Übersicht und Beispielberechnung zur Flexibilisierung von Kälteversorgungssystemen

Bachelorarbeit

Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen-Energiesysteme
der Hochschule Ruhr West

David Hennes
david.hennes@stud.hs-ruhrwest.de
10005917

Erstprüferin:	Prof. Dr.-Ing. Sylvia Schädlich
Zweitprüfer:	Dr.-Ing. Clemens Pollerberg
Kooperationspartner:	Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
Betreuer:	Dr.-Ing. Clemens Pollerberg

Oberhausen, 07 Mai 2020

Kurzfassung

Im Zuge des Kohleausstiegs und der Energiewende steigt der Anteil erneuerbarer Energien am Strommarkt. Da diese Energien nur volatil zur Verfügung stehen, werden innovative Lösungen für den elektrischen Energieausgleich zwischen Angebot und Nachfrage benötigt. Eine mögliche Lösung ist das Lastmanagement. Da der Kältemarkt über 10 % der elektrischen Last in Deutschland ausmacht, bietet dieser ein hohes Potenzial für das Lastmanagement. In dieser Arbeit wird der Kältebedarf und der elektrische Energiebedarf zur Kältebereitstellung für die Bundesrepublik Deutschland, aufbauend auf einer Metarecherche, ermittelt und für unterschiedliche Branchen quantifiziert. Es zeigt sich, dass die größten Anwendungen von Kälte Haushaltskühlgeräte, die Lebensmittelindustrie und der Lebensmitteleinzelhandel sind.

Wie eine Lastverschiebung umgesetzt werden könnte, wird mit einer Beispielberechnung für die Kälteversorgung eines Krankenhauses, für welches Messdaten aus dem Zeitraum vom 21.03.2019 bis zum 31.12.2019 vorliegen, untersucht. Dabei wird der Einsatz eines Kältespeichers zugrunde gelegt und die „Speicherbewirtschaftung“ anhand der Stromtarife am EPEX SPOT Markt durchgeführt [1]. Für das gegebene Lastprofil werden unterschiedliche Kombinationen aus Leistungsgröße der Kältemaschine und Kältespeicherkapazität untersucht.

Für das betrachtete Krankenhaus wird ein Energiebedarf zur Kältebereitstellung von 290 MWh/a und ein Lastverschiebepotenzial von 20 MWh/a berechnet. Dies entspricht einem monetären Gegenwert von 828 €, bei einem Stromeinkauf am EPEX SPOT.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Ziele und Methodik 2

3 Stand der Technik 4

3.1 Kälteerzeugung 4

3.2 Kältespeicherung 6

3.3 Lastmanagement 8

3.4 Bilanzausgleich im Energiemanagement 12

4 Kältemarkt in Deutschland 14

4.1 Entwicklung des Stromverbrauchs 14

4.2 Studien zum Kältemarkt in Deutschland 15

4.2.1 Studie „Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland“ 16

4.2.2 Studie „Energiebedarf bei der technischen Erzeugung von Kälte“ 17

4.2.3 Studie „Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie“ 20

4.2.4 Studie „Energieeffizienz in Zahlen“ 21

4.2.5 Studie „Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland“ 22

4.3 Auswertung der Studien zum Kältemarkt 24

5 Kälteanwendungen 28

5.1 Methodik der Steckbriefe 28

5.2 Auswertung der Steckbriefe 31

5.3 Vergleich zwischen der Steckbriefauswertung und der Studienauswertung 34

6 Ermittlung des Lastverschiebepotenzials eines Krankenhauses 35
6.1 Daten der Beispielanwendung 35
6.2 Grundlagen und Annahmen zur Berechnung 38
6.2.1 Schaltschema der Simulation 38
6.2.2 Auswahl der möglichen Kältespeicher 40
6.2.3 Dimensionierung der technischen Betriebsanlagen 41
6.2.4 Leistungsklassen 41
6.2.5 Investitionskosten 42
6.3 Auswertung 43
6.3.1 Änderung der Größe der Kältemaschine 43
6.3.2 Änderung der Speichergröße 45
6.3.3 Optimale Größe der Kältemaschine und des Kältespeichers 47
6.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse 49
7 Zusammenfassung und Ausblick 50
8 Anhang I
9 Literaturverzeichnis XIV
Erklärung XVII

Abkürzungsverzeichnis

AG	Arbeitsgemeinschaft
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
COP	Coefficient of Performance
DE	Deutschland
DKV	Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.
EER	Energy Efficiency Ratio
EH	Einzelhandel
el.	elektrisch
EVU	Energieversorgungsunternehmen
ges.	gesamt
GHD	Gewerbe-Handel-Dienstleistung
NK	Normalkühlung
priv.	private
techn.	technisch
th.	thermisch
TK	Tiefkühlung
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

Formelzeichen

Q	thermische Energie / Speicherkapazität
q_0	Kälteleistung
T-s	Temperatur-Entropie
w	Kältearbeit
h	Enthalpie
$\dot{Q}_0$	Kälteleistung
ε	Leistungszahl
P	Antriebsleistung
$\dot{m}$	Massenstrom
s	Entropie
q	Speicherdichte
c_p	spezifische Wärmekapazität
V	Volumen
ρ	Dichte
ΔT	Temperaturdifferenz
c	Schmelzwärme

Q_S	Speichergröße des Kältespeichers
Q_F	Speicherfüllstand des Kältespeichers
Q_K	Energiebedarf zur Kältebereitstellung der kommenden Viertelstunde
$P_{el,max}$	maximale elektrische Leistung der Kältemaschine
P_{el}	elektrische Leistung der Kältemaschine
K_{Strom}	Stromkosten der kommenden Viertelstunde
$\bar{x}$	Durchschnittspreis am EPEX SPOT
η	Wirkungsgrad
Q_{Klinik}	elektrischer Energiebedarf zur Kältebereitstellung in Kliniken
E_{Klinik}	Strombedarf der Branche Klinik
p	Kälteanteil am elektrischen Gesamtstromverbrauch

Einheiten

MW	Megawatt
kW	Kilowatt
TWh	Terawattstunde
GWh	Gigawattstunde
MWh	Megawattstunde
kWh	Kilowattstunde
PJ	Petajoule
kJ	Kilojoule
a	Jahr
h	Stunde
d	Tag
kg	Kilogramm
m	Meter
K	Kelvin
°C	Grad Celsius
hl	Hektoliter
€	Euro

Gesetze

EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EnWG	Energiewirtschafts-Gesetz

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Links: T,s- Diagramm -,
rechts: Funktionsschema einer Kompressionskältemaschine [5] ----------5
Abbildung 2: Kälteleistungsentwicklung bei Teillastverhalten einer
Kompressionskältemaschine [5] ----------6
Abbildung 3: links: Lastgang ohne Lastmanagement;
rechts: Lastgang mit Lastmanagement nach [10] ----------9
Abbildung 4: Automatische Lastabschaltung bei drohender
Überschreitung der Maximallast [9]---------- 10
Abbildung 5: Schaltmöglichkeit für Leistungsreduzierung mit Nachholung [9] ---------- 10
Abbildung 6: Schaltmöglichkeit für Leistungserhöhung mit späterem Ausgleich [9] ---------- 11
Abbildung 7: Ausnutzung von Preisschwankungen auf dem Strommarkt [9] ---------- 12
Abbildung 8: Zeitlicher Ablauf der Regelleistungsbereitschaft nach Produkten [9]---------- 13
Abbildung 9: Entwicklung des Stromverbrauchs nach Sektoren in Deutschland [12] --------- 14
Abbildung 10: Anteil der Einsatzgebiete am elektrischen
Endenergiebedarf zur Kälteerzeugung nach [14]---------- 17
Abbildung 11: Links Anteil am Kältebedarf; rechts: Anteil am elektrischen
Energiebedarf zur Kältebereitstellung nach [15]---------- 19
Abbildung 12: Links: Anteil am Kältebedarf-, rechts: Anteil am elektrischen
Endenergiebedarf nach Sektoren [16] ---------- 21
Abbildung 13: Anteil der Sektoren am elektrischen Energiebedarf zur
Kältebereitstellung nach [17] ---------- 22
Abbildung 14: Entwicklung des Strombedarfs im Kältesektor
zwischen 2008 und 2018 nach [18]---------- 23
Abbildung 15: Anteil der Hauptsektoren am Strombedarf im Kältesektor 2018 nach [18] ---- 23
Abbildung 16: Gegenüberstellung des elektrischen Energiebedarfs zur
Kältebereitstellung der verschiedenen Quellen aus Kapitel 4.2---------- 25
Abbildung 17: Anteil der Branchen der Steckbriefe am elektrischen
Energiebedarf zur Kältebereitstellung in Deutschland---------- 32
Abbildung 18: Vergleich der Studien und der Ergebnisse der Steckbriefe
für den elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung ---------- 34
Abbildung 19: Jahresverlauf der gemittelten Tageskälteleistungen der
Kältemaschine für das Jahr 2019 ---------- 36
Abbildung 20: Tagesverlauf der viertelstündlichen Leistungsdaten der
Kältemaschine für den 26.08.2019---------- 37
Abbildung 21: Tagesverlauf der viertelstündlichen Leistungsdaten der
Kältemaschine für den 08.11.2019---------- 37
Abbildung 22: Schaltschema der Beispielberechnung mit Betriebsgrößen ---------- 39

Abbildung 23: Leistungsklassenverteilung für verschiedene Kälteleistungen zur Speichergröße von 70 kWh ---- 44
Abbildung 24: Kostenentwicklung über verschiedene Kälteleistungen zur Speichergröße 70 kWh ---- 45
Abbildung 25: Leistungsklassenverteilung über verschiedene Speichergrößen zur Kälteleistung 250 kW ---- 46
Abbildung 26: Kostenentwicklung über verschiedene Speichergröße zur Kälteleistung von 250 kW ---- 47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von Lastmanagement nach [10] 11
Tabelle 2: Endenergiebedarf der Einsatzgebiete nach [14] 16
Tabelle 3: Kältebedarf der Branchen nach [15] 18
Tabelle 4: Kältebedarf des Nahrungsmittelsektors nach [15] 19
Tabelle 5: Kältebedarf der Branchen nach [16] 20
Tabelle 6: Energiebedarf zur Kältebereitstellung nach [17] 22
Tabelle 7: Gegenüberstellung der Ergebnisse für den Kältebedarf und den Energiebedarf zur Kältebereitstellung aus 4.2 mit den entsprechenden Quellen 24
Tabelle 8: Vergleich des elektrischen Energiebedarfs zur Kältebereitstellung in TWh/a der Hauptsektoren der verschiedenen Studien 26
Tabelle 9: Steckbrief zur Branche Medizin 29
Tabelle 10: Übersichtstabelle über alle Steckbriefe der Kriterien Kältebedarf und Energiebedarf in Summe und anteilig 31
Tabelle 11: Legende zu Abbildung 19 34
Tabelle 12: Speichergrößen, welche für den Einsatz als Kältespeicher getestet werden 41
Tabelle 13: Definition von Leistungsklassen 42
Tabelle 14: Investitionskosten verschiedener Speichergrößen nach [26] 43
Tabelle 15: Bestimmung der Speichergröße durch die Amortisationszeit 48

1 Einleitung

Die Energiewende ist ein zentrales Thema unserer Gesellschaft und notwendig, um Kohlendioxidemissionen zu minimieren und eine nachhaltige Energieversorgung zu gewährleisten. In der Politik werden folgende Ziele genannt:

- 40 % erneuerbare Energien am Stromverbrauch bis 2025 gemäß § 1 II Nr.1 EEG
- 55 % weniger Treibhausgasemissionen bis 2030 im Vergleich zu 1990 [2]
- 50 % weniger Primärenergieverbrauch bis 2050 im Vergleich zu 2008 [2]

Mit steigendem Anteil an erneuerbaren Energien soll der Anteil der fossilen Energieträger gesenkt werden. So sollen gemäß § 13k I Nr. 1, 2 EnWG bis zum 31. Dezember 2022 alle Braunkohlekraftwerke mit einer elektrischen Nettoleistung von mindestens 3 Gigawatt und alle Steinkohlekraftwerke mit einer elektrischen Nettoleistung von mindestens 4 Gigawatt abgeschaltet werden. Ein weiteres Ziel ist es, alle Kernkraftwerke bis Ende 2022 vom Netz zu nehmen [3] .

Da Solarstrahlung und Wind nur volatil zur Verfügung stehen, wird derzeit nach Lösungen gesucht, die Schwankungen in der Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien zu kompensieren. Ein Lösungsansatz wird in der Flexibilisierung der Energieversorgung gesehen. Eine wichtige Maßnahme zur Flexibilisierung ist der Einsatz von Energiespeichern für das Lastmanagement. Stromspeicher können beispielsweise, während einer Überproduktion, elektrische Energie aufnehmen und diese bei Lastspitzen wieder abgeben. Über ein Lastmanagement können Lastspitzen reduziert und verschoben werden, mit dem Ziel, den Strombedarf in die Phasen der bisherigen Stromüberproduktion zu verschieben und den Direktverbrauch zu erhöhen.

Der Kältesektor besitzt mit einem hohen Energie- und Leistungsbedarf möglicherweise ein Potenzial, Lastspitzen oder Überangebote im Netz auszugleichen. Dies geschieht, indem Kälteversorgungssysteme flexibel betrieben werden. Die nachfolgende Arbeit befasst sich mit einem Überblick über den Kältemarkt, um diesen möglichst genau zu erfassen und bewerten zu können, ob der Kältesektor in Deutschland einen Beitrag für den elektrischen Energieausgleich leisten kann. Des Weiteren wird mit einer Anwendung beispielhaft simuliert, wie eine Lastverschiebung über einen Kältespeicher realisiert werden kann.

2 Ziele und Methodik

Diese Bachelorarbeit ist Teil eines dreijährigen Projektes zum Thema: „Flexibilisierung von Kälteversorgungssystemen für den elektrischen Energieausgleich in Deutschland“. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert (Förderkennzeichnung: 03EI1007) [4].

Ziel der Bachelorarbeit ist es, im Rahmen einer Metarecherche ein umfassendes Bild der Versorgungsstruktur in der Kältetechnik zu liefern. Dabei werden möglichst alle Anwendungen, in denen Kälte benötigt wird, erfasst und mit Hilfe von Steckbriefen beschrieben. Die Steckbriefe quantifizieren den Energiebedarf und das Verbrauchsverhalten der jeweiligen Anwendungen, soweit diese in der Literatur verfügbar sind. Wichtige Kenngrößen sind Kältebedarf, spezifische Kälteleistung sowie Betriebs- und Volllaststunden. Beispielhaft wird dann eine Anwendung genauer betrachtet und mit Hilfe von Simulationsrechnungen das Potenzial zum Lastmanagement durch den Einsatz eines Kaltwasserspeichers untersucht.

Vorgehensweise

Im ersten Schritt werden die bisher veröffentlichten Studien gesichtet und deren Informationen zum Kältebedarf und elektrischen Energiebedarf in Deutschland zusammengetragen. In einem zweiten Schritt wird der Kältebedarf unterschiedlichen Branchen zugeordnet. Jede Anwendung wird in einem Steckbrief erfasst, der diese jeweils möglichst vollständig beschreiben soll.

Die Kenngrößen und Charakteristika der Steckbriefe wurden im Vorfeld der Recherche festgelegt und sind nachfolgend aufgelistet:

- Technische Rahmenbedingungen
    - Eingesetzte Technologie der Anwendung
    - Kältebedarf
    - Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung
    - Strombedarf der Branche
    - Spezifischer Kältebedarf
    - Spezifische und gesamte installierte elektrische Kälteleistung
    - Anzahl der Kälteanlagen
    - Typische Leistungsgrößenbereiche der Anlagen
    - Benötigte Temperaturniveaus
    - Einsatz von Kältespeichern
    - Volllast- und Betriebsstunden
    - Maximale Leistungsaufnahme
    - Fernsteuerbarkeit

    - Aufwand für Anlagenvergrößerung (Nachrüstung / Austausch)
    - Ist eine Leistungsregelung üblich?
    - Kälteanteil am elektrischen Gesamtverbrauch
- Wirtschaftliche Rahmenbedingungen
    - Förderungen
    - Kosten(-anteil) für die Kältebereitstellung
- Rechtliche Rahmenbedingungen
    - Geltende Verordnungen und Gesetze
    - Anforderungen an Temperaturniveaus
- Ökologische Rahmenbedingungen
    - Treibhausgase in CO_2-Äquivalent
    - Jährliche Kältemittelverlustraten

Anhand der ermittelten und in den Steckbriefen zusammengestellten Daten wird analysiert, welche Anwendungen den größten Anteil am Kältebedarf haben. Anschließend wird auf Basis dieser Anteile bewertet, welche Anwendungen sich für Lastmanagement am besten eignen. Dazu dienen hauptsächlich die Parameter Kältebedarf in kWh_{th} und Energiebedarf zur Kältebereitstellung in kWh_{el}, über die sich die Größe der Branche bewerten lässt.

Die exemplarische Beispielberechnung erfolgt in einem dritten Schritt. Das Rechenbeispiel für die Anwendung wird mit der Software Excel von Microsoft Windows durchgeführt. Hierfür wird als Anwendung ein Krankenhaus ausgewählt, für das minutengenaue Messdaten der Kälteversorgung vorliegen. Durch die Auswahl verschiedener Speichergrößen und Leistungen der Kältemaschine wird die Nutzbarkeit der Kältemaschine im Hinblick auf Netzdienlichkeit untersucht und das Lastverschiebepotenzial der Kälteversorgung bestimmt. Darüber hinaus wird geprüft, welche monetären Vorteile ein Betrieb mit Lastmanagement für den Betreiber einer Kälteversorgungsanlage hat. Dies kann als Vorlage für andere Kälteanwendungen dienen, um das Flexibilisierungspotenzial großflächig zu nutzen.

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik für die Kälteerzeugung, Kältespeicherung, das Lastmanagement und den Bilanzausgleich beschrieben. Dazu werden die am häufigsten verwendeten Technologien für die Kälteversorgung vorgestellt. Dabei soll vorweggeschickt werden, dass als physikalische Größe nur die Wärmeenergie definiert ist und Kälte physikalisch als Wärme auf niedrigem Temperaturniveau definiert ist.

3.1 Kälteerzeugung

Für die Kälteerzeugung werden verschiedene Kälteanlagentechnologien eingesetzt. Die am häufigsten verwendete Kälteanlagentechnik ist die elektrisch angetriebene Kompressionskältemaschine, deren Technologie im Weiteren vorgestellt wird. Es gibt am Markt noch andere Kälteerzeugungstechnologien, welche aber nur selten eingesetzt und daher in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden. In 90 % aller Kälteerzeugungsanlagen werden Kompressionskältemaschinen eingesetzt [5], die nach dem linkslaufenden Carnot‘schen Kreisprozess funktionieren. In Abbildung 1 ist idealisiert auf der rechten Seite der schematische Aufbau einer Kompressionskältemaschine abgebildet und auf der linken Seite das entsprechende T,s- Diagramm. Die Hauptbestandteile der Maschine sind ein Verdampfer, in dem durch die Verdampfung des Kältemittels Wärme aufgenommen wird und die Kälte entsteht, ein Verdichter, ein Verflüssiger, in dem durch die Kondensation des Kältemittels die Wärme wieder abgegeben wird und ein Expansionsorgan.

Im Verdampfer nimmt das flüssige Kältemittel, bei einer isobaren Wärmeaufnahme, zunächst Energie auf. Dabei gibt das zu kühlende Medium Energie ab, die bei dem Kältemittel zu einer Erhöhung der Entropie s führt. Die Temperatur des Kältemittels im Kreisprozess bleibt idealisiert konstant. Die aufgenommene Phasenwechselenergie hängt dabei vom Kältemittel ab.

Anschließend findet im Verdichter eine isentrope Verdichtung des trockenen, gesättigten Dampfes statt. Dabei erreicht das Kältemittel ein höheres Druck- und Temperaturniveau. Im Verflüssiger erfolgt eine isotherme Wärmeabgabe. Dabei kondensiert das Kältemittel und gibt über den Phasenwechsel die Wärmeenergie an die Umgebungsluft ab. In diesem Schritt nimmt idealisiert die Entropie im selben Maß ab, wie sie zwischen Punkt 4 und 1 zugenommen

hat. Zwischen Punkt 3 und 4 findet eine isentrope Entspannung statt, sodass die Temperatur des Kältemittels sinkt und im Folgenden im Verdampfer wieder Energie aufnehmen kann. [5]

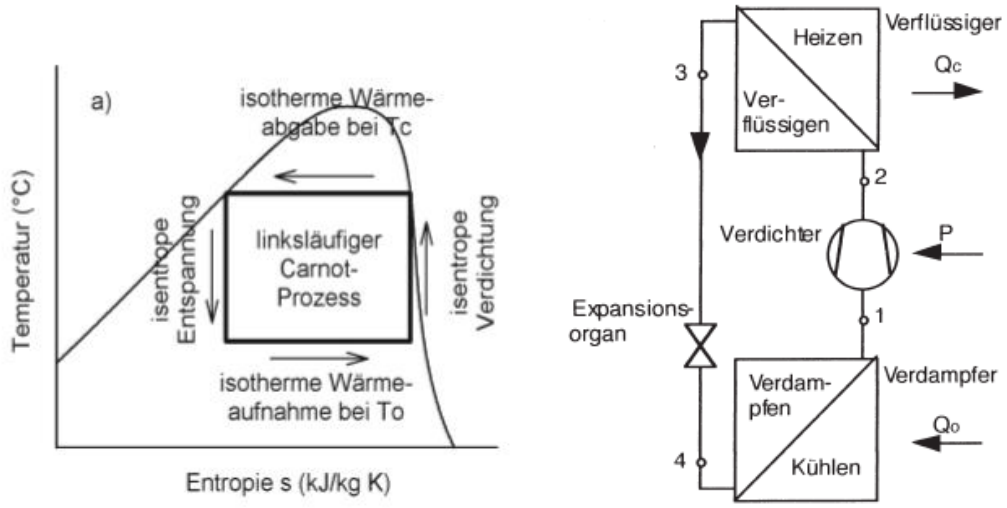


Abbildung 1: Links: T,s- Diagramm -, rechts: Funktionsschema einer Kompressionskältemaschine [5]

Die spezifische Kälteleistung q_0 kann durch die Enthalpie h zwischen den Punkten 4 und 1, in kJ/kg ermittelt werden. Die Enthalpie h zwischen Punkt 1 und 2 gibt die Arbeit w (spezifischen Antriebsleistung) und somit den Energieeinsatz an [5]. Das Verhältnis von der Enthalpie (h_1-h_4) zu (h_2-h_1) gibt die Leistungszahl der Kältemaschine an, da sie das Verhältnis von Energieertrag zu Energieeinsatz darstellt.

Die Kälteleistung $\dot{Q}_0$ kann aus der Differenz der Enthalpien (h_1-h_4) und dem Massenstrom $\dot{m}$, mit der folgenden Formel bestimmt werden [5]:

$$\dot{Q}_0 = \dot{m}\,(h_1 - h_4)$$

Statt des Wirkungsgrades wird bei Kälteanlagen eine Leistungszahl ε angegeben, welche sich über die Kälteleistung $\dot{Q}_0$ und die Antriebsleistung P berechnet [5].

$$\varepsilon_K = \frac{\dot{Q}_0}{P}$$

In Verbindung mit Kältemaschinen werden die Effizienzziffern Coefficient of Performance (COP) und Energy Efficiency Ratio (EER) häufig genannt. Diese geben, wie die Leistungszahl, ein Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand an. Der EER wird dabei für Kälteanlagen und der COP für Wärmepumpen verwendet.

$$COP = \frac{Nutzleistung}{Leistungsaufnahme}$$

$$EER = \frac{Kälteleistung}{Leistungsaufnahme}$$

Kompressionskältemaschinen werden in verschiedene Leistungsgrößen unterteilt, für die verschiedene Verdichter eingesetzt werden. Es wird zwischen Verdrängungsverdichtern, wie Kolben- und Rotationsverdichtern und Turboverdichtern unterschieden [5].

In Abbildung 2 ist die Effizienz einer Kompressionskältemaschine im Teilllastbereich, mit der Kurve η, dargestellt. Daran ist zu erkennen, dass die Effizienz logarithmisch mit der Kälteleistung in % steigt. Die Effizienzsteigerung ist bis 50 % Kälteleistung sehr groß und flacht danach stärker ab, sodass ein wirtschaftlicher Betrieb der Maschine erst bei höherer Kälteleistung sinnvoll ist.

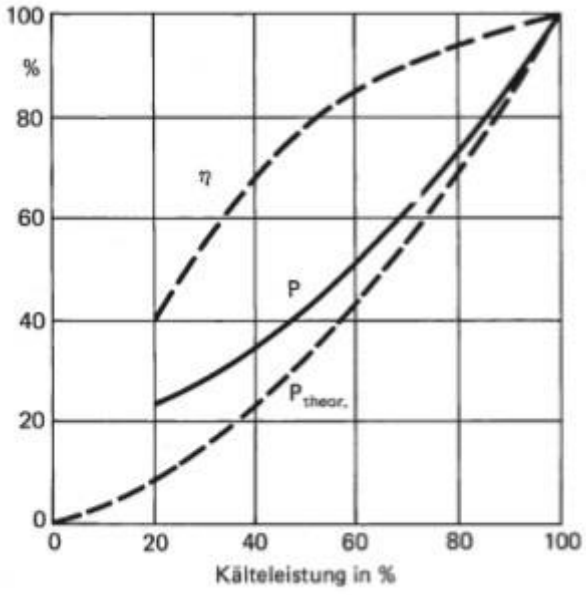


Abbildung 2: Kälteleistungsentwicklung bei Teillastverhalten einer Kompressionskältemaschine [5]

Leistungsklassen stellen die Anteile von Teillastverhalten dar, über die die Auslastung einer Kältemaschine beurteilt werden kann.

3.2 Kältespeicherung

Kältespeicher spielen eine zentrale Rolle bei der Flexibilisierung von Kälteanlagen. Sie können überschüssige Energie aus der Stromerzeugung erneuerbarer Energien speichern und gleichzeitig Lastspitzen der Kälteanlagen ausgleichen. Die Kältespeicher werden in zwei Gruppen unterteilt, die Latentwärmespeicher und die sensiblen Wärmespeicher. Sensible Wärmespeicher, auch Pufferspeicher genannt, nutzen die spezifische Wärmekapazität des Kühlmediums, sodass mit dem überschüssigen Strom eine Absenkung der Kühlmediumtemperatur erfolgt. Latentwärmespeicher nutzen die Phasenwechselenergie eines Speichermediums zur Speicherung von thermischer Energie [5]. Als Latentwärmespeicher, werden hauptsächlich Eisspeicher eingesetzt und als sensible

Wärmespeicher vor allem Kaltwasserspeicher [5]. Im folgenden Abschnitt wird die Funktionsweise eines Kaltwasserspeichers und eines Eisspeichers vorgestellt.

Kaltwasserspeicher

Beim Kaltwasserspeicher wird die Wassertemperatur im Speicher reduziert. Die Speicherdichte q wird über die spezifische Wärmekapazität von Wasser $c_p = 4{,}18 \frac{kJ}{kg*K}$, die Dichte von Wasser $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$ und die Temperaturdifferenz ΔT bestimmt [5].

$$q = c_p * \rho * \Delta T = \frac{1000 * 4{,}18 * 1}{3600} = 1{,}16 \frac{kWh}{m^3 * K} * \Delta T$$

Für die Speicherkapazität Q wird die spezifische Speicherdichte mit dem Volumen V und der Temperaturdifferenz zwischen Ladung und Entladung des Speichers bestimmt [6]. Eine übliche Temperaturdifferenz sind 6 K [5].

$$Q = c_p * \Delta T * \rho * V$$

Die Dimensionierung des Speichervolumens hat somit Einfluss auf die Speicherkapazität, das heißt je größer das Speichervolumen ist, desto mehr Energie kann bei gleicher Temperaturdifferenz gespeichert werden.

Eisspeicher

Beim Eisspeicher wird die Phasenwechselenergie (Wasser/Eis) zur Speicherung von Energie genutzt. Die für den Phasenwechsel benötigte Energie ist 80-mal größer als die Energie, die notwendig ist, um die Temperatur von Wasser um 1 Grad zu verändern. Dadurch wird eine höhere Energiedichte als beim Kaltwasserspeicher erreicht [7].

Die theoretische spezifische Speicherdichte q_{theor} wird über die Dichte von Eis $\rho = 916 \frac{kg}{m^3}$ und die Schmelzwärme des Wasser $c = 332 \frac{kJ}{kg}$ berechnet [5].

$$q_{theor} = \rho * c = 916 * 332 * \frac{1}{3600} = 84{,}5 \frac{kWh}{m^3}$$

Da bei einem Eisspeicher im Inneren Spiralkühlrohre eingesetzt werden, um das Wasser zu gefrieren, werden in der Praxis nur $q = 40\ bis\ 60 \frac{kWh}{m^3}$ erreicht [5]. Durch die Spiralkühlrohre fließt ein Kältemittel mit einem Schmelzpunkt unter 0 °C. Die Speicherkapazität Q wird über die spezifische Speicherdichte q und das Speichervolumen V bestimmt:

$$Q = q * V$$

3.3 Lastmanagement

Für den Begriff Lastmanagement gibt es in der wissenschaftlichen Literatur keine einheitliche Definition. Im Allgemeinen versteht man unter Lastmanagement die Veränderung der Energieabnahme eines Stromverbrauchers. Der Eingriff in den Betrieb von elektrischen Anwendungen zur Steuerung des Stromverbrauchs wird im Englischen als „Demand Side Management“ bezeichnet. Übergeordnet kann Lastmanagement als Änderung des Stromlastgangs zur Stabilisierung des Energienetzes bezeichnet werden. Mit steigendem Anteil an erneuerbaren Energien in Deutschland steigt auch die Bedeutung des Lastmanagements, als eine Möglichkeit, die volatile Energieproduktion aus den regenerativen Energien auszugleichen [9].

Zum Lastmanagement können Lastverzicht, Lasterhöhung, Lastverschiebung und die Sektorenkopplung beitragen. Unter Lastverzicht versteht man die Einsparung von Energie. Das bedeutet, diese Energie muss nicht zu einem anderen Zeitpunkt bereitgestellt werden, sondern wird grundsätzlich eingespart. Bei der Lasterhöhung wird der Energieverbrauch, komplementär zum Lastverzicht, erhöht, ohne zu einem anderen Zeitpunkt dafür Energie einzusparen. Ein Lastverzicht kann durch Verbesserung der Energieeffizienz in vielen Bereichen erreicht werden, indem durch die Optimierung des Stromverbrauchers Energie eingespart wird, mit dem Ziel, die Stromkosten zu senken. Eine Lasterhöhung wird durch die Erhöhung der Auslastung, beispielsweise einer Produktionsanlage, erzielt, unter anderem, um Zeiten niedriger Stromtarife zu nutzen. So könnte eine Holzfabrik mehr Holz zuschneiden, als ursprünglich geplant, und die Überproduktion über Sonderverkäufe vertreiben [8].

Die Lastverschiebung besteht aus den zwei Phasen der Lasterhöhung und Lastreduktion. Dabei wird der Energieverbrauch zeitlich verschoben, sodass zu einem Zeitpunkt der Energieverbrauch erhöht, beziehungsweise reduziert und zu einem anderen Zeitpunkt diese Erhöhung, beziehungsweise Reduktion, wieder kompensiert wird. In Summe bleibt der Energieverbrauch unverändert. Dabei kann Lastverschiebung durch verschiedene Lastmanagementmöglichkeiten umgesetzt werden. Bei Betrieben unterscheidet man zwischen betrieblichem Spitzenlastmanagement und überbetrieblichem Lastmanagement. Während beim Spitzenlastmanagement die innerbetrieblichen Lastspitzen identifiziert werden, mit dem Ziel, eine konstantere Lastverteilung zu erreichen und Lastspitzen im Betrieb zu reduzieren, soll beim überbetrieblichen Lastmanagement auf die Lastspitzen im Netz reagiert werden, um zur Netzstabilisierung beizutragen [9].

Diese Reduzierung von Lastspitzen erfolgt durch eine gezielte Ansteuerung von Stromverbrauchern und ist für Industriebetriebe mit hohen Lastspitzen interessant, da die Betriebe nicht nur den Arbeitspreis der bezogenen Energie (€/MWh) bezahlen müssen,

sondern zusätzlich einen Leistungspreis (€/kW), der auf Grundlage der maximal bezogenen Leistung ermittelt wird.

In Abbildung 3 ist ein Lastgang mit und ohne Lastmanagement dargestellt. Es ist ersichtlich, dass durch Lastmanagement die Maximalleistung P_{max} reduziert werden kann.

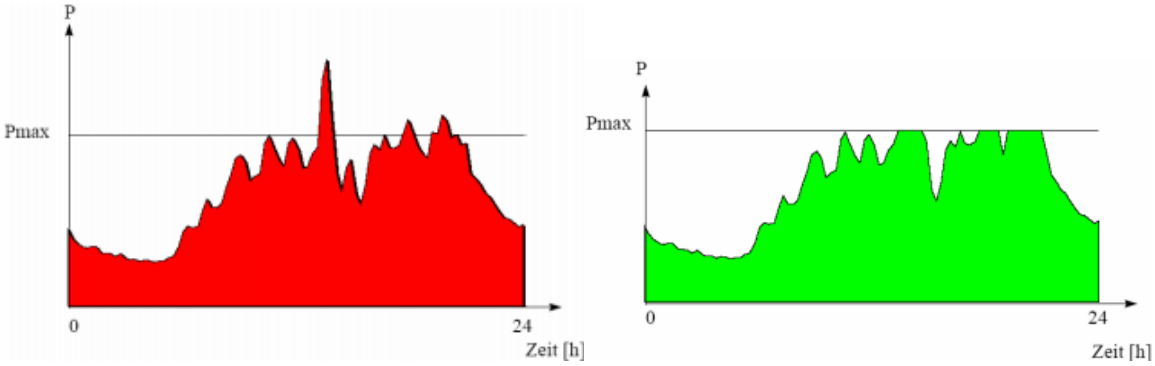


Abbildung 3: links: Lastgang ohne Lastmanagement; rechts: Lastgang mit Lastmanagement nach [10]

Um ein Spitzenlastmanagement effizient einsetzen zu können, muss im ersten Schritt eine Lastganganalyse erfolgen. Dabei werden die typischen Lastgänge im Unternehmen erfasst, um festzustellen, wann Lastspitzen auftreten und durch welche Lastabnehmer sie verursacht werden. So kann zum Beispiel eine einzelne Maschine phasenweise einen hohen Stromverbrauch aufweisen oder es gibt Zeiten, in denen mehrere Maschinen gleichzeitig Strom abnehmen und dadurch die Last erhöht ist. Im zweiten Schritt muss analysiert werden, bei welchen Maschinen und Prozessen eine Lastverschiebung möglich ist, um die Spitzenlast reduzieren zu können. Aus der Lastganganalyse wird ein Leistungsmittelwert (Soll-Leistung) ermittelt, der im Regelbetrieb nicht überschritten werden soll. Die Umsetzung des Spitzenlastmanagements erfolgt über ein Mess- und Steuerungssystem. Das System misst in festgelegten Zeitintervallen den aktuellen Stromverbrauch (Ist-Leistung) und ermittelt die für die nächste Viertelstunde zu erwartende Last. Wenn der prognostizierte Werte über der vorher festgelegten Soll-Leistung liegt, schaltet das Regelsystem Verbraucher nach einer voreingestellten Priorität ab. Sobald die Ist-Leistung unter die Soll-Leistung sinkt, werden diese Verbraucher wieder zugeschaltet. Dies ist in Abbildung 4 dargestellt.

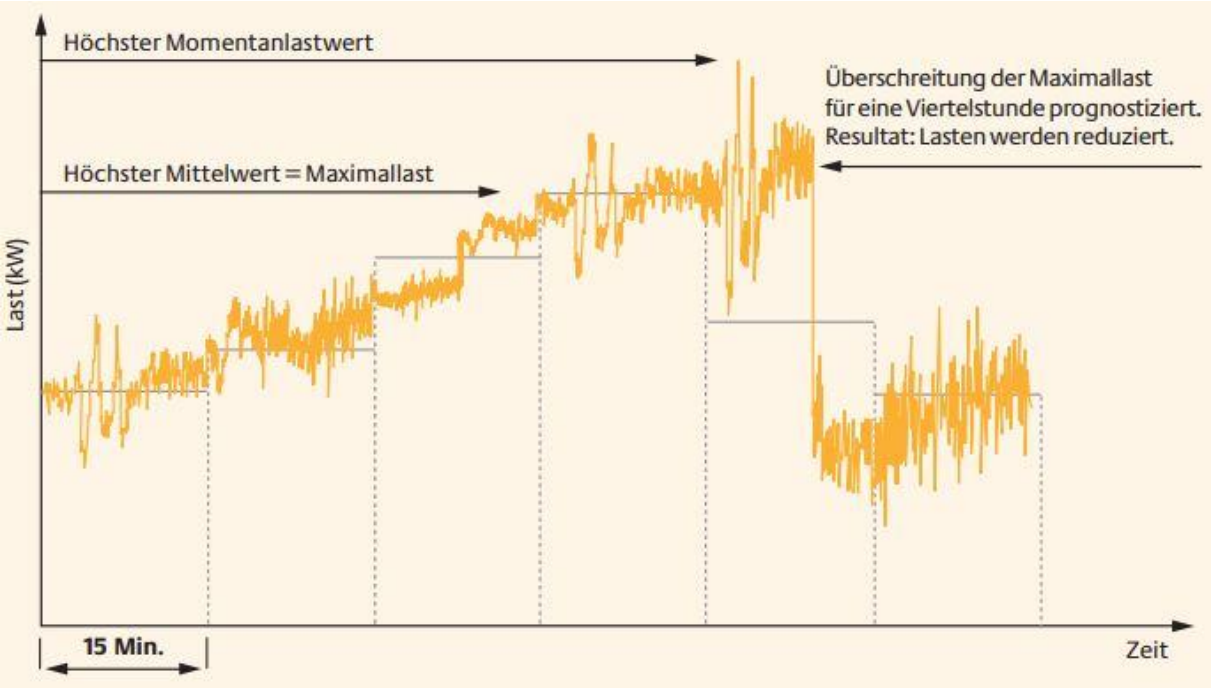


Abbildung 4: Automatische Lastabschaltung bei drohender Überschreitung der Maximallast [9]

Beim überbetrieblichen Lastmanagement werden die im Betrieb vorhandenen verschiebbaren Lasten zur Netzstabilisierung nutzbar gemacht. Ziel ist es, die Lasten aus Zeiten mit hoher Netzauslastung und dementsprechend teuren Strompreisen in Zeiten mit geringerer Netzauslastung und niedrigen Preisen zu verschieben. Der Vorteil für die Betriebe besteht darin, dass sie diese flexiblen Lasten vermarkten können [9].

Die beiden Möglichkeiten der Lastverschiebung sind in den Abbildung 5 und Abbildung 6 schematisch dargestellt. Bei der Schaltung in Abbildung 6 wird zuerst bei günstigen Strompreisen oder geringer Auslastung der Maschine oder des Prozesses die abgerufene Leistung erhöht. Die so gespeicherte Energie kann im Ausgleichszeitraum, zum Beispiel bei teurem Strompreis oder hoher Auslastung des Prozesses, wieder freigesetzt werden. In Abbildung 5 wird zunächst die Leistung auf Grund von hohen Strompreisen oder Auslastungen reduziert und anschließend zu einem späteren Zeitpunkt zu besseren Konditionen nachgeholt.

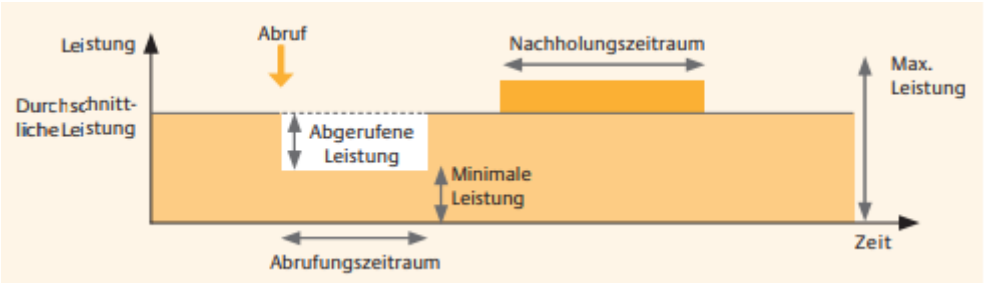


Abbildung 5: Schaltmöglichkeit für Leistungsreduzierung mit Nachholung [9]

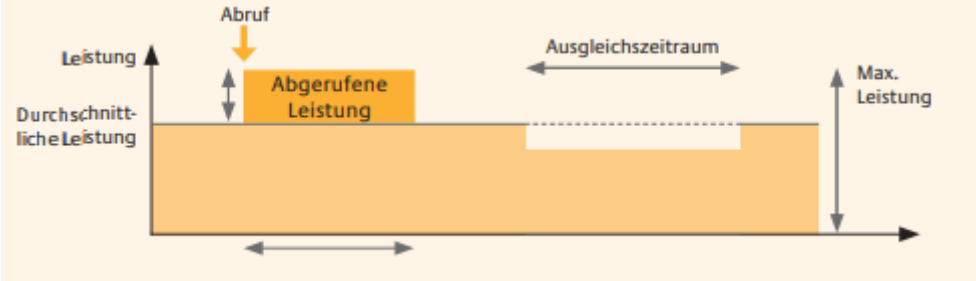


Abbildung 6: Schaltmöglichkeit für Leistungserhöhung mit späterem Ausgleich [9]

Während für eine kurzzeitige Lastverschiebung bestimmte Prozesse für eine kurze Zeitspanne in ihrer Leistung reduziert werden können, ist für eine längere Lastverschiebung in der Regel die Möglichkeit einer Zwischenspeicherung erforderlich [12]. Dies könnte zum Beispiel mit einem Energiespeicher umgesetzt werden, welcher bei günstigen Preisen oder geringer Auslastung der Produktion geladen wird und zu Zeitpunkten teurer Strompreise oder einer hohen Auslastung entladen wird.

Bei der Sektorenkopplung besteht die Möglichkeit, die Energieträger zu wechseln. Dadurch kann zum Beispiel der elektrische Energieverbrauch erhöht und gleichzeitig der thermische Energiebedarf verringert werden oder umgekehrt. Sektorenkopplung kann dementsprechend nur eingesetzt werden, wenn beide Anlagentypen an einem Standort zu Verfügung stehen [10].

Als Fazit werden in Tabelle 1 Vor- und Nachteile von Lastmanagement aufgeführt. Dabei ist sowohl die Reduktion von Lastspitzen und ein gleichmäßigerer Lastgang als auch eine Kostenersparnis möglich. Allerdings ist dazu meist eine zusätzliche Infrastruktur notwendig, die einmalige Investitionskosten erfordert.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von Lastmanagement nach [10]

Pro	**Contra**
Verringern von Lastspitzen	Zusätzliche Infrastruktur
Kostenersparnis über einen längeren Zeitraum	Einmalige Kosten
Gleichmäßiger Verlauf des Lastgangs	Mehraufwand für die EVU`s

3.4 Bilanzausgleich im Energiemanagement

Die Erschließung von Lastmanagement und die Erzielung wirtschaftlicher Vorteile können sich gegenseitig positiv beeinflussen. Der EPEX SPOT (European Power Exchange) ist die Börse für kurzfristigen Stromgroßhandel in Mitteleuropa [9]. Dort werden, sowohl Tarife für den Folgetag (Day-ahead-Handel) als auch den aktuellen Tag (Intraday-Handel) gehandelt. Dabei wird hauptsächlich zwischen dem Peak-Strompreis (8:00 bis 20:00 Uhr) und dem Off-Peak Preis (20:00 bis 8:00 Uhr) unterschieden [11]. Diese sind in Abbildung 7 dargestellt.

Hintergrund dieses Bilanzausgleiches ist, dass im Stromnetz ein Gleichgewicht zwischen Ein- und Ausspeisung gehalten werden muss. Dazu ist jeder Netznutzer verpflichtet, wobei für Haushalte und kleinere Unternehmen der Stromlieferant die Verantwortung trägt. Eine Abrechnungsperiode beträgt dabei eine Viertelstunde.

