



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Schlussbericht** 12.12.2014

---

# **Magnetokalorische Kraftmaschine zur Strom- erzeugung**

## **Marktchancen- und Potenzialanalyse**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Kofinanzierung:**

Swiss Blue Energy AG  
Badstrasse 6  
5330 Bad Zurzach  
[www.swiss-blue-energy.ch](http://www.swiss-blue-energy.ch)

**Auftragnehmer:**

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW  
Hochschule für Wirtschaft  
Riggenbachstrasse 16  
4600 Olten  
[www.fhnw.ch/wirtschaft](http://www.fhnw.ch/wirtschaft)

**Autoren:**

Prof. Thomas Helbling, [thomas.helbling@fhnw.ch](mailto:thomas.helbling@fhnw.ch)  
Marc Bill, [marc.bill@fhnw.ch](mailto:marc.bill@fhnw.ch)

<b>BFE-Bereichsleiter:</b>	Martin Pulfer
<b>BFE-Programmleiter:</b>	Michael Spirig
<b>BFE-Vertragsnummer:</b>	SI/501018-01

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

## Zusammenfassung

Magneto-kalorische Kraftmaschinen (MKK) sind in der Lage, aus einer geringen Temperaturdifferenz zweier Flüssigkeiten Rotationsenergie zu erzeugen, welche weiter zur Stromproduktion verwendet werden kann. Diese Technologie bietet somit die Möglichkeit, aus ungenutzter Abwärme Strom zu erzeugen. Im Besonderen ist hauptsächlich die Temperaturdifferenz und nicht das Temperaturniveau entscheidend für die Leistung der MKK. Somit kann diese neue Technologie auch in der bisher (fast) nicht nutzbaren Niedertemperaturabwärme ( $<100^{\circ}\text{C}$ ) angewandt werden.

Die vorliegende Studie untersucht die Wirtschaftlichkeit und schätzt das Marktpotenzial (CH und DEU) für diese neue Technologie im industriellen Umfeld ab. Aus abwärme-technisch relevanten Branchen wurden sechs Business Cases selektioniert, bei welchen die Implementation einer MKK in den Prozess geprüft wurde. Anhand der gesammelten Daten und der dynamischen Investitionskostenrechnung wurde für alle Cases ein Target Price berechnet. Dieser widerspiegelt den vom Markt akzeptierten Preis einer solchen Anlage, der sich zwischen 4'500 und 8'100 CHF pro kW installierte Leistung bewegt. Die Rentabilität hängt am stärksten vom Strom- und Wasserpreis sowie den Betriebsstunden ab.

Es resultiert ein ausreichend grosses Marktpotenzial für die Schweiz und Deutschland, um die Technologie weiter zu verfolgen. Bezüglich den Energiegestehungskosten ist die Technologie unter den berechneten Target Prices konkurrenzfähig zu erneuerbaren Energietechnologien. Inwieweit die aus dem Target Price abzuleitenden Target Costs für die MKK-Technologie realistisch sind, war nicht Gegenstand der Untersuchung und muss im Verlauf des nächsten Entwicklungsschrittes geklärt werden. Erste Abschätzungen stimmen allerdings positiv.

Damit die in der Studie berechneten Werte erreicht werden, muss vorgängig eine weitere technologische Entwicklung, im spezifischen des magnetokalorischen Materials stattfinden. Falls die vorgegebenen Werte durch die Technik erreicht werden, ergibt sich ein hohes Potenzial der Niedertemperaturabwärmenutzung mit Hilfe der magnetokalorischen Kraftmaschine.

## Résumé

Les moteurs magnéto-caloriques (MMC) sont capables de générer de l'énergie de rotation à partir d'une très faible différence de température entre deux fluides, pouvant ensuite être exploitée pour la production d'électricité. Cette technologie offre ainsi la possibilité de produire de l'électricité à partir d'un dégagement de chaleur inutilisé. En particulier, c'est la différence de température et non pas le niveau de température qui est déterminante pour le rendement électrique de la MMC. Ainsi, cette nouvelle technologie peut également être utilisée à des niveaux de basse température jusqu'ici (presque) inexploitable ( $<100^{\circ}\text{C}$ ). La présente étude analyse la rentabilité de cette nouvelle technologie et évalue son marché potentiel (CH et DE) dans l'environnement industriel. À partir des branches industrielles pertinentes pour le dégagement de chaleur thermique, six études de faisabilité ont été sélectionnées, pour lesquelles l'implantation d'un processus MCC a été testé. Pour chaque cas, un prix cible ("target price") a été calculé sur la base des données collectées et à partir de la méthode de calcul des coûts d'investissement dynamiques. Celui-ci reflète le prix accepté par le marché pour une telle installation, oscillant entre 4 500 et 8 100 CHF par kW de puissance installée. La rentabilité dépend principalement du prix de l'électricité et de l'eau ainsi que des heures de fonctionnement.

Le potentiel de marché résultant est suffisamment important en Suisse et en Allemagne pour pouvoir poursuivre le développement de cette technologie. En ce qui concerne les coûts de production de l'énergie, sur la base du prix cible ("target price") calculé, cette technologie est concurrentielle par rapport aux autres énergies renouvelables. La mesure dans laquelle les coûts cibles dérivés du prix cible sont réalistes pour la technologie MCC ne faisait pas l'objet de cette enquête et ce point devra donc être clarifié au cours des prochaines étapes de développement. Toutefois, les estimations initiales s'avèrent positives.

Afin d'atteindre les valeurs calculées dans cette étude, des avancées technologiques doivent être réalisées au préalable, en particulier sur le matériau magnéto-calorique. Dans le cas où les valeurs fixées seraient atteintes, l'utilisation d'une machine magnéto-calorique pour l'exploitation des dégagements de chaleur à basse température présenterait un grand potentiel.

## Summary

Magneto caloric machines (MKM) are able to generate kinetic energy of rotation using the temperature difference between two liquids, which then can be transformed into electricity. This new technology offers the opportunity to generate electricity out of waste heat. In particular only the temperature difference and not the level is determining the electrical power of an MKM. Hence, this new technology can be applied to low temperature waste heat ( $<100^{\circ}\text{C}$ ), which (nearly) cannot be recovered up to date.

This study evaluates the profitability and estimates the market potential (CH and GER) for this new technology in the industry. Six business cases were selected out of waste heat intensive industries. For those the integration of an MKK into processes was evaluated. Based on the collected data a target price was calculated for each case using a dynamic investment cost methodology. The target price represents the price which the industry is willing to pay for an MKK. It results in 4'500 to 8'100 CHF per kW installed power. Profitability is influenced by electricity, water price and operating hours the most.

The estimated market potential for Switzerland and Germany is sufficiently to pursue the development of the technology. Looking at electricity generation costs, the technology is, under the assumption of the calculated target price, competitive to renewable energy technologies. Whether the target costs which correspond to the calculated target prices are feasible or not was not part of this study and has to be evaluated in the next development stage. However, first estimates show a positive pattern.

To attain the results of this study, a technological development especially of the magneto caloric material needs to be tackled. If the assumptions underlying this study can be fulfilled by the technology, a high potential of low temperature waste heat recovery by magneto caloric machines exists.

# Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	7
2	Ziel der Arbeit	7
3	Vorgehen/Methode	8
4	Identifikation Business Cases	9
4.1	Branchen mit Abwärmepotenzial	9
4.2	Branchen mit Kaltwasserpotenzial	9
4.3	Branchen mit Abwärme- und Kaltwasserpotenzial	10
5	Business Cases	11
5.1	Teilmarkt grosse Abwärmeproduzenten	12
5.2	Teilmarkt kleine Abwärmeproduzenten	14
6	Sensitivitätsanalyse Target Price	15
6.1	Sensitivität Einflussfaktoren	15
6.2	Fazit Sensitivitätsanalyse	16
7	Marktpotenzialschätzung	18
7.1	Marktpotenzialschätzung Schweiz	18
7.2	Marktpotenzialschätzung Deutschland	18
8	CO <sub>2</sub> -Einsparpotenzial	19
9	Anforderungspflichtenheft	19
10	Fazit	20
10.1	Target Price für den wirtschaftlichen Betrieb MKK	20
10.2	Einschätzung Erfolgspotenzial MKK	20
10.3	Konkurrenzfähigkeit zu erneuerbaren Energietechnologien	20
11	Literaturverzeichnis	22
Anhang		23
12	Investitionskostenrechnung	23
12.1	Kapitalwertmethode (NPV)	23
12.1.1	Target Price	23
12.1.2	Aufwände und Erträge - Cashflow	23
12.1.3	Berücksichtigte Faktoren	24
12.2	Investitionskosten	24
13	Diagramme Simulation Sensitivität	25

# Präambel

Der vorliegenden Studie unterliegen einige massgebende Annahmen, die hier kurz erläutert werden.

Die Selektion der Business Cases wurde aufgrund der Eigenschaften des magnetokalorischen Materials Gadolinium getroffen. Die Curie-Temperatur von Gadolinium liegt bei circa 19.3°C. Es wurde konsequenterweise nach Industrien gesucht, die über einen Kaltwasserzugang verfügen. Bereits heute bestehen für die magnetokalorischen Kältetechnik Materialien, dessen Curie Punkt über einen grossen Temperaturbereich beliebig einstellbar ist (z.B. Materialien von BASF, VAC). Diese Materialien wurden jedoch für andere Anwendungen als die MKK optimiert und müssen weiter entwickelt werden, bevor ein effizienter Einsatz für die Kraftmaschine möglich ist. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Restriktion einer Kaltwasserquelle durch die Materialeigenschaften in Zukunft aufgehoben wird, so dass nur noch das  $\Delta T$  zwischen zwei Medien entscheidend ist (10 und 30°C wäre äquivalent zu 60 und 80°C). Die Wirtschaftlichkeitsberechnung richtet sich am zukünftigen Material aus, welches die gesamte Temperaturdifferenz ausnützen kann (Nutzung über mehrere Kaskaden).

Bis zum heutigen Zeitpunkt ist der von der Swiss Blue Energy AG gebaute Demonstrator, nach unserem besten Wissen, die einzige magnetokalorische Kraftmaschine dieser Art mit einer Leistung im kW-Bereich. Heiniger et al. (2012) bilanzierten diese Maschine, welche einen thermischen Gesamtwirkungsgrad von 0.75% aufweist (> 1.5 % im Teillastbereich), was ca. 10% des Carnot-Wirkungsgrades entspricht. Dieser Demonstrator wurde rein zu Anschauungszwecken und ohne Fokus auf den Wirkungsgrad ausgelegt und konstruiert. In einer vom BFE unterstützten Studie von Kitanovski et al. (2008a) wurden magnetokalorische Kraftmaschinen zur Stromerzeugung untersucht und ökonomisch bewertet. Für die vorliegende Studie wurde zur Berechnung des thermischen MKK-Wirkungsgrades basierend auf den Ergebnissen von Kitanovski et al. (2008a), bzw. Vurnoz et al. (2012) angenommen, dass 40% des Carnot Wirkungsgrades genutzt werden können (Temperaturen < 100 °C, 2 Tesla magn. Flussdichte, 30% Volumenanteil).

# 1 Ausgangslage

Magneto-kalorische Kraftmaschinen (MKK) sind in der Lage, aus einer geringen Temperaturdifferenz zweier Flüssigkeiten ( $<100^{\circ}\text{C}$ ) Rotationsenergie zu erzeugen, welche weiter zur Stromproduktion verwendet werden kann. Diese junge Technologie bietet somit die Möglichkeit aus ungenutzter Abwärme Strom zu erzeugen. Im Besonderen ist hauptsächlich die Temperaturdifferenz und nicht das Temperaturniveau entscheidend für die Leistung der MKK. Somit kann diese neue Technologie auch in der bisher (fast) nicht nutzbaren Niedertemperaturabwärme angewandt werden.

Die Swiss Blue Energy AG (SBE) entwickelte eine Maschine, welche die oben genannten Eigenschaften zur Stromproduktion ausnutzt (weitere Informationen auf [www.swiss-blue-energy.ch](http://www.swiss-blue-energy.ch)). Das Bundesamt für Energie (BFE) unterstützt zwei parallel laufende Forschungsprojekte zu dieser Maschine. Neben dem vorliegenden Projekt wurde ein Forschungsprojekt am Institut für Thermo- und Fluidengineering (ITFE) der Hochschule für Technik der FHNW unterstützt. Ziel dieses Projektes ist es auf Grundlage des von SBE gebauten Demonstrators einen industrietauglichen Prototypen zu entwickeln, welcher einem dauerhaften Industrieversuch standhält. Zur Festlegung der technischen Parameter als Ausgangslage der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde eng mit dieser Forschungsgruppe zusammengearbeitet.

Die Anspruchsgruppen in Energiefragen sind vielschichtig. Während aus betrieblicher Sicht vor allem die Versorgungs-, Betriebssicherheit und wirtschaftliche Aspekte im Vordergrund stehen, gilt es aus volkswirtschaftlicher Sicht nicht nur die wirtschaftlichen Aspekte sondern zunehmend ökologische und andere Fragen zu berücksichtigen. In unserer Analyse werden wir uns auf die betrieblichen Aspekte konzentrieren.

Die Studie untersucht ausschliesslich Abwärmequellen, die aufgrund industrieller Produktionsprozesse zustande kommen. Weitere mögliche Einsatzgebiete, wie z.B. in Kombination mit Solarenergie oder Geothermie sind nicht Teil des Auftrags und werden deshalb bewusst nicht behandelt. Kitanovski et al. (2008a) zeigte bereits, dass magnetische Energieerzeugungstechnologien in der industriellen Abwärmennutzung die grössten Marktchancen hätten.

Die Studie beschränkt sich innerhalb der Industrie auf Lösungen mit Abwärme in Form von Wasser. In Zukunft ist es durchaus plausibel, dass Abwärme in anderen Flüssigkeiten und Aggregatzuständen nutzbar sind, wodurch sich das Anwendungsgebiet erweitert.

Die unten aufgeführten Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse beruhen auf vielen Annahmen und Schätzung, vor allem der Eigenschaften einer zukünftigen MKK. Eine dieser Annahmen beinhaltet z.B. eine grundlegende Innovation in der magneto-kalorischen Materialwissenschaft. Sobald die technische Entwicklung des Materials und der Konstruktionsweise abgeschlossen ist, sollten die vorliegenden Werte deshalb verifiziert und allenfalls den neuen Gegebenheiten angepasst werden.

## 2 Ziel der Arbeit

Im Rahmen des vom BFE und der SBE unterstützten Forschungsprojektes "Wirtschaftlichkeitsanalyse - magnetokalorische Kraftmaschine (MKK)" wird das Marktpotential der MKK für die Schweiz und Deutschland abgeschätzt. Die vorliegende Studie hat zum Ziel die Wirtschaftlichkeit der MKK im industriellen Umfeld zu eruieren und sowohl das Marktpotenzial für die Schweiz und Deutschland abzuschätzen als auch ein Anforderungspflichtenheft für die Industrie zu erstellen.

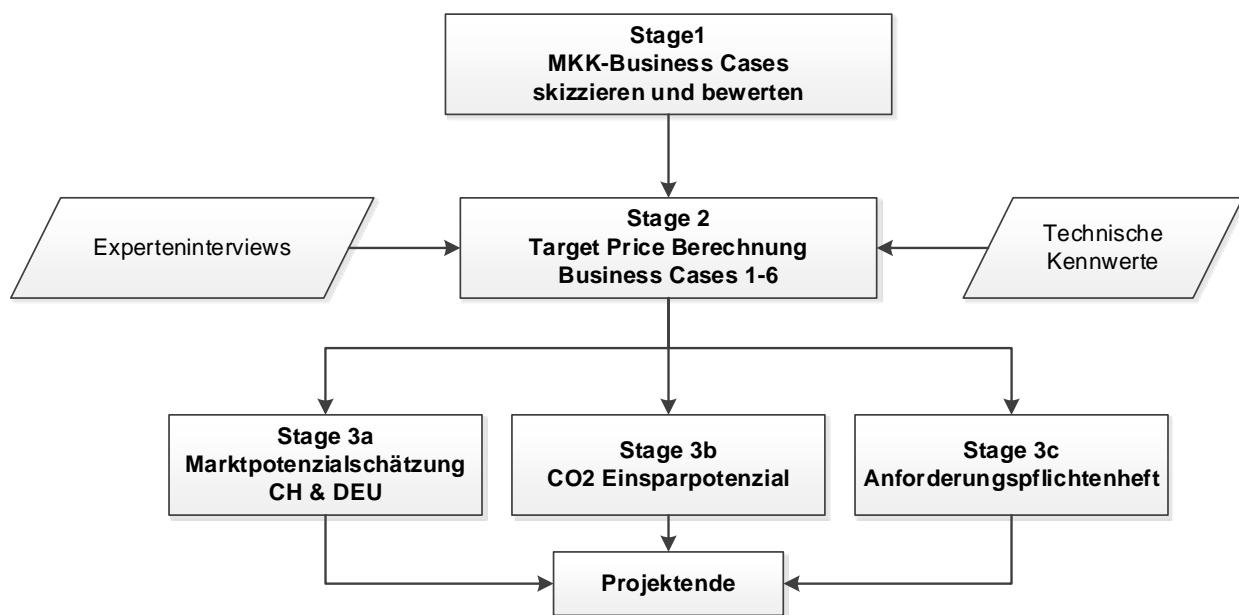
Explizit sollen im Rahmen der Studie folgende Fragestellungen für die MKK zur Elektrizitätserzeugung geklärt werden:

- Der Target Price für unterschiedlich grosse Anlagentypen ist valide eruiert.
- Das Anforderungspflichtenheft für MKK für die Zielgruppe „Industrielle Abwärmeerzeuger“ ist definiert.
- Die Marktattraktivität der MKK-Technologie im industriellen Umfeld ist geklärt.
- Das Marktpotenzial von MKK-Anlagen ist für die Schweiz und Deutschland bekannt (Anzahl Anlagen/kW-Leistung).
- Das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial durch MKK-Anlagen zur Elektrizitätsgewinnung im Markt industrielle Abwärme in der Schweiz ist definiert.

### 3 Vorgehen/Methode

Zur Zielerreichung wurde ein dreistufiges Verfahren gewählt. In der ersten Stufe wurden potentielle Business Cases skizziert und mithilfe von Experteninterviews bewertet. Mithilfe der Inputdaten von technischer Seite und den in den Experteninterviews gesammelten Datenwerte, wurden zwei Marktsegmente identifiziert und aus jedem Segment die erfolgversprechendsten Business Cases selektioniert. Während der zweiten Stufe wurde für diese Business Cases die Wirtschaftlichkeit einer konkreten Anlage mit der Kapitalwertmethode eruiert. In der letzten Stufe wurde mithilfe der gewonnen Erkenntnisse aus Stufe 2 das Marktpotenzial, das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial und das Anforderungspflichtenheft für die Schweiz und Deutschland erstellt.

Abbildung 1: Konzept Vorgehen Wirtschaftlichkeitsanalyse



#### Methode

Zur Abschätzung des Marktpotenzials wurden aus den potentiellen Industrien sechs Business Cases selektioniert. Aufgrund dieser Business Cases wurde der Target Price für unterschiedlich grosse Anlagentypen berechnet. Als Berechnungsmethode wurde die dynamische Investitionskostenrechnung gewählt. Eine leichte Abwandlung der Kapitalwertmethode (siehe Anhang 12) ergibt den Target Price. Der Target Price ist der maximal durch den Markt akzeptierte Preis für eine MKK. Dieser Preis muss neben den Produktions- und Installationskosten auch die vom Hersteller angestrebte Marge enthalten. In der Berechnung sind betriebliche, technische und wirtschaftliche Faktoren berücksichtigt (siehe Abschnitt 12.1.3).

Der Target Price enthält Schätzungen der technischen Eigenschaften zukünftiger MKKs. Diese Schätzungen wurden aufgrund der Messungen am Demonstrator gemacht (Heiniger et al, 2012) und stammen aus aktuellen Forschungsberichten (Kitanovski et al., 2008, Vuarnoz et al., 2012). Eine der wichtigsten Annahmen auf technischer Seite ist die Existenz eines Materials, das den angenommenen Wirkungsgrad erfüllt und dessen Curie-Punkt über einen grossen Temperaturbereich einstellbar ist. Aktuelle und zukünftige

tige Produktionskosten einer Anlage haben keinen Einfluss auf den Target Price. Der Target Price setzt von der Kundenseite an und gibt einen Richtwert für den maximalen, vom Markt akzeptierten Endpreis vor.

## 4 Identifikation Business Cases

### 4.1 Branchen mit Abwärmepotenzial

Da in der Schweiz keine Daten zu Abwärmemengen bestehen, betrachten wir die Energieintensität auf Branchenebenen als Indikator. Um die erforderliche Menge an Abwärme zu erhalten, wird der Energieverbrauch pro Produktionsstätte berechnet. Dieser Indikator zeigt klar an, dass in den Branchen Chemie/Pharmaindustrie, Zement/Betonproduktion und Metall/Eisenproduktion das grösste Potenzial lauert. Das nächstgrösste Potenzial, birgt sich in der Nahrungsmittelproduktion. Dieses Potenzial ist vermutlich grösser als durch den Indikator angezeigt, da die Branche bezüglich den Betriebsgrössen sehr heterogen ist. Es ist plausibel, dass es eine nicht vernachlässigbare Anzahl an sehr grossen Abwärmeerzeugern in der Nahrungsmittelproduktion gibt.

Tabelle 1: Energieverbrauch und Struktur relevanter Branchen 2012 - Schweiz

Energiestatistik 2012	Total TJ	Arbeitsstätten (AS)	VZÄ	TJ/AS	GWh/AS
Zement / Beton:	13'941	38	1'595	366.87	101.91
Metall / Eisen:	7'496	124	7'563	60.45	16.80
Chemie / Pharma:	32'198	822	59'202	39.17	10.88
Nahrungsmittel:	17'070	2'521	54'389	6.77	1.88
Papier / Druck:	12'985	2'524	29'941	5.14	1.43
Metall Geräte:	15'758	10'174	200'872	1.55	0.43

### 4.2 Branchen mit Kaltwasserpotenzial

Auch für die industrielle Verwendung von Wasser ist keine offizielle Statistik vorhanden. Dezentral sind teilweise bei den Kantonen Daten vorhanden, die jedoch nicht öffentlich zugänglich sind. Geografische Angaben von Entnahme- und Rückgaberechten von Quell- und Oberflächengewässer sind teilweise in den online GIS-Browsern der Kantone einsehbar, dies jedoch ohne effektive Nutzungsdaten (z.B. Zürich: [www.gis.zh.ch](http://www.gis.zh.ch)).

Nach unserem Wissen stammt die neuste und einzige Statistik zum Wasserverbrauch der Industrie aus dem Jahre 2009, verfasst vom Schweizerischen Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW). Die Daten beziehen sich auf das Betriebsjahr 2006. In der Statistik sind nicht alle Industriezweige erfasst, die relevanten Wasserverbraucher konnten jedoch repräsentativ abgebildet werden.

Die Statistik der SVGW (2009) zeigt klar, dass der grösste Verbraucher die Kernkraftwerke sind, gefolgt von Gewerbe und Industrie (siehe Abbildung 2). Relevante Branchen aus der Sicht des Wasserverbrauchs sind die Chemie-, Entsorgungs-, Papier-, Metall- und Nahrungsmittelindustrie (siehe Abbildung 3). Inwiefern dieses Wasser als Abwärme- oder Kältequelle genutzt werden kann, geht aus den Daten nicht hervor und musste individuell abgeklärt werden.

Abbildung 2: Wasserbedarf der Schweiz 2006. Quelle: SVGW (2009)

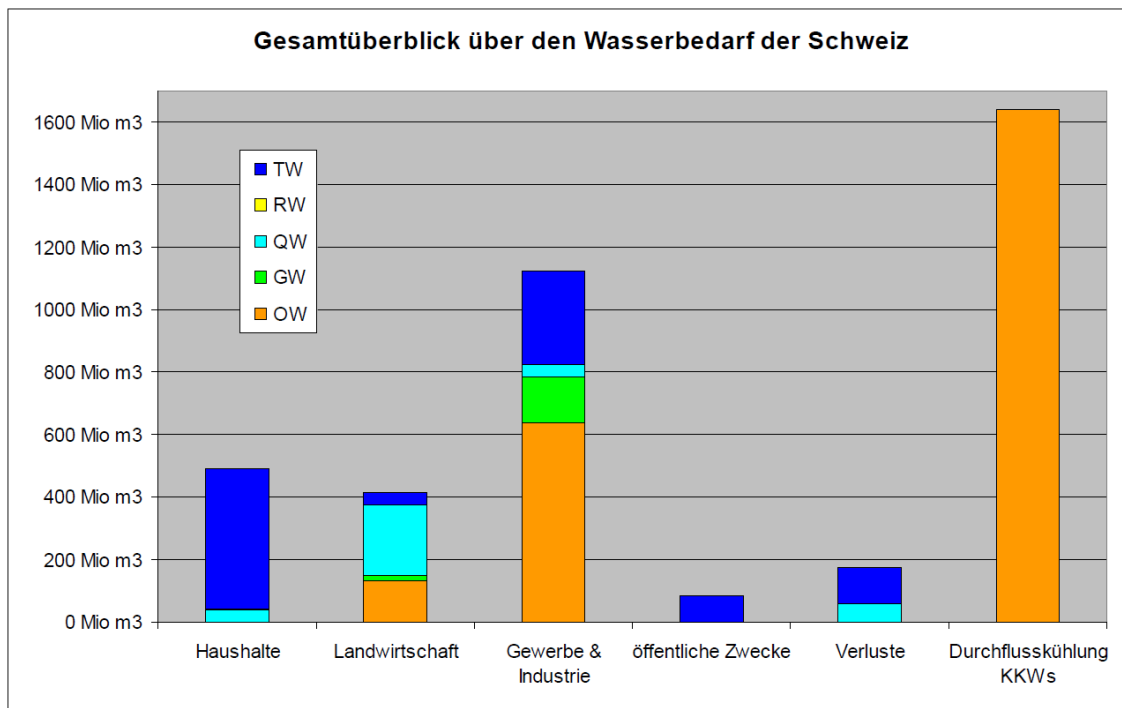
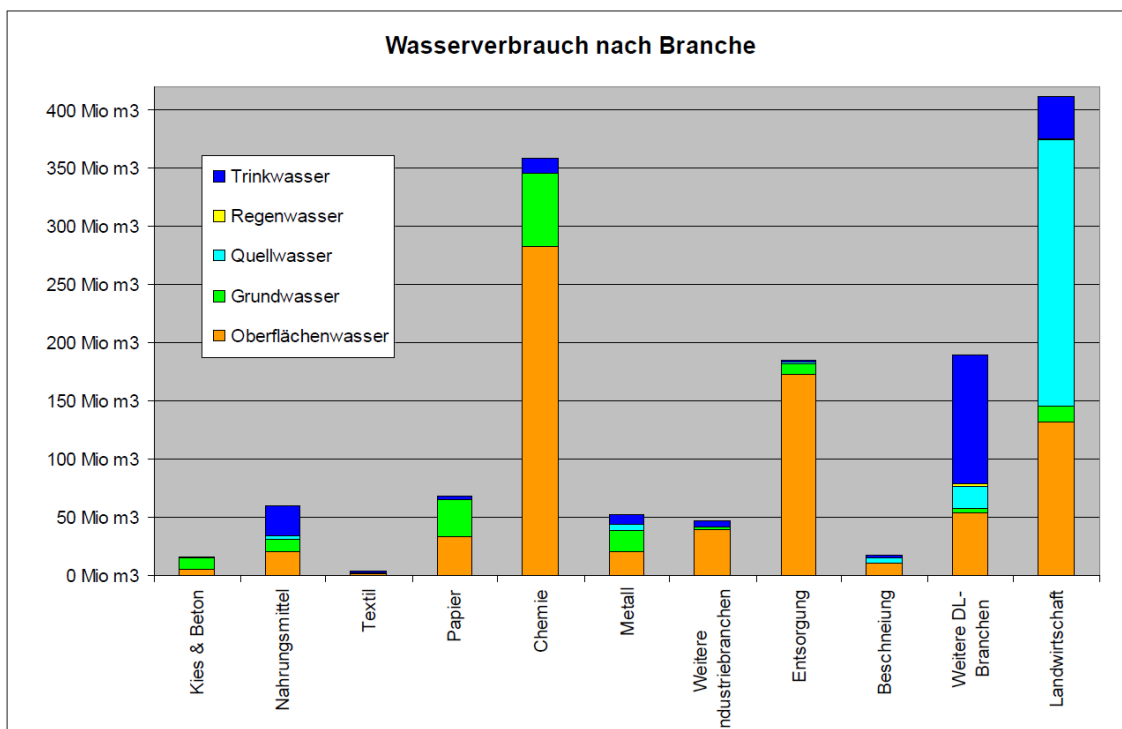


Abbildung 3: Wasserbedarf nach Branche 2006. Quelle: SVGW (2009)



### 4.3 Branchen mit Abwärme- und Kaltwasserpotenzial

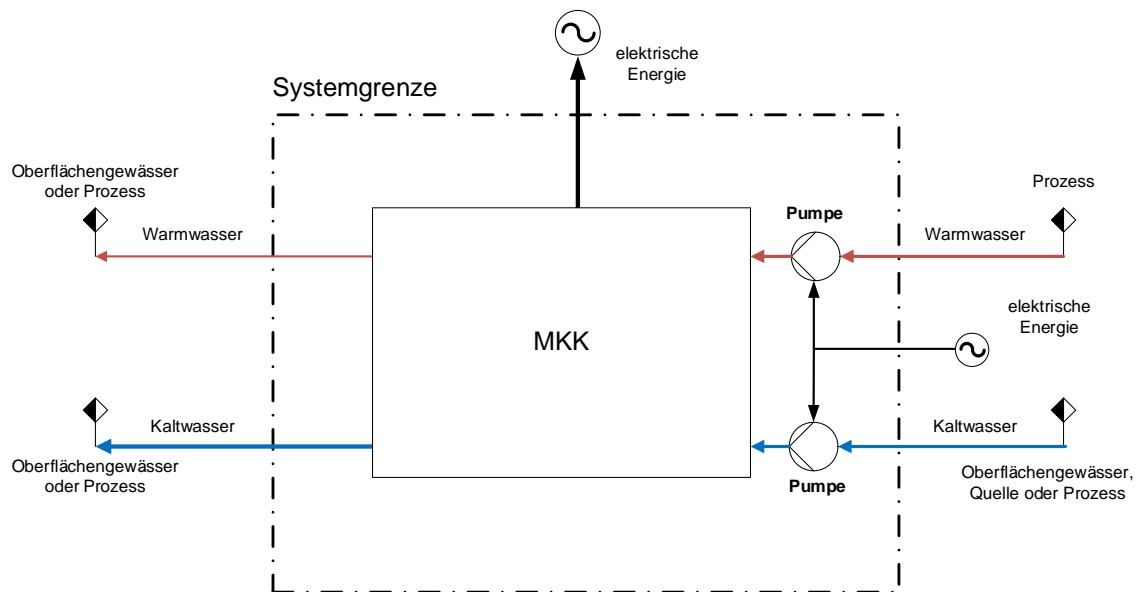
Aus dieser Analyse schliessen wir, dass die Betriebe der Chemie-, Metall-, Papier- und Nahrungsmittellndustrie potenzielle Standorte für eine MKK sein könnten. Ausser in der Papierindustrie konnten in allen Industriezweigen Partner für relevante Business Cases gefunden werden. Die Produktionsprozesse sind allerdings innerhalb der Branchen sehr heterogen, was eine Verallgemeinerung der Resultate erschwert. Zusätzlich wurde die Zement- und Betonindustrie aufgrund des hohen Energiebedarfs pro Arbeitsstätte und der relativ standardisierten Produktionsprozesse untersucht.

## 5 Business Cases

Das Integrationspotenzial einer MKK in bestehende Prozesse wurde jeweils mit den Energie- oder Umweltverantwortlichen der Teilnehmenden Unternehmen ausführlich diskutiert. Es bestand stets eine hohe Bereitschaft Daten zur Verfügung zu stellen.

Grundannahme der Cases ist eine Black Box, in welcher die Temperaturdifferenz optimal ausgenutzt wird (inkl. Kaskadierung). Der Target Price bezieht sich auf eine fertig installierte Anlage. Als Input wird Warm- und Kaltwasser sowie elektrische Energie für die Pumpen benötigt, als Output resultieren neben elektrischer Energie ebenfalls zwei Massenströme (warm und kalt).

Abbildung 4: Systemgrenze MKK



Die Studie von Vuarnoz et al. (2012) evaluiert magnetokalorische Kraftmaschinen und modelliert für ein Magnetfeld von 2 Tesla einen Gesamtwirkungsgrad von 40% des Carnot-Wirkungsgrades (Verluste einberechnet). Nach unserem besten Wissen ist diese Studie die aktuellste und auch einzige, welche Simulationen dieser Art durchgeführt hat. Wir nehmen deshalb für die Business Cases einen thermischen Gesamtwirkungsgrad an, der jeweils 40% des Carnot-Wirkungsgrades beträgt.

Weitere Annahmen sind:

- Kapitalkosten: 8%
- Nutzungsdauer: 15 Jahre
- Druckverlust innerhalb MKK: 1 bar

Alle übrigen Parameter sind reale Werte aus den Unternehmen, z.B. die Betriebsstunden, der Strompreis (gleichzeitig Gestehungskosten für Unternehmen und Ertrag der MKK), Massenströme, Wasserkosten, etc. Tabelle 2 fasst die Inputdaten und die Resultate der Business Cases zusammen.

Grundlage der Wirtschaftlichkeitsberechnung ist eine Abwandlung der dynamischen Investitionskostenrechnung NPV. Die Methodik ist in Abschnitt 12 detailliert beschrieben. Der resultierenden Target Price deckt sämtliche Kosten, inkl. Marge des Herstellers (Produktion, Vertrieb, Installation, Marketing etc.).

Die nachfolgenden Business Cases stammen aus der Metall-/Eisen-, Energieerzeugungs-, Nahrungsmittel-, Zement- und Chemie-/Pharmaindustrie. Sämtliche Cases wurden mit Unternehmen in der Schweiz durchgeführt. Die Teilmärkte sind nach verfügbarem Massenstrom eingeteilt. Steht mehr als je 50m<sup>3</sup>/h Warm- und Kaltwasser zur Verfügung wird das Unternehmen als grosser Abwärmeproduzent klassifiziert.

## 5.1 Teilmarkt grosse Abwärmeproduzenten

Tabelle 2: Business Cases - Teilmarkt grosse Abwärmeproduzenten

		Einheit	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Volumen	WW	m <sup>3</sup> /h	900	60	130	130	60
	KW	m <sup>3</sup> /h	900	60	130	130	60
Temperatur	WW	°C	36.5	57	60	60	28
	KW	°C	10	17	25	30	6
Preis / Kosten	WW	CHF/m <sup>3</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	KW	CHF/m <sup>3</sup>	0.003	0.00	0.00	0.018 <sup>1</sup>	0.00
	Strom	CHF/kWh	0.12	0.10	0.10	0.10	0.11
Betriebsstunden <sup>2</sup>		h/a	8'760	7'500	7'000	7'000	8'760
Höhendifferenz	WW	m	0	0	0	0	3
	KW	m	5 <sup>3</sup>	5	5	3	40
Kosteneinsparung zu Ist-Situation		CHF/a	26'000	0	0	0	750 <sup>4</sup>
thermischer Wirkungsgrad <sup>5</sup>			3.4%	4.9%	10.5%	9.0%	3.0%
Leistung MKK		kW	949	135	222	163	45
Leistung Pumpen		kW	89	6	13	35 <sup>6</sup>	12
<b>Nettoleistung MKK</b>		<b>kW</b>	<b>860</b>	<b>129</b>	<b>209</b>	<b>128</b>	<b>33</b>
Nettoproduktion MWh		MWh/a	7'500	970	1'500	900	280
<b>Target Price / kW</b>		<b>CHF/kW</b>	<b>8'100</b>	<b>6'100</b>	<b>5'600</b>	<b>4'500</b>	<b>6'000</b>
<b>Target Price / kWh</b>		<b>Rp/kWh</b>	<b>6.8</b>	<b>5.7</b>	<b>5.6</b>	<b>5.5</b>	<b>6.4</b>
<b>Target Price Total</b>		<b>CHF</b>	<b>7'690'000<sup>7</sup></b>	<b>830'000<sup>8</sup></b>	<b>1'250'000</b>	<b>740'000<sup>9</sup></b>	<b>270'000</b>
CO2 Einsparpotenzial		t CO2eq <sup>10</sup>	920	120	180	110	35

1 Case 4 hat kein Kaltwasserzugang, weshalb ein eigener Kühlkreislauf für die MKK benötigt wird. Die Wasserkosten berechnen sich durch den Energieverbrauch des Kühlturms (Motorleistung für Wasserverteilsystem und Axialventilator 23kW, Kühlturm Cofely EWK (Cofely 2013)). Wird direkt als Aufwand in der Gesamtpumpenleistung der Maschine verrechnet.

2 Anzahl Stunden in der Abwärme anfällt. Je nach Wartungsintervall der MKK verringern sich die Betriebsstunden der MKK.

3 Einsparung von Pumpenergie, da kein zusätzliches Mischwasser gepumpt werden muss vor Rückgabe an Gewässer.

4 Kosteneinsparung durch verringerte Energierückgabe an Gewässer.

5 40% von Carnot-Wirkungsgrad. Siehe Kitanovski et al. (2008a).

