

Forschungsbericht BWPLUS

**EVA**  
**Thermische Energiespeicher zur Verstromung**  
**diskontinuierlicher Abwärme**

von

Wolf-Dieter Steinmann  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für technische Thermodynamik, Stuttgart

René Schulte  
Peter Scherrer  
Stadtwerke Esslingen

Förderkennzeichen: BWE 27006 + BWE 27007

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Juli 2010

# Inhalt

Zusammenfassung.....	4
1 Grundlagen der speicherunterstützten Verstromung .....	6
1.1 Nutzung industrieller Abwärme .....	6
1.2 Verstromung von Abwärme .....	8
1.3 Speicherunterstützte Verstromung von diskontinuierlicher Abwärme .....	9
2 Aufbau eines Systems für die speicherunterstützte Verstromung von Abwärme.....	11
2.1 Energiespeicher .....	11
2.1.1 Sensible Energiespeicher .....	11
2.1.2 Latentwärmespeicher .....	14
2.2 Energieumwandlungsprozess .....	17
2.3 Wärmeübertrager.....	21
3 Anwendungsbereiche für die speicherunterstützte Verstromung von Abwärme .....	22
3.1 Identifikation von Grundfällen.....	22
3.1.1 Fluktuierende Variation der Abwärmeleistung bei ausreichend hoher spezifischer Enthalpie .....	22
3.1.2 Fluktuierende Variation der spezifischen Enthalpie .....	23
3.1.3 Kontinuierlicher Abfall der spezifischen Enthalpie der verfügbaren Abwärme.....	24
3.2 Anwendungsbereiche in der Industrie .....	25
4 Analyse von Beispielen für die speicherunterstützte Verstromung.....	27
4.1 Lichtbogenofen zur Stahlerzeugung.....	28
4.2 Zementwerk.....	33
4.2.1 Latentwärmespeicher in der Abgasströmung.....	35
4.2.2 Integration eines Thermoölspeichers .....	39
4.2.3 Integration Latentwärmespeicher in den Thermoölkreislauf.....	40
4.2.4 Vergleich der Speicherkonzepte .....	42
4.3 Abwärme von Abkühlprozessen .....	43
4.3.1 Speichereinsatz bei sequenziell betriebenen Öfen.....	44
4.3.2 Speichereinsatz zur Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades .....	46
4.3.3 Speichereinsatz bei verkürzter Abkühlprozessen .....	50
5 Messung der Dienstleistungsqualität zur Einführung einer Zusatzleistung am Beispiel industrieller Abwärme .....	52
5.1 Grundlagen der Untersuchung.....	53
5.1.1 Erfolgskette des Relationship Marketing.....	53
5.1.2 SERVQUAL-Ansatz zur Messung der Dienstleistungsqualität .....	54
5.1.3 Geschäftsbeziehungen in Business-to-Business Märkten.....	56
5.2 Modifikation des SERVQUAL-Ansatzes .....	56
5.2.1 SERVQUAL als Grundgerüst zur Messung der Leistungsqualität im Wärmemarkt .....	56
5.2.2 Anpassungen an den Wärmemarkt .....	56
5.2.3 Bestimmung des Bezugspunktes der Untersuchung.....	57
5.3 Planung und Rücklauf der Kundenbefragung .....	58

5.4	Auswertung der Kundenbefragung .....	58
5.4.1	Überprüfung der Daten anhand der schließenden Statistik.....	58
5.4.2	Auswertung der SERVQUAL-Werte .....	62
5.4.3	Gewichtung der Dimensionen.....	63
5.4.4	Fazit der Auswertung.....	63
5.5	Handlungsempfehlungen.....	63
6	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	66
7	Literatur .....	68
8	Anhang.....	71
A	Original SERVQUAL Fragebogen .....	71
B	Fragebogen für die Papierindustrie .....	72
C	Auswertung durch SmartPLS bzw. SPSS .....	75

## Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde untersucht, inwieweit thermische Energiespeicher die Effizienz dezentraler Anlagen zur Verstromung industrieller Abwärme verbessern können. Der Grundgedanke dabei ist, dass Abwärme aus industriellen Prozesse häufig zeitliche Schwankung in der Temperatur und/oder in der Leistung aufweist und eine Verstromung in einem thermischen Kreisprozess nicht oder nur begrenzt erfolgen kann. Der Energiespeicher soll diese Schwankungen kompensieren und die Bereitstellung eines für die Verstromung geeigneten Wärmestroms ermöglichen. Die Integration eines Energiespeichers soll die Wirtschaftlichkeit der Abwärmeverstromung verbessern, in dem Turbinen möglichst optimal betrieben werden können und die Regelung vereinfacht wird.

Zum Einsatz kommen sollen dabei möglichst kompakte Energieumwandlungsmodule, in die die drei thermischen Teilprozesse Übertragung der Abwärme, Speicherung und Kreisprozess zur Umwandlung von Wärme in mechanische Energie integriert sind. Für die technologische Umsetzung dieser Teilprozesse können jeweils verschiedene Konzepte angewendet werden. Bei den thermischen Speichersystemen konnten für den Temperaturbereich über 100 °C in den letzten Jahren deutliche Entwicklungsfortschritte erzielt werden, verschiedene Konzepte werden insbesondere im Kraftwerksbereich eingesetzt, wobei teilweise Leistungen im Bereich von mehreren hundert MW erreicht werden. Im Rahmen dieser Studie wurden thermische Speicher betrachtet, die entweder auf der Speicherung sensibler Wärme basieren oder bei denen die mit einem Phasenwechsel verbundenen Energieänderungen genutzt werden. Thermochemische Speicher wurden nicht berücksichtigt, da aufgrund deren Entwicklungsstandes ein mittelfristiger industrieller Einsatz als unwahrscheinlich angenommen wird.

Kreisprozesse, die zur Umwandlung der Abwärme in mechanische Energie eingesetzt werden sollen, müssen eine externe Energiezufuhr ermöglichen. Insbesondere im Hinblick auf die verfügbare Erfahrung bieten sich für die hier betrachtete Anwendung Dampfturbinen mit Wasserdampf bzw. organischen Arbeitsmedien (Organic Rankine Cycle, ORC) an. Während sich Wasserdampf vor allem für elektrische Leistungen über 1 MW und Temperaturen oberhalb von 300°C eignet, bieten ORC-Systeme bei niedrigeren Temperaturen und Leistungen Vorteile.

Bei Wärmeübertragern zur Aufnahme der Abwärme kann weitestgehend auf den derzeitigen Stand der Technik zurückgegriffen werden, besondere Anforderungen ergeben sich hier nicht aus der speicherunterstützten Verstromung. Berücksichtigt werden müssen Anforderung, die sich aus der Zusammensetzung der Abgase und schnellen Temperaturtransienten ergeben.

Das Potenzial der speicherunterstützten Verstromung von Abwärme sollte an Anwendungsbeispielen in der Industrie im Rahmen dieser Studie untersucht werden. Basis hierfür sind Darstellungen des zeitlichen Verlaufes der Temperaturen und Massenströme von Abwärmeströmen. Mit dem Ziel, eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf möglichst viele Anwendungen zu ermöglichen, wurden drei unterschiedliche Grundfälle von diskontinuierlichen Abwärmeströmen identifiziert.

Beim ersten Grundfall variiert die thermische Leistung, während die Temperatur der Abwärme immer oberhalb der Maximaltemperatur des thermischen Kreisprozesses liegt. Als Anwendungsbeispiel für diesen Fall wurde der Abgasstrom aus einem Lichtbogenofen betrachtet, in dem Stahlschrott eingeschmolzen wird. Die Temperaturen der Abgase liegen hier immer oberhalb der Maximaltemperaturen eines Dampfkreislaufes, ausgeprägte Schwankungen treten jedoch beim Abgasmassenstrom und damit bei der Leistung auf. Diese Schwankungen sind so ausgeprägt, dass der direkte Betrieb einer Turbine kaum möglich ist. Für diese Anwendung empfiehlt sich ein Speichersystem, bei dem eine Salzschnmelze als

Speichermedium eingesetzt wird. Mit einem derartigen Speichersystem kann die Abwärme zum Antrieb einer Dampfturbine mit einer Leistung von 2.8 MW verwendet werden. Die für das Speichersystem erwarteten Kosten liegen bei unter 5% der Kosten der Dampfturbine.

Beim zweiten Grundfall schwankt die Temperatur der Abwärme um den Maximalwert, der für den Betrieb der Turbine erforderlich ist. Ziel des Speichereinsatzes ist hier vor allem eine Stabilisierung der Temperatur, um Wirkungsgradeinbußen und eine reduzierte Ausnutzung der Abwärmeenergie zu vermeiden. Als Beispiel wurde hier ein Zementwerk betrachtet, bei dem die Abluft eines Klinkerkühlers von einer ORC-Turbine genutzt werden. Zum Einsatz kommt hier ein Latentwärmespeicher, der die Temperaturschwankungen begrenzt. Durch den Einsatz kann bei gleicher mittlerer Leistung anstelle einer 2.4 MW-Turbine eine 1.2 MW-Turbine eingesetzt werden, die Kosten des Speichers liegen deutlich unterhalb der eingesparten Kosten bei der Turbine.

Der dritte Grundfall zeichnet sich durch einen kontinuierlichen Abfall der Temperatur der Abwärme aus. Ein derartiger Verlauf ist charakteristisch für Abkühlprozesse thermischer Massen. Als Beispiel wurde hier ein elektrisch beheizter Ofen betrachtet. Der Speichereinsatz ist bei Abkühlprozessen insbesondere dann attraktiv, wenn eine beschleunigte Abkühlung erfolgen kann, die Kapazität und damit die Investitionskosten des Speichers sind niedriger, die Turbine gibt eine höhere Leistung ab.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass der Einsatz thermischer Speicher die Verstromung industrieller Abwärme vereinfacht bzw. die Wirtschaftlichkeit verbessert. Voraussetzung für eine fundierte Quantifizierung dieses Potenzials sind Angaben über die verfügbare industrielle Abwärme. Diese Angaben sind derzeit nur für Einzelfälle in ausreichender Qualität verfügbar, hier sind neben den repräsentativen Informationen über Leistung und Energie der Abwärme auch Temperaturwerte und Beschreibungen der entsprechenden zeitlichen Verläufe erforderlich. Die Anwendungsgebiete der speicherunterstützten Verstromung von Abwärme liegen zunächst vor allem im Bereich der energieintensiven Industriebereiche wie beispielsweise bei der Herstellung von Eisen, Stahl und Baustoffen. Hier lassen sich Prozesse identifizieren, die eine Verstromung von Abwärme im MW-Bereich erlauben. Insbesondere auch aufgrund der hohen Anzahl von Betriebsstunden können hier Investitionskosten erwartet werden, die unter den entsprechenden Kosten von regenerativen Energieerzeugungssystemen liegen. Vorteilhaft ist bei der Integration thermischer Speicher in Industrieanlagen eine Mehrfachnutzung, d.h. der Speicher unterstützt nicht nur die Verstromung von Abwärme, sondern wird beispielsweise auch für die Gebäudebeheizung eingesetzt.

Im Rahmen dieser Studie untersuchten die Stadtwerke Esslingen das Potenzial für die speicherunterstützte Verstromung bei Großkunden. Aufgrund der regionalen Industriestruktur, die von Automobilzulieferern und Werkzeugmaschinenherstellern geprägt ist, konnten hier keine wirtschaftlich attraktiven Anwendungsfälle identifiziert werden. Für Konzepte wie die speicherunterstützte Verstromung, deren Einführung sich vor allem bei Großkunden anbietet, ist eine Umsetzung im Rahmen eines Anlagencontractings attraktiv. Als Basis hierfür wurde bei den Stadtwerken Esslingen eine grundlegende Untersuchung der Kundenbedürfnisse bei der Einführung neuer Technologien zur verbesserten Abwärmenutzung durchgeführt

# 1 Grundlagen der speicherunterstützten Verstromung von Abwärme

## 1.1 Nutzung industrieller Abwärme

Der Anteil der Industrie am Endenergiebedarf in Deutschland lag 2007 bei 29% und betrug ca. 734000 GWh [1]. Ein Großteil dieser Energie geht als Abwärme ungenutzt an die Umgebung verloren. Verschiedene Maßnahmen werden derzeit zur Steigerung der Energieeffizienz industrieller Prozesse angewendet. Vorteilhaft ist die Rückführung von Abwärme in den Prozess. Bis zu welchem Umfang diese interne Nutzung möglich ist, hängt von verschiedenen Bedingungen ab:

- Das Temperaturniveau der Abwärme muss den Anforderungen des Prozesses entsprechen
- Zeitliche Übereinstimmung von Abwärmeeinfall und Wärmebedarf
- Verfügbarkeit eines prozess-spezifischen Wärmeübertragungssystems für Aufnahme, Transport und Abgabe der Abwärme

Der Umfang der internen Nutzung industrieller Abwärme kann durch den Einsatz von Wärmepumpen gesteigert werden, wenn das Temperaturniveau der Abwärme geringfügig unter der für den Prozess erforderlichen Wärme liegt. Zum Einsatz kommen dann i.d.R. chemische Wärmepumpen [2]

Neben einer internen Nutzung bietet sich auch die Einspeisung von industrieller Abwärme in ein Nahwärmenetz an. Die Wirtschaftlichkeit dieser Lösung wird von folgenden Bedingungen beeinflusst:

- Verfügbarkeit/ Anschluss eines Nahwärmenetzes
- Saisonale Schwankungen im Wärmebedarf
- Gewährleistungspflicht für Wärmeversorgung durch Industriebetrieb
- Ausprägung von zeitlichen Diskontinuitäten der verfügbaren Abwärme

Nach [3] lag in Deutschland der Anteil der industriellen Abwärme 1997 bei ca. 2% der Fernwärme für die öffentliche Versorgung.

Industrielle Abwärme kann auch zum Antrieb von Kältemaschinen genutzt werden. Voraussetzung für eine wirtschaftliche Realisierung ist auch hier eine Übereinstimmung des Kältebedarfs mit der verfügbaren Abwärme, häufig treten ausgeprägte saisonale Schwankungen beim Kältebedarf auf.

Thermische Speichersysteme erleichtern bei allen zuvor beschriebenen Konzepten die Nutzung von Abwärme, da eine Kompensation von Schwankungen im Abwärmeangebot möglich wird. Dadurch kann der Teillastbetrieb von Komponenten reduziert werden ebenso können thermomechanische Spannung aufgrund von Temperaturtransienten vermieden werden. Während der Anwendungsschwerpunkt thermischer Energiespeicher bisher vor allem im Bereich der solaren Gebäudeheizung lag, bietet sich durch die Entwicklung von Energiespeichern, die auch bei Temperaturen oberhalb von 100°C eingesetzt werden können, inzwischen auch verstärkt die Option eines Einsatzes im industriellen Bereich. Hier kann eine Reihe von Grundkonzepten unterschieden werden (Fig.1):

- Bei Batch-Prozessen, bei denen während des Produktionszyklus Variationen der verfügbarer Abwärme und Wärmebedarf auftreten, kann die Abwärme zwischengespeichert werden, um zu einem späteren Zeitpunkt wieder in den Prozess eingekoppelt zu werden.
- Die kombinierte Erzeugung von Strom und Prozesswärme in Industrie-Kraftwerken ermöglicht eine effektive Nutzung fossiler Energieträger; im industriellen Bereich erweist sich jedoch häufig die gleichzeitige Bereitstellung von Strom und Wärme als nachteilig, weil dies nicht in jedem Fall dem Bedarfsprofil entspricht. Der Einsatz von thermischen Speichern ermöglicht hier eine Flexibilisierung und könnte zu einer stärkeren Verbreitung der industriellen Kraft-Wärme-Kopplung beitragen
- Bei zahlreichen industriellen Prozessen treten ausgeprägte Schwankungen der anfallenden Abwärme auf; kann diese nicht in den Prozess wieder eingekoppelt werden, bietet sich eine Nutzung für Heizzwecke bzw. für den Betrieb von Kältemaschinen an. Bei Kältemaschinen ermöglicht ein Energiespeicher den kontinuierlichen Betrieb im optimalen Arbeitspunkt. Fällt die Abwärme bei hohen Temperaturen an, so ist auch bei einer Nutzung für Heizzwecke eine Speicherung bei hohen Temperaturen vorteilhaft, weil dann hohe Speicherdichten erreicht werden können

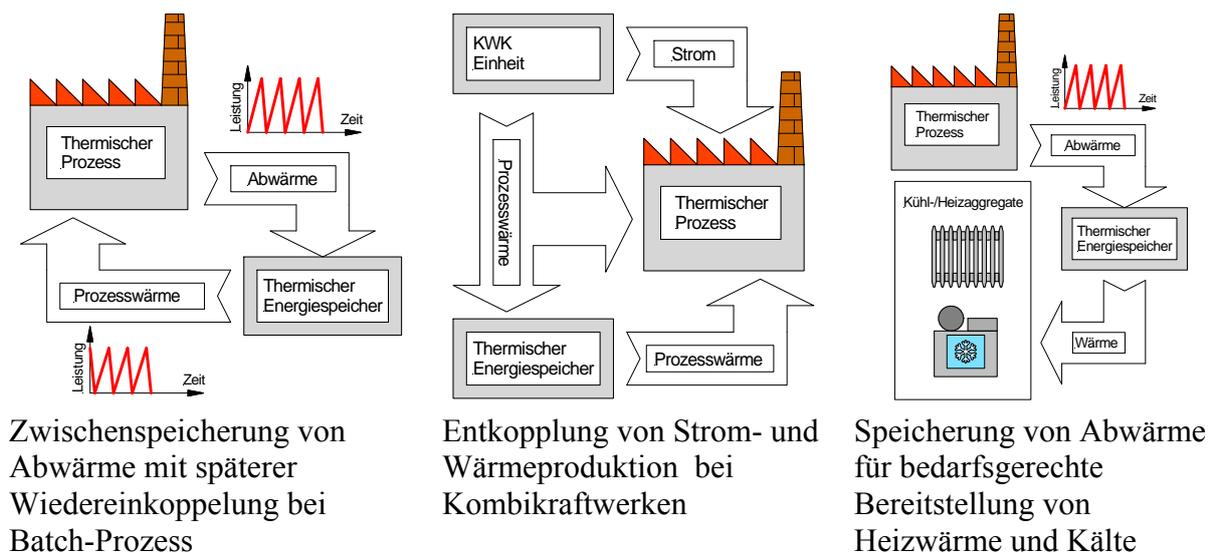


Fig.1: Mögliche Grundkonzepte für den industriellen Einsatz thermischer Energiespeicher

Im Mittelpunkt der vorliegenden Studie steht die speicherunterstützte Verstromung von Abwärme. Der Speicher soll dabei die Nutzung von Abwärmequellen ermöglichen, die bisher nicht oder nur in begrenztem Umfang als Antriebsenergie für thermische Kreisprozesse zur Umwandlung von Wärme in mechanische Energie genutzt werden. Fig.2 zeigt eine Prinzipdarstellung der speicherunterstützten Verstromung:

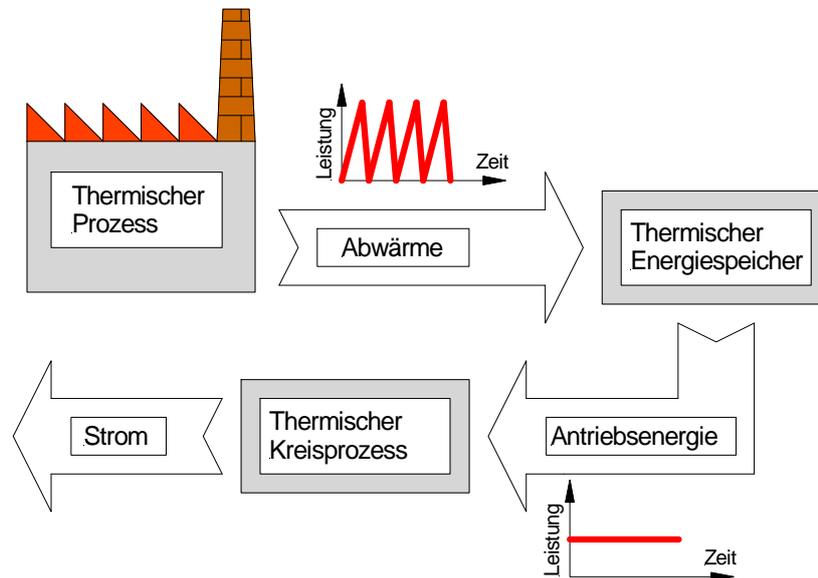


Fig.2: Prinzipdarstellung speicherunterstützte Verstromung

## 1.2 Verstromung von Abwärme

Unter dem Gesichtspunkt der Effizienz ist immer eine Nutzung von Abwärme als Wärme anzustreben. Häufig ist jedoch eine interne Nutzung von Abwärme im Prozess nicht möglich, da die Temperatur nicht ausreichend hoch ist, die Einspeisung in ein Fernwärmenetz ist oft nicht wirtschaftlich, da keine ausreichende Übereinstimmung mit dem Wärmebedarf besteht. Die zuvor beschriebenen Konzepte zur Abwärmenutzung erfordern eine spezifische Anpassung an die Anlagencharakteristik und Modifikationen der Prozesse. Als Alternative bietet sich in diesen Fällen eine Verstromung der Abwärme an. Vorteile einer derartigen Verstromung sind:

- Geringe Rückkopplung auf den Prozess
- Eigennutzung oder Einspeisung möglich, leichter Energietransfer zu großer Anzahl an Verbrauchern möglich
- Einsatz standardisierter Module möglich
- Saisonale Schwankungen im Strombedarf gering

Die Verstromung industrieller Abwärme wurde in verschiedenen Studien untersucht [4-6]. In [7] wurde für die Stoßöfen eines Hüttenwerkes die Verstromung der Abgase untersucht. Ein Beispiel für die Stromerzeugung aus industrieller Abwärme ist die Anlage im Werk Lengfurt der Heidelberger Zement AG [8]. Das System ist seit 1999 in Betrieb und erzeugt eine maximale elektrische Leistung von ca. 1.1 MW aus der Abluft eines Klinkerkühlers. Die Energie dieses Abluftstromes konnte zuvor nicht genutzt werden. Vorteilhaft ist in diesem Fall die hohe Anzahl von jährlichen Betriebsstunden (>6000h). Ein weiteres Beispiel ist eine Anlage bei der Gerresheimer Essen GmbH, die mit Abwärme aus zwei Schmelzöfen betrieben wird und für eine elektrische Leistung von 500kW ausgelegt ist [9]. Auch hier liegt die Anzahl der Volllaststunden (8000h) sehr hoch.

Für die Verstromung von Abwärme werden inzwischen verschiedene kompakte Anlagen angeboten [10,11].

### **1.3 Speicherunterstützte Verstromung von diskontinuierlicher Abwärme**

Fig.3 zeigt den zeitlichen Verlauf von Leistung und Temperaturniveau der Abgaswärmeströme an Tiegelöfen einer Aluminium / Zink-Gießerei [12]. Dieses Beispiel zeigt die häufig bei Abwärmequellen auftretenden zeitlichen Schwankungen bei Leistung und Temperatur. Obwohl hier Temperaturen von über 400°C erreicht werden, ist eine Nutzung in einem thermischen Kreisprozess wahrscheinlich aufgrund des instationären Verlaufes nicht zu realisieren.

Transiente Betriebszustände führen bei Systemen zur Umwandlung thermischer Energie in mechanische Energie zu einer Verringerung der Effizienz und reduzieren die Lebensdauer, u.U. können Wärmeströme mit schnellen Temperaturschwankungen aufgrund unzulässiger thermomechanischer Belastungen nicht genutzt werden. An- und Abfahrvorgänge sind mit Energieverlusten verbunden, da die Systemkomponenten auf Betriebstemperatur gebracht werden müssen und die dafür erforderliche Energie nur begrenzt beim Abfahren genutzt werden kann. Energieumwandlungsprozesse, bei denen eine externe Wärmequelle genutzt wird, benötigen häufig lange Anfahrzeiten, die von den Stadtwerken Esslingen betrieben ORC-Anlage benötigt beispielsweise für den Anfahrvorgang aus dem kalten Zustand ca. 45 Minuten. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die maximale Ausnutzung des Systems anzustreben, d.h. der Betrieb sollte im Auslegungspunkt mit minimalen Stillstandszeiten erfolgen. Aus thermoökonomischer Sicht eignen sich daher nur industrielle Abwärme mit möglichst konstanten Werten für Leistung und Temperatur. Es ist anzunehmen, dass ein Großteil der verfügbaren Abwärme diese Kriterien nicht erfüllt. Für die Nutzung diskontinuierlicher Abwärmeströme wurde das Konzept der speicherunterstützten Verstromung entwickelt: hier wird ein thermischer Energiespeicher zwischen die Abwärmequelle und den Energiewandler geschaltet, um Fluktuationen im verfügbaren Wärmestrom zu kompensieren und dem Energiewandler einen möglichst kontinuierlichen Wärmestrom zuzuführen. Der Einsatz des Speichers soll folgende Vorteile bieten:

- Dem Energiewandler wird ein konstanter Wärmestrom geliefert, dessen Leistung dem zeitlichen Mittelwert des Abwärmestromes entspricht
- Temperaturschwankungen werden ausgeglichen oder gedämpft
- Häufiges An- und Abfahren des Energiewandlers wird vermieden
- Die gleiche elektrische Arbeit kann durch einem Energiewandler mit geringer Maximalleistung erzeugt werden, entsprechend reduzieren sich die Investitionen
- Die Regelung wird vereinfacht
- Die Kombination Speicher/Energiewandler kann so eingesetzt werden, dass eine bedarfsgerechte Bereitstellung von Strom möglich wird, die Einspeisung in das Stromnetz kann ertragsoptimiert erfolgen.

Abgastemperatur und Energieinhalt zweier Kipptiegel KLV 600,  
 Brennerleistung 2 x 300 kW, gemeinsam genutzter Schornstein

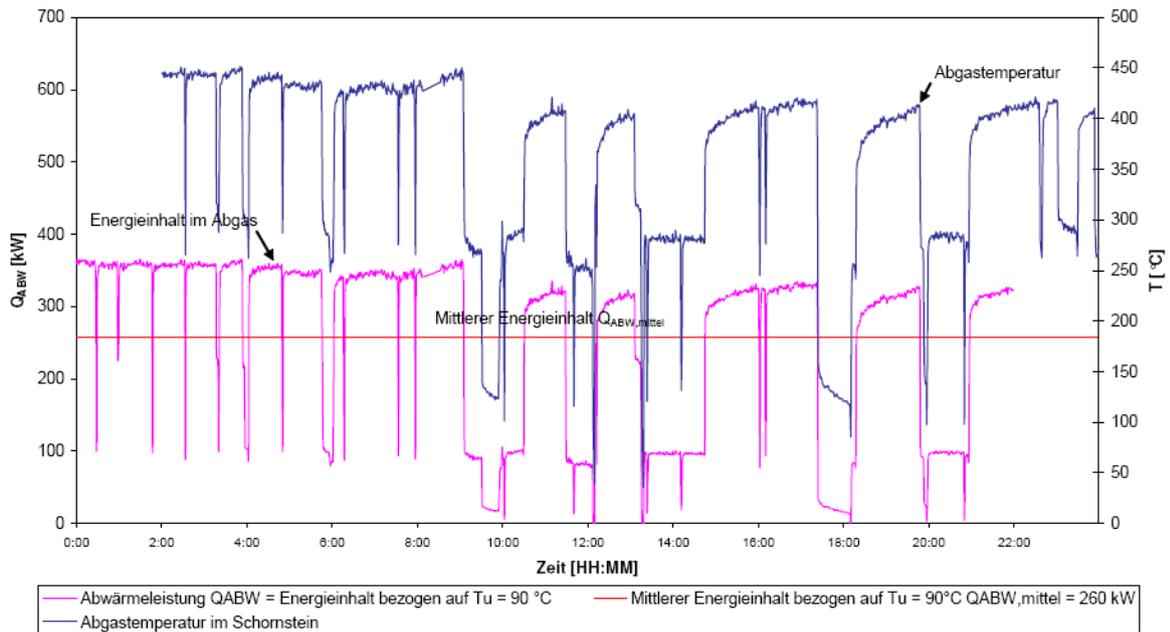


Fig.3: Beispiel für instationäre Abwärmequelle in einer Gießerei [12]

Voraussetzung für Realisierung der speicherunterstützten Verstromung von Abwärme ist Verfügbarkeit von Speichersystemen im relevanten Temperaturbereich. Hierbei kann auf aktuelle Forschungsarbeiten zurückgegriffen werden, in deren Rahmen Speichersysteme für den Einsatz in solarthermischen Kraftwerken und zur Steigerung der Energieeffizienz in der Prozessindustrie entwickelt wurden.

## 2 Aufbau eines Systems für die speicherunterstützte Verstromung von Abwärme

Angestrebt wird eine Systemlösung mit kompaktem Aufbau, deren Integration möglichst geringe Modifikationen der bestehenden Anlage erfordern. Es lassen sich die drei Grundprozesse Wärmeübertragung, Energiespeicherung und Energieumwandlung unterscheiden (Fig.4). Die Energiespeicherung kann dabei parallel zu einer Energieübertragung an den Energiewandler erfolgen. Eine Anpassung an spezifische Anwendungen soll durch eine entsprechende technische Umsetzung dieser drei Grundprozesse ermöglicht werden. Die verschiedenen Optionen zur technischen Umsetzung sollen im Folgenden beschrieben werden.

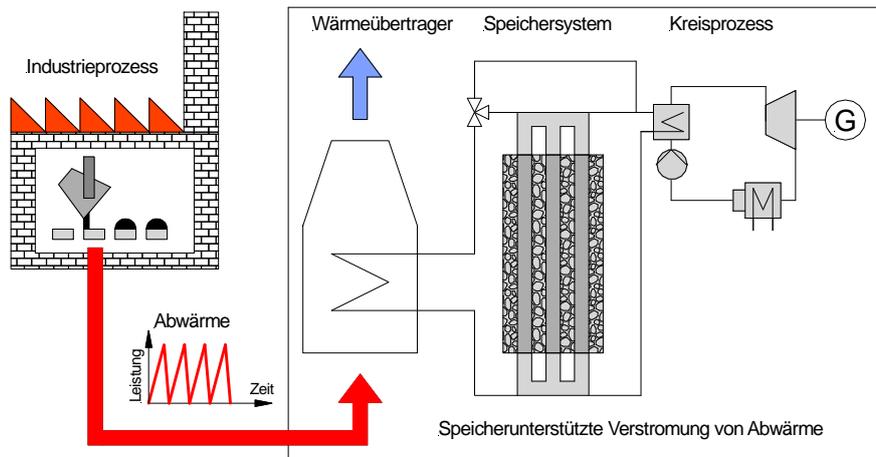


Fig.4: Prinzipschema speicherunterstützte Verstromung industrieller Abwärme

### 2.1 Energiespeicher

Die minimale Temperatur, bei der heute kommerziell verfügbare thermische Energiewandler betrieben werden, liegt bei ca. 80°C. Im Hinblick auf den thermischen Wirkungsgrad ist eine möglichst hohe Temperatur bei der Energiespeicherung anzustreben. Aus diesen Gründen werden im Rahmen dieser Studie drucklose Wasserspeicher nicht betrachtet. Für den Temperaturbereich über 100°C wurden verschiedene Speicherkonzepte entwickelt, die kommerziell in der Prozessindustrie bzw. in Kraftwerken eingesetzt werden oder sich in einem marktnahen Stadium befinden. Diese Konzepte weisen unterschiedliche Charakteristiken auf, für jede Anwendung muss eine Auswahl des am besten geeigneten Konzeptes erfolgen, eine allgemein gültige Bewertung ist nicht möglich.

Die Speicherkonzepte basieren entweder auf der Speicherung sensibler Wärme oder nutzen die Energieänderungen, die mit einem Phasenwechsel des Speichermediums verbunden sind [13].

#### 2.1.1 Sensible Wärmespeicher

Der Energieinhalt eines sensiblen Wärmespeichers lässt sich direkt aus der mittleren Temperatur des Speichermediums bestimmen. Es wurden verschiedene Konzepte entwickelt, die sich im Aggregatzustand des Speichermediums oder in der Art der Wärmeeinkopplung unterscheiden. Die kapazitätsspezifischen Kosten sensibler Speicher hängen von der mittleren Temperaturdifferenz ab, die das Speichermedium während eines Be- bzw. Entladezyklus durchläuft, Kostenangaben können daher nur für eine bestimmte Temperaturdifferenz

erfolgen. Derzeit befinden sich folgende Konzepte in einem kommerziellen oder marktnahen Stadium:

### **Zweitanksysteme mit flüssigem Wärmespeichermedium**

Bei Zweitanksystemen mit flüssigem Speichermedium befindet sich zwischen einem kalten und einem heißen Flüssigkeitsvolumen ein Wärmeträger, über den die Ein- bzw. Auskopplung der Energie erfolgt. Als Speichermedium können Thermoöle oder geschmolzene Nitratsalze eingesetzt werden. Bei Thermoölen sind Umweltaspekte und hohe volumenspezifische Kosten zu beachten, bei den derzeit eingesetzten Nitratsalzen liegen die minimalen Erstarrungstemperaturen bei ca. 145°C, ein Erstarren im Speichertank sollte vermieden werden. Salzschnmelzen als Wärmeträgermedium wurden bei solarthermischen Kraftwerken schon bei Temperaturen bis zu 520°C eingesetzt (Fig.5)[14], es werden derzeit Systeme mit maximalen Leistungen im Bereich von 150 MW betrieben, die Kapazität liegt im GWh-Bereich [15].



Fig.5: Kalttank und Heißtank eines Salzschnmelze-Speichersystems, eingesetzt im solarthermischen Solar Two Kraftwerk [14]

### **Ruths-Speicher**

Bei Ruths-Speichern (auch als Dampfspeicher bezeichnet) [16] wird ein druckbeaufschlagtes Wasservolumen zur Speicherung genutzt (Fig.6). Bei der Beladung wird Dampf über Düsen zugeführt, die bei der Kondensation freiwerdende Energie erhöht die Temperatur des Wasservolumens. Bei der Entladung wird Satttdampf entnommen, dessen Erzeugung verringert die sensible Wärme im Speichervolumen, Druck und Temperatur sinken während der Entladung ab, was nachteilig für den Betrieb einer Turbine ist. Die maximal erreichbare Temperatur ist bei Ruths-Speichern begrenzt, unter wirtschaftlichen Aspekten ergeben sich Grenzen durch die Kosten des Druckbehälters, die mit zunehmender Temperatur stark ansteigen. Ruths-Speicher eignen sich vor allem für Prozesse, die mit Satttdampf auf variierendem Druckniveau betrieben werden können. Ruths-Speicher können kurzfristig hohe Leistungen bereitstellen bzw. aufnehmen und eignen sich daher zur Kompensation schneller Transienten.

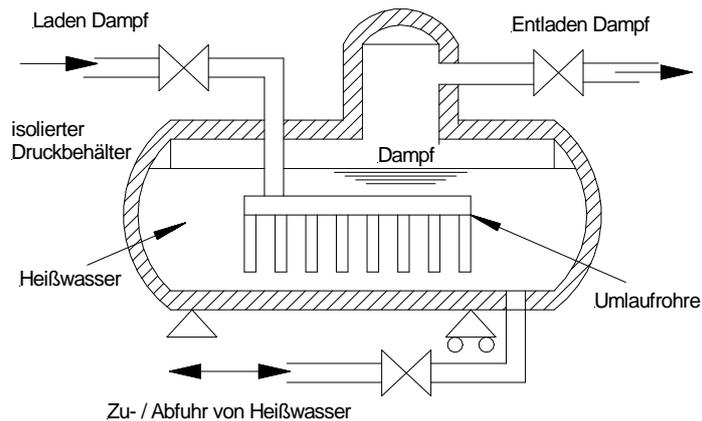


Fig.6: Schema eines Gefällespeichers

Ruths-Speicher werden in der chemischen Industrie und in der Baustoffindustrie eingesetzt. Ein Speichersystem mit einer Kapazität von 20 MWh und einem Maximaldruck von 45 bar wurde in das Solarkraftwerk PS10 integriert.

### Feststoffspeicher

Die Kosten fester Speichermedien sind deutlich niedriger als die entsprechenden Kosten von flüssigen Speichermedien, Risiken aufgrund von Erstarrung, Verdampfung oder Undichtigkeiten werden vermieden. Aufwändiger ist dagegen die Ein- und Auskopplung von Wärme an das Speichermedium. Während flüssige Speichermedien direkt als Arbeitsmedien in Wärmeübertragern eingesetzt werden können, muss bei festen Speichermedien ein Wärmeübertrager in das Speichervolumen integriert werden. Nachteilig ist hier die niedrige Wärmeleitfähigkeit der Speichermedien. Aufgrund von Kostenaspekten scheiden metallische Speichermedien aus, preisgünstige Materialien wie beispielsweise Beton weisen Wärmeleitfähigkeit  $< 2 \text{ W/mK}$  auf und erfordern großflächige Wärmeübertragungssysteme. Die Kosten des Wärmeübertragers liegen beim Feststoffspeicher i.d.R. deutlich über den Kosten des Speichermediums. Da die Leistungsdichte die Kosten des Wärmeübertragers stark beeinflusst, werden Feststoffspeicher häufig für Lade- und Entladezyklen im Bereich mehrerer Stunden ausgelegt. Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte wurden Feststoffspeicher mit Beton als Speichermedium unter anwendungsnahen Bedingungen bei Temperaturen bis zu  $400^\circ\text{C}$  und Kapazitäten von  $400\text{kWh}$  demonstriert (Fig.7) [17].



Fig.7: Feststoffspeicher mit Beton als Speichermedium mit  $400\text{kWh}$  Speicherkapazität, maximale Temperatur bei  $400^\circ\text{C}$  [17].

Tabelle 1 gibt eine Übersicht der wesentlichen Eigenschaften der zuvor beschriebenen Speicherkonzepte für sensible Energiespeicherung:

Konzept	Temperaturbereich (erprobt) [°C]	Vorteile	Nachteile
Zweitank (Thermoöl)	0 - 300	- Wärmeabgabe bei konstanter Temperatur - Teilbeladung möglich - drucklos	- Umweltaspekte - Brandgefahr - große Tankvolumen wegen geringer Dichte Speichermedium
Zweitank (Salzschmelze)	145 - 540	- Wärmeabgabe bei konstanter Temperatur - Teilbeladung möglich - drucklos	- Erstarren der Salzschmelze muss vermieden werden
Ruths	0 - 300	- hohe volumetrische Leistungsdichte - kurze Ansprechzeiten	- eignet sich nur für Sattdampf als Arbeitsmedium - Temperatur und Druck fallen stetig während der Entladung - Speicherbehälter steht unter Druck
Feststoff (Beton)	0 - 400	- sicheres Speichermedium - drucklos	- Temperatur nicht konstant bei Entladung - Leistungsdichte wirtschaftlich begrenzt

Tab.1: Übersicht Konzepte für die Speicherung sensibler Wärme

### 2.1.2 Latentwärmespeicher

Latentwärmespeicher nutzen Energieänderungen, die mit einem Phasenwechsel des Speichermediums verbunden sind. Diese Phasenwechsel verlaufen näherungsweise isotherm, bei der Beladung muss Wärme mit Temperaturen oberhalb der Phasenwechseltemperatur zugeführt werden, bei der Entladung wird Wärme bei Temperaturen unterhalb der Phasenwechseltemperatur bereitgestellt. Die Leistungsdichte eines Latentwärmespeichers hängt auch von der zulässigen Temperaturdifferenz zwischen der Phasenwechseltemperatur und der zulässigen Temperatur der abgegebenen Wärme ab. Latentwärmespeicher eignen sich insbesondere für Anwendungen, bei denen Energie bei konstanter Temperatur benötigt wird, wie beispielsweise bei Prozessen mit Dampf als Arbeitsmedium.

Mit der Wahl des Latentspeichermediums (engl. Phase Change Material, PCM) wird auch die Temperatur des Phasenwechsels festgelegt, die auf die Anwendung abgestimmt werden muss. Weitere zu berücksichtigende Kriterien ist die chemische Verträglichkeit mit den übrigen Materialien, die im Speicher in Kontakt mit dem Speichermedium stehen sowie Sicherheitsaspekte oder Hygroskopizität. Aus Kostengründen werden vor allem Salze und deren Mischungen eingesetzt, die nachfolgende Tabelle zeigt eine Auswahl von möglichen Speichermedien [18]:

	Schmelz- temperatur [°C]	Schmelz- enthalpie [kJ/kg]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Vol.spez. Kapazität [kWh/m <sup>3</sup> ]	Geschätzte Kosten [€/kWh] Nur Material, Nur Latentwärme
KNO <sub>3</sub> - NaNO <sub>3</sub> (eu)	222	100	2000	55	14
KNO <sub>3</sub> - NaNO <sub>2</sub> - NaNO <sub>3</sub> (eu)	142	60	2000	33	45
NaNO <sub>3</sub>	306	175	1900	96	7

Tab.2: Mögliche Speichermaterialien für Latentwärmespeicher

Bei PCM-Speichersystemen wird i.d.R. ein Wärmeübertrager in das Speichermaterial integriert, um Wärme ein- und auszukoppeln. Die als PCM betrachteten Salze weisen eine niedrige Wärmeleitfähigkeit auf ( $< 1 \text{ W/mK}$ ), der integrierte Wärmeübertrager muss so ausgeführt sein, dass die erforderliche Leistungsdichte erreicht werden kann. Die Optimierung des Wärmeübertragers ist wesentlich für den wirtschaftlichen Erfolg des Latentwärmespeichers. Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte wurden Latentwärmespeicher entwickelt und demonstriert [19]. Durch den Einsatz von berippten Wärmeübertragern, die in das Speichermaterial integriert wurden, konnten dabei die angestrebten Leistungsdichten erreicht werden. Derzeit befindet sich ein Latentspeichersystem mit NaNO<sub>3</sub> im Aufbau, das mit Dampf als Arbeitsmedium bei ca. 100 bar betrieben werden soll (Fig.8). Der Speicher ist für eine Leistung von 700 kW bei einer Kapazität von 700 kWh ausgelegt.



Fig.8: Latentspeichermodule für Dampf bei ca. 100bar, Leistung 700 kW, Speicherkapazität 700 kWh

Die Wahl des Speicherkonzeptes erfolgt unter Berücksichtigung systemtechnischer Aspekte: sensible Wärmespeicher eignen sich vor allem zur Kombination mit einphasigen

Arbeitsmedien, wie beispielsweise Thermoöl, während Latentwärmespeicher bei Systemen bevorzugt werden, in denen zweiphasige Arbeitsmedien eingesetzt werden. Latentwärmespeicher können auch unterhalb der Phasenumwandlungstemperatur betrieben werden, ein derartiges System kombiniert dann sensible und latente Wärmespeicherung und kann dadurch höhere volumetrische Kapazitäten erreichen.

Wesentlich für den wirtschaftlichen Erfolg von Speichersystemen ist eine möglichst optimale Systemintegration, d.h. eine gute Anpassung sowohl an die Anlagenteile, die Energie für eine Beladung bereitstellen, als auch an den Verbraucher, dem die Energie während der Entladung geliefert wird. Die Kosten eines Speichersystems hängen sowohl vom Temperatur-/Druckniveau, als auch der Leistungsdichte und der Speicherkapazität ab. Allgemeine Aussagen über die Kosten thermischer Speichersysteme sind nicht möglich, vielmehr erfordern Kostenangaben die Spezifikation folgender Faktoren:

- Kapazität des Speichers
- Leistung während der Be- und Entladung
- Temperaturniveau
- Wärmeträgermedium für Ein- und Auskopplung der Energie
- Frequenz der Lade-/ Entladezyklen
- Zulässige Anfahrzeiten

Diese Faktoren werden durch den konkreten Anwendungsfall bestimmt. Die Amortisationszeit von Speichern wird stark von der Häufigkeit der Be- und Entladung beeinflusst, da die durch den Speicher eingesparte Energie von der Anzahl der Zyklen abhängt.

## 2.2 Energieumwandlungsprozess

Die Wahl des Energieumwandlungsprozesses wird stark beeinflusst vom Temperaturniveau der verfügbaren Abwärme. Unter der Annahme, dass die Temperatur der Abwärme vom Temperaturniveau des Prozesses abhängt, folgt aus Fig.9 [20], die eine Abschätzung für den Prozesswärmebedarf für verschiedene Temperaturbereiche darstellt, dass ausgeprägte Maxima sowohl im Temperaturbereich 1400-1500°C als auch im Temperaturbereich unter 200°C auftreten.

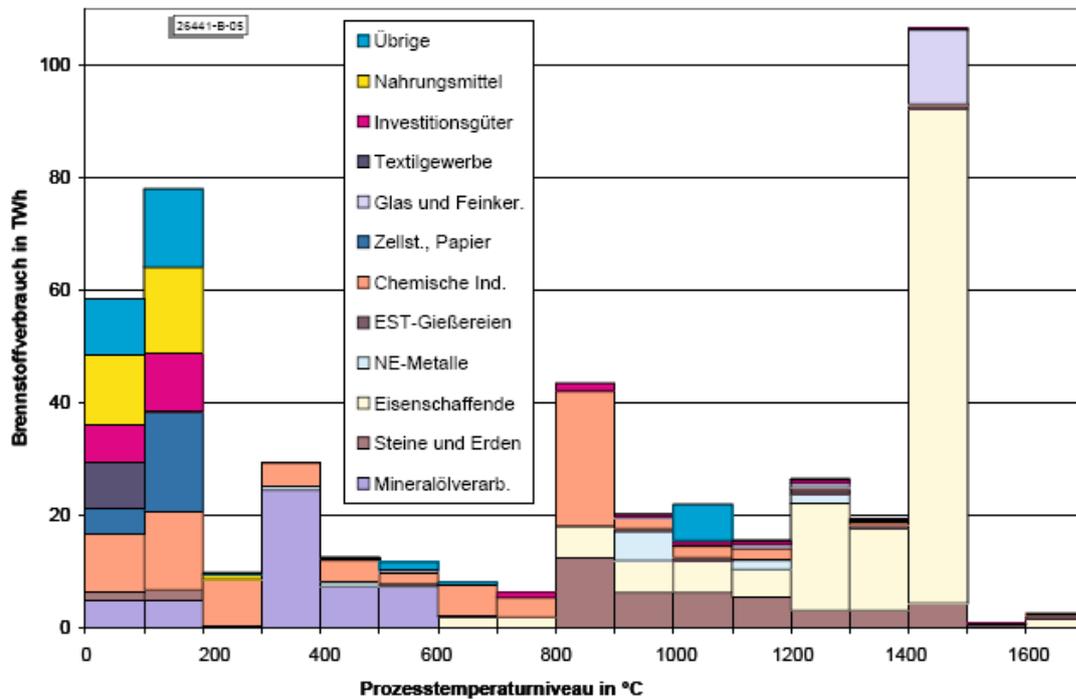


Fig.9: Brennstoffverbrauch für industrielle Prozesswärme nach Branchen und Temperaturniveau (Deutschland 1990)[20]

Aus dem entsprechenden temperaturabhängigen Bedarf an elektrischer Energie (Fig.10) ergeben sich Maxima im Temperaturbereich unter 100°C sowie im Temperaturbereich 900-1000°C. Der Bedarf an elektrischer Energie liegt im Bereich der Prozessindustrie bei ca. 25% des Bedarfs an thermischer Energie.

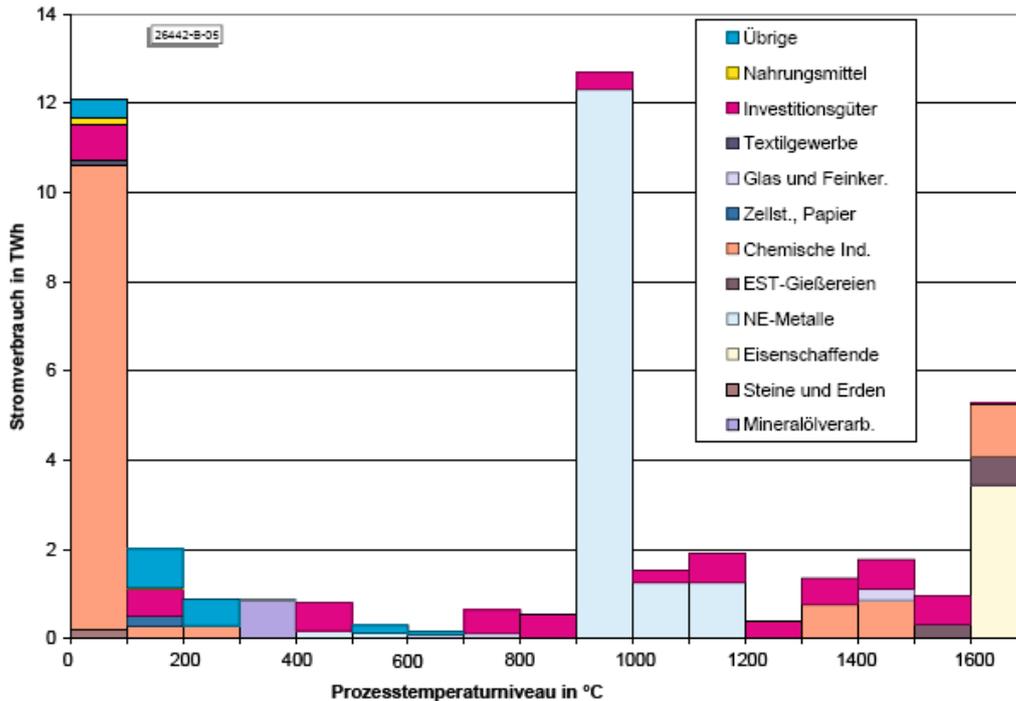


Fig.10: Stromverbrauch für industrielle Prozesswärme nach Branchen und Temperaturniveau (Deutschland 1990)[20]

Im Hinblick auf erreichbare Wirkungsgrade erscheint insbesondere die Abwärme bei Temperaturen nahe 1000°C als besonders attraktiv; der technische Aufwand für eine Verstromung scheint jedoch insbesondere für die Wärmeübertrager und die Speichersysteme erheblich. Für diesen Temperaturbereich sind keine Beispiele einer Verstromung von Abwärme bekannt. Im Hinblick auf die zu erwartende Struktur der Temperaturverteilung der verfügbaren Abwärme liegt daher der Schwerpunkt der folgenden Betrachtungen bei Temperaturen zwischen 80°C und 500°C. Hier bieten sich verschiedene Optionen für den thermischen Kreisprozess an. Im Hinblick auf den industriellen Einsatz stehen bei Auswahl des Energiewandlers insbesondere Aspekte wie Verfügbarkeit kommerzieller Systeme und Umfang der Betriebserfahrung im Vordergrund. Für den Bereich der Verstromung industrieller Abwärme dürften die meisten Anwendungen im Leistungsbereich unter 2MW<sub>elektrisch</sub> liegen.

- Dampfkraftprozess mit Wasserdampf als Arbeitsmedium  
Häufigster Prozess im Kraftwerksbereich, bei Abwärmenutzung i.d.R. vor allem bei Systemen mit Abgasnutzung von Verbrennungsmaschinen
- ORC (Organic-Rankine Prozess, Clausius-Rankine-Prozess mit organischem Arbeitsmedium)  
Zahlreiche Anwendungen im Niedertemperaturbereich
- Kalina-Zyklus  
Kreisprozess mit binärem Arbeitsmedium zur Verbesserung Wirkungsgrad insbesondere bei Temperaturen <100°C; durch binäres Arbeitsmedium (Ammoniak-Wasser) ist die Verdampfung nicht isotherm; derzeit etwa vier Anlagen weltweit in Betrieb, komplexer Anlagenaufbau
- Stirling-Prozess  
Anwendungen vor allem in der dezentralen KWK, Leistungsbereich bekannter Systeme <100kW, bisher begrenzte Erfahrung mit kommerziellen Systemen.

Von diesen Konzepten erscheinen neben konventionellen Dampfturbinen insbesondere ORC-Systeme als besonders attraktiv für die speicherunterstützte Verstromung. Der führende Hersteller ORMAT gibt die Anzahl der gelieferten eigenen Anlagen mit über 800 an, der Großteil der Systeme zur Verstromung industrieller Abwärme basiert inzwischen auf dem ORC-Prozess [21]. Nach Hersteller-Angaben erreichen ORC-Systeme bei 100°C Maximaltemperatur noch 11% Wirkungsgrad, im Bereich der Geothermie werden Systeme auch bei minimalen Temperaturen von ca. 80°C betrieben [22].

Demgegenüber ist die Anzahl von Systemen auf Basis des Kalina-Zyklus oder des Stirling Prozesses gering, es sind für diese beiden Systeme keine Verwendung zur Verstromung industrieller Abwärme bekannt. Beide Konzepte weisen eine höhere Komplexität auf als der ORC-Prozess.

Die Unterschiede zwischen ORC-Systemen und konventionellen Dampfkraftprozessen ergeben sich vor allem aus den Eigenschaften des organischen Arbeitsmediums. Fig.11 zeigt das t-s Diagramm für Wasser und R-123 sowie R-134 als mögliche Arbeitsmedien für den ORC-Prozess.

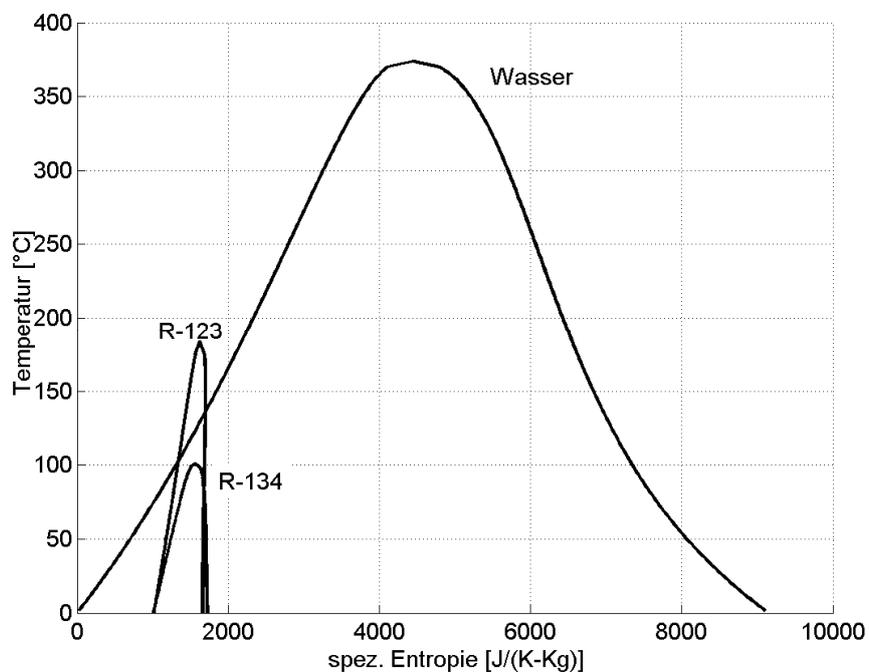


Fig.11: t-s-Diagramm für Wasser im Vergleich zu R-123 und R-134 als mögliche Arbeitsmedien ORC-Prozess.

Unterschiede zeigen sich hier bei der Verdampfungsenthalpie sowie beim Verlauf der Sättigungslinie rechts vom kritischen Punkt. Während die Sättigungslinie für den Übergang Naßdampf/überhitzter Dampf beim Wasser eine negative Steigung aufweist, weisen die entsprechenden Sättigungslinien für die Arbeitsmedien des ORC-Prozesses häufig eine positive Steigung auf. Der Entspannungsprozess endet bei ORC-Turbinen daher häufig im Gebiet des überhitzten Dampfes, wodurch in den Endstufen der Turbine Probleme durch Tropfenbildung vermieden werden können (Fig.12). Fig.13 zeigt den Einfluss des maximalen Druck und damit der Verdampfungstemperatur auf den Wirkungsgrad für R-123 als Arbeitsmedium.

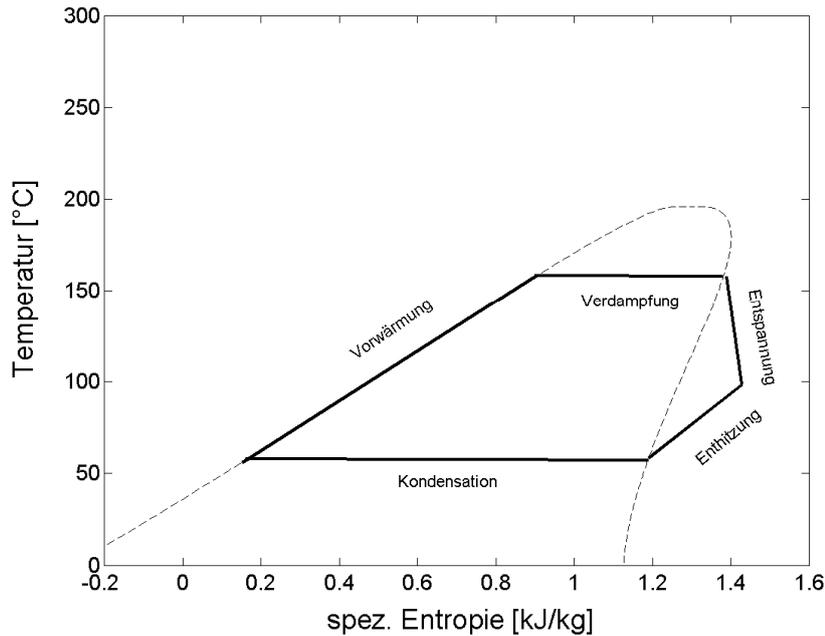


Fig.12: Beispielhafter Verlauf eines ORC-Kreisprozess im TS-Diagramm

Vorteile bietet die geringere Verdampfungsenthalpie eines organischen Arbeitsmediums auch bei der Nutzung von Energie, die als sensible Wärme verfügbar ist. Bei Dampfkreisläufen muss ausreichend Abwärme oberhalb der Verdampfungstemperatur verfügbar sein, dieser Anteil ist für ORC-Systeme deutlich geringer als bei Wasserdampfkreisläufen (Fig.14), Abwärme kann daher auch noch bei tieferen Temperaturen genutzt werden.

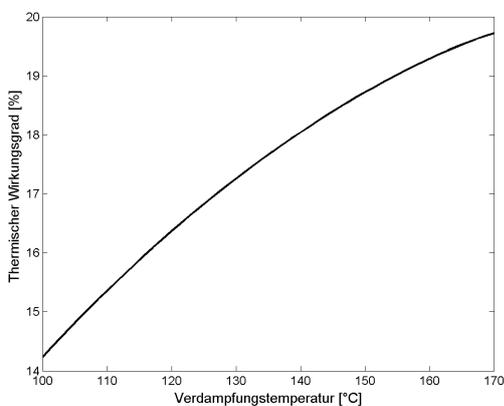


Fig.13: Berechneter thermischer Wirkungsgrad des ORC-Sattdampf-Prozesses in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur, Arbeitsmedium R123

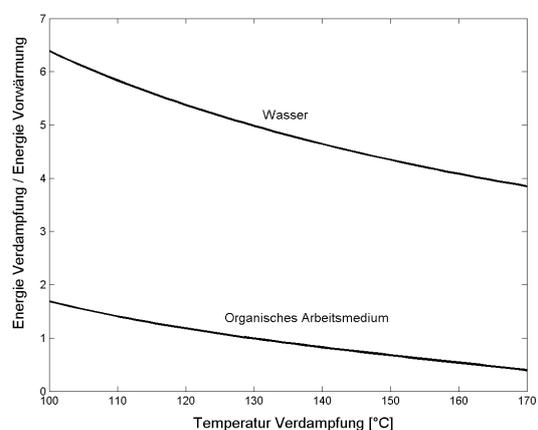


Fig.14: Vergleich Clausius-Rankine mit Arbeitsmedium Wasser gegenüber organischem Arbeitsmedium: Verhältnis der erforderlichen Energie für die Verdampfung zur erforderlichen Energie für die Vorwärmung

Bei der Analyse des ORC-Prozesses kann auf Betriebserfahrung der Stadtwerke Esslingen am Holzheizkraftwerk Scharnhäuser Park zurückgegriffen werden (Fig.15), insbesondere auf Betriebsverhalten beim Anfahren und bei Lastwechsel.

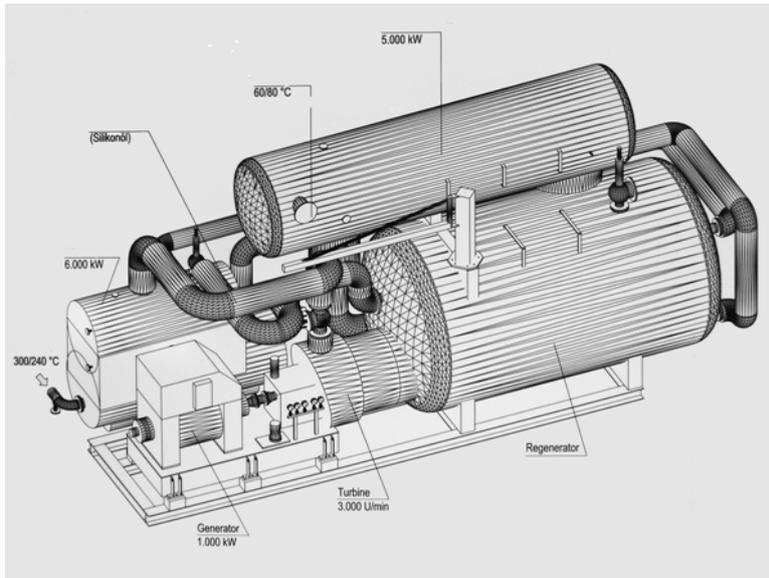


Fig.15: Darstellung ORC-Modul, das von den Stadtwerken Esslingen im Holzheizkraftwerk Scharnhäuser Park eingesetzt wird.

### 2.3 Wärmeübertrager

Im ersten Teilschritt wird die Abwärme an das Speichersystem übertragen, parallel dazu kann auch eine Übertragung an das Arbeitsmedium des Energieumwandlungsprozesses erfolgen. Aus dem Einsatz bei der speicherunterstützten Verstromung ergeben sich für den Wärmeübertrager im Vergleich zu üblichen Anwendungen zur Nutzung von Abwärme keine wesentliche zusätzlichen Anforderungen, hier kann auf den Stand der Technik zurückgegriffen werden. Berücksichtigt werden müssen Anforderungen aufgrund von thermischen Transienten und Zusammensetzung von Abgasströmen.

Für den Transport der Abwärme aus dem Prozess lassen sich verschiedene Fälle unterscheiden:

- |  |   |
|--|---|
| Abgabe über Gasstrom                       | - Heißluft (keine Reinigung erforderlich)<br>- Dampf<br>- Abgase (Reinigung erforderlich) |
| Energie ist in Produkt (flüssig) enthalten | - Berücksichtigung Korrosion  |
| Energie ist in Produkt (fest) enthalten    | - aktive Kühlung erforderlich, Berücksichtigung Auswirkung auf Produkteigenschaften       |

Wenn sich in einer Industrieanlage lokal verteilte Abwärmequellen befinden, können Wärmeübertrager über ein Wärmenetz miteinander verbunden werden, über das die aufgenommene Abwärme dann zu einem gemeinsamen Speicher bzw. Energiewandler transportiert wird.

Treten bei Abwärmeströmen kurzzeitige Schwankungen auf, so ist auch eine Kombination von Wärmeübertrager und Speicher denkbar. Entsprechend Fig.16 wird der Abwärmestrom dann direkt durch das Speichermaterial geführt. Im Speichermaterial sind Wärmeübertrager angeordnet, die vom Arbeitsmedium des Kreisprozess durchströmt wird. Das Speichermaterial dämpft bei einer derartigen Anordnung schnelle Transienten im Abgasstrom, die Regelung wird vereinfacht.

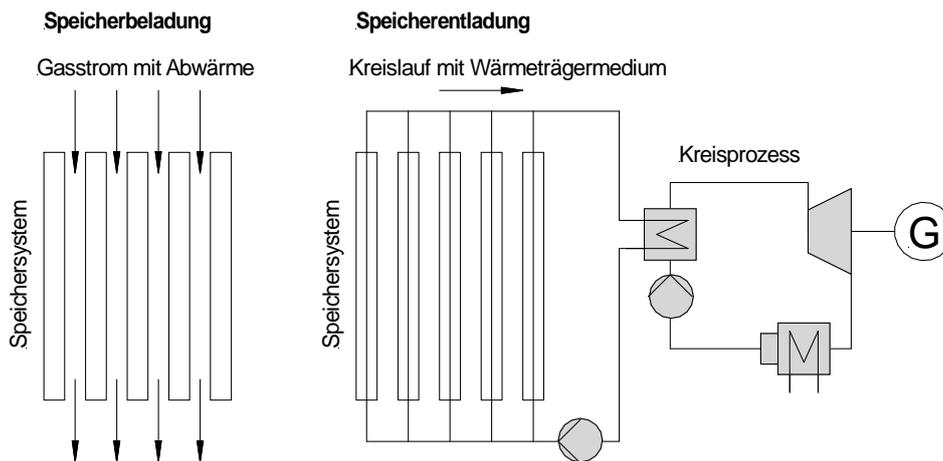


Fig.16: Speicherkonzept mit direkter Einkopplung von Abwärme aus Gasstrom, Entladung über Arbeitsmedium des Kreisprozesses.

### 3 Anwendungsbereiche für die Speicherunterstützte Verstromung von Abwärme

#### 3.1 Identifikation von Grundfällen

Die Strukturen der Energieströme in industrielle Anlagen unterscheiden sich stark voneinander, auch bei gleichen Produkten können sich für verschiedene Anlagen deutliche Unterschiede bei den Profilen der Abwärmeströme ergeben. Um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dieser Studie auf möglichst viele Anwendungen zu ermöglichen, werden ausgehend von der Charakteristik der verfügbaren Abwärme verschiedene Grundfälle definiert. Durch Zuordnung zu einem dieser Grundfälle kann bei gegebenem Abwärmeprofil eine Abschätzung über das Potenzial einer speicherunterstützten Verstromung vorgenommen werden.

Es wurden folgende drei Grundfälle identifiziert, für die im Kapitel 4 Anwendungsbeispiele berechnet werden.

#### 3.1.1 Fluktuierende Variation der Abwärmeleistung bei ausreichend hoher spezifischer Enthalpie

In diesem Fall treten zeitliche Änderungen der verfügbaren Abwärmeleistung auf, wobei die spezifische Enthalpie der Abwärme konstant bleibt bzw. stets oberhalb der Maximaltemperatur des Kreisprozesses liegt. Abweichungen von der Auslegungsleistung führen bei thermischen Kreisprozessen zu Wirkungsgradverlusten bzw. zu einer verschlechterten Wirtschaftlichkeit. Wird hier eine speicherunterstützte Verstromung angewendet, dann erfolgt die Dimensionierung des thermischen Kreisprozesses so, dass die thermische Auslegungsleistung dem zeitlichen Mittelwert der Abwärmeleistung entspricht. Der Einsatz eines thermischen Energiespeichers kann hier unterschiedliche Verbesserungen bewirken (Fig. 17):

- Ist keine Abwärme verfügbar, wird der thermische Kreisprozess und die damit verbundenen Investitionen nicht genutzt (Fig.17, Phase A). Der Einsatz eines Speichers führt zu einer konstanten Ausnutzung des vorhandenen Kreisprozesses

- Fällt die Abwärme mit Unterbrechungen an, treten in jeder Anfahrphase Verluste auf, bis das System Betriebstemperaturen erreicht hat. Durch den Einsatz eines Speichers können Betriebsunterbrechungen und die damit verbundenen Anfahrverluste reduziert werden (Fig.17, Phase B)
- Übersteigt die verfügbare Abwärmeleistung die thermische Auslegungsleistung des thermischen Kreisprozesses, so kann das Abwärmepotenzial nicht vollständig genutzt werden; ist ein Speicher verfügbar, so kann die überschüssige Leistung gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt genutzt werden (Fig.17, Phase C)
- Liegt die Abwärmeleistung unterhalb der thermischen Auslegungsleistung, so treten Teillastverluste auf, die verfügbare Leistung des thermischen Kreisprozesses wird nur teilweise genutzt. Wird die Abwärme durch Leistung aus dem Speicher ergänzt, kann der Anteil des Teillastbetriebs begrenzt werden.

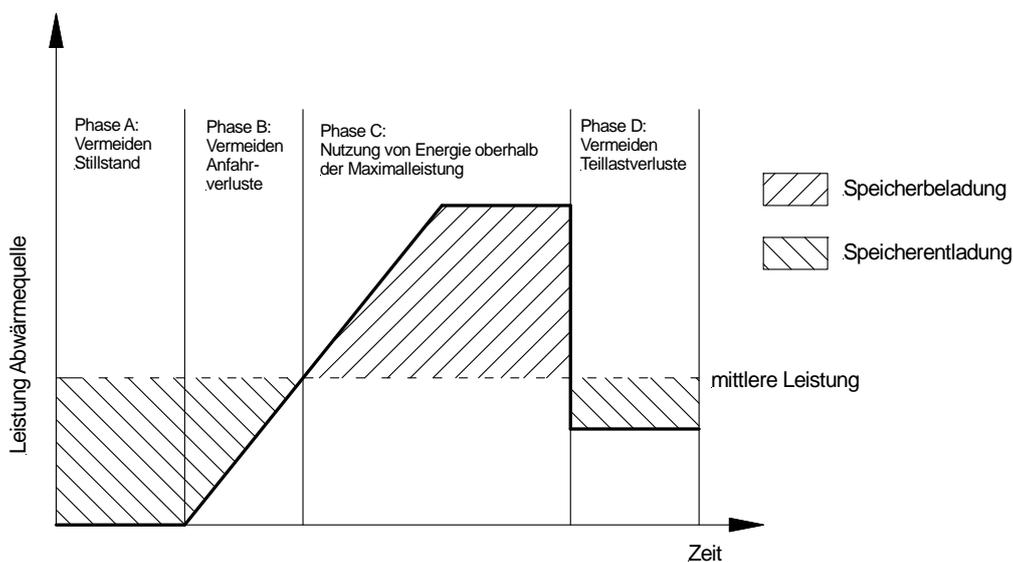


Fig.17: Beispielhafter Verlauf für den Grundfall 1; bei ausreichend hoher Enthalpie variiert die verfügbare Leistung der Abwärme

### 3.1.2 Fluktuierende Variation der Enthalpie

Fällt die Temperatur der verfügbaren Abwärme zeitweise unter die erforderliche Maximaltemperatur des Kreisprozesses, ergeben sich Wirkungsgradeinbußen, bei schnellen Temperaturvariationen treten thermomechanische Spannungen in der Turbine auf, die zu einem erhöhten Wartungsaufwand führen. Thermische Speicher können hier zur Stabilisierung der Temperatur der verfügbaren Antriebswärme genutzt werden (Fig.18). Treten Temperaturen oberhalb der erforderlichen Maximaltemperaturen auf, wird der Abwärmestrom durch den Speicher bis auf die Maximaltemperatur abgekühlt, fällt die Temperatur des Abwärmestromes unter die erforderliche Maximaltemperatur, so wird durch zuvor gespeicherte Energie die Temperatur wieder auf den Sollwert angehoben. Für den Ausgleich von Temperaturschwankungen eignen sich Latentwärmespeicher, bei denen die Be- und Entladevorgänge bei näherungsweise gleichbleibender Temperatur erfolgen und die sich damit besonders gut für derartige Regelaufgaben eignen. Bei Dampfkreisprozessen ist die Differenz zwischen der Temperatur der Abwärme und der Verdampfertemperatur von besonderer Bedeutung, da nur der Abwärmeanteil für die Verdampfung genutzt werden kann, dessen Temperatur oberhalb der Siedetemperatur des Arbeitsmediums liegt. Die für die Verdampfung verfügbare thermische Leistung begrenzt häufig die Gesamtleistung der

Turbine, Variationen in der Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Abwärme wirken sich deutlich auf die elektrische Leistung aus, die von der Turbine abgegeben werden kann.

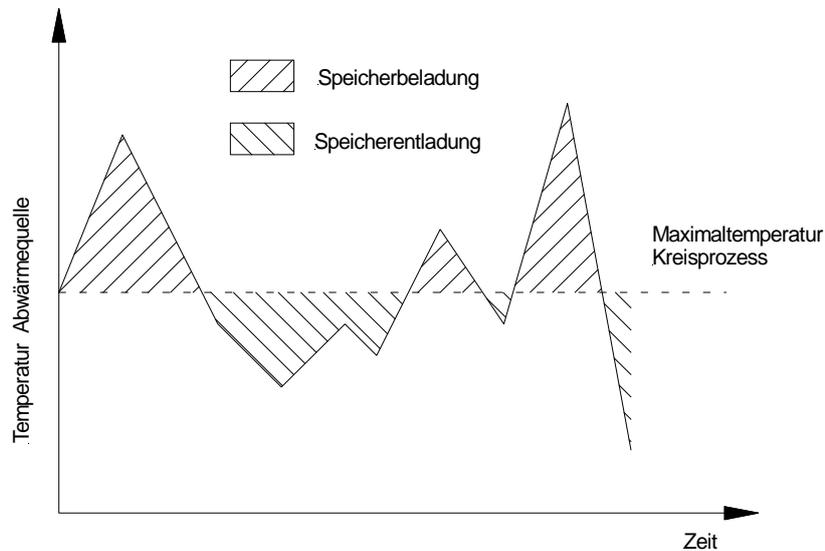


Fig.18: Beispielhafter Verlauf für den Grundfall 2; die Temperatur der verfügbaren Abwärme fällt zeitweise unter die Maximaltemperatur des nachgeschalteten Kreisprozesses

### 3.1.3 Kontinuierlicher Abfall der spezifischen Enthalpie der verfügbaren Abwärme

Wird Abwärme aus einem Abkühlprozess genutzt, so sinkt die Temperatur der verfügbaren Abwärme kontinuierlich ab. Wird ein Dampfkreislauf zur Umwandlung der Abwärme eingesetzt, kann nur der Abwärmeanteil oberhalb der Verdampfungstemperatur genutzt werden. Soll diese Abwärme in einem Sattdampfprozess eingesetzt werden, kann durch entsprechende Regelung die verfügbare thermische Leistung konstant gehalten werden, jedoch ist aufgrund der variierenden Temperatur eine ständige Anpassung der Kühlmassenströme erforderlich. Der Einsatz eines Speichers bietet hier zwei Vorteile: in der Anfangsphase des Abkühlprozesse nimmt der Speicher den Leistungsanteil, der oberhalb des zeitlichen Mittelwertes liegt auf und ermöglicht damit eine konstante Auslastung der Turbine. Fällt die Temperatur der Abwärmequelle unter die Verdampfungstemperatur des Kreisprozesses, wird das Temperaturniveau durch die zuvor eingespeicherte Energie angehoben, damit kann Abwärme aus dem Abkühlprozess in größerem Umfang genutzt werden. Dieses Grundprinzip des Speichereinsatzes bei der Nutzung von Wärme aus Abkühlprozessen ist in Fig.19 dargestellt. In der Anfangsphase gibt der Abwärmestrom eine stetig sinkende Leistung an den Speicher ab und wird dabei auf die für den Kreisprozess maximal erforderliche Temperatur abgekühlt. Ab dem Zeitpunkt  $t_1$ , ab dem die Temperatur der verfügbaren Abwärme unterhalb der erforderlichen Maximaltemperatur des Prozesses liegt, wird dem Abwärmestrom Energie aus dem Speicher zugeführt, um die erforderliche Temperatur zu erreichen. Der Speichereinsatz bietet sich insbesondere dann an, wenn eine beschleunigte Abkühlung durchgeführt werden soll. Die verfügbare Abwärmeleistung ist dann höher, während die erforderliche Kapazität des Speichers verringert wird, da diese von der Dauer des Abkühlvorganges bestimmt wird. Aufgrund der stärkeren Leistungsgradienten ist ein direkter Antrieb der Turbine ohne Speichereinsatz bei beschleunigten Abkühlprozessen problematischer.

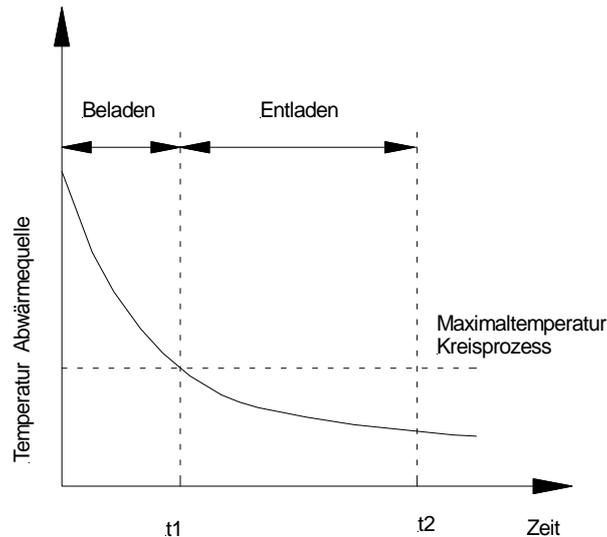


Fig.19: Beispielhafter Verlauf für den Grundfall 3; stetiger Abfall der Temperatur der verfügbaren Abwärme.

### 3.2 Anwendungsbereiche in der Industrie

Für die Abschätzung des Potenzials der speicherunterstützte Verstromung von Abwärme sind Information über den zeitlichen Verlauf von Temperatur und Leistung der verfügbaren Abwärmeströme erforderlich. Derartige Daten sind aktuell nicht im erforderlichen Umfang verfügbar. Verschiedene frühere Projekte haben Konzepte zur Nutzung industrieller Abwärme für die öffentliche Nahwärmeversorgung untersucht. Da diese Analysen sich auf Heizanwendungen beziehen, sind die Ergebnisse nur eingeschränkt nutzbar. Nach [23] liegt die geschätzte industrielle Abwärme für die alte Bundesrepublik bei 1500PJ.

Im Hinblick auf den Einsatz von Wärmepumpen in der Prozessindustrie wurde in [24] die verfügbare Abwärme in Abhängigkeit von der Temperatur für die Niederlande abgeschätzt; aus dieser Darstellung (Fig.20) ergibt sich, dass der Großteil der Abwärme in einem Temperaturbereich zwischen 80-150°C anfällt. Unterschiede ergeben sich hier gegenüber der zu erwartenden Verteilung in Deutschland, da hier die Metallindustrie zu einer Verschiebung in Richtung höherer Temperaturen führen.

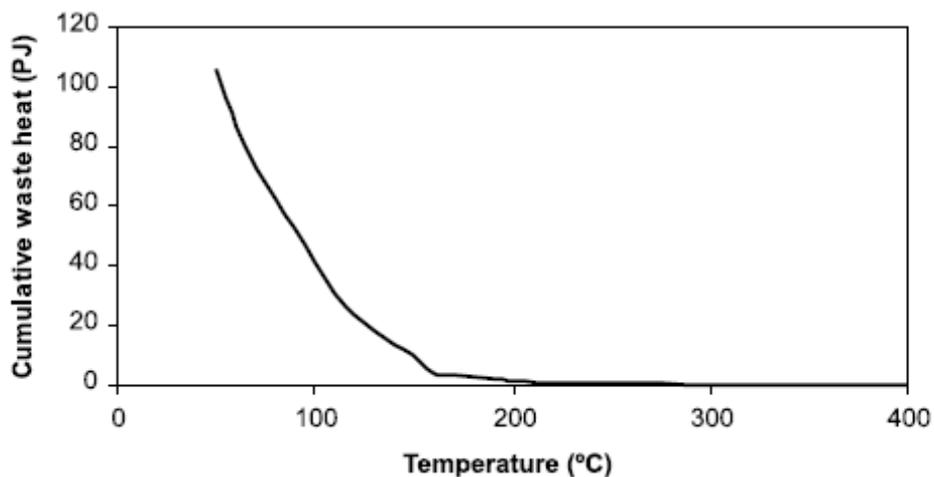


Fig.20: Kumulative Abwärmeenergie Prozessindustrie, Niederlande, 1999 [17]

Aus der Vielzahl industrieller Prozesse können geeignete Anwendung für die speicherunterstützte Verstromung durch eine Reihe von Kriterien identifiziert werden:

- Die Abwärme sollte bei einer möglichst hohen Temperatur anfallen, um hohe Wirkungsgrade im Kreisprozess zu erreichen
- Eine direkt thermische Nutzung der Abwärme sollte nicht möglich sein, da diese einer Verstromung vorzuziehen ist
- Prozesse mit hohen jährlichen Betriebsstunden sind vorteilhaft
- Die speicherunterstützte Verstromung eignet sich insbesondere bei Prozessen, die ausgeprägte zeitliche Variationen bei Leistung und Temperatur aufweisen

Darüber hinaus sollten noch folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Der durchschnittliche Anteil der Energiekosten in der verarbeitenden Industrie liegt in Deutschland bei ca. 5.3%; es ist zu erwarten, dass die Bereitschaft, Konzepte wie die speicherunterstützte Verstromung einzusetzen, in energieintensiven Industriezweigen mit überdurchschnittlichen Energiekostenanteil ausgeprägter ist.
- Industrieanlagen weisen untereinander auch dann erhebliche Unterschiede auf, wenn das gleiche Endprodukt erzeugt wird. Neben den Investitionskosten für die Komponenten der speicherunterstützten Verstromung sind Aufwendungen für die Anpassung an die spezifischen Gegebenheiten des Industrieprozesses erforderlich. Der Anteil dieser Aufwendung an den Gesamtkosten nimmt mit zunehmender Anlagengröße ab, Systeme mit größeren Leistungen sind auch im Hinblick auf die Kosten für Turbinen spezifisch kostengünstiger.

Fig.21 zeigt die Aufteilung des globalen industriellen Energieverbrauches auf verschiedene Industriezweige. Die vier größten Bereiche (Chemie, Eisen + Stahl, NE-Mineralien und Papier + Zellstoff) benötigen 64% des Gesamtverbrauchs.

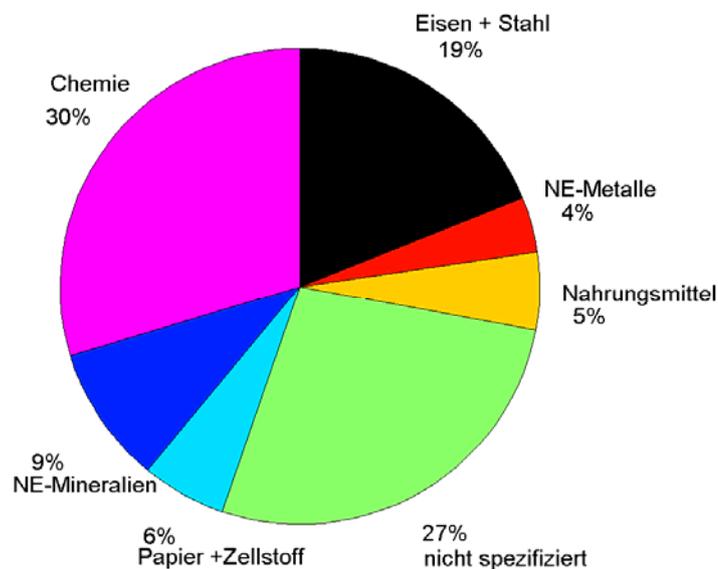


Fig.21: Anteil einzelner Industriezweige am globalen Energieverbrauch der Industrie; Darstellung nach [25]

Von besonderem Interesse für die weiteren Betrachtungen sind die Bereiche Eisen + Stahl sowie NE-Mineralien. Hier lassen sich energieintensive Prozesse identifizieren, die in ähnlicher Form in zahlreichen Anlagen durchgeführt werden, die Übertragbarkeit ist daher gut

und die Auswirkungen von Effizienzsteigerungen bei diesen Prozessen sind aufgrund des hohen Energiebedarfs signifikant. Der Gesamtbedarf der Chemieindustrie ist zwar hoch, jedoch wird hier eine große Vielfalt von Produkten in einer entsprechend großen Anzahl unterschiedlicher Prozesse hergestellt, die Relevanz einzelner Prozesse ist häufig begrenzt. Darüber hinaus weisen chemische Anlagen bei energieintensiven Produkten bereits ein hohes Maß an Abwärmenutzung auf, das Potenzial von Effizienzsteigerungen durch die Verstromung von Abwärme bei hohen Temperaturen scheint hier zunächst begrenzt. Die Papier + Zellstoffindustrie weist zwar einen hohen Energiebedarf auf, jedoch wird hier ein Großteil der Wärme für Trocknungsprozesse benötigt, entsprechend fällt Abwärme vor allem bei niedrigen Temperaturen an und eignet sich daher nur bedingt für eine Verstromung.

## **4 Analyse von Beispielen für die speicherunterstützte Verstromung**

In der ursprünglichen Projektplanung war vorgesehen, dass sowohl aus der Literatur als auch aus dem Kundenkreis der Stadtwerke Esslingen Anwendungsbeispiele für die speicherunterstützte Verstromung ausgewählt werden. Voraussetzung für die Analyse ist die Verfügbarkeit von Temperatur- und Leistungsprofilen für die nutzbare Abwärme. Aus der Literatur sind derartige Daten verfügbar, die teilweise im Rahmen von Arbeiten über Emissionen von Industrieprozessen erfasst wurden. Von einem Industriepartner außerhalb des Kundenkreises der Stadtwerke Esslingen wurden Daten zur Verfügung gestellt, die das Abkühlverhalten eines Ofens beschreiben.

Die Stadtwerke Esslingen beliefern zahlreiche Großkunden, für die eine Analyse des Potenzials der speicherunterstützten Verstromung durchgeführt wurde. Bei diesen Großkunden handelt es sich vor allem um Zulieferbetriebe der Automobilindustrie und Hersteller von Werkzeugmaschinen. Der Energiekostenanteil bei diesen Firmen ist im Vergleich zu Personalkosten gering, Abwärme fällt nur in geringem Umfang an, die Temperaturen sind häufig zu niedrig für eine Verstromung. Die Großkunden zeigten zwar Interesse an einem Speichereinsatz zur Unterstützung der Gebäudeheizung, jedoch waren die Voraussetzungen für eine speicherunterstützte Verstromung nicht gegeben, es konnten aus diesem Bereich keine Anwendungsfälle identifiziert werden. Zunächst wurde auch ein Bausstoffunternehmen, das Kalksandsteine produziert, für eine Potenzialabschätzung betrachtet. Dabei zeigte es sich jedoch, dass sich die Abwärme, die vor allem bei Temperaturen bis ca. 130°C anfällt, besser für eine Rückkopplung in den Prozess eignet als für eine speicherunterstützte Verstromung.

Im Rahmen dieser Studie wurde eine systematische Vorgehensweise für die Beurteilung des Potenzials einer speicherunterstützten Verstromung angewendet. Dazu wurde ein modulares Matlab-Programm entwickelt, das die Abbildung von Konzepten mit unterschiedlichen Kombinationen von Abwärmequelle, Wärmeübertrager, Speicher und Turbine ermöglicht. Nach Eingabe der Daten, die den Abwärmeverlauf beschreiben, werden die erforderlichen Berechnungen durchgeführt. Diese Vorgehensweise umfasst folgende Teilschritte:

- Erfassen des zeitlichen Verlaufes von thermischer Leistung und Temperatur der verfügbaren Abwärme
- Bestimmen der zeitlichen Mittelwerte für Leistung und Temperatur

- Es wird zunächst angenommen, dass dem thermischen Kreisprozess immer die mittlere Leistung bereitgestellt werden soll; daraus wird bestimmt, welche Leistung der Speicher bereitstellen muss, um Variationen in der direkt verfügbaren Abwärme zu kompensieren.
- Für den Leistungsverlauf des Speichersystems wird eine Häufigkeitsverteilung erstellt, aus dieser kann eine Abschätzung für eine wirtschaftlich sinnvolle Leistungsvorgabe abgeleitet werden
- Es wird das zeitliche Integral des Leistungsverlaufs des Speichersystems bestimmt; aus diesem Integral kann die Kapazität des Speichersystems bestimmt werden
- Für die Mittelwerte für Temperatur und Leistung werden für den Clausius-Rankine Prozess mit Wasser bzw. organischen Medien die Wirkungsgrade der Energieumwandlung bestimmt
- Die Berechnungen werden für kleinere mittlere Leistung wiederholt, um zu bestimmen, wie sich eine Reduzierung des Speichersystems auf den erzielbaren Ertrag auswirkt
- Auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Teilschritte wird das Speicherkonzept ausgewählt, das sich für die Anwendung am besten eignet.

Diese Vorgehensweise wird im Folgenden anhand von Anwendungsbeispielen aus energieintensiven Industriezweigen gezeigt. Dabei wird für jeden der in Abschnitt 3.1 identifizierten Grundfälle anhand eines Beispiels dargestellt.

#### ***4.1 Lichtbogenöfen zur Stahlerzeugung***

Lichtbogenöfen werden zur Erzeugung von Elektrostahl aus Stahlschrott eingesetzt, wobei der Schrott mit elektrischer Energie geschmolzen wird. Der Anteil der Lichtbogenöfen an der Rohstahlerzeugung lag 2004 in Deutschland bei ca. 30% mit steigender Tendenz. Weltweit sind mehr als 1200 Lichtbogenöfen im Einsatz, in Deutschland werden 27 Anlagen betrieben [26], (Fig.22).

Die maximale Beladung von Lichtbogenöfen liegt bei ca. 150t Schrott, die elektrischen Leistungen können bis zu 60MW erreichen. Lichtbogenöfen werden häufig im Mehrschichtbetrieb gefahren, d.h. es wird eine hohe jährliche Betriebsstundenzahl erreicht. Im Lichtbogenofen entstehen während des Schmelzprozesses Abgase, die einer Abgasreinigung zugeführt werden müssen. Die in diesen Abgasen enthaltene Energie soll hier genutzt werden.

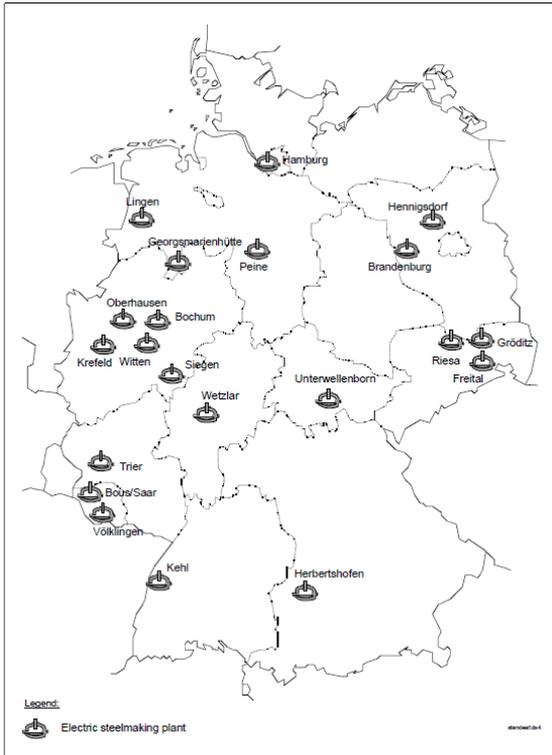


Fig.22: Standorte von Lichtbogenöfen in Deutschland [27]

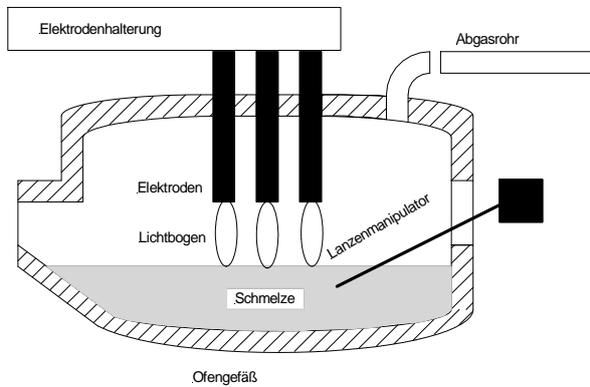


Fig.23: Vereinfachte Darstellung eines Lichtbogenofens

Temperatur und Massenstrom der abgeführten Abgase unterliegen ausgeprägten zeitlichen Schwankungen. Ein beispielhafter Verlauf (Fig.24) wurde [26] entnommen, wo die Zusammensetzung der Abgase im Vordergrund stand.

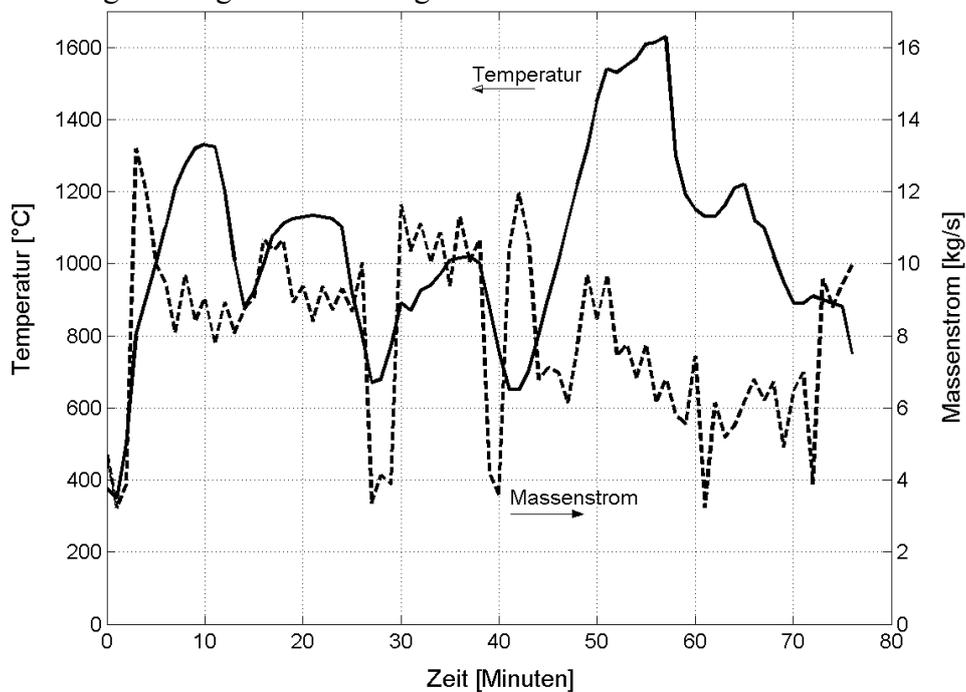


Fig.24: Beispielhafter Temperaturverlauf und Massenstrom der Abgase eines Lichtbogenofens, eigene Darstellung nach [26]

Unter der Annahme, dass die Abgase auf eine Temperatur von 200°C abgekühlt werden, ergibt sich für den Temperaturverlauf aus Fig.24 eine verfügbare thermische Leistung

entsprechend Fig.25. Der Mittelwert der Leistung liegt bei ca. 8.2MW, der Spitzenwert bei fast 16MW. Die Exergie der Abgase ist hoch, der Mittelwert der Temperatur liegt bei über 1000°C. Eine direkte Nutzung eines derartigen Abgasstromes in einem Kreisprozess kann ausgeschlossen werden; die ausgeprägten Transienten bei Temperatur und Leistung würden zu unzulässigen Belastungen führen.

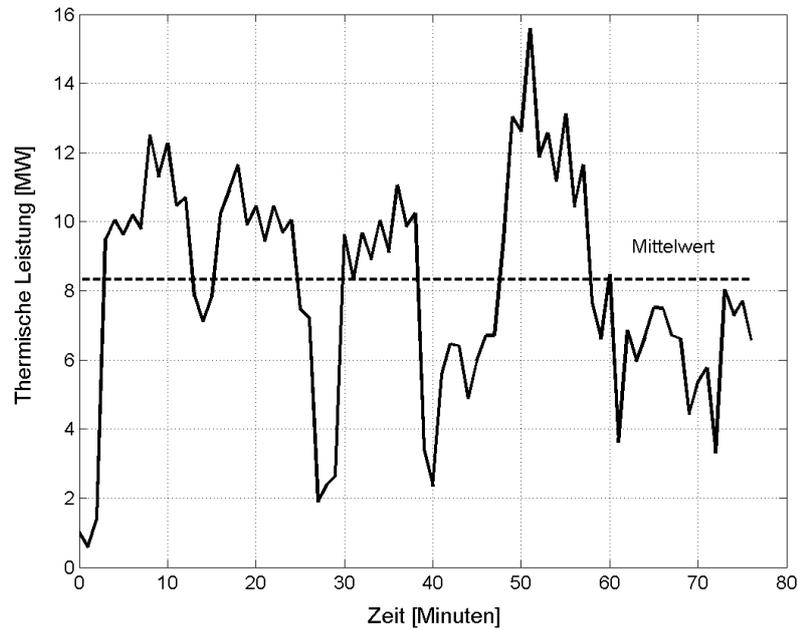


Fig.25: Thermische Leistung im Abgasmassenstrom eines Lichtbogenofens; Darstellung auf Basis von [26]

Stattdessen soll hier ein thermischer Speicher eingesetzt werden, der die Abweichungen vom Mittelwert der Leistung kompensiert. Da die Temperatur der Abgase nach der Anfangsphase bei minimal 700°C und damit deutlich oberhalb der Maximaltemperaturen eines Clausius-Rankine-Prozesses liegen, ist ein Ausgleich der Temperaturschwankungen von untergeordneter Bedeutung. Fig.26 zeigt den zeitlichen Verlauf der Leistung, die vom Speicher bereitgestellt werden muss (<0.0) bzw. aufgenommen werden muss (>0.0). Die Maximalwerte liegen sowohl bei der Beladung als auch bei der Entladung in einem Bereich von ca. 6MW.

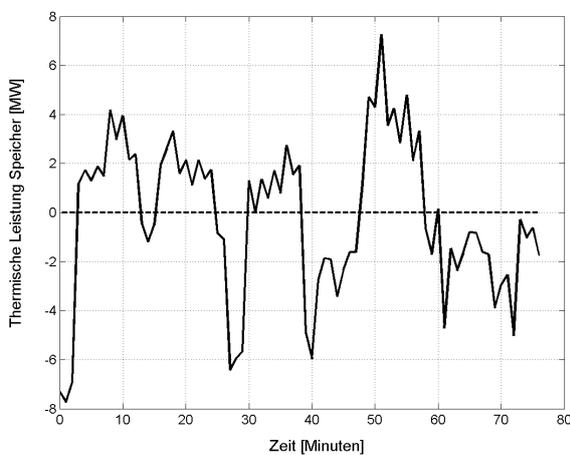


Fig.26: Leistung Speichersystem für mittlere thermische Leistung von 8.2MW

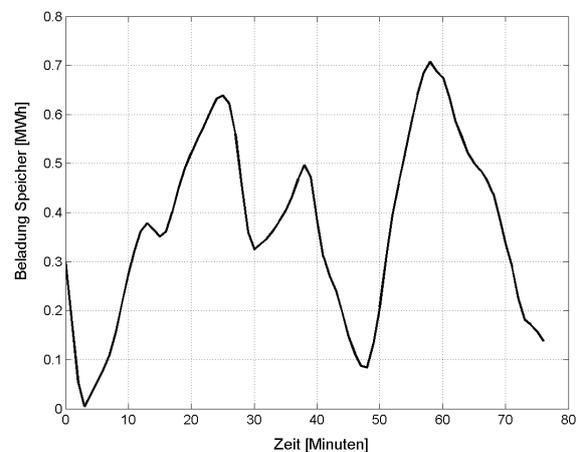


Fig.27: Ladezustand des Speichersystems für mittlere thermische Leistung von 8.2MW

Günstig ist bei dieser Anwendung der häufige Wechsel zwischen Be- und Entladung, wodurch die erforderliche Speicherkapazität begrenzt wird. Diese liegt bei ca. 0.7MWh, wie aus dem Verlauf der Beladung abgeleitet werden kann, die sich aus der zeitlichen Integration der Leistung unter Berücksichtigung des Vorzeichens ergibt (Fig.27).

Die Maximalwerte von 6MW für die Be- und Entladung treten nur kurzfristig auf; Fig.28 und Fig.29 zeigen, welche Leistungsbereiche welche Anteile an Gesamtdauer der Be- bzw. Entladeprozesse haben. Eine Leistung von ca. 4MW ist ausreichend, um während ca. 80% der Gesamtdauer eine Kompensation der Leistungsvariationen zu ermöglichen.

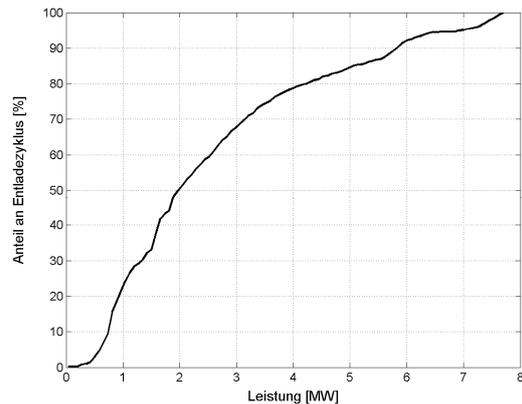
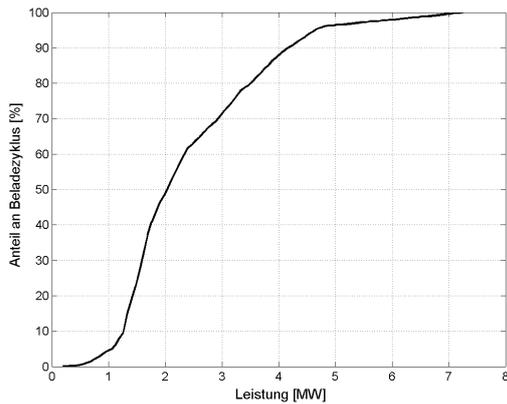


Fig.28: Häufigkeit Leistungswerte bei der Beladung

Fig.29: Häufigkeit Leistungswerte bei der Entladung

Aufgrund der ausgeprägten Maximalwerte im Leistungsverlauf ist anzunehmen, dass die Reduzierung der geforderten mittleren Leistung zu einer überproportionalen Verringerung der erforderlichen Speicherleistung und -Kapazitäten führt, die Analysen werden daher für Mittelwerte der thermischen Leistung von 6MW und 4MW wiederholt. Fig.30 zeigt die Werte für erforderliche Leistung des Speichers, Fig.31 zeigt die Werte für den Ladezustand. Die maximal erforderlichen Entladeleistungen fallen auf 4MW (mittlere thermische Leistung 6MW) und 2MW (mittlere thermische Leistung 4MW). Die erforderlichen Speicherkapazitäten können auf ca.0.24MWh (mittlere thermische Leistung 6MW) bzw. 0.1MWh (mittlere thermische Leistung 4MW) reduziert werden.

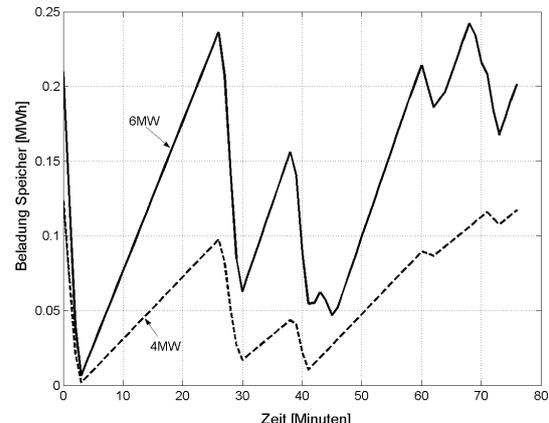
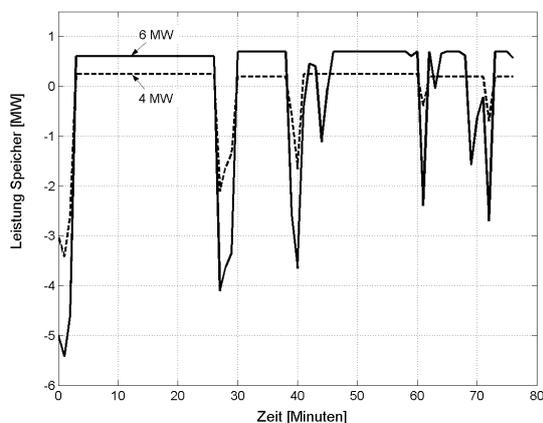


Fig.30: Speicherleistung bei mittleren thermischen Leistungen von 4MW und 6MW

Fig.31: Ladezustand bei mittleren thermischen Leistungen von 4MW und 6MW

Für diese Anwendung scheint ein Zweitank-Speicherkonzept mit einer Salzschnmelze ( $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_2\text{-NaNO}_3$ , Erstarrungspunkt  $142^\circ\text{C}$ ) als Arbeitsmedium am besten geeignet. Dampfspeicher eignen sich nicht für diesen Temperaturbereich, Feststoffspeicher sind nur bedingt für die hier erforderlichen kurzen Zykluszeiten geeignet. Da die Abwärme als sensible Wärme anfällt werden Latentwärmespeicher nicht betrachtet.

Ein Wärmeübertrager, der von Flüssigsalz durchströmt wird, könnte im Abgaskanal angeordnet werden (Fig.32). Nach Austritt aus dem Abgaskanal-Wärmeübertrager wird das Flüssigsalz ganz oder teilweise einem weiteren Wärmeübertrager zugeführt, in dem die Energie an das Arbeitsmedium des Kreisprozesses übertragen wird, der Überschuss wird dem Heißtank zugeführt. Ist der Massenstrom vom Abgaskanal-Wärmeübertrager infolge niedriger Abwärmeleistung nicht ausreichend, wird die Differenz zum Sollwert durch den Heißtank ausgeglichen. Das aus dem Wärmeübertrager austretende Flüssigsalz wird wieder zum Wärmeübertrager im Abgasstrom zurückgeführt, wobei entsprechend der Momentanleistung der Abgase der Massenstrom des Flüssigsalzes durch das Salzvolumen im Kalttank angepasst wird.

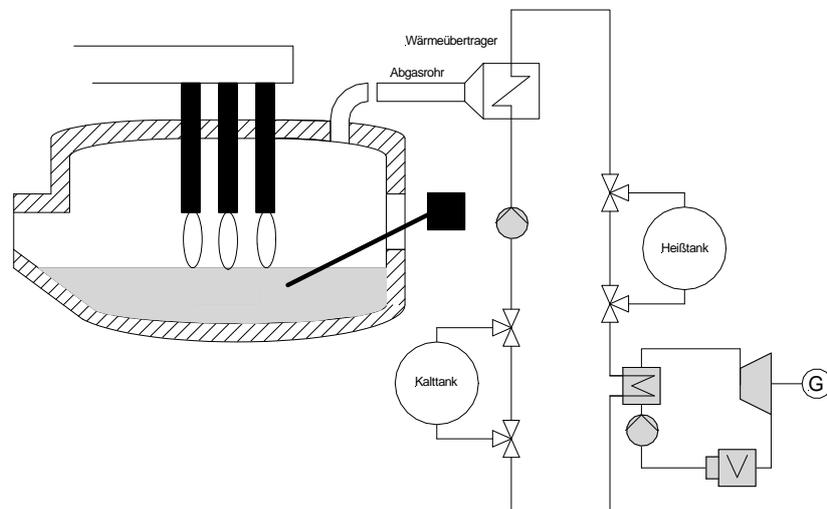


Fig.32: Prinzipdarstellung Lichtbogenofen mit nachgeschalteter Einheit zur speicherunterstützten Verstromung

Unter der Annahme, dass die Temperatur im Heißtank bei  $500^\circ\text{C}$  liegt und die Temperatur im Kalttank bei  $200^\circ\text{C}$  liegt, ergeben sich für die oben betrachteten Fälle folgende Werte für die erforderlichen Salzvolumina und die abgegebene elektrische Leistung:

Thermische Leistung [MW]	Kapazität Speicher [MWh]	Masse Flüssigsalz [kg]	Max. Leistung Speicher [MW]		Dampfturbine		ORC	
			Beladen	Entladen	$\eta$ [%]	$P_{\text{elektrisch}}$ [MW]	$\eta$ [%]	$P_{\text{elektrisch}}$ [MW]
4	0.125	1000	0.3	3.3	35	1.4	19	0.76
6	0.24	1920	0.6	5.3	35	2.1	19.9	1.19
8.2	0.7	5600	6.0	6.8	35	2.8	20.2	1.61

Tab.3: Erforderliche Speicherkapazität und erzeugte Leistungen für Speicher mit unterschiedlicher Maximalleistung

Bei der maximalen mittleren thermischen Leistung wird beim Einsatz einer Dampfturbine eine elektrische Leistung von 2.8MW erreicht, bei einer mittleren thermischen Leistung von 6MW wird eine elektrische Leistung von 2.1MW erreicht. Die für die maximale Leistung erforderliche höhere Speicherkapazität dürfte von untergeordneter wirtschaftlicher Relevanz sein, da die Kosten des Speichermaterials bei ca.1200€/t liegen. Wenn die Kosten des

Speichersystems auf ca. 100€/kWh geschätzt werden, so liegen die Gesamtkosten des Speichers mit ca. 70000€ deutlich unterhalb der Kosten der Turbine, die bei spez. Kosten von ca. 1000€/kW Kosten von ca. 2.8Mio. € aufweisen dürfte. Für eine wirtschaftliche Beurteilung sind Annahmen für die Anzahl der jährlichen Betriebsstunden sowie Angaben über die Tarifstruktur erforderlich.

## 4.2 Zementwerk

Im Werk Lengfurt der Heidelberger Zement AG wurde im Rahmen eines vom Land Bayern und dem Umweltbundesamt geförderten Projektes eine ORC-Turbine zur Verstromung der in der Abluft eines Klinkerkühlers enthaltenen Abwärme installiert [8]. Eine **vereinfachte** Darstellung des Aufbaus der Anlage ist in Fig.33 dargestellt.

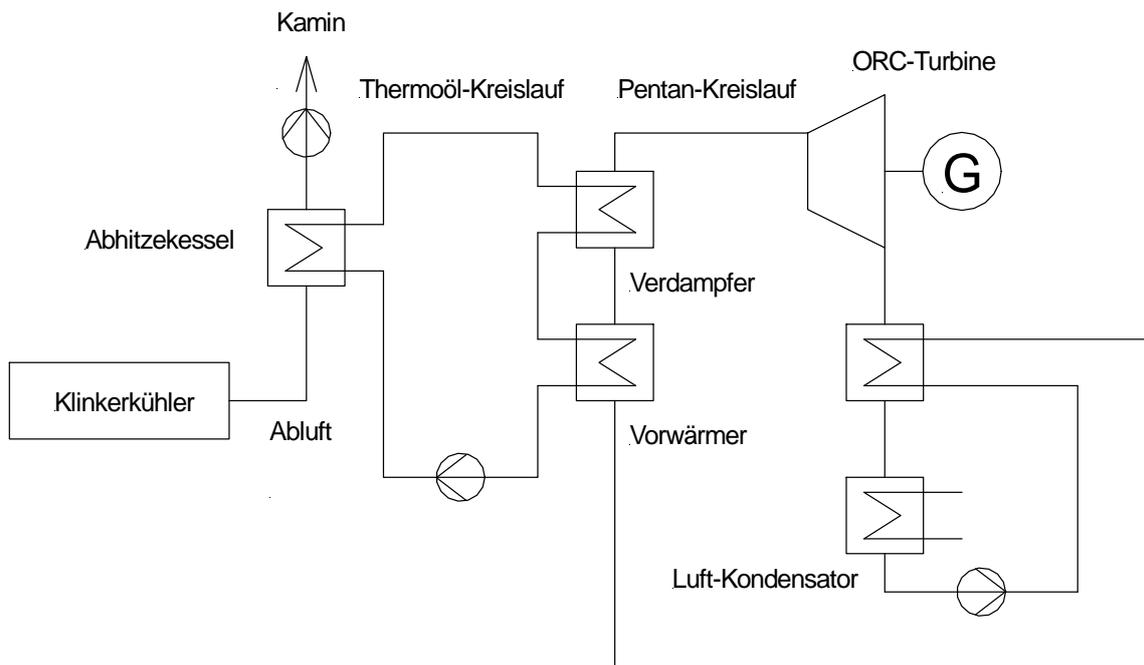


Fig.33: Vereinfachte Darstellung Verstromung der Abwärme eines Klinkerkühlers mit einer ORC-Turbine. Eigene Darstellung nach [8]

Die Wärme der Abluft, die den Kühler im Durchschnitt mit ca. 275°C verlässt, wird in einem Abhitzekessel an einen Thermoöl-Zwischenkreislauf übertragen und dabei auf ca. 125 °C abgekühlt. Die Energie des Thermoöl-Kreislaufes wird genutzt, um Pentan zu verdampfen, das als Arbeitsmedium für die ORC-Turbine eingesetzt wird.

Für die oben beschriebene Anlage ist in der Literatur ein beispielhafter Verlauf für den zeitlichen Verlauf der Temperatur der aus dem Klinkerkühler austretenden Abluft verfügbar [28]. Darüber hinaus ist aufgrund der öffentlichen Förderung der Anlagenaufbau gut dokumentiert

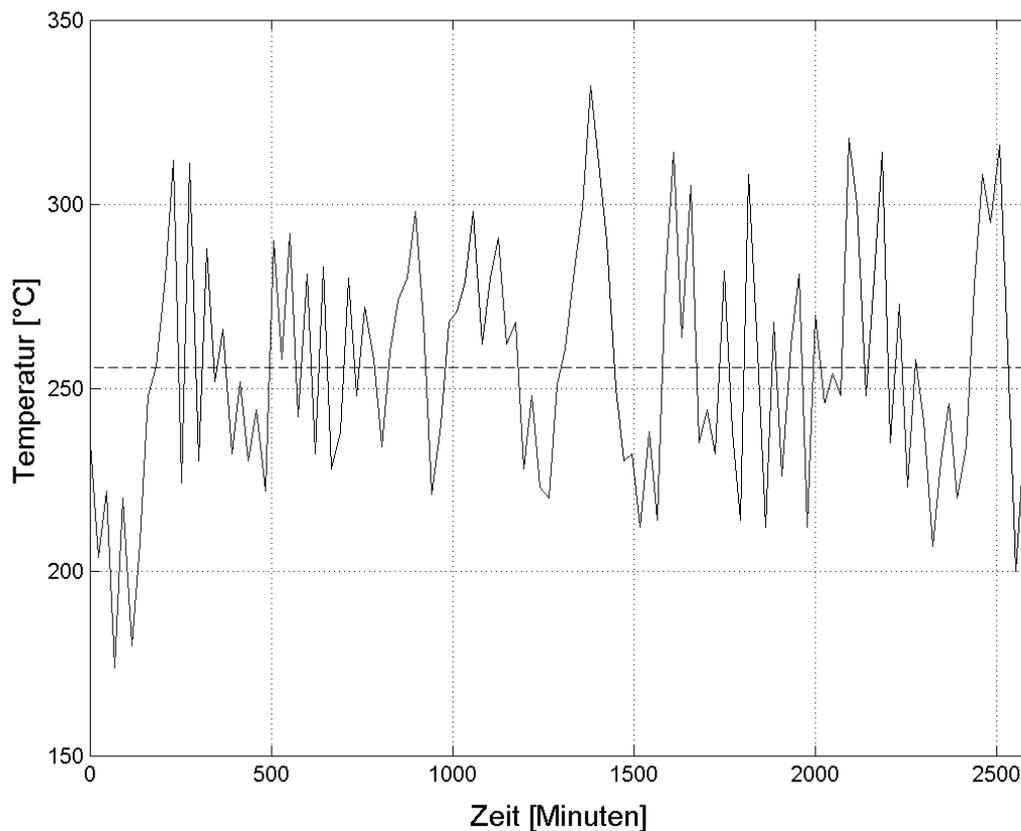


Fig.34: Beispielhafter Verlauf für die Temperatur der Abluft aus dem Klinkerkühler. Eigene Darstellung nach [28]

Der Temperaturverlauf weist ausgeprägte Schwankungen um einen Mittelwert bei ca. 260 °C auf. Der Thermoöl-Zwischenkreislauf im Werk Lengfurt dient auch zum Ausgleich der Temperaturschwankungen. Im Rahmen der vorliegenden Studie soll der Temperaturverlauf nach Fig.34 als Randbedingung für die Untersuchung der speicherunterstützten Verstromung verwendet werden. Ein direkter Vergleich mit der bestehenden Anlage in Lengfurt ist nicht beabsichtigt, da hierfür keine ausreichenden Informationen über die dortige Regelstrategie und den detaillierten Aufbau des Thermoöl-Zwischenkreislauf verfügbar sind. Die wesentlichen Prozessparameter für den ORC-Kreislauf (Zustand am Ende des Verdampfers, Kondensationstemperatur, Pentan als Arbeitsmedium) werden aus der Dokumentation der Anlage in Lengfurt übernommen. Der Massenstrom des Thermoöls wird bei allen nachfolgenden Betrachtungen zeitlich konstant gehalten.

Nach [8] liegt die Temperatur des Thermoöles im Auslegungsfall bei 230 °C bei einer Ablufttemperatur von 275°C, bei geringeren Ablufttemperaturen steht für die Verdampfung des Pentans bei 162°C entsprechend weniger Leistung zur Verfügung. Für den Abhitzeessel wird eine konstante Grädigkeit von 45 K zwischen dem Thermoöl und der Abluft angenommen. Mit dieser Annahme ergibt sich aus einem Abluftmassenstrom mit einem konstanten Volumenstrom von 150000 Nm<sup>3</sup>/h der in Fig.35 dargestellte zeitliche Verlauf für die von der ORC-Turbine abgegebene Leistung.

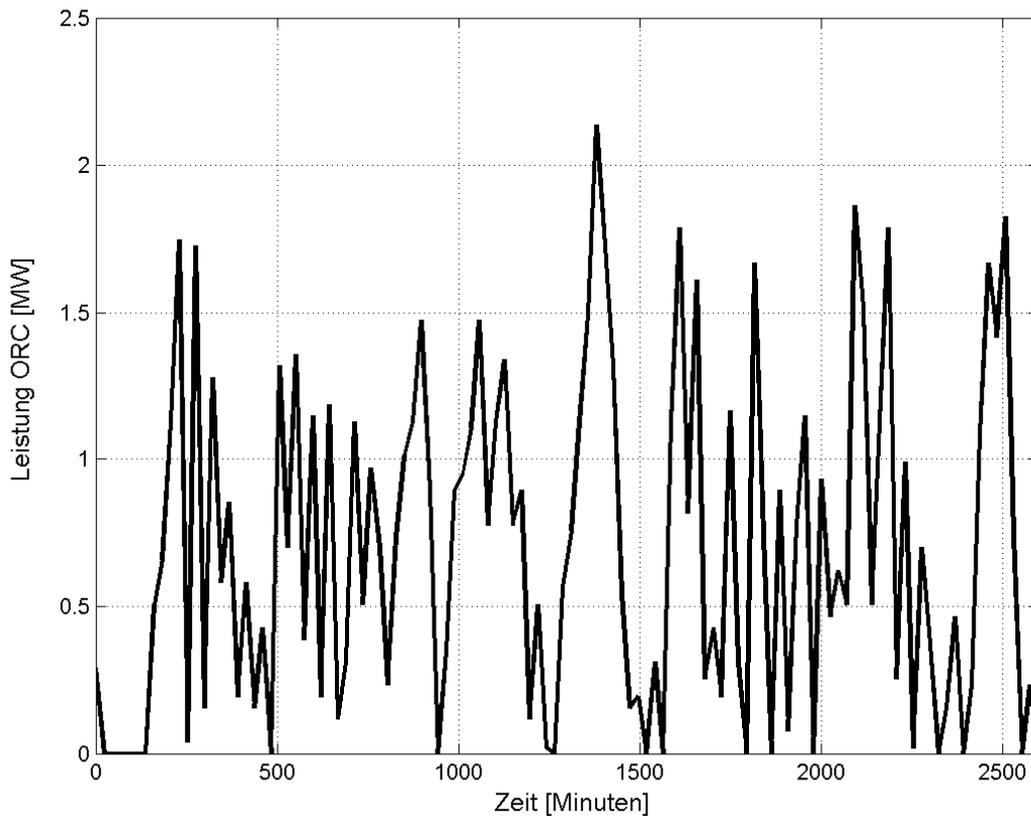


Fig.35: Aus Abluft mit Temperaturverlauf nach Fig.34 durch ORC-Turbine direkt erzeugte mechanische Leistung, ohne Speicher

#### 4.2.1 Latentwärmespeicher in der Abgasströmung

Die Schwankungen bei der abgegebenen Leistung ergeben sich aus der ausgeprägten Variation der thermischen Leistung, die von der Abluft für die Verdampfung bei ausreichend hoher Temperatur unter Berücksichtigung der Grädigkeit im Abhitzeessel bereitgestellt wird. Ein thermischer Speicher bietet sich hier insbesondere zur Stabilisierung der Temperatur auf einem ausreichend hohen Niveau an. Geeignet sind hier insbesondere Latentwärmespeicher, bei denen die Ein- und Ausspeicherung von Energie bei näherungsweise konstanter Temperatur erfolgt. Fig.36 zeigt die Prinzipdarstellung einer Anlage zur Verstromung der Wärme aus der Abluft eines Klinkerkühlers mit integriertem Latentwärmespeicher im Thermoöl-Kreislauf. Der Speicher wird dabei so angeordnet, dass er von der Abluft durchströmt wird, bevor diese in den Abhitzeessel eintritt, der vom Thermoöl durchströmt wird. Das Thermoöl wird anschließend durch den Latenwärmespeicher geführt. Diese Kombination von Latentwärmespeicher und Wärmeübertrager soll gewährleisten, dass die Maximaltemperatur des Thermoöls möglichst konstant gehalten werden kann.

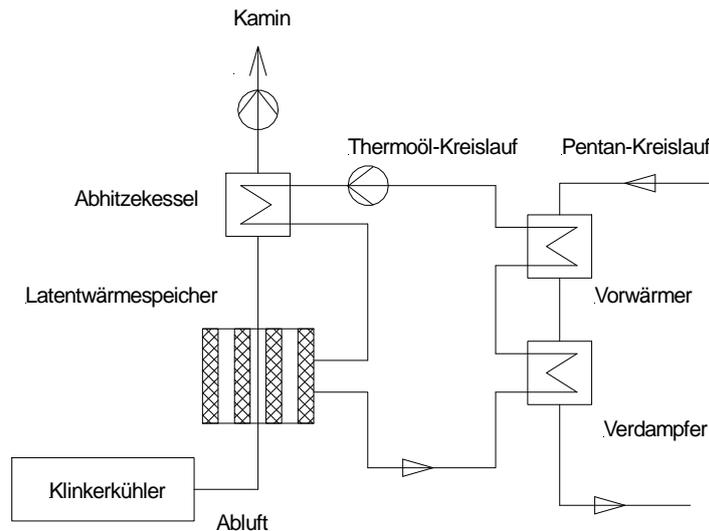


Fig.36: Integration Latentwärmespeicher in den Strömungsweg der Abluft zur Kompensation von Temperaturschwankungen der verfügbaren Abluft.

Der Latentwärmespeicher ist so aufgebaut, dass das Speichermaterial in dünnen Schichten zwischen den Strömungskanälen für die Abluft und dem Rohrleitungssystem für das Thermoöl angeordnet ist (Fig.37). Die Schichtdicke des Latentspeichermaterials wird aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials begrenzt, um eine ausreichend hohe Leistung des Speichers zu ermöglichen. Liegt die Temperatur der Abluft über der Schmelztemperatur des Speichermaterials, so wird Energie von der Abluft an das Speichermaterial übertragen, Speichermaterial wird aufgeschmolzen. Die Abluft tritt danach in den Abhitzekessel ein, wo die verbleibende Energie an das Thermoöl abgegeben wird. Nach der ersten Wärmeaufnahme im Abhitzekessel tritt das Thermoöl in den Latentwärmespeicher ein, wo eine weitere Aufheizung bis maximal zur Schmelztemperatur des Speichermaterials erfolgt, über einen Verdampfer und einen Vorwärmer wird die Energie wieder an den Pentan-Kreislauf der ORC-Turbine übertragen, bevor das Thermoöl wieder in den Abhitzekessel gefördert wird.

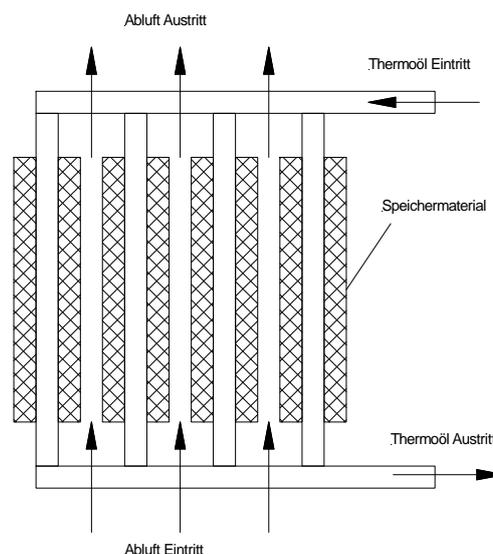


Fig.37: Prinzipdarstellung Latentwärmespeicher mit Strömungswegen für Abluft und Thermoöl

Für die folgenden Betrachtungen wird ein Speichersystem mit einer eutektischen Mischung  $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_3$  mit einem Schmelzpunkt von ca.  $222^\circ\text{C}$  eingesetzt. Fig.38 zeigt die Leistung, die von der Abluft an das Speichermaterial abgegeben wird, sowie die Leistung, die im Speicher an das Thermoöl übertragen wird und die Differenz, die in das Speichermaterial eingespeichert wird ( $>0$ ) bzw. vom Speichermaterial abgegeben wird ( $<0$ ).

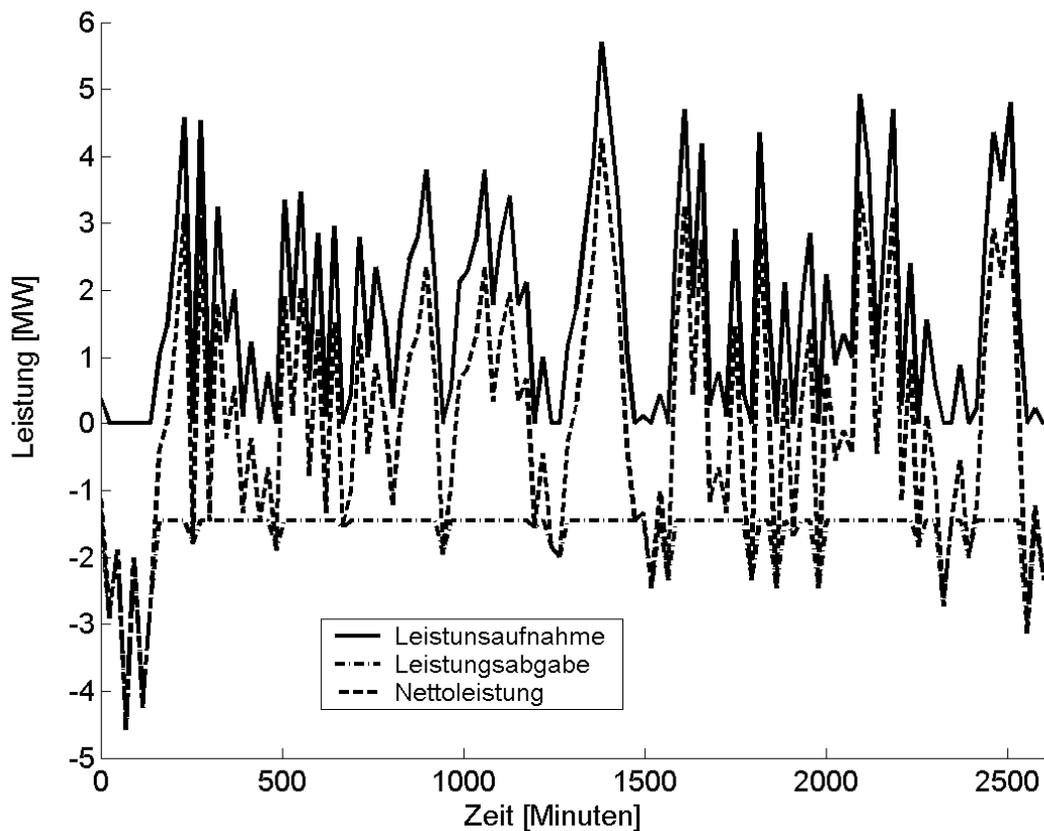


Fig.38: Zeitlicher Verlauf der Leistungsübertragung von der Abluft an den Speicher, Leistungsabgabe vom Speicher an das Thermoöl und resultierende Nettoleistung des Speichermaterials für Anordnung nach Fig.37.

Die maximale Leistung, die vom Speichermaterial aufgenommen werden muss, liegt bei ca. 4.2MW, der Maximalwert der Entladeleistung liegt bei ca. 2.5MW (ohne Anfahrphase). Neben der Leistung des Speichersystems ist die Kapazität von Interesse, diese ergibt sich aus der Integration der Nettoleistung (Fig.39).

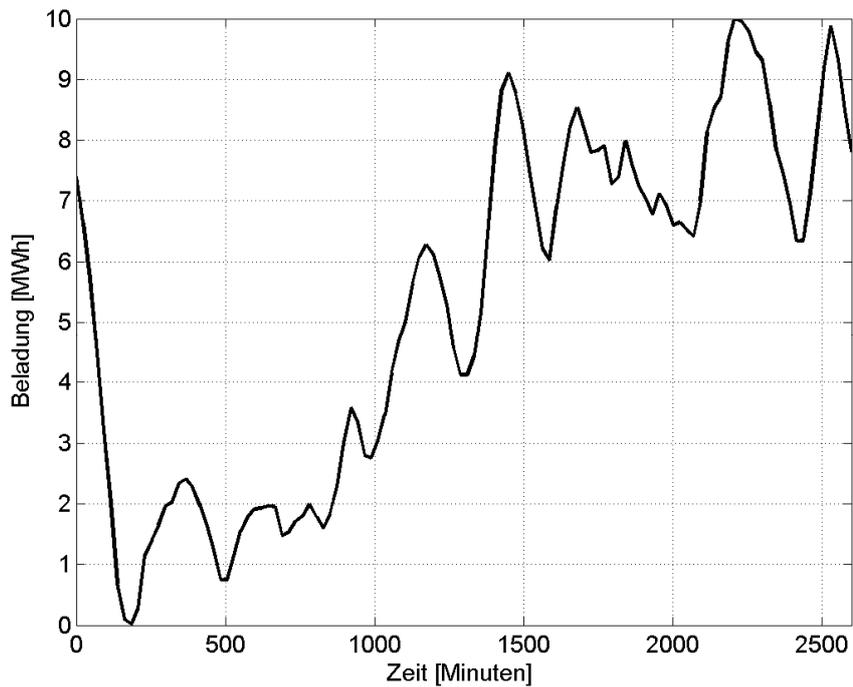


Fig.39: Zeitlicher Verlauf des Energieinhalts des Speichers nach Fig.36

Die maximale Beladung des Speichers liegt bei ca. 10MWh; insbesondere in der Anfangsphase muss vom Speicher Energie bereitgestellt werden, um die niedrigen Temperaturen der Abluft auszugleichen. Werden die ersten 150 Minuten nicht berücksichtigt, ergibt sich ein Verlauf der Beladung nach Fig.40, die maximal erforderliche Kapazität liegt hier bei ca. 6 MWh.

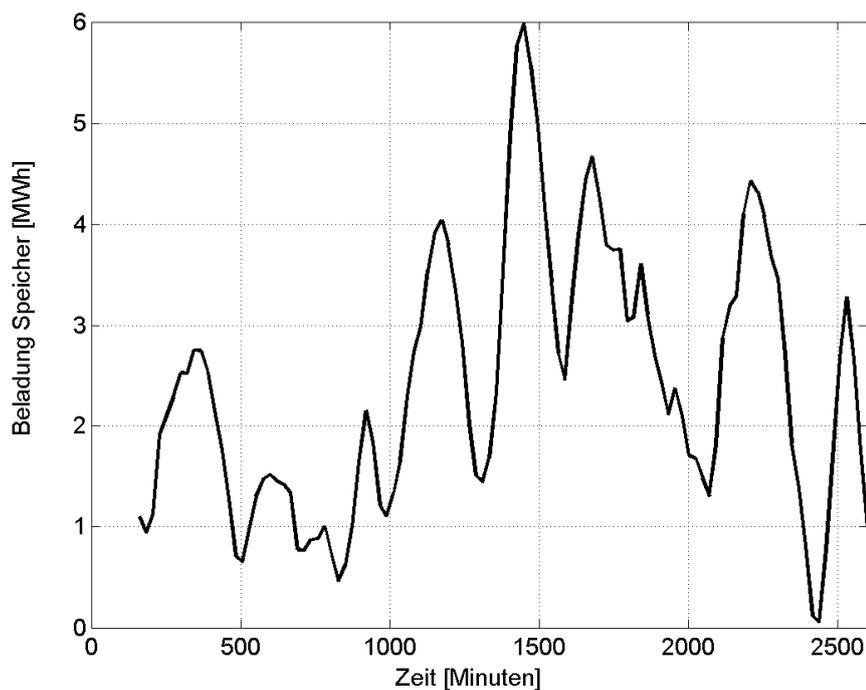


Fig.40: Zeitlicher Verlauf des Energieinhalts des Speichers nach Fig.36, ohne Berücksichtigung der Anfangsphase <150 Minuten.

Bei der Schaltung nach Fig.36 gibt die ORC-Turbine eine konstante Leistung von 770kW ab. Würde die Abluft ohne Speicher verstromt, so würde sich theoretisch eine mittlere Leistung von 915kW ergeben. Dies würde jedoch eine Turbine mit einer Maximalleistung von ca. 2.2 MW erfordern, bei der aufgrund von Transienten und Teillastbetrieb die theoretische Leistung nicht erreicht wird, darüber hinaus führen die häufigen Lastwechsel zu einem erhöhten Wartungsaufwand. Würde eine Turbine mit 770kW ohne Speicher betrieben, würde der zeitliche Mittelwert der Leistung bei 565kW liegen, d.h. durch den Speicher kann die abgegebene mechanische Arbeit der Turbine um 36% erhöht werden.

Der Latentwärmespeicher benötigt bei einer Speicherdichte von ca. 55 kWh/m<sup>3</sup> ein Speichervolumen von 18.2m<sup>3</sup> pro MWh, ein Speicher mit 6 MWh würde ein Volumen von ca. 110m<sup>3</sup> erfordern.

#### 4.2.2 Integration eines Thermoölspeichers

Eine naheliegende Alternative zum Latentwärmespeicher ist der Einsatz eines Thermoölspeichers. Entsprechend Fig.41 wird der Speicher am Austritt des Abhitzekessels angeordnet. Der Massenstrom des Thermoöls soll so geregelt werden, dass die Austrittstemperatur des Thermoöls aus dem Abhitzekessel bei 220°C liegt. Die thermische Leistung, die an den ORC-Kreislauf abgegeben wird soll konstant sein. Um zeitliche Variationen im Massenstrom des aus dem Abhitzekessel ausströmenden Thermoöls auszugleichen, werden zwei Öltanks auf unterschiedlichem Temperaturniveau benötigt.

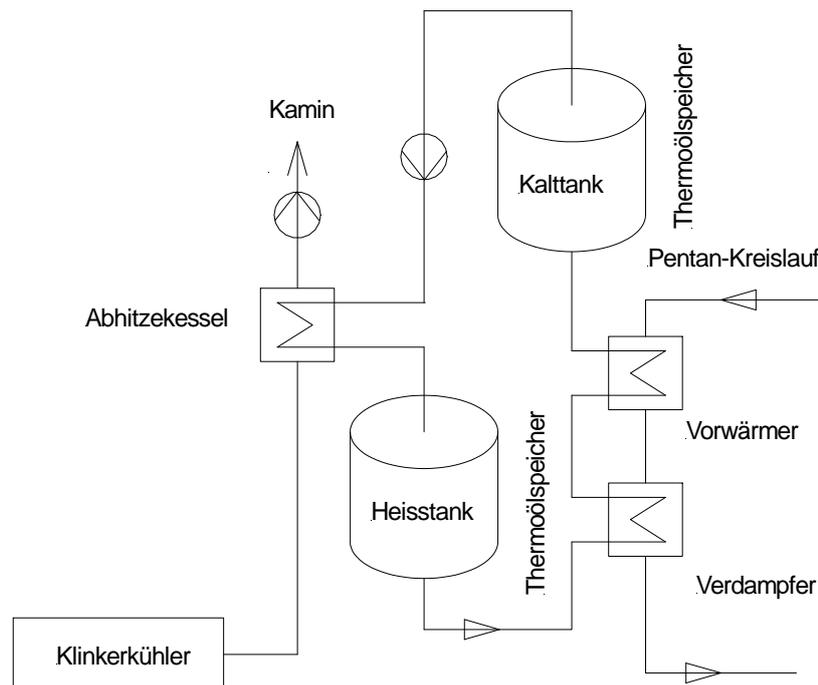


Fig.41: Integration eines direkten Zweitank-Speichers in den Thermoölkreislauf

Fig.42 zeigt den zeitlichen Verlauf des Füllstands des Heißtanks, wenn der austretende Massenstrom immer dem zeitlichen Mittelwert des Massenstromes entspricht, der im Abhitzekessel auf 220°C erhitzt wird. Die von der ORC-Turbine abgegebene Leistung liegt wie bei der zuvor beschriebenen Lösung bei ca. 770kW.

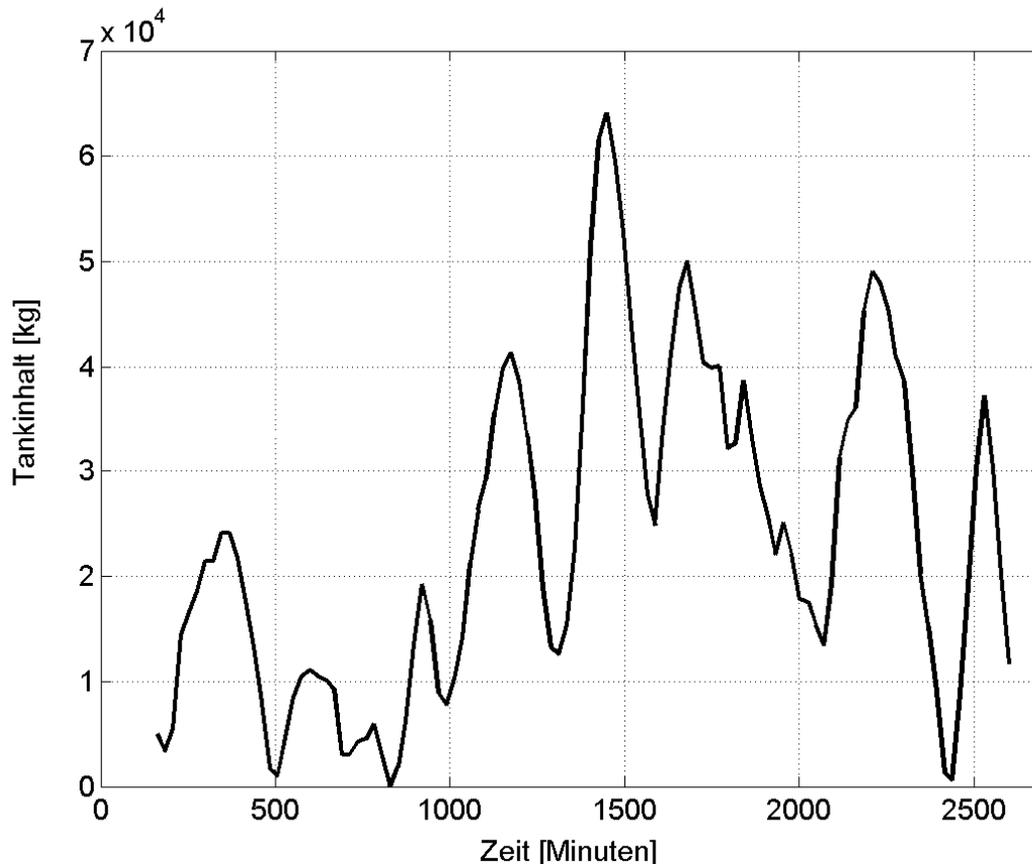


Fig.42: Zeitlicher Verlauf Masse des Thermoöls im Heißspeicher bei Schaltung nach Fig.41  
 Der Maximalwert der Masse des Thermoöls im Heißspeicher liegt bei ca. 64000kg, der entsprechende Heißspeicher müsste über ein Volumen von ca. 100m<sup>3</sup> verfügen, das Volumen des Kaltspeichers kann aufgrund der geringeren Dichte um ca. 10% reduziert werden. Der Einsatz einer kostengünstigeren Salzschnmelze ist bei dieser Anwendung aufgrund der niedrigen Temperatur im Kalttank (85°C) nicht möglich, da handelsübliche Salze bei ca. 140°C erstarren.

#### 4.2.3 Integration Latentwärmespeicher in den Thermoölkreislauf

In Hinblick auf das benötigte Volumen von ca. 110m<sup>3</sup> Speichermaterial ist die Integration eines Latentwärmespeichers nach Fig.36 in den Strömungsweg der Abluft u.U. nur schwer zu realisieren; alternativ hierzu ist auch eine Integration in den Thermoölkreislauf denkbar, d.h. der Latentwärmespeicher wird nur von dem aus dem Abhitzekeessel austretendem Thermoöl durchströmt, nicht jedoch von der Abluft (Fig.43). Liegt die Temperatur über der Schmelztemperatur des Speichermaterials, gibt das Thermoöl Energie ab, liegt die Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur, nimmt das Thermoöl Energie auf. In beiden Fällen besteht zwischen der Temperatur des aus dem Speicher austretenden Thermoöls und der Schmelztemperatur des Speichermaterials eine minimale Temperaturdifferenz, die von der Größe der wärmeübertragenden Fläche zwischen Speichermaterial und Thermoöl abhängt.

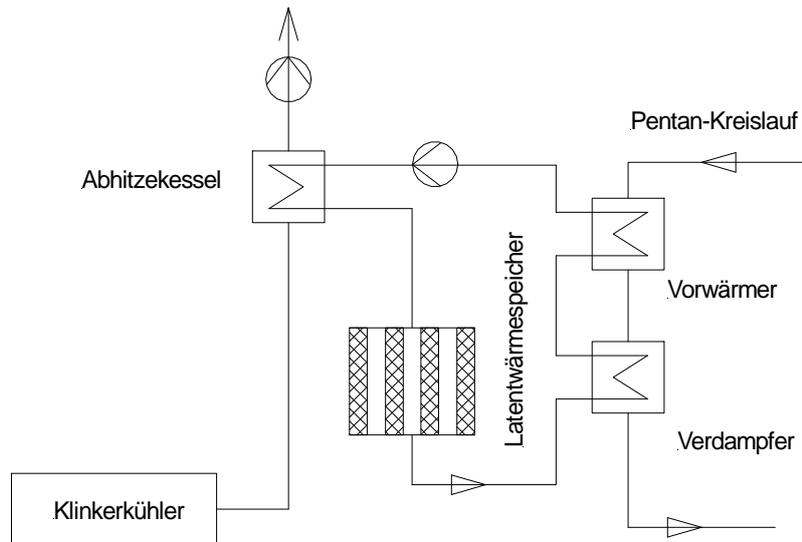


Fig.43: Integration eines Latentwärmespeichers in den Thermoölkreislauf

Aufgrund der endlichen Annäherung an die Schmelztemperatur des Speichermaterials wechselt die Temperatur des Thermoöls am Austritt des Speichers sprunghaft entsprechend Fig.44. Die maximalen Temperaturdifferenzen liegen bei ca. 20K, während die entsprechenden Differenzen ohne Speicher mehr als 100K betragen. Die mittlere Leistung beträgt sowohl mit Speicher als auch ohne Speicher ca. 980kW, wobei diese Leistung mit Speicher von einer Turbine mit einer maximalen Leistung von 1.2 MW erzeugt wird, während ohne Speicher ein Turbine mit einer Maximalleistung von 2.4 MW benötigt wird, wobei auch hier die tatsächlich abgegebene Leistung aufgrund von Teillast und Transienten stärker vom theoretischen Wert abweicht als bei der kleineren Turbine.

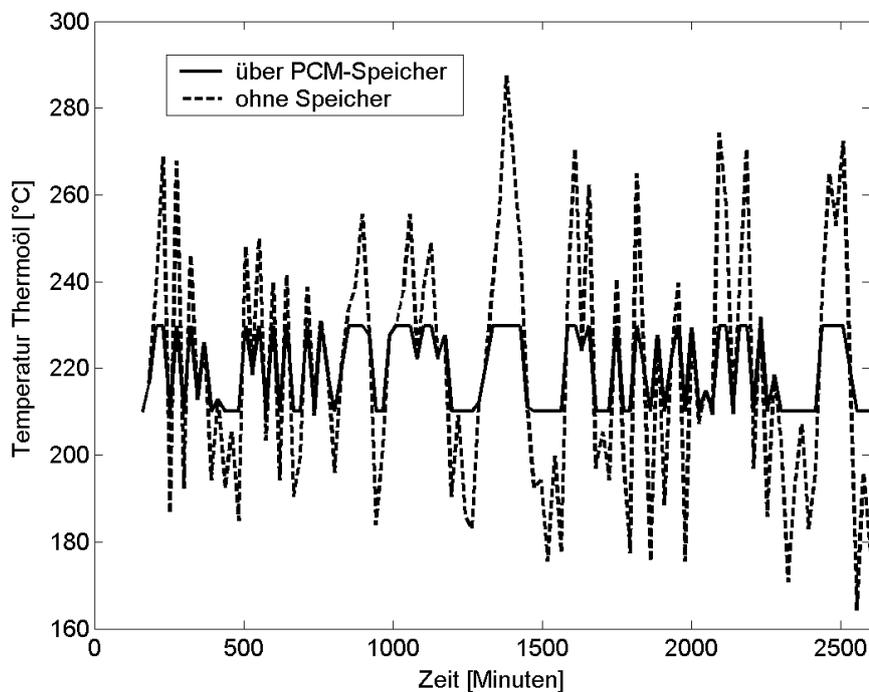


Fig.44: Temperaturverlauf Thermoöl am Austritt des Latentwärmespeichers nach Fig.43 im Vergleich zum Temperaturverlauf ohne Speicher

Fig.45 zeigt den Beladezustand des Latentwärmespeichers. Aus der Darstellung folgt, dass die maximale Beladung des Speichers bei ca. 3.75 MWh liegt, die erforderliche Kapazität ist damit geringer als bei einer Anordnung des Speichers im Strömungsweg der Abluft. Grund hierfür ist, dass bei der Anordnung nach Fig.43 eine Variation der Öltemperatur innerhalb eines begrenzten Bereiches zugelassen wird, während bei der zuvor betrachteten Anordnung des Speichers im Abluftkanal die Öltemperatur auf einem konstanten Wert gehalten wird. Aufgrund der Variation der Speichertemperatur schwankt auch die Leistung der ORC-Turbine in einem Bereich zwischen 60 -100% der Maximalleistung.

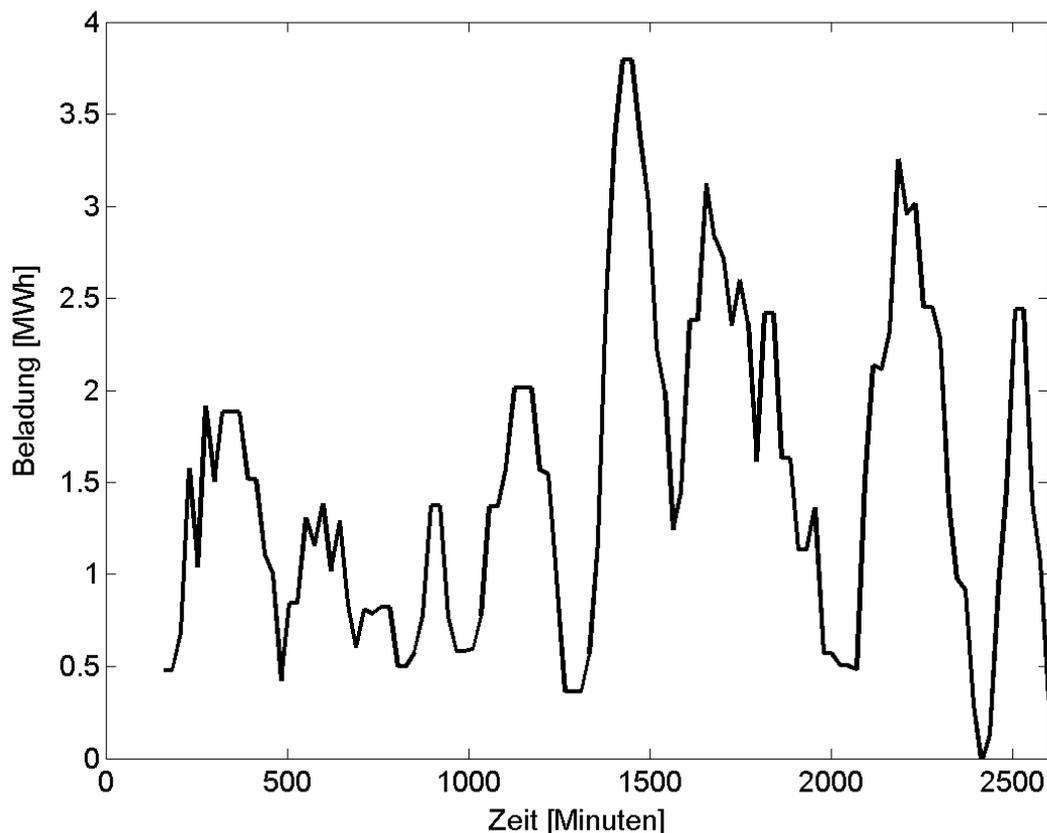


Fig.45: Beladezustand Latentwärmespeicher nach Fig.43

#### 4.2.4 Vergleich der Speicherkonzepte

Zwischen den lokalen Extremwerten der Ablufttemperatur liegen 10 bis 100 Minuten, die Zeiträume zwischen der maximalen und der minimalen Beladung betragen bis zu 600 Minuten. Lösungen nach Fig.37, bei denen der Speicher in den Strömungsweg der Abluft integriert wird, eignen sich vor allem für kurze Beladezyklen im Bereich von 5-10 Minuten. Vorteilhaft ist bei einem derartigen Konzept, dass durch den Speicher die Temperaturtransienten im Abhitzeessel ebenfalls begrenzt werden, wodurch die thermomechanische Spannungen und damit auch die Kosten reduziert werden können. Die direkte Speicherung von Thermoöl dürfte die kostengünstigste Lösung darstellen, jedoch müssen hier Sicherheitsaspekte aufgrund der großen Mengen an Thermoöl berücksichtigt werden, außerdem müssen die räumlichen Gegebenheiten für die Unterbringung von zwei Speichertanks mit jeweils ca. 100m<sup>3</sup> Volumen gegeben sein.

Die Integration eines Latentwärmespeichers in den Thermoölkreislauf ist bei dem hier betrachteten zeitlichen Verlauf der Ablufttemperatur aufgrund der geringeren

Speicherkapazität kostengünstiger als eine Integration des Speichers in den Strömungsweg der Abluft, jedoch unterliegt die Leistung der Turbine leichten Schwankungen.

### 4.3 Abwärme von Abkühlprozessen

Die nachfolgenden Daten wurden von einem Industriepartner zur Verfügung gestellt. Bei dem betrachteten Prozess werden die Ausgangsmaterialien in eine Schüttung eingebettet und in einem Ofen elektrisch bis auf Temperaturen von 3000°C erhitzt. Nach Ende der Beheizung wird die Energie über die Seitenwände des Ofens an die Umgebung abgegeben, die Temperatur der Abwärme sinkt entsprechend Fig.46.

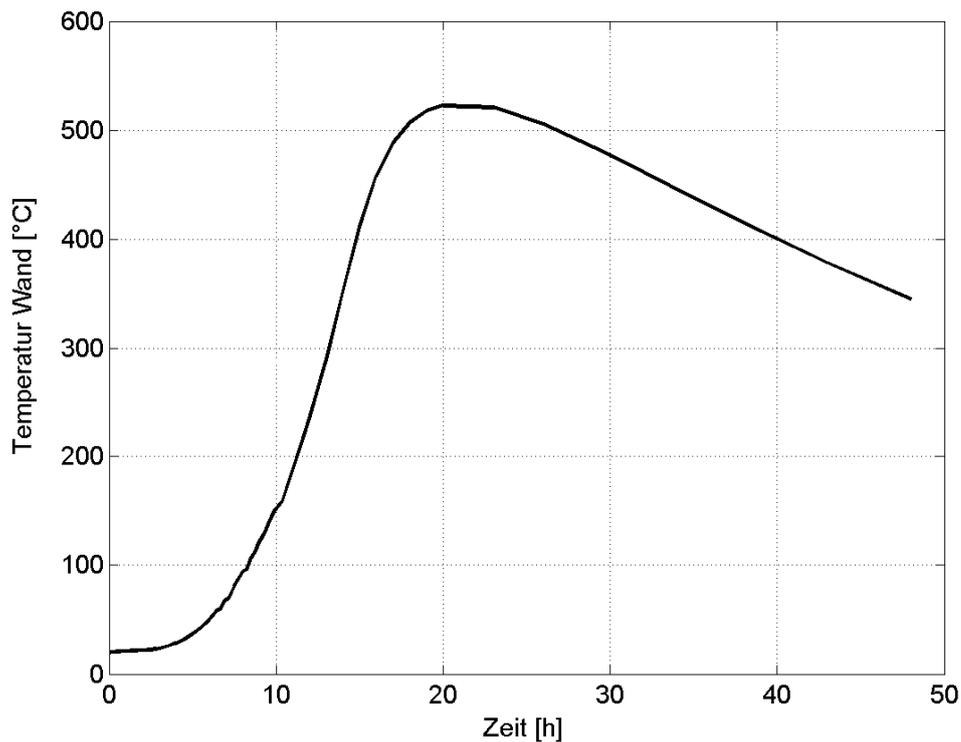


Fig.46: Temperaturverlauf der Ofenwand während des Abkühlprozesses

Im Vordergrund der Analysen des Industriepartners standen Optionen zur Verkürzung der Abkühlphase, um eine höhere Auslastung der Öfen zu erreichen. In diesem Rahmen wurden Simulationen durchgeführt, bei denen der Temperaturverlauf und die Energieabgabe eines Ofens berechnet wurde, wobei unterschiedliche Maximaltemperaturen für das Kühlmedium zugelassen wurden. Fig.47 zeigt die Ergebnisse für Kühltemperaturen von 150°C und 200°C.

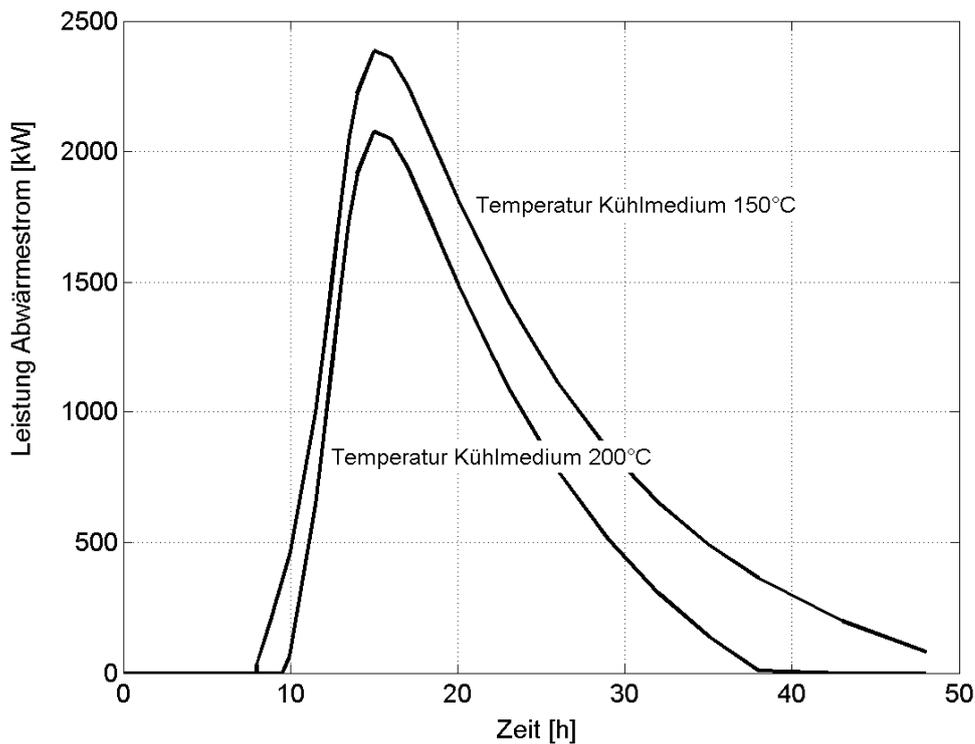


Fig.47: Zeitlicher Verlauf der vom Kühlmedium abtransportierten thermischen Energie

#### 4.3.1 Speichereinsatz bei sequenziell betriebenen Öfen

Die Daten über den Leistungsverlauf wurden als Ausgangsbasis für die Abschätzung des Potenzials einer Verstromung der Abwärme genutzt. Dabei werden mehrere Öfen betrachtet, die zeitlich versetzt betrieben werden. Der Versatz beträgt ca. 24 Stunden, da ein Zyklus etwa 30 Stunden dauert, steht zeitweise Abwärme aus zwei Öfen zur Verfügung. Die verfügbare Abwärmeleistung ist bei dieser Anwendung mit einem Maximalwert von ca. 2MW deutlich geringer als bei den zuvor betrachteten Fällen, die erwartete Leistung liegt bei einer Abwärmtemperatur von 200°C und einem Wirkungsgrad von ca. 17% in einem Bereich von maximal 340kW. In Fig.48 ist der Leistungsverlauf der Abwärme bei einer Temperatur von 200°C dargestellt, der Mittelwert der thermischen Leistung liegt hier bei ca. 1070kW. Für diesen Temperaturbereich eignet sich eine ORC-Turbine mit Pentan als Arbeitsmedium, bei einem Wirkungsgrad von 17% beträgt die im Mittel abgegebene Leistung der Turbine bei ca. 180kW bei einer Maximalleistung von 340kW ohne Berücksichtigung von Verlusten aufgrund von Teillast oder Transienten.

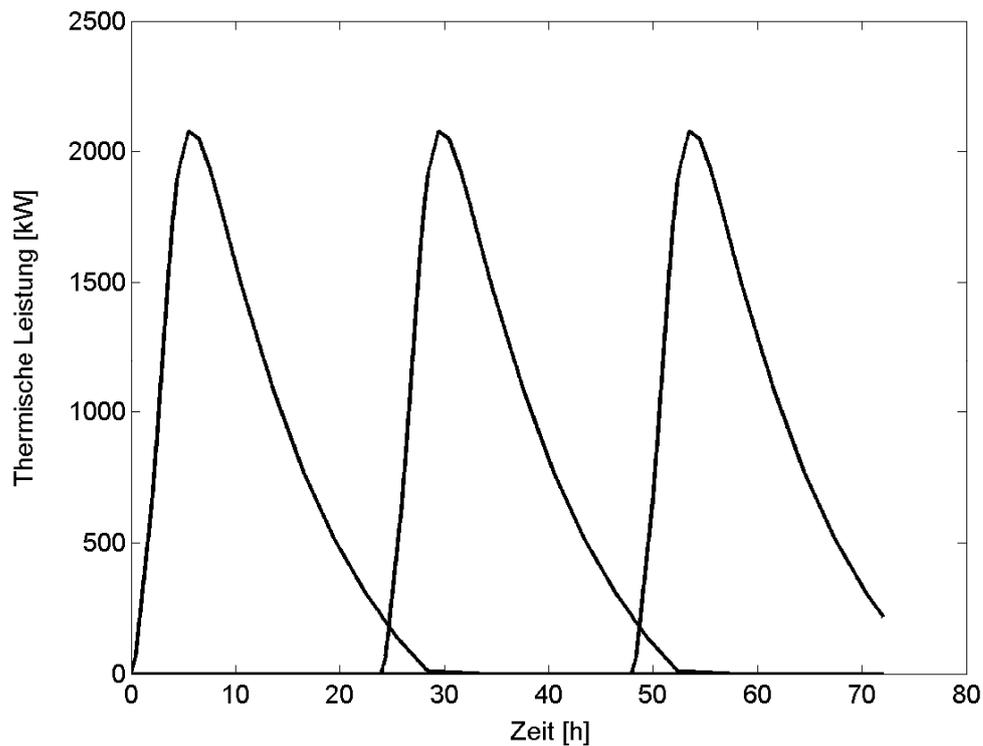


Fig.48: Zeitlicher Verlauf der thermischen Leistung von drei sequenziell betriebener Öfen

Ein thermischer Energiespeicher kann für die Kompensation der zeitlichen Schwankungen der Leistung der verfügbaren Abwärme eingesetzt werden. Soll eine Turbine eine konstante thermische Leistung entsprechend dem zeitlichen Mittelwert von 1070kW zur Verfügung gestellt werden, so wäre ein Speichersystem mit einem Beladeprofil nach Fig.49 erforderlich. Für eine vollständige Kompensation der Schwankungen wäre ein Speichersystem mit einer Kapazität von ca. 6MWh erforderlich.

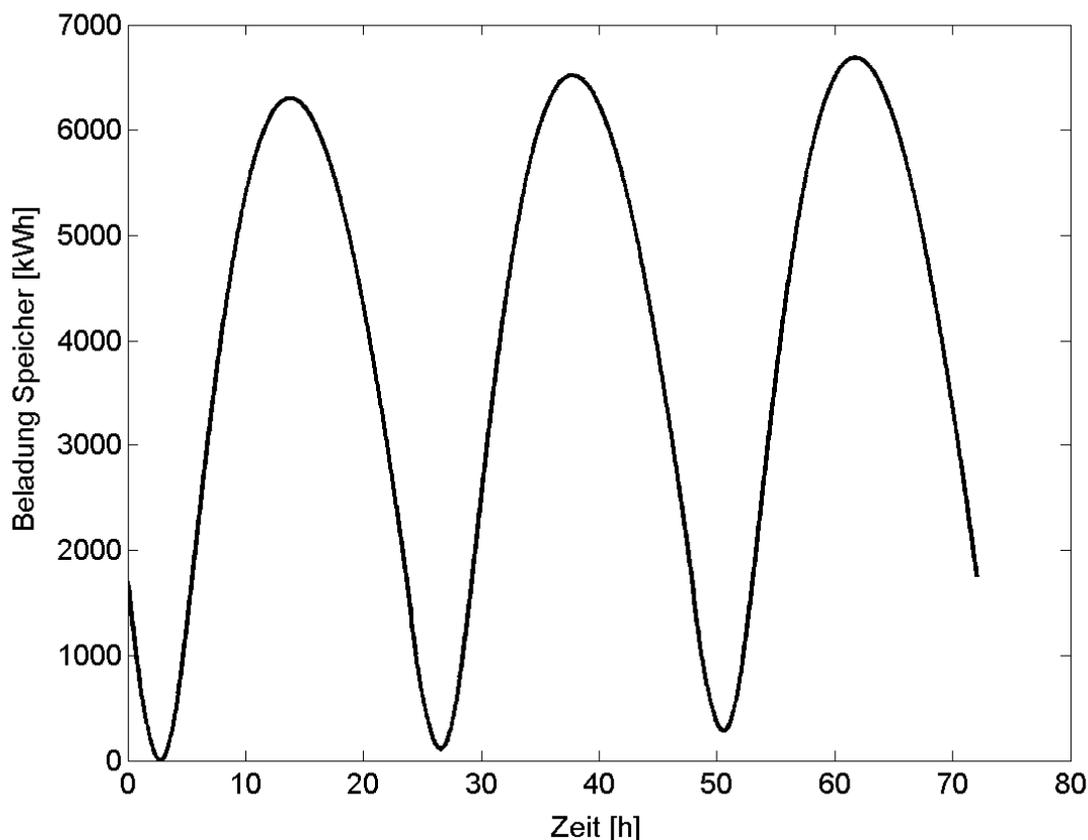


Fig.49: Beladung eines Speichers zur Kompensation der Schwankungen in der verfügbaren Abwärmeleistung nach Fig.48.

Würde eine Turbine mit einer Maximalleistung von 180kW ohne Speicher betrieben, würde die mittlere Leistung bei ca. 135kW liegen, der Speicher erhöht die mittlere Leistung um ca. 30%. Für das Speichersystem liegen die spezifischen Kosten mindestens bei ca. 50€/kWh, für ein System mit den einer Kapazität von 6MWh ergeben sich damit Kosten von ca. 300000€. Der Einsatz einer größeren Turbine mit einer Maximalleistung von 340kW ermöglicht eine ähnliche Verbesserung wie der Einsatz des Speichers, die zusätzlichen Kosten für die größere Turbine liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die erwarteten Kosten für das Speichersystem. Auch wenn beim Einsatz einer größeren Turbine Verluste aufgrund von Teillast und Transienten auftreten, scheint der Einsatz eines Speichersystems hier nur begrenzte Vorteile zu bieten, dies ist vor allem durch die niedrige Frequenz der Belade- / Entladezyklen in Kombination mit einem niedrigen thermischen Wirkungsgrad begründet. Eine Alternative zum Speichereinsatz bietet hier auch eine verbesserte Regelung der Abwärmeabfuhr durch eine entsprechende Anpassung des Massenstromes des Kühlmediums mit dem Ziel, die zeitliche Variation der Leistung zu begrenzen. In diesem Fall werden die thermischen Kapazitäten selbst als Speicher genutzt.

#### 4.3.2 Speichereinsatz zur Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades

Abkühlprozesse sind durch eine stetig absinkende Temperatur der Abwärme charakterisiert, eine Ausnahme bilden hier Erstarrungsprozesse. Soll die Abwärme in einem nachgeschalteter Kreisprozess genutzt werden, ist die untere Temperaturgrenze der nutzbaren Abwärme durch die Maximaltemperatur des Kreisprozesses festgelegt. Bei der Auswahl eines Kreisprozesses muss daher berücksichtigt werden, dass eine niedrige maximale Prozesstemperatur einerseits

die nutzbare Abwärmeenergie erhöht, andererseits sinkt auch der thermische Wirkungsgrad. Ein thermischer Energiespeicher bietet die Möglichkeit, zu Beginn der Abkühlung, wenn eine ausreichend hohe Leistung zur Verfügung steht, Energie bei hoher Temperatur zu speichern. Zu einem späteren Zeitpunkt, wenn die Temperatur der Abwärme unter die Maximaltemperatur des nachgeschalteten Kreisprozesses gesunken ist, stellt der Speicher Energie auf ausreichend hohem Temperaturniveau zur Verfügung, während Abwärme noch direkt für die Prozessabschnitte genutzt werden kann, bei denen Energie auf niedrigerem Temperaturniveau benötigt wird, wie beispielsweise bei der Vorwärmung.

Das Potenzial dieses Konzeptes soll anhand eines Abkühlprozesses untersucht werden, dessen Randbedingungen sich zunächst an dem zuvor betrachteten Ofen anlehnt.

Bei den bisherigen Analysen wurde ein ORC-Prozess mit Pentan mit einer Verdampfungstemperatur von ca. 160°C angenommen. Dieser Prozess erreicht einen Wirkungsgrad von ca. 17%. Anstelle von diesem Prozess soll jetzt eine ORC-Turbine mit Toluol als Arbeitsmedium angenommen werden. Die Verdampfungstemperatur liegt bei 260°C, der thermische Wirkungsgrad steigt auf 22.5%, damit kann aus der gleichen Wärmemenge 32% mehr elektrische Energie erzeugt werden.

Als Speicher kommt ein Latentwärmespeicher mit  $\text{NaNO}_3$  als Speichermedium zum Einsatz. Die Phasenwechseltemperatur liegt hier bei ca. 306°C, damit kann Wärme bei einer ausreichend hohen Temperatur für den gewählten ORC-Prozess mit Toluol als Arbeitsmedium bereit gestellt werden.

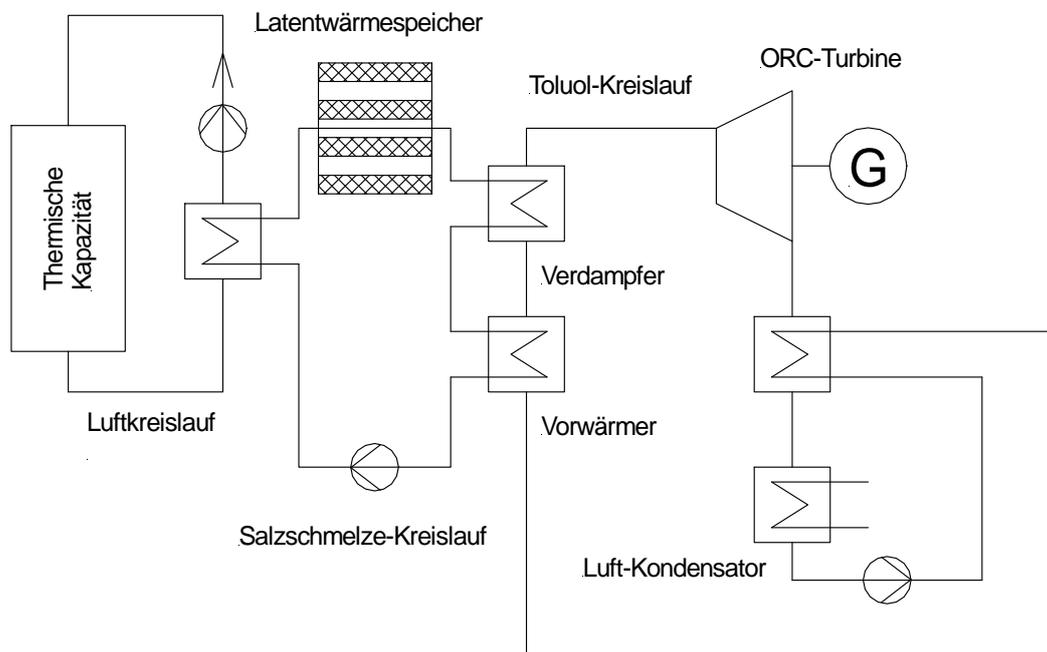


Fig.50: Schaltung für die Verstromung von Abwärme aus Abkühlprozess einer thermischen Kapazität

Hier soll der Abkühlprozess einer thermischen Masse betrachtet werden, die konvektiv gekühlt wird. Die Abwärme wird zunächst in direktem Kontakt an einen Luftstrom übertragen, der dann in einem Wärmeübertrager einen flüssigen Wärmeträger erhitzt. Als Wärmeträger wird eine Salzschmelze mit einem Erstarrungspunkt von ca. 142°C eingesetzt. Entsprechend Fig.50 durchläuft der Wärmeträger nach Aufnahme der Abwärme den Speicher. Liegt die Temperatur der aufgenommenen Abwärme über der Phasenwechseltemperatur, gibt

die Salzschnmelze Wärme an den Speicher ab, liegt die Temperatur unterhalb der Phasenwechseltemperatur, nimmt die Salzschnmelze Energie auf, die Temperatur der Salzschnmelze beim Eintritt in den Wärmeübertrager zum Toluol-Kreislauf weist daher nur geringfügige Schwankungen auf. Fig.51 zeigt den berechneten zeitlichen Verlauf der Abwärmeleistung für die Konfiguration nach Fig.50. ergänzt durch die Verläufe für die Abkühlung ohne Speicher mit maximalen Temperaturen von 150°C bzw. 200°C für das Kühlmedium. Die Leistung der ORC-Turbine beträgt über den gesamten betrachteten Zeitraum 100kW.

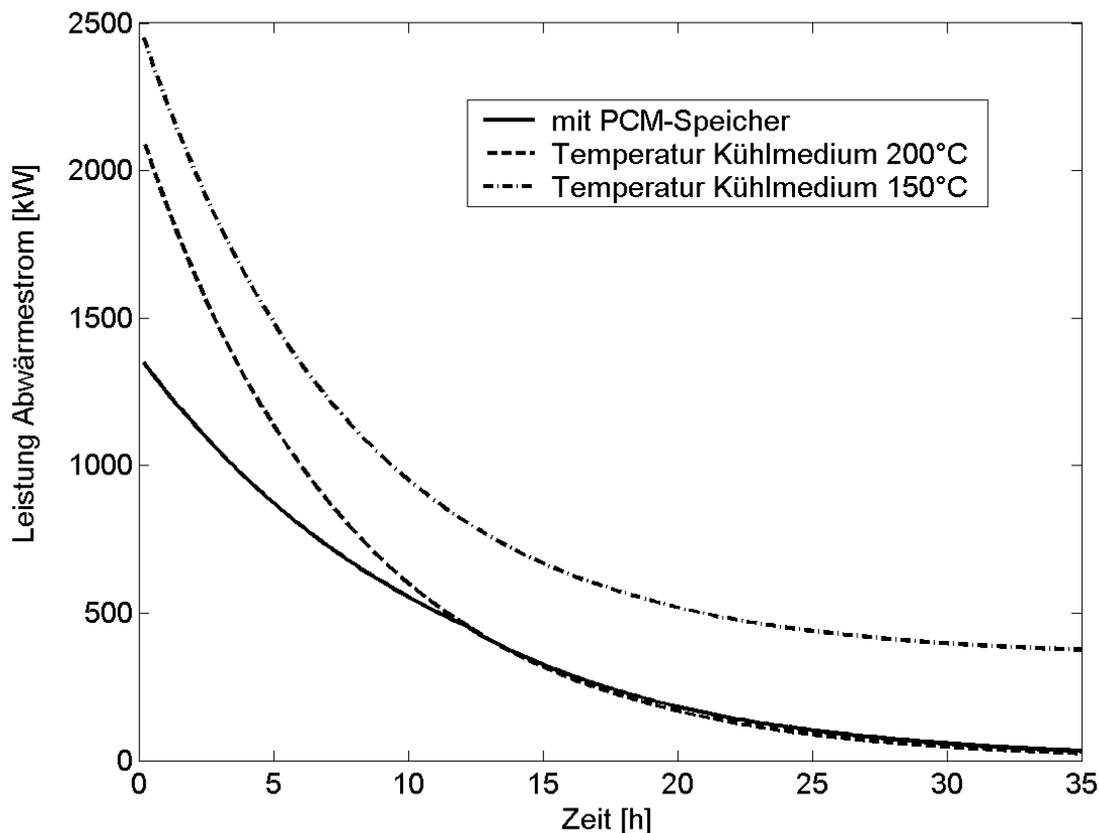


Fig.51: Zeitlicher Verlauf der Abwärmeleistung für die Konfiguration nach Fig.50 mit Speicher im Vergleich zu Abkühlkurven ohne Speicher

Die ORC-Turbine benötigt eine thermische Leistung von 445kW; sobald diese Leistung nicht mehr direkt vom Abwärmestrom zur Verfügung gestellt werden kann, wird zuvor gespeicherte Energie wieder vom Speicher zur Verfügung gestellt. Fig.52 zeigt die Verläufe der verfügbaren Abwärmeleistung, die direkt für den Antrieb der Turbine genutzt wird sowie die Leistung, die vom Speichersystem aufgenommen (>0) bzw. bereitgestellt wird (<0). Solange ausreichend Leistung direkt vom Abwärmestrom verfügbar ist, wird der Speicher mit abnehmender Leistung beladen.

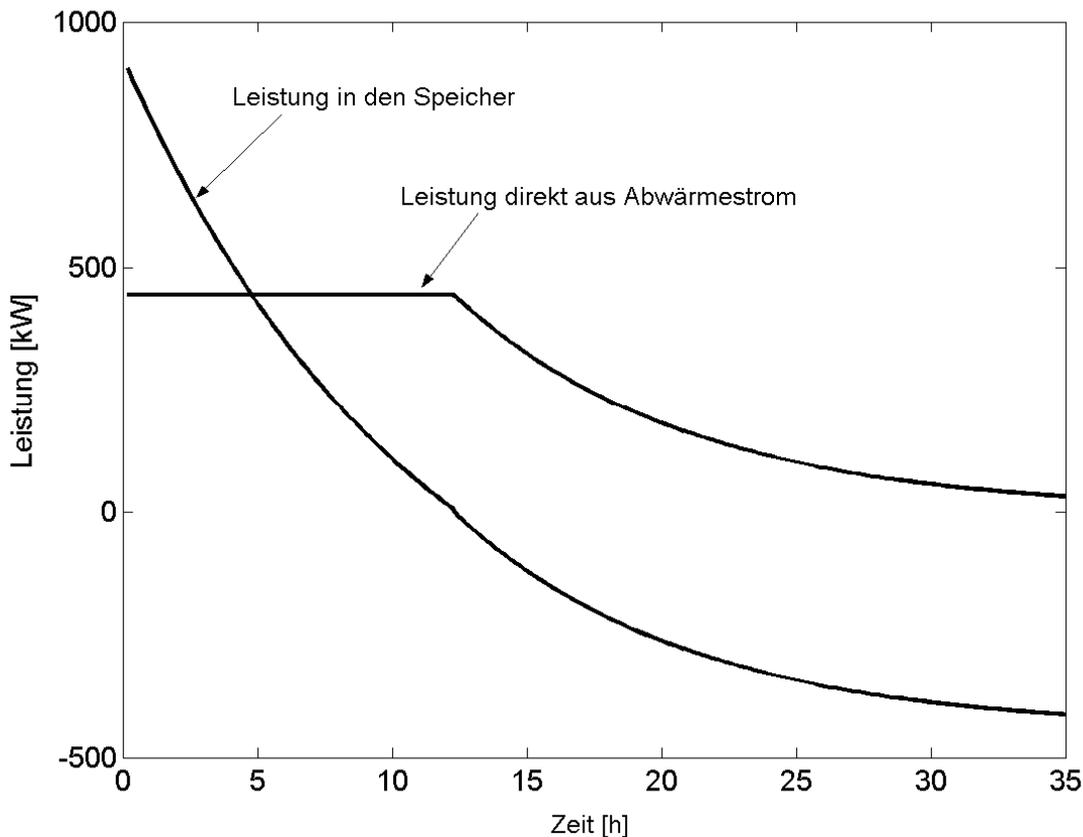


Fig.52: Zeitlicher Verlauf der Wärmeströme in das Speichersystem und in den ORC-Prozess bei Schaltung nach Fig.50

Fig.53 zeigt den Verlauf des Beladezustandes des Speichers. Bis die verfügbare Abwärmeleistung unter den Bedarf des ORC-Kreislaufes absinkt, nimmt die Beladung zu und erreicht einen Maximalwert von ca. 5.3MWh. Im Vergleich hierzu leistet eine 100kW-Turbine mit Pentan als Arbeitsmedium über den betrachteten Zeitraum eine mittlere Leistung von 48kW, bei einer Gesamtdauer des Entladeprozesses von 35 Stunden wird damit durch den Speichereinsatz eine zusätzliche elektrische Arbeit von 1.82 MWh erzeugt. Bei maximal 245 Zyklen pro Jahr liegt die zusätzlich erzeugte elektrische Arbeit bei 447 MWh. Die geschätzten Kosten für den Latentwärmespeicher liegen im Bereich von 500000-750000€, die wirtschaftlichen Vorteile aufgrund des Mehrertrages erscheinen auch hier begrenzt. Vorteilhaft kann ein Speicher im Hinblick auf die vereinfachte Regelung sein, die u.U. erst eine Nutzung der Abwärme eines Abkühlprozesses ermöglicht.

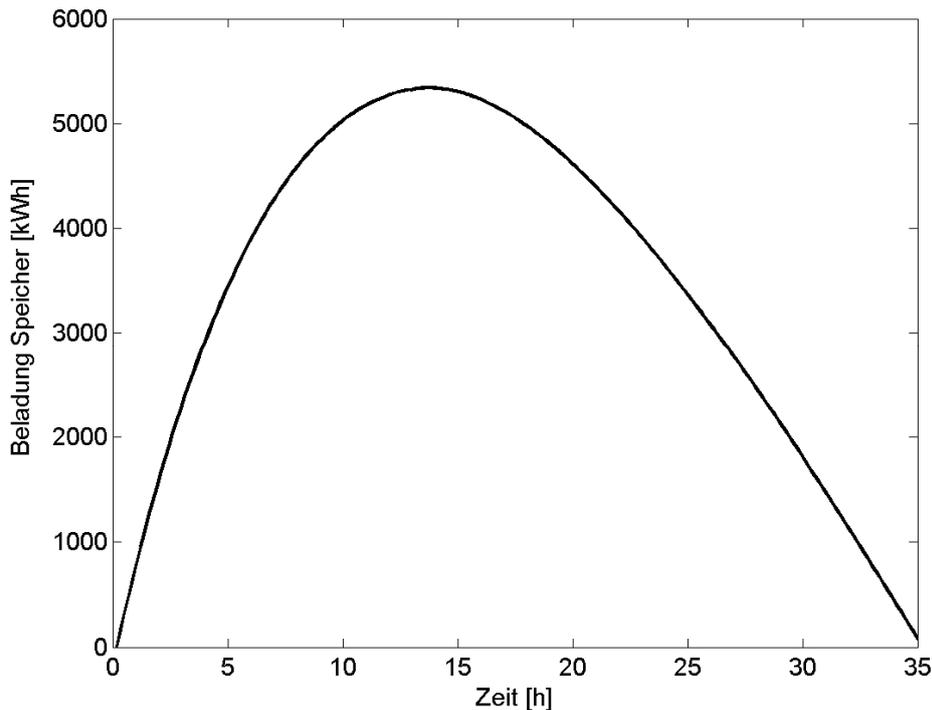


Fig.53 Zeitlicher Verlauf Beladezustand Speicher bei Konfiguration nach Fig.50

### 4.3.3 Speichereinsatz bei verkürzter Abkühlprozessen

Bei den zuvor betrachteten Abkühlprozessen führen die erforderlichen Speicherkapazitäten zu hohen Investitionskosten. Ursache hierfür ist vor allem die Dauer der Abkühlung. Im Folgenden soll untersucht werden, inwieweit eine Verkürzung des Abkühlprozesses zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit führen kann. Dabei wird angenommen, dass die konvektive Wärmeabfuhr von der sich abkühlenden thermischen Masse so gesteigert werden kann, dass eine beschleunigte Temperaturabsenkung möglich ist.

Für die zuvor betrachtete thermische Masse werden Abkühlzeiten von zuvor ca. 35 Stunden auf 10 bzw. 5 Stunden reduziert, Fig.54 zeigt die entsprechenden Temperaturverläufe der wärmeabgebenden thermischen Kapazität, in Fig.55 sind die übertragenen thermischen Leistungen dargestellt.

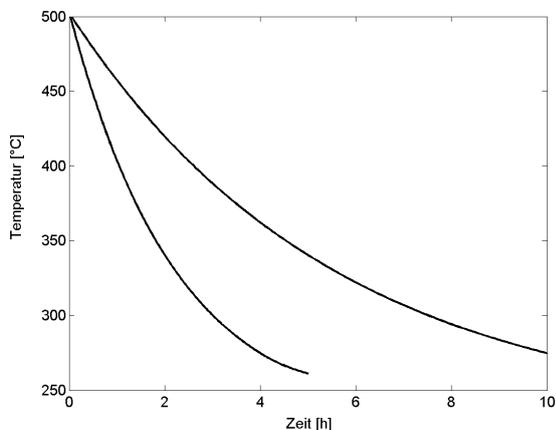


Fig.54: Temperaturverlauf der thermischen Kapazität bei beschleunigter Abkühlung für Entladezeiten von 5 und 10 Stunden

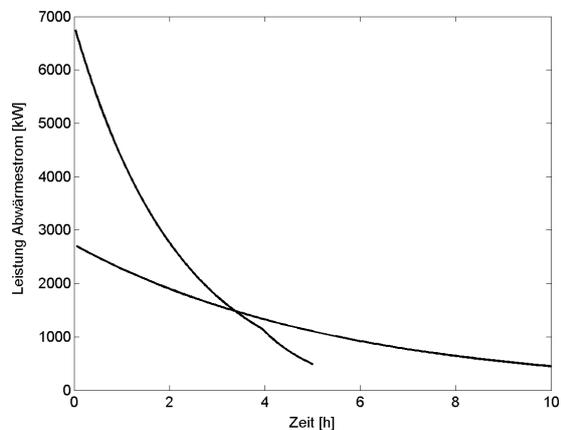


Fig.55: Abgegebene thermische Leistung bei beschleunigter Abkühlung für Entladezeiten von 5 und 10 Stunden

Bei der schnelleren Entladung steigt die verfügbare Abwärmeleistung, damit können auch ORC-Turbinen mit einer höheren elektrischen Leistung betrieben werden. Bei einer Abkühlung mit 10 Stunden Dauer kann eine Turbine konstant mit 275 kW betrieben werden, bei einem 5-stündigen Abkühlprozess kann eine 600kW-Turbine durchgehend mit ausreichender Abwärme versorgt werden. Fig.56 zeigt für die beiden Fälle mit verkürzten Abkühlzeiten die Verläufe für die Speicherbeladung, aus denen sich erforderliche Speicherkapazitäten von 2.8 MWh (10h Abkühlzeit) bzw. 3.6MWh (5h Abkühlzeit) ergeben. Gegenüber dem zuvor betrachteten Abkühlprozess mit einer Dauer von ca. 35h Stunden reduziert sich die erforderliche Speicherkapazität um etwa 50%, gleichzeitig steigt die erzeugte elektrische Leistung. Der Speicher gewinnt bei verkürzten Abkühlzeiten an Bedeutung, da hier die zeitliche Variation der verfügbaren Abwärmeleistung ausgeprägter ist, ein direkter Betrieb der Turbine ist daher schwieriger. Attraktiv ist eine beschleunigte Abkühlung insbesondere dann, wenn eine unterbrechungsfreie Folge von Abkühlprozessen möglich ist, der Speicher also kontinuierlich genutzt wird. Gelingt dies bei den hier betrachteten Abkühlzyklen von 5 bzw. 10 Stunden, so könnte bei einer jährlichen Betriebszeit von 8600 Stunden eine elektrische Energie von 2365 MWh (10h Abkühlzeit) bzw. 5160 MWh (5h Abkühlzeit), eine Amortisierung der Speicherkosten, die im Bereich von 350000 bis 450000€ liegen dürften, sollte daher schneller erfolgen können. Voraussetzung für eine beschleunigte Abkühlung ist der Nachweis, dass die Produktqualität nicht negativ beeinflusst wird, eventuell bieten sich jedoch auch Vorteile durch eine verkürzte Fertigungszeit.

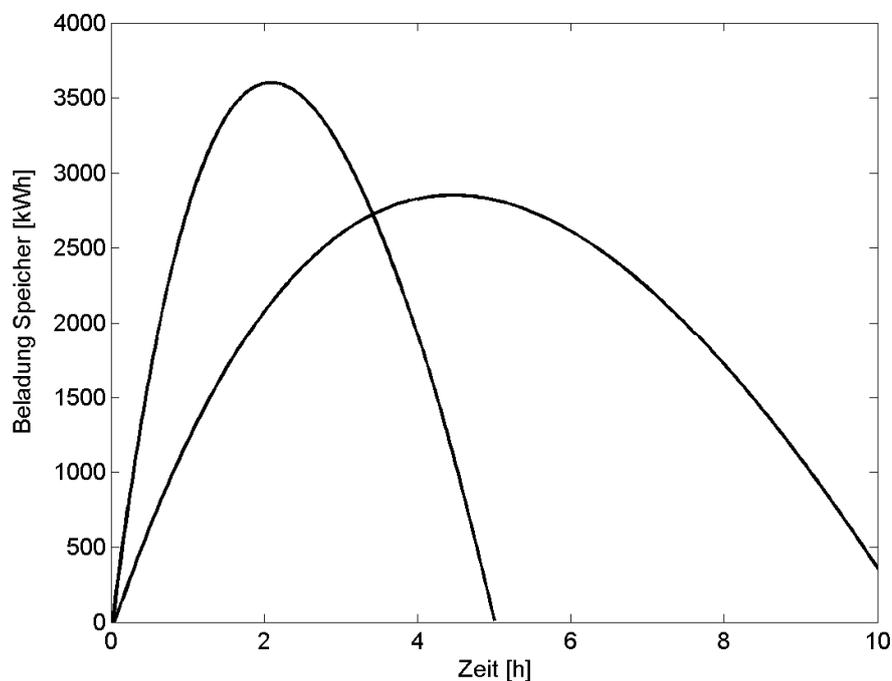


Fig.56: Verläufe der Speicherbeladung für Entladezeiten von 5 und 10 Stunden

## **5 Messung der Dienstleistungsqualität zur Einführung einer Zusatzleistung am Beispiel industrieller Abwärme**

Für Konzepte wie die speicherunterstützte Verstromung von Abwärme bietet sich eine Umsetzung im Rahmen eines Anlagencontractings an. Mit dem Ziel, die Erwartungen potenzieller Kunden zu identifizieren, wurde bei den Stadtwerken Esslingen eine Analyse zu Erfordernissen bei der Markteinführung von Technologien zur verbesserten Ausnutzung industrieller Abwärme durchgeführt.

Der Kundenkreis der Stadtwerke Esslingen beschränkt sich auf deren reguläres Versorgungsgebiet. Dabei spielt es keine Rolle, ob das Hauptprodukt der Stadtwerke Strom, Gas oder Wasser ist. Es besteht eine regionale Ausrichtung. Diese Orientierung schränkt zwar die Anzahl der potentiellen Kunden ein, erhöht aber die Kundenbindung durch Nähe, Präsenz und höhere Servicestandards. Durch Contracting können insbesondere in Zusammenarbeit mit regional agierenden Handwerkern neue Kunden gewonnen bzw. alte Kunden durch verbesserte Dienstleistungen besser gebunden werden. Besonders für Stadtwerke ist es in Anbetracht eines immer härter umkämpften Marktes mit zunehmend steigendem Wettbewerbsdruck von wachsender Bedeutung, Kunden zu halten, die ansonsten zu Billiganbietern wechseln, deren günstigen Preisen die Stadtwerke nichts entgegen halten können, außer den lokalen Vorteil und ein breit gefächertes Dienstleistungsportfolio.

Dennoch ist dies nur eine Antwort für die Zukunft. Bestehende regionale Monopole werden durch die Marktöffnung (Liberalisierung der Märkte) aufgebrochen und Substitutionsgüter wie neue Energieformen (Geothermie oder Photovoltaik) fordern ein Umdenken bei Stadtwerken. Energieversorger müssen mit ihren Kunden stärker als bisher zusammenarbeiten, neue Leistungen und Service anbieten bzw. bestehende Leistungen auf neuen Märkten etablieren. Dies hat zur Folge, dass Stadtwerke eventuell auch bestehende regionale Strategien überarbeiten. Ein Anlagencontracting zur speicherunterstützten Verstromung von Abwärme kann eine vielversprechende Leistung in neuen Märkten sein. Die Indikatoren für dessen Einsatz sind unter anderem Branchenbezogen, z.B. ein hohes Abwärmeaufkommen wie in der Papier- oder Gießereiindustrie. Da der Erfolg einer neuen Leistung maßgeblich von der Nachfrage des Marktes beeinflusst wird, ist es nachvollziehbar, dass der Radius des definierten Marktes erfolgsorientiert definiert sein muss.

Basis der Untersuchung war eine Befragung von Unternehmen der Papierindustrie, von Gießereien und Brauereien in Deutschland. Die Ergebnisse dieser Analyse werden im Folgenden dargestellt.

Mit der Verpflichtung der Politik den weltweiten Temperaturanstieg auf maximal 2° Celsius zu beschränken und der damit verbundenen Reduzierung der Emissionen von 21% gegenüber 1990 wird auch die Industrie in die Pflicht genommen den Energieverbrauch zu reduzieren. Das Ziel Energiesparpotenziale aufzudecken wird zusätzlich durch steigenden Energiepreise immer bedeutender [29]. Studien belegen, dass in der Industrie immer noch große Einsparpotenziale vorhanden sind (vgl. [30], S. 24). Die Ausschöpfung dieser Potentiale ermöglicht Unternehmen die Energiekosten zu senken und somit ihre Wettbewerbsposition zu stärken. Zusätzlich tragen sie damit zum Klimaschutz bei. Eine Möglichkeit die Energieeffizienz in der Industrie zu steigern besteht in der vermehrten Nutzung von Abwärme. Um die Marktdurchdringung der Technologien zur Abwärmenutzung zu beschleunigen, sollten schon in der Planungsphase die Bedürfnisse der Kunden in das Produkt mit einfließen. Dies ermöglicht die Bereitstellung von kundengerechten und qualitativ hochwertigen Produkten. Zusätzlich werden die Fehlerkosten bei der Produkteinführung minimiert (vgl. [31], S. 160).

Unternehmen können strategische Wettbewerbsvorteile nur verwirklichen, wenn sie die für den Kunden relevanten Leistungsmerkmale besser als Wettbewerber erfüllen (vgl. [32], 2006, S. 1). Unter diesem Gesichtspunkt kommt der Qualität der Dienstleistung eine herausragende Bedeutung zu.

In der vorliegenden Studie wird untersucht, wie sich Unternehmen in der Investitionsgüterbranche durch Anlagen zur Abwärmenutzung einen strategischen Wettbewerbsvorteil erschaffen können. Abwärmanlagen werden dabei nicht als ein eigenständiges Produkt angesehen, sondern als eine Erweiterung der Wärmeanlage.

## **5.1 Grundlagen der Untersuchung**

Die Dienstleistungsqualität hat einen entscheidenden Einfluss auf den wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens. Dies kann anhand der Erfolgskette des Relationship Marketing verdeutlicht werden. Dabei wird ersichtlich, welche Vorteile die Messung der Dienstleistungsqualität zur Einführung einer Zusatzleistung besitzt und wie diese Zusatzleistung optimal an die Bedürfnisse des Kunden angepasst werden können.

### **5.1.1 Erfolgskette des Relationship Marketing**

Durch die von [33] entworfene Erfolgskette des Relationship Marketing wird deutlich, dass der ökonomische Erfolg eines Unternehmens von mehreren Faktoren beeinflusst werden kann. Zu Beginn der Kette steht das Relationship Marketing, als Instrument, um die Zufriedenheit der Kunden zu beeinflussen. Eine hohe Kundenzufriedenheit kann sich positiv auf die Kundenbindung auswirken. Kunden wiederum, die an ein Unternehmen gebunden sind, tragen erheblich zum wirtschaftlichen Erfolg bei.

#### **Relationship Marketing**

Unter Relationship Marketing werden alle Maßnahmen zur Voruntersuchung, Planung, Realisierung und Kontrolle von Produkten und Dienstleistungen im Geschäftsverkehr angesehen. Die Beziehung zum Kunden steht dabei im Mittelpunkt (vgl. [33], S. 10). Für Kunden wird es durch Produktangebote mit vergleichbaren technischen und qualitativen Eigenschaften immer schwieriger, sich zwischen den Anbietern zu entscheiden. Daher wird die Differenzierung durch qualitativ hochwertige Dienstleistungen immer wichtiger und stellt für die Unternehmen einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil dar (vgl. [32], S.1). Für die erfolgreiche Integration des Relationship Marketing im Unternehmen muss sichergestellt werden, dass die Mitarbeiter bei der Beurteilung ihres eigenen Handelns die Kundenperspektive als Bewertungsmaßstab benützen (vgl. Bruhn, 2001, S. 53). Das bedeutet,

bei jeder Interaktion ist darauf zu achten, wie der Kunde das Verhalten der Mitarbeiter interpretiert. Eine Möglichkeit, diese Kundenperspektive zu übernehmen, bietet die Ermittlung der Kundenerwartungen. Sie bietet nicht nur die Möglichkeit, das Verhalten der Mitarbeiter auf den Kunden abzustimmen, sondern ist auch zum Optimieren von bestehenden Produkten geeignet. Zusätzlich können die Erwartungen schon in der Planungsphase in Neuprodukte mit einfließen, um diese optimal an die Bedürfnisse der Kunden anzupassen [34].

#### Kundenzufriedenheit

Dienstleistungen nehmen eine herausragende Stellung im Relationship Marketing ein, mit dem sich die Kundenzufriedenheit maßgeblich beeinflussen lässt.

Die in der wissenschaftlichen Literatur bedeutendste Theorie um Kundenzufriedenheit zu erklären stellt das (Dis-) Konfirmationsparadigma dar, das auch als C/D Paradigma (Confirmation/Disconfirmation) bezeichnet wird (vgl. [32], S. 11). Der Grundgedanke des (Dis-) Konfirmation-Paradigmas liegt in der Auffassung, dass der Kunde bei einer Leistungsanspruchnahme Erwartung gegen Wahrnehmung abwägt. Erfüllt die Leistung die Ansprüche des Kunden, so führt dies zu Zufriedenheit. Wird die Erwartung übertroffen, entsteht eine hohe Zufriedenheit oder er ist sogar begeistert. Es kann jedoch auch Unzufriedenheit entstehen, wenn die Wahrnehmung die Erwartung deutlich unterschreitet (vgl. [35], S. 129). Eine hohe Kundenzufriedenheit kann zu einer Kundenbindung führen.

#### Kundenbindung

Unter Kundenbindung, auch Kundenloyalität genannt, wird oftmals der regelmäßige Wiederverkauf einer Leistung verstanden. Ein Wiederkauf kann jedoch auch aus Gründen der Bequemlichkeit oder Gewohnheit erfolgen. Von Kundenbindung wird daher nur ausgegangen, wenn sich der Wiederkauf auf einer positiven Einstellung des Kunden gegenüber dem Anbieter beruht (vgl. [36], S. 845). Von Kundenbindung wird ebenfalls gesprochen, wenn der Kunde den Anbieter weiterempfiehlt, die Leistung mehrfach in Anspruch nimmt oder in Erwägung zieht, andere Angebote des Anbieters zu nützen (sog. Cross-Selling). Kundenbindung ist eine Kombination zwischen bisherigem und geplantem Verhalten (vgl. [36], S. 845).

Für Unternehmen kann es äußerst attraktiv sein, Kunden an sich zu binden. Sie können dadurch ein höheres Wachstum erreichen, die Rentabilität steigern und langfristig die Existenz des Unternehmens sichern (vgl. [32], S. 52).

### **5.1.2 SERVQUAL-Ansatz zur Messung der Dienstleistungsqualität**

Unter den multiattributiven Verfahren wird der SERVQUAL-Ansatz (Kunstwort aus Service und Quality) als das bedeutendste Modell zur Messung der Dienstleistungsqualität angesehen (vgl. [37], S. 76). Der Ansatz ermöglicht es, die einzelnen Leistungskriterien einer Dienstleistung zu messen, um ein ganzheitliches Bild über die Dienstleistungsqualität zu erstellen.

#### GAP Modell als Grundannahme von SERVQUAL

Der SERVQUAL-Ansatz geht auf die Autoren Parasuraman et al. zurück. Sie erkannten einen Mangel an Ansätzen zur Qualitätsmessung in der Dienstleistungsbranche (vgl. [38], S. 3f.). Um diesen zu beheben, führten sie eine Befragung mit B2C Kunden in verschiedenen Dienstleistungsbranchen durch. Als Ergebnis erlangten sie folgende Erkenntnisse (vgl. [39], S. 90):

Kunden fällt eine Qualitätsbeurteilung von oftmals komplexen Dienstleistungen schwerer als von Produkten.

Um die Qualität der Leistungserstellung zu beurteilen, ist nicht nur das Ergebnis, sondern auch der eigentliche Erstellungsprozess von Bedeutung.

Bei Beurteilung der Dienstleistungsqualität ist die Kundenperspektive ausschlaggebend.

In der Studie konnten fünf Lücken im Unternehmen identifiziert werden (vgl. [40], 1992, S. 30). Diese Schwachstellen bezeichneten die Autoren Parasuraman et al. als „GAP“ („Lücke“).

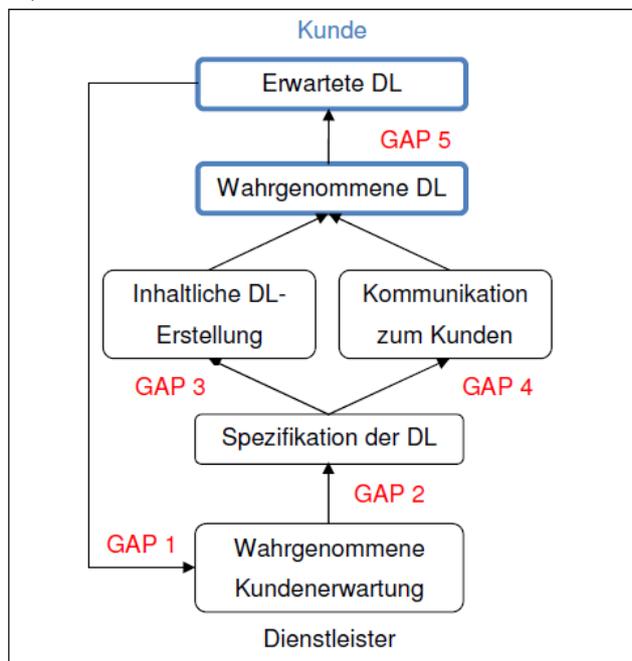


Fig. 57: GAP-Modell (Vgl. [38], S. 44)

GAP 5 bildet die zentrale Lücke des GAP-Modells. Diese Lücke bildet sich, wenn der Kunde eine Leistung anders wahrnimmt, als er es erwartet hat. Eine hohe Dienstleistungsqualität wird dann erreicht, wenn die Wahrnehmung einer Dienstleistung die Erwartung erfüllt oder gar übertrifft (vgl. [39], S. 103f.).

### Konzeptualisierung und Operationalisierung von Servqual

Parasuraman et al. erkannten durch vorhergehende Forschungen, dass die Differenz zwischen der Erwartung und der Wahrnehmung eines Kunden die größte Hürde darstellt, um eine hohe Dienstleistungsqualität zu erreichen. Die Autoren ermittelten, welche Kriterien für die Beurteilung der Dienstleistung ausschlaggebend sind. Dieses Vorgehen wird auch als Konzeptualisierung bezeichnet (vgl. [41], S. 5). Sie ermittelten fünf Dimensionen aus denen die Dienstleistungsqualität besteht.

Der große Vorteil des Modells besteht darin, dass es grundsätzlich für alle Dienstleistungsbranchen angewendet werden kann und nur noch an die Besonderheiten einer Branche angepasst werden muss (vgl. [42], S. 30f.). Nach der Konzepterstellung konnte daraus in der Operationalisierung ein Messmodell entwickelt werden. Es entstand ein standardisierter Fragebogen mit insgesamt 22 Fragen. Bei jeder Frage können die Befragten ihre Erwartung und Wahrnehmung auf einer Doppelskala angeben. Die Antworten können zwischen 1 („stimme gar nicht zu“) bis 7 („stimme voll zu“) schwanken. Anhand dieser Daten erfolgt die Auswertung. Für weitere Ausführungen wird auf Parasuraman ([40], S. 199ff.) verwiesen.

### 5.1.3 Geschäftsbeziehungen in Business-to-Business Märkten

Der Geschäftskundenbereich unterscheidet sich in mehreren Punkten grundlegend vom Konsumgüterbereich. Dies wird schon an der Vermarktung der Leistungen deutlich, die nicht

an Endkonsumenten gerichtet ist, sondern an organisationale Nachfrager wie Unternehmen, Behörden und Verbände (vgl. [43], S. 18).

	Business-to-customer	Business-to-Business
Zielgruppe	Privatpersonen	Organisationen
Grund der Leistungsanspruchnahme	Bedürfnisbefriedigung	Um damit weitere Leistungen zu erstellen
Leistungsangebot	Standardisiert	Spezialisiert
Entscheidungsprozess	Emotional	Rational

Tab. 4: Unterschiede zwischen B2C und B2B (Vgl. Kesting, 2008, S. 44f.)

Erfolgt die Marktbearbeitung in Konsumgütermärkten oftmals mit standardisierten Produkten, ist dies bei Investitionsgütern durch die geringe Anzahl an Nachfragern nicht möglich (vgl. [32], S. 91). Anbieter müssen deshalb ihre Leistung an die Besonderheiten der Kunden anpassen (vgl. [32], S. 92). Zusätzlich wird die Wichtigkeit der Leistungsqualität durch die langfristige Ausrichtung von Geschäftsbeziehungen erhöht, wie sie speziell in der Investitionsgüterbranche vorhanden ist (vgl. [43], S. 18). Die Kunden erwerben in dieser Branche nicht nur eine Anlage, sondern benötigen auch produktbegleitende Dienstleistungen, wie z.B. Beratungsleistungen, Schulungen, Installation oder Wartung.

## 5.2 Modifikation des SERVQUAL-Ansatzes

### 5.2.1 SERVQUAL als Grundgerüst zur Messung der Leistungsqualität im Wärmemarkt

Die fünf Dimensionen des SERVQUAL-Ansatzes bilden die entscheidenden Aspekte der Dienstleistungsqualität auf dem Wärmemarkt weitgehend ab. Das Erscheinungsbild (Dimension Materielles), die Zuverlässigkeit der Leistungserbringung (Dimension Zuverlässigkeit) sowie die Reaktionszeit bei Anfragen und Problemen (Dimension Entgegenkommen) werden als wichtige Komponenten identifiziert. Die weiteren Dimensionen Souveränität und Einfühlung werden ebenfalls als entscheidende Bestandteile eingestuft. Im weiteren Verlauf wird der SERVQUAL-Ansatz als Ausgangspunkt für die Vorgehensweise gewählt. Dabei wird der Empfehlung von Parasuraman nachgekommen, dieses Modell nur als Grundstruktur anzusehen und es an die Besonderheiten des Realphänomens anzupassen (vgl. [44], S. 445). Aus diesem Grunde wurden, falls notwendig, einzelne Indikatoren des Ansatzes eliminiert, verändert oder hinzugefügt.

### 5.2.2 Anpassungen an den Wärmemarkt

SERVQUAL bietet zwar eine gute Ausgangslage für die wichtigsten Attribute der Dienstleistungsqualität, beachtet jedoch nicht die Unterschiede zwischen Privat- und Geschäftskunden (vgl. [45], S. 7). Aufgrund der mangelhaften Abdeckung der Besonderheiten von Geschäftskunden haben die Autoren den B2B SERVQUAL-Ansatz entwickelt. In diesem Modell sind 8 Dimensionen mit insgesamt 46 Indikatoren aufgelistet. Unter anderem werden darin die Komponenten Preis und Produkt berücksichtigt. Sträter ([46], S. 88) sieht in einer Studie über den Anlagenbau, den Preis ebenfalls als einen wichtigen Einflußfaktor auf die Gesamtzufriedenheit. Bahia et al. ([47], S. 86) stimmt dem zu und sieht zusätzlich in der Dimension Produkt ein wichtiges Beurteilungskriterium. Produkt wird ebenfalls vom Westbrook ([48], S. 58) in das Modell zur Messung der Dienstleistungsqualität aufgenommen.

Eine KfW Studie unterlegt, dass bei 38,3% der Unternehmen Zeitmangel als eines das größte Hemmniss bei der Einführung von Energieeinsparmaßnahmen angegeben (vgl. [49], S. 34) wird.

Die KfW Studie ergab weiterhin dass der Hauptgrund für die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen die Senkung der Energiekosten ist (vgl. [49], S. 27). Des Weiteren bekräftigen viele Unternehmen, dass hohe Informationskosten und fehlendes Kapital die Umsetzung von energiesparenden Maßnahmen behindern (vgl. [49], S. 34). Die Relevanz der Dimension Kosten wird ferner durch eine Studie des Fraunhofer-Institutes hinterlegt, die hohe Informationskosten und eine lange Amortisationsdauer als große Hindernisse für die Einführung von Energieeffizienzmaßnahmen angibt (vgl. [50], S. 243ff.). Als einen weiteren Grund für die Einführung von Energieeffizienzmaßnahmen gaben 48% der Unternehmen den Beitrag zum Klimaschutz an (vgl. [49], S. 27). Durch eine ökologisch nachhaltige Produktionsweise kann der Verknappung von endlichen Rohstoffen entgegengewirkt werden. Zusätzlich wird versucht, die Umweltbelastungen auf ein Minimum zu reduzieren (vgl. [51], S. 61f.).

Bei der Unternehmensbefragung gaben 10,7% der Befragten an, dass sie sich durch die Einführung von Effizienzmaßnahmen einen Imagegewinn erhoffen (vgl. KfW Bankengruppe 2005a, S. 27). Zusätzlich gaben 24,7% an, dass die Erlangung von Imagevorteilen die Umsetzung von energiesparenden Maßnahmen begünstigt (vgl. [30], S. 38).

Die Anpassung des SERVQUAL-Ansatzes an den Wärmemarkt hat zur Aufnahme folgender Dimensionen in das Modell geführt: Information, Produkt, Preis, Ökologie, Image, Einsparung und Kosten.

### **5.2.3 Bestimmung des Bezugspunktes der Untersuchung**

Die Festlegung des Bezugspunktes hat erhebliche Auswirkungen auf die Formulierung des Fragebogens und die weitere Verwendung der Studie. Für den Bezugspunkt können die Ergebnisse der Untersuchung sehr bedeutsam sein und hilfreiche Informationen zur Vermarktung der Abwärmeanlagen liefern.

Als Bezugspunkt wird hier der Hersteller der Wärmeanlagen angesehen werden. Dieser besitzt die notwendige Erfahrung im Anlagenbau und die benötigten Fertigungsanlagen. Der Anlagenbauer kann die Abwärmenutzung als Erweiterung der Produktpalette ansehen, um den Unternehmensumsatz zu erhöhen, oder als ein Instrument um eine stärkere Kundenbindung zu erlangen.

#### **Ergänzendes zum Fragebogen**

Für eine praxisorientierte Sichtweise wurden in einem ersten Schritt vier Experten verschiedener Bereiche schriftlich befragt. Ziel dabei war, alle Facetten des Konstrukts zu erarbeiten. Als Anlage erhielten die Experten den Original-SERVQUAL-Fragebogen mit stichpunktartigen Vorschlägen für Veränderungen bzw. Ergänzungen. Außerdem erhielten sie eine Erläuterung des SERVQUAL-Ansatzes. Die Experten wurden gebeten, zusätzliche Vorschläge für neue Indikatoren aufzuschreiben. Auf dieser Grundlage sollten die Experten mögliche Beziehungen zwischen den Indikatoren aufzeigen. Den Abschluss dieser Phase bildet die Zusammenfassung aller gesammelten Informationen. In einer zweiten Phase wurden die Ergebnisse in der Expertenrunde ausgewertet. Dabei konnten die relevanten Dimensionen und Indikatoren festgelegt werden.

Der original SERVQUAL Fragebogen unterteilt sich in Erwartungs- und Wahrnehmungsfragen. Von dieser Methodik wird in der vorliegenden Studie Abstand genommen, da es sich bei der Abwärmenutzung um ein Neuprodukt handelt. Aus diesen Gründen wird im Abwärmefragebogen auf die Wahrnehmungsfragen verzichtet und nur die Erwartungshaltung der Befragten aufgenommen.

Zur Auswertung durch die schließende Statistik ist es nötig, die Globalmaße Kundenzufriedenheit und Kundenbindung zu messen. Kundenzufriedenheit kann durch die Frage nach der Globalzufriedenheit und dem Gesamteindruck der Kunden deutlich gemacht werden. Kundenbindung benötigt Fragen nach der Wiederkaufabsicht, Weiterempfehlung und Zusatzkauf (vgl. [52], S. 411).

### **5.3 Planung und Rücklauf der Kundenbefragung**

Als Grundlage der Studie dient eine Befragung der Branchen Papier- und Gießereiindustrie sowie von Brauereien. Diese wurde im November 2009 durchgeführt.

In der vorliegenden Studie wurden alle Unternehmen der Papierindustrie telefonisch kontaktiert, um die relevanten Ansprechpartner in den Unternehmen zu bestimmen. Es wurde eine webbasierte Befragung gewählt.

Die Untersuchung bei 110 Unternehmen in der Papierindustrie ergab eine Rücklaufquote von 37%, das sind 41 ausgefüllt Fragebögen. In der Gießereiindustrie, lag der Rücklauf bei 14%, das entspricht 23 Antworten von 170 Unternehmen. Von 250 angeschriebenen Brauerei-Unternehmen wurden 18 Fragebögen ausgefüllt, dies entspricht einer Rücklaufquote von 7%.

Insgesamt konnten in der Studie 82 Fragebögen verwertet werden. Damit ist die Mindestanzahl von 50 Fragebögen überschritten, was eine Auswertung mit der PLS-Methode möglich macht. Im folgenden Abschnitt wird die Auswertung genauer erläutert.

### **5.4 Auswertung der Kundenbefragung**

Die Auswertung erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird das Daten-Rohmaterial anhand der schließenden Statistik auf seine Aussagekräftigkeit bewertet. Im Anschluss daran werden die SERVQUAL-Werte beurteilt.

#### **5.4.1 Überprüfung der Daten anhand der schließenden Statistik**

Die schließende Statistik wird verwendet, um aufzuzeigen wie gut das Modell die Wirkungen zwischen latenten Variablen beschreibt (vgl. [53], S. 727). Bei der Auswertung der Daten wird auf die Vorgehensweise von Henseler ([54]) zurückgegriffen.

Obwohl Wissenschaftstheoretiker nur von reflektiven und formativen Messmodellen ausgehen, muss anhand der Komplexität und Abstraktheit vieler Forschungsfragen auf ein multidimensionales Messmodell zurückgegriffen werden. Es besteht aus einem vorgelagerten Teilmodell und nachgelagerten Modell. Beim vorgelagerten werden die Dimensionen durch Indikatoren messbar gemacht. Diese Dimensionen beschreiben im nachgelagerten Teilmodell wiederum eine latente Variable (vgl. [55], S. 107).

In dieser Arbeit wird definiert, dass es sich bei dem äußeren Modell um reflektives Messmodell handelt, dies bedeutet alle Indikatoren einer Dimension spiegeln diese wider. Jedoch ist jeder Indikator mit einem Fehlerwert behaftet. Dieser wird in zufälligen und einen systematischen Fehler unterteilt. Der zufällige Fehler wirkt ohne eine bestimmte Systematik auf das Konstrukt ein, während der systematische bei jeder Messung auftritt. Nimmt der zufällige Messfehler den Wert Null an, gilt das Modell als vollständig reliabel. Ist zusätzlich der systematische Messfehler gleich Null, gilt es als vollständig valide (vgl. [53], S. 727). Erst wenn dies nachgewiesen ist, kann bestätigt werden, dass es sich bei diesem Modell um ein reflektives handelt.

Die Reliabilität des Modells wird mit Hilfe der Konstrukt- und Indikatorreliabilität beurteilt. Die Konstruktrelaiabilität misst die Beziehungsstärke zwischen den einzelnen Indikatoren im PLS-Pfadmodell (vgl. [54], S. 299). Indikatoren desselben Konstruktes müssen dabei eine starke Beziehung untereinander aufweisen. Ein Messwert von größer 0,7 zeugt von ausreichender Konstruktrelaiabilität. Bei einer ersten Überprüfung des Messmodelles wurde bei einigen Indikatoren keine ausreichende Konstruktrelaiabilität festgestellt. Daraufhin wurde

das zuvor festgelegte Modell umstrukturiert und einige Indikatoren anderen Dimensionen zugeordnet.

Für die Beurteilung der Indikatorreliabilität muss jeder einzelne Indikator begutachtet werden. Sie gibt die Genauigkeit an, mit welcher die Dimension die Varianz des Indikators erklärt. Der Mindestwert beträgt dabei 50% (vgl. [56], S. 212). Dies wird anhand der Pfadwerte deutlich, die den Wert von 0,7 ( $\sqrt{0,5}$ ) überschreiten sollten. Bei mehreren Indikatoren wurde ein Wert  $< 0,7$  festgestellt. Jedoch wird empfohlen nur jene Indikatoren aus dem Modell zu entfernen, die den Wert von 0,4 unterschreiten und deren Eliminierung außerdem zu einer erheblich besseren Konstruktreliabilität führen (vgl. [54], S. 299). Dieser Schwellwert wurde bei keinem Indikator unterschritten.

Zur Beurteilung der Validität werden die Konvergenzvalidität und die Diskriminanzvalidität errechnet. Mit der Konvergenzvalidität kann erkannt werden, ob die Indikatoren einer Dimension dasselbe Konstrukt messen. Dies wird durch die durchschnittlich erfasste Varianz AVE („average variance extracted“) bewiesen, welche den Wert von 0,5 überschreiten sollte (vgl. [54], S. 299). Der Wert gibt an, wie hoch der Varianzanteil in Relation zum Messfehler ist (vgl. [56], S. 212).

Mit der Diskriminanzvalidität wird bewiesen, dass es sich bei der latenten Variablen um ein unabhängiges Konstrukt handelt. Hierfür müssen zwei Bewertungskriterien erfüllt sein. Der Pfadkoeffizient zwischen dem Indikator und der dazugehörigen Dimension muss höher sein als der Pfadkoeffizient zu anderen Dimensionen. Als zweites Merkmal muss das Fornell-Larcker Kriterium erfüllt sein. Dafür wird gefordert, dass der AVE Wert einer Dimension größer ist, als die quadrierte Korrelation zu jeder anderen Dimension (vgl. [54], S. 299f.). Alle untersuchten Indikatoren erfüllen diese Kriterien. Die Überprüfung der Reliabilität und Validität hat ergeben, dass es sich beim äußeren Modell um ein reflektives Messmodell handelt. Dadurch kann zur Überprüfung des inneren Modells übergegangen werden.

Dimension	Konstruktrelabilität	AVE
Information	0,86	0,52
Materielles	0,74	0,59
Produkt	0,75	0,51
Preis	0,76	0,62
Erscheinungsbild	0,92	0,84
Mitarbeiter	0,78	0,58
Ökologie	0,93	0,81
Einsparung	1,00	1,00
Image	0,95	0,91
Kosten	0,81	0,51
Gesamtzufriedenheit	0,92	0,86
Kundenbindung	0,93	0,82
SERVQUAL-	0,91	0,26

Tab.5: Auswertung der Konstruktrelabilität (Quelle SmartPLS)

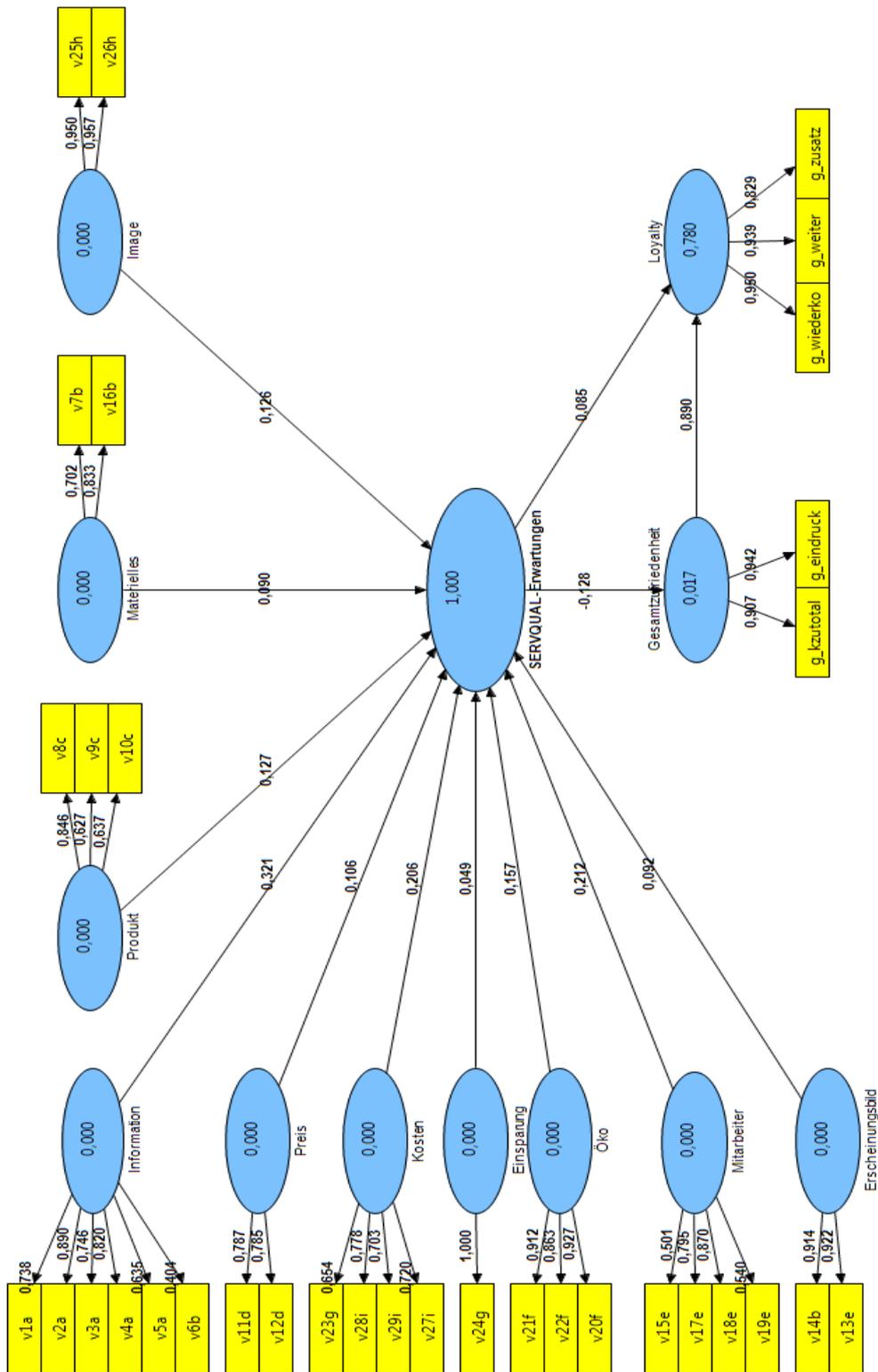


Fig.58: Pfadkoeffizienten mit R<sup>2</sup>-Werten (Quelle: SmartPLS)

Die Überprüfung im Strukturmodell unterscheidet zwischen endogenen (abhängigen) und exogenen (unabhängigen) Variablen (vgl. [53], S. 716). Im untersuchten Modell sind Kundenzufriedenheit bzw. Kundenbindung endogene und die Dimensionen der Dienstleistungsqualität exogene Variable. Ausgangspunkt zur Bewertung des Strukturmodells ist das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der endogenen Variablen. Es misst die Stärke der Beziehungen der latenten Variablen. Werte von 0,67, 0,33 und 0,19 lassen eine substantielle, mittelgute und schwache Beziehung erkennen (vgl. [53], S. 731). Die  $R^2$  Werte verdeutlichen, welchen Einfluss die Dienstleistungsqualität auf die Kundenzufriedenheit hat, sowie welchen Einfluss diese beiden Größen auf die Kundenbindung haben. Der Wert von 0,78 bei Kundenbindung ist dabei außerordentlich hoch. Er zeigt, dass die Dienstleistungsqualität und die Kundenzufriedenheit entscheidend zur Kundenbindung beitragen. Verschwindend gering ist jedoch der Einfluss von Dienstleistungsqualität auf die Kundenzufriedenheit (0,017). Ein solch geringer Wert kann nach der bisherigen Diskussion ausgeschlossen werden. Ursache für diesen geringen Wert ist möglicherweise die ausschließliche Messung der Kundenerwartungen.

#### 5.4.2 Auswertung der SERVQUAL-Werte

Bei der Analyse der Daten konnte ein Erwartungsniveau der einzelnen Dimensionen ermittelt werden. Dieses gibt an, welche Erwartung die Kunden an jede Dimension stellen. So konnte beispielsweise festgestellt werden, dass Kunden sehr hohe Erwartungen an Informationen über Abwärmeanlagen haben.

Dimension	Antworten	Erwartungsniveau
Information	82	90,8%
Materielles	79	89,4%
Produkt	81	92,1%
Preis	81	93,0%
Erscheinungsbild	77	61,3%
Mitarbeiter	81	91,9%
Ökologie	81	84,3%
Einsparung	81	82,5%
Image	81	82,3%
Kosten	82	88,7%

Tab.6: Erwartungsniveau (Quelle SmartPLS)

### 5.4.3 Gewichtung der Dimensionen

Bei Parasuraman et al. ([40], S. 204f.) wird die Gewichtung im Fragebogen durch die zusätzliche Abfrage der Bedeutung der Dimensionen für den Befragten vollzogen. Die Bedeutung wird in dieser Arbeit durch die statistische Methoden ermittelt unter Verwendung der Pfadwerte (vgl. [57], S. 74).

Dimension	Pfadwerte	Bedeutung
Information	0,321	21,6%
Materielles	0,090	6,1%
Produkt	0,127	8,5%
Preis	0,106	7,1%
Erscheinungsbild	0,092	6,2%
Mitarbeiter	0,212	14,3%
Ökologie	0,157	10,6%
Einsparung	0,049	3,3%
Image	0,126	8,4%
Kosten	0,206	13,9%

Tab.7: Pfadwerte der Dimensionen des SERVQUAL Modells (Quelle SmartPLS)

### 5.4.4 Fazit der Auswertung

Mit der statischen Analyse der Daten wurde das Modell zur Messung der Dienstleistungsqualität validiert. Die statistische Überprüfung ergab, dass das entwickelte Modell zur Messung der Dienstleistungsqualität bei Abwärmeanlagen angewendet werden kann. Durch die anschließende Auswertung der SERVQUAL Werte konnte die Bedeutung der einzelnen Dimensionen erarbeitet werden.

## 5.5. Handlungsempfehlungen

Bei der Analyse der Pfadwerte wurde ein sehr hoher Wert von 0,89 zwischen Kundenzufriedenheit und Kundenbindung festgestellt. Dies lässt erkennen, dass die Kundenbindung sehr stark von der Kundenzufriedenheit abhängt. Gelingt es einem Unternehmen in der Branche von Anlagenbauern die Ansprüche seiner Kunden zu erfüllen, dann hat dies eine ganz klare Auswirkung auf die Kundenbindung. Somit können Abwärmeanlagen als ein Instrument angesehen werden, um eine stärkere Kundenbindung zu erreichen. Abwärmeanlagen bieten folglich die Möglichkeit, einen Wettbewerbsvorteil durch höhere Kundenbindung zu schaffen. Jedoch muss der Anlagenbauer unbedingt darauf achten, die Ansprüche der Kunden zu erfüllen.

In der heutigen wissenschaftlichen Literatur besteht Einigkeit über den starken Einfluss der Dienstleistungsqualität auf die Kundenzufriedenheit. In der vorliegenden Studie wurden nur Erwartungswerte gemessen und daher ist die Überprüfung des Zusammenhanges zwischen Dienstleistungsqualität und Kundenzufriedenheit nicht möglich. Als Konsequenz aus dem starken Einfluss der Dienstleistungsqualität auf die Kundenzufriedenheit und der nachgewiesenen starken Auswirkung auf die Kundenbindung, wird Anlagenbauern empfohlen Abwärmeanlagen in ihr Produktportfolio mit aufzunehmen.

Eine wichtige Information gibt der negative Zusammenhang zwischen den SERVQUAL-Erwartungen und der Gesamtzufriedenheit. Dies wird am Pfadkoeffizient von -0,128 deutlich.

Dieser negative Wert kann mit der vorweggenommenen negativen Erwartungshaltung des Kunden begründet werden. Mit anderen Worten rechnet der Kunde tendenziell damit, dass der Anlagenbauer seine Erwartungen nicht erfüllt. In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass es für den Anlagenbauer umso wichtiger ist, die Erwartung der aus Kundensicht bedeutenden Dimensionen zu erfüllen, denn nur dadurch wird, wie schon im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, eine höhere Kundenbindung erreicht. Als Konsequenz daraus wird Anlagenbauern, die die Erwartung in den bedeutenden Dimensionen nicht erfüllen können empfohlen, tendenziell vom Vertrieb von Abwärmeanlagen abzusehen. Die negative Grundeinstellung lässt sich zusätzlich als eine grundsätzliche Tendenz in der Wärmebranche deuten.

Die Erwartungen des Kunden werden in diesem Bereich vermutlich oftmals nicht erfüllt. Dies bietet Anbietern, die diese Erwartungen erfüllen einen weiteren Wettbewerbsvorsprung, da die Kunden mit dem Angebot zufrieden sind.

### Wertung der Dimensionen

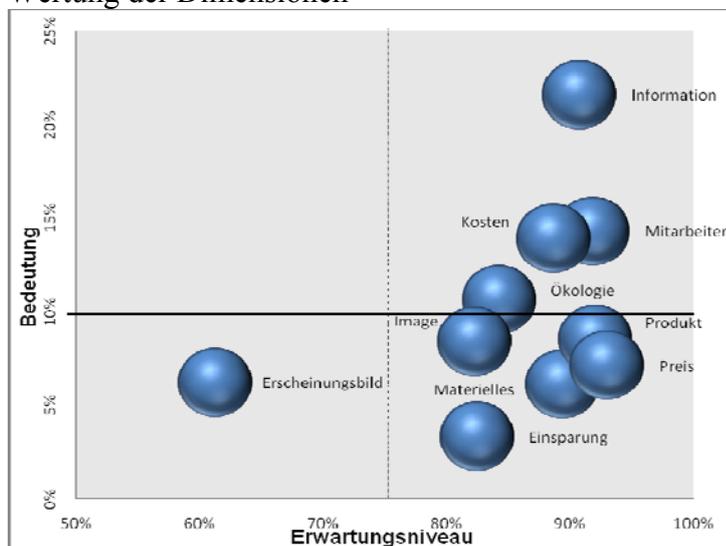


Fig.19: Aktivitäten-Portfolio

Die Dimensionen lassen sich anhand ihrer Relevanz in vier Kategorien einordnen, auf welche im weiteren Verlauf detailliert eingegangen wird:

Kategorie 1: Information

Kategorie 2: Kosten, Mitarbeiter, Ökologie

Kategorie 3: Image, Produkt, Preis, Materielles, Einsparung

Kategorie 4: Erscheinungsbild

Die Dimension Information in der Kategorie 1 besitzt mit 21,6% die höchste Bedeutung für die Kunden und zusätzlich stellen sie sehr hohe Erwartungen daran. Für Anlagenbauer, die Abwärmeanlagen in ihr Produktportfolio mit aufnehmen wollen, ist somit entscheidend, dass sie potentielle Kunden über Abwärme informieren.

Kategorie 2, mit einer ebenfalls hohen Relevanz, wird von den Dimensionen Kosten, Mitarbeiter und Ökologie gebildet. Der Dimension Mitarbeiter wird dabei der höchste Stellenwert, sowohl in Bezug auf Erwartung und Bedeutung zugeschrieben. So ist in dieser Dimension die schnelle Reaktion auf Kundenprobleme sehr bedeutend. Anlagenbauer sollten daher darauf achten, dass sie einen gut funktionierenden Kundenservice anbieten. Die Dimension Kosten hat ebenfalls eine hohe Relevanz. Der Indikator Investitionskosten ist dabei für die Unternehmen am wichtigsten. Diese Erkenntnis stimmt auch mit der

Feststellung überein, dass in vielen Industriebranchen die Amortisationsdauer als wichtigster Maßstab für die Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen gilt. Anlagenbauer sollten daher versuchen, den Preis für Abwärmeanlagen möglichst gering zu halten. Eine weitere interessante Erkenntnis dieser Studie liegt im hohen Stellenwert der Dimension Ökologie. Unternehmen sehen in Abwärmeanlagen die Möglichkeit, den Ausstoß von Treibhausgasen zu verringern. Anlagenbauer könnten diese Aussage aufgreifen und dies in die Entwicklung von Abwärmeanlagen mit einfließen lassen. Könnten Abwärmeanlagen einen Beitrag leisten, um Emissionen zu verringern, würde dies von Unternehmen sehr positiv aufgenommen.

Die Kategorie 3 zeichnet sich durch eine hohe Erwartungshaltung, jedoch nur eine geringe Bedeutung aus. Unternehmen erwarten in der Dimension Image, dass ihr Unternehmen durch Abwärmeanlagen umweltfreundlicher wahrgenommen wird. Diesen Aspekt kann der Anbieter aufgreifen und neben Abwärmeanlagen Marketingkonzepte für seine Kunden anbieten, durch die sie ein umweltfreundlicheres Image erhalten. In der Dimension Produkt ergab der Indikator kundenspezifische Anlagen zu erkennen, wie wichtig dem Kunden eine Anpassung an seine Gegebenheiten ist. In der Dimension Preis erwartet der Kunde Transparenz. In der Dimension Materielles kann vor allem der Indikator Internetangebot Einfluss auf gute Dienstleistungsqualität nehmen. In der Dimension Einsparung wurde dem Indikator Erlöse aus der Energieeinspeisung eine geringe Bedeutung zugeschrieben. Der Kunde hat somit nicht das Ziel mit Abwärmeanlagen einen Gewinn zu erwirtschaften, sondern damit Kosten einzusparen.

In der vierten Kategorie ist die Dimension Erscheinungsbild enthalten. Unternehmen schreiben dieser nur eine geringe Bedeutung zu und die Erwartung ist um 21% geringer als der der nächstliegenden Dimension. Dadurch kann die Erwartung, wie am Indikator gepflegte Kleidung der Mitarbeiter deutlich wird, leicht erfüllt werden. Jedoch hat dies wenig Einfluss auf die Beurteilung der Dienstleistungsqualität.

Die durch diese Studie erhaltenen Daten bilden eine Grundlage zur Einführung einer Zusatzleistung im Bereich industriellen Abwärmenutzung. Für das weitere Vorgehen wird empfohlen, die Untersuchung auf zusätzliche Branchen auszudehnen, um ein möglichst umfassendes Bild über die Erwartungen der Kunden zu erhalten.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die speicherunterstützten Verstromung von Abwärme bietet eine weitere Option zur Steigerung der Energieeffizienz von Industrieprozessen durch thermische Energiespeicher. Insbesondere bei energieintensiven Prozessen, wie sie beispielsweise in der Elektrostahl- und Zementindustrie auftreten, ermöglichen Energiespeicher die Nutzung von Abwärmeströmen, die bisher aufgrund von ausgeprägten zeitlichen Schwankung von Leistung und Temperatur nur begrenzt ausgenutzt werden konnten.

Wirtschaftlich besonders attraktiv sind dabei Anwendungen, bei denen ausgeprägte Schwankungen der Leistung bzw. der Temperatur der Abwärme mit Perioden im Bereich von Minuten bis zu einer Stunde auftreten. Thermische Kreisprozesse können nur eingeschränkt mit derartigen Wärmequellen angetrieben werden, die zulässigen Temperaturtransienten begrenzen die Lastwechselgeschwindigkeit. Andererseits sind die erforderlichen Investitionen für das Speichersystem abhängig von der Speicherkapazität, häufige Be- und Entladezyklen verkürzen die Amortisationszeit.

Bei der Identifikation von wirtschaftlich attraktiven Anwendungen der speicherunterstützten Verstromung sollten folgende Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

- Fällt Abwärme bei Temperaturen  $> 200\text{ °C}$  an? Bei niedrigeren Temperaturen ist eine Verstromung zwar auch möglich, jedoch ist der Wirkungsgrad dann so gering, dass häufig nur niedrige elektrische Leistungen erzeugt werden, der zusätzliche Aufwand für einen Speicher ist häufig nicht wirtschaftlich.
- Die spezifischen Kosten für Speichersysteme sind über weite Temperaturbereiche nur in geringem Maße von der Temperatur der gespeicherten Wärme abhängig; hieraus folgt, dass bei höheren Temperaturen die Kosten bezogen auf die gespeicherte Exergie sinken, auch deshalb empfiehlt sich ein Einsatz bei Prozessen, deren Abwärme bei hohen Temperaturen anfällt.
- Ist eine Rückkopplung der Abwärme in den Prozess möglich? Eine derartige Nutzung sollte gegenüber einer Verstromung immer bevorzugt werden.
- Günstig sind Anwendungen mit einer hohen Betriebsstundenzahl, wie sie bei Prozessen typisch sind, die im Mehrschichtbetrieb gefahren werden
- Treten ausgeprägte Transienten bei Leistung und / oder Temperatur auf? Bei konstanten Abwärmeströmen oder langsamen Transienten bietet der Speichereinsatz keine Vorteile.
- Ist die mittlere Leistung ausreichend hoch? Die leistungsspezifischen Kosten für die Integration und Wartung einer Anlage zur speicherunterstützten Verstromung sinken mit steigender Leistung

Für die Verstromung eignen sich vor allem Dampfkreisprozesse. In Abhängigkeit von der mittleren Temperatur der Abwärme kommen dabei entweder Wasserdampf ( $>300\text{ °C}$ ) oder organische Fluide ( $<300\text{ °C}$ ) als Arbeitsmedien zum Einsatz.

Ist eine Anwendung identifiziert worden, kann ausgehend von der Charakteristik der verfügbaren Abwärme eine Zuordnung zu einem der drei Grundfälle erfolgen:

- Die thermische Leistung schwankt bei einer Temperatur, die immer oberhalb der Maximaltemperatur des eingesetzten Kreisprozesses liegt. Der Speicher kompensiert diese Schwankungen, dem Kreisprozess wird eine konstante Leistung bei konstanter Temperatur bereitgestellt. Die Abwärme fällt i.d.R. als sensible Wärme an, entsprechend eignen sich beispielsweise Zweitank-Speichersysteme mit einer Salzschnmelze.

- Die Temperatur der Abwärme sinkt zeitweise unter die vom Dampfkreislauf geforderte Maximaltemperatur bzw. die Temperaturdifferenz zwischen Abwärmtemperatur und der Verdampfertemperatur variiert stark. Der Speicher wird hier für eine Stabilisierung der Temperatur eingesetzt. Geeignet sind hierfür insbesondere Latentwärmespeicher, bei denen die Ein- bzw. Auskopplung von Energie innerhalb eines schmalen Temperaturbereichs erfolgt.
- Die Temperatur der Abwärme sinkt stetig als Folge eines Abkühlprozesses einer thermischen Masse. Zu Beginn der Abkühlung wird der Speicher mit Abwärme bei hoher Temperatur beladen, während gleichzeitig Abwärme zur Verstromung genutzt wird. Fällt die Temperatur der Abwärme unter die vom Kreisprozess geforderte Maximaltemperatur, wird Wärme vom Speicher auf ausreichend hohem Temperaturniveau bereitgestellt, parallel dazu wird die bei niedrigerer Temperatur direkt verfügbare Abwärme für die Vorwärmung genutzt. Der Speicher ermöglicht damit die Nutzung der Abwärme aus Abkühlprozessen über einen breiteren Temperaturbereich.

Die Einführung der speicherunterstützten Verstromung empfiehlt sich zunächst in energieintensiven Industriezweigen wie der Eisen- und Stahlindustrie und im Baustoffsektor. In diesen Bereichen können Grundprozesse identifiziert werden, die ein hohes Potenzial für eine speicherunterstützte Verstromung bis in den MW-Leistungsbereich aufweisen. Da diese Branchen vor allem in den Schwellenländern ein hohes Wachstum aufweisen, ist in der speicherunterstützten Verstromung auch eine Exporttechnologie zu sehen.

Die Abschätzung des Potenzials der speicherunterstützten Verstromung wird durch die Vielfalt industrieller Prozesse erschwert. Selbst bei ähnlichen Endprodukten können die verfügbaren Abwärmeströme verschiedener Industrieanlagen deutlich voneinander abweichen. Darüber hinaus sind für die Beurteilung möglicher Anwendungsfälle Informationen über den zeitlichen Verlauf von Temperatur und Abwärme erforderlich. Für eine genauere Abschätzung des Potenzials empfiehlt sich die Entwicklung vereinfachter Modelle der Prozesse, die als vielversprechend für die Anwendung der speicherunterstützten Verstromung identifiziert werden. Diese Modelle bilden Referenzfälle ab, mit denen verschiedene Optionen für eine Abwärmenutzung verglichen werden können. Damit kann auch das Potenzial einer Mehrfachnutzung eines Speichersystems untersucht werden. Bei einer derartigen Mehrfachnutzung würde der Speicher nicht nur für die Unterstützung der Verstromung eingesetzt, alternativ könnte gespeicherte Wärme auch wieder zurück in den Prozess gekoppelt werden oder in der Gebäudeheizung genutzt werden.

## 7 Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Struktur des Energieverbrauchs
- [2] Wongsuwan, W., et al., 2001, „A review of chemical heat pump technology and application“, Applied Thermal Engineering 21, 1489-1519
- [3] Besch, H., Neuffer, H., Witterhold, F., et al., 2000, „Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und erneuerbarer Energien“
- [4] Lambrecht, J., Karsten, D., 1982, „Stromerzeugungspotenzial aus industrieller Abwärme in der deutschen chemischen und petrochemischen Industrie einschließlich Erdöl-Raffinerien“, Schlussbericht BMFT-FB-T 82-042
- [5] Bormann, H., et al., 1983, „Abwärme-Energieumwandlungsprozess“, Forschungsbericht BMFT-T 83-173
- [6] Huppmann, G., et al., 1985, „Abwärmenutzung in der Industrie unter Verwendung des organischen Rankine Kreisprozesses (ORC), Forschungsbericht BMFT T85-110
- [7] Beier, W., et al., 1984, „Kraft-Wärme-Kopplung mit Abwärme aus diskontinuierlichem Betrieb“, Schlussbericht, BMFT-FB-T84-086
- [8] N.N., 2001, „Niedertemperaturverstromung mittels einer ORC-Anlage im Werk Lengfurt der Heidelberger Zement AG“, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
- [9] Brandstätter, R., 2008, „Industrielle Abwärmenutzung-Beispiele & Technologien“, Amt der Oö. Landesregierung, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung Umweltschutz
- [10] Produktinformation PowerCycle200, UTC Power
- [11] Produktinformation Waste Heat Generator, ElectraTherm, Inc.
- [12] Stephan, W., et al., 2005, „Effiziente Energieverwendung in der Industrie – Teilprojekt Metallschmelzbetriebe“, Bayer. Landesamt für Umweltschutz
- [13] Beckmann, G., Gilli, P.V., 1984: „*Thermal Energy Storage*“, Springer Verlag
- [14] Pacheco, J.E., 2002, "Final Test and Evaluation Results from the Solar Two Project", Sandia National Laboratories
- [15] Relloso, S., Gutierrez, Y., 2008, "Real application of molten salt thermal storage to obtain high capacity factors in parabolic trough plants", Solar Paces Conference, Las Vegas
- [16] Goldstern, W., 1963, "Dampfspeicheranlagen", 2. Auflage, Springer Verlag
- [17] Laing, D. et al., 2009 "Test Results of Concrete Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Power Plants", ASME J. of Solar Energy Engineering, Vol.131
- [18] Janz, G.J., et al., 1979, "Physical Properties Data Compilation Relevant to Energy Storage II. Molten Salts: Data on Single and Multi-Component Salt Systems", NSRDS-National Standard Reference Data System.
- [19] Steinmann, W.D., Laing, D., Tamme, R., 2009, "Development of PCM Storage for Process Heat and Power Generation". Journal of Solar Energy Engineering, 131, ASME. DOI: 10.1115/1.3197844. ISSN 0199-6231
- [20] Rudolph, W., Wagner, U., 2008, „Energieanwendungstechnik“, Springer
- [21] Wei, D., et al., 2007, „Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery“, Energy Conversion and Management, Vol. 48, 1113-1119
- [22] Köhler, S., 2006, „Geothermisch angetriebene Dampfkraftprozesse“, Geoforschungszentrum Potsdam
- [23] Fratzscher, W., Stephan, K., 2000, „Strategien zur Abfallenergieverwertung“, Vieweg

- [24] S. Spoelstra, S., Haije, W.G, Dijkstra, J.W., 2002, „Techno-economic feasibility of high-temperature high-lift chemical heat pumps for upgrading industrial waste heat”, *Applied Thermal Engineering* 22 ,1619–1630
- [25] N.N., 2007, "Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions", IEA
- [26] Voj, L. „Stickoxidemission von Lichtbogenöfen der Stahlindustrie", GRIPS media GmbH, Bad Harzburg, 2006
- [27] Rentz, O., Hähre, S., Jochum, R., Spengler, T. „Report on Best Available Techniques (BAT) in the Electric Steelmaking Industry", Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung, Karlsruhe, 1997
- [28] Legmann, H., 2002, "Recovery of industrial heat in the cement industry by means of the ORC-process", Cement Industry Technical Conference
- [29] Behrmann, T. (2009): Statistisches Bundesamt Deutschland, unter: <http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Zeitreihen/WirtschaftAktuell/Preismonitor/Uebersicht/Preismonitor.psml>, Stand: 11.2009, Druckdatum: 11.01.2010.
- [30] KfW Bankengruppe (2005): KfW-Befragung zu den Hemmnissen und Erfolgsfaktoren von Energieeffizienz in Unternehmen, Frankfurt am Main 12.2005.
- [31] Streckfuß, G et al. (2009): QFD, DOE und TRIZ als wirkungsvolle Methoden-Kombination im Rahmen von Design for Six Sigma, in: Töpfer, A. [Buchverf.]: *Lean Six Sigma*, 1. Auflage, Heidelberg 2009.
- [32] Festge, F. (2006): Kundenzufriedenheit und Kundenbindung im Investitionsgüterbereich, 1. Auflage, Wiesbaden 2006.
- [33] Bruhn, M. (2009): Relationship Marketing, 2.Auflage, München 2009.
- [34] Bruhn, M. (2001): *Relationship Marketing*, 1. Auflage, München 2001.
- [35] Nerdinger, F. et al. (2007): Kundenzufriedenheit und Kundenbindung, in: Moser, K. [Buchverf.]: *Wirtschaftspsychologie*, 1. Auflage, Heidelberg 2007.
- [36] Homburg, C. et al (2007): Kundenzufriedenheit und Kundenbindung, in: Herrmann, A. et al. [Buchverf.]: *Handbuch Produktmanagement*, 3. Auflage, Wiesbaden 2007.
- [37] Steffen, D. (2006): Die Potentialqualität von Dienstleistungen, 1. Auflage, Wiesbaden 2006.
- [38] Parasuraman, A. et al (1985): A Conceptual Model of Service Quality and Its Implications for Future Research, in: *Journal of Marketing* 1985, Heft 49, S.41-50.
- [39] Bruhn, M. (2008): Qualitätsmanagement für Dienstleistungen, 7. Auflage, Berlin, Heidelberg 2008.
- [40] Parasuraman, A. et al. (1992): *Qualitätsservice: was Ihre Kunden erwarten - was Sie leisten müssen*, 1. Auflage, Frankfurt am Main 1992.
- [41] Homburg, C. et al. (1996): Konzeptualisierung und Operationalisierung komplexer Konstrukte - Ein Leitfaden der Marketingforschung, in: *Marketing ZFP* 1996, Heft 1, S.5-24.
- [42] Parasuraman, A. et al. (1988): SERVQUAL: A Multiple-Item Scale for Measuring Consumer Perception of Service Quality, in: *Journal of Retailing* 1988, Heft 64, Nr.1, S.12-40.
- [43] Keller, N. et al. (2006): Messung der Kundenbeziehungsqualität im B2B-Marketing - eine Studie im industriellen Großhandel, in: Universität Dortmund - Lehrstuhl für Marketing, Dortmund 02.2006.
- [44] Parasuraman, A. et al. (1991): Refinement and Reassessment of the SERVQUAL Scale, in: *Journal of Retailing* 1991, Heft 67, Nr.4, S.420-450.
- [45] Vandaele, D. et al. (2004): Development of a measurement scale for business-to-business service quality: assessment in the facility services sector, in: Universität Gent, Gent 2004.
- [46] Sträter, D. (2008): Prozessbezogene Kundenzufriedenheitsanalysen im internationalen Maschinen- und Anlagenbau, in: Universität Dortmund, Dortmund 2008.

- [47] Bahia, K. et al. (2000): A reliable and valid measurement scale for the perceived service quality of banks, in: *International Journal of Bank Marketing* 2006, Heft 18/2, S.84-91.
- [48] Westbrook, K. et al. (1998): Business-to-Business Selling Determinants of Quality, in: *Industrial Marketing Management* 1998, Heft 27, S.51-62.
- [49] KfW Bankengruppe (2005): KfW-Befragung zu den Hemmnissen und Erfolgsfaktoren von Energieeffizienz in Unternehmen, Frankfurt am Main 12.2005.
- [50] Schmidt, C. et al. (2003): Möglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs branchenübergreifender Techniken in den Bereichen Industrie und Kleinverbrauch, in: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe/München 2003.
- [51] Prammer, H. (2009): *Integriertes Umweltkostenmanagement*, 1. Auflage, Wiesbaden 2009.
- [52] Meffert, H. et al. (2009): *Dienstleistungsmarketing*, 6. Auflage, Wiesbaden 2009.
- [53] Götz, O. et al. (2004): Analyse von Strukturgleichungsmodellen mit Hilfe der Partial-Least-Squares(PLS)-Methode, in: *Die Betriebswirtschaft* 2004, Heft 64, S.717-738.
- [54] Henseler, J. et al. (2009): The use of partial least squares path modeling in international marketing, in: *Advances in International Marketing* 2009, Heft 20, S.277-319.
- [55] Wolf, J. et al. (2007): *Methodik der empirischen Forschung*, 2. Auflage, Wiesbaden 2007.
- [56] Ringle, C. et al. (2007): Beurteilung der Ergebnisse von PLS-Pfadanalysen, in: *Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt (WiSt)* 2007, Heft 2, S.211-216.
- [57] Henseler, J. et al. (2005): Einführung in die PLS-Pfadmodellierung. *Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* 2005, Heft 2, S.70-75.

# Anhang

## A Original SERVQUAL Fragebogen

1. Firma X hat modern aussehende Betriebs- und Geschäftsausrüstungen
2. Firma X hat angenehm ins Auge fallende Einrichtungen
3. Die Arbeitnehmer der Firma X sind adrett gekleidet
4. Broschüren und sonstige Mitteilungen der Firma X sind gut gestaltet
5. Wenn Firma X verspricht, etwas zu einem bestimmten Termin zu erledigen, hält sie den Termin ein
6. Wenn Sie ein Problem haben, ist man bei der Firma X aufrichtig daran interessiert, es zu lösen
7. Firma X führt den Service gleich beim ersten Mal richtig aus
8. Firma X leistet ihre Dienste zu den versprochenen Terminen
9. Firma X besteht auf irrtumsfreien Belegen für die Kunden
10. Arbeitnehmer der Firma X sagen Ihnen genau wann der Service geleistet wird
11. Mitarbeiter der Firma X bedienen Sie prompt
12. Arbeitnehmer der Firma X sind stets bereit Ihnen zu helfen
13. In Firma X ist man nie zu beschäftigt, um auf Ihre Wünsche einzugehen
14. Das Verhalten der Arbeitnehmer der Firma X flößt Ihnen Vertrauen ein
15. Bei Ihren Transaktionen mit Firma X fühlen Sie sich sicher
16. Mitarbeiter der Firma X sind stets gleichbleibend höflich zu Ihnen
17. Arbeitnehmer der Firma X haben das Fachwissen zur Beantwortung Ihrer Fragen
18. Die Firma X widmet Ihnen individuelle Aufmerksamkeit
19. Firma X hat Betriebszeiten, die allen ihren Kunden gerecht werden
20. Firma X hat Mitarbeiter, die sich Ihnen persönlich widmen
21. Firma X liegen Ihre Interessen am Herzen
22. Die Mitarbeiter der Firma X verstehen Ihren spezifischen Servicebedarf

Tab.8: Original SERVQUAL Fragebogen

# B Fragebogen für die Papierindustrie

## Studie zur Abwärmenutzung in der Papierindustrie

Sehr geehrte Damen und Herren,

im Rahmen meiner Bachelorarbeit führe ich eine Studie durch, die dazu beitragen soll Abwärmetechnologien in der Papierindustrie zu etablieren. Ich würde dazu gerne Ihre persönliche Meinung zum Thema Abwärme über diese Online-Befragung in Erfahrung bringen. Mit Ihrer Unterstützung leisten Sie einen wesentlichen Beitrag für den empirischen Teil meiner Bachelorarbeit. Vorab besten Dank für Ihre Mühe und Entgegenkommen, diesen Fragebogen zu beantworten.

Freundliche Grüße

Florian Geier

Stellen Sie sich bitte einen ausgezeichneten Hersteller von Wärmeanlagen vor. Dieser bietet Produkte und Dienstleistungen an, die Ihren Qualitätsansprüchen entsprechen, bzw. Sie für angemessen halten. Bitte geben Sie an, in welchem Umfang ein solcher Anlagenbauer die beschriebenen Merkmale haben sollte.

Je mehr Sie der Aussage zustimmen, desto weiter rechts (7) sollten Sie Ihr Kreuz setzen.

Je weniger Sie den Aussagen zustimmen, desto weiter links (1) sollten Sie Ihr Kreuz setzen.

---

### Hervorragende Anlagenbauer sollten ausgezeichnet über...

	stimme gar nicht zu	1	2	3	4	5	6	7	stimme voll zu
1. ...den Nutzen von Abwärmeanlagen informieren.		<input type="radio"/>							
2. ...die Kosten von Abwärmeanlagen informieren.		<input type="radio"/>							
3. ...verschiedene Technologien zur Abwärmenutzung informieren.		<input type="radio"/>							
4. ...Voraussetzungen für Abwärmeanlagen informieren (z.B. Platzbedarf).		<input type="radio"/>							
5. ...über finanzielle Förderungen zur Abwärmenutzung informieren (z.B. staatliche Förderprogramme).		<input type="radio"/>							

**Hervorragende Anlagenbauer sollten folgendes anbieten:**

	stimme gar nicht zu	1	2	3	4	5	6	7	stimme voll zu
6. Gut gestaltete Broschüren und gedruckte Informationsmaterialien über Abwärmeanlagen.	<input type="radio"/>								
7. Gut gestaltetes Internetangebot über Abwärmenutzung.	<input type="radio"/>								

**Hervorragende Anlagenbauer sollten...**

	stimme gar nicht zu	1	2	3	4	5	6	7	stimme voll zu
8. ...Abwärmeanlagen anbieten, die speziell auf die Kundenbedürfnisse zugeschnitten sind.	<input type="radio"/>								
9. ...nur ausgereifte Technologien in ihren Abwärmeanlagen verwenden.	<input type="radio"/>								
10. ...sicher stellen, dass Abwärmeanlagen zu keiner Zeit den Produktionsprozess stören.	<input type="radio"/>								
11. ...die Kosten für Abwärmeanlagen sehr transparent darstellen.	<input type="radio"/>								
12. ...ein sehr gutes Preis-Leistungsverhältnis bei Abwärmeanlagen haben.	<input type="radio"/>								

**Mitarbeiter hervorragender Anlagenbauer sollten...**

	stimme gar nicht zu	1	2	3	4	5	6	7	stimme voll zu
13. ...immer freundlich und höflich sein.	<input type="radio"/>								
14. ...gepflegt gekleidet sein.	<input type="radio"/>								
15. ...jederzeit für ihre Kunden erreichbar sein.	<input type="radio"/>								
16. ...fachkundig über Abwärmeanlagen informieren können.	<input type="radio"/>								

**Mitarbeiter hervorragender Anlagenbauer sollten...**

	stimme gar nicht zu	1	2	3	4	5	6	7	stimme voll zu
17. ...sehr schnell auf Kundenprobleme reagieren.	<input type="radio"/>								
18. ...in der Planung zeitnah über auftretende Mängel informieren.	<input type="radio"/>								
19. ...sehr kompetent im Bereich Abwärmenutzung sein.	<input type="radio"/>								

**Abwärmeanlagen sollten dazu beitragen:**

	stimme gar nicht zu	1	2	3	4	5	6	7	stimme voll zu
20. Treibhausgase zu reduzieren	<input type="radio"/>								
21. Rohstoffe zu schonen	<input type="radio"/>								
22. Die Region aus ökologischer Sicht zu entlasten	<input type="radio"/>								
23. Kosten einzusparen	<input type="radio"/>								
24. Erlöse aus Energieeinspeisung zu erbringen	<input type="radio"/>								

**Durch Abwärmeanlagen sollte unser Unternehmen...**

	stimme gar nicht zu	1	2	3	4	5	6	7	stimme voll zu
25. ...umweltbewusster wahrgenommen werden.	<input type="radio"/>								
26. ...innovativer wahrgenommen werden.	<input type="radio"/>								

**Abwärmeanlagen sollten...**

	stimme gar nicht zu	1	2	3	4	5	6	7	stimme voll zu
27. ...geringe Informationskosten verursachen (z.B. bei der Suche nach Anbietern).	<input type="radio"/>								
28. ...geringe Investitionskosten verursachen.	<input type="radio"/>								
29. ...geringe Wartungskosten verursachen.	<input type="radio"/>								

Bitte beantworten Sie anschließend noch ein paar allgemeine Fragen auf einer Skala von 1 bis

7. Dabei stellt 1 die schlechteste Einschätzung und 7 die beste Einschätzung dar.

	Sicher nicht	1	2	3	4	5	6	7	Auf jeden Fall
30. Sind Sie mit dem Hersteller Ihrer Wärmanlage insgesamt zufrieden?		<input type="radio"/>							
31. Werden Sie weitere Angebote von dem Hersteller Ihrer Wärmanlage nutzen (z.B. zusätzliche Serviceangebote)?		<input type="radio"/>							

Werden Sie den Hersteller Ihrer Wärmanlage...

	Sicher nicht	1	2	3	4	5	6	7	Auf jeden Fall
32. ...für weitere Anlagen in Betracht ziehen?		<input type="radio"/>							
33. ...weiterempfehlen?		<input type="radio"/>							

34. Ich habe einen sehr positiven Gesamteindruck des Herstellers meiner Wärmanlage.

Sicher nicht	1	2	3	4	5	6	7	Auf jeden Fall
<input type="radio"/>								

Abbildung 1: Fragebogen für die Papierindustrie

## C Auswertung durch SmartPLS bzw. SPSS

Tabelle 9: Konstruktrelabilität der ersten Auswertung  
(Quelle: SmartPLS)

	Konstruktrelabilität
Einsparung	0,671496
Gesamtzufriedenheit	0,921712
Image	0,926239
Information	0,880437
Kosten	0,752798
Loyalty	0,933161
Materielles	0,635477
Mitarbeiter	0,693657
Preis	0,722987
Produkt	0,144253
Öko	0,488349

Pfadkoeffizienten													
Indikator	Einsparung	Ercheinungsbild	Gesamtzufriedenheit	Image	Information	Kosten	Loyalty	Materielles	Mitarbeiter	Preis	Produkt	SERVQUAL-Eröho	
g_eindruck	-0,160	-0,013	0,942	-0,051	-0,121	-0,067	0,896	-0,055	-0,167	-0,123	0,021	-0,121	-0,003
g_kutotal	-0,100	0,079	0,907	-0,077	-0,110	-0,085	0,712	-0,039	-0,126	-0,159	-0,039	-0,117	-0,024
g_weiter	-0,066	-0,042	0,878	0,061	-0,053	-0,016	0,939	0,069	-0,139	-0,067	0,065	-0,044	-0,006
g_wiederko	0,034	-0,112	0,831	0,049	-0,022	-0,005	0,950	0,073	-0,082	0,000	0,160	-0,007	-0,028
g_zusatz	0,009	0,107	0,665	0,061	0,058	-0,052	0,829	-0,030	-0,198	-0,204	0,001	-0,029	0,081
v10c	0,154	-0,022	0,066	0,241	0,106	0,498	0,112	0,047	0,378	0,387	0,637	0,394	0,104
v11d	0,071	0,082	-0,175	0,146	0,265	0,482	-0,141	0,379	0,486	0,787	0,268	0,507	0,240
v12d	0,223	-0,067	-0,060	0,155	0,247	0,467	0,000	0,233	0,550	0,785	0,483	0,504	0,148
v13e	0,076	0,932	0,073	0,040	0,313	0,294	0,007	0,216	0,287	0,033	0,123	0,400	0,291
v14b	0,051	0,914	-0,020	0,179	0,337	0,239	-0,058	0,173	0,265	-0,017	0,075	0,382	0,227
v15e	0,093	0,377	-0,141	0,015	0,259	0,351	-0,253	0,205	0,501	0,233	0,266	0,401	0,126
v16b	0,100	0,082	-0,046	0,309	0,330	0,359	0,074	0,833	0,400	0,404	0,263	0,504	0,231
v17e	0,210	0,282	-0,145	0,167	0,512	0,508	-0,170	0,369	0,795	0,508	0,408	0,662	0,178
v18e	0,320	0,134	-0,145	0,393	0,398	0,595	-0,059	0,321	0,870	0,601	0,580	0,721	0,275
v19e	0,047	0,105	-0,001	0,337	0,346	0,328	0,039	0,269	0,540	0,418	0,326	0,464	0,053
v1a	0,361	0,328	-0,058	0,188	0,738	0,355	0,057	0,143	0,309	0,079	0,432	0,563	0,259
v20f	0,106	0,222	0,052	0,221	0,200	0,253	0,038	0,238	0,237	0,240	0,240	0,442	0,927
v21f	-0,043	0,221	-0,023	0,327	0,190	0,280	0,010	0,335	0,212	0,253	0,164	0,443	0,912
v22f	0,092	0,318	-0,063	0,455	0,256	0,262	-0,014	0,235	0,210	0,176	0,151	0,466	0,863
v23g	0,276	-0,026	-0,012	0,167	0,311	0,654	0,099	0,220	0,441	0,418	0,535	0,495	0,052
v24g	1,000	0,070	-0,144	0,070	0,285	0,319	-0,011	0,105	0,267	0,187	0,362	0,362	0,058
v25h	0,140	0,028	-0,014	0,950	0,307	0,183	0,132	0,358	0,312	0,194	0,403	0,488	0,343
v26h	-0,001	0,190	-0,111	0,957	0,359	0,224	-0,007	0,469	0,348	0,173	0,290	0,529	0,370
v27i	0,282	0,400	0,012	0,267	0,430	0,720	0,030	0,343	0,538	0,367	0,538	0,682	0,383
v28i	0,182	0,204	-0,151	0,128	0,280	0,778	-0,097	0,322	0,401	0,410	0,273	0,532	0,283
v29i	0,157	0,184	-0,100	0,009	0,290	0,703	-0,114	0,286	0,487	0,559	0,230	0,493	0,073
v2a	0,240	0,171	-0,119	0,258	0,890	0,434	-0,031	0,260	0,542	0,422	0,445	0,708	0,215
v3a	0,226	0,239	-0,145	0,478	0,746	0,320	-0,037	0,345	0,453	0,188	0,314	0,621	0,228
v4a	0,165	0,330	-0,094	0,270	0,820	0,391	0,019	0,355	0,414	0,265	0,316	0,630	0,170
v5a	0,245	0,162	-0,104	0,027	0,635	0,260	-0,051	0,179	0,339	0,221	0,140	0,428	0,073
v6b	-0,069	0,361	0,010	0,241	0,404	0,231	-0,017	0,366	0,304	0,201	0,069	0,369	0,028
v7b	0,057	0,272	-0,032	0,375	0,238	0,275	-0,012	0,702	0,239	0,170	0,124	0,392	0,232
v8c	0,380	0,129	0,000	0,328	0,546	0,427	0,109	0,305	0,548	0,360	0,846	0,659	0,223
v9c	0,165	0,103	-0,105	0,164	0,076	0,288	-0,089	0,133	0,261	0,287	0,627	0,310	0,056

Tab.10: Pfadkoeffizienten (Quelle: SmartPLS)

Fornell-Lacker Kriterium	Einsparung	Erscheinungsbild	Gesamtzufriedenheit	Image	Information	Kosten	Loyalty	Materielles	Mitarbeiter	Preis	Produkt	SERVQUAL-Öko	AVE
Einsparung													1,000
Erscheinungsbild	0,005												0,842
Gesamtzufriedenheit	0,021	0,001											0,855
Image	0,005	0,014	0,005										0,910
Information	0,081	0,125	0,016	0,123									0,522
Kosten	0,102	0,085	0,007	0,046	0,220								0,511
Loyalty	0,000	0,001	0,773	0,004	0,000	0,001							0,824
Materielles	0,011	0,045	0,003	0,190	0,139	0,173	0,002						0,593
Mitarbeiter	0,071	0,091	0,026	0,120	0,308	0,435	0,022	0,181					0,483
Preis	0,035	0,000	0,022	0,037	0,106	0,364	0,008	0,151	0,434				0,618
Produkt	0,131	0,012	0,000	0,130	0,180	0,320	0,008	0,068	0,347	0,228			0,505
SERVQUAL-Erwartungen	0,131	0,181	0,017	0,285	0,616	0,616	0,001	0,344	0,691	0,413	0,467		0,264
Öko	0,003	0,080	0,000	0,140	0,058	0,087	0,000	0,089	0,059	0,061	0,042	0,251	0,812

Tab.11: Fornell-Lacker-Kriterium (Quelle: SmartPLS)