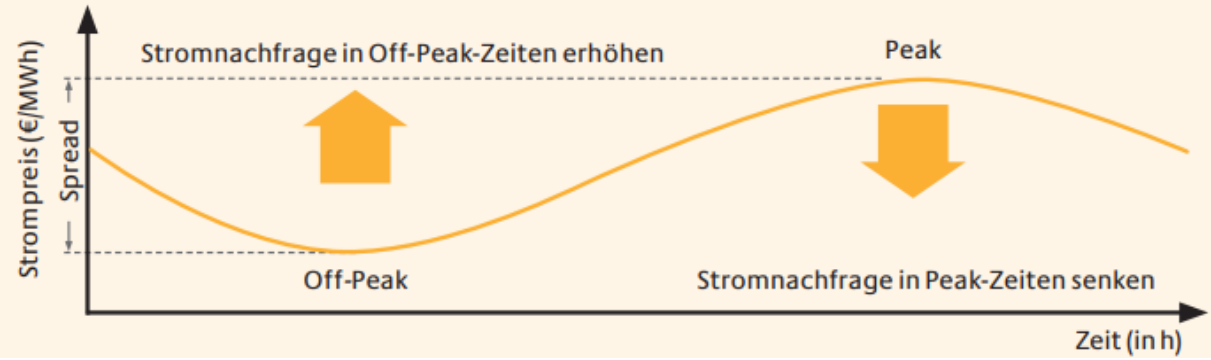


Abbildung 7: Ausnutzung von Preisschwankungen auf dem Strommarkt [9]

Durch flexible Lasten können Unternehmen am EPEX SPOT Kostenreduzierungen erwirtschaften. Dabei können insbesondere energieintensive Unternehmen Bilanzkreise ausgleichen. Dafür gibt es Erzeugungen und Lasten, deren Ziel die Netzstabilität ist. Je nach Anfahrgeschwindigkeit wird zwischen Primär- und Sekundärregelleistung, sowie Minutenreserve unterschieden. In Abbildung 8 sind diese nach Einsatz- und Aktivierungszeit aufgetragen. Die Primärregelleistung wird bei Frequenzabweichungen innerhalb von 30 Sekunden automatisch aktiviert und ist dann für bis zu 15 Minuten verfügbar. Die Sekundärregelleistung muss innerhalb von fünf Minuten vollständig aktiviert werden und wird vom Übertragungsnetzbetreiber zugeschaltet. Typischerweise werden Gaskraft- oder Pumpspeicherwerke eingesetzt. Die Minutenreserve muss innerhalb von 15 Minuten vollständig aktiviert sein und wird vor allem durch große regelbare Kraftwerke wie Steinkohlekraftwerke bereitgestellt. Flexible Lasten können ebenfalls als Regelleistung eingesetzt werden, wenn ihr Pool mindestens 15 MW Leistung umfasst [9].

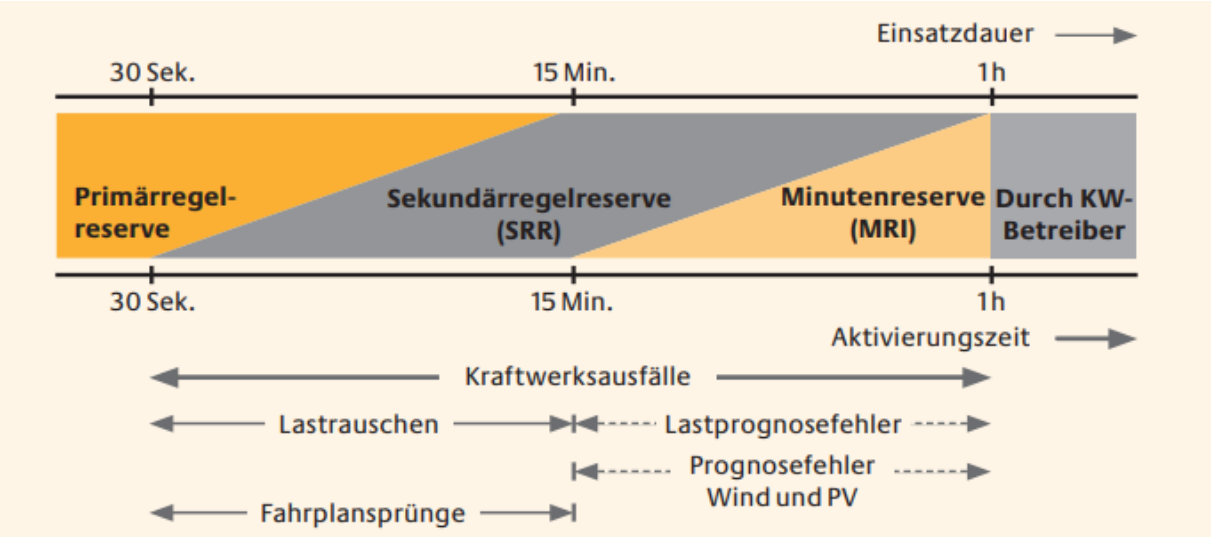


Abbildung 8: Zeitlicher Ablauf der Regelleistungsbereitschaft nach Produkten [9]

Im Durchschnitt kostete im Jahr 2019 an der Energieböse EPEX SPOT eine MWh 37,48 € und die Standardabweichung beträgt 17,35 €/MWh. Dabei ist der höchste Preis, der im Laufe des Jahres aufgetreten ist, 164,23 € und der niedrigste -149,91 €/MWh [1].

Anwendungsmöglichkeiten im Kältesektor

Die oben beschriebenen Methoden für Lastmanagement sind auch im Kältesektor einsetzbar. Ein Lastverzicht kann zum Beispiel umgesetzt werden, indem eine effizientere Kälteanlage eingebaut wird, welche Energie einspart. Für Lastverschiebung gibt es zwei Hauptmöglichkeiten. Zum einen, durch die Nutzung der thermischen Trägheit von Kühlanwendungen und zum anderen durch den Einsatz von Kältespeichern.

Kältespeicher dienen zur Zwischenspeicherung von Energie. Dies kann zum Netzausgleich genutzt werden, wenn ein Zusammenschluss verschiedener Kälteanlagen die Mindestleistung für die Regelleistung zur Verfügung stellt. Übersteigt die Stromerzeugung die Energieabnahme, kann ein Kältespeicher dies kompensieren, indem die Leistung der Kältemaschine erhöht wird. Dadurch wird kurzfristig mehr Kälte erzeugt als zu diesem Zeitpunkt benötigt wird und diese dazu genutzt, den Speicher zu befüllen. Im gegenteiligen Fall kann der Kältespeicher Zeitpunkte überbrücken, in denen die Energieabnahme die Erzeugung übersteigt. Dann nimmt die Kältemaschine weniger Energie auf und gleichzeitig wird der Speicher entladen, um den Kältebedarf der Anwendung trotzdem zu decken.

4 Kältemarkt in Deutschland

Im Kapitel „Kältemarkt in Deutschland“ wird zunächst aus Daten bestehender Studien die Größe des Kältemarktes in Deutschland abgeschätzt. Anschließend wird der Kältemarkt in Deutschland auf die verschiedenen Branchen aufgeschlüsselt. Daraus ist erkennbar, welche Anwendungen den größten elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung und somit ein großes Potenzial für Lastmanagement besitzen.

Die beiden Auswertungsgrößen sind der Kältebedarf, der die thermische Energie, die benötigt wird, um eine bestimmte Temperatur zu erreichen oder zu halten, angibt, sowie der elektrische Endenergiebedarf zur Kältebereitstellung, der die benötigte Energie zur Deckung des Kältebedarfs angibt.

4.1 Entwicklung des Stromverbrauchs

Einleitend wird die Entwicklung des Gesamtstromverbrauch in Deutschland zwischen 1990 und 2016 mit der Verteilung auf die Sektoren betrachtet und in Abbildung 9 dargestellt. Die vier Hauptsektoren sind Gewerbe-Handel-Dienstleistungen (GHD), Industrie, Verkehr und Haushalte [12]. Der Nettostromverbrauch in Deutschland lag 2018 bei 527 TWh [13].

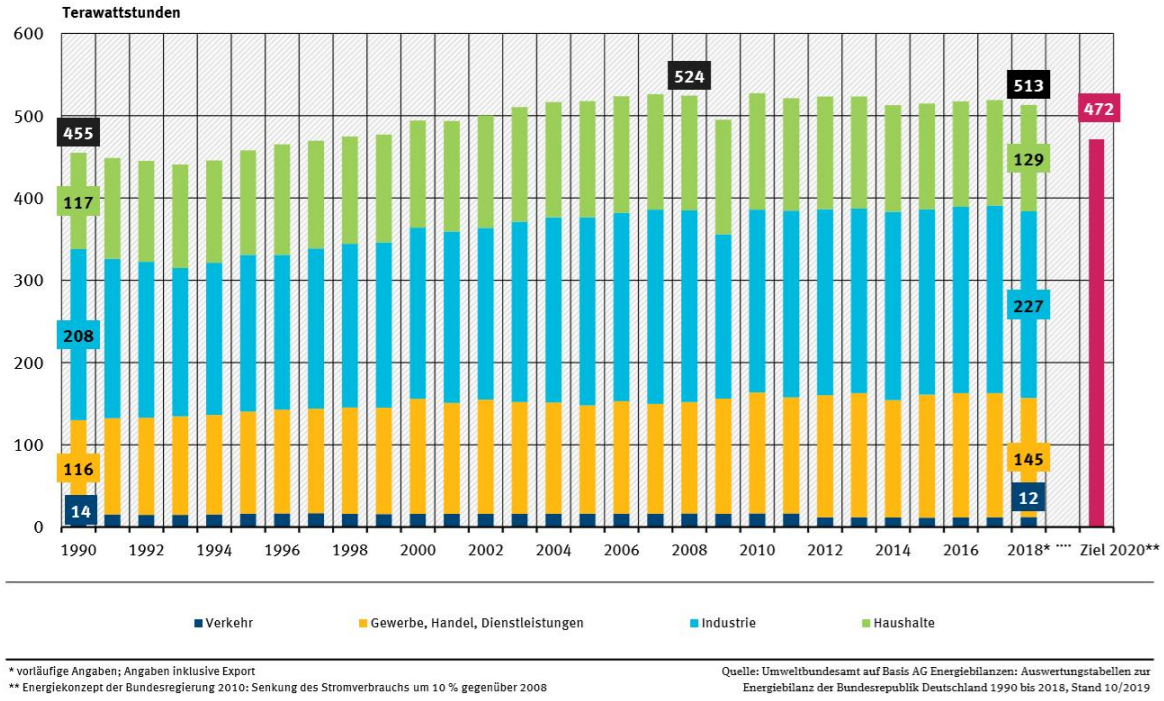


Abbildung 9: Entwicklung des Stromverbrauchs nach Sektoren in Deutschland [12]

In Abbildung 9 ist zu erkennen, dass der Stromverbrauch in Deutschland in den letzten Jahren zwischen 500 und 530 TWh/a stagniert und für das Jahr 2020 sogar ein Rückgang prognostiziert wird. Der Anteil des Verkehrssektors ist mit 12 TWh im Jahr 2018 am geringsten.

Die Haushalte und der GHD-Sektor haben jeweils einen Anteil von etwa einem Viertel und der Sektor Industrie ist mit 227 TWh/a der größte.

4.2 Studien zum Kältemarkt in Deutschland

Zum Kältebedarf und elektrischem Energiebedarf zur Kältebereitstellung in Deutschland gibt es verschiedene Studien. Diese dienen als Grundlage, um die Größe des Kältesektors im weiteren Verlauf dieser Arbeit zu bestimmen und den Kältebedarf und den elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung in Deutschland für die verschiedenen Branchen zu identifizieren.

In der Literatur findet man häufig zwei Angaben zur Bezifferung des Kältebedarfs, die Kältemenge oder Kältearbeit und den Stromverbrauch oder Endenergieverbrauch für die Kälteerzeugung. Häufig wird nur, entweder auf den Strombedarf oder die Kältemenge eingegangen, selten werden beide Werte genannt. Auch wenn die beiden Werte kausal zusammenhängen, lassen sie sich nicht direkt voneinander berechnen, sondern nur über die Leistungs- oder Arbeitszahl der Kältemaschine. Diese ist aber häufig nicht bekannt und wird in der Literatur nicht angegeben.

Für die Auswertung wurden folgende Studien berücksichtigt:

- Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland; 2011[14]
- Energiebedarf bei der technischen Erzeugung von Kälte; 2002 [15]
- Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie; 2014 [16]
- Energieeffizienz in Zahlen; 2018 [17]
- Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland; 2018 [18]

Bei den ausgewerteten Studien handelt es sich um Metaanalysen, die teilweise die gleichen Primärdaten verschieden bewerten. Einige Studien beziehen sich dabei auf Daten vom DKV zum Basisjahr 1999, die in der Quelle „Energiebedarf bei der technischen Erzeugung von Kälte“ aus dem Jahr 2002 ausgewertet wird. Die unterschiedlichen Angaben, die unterschiedlichen Zeitpunkte der Datenerhebung und die unterschiedlichen Datenquellen erschweren eine vergleichende Gegenüberstellung der Daten erheblich.

4.2.1 Studie „Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland“

In der Studie „Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland“ vom VDMA 2011 werden verschiedene Daten zum Basisjahr 2009 ausgewertet [14]. Die Studie gibt den gesamten Endenergiebedarf von Kältetechnik in Deutschland mit 86 TWh/a an. Davon entfallen 72 TWh/a auf die elektrische und 14 TWh/a auf die nicht-elektrische Erzeugung. In Abbildung 10 und Tabelle 2 ist die Aufteilung des elektrischen Energiebedarfs, der VDMA-Studie dargestellt. Neben dem Gesamtendenergiebedarf ist in Tabelle 2 zusätzlich der Primärenergiebedarf aufgeführt, der in dieser Arbeit aber nicht betrachtet wird.

Tabelle 2: Endenergiebedarf der Einsatzgebiete nach [14]

Einsatzgebiet	**Gesamtendenergiebedarf in GWh/a**			**Primärenergie-bedarf in GWh/a**
	elektrisch	nicht elektrisch	Gesamt	
Haushaltskälte	24.138	-	24.138	71.690
Supermarktkälte	8.592	-	8.592	25.518
Nahrungsmittelherstellung	6.748	138	6.886	20.317
Gewerbe	5.396	110	5.507	16.248
Transport	572	1.147	1.720	4.817
Klimatisierung	10.795	12.301	23.096	70.701
Industrie (ohne Nahrungsmittel)	9.804	200	10.004	29.517
Medizin	1.348	-	1.348	4.005
Kühlhäuser	1.406	-	1.406	4.175
Wärmepumpen	2.597	-	2.597	7.712
Sonstige	632	300	932	2.672
Gesamt	**72.028**	**14.196**	**86.224**	**257.373**

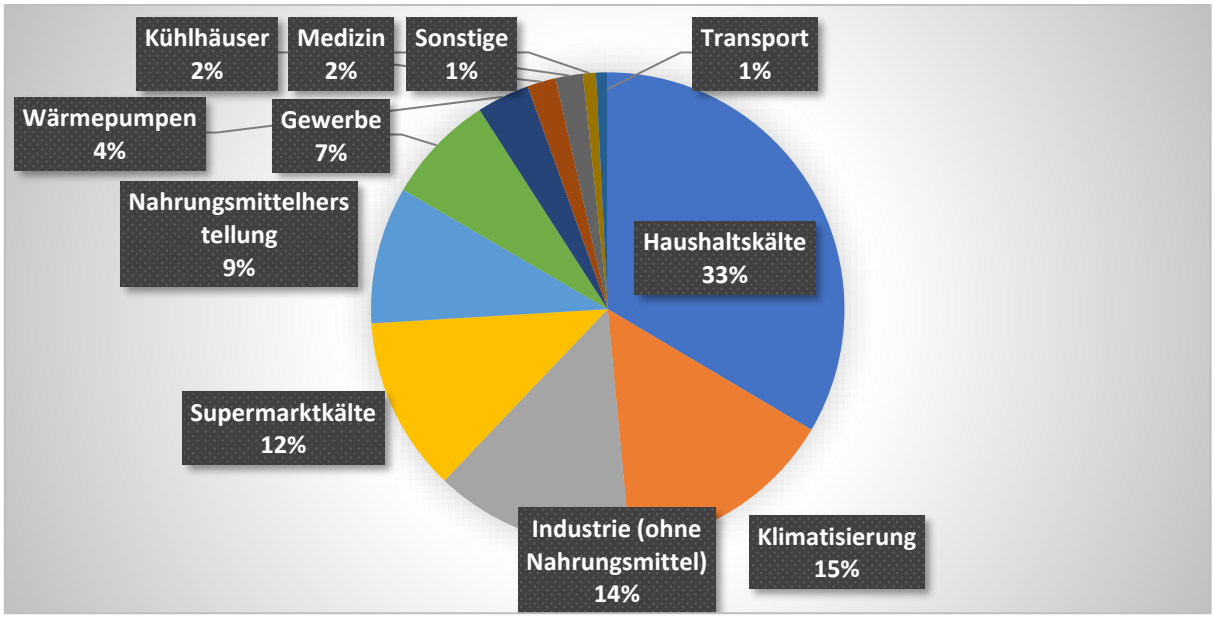


Abbildung 10: Anteil der Einsatzgebiete am elektrischen Endenergiebedarf zur Kälteerzeugung nach [14]

Dabei ist zu erkennen, dass der Sektor Haushaltskälte mit 24.138 GWh/a der größte ist, gefolgt von der Klimatisierung und der Industrie (ohne Nahrungsmittel). Hierbei wird die Klimatisierung allerdings als ein Einsatzgebiet betrachtet und es erfolgt keine weitere Differenzierung. Den Anteil der Kältetechnik am elektrischen Endenergiebedarf in Deutschland gibt die VDMA-Studie mit 14,4 % an.

4.2.2 Studie „Energiebedarf bei der technischen Erzeugung von Kälte“

Diese Studie bezieht Ihre Daten auf das Referenzjahr 1999 [15] und wurde in Zusammenarbeit folgender Institute erstellt:

- Institut für Angewandte Thermodynamik und Klimatechnik, Universität Essen
- Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH, Hannover
- Forschungsrat Kältetechnik e.V., Frankfurt
- Institut für Luft- und Kältetechnik GmbH, Dresden

Sie gibt als Gesamtenergiebedarf zur technischen Erzeugung von Kälte in Deutschland einen Wert von 77,09 TWh/a an. Aus Tabelle 3 ist ersichtlich, dass davon 66,05 TWh/a auf den elektrischen und 10,91 TWh/a auf den nichtelektrischen Bedarf entfallen.

Tabelle 3: Kältebedarf der Branchen nach [15]

	Gesamtenergiebedarf in GWh/a			**Primärenergie-bedarf in GWh/a**	**Gesamtkälte-bedarf in GWh/a**
	elektrisch	nicht elektrisch	Gesamt		
Nahrungsmittel	48.050	3.071	51.121	153.909	108.058
Industriekälte	6.854	0	6.845	20.795	5.255
Klimatisierung	9.705	7.776	17.481	50.349	48.548
Sonstige	1.579	65	1.644	4.981	3.066
Gesamt	**66.049**	**10.912**	**77.091**	**230.034**	**164.927**

Der Gesamtkältebedarf wird mit 164,93 TWh/a angegeben. In Abbildung 11 sind die Anteile der Sektoren Nahrungsmittel, Industriekälte, Klimatisierung und Sonstige am Kältebedarf (links) und am elektrischen Energiebedarf (rechts) graphisch dargestellt. Nach Angaben der Studie entfallen auf die drei Sektoren Nahrungsmittel, Industriekälte und Klimatisierung 98 % des gesamten Kältebedarfs in Deutschland.

Insgesamt ist der Nahrungsmittelsektor die Sparte mit dem höchsten elektrischen Energiebedarf (48.050 GWh/a) und Kältebedarf (108.058 GWh/a). Die Industriekälte hat zwar mit 5.255 GWh/a nur einen Anteil von 3 % am Kältebedarf, mit 6.854 GWh/a ist ihr Anteil am elektrischen Energieverbrauch im Vergleich dazu mit 10 % aber wesentlich höher. Umgekehrt verhält es sich mit der Klimatisierung. Diese hat einen Kältebedarf von 48.548 GWh/a, während der elektrische Energiebedarf nur 9.705 GWh/a beträgt. Der Sektor Sonstiges ist mit 3.066 GWh/a Kältebedarf und 1.579 GWh/a elektrischem Energiebedarf mit 2 % jeweils sehr klein.

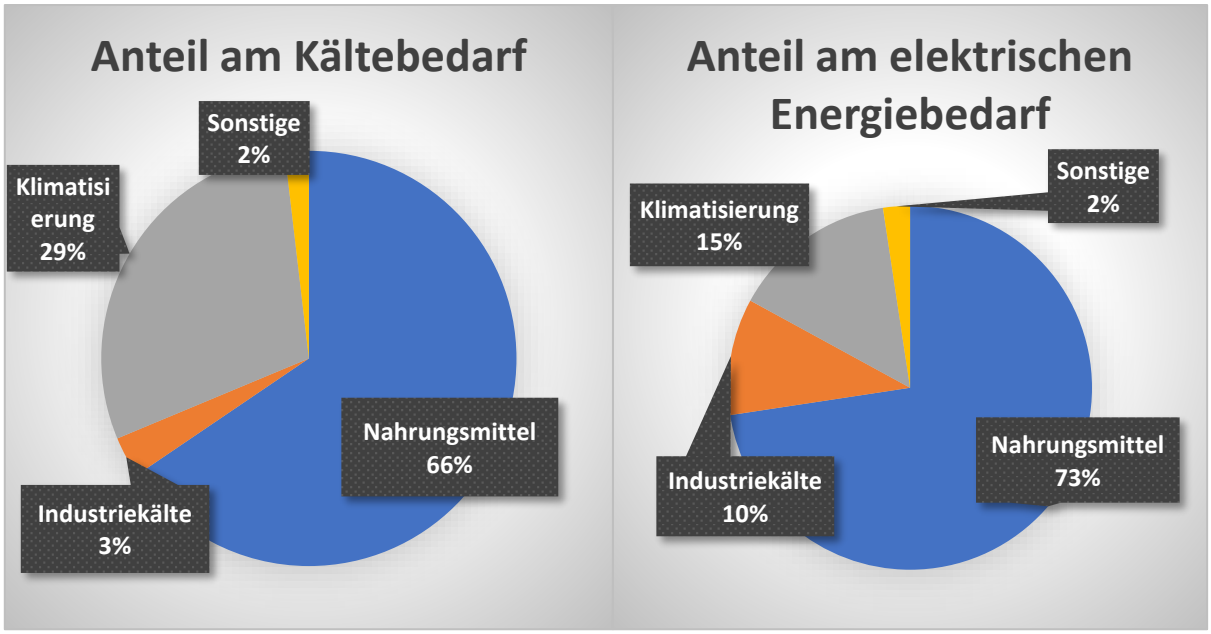


Abbildung 11: Links Anteil am Kältebedarf; rechts: Anteil am elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung nach [15]

Die einzelnen Sektoren werden jeweils in kleinere Bereiche aufgeteilt. So besteht der Nahrungsmittelsektor aus den in Tabelle 4 dargestellten Unterkategorien.

Tabelle 4: Kältebedarf des Nahrungsmittelsektors nach [15]

Nahrungs-mittelsektor	**Gesamtenergiebedarf in GWh/a**			**Primärenergie-bedarf in GWh/a**	**Gesamtkälte-bedarf in GWh/a**
	elektrisch	nicht elektrisch	Gesamt		
Erzeugung	19.616	-	19.616	59.436	54.929
Transport	-	3.071	3.071	8.316	7.751
Verteilung, Lagerung	9.805	-	9.805	29.708	19.146
Haushalt	18.630	-	18.630	56.449	26.232
Gesamt	**48.050**	**3.071**	**51.121**	**153.909**	**108.058**

Für diese Unterkategorien erfolgen noch weitere Aufteilung in verschiedene Lebensmittelbranchen, welche hier nicht weiter aufgeführt werden.

4.2.3 Studie „Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie“

Die Studie „Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie“ ist eine Forschungsarbeit vom Institut für Luft- und Kältetechnik und wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit in Auftrag gegeben [16]. Auch diese Studie fasst verschiedene Quellen zusammen und überprüft deren Plausibilität. Unter anderem bezieht sich die Studie auf die VDMA Studie „Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland“ [14] (siehe 4.2.1) und den DKV Statusbericht 22, welcher in der Studie „Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte“ [15] aus dem Jahr 2002 ausgewertet wird (siehe 4.2.2).

Dabei wird neben dem Endenergiebedarf zur Kältebereitstellung auch eine Schätzung zum Kältebedarf angegeben. Als Ergebnis der Auswertung wird ein Kältebedarf von 63,17 TWh/a und ein elektrischer Energiebedarf zur Kältebereitstellung von 30,24 TWh/a ermittelt. Die Aufteilung des Kältebedarfs und elektrischen Energiebedarfs zur Kältebereitstellung ist in Tabelle 5 sowie in Abbildung 12 auf die verschiedenen Branchen aufgetragen.

Tabelle 5: Kältebedarf der Branchen nach [16]

Branchen	Kältebedarf in GWh/a	elektrischer Endenergiebedarf in GWh/a
Industriekälte	18.296	13.030
Nahrungsmittelherstellung	14.091	6.766
Gebäudeklimatisierung	30.787	10.448
Summe	**63.174**	**30.244**

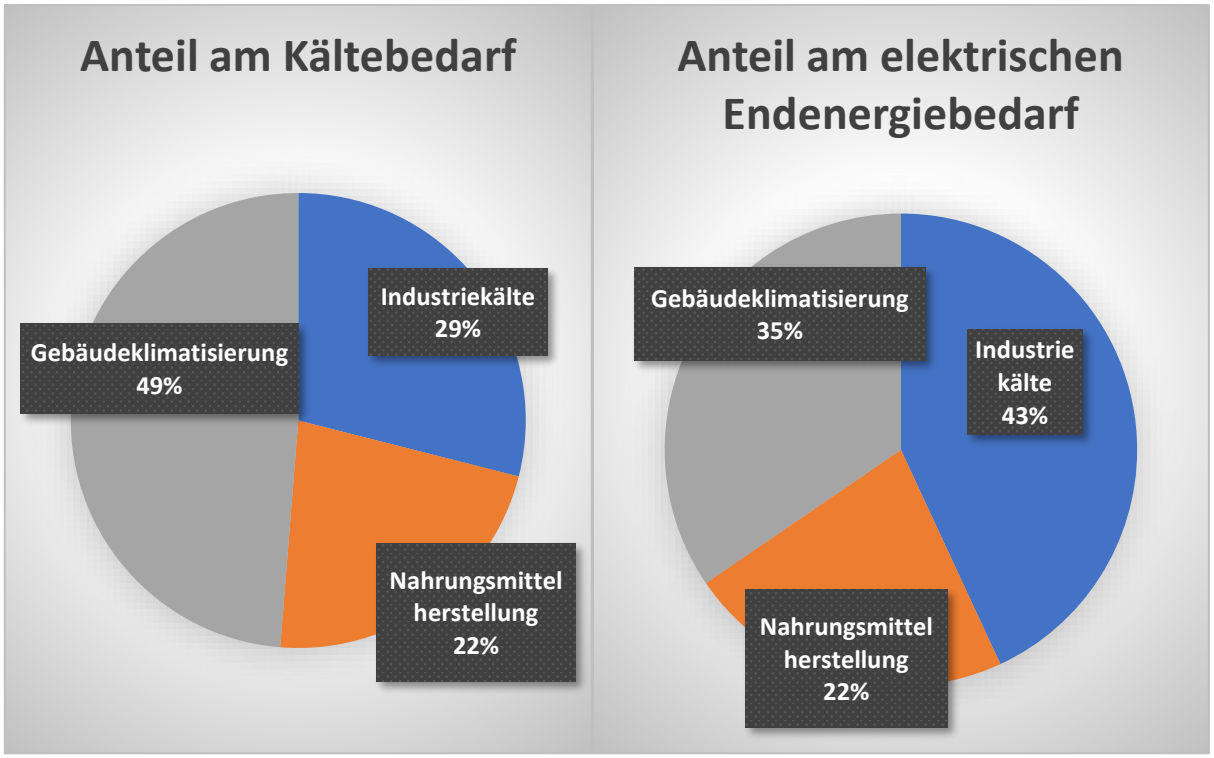


Abbildung 12: Links: Anteil am Kältebedarf-, rechts: Anteil am elektrischen Endenergiebedarf nach Sektoren [16]

Die Gebäudeklimatisierung, welche Gewerbe-Handel-Dienstleistungen, Industrie, Rechenzentren und Server sowie Haushalte umfasst, macht mit 30.787 GWh/a beim Kältebedarf einen Anteil von 49 % aus. Mit 10.448 GWh/a ist der Anteil am elektrischen Endenergieverbrauch für die Kälteversorgung mit 35 % wesentlich geringer. Dies lässt darauf schließen, dass mit einem geringeren Energieaufwand ein höherer Kältebedarf, im Vergleich zu den anderen Branchen, gedeckt werden kann. Demgegenüber wird bei der Industriekälte ein gegenläufiger Effekt festgestellt. Hier beträgt mit 18.296 GWh/a der Anteil am Gesamtkältebedarf nur 29 %, während mit 13.030 GWh/a der Anteil am elektrischen Endenergiebedarf bei 43 % liegt. Für die Nahrungsmittelherstellung wird ein Kältebedarf von 14.091 GWh/a und ein elektrischer Endenergiebedarf von 6.766 GWh/a angegeben.

4.2.4 Studie „Energieeffizienz in Zahlen“

Die Studie „Energieeffizienz in Zahlen“ wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im August 2018 veröffentlicht [17]. Darin wird für das Jahr 2008 ein Gesamtstromverbrauch in Deutschland von 524 TWh/a mit einem Anteil des elektrischen Energiebedarfs zur Kältebereitstellung von 49,26 TWh/a angegeben. Des Weiteren werden vorläufige Werte für das Jahr 2016 angegeben mit einer prognostizierten Reduktion des gesamten Stromverbrauchs auf 516 TWh/a und einer Erhöhung des elektrischen Energiebedarfs zur Kältebereitstellung auf 55,73 TWh/a [17]. Dabei wird zwischen Klimakälte und sonstiger Prozesskälte unterschieden. Die 55,73 TWh/a für das Jahr 2016 teilen sich, wie

in Tabelle 6 aufgeführt, auf die Sektoren Industrie, private Haushalte und Gewerbe-Handel-Dienstleistungen auf, wobei die abweichende Summe in Tabelle 6 auf Rundungen zurückzuführen ist.

Tabelle 6: Energiebedarf zur Kältebereitstellung nach [17]

Sektor in Deutschland	Gesamtstrombedarf in TWh/a	Anteil der Kältetechnik in %	Energiebedarf zur Kältebereitstellung in TWh/a
Industrie	226	4,3	9,7
Gewerbe-Handel-Dienstleistung	149	10,6	15,8
Private Haushalte	129	23,2	29,9
Summe	**504**	**11,0**	**55,4**

Die privaten Haushalte haben mit 29,9 TWh und über 50 % den größten Anteil am elektrischen Energiebedarf des Kältesektors. Der Sektor Gewerbe-Handel-Dienstleistungen (GHD) hat mit 15,8 TWh/a einen Anteil von etwa einem Drittel und die Industrie mit 9,7 TWh/a von 17 %. Diese Aufteilung wird in Abbildung 13 graphisch dargestellt.

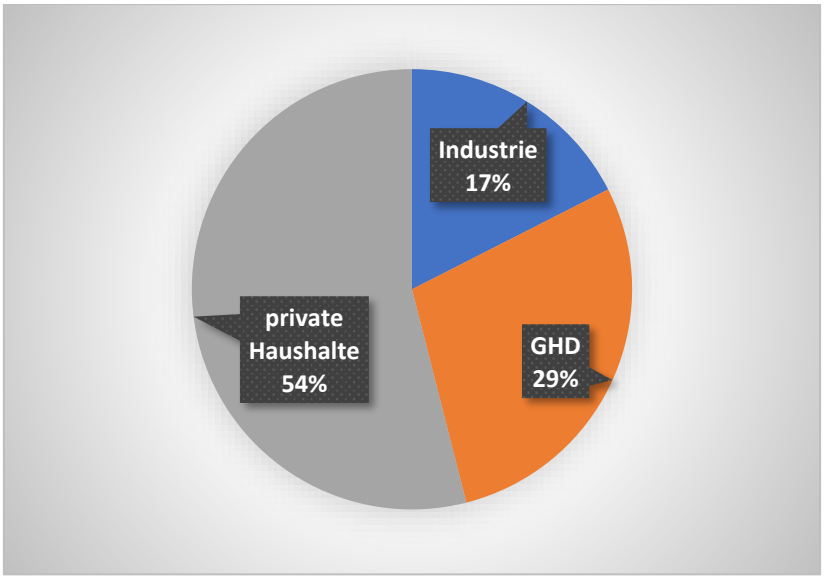


Abbildung 13: Anteil der Sektoren am elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung nach [17]

4.2.5 Studie „Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland“

In der Studie „Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland“ werden Daten zu Endenergieverbräuchen nach Energieträgern und Anwendungszwecken angegeben und es werden Bilanzen für den Zeitraum zwischen 2008 und 2018 erstellt [18]. Herausgeber ist die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.. Daten zum Kältebedarf gibt diese Studie nicht an.

Die in der Studie angegebenen Werte zum Strombedarf des Kältesektor in PJ wurden zur besseren Vergleichbarkeit mit den anderen Studien in TWh/a umgerechnet und werden in Abbildung 14 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Strombedarf zur Kältebereitstellung tendenziell ansteigt. In den Jahren 2015 bis 2018 ist nur noch eine leichte Steigerung zu erkennen, sodass zu erwarten ist, dass sich diese Entwicklung auch in den Folgejahren fortsetzt.

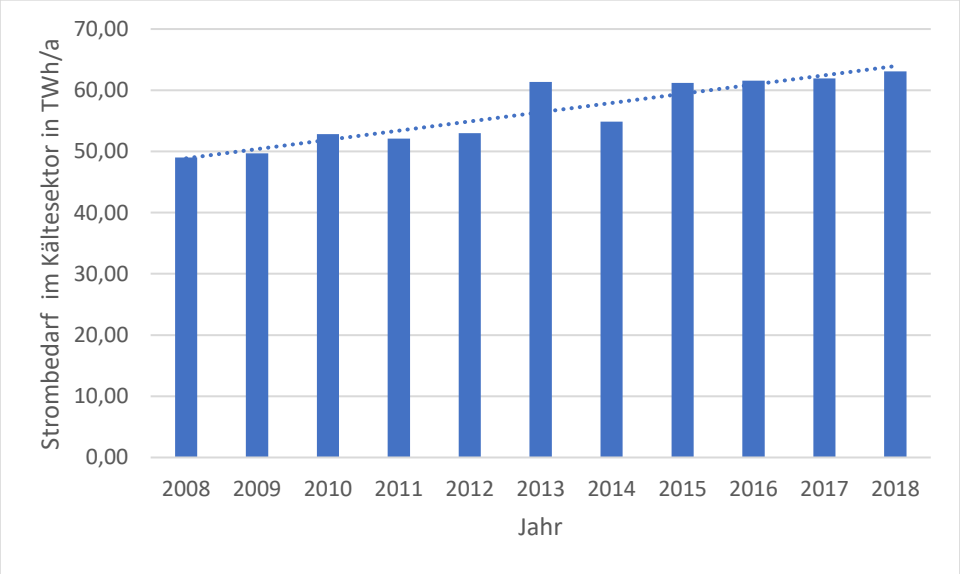


Abbildung 14: Entwicklung des Strombedarfs im Kältesektor zwischen 2008 und 2018 nach [18]

In dieser Studie werden darüber hinaus die Anteile am elektrischen Energiebedarf zur Kältebreitstellung für die Hauptsektoren aufgeschlüsselt, dies ist in Abbildung 15 dargestellt. Demnach ist der Sektor private Haushalte mit 30,31 TWh/a und einem Anteil von 48 % am gesamten Kältesektor der größte. Die Industrie macht mit 15,19 TWh/a 24 % und der Gewerbe-Handel-Dienstleistungs-Sektor (GHD) mit 17,58 TWh/a 28 % des Strombedarfs im Kältesektor aus. Im Sektor Verkehr verzeichnet diese Studie keinen elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung.

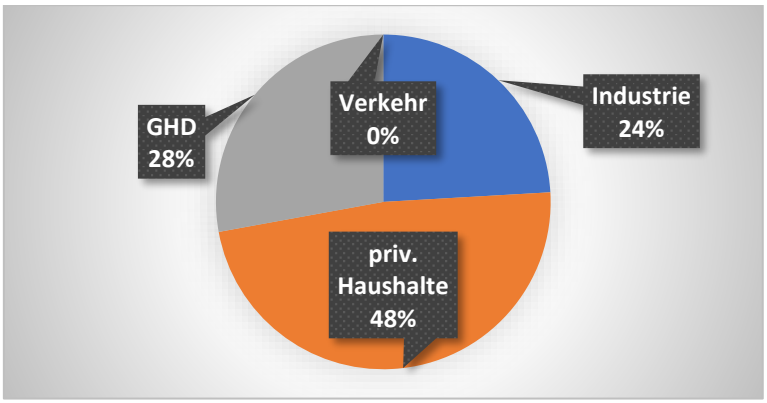


Abbildung 15: Anteil der Hauptsektoren am Strombedarf im Kältesektor 2018 nach [18]

4.3 Auswertung der Studien zum Kältemarkt

In diesem Abschnitt werden die in Kapitel 4.2 genannten Studien miteinander verglichen und ausgewertet. Dazu werden zunächst in Tabelle 7 der Kältebedarf und der elektrische Energiebedarf zur Kältebereitstellung der Studien zusammengefasst. Zusätzlich ist der Anteil des Kältesektors am elektrischen Endenergiebedarf, soweit dieser in der Studie angegeben ist, aufgeführt.

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Ergebnisse für den Kältebedarf und den Energiebedarf zur Kältebereitstellung aus 4.2 mit den entsprechenden Quellen

Studie	Kältebedarf in TWh/a	el. Endenergiebedarf zur Kältebereit-stellung in TWh/a	Anteil am Endenergiebedarf (Strom) DE
Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland, 2011	Nicht genannt	72,03	14,40 %
Energiebedarf bei der techn. Erzeugung von Kälte, 2002	164,93	66,05	Nicht genannt
Nachhaltige Kälteversorgung im Deutschland, 2014	63,17	30,24	Nicht genannt
Energieeffizienz in Zahlen, 2018	Nicht genannt	55,4	10,80 %
AG Energiebilanzen, 2018	Nicht genannt	63,08	12,30 %

Der gesamte Kältebedarf wird nur in den Studien „Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland“ [16] und „Energiebedarf bei der technischen Erzeugung von Kälte“ [15] genannt, wobei die Werte um mehr als das Zweieinhalbfache voneinander abweichen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass der Kältebedarf nicht gemessen, sondern nur abgeschätzt wird. Daraus ergeben sich je nach angewendeter Methode sehr unterschiedliche Ergebnisse.

Der Energiebedarf zur Kältebereitstellung kann hingegen grundsätzlich gemessen werden. Dafür werden Unternehmen um die Bereitstellung ihrer Daten zum Strombedarf gebeten. Je detaillierter diese Daten zur Verfügung gestellt werden, desto repräsentativer ist die Gesamtsumme des Kältemarktes. Da diese Daten nicht flächendeckend zur Verfügung stehen, geben die verschiedenen Studien Schätzung anhand von Annahmen zu den übrigen Branchen an. In Abbildung 16 werden die Werte zum Energiebedarf, die in den Studien genannt werden, aufgeführt.

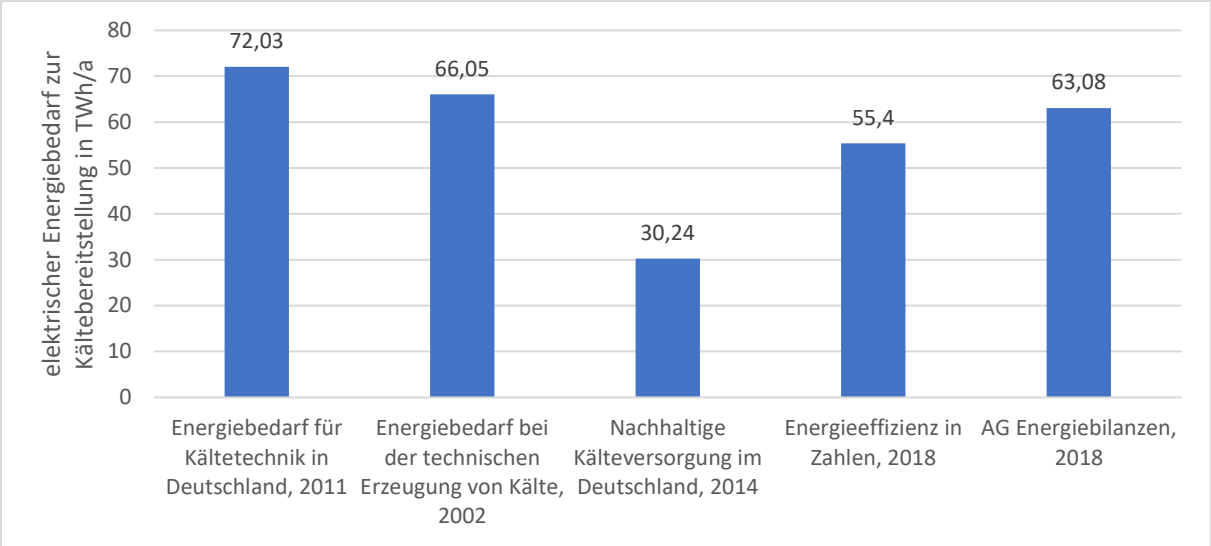


Abbildung 16: Gegenüberstellung des elektrischen Energiebedarfs zur Kältebereitstellung der verschiedenen Quellen aus Kapitel 4.2

In Abbildung 16 ist zu erkennen, dass die Unterschiede beim Energiebedarf geringer sind als beim Kältebedarf. Auffällig ist, dass der Wert aus der Studie „Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland“ mit nur 30,24 TWh/a deutlich von den Werten der anderen Studien abweicht, da diese Studie unter anderem den Energiebedarf von Haushaltskühlgeräten nicht berücksichtigt. Wie aus den anderen Studien hervorgeht, ist dieser Energiebedarf mit einem Wert zwischen 18,63 TWh/a und 30,31 TWh/a erheblich und somit einer der Hauptgründe, weshalb die Summe des Energiebedarfs dieser Studie stark von den anderen Studien abweicht. Aus diesem Grund wird der Wert 30,24 TWh/a bei der Bildung eines Mittelwertes nicht mit einbezogen. Somit zeigen die Ergebnisse der Studien, dass der elektrische Energiebedarf zur Kältebereitstellung in einem Bereich zwischen 55,4 TWh/a und 72,03 TWh/a liegt und einen Mittelwert von 64,14 TWh/a aufweist.

Zur detaillierteren Betrachtung der Studienergebnisse wird zusätzlich die Verteilung des elektrischen Energiebedarfs zur Kältebereitstellung auf die vier Hauptsektoren verglichen und in Tabelle 8 gegenübergestellt.

Tabelle 8: Vergleich des elektrischen Energiebedarfs zur Kältebereitstellung in TWh/a der Hauptsektoren der verschiedenen Studien

	Energie-bedarf für Kältetechnik in DE **2011**	**Energie-bedarf bei der techn. Erzeugung von Kälte** **2002**	**Nachhaltige Kälte-versorgung in DE** **2014**	**Energie-effizienz in Zahlen** **2018**	**AG Energie-bilanzen** **2018**
Industrie	9,80	6,85	13,03	9,7	15,19
Klimatisierung	10,80	9,71	10,45	-	-
Haushalte	24,14	18,63	in Klima-tisierung	29,9	30,31
Nahrungsmittel	15,34	29,42	6,77	-	-
GHD	5,40	-	in Klima-tisierung	15,8	17,58
Sonstige	6,56	1,58	-	-	-
Gesamt	**72,03**	**66,05**	**30,244**	**55,4**	**63,08**

Aus Tabelle 8 wird deutlich, dass die Angaben zu den Sektoren der verschiedenen Studien sehr unterschiedlich sind, was vor allem darauf zurückzuführen ist, dass die Aufteilung auf Industrie, Klimatisierung, Haushalte, Nahrungsmittel und GHD nicht einheitlich ist. In der Studie „Energiebedarf für Kältetechnik“ werden Zahlen zu allen fünf Sektoren genannt. Eine andere Aufteilung nutzt die Studie „Energiebedarf bei der technischen Erzeugung von Kälte“, dort ist der GHD-Sektor auf den Industrie-, Klimatisierungs- und Nahrungsmittelsektor aufgeteilt. Die Studie „Nachhaltige Kälteversorgung“ gibt die Werte für die Klimatisierung von GHD und Haushalten jeweils unter dem Sektor Klimatisierung an. Der weitere Energiebedarf, zum Beispiel für die Kühlung in diesen beiden Sektoren wird, wie oben bereits erläutert, in dieser Studie nicht erfasst. Weiterhin werden in dieser Studie unter dem Sektor Industrie mehr Branchen gefasst, sodass der für die Industrie angegebene Energiebedarf, in Höhe von 13,03 TWh im Jahr 2014, der zweithöchste der fünf Studien ist. Der für den Sektor Nahrungsmittel angegebene Bedarf von 6,77 TWh/a ist dafür vergleichsweise gering. Die Studie „Energieeffizienz in Zahlen“ gibt für die Industriekälte einen Energiebedarf von 9,7 TWh im Jahr 2016 an. Der Bedarf für die Klimatisierung wird nicht separat angegeben, sondern in den Sektoren Industrie, Haushalte und GHD mit eingerechnet. Der Energiebedarf der Haushalte mit 29,9 TWh/a und des GDH-Sektors mit 15,8 TWh/a, sind jeweils vergleichsweise hoch. Die aktuellste Studie ist die „AG Energiebilanzen“ von 2018. In dieser Studie wird der Bedarf für Klimatisierung und Nahrungsmittel nicht separat aufgeführt, sondern ist in den Sektoren Industrie und GHD inkludiert. Daher sind für Industrie und GHD die höchsten Werte aller Studien angegeben.

Ein kontinuierlicher Anstieg des Energiebedarfs ist, widersprechend zu Abbildung 14, nicht zu erkennen, da die jüngsten und ältesten Daten mit 66,049 TWh/a und 63,08 TWh/a jeweils im Mittelfeld liegen. Dem gegenüber ist der größte Bedarf für das Jahr 2011 angegeben. Für die Annahme, dass der Energiebedarf zwischen 2002 und 2011 stark anstieg und sich anschließend bis 2018 stark reduzierte, gibt es außerhalb dieser Studien keine Gründe. Dies führt zu dem Schluss, dass die unterschiedlichen Bewertungen in den einzelnen Studien wesentlich größeren Einfluss auf deren Ergebnis haben als deren Erscheinungs- oder Basisjahr.

Insgesamt ist der Energiebedarf für alle Sektoren so groß, dass ein Potenzial für Lastmanagement zu erwarten ist. Wie sich der Energiebedarf der unterschiedlichen Sektoren auf die verschiedenen Branchen aufteilt, soll anhand der Steckbriefe im folgenden Kapitel geprüft werden.

5 Kälteanwendungen

Nachdem in Kapitel 4 die Studien zum Kältebedarf ausgewertet wurden, wird der Kältemarkt in diesem Kapitel auf verschiedene Branchen aufgeschlüsselt. Dafür werden Steckbriefe, welche die Kälteanwendungen beschreiben, erstellt. Es wird zunächst die Methodik beschrieben und dann beispielhaft ein Steckbrief erläutert. Anschließend erfolgt die Auswertung der Steckbriefe. Die Ergebnisse werden mit den Werten aus Kapitel 4 verglichen.

5.1 Methodik der Steckbriefe

In den Steckbriefen werden die Anwendungen möglichst genau charakterisiert, damit bewertet werden kann, wie gut sie sich zur Flexibilisierung eignen. Dabei werden, soweit in der Literatur verfügbar, die in Kapitel 2 genannten Kenngrößen dargestellt. Als Ziel dieser Steckbriefe soll, soweit möglich, das gesamte Volumen der Kälteanwendungen in Deutschland auf die verschiedenen Branchen aufgeschlüsselt werden. Die Steckbriefe dienen zur Dokumentation der recherchierten Daten für die ausgewählten Branchen.

Nachfolgend wird beispielhaft ein Steckbrief vorgestellt. Die Steckbriefe der Branchen Bäckereien, Brauereien, Bürogebäude, Chemie- & Pharmaindustrie, Fleischereien, Freizeitindustrie, Gastgewerbe, Haushalte, Kühlhäuser, Lebensmittel-EH, Lebensmittelindustrie, Milchverarbeitung und Rechenzentren befinden sich im Anhang dieser Arbeit. In Tabelle 9 ist der Steckbrief für Medizin dargestellt. Die Anwendung Medizin, beinhaltet die Kühlung und Klimatisierung von Krankenhäusern, Kureinrichtungen, Blutkonserven und Leichenkühlungen. Der Bedarf für Kliniken wird im weiteren Verlauf als Referenz für die Übertragbarkeit der Beispielberechnung genutzt.

Tabelle 9: Steckbrief zur Branche Medizin

	Charakteristika		Berech-nung	Quelle
1	Kältebedarf	1,488 TWh/a [davon Kliniken 569 GWh/a]		[15]
2	Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung	1,078 TWh/a [davon Kliniken 352 GWh/a]		[15]
3	Gesamtstrombedarf Branche über alle Anwendungsfelder	2,98 TWh/a [nur Kliniken]	$6\ MWh/Bett * 497.200\ Betten$	[19] & Kriterium 4
4	Spezifischer Strombedarf	6.000 kWh/ (Bett*Jahr) Nutzkühlbedarf: 30 kWh/m²		[20] [21]
5	Spezifischer Kältebedarf	Keine Angaben verfügbar		
6	Volllaststunden	800 bis 2.000 h/a		[22]
7	Kälteanteil am elektrischen Gesamtverbrauch	14 %		[20]

Der Kältebedarf der Branche wird mit 1,49 TWh/a angegeben [15]. Die im Steckbrief angegebenen Daten können durch Querprüfung auf ihre Richtigkeit geprüft werden. Über den Gesamtstrombedarf der Branche (Kliniken) E_{Klinik} und den Kälteanteil am elektrischen Gesamtstromverbrauch p, kann der elektrische Energiebedarf zur Kältebereitstellung Q_{Klinik} für Klinken berechnet werden.

$$Q_{Klinik} = E_{Klinik} * p = 2{,}98 \frac{TWh}{a} * 14\ \% = 417\ GWh/a$$

Der berechnete Wert für den elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung Q_{Klinik} befindet sich mit 417 GWh/a, im Vergleich zu dem, in einer anderen Literaturstelle [15] angegebenen Wert für den elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung von 352 GWh/a, in der gleichen Größenordnung und ist somit plausibel.

Einige der Charakteristika der Steckbriefe konnten bei der Recherche nicht in der Literatur gefunden und somit nicht in den angehängten Steckbriefen mit ausgeführt werden. Ziel der Auswertung ist es, die Anforderungen der Anwendungen miteinander zu vergleichen. Da dies

in den folgenden Punkten nicht möglich ist, wurden diese Anforderungen gestrichen und nicht weiter berücksichtigt:

- Technische Rahmenbedingungen
    - Eingesetzte Technologie der Anwendung
    - Spezifische und gesamte installierte elektrische Leistung
    - Anzahl der Kälteanlagen
    - Typische Leistungsgrößenbereich der Anlagen
    - Benötigte Temperaturniveaus
    - Einsatz von Kältespeichern
    - Maximale Leistungsaufnahme
    - Fernsteuerbarkeit
    - Aufwand für Anlagenvergrößerung (Nachrüstung / Austausch)
    - Ist eine Leistungsregelung üblich?
- Wirtschaftliche Rahmenbedingungen
    - Förderungen
    - Kosten(-anteil) für die Kältebereitstellung
- Rechtliche Rahmenbedingungen wie
    - Geltende Verordnungen und Gesetze
    - Anforderungen an Temperaturniveaus
- Ökologische Rahmenbedingungen wie
    - Treibhausgase in CO_2-Äquivalent
    - Jährliche Kältemittelverlustraten

Somit wurden für die Steckbriefe die folgenden Charakteristika verwendet:

- Technische Rahmenbedingungen
    - Kältebedarf
    - Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung
    - Strombedarf der Branche
    - Spezifischer Kältebedarf
    - Betriebsstunden
    - Volllaststunden
    - Kälteanteil am elektrischen Gesamtverbrauch

5.2 Auswertung der Steckbriefe

Die Auswertung der Steckbriefe basiert hauptsächlich auf dem Kältebedarf und dem elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung, da diese die Relevanz einer Anwendung widerspiegeln. Das Ziel der Steckbriefe, die Branchen anhand von detaillierten Daten hinsichtlich ihres Potenzials für Lastmanagement zu bewerten, konnte nur teilweise erreicht werden, da viele Charakteristika nicht veröffentlich sind. Für eine genauere Analyse müssten Detaildaten direkt bei Unternehmen erhoben werden.

In Tabelle 10 ist der Kältebedarf und der elektrische Energiebedarf zur Kältebereitstellung aller, durch Steckbriefe recherchierten Branchen gegenübergestellt. Diese Verteilung ist in Abbildung 17 graphisch dargestellt.

Tabelle 10: Übersichtstabelle über alle Steckbriefe der Kriterien Kältebedarf und Energiebedarf in Summe und anteilig

Branche	Kältebedarf in TWh/a	Energiebedarf in TWh/a	Kältebedarf	Energiebedarf
Bäckereien	0,77	0,44	1 %	1 %
Brauereien	1,36	0,45	1 %	1 %
Bürogebäude	4,77	1,45	4 %	2 %
Chemie- & Pharmaindustrie	8,12	5,44	6 %	8 %
Fleischereien	1,74	0,87	1 %	1 %
Freizeitindustrie	1,49	0,46	1 %	1 %
Gastgewerbe	4,72	2,01	4 %	3 %
Haushalte	26,23	18,63	21 %	27 %
Kühlhäuser	1,32	0,70	1 %	1 %
Lebensmittel-EH	20,73	8,53	16 %	12 %
Lebensmittelindustrie	49,67	17,13	39 %	25 %
Medizin	1,49	1,08	1 %	2 %
Milchverarbeitung	1,05	0,58	1 %	1 %
Rechenzentren	3,33	2,70	3 %	4 %
kleine Branchen summiert	unbekannt	8,38	unbekannt	12 %
Summe	**126,79**	**68,85**		

Dabei wird unter Lebensmittelindustrie die industrielle Herstellung von Lebensmitteln, exklusive Bäckerei- und Fleischverarbeitungsbetrieben gefasst. Die Milchverarbeitung ist ebenfalls separat aufgeführt und nicht in der Branche Lebensmittelindustrie enthalten.

Die unter Sonstige (kleine Branchen summiert) dargestellten Anwendungen haben einen vergleichsweise geringen Energiebedarf zur Kältebereitstellung. Zu diesen Branchen wurden zudem kaum zusätzliche Informationen gefunden, sodass eine Erstellung eines Steckbriefes nicht sinnvoll erscheint. Eine Differenzierung des Energiebedarfs zur Kältebereitstellung der summierten Branchen wird im Anhang gegeben.

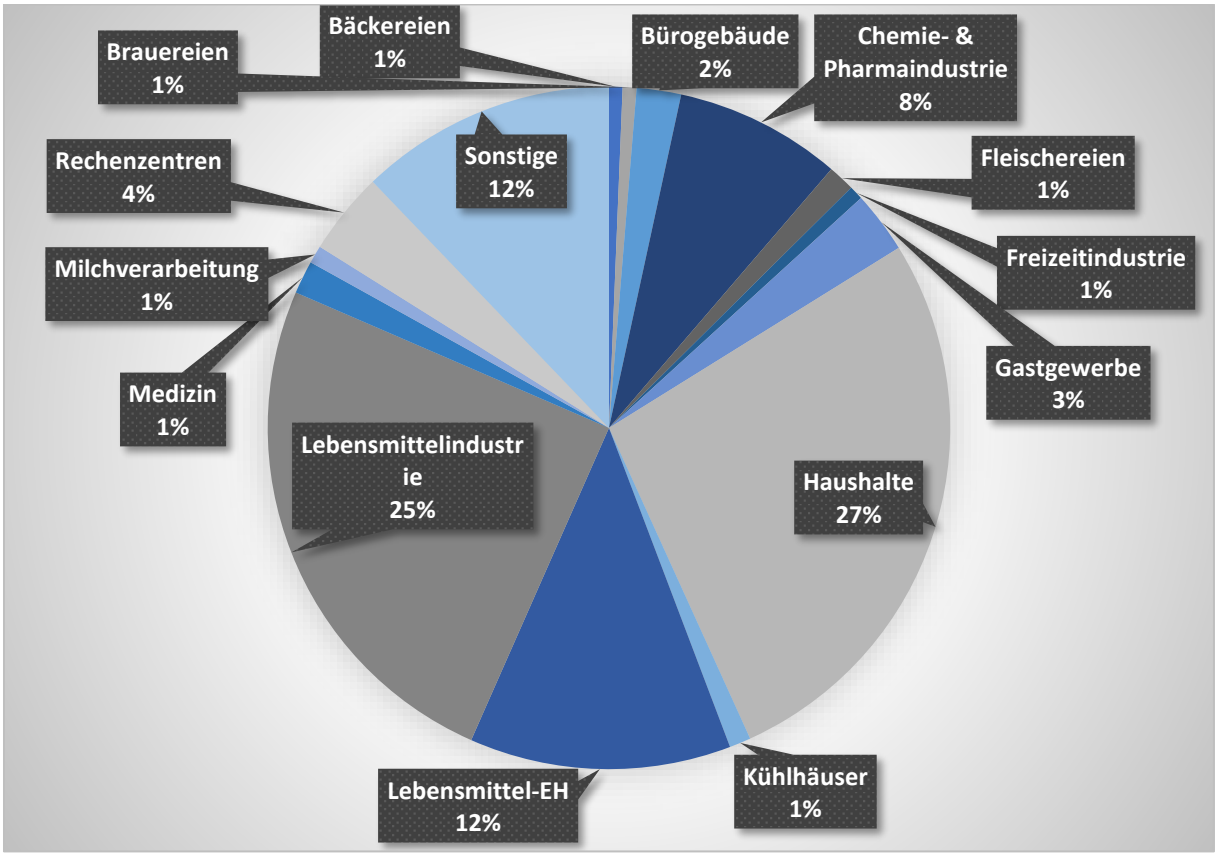


Abbildung 17: Anteil der Branchen der Steckbriefe am elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung in Deutschland

Aus Tabelle 10 und Abbildung 17 ist zu erkennen, dass die Branche „Lebensmittelindustrie“, mit 49,67 TWh/a den größten Anteil am Kältebedarf und die Branche „Haushalte“ mit 18,63 TWh/a den größten Anteil am Endenergiebedarf zur Kältebereitstellung hat. Bei den Haushalten sind dabei die elektrischen Kühlgeräte, wie Kühlschrank und Kühltruhe, die Hauptverbraucher. Im Lebensmitteleinzelhandel entfallen von 20,73 TWh/a Kältebedarf, mit 13,18 TWh etwa zwei Drittel auf die Kühlung und mit 7,55 TWh/a ein Drittel auf die Klimatisierung.

Bislang wurde die Kältetechnik nur durch den Kältebedarf und elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung angegeben. Ein Ziel der Steckbriefe war es, andere Charakteristika zu finden, mit denen bewertet werden kann, welche Anwendungen sich für das Lastmanagement eignen. Die Größe und die Anzahl der Kälteanlagen spielen dabei eine entscheidende Rolle, denn für eine Flexibilisierung ist bei den meisten Kälteanlagen eine Nachrüstung, in Form einer

Steuerungseinheit, wie zum Beispiel eines Controllers, nötig. Da die Literatur dazu keine repräsentativen Zahlen liefert, können keine quantitativen Ergebnisse ausgegeben werden. Es können ausschließlich qualitative Aussagen getroffen werden.

Die Branche Haushaltskälte hat mit 18,63 TWh/a an Energiebedarf zur Kältebereitstellung zwar einen hohen Bedarf, da sich aber in fast jedem Haushalt etwa ein bis drei Kühlgeräte befinden, haben die Einzelanlagen eine geringe Leistung und auch einen geringen Verbrauch. Lediglich ihre Masse führt zu dem hohen Energiebedarf. Für eine Flexibilisierung müssten alle Einzelgeräte nachgerüstet oder ersetzt werden.

Besser eignen sich Kältesysteme mit einer hohen installierten Leistung. In einer Molkerei wird Milch innerhalb kurzer Zeit von über 30°C auf 4°C bis 6°C [23] gekühlt. Dafür ist eine hohe Kälteleistung erforderlich. Mit einer Nachrüstung stünde eine hohe Leistung für eine Flexibilisierung bereit. Inwiefern die Branche Molkerei/Milchverarbeitung für eine Flexibilisierung geeignet ist, müsste im Detail mit neuen Daten, geprüft werden.

Die Lebensmittelindustrie hat mit 17,13 TWh/a ebenfalls einen hohen Energiebedarf zur Kältebereitstellung. Informationen zu der Anzahl der Anlagen oder der installierten Leistung liegen auch hier nicht vor. Auf Grund des hohen Energiebedarfs wird eine hohe Leistung und somit ein Potenzial für Lastmanagement jedoch vermutet.

Größenordnung des Kältesektors

Der Netto-Strombedarf für die Kältetechnik liegt mit 68,87 TWh/a etwa 50 % über der Stromproduktion aller Photovoltaikanlagen im Jahr 2018 in Deutschland in Höhe von 46 TWh/a [24]. Es ist zu erwarten, dass die Flexibilisierung der Kälteversorgung insbesondere in den Sektoren Lebensmittelindustrie und -einzelhandel ein entsprechend hohes Potenzial zur Unterstützung der Energiewende aufweist. Dabei weist die Kühlung einen ganzjährigen Energiebedarf auf, während die Klimatisierung nur in den Sommermonaten benötigt wird.

Ein Ergebnis dieser Arbeit ist somit, dass die Kältetechnik, durch ihren hohen elektrischen Energiebedarf, ein großes Lastvolumen für Lastmanagement zur Verfügung stellen kann. Für eine genauere Analyse, in welchen Anwendungen Lastmanagement integriert werden könnte, müssen neue Daten erhoben werden, die die jeweilige Anwendung genau charakterisiert.

5.3 Vergleich zwischen der Steckbriefauswertung und der Studienauswertung

In Kapitel 5.2 wird aus den Steckbriefen eine Summe für den Kältesektor gebildet, die auf Rechercheergebnissen aus unterschiedlichen Quellen basiert. Der Vergleich diese Summe mit den Ergebnissen der Studien aus Kapitel 4.3 ist in Abbildung 18 dargestellt.

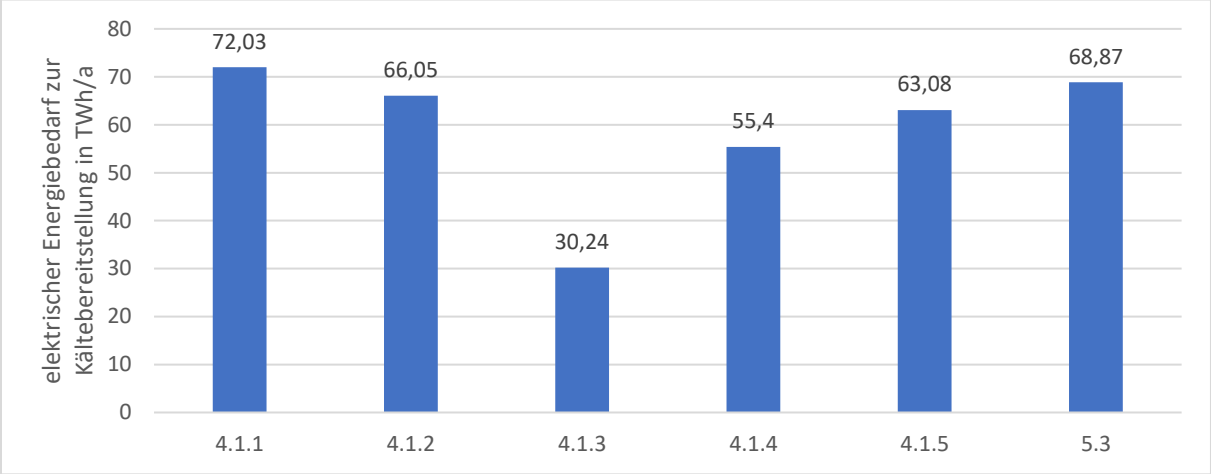


Abbildung 18: Vergleich der Studien und der Ergebnisse der Steckbriefe für den elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung

Tabelle 11: Legende zu Abbildung 19

Studie	Kapitel
Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland	4.2.1
Energiebedarf bei der technischen Erzeugung von Kälte	4.2.2
Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland	4.2.3
Energieeffizienz in Zahlen	4.2.4
AG Energiebilanzen	4.2.5
Steckbriefauswertung	5.3

Bei der Auswertung der Studien in Kapitel 4.3 wurde ein elektrischer Energiebedarf zur Kältebereitstellung im Bereich von 55,4 bis 72,02 TWh/a ermittelt. Der aus den Steckbriefen analysierte Bedarf liegt mit 68,87 TWh/a in diesem Bereich. Beim Kältebedarf ist eine Einordnung der Ergebnisse nicht sinnvoll, da die Werte bereits in den Studien um ein Vielfaches voneinander abweichen.

6 Ermittlung des Lastverschiebepotenzials eines Krankenhauses

In diesem Kapitel wird am Beispiel eines Krankenhauses das Potenzial für die Flexibilisierung ermittelt. Da für ein Krankenhaus im südlichen Ruhrgebiet bereits seit März 2019 minütliche Leistungsdaten der dort installierten Kältemaschine aufgezeichnet werden, wird dieses beispielhaft betrachtet. Konkret wird, unter Zugrundelegung dieser Daten, in Excel eine Berechnung aufgestellt, deren Ergebnis das Potenzial zur Lastverschiebung quantifizieren soll. Anschließend wird bewertet, ob dieses Potenzial auf andere Anwendungen übertragbar ist.

6.1 Daten der Beispielanwendung

In dem betrachteten Krankenhaus ist eine Spinchiller Kältemaschine mit luftgekühltem Kaltwassersatz für Außenaufstellung installiert. Die technische Daten sind [25]:

- Baureihe: WSAT-XSC2-90D-249F
- Normalkühlleistung von 239 kW bis 665 kW
- Verdichter: Scrollverdichter
- Große Wärmetauscherflächen
- Elektronisch gesteuerte Ventilatoren
- Wasserkaltsatz mit hohem energetischem Wirkungsgrad
- Jahreszeitlicher Wirkungsgrad an der Spitze der im Markt verfügbaren Geräte
- Version EXCELLENCE SC
- Inbetriebnahme im Winter 2014/2015

Es wird ein Scroll- oder Schraubenverdichter eingesetzt. Dieser gehört zur Gruppe der Rotationsverdichter und somit der Verdrängungsverdichter (vergleiche Kapitel 3.1). Des Weiteren wird freie Kühlung durch ein Rückkühlwerk, sowohl für das Kühlmittel als auch für das Kaltwasser genutzt. Ab einer Außentemperatur von ca. 8°C reicht die freie Kühlung nicht mehr aus und die Kältemaschine muss betrieben werden. Da das betrachtete Krankenhaus bisher keinen Speicher nutzt, wird angenommen, dass die ermittelten Leistungsdaten dem Energiebedarf zur Kältebereitstellung des Krankenhauses entsprechen. Dieser lag im Jahr 2019 bei 290 MWh.

Die minütlichen Leistungsdaten der Kältemaschine, werden auf Viertelstundenwerte gemittelt, um mit den Daten auf Basis von Viertelstundenwerte des Spotmarktes arbeiten zu können. Für die Kälteanlage liegen Daten zwischen dem 21.03.2019 und dem 31.12.2019 vor. Die Daten für den Zeitraum 01.01.2019 bis 21.03.2019 müssen daher abgeschätzt werden. Dafür

wurden die vorhandenen Daten aus Dezember und März berücksichtigt. Der Leistungsmittelwert für Dezember beträgt 8 kW. Dieser wird als Grundlast des Krankenhauses angenommen und für die Monate Januar und Februar als Kälteleistung verwendet. Dabei wird davon ausgegangen, dass Dezember, Januar und Februar die kältesten Monate im Jahr sind, in denen nur die Grundkühllast anfällt. Zur Ermittlung der Daten für den Zeitraum zwischen dem 01.03.2019 und dem 21.03.2019 werden die vorhandenen Daten von Ende März (22.-31.03.2019) betrachtet. Diese weisen eine durchschnittliche Last von 13,8 kW auf. Für die erste Märzwoche wird ein Bedarf von 9 kW, für die zweite ein Bedarf von 10 kW und für die dritte ein Bedarf von 11 kW angenommen. Dadurch nähert sich die Kälteleistung im März langsam steigend den realen Messwerten von Ende März an. Da auf Grund von Messfehlern auch negative Werte in den Ursprungsdaten vorhanden sind, werden alle negativen Werte als Null und somit als Stillstand der Anlage angenommen. Die vorliegenden Messdaten werden hier graphisch dargestellt und analysiert.

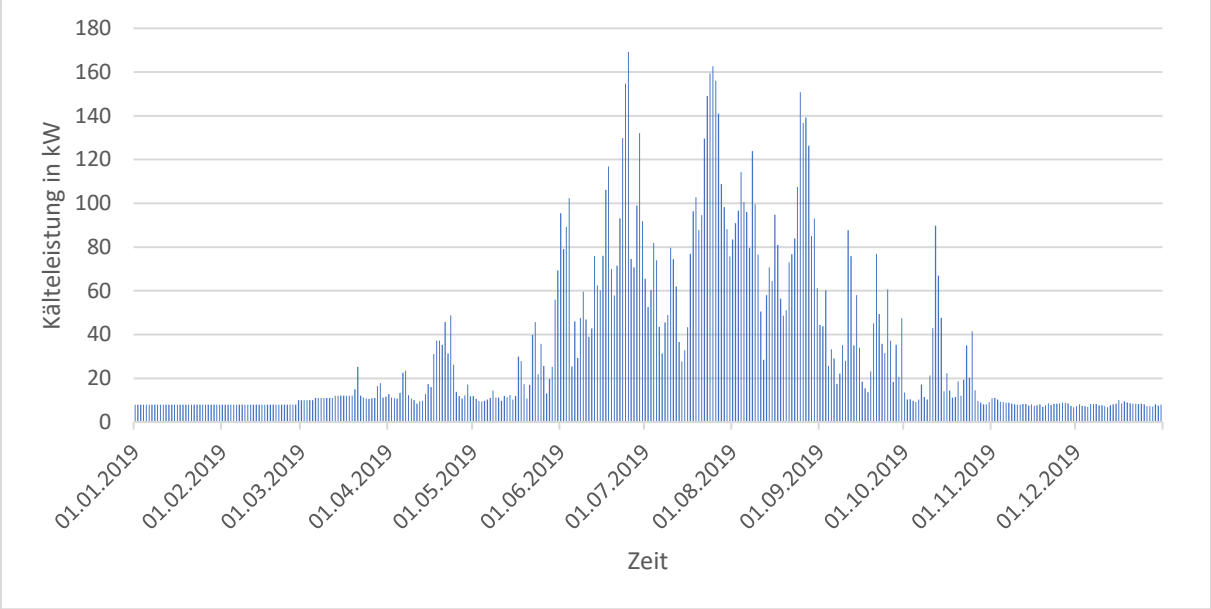


Abbildung 19: Jahresverlauf der gemittelten Tageskälteleistungen der Kältemaschine für das Jahr 2019

In Abbildung 19 wird der Jahresverlauf der Viertelstundenwerte dargestellt. Da für den Beginn des Jahres bis zum 21.03.2019 Annahmen zur Grundlast getroffen wurden, treten dort keine Schwankungen auf. Ab Juni ist ein starker Anstieg der Kälteleistung zu erkennen, dort begann die erste warme Periode des Jahres 2019. Weitere Phasen mit sehr hohem Kühlbedarf traten Ende Juni, Ende Juli und Ende August auf.

Für die vorliegenden Lastprofile sind hier beispielhaft zwei Tage dargestellt, der 26.08.2019, als der Tag mit der höchsten gemessenen Leistung und der 08.11.2019, als Beispieltag für sehr geringe Kälteleistungen. Der Tagesverlauf der Viertelstundenwerte des 26.08.2019 wird in Abbildung 20 dargestellt.

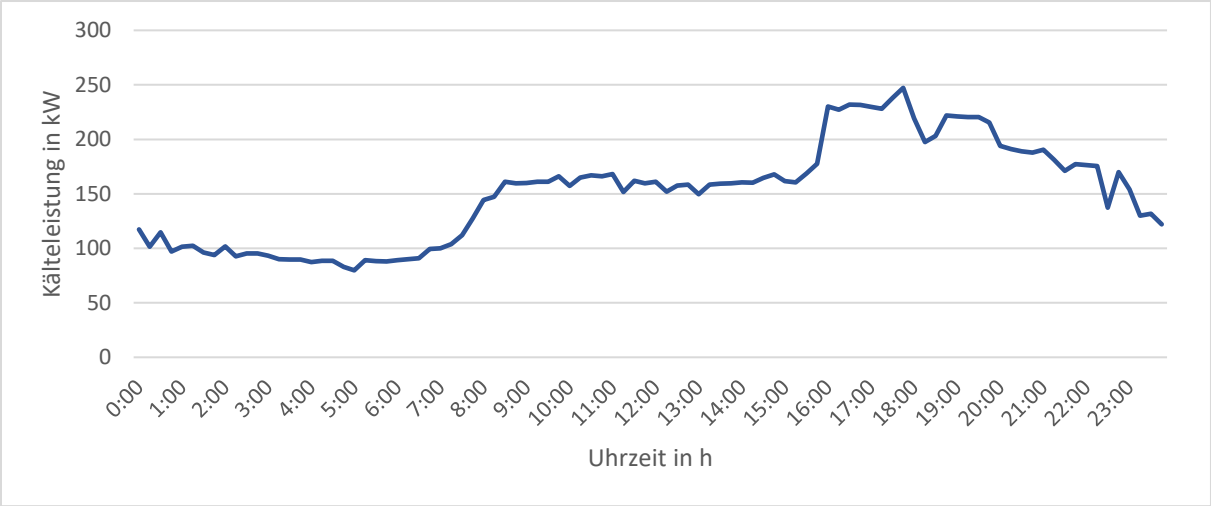


Abbildung 20: Tagesverlauf der viertelstündlichen Leistungsdaten der Kältemaschine für den 26.08.2019

Ab 0 Uhr bis 7 Uhr wird durchschnittlich eine Leistung von etwa 100 kW abgerufen. An diesem Tag war um 6:35 Uhr Sonnenaufgang, sodass ab diesem Zeitpunkt der Kältebedarf, der durch die Sonneneinstrahlung induziert wird, steigt. Zwischen 9:00 Uhr und 15:00 Uhr bleibt die Kälteleistung bei etwa 160 kW relativ konstant. Erst in den Nachmittagsstunden steigt die Kälteleistung weiter auf über 200 kW, bevor sie ab 19:00 Uhr stetig fiel.

Als zweiter Tag wurde der 08.11.2019, als Beispiel für einen kühlen Herbsttag, ausgewählt. Hierfür wird in Abbildung 21 der Verlauf der Viertelstundenwerte dargestellt.

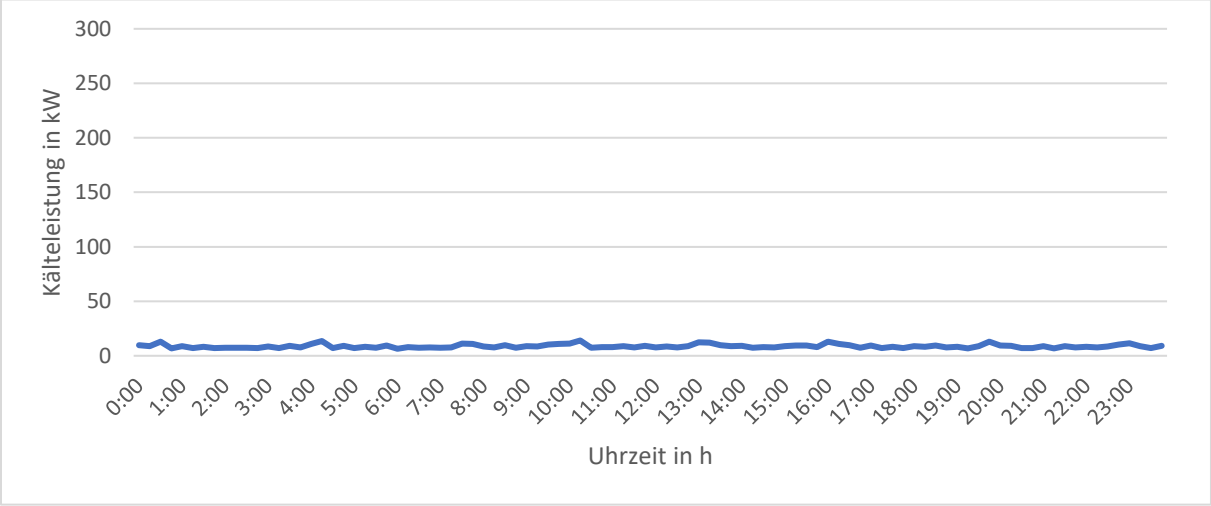


Abbildung 21: Tagesverlauf der viertelstündlichen Leistungsdaten der Kältemaschine für den 08.11.2019

In Abbildung 21 ist zu erkennen, dass die Kälteleistung sich im Tagesverlauf kaum ändert. Es wird eine Durchschnittsleistung von 8 kW abgerufen.

6.2 Grundlagen und Annahmen zur Berechnung

Mit den konkret vorhandenen Daten wird eine Flexibilisierung über einen Kältespeicher durchgeführt. Das bedeutet, dass die Speicherkapazität des Kältespeichers dem Betrieb der Kältemaschine einen Freiheitsgrad bietet, der das Abschalten oder Zuschalten der Kältemaschine über einen gewissen Zeithorizont verschieben lässt. Für diese Flexibilisierung der Kältemaschine zum elektrischen Energieausgleich muss zunächst ermittelt werden, zu welchen Zeitpunkten eine Lastverschiebung sinnvoll ist.

Da sich der Preis des EPEX SPOT, welcher im Stand der Technik vorgestellt wurde, an Angebot und Nachfrage orientiert, sind die Grundannahmen für diese Berechnung:

- Wenn der Preis unterdurchschnittlich ist, gibt es ein Stromüberangebot am Markt
- Wenn der Preis überdurchschnittlich ist, gibt es ein Stromdefizit am Markt.

Für die Berechnung wird der Durchschnittswert aus dem Jahr 2019 der Energiebörse EPEX SPOT, in Höhe von 37,48 €/MWh, zu Grunde gelegt.

Durch den Einsatz des Kältespeichers können Zeiten mit hohem Strompreis überbrückt und Zeiten mit niedrigem Strompreis besser genutzt werden. Ziel der Funktion soll die Minimierung der Kosten durch den Einsatz des Kältespeichers sein. Eine Lastverschiebung über eine variable Temperatur in der Klimatisierung wird nicht betrachtet. Darüber hinaus soll über verschiedene Dimensionierungen von Kältemaschine und Kältespeicher, die kostengünstigste Option ermittelt werden. Es wird auf Grund der Effizienzkurve einer Kompressionskältemaschine festgelegt, dass diese erst ab einer Leistung von über 50 % betrieben wird (vergleiche Kapitel 3.1).

6.2.1 Schaltschema der Simulation

In Abbildung 22 wird zunächst das Schaltschema der Kältemaschine dargestellt. Dabei sind vier Ausgangsgrößen möglich.

- Kein Betrieb
- Betriebszustand I: Minimallast, um den Kältebedarf zu decken
- Betriebszustand II: Speicher wird vollgeladen
- Betriebszustand III: Volllastbetrieb

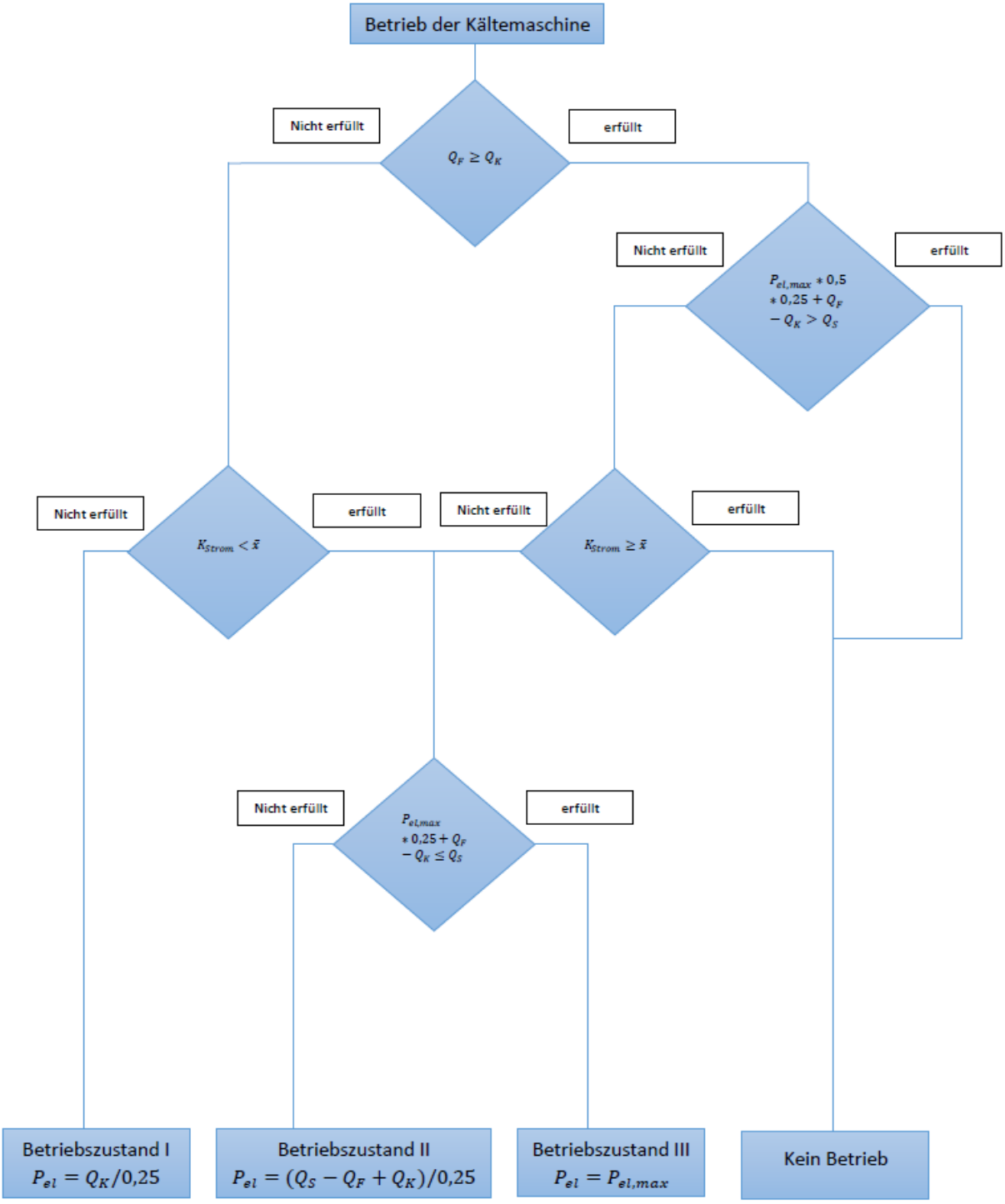


Abbildung 22: Schaltschema der Beispielberechnung mit Betriebsgrößen

Zunächst wird geprüft, ob der Speicherfüllstand $Q_F \geq$ dem elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung der kommenden Viertelstunde Q_K ist. Ist dies erfüllt, ist es energetisch möglich, die Kältemaschine nicht zu betreiben, da die Kältelast durch den Speicher gedeckt werden kann. Dann wird geprüft, ob der Speicher bei der Minimalleistung von 50 % überladen würde. Dies ist der Fall, wenn die maximale Kälteleistung $P_{el,max}$, multipliziert mit 50 % und dem Zeitfaktor 0,25, addiert mit dem Speicherfüllstand Q_F und abzüglich des elektrischen Energiebedarfs zur Kältebereitstellung Q_K größer als die Speichergröße Q_S ist. In diesem Fall

findet kein Betrieb statt, da eine Überladung des Speichers technisch nicht möglich ist und systemisch verhindert werden muss. Ist dieses Kriterium nicht erfüllt, so wird geprüft, ob der Preis bzw. die Stromkosten K_{Strom} größer oder gleich dem durchschnittlichen Preis $\bar{x}$ sind. Ist der Preis überdurchschnittlich, findet ebenfalls kein Betrieb statt, anderenfalls wird geprüft, ob der Speicher bei Volllastbetrieb überladen würde. Ein Volllastbetrieb ($P_{el} = P_{el,max}$; Betriebszustand III) ist möglich, wenn die maximale Kälteleistung der Kältemaschine $P_{el,max}$ multipliziert mit dem Zeitfaktor 0,25 h, addiert mit dem Speicherfüllstand Q_F und abzüglich dem elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung $Q_K \leq$ der Speichergröße Q_S ist. Anderenfalls wird die Leistung mit Betriebszustand II auf $(Q_S - Q_F + Q_K)/0{,}25$ begrenzt.

Ist der Speicherfüllstand Q_F kleiner dem elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung der kommenden Viertelstunde Q_K, wird geprüft, ob der Preis bzw. die Stromkosten K_{Strom} kleiner als der durchschnittliche Preis $\bar{x}$ ist. Ist dies nicht erfüllt, so wird die Kältemaschine auf Betriebszustand I so betrieben, dass der elektrische Energiebedarf zur Kältebereitstellung Q_K geteilt durch den Zeitfaktor 0,25 h, durch die Leistung der Kältemaschine P_{el} gedeckt wird. Wird der Strompreis als unterdurchschnittlich klassifiziert, so wird je nach Speicherfüllstand Q_F, wie oben beschrieben, geprüft, ob ein Volllastbetrieb möglich ist und somit, ob Betriebszustand II oder III gewählt wird.

Kontrollfunktion

Neben der in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Berechnung wird ein konventioneller Betrieb der Anlage abgebildet, dessen Ziel es ist, möglichst selten Leistung abzurufen. Diese simuliert den fiktiven Betrieb der Kältemaschine ohne Lastmanagement und ist dementsprechend unabhängig von den Stromkosten K_{Strom}. Die eingesetzten Komponenten bleiben dabei unverändert. Es findet ein Betrieb der Kältemaschine nur dann statt, wenn der Energiebedarf zur Kältebereitstellung Q_K nicht mehr durch den Speicherfüllstand Q_F gedeckt werden kann. In diesem Fall wird ein Betrieb auf Betriebszustand III ausgeführt, in allen anderen Fällen bleibt die Kältemaschine aus.

6.2.2 Auswahl der möglichen Kältespeicher

Für die Flexibilisierung soll ein Kaltwasserspeicher verwendet werden, da dieser kostengünstig und flexibel eingesetzt werden kann. Die Dimensionierung des Kältespeichers erfolgt ausschließlich über das Volumen des Speichers, wobei die häufig vertriebenen Speichergrößen, die in Tabelle 12 aufgeführt sind, berücksichtigt werden. Für die weitere Berechnung werden die aufgerundeten Energiemengen in kWh zugrunde gelegt. In den Untersuchungen werden die Speichergrößen 35, 70, 140, 210, 280, 350 kWh betrachtet.

Tabelle 12: Speichergrößen, welche für den Einsatz als Kältespeicher getestet werden

Speichergröße in m³	Energiemenge in MJ	Energiemenge in kWh	Gerundete Energiemenge in kWh
5	125,4	34,83	35
10	250,8	69,67	70
20	501,6	139,33	140
30	752,4	209,00	210
40	1003,2	278,67	280
50	1254	348,33	350

6.2.3 Dimensionierung der technischen Betriebsanlagen

Der ermittelte Lastverlauf des Beispielkrankenhauses dient für eine optimierte Auslegung einer Anwendung mit einem vergleichbaren Lastprofil. Für dieses sollen die Kombination aus Größe der Kältemaschine und Größe des Speichervolumens optimiert werden.

Als Ergebnisparameter werden die Betriebsstunden sowie eine Kostenersparnis ermittelt. Diese ergeben sich aus dem Vergleich der beiden Betriebsführungen „Betrieb mit Lastmanagement“ und „Betrieb ohne Lastmanagement“. Zu jedem Zeitpunkt, an dem die Kältemaschine in Betrieb ist, werden die Kosten anhand des Spotmarktes und des Energieverbrauchs ermittelt. Daraus ergeben sich die Betriebskosten der Anlage über das Kalenderjahr 2019, wenn die Kältemaschine ihren Strom direkt am SPOT Markt erwerben würde. In Abhängigkeit von der Größe der eingesetzten Kältemaschine und des eingesetzten Speichervolumens, verändert sich die Kostendifferenz zwischen den beiden Betriebsstrategien. Die Mindestgrößen für die Kältemaschine und den Kältespeicher sind 250 kW Leistung bei der Kältemaschine und 32 kWh bei dem Kältespeicher, um den Kältebedarf unterbrechungsfrei zur Verfügung stellen zu können. Somit ist der 35 kWh-Speicher die kleinstmögliche Einheit.

6.2.4 Leistungsklassen

Wird im Folgenden von einer Erhöhung der Kälteleistung der Kältemaschine oder der Speicherkapazität gesprochen, ist die Dimensionierung dieser Komponenten und nicht die Änderung im Betrieb gemeint. Ziel ist eine optimale Kombination aus der Größe der Kältemaschine und des Speichervolumens zu finden. Dafür wurde der Betrieb der Kältemaschine in vier Leistungsklassen aufgeteilt. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, ist ein

wirtschaftlicher Betrieb der Kältemaschine erst bei höherer Kälteleistung sinnvoll. Daher wird die Kältemaschine mit einer Mindestauslastung von 50 % betrieben. Darauf basierend, werden die vier Leistungsklassen, wie in Tabelle 13 dargestellt, festgelegt. Dabei stellt die Leistungsklasse IV den Volllastbetrieb dar. Die kleinste Leistungsklasse schließt alle Betriebspunkte ab einer Leistung von 50 % bis zu einer Leistung kleiner 60 % ein, die zweite Leistungsklasse einen Betrieb zwischen 60 % und 80 % und die dritte zwischen 80 % und kleiner 100 %.

Tabelle 13: Definition von Leistungsklassen

Leistungsklassen	Betrieb der Kältemaschine
I	$\geq 50\ \%\ bis\ <\ 60\ \%$
II	$\geq 60\ \%\ bis < 80\ \%$
III	$\geq 80\ \%\ bis < 100\ \%$
IV	$= 100\ \%$

6.2.5 Investitionskosten

Als weitere Grundlage für die Speicherauswahl, werden die Investitionskosten der entsprechenden Speicher betrachtet. Dazu werden von der Firma Lorenz GmbH & Co KG auf Anfrage mitgeteilte Kostenabschätzungen berücksichtigt [26]. Da nur Speicher bis 10 m³ üblicherweise vertrieben werden, werden die größeren Speichergrößen berechnet, indem mehrere 10 m³-Speicher verbaut werden. Ansonsten müssten für diese Speichergrößen jeweils konkrete Angebote bei den Firmen angefordert werden. In Tabelle 14 sind die Investitionskosten der Kältespeicher aufgeführt.

Tabelle 14: Investitionskosten verschiedener Speichergrößen nach [26]

Speichergröße in m³	Investitionskosten in €
5	6.700
10	10.600
20	21.100
30	31.700
40	42.200
50	52.800

6.3 Auswertung

In diesem Kapitel werden die Daten der Beispielberechnung ausgewertet.

6.3.1 Änderung der Größe der Kältemaschine

Zur Ermittlung der unterschiedlichen Kältemaschinengrößen (in kW) werden nun die Anteile der verschiedenen Leistungsklassen an der Betriebszeit der Kältemaschine ermittelt und in Abbildung 23 dargestellt. Dafür wurde beispielhaft eine Speichergröße von 70 kWh, also 10 m³ (siehe Kapitel 6.2.2) zugrunde gelegt. Auf der Y-Achse sind die Betriebszeiten der Anlage über das Jahr 2019 in Prozent aufgetragen. Dabei zeigt die Höhe der Balken die Häufigkeit des gesamten Betriebes bezogen auf das ganze Jahr. Als kleinste Leistungsgröße wurde 250 kW gewählt, da diese dem maximalen Leistungsbedarf im Jahr 2019 entspricht.

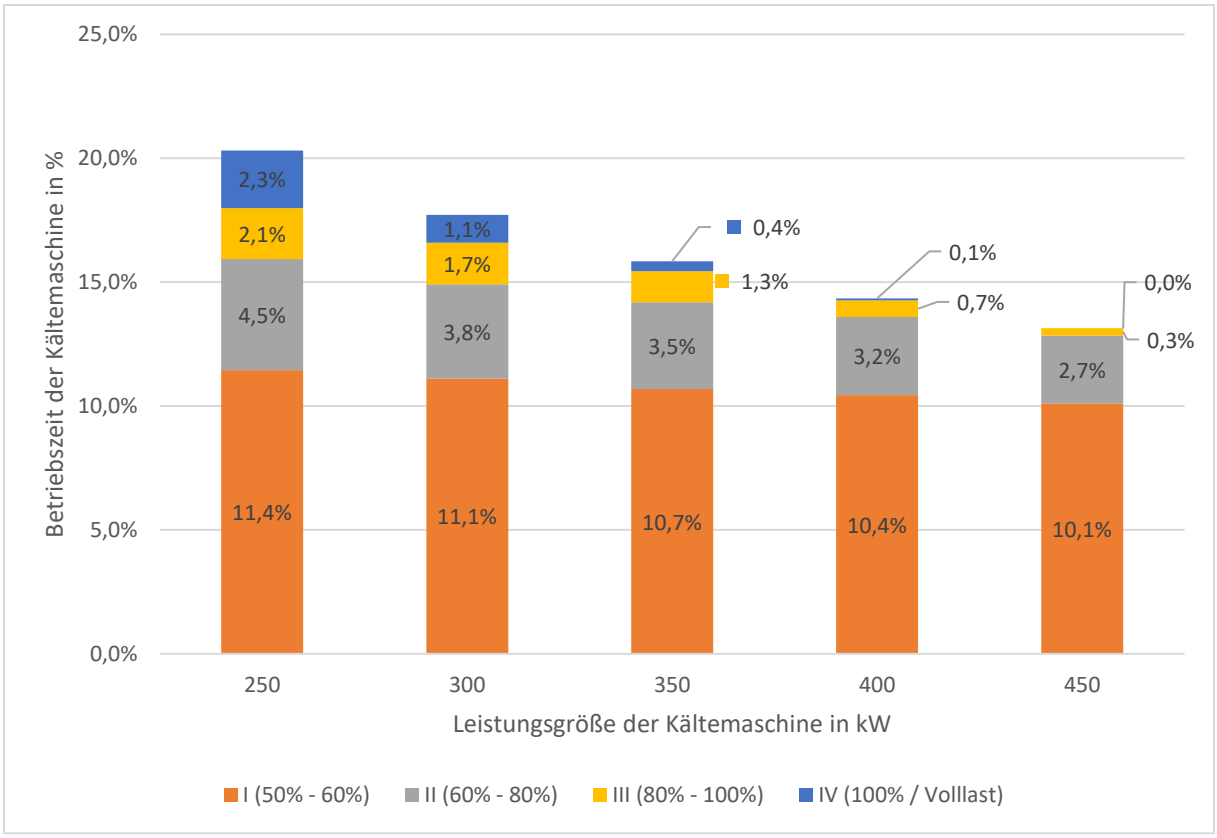


Abbildung 23: Leistungsklassenverteilung für verschiedene Kälteleistungen zur Speichergröße von 70 kWh

In Abbildung 23 ist zu erkennen, dass sich die gesamte Betriebszeit verringert je größer die Leistung der Kältemaschine wird. So sinkt die Betriebszeit von etwa 20 % bei der 250 kW Leistungsgröße, auf etwa 13 % bei der 450 kW Leistungsgröße. Zusätzlich sinkt der Anteil der Leistungsklassen III und IV am stärksten, sodass der Volllastanteil bei einer Kälteleistung von 450 kW bereits bei 0 % liegt. Weniger schnell sinken die Anteile der Leistungsklassen I und II.

Die Änderung der Kosteneinsparung in Abhängigkeit von der Erhöhung der Kälteleistung der Kältemaschine wird in Abbildung 24 dargestellt. Als zweiter Graph ist die Betriebszeit der Kältemaschine aufgetragen. Die Kosteneinsparung bezieht sich dabei auf die Differenz zwischen einem Betrieb mit und ohne Lastmanagement.

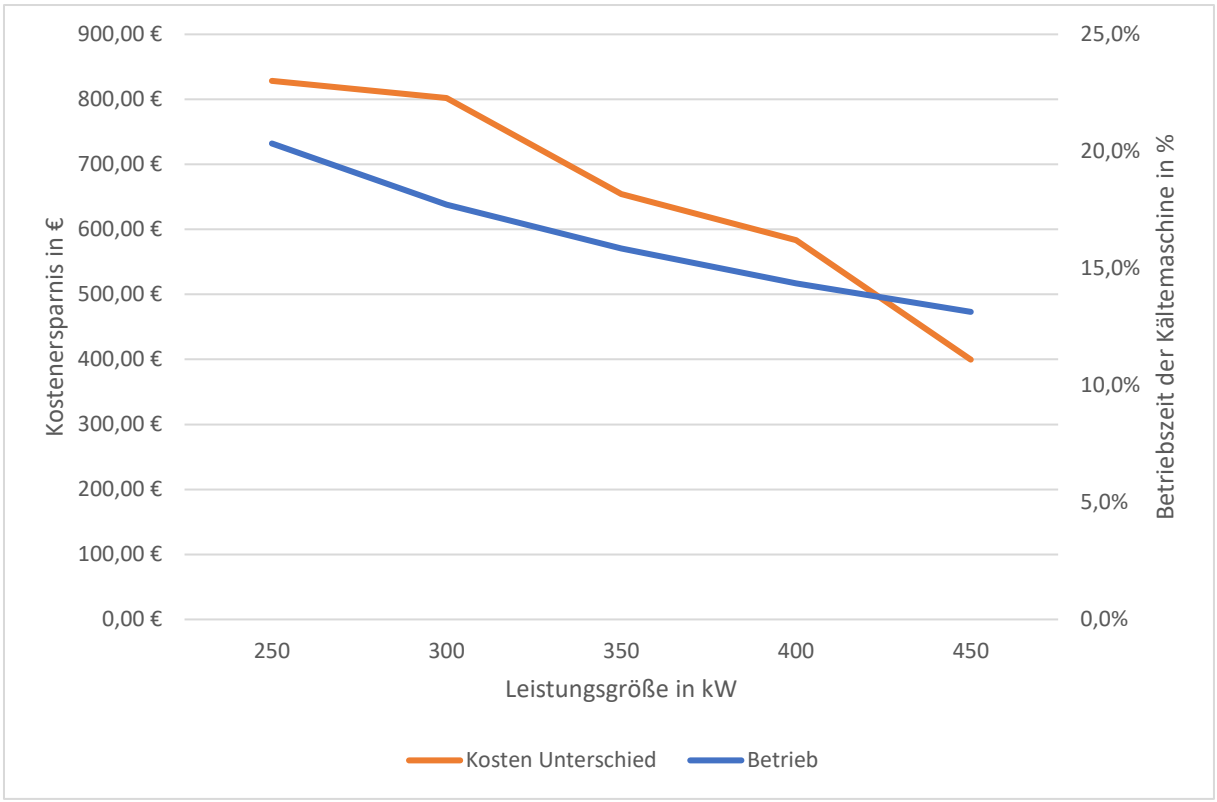


Abbildung 24: Kostenentwicklung über verschiedene Kälteleistungen zur Speichergröße 70 kWh

In Abbildung 24 ist zu erkennen, dass sich durch eine Erhöhung der Kälteleistung die Kostendifferenz zwischen einem Betrieb mit und ohne Lastmanagement verringert. Dies liegt daran, dass eine Erhöhung der Kälteleistung dazu führt, dass die Kältemaschine weniger flexibel einschalten kann, da sie auf mindestens 50 % betrieben werden muss. Gleichzeitig geht der gesamte Betrieb der Kältemaschine zurück, da sie nun durch die höhere Leistung mehr Energie liefert und dementsprechend seltener betrieben werden muss. Somit ergibt sich die größte Kostenersparnis bei einer Kältemaschinengröße von 250 kW.

6.3.2 Änderung der Speichergröße

In Abbildung 25 wird nun dargestellt, wie sich die Leistungsklassenverteilung ändert, wenn die Speichergröße bei gleichbleibender maximaler Kälteleistung erhöht wird. Dazu wurde eine maximale Kälteleistung von 250 kW festgesetzt, die in etwa der Mindestleistung entspricht, die für diese Anwendung benötigt wird. Als Speichergrößen werden 5, 10, 20, 30, 40 und 50 m³ eingesetzt, die den Speicherkapazitäten von 35, 70, 140, 210, 280, 350 kWh entsprechen.

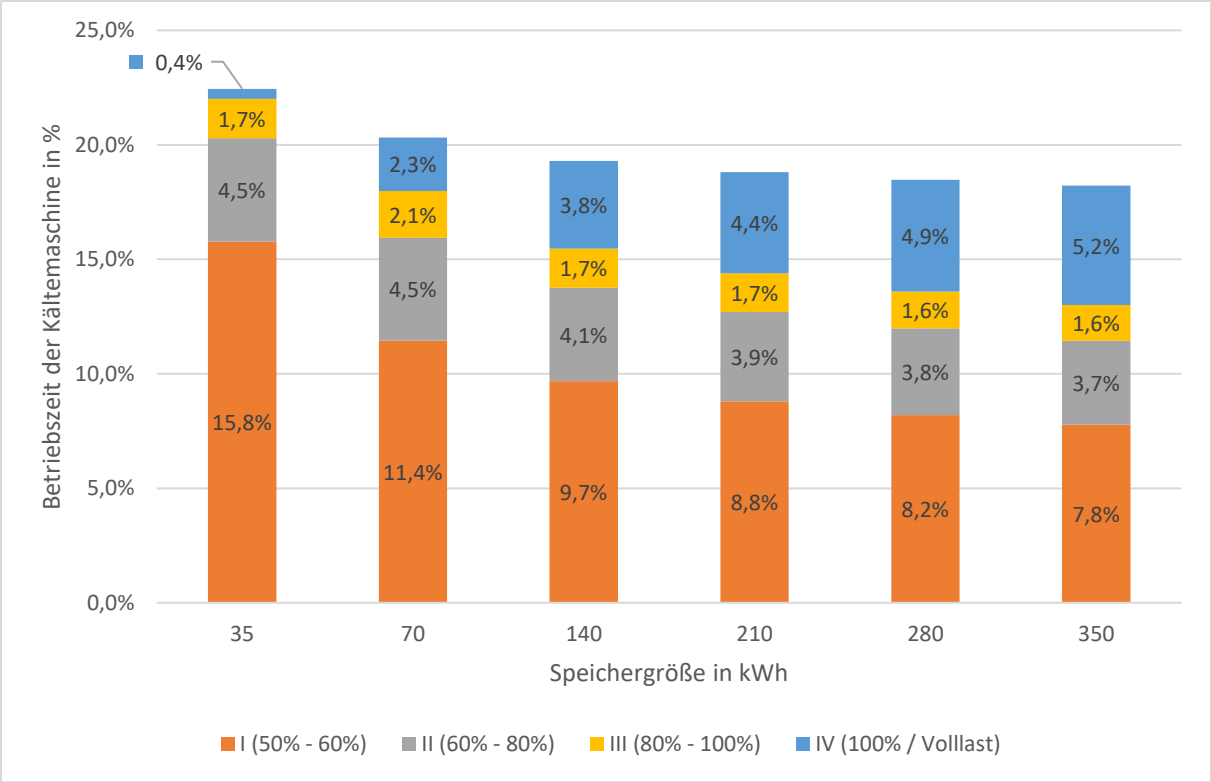


Abbildung 25: Leistungsklassenverteilung über verschiedene Speichergrößen zur Kälteleistung 250 kW

Hierbei ist zu erkennen, dass sich, ähnlich wie bei der Erhöhung der Kälteleistung, der Gesamtbetrieb der Kältemaschine durch Erhöhung der Speichergröße verringert, sich jedoch die Leistungsklassenanteile im Vergleich verändern. Der Volllastanteil (Leistungsklasse IV) steigt von 0,4 % bei einem 35 kWh-Speicher, auf 5,2 % bei einem 350 kWh-Speicher. Während der Anteil von Leistungsklasse III nahezu unverändert bleibt, reduzieren sich die Anteile von Leistungsklasse I und II bei der Vergrößerung des Speichervolumens.

Wie bei der Leistungsvergrößerung wird auch bei der Speichererhöhung die Entwicklung der Kostenersparnis betrachtet und in Abbildung 26 dargestellt.

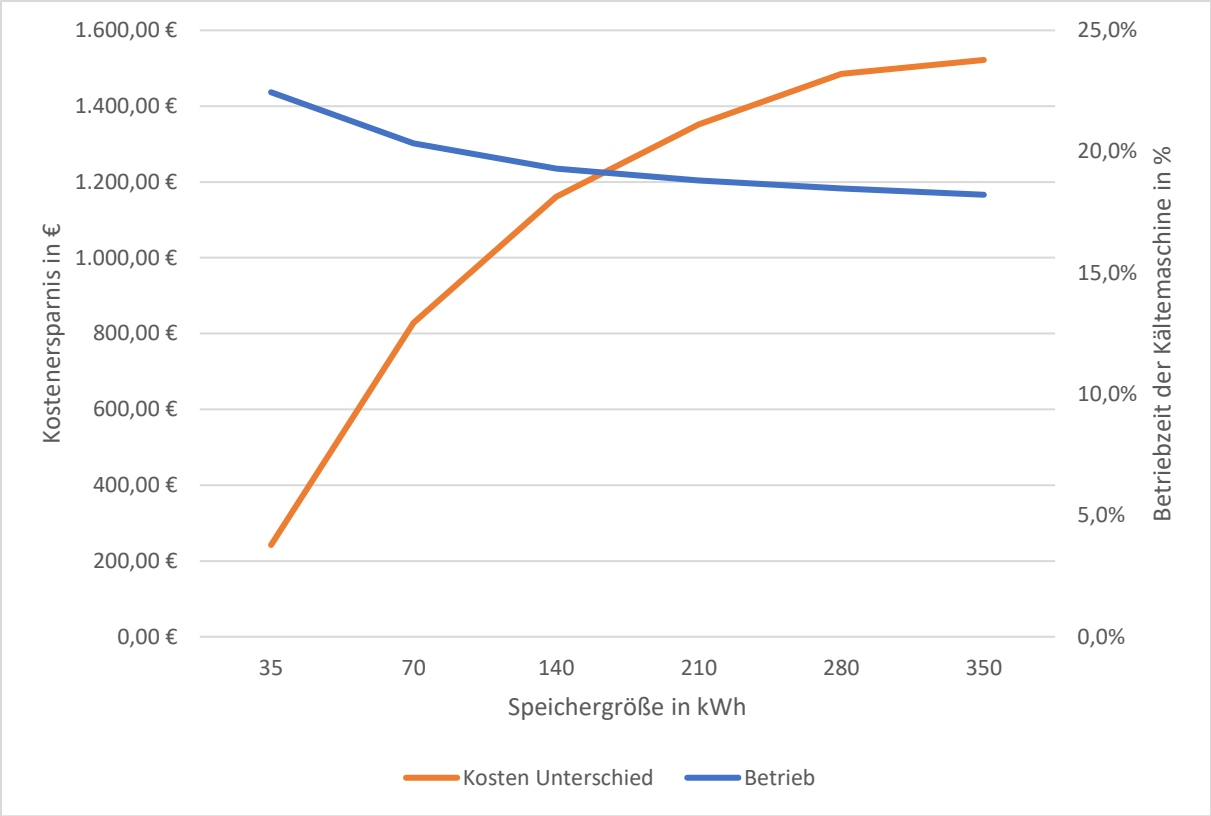


Abbildung 26: Kostenentwicklung über verschiedene Speichergröße zur Kälteleistung von 250 kW

Der Graph „Betrieb“ gibt die gesamte Betriebszeit an und sinkt, bei einer Vergrößerung des Speichers, wie bereits in Abbildung 25 zu erkennen. Der zweite Graph stellt den Kostenunterschied zwischen dem Betrieb mit und ohne Lastmanagement dar und steigt bei der Vergrößerung des Speichers logarithmisch. Die höhere Dimensionierung im niedrigen Speichervolumenbereich bewirkt einen Kostenunterschied zwischen einem 35 kWh und einem 70 kWh Speicher von fast 600 €/a. Diese Steigerung wird mit der weiteren Erhöhung der Speicherkapazität immer geringer und nähert sich einem Wert von etwa 1.600 €.

6.3.3 Optimale Größe der Kältemaschine und des Kältespeichers

Für die Größe der Kältemaschine und des Kältespeichers, wird nun die Kombination ermittelt, die sich für Lastmanagement am besten eignet.

Die Betriebsweise mit Lastmanagement hat, im Gegensatz zum konventionellen Betrieb, eine Kostenoptimierung zum Ziel und der Unterschied in der Betriebszeit kann als Lastverschiebepotenzial betrachtet werden. Das Lastverschiebepotenzial wird von der Leistung der Kältemaschine und der Größe des Kältespeichers beeinflusst. Aus den in Kapitel 6.3.1 und 6.3.2 dargestellten Berechnungsergebnissen geht hervor, dass die Kostenersparnis umgekehrt proportional zur Größe der Kältemaschine ist, das heißt je kleiner die Kältemaschine, desto höher ist die Kostenersparnis. Daher wird mit 250 kW die kleinstmögliche Leistung für die Kältemaschine ausgewählt.

Weiterhin erhöht sich die Kostenersparnis mit Erhöhung des Kältespeichervolumens, wobei die Höhe der Kostenersparnis mit der Erhöhung des Speichervolumens immer geringer wird. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass für einen größeren Speicher auch höhere Investitionskosten und ein größerer Platzbedarf anfallen. Bei Betrachtung der Kostenersparnis und der Investitionskosten wird deutlich, dass bei einer 250 kW Kältemaschine, ein Speicher mit 10 m³ die geringste Amortisationszeit hat. Der 10 m³-Speicher amortisiert sich bereits nach unter 13 Jahren.

Tabelle 15: Bestimmung der Speichergröße durch die Amortisationszeit

Speichergröße in m³	Investitionskosten in €	Jährliche Kostenersparnis in €	Amortisationszeit in Jahren
5	6.700	242,15	27,6
10	10.600	828,42	12,7
20	21.100	1.160,88	18,2
30	31.700	1.351,49	23,4
40	42.200	1.485,13	28,4
50	52.800	1.521,89	34,7

Für die ausgewählten Komponenten, 250 kW Leistung der Kältemaschine und 70 kWh (10 m³) Kapazität des Kältespeichers, sind folgende Werte ermittelt worden.

Die Kostenersparnis liegt bei 828,42 € für das Jahr 2019. Bei der Berechnung mit Lastmanagement wird die Kältemaschine in 20,34 % der Zeit betrieben. In der Berechnung ohne Lastmanagement hingegen nur in 13,23 % der Zeit. Die Differenz von 7,1 %, entspricht einem Unterschied von 623,25 Stunden. Dies ist die Zeit in der Energie abgefragt wird, welche ohne Lastmanagement nicht abgerufen wird. Da die Kältemaschine durchschnittlich eine Leistung von 33,06 kW abruft, kann als Verschiebemenge das Produkt aus Durchschnittsleistung und Verschiebezeit angesetzt werden. Diese Verschiebemenge liegt bei $623{,}25\ h * 33{,}06\ kW = 20{,}6\ MWh/a$. Der Anteil der Verschiebemenge von 20,6 MWh/a am Gesamtbedarf von 290 MWh/a liegt bei etwa 7 %.

6.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird geprüft, ob die berechneten Ergebnisse auf andere Anwendungen oder Sektoren übertragbar sind. Die Berechnung der Lastverschiebung über die Häufigkeit der Laufzeit und die durchschnittliche Leistung der Kältemaschine ist eine Methode, um das Verschiebepotenzial zu ermitteln.

In der Beispielberechnung wird ein Krankenhaus betrachtet, welches in seiner Größe einem durchschnittlichen Krankenhaus in Deutschland entspricht. Wie im Steckbrief Medizin angegeben, beträgt der Energiebedarf zur Kältebereitstellung für die Klinken in Deutschland 352 GWh/a. Überträgt man den in der Beispielberechnung ermittelten Verschiebeanteil von 7 % auf alle Kliniken, so ergibt sich ein Potenzial für Lastmanagement beziehungsweise eine Verschiebemenge von 25 GWh/a für alle Krankenhäuser in Deutschland. Hierbei handelt es sich um eine Hochrechnung, da jedes Krankenhaus verschiedene Rahmenbedingungen aufweist. So hat die installierte Kältemaschine einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch und somit das Verschiebepotenzial. Weiterhin sind möglicherweise in anderen Krankenhäusern bereits Kältespeicher installiert. Darüber hinaus ist der Klimatisierungsbedarf regional unterschiedlich. So ist dieser bei Krankenhäusern in südlicheren Bundesländern, wie Bayern und Baden-Württemberg, höher als bei dem Beispiel in Nordrhein-Westfalen.

Für den vorliegenden Lastgang des Krankenhauses wurde die Stromabnahme für eine Flexibilisierung optimiert. Diese ist übertragbar für vergleichbare Lastgänge, sowohl von anderen Krankenhäusern als auch von Anwendungen anderer Branchen. Da der Hauptkältebedarf durch die Klimatisierung des Krankenhauses entsteht, ist eine Übertragung in Anwendungsbereiche im Klimatisierungssektor grundsätzlich möglich. Dafür muss in den entsprechenden Anwendungen das Lastprofil mit dem des Krankenhauses verglichen werden, um die Übertragbarkeit weiter zu untersuchen.

Zusätzlich können durch dieses überbetriebliche Lastmanagement die Betriebskosten der Kältemaschine gesenkt werden, wodurch ein wirtschaftlicher Anreiz für den Betreiber entsteht, vorausgesetzt sind entsprechende Lastmanagementtarife des Energieversorgers. Die ausgegebene Kosteneinsparung wurde auf Grundlage des EPEX SPOT ermittelt und muss unter Berücksichtigung entsprechender individueller Stromtarife umgerechnet werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Da erneuerbare Energien aus Solarstrahlung und Wind nur volatil zur Verfügung stehen, ist es erforderlich, die Schwankungen in der Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien zu kompensieren. In der Arbeit wurde geprüft, inwieweit der Einsatz von Lastmanagement im Kältesektor zum elektrischen Energieausgleich beitragen kann. Aus bisher veröffentlichten Studien zum Kältemarkt in Deutschland ergibt sich ein elektrischer Energiebedarf zur Kältebereitstellung im Bereich von 55 bis 72 TWh/a. Die Hauptenergieverbraucher im Kältesektor sind Haushaltskühlgeräte mit 18,63 TWh/a, die Lebensmittelindustrie mit 17,13 TWh/a und der Lebensmittel-Einzelhandel mit 8,53 TWh/a. Ein hohes Potenzial ist in der Branche Lebensmittelindustrie zu erwarten, da sowohl der Energiebedarf als auch der Kältebedarf sehr hoch sind. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die Kühlung, die einen ganzjährigen Energiebedarf aufweist und in vielen Branchen benötigt wird (z.B. NK- oder TK-Kühlung in Lebensmittelindustrie und Einzelhandel; Kühlung in der Produktion) ein hohes Flexibilisierungspotenzial aufweist. Da viele Charakteristika zur Bewertung des Potenzials verschiedener Branchen für Lastmanagement nicht veröffentlicht sind, müssten für eine genauere Analyse Detaildaten direkt bei den Unternehmen erhoben werden.

Wie eine Lastverschiebung über einen Kältespeicher umgesetzt werden kann, wurde für die Kälteversorgung eines Krankenhauses, für das konkrete Daten zum Energiebedarf vorliegen, beispielhaft simuliert, wobei die Last kostenoptimiert verschoben wurde. Über die Preise des EPEX SPOT wurde mit Hilfe eines 10 m³-Speichers eine Kostenersparnis von 828 € berechnet. Bei Investitionskosten von etwa 10.600 € für einen Speicher dieser Größe, würde sich dieser bereits nach weniger als 13 Jahren amortisieren, bei einer Preisbasis des Spotmarktes. Mit einem Energiebedarf zur Kältebereitstellung von 290 MWh/a wird für das Krankenhaus ein Lastverschiebepotenzial von 20 MWh/a berechnet. Eine Übertragung des Ergebnisses auf alle Krankenhäuser in Deutschland ergibt eine Verschiebemenge von über 25 GWh/a. Obwohl der Energiebedarf für die deutschen Krankenhäuser nur etwa 1% des gesamten Kältemarktes ausmacht, hat diese Verschiebemenge bereits den Umfang, um einen nennenswerten Beitrag zum elektrischen Energieausgleich in Deutschland zu leisten. Da der Hauptkältebedarf durch die Klimatisierung des Krankenhauses entsteht, sind grundsätzlich entsprechende Potenziale für Lastmanagement im Klimatisierungssektor zu erwarten. Da der Energiebedarf für die Klimatisierung, ebenso wie die Energiebereitstellung durch Photovoltaik, vor allem in den Sommermonaten anfällt, ließen sich besonders diese Schwankungen ausgleichen.

Zur Ermittlung des Flexibilisierungspotenzials anderer Branchen ist eine Simulation, vergleichbar mit der Krankenhaus-Berechnung, möglich. Dafür müssen genaue Lastprofile vorliegen, welche gemessen oder von Unternehmen zur Verfügung gestellt werden. Anhand solcher Ergebnisse kann das Gesamtpotenzial des Kältesektors genauer abgeschätzt werden.

8 Anhang

Steckbrief Bäckerei

	Technische Rahmenbedingungen		Quelle
1	Kältebedarf	0,77 TWh/a	[15]
2	Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung	435 GWh/a	[15]
3	Strombedarf Branche	1,27 TWh/a (2004)	[27]
4	Spezifischer Strombedarf	3,4 kWh/kg (Mehl)	[28]
5	Benötigte Temperaturniveaus	NK 0 bis 4°C TK bis -30°C	[29]
6	Volllaststunden	2.500 – 3.200	[30]
7	Kälteanteil am el. Gesamtverbrauch	42 % (2018)	[31]

Steckbrief Brauereien

	Technische Rahmenbedingungen		Quelle
1	Kältebedarf	1,36 TWh/a	[15]
2	Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung	454 GWh/a	[15]
3	Strombedarf Branche	Keine Angaben verfügbar	-
4	Spezifischer Strombedarf	3,5 kWh/hl bis 5 kWh/hl [Verkaufsbier]	[32]
5	Spezifische installierte el. Kälteleistung	15.000 kW / 1.000 hl [Verkaufsbier]	[32]
6	Volllaststunden	5.000 – 7.000	[30]
7	Kälteanteil am el. Gesamtverbrauch	35 % (2006)	[33]
8	Kostenanteil für die Kältebereitstellung	26,4 %	[34]

Steckbrief Bürogebäude

	Technische Rahmenbedingungen		Quelle
1	Kältebedarf	4,77 TWh/a	[15]
2	Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung	1,45 TWh/a	[15]
3	Strombedarf Branche	19,70 TWh/a (2001)	[27]
4	Spezifischer Kältebedarf	4,7 kWh/(m²*a)	[35]
5	Installierte el. Kälteleistung ges.	0,2 bis 6 MW_{th}	[36]
6	Volllast-/Betriebsstunden	300 - 800 h/a	[36]
7	Kälteanteil am el. Gesamtverbrauch	0,9 % (Klimakälte)	[37]

Steckbrief Chemie- und Pharmaindustrie

	Technische Rahmenbedingungen		Quelle
1	Kältebedarf	8,12 TWh/a	[16]
2	Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung	5,44 TWh/a	[15]
3	Strombedarf Branche	51,7 TWh (2013)	[38]
4	Spezifischer Strombedarf	Keine Angaben verfügbar	
5	Typischer Leistungsgrößenbereich der Anlagen	Tieftemperaturtechnik: 100 MW	[39]
6	Volllast-/Betriebsstunden	Keine Angaben verfügbar	
7	Kälteanteil am el. Gesamtverbrauch	8 %	[39]

Anmerkung:

Der Kältebedarf der Chemie- und Pharmaindustrie umfasst die in der Quelle [16] genannten Anwendungen:

- Übrige Chemie Industrie 6,07 TWh/a
- Chemie Luft und Gas Verflüssigung 1,12 TWh/a
- Pharmaindustrie 0,93 TWh/a

Steckbrief Fleischereien

	Technische Rahmenbedingungen		Quelle
1	Kältebedarf	1,74 TWh/a	[15]
2	Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung	874 GWh/a	[15]
3	Strombedarf Branche	1,24 TWh/a	[27]
4	Spezifischer Kältebedarf	0,75 kWh/Kg Einkaufsmasse (Fleisch)	[40]
5	Spezifische installierte elektrische Kälteleistung gesamt	0,045 kW/(t*a)	[41]
6	Anzahl der Kälteanlagen	55.100	[42]
7	Volllast-/Betriebsstunden	Keine Angaben verfügbar	
8	Kälteanteil am elektrischen Gesamtverbrauch	40 %	[43]

Steckbrief Freizeitindustrie

	Technische Rahmenbedingungen		Quelle
1	Kältebedarf	1,49 TWh/a	[15]
2	Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung	0,46 TWh/a	[15]
3	Strombedarf Branche	Keine Angaben verfügbar	
4	Spezifischer Strombedarf	Keine Angaben verfügbar	
5	Spezifische installierte elektrische Kälteleistung	1,72 MW für eine Skihalle	[44]
6	Volllast-/Betriebsstunden	Betriebsstunden: 4.200 h/a	[21]
7	Kälteanteil am elektrischen Gesamtverbrauch	Keine Angaben verfügbar	

Anmerkung:

Diese Anwendung umfasst die Kühlung von Eissportstätten, Bobbahnen, Freiluft-Eisbahnen und die Klimatisierung von Sportstätten.

Der Kältebedarf und die Energiebereitstellung zur Kälteversorgung werden aus den Werten für Klimatisierung und Kühlung, die in der Quelle angegebenen sind, summiert.

Steckbrief Gastgewerbe

	Technische Rahmenbedingungen		Quelle
1	Kältebedarf	4,72 TWh/a	[45]
2	Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung	2,01 TWh/a	[45]
3	Strombedarf Branche	13,78 TWh/a	[27]
4	Spezifischer Kältebedarf	224 kWh/(a*Bett)	[21]
5	Betriebsstunden	Raumkühlung: Hotel: 1134 h/a; Restaurant: 1605 h/a	DIN V 18599-7
6	Volllaststunden	300 bis 500 h/a	[36]
7	Kälteanteil am elektrischen Gesamtverbrauch	18 %	[46]

Anmerkung:

Die Anwendung Gastgewerbe umfasst Gasthäuser, Restaurants und Hotels. Diese werden klimatisiert und besitzen einen Kühl- sowie Tiefkühlbedarf für Lebensmittel.

Der Kältebedarf und die Energiebereitstellung zur Kälteversorgung werden aus den Werten für Klimatisierung und Kühlung für Hotels und Gaststätten, die in der Quelle angegebenen sind, summiert.

Steckbrief Haushalte

	Technische Rahmenbedingungen		Quelle
1	Kältebedarf	26,23 TWh/a	[15]
2	Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung	18,63 TWh/a	[15]
3	Strombedarf Branche	129,5 TWh [2018]	[18]
4	Spezifischer Kältebedarf	Keine einheitlichen Angaben verfügbar	
5	Volllast-/ Betriebsstunden	Keine einheitlichen Angaben verfügbar	
6	Kälteanteil am elektrischen Gesamtverbrauch	23,2 %	[18]

Zusatzinformation zur Aufteilung der Kühlgeräte am Kältebedarf, aus [15]:

Kühlung im Haushalt	Gesamtenergiebedarf in GWh/a	Kältebedarf in GWh/a
Kühlschränke	5.304	7.691
Kühlschrank+ Gefrierfach	2.941	4.264
Gefrierschränke	5.376	7.338
Gefriertruhen	2.754	3.759
Kühl-/Gefrierabteile	2.255	3.180
Gesamt	**18.630**	**26.232**

Anmerkung:

Diese Anwendung umfasst die Kühlgeräte in privaten Haushalten.

Der Klimatisierungsbedarf wird mit 170 GWh/a [Kältebedarf] und 70 GWh/a [Energiebedarf zur Kühlung] vernachlässigt.

Steckbrief Lebensmittel-Einzelhandel

	Technische Rahmenbedingungen		Quelle
1	Kältebedarf	Kühlung: 13,18 TWh/a (1999) Klimatisierung: 7,55 TWh/a Gesamt: 20,73 TWh/a	[45] [15]
2	Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung	Kühlung: 6,29 TWh/a (1999) Klimatisierung: 2,24 TWh/a Gesamt: 8,53 TWh/a	[45] [15]
3	Strombedarf Branche	Keine Angaben verfügbar	
4	Spezifischer Kältebedarf	0,6 kWh/(m²*d) [Verkaufsfläche]	[21]
6	Spezifische installierte elektrische Kälteleistung	40W/m²	DIN SPEC 15240
7	Volllast-/ Betriebsstunden	Kühlstunden: 1.900 h/a	[21]
8	Kälteanteil am elektrischen Gesamtverbrauch	48 %	[47]

Anmerkung:

Diese Anwendung umfasst Discounter, Supermärkte und andere Lebensmitteleinzelhandelsgeschäfte. Hierbei werden die Kühlung und die Klimatisierung summiert.

Steckbrief Lebensmittelindustrie

	Technische Rahmenbedingungen		Quelle
1	Kältebedarf	49,67 TWh/a	[15]
2	Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung	17,13 TWh/a	[15]
3	Strombedarf Branche	Keine Angaben verfügbar	
4	Spezifischer Kältebedarf	Keine Angaben verfügbar	
5	Volllaststunden	2.500 – 3.500	[30]
6	Kälteanteil am elektrischen Gesamtverbrauch	Keine Angaben verfügbar	

Anmerkung:

In dieser Anwendung ist der Kühlbedarf von Fleischereien, Bäckereien, Fruchtsaftherstellern, Brauereien, Milchviehbetrieben und Schlachthöfen nicht enthalten.

Da unter Lebensmittelindustrie je nach Quelle verschiedene Anwendungen fallen, sind Angaben neben dem Kältebedarf und dem elektrischen Energiebedarf zur Kältebereitstellung nicht sinnvoll möglich.

Steckbrief Milchverarbeitung

	Technische Rahmenbedingungen		Quelle
1	Kältebedarf	1,05 TWh/a	[16]
2	Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung	0,58 TWh/a	[16]
3	Strombedarf Branche	2,1 TWh/a	[48]
4	Spezifischer Strombedarf	0,094 kWh_{el}/kg (Rohmilch)	[49]
5	Spezifische installierte elektrische Kälteleistung	0,013 kW/(t*a)	[41]
6	Installierte elektrische Kälteleistung gesamt	20,39 MW	[16]
7	Volllaststunden	2.600 – 2.900 h	[30]
8	Kälteanteil am elektrischen Gesamtverbrauch	Keine Angaben verfügbar	

Anmerkung:

Diese Anwendung umfasst den Kältebedarf in Molkereien und in der Milchverarbeitung.

Steckbrief Rechenzentren

	Technische Rahmenbedingungen		Quelle
1	Kältebedarf	3,33 TWh/a	[16]
2	Elektrischer Energiebedarf für die Kältebereitstellung	2,7 TWh/a	[16]
3	Strombedarf Branche	10,11 TWh/a [2008]	[21]
4	Spezifischer Strombedarf	Keine Angaben verfügbar	
5	Spezifische installierte elektrische Kälteleistung	1.814 W/m²	DIN V 18599-10
6	Anzahl der Kälteanlagen	2.176.624	[21]
7	Betriebsstunden	8760 h	DIN V 18599-7
8	Kälteanteil am elektrischen Gesamtverbrauch	33 %	[21]

Anmerkung:

Diese Anwendung umfasst die Klimatisierung von Rechenzentren, Serverräumen und sonstiger Informationstechnik.

Energiebedarf der Branchen, für welche keine Steckbriefe erstellt werden und die unter Sonstiges auflistet sind [15].

Branche: Sonstiges nach [15]	**Energiebedarf zur Kältebereitstellung in GWh/a**
Fruchtsaftherstellung	23
Schlachthöfe	98
Eisdielen	118
Imbisshallen	198
Kantinen	248
Jugendherbergen	1
Getränke-Einzelhandel	351
Apotheken	33
Tankstellen	498
Bauindustrie	1
Bergbau	480
Pflanzenhandel	749
Labors	5
Tieftemperaturtechnik	169
Klimatisierung von Wohnbereichen	70
Klimatisierung in der Industrie	5.090
Klimatisierung in Fahrzeugen	65 (diese ist nahezu ausschließlich thermisch)
Wehrtechnik	183
Summe	**8.380**

9 Literaturverzeichnis

[1] European Energy Exchange AG, *EPEX-SPOT Market-Data.* [Online]. Available: https://www.epexspot.com/en/market-data (accessed: Apr. 30 2020).

[2] Bundesregierung, “Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung,” 2010.

[3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), *Bundesregierung führt beschleunigten Atomausstieg konsequent fort,* 105th ed., 2018.

[4] EnArgus, *FlexKaelte: Flexibilisierung von Kälteversorgungssystemen für den elektrischen Energieausgleich in Deutschland (FlexKaelte).* [Online]. Available: https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=Fraunhofer-Institut%20f%c3%bcr%20Umwelt-,%20Sicherheits%20flexk%c3%a4lte&v=10&s=12&id=1213763-%20und%20Energietechnik%20(UMSICHT)&id=1213763 (accessed: Apr. 30 2020).

[5] Recknagel, Sprenger, Schramek, “Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik,” 2007.

[6] Sinusverteiler GmbH, “Individuelle Pufferspeicher,”

[7] Siemens AG 2017, “Kältetechnik,” 2017.

[8] Energie Agentur NRW, “Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen: Potenziale, Hemmnisse, Handlungsoptionen,” 2016.

[9] Deutsche Energie-Agentur, “Handbuch Lastmanagement: Vermarktung flexibler Lasten,” 2012.

[10] Technische Universität Berlin, “Lastmanagement,” 2007.

[11] European Energy Exchange AG, “Direktvermarktung von erneuerbaren Energien an der Strombörse,” 2017.

[12] Umweltbundesamt, “Entwicklung des Stromverbrauchs nach Sektoren: Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2017,”

[13] Statista, *Nettostromverbrauch in Deutschland in den Jahren 1991 bis 2018 (in Terawattstunden).* [Online]. Available: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/164149/umfrage/netto-stromverbrauch-in-deutschland-seit-1999/

[14] Dr. Karin Jahn and Dipl.-Volkswirt Guntram Preuß, “Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland: Eine Abschätzung des Energiebedarfs von Kältetechnik in Deutschland nach Einsatzgebieten,” Apr. 2011.

[15] Prof. Dr.-Ing. Fritz Steimle, “Energiebedarf bei der technischen Erzeugung von Kälte in der Bundesrepublik Deutschland,” 2002.

[16] Carsten Heinrich, Sebastian Wittig, Peter Albring, Lutz Richter, Mathias Safarik, “Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie,” Jan. 2014.

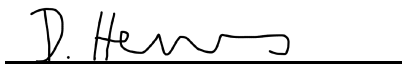
[17] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), “Energieeffizienz in Zahlen: Entwicklung und Trends in Deutschland 2018,” Aug. 2018.

[18] Dipl.-Oec. Hans Georg Buttermann and Dipl.-Volkswirt Uwe Maaßen, “Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland: Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken,” 2018.
[19] Statista, *Anzahl der Krankenhausbetten in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2017.* [Online]. Available: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157049/umfrage/anzahl-krankenhausbetten-in-deutschland-seit-1998/
[20] Stiftung Viamedica, “Erneuerbare Energien und Energieeffizienz in deutschen Kliniken,” 2020.
[21] Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt für Ressourcenschutz, “Kältemarktanalyse der Stadt Hamburg in Juni 2010,” Jun. 2010.
[22] Peter Noeres, Daniel Hölder, and Wilhelm Althaus, “Entwicklung von Betriebsstrategien zur Optimierung der Fernwärme-Kälte-Kopplung,” 1998.
[23] Kälte Klima Aktuell, *Milchkühlung.* [Online]. Available: https://www.kka-online.info/artikel/kka_Milchkuehlung_1809189.html
[24] Fraunhofer ISE, “Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland,” 2019. [Online]. Available: https://www.ottobrunn.de/fileadmin/Dateien/Energie-Klimaschutz/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland_Jan_2019.pdf
[25] Clivet, “Technisches Handbuch Spinchiller,”
[26] Firma Lorenz GmbH & Co KG, "Anfrage für Investitionskosten von Kältespeichern".
[27] D. Khripko, “Flexibilisierung des industriellen Energiebedarfes: Nutzungsgradsteigerung erneuerbarer Energien in Verteilnetzen,” Kassel, Produktion & Energie Band 14, 2007.
[28] proKlima – Der enercity-Fonds and ASEW GbR, Eds., “Informationen für das Bäcker- und Konditorhandwerk,”
[29] Karla Rika Müller, “Nutzung von Abwärme im Gewerbe: Fallbeispiel Bäckereien,” Feb. 2013.
[30] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Wien, “Leitfaden für Energieaudits in Kältesystemen,” 2015.
[31] S. Heins, “Untersuchung von Systemen zur Teigkühlung im Bäckereigewerbe,” May. 2018.
[32] S. Vey, “Anlagenplanung in Brauereien und Getränkeabfüllbetrieben unter Verwenden von Standardsoftware,” Jun. 2000.
[33] HKK Historische Kälte- und Klimatechnik e.V., Ed., “Anforderungen an die Kältetechnik in Brauereien – damals und heute,” May. 2006.
[34] B. Puttinger, “Energiekennzahlen und Sparpotenziale in Brauereien,” 2000.
[35] Forschungsstelle für Energiewirtschaft, Ed., “Strukturoptimierung in Ballungsgebieten: Energiebedarfsprognose für die Stadt München,” Feb. 2007.
[36] Fraunhofer UMSICHT, “Entwicklung von Betriebsstrategien zur Optimierung der Fernwärme-Kälte-Kopplung,” 1998.
[37] Dr. Ralph Henger, “Büroimmobilien: Energetischer Zustand und Anreize zur Steigerung der Energieeffizienz,” 2017.
[38] Dr. Jochen Wilkens, “Die chemische Industrie im Konflikt: Zwischen Effizienz und fluktuierender Stromversorgung,” Nov. 2016.

[39] Prof. Dr. Wolfgang Fratzscher, “Zur Kälteanwendung in der chemischen Industrie,” 2008.
[40] SWH. EVH, Ed., “Informationen für das Fleischerhandwerk,”
[41] W. Schwarz, “Das neue Modell zu stationären Kälte- und Klimaanlagen für die jährliche Emissionsberichteerstattung: Industriekälte,” Oct. 2012.
[42] Dipl.-Volkswirt Guntram Preuß, “Branchenbericht Deutscher Markt für Kältetechnik 2009: Bestand an Kältesysteme in Deutschland nach Einsatzgebieten Marktvolumen für kältetechnische Anwendungen,” Dec. 2009.
[43] H. Ortner, “Stromeinsparung in der Fleischverarbeitenden Industrie,”
[44] Kälte Klima Aktuell, “Skivergnügen das ganze Jahr: Schneeproduktion mit Ammoniak-Einschraubenverdichtern,” Accessed: Apr. 30 2020. [Online]. Available: https://www.kka-online.info/artikel/kka_Skivergnuegen_das_ganze_Jahr_1418705.html
[45] M. Klobasa, *Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz*. Stuttgart, 2009.
[46] R. Kapferer, A. Greml, W. Kreuzer, M. Braito, “Kälteanlagen im Hotel- und Gastgewerbe,” Oct. 2011.
[47] Stephen P. A. Brown, *Energy Policy.* [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511003235
[48] Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, “Energieverbrauch und CO2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien: Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente,” Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Stuttgart, ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale".
[49] Susmilk and Niels Jungbluth, Regula Keller, Genevève Doublet, Alex König, Simon Eggenberger, “Del. 7.3 Report on life cycle assessment, economic assessment, potential employment effects and exergy-based analysis,” 2016.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht. Die vorgelegte Arbeit hat weder in der gegenwärtigen noch in einer anderen Fassung schon einem anderen Fachbereich der Hochschule Ruhr West oder einer anderen wissenschaftlichen Hochschule vorgelegen.

Oberhausen, 07.05.2020 

Ort, Datum Unterschrift