



**E-Energy - IKT-basiertes Energiesystem der Zukunft**  
**FÖRDERPROGRAMM DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT**  
**(BMU)**  
**IKT für das Internet der Energie**



**Projekt Titel**

**Modellstadt Mannheim**

**Vollständige Projektbezeichnung**

**Modellstadt Mannheim in der  
Metropolregion Rhein-Neckar, Mannheim**

**Förderkennzeichen: 0325089C beim Projektträgers Jülich (Pt) für das  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)  
Referat KI III 5 - Forschung und Entwicklung im Bereich Erneuerbare Energien**

**Nutzung von thermischen Speichern als  
Energiespeicher (AS1.06)**

**Status: Entwurf**

**Version: V1.0**

**Dissemination Level: Public**

**Date: 31.07.2009**

**Organisationsname des Konsortialführers: MVV Energie AG**

### Status Beschreibung

Geplantes Fertigstellungsdatum:	Version 1: 31.07.2009	Tatsächliches Fertigstellungsdatum:	31.07.2009
Kurze Dokumentenbeschreibung:	Das Ziel dieser Arbeit ist die detaillierte Beschreibung eines Lastverlagerungspotenzials in der Kälteerzeugung der Stadt Mannheim. Es soll untersucht werden, ob mittels IKT und dezentralen Entscheidungsmechanismen thermische Speicher in Form von Kälteanlagen für ein Lastmanagement sowie zum Angebot von Reserveleistungen für virtuelle, lokale Regelenergiepools genutzt werden können.		
Autoren:	Arne Grein (ifeu), Martin Pehnt (ifeu), Markus Duscha (ifeu), Holger Kellerbauer (UDE)		
<input type="checkbox"/> Partner <input type="checkbox"/> Contributions <input type="checkbox"/> Peer reviews	<input checked="" type="checkbox"/> MVV <input type="checkbox"/> PPC <input type="checkbox"/> IBM <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> UDE <input type="checkbox"/> PSE <input type="checkbox"/> ISET <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> ifeu <input type="checkbox"/> IZES <input type="checkbox"/> DREWAG	<b>Art der Veröffentlichung:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Projektbericht <input type="checkbox"/> Sonstige Veröffentlichung	
Peer review approval :	<input type="checkbox"/> Approved <input type="checkbox"/> Rejected (improve as specified hereunder)	Date:	
Suggested improvements:			

### Version History

Version:	Datum:	Kommentare, Änderungen, Status:	Person(en):
01	23.07.2009	Fertigstellung Hauptdokument (ifeu) sowie Modellbildung (UDE)	Arne Grein, Holger Kellerbauer
01a	31.07.2009	Formatanpassung	Arne, Grein

## Inhaltsverzeichnis

<b>ABKÜRZUNGEN.....</b>	<b>9</b>
<b>1. EINLEITUNG.....</b>	<b>11</b>
1.1. AUSGANGSLAGE UND PROBLEMSTELLUNG.....	11
1.2. ZIEL DER STUDIE.....	11
1.3. VORGEHENSWEISE.....	12
<b>2. KÄLTEERZEUGUNGSANLAGEN FÜR EIN DEZENTRALES LASTMANAGEMENT.....</b>	<b>13</b>
2.1. UNTERSUCHUNGEN UND ERFAHRUNGEN ZUM LASTMANAGEMENT MIT THERMISCHEN SPEICHERN.....	13
2.1.1. <i>Theoretische Untersuchungen</i> .....	14
2.1.2. <i>Praktische Erfahrungen</i> .....	15
2.2. ANWENDUNGSBEREICHE DER KÄLTEERZEUGUNG.....	16
2.2.1. <i>Strukturierung der Bereiche</i> .....	16
2.2.2. <i>Bedeutung der Branchen für den Kältebedarf in Deutschland</i> .....	17
2.2.3. <i>Aktuelle Entwicklungen des Kältebedarfs</i> .....	19
2.2.4. <i>Charakteristika der relevanten Anwendungen</i> .....	22
2.3. GRUNDPRINZIPIEN DER KÄLTEERZEUGUNG.....	30
2.3.1. <i>Systematisierung der Prozesse und Technologien zur Kälteerzeugung</i> .....	30
2.3.2. <i>Aufbau und Dimensionierung der Kälteversorgung</i> .....	36
2.3.3. <i>Thermische Speicherkapazität</i> .....	37
2.3.4. <i>Sensorik und Aktorik</i> .....	39
2.3.5. <i>Lastverhalten im Betrieb</i> .....	41
2.4. KÜHLSTRATEGIEN ZUR LASTVERLAGERUNG.....	42
2.5. ZUSÄTZLICHE EXTERNE KÄLTESPEICHER.....	43
<b>3. LASTMANAGEMENTPOTENZIALE DER KÄLTEERZEUGUNG IN DER STADT MANNHEIM.....</b>	<b>45</b>
3.1. METHODISCHER ANSATZ.....	45
3.2. BRANCHENZAHLEN FÜR DIE STADT MANNHEIM.....	48
3.3. EMPIRISCHE DATEN DER BETRIEBSFÜHRUNG UND -ANFORDERUNGEN DER KÄLTEANLAGEN.....	50
3.4. BEWERTUNG DER INFORMATIONEN IM HINBLICK AUF DIE POTENZIALANALYSE.....	59
3.4.1. <i>Annahmen zur technischen Auslegung von Kälteanlagen</i> .....	59
3.4.2. <i>Gruppierung von vergleichbaren Lastprofilen</i> .....	71
3.4.3. <i>Hemmnisse für Betreiber von Kälteanlagen zur Umsetzung von Lastmanagement</i> .....	78
3.5. BESTIMMUNG DES LASTMANAGEMENTPOTENZIALS.....	82
3.5.1. <i>Aggregation des theoretischen Potenzials</i> .....	82
3.5.2. <i>Ermittlung des wirtschaftlich-technischen und realisierbaren Potenzials</i> .....	87
3.5.3. <i>Ergebnisse der zeitlichen Modellierung der Verlagerungspotenziale innerhalb der Lastprofilgruppen</i> .....	91
3.6. KRITISCHE ANMERKUNGEN.....	94
3.6.1. <i>Vorgehen der Potenzialanalyse</i> .....	94
3.6.2. <i>Wirkungen des Lastmanagements</i> .....	95
<b>4. SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUM LASTMANAGEMENTPOTENZIAL IN DER KÄLTEERZEUGUNG.....</b>	<b>97</b>
4.1. EINFLUSSPARAMETER AUF DAS LASTMANAGEMENTPOTENZIAL.....	97
4.2. QUANTIFIZIERUNG DES THEORETISCHEN, TECHNISCH-WIRTSCHAFTLICHEN UND REALISIERBAREN POTENZIALS.....	99
4.3. IMPLEMENTIERUNGSMÖGLICHKEITEN VON LASTMANAGEMENT IN DER KÄLTEERZEUGUNG.....	103

---

<b>5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>106</b>
<b>6. LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>110</b>
<b>7. ANHANG.....</b>	<b>114</b>
7.1. FRAGEBOGEN FÜR KÄLTEANLAGENBETREIBER .....	114
7.2. FRAGEBOGEN FÜR BETREIBER VON KÄLTEANLAGEN .....	116
<b>8. MODELLBILDUNG FÜR DIE IN KÄLTEANLAGEN VERFÜGBARE REGELENERGIE (UDE) .....</b>	<b>121</b>
8.1. EINLEITUNG .....	121
8.2. HERLEITUNG DES MODELLS.....	122
8.3. BEWEIS FÜR DIE KORREKTHEIT DES MODELLS.....	124
8.4. VERFEINERUNG DES MODELLS.....	126
8.4.1. Zeitabhängigkeit der Widerstandes $R_i$ .....	126
8.4.2. Definition eines Abschaltvektors .....	127
8.4.3. Definition von Gruppen .....	127
8.4.4. Erweiterung der Definition eines Abschaltvektors .....	128
8.4.5. Das Kompressorproblem .....	129
8.4.6. Mögliche Verfeinerungen des Kompressorproblems .....	131
8.4.7. Vereinigung der Vorfaktoren.....	131
8.5. BEWERTUNG DES MODELLS .....	132
8.6. VORMESSUNGEN.....	133
8.7. GEWONNENE ERKENNTNISSE .....	136
8.8. BERECHNUNGEN .....	138
8.8.1. Berechnungen auf den realen Daten.....	141
8.8.2. Einteilung in Gruppen .....	142
8.8.3. Ergebnisbildung über alle Gruppen.....	148
8.9. ERGEBNIS / BEWERTUNG DIESER MODELLRECHNUNG .....	149
8.10. ERGEBNISSE ANDERER MODELLRECHNUNGEN / STUDIEN.....	150
8.11. DIE VERWENDETEN FORMELZEICHEN .....	151

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Struktur der Kälteerzeugung nach Branchen [in Anlehnung an Steimle et al. 2002] .....	17
Abbildung 2.2 Anteile der Kälteerzeugung der unterschiedlichen Branchengruppen in Deutschland nach dem Stromverbrauch [Quelle: Steimle et al. 2002] .....	18
Abbildung 2.3 Entwicklung des Endenergieverbrauchs zur Kälteerzeugung bis zum Jahr 2020 [Arnemann 2009 in Anlehnung an Probst 2009].....	22
Abbildung 2.4 Relative Verteilung der Kühlhauskapazitäten im Jahr 2007 [Quelle: VDKL 2008].....	25
Abbildung 2.5 Umsatzanteile der Handelsketten des Lebensmittel-EH im Jahr 2005 [Quelle: BVL 2007].....	26
Abbildung 2.6 Maximale Tagestemperaturen der Stadt Mannheim im Jahr 2008 [Quelle: WetterstationMannheim 2009] .....	29
Abbildung 2.7 Saisonale Variation des Kühlbedarfes in Büro- und Verwaltungsgebäuden [in Anlehnung an VDI 2008] .....	29
Abbildung 2.8 Geordnete Kurve der Tageshöchsttemperaturen in der Stadt Mannheim im Jahr 2008 [Quelle: WetterstationMannheim 2009] .....	30
Abbildung 2.9 Der idealisierte, linksläufige Carnot-Kältekreisprozess [in Anlehnung an Recknagel et al. 2009] .....	31
Abbildung 2.10 Der Kompressionskälteprozess [Quelle: dena o.J.] .....	32
Abbildung 2.11 Leistungsbreite von Kompressionskältemaschinen [in Anlehnung an Recknagel et al. 2009]	33
Abbildung 2.12 Der Sorptionskälteprozess am Beispiel der Absorption [Quelle: dena o.J.] .....	34
Abbildung 2.13 Temperaturdifferenzen zwischen realem und idealisiertem Kälteprozess .....	34
Abbildung 2.14 Abhängigkeit der Leistungszahl von der Verdampfungstemperatur [in Anlehnung an Winkler 2009].....	36
Abbildung 2.15 Temperaturkurve eines Haushaltskühlschranks mit unterschiedlicher Wasserbefüllung zur Variation der Speicherkapazität bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C [Quelle: Stadler 2005] .....	38
Abbildung 2.16 Vereinfachter Regelkreis .....	39
Abbildung 2.17 Teillastverhalten eines Schraubenverdichters [in Anlehnung an Recknagel et al. 2009].....	42
Abbildung 2.18 Vorkühl- (oben) und Nachkühlstrategie (unten) bei dezentralen Anlagen und Verbundanlagen.....	43
Abbildung 3.1 Struktur der Potenzialanalyse .....	46
Abbildung 3.2 Bezugsquellen zur empirischen Untersuchung.....	47
Abbildung 3.3 Aufwärmverhalten von Kühltruhen im Lebensmittel-EH bei einer Ausgangstemperatur von – 20 °C [Quelle: Stadler 2005] .....	64
Abbildung 3.4 Aufwärmdauer von verschiedenen Bürogebäudetypen um 1 °C [Quelle: Bukvic 2007] .....	69
Abbildung 3.5 Haushaltslastprofil [Quelle: Jentzsch 2008] .....	70
Abbildung 3.6 Temperatur-Hysterese eines Haushaltskühlschranks [Quelle: Jentzsch 2008].....	70
Abbildung 3.7 Tageslastprofil für die gewerbliche Klimatisierung.....	72
Abbildung 3.8 Jahreslastprofil für die gewerbliche Klimatisierung .....	72
Abbildung 3.9 Tageslastprofil für die industrielle Klimatisierung.....	73
Abbildung 3.10 Jahreslastprofil für die industrielle Klimatisierung.....	73
Abbildung 3.11 Tageslastprofil für gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen im Lebensmittel-EH.....	74
Abbildung 3.12 Jahreslastprofil für gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen im Lebensmittel-EH.....	74
Abbildung 3.13 Tageslastprofil für gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen in Kühl lagern.....	75
Abbildung 3.14 Jahreslastprofil für gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen in Kühl lagern .....	76
Abbildung 3.15 Tageslastprofil für Prozesskälte in Industrieanwendungen.....	76
Abbildung 3.16 Jahreslastprofil für Prozesskälte in Industrieanwendungen .....	77
Abbildung 3.17 Tageslastprofil für Klein- und Kleinstanlagen in der Gewerbekälte.....	78
Abbildung 3.18 Jahreslastprofil für Klein- und Kleinstanlagen in der Gewerbekälte.....	78
Abbildung 3.19 Aggregierte Kälteanlagenleistung nach Lastprofilgruppen .....	86

Abbildung 3.20 Aggregierte Zahl der Betriebsstellen nach Lastprofilgruppen .....	87
Abbildung 3.21 Durchschnittliche Leistung pro Betriebsstätte nach Lastprofilgruppen .....	87
Abbildung 3.22 Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf der Gruppe GK.....	91
Abbildung 3.23 Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf der Gruppe IK .....	91
Abbildung 3.24 Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf der Gruppe LM.....	92
Abbildung 3.25 Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf der Gruppe KL .....	92
Abbildung 3.26 Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf der Gruppe PI.....	93
Abbildung 3.27 Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf der Gruppe KK.....	93
Abbildung 3.28 Gesamte Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf .....	94
Abbildung 4.1 Aufteilung des maximalen theoretischen Lastverlagerungspotenzials der Kälteerzeugung in der Stadt Mannheim nach Branchen.....	100
Abbildung 4.2 Aufteilung des maximalen theoretischen Lastverlagerungspotenzials der Kälteerzeugung in der Stadt Mannheim nach Lastprofilgruppen [eigene Darstellung].....	101
Abbildung 4.3 Reduzierung des maximalen Lastmanagementpotenzials nach Potenzialstufen .....	102
Abbildung 4.4 Maximales realisierbares Lastmanagementpotenzial nach Verlagerungsdauer .....	103
Abbildung 5.1 Anwendungsbereiche der Kälteerzeugung .....	106
Abbildung 5.2 Beispiele für analysierte Kälteanlagen in Mannheim in unterschiedlichen Branchen.....	106
Abbildung 5.3 Potenzialanalyse der Kälteerzeugung nach Lastprofilgruppen für die Stadt Mannheim .....	107
Abbildung 5.4 Aggregierter Lastverlauf der Lastprofilgruppen über einen Sommertag .....	108
Abbildung 5.5 Verlagerungsdauern von Kälteanlagen nach Lastprofilgruppen.....	108

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Anteile der Branchen am Stromverbrