

## Lineare Optimierung eines Systems zur solaren Kühlung unter besonderer Berücksichtigung unterschiedlicher Speicherkonzepte – ein Fall für oemof!

Franziska Pleißner<sup>1</sup>, Henning Francke<sup>2</sup>, Silke Köhler<sup>1</sup>, Jann Launer<sup>3</sup>, Christoph Pels Leusden<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Beuth Hochschule für Technik Berlin

<sup>2</sup>Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam

<sup>3</sup>Reiner Lemoine Institut, Berlin

### Abstract

Die vorliegende Arbeit untersucht den Einfluss variierender Speicherkapazitäten auf zwei Konzepte zur Kälteversorgung eines Campusgebäudes im Oman. Es wird zum einen ein thermisches System mit Wärmespeicher und Absorptionskältemaschine betrachtet, zum anderen ein Elektrisches mit Stromspeicher und Kompressionskältemaschine. Dafür wird das Open-Source-basierte Simulationswerkzeug oemof verwendet, das die lineare Optimierung verschiedenster Energiesysteme erlaubt.

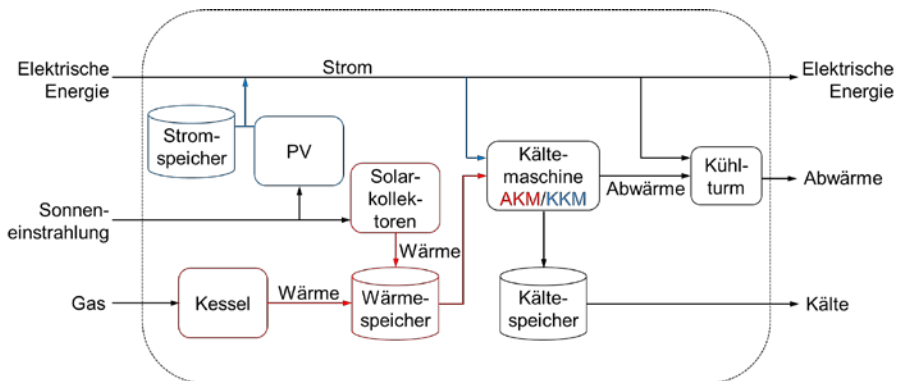
Bei der Systemoptimierung sind die Speicher auf beiden Seiten der jeweiligen Kältemaschine zu betrachten und zu optimieren. Bei kostenoptimaler Auslegung erreichen die Konzepte solare Deckungsanteile von 87% (thermisches Konzept) bzw. 73% (elektrisches Konzept). Größer dimensionierte Speicher ermöglichen eine Verringerung der Nennleistung der kälteerzeugenden Komponenten bei gleichzeitiger Vergrößerung des solaren Deckungsanteils um ca. 3 %-Punkte bzw. 16%-Punkte bei Mehrkosten von weniger als 5% bzw. 10% (jeweils thermisches und elektrisches System). Die für einen vorgegebenen solaren Deckungsanteil benötigte Fläche ist für beide Konzepte ähnlich groß. Bei den aktuellen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen erreicht das elektrische Konzept einen höheren solaren Deckungsanteil bei gleichzeitig besserer Wirtschaftlichkeit als das thermische Konzept.

### 1 Einleitung

Dem voranschreitenden Klimawandel und der Abnahme von fossilen Energiereserven muss Rechnung getragen werden, indem deren Einsatz so stark wie möglich reduziert wird. Neben dem Substituieren von fossiler durch erneuerbare Primärenergie ist deren effiziente Nutzung eine wichtige Stellschraube. Die Optimierung von Auslegung und Betrieb komplexer Energiesysteme spielt dabei eine große Rolle. Unter- oder überdimensionierte Anlagen haben nicht nur ökonomische Nachteile, sondern verschwenden außerdem Ressourcen oder erfüllen die ihnen zugeordnete Aufgabe nicht. Zur Systemanalyse, -bewertung und -optimierung eignen sich Simulationsmodelle, da sie erlauben, das Zusammenspiel verschiedener Systemkomponenten kostengünstig und schnell in verschiedenen Szenarien zu untersuchen. Open-Source-basierte Simulationsumgebungen wie oemof [1] ermöglichen, solche Rechnungen und ihre Ergebnisse transparent und vollständig nachvollziehbar abzubilden.

Die vorliegende Arbeit stellt ein Modell vor, das zwei Konzepte der solaren Kühlung für ein Gebäude innerhalb des Innovation Park Muscat im Oman untersucht. Die Kühlaufgabe wurde in [2] für ein Anlagenkonzept vorgestellt. Die vorliegende Untersuchung erweitert die Betrachtung um zusätzliche Komponenten wie eine alternative Kälteerzeugung, solare Stromerzeugung und eine breite Varianz unterschiedlicher Speicher.

Es findet ein Vergleich zwischen Kälteerzeugung durch Kompressions- und Absorptionskälteanlagen mit der jeweils entsprechenden Energieversorgung und -speicherung statt. Abbildung 1 zeigt ein Schema des Modells.



**Abbildung 1: Vereinfachtes Schema des erarbeiteten Modells**

In der Untersuchung werden zum einen die beiden Konzepte zur Kälteerzeugung vergleichend bewertet. Zum anderen wird die Dimensionierung der Komponenten optimiert. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die gegenseitige Beeinflussung der Komponenten gelegt. Die Arbeit orientiert sich an folgenden Forschungsfragen:

1. Ermöglicht eine großzügige Speicherdimensionierung eine Reduzierung der Nennleistung anderer Komponenten ohne Komforteinbußen, also die Unterdeckung des Bedarfs?
2. Ist dabei die Investition in den Kälte- oder den Wärmespeicher vorteilhafter?
3. Welches Konzept erzielt bei vernünftiger Dimensionierung den höchsten solaren Deckungsanteil?
4. Ergibt sich bei gleichem solaren Deckungsanteil ein Vorteil für die Kälteerzeugung durch eine Kompressionskältemaschine oder eine Absorptionskältemaschine hinsichtlich Gesamtkosten oder Kollektorplatzbedarf?

## 2 Versorgungsaufgabe und Versorgungskonzepte

Für die Deckung des Kältebedarfs eines Gebäudes werden zwei Konzepte zur Kälteerzeugung analysiert (siehe Abbildung 1). Bei dem Gebäude handelt es sich um ein Campusgebäude im Oman, das tagsüber einen erhöhten Kühlbedarf aufweist. Es ist somit eine teilweise Korrelation von Kühlbedarf und solarer Einstrahlung gegeben. In Konzept 1 wird eine Absorptionskältemaschine (AKM) mit einer Wärmeversorgung durch Solarkollektoren und einen Gaskessel betrachtet. Das Konzept enthält alle in Abbildung 1 gezeigten Komponenten bis auf die Kompressionskältemaschine (KKM). In Konzept 2 wird eine KKM, deren Strombedarf durch PV-Anlagen und örtliche Stromversorgung gedeckt wird, untersucht. Konzept 2 besteht aus allen blauen und schwarzen Komponenten der Abbildung. Zur Deckung bzw. Speicherung von Spitzen enthalten beide Konzepte Kältespeicher, sowie Wärme- (Konzept 1) oder Stromspeicher (Konzept 2).

Die zu erzeugende Kälte und die Solareinstrahlung sind beide als Zeitreihen vorgegeben (s. Abbildung 2) [3]. Der Gesamtkühlbedarf über das Jahr beträgt 721 GWh.

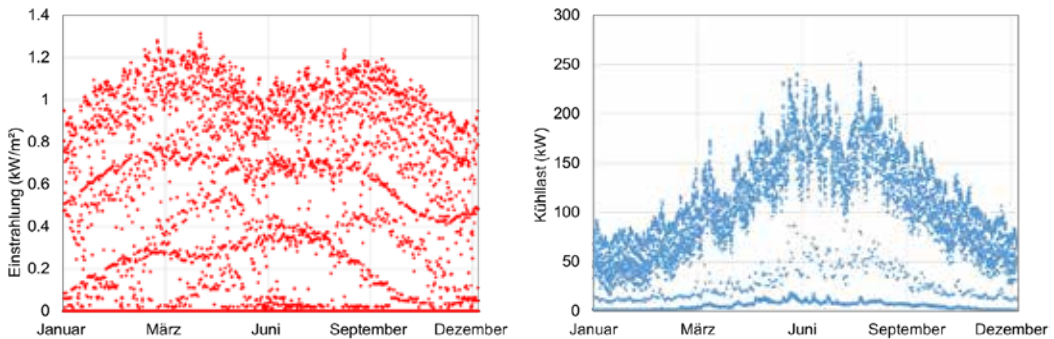


Abbildung 2: Globalstrahlung (links) und Kühllast (rechts) Daten aus [3]

### 3 Modellierung

Die Modellierung erfolgt mit dem Open-Source-basierten Simulationswerkzeug oemof (Open Energy System Modelling Framework) [1]. Durch seinen modularen Aufbau erlaubt es die lineare Optimierung verschiedenster und komplexer Modelle. Die Optimierung zielt auf Minimierung der Gesamtkosten. Freie Parameter können sowohl die Größe der jeweiligen Komponenten (Entwurfsoptimierung) als auch der Einsatz der Komponenten bei vorgegebener Größe (Einsatzoptimierung) sein. Eine Mischung, d.h. Entwurfsoptimierung für einen Teil der Komponenten bei gleichzeitiger Einsatzoptimierung der verbleibenden Komponenten, ist möglich.

Es wird eine stundenaufgelöste Jahressimulation durchgeführt, um die Lösung für die insgesamt wirtschaftlichste Deckung des vorgegebenen Kältebedarfs zu ermitteln. Dafür wird für jede Stunde des Jahres die Energiebilanz aus Quellen (elektrische Energie, Solareinstrahlung und Gas) und Senken (elektrische Energie, Abwärme und Kälte) aufgestellt. Bei Bedarf werden die Speicher be- und entladen.

#### 3.1 Annahmen und Vorgaben

Tabelle 1 und Tabelle 2 fassen die technischen und wirtschaftlichen Eckdaten der Simulation zusammen. Für Kollektor und PV-Anlage wurde der Ertrag nicht mit Hilfe von Anlagenwirkungsgraden ermittelt, sondern es werden Ertragszeitreihen (für thermische Solarkollektoren pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche bzw. für PV-Anlagen pro kW<sub>p</sub>) verwendet, die auf der in Abbildung 2, links gezeigten Globalstrahlung beruhen. Die Zeitreihen wurden [4] entnommen.

Der Schwerpunkt der Simulationen liegt auf dem Vergleich verschiedener Szenarien, um den Einfluss der Speicher auf die Gesamtsysteme zu untersuchen, nicht auf der Ermittlung von Kältegestehungskosten. Aus diesem Grund sind Vereinfachungen in den Annahmen, wie zum Beispiel die Vernachlässigung der Kosten für Verrohrung, zulässig.

Tabelle 1: Technische Annahmen

Verluste thermische Speicher	0,6%/h
Wirkungsgrad elektrischer Speicher	90 %
Stromverbrauch Kühlturm	0,012 kW <sub>el</sub> / kW <sub>th</sub>
Leistungszahl Absorptionskältemaschine	0,7
Leistungszahl Kompressionskältemaschine	3,5
Wirkungsgrad Gaskessel	95 %

**Tabelle 2: Wirtschaftliche Annahmen**

Komponente	Spezifische Investitionskosten	Lebensdauer [a]	OPEX [% Investitionskosten]
Thermischer Solarkollektor	130 €/ m <sup>2</sup>	20	2
Absorptionskälteanlage	600 €/kW	18	3
Kompressionskälteanlage	350 €/kW	15	3,5
Gaskessel	100 €/kW	20	3
Kühlturm	30 €/kW	20	3,5
Wärmespeicher	20 €/kWh	20	1
Kältespeicher	40 €/kWh	20	1
Stromspeicher	165 €/kWh	20	1
Zinssatz	6%		
Preis Strom	0,1 €/kWh		
Preis Gas	0,04 €/kWh		

3.2 Vorgehen

Zunächst wird für beide Konzepte je ein Referenzszenario erstellt. Dieses dient als Vergleich für die später erfolgende Variation der Speichergößen. Das Referenzszenario ist das Ergebnis der Entwurfsoptimierung aller in dem jeweiligen Konzept vorhandenen Komponenten und stellt das System mit den geringsten Gesamtkosten zur Deckung des Kältebedarfs dar. Die Leistung von Kälteanlage, PV-Anlage, Solarkollektoren, Kühlturm und Gaskessel sowie die Kapazitäten von Strom-, Wärme- und Kältespeicher sind demnach in diesem Fall freie Parameter der Optimierung und werden mit oemof ermittelt.

Anschließend folgen Variationsrechnungen, die den Einfluss verschiedener Speichergößen auf das Gesamtsystem untersuchen. Die Ergebnisse dieser Variationsrechnungen dienen zur Beantwortung der in Abschnitt 1 gestellten Forschungsfragen. In den Variationsrechnungen werden die Kapazitäten der Speicher festgelegt (Einsatzoptimierung), während die Leistungen der übrigen Komponenten wieder wirtschaftlich optimiert werden (Entwurfsoptimierung). Es findet in Konzept 1 eine Variation der Kapazität des Kältespeichers für verschieden große Wärmespeicher statt, sowie die Variation des Wärmespeichers für verschieden große Kältespeicher. Das Vorgehen für Konzept 2 ist analog, wobei hier der Stromspeicher an Stelle des thermischen Speichers betrachtet wird. Die Tabelle 3 zeigt, welche Speicherkapazitäten festgelegt wurden.

**Tabelle 3 Speichergößen der Variationsrechnungen**

**Konzept 1: Absorptionskälteanlage**

Variation Kältespeicher [kWh]	Kapazität Wärmespeicher (Scharparameter) [kWh]						
50 – 4000	200	400	800	1000	1500	2000	2500
Variation Wärmespeicher [kWh]	Kapazität Kältespeicher (Scharparameter) [kWh]						
50 – 4000	25	100	250	300	700	1000	1500

**Konzept 2: Kompressionskälteanlage**

Variation Kältespeicher [kWh]	Kapazität Stromspeicher (Scharparameter) [kWh]					
50 – 4000	25	50	100	200	300	500
Variation Stromspeicher [kWh]	Kapazität Kältespeicher (Scharparameter) [kWh]					
25 – 3000	50	100	200	400	700	1000

### 3.3 Ergebnisgrößen

Es werden sowohl im Referenzszenario als auch in den Variationsrechnungen die Größen aller nicht festgelegten Komponenten ermittelt. Die Lösung jeder einzelnen Variationsrechnung ist das jeweilige Kostenoptimum mit den zugehörigen Leistungen von AKM, Kessel und KKM, der Fläche der Kollektoranlage und der Leistung der PV-Anlage sowie den jährlichen Gesamtkosten. Diese sind größer oder gleich dem Kostenoptimum des Referenzszenarios. Die jährlichen Gesamtkosten enthalten die Kosten für den Zukauf von Strom und Gas, Instandhaltungskosten (OPEX, s. Tabelle 2) sowie die als Annuität auf die Lebensdauer umgelegten Investitionskosten.

Weitere, abgeleitete Ergebnisgrößen sind der solare Deckungsanteil SF sowie die auf die jährlichen Gesamtkosten des zugehörigen Referenzszenarios bezogenen relativen jährlichen Gesamtkosten der Variation. Da die Kostenannahmen noch vergleichsweise grob sind, soll bei der Darstellung und Diskussion der Ergebnisse von absoluten Kostenangaben abgesehen werden. Der solare Deckungsanteil wird für die beiden Konzepte definiert als Quotient von Solarertrag  $Q_{sol}$  und Gesamtwärmebedarf  $Q_{ges}$  (Konzept 1) bzw. elektrischer Ertrag der PV-Anlage  $W_{el,PV}$  und Gesamtbedarf an elektrischer Energie  $W_{el,ges}$  (Konzept 2):

$$SF_{K1} = \frac{Q_{sol}}{Q_{ges}} \quad Gl (1) \qquad SF_{K2} = \frac{W_{el,PV}}{W_{el,ges}} \quad Gl(2)$$

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Referenzszenario – kostenoptimale Lösung

Das Referenzszenario ist die kostenoptimale Lösung, die sich bei freier Größe bzw. Leistung von Kältemaschine, Kessel, Kollektorfläche, PV-Anlage, Wärme-, Kälte- und Stromspeicher (wenn vorhanden) ergibt. Tabelle 4 fasst die Ergebnisse zusammen. Alle folgenden Abbildungen enthalten zudem die Ergebnisse des Referenzszenarios, so dass ein direkter Vergleich zu den Variationsrechnungen möglich wird.

**Tabelle 4: Ergebnisse Referenzszenarien Konzepte 1 und 2**

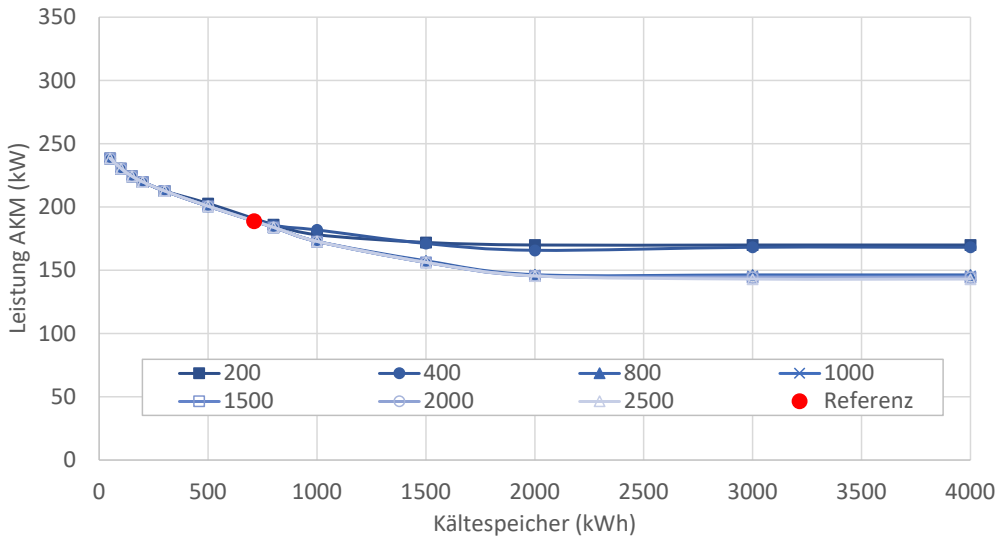
	Konzept 1 AKM	Konzept 2 KKM
Leistung AKM	189 kW	-
Leistung KKM	-	205 kW
Leistung Kessel	132 kW	-
Kollektorfläche	1041 m <sup>2</sup>	-
Leistung Photovoltaik <sup>1</sup>	8 kWp	90 kWp
Kapazität Kältespeicher	711 kWh	421 kWh
Kapazität Stromspeicher	9 kWh	100 kWh
Kapazität Wärmespeicher	1052 kWh	-
Solarer Deckungsanteil	86,7%	72,7%

### 4.2 Nennleistung der Komponenten in Abhängigkeit von der Speicherdimensionierung

Abbildung 3 bis Abbildung 5 zeigen für Konzept 1, wie sich die Leistung von Kältemaschine und Gaskessel sowie die Kollektorfläche bei der Variation der Kapazität von Wärmespeicher und Kältespeicher verändern.

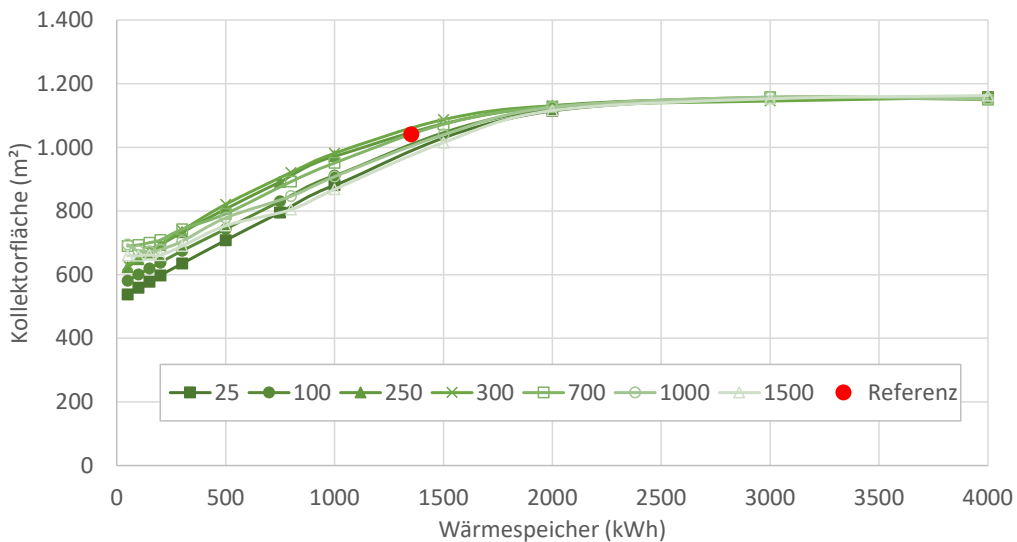
Die Leistung der Kältemaschine hängt fast ausschließlich von der Größe des Kältespeichers ab (Abbildung 3): Bis zu einer Kältespeicherkapazität von 800kWh nimmt die Leistung der Kältemaschine ab. Bei weiter wachsender Kapazität des Kältespeichers nähert sich die Leistung einem konstanten Wert an, und zwar ca. 150 kW für große Wärmespeicher (ab 800 kWh) und ca. 170 kW für kleine

Wärmespeicher (bis 400 kWh), während bei der kleinsten untersuchten Kältespeicherkapazität eine maximale Leistung von 238 kW benötigt wird. Durch die Vergrößerung des Kältespeichers erhöht sich die Volllaststundenzahl der Kältemaschine, sodass die maximale Leistung reduziert werden kann. Eine weitere Erhöhung der Kältespeicherkapazität auf mehr als 2000 kWh bringt hingegen keine weitere Veränderung.



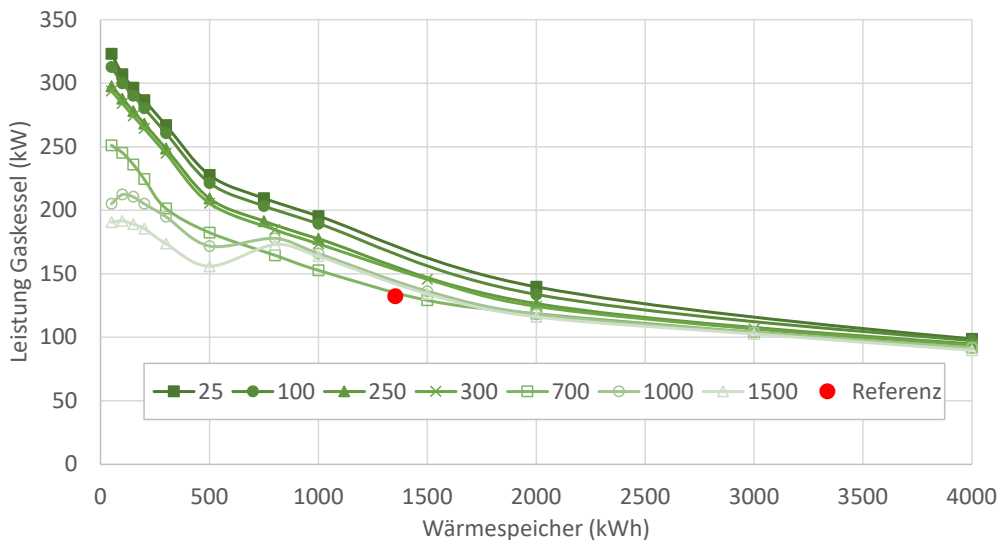
**Abbildung 3: Konzept 1 - Leistung der Absorptionskältemaschine in Abhängigkeit von der Speichergröße. Scharparameter: Kapazität Wärmespeicher (kWh)**

Bei Vergrößerung der Kapazität des Wärmespeichers vergrößert sich die Kollektorfläche. Diese Erhöhung ist nur in geringem Maße und nur bei kleinen Wärmespeichern (<1500 kWh) abhängig von der Kapazität des Kältespeichers. Es wird ein Maximum von ca. 1150 m<sup>2</sup> erreicht (siehe Abbildung 4). Durch die Vergrößerung des Wärmespeichers kann die vom Kollektor erzeugte Wärme zu einem größeren Anteil genutzt werden, sodass sich dessen Einsatz wirtschaftlich lohnender darstellt. Der solare Deckungsanteil verläuft qualitativ genauso wie die Kollektorfläche: mit zunehmender Größe des Wärmespeichers steigt ebenfalls der solare Deckungsanteil bis zu einem Höchstwert von gut 90% (vgl. Abbildung 8). Zu beachten ist hierbei, dass jeder Punkt in den Diagrammen das Ergebnis einer wirtschaftlichen Optimierung zeigt. Bei einem festgelegten solaren Deckungsanteil würde bei kleinerer Speichergröße kein kleinerer Kollektor gewählt werden können.