6 Inklusive Motorleistung für Kühlturm (Wasserverteilsystem und Axialventilator).

7 Der Target Price müsste neben der MKK die Kosten eines Wasserfilters decken, da die Kaltwasserquelle sandhaltig ist.

8 Da die Abwärmequelle einen relativ hohen Anteil an Feststoffen enthält, muss zur Abwärmegewinnung ein Wärmetauscher eingesetzt werden, der ebenfalls vom Target Price gedeckt sein muss.

9 Der Target Price müsste neben der MKK die Kosten eines eigenen Kühlkreislaufs decken.

10 Es wird mit der CO2-Emission des Schweizer Lieferanten-Strommix von 122 g CO2eq/kWh gerechnet. Quelle: BAFU (2014).

Der Target Price im Teilmarkt grosse Abwärmeproduzenten bewegt sich zwischen 4'500 und 8'100 CHF pro kW installierte Leistung. Dieser Preis muss je nach Produktionsprozess neben den Gesamtkosten einer fertig installierten MKK die Kosten eines Wärmetauschers oder Wasserkühlturmes decken. Dieses Preisniveau könnte vermutlich in einer Kleinserie mit den entsprechenden Materialien erreicht werden. Der Target Price pro kW darf zwischen den Cases allerdings nicht eins zu eins verglichen werden. So ist z.B. im Case 2 und Case 5 der Target Price / kW zwar (fast) identisch, jedoch weichen die Target Prices für die gesamte Anlage massiv voneinander ab. Der Anteil an fixen Herstellungs und Materialkosten (Generator etc.) pro kW fällt bei kleineren Anlagen wesentlich höher aus als bei Grossen. Dadurch lässt der Target Price bei kleinen Anlagen weniger Spielraum für leistungsabhängige Produktionskosten und Marge.

Sobald eine der Ressourcen (Warm- oder Kaltwasser) kostenpflichtig ist, sinkt der Target Price (der Gesamtanlage) auf ein sehr tiefes Niveau (siehe Case 3). Gründe für kostenpflichtiges Wasser sind u.a.:

- Abgaben (durch Regulierung)
- Nicht Verfügbarkeit von Oberflächen- oder Grundwasser. Es muss zusätzlich ein Kühlturm betrieben werden, dessen Betriebskosten das Wasser verteuern (und die Investitionskosten zusätzlich vom Target Price gedeckt sein müssen).
- Wasser muss (über eine grosse Höhendifferenz) gepumpt werden.

Einen nennenswert positiven Effekt auf den Target Price haben der Massenstrom, das  $\Delta T$ , der Strompreis (Erlös) und die Betriebsstunden. Eine weiterführende Analyse der verschiedenen Faktoren ist in Abschnitt 6 zu finden.

## 5.2 Teilmarkt kleine Abwärmeproduzenten

Tabelle 3: Business Cases - Teilmarkt kleine Abwärmeproduzenten

		Einheit	Case 6	Case 7
Volumen	WW	m <sup>3</sup> /h	25	10
	KW	m <sup>3</sup> /h	25	10
Temperatur	WW	°C	40	60
	KW	°C	15	13
Preis / Kosten	WW	CHF/m <sup>3</sup>	0	0
	KW	CHF/m <sup>3</sup>	0	0
	Strom	CHF/kW h	0.12	0.10
Betriebsstunden		h/a	7'600	8'400
Höhendifferenz	WW	m	0	0
	KW	m	0	0
Kosteneinsparung zu Ist-Situation		CHF/a	0	0
thermischer Wirkungsgrad			8%	14%
Leistung MKK	kW		23	31
Leistung Pumpen	kW		2	1
<b>Nettoleistung MKK</b>	<b>kW</b>		<b>21</b>	<b>30</b>
Nettoproduktion MWh	MWh/a		160	250
<b>Target Price / kW</b>	<b>CHF/kW</b>		<b>7'100</b>	<b>7'000</b>
<b>Target Price / kWh</b>	<b>Rp/kWh</b>		<b>6.6</b>	<b>5.8</b>
<b>Target Price Total</b>	<b>CHF</b>		<b>160'000</b>	<b>220'000</b>
CO <sub>2</sub> Einsparpotenzial	t CO <sub>2</sub> eq <sup>11</sup>		20	30

Die Target Prices pro kW in diesem Teilmarkt sind auf einem ähnlichen Niveau wie im anderen Teilmarkt. Allerdings sind die Preise der Gesamtanlagen relativ tief. Dies zeigt auch die Problematik dieses Teilmarktes. Die notwendigen fixen Materialkosten (z.B. Generator) müssen sehr tief gehalten werden, damit der Target Price erreicht wird.

In den untersuchten Cases würde bei beiden Unternehmen mehr Abwärme zur Verfügung stehen. Das MKK-Potenzial ist durch eine beschränkte Wasserverfügbarkeit bzw. dem dezentralen Anfallen der Abwärme viel kleiner als das effektive Abwärmepotenzial der Betriebe.

<sup>11</sup> Es wird mit der CO<sub>2</sub>-Emission des Schweizer Lieferanten-Strommix von 122 g CO<sub>2</sub>eq/kWh gerechnet. Quelle: BAFU (2014).

## 6 Sensitivitätsanalyse Target Price

Um die Relevanz der verschiedenen Inputgrössen auf den Target Price besser zu verstehen, wird in diesem Abschnitt eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Im ersten Teil werden die Inputgrössen einzeln mit absoluten Werten analysiert, im zweiten Teil wird ein standardisierter Vergleich zwischen den Inputgrössen aufgezeigt.

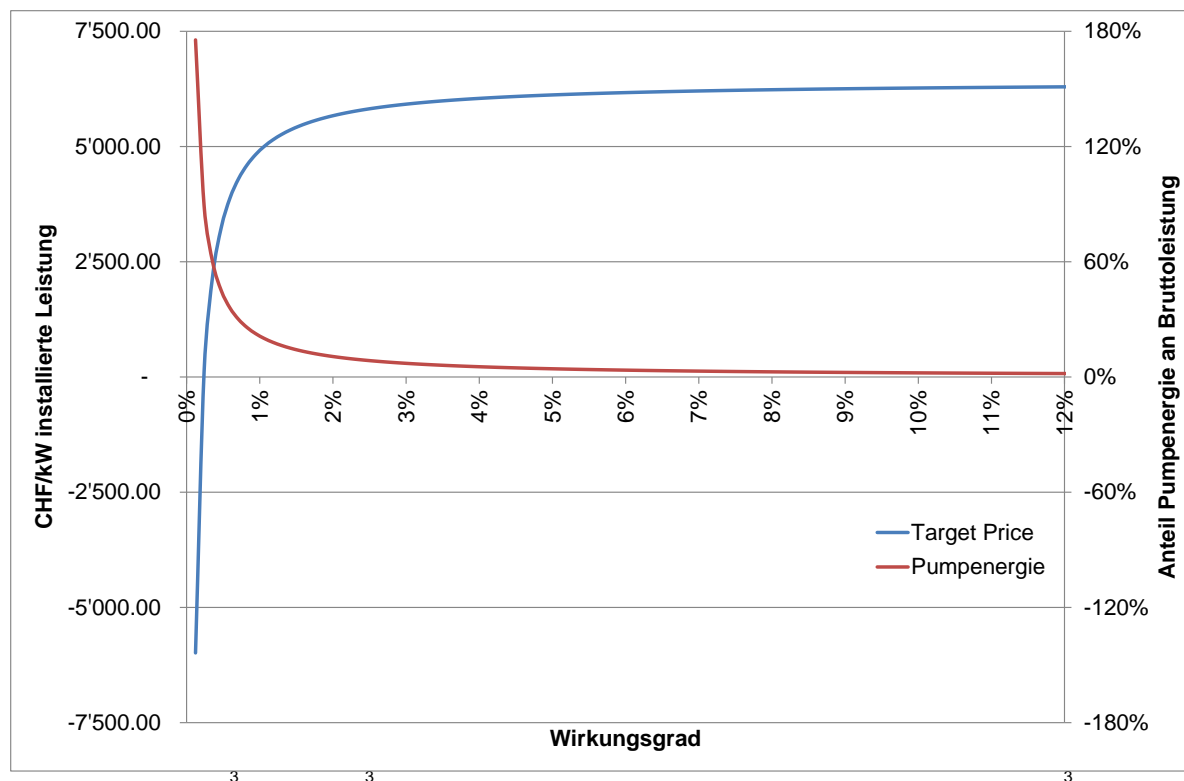
### 6.1 Sensitivität Einflussfaktoren

Der Target Price pro kW installierte Leistung flacht, bei den Einflussfaktoren die einen direkten Effekt auf die Leistung haben, ab einem gewissen Wert ab. Abbildung 5 zeigt auf, dass diese Abflachung aufgrund der benötigten Pumpenergie zustande kommt. Steigt der Wirkungsgrad über ca. 2%, stagniert die anteilige Pumpenergie der Bruttoleistung. D.h. Ertrag und Aufwand wachsen proportional mit jeder zusätzlichen Einheit Leistung, so dass der Preis pro kW stagniert. Für die Wirtschaftlichkeit der MKK ist es gemäss Abbildung 5 essentiell, dass der Wirkungsgrad in den flachen Bereich der Kurve kommt, also grösser als ca. 1.5-2% ist.

Bezüglich der Temperaturdifferenz, befindet sich die Maschine im optimalen Bereich, sobald das  $\Delta T$  grösser als ca. 20°C ist (siehe Abbildung 6). Da die Erträge und Aufwände linear vom Massenstrom abhängig sind, ist der Target Price pro kW unabhängig vom Massenstrom und stagniert auf dem Level von 6'100 CHF/kW.

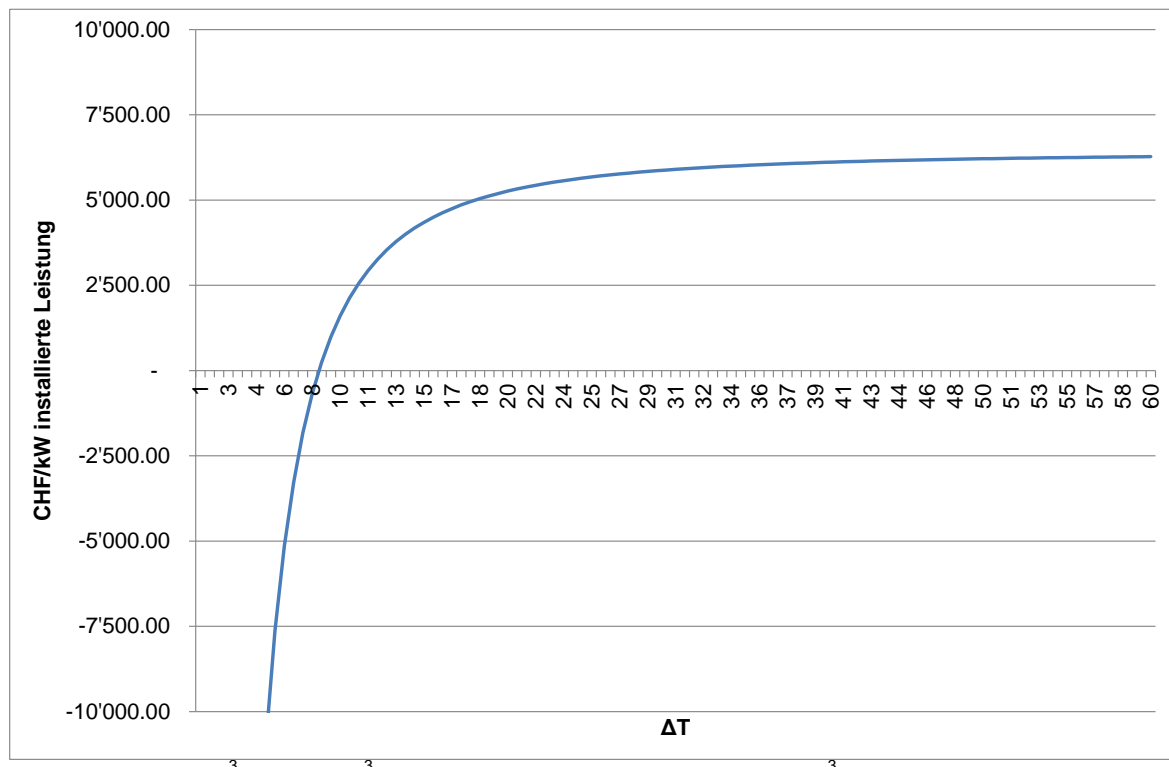
Betriebliche und wirtschaftliche Einflussfaktoren haben mehr oder weniger einen linearen Effekt auf den Target Price. Hier ist vor allem der Vergleich zwischen den Faktoren interessant, welcher im nächsten Abschnitt behandelt wird. Sensitivitätsdiagramme der einzelnen Faktoren mit absoluten Werten sind in Abschnitt 13 zu finden.

Abbildung 5: Target Price und Pumpenergie in Abhängigkeit des Wirkungsgrades.



Bemerkung:  $m_H^o=60\text{m}^3/\text{h}$ ,  $m_C^o=60\text{m}^3/\text{h}$ ,  $T_H = 57^\circ\text{C}$ ,  $T_C = 17^\circ\text{C}$ ,  $P_{el}=0.10\text{CHF/kWh}$ ,  $P_{Wasser}=0.00\text{CHF/m}^3$ ,  $i=8\%$ ,  $T=15$  Jahre,  $\text{Betrieb} = 7'500\text{h/a}$ .

Abbildung 6: Target Price in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz.



Bemerkung:  $m_H^0=60\text{m}^3/\text{h}$ ,  $m_C^0=60\text{m}^3/\text{h}$ ,  $P_{el}=0.10\text{CHF/kWh}$ ,  $P_{Wasser}=0.00\text{CHF/m}^3$ ,  $i=8\%$ ,  $T=15\text{ Jahre}$ ,  $\eta_{th}/\eta_{carnot} = 40\%$ ,  $Betrieb = 7'500\text{h/a}$ .

## 6.2 Fazit Sensitivitätsanalyse

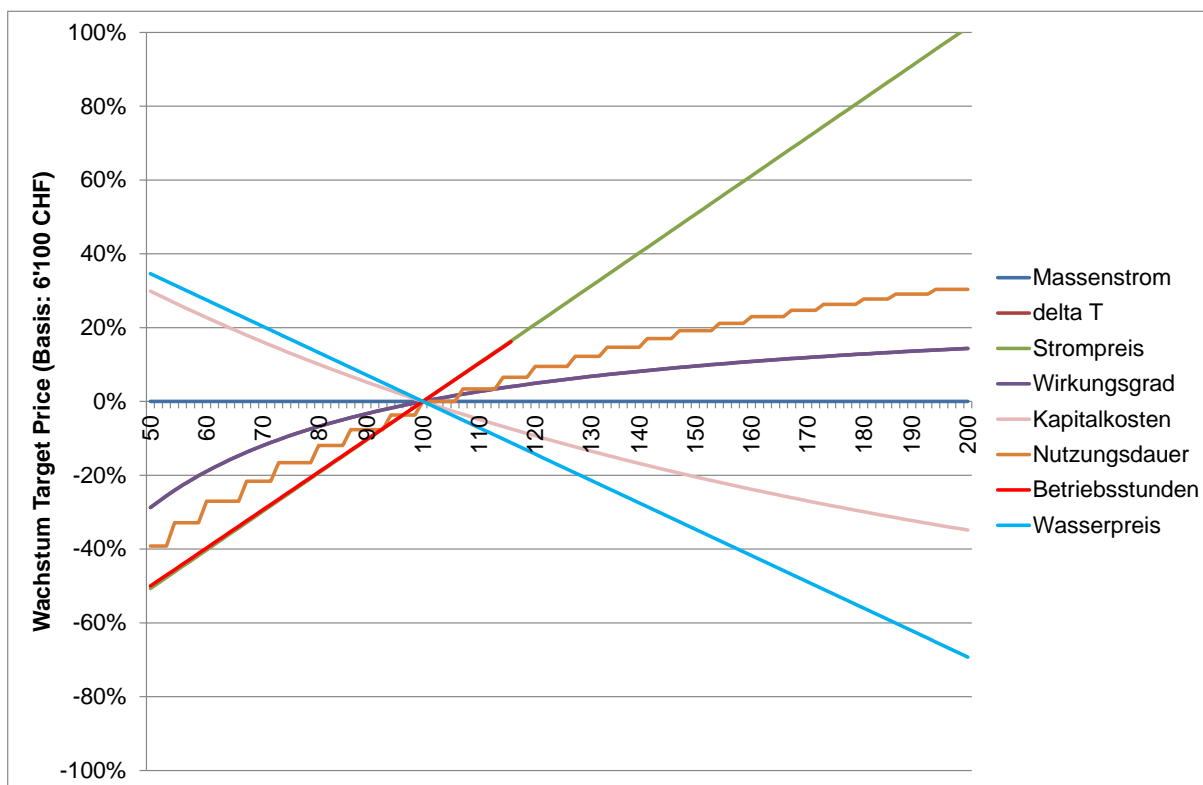
Abbildung 7 zeigt einen Vergleich aller Inputgrössen auf den Target Price pro kW installierte Leistung. Auf der horizontalen Achse ist die standardisierte Variation der Inputgrössen, auf der vertikalen das Wachstum des Target Prices abgetragen. Am Beispiel des Strompreises lässt sich ablesen, dass eine Verdoppelung des Strompreises (von Index 100 auf 200) eine Verdoppelung des Target Prices zur Folge hat (Wachstum um 100%). Oder dass ein doppelt so hoher thermischer Wirkungsgrad eine um, ceteris paribus, 15% teurer Maschine zulässt.

Der Strom- und Wasserpreis haben die stärksten Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit. Die Betriebsstunden hätten dasselbe Potenzial wie der Strompreis, wenn sie nicht natürlich beschränkt wären. Zweitwichtigste Einflussfaktoren sind die Nutzungsdauer und die Kapitalkosten, gefolgt vom Wirkungsgrad, der identische Effekte wie das  $\Delta T$  hat. Der Massenstrom hat keinen Einfluss, da der Cashflow proportional zur Leistungssteigerung wächst.

Konkret heisst das, dass eine Verdoppelung der Strompreise gegenüber einer Verdoppelung des Wirkungsgrades einen sechs Mal grösseren Effekt auf den Target Price hat. Die Halbierung des Kapitalkossensatzes hat einen doppelt so hohen Effekt wie die Verdoppelung des  $\Delta T$  oder des Wirkungsgrades.

Die technischen Spezifikationen der Maschine haben demzufolge einen viel kleineren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit als die ökonomischen Grössen, können jedoch direkt beeinflusst werden. Strompreis und Kapitalkosten werden vom Markt vorgegeben. Der Wasserpreis ist entweder vom Regulator vorgegeben oder wird über Betriebskosten (z.B. Kühlturm) bestimmt. Hier gilt es bei der Integration in Prozesse möglichst innovative Modelle zu identifizieren um die Kosten tief zu halten (z.B. Mehrfachverwendung von Kühlwasser). Im gleichen Atemzug kann das verfügbare  $\Delta T$  und der Massenstrom optimiert werden. Der Wirkungsgrad und die Betriebsstunden können im Vergleich zu den anderen Grössen direkt durch technische Entwicklung gesteigert werden. Kleine Wartungsfenster und eine hohe Zuverlässigkeit erhöhen die Betriebsstunden. Dieses Argument darf bei der Betrachtung in Abbildung 7 nicht vergessen werden.

Abbildung 7: Vergleich Inputgrößen Sensitivitätsanalyse Target Price (standardisiert)



Bemerkung: Da im Basisszenario des Cases 2 keine Wasserkosten bestehen, kann keine proportionale Veränderung vorgenommen werden. Der gewählte Wasserpreis befindet sich im Bereich zwischen -0.025 und 0.05 CHF. Da im Basisszenario bereits mit 85% der maximalen jährlichen Betriebsstunden gerechnet wird, ist eine Verdoppelung in der Realität nicht möglich. Die maximale Steigerung beträgt 17%, resp. 1.17.

## 7 Marktpotenzialschätzung

Das grösste Marktpotenzial wird in den unter Abschnitt 4.3 und in Kitanovski et al. (2008b) identifizierten Industrien vermutet. Die Schätzung nimmt an, dass jeweils 50% der Unternehmen eine nutzbare Warm- und Kaltwasserquelle haben. Aufgrund des Primärenergieverbrauchs der einzelnen Industrien wird die Anlagegrösse approximiert. Dazu wird angenommen, dass 80% der verbrauchten Primärenergie in Form von Abwärme zur Verfügung steht und im Schnitt 7'500 Stunden pro Jahr produziert wird. Das Marktpotenzial in CHF wurde mit einem Verkaufspreis von 5'000 CHF/kW berechnet.

Das Marktpotenzial beträgt in der Schweiz geschätzte 26.5 Mio. CHF und in Deutschland 1.6 Mil. CHF. Das Marktpotenzial ist folglich in beiden Ländern ausreichend vorhanden.

### 7.1 Marktpotenzialschätzung Schweiz

Tabelle 4: Geschätztes Marktpotenzial für die Schweiz. Quelle: BAFU, Schober, Wikipedia

Branchen	Potenzielle Anzahl Anlage/Typ			Total
	kW 1-5	kW6-49	kW 50-200	
Pharmazeutische Chemie Hersteller			21	21
Hüttenwerke, Eisen, Stahl und Walzwerke			5	5
Holzplatten Hersteller			2	2
Nahrungsmittel Hersteller		38		38
Papier und Karton Hersteller		9		9
Zementwerke			1	1
Raffinerien (alle Ug-Grössen)			1	1
KVA (alle Ug-Grössen)			8	8
Total Anlagen Schweiz	-	47	38	85
Total Leistung Schweiz (kW)	-	500	4'800	5'300
Total Marktpotenzial Schweiz (Mio. CHF)	-	2.5	24.0	26.5

### 7.2 Marktpotenzialschätzung Deutschland

Tabelle 5: Geschätztes Marktpotenzial für Deutschland. Quelle: Destatis, Eurostat, Institut Bauen und Umwelt (2010), Schober, vdz (2014), Wikipedia.

Branche	Total Anzahl Anlagen
Pharmazeutische Chemie Hersteller	89
Hüttenwerke, Eisen, Stahl und Walzwerke	113
Holzplatten Hersteller	36
Nahrungsmittel Hersteller	416
Papier und Karton Hersteller	123
Zementwerke	27
Raffinerien	9
KVA	35
Total Anlagen Deutschland	848
Total Leistung Deutschland (kW)	320'000
Total Marktpotenzial Deutschland (Mio. CHF)	1'600

## 8 CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial

Das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial wird auf Basis der Marktpotenzialschätzung berechnet. Als Umrechnungsfaktor wird für die Schweiz der offiziell vom BAFU (2014) veröffentlichte Faktor des Schweizer Lieferanten-Strommix von 122 g CO<sub>2</sub>eq/kWh verwendet. Für Deutschland beträgt dieser Faktor 558 g CO<sub>2</sub>/kWh (Icha 2014).

Tabelle 6: CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial

	Schweiz	Deutschland
CO <sub>2</sub> -Einsparpotenzial	ca. 4'800 t	ca. 1.3 Mio. t
Gesamtemission 2013	ca. 57 Mio. t	ca. 820 Mio. t

## 9 Anforderungspflichtenheft

### Platzbedarf

Da die Gesamteffizienz stark von der benötigten Pumpenergie abhängt, sollte die MKK möglichst nahe bei den Wasserquellen platziert werden. Die Wasserzentralen der Betriebe sind jedoch meistens relativ eng bemessen, z.T. müsste die Maschine auf Stelzen oder aufs Dach gestellt werden, was zusätzliche Pumpenergie zur Folge hat.

Es empfiehlt sich deshalb, neben den Vorteilen eines abgeschlossenen Systems, z.B. in einem Container auch eine "offene" Variante ins Auge zu fassen, um den Platzbedarf zu minimieren.

### Zuverlässigkeit

Da die MKK in (fast) allen Fällen am Ende des Produktionsprozess steht, spielt die Zuverlässigkeit keine erstrangige Rolle. Die Massenströme würden bei einem Ausfall der MKK über einen Bypass umgeleitet und direkt gemischt. Die im Normalfall durch die Maschine entzogene thermische Leistung ist vernachlässigbar, kann allenfalls zu leicht höheren (Umwelt-)abgaben führen. Falls die Maschine am Anfang oder in einem Prozess integriert wäre, müsste ebenfalls ein Bypass eingebaute werden, da oft der gesamte Produktionsprozess vom funktionierenden Kühlwasserkreislauf abhängt.

### Wartung

Produktionsprozesse laufen oft 24 Stunden am Tag, 365 Tage im Jahr. Dank einem überdimensionierten Maschinenpark, kann parallel zur Produktion die Wartung der Produktionsmaschinen stattfinden. Wie soeben diskutiert müsste die MKK in den meisten Fällen mit einem Bypass abgesichert werden. Das Wartungsintervall hat somit ausschliesslich einen negativen Effekt auf die eigenen Betriebsstunden. In der Sensitivitätsanalyse wurde gezeigt, dass die Anzahl Betriebsstunden den grössten positiven Effekt auf die Wirtschaftlichkeit aufweisen (so auch die Strompreise).

### Wassertrennung

Die Wasserqualität des kalten und warmen Wassers ist fast nie identisch in der Industrie. Eine Durchmischung der beiden Medien wirkt sich immer negativ auf den Produktionsprozess aus. Am anschaulichsten kann dies an der Chemieindustrie illustriert werden, wo das Warmwasser mit Chemie verunreinigt ist. Die Durchmischung mit dem Kaltwasser würde dieses direkt zu Abwasser deklassieren, was mit erheblichen Zusatzkosten verbunden ist.

Um das Anwendungsgebiet zu erweitern, ist in Zukunft eine strikte Trennung der Wasserströme zwingend. Alternativ kann dieses Problem auch mit Wärmetauschern gelöst werden.

## 10 Fazit

### 10.1 Target Price für den wirtschaftlichen Betrieb MKK

Der Markt bezahlt zwischen 4'500 bis 8'100 CHF/kW für eine MKK. Dieser Preis muss sowohl die Produktions-, Installationskosten und die Marge decken. Der Preis wird erreicht, sofern von technischer Seite die angenommene Effizienz von 40% des Carnot-Wirkungsgrades erreicht werden (siehe Präambel).

Auf der Marktseite begünstigen hohe Strompreise, lange Betriebsstunden, günstiges Wasser und tiefe Kapitalkosten die Wirtschaftlichkeit der MKK. Eine Besteuerung der Abwärme oder CO<sub>2</sub>-Steuern wären zusätzliche positive Faktoren.

### 10.2 Einschätzung Erfolgspotenzial MKK

Bedingt durch das hohe Involvement für die optimalere Nutzung der Abwärme schätzen wir das Erfolgspotenzial von MKK (sofern die in Kap. 5 und Kap 0 definierten Werte erreicht werden) als sehr hoch ein: Alle kontaktierten Unternehmen haben ein sehr hohes Problembewusstsein und suchen aktiv nach Lösungen zur verbesserten Nutzung der Abwärme. Als Indikator für das hohe Involvement interpretieren wir die Bereitschaft nicht nur „Red- und Antwort im Rahmen von Interviews zu stehen“ sondern im Nachgang Daten zu liefern.

Bemerkenswert ist auch, dass beinahe alle kontaktierten Firmen für die optimierte Energienutzung verantwortliche Personen haben (Energie- oder Umweltbeauftragter).

Es ist nicht unwahrscheinlich, dass mittelfristig die Energiepreise wieder ansteigen werden, da sich der Markt bereinigt (Subventionen Solar- und Windenergie Deutschland). Wie in Abschnitt 6 gezeigt, hat der Energiepreis den stärksten positiven Effekt auf die Wirtschaftlichkeit der MKK.

Zusätzlich muss erwähnt werden, dass zukünftige regulatorische Vorschriften eine erhöhte Nachfrage nach Abwärmenutzungstechnologien zur Folge haben könnten. Aktuelle sei die ISO-Norm 50'001 zum Energiemanagement im Unternehmen erwähnt. Bestrebungen zur Besteuerung von Abwärme sind, nach unserem besten Wissen, bis jetzt nicht im Gange, könnten in Zukunft jedoch als realistisches Szenario auftreten. Die MKK könnte hier zur Reduktion der Abwärme und somit der Steuer beitragen.

Aus volkswirtschaftlicher Perspektive sind die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Mengen und die verminderte Abhängigkeit weitere positive Aspekte der MKK-Technologie. Da die MKK einen Teil der Abwärme in Energie umwandelt und somit in der Gesamtbilanz das verwendete Wasser abkühlt, sind keine negativen Effekte auf Oberflächengewässer oder Grundwasser zu erwarten.

### 10.3 Konkurrenzfähigkeit zu erneuerbaren Energietechnologien

Für den Vergleich verschiedener Energietechnologien sind neben den Investitionskosten pro kW die Gestehungskosten pro kWh relevant. Die Levelized Cost of Electricity<sup>12</sup> (LCOE) vergleichen die akkumulierten Investitions- und Betriebskosten mit der jährlichen Energieproduktion. Die LCOE bieten einen guten Indikator für den Vergleich, bilden jedoch nicht sämtliche Aspekte der Energieproduktion und der politischen Rahmenbedingungen ab. (Kost et al., 2013)

Abbildung 8 zeigt den Vergleich zwischen der MKK-Technologie und anderen erneuerbaren Technolo-

---

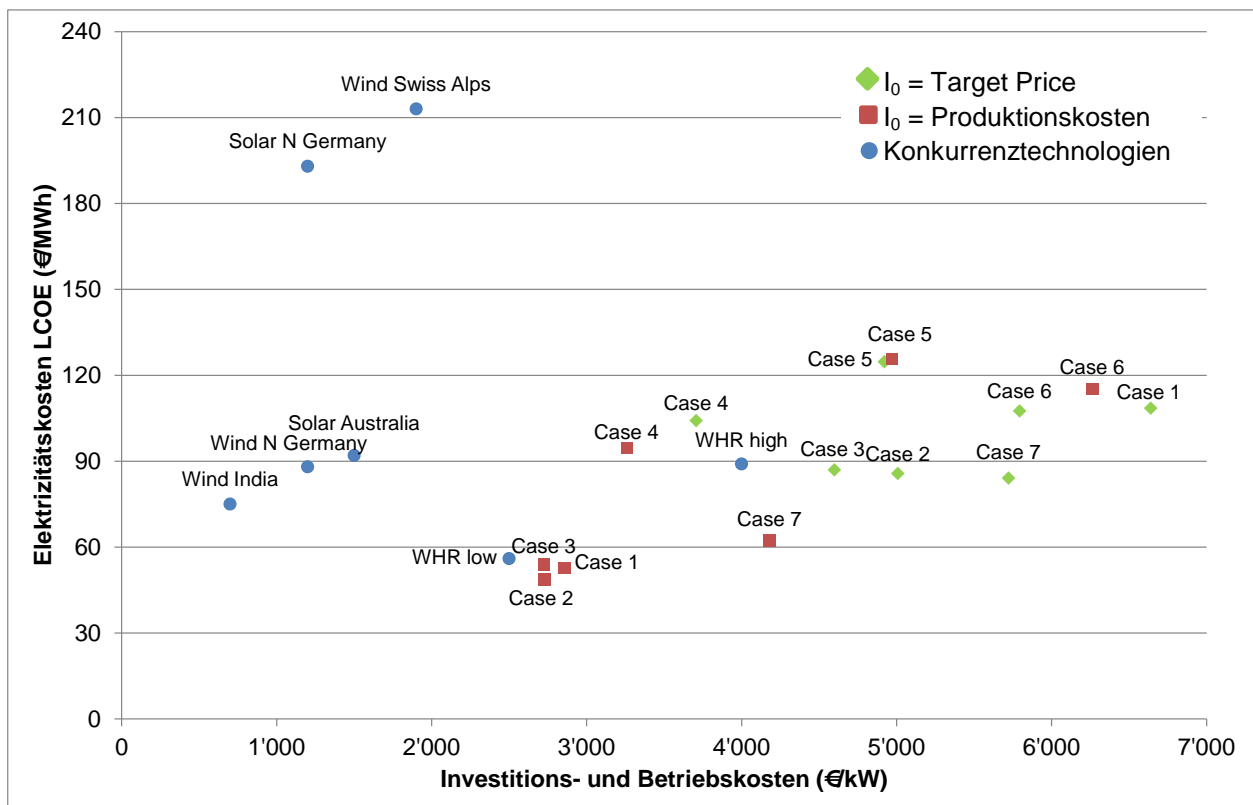
$$^{12} LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{M_{t,el}}{(1+i)^t}}$$

$I_0$ : Investitionskosten,  $A_t$ : Betriebskosten,  $M_{t,el}$ : produzierte Strommenge in kWh

gien (blaue Punkte). Die grünen Rhomben zeigen die Marktperspektive, d.h. wenn zum Target Price verkauft würde. Die roten Quadrate zeigen die Kostenperspektive, d.h. wenn der Verkaufspreis nur die Produktionskosten<sup>13</sup> decken würde. Dies sind die Eckpunkte, in welchem sich der Preis und die LCOE in Realität bewegen werden. Der reale Punkt wird also in diesem Bereich liegen.

Wird zum Target Price verkauft, kann die MKK-Technologie bei den LCOE mit anderen Technologien mithalten. Die Investitions- und Betriebskosten befinden sich allerdings auf einem sehr hohen Niveau. Beachtet man jedoch nur die effektiven Produktionskosten, sinken die Kosten pro kW bei den rentablen Anlagen auf ein konkurrenzfähiges Niveau. Vor allem die grossen MKK-Anlagen werden bisherige Technologien stark konkurrieren. Es gilt zu beachten, dass die Produktionskosten stark von der technologischen Entwicklung der MKK abhängen und deshalb momentan nur schwer abschätzbar sind.

Abbildung 8: Vergleich LCOE und Investitionskosten mit erneuerbaren Energietechnologien. Quelle: Holcim Technology Ltd. Switzerland, eigene Berechnungen.



<sup>13</sup> Die Produktionskosten wurden vom ITFE aufgrund der Daten von Demonstrator und Prototyp geschätzt. Die Kosten setzen sich aus einem fixen Teil (Generator, Gehäuse etc.) und einem von der MKK-Leistung abhängigen Teil zusammen. Der Materialbedarf dieser variablen Kosten kann gut auf einen Magnetspalt aufgeteilt werden, und wurde auch so geschätzt. Grosse Anlagen können die fixen Kosten besser amortisieren (abnehmende Durchschnittskosten) und erreichen so tiefere Produktionskosten pro kW. Eine Aufstellung der geschätzten Kosten ist in Abschnitt 12.2 zu finden.

# 11 Literaturverzeichnis

Bundesamt für Umwelt BAFU (2014). Klimapolitik: Fragen und Antworten. URL: <http://www.bafu.admin.ch/klima/09608/index.html?lang=de> [Stand: 13.Oktober 2014].

Cofely Kältetechnik GmbH (2014). Kühlturbroschüre. URL: [http://www.cofely.info/uploads/media/Cofely\\_KUeHLTURM-BROSCHUERE.pdf](http://www.cofely.info/uploads/media/Cofely_KUeHLTURM-BROSCHUERE.pdf) [Stand: 23.10.2014].

Ichta, P. (2014). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2013. Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau.

Institut Bauen und Umwelt (2010). Umwelt-Produktdeklaration: Beschichtete und unbeschichtete Spanplatten. Glunz AG. Meppen.

Heiniger, K.C. et.al. (2012). "Messungen am Prüfstand von Dr. N. Vida", interner FHNW-ITFE-Bericht #2012-76. FHNW, Windisch.

Kost, Ch., Mayer, J.N., Thomsen, J., Hartmann, N., Senkpiel, Ch., Philipps, S., Nold, S., Lude, S., Saad, N. & Schlegl, Th. (2013). Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies. Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems ISE. Freiburg.

Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) (2009). *Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft*. SVGW. Zürich.

Thommen, J.P. (2012). Betriebswirtschaft und Management: Eine managementorientierte Betriebswirtschaftslehre. Versus Verlag, 9. Auflage. Zürich.

Kitanovski, A., Diebold, M., Vuarnoz, D., Gonin, C. & Egolf, P.W. (2008a). Applications of Magnetic Power Production and its Assessment. A Feasibility Study. Final report. University of Applied Sciences of Western Switzerland. Yverdon les Bains.

Kitanovski, A., Diebold, M., Vuarnoz, D., Gonin, C. & Egolf, P.W. (2008b). Applications of Magnetic Power Production and its Assessment. Overview of and Comparison with Existing Technologies of Power Conversion. Final report: Appendix 1. University of Applied Sciences of Western Switzerland. Yverdon les Bains.

Verein deutscher Zementwerke (vdz) (2014). Zementindustrie im Überblick 2014. Berlin.

Vuarnoz, D., Kitanovski, A., Gonin, C., Borgeaud, Y., Delessier, M., Meinen, M. & Egolf, P.W. (2012). Quantitative feasibility study of magnetocaloric energy conversion utilizing industrial waste heat. *Applied Energy*, 100, p.229-237.

# Anhang

## 12 Investitionskostenrechnung

### 12.1 Kapitalwertmethode (NPV)

Zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit verwenden wir die Kapitalwertmethode (NPV). Dieser Methode unterliegt der Grundgedanke, dass die Investitionskosten gegen alle in Zukunft anfallenden Cashflows abgewogen werden. Die Cashflows werden dabei auf den Investitionszeitpunkt abgezinst. Das Kapital wird durch die Investition gebunden und muss deshalb eine Mindestrendite erreichen, die zum Beispiel durch eine alternative Anlagemöglichkeit erreicht werden könnte oder die Faktoren wie Marktchancen und Risiken der Investition widerspiegelt. (Thommen, 2012).

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+i)^t} + \frac{L_T}{(1+i)^T}$$

$I_0$  ... Investitionssumme im Zeitpunkt 0

$CF_t$  ... Cashflow im Zeitpunkt  $t$  (Erträge – Ausgaben)

$i$  ... Kapitalkostensatz

$L_T$  ... Liquidationserlös am Ende der Nutzungsdauer

$T$  ... Nutzungsdauer

Ist die Summe der diskontierten Cashflows grösser als die Investitionssumme so resultiert ein positiver NPV. Dies bedeutet, dass die Investition über die angenommene Nutzungsdauer eine Rendite abwirft, die über der geforderten Mindestrendite liegt. (Thommen, 2012)

#### 12.1.1 Target Price

Eine Investition wird getätigt, sobald ein positiver NPV besteht. Diese Eigenschaft wird zur Berechnung des Target Prices ausgenutzt. Setzen wir den NPV gleich Null, können wir nach der Investitionssumme  $I_0$  auflösen, was wiederum dem Target Price entspricht.

$$Target\ Price = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+i)^t}$$

Der Target Price entspricht dem maximalen, auf dem Markt erzielbaren Preis. Er muss sowohl die Produktionskosten als auch die Marge decken. Je höher der Target Price, desto grösser der Spielraum für die Produktionskosten, respektive desto grösser die Marge.

#### 12.1.2 Aufwände und Erträge - Cashflow

Der jährliche Cashflow setzt sich aus der Summe der erzielten Erträge minus der Summe der Aufwände zusammen. Die Zusammensetzung der Erträge und Aufwände wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Thermo- und Fluid-Engineering der FHNW erarbeitet.

Die MKK produziert elektrische Energie, die vom Unternehmen selbst konsumiert wird. Die Energiekosten des Unternehmens reduzieren sich somit um die jährlich produzierte Leistung. Der Preis ist durch den Energieeinkaufspreis des Unternehmens gegeben (Durchschnittswert inkl. Netzgebühren). Der Ertrag setzt sich folgendermassen zusammen:

$$E_t = Preis_{el} * Betriebsstunden * P_{el,MKK}$$

Der jährliche Aufwand setzt sich aus den Kosten für die Massenströme und den Pumpkosten zusammen.

$$A_t = [Preis_H * \dot{m}_H + Preis_C * \dot{m}_C + Preis_{el}(P_{Pumpe_H} + P_{Pumpe_C}) + \frac{(\dot{m}_H + \dot{m}_C)}{100} * K_{M\&O}]$$

*\* Betriebsstunden*  
*H ... warmes Medium*  
*C ... kaltes Medium*  
*P ... Leistung*  
 *$\dot{m}$  ... Massenstrom*  
*Preis<sub>el</sub> ... Preis elektrische Energie*  
*K<sub>M&O</sub> ... Kosten Instandhaltung und Betrieb*

### 12.1.3 Berücksichtigte Faktoren

Die Investitionskostenrechnung berücksichtigt aufgrund der Inputs und der gewählten Methode folgende Punkte:

- Kapitalkosten
- Nutzungsdauer
- Betriebsstunden
- Druckverlust innerhalb der Maschine
- Pumpenergie für Höhenmeter
- Kosten für Pumpenergie
- Instandhaltungs- und Betriebskosten
- Energiepreis
- Wasserpreis

Die Leistung der Maschine wird bestimmt durch:

- Wirkungsgrad
- $\Delta T$
- Wassermassenstrom

## 12.2 Investitionskosten

Die Kosten einer MKK setzen sich aus einem fixen Anteil (Generator, Antrieb, Wasserzufuhr, Inbetriebnahme etc.) und einem variablen Anteil (magnetokalorisches Material, Magnete, Pumpen etc.) zusammen. Die Kostenrechnung wird nach der benötigten Anzahl von Magnetspalten erstellt. Jeder Magnetspalt produziert mit identischem Materialaufwand die gleiche elektrische Leistung. Die Anzahl Magnetspalte multipliziert mit deren Leistung ergibt die Gesamtleistung der Maschine.

Es entstehen positive Skaleneffekte, welche durch sinkende Durchschnittskosten (geringerer Fixkostenanteil an Gesamtkosten) zu begründen sind. Kostentreiber, neben den Fixkosten, welche durch günstigere Materialisierung und automatisierte Produktion in Zukunft vermutlich wesentlich gesenkt werden können, sind die Anzahl benötigter Magnetspalten. Die Kosten pro Magnetspalt sind wesentlich von den Material- und Magnetkosten abhängig. Die benötigte Anzahl definiert sich massgeblich durch die verfügbare elektrische Leistung pro Magnetspalt. Die variablen Investitionskosten sinken fast proportional mit der Leistung pro Magnetspalt. Um eine hohe Rentabilität zu erreichen, muss demzufolge auf technischer Seite nicht nur der Wirkungsgrad des Materials, sondern vor allem die Leistung pro Magnetspalt gesteigert werden.

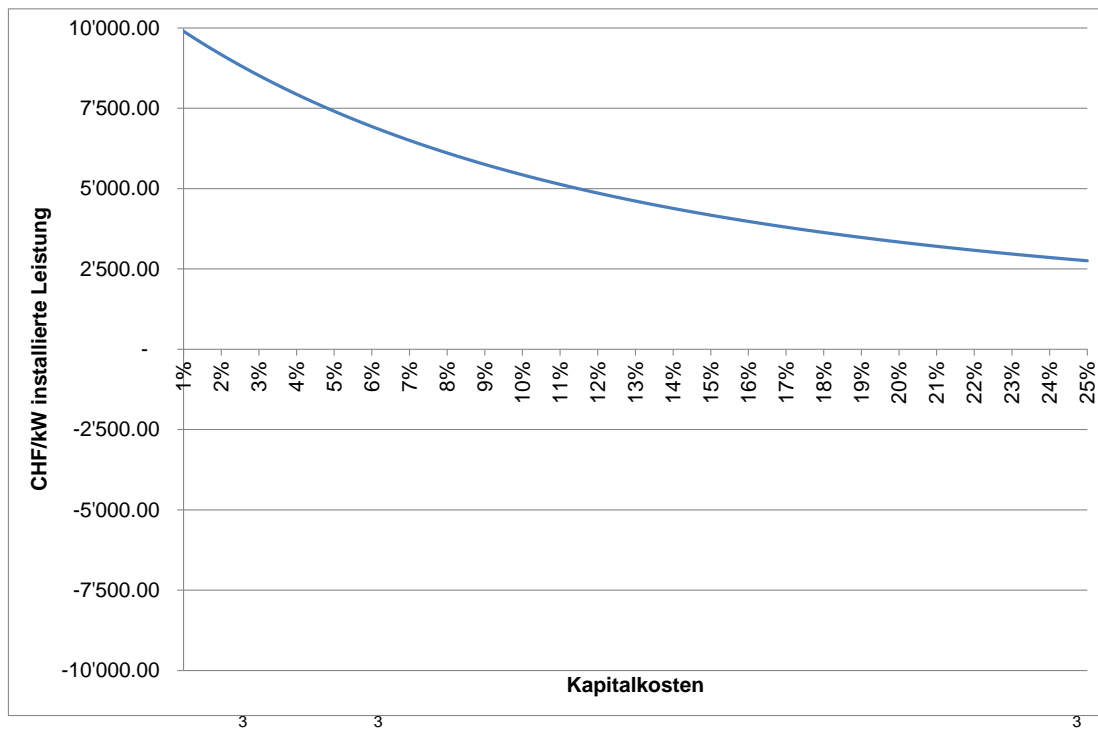
Die Kosten wurden vom ITFE grob geschätzt. Die Schätzung basiert auf den bisherigen Erfahrungswerten vom Bau des Demonstrators und des Prototypen. Die Fixkosten wurden für drei Anlagegrößen geschätzt, die variablen Kosten pro Magnetspalt sind identisch für alle Anlagegrößen (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Produktionskostenschätzung für drei MKK-Anlagegrössen.

Leistung MKK	Fixkosten	Variable Kosten (pro Magnetspalt)
1-5 kW	75'000	5'000
6-50 kW	95'000	5'000
51-200 kW	130'000	5'000

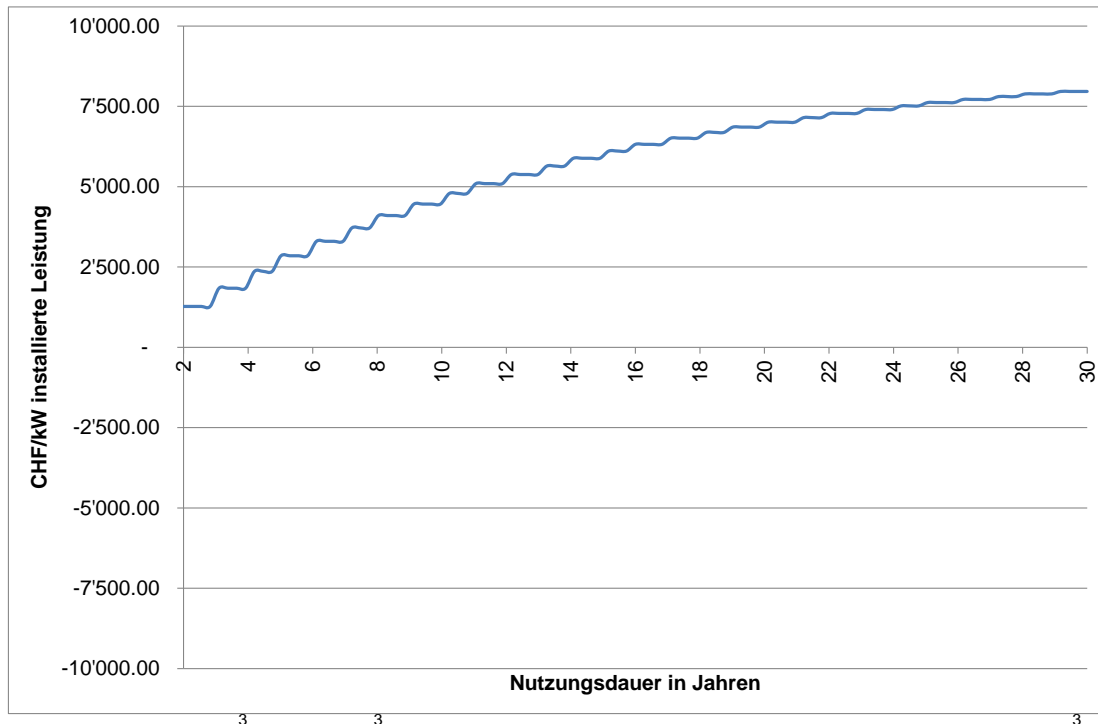
## 13 Diagramme Simulation Sensitivität

Abbildung 9: Target Price in Abhängigkeit der Kapitalkosten.



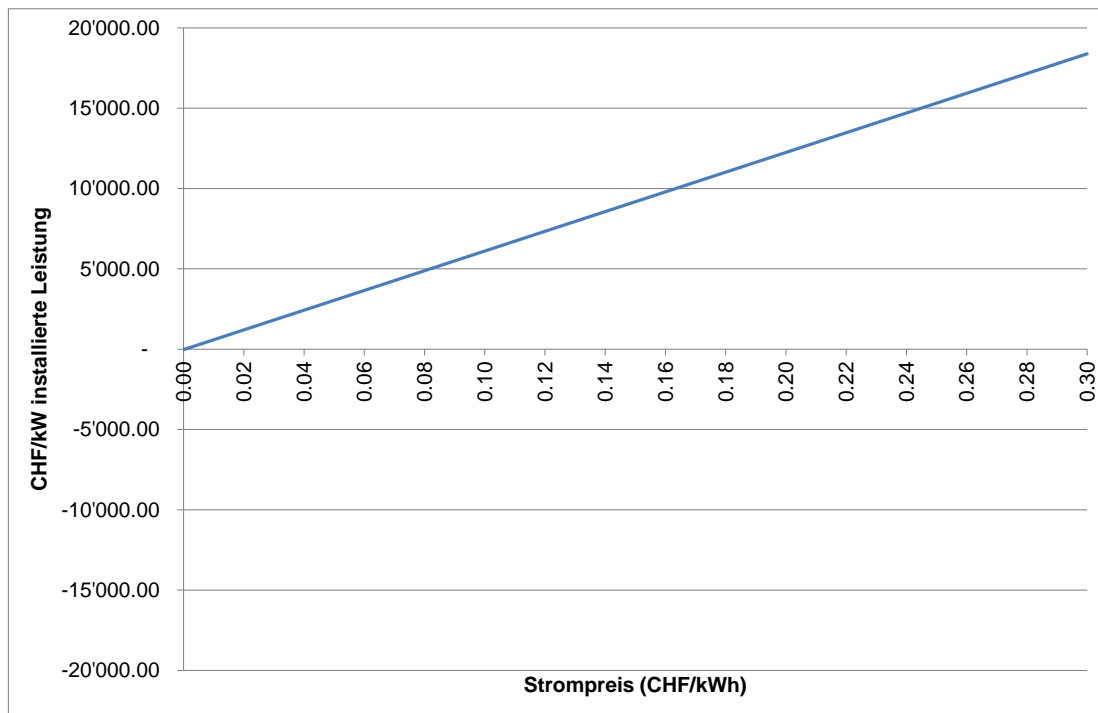
Bemerkung:  $m_H^{\circ}=60\text{m /h}$ ,  $m_C^{\circ}=60\text{m /h}$ ,  $T_H = 57^{\circ}\text{C}$ ,  $T_C = 17^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{el}=0.10\text{CHF/kWh}$ ,  $P_{Wasser}=0.00\text{CHF/m}$ ,  $T=15$  Jahre,  $\eta_{th}/\eta_{carnot} = 40\%$ ,  $Betrieb = 7'500\text{h/a}$ .

Abbildung 10: Target Price in Abhängigkeit der Nutzungsdauer.



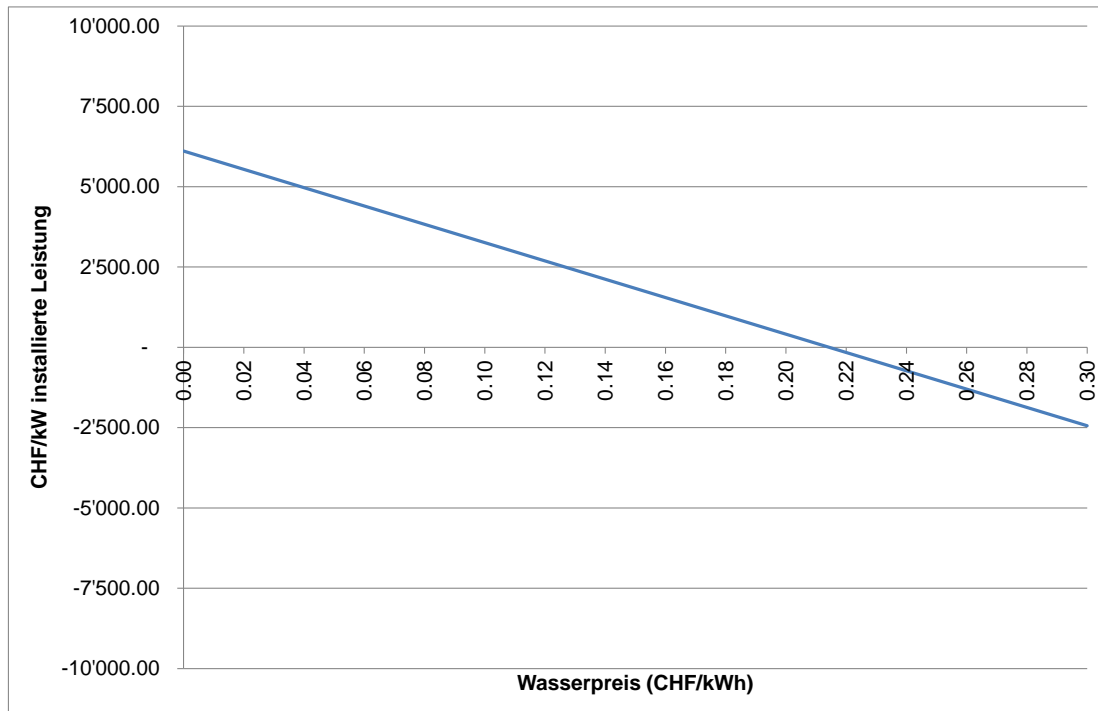
Bemerkung:  $m_H^{\circ}=60\text{m}^{\circ}/\text{h}$ ,  $m_C^{\circ}=60\text{m}^{\circ}/\text{h}$ ,  $T_H = 57^{\circ}\text{C}$ ,  $T_C = 17^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{el}=0.10\text{CHF/kWh}$ ,  $P_{Wasser}=0.00\text{CHF/m}$ ,  $i=8\%$ ,  $\eta_{th}/\eta_{carnot} = 40\%$ ,  $Betrieb = 7'500\text{h/a}$ .

Abbildung 11: Target Price in Abhängigkeit des Strompreises.



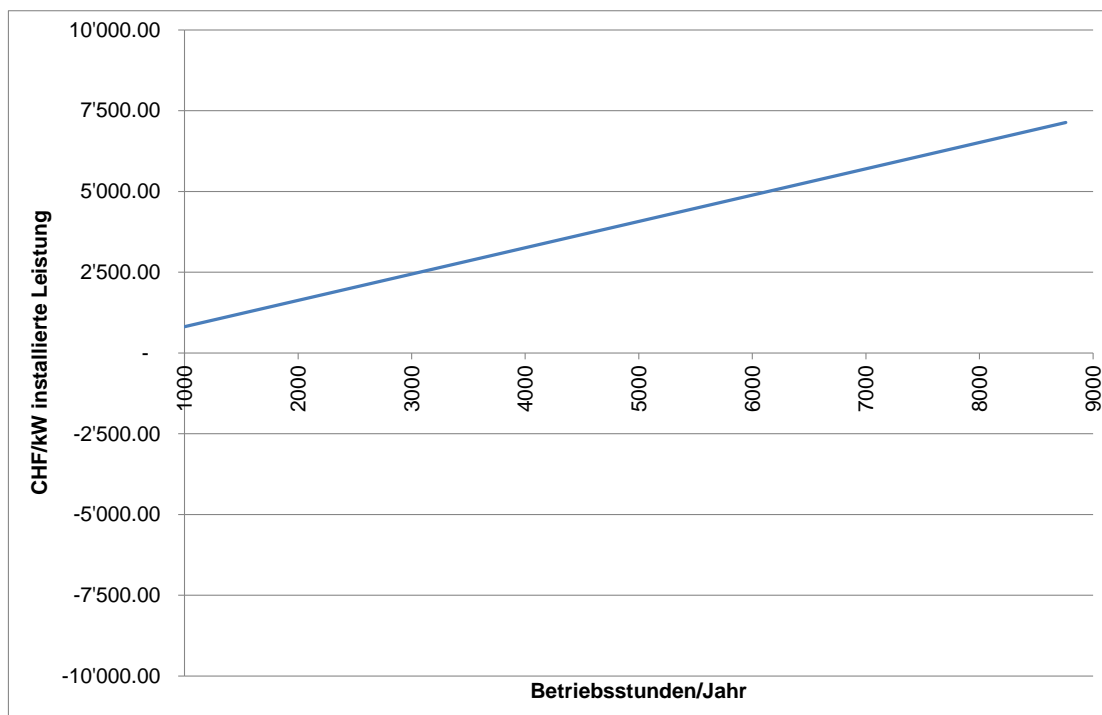
Bemerkung:  $m_H^{\circ}=60\text{m}^{\circ}/\text{h}$ ,  $m_C^{\circ}=60\text{m}^{\circ}/\text{h}$ ,  $T_H = 57^{\circ}\text{C}$ ,  $T_C = 17^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{Wasser}=0.00\text{CHF/m}$ ,  $i=8\%$ ,  $T=15\text{Jahre}$ ,  $\eta_{th}/\eta_{carnot} = 40\%$ ,  $Betrieb = 7'500\text{h/a}$ .

Abbildung 12: Target Price in Abhängigkeit des Wasserpreises.



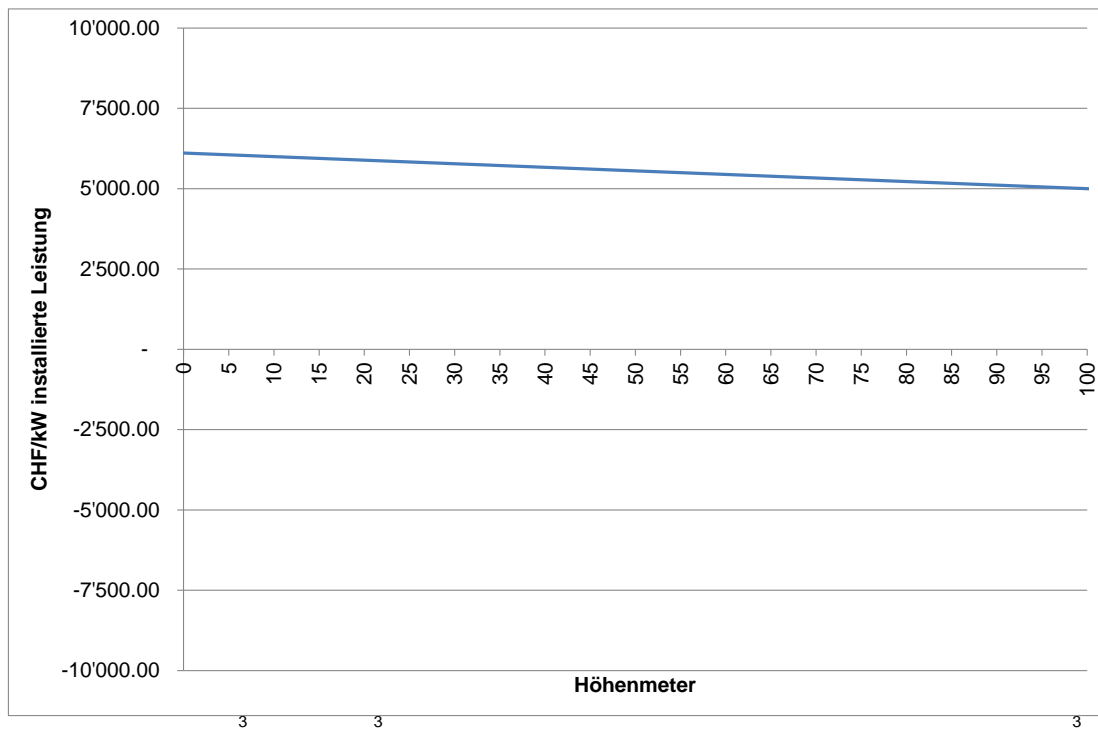
Bemerkung:  $m_H^{\circ}=60\text{m}^3/\text{h}$ ,  $m_C^{\circ}=60\text{m}^3/\text{h}$ ,  $T_H = 57^{\circ}\text{C}$ ,  $T_C = 17^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{el}=0.10\text{CHF/kWh}$ ,  $i=8\%$ ,  $T=15$  Jahre,  $\eta_{th}/\eta_{carnot} = 40\%$ ,  $\text{Betrieb} = 7'500\text{h/a}$ .

Abbildung 13: Target Price in Abhängigkeit des Betriebsstunden pro Jahr.



Bemerkung:  $m_H^{\circ}=60\text{m}^3/\text{h}$ ,  $m_C^{\circ}=60\text{m}^3/\text{h}$ ,  $T_H = 57^{\circ}\text{C}$ ,  $T_C = 17^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{el}=0.10\text{CHF/kWh}$ ,  $P_{Wasser}=0.00\text{CHF/m}^3$ ,  $i=8\%$ ,  $T=15$  Jahre,  $\eta_{th}/\eta_{carnot} = 40\%$ .

Abbildung 14: Target Price in Abhängigkeit der mit Pumpenergie zu überwindenden Höhenmeter.



Bemerkung:  $\dot{m}_H = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_C = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $T_H = 57^\circ\text{C}$ ,  $T_C = 17^\circ\text{C}$ ,  $P_{el} = 0.10 \text{ CHF/kWh}$ ,  $P_{Wasser} = 0.00 \text{ CHF/m}^3$ ,  $i = 8\%$ ,  $T = 15 \text{ Jahre}$ ,  $\eta_{th}/\eta_{carnot} = 40\%$ ,  $Betrieb = 7'500 \text{ h/a}$ .