



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

# KONZEPTSTUDIE: KLIMATISIERUNG DURCH ABWÄRMENUT- ZUNG AUS BRENNSTOFFZELLEN

## Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**Paul Gantenbein,** paul.gantenbein@solarenergy.ch  
**Andreas Luzzi,** andreas.luzzi@solarenergy.ch  
**Michael Spirig,** michael.spirig@solarenergy.ch

**Hochschule für Technik Rapperswil HSR**  
**Institut für Solartechnik SPF, www.solarenergy.ch**  
Oberseestrasse 10 CH-8640 Rapperswil

**Alexander Schuler,** alexander.schuler@hexis.com  
**Volker Nerlich,** volker.nerlich@hexis.com

**Hexis AG,** Hegifeldstrasse 30,  
CH-8404 Winterthur, [www.hexit.com](http://www.hexit.com)

## **Impressum**

Datum: 31. Juli 2007

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie**, Forschungsprogramm XY

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

BFE-Projektleiter: Dr. Andreas Gut, [Andreas.Gut@bfe.admin.ch](mailto:Andreas.Gut@bfe.admin.ch)

Projektnummer: 101960 / 152423

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	3
1. Ausgangslage .....	6
2. Ziel der Arbeit .....	6
3. Vorgehen .....	6
4. Ergebnisse .....	7
4.1 SystemE .....	7
4.1.1 Systemabgrenzung .....	7
4.1.2 Randbedingungen und Eingrenzung .....	8
4.1.3 Systemvarianten und wichtigste Parameter .....	8
4.1.4 Referenzsystem und Systemvarianten HTLRN2, HTLRN3 und HTWR .....	10
4.1.5 Kritische Punkte für das Design und die Evaluation von Zielsystemen .....	12
4.1.6 Beurteilungskriterien .....	12
4.2 TECHNOLOGIE .....	15
4.2.1 Schlüsselkomponenten .....	15
4.2.2 Beurteilung der Technologie .....	15
4.3 Wirtschaftlichkeit .....	16
4.3.1 Vorgehen zur Berechnung der partiellen, jährlichen Kosten .....	16
4.3.2 Vorgehen zur Sensitivitätsanalyse .....	16
4.3.3 Partielle, jährliche Kosten .....	16
4.3.4 Sensitivitätsanalyse .....	17
A. Sensitivität: Kosten-Betriebsstunden sowie Strom- und Gaspreis .....	17
B. Sensitivität: Gaspreis und Einspeisevergütung zu Strompreis .....	18
C. Sensitivität: Kosten-Amortisationszeit und Gaspreis .....	18
D. Sensitivität: Kosten-Kapitalzins .....	19
E. Zusammenfassung der Sensitivitätsanalyse .....	20
4.3.5 Patente, Barrieren .....	21
4.4.1 Marktzahlen .....	22
4.4.2 Vollaststunden – Komfort Bedarf .....	22
4.4.3 Zusammenfassung Markt .....	22
5. Symbolverzeichnis .....	27
6. Referenzen .....	28
Anhang .....	29
A.1 Clip board of Kick-off Meeting .....	29
A.2 Auslegungsdaten Galileo, Hexis AG .....	30
A.3 Generische Einteilung von Air-Conditioning Systemen .....	31
A.4 Informationsquellen zu Technik, Wirtschaftlichkeit und Markt .....	32
a. Ursprungs Module (BZ, AKM) .....	33
b. System-Varianten mit BZ und Wärme-/Kältespeicher .....	34
A.6 Verfügbare Systemkomponenten – Spezifikationen .....	36
A. WKT .....	36

Absorptionskältemaschine .....	36
Kühlgerät – Splitgerät.....	37
A. 7 Berechnung der Amortisations-, Betriebs-, und Unterhaltskosten.....	38
A. Amortisationskosten .....	38
B. Betriebskosten.....	38
C. Unterhaltskosten .....	39
D. Zusammenstellung der Kosten .....	39
A. 8 Strom-, Gas- und Einspeisepreise.....	40
A. 8.1 A Strompreise Spanien (Angaben Hexit AG) .....	40
A. 8.1 B Strompreise im Tessin Mai 2006 .....	41
A. 8.1 C Strompreise in Europa Dez. 2006 .....	42
A. 8.2 A Gaspreise in der EU25 im Januar 2006.....	44
A. 8.2 B Gaspreise in der Schweiz Mai 2006 .....	44
A. 8.3 A Vergütung für Stromeinspeisung – EU / SPANIEN .....	46
A. 8.3 B Vergütung für erneuerbare Energien EKZ - CH .....	47
A.9 Klima und Wärmesenke.....	48
A.10 Klimadaten .....	49
Klimadaten für Lugano.....	49
Klimadaten für Madrid.....	50
Klimadaten für Almeria .....	50

## Zusammenfassung

### Ausgangslage und Fragestellung

Ein ganzjähriger, durchgehender Betrieb von **SOFC-Brennstoffzellenheizsystemen** wäre zur Verminderung der Zell-Degradation sowie einer besseren Auslastung und damit Generierung eines zusätzlichen **Amortisationsbeitrages** sehr erstrebenswert. Eine interessante Möglichkeit bietet hierzu die **Nutzung** der Brennstoffzellenabwärme mittels **Absorptionskältemaschine (AKM)** zur Raumklimatisierung. In dieser Studie wird daher das technische, wirtschaftliche und marktrelevante Potential dieses Konzeptes evaluiert.

### Gewählter Lösungsweg

Zuerst werden auf der Basis vorhandener Informationen, das System, die Terminologie und die Randbedingungen wie Temperaturniveaus, Leistungsbereiche, Zielmärkte usw. definiert. Mittels weiterer Recherchen und eines Fragenkatalogs an Experten werden 2-3 vielversprechende Systemvarianten aus der Vielzahl prinzipieller Möglichkeiten ausgewählt und grob ausgelegt. Diese Varianten werden mit einem **Referenzsystem - herkömmliches Klimagerät - bezüglich Technologie, Wirtschaftlichkeit und Markt verglichen**.

Um den finanziellen Aufwand zur Realisierung der Systeme einzugrenzen, werden in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht die Kosten der vollständigen Systeme analysiert, sondern lediglich die Beiträge für die Systemkomponenten, welche für die Kühlfunktion je nach Variante zusätzlich erforderlich sind. Aus den resultierenden Kostendifferenzen lässt sich dann ein entsprechender **Amortisationsbeitrag** ableiten. Die **Sensitivität** dieses Beitrages wurde überprüft durch die Variation verschiedener Parameter wie, Betriebszeit, Amortisationszeitraum, Energiepreis (Strom, Gas, Einspeisevergütung) und Kapitalzinsen.

Abschliessend wird eine **Bewertung** der Varianten mittels vorgegebener, gewichteter Kriterien vorgenommen. Diese widerspiegelt die Beurteilung des Konzeptes zur Realisierung der Kühlfunktion durch die am Projekt involvierten Personen. Für die priorisierte Variante wird als Diskussionsvorschlag eine grobe **Umsetzungs-Roadmap** vorgeschlagen.

### Hauptergebnisse

Dem Referenzsystem werden drei Varianten zur Raumkühlung gegenübergestellt. Bei allen drei Varianten wird die Abwärme der Brennstoffzelle in einer Absorptionskältemaschine zur Trennung des Betriebs- und des Kältemittels genutzt. Hierfür lassen sich ein- oder mehrstufige AKMs einsetzen. Bei 3 Stufen kann theoretisch ein thermischer Wirkungsgrad von bis 1.6 erwartet werden. Für die **Variante im Haus-Retrofit- und Neubau-Bereich** besteht ein mittelfristiges Realisierungspotential für den spanischen Markt. Zur Anwendung eignen würde sich eine 2-stufige Absorptionskältemaschine mit einer Kälteleistung von  $P \geq 12 \text{ kW}$  sowie Luft als Kälteverteilmittel (**HTLRN2**, HT=Hochtemperatur, L=Luft, R= Retrofit- und N= Neubau-Bereich, 2 = 2-stufiger Absorptionskältemaschine). Die Betriebszeit sollte grösser als 6'000h pro Jahr betragen. Bei einem Marktanteil von lediglich 1% könnte mit dem Verkauf von 1'000-50'000 Systemen gerechnet werden.

Wirtschaftlich gesehen resultiert ein Amortisationsbeitrag (= geringere Kosten als bei der Referenzvariante mit herkömmlichem Klimagerät), sobald eine der folgenden Vorgaben eintrifft: Betriebszeit  $>3'000 \text{h/a}$ , Amortisationszeitraum  $\geq 15 \text{ Jahre}$ , Energiepreise Strom  $\geq 0.20 \text{ CHF/kWh}$ , Gas  $\leq 0.08 \text{ CHF/kWh}$ , Einspeisevergütung  $\geq 0.19 \text{ CHF/kWh}$ , Kapital-Zins  $\leq 6\%$  und/oder Senkung der Investitionskosten für die AKM - aufgrund einer Economy of Scale und technischer Verbesserungen. Dazu gibt es die Angabe der schwedischen Firma ClimateWell AB, welche als Ziel-Preis 7'500.- Euro für ihre 1-stufige 10 kW AKM angibt, wobei der aktuelle Preis ein Mehrfaches davon ist und der Wirkungsgrad COP = 0.7 beträgt. Ein „Vorprototyp“ einer 1-stufigen 10 kW AKM der Phönix SonnenKlima AG, welche beim SPF in Betrieb ist, kostete 15'000.- Euro.

**Hauptbarrieren** für eine Umsetzung sind neben den **hohen Kosten** die noch **mangelhafte Marktreife** bzw. die **fehlende Verfügbarkeit** von mehrstufigen Absorptionskältemaschinen. Diese sind aufgrund ihres höheren Wirkungsgrades gegenüber der 1-stufigen AKM letztlich wirtschaftlich interessanter.

Die Zeitdauer zur Realisierung eines System-Prototyps auf der Basis eines P&D Projektes wird auf mindestens 3 Jahre geschätzt.

Für die Variante **HTWR** (Hochtemperatur – Wasser für den Retrofit-Bereich) ist die Beurteilung ähnlich wie HTLRN2. Die **HTLRN3 Variante** (3-stufige AKM) scheidet als nicht amortisierbares System vor-

erst noch aus. Systemen mit weniger als 12 kW Kühlleistung kann zur Zeit noch kein grosses Realisierungspotential zugesprochen werden, weil dazu die AKM mit entsprechender Leistung als Hauptkomponente noch zu fehlen scheint.

Der Kanton Tessin, wo eine Betriebszeit der Kühlmaschine im Bereich von 2'500h/a liegt, ist als Testmarkt einzustufen (1%-iger Marktanteil, entspricht ca. 10-400 Systemen), was für die Pilotphase der Umsetzung interessant sein könnte.

### **Kritik und Verbesserungsvorschläge**

Die vorliegende Analyse gibt einen ersten systematischen Überblick zum noch wenig beleuchteten Thema der Klimatisierung durch Abwärmenutzung aus Brennstoffzellen. Die Abschätzung des Realisierungspotentials ermöglicht eine sinnvolle Vorgabe für das weitere Vorgehen.

Insgesamt sind gegenständliche, konkrete Informationen nur spärlich vorhanden und bedürfen einer minuziösen Aufarbeitung. Der Detaillierungsgrad und die Aussagen zur Vielfalt besonders der Systemkomponenten sind noch unbefriedigend und daher u.a. durch weitere Expertengespräche<sup>1</sup> zu vertiefen. Vollständigkeitshalber sind zudem weitere Systemvarianten grob zu klären und das Nutzerverhaltens im angestrebten Markt zu spezifizieren. Auf dieser dann etwas detaillierteren Basis sind für eine fassbare technisch-wirtschaftliche Beurteilung ein bis zwei konkrete Systeme grob auszulegen.

Die Objektivität der Beurteilung ist daher durch vertiefte und konkretere Abklärungen in allen Bereichen zu verbessern. Im Speziellen:

- Bestimmung der effektiven Realkosten für das Referenzsystem.
- Detailliertere und konkretere Kostenanalyse der neuen Systeme.
- Ausarbeitung einer Variante mit Nutzung der Brennstoffzellenabwärme zum Betrieb von Absorptionskältemaschine zur Kühlung von Haupträumlichkeiten in Kombination mit Splitgräten, welche den elektrischen Strom aus der Brennstoffzelle direkt nutzen, zur Kühlung kleinerer, weniger oft genutzten Nebenräumen.
- Bestimmung des Kundensegmentes und vertiefte Abschätzung des Marktpotentials sowie Überlegungen zur Marktbearbeitung in den potentiellen Zielmärkten:
  - o Südliche EU mit Spanien, Portugal, Südfrankreich, Italien, Griechenland etc.
  - o Naher Osten und Region des Persischen Golfes (ganzjähriger Kühlbedarf von 8760h)
  - o Regionen mit einem Verhältnis von Gaspreis/Strompreis < 0.3.

---

<sup>1</sup> Die Befragung von Experten, welche den Projektpartnern nicht angehören und vor welchen die Projektdetails vertraulich behandelt werden, ohne ihnen präzisere Angabe der Hintergründe zu machen, erfordert einiges an Fingerspitzengefühl.

## **Schlussfolgerungen**

Es scheint ein Realisierungspotential für die Variante HTLRN2, 12 kW, in Spanien vorhanden zu sein. Dieses ist zeitlich gesehen aber eher mittelfristig, da die Marktreife bzw. die Verfügbarkeit von zweistufigen Absorptionskältemaschinen mit entsprechendem hohem Wirkungsgrad ungenügend ist.

Eine Realisierung hängt zudem ab von den effektiv erreichbaren elektrischen und thermischen Wirkungsgraden einer einzelnen Festoxidbrennstoffzelle. Erforderlich für eine erfolgreiche Umsetzung wäre zudem das Erreichen der Marktreife eines Systems mit einer thermischen Leistung von ca. 10 kW<sub>th</sub>.

Auch die Chancen für den Aufbau von Pilotanlagen sind gering, da die fokussierte Entwicklung der Teilsysteme Priorität hat.

## **Handlungsempfehlungen**

Die Veränderung dieser Randbedingungen ist zu beobachten und entsprechend der Bedarf einer Weiterführung und Detaillierung dieser Studie zu prüfen und zu beurteilen.

## 1. Ausgangslage

Brennstoffzellensysteme für den Wohnhausbereich werden heute wärmegeführt betrieben. Der Wärmebedarf ist jedoch saisonal stark schwankend. Dies führt dazu, dass die Brennstoffzellensysteme in den Sommermonaten abgeschaltet werden, was aus Sicht der Brennstoffzellenaggregate insgesamt zu ungenügenden Vollastbetriebsstunden von ca. 3'000h - 5'000h führt (1 Jahr hat 8'760h). Weiterführen Ein- und Ausschaltvorgänge (Betriebsunterbrüche) zu einer beschleunigten Degradation der Zellen. Ein Betrieb des Brennstoffzellensystems über das ganze Jahr ist daher anzustreben. Dies kann mit der Nutzung der Brennstoffzellenabwärme zum Betrieb einer Wärme betriebenen Kältemaschine zur Kühlung von Wohn- und Arbeitsräumen erreicht werden. Ein Konzept dazu wird evaluiert.

## 2. Ziel der Arbeit

In dieser Studie wird das Konzept der Abwärmenutzung von typischerweise wärmegeführten Brennstoffzellensystemen zum thermischen Antrieb von Kältemaschinen, welche zur Klimatisierung von Wohn- und Arbeitsräumen eingesetzt werden evaluiert und bewertet. Die zeitlich optimale Auslastung der Brennstoffzelle mit einem Dauerbetrieb über das Jahr wird angestrebt.

## 3. Vorgehen

Das Projekt hat den Charakter von fundierten Vorabklärungen und gliedert sich in drei Schwerpunkte:

- **Technologie** (Systemvarianten, Spezifikation, Komponentenwahl, Systemintegration)
- **Wirtschaftlichkeit** (Investitionskosten, Betriebskosten, Sensitivitätsanalyse)
- **Markt** (Nischenanwendungen, Trends, deployment options)

In einer ersten Phase werden die prinzipielle technische Machbarkeit und eine grobe Abschätzung der Kosten durchgeführt. Hierzu sind das System, die gemeinsame Terminologie, die Leistungsgruppen und potentielle Märkte zu definieren. Durch ein erstes Studium der Literatur, der vorhandenen Patente und einer bestehenden, thema-spezifischen Diplomarbeit von Hexis soll ein Überblick gewonnen werden.

Darauf und auf den vorhandenen Erfahrungen beider Projektpartner bauend, gilt es die im Kontext des Gesamtsystems theoretisch sinnvollen Komponenten-Varianten in einem morphologischer Kasten aufzulisten, zu priorisieren und den Referenzfall (Standard Klimaanlage) zu bestimmen. Die Anforderungen an die Komponenten und die Zielanwendung werden dadurch festgelegt, dass nebst Fachliteratur über einen Fragebogen auch diverse Know-how-Träger und Lieferanten konkret befragt werden.

Zuerst werden die wichtigsten, technischen Details, die Verfügbarkeit wesentlicher Komponente und die ungefähren Kosten (Investition, Betrieb, Unterhalt) geklärt und zu einem Gesamtbild zusammengeführt. Darauf aufbauend ist beabsichtigt in der zweiten Phase die wirtschaftlich interessantesten Systemvarianten vertieft auszuarbeiten und grob mit dem Referenzsystem „Kompressionskältemaschine“ zu vergleichen. Es werden dazu die Sensitivität der Gestehungskosten und die mikro- sowie die makroökonomischen Trends (Betriebszeit, Service- und Unterhaltskosten, Amortisationszeit, Zinsen, Gas- und Strompreise) untersucht.

Abschliessend werden Handlungsempfehlungen in Form einer Umsetzungs-Roadmap ausgearbeitet und präsentiert.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 SYSTEME

#### 4.1.1 Systemabgrenzung

Die möglichst ganzjährige Nutzung der Abwärme eines Festkeramik Brennstoffzellensystems (SOFC) zum Betrieb einer thermisch betriebenen Kältemaschine verspricht eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des SOFC Systems. Die nachfolgende Grafik in Fig. 1 zeigt schematisch das in dieser Studie behandelte **System mit den zwei thermodynamischen Behandlungsfunktionen Heizen und Kühlen**. Der Fokus liegt auf der Evaluation des Kühlteils, unter Beachtung der durch den Heizteil gegebenen Bedingungen. Ebenfalls dargestellt sind die erforderlichen System-Hauptkomponenten sowie die wesentlichen Leistungsflüsse  $\dot{Q}$  über die Systemgrenzen. In der Grafik sowie im Symbolverzeichnis sind die verwendeten Abkürzung und Bezeichnungen erläutert.

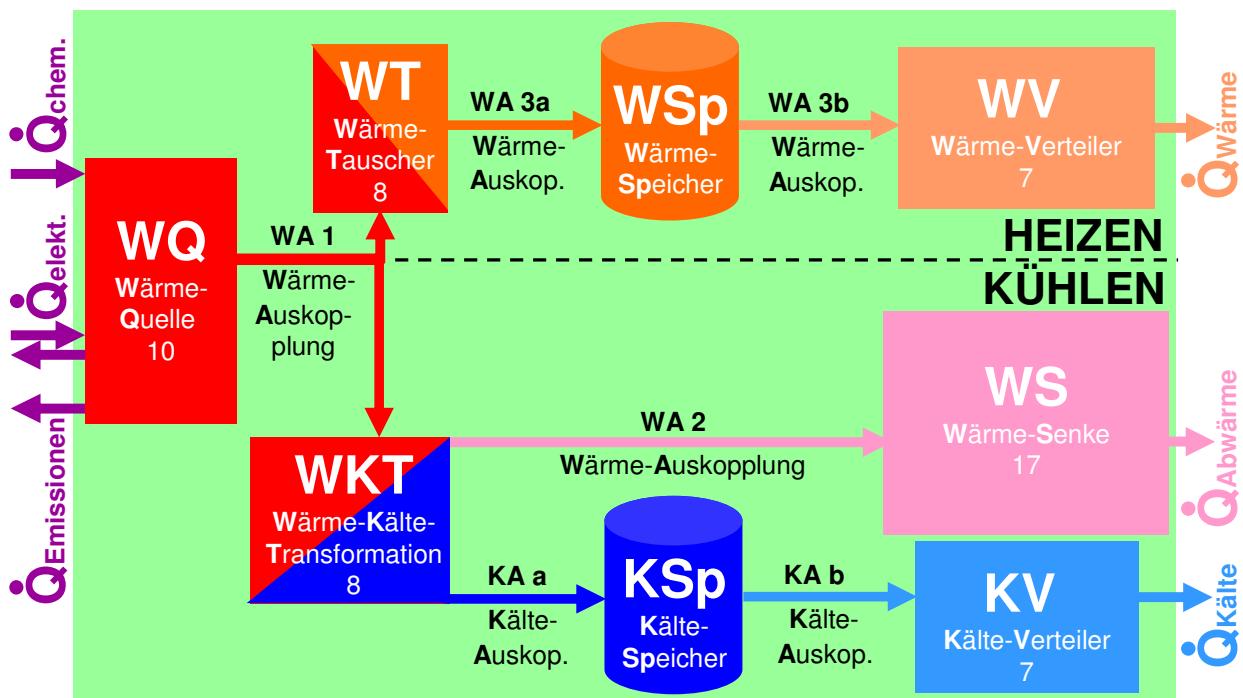


Fig. 1: WärmeKraftKopplungs-System mit den thermodynamischen Behandlungsfunktionen Heizen und Kühlen sowie Wandlung von chemischer in elektrische Energie. Als Wärmequelle WQ soll eine Festoxid-Brennstoffzelle eingesetzt werden. Die eingetragenen dimensionslosen Zahlen in den Systemteilen dienen dem relativen Vergleich der Leistungsgrößen.

Nicht eingezeichnet in Figur 1 sind die Verlustenergieflüsse aus den einzelnen Systemelementen. Die explizite Berechnung ist in dieser Studie nicht erforderlich, da sie indirekt über den Wirkungsgrad der Komponenten in der Wirtschaftlichkeitsrechnung berücksichtigt werden.

Die Nutzung der Wärmeenergie aus der SOFC in einer Wärme-Kälte-Transformation (WKT), welche hier eine Absorptionskältemaschine (AKM) sein kann, erfolgt über die Wärmeauskopplung (WA 1). Die Kälte aus der AKM wird über ein Kälte-Verteiler (KV) System zum Verbraucher geleitet. Je nach Gebäudestruktur und Nutzerbedarf müssen Leistungsspitzen durch einen Kälte-Speicher (KSp) ausgeglichen werden. Die aus der SOFC in die AKM geführte Wärmeenergie sowie jene Wärmeenergie, welche das Kälte-Verteiler-System in den zu kühlenden Räumen aufnimmt, werden über die Wärmesenke (WS) an die Umgebung abgeführt. Aus Kostengründen sind idealerweise das Kälte-Verteiler-System und das Wärme-Verteiler-System identisch.

#### 4.1.2 Randbedingungen und Eingrenzung

Folgende Randbedingungen wurden zur Eingrenzung der Vielfalt von Systemlösungen angenommen (siehe Anhang A.01 Clip board of Kick-off meeting und Anhang A.02 Auslegungsdaten Galileo, Hexit AG):

- SO-Brennstoffzelle als Wärmequelle WQ:  
Austrittstemperatur T der Reaktionsgase aus dieser Wärmequelle:  $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  
Wärme-Auskopplung WA1 auf die Vorlauftemperatur von Warm-Wasser:  $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Wärmequelle WQ:  
Die thermischen Energiequelle WQ soll prioritär zum „Kühlen“ und sekundär zur Bereitstellung von Warmwasser und Raumheizung eingesetzt werden. Für Warmwasser- und Raumheizungsbedarf ist eine im SOFC System inhärente Ersatz-Energiequelle in Form eines Gasbrenners eingebaut.
- Leistung der Wärmequelle:  
Drei Leistungsklassen der Wärmequelle werden angenommen,  $WQ_{\max}$ :  $2.3\text{ kW}_{\text{th}}$ ,  $9.2\text{ kW}_{\text{th}}$ , und  $>30\text{ kW}_{\text{th}}$ . Die Klasse mit der tiefsten Leistungseinheit entspricht dem Hexit Galileo System. Die  $9.2\text{ kW}_{\text{th}}$  entsprechen 4 Einheiten des Hexit Galileo Systems. Diese ergeben bei Kopplung an eine 2stufigen Absorptionskältemaschine mit einem Wirkungsgrad von 1.3 eine den Marktanforderungen entsprechende Kühlleistung von  $12\text{ kW}$  [12, 13]. Die Wärmequelle mit einer thermischen Leistung  $>30\text{ kW}_{\text{th}}$  gehört zu einer nächst grösseren Klasse.
- Zielmärkte:  
Die untersuchten Zielmärkte sind der Kanton Tessin in der Schweiz und Spanien in der Europäischen Union.

#### 4.1.3 Systemvarianten und wichtigste Parameter

Um alle theoretisch möglichen Systemkonfigurationen aufzuzeigen und sinnvoll einzugrenzen wurde ein morphologischer Kasten zusammengestellt und sowohl das Referenzsystem (ausgezogene Linie) als auch die (wirtschaftlich relevantesten) vielversprechendsten Systemvarianten (gestrichelte Linien) eingetragen (siehe Tabelle 1 und Abschnitt 4.1.4). Die Bezeichnung der Systemvarianten ist wie folgt zu verstehen: Antrieb der WKT (AKM): HT = Hochtemperatur, LT = Tieftemperatur; Kälte-Verteiler KV: W = Wasser, L = Luft; Gebäude-/Anlagenalter: R = Retrofit, N = Neubau. Beispiel: HTLRN = Hochtemperatur – Luft – Retrofit & Neubau.

Merktal	Ausprägung						
	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)
1. Gebäude Struktur / Funktion	EFH* Minergie	EFH* Durchschnitt	MFH	Bürogebäude	Hotel	EDV-Raum	Andere
2. Leistung P	2.3 kW <sub>th</sub>	9.2 kW <sub>th</sub>	>30 kW <sub>th</sub>				
3. Raumhöhe H	2.4 m	2.7 m	3 m	3.5 m	4 m	H > 4 m	
4. Luftwechselrate	< 3 /h	3 /h	4 /h	5 /h	6 /h		
5. Betrieb**	Vollast	Teillast	Standby				
6. WQ, T <sub>max</sub>	Gas-/Ölbrenner	BZ, 550 °C	Holzfeuerung	Industrielle Abwärme	Erdwärme (Geothermie)	Wärme-pumpe (allgemein)	<u>Solarthermie</u>
7. WA 1 zu		WT allein	WKT 160 °C+WT 80 °C+WKT	WT-80 °C+WKT	WT-WSp-80 °C+WKT	WT allein	
8. WKT	SG-KKM	AKM 1 stuf.	AKM 2 stuf.	AKM 3 stuf.	DEC		
9. Kältemitteltemperatur	6 °C / 12 °C	-6 °C / 12 °C					
10. WA 2	Wasser	Wasser-Glykol	R 407C	R 717	Luft		
11. WS	Aussen Kühler (Luftkondensator)	Geschlossener Kühliturm	Geschl. Kühliturm mit Sprühkühlung	Offener Kühliturm	Erdregister	Fluss/See	Andere
12. KA a	Wasser	Luft	Wasser-Glykol	R 407C	R 717		
13. KA b	Wasser	Luft	Wasser-Glykol	R 407C	R 717		
14. KSp	Keiner (intern)	Klein (1h)	Mittel (4h)	Gross (12h)			
15. KV***	Luft (Aussen / Mischluft)	Horizontflächen → Kühlflächen	Strahlungsdecken	Fussboden	Bauteile (Wände, ...)	a), b) ... kombiniert	
16. Preisklasse	low	High end (Villa, Bank, Spital)					
17. Markt	Tessin	Spanien					
18. Anlagenalter	Neubau	Retrofit Heizung (CH)	Retrofit Heizen + Kühlen 100%				

**Tabelle 1:** Morphologischer Kasten zur Darstellung und Eingrenzung der Systemkonfigurationen.

*Legende:*

*Die ausgezogene Linie bezeichnet das Referenzsystem,*

*die gestrichelten Linien definieren die vielversprechendsten Systemvarianten, nach Prioritäten geordnet*

- 1 HTLRN2
- 2 HTLRN3
- 3 HTWR
- 4 LTWR
- 5 LTLRN
- 6 LTWR

\* EFH: Einfamilienhaus mit einer zu beheizenden oder zu kühlenden Energiebezugsfläche von 120m<sup>2</sup>  
PS: Relativ kleines EFH wurde angenommen.

\*\*Das Teillastverhalten ist im Fall des SOFC Brennstoffzellensystems sekundär, da sich das obere Temperaturniveau von  $T = 550^\circ\text{C}$  kaum ändert, was für die folgenden Komponenten zu einem beinahe lastunabhängigem Betriebsverhalten führt.

\*\*\*KV Kälte-Verteilung: siehe Anhang A.03 Generische Einteilung Air-Conditioning; je nach Anordnung können Heizflächen gleichzeitig auch Kühlflächen sein.

#### 4.1.4 Referenzsystem und Systemvarianten HTLRN2, HTLRN3 und HTWR

Folgende Systemvarianten wurden als für die Untersuchung relevant ausgewählt (siehe Tabelle 1 und Anhang A.05 Module und Gesamtsystem der Varianten mit BZ als WQ):

a. **Referenzsystem** (  rote, ausgezogene, dicke Linie in Tabelle 1)

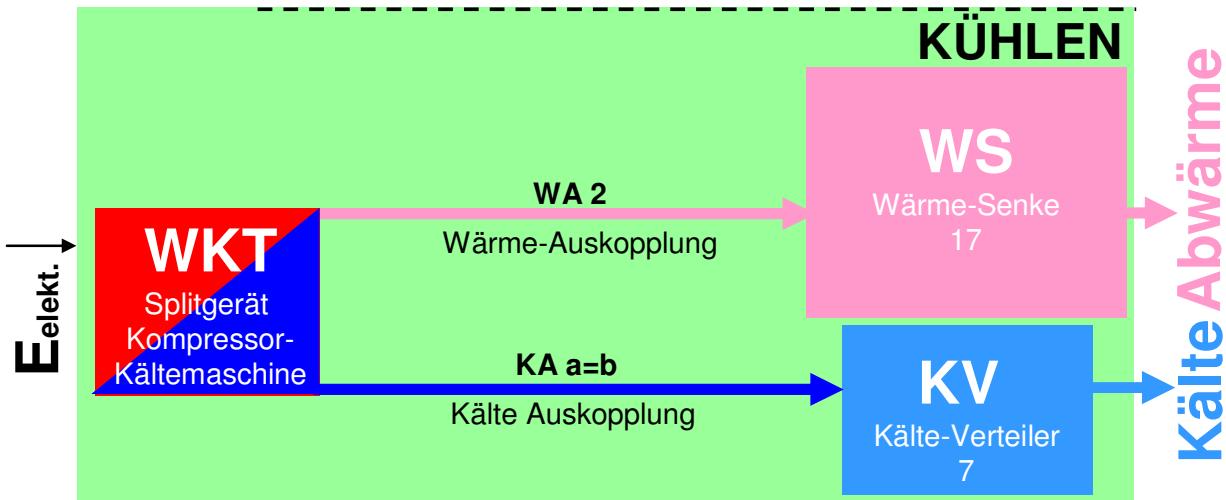


Fig. 2: Splitgerät als Referenzsystem mit der thermodynamischen Behandlungsfunktion Kühlen.

Für das in Fig. 2 schematisch dargestellte Referenzsystem wird von folgender Konfiguration ausgegangen:

Generell:

- Durchschnittliches Einfamilienhaus mit einem nominalen Wärmeleistungsbedarf von  $9.2\text{kW}_{\text{th}}$ .
- Für einen behaglichen Raumklima sei eine Luftwechselrate von  $<3/\text{h}$  vorausgesetzt [2]. Da bei den Varianten mit einer Brennstoffzelle ein beinahe lastunabhängiges Verhalten angenommen wird, werden vorerst nur Vollast-Varianten verglichen.

Geräte-technische Details:

- Für das Heizen wird von einem entsprechend ausgelegten, zentralen Gas-Brenner mit auf Luftbasierten Wärmeverteilsystem ausgegangen.
- Die gewünschte Kühlfunktion wird mit einem separaten State-of-the-Art Splitgerät mit einer Kompressor-Kältemaschine (SG-KKM) erreicht.
- Der Eckwert für die Kältemitteltemperatur betrage  $6^\circ\text{C}$  resp.  $12^\circ\text{C}$ . Das Kältemittel ist für alle Kreisläufe R407C [1].
- Die Wärmeabfuhr durch die Wärmeauskopplung WA 2 geschieht über einen Aussenkühler und es ist kein Kältespeicher KSp vorgesehen. Die Kälte wird im Kälte-Verteiler KV als Mischluft von Aussenluft und Kühlluftstrom in den Räumen verteilt (Induktionsgeräte).

Marktrelevante Angaben:

- Da die Deckung des Kühlbedarfs tendenziell eher noch einem gehobenen Komfort-Standard entspricht, wird von einer High-End Preisklasse für teurere Einfamilienhäuser (Villen) ausgegangen. Natürlich werden auch Tiefpreissegmente oder Segmente anderer Ausprägung, wie kleinere Verkaufsräume, mit solchen Anlagen bedient, diese werden aber in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

- In der Schweiz ist das Tessin und in Europa Spanien, je ein geografisch typischer und vielversprechender Marktraum mit für die grobe Abschätzung vorhandenen Klimadaten (siehe Anhang A.09 Klima und Wärmesenke)
- Splitgeräte werden sowohl im Neubau-Bereich (N) als auch im Retrofit-Bereich (R) eingesetzt.

- b. HTLRNx** = Hochtemperatur – Luft – Retrofit- und Neubau-Bereich mit x-stufiger Kältemaschine
- — ● blaue, gestrichelte, dicke Linie in Tabelle 1, x=2 zwei stufige AKM  
— — — schwarz, gestrichelte, dicke Zusatz-Linie in Tabelle 1, x=3 drei stufige AKM

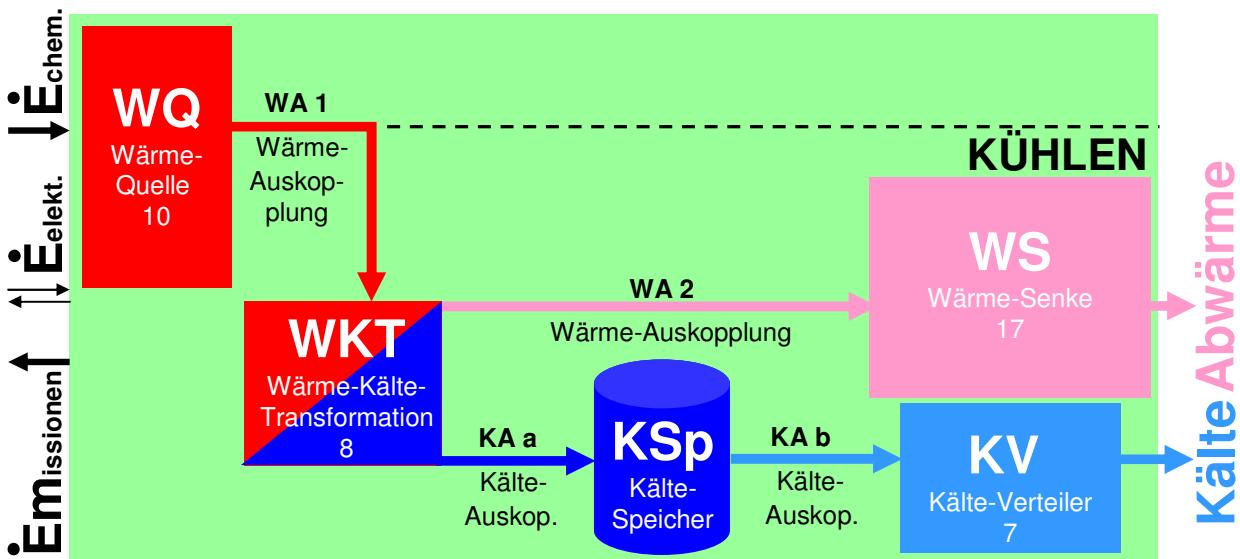


Fig. 3: Varianten HTLRNx mit lediglich der thermodynamischen Behandlungsfunktion Kühlen (x=2 oder 3)

Bei der in Fig. 3 schematisch dargestellten HTLRNx (x=2, 3) Variante wird von folgender Konfiguration ausgegangen, wobei nur die Unterschiede zur Referenzkonfiguration beschrieben sind. In Anhang A.05 Module und Gesamtsystem der Varianten mit einer Brennstoffzelle als Wärmequelle befinden sich detailliertere, schematische Darstellungen der einzelnen Module (BZ, AKM, usw.) und der Gesamtsysteme der untersuchten Varianten.

Generell:

- Die Luftwechselrate sei statt  $<3/h \rightarrow 4/h$ .

Geräte-technische Details:

- Die Wärmeauskopplung im modifizierten Brennstoffzellen-System, z.B. genannt „Hexit Galileo Cool“, ist bei einer lastunabhängigen Austrittstemperatur oder Quellentemperatur von  $T=550^{\circ}\text{C}$ .
- Die Wärmeenergie für die Wärme-Kälte-Transfomation WKT in einer zweistufigen Absorptionskältemaschinen (x=2) wird mit nominal  $T = 130^{\circ}\text{C} - 160^{\circ}\text{C}$  ausgekoppelt. Der angenommene Wirkungsgrad beträgt  $\text{COP} = 1.3$ .

In der Variante mit x=3 wird eine dreistufige Absorptionskältemaschinen vorausgesetzt. In diesem Fall wird die Wärmeenergie mit nominal  $T = 160^{\circ}\text{C}$  ausgekoppelt. Der angenommene Wirkungsgrad liegt bei  $\text{COP} = 1.6$ .

- Der Eckwert für die Kältemitteltemperatur betrage ebenfalls  $6^{\circ}\text{C}$  resp.  $12^{\circ}\text{C}$ . Als jeweiliges Kältemittel werde eingesetzt für den Kreislauf:
  - WA 2 von der Wärme-Kälte-Transformation WKT zur Wärme-Senke WS ein 30%-iges Glykol-Wasser Gemisch.
  - KA a von der Wärme-Kälte-Transformation WKT zum Kälte-Speicher KSp Wasser.
  - KA b vom Kälte-Speicher KSp zur Kälte-Verteilung KV Luft.

- Die Wärme-Senke WS werde durch einen geschlossenen Kühlturn mit Sprühkühlung realisiert.
- Der Kältespeicher KSp soll eine Grösse aufweisen, so dass er ca. 4h die geforderte Nennwert-Kälteenergie abgeben kann.

Marktrelevante Angaben:

- Analog der Referenzkonfiguration

**c. HTWR** = Hochtemperatur – Wasser – Retrofit-Bereich  
 (●—●—● grüne, gestrichelte, dünne Linie in Tabelle 1)

Bei der zweiten vielversprechenden Variante wird beim HTWR-System zudem von folgender Konfiguration ausgegangen, wobei nur die Unterschiede zur obigen HTLRN-Variante beschrieben sind (vergl. Fig. 2 und 3):

Generell:

- Analog der HTLRN-Konfiguration

Geräte-technische Details:

- Die Kälte-Verteilung KV wird über die gleichen Flächen, respektive Endgeräte realisiert wie die Wärmeverteilung beim Heizen.

Marktrelevante Angaben:

- Analog der Referenzkonfiguration

#### 4.1.5 Kritische Punkte für das Design und die Evaluation von Zielsystemen

Folgende Punkte sind für die Definition der Anforderungen an die Komponenten und die Auslegung sowie Integration möglicher Zielsysteme besonders kritisch. Sie wurden mittels eines daraus abgeleiteten Katalogs von Fragen an Experten und durch die Konsultation anderer Informationsquellen gezielt untersucht (siehe Anhang A.04 Informationsquellen zu Technik, Wirtschaftlichkeit und Markt).

#### Technik

- Prinzipiell geeignete Kühlsysteme WKT zur Arbeits- und Wohnraum Klimatisierung und deren Einsatzbereiche sowie Präferenzen bezogen auf die Kälteleistung und den Gebäudetyp.
- Art der gebräuchlichen Kälteverteilung KV.
- Art der gebräuchlichsten Wärmequellen zum Betrieb von Absorptionskältemaschinen AKM.
- Grösse des Wärme- WSp und Kältespeichers KSp in Abhängigkeit der installierten Leistung und des Gebäudetyps.
- Art der Wärmeabfuhr in die Wärmesenke WS.

#### Wirtschaftlichkeit

- Investition pro kW Heiz/Kühl-Leistung abhängig vom Gebäudetyp.
- Betriebskosten pro kW Kühlleistung und Wirkungsgrade abhängig von Klimageräte- und Gebäudetypen.
- Unterhalt und Service abhängig von Klimageräte- und Gebäudetypen.
- Betriebszeiten in Tagen/Stunden pro Jahr in den Zielmärkten.

#### Markt

- Anzahl und prozentualer Anteil an klimatisierten Häusern/Räumen in den Zielmärkten.
- Länder und Regionen abhängige Bau- und Energienutzungsgesetze.

#### 4.1.6 Beurteilungskriterien

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die Kriterien nach denen die jeweiligen Varianten beurteilt werden aufgelistet, beschrieben und ihre Gewichtung sowie eine Bewertungs-Skala ist angegeben. Dabei ist

die Detaillierung nur auf das Wesentliche beschränkt. Die Gewichtung der Hauptkriterien, Technologie, Wirtschaftlichkeit und Markt ist je gleich 1. D.h. die Summe der Gewichtungen der Unterkriterien innerhalb eines Hauptkriteriums ist 1. Die Gewichtung der Unterkriterien innerhalb eines Hauptkriteriums ist zudem gleich verteilt.

Bei der Beurteilung sollen die Kriterien nur auf den Systemteil der Kälteerzeugung ohne die Wärmequelle vorgenommen werden. Z.B. der State-of-the-Art der Brennstoffzelle ist nicht mitzubeurteilen, was bedeutet, dass angenommen wird die BZ als solche sei verfügbar und marktreif. Dies ist erforderlich um die Realisierungschancen unabhängig von der BZ-Technologie beurteilen zu können. Hingegen zu beurteilen ist, ob sich die Komponenten verbinden lassen.

Kriterium	Beschreibung	Gewichtung	Erfüllungsgrad
<b>Technologie</b>			
▪ Reife	Entwicklungsstand des Komponentensets (Forschung, Prototyp, Spezialserie, Grossserie).	Je 1/6 in der Summe = 1	0% – 100%
▪ Technische Machbarkeit	Mutmassliche Schwierigkeiten bei der Realisierung der Lösung zu einem Produkt (F&E-Aufwand, Aufwand für den Aufbau einer industriellen Produktion).		0% – 100%
▪ Komplexität	Komplexität der technischen Lösung bezüglich Produktion, Lieferung und Inbetriebnahme.		0% – 100%
▪ Verfügbarkeit	Verfügbarkeit der Komponenten (sofort lieferbar in kleinsten, mittleren, grossen Mengen).		0% – 100%
▪ Schnittstellen (Regelung)	Wie einfach lassen sich die Komponenten verbinden und steuern.		0% – 100%
▪ Montierbarkeit	Wie einfach und schnell lässt sich das Kühlsystem installieren und in Betrieb nehmen.		0% – 100%
<b>Wirtschaftlichkeit</b>			
▪ Investitionskosten	Amortisation der Investitionskosten der je nach Konfiguration verschiedenen Komponenten, respektive der zusätzlich erforderlichen Komponenten, inkl. der Möglichkeit bestehende Installationen doppelt zu verwenden z.B. Speicherkapazitäten, Verteilsysteme.	1/2	0% – 100%
▪ Betriebskosten	Hauptsächlich die Brennstoff-(Gas)- und Elektrizitätskosten, welche über den Gesamt-Wirkungsgrad zu den entsprechenden Energiekosten umrechenbar sind. Die Nettostromproduktion des SOFC Systems wird zu Marktpreisen vergütet.		
▪ Unterhaltskosten	In geschätzten % der Investitionskosten. Die Unterhaltskosten werden pro Jahr unabhängig von den Betriebszeiten eingerechnet d.h. periodische Wartung ungetacht des effektiven Einsatzes.		
▪ Gesamtkosten	Summe obiger Kosten pro Jahr als quantitatives Vergleichsergebnis.		
▪ Sensitivität bezüglich verschiedener Parameter (positive Beurteilung aufgrund von Vorteilen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Betriebszeit</li> <li>○ Energiepreis (Strom, Gas)</li> <li>○ Amortisationszeitraum</li> <li>○ Kapital-Zins</li> </ul>	1/2	0% – 100%
<b>Markt</b>			
▪ Bedarf	Erwartete Marktgrösse im entsprechenden Segment (High-End Preisklasse für Villen, Banken und Spitäler.	Je 1/4 in der Summe	0% – 100%

Kriterium	Beschreibung	Gewichtung	Erfüllungsgrad
▪ Einsatzzeit	Beurteilung, ob die Kühlfunktion für die entsprechende Konfiguration überhaupt sinnvoll gebraucht wird. Dies anhand von der Anzahl Stunden pro Jahr in denen die Anlage voraussichtlich zum Kühlen in Betrieb ist.	= 1	0% – 100%
▪ Akzeptanz <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ CH, Tessin</li> <li>◦ ES</li> </ul>	Wie wird die entsprechende Konfiguration voraussichtlich in den Zielmärkten akzeptiert, vertreibbar sein.		0% – 100%
▪ Ökologie	Ökologische Aspekte unter anderem aufgrund des Wirkungsgrades, Einsatzes von ökologischeren Betriebsmittel.		0% – 100%

Tabelle 2: Beurteilungskriterien: Kriterium, Beschreibung, Gewichtung und %-Bereiche für den Erfüllungsgrad.

## 4.2 TECHNOLOGIE

### 4.2.1 Schlüsselkomponenten

In der Tabelle 3 sind die Schlüsselkomponenten zu den Systemvarianten aufgeführt. Falls mögliche Lieferanten dieser Bauteile bekannt sind werden diese genannt und ein Schätzpreis wird angegeben.

Komponenten-Bezeichnung	Hersteller	Preis/Stk [CHF]	Beschreibung
<b>WA1 (Wärmeauskopp lung)</b>			
▪ Wärmetauscher	Gastec	2'000.-	HTLRN2, Pumpe, Schätzung, Siehe [7, 8]
▪ Wärmetauscher	Gastec	2'500.-	HTLRN3, Pumpe, Schätzung, Siehe [7, 8]
<b>WKT (Kältemaschine)</b>			
▪ AKM (1-stufig)	Climatewell / Phönix / Broad	30000.-	HTWR, knapp verfügbar. Schätzung des Preises ausgehend vom Preis einer 10 kW AKM auf 12 kW
▪ AKM (2-stufig)	Broad	30000.-	HTLRN2, 2-stufige AKM nicht verfügbar. Schätzung des Preises ausgehend von einer 1-stufigen AKM.
▪ AKM (3-stufig)	Broad	45000.-	HTLRN3, 3-stufige AKM nicht verfügbar. Schätzung des Preises ausgehend von einer 1-stufigen AKM.
<b>WKT (Kältemaschine)</b>			
▪ Kompressormaschine	Air 2000 GmbH	15000.-	Referenz, 12 kW / 7°C / 35°C
<b>KV (Kälteverteilung)</b>			
▪ 2-Leister-System	NN	10.-	Annahme: Ein Systemteil für die Kälteverteilung ist vorhanden, respektive muss analog auch beim Referenzsystem installiert werden, d.h. diese Komponente ist nicht Differenzkosten wirksam.
<b>Ksp (Kältespeicher)</b>			
▪ Tank / Behälter	NN	10.-	Annahme: Wie Kälteverteilung (KV)

Tabelle 3: Schlüsselkomponenten zum Aufbau der Systemvarianten.

Weitere Details, auch zum Referenzsystem, und Grundlagen zur Berechnung der Kosten sind im Anhang A.06: Verfügbare Systemkomponenten – Spezifikationen sowie Anhang A.07 Berechnung der Amortisations-, Betriebs-, und Unterhaltskosten aufgelistet.

### 4.2.2 Beurteilung der Technologie

Da zum Zeitpunkt der Arbeit für die Varianten HTLRNx und HTWR keine definitiven technischen Daten vorliegen, wurde zur Beurteilung der Kriterien, wie Reife, technische Machbarkeit, Komplexität, ... (siehe Abschnitt 4.1.6) – auf die Expertenmeinungen und die zur Verfügung stehenden Informationsquellen (siehe Anhang A.04, Informationsquellen zu Technik, Wirtschaftlichkeit und Markt) abgestützt. Die **efektive**-Objektivität der Beurteilung kann aber noch verbessert werden.

## 4.3 WIRTSCHAFTLICHKEIT

### 4.3.1 Vorgehen zur Berechnung der partiellen, jährlichen Kosten

Für die Beurteilung der wirtschaftlichen Aspekte sind im Anhang A.07 Berechnung der Amortisations-, Betriebs-, und Unterhaltskosten, die wichtigsten Gleichungen und verwendeten Daten sowie eine Zusammenstellung der Kosten gegeben.

Hierbei handelt es sich nicht um Kosten für ein Gesamtsystem, sondern um die **Kosten für die unterschiedlichen Teilsysteme, welche bei den jeweiligen Konfigurationen unterschiedlich** sind. D.h.: Gleiche oder aufgrund des Heizens vorgegebene Systemteile, wie die Wärmequelle WQ sind bezüglich der Investitionen und Unterhaltskosten nicht in die Betrachtung einbezogen.

Aus den resultierenden **Kostendifferenzen**, der für die Kühlfunktion zusätzlich erforderlichen Komponenten, lässt sich ein entsprechender **Amortisationsbeitrag** für das jeweilige Heizsystem ableiten. Diese partielle Betrachtungsweise gestattet eine erste, vereinfachte Beurteilung der Wirtschaftlichkeit. Berücksichtigt wurden die Investitions-, Betriebs- und Unterhaltskosten.

### 4.3.2 Vorgehen zur Sensitivitätsanalyse

Über eine **Parametervariation** wurde die Sensitivität bezüglich verschiedener Parameter wie Betriebszeit, Amortisationszeitraum, Energiepreis (Strom, Gas, Einspeisevergütung) und Kapital-Zins eruiert.

Die Parameter-Grunddaten für die Sensitivitätsanalyse und die Variationsbereiche sind in Tabelle 4 zusammengestellt (in allen nun folgenden Tabellen orange hinterlegt, in Diagrammen mit einem orangen Strich markiert). Im Anhang A.07 Berechnung der Amortisations-, Betriebs-, und Unterhaltskosten und im Anhang A.08 Strom-, Gas- und Einspeisepreise sind dazu ausführlichere Angaben zu finden. Die Grunddaten sind immer gültig, wenn nichts anderes angegeben wird.

Parameter	Grunddaten	Variation -->				pot. Lösung
Amortisationszeit [Jahre]	15	10	15	20	25	20
Kapitalzins [%]	7	3	5	7	9	6
Betriebsstunden [h/a]	3000	0	3000	6000	9000	3000
Strompreis [CHF/kWh]	0.20	0.07			0.20	0.20
Gaspreis [CHF/kWh]	0.07	0.05	0.07	0.10	0.15	0.08
Einspeisevergüt. [CHF/kWh]	0.15		0.10	0.15	0.20	0.19

Tabelle 4: Parameterwerte: Grunddaten (orange), Variationsbereiche (weiss) und potentielle Lösung (blau).

#### Bemerkung zu den Energiepreisen:

Um zu zeigen, wo die Grenzen der Wirtschaftlichkeit liegen, wurde für die Grunddaten des **Strompreises ein eher hoher Wert** von 0.20 CHF/kWh (Nachfragermarkt in den Zeiten erhöhten Kühlbedarfes) und für die Grunddaten des **Gaspreises ein eher tiefer Wert** von 0.07 CHF/kWh angenommen. Der Wert von 0.15 CHF/kWh für die Einspeisevergütung ist ebenfalls ein eher hoher Wert. Praktisch kann aber ein Wert so hoch wie der Einkaufspreis für Strom angenommen werden, wenn der selbstproduzierte Strom intern verbraucht werden kann, d.h. die entsprechende Zukaufsmenge entfällt.

Ebenfalls in Tabelle 4 zu sehen sind die Werte, bei welchen eine **potentielle Lösung**, d.h. ein Amortisationsbeitrag zu resultieren scheint (in Tabellen blau hinterlegt, in den Diagrammen in Abschnitt 4.3.3 mit einem blauen Kreis markiert). Hierbei wurden ausgehend von den Grunddaten die Werte in die optimale Richtung moderat angepasst / korrigiert.

### 4.3.3 Partielle, jährliche Kosten

Die Tabelle 5 enthält die resultierenden, partiellen Kosten pro Jahr der untersuchten Fälle für die **Grunddaten** gemäss Tabelle 4.

[CHF/a]	Amortisation	Betriebskosten	Unterhaltskosten	Total
Referenz	1814	3089	308	5211
HTLRN2	4228	1155	644	6027
HTLRN3	5930	1019	949	7898

Tabelle 5: Mit den Grunddaten bestimmte partielle, jährliche Kosten der untersuchten Varianten.

Bezogen auf den Referenzfall (State-of-the-Art Splitgerät) resultiert kein Amortisationsbeitrag. Das System mit zweistufiger AKM (HTLRN2) hat 15%, dasjenige mit dreistufiger AKM (HTLRN3) sogar 52% höhere Kosten.

Der Referenzfall hat aufgrund geringer Investitionen tiefe Amortisations- und Unterhaltskosten. Einen hohen Anteil haben jedoch die Betriebskosten, welche linear von der Betriebszeit und dem Strompreis abhängen.

Bei den Varianten HTLRNx sind die Verhältnisse umgekehrt. Bei beiden sind die Amortisation der höheren Investitionen und die zu erwartenden Unterhaltskosten hoch.

Nachfolgende Tabelle 6 zeigt die partiellen, jährlichen Kosten der untersuchten Varianten für die **potentiellen Lösung**.

[CHF/a]	Amortisation	Betriebskosten	Unterhaltskosten	Total
<b>Referenz</b>	1440	3089	308	<b>4837</b>
<b>HTLRN2</b>	3357	836	644	<b>4837</b>
<b>HTLRN3</b>	4709	782	949	<b>6440</b>

Tabelle 6: Mit den Daten für die potentielle Lösungsvariante bestimmte partielle, jährliche Kosten.

Ein **Amortisationsbeitrag scheint für die Variante HTKRN2 möglich**, wenn die Amortisationszeit auf 20 Jahre erhöht wird, günstiges Kapital eingesetzt werden kann (Zins 6%), sowie z.B. der selbst-erzeugte Strom den Eigenbedarf deckt, d.h. die entsprechende Strom-Zukaufsmenge entfällt.

#### 4.3.4 Sensitivitätsanalyse

A. Sensitivität: Kosten-Betriebsstunden sowie Strom- und Gaspreis

Nachfolgendes Diagramm (Fig. 4) zeigt die Sensitivität der Kosten bezüglich der Anzahl Betriebsstunden pro Jahr.

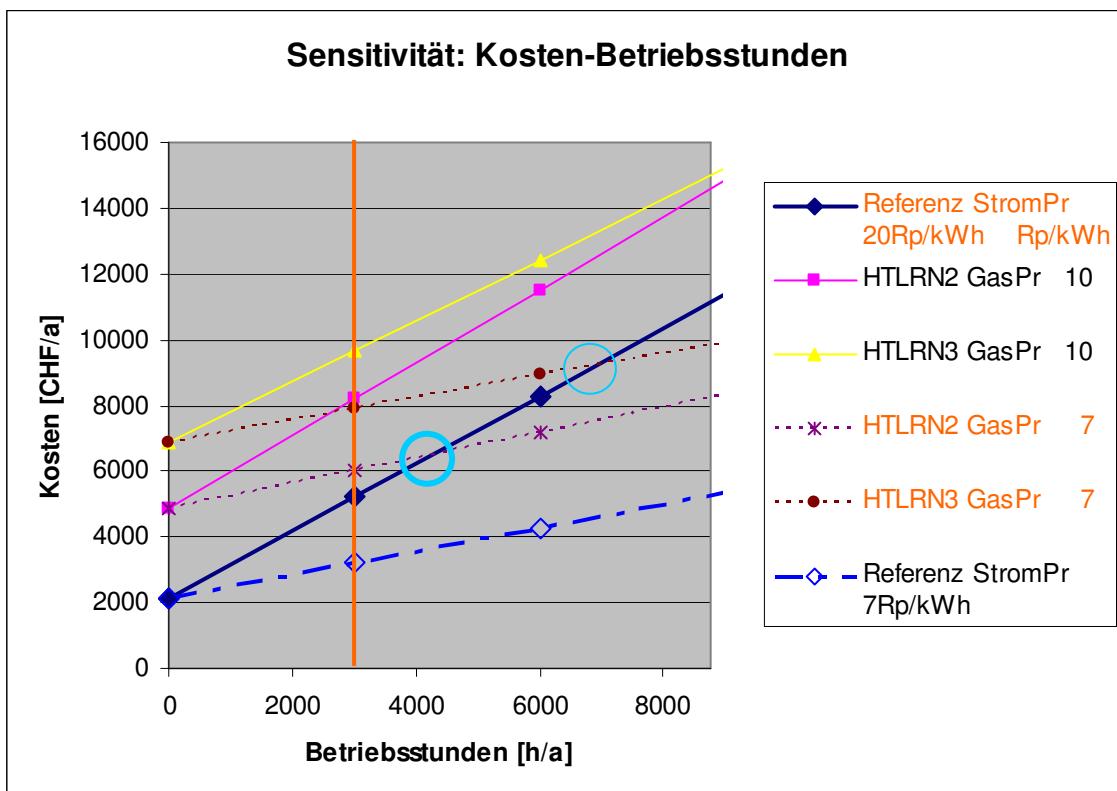


Fig. 4: Sensitivität der Kosten bezüglich Anzahl Betriebsstunden pro Jahr mit den Parametern Strom- (StromPr) und Gaspreis (GasPr: 7 und 10 Rp/kWh).

Ein Amortisationsbeitrag scheint bei Annahme der Grunddaten für die Variante HTLRN2 ab einer Betriebszeit von etwa 4000 [h/a] (hellblauer, dicker Kreis) und für die Variante HTLRN3 ab etwa 7000 [h/a] Betriebszeit möglich (hellblauer, dünner Kreis).

Die schleifenden Schnitte der Kurven in Fig. 4 für die Referenz- bzw. die HTLRN2/3 Varianten zeigen einen starken Anstieg der erforderlichen Betriebszeit bei tieferen Strompreisen (7 Rp/kWh) oder höheren Gaspreisen (10 Rp/kWh). Entsprechend ergibt sich im umgekehrten Fall der Preisentwicklung eine starke Reduktion der erforderlichen Betriebszeit.

Realistisch für die Standorte Tessin (Norditalien) und Spanien sind Betriebszeiten um 2'500 h/a bzw. 5'000 [h/a] (siehe Abschnitt 4.4.2 Vollaststunden – Komfort Bedarf, 3000 [h/a] = Grunddaten).

#### B. Sensitivität: Gaspreis und Einspeisevergütung zu Strompreis

Nachfolgende Grafik (Fig. 5) zeigt die Sensitivität der Kosten auf die Verhältnisse Gaspreis zu Strompreis und Einspeisevergütung zu Strompreis.

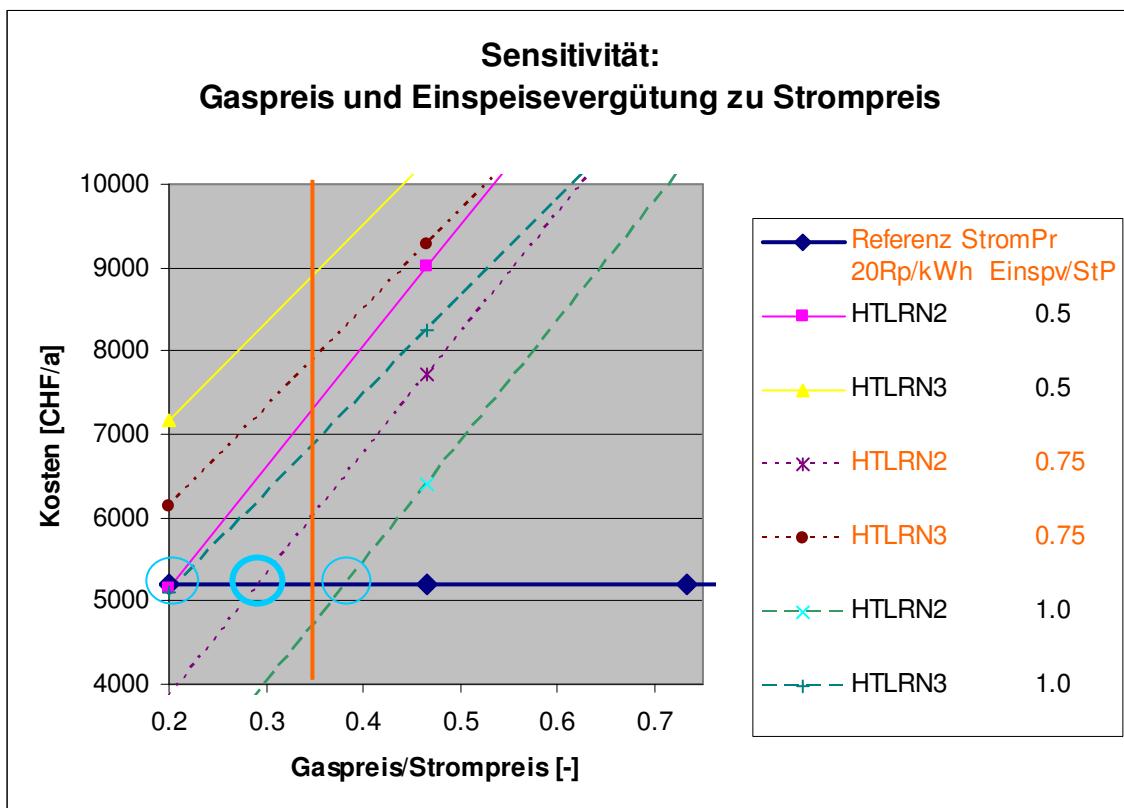


Fig. 5: Sensitivität der Kosten bezüglich der Verhältnisse Gaspreis zu Strompreis und Einspeisevergütung zu Strompreis.

Unter Annahme der Grunddaten scheint die Variante HTLRN2 ab einem Gaspreis zu Strompreis Verhältnisse von 0.3 ein Amortisationsbeitrag zu generieren (hellblauer, dicker Kreis). Kann der selbstproduzierte Strom intern verbraucht werden, was einem Einspeisevergütung zu Strompreis Verhältnis von 1 entspricht, scheinen die Variante HTLRN3 ab einem Gaspreis zu Strompreis Verhältnisse von 0.2 und die Variante HTLRN2 bereits ab 0.2 ein Amortisationsbeitrag zu generieren (hellblaue, dünne Kreis).

Die Kurven in Fig. 5 zeigen eine starke Abhängigkeit der Kosten von den Energiepreisen und der Einspeisevergütung, resp. von den entsprechenden Verhältnissen daraus.

#### C. Sensitivität: Kosten-Amortisationszeit und Gaspreis

Nachfolgendes Diagramm (Fig. 6) zeigt die Sensitivität der Kosten auf eine Variation der Amortisationszeit und des Gaspreises.

Die höheren Investitionskosten der Varianten HTLRNx können durch eine lange Abschreibungszeit ausgeglichen werden. Unter Annahme der Grunddaten bräuchte es eine Amortisationszeit von etwa 30 Jahren um für die Variante HTLRN2 in den Bereich eines Amortisationsbeitrages zu gelangen

(hellblauer, dünner Kreis ausserhalb des Diagramms). Bei einem Gaspreis von 5 [Rp/kWh] reicht hingegen bereits eine Amortisationszeit von 10-12 Jahren (hellblauer, dicker Kreis). Insgesamt spielt die Amortisationszeit eine untergeordnete Rolle für das Realisierungspotential.

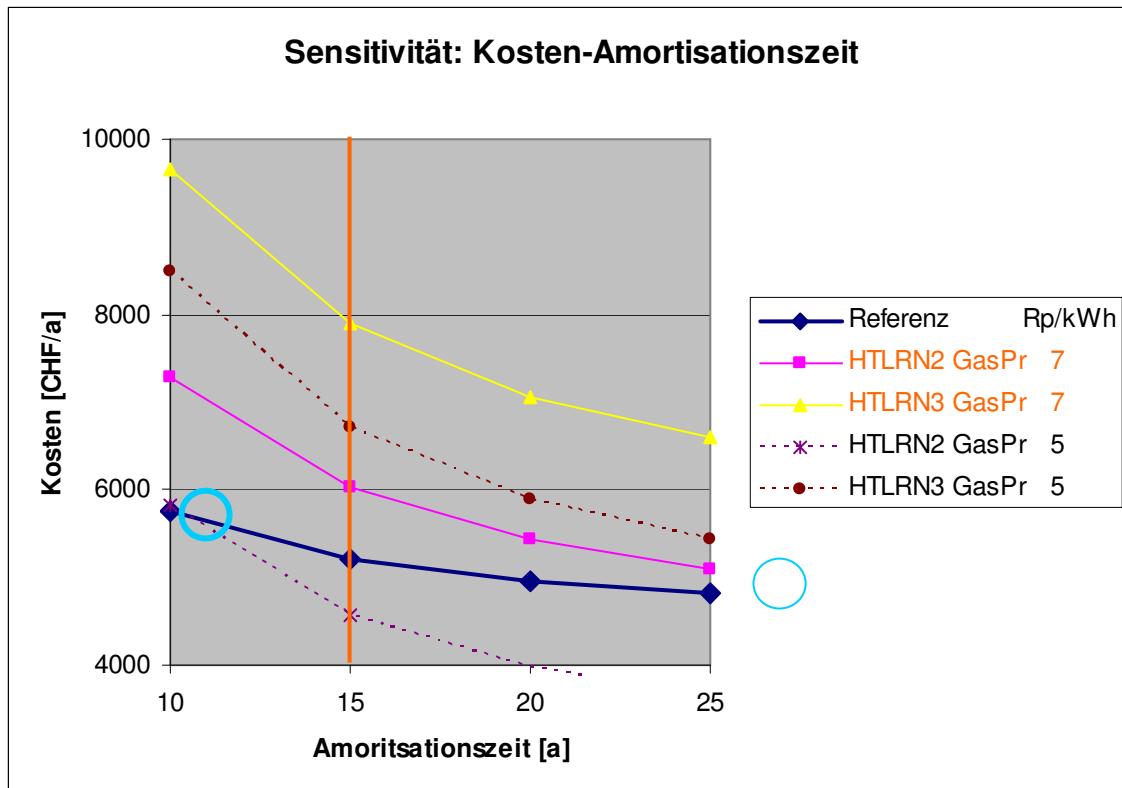


Fig. 6: Sensitivität der Kosten bezüglich einer Variation der Amortisationszeit und des Gaspreises.

#### D. Sensitivität: Kosten-Kapitalzins

Nachfolgende Grafik (Fig. 7) zeigt die Sensitivität der Kosten bezüglich der Kapitalkosten (Kapitalzinsen).

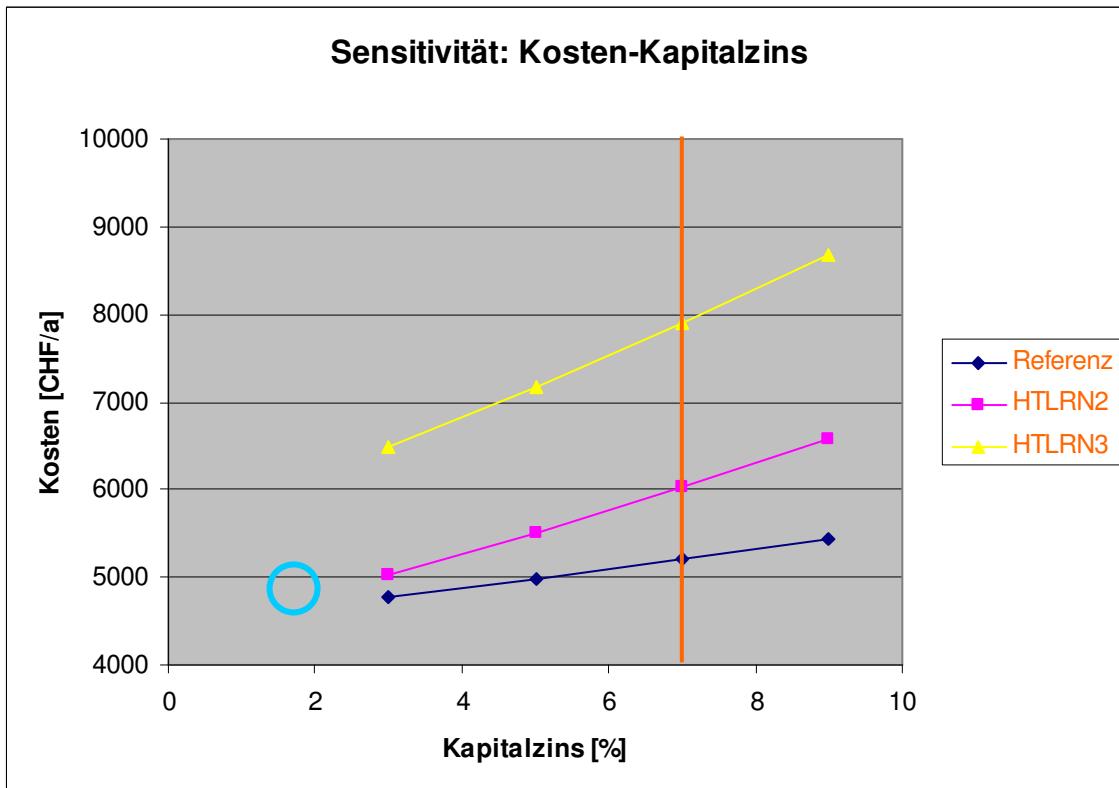


Fig. 7: Sensitivität der Kosten bezüglich der Kapitalzinsen.

Die höheren Investitionskosten der Variante HTLRN2 im Vergleich zur Referenzvariante können durch tiefere Kapitalzinsen ausgeglichen werden. Unter Annahme der Grunddaten bräuchte es einen Kapitalzins von etwa 2% und tiefer um in den Bereich eines Amortisationsbeitrages zu gelangen (hellblauer, dicker Kreis).

Die Kapitalzinsen spielen jedoch eine untergeordnete Rolle für das Realisierungspotential.

#### E. Zusammenfassung der Sensitivitätsanalyse

Die erforderlichen **Betriebszeiten** wo ein Amortisationsbeitrag möglich zu sein scheint, liegen im Tessin für die Variante HTLRN2 mit 3'000-4'000 h/a eher zu hoch (2'500 h/a). Hingegen liegen sie aber in Spanien, wo durchaus Kühlbetriebszeiten von 5'000 h/a denkbar sind, in einem wirtschaftlichen attraktiven Bereich, (siehe Abschnitt 4.4.2 Vollaststunden – Komfort Bedarf).

Die aktuell breit diskutierte und gemäss Modellrechnungen zu erwartende globale Temperaturerhöhung (Klimaveränderung / Erwärmung) könnte als äusserer Parameter mittelfristig längere Kühlbetriebszeiten erfordern. Wobei allerdings eher das zunehmende Komfortbedürfnis der Menschen als „innerer Parameter“ Potential schafft.

Für eine kurzfristige Umsetzung dieser Varianten wäre das Realisierungspotential in einem Markt mit noch längeren Kühlperioden, wie es sie z.B. im nahen Osten gibt, zu untersuchen.

Die Abhängigkeit der Kosten von den **Energiepreisen** und der **Einspeisevergütung**, resp. von den entsprechenden Verhältnissen ist gross. Vor allem Märkte/Regionen mit einem tiefen Gas- zu Strompreis Verhältnis (<0.35) sind sehr vielversprechend, da dann billig „Gas in Kälte“ gewandelt werden kann, wogegen das Referenzsystem unter dem hohen Strompreis leidet. Wichtig dabei ist, dass der eigen produzierte Strom möglichst selbst verbraucht wird oder eine entsprechende Einspeisevergütungen (> 0.75 \* Strompreis) von den Stromnetzbetreibern resultiert.

Bei den Varianten HTLRNx sind die **Amortisationskosten** und die zu erwartenden **Unterhaltskosten** besonders aufgrund der Investition für die WKT (Wärme-Kälte-Transformation) noch sehr hoch. Hier sind den auch Ansätze zur Kostenreduktion zu suchen.

Speziell bei der Variante HTLRN3 können die zu erwartenden mehr als 3 mal höheren Investitionskosten nicht mehr durch die Senkung der variablen Kosten (Unterhalt und Betrieb) kompensiert werden. Diese Variante scheidet daher zur Zeit als nicht amortisierbares System aus.

Die Amortisationszeit und der Kapitalzins sind für die Verbesserung des Realisierungspotentials subsidiäre zu beachten.

#### 4.3.5 Patente, Barrieren

Noch sind keine Patente gefunden worden, in welchen das gleiche Konzept beschrieben ist. Hingegen gibt es eine Japanische Patentanmeldung in welcher die Brennstoffzelle als Wärmequelle zum Betrieb einer Dampfstrahlpumpe, welche wiederum das Kältemittel fördert, eingesetzt werden soll. In allen anderen Patentveröffentlichungen wird die Nutzung der elektrischen Energie aus der Brennstoffzelle zum Betrieb einer Kompressorkältemaschine beschrieben. Weitere einschlägige Dokumente beschreiben die Wärmeauskopplung (WA 1) aus einer Brennstoffzelle über einen speziellen Wärmeübertrager. Es sind folgende Patente zu nennen:

Brennstoffzelle:

- PATENT ABSTRACTS OF JAPAN 2005172352 A. AIR CONDITIONER FOR MOVABLE BODY. Date of filling: 11. 12. 03. Date of publication of application: 30. 06. 05. JFE ENGINEERING KK (JP).
- EUROPEAN PATENT APPLICATION: EP 1 750 319 A1. Fuel Cell Power Generating Refrigerator System. Date of filing: 10. 03. 2005, Date of publication: 07. 02. 2007. Daikin Industries, Ltd. Osaka-shi, Osaka 530-8323 (JP).

Wärmeübertrager:

- DE 103 24 463 B4 Deutsches Patent, 24. 03. 2005. EAW Energieanlagenbau GmbH, Westenfeld DE [7]
- EP 0 949 466 A1 Europäische Patentanmeldung. Rinnai Kabushiki Kaisha, Nagoya-shi JP, 29. 10. 1997 [8]

Da wir kein zusätzlichen Kosten oder gar Realisierungsbarrieren aufgrund von Patenten erwarten, wurde dieses Kriterium nicht weiter in die Beurteilung mit einbezogen.

## 4.4 Markt

#### 4.4.1 Marktzahlen

Aktuelle, effektive Marktzahlen in diesem Bereich sind schwierig zu eruieren, insbesondere, da die Märkte aufgrund von klimatischen Veränderungen und neuen technischen Möglichkeiten in stetigem Um- und Aufbruch sind.

Aus [12, 13, 15] sind folgende Werte für den **Spanischen Markt** für die Jahre **1996-2020**, (<12kWth) eruierbar:

- 1.3-79 Mio. genutzter Systeme (→ sehr hohe Zuwachsraten).
  - Single-Split-Geräte haben einen Anteil von 70-80%.  
Mulit-Split-Geräte haben einen Anteil von 0-20% an den neu verkauften Geräten.
  - In Spanien und in Frankreich wird mit den insgesamt höchsten Verkaufszahlen von Klimageräten gerechnet.
  - „...Aus der steigenden Nachfrage von Multi-Split-Klimageräten lässt sich darauf schliessen, dass sich eine zunehmende Zahl von Wohnungs- bzw. Eigenheimbesitzern dazu entschliessen wird, grössere Systeme zur Klimatisierung des Wohnbereichs zu installieren, woraus im Einzelfall auch das Interesse an einer gekoppelten Strom- und Kälteerzeugung resultieren könnte....“ [15].

Daraus lässt sich ableiten, dass bei einer Amortisationszeit von ca. 15 Jahren und einem Marktanteil von z.B. 1% **900-53'000 Systeme** (= 1.3-79 Mio Systeme /15 \*0.01) pro Jahr absetzbar sein könnten.

Für das **Tessin** konnten bisher, auch beim BFE, keine Marktzahlen für Klimaanlagen (Single-Split-Geräte) gefunden werden. Eine einfache Schätzung lässt sich ausgehend von den Spanischen Zahlen über die Einwohnerzahl machen:

Einwohner: Tessin 333'0000 / Spanien 41 Mio Verhältnis: 1/123 = 0.8%

Daraus lässt sich extrapolieren, dass die Größenordnung der absetzbaren Geräte bei ca. **7-430 Systeme** liegen könnte (1996-2020, 1% Marktanteil, 15 Jahren Amortisationszeit).

#### 4.4.2 Vollaststunden – Komfort Bedarf

Folgende Vollaststunden pro Jahr werden in [15 S.43] genannt:

- Norditalien 615 h/a
  - Spanien Nord/Süd 143/1049 h/a
  - „...Bei Luftkühllanlagen in Gewerbe- oder Büroräumen ist von einer drei- bis vierfachen Vollaststundenzahl auszugehen, womit sich die Voraussetzungen für eine Amortisation der Anlage oder zumindest für einen kostengünstigen Betrieb verbessern...“

Daraus lässt sich ableiten, dass für den vorerst vorgesehenen Marktbereich (High-End Preisklasse, Villen, Banken und Spitäler) folgender Bedarf angenommen werden kann:

- Norditalien 615 h/a \*4 = 2460 h/a
  - Spanien Nord/Süd 143/1049 h/a \*4 = 72/4196 h/a

Ausgehend von den mit Polysun [10] berechneten Klimadaten in Anhang A.10 können für den Komfort-Bedarf folgende Betriebszeiten interpoliert werden:

- Tessin/Lugano: ca. 6.5 Monate Kühlen = 4'700 h/a (bei einem Bedarf von 12 kWh/m<sup>2</sup> pro Monat)
  - Spanien/Madrid: ca. 8 Monate Kühlen = 5'800 h/a (bei einem Bedarf von 16 kWh/m<sup>2</sup> pro Monat)
  - Spanien/Almeria: ca. 10 Monate Kühlen = 7'300 h/a (bei einem Bedarf von 16 kWh/m<sup>2</sup> pro Monat)

Somit kann in erster Näherung für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit und der Annahme eines zunehmenden Komfortbedürfnisses, von einer Betriebszeit einer Kühlmaschine zwischen 2'500h und 5'000h im Jahr ausgegangen werden.

#### 4.4.3 Zusammenfassung Markt

Im spanischen Markt scheint es ein beachtliches Absatzpotential zu haben. Den Kanton Tessin hingegen stufen wir eher als geografisch nahen Testmarkt ein. Dazu gäbe es aber eine naheliegende Ausweitung der Markt-Aktivitäten nach Norditalien.

Zu erwarten ist, dass sämtliche EU-Süd Märkte, vorab Spanien, Portugal, Südfrankreich, Italien, Griechenland, zusammen ein sehr vielversprechendes (Nischen-) Marktpotential bieten, sofern diese bearbeitet und bedürfnisgerecht bedient werden können.

#### 4.5 Beurteilungen

Basierend auf den in den vorhergehenden Abschnitten erläuterten Informationen und Überschlagsberechnungen kann nun die Bewertung der Varianten nach den Kriterien von Abschnitt 4.1.6 vorgenommen werden. Nachfolgende Tabelle 7 zeigt die Bewertung gemittelt über alle Experten.

	Variante	Referenz	HTLRN2	HTLRN3	HTWR
Mittel	Mittel - all	71%	55%	52%	52%
Techn.	Techn. - all	83%	43%	36%	35%
Wirtsch.	Wirtsch. - all	58%	58%	58%	56%
Markt	Markt - all	73%	65%	61%	64%

Tabelle 7: Bewertung der verschiedenen Varianten durch die Experten anhand der vorgegebenen Kriterien.

In Fig. 8 sind obige Beurteilungswerte zusammengefasst in einer Grafik dargestellt. Die Grafik zeigt die Bewertung gemittelt über alle Experten zur Technik, Wirtschaftlichkeit und zur Marktchance sowie einen Mittelwert aus diesen drei Bereichen zu den Varianten. Die Unsicherheiten sind als „Fehlerbalken“ eingezeichnet.

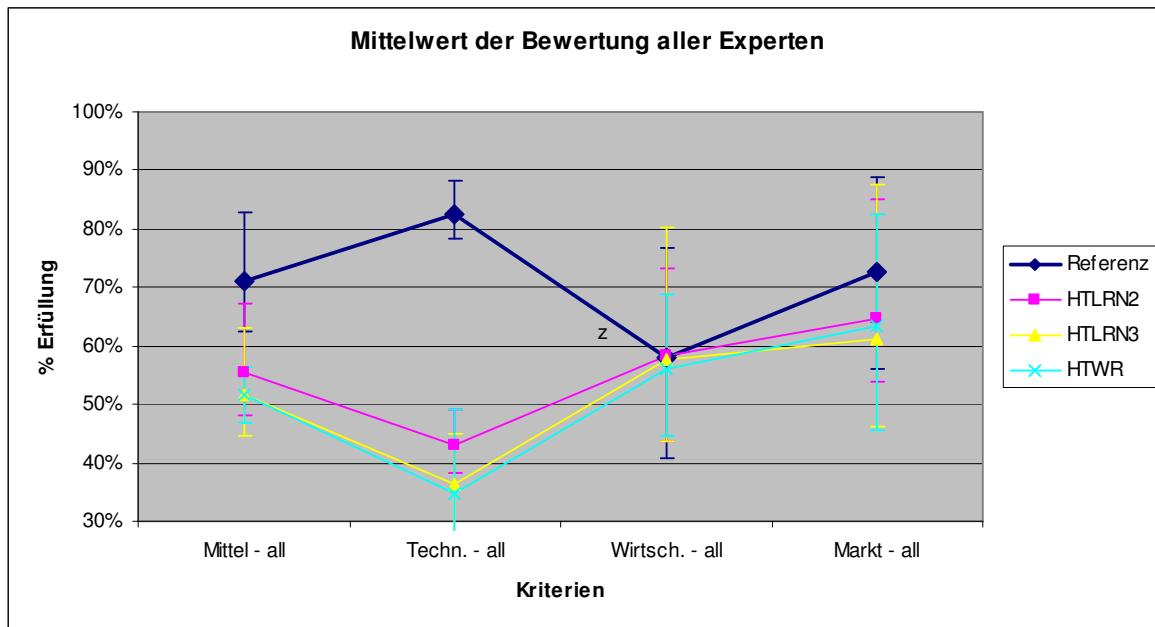


Fig. 8: Darstellung der Variantenbewertung durch die Experten nach den Kriterien von Abschnitt 4.1.6.

Aus der Beurteilung kann folgendes Fazit geschlossen werden:

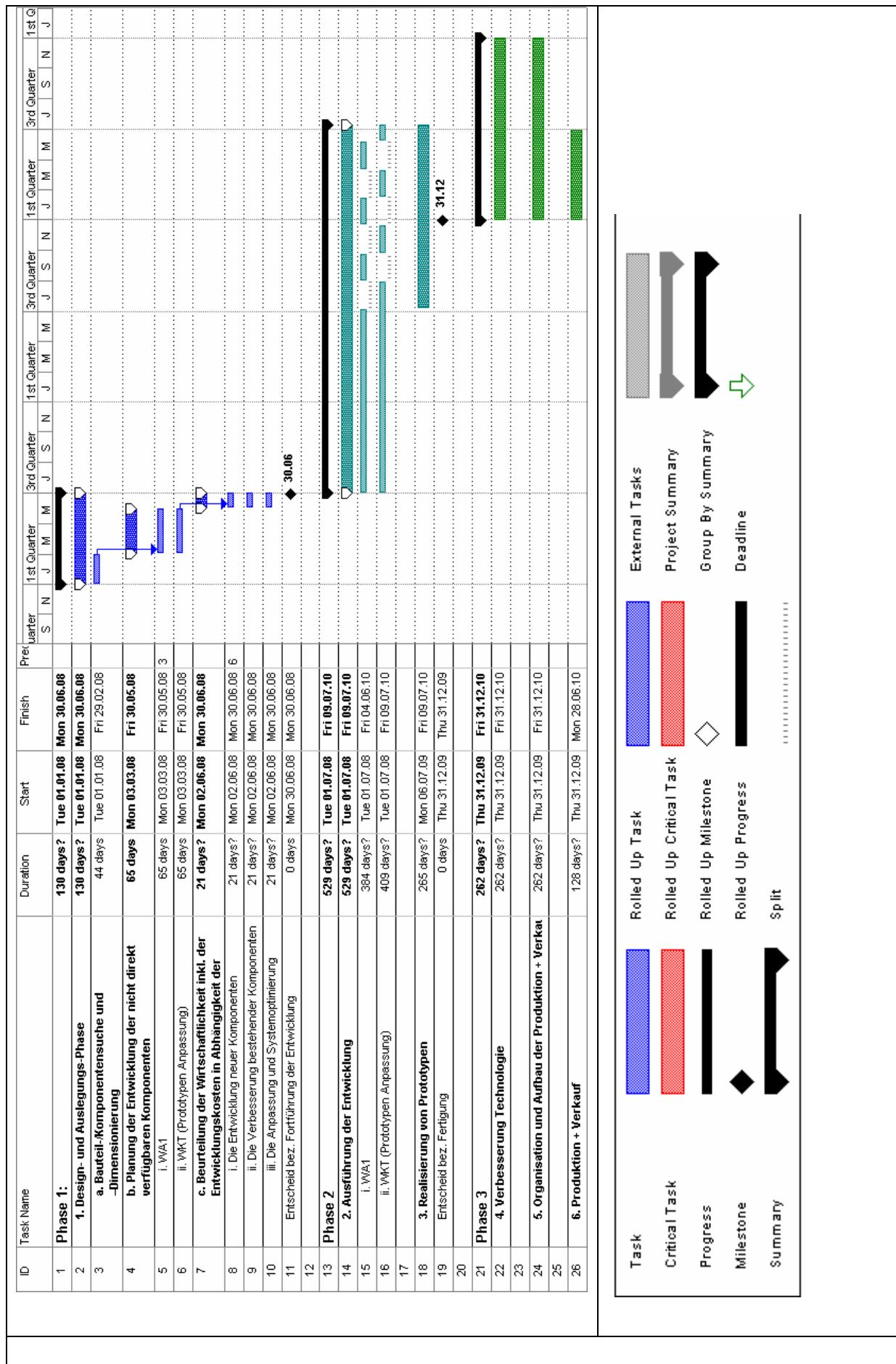
- Die Referenzvariante wird von allen Experten mit den besten **Realisierungschancen** eingeschätzt. Die Variante HTLRN2 hat im Mittel die zweitbesten Realisierungschancen, dicht gefolgt von den anderen Varianten. Die Unterschiede zum Referenzsystem sind erheblich, aber es wird den neuen Varianten durchaus eine Chance eingeräumt. Allerdings ist hier noch eine Diskussion zu den Abweichungen notwendig.
- Alle Experten bewerten die **neuen Varianten** ähnlich.

- Die **Wirtschaftlichkeit und die Marktchancen** der neuen Varianten werden zwar tiefer aber relativ zu einander vergleichbar wie im Referenzfall beurteilt.
- Die Technik wird mit Skepsis beurteilt. Hier ist der grösste Unterschied zum Referenzsystem auszumachen. Die Kriterien **Reife und Verfügbarkeit** werden hier wesentlich tiefer **als bei** der Referenzvariante bewertet. Hier besteht ebenfalls ein Klärungsbedarf ob nur die AKM oder auch die Brennstoffzelle in die Bewertung eingeflossen ist. Die anderen Kriterien wie technische Machbarkeit, Montierbarkeit, Schnittstellen und Komplexität werden nur wenig schlechter als im Referenzfall beurteilt.

Zusammengefasst besteht aufgrund der Bewertung besonders für die Variante HTLRN2 (Hochtemperatur – Luft – Retrofit- und Neubau-Bereich mit 2-stufiger Kältemaschine) durchaus ein mittelfristiges Realisierungspotential. Bedingungen hierzu sind, dass die entsprechenden technischen Fragestellungen noch gelöst und aufgrund des Economy of Scale die Herstellungskosten und als Folge davon die Investitionskosten gesenkt werden.

## 4.6 Umsetzungs-Roadmap

Msp Für die Variante HTLRN2 ist ein Projektzeitplan mit 3 Phasen zur Umsetzung ausgearbeitet worden.



## 5. Symbolverzeichnis

Symbol / Abkürzung	Beschreibung
AKM	Absorptionskältemaschinen
BZ	Brennstoffzelle
DEC	Desiccant cooling system
HTLRN	Hoch-Temperatur – Luft – Retrofit- und Neubau-Bereich
HTWR	Hoch-Temperatur – Wasser – Retrofit-Bereich
KA	Kälte-Auskopplung
KA a	Kälte-Auskopplung von der Wärme-Kälte-Transformation WKT zum Kälte-Speicher KSp
KA b	Kälte-Auskopplung vom Kälte-Speicher KSp zur Kälte-Verteilung KV
KEB	Kühlenergie-Bedarf [kWh]
KKM	Kompressor-Kältemaschine
KLKB	Kälteleistungs-Bedarf [kW]
KSp	Kälte-Speicher
KV	Kälte-Verteilung
LTLRN	Tief-(low)-Temperatur – Luft – Retrofit- und Neubau-Bereich
LTWR	Tief-(low)-Temperatur – Wasser – Retrofit-Bereich
<u>Q</u>	Energiestrom / Leistung [kW], chemisch, elektrisch, in den Emissionen-, Nutzwärme, Abwärme, Kälte
SG-KKM	Splitgerät / Kompressor-Kältemaschine
WA	Wärme-Auskopplung
WA 1	Wärme-Auskopplung von der Wärme-Quelle WQ zum Wärmetauscher WT und oder zur Wärme-Kälte-Transformation WKT
WA 2	Wärme-Auskopplung von der Wärme-Kälte-Transformation WKT zur Wärme-Senke WS
WA 3a	Wärme-Auskopplung vom Wärmetauscher WT zum Wärme-Speicher WSp
WA 3b	Wärme-Auskopplung vom Wärme-Speicher WSp zum Wärme-Verteiler WV
WKT	Wärme-Kälte-Transformation
WLB	Wärmeleistungs-Bedarf [kW]
WQ	Wärme-Quelle
WS	Wärme-Senke
WSp	Wärme-Speicher
WT	Wärme-Tauscher / Wärmeübertrager
WV	Wärme-Verteilung

Tabelle 8: Im Text und den Grafiken verwendete Abkürzungen und Symbole.

## 6. Referenzen

- [1] Schramek, **Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 05/06**, 72. Auflage. Recknagel, Sprenger, Oldenburg Industrieverlag München, 2005.
- [2] Hans-Martin Henning (Ed.), **Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings - A Handbook for Planners**, Springer 2004 ISBN 3-211-00647-8.
- [3] S. Biel WILO AG, **Energieeffiziente Kaltwasserverteilung**, VDI-Tage Gebäudetechnik Heizungs- und Raumlufttechnik, VDI-Berichte 1921, 2006.
- [4] **Thermische Solarenergie**, 16. Symposium, Tagungsband, Ostbayrisches Technologie-Transfer-Institut (OTTI) Regensburg, 2006.
- [5] **Solares Kühlen in der Praxis**, Tagungsband, Band 65, HfT Stuttgart, 2004.
- [6] **Absorptionskälteanlage mit Hochtemperatur-Brennstoffzelle. Innovationspreis für Planung, Forschung und Entwicklung**, [www.asue.de/preis\\_2004.htm](http://www.asue.de/preis_2004.htm).
- [7] Deutsches Patent, **DE 103 24 463 B4**, 24. 03. 2005. EAW Energieanlagenbau GmbH, Westenfeld DE.
- [8] Europäische Patentanmeldung **EP 0 949 466 A1**, Rinnai Kabushiki Kaisha, Nagoya-shi JP, 29. 10. 1997.
- [9] W. Frank, **Raumklima und thermische Behaglichkeit**, Berichte aus der Bauforschung, Heft 104, Berlin 1975.
- [10] **Meteotest**, Meteonorm 5.1.
- [11] **Regeln für die „Kühllastberechnung“** Règles pour le „calcul des charges frigorifiques“. Verband Schweizerischer Heizungs- und Lüftungsfirmen / Association Suisse des Entreprises de Chauffage et de Ventilation ASCV.
- [12] M. Dupont, J. Adnot, **Inspection and auditing of air-conditioning facilities in Europe – A new efficiency target (2005)**. Center for Energy and Processes – Ecole des Mines de Paris, 60 boulevard Saint Michel – 75272 Paris Cedex 06 – France.  
[http://www.energyagency.at/projekte/auditac\\_publ.htm](http://www.energyagency.at/projekte/auditac_publ.htm).
- [13] J. Adnot, coordinator, **Energy Efficiency of Room Air-Conditioners (EERAC)**. Final report May 1999. Study for the Directorate-General for Energy (DGXVII) of the Commission of the European Communities. [http://www.ceecap.org/img\\_assets/File/EERAC.pdf](http://www.ceecap.org/img_assets/File/EERAC.pdf).
- [14] Kühlen mit der Sonne, Austria Solar, [www.solarwaerme.at/docs/162.pdf](http://www.solarwaerme.at/docs/162.pdf).
- [15] Th. Pfeifer, Kopplung von SOFC mit Klima-Kälte-Anlagen. Diplomarbeit bei der Sulzer Hexis AG, 2002.

## **Anhang**

### **A.1 Clip board of Kick-off Meeting**

Zu Beginn des Projektes wurde am Kick-off Meeting das Untersuchungsfeld eingegrenzt. So wurden die Leistungsklassen der Wärmequellen bestimmt, die Zielmärkte definiert und angedacht bei welchen Kombinationen von Kältemaschinentypen und Brennstoffzelle ein wirtschaftliches System gebaut werden könnte. Die Wärmequelle soll immer aus einer Anzahl  $n$  Brennstoffzellen-Grundmodulen bestehen, wobei  $n = 1, 4$  und grösser sein kann.

## A.2 Auslegungsdaten Galileo, Hexit AG

Die Grunddaten zur Brennstoffzelle von Hexit AG sind in Fig. A2.1 zusammengestellt. Weitere Informationen sind unter [www.hexit.com](http://www.hexit.com) Galileo – Brennstoffzellen-Heizgerät der nächsten Generation zu finden.

### Auslegungsdaten

Elektrische Leistung:	1 kW max.
Thermische Leistung Brennstoffzelle:	2,5 kW max.
Thermische Leistung Zusatzbrenner:	20 kW
Elektrischer Wirkungsgrad:	25–30% (Ziel: > 30%)
Gesamtwirkungsgrad:	ca. 85%
Brennstoffzellentyp:	Hexit SOFC

### Brennstoffaufbereitung

Entschwefelung:	nicht erforderlich
Reformierung:	CPO (Catalytic Partial Oxidation)

### Anschlussdaten

Brennstoff:	Erdgas, Netzdruck
Elektrischer Anschluss:	230 V AC, 50 Hz

### Abmessungen/Gewicht

Breite x Tiefe x Höhe:	55 x 55 x 160 cm
Platzbedarf:	3,0 m <sup>2</sup> (inkl. Serviceraum)
Gesamtgewicht installiert:	170 kg

Fig. A2.1: Grunddaten bzw. Auslegungsdaten der Hexit AG Brennstoffzelle (Ausschnitt aus dem Prospekt: Galileo - Brennstoffzellen-Heizgerät der nächsten Generation).

### A.3 Generische Einteilung von Air-Conditioning Systemen

Die zwei folgenden Grafiken zeigen die verfeinerte Einteilung der Raumklimatisierung an Hand der Kältemittel-Temperatur und der Kälteverteilung nach „Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings“ [2] sowie die Klassifikation raumlufttechnischer Anlagen (RLT-Anlagen) wie sie in der Heizungs- und Klimatechnik gemacht wird.

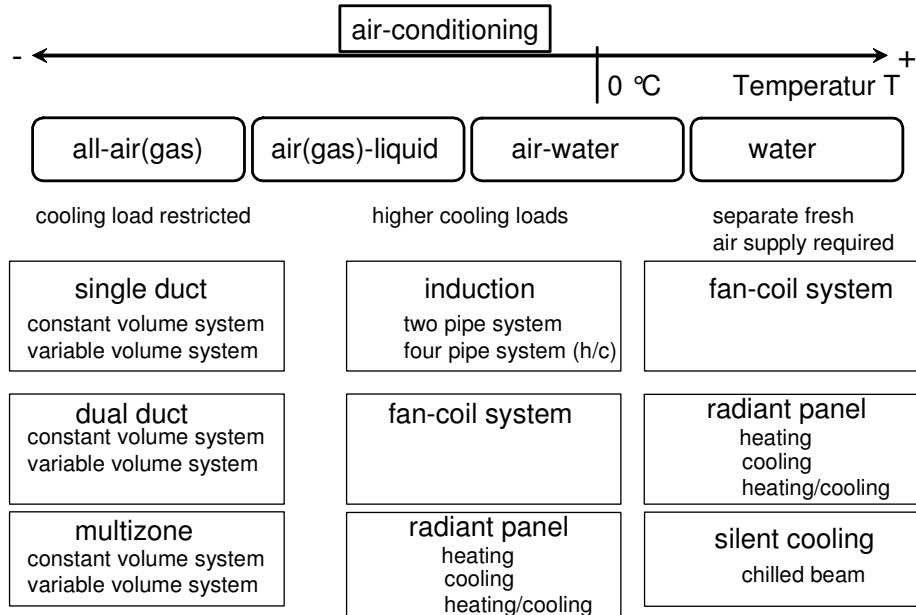


Fig. A3.1: Generische Einteilung von Klimatechniksystemen nach „Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings“. Leicht verfeinerte Version aus [2].

Tafel 3.1.3-1 Klassifikation von RLT-Anlagen nach der Lüftungsfunktion, thermodynamischen Behandlungsfunktion und Luftart

Thermodynamische Behandlungsfunktionen		RLT-Anlage	
Anzahl	Art	mit Lüftungsfunktion	ohne Lüftungsfunktion
keine		Lüftungsanlage AU, MI oder FO	Umluftanlage UM
eine	H K B E	Lüftungsanlage AU oder MI	Umluftanlage UM
zwei	HK	Teilklimaanlage AU oder MI	Umluft-Teilklimaanlage UM
drei	HKB HKE HBE KBE	Teilklimaanlage AU oder MI	Umluft-Teilklimaanlage UM
vier	HKBE	Klimaanlage AU oder MI	Umluft-Klimaanlage UM

Beispiel: HKBE-MI = Klimaanlage mit Lüftungsfunktion, mit den thermodynamischen Behandlungsfunktionen Heizen, Kühlen, Be- und entfeuchten und mit Mischluft (Außen- und Umluft)

Fig. A3.2: Klassifikation von raumlufttechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) wie sie in der Heizungs- und Klimatechnik gemacht wird [1].

## A.4 Informationsquellen zu Technik, Wirtschaftlichkeit und Markt

Für die Konzeptstudie wurden verschiedene Informationsquellen genutzt in Tabelle A4.1 ist eine Zusammenstellung. Um verfeinerte Daten zur Technik, zur Wirtschaftlichkeit und zum Markt zu bekommen arbeiteten wir einen Fragebogen aus. Der Fragebogen ist diesem Anhang beigefügt.

Was/Wann	An/Mit	Firma / Thema
<b>Fragebogen, Mail</b>	Namen Vornamen	Firma
16.01.2007 retour	E. Granwehr	AxAir / Service
10.03.2007 offen	A. Weber / NN	Amstein + Walther AG Zürich / Planung
Dez. 06 / Feb. 07	X. Garcia Casals	Aiguasol / Planung
Feb. 07 / Juni 07	P. Olofson	ClimateWell AB / Marketing
<b>Interview</b>	Namen Vornamen	Firma
08.03.2007 Telefon	A. Weber	Amstein + Walther AG Zürich / Planung
27.06.2007 Telefon	U. Jäggi	Soltop AG / Planung
<b>Weitere</b>	Stichwort	Was
Juni	Messebesuch / Intersolar	Kältemaschinen
Gesamter Projektzeitraum	Veröffentlichungen	Literaturverzeichnis. Weitere Dokumente wurden gesammelt und abgelegt.
Gesamter Projektzeitraum	Internet	Kurzrecherchen im Internet zu den jeweiligen Themenkreisen.

*Tabelle A4.1: Zusammenstellung der verwendeten Informationsquellen.*

#### A.5 Module und Gesamtsystem der Varianten mit Brennstoffzelle als Wärmequelle

Das Brennstoffzellen-Modul (BZ) mit Warmwasserspeicher (200 l standardmässig im BZ System) wird als bestehend vorausgesetzt. Die Wärme aus der BZ wird in der Absorptionskältemaschine (AKM) zur Trennung von Betriebs- und Kältemittel genutzt. Die AKM, der Kühlurm und die Kälteverteilung bilden das Kühlsystem.

##### A. URSPRUNGS MODULE (BZ, AKM)

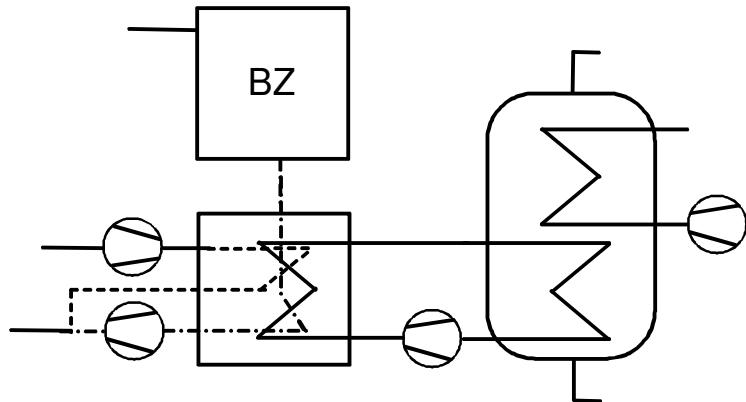


Fig. A5.1: Brennstoffzelle BZ mit darunter dargestellter Wärmeauskopplung und Warmwasser-Wärmespeicher (rechts).

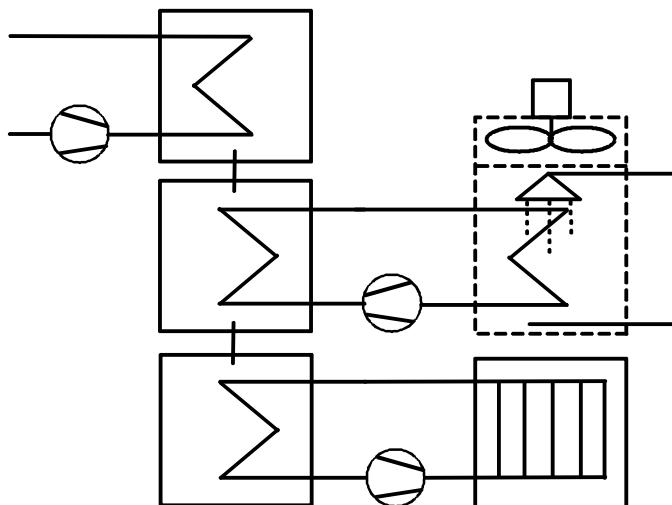


Fig. A5.2: Absorptionskältemaschine AKM (links) mit drei Elementen übereinander, welche gleich auch die 3 zum Betrieb notwendigen Temperaturniveaus repräsentieren. Der Kühlurm (rechts oben) und der Kälteverteiler (rechts unten) bilden mit der AKM zusammen das Kältesystem.

## B. SYSTEM-VARIANTEN MIT BZ UND WÄRME-/KÄLTESPEICHER

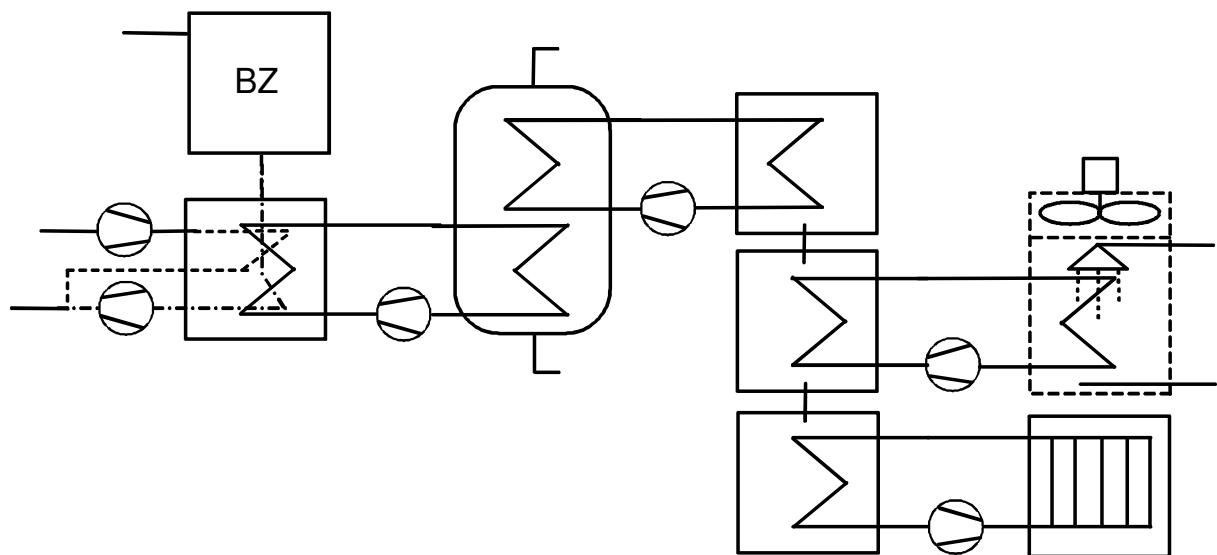


Fig. A5.3: Brennstoffzelle BZ gekoppelt mit einer [Absorptionskältemaschine AKM](#) bzw. einem Kältesystem (Single-Effekt SE;  $T_o = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Die Wärmeenergie für den Generator der AKM wird über den vorhandenen bzw. grösser zu dimensionierenden Wärmespeicher bezogen.

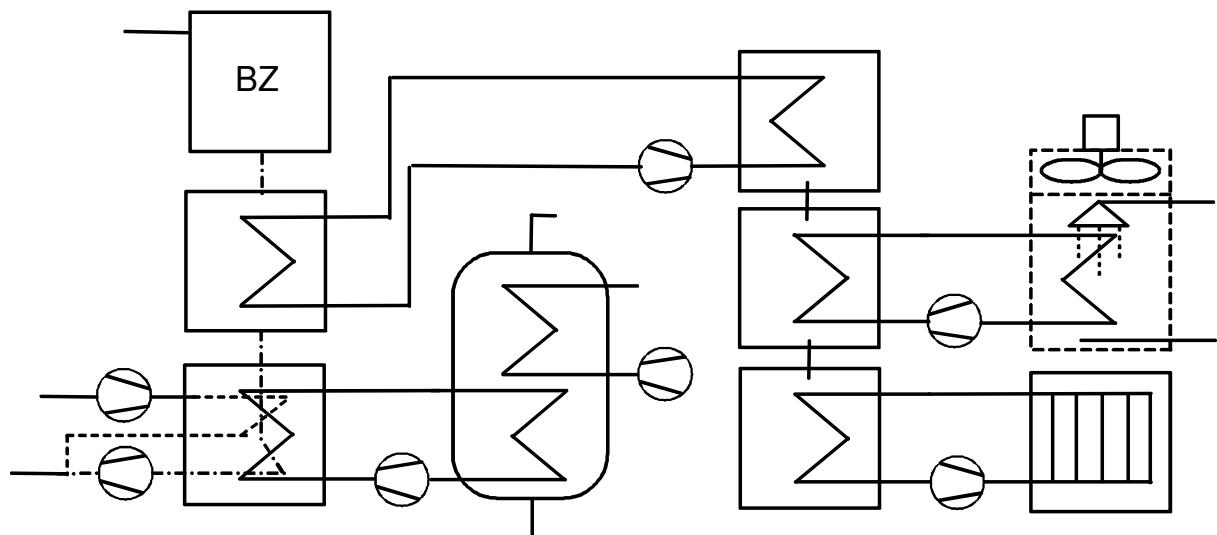


Fig. A5.4: Brennstoffzelle BZ gekoppelt mit einer Absorptionskältemaschine AKM bzw. einem Kältesystem (Doppel-Effekt DE;  $T_o = 160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Die Wärmeenergie für den Generator der AKM wird über einen in der BZ zusätzlich eingebauten Wärmeübertrager bezogen. Dieser Wärmeübertrager ermöglicht die Auskopplung von Wärmeenergie bei höherer Temperatur.

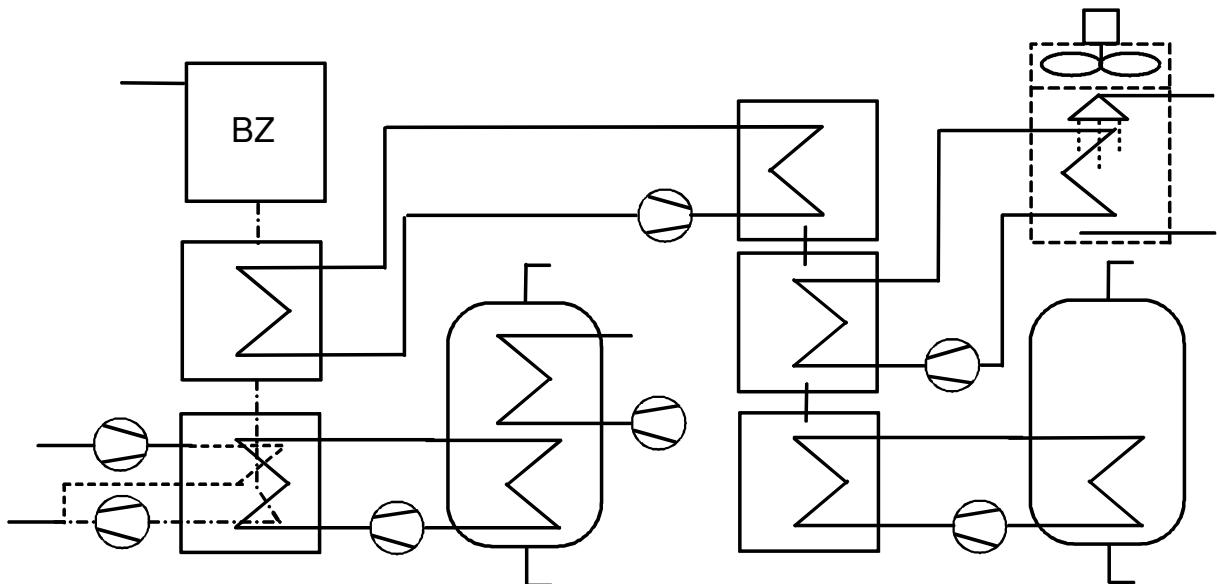


Fig. A5.5: Brennstoffzelle BZ gekoppelt mit einer Absorptionskältemaschine AKM bzw. Kältesystem (Doppel-Effekt DE;  $T_0 = 160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Die Wärmeenergie für den Generator der AKM wird über einen in der BZ zusätzlich eingebauten Wärmeübertrager bezogen. Das Kältesystem ist zur Überbrückung von Leistungsspitzen mit einem Kältespeicher ausgerüstet (rechts unten an Stelle des Kälteverteilungssystems dargestellt; vergleiche Fig. A5.4).

## A.6 Verfügbare Systemkomponenten – Spezifikationen

### A. WKT

#### Absorptionskältemaschine

- Kälteleistung  $P_{cool} = 10 \text{ kW}$
- Betriebstemperaturen: Generator  $T_o = 75 / 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
Verdampfer  $T_u = 6 / 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
Kondensator  $T_m = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$

In Fig. X ist eine einstufige LiBr-H<sub>2</sub>O Absorptionskältemaschine mit einer Kälteleistung von 10 kW und einem thermischen Wirkungsgrad COP = 0.75 abgebildet. Dieser von Phönix Sonnenwärme AG gebaute Prototyp erreicht eine Kältemitteltemperatur von  $T_u = 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zur Trennung des Kältemittels H<sub>2</sub>O aus der LiBr-H<sub>2</sub>O-Lösung wird im Generator eine Temperatur von  $T_o = 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  gefordert. Die Wärmeabfuhr über einen (offenen) Kühlturn ist bei einer maximalen Wassertemperatur von  $T_m = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchte rF = 30 % – 70 %.



Fig. A6.1: Bild des Prototyps einer einstufigen Absorptionskältemaschine (AKM) mit dem Stoffpaar LiBr-H<sub>2</sub>O der Phönix Sonnenwärme AG. Die maximale Kälteleistung beträgt 10 kW und die Temperatur des Kühlmediums (Wasser) liegt im Bereich von  $T = 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Der Wirkungsgrad der Kältemaschine wird angegeben mit COP = 0.75 bei Generator-Vorlauftemperaturen  $T = 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  und -Rücklauftemperaturen  $T = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Temperatur bei der Wärmeabfuhr ist optimal bei  $T = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$

## Kühlgerät – Splitgerät

Ventilator: Radial  
 Verflüssiger: Kupferrohr mit Aluminium-Lamellen  
 Verdampfer: Koaxialal, selbstreinigend, im Tank eingebaut  
 Gehäuse: Galvanisierter Stahl mit 60 Mikron Pulverbeschichtung  
 Verdichter: vollhermetisch, sauggasgekühlt  
 Kältemittel: R407c  
 Steuerung: ab ECA.12 mit Mikroprozessor  
 Hydraulik: incl. Tank, Pumpe, Sicherheitsventil, Bypass, Sicherheitsventil, Be- und Entlüftungsventil, Strömungswächter  
 gefertigt unter CEE 89/932  
 Einhaltung: CEE 91/368  
 CEE 93/68  
 DIN 40050 Schutzklasse IP 44  
 CEE 87/404



Zentrifugal-Ventilator	Modelle: ECC.010 ECC.012 ECC.016 ECC.022 ECC.030 ECC.038 ECC.061 ECC.075 ECC.095 ECC.120 ECC.150 ECC.180													
	Kühleistung													
Wasseraustrittstemperatur = +7° C	kW	10,2	12,2	15,8	22,5	30,8	38,3	61,1	74,8	95	123	150	179	
Wassertemperaturdifferenz = +5° C														
Aussentemperatur = +35° C														
Wasseraustrittstemperatur = +15° C	kW	14,2	16,8	21,8	31,1	42,4	53	84,3	104	130	169	206	244	
Wassertemperaturdifferenz = +5° C														
Aussentemperatur = +25° C														
Verdichter	Anzahl	Stück	1	1	1	1	1	2	2	4	4	4	4	
	Leistungsaufnahme kW		3,4	3,9	5	7,2	9,6	12	19,2	23,9	28,8	38,4	47,4	49,8
Pumpe	H <sub>2</sub> O Volumenstrom	mo/h	0,6/5,4	0,6/5,4	0,6/5,4	1,8/7,2	1,8/7,2	3/13,2	6/27	6/27	6/27	6/42	18/66	18/66
	Druck bar		3,4/2,2	3,4/2,2	3,4/2,2	3,8/2,2	3,8/2,2	3,7/2,0	3,7/2,0	3,7/2,0	3,7/2,0	3,8/2,0	3,2/2,1	3,2/2,1
	Leistungsaufnahme kW		0,75	0,75	0,75	1,1	1,1	1,5	3	3	3	4	5,5	5,5
Speichertank	Liter		150	150	150	330	330	330	600	600	470	470	470	470
Axialventilatoren	Anzahl	Qty	1	1	1	2	2	3	3	4	4	4	4	
	Leistungsaufnahme kW		1,1	1,1	1,1	2,2	2,2	2,2	3,3	3,3	8	8	8	11
	Luftvolumenstrom	mo/h	6.000	6.000	5.800	11.800	11.800	11.300	19.000	19.000	46.000	45.000	44.000	52.000
Stromanschluss	V/Hz/Ph.									400/50/3				
Wasseranschluss	B.S.P	1"	1"	1"	1 1/2"	1 1/2"	2"	2"	2 1/2"	2 1/2"	2 1/2"	2 1/2"	2 1/2"	
Schalldruckpegel	dB(A)	63	64	64	67	68	68	70	70	73	73	73	75	
Abmessungen	Länge	mm	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.300	1.300	1.300	1.300	1.300	1.300	
	Breite	mm	1.450	1.450	1.450	1.800	1.800	1.800	2.000	2.000	3.600	3.600	3.600	
	Höhe	mm	1.410	1.410	1.410	1.940	1.940	1.940	2.380	2.380	2.380	2.380	2.380	
Gewicht	Kg		295	295	305	515	525	560	1.000	1.160	1.620	1.590	1.630	1.810

Tabelle A6.1: Beispiel eines Splitgerätes der Air 2000 GmbH. Die Geräte ECC.012 liegen im Bereich der Leistungsanforderung von 12 kW Kälteleistung und werden als Teil des Referenzsystems herangezogen.

## A. 7 Berechnung der Amortisations-, Betriebs-, und Unterhaltskosten

### A. AMORTISATIONSKOSTEN

Zur Berechnung der partiellen, jährlichen Amortisationskosten wurden die **Investitionen** (Preise, siehe Abschnitt D. Zusammenstellung der Kosten) mit der von der Amortisationszeit [Jahre] und dem Kapitalzins [%] abhängigen **Annuitätssumme** dividiert.

### B. BETRIEBSKOSTEN

In Ungleichung (1) steht auf der rechten Seite der Betrag für die Betriebskosten bzw. die Energiekosten des Referenzsystems zur geforderten Kühlenergie. Auf der linken Seite der Ungleichung (1) steht der Betrag für den Gaspreis minus ein erzielter Einspeisepreis für die ins elektrische Netz gelieferte elektrische Energie. Für Preise und Wirkungsgrade, wo die Ungleichung (1) erfüllt ist, wird mit dem System eine „Rendite“ erzielt. Die Voraussetzungen sind:

- ⇒ **Referenzvariante** = State-of-the-Art Splitgerät mit einer Kompressor-Kältemaschine (SG-KKM).
- ⇒ **Hauptvarianten** HTLRN2, resp. HTLRN3 und HTWR  
= Brennstoffzelle als Wärmequelle zur Wohnraumkühlung mit einer Absorptionskältemaschine (AKM) und Einspeisung der überschüssigen elektrischen Energie in das öffentliche Netz.

$$(1) \quad \frac{t * P_{cool}}{\eta_{AKM}} \left( \frac{Gaspreis}{\eta_{th.BZ}} - \left( \frac{\eta_{el.BZ}}{\eta_{th.BZ}} - \eta_{eg.} \right) * Einspeisepreis_{el.} \right) < \frac{t * P_{cool}}{\eta_{el.-cool}} * Strompreis$$

#### Bezeichnungen:

- $P_{cool}$  Kühlleistungsbedarf (kW)
- $t$  Betriebszeit (Betriebsstunden)
- $\eta$  Wirkungsgrad (AKM, AKMeg, th.BZ, el.BZ)
- AKM Absorptionskältemaschine
- BZ Brennstoffzelle
- th. thermisch
- el. elektrisch
- eg Eigenbedarf der AKM (interne Pumpen, etc)

Zur Vereinfachung der Ungleichung (1) können beide Seiten durch die Kühlenergie  $Q_{cool} = t * P_{cool}$  dividiert werden. Mit der daraus entstandenen Ungleichung (2) werden die Bereiche „Rendite“ und „Verlust“ in der Gas- und Strompreisebene sichtbar.

$$(2) \quad \frac{1}{\eta_{AKM}} \left( \frac{Gaspreis}{\eta_{th.BZ}} - \left( \frac{\eta_{el.BZ}}{\eta_{th.BZ}} - \eta_{eg.} \right) * Einspeisepreis_{el.} \right) < \frac{1}{\eta_{el.-cool}} * Strompreis$$

Die für die Berechnung angenommenen **Wirkungsgrade** können aus nachfolgender Tabelle A7.2 in Abschnitt D ersehen werden. Für die relevanten **Marktpreise von Strom, Gas und Einspeisung** standen interne Angaben von Hexis AG und Daten aus einer Internetrecherche (siehe Anhang A.8 Strom-, Gas- und Einspeisepreise) zur Verfügung. Folgende Preisspannen wurden eruiert:

Preise:	[CHF/kWh]	CH (Tessin)	Spanien
Strompreis		0.14 - 0.20	0.16 - 0.20
Gaspreis		0.07 - 0.09	0.07 - 0.09
Einspeisevergütung		0.10 - 0.15	0.12 - 0.15
Kursumrechnung [CHF/EURO]		1.65	

Tabelle A7.1: Preisspanne für Strom und Gas sowie für einen Einspeisevergütung im Tessin und in Spanien.

Die Einspeisevergütung ist ein theoretischer Wert, da es bis jetzt z.B. nur in Deutschland ein Einspeisebonus für innovative Technologien wie Brennstoffzellen, Mikroturbinen, etc. gibt.

### C. UNTERHALTSKOSTEN

Zur Berechnung der jährlichen **Unterhaltskosten** wurden je nach Komplexität des Systemteils 0.5-2% der Investition (Preis, siehe Abschnitt D. Zusammenstellung der Kosten)) angenommen. Im Durchschnitt liegen diese Kosten dann bei 1.7-1.9 [%Preis/Jahr].

### D. ZUSAMMENSTELLUNG DER KOSTEN

In nachfolgender Tabelle sind die für die Kostenberechnung relevanten Daten zusammengestellt – Preise, Wirkungsgrade und prozentualer Anteil des Unterhalts pro Jahr sowie den damit bestimmten Unterhaltskosten für ein Jahr. Die Angaben beziehen sich auf ein System mit einer Kühlleistung von 12 kW.

Varianten	Gerät/Anlagenteil	Preis [CHF]	Wirkungsgrad [-]	Unterhalt [%Preis/Jahr]	Unterhalt [CHF]
<b>Referenz</b>					
	Kältemaschine	15000	3.90	2.0	300
	Ksp	10	0.90	0.0	0
	KV	10	0.83	0.1	0
	WS	1500	0.80	0.5	8
	<b>Total/Mittel</b>	<b>16520</b>	<b>2.33</b>	<b>1.9</b>	<b>308</b>
<b>HTLRN2</b>	WA1				
	Wärmetauscher bei WQ	2000	0.95	1.0	20
	WKT:AKM-(DE;LiBr-H2O)	30000	1.30	2.0	600
	KSp	3000	0.90	0.2	6
	KV	10	0.83	0.5	0
	WS	3500	0.90	0.5	18
	<b>Total/Mittel</b>	<b>38510</b>	<b>0.83</b>	<b>1.7</b>	<b>644</b>
<b>HTLRN3</b>	WT	2500	0.95	1.0	25
	WKT: AKM-(TE;LiBr-H2O)	45000	1.60	2.0	900
	KSp	3000	0.90	0.2	6
	KV	10	0.83	0.5	0
	WS	3500	0.90	0.5	18
	<b>Total/Mittel</b>	<b>54010</b>	<b>1.02</b>	<b>1.8</b>	<b>949</b>

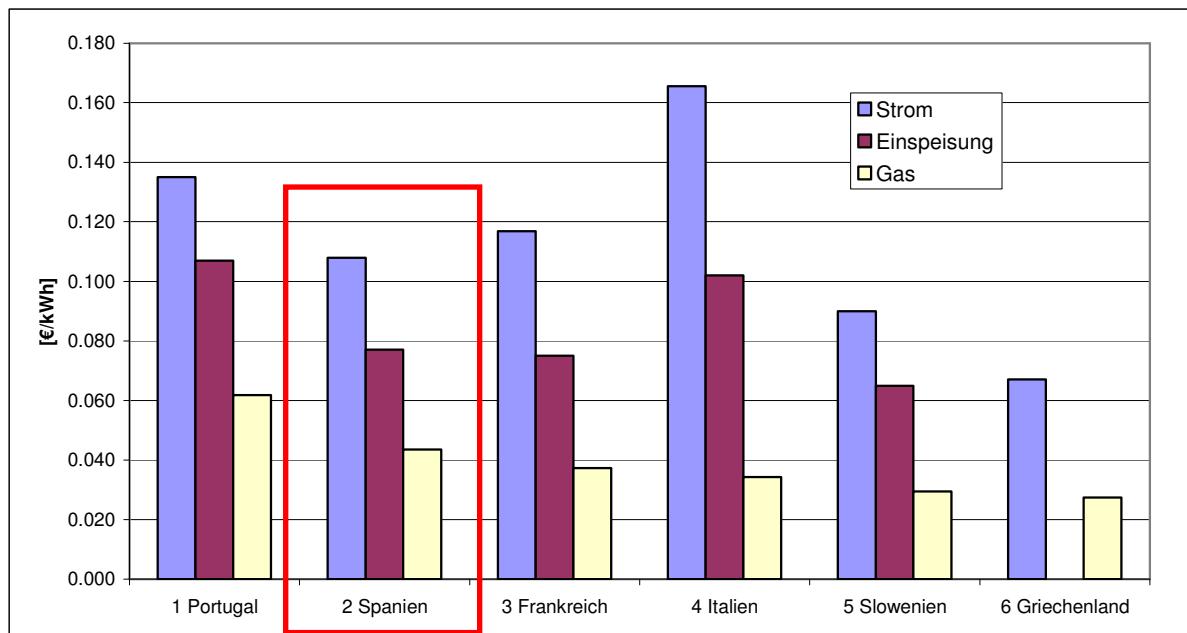
Tabelle A7.2: Zusammenstellung der Komponentenpreise, Wirkungsgrade sowie Unterhaltskosten .

## A. 8 Strom-, Gas- und Einspeisepreise

### A. 8.1 A STROMPREISE SPANIEN (ANGABEN HEXIS AG)

Zur Identifikation von relevanten Märkten, welche sich für ein Brennstoffzellen getriebenes Kühlssystem nach den Ungleichungen (1) und (2) in Anhang A. 07 lohnen würden, ist die Grafik in Fig. X mit den Strom- und Gaspreisen angefügt.

Land	Strompreis Grundpreis	€/kWh		Gaspreis Grundpreis	€/kWh	
		Ø Arbeits-preis (inkl. Netz etc.)	Einspeise- vergütung Strom		Ø Arbeits-preis (inkl. Netz etc.)	Mineral- ölsteuer- vergütung
Name	€/a	Strom	Einspeisung	€/a	Gas	€/kWh
1 Portugal	0.000	0.135	0.107	0.000	0.062	0.000
2 Spanien	0.000	0.108	0.077	0.000	0.044	0.000
3 Frankreich	0.000	0.117	0.075	0.000	0.037	0.000
4 Italien	377.520	0.166	0.102	37.440	0.034	0.000
5 Slowenien	0.000	0.090	0.065	0.000	0.029	0.000
6 Griechenland	0.000	0.067		0.000	0.027	0.000



PS: Es wurde jeweils der oberste Eintrag aus der Liste des Landes in obige Tabelle eingetragen.  
Mittelwert wäre auch sinnvoll gewesen.

Fig. A8.1: Länder abhängige Energiepreise für den Bezug von Strom und Gas sowie Erlös aus der Einspeisung von elektrischem Strom ins öffentliche Netz in Spanien und fünf weiteren südeuropäischen Ländern.

## A. 8.1 B STROMPREISE IM TESSIN MAI 2006

### Stromerzeugung und -versorgung

Der Kanton Tessin erzeugt pro Jahr durchschnittlich 3'900 GWh durch Wasserkraftwerke. Damit gehört das Tessin zu den führenden Wasserkraftstrom produzierenden Kantonen. Die AET (Azienda Elettrica Ticinese, das Tessiner Elektrizitätswerk) garantiert die Stromversorgung der einzelnen Verteilerunternehmen, die ihrerseits den Bedarf der Endabnehmer abdecken. In manchen Fällen versorgt das AET die großen Industrikunden direkt.

### Stromkosten

Die Stromkosten hängen von der verbrauchten Menge und dem mehr oder weniger rationalen Einsatz der Anlagen ab. Daher stellen die größten Verteilerunternehmen der Industrie einen Beratungsservice zur Verfügung. Normalerweise sinkt der durchschnittliche Kilowattpreis, wenn die Betriebsstunden der Anlagen steigen.

Betrieb	Verbrauch (kWh/Jahr)	Leistung (kW)	Lieferung	Preis (Rp./kWh)
mittel	150'000	75	Niederspannung	14.5 - 20.0
groß	500'000	200	Niederspannung	13.5 - 17.5
groß	500'000	200	Mittelspannung	12.5 - 15.5
groß	1'500'000	750	Mittelspannung	12 - 16.5
groß	2'250'000	750	Mittelspannung	10 - 14.5
sehr groß	15'000'000	5'000	Mittelspannung	9 - 13.5

Quelle: Die Lieferung elektrischer Energie an die Industrien ESI und ATI

Die Tabelle zeigt die aktuelle Preisspanne der Strompreise (inklusive aller Punkte: Vertrag, Leistung, Verbrauch usw.), bei unterschiedlichen Kundentypen, gemäß den Angaben des eidgenössischen Statistikamts und der Union der schweizerischen Zentralen. Im Tessin ist der Strompreis um 15-30% niedriger als im schweizerischen Durchschnitt.

Detaillierte Informationen können direkt bei den Gemeinden und den örtlichen Elektrizitätswerken erfragt werden, deren Anschriften unter der Internetadresse [www.elettricita.ch](http://www.elettricita.ch) (nur auf Italienisch) der Vereinigung ESI – Elettricità Svizzera Italiana – erhältlich sind.

### Die wichtigsten Tessiner Elektrizitätswerke

Die wichtigsten der 17 Tessiner Elektrizitätswerke sind folgende:

**AEM SA Massagno**, Azienda Elettrica Massagno  
Via Privata 4, CH-6900 Massagno  
Tel. +41 (0)91 966 25 21 – [www.aemsa.ch](http://www.aemsa.ch)

**AEC Stabio**, Azienda Elettrica Comunale Stabio  
Via Ufentina, CH-6855 Stabio  
Tel. +41 (0)91 641 69 00 – [www.amstabio.ch](http://www.amstabio.ch)

**AGE SA Chiasso**, Azienda Comunale AGE Chiasso  
Piazza Bernasconi 6, CH-6830 Chiasso  
Tel. +41 (0)91 695 07 11 – [www.age-sa.ch](http://www.age-sa.ch)

**AIL SA Lugano**, Aziende Industriali di Lugano  
Via della Posta 8, CH-6900 Lugano  
Tel. +41 (0)58 866 75 70 – [www.ail.ch](http://www.ail.ch)

**AI Mendrisio**, Aziende Industriali Mendrisio  
Via V. Vela 9, CH-6850 Mendrisio  
Tel. +41 (0)91 646 18 26 – [www.aimonline.ch](http://www.aimonline.ch)

**AMB Bellinzona**, Aziende Municipalizzate Bellinzona  
Vicolo Muggiasca 1a, CH-6500 Bellinzona  
Tel. +41 (0)91 821 88 11 – [www.amb.ch](http://www.amb.ch)

**SES SA Locarno**, Società Elettrica Sopracenerina  
Piazza Grande 5, CH-6601 Locarno  
Tel. +41 (0)91 756 91 91 – [www.ses.ch](http://www.ses.ch)

**AET**, Azienda Elettrica Ticinese  
Viale Officina 10, CH-6501 Bellinzona  
Tel. +41 (0)91 822 27 11 – [www.aet.ch](http://www.aet.ch)

### Kosten des Industriewassers

Die Kosten des Industriewassers für Gemeinden und Gemeindezusammenschlüsse, die über die für die Lieferung geeigneten Strukturen verfügen, betragen ca. CHF 0,20/0,30 pro Kubikmeter. Für die anderen Gebiete gibt es Trinkwasser, dessen Kosten von Ort zu Ort variieren, jedoch generell höher sind.

### Nützliche Adresse

**Ufficio dell'energia**  
Residenza governativa  
CH-6501 Bellinzona  
Tel.: +41 (0)91 814 39 89  
Fax: +41 (0)91 814 44 86  
e-mail: [dfe-energia@ti.ch](mailto:dfe-energia@ti.ch)  
Internet: [www.ti.ch/energia](http://www.ti.ch/energia)

COPERNICO – Wirtschaftsförderungsinitiative des Kantons Tessin

Fig. A8.2: Strompreise bei Bezug von den Tessiner Elektrizitätswerken in Funktion des Verbrauchs. Mit steigender verbrauchter Menge (bezogener elektrischer Energie) sinkt der Preis pro kWh. Beachte: Die Strompreise im Tessin sind 15% bis 30% niedriger als im schweizerischen Durchschnitt. Siehe: [www.copernico.ch/deutsch/pdf/Copernico%20Tedesco\\_02-07.pdf](http://www.copernico.ch/deutsch/pdf/Copernico%20Tedesco_02-07.pdf) und Stromrechner für Deutschland: <http://www.verivox.de/power/>.

## A. 8.1 C STROMPREISE IN EUROPA DEZ. 2006

### Stromversorgung

## Auf dem Weg in die vermeidbare Knappheit

Vor Grundsatzentscheiden für die Stromversorgung.

2005 hat die Schweiz erstmals mehr Elektrizität importiert als exportiert. Schlechte hydrologische Bedingungen sowie ein mehrmonatiger Stillstand des Kernkraftwerks Leibstadt setzten der Produktion bei steigender Nachfrage Grenzen. Diese Erfahrung ist als Warnsignal zu verstehen. So erwartet der Branchenverband VSE ab 2021/2022 steigende Engpässe in der Stromselbstversorgung. Die Stilllegung von Kernkraftwerken, das Auslaufen von Lieferverträgen sowie der Verbrauchsanstieg fordern Tribut. Mittelfristig soll die drohende Versorgungslücke durch Gaskombikraftwerke, längerfristig durch neue Kernkraftwerke geschlossen werden; erneuerbare Energien haben nur begrenzt Potenzial. Um Investitionen planen und realisieren zu können, sind Grundsatzentscheide rasch zu fällen.

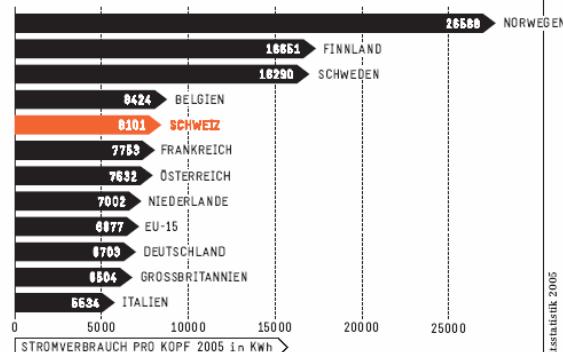
Würde die Stromversorgung nach den Regeln eines freien Marktes erfolgen, käme es automatisch zu einem Ausgleich. Die unelastische Nachfrage würde zu einer Preiserhöhung führen, welche Energiesparan ebenso wie den Einsatz neu-

er Produktionstechnologien, wie dezentraler Solarstromanlagen, attraktiv machen würde. Davon sind wir weit entfernt. Also mehr Strom importieren? Steigende Preise würden die Lieferung von Elektrizität in die Schweiz attraktiver machen als ihre Durchleitung. Die nötigen Transportkapazitäten sind in Europa aber knapp, wie die Differenzen zwischen den nationalen Preisniveaus zeigen. Heute werden Stromlieferungen durch Kapazitätsauktionen an den Grenzen verteilt. Erst wenn Auktionserlöse für die Beseitigung von Engpässen verwendet werden – wie es die EU-Elektrizitätsbinnenmarktverordnung vorsieht –, wird der grenzüberschreitende Stromaustausch an Bedeutung gewinnen und für eine Konvergenz der Preise sorgen. Weil Übertragungskapazitäten eine echte Alternative zu nationalen Produktionskapazitäten darstellen, wird empfohlen, endlich die internationale Produktionsstruktur und deren Standorte zu optimieren. Aus Schweizer Perspektive auch deshalb, weil der EU selbst auch eine Versorgungslücke droht.

Der Pro-Kopf-Stromverbrauch in der Schweiz belief sich im Jahr 2005 auf 7642 kWh (1950: 2054 kWh). Die Schweiz liegt unter dem EU-Durchschnitt, der von Schweden und Finnland in die Höhe getrieben wird. Der Pro-Kopf-Verbrauch wird wesentlich durch den Anteil der elektrischen Energie am Gesamtenegieverbrauch bestimmt (Norwegen 42,3%, Schweiz ca. 20%). Zudem spielt die Industriestruktur eine Rolle. Ein hoher Anteil von Unternehmen in der Metall- und Chemiebranche erhöht den Verbrauch signifikant. Das bundesrätliche Ziel einer 2000-Watt-Gesellschaft – letztmals erreicht im Jahre 1950 – liegt damit in weiter Ferne.

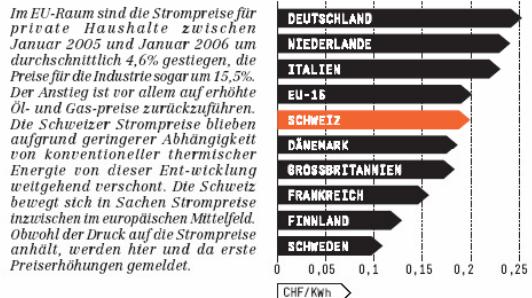
Quelle: Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2005

### Stromverbrauch: Utopische 2000-Watt-Gesellschaft

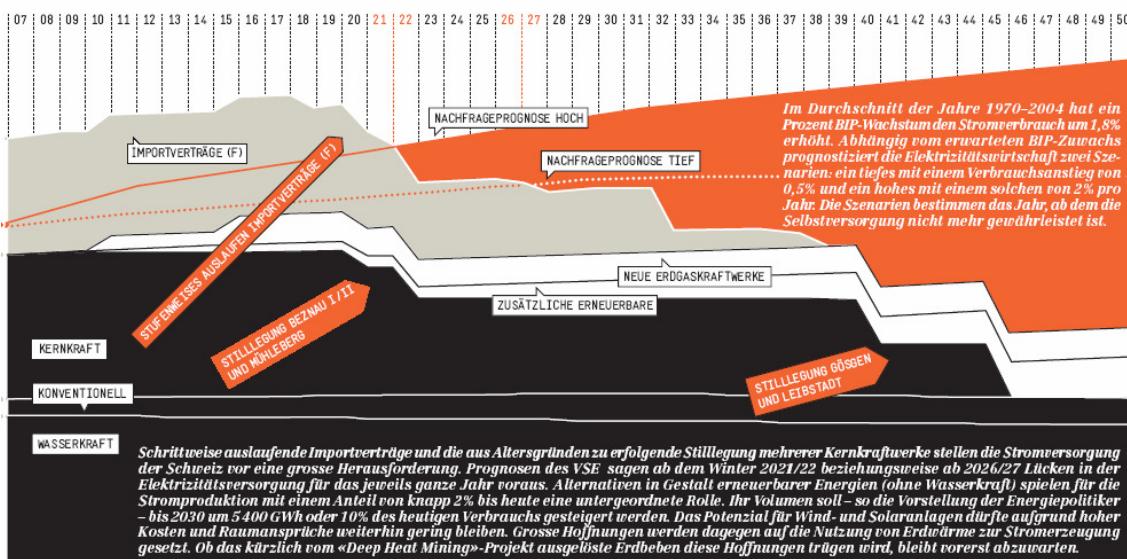


Der Pro-Kopf-Stromverbrauch in der Schweiz belief sich im Jahr 2005 auf 7642 kWh (1950: 2054 kWh). Die Schweiz liegt unter dem EU-Durchschnitt, der von Schweden und Finnland in die Höhe getrieben wird. Der Pro-Kopf-Verbrauch wird wesentlich durch den Anteil der elektrischen Energie am Gesamtenegieverbrauch bestimmt (Norwegen 42,3%, Schweiz ca. 20%). Zudem spielt die Industriestruktur eine Rolle. Ein hoher Anteil von Unternehmen in der Metall- und Chemiebranche erhöht den Verbrauch signifikant. Das bundesrätliche Ziel einer 2000-Watt-Gesellschaft – letztmals erreicht im Jahre 1950 – liegt damit in weiter Ferne.

### Strompreise: Im europäischen Mittelfeld



Quelle: Energie 2006



Seite 5 – DEZEMBER 2006

avenir aktuell+

Fig. A8.2: Oben: Verbrauch an elektrischer Energie und Preise dazu in der Schweiz und in mehreren europäischen Ländern für das Jahr 2005. Unten: Szenarien zur Entwicklung des Stromverbrauchs / Strombedarfs in der Schweiz bis zum Jahr 2050 qualitativ dargestellt (Avenir-Suisse). [http://www.thinktank-switzerland.ch/content/avenir-aktuell/0612\\_drei/mainColumnParagraphs/0/document/avenir\\_aktuell\\_dez06.pdf](http://www.thinktank-switzerland.ch/content/avenir-aktuell/0612_drei/mainColumnParagraphs/0/document/avenir_aktuell_dez06.pdf)

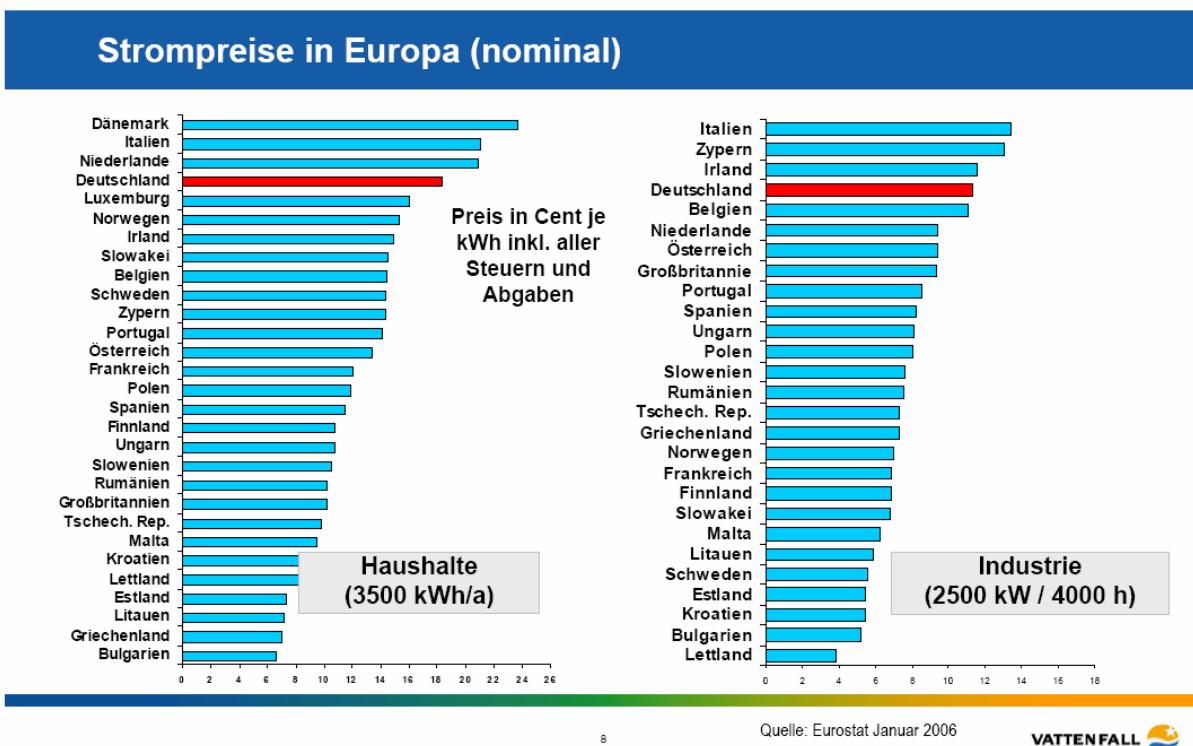


Fig. A8.3: Strompreise im Jahr 2006 für Haushalte und Industrie (in Abhängigkeit vom Verbrauch) in Europa ohne Schweiz (Vattenfall und wirtschaftsrat.de/externdata/energieklausurtagung/rede-dr-rauscher.pdf).

## A. 8.2 A GASPREISE IN DER EU25 IM JANUAR 2006

Gaspreise pro GJ, einschließlich aller Steuern, Normalverbraucher im Haushalt - 83,7 GJ/Jahr

	Januar 2006 (in Landes- währung)	Anstieg in % Januar 2006/ Januar 2005	Januar 2006 (Euro)	Januar 2006 (KKS)	Steueranteil in %
EU25	13,02	15,6	13,02		
<b>Belgien</b>	13,50	21,0	13,50	12,48	20,4
<b>Tschechische Republik</b>	287,97	26,8	10,03	16,09	16,0
<b>Dänemark</b>	222,50	5,2	29,82	21,68	55,8
<b>Deutschland</b>	15,98	17,8	15,98	14,53	23,3
<b>Estland</b>	72,52	0,1	4,63	7,47	15,1
<b>Spanien</b>	13,63	14,5	13,63	14,20	13,8
<b>Frankreich</b>	12,72	20,3	12,72	11,53	15,0
<b>Irland</b>	12,51	25,3	12,51	10,03	11,9
<b>Italien</b>	16,50	7,6	16,50	15,83	36,8
<b>Lettland</b>	3,72	17,7	5,34	9,91	15,0
<b>Litauen</b>	21,54	15,3	6,24	11,96	15,2
<b>Luxemburg</b>	10,33	26,9	10,33	9,00	5,7
<b>Ungarn</b>	1 856,25	21,6	7,40	11,80	13,0
<b>Niederlande</b>	16,92	11,5	16,92	15,53	34,5
<b>Österreich</b>	15,65	17,1	15,65	14,56	31,5
<b>Polen</b>	36,15	17,3	9,46	15,95	18,0
<b>Portugal</b>	14,52	17,7	14,52	16,79	4,8
<b>Slowenien</b>	3 110,00	25,6	12,99	16,97	22,8
<b>Slowakei</b>	408,00	29,9	10,88	18,40	16,2
<b>Schweden</b>	241,60	20,4	25,95	21,81	43,0
<b>Vereinigtes Königreich</b>	5,65	11,4	8,24	7,30	4,8

Griechenland, Zypern und Malta verfügen über keine bedeutsamen Gasmärkte und haben daher keine Gaspreise gemeldet. Finnland verfügt über keinen nennenswerten Gasmarkt für private Verbraucher und hat deshalb keine Preise für Haushalte angegeben.

Tabelle A8.1: Gaspreise im Jahr 2006 in Europa bis zu einem Verbrauch von 83,7 GJ. Erdgas hat je nach Qualität einen Energieinhalt (Brennwert) von rund 40 MJ/ m<sup>3</sup> (Eurostat-Pressestelle: Tim Allen, eurostat-pressoffice@ec.europa.eu).

Um einem Vergleich der Energiepreise machen zu können, sei hier eine Umrechnung auf den Preis pro kWh in Spanien angegeben.

Energie (Gas): 1GJ = 278 kWh

Limite für Jahresverbrauch: 83,7 GJ/a = 23'269 kWh/a

Preis pro kWh in Spanien: 13.63 Euro/GJ = 0.05 Euro/kWh \* 1.65 CHF/Euro → **0.0825 CHF/kWh**.

## A. 8.2 B GASPREISE IN DER SCHWEIZ MAI 2006

Aus einer Pressemitteilung sind nachfolgend Preise für unterschiedliche Energieformen angegeben ([http://www.presseportal.ch/de/pm/100003923/100509018/holzenergie\\_schweiz](http://www.presseportal.ch/de/pm/100003923/100509018/holzenergie_schweiz)).

Und in einem Auszug ist zu lesen, dass Energie aus Holz zwar billiger ist als aus Öl und Gas – Gas hingegen doch auch billiger als Strom ist:

„....drastischen Preiserhöhungen der fossilen Energien zwar um etwa fünf bis fünfzehn Prozent angezogen hat, so bewegt er sich auch heute noch auf einem vergleichsweise moderaten Preisniveau. Konkret liegen die **Brennholzpreise heute deutlich tiefer als die Öl- oder Gaspreise**, wie die untenstehende Tabelle veranschaulicht (Stand Mai 2006, Energiepreise für ein Einfamilienhaus mit ca. 2'500 Litern Ölverbrauch pro Jahr)....“

Siehe dazu die folgende Tabelle.

Energieform	Preis in Rappen pro Kilowattstunde
Öl	7,5 bis 9 Rappen
Gas	<b>7 bis 8,5 Rappen</b>
Strom	10 bis 22 Rappen
Stückholz	5 bis 8 Rappen
Schnitzel	5 bis 6 Rappen
Pellets	6 bis 7 Rappen

In einer weiteren Quelle findet sich die Grafik in Fig. A8.4 (<http://www.erdoel.ch/site/erd565106/fra674237/fra600155056.asp>):

Daraus kann abgelesen werden, dass Heizenergie aus Strom mit 12 bis 13 Rp./kWh klar am teuersten ist. Es folgt das **Erdgas mit einem Preis von 6 bis 7 Rp./kWh** und schliesslich Erdöl als günstigste Quelle für Heizenergie mit einem Preis von um die 5 bis 6 Rp./kWh.

## Preise für Heizenergie (in Rp./kWh)

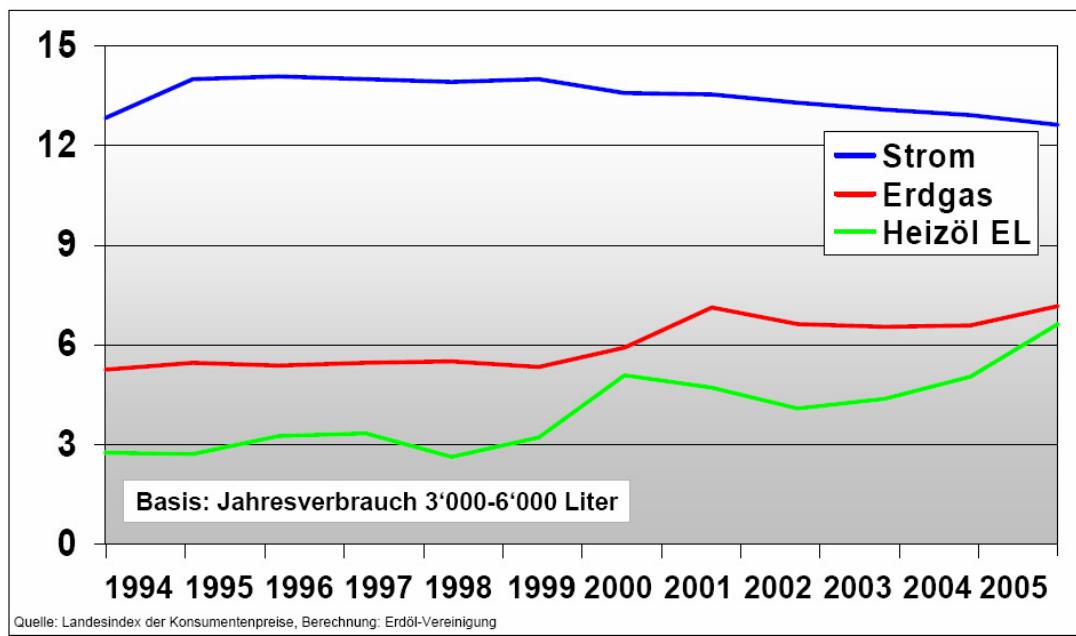


Fig. A8.4: Entwicklung der Energiepreise in Rp/kWh von 1994 bis 2005 (Landesindex der Konsumentenpreise).

### **A. 8.3 A VERGÜTUNG FÜR STROMEINSPEISUNG – EU / SPANIEN**

Die Vergütung für die Einspeisung von elektrischem Strom in das öffentliche Netz ist als Parameter in Ungleichung (2) in Abschnitt A 7 berücksichtigt. Ein Erlös aus der Einspeisung verbessert die Wirtschaftlichkeit eines Systems, welches die Abwärme aus einer Brennstoffzelle nutzen kann erheblich.

In der EU gibt es in Deutschland einen „Bonus“ für innovative Technologien wie Brennstoffzellen, Mikroturbinen etc. und in Spanien ist seit dem 26. Mai 2007 das Königliche Dekret 661/2007 in Kraft. Es löst das Dekret 436/2004 (Real Decreto 436/2004) ab und regelt die Einspeisevergütung.

Dazu sei auf die unten stehenden Angaben verwiesen.

Tarifgruppen zur Einspeisevergütung in Spanien:

- bis 100 KW: 44,03 c€/kWh; nach 25 Jahren: 35,23 c€/kWh
- 100KW bis 10 MW: 41,75 c€/kWh; nach 25 Jahren: 33,40 c€/kWh
- 10 MW bis 50 MW: 22,97 c€/kWh; nach 25 Jahren: 18,38 c€/kWh

## A. 8.3 B VERGÜTUNG FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN EKZ - CH

### Vergütung für erneuerbare Energie



40RENS / 40REMS

#### 1. Produktbeschrieb

Für die Einspeisung von elektrischer Energie in das Netz (Nieder- und Mittelspannungsnetz) der EKZ, die von unabhängigen Produzenten durch die Nutzung von erneuerbarer Energie gewonnen wurde (gemäss Artikel 7, Absatz 3 des Energiegesetzes vom 26.6.1998 und Artikel 1, Absatz f sowie Artikel 5 der Energieverordnung vom 7.12.1998).

#### 2. Preisinformationen

Zuzüglich 7,6 % Mehrwertsteuer bei gemeldeter MwSt-Nummer.

#### Vergütungspreise

		in den Wintermonaten Oktober bis März exkl. MwSt.	in den Sommermonaten April bis September exkl. MwSt.
Hochtarif (HT)		22,00 Rp./kWh	15,00 Rp./kWh
Niedertarif (NT)		15,00 Rp./kWh	10,00 Rp./kWh

#### Tarifzeiten

Hochtarif	Montag – Freitag Samstag	07:00 – 20:00 Uhr 07:00 – 13:00 Uhr
Niedertarif	übrige Zeiten	

#### 3. Gültigkeit

Diese Angaben treten ab 1. Oktober 2006 in Kraft und sind auf unbestimmte Dauer bis auf Widerruf gültig.

#### 4. Allgemeine Bestimmungen

- Bei Anlagen bis 3 kW werden Zähler ohne Rücklaufhemmung verwendet, bei Anlagen mit grösserer Leistung muss die ins EKZ Versorgungsnetz eingespeiste Energie separat gemessen werden.
- Auf Wunsch des unabhängigen Produzenten wird auch bei den oben erwähnten Kleinanlagen eine Vergütung gemäss dem Rückliefertarif für erneuerbare Energie gewährt. Die dafür notwendigen nachträglichen Änderungen an den Installationen und Messeinrichtungen erfolgen auf Kosten des unabhängigen Produzenten.
- Für Rücklieferungen elektrischer Energie, die nicht von unabhängigen Produzenten gemäss Art. 1, Abs. a der Energieverordnung stammt oder die aus Wasserkraftwerken mit einer Leistung von mehr als 1 MW gewonnen wird, ist der Tarif nicht anwendbar.
- Für die Einspeisung aus Produktionsanlagen, die zwischen 1992 und 1999 in Betrieb genommen wurden, wird auf Verlangen des unabhängigen Produzenten ein Zuschlag von 1 Rp./kWh vergütet.
- Im Übrigen gelten die Bestimmungen des zwischen den EKZ und dem unabhängigen Produzent abgeschlossenen Vertrages.

ZGZ 21.154 / 10.06

Elektrizitätswerke des Kantons Zürich

Dreikönigstrasse 18

Postfach 2254

8022 Zürich

Tabelle 8.2: Vergütung bei Einspeisung von elektrischem Strom aus erneuerbaren Energiequellen in das Netz der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ). Eine Vergütung aus anderen Quellen wie einer Brennstoffzelle ist (noch) nicht vorgesehen.

## A.9 Klima und Wärmesenke

Die Wärmeenergie aus den zu kühlenden Räumen und die zum Antrieb der Kältemaschine zugeführte Energie (Wärme- sowie mechanische und elektrische Energie) muss in eine Wärmesenke bei einem mittleren Temperaturniveau abgeführt werden. Die einfachste Variante ist dazu die Nutzung der Umgebungsluft als Kühlmedium. Entsprechend den klimatischen Verhältnissen am Standort kommen zwei Kühlurmvarianten in Frage. Aus Kostengründen wird eine Variante mit geschlossenem Kühlurm/Wärmetauscher vorgeschlagen.

**Spanien** – In Spanien sind bezüglich Luftfeuchte- und Temperaturschwankungen zwei klimatischen Zonen zu betrachten. Im südspanischen *Almeria*, am Mittelmeer, liegt die jährliche Schwankung der Feuchte zwischen 65 % und 75 % und jene der Aussentemperatur schwankt ca. zwischen 15 °C und 35 °C. Temperaturen unter dem Gefrierpunkt sind hier nicht zu erwarten. In *Madrid* hingegen schwankt die Luftfeuchte im Bereich zwischen 80 % im Winter und 40 % im Sommer, wenn Kühlbedarf besteht. Auch die Aussentemperatur unterliegt im Vergleich zu Almeria einer starken Schwankung. Nebst Temperaturen über 30 °C im Sommer müssen im Winter Temperaturen unter dem Gefrierpunkt berücksichtigt werden.

Die Region um Madrid würde sich für den Einsatz eines offenen durch Verdunstungskühlung leistungsstarken, Wasser betriebenen Kühlturms eignen. Da im Winter Aussentemperaturen unter dem Gefrierpunkt des Wassers zu erwarten sind ist dieser Variante jene mit einem geschlossenen Kühlurm vorzuziehen. Als Wärmeträgermedium wird dazu Antifrogen eingesetzt. Da in Madrid die Luftfeuchte im Sommer generell tief ist, kann die Kühlleistung hier durch die Besprühung des Wärmetauschers des Aussenteils mit Wasser gesteigert werden. Dadurch entsteht aber ein erhöhter Wartungsaufwand.

**Tessin** – Stellvertretend für das Tessin sind die Klimadaten von Lugano herangezogen worden. Die Luftfeuchte schwankt hier im Bereich von 65 % bis 75 % nur relativ wenig auf erhöhtem Niveau. Die Temperatur hingegen schwankt von negativen Werten bis in den Bereich nahe 30 °C. Wenn Kühlbedarf besteht, dann zeigen das Temperaturniveau und die relative Luftfeuchte den Einsatz eines geschlossenen Kühlurmes / Wärmetauschers an. Da im Winter Temperaturen unter dem Gefrierpunkt zu erwarten sind ist Antifrogen als Wärmeträgermedium einzusetzen. Zur Steigerung der Kühlleistung kann das „Freecooling“ zum Einsatz kommen. Dadurch wird aber ein erhöhter Wartungsaufwand entstehen.

## A.10 Klimadaten

Bei der Dimensionierung von Klimageräten zur Anwendung in Wohn- und Arbeitsräumen sind nebst der Gebäudestruktur, den internen Wärmequellen, dem Nutzerverhalten und dessen Komfortbedürfnissen die klimatischen Bedingungen am Standort die wichtigsten Einflussgrößen. Die Zahl der Betriebsstunden der Geräte über den Jahresverlauf beeinflussen die variablen Kosten und den Servicezyklus. In der Klimatechnik können dazu als Mass die Heizgrad- bzw. die Kühlgradtage oder aber die Außentemperatur (Umgebungstemperatur), ab welcher geheizt bzw. gekühlt werden soll, angegeben werden.

In den Grafiken der Fig. A10.1 bis Fig. A10.6 sind Wetterdaten [10] für die Standorte Lugano in der Schweiz und Madrid sowie Almeria in Spanien dargestellt. An Hand der zwei Beispielstandorte in Spanien sind die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen im Landesinneren und am Meer deutlich zu erkennen. Aus den Grafiken kann für die drei Standorte die Zeit in der ein Kühlbedarf besteht abgelesen werden. Kühlbedarf besteht nach [11] z. B. ab einer Außentemperatur von  $T_a=15^\circ\text{C}$ . Bei Außentemperaturen, die tiefer als  $T_a=15^\circ\text{C}$  liegen, besteht ein Heizbedarf.

### KLIMADATEN FÜR LUGANO

Luftfeuchtigkeit rF [%] in Lugano

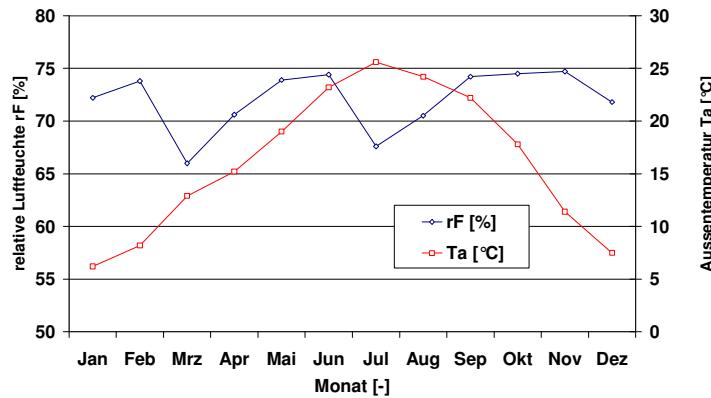


Fig. A10.1: Monatliche relative Luftfeuchtigkeit rF [%] und Außentemperatur Ta [°C] in Lugano. Die Luftfeuchtigkeit in Lugano liegt über das ganze Jahr im Bereich zwischen 65 % und 75 %.

Solarstrahlung  $G_h$  / Außentemperatur  $T_a$ : Lugano

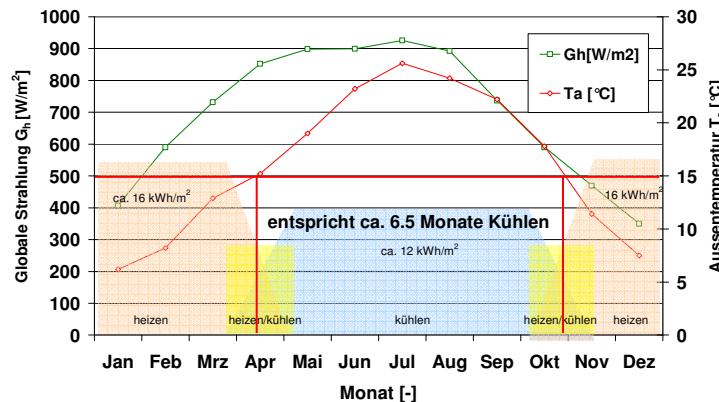


Fig. A10.2: Monatliche globale Solarstrahlung  $G_h$  [W/m²] in eine horizontale Fläche und Außentemperatur  $T_a$  [°C] in Lugano. Schematisch eingezeichnet sind die Heiz- und Kühlperioden bzw. die Perioden mit Bedarf an Heizen oder Kühlen.

## KLIMADATEN FÜR MADRID

Luftfeuchtigkeit rF [%] in Madrid

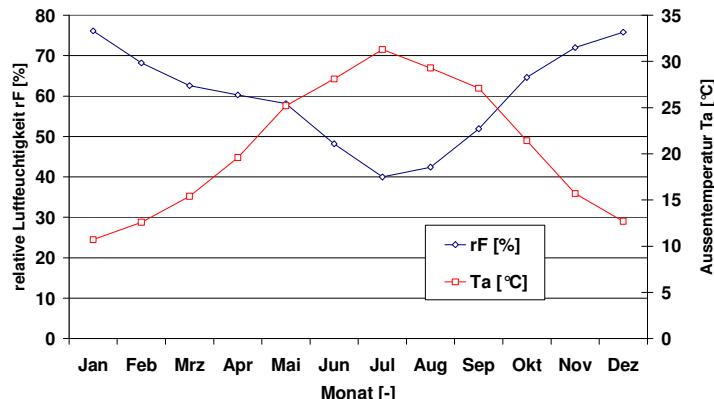


Fig. A10.3: Monatliche relative Luftfeuchte rF [%] und Aussentemperatur Ta [°C] in Madrid. Die Luftfeuchtigkeit in Madrid schwankt zwischen 80 % im Winter und 40 % im Sommer, wenn Kühlungsbedarf besteht.

Solarstrahlung  $G_h$  / Aussentemperatur Ta: Madrid

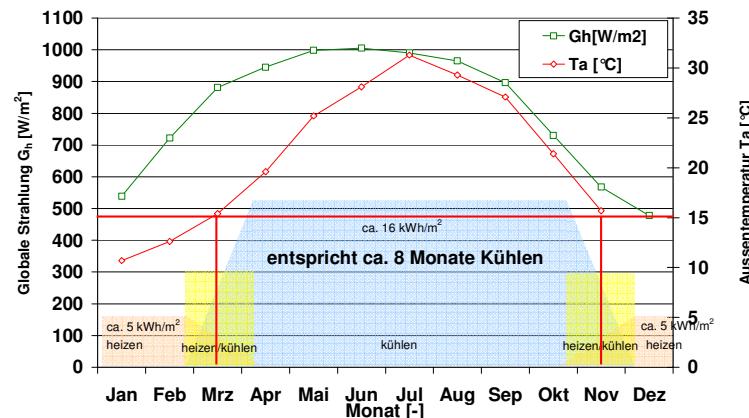


Fig. A10.4: Monatliche globale Solarstrahlung  $G_h$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] in eine horizontale Fläche und Aussentemperatur Ta [°C] in Madrid. Schematisch eingezeichnet sind die Heiz- und Kühlperioden bzw. die Perioden mit Bedarf an Heizen oder Kühlen.

## KLIMADATEN FÜR ALMERIA

Luftfeuchtigkeit rF [%] in Almeria

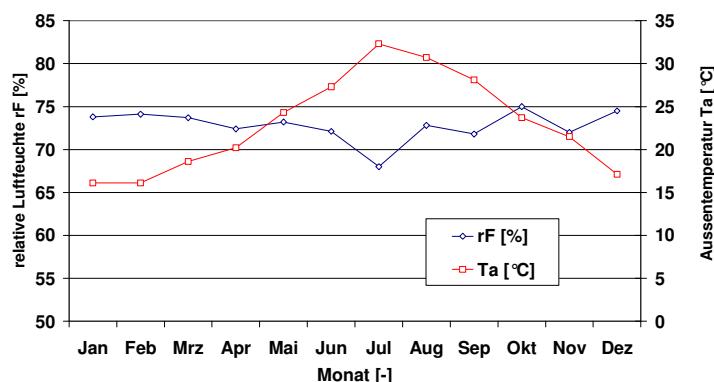


Fig. A10.5: Monatliche relative Luftfeuchtigkeit rF [%] und Aussentemperatur Ta [°C] in Almeria. Die Luftfeuchtigkeit in Almeria liegt über das ganze Jahr im Bereich zwischen 65 % und 75 %.

Solarstrahlung  $G_h$  / Aussentemperatur  $T_a$ : Almeria

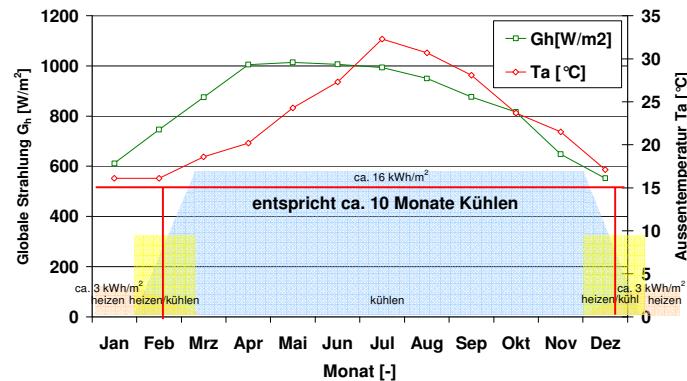


Fig. A10.6: Monatliche globale Solarstrahlung  $G_h$  [ $\text{W/m}^2$ ] in eine horizontale Fläche und Aussentemperatur  $T_a$  [ $^\circ\text{C}$ ] in Almeria. Schematisch eingezeichnet sind die Heiz- und Kühlperioden bzw. die Perioden mit Bedarf an Heizen oder Kühlung.