowohl über einen Kühlwasser- als auch über einen Abgaswärmetauscher, der Abgaswärmetauscher des grösseren Aggregates kann variabel betrieben werden.

Lieferant Biogasanlage	Genesys
Lieferant Gasmotor	190 kW.e: AVS Aggregatebau GmbH
Planer Abwärmenutzung	Eigenleistung mit Sanitär
Elektrischer Wirkungsgrad	ca. 38 % → 290 kW.e
Gesamtwirkungsgrad	k. A., Annahme 85 % → 359 kW.th
Jahresstromproduktion	

Bestehende Abwärmenutzungen

- Heizen Wohnhaus (drei 4-Zimmer-Wohnungen)
- Heizen Kuhstall und Melkstand inkl. Warteraum im Aussenbereich
- Hygienisierung der Gastroabfälle bei 70°C
- Waschanlage für Behälterreinigung Gastroabfälle
- Heutrocknung im Sommer bis Oktober rund um Uhr (ca. 200 kW.th)

Die Heutrocknung ist zusammen mit der Stall- und Melkstandheizung an derselben Fernleitung angeschlossen.

Substrat: In- und Output

Die Co-Substratmenge beträgt heute ca. 17 %.

Rinder: Gülle und Mist	280 GVE (z. T. aus Laufstall)
Pferde: Mist	35 Tiere
Gras (Weidereinigung)	
Gastroabfälle	ca. 500 Tonnen / a
Kommunale Grünabfälle	Visp, Naters, Riederalp
Mühlestaub, Speiseöl	

Die Anlage liefert einen presstrockenen Volldünger (Textur: heterogen, mit kurzen Strohhalmen durchsetzt), welcher auf den vier Betrieben und in einer Gärtnerei verwendet wird.

Wirtschaftlichkeit

Investitionen Biogasanlage und Gasmotor	CHF	1'400'000
Subventionen: Coop	CHF	50'000
Zinsloses Darlehen Kanton	CHF	200'000
Strompreis vergütet	CHF/kWh	0.21
Strom Kapitalkosten	CHF/kWh	0.051
	CHF/kWh	

Spezielles

- Direkt neben der Anlage befindet sich das Wohnhaus des Nachbarn, welches heute mit Öl beheizt wird. Der Anschluss ans Nahwärmenetz war bis anhin nicht möglich, da keine Einigung bzgl. Vergütung zustande kam.
- Der Betrieb des Gasmotors wird durch die Verfügbarkeit von Gastroabfällen limitiert. Daher ist die Stromproduktion im Sommer höher als im Winter (Tourismus).

10.1.5 Schürch, Madiswil BE*Betriebsverhältnisse*

Die Anlage wird durch die Familie Schürch betrieben. Auf dem Areal war früher ein Schlachtbetrieb inkl. Schweinemast mit ca. 100 Angestellten. Heute umfasst der Betrieb rund 1'000 Mastschweine und 4'000 Legehennen. Die Futtermittel (100 % pflanzlich) werden vollständig von extern bezogen (keinerlei eigene Ackerbewirtschaftung).

Betreiber	Fam. Schürch
Standort	Madiswil BE
Inbetriebsetzung Motor	2007, 140 kW.e
Vermarktung	Ökostrom Schweiz

Anlagedaten

Die Anlage wurde 2007 komplett erneuert und verfügt über eine sehr übersichtliche Wärmeverteilungsinstallation.

Lieferant Biogasanlage	??
Lieferant Gasmotor	Avesco
Planer Abwärmenutzung	Eigenleistung, ??
Elektrischer Wirkungsgrad	ca. 39 % ??
Gesamtwirkungsgrad	87 % → 172 kW.th
Jahresstromproduktion	1'200'000 kWh (brutto)

Bestehende Abwärmenutzungen

Zur Zeit wird noch keine Abwärme nebst dem Betrieb der Biogasanlage genutzt. Je nach Anteil und Temperatur der Schweinegülle am Gesamtgärssubstrat verbraucht alleine die Beheizung der Fermenter bis 50 % der Bruttowärmeleistung. Folgende Abwärmenutzungen sind geplant resp. überprüft worden:

Momentan ist der Entscheid für eine ORC-Anlage pendent.

- Heizen Wohnhaus: Ab kommender Heizperiode in Betrieb
- Heizen Schweineställe: geprüft, wegen zu hohen Kosten für die Wärmeverteilung in den Ställen (also unabhängig von der Wärmequelle) jedoch nicht realisiert
- Stromausbeute erhöhen: eine Offerte für eine ORC-Anlage liegt auf dem Tisch, Umsetzung unsicher
- Heizen Gewächshaus: eine Gärtnerei aus Langenthal hatte Interesse für ein 3-ha-Gewächshaus. Aufgrund eines Zonenkonfliktes wurde die Baubewilligung verhindert.

Substrat: In- und Output

Die Co-Substratmenge beträgt heute ca. 45 %.

Gülle und Mist von eigenem Betrieb	3'500 t/a (1'270 Saue, davon 150 von Nachbarbetrieb, 15 Rinder, 20 Kühe)
Mist von extern	1'000 t/a
Co-Substrate	Ca. 4'000 t/a (Pansen, Fleischsuppe, Most, Riccola)

Der Anteil der Gülle und somit der Eigenwärmebedarf der Biogasanlage schwankt saisonal recht stark. Produkt: k. A.

Wirtschaftlichkeit

k. A.

Spezielles

- Die bereits hygienisiert angelieferte Fleischsuppe (zur Verwendung als Gärssubstrat) wird in zwei grossen Speichern (Futterkochkessel des ehem. Mast- und Schlachtbetriebes) temperiert zwischengelagert.
- Der Fermenter ist mit einem Betondeckel verschlossen. Der darüberliegende Gasballon ist somit unabhängig vom Fermenter bewirtschaftbar.

10.2 Kostenberechnungen Abwärmenutzungen: Bsp. Profil K1

Wirtschaftlichkeit Abwärmenutzung Biogasmotor			AWN	REFERENZ			Erlös
Leistungsprofil: K1			Biogasmotor	Total	Wärme: Ölkessel	Kälte: KKM	Strom
ENERGIEBILANZ			Energienmenge [MWh]				
	Leistung [kW]	Stunden [h/a]					
Bruttowärmeangebot Biogasmotor	250	8'760	2'190				
Bruttostromproduktion Biogasmotor	200	8'760	1'752				
Gesamtwärmebedarf der Abwärmenutzung	649	2'076	1'347				
Deckung mit Biogasmotor direkt	250	4'105	1'026				
Deckung mit Biogasmotor via Speicher	250	207	52				
Deckung mit Spitzenkessel	477	564	269				
Abwärme für Wärmeproduktion	646	1'999	1'292				
Abwärme für Kälteproduktion	30	1'828	55				
Abwärme für Stromproduktion	0	0	0				
Nutzungsgrad Biogasmotor-Abwärme			70%	0%			
Deckungsgrad der Nutzung mit Biogasmotor-Abwärme			80%				
Nutzenergie Wärme	Wirkungsgrad Konversion	0.90	1'087		1'087		
Nutzenergie Kälte	Wirkungsgrad Konversion	0.54	28			28	
Nutzenergie Strom	Wirkungsgrad Konversion	0.16	0				0
Wirkungsgrad Ölkessel > Ölbedarf (kostenpflichtig)		0.85	285		1'279		
Wirkungsgrad KKM > Strombedarf (kostenpflichtig)		4				7	
Strombedarf (kostenpflichtig) AWN (AKM, Fernwärme)		12	23				
Exergieerhalt der Abwärmenutzung			71%	-96%			
INVESTITIONEN			CHF	CHF	CHF	CHF	CHF
Anlagekosten FW-Umformer	60 CHF/kW.th		13'520				
Anlagekosten Kälte (AKM)	7'935 CHF/kW.k		128'553				
Anlagekosten Strom (ORC)	0 CHF/kW.e		0				
Anlagekosten Ölkessel (ohne ORC)	252 CHF/kW.th	252	138'976		138'569		
Anlagekosten KKM	4'602 CHF/kW.k					74'549	
Abgaswärmetauscher-Kosten	31 CHF/kW.e	Avesco	6'219				
Speicherkosten	2'200 CHF/m ³	E+P					
Speichervolumen	7.1 m ³		15'714				
Fernwärmeleitungskosten	560 CHF/m	Leistung [kW]					
Leitungslänge	300 m	300	168'000				
Fernkälteleitungskosten	765 CHF/m	Leistung [kW]					
Leitungslänge	200 m	15	153'000				
Honorare, Akquisition, Baunebenkosten	Anteil an Invest	12%	36'358		16'628	8'946	
Total Investitionen			660'341	238'692	155'197	83'495	
JAHRESKOSTEN			CHF/a	CHF/a	CHF/a	CHF/a	CHF/a
Kapitalkosten							
Anlagen Wärme (inkl. Honorare)	20 Jahre Abschreibung		13'097	12'453	12'453		
Anlagen Kälte (inkl. Honorare)	20 Jahre Abschreibung		12'161	12'682		12'682	
Anlagen Strom (inkl. Honorare)	20 Jahre Abschreibung		0	0			
Fernwärmeleitung	40 Jahre Abschreibung		9'791				
Fernkälteleitung	40 Jahre Abschreibung		8'917				
Abgaswärmetauscher	15 Jahre Abschreibung		625				
Speicher	20 Jahre Abschreibung		1'514				
Zinssatz	5 %						
Total Kapitalkosten			44'590	25'135	12'453	12'682	
Betriebskosten							
Kosten Heizöl EL	120 CHF/100 Lit.	2008	34'182		153'497		
Kosten Strom	14.7 Rp./kWh	2008	3'385			1'012	
Kosten Wasser							
Wartung/Unterhalt FW-Umformer	Anteil an Invest	1.00%	135				
Wartung/Unterhalt Kälte (AKM)	Anteil an Invest	2.50% E+P 2005	3'214				
Wartung/Unterhalt Strom (ORC)	Anteil an Invest	4.00% Lti Drives 2008	0				
Wartung/Unterhalt Ölkessel	Anteil an Invest	1.00%	1'390		1'386		
Wartung/Unterhalt KKM	Anteil an Invest	3.00% E+P 2005				2'236	
Wartung/Unterhalt Abgas-WT	Anteil an Invest	3.00%	187				
Wartung/Unterhalt Speicher	Anteil an Invest	1.00%	157				
Wartung/Unterhalt Fernwärmeleitung	Anteil an Invest	1.00%	1'680				
Wartung/Unterhalt Fernkälteleitung	Anteil an Invest	1.00%	1'530				
Versicherung/Verwaltung	Anteil an Invest	1.00%	6'240		1'386	745	
Total Betriebskosten			52'099	160'262	156'268	3'994	
Jahreskosten Wärme			64'420		168'722		
Jahreskosten Kälte			30'408			16'676	
Jahreskosten Strom			0				0
Total Jahreskosten			94'829	185'398			
/ abzüglich Erlös aus zusätzlicher Stromproduktion ORC			94'829	185'398			
SPEZIFISCHE KOSTEN			Rp./kWh	Rp./kWh	Rp./kWh	Rp./kWh	Rp./kWh
Betriebskosten Wärme			3.6		14.4		
Betriebskosten Kälte			33.5			14.5	
Betriebskosten Strom			k.A.				
Gestehungskosten Wärme			5.9	15.5	15.5		
Gestehungskosten Kälte			110.4	60.6		60.6	
Gestehungskosten Strom			k.A.				35.5

10.3 Kostenberechnungen Konversionstechnologien