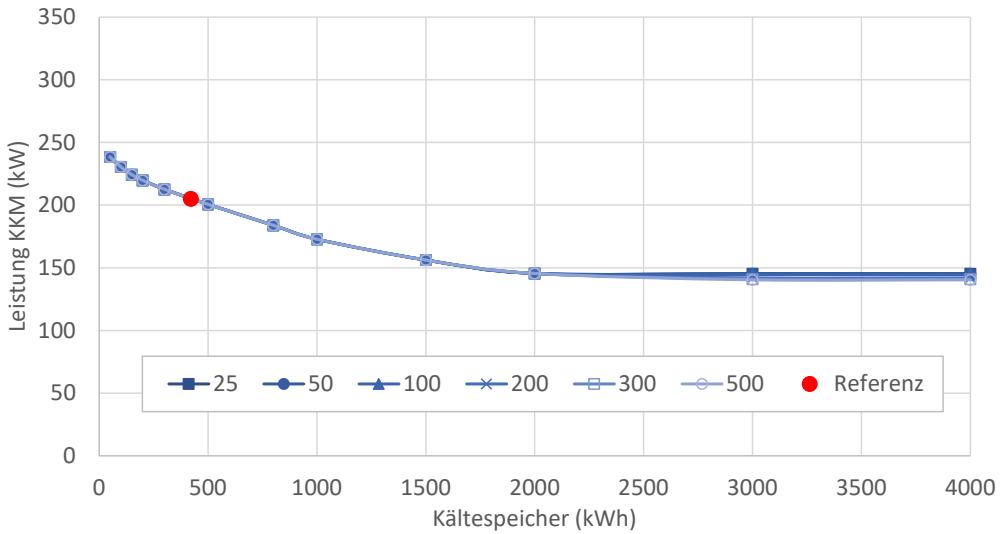
**Abbildung 4: Konzept 1 - Kollektorfläche in Abhängigkeit von der Speichergöße.**  
**Scharparameter: Kapazität Kältespeicher (kWh)**

Die maximale Leistung des Gaskessels beträgt für kleine Speicher 323 kW. Sie sinkt mit zunehmender Speichergöße (Abbildung 5). Da bei steigender Größe des Kältespeichers die Leistung der Kältemaschine sinkt, sinkt die Leistung des Kessels, um diese zu versorgen. Wird der Wärmespeicher vergrößert, kann ein größerer Anteil der benötigten Wärme von den Kollektoren bereitgestellt werden, sodass ein kleinerer Gaskessel ausreichend ist.



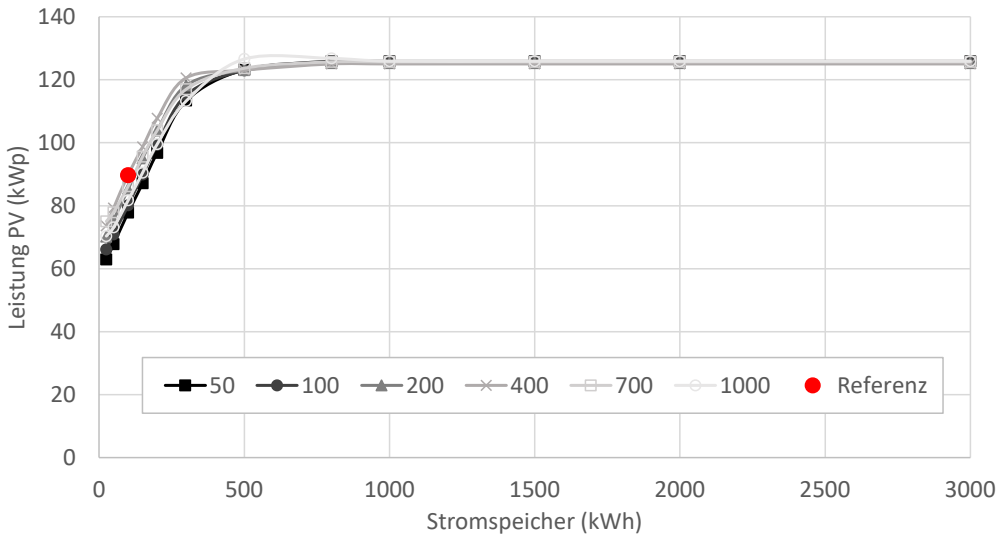
**Abbildung 5: Konzept 1 - Leistung des Gaskessels in Abhängigkeit von der Speichergöße.**  
**Scharparameter: Kapazität Kältespeicher (kWh)**

Die Ergebnisse des Konzepts 2 ergeben ein ähnliches Bild: Die Leistung der Kältemaschine sinkt, nahezu unabhängig von der Stromspeicherkapazität, mit steigender Kapazität des Kältespeichers von ca. 238 kW auf ca. 140 kW (Abbildung 6).



**Abbildung 6: Konzept 2 - Leistung der Kompressionskältemaschine in Abhängigkeit von der Speichergöße. Scharparameter: Stromspeicher (kWh)**

Die Leistung der PV-Anlage steigt, kaum abhängig von der Kapazität des Kältespeichers, mit zunehmender Kapazität des Stromspeichers (Abbildung 7). Auch hier steigt der solare Deckungsanteil analog mit der Leistung der PV-Anlage. Der maximale Deckungsanteil beträgt ebenfalls gut 90% (vgl. Abbildung 10).



**Abbildung 7: Konzept 2 - Leistung der PV-Anlage in Abhängigkeit von der Speichergöße. Scharparameter: Kältespeicher (kWh)**

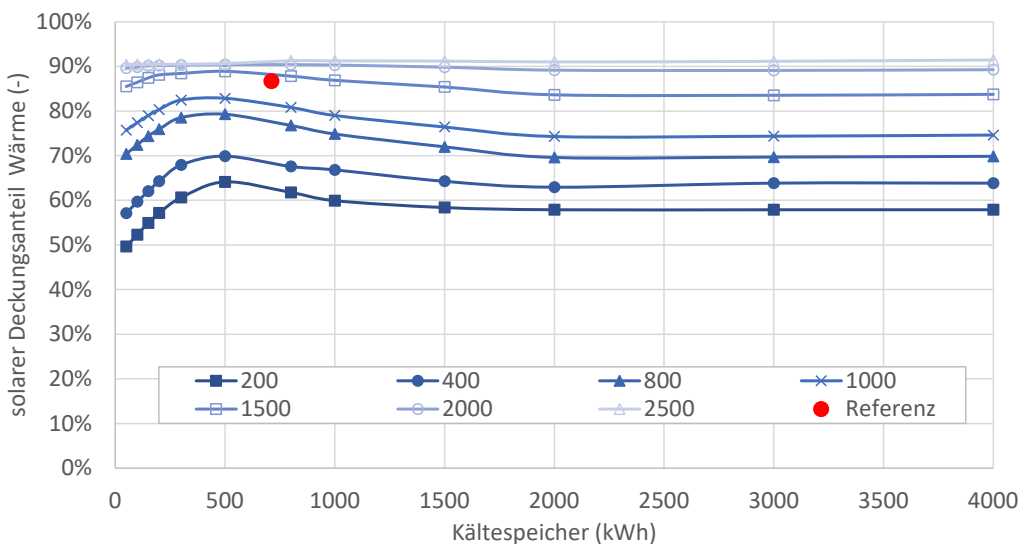
Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass durch die Wahl größerer Speicher die Kälteanlagen und der Gaskessel ohne Komforteinbußen kleiner dimensioniert werden können. Wird eine wirtschaftliche und keine energetische Optimierung angestrebt, vergrößern sich die solaren Komponenten Kollektoren und PV-Anlage mit steigender Speichergöße. Die kleineren Solaranlagen bei kleiner Speichergöße werden letztendlich mit einem geringeren solaren Deckungsanteil erkauf.



### 4.3 Vergleichende Bewertung der Speicheroptionen

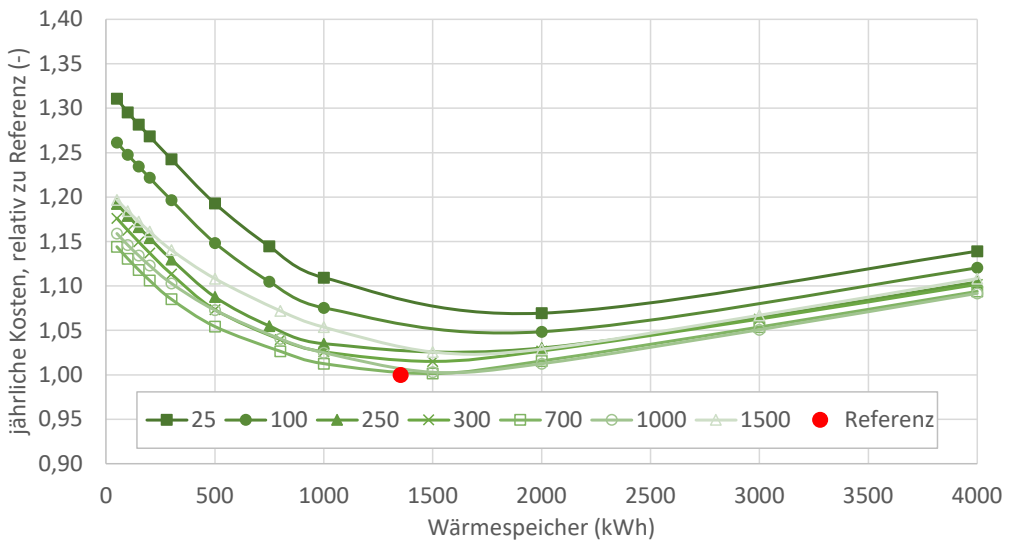
Für die Beantwortung der 2. Forschungsfrage müssen zunächst die Kriterien für ‚vorteilhaft‘ definiert werden. Für die vorliegende Betrachtung wurden der solare Deckungsanteil und die Kosten relativ zum Referenzszenario gewählt. Ein hoher solarer Deckungsanteil erhöht die Autarkie und verringert CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Gasnutzung oder Bezug von Strom mit vorgelagerten Emissionen und wird daher angestrebt. Genauso sollen aber die Kosten möglichst gering bleiben.

Bei Konzept 1 steigt der solare Deckungsanteil mit zunehmender Kapazität des Kältespeichers bis zu einer Größe von 500 kWh an, danach sinkt er wieder (Abbildung 8). Eine Erhöhung der Wärmespeicherkapazität führt kontinuierlich zu einem steigenden solaren Deckungsanteil, bis ein Sättigungswert von ca. 90% erreicht wird. Zudem bewirkt ein sehr großer Wärmespeicher (2500kWh), dass dieser Deckungsanteil nahezu unabhängig von der Kapazität des Kältespeichers wird.



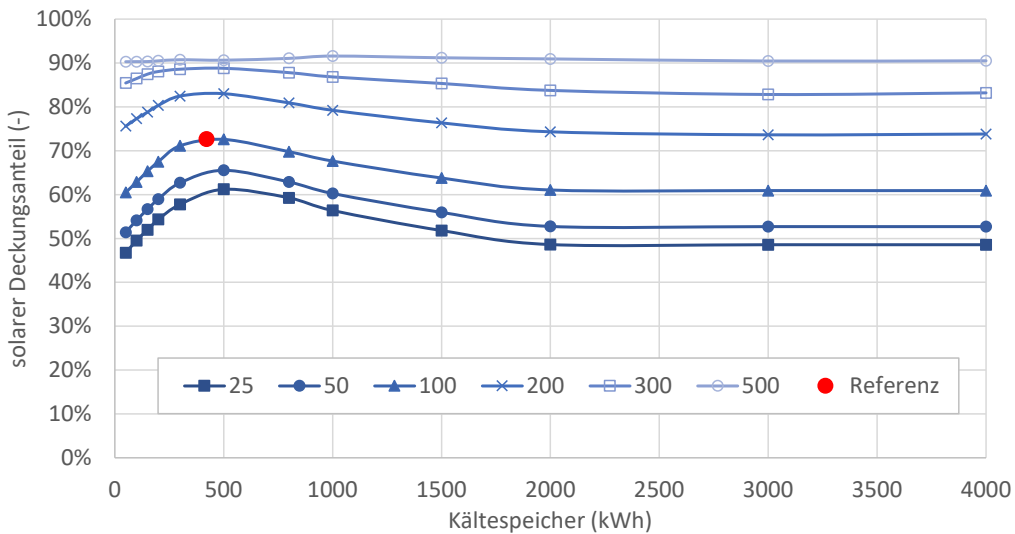
**Abbildung 8: Konzept 1 - solarer Deckungsanteil in Abhängigkeit von den Speichergößen. Scharparameter: Wärmespeicher**

Ausgehend vom Kostenoptimum (= Referenz) führt eine Vergrößerung des Wärmespeichers nur zu moderaten Mehrkosten von höchstens 5%, eine Verkleinerung dagegen erzeugt schnell höhere Kosten, wie Abbildung 9 zeigt. Eine Abweichung von der optimalen Kapazität des Kältespeichers von ca. 700 kWh ist hingegen in beide Richtungen schnell mit steigenden Kosten verbunden. Es ist daher vorteilhaft, den Wärmespeicher großzügig zu dimensionieren. Dass diese Strategie auch wirtschaftlich günstig ist, zeigt sich in Abbildung 8: der solare Deckungsanteil des Referenzszenarios liegt nah an dem in den Variationsrechnungen erreichten Maximum.

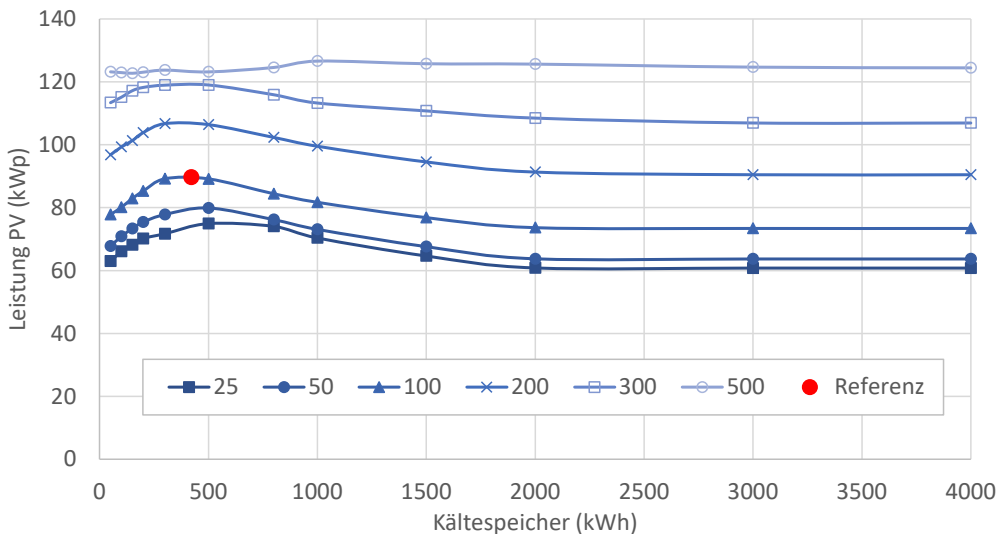


**Abbildung 9: Konzept 1: relative Kosten in Abhängigkeit der Wärmespeicherkapazität.  
Scharparameter: Kältespeicher (kWh)**

Für Konzept 2 zeigt sich ein ähnliches Bild. Bei einer festgelegten Kapazität des Stromspeichers nimmt der solare Deckungsanteil mit zunehmender Größe des Kältespeichers bis zu einer Stromspeicherkapazität von ca. 500 kWh zu. Danach sinkt der Deckungsanteil wieder (Abbildung 10). Dies lässt sich wie folgt erklären: mit größerem Kältespeicher sinkt die notwendige Leistung der Kältemaschine und der Kältebedarf wird von der Kälteerzeugung entkoppelt. Somit kann die Kälte dann erzeugt werden, wenn ausreichend Einstrahlung vorhanden ist (angebotsorientiert). Wird der Kältespeicher jedoch zu groß gewählt, ohne dass ein großer Stromspeicher vorhanden ist, sinkt der solare Deckungsanteil wieder, da der nun vergleichmäßigte Strombedarf der Kälteanlage in Zeiten geringer solarer Einstrahlung (nachts) nicht mehr von der PV-Anlage gedeckt wird. Die PV-Anlage wird unrentabler und es wird weniger zugebaut (siehe Abbildung 11). Ist der Stromspeicher groß genug gewählt, verringert sich dieser Effekt.

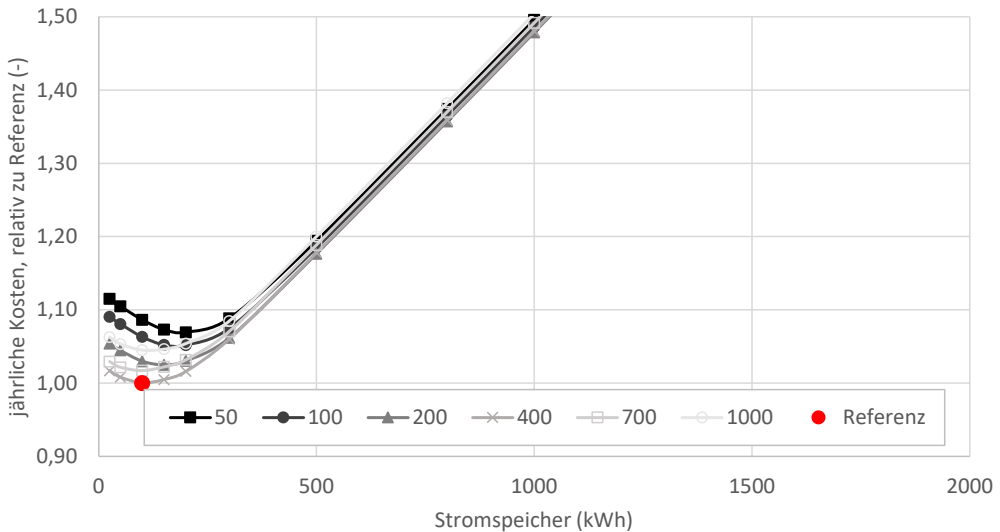


**Abbildung 10: Konzept 2 - solarer Deckungsanteil in Abhängigkeit von der Speichergöße. Scharparameter: Stromspeicher (kWh)**



**Abbildung 11: Konzept 2 - Leistung der PV-Anlage in Abhängigkeit von der Speichergöße. Scharparameter: Stromspeicher (kWh)**

Die Kostenstruktur ist im Fall der Kompressionskältemaschine deutlicher von den Kosten des Stromspeichers geprägt, als es in Konzept 1 durch den Wärmespeicher der Fall ist. Deshalb besteht ein starker Kostenanstieg bei steigender Stromspeicherkapazität (siehe Abbildung 12, zur besseren Lesbarkeit wurde die x-Achse im Vergleich zu den anderen Diagrammen verändert). Bei Berücksichtigung des Kostenaspekts sollte der Stromspeicher nicht beliebig groß dimensioniert werden: Eine Speichergöße von ca. 300 kWh bietet im vorliegenden Berechnungsbeispiel einen guten Kompromiss mit einer Zunahme des solaren Deckungsanteils von ca. 15%-Punkten gegenüber dem Kostenoptimum (Referenz) bei moderaten Mehrkosten von ca. 6%.



**Abbildung 12: relative Kosten in Abhängigkeit der Stromspeicherkapazität. Scharparameter Kältespeicher (kWh)**

Generell gilt, dass in Konzept 2 beide Bewertungskriterien stärker von der Größe des Stromspeichers als von der Größe des Kältespeichers abhängen. Insbesondere die Kosten steigen bei Überdimensionierung des Stromspeichers stark an. Eine Unterdimensionierung des Stromspeichers hat zudem stärkere negative Auswirkungen auf den solaren Deckungsanteil als eine Unterdimensionierung des Kältespeichers: Ausgehend vom Kostenoptimum führt eine Halbierung jeweiligen Speicherkapazität zu einer Verringerung des solaren Deckungsanteils um ca. 5%-Punkte (Kältespeicher) bzw. 7%-Punkte (Stromspeicher), während die Kosten um 3% (Kältespeicher) bzw. 1% (Stromspeicher) ansteigen.

#### 4.4 Vergleichende Bewertung der Versorgungskonzepte

Im Referenzszenario erreicht Konzept 1 einen solaren Deckungsanteil von 86,7%, Konzept 2 nur 72,7%. Da beide Referenzszenarien das jeweilige Kostenoptimum darstellen, ist eine Verringerung des solaren Deckungsanteils nicht sinnvoll. Wird als ‚vernünftige Dimensionierung‘ das beste Verhältnis von solarem Deckungsanteil zu eingesetzten Kosten gesucht, ist für Konzept 1 eine Konfiguration mit relativ großen Speichern sinnvoll (Kältespeicher: 1000 kWh, Wärmespeicher 2000 kWh), womit ein solarer Deckungsanteil von 90 % erreicht wird. Bei Konzept 2 sind bezogen auf das genannte Verhältnis deutlich kleinere Speicherkonfigurationen geeignet (Kältespeicher 400 kWh, Stromspeicher 300 kWh), die einen solaren Deckungsanteil von 89% erreichen. Hier ist jedoch zu beachten, dass bisher die Kosten nur jeweils innerhalb eines Konzeptes verglichen wurden. Mit den genannten Dimensionierungen liegen die jährlichen Gesamtkosten des Konzept 2 nur bei gut 60% der jährlichen Gesamtkosten des Konzept 1. Konzept 2 erfordert selbst bei einer Speicherkonfiguration von 700 kWh Kältespeicher und 800 kWh Elektrospeicher nur 80 % der jährlichen Gesamtkosten des Konzept 1 mit oben genannter sinnvoller Dimensionierung und erreicht mit 92% zudem einen höheren solaren Deckungsanteil als Konzept 1. Bei einer Einbeziehung der wirtschaftlichen Auswirkungen und vernünftiger Dimensionierung erreicht also das Konzept 2 mit Photovoltaik und Kompressionskältemaschine einen höheren solaren Deckungsanteil bei gleichzeitig besserer Wirtschaftlichkeit als Konzept 1.

Die für einen vorgegebenen solaren Deckungsanteil benötigte Fläche ist hingegen ähnlich groß. Für einen solaren Deckungsanteil von 90% werden bei Konzept 1 (Variation Kältespeicher: 1000 kWh, Wärmespeicher: 2000 kWh) 1126 m<sup>2</sup> Kollektorfläche benötigt, bei Konzept 2 (Kältespeicher 400 kWh, Stromspeicher 300 kWh) bei einem angenommenen Anlagenwirkungsgrad von 12% [5] 1026 m<sup>2</sup>

Photovoltaik. Hier liefert Konzept 2 ebenfalls leicht vorteilhafte Ergebnisse.

## 5 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

Die durchgeführten Berechnungen zeigen die Relevanz, die der Dimensionierung von Speichern in Energiesystemen zukommt. Durch eine geeignete Wahl kann in Systemen mit regenerativer, und damit fluktuierender, Energieerzeugung der solare Deckungsanteil signifikant erhöht, bei einer schlechten Auslegung stark verringert werden. Bei einem System, das die fluktuierende Energie nicht direkt nutzt, sondern weiter in eine andere Endenergieform wandelt, zeigt sich, dass für ein optimales System auf beiden Seiten des Energiewandlers ein ausreichend großer Speicher benötigt wird. Zudem beeinflusst die Größe der Speicher die Dimensionierung der anderen Komponenten – diese können bei großzügiger Speicherdimensionierung kleiner gewählt werden

Bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Ökonomie ist eine unverhältnismäßige Überdimensionierung der Speicher unvorteilhaft. Es sind für jedes System günstige Speicherkapazitäten vorhanden, bei deren Überschreitung der solare Deckungsanteil des Gesamtsystems nicht oder nur geringfügig weiter steigt, die Mehrkosten jedoch sehr groß sind. Dabei weisen die jährlichen Gesamtkosten die größte Sensitivität gegenüber dem spezifisch teureren Speicher auf.

Da sich das Verhältnis der Kosten der einzelnen Komponenten bei verschiedenen Systemen unterschieden, gibt es auch für jedes System eine andere ökonomisch und ökologisch günstige Konfiguration, für deren Ermittlung oemof ein geeignetes Werkzeug darstellt.

## 6 Literatur

- [1] Hilpert, S., Kaldemeyer, C., Krien, U., Günther, S., Wingenbach, C., Plessmann, G., The Open Energy Modelling Framework (oemof) - A new approach to facilitate open science in energy system modeling, Energy Strategy Reviews, 2018
- [2] Cordes, T., Scheuren, J., Schlatmann, R., Solares Kühlen im Oman - Optimierungspotential und Eignung verschiedener Konzepte, Tagungsband Ret.Con 2018
- [3] Al-Saadi, S., Al-Hajri, J., Al-Hadhrami S., Cooling load calculations of a social center building in Muscat: Phase-II, Sultan Qbaos University, Internal report, 2017
- [4] Tom Cordes, Diplomarbeit, Development and Evaluation of different concepts for solar thermal assisted cooling in Oman, HTW Berlin
- [5] Quaschnig, V., Regenerative Energiequellen, Hanser Verlag München, 2013

Die Arbeiten werden im Rahmen des Projektes oemof\_heat, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie FZK 03ET4047B, durchgeführt.

Die vorliegende Arbeit ist dabei Teil des Projektes oemof-heat, welches oemof um Funktionalitäten zur Abbildung von Wärmesystemen erweitert, um den Anwendungsbereich des Werkzeugs zu vergrößern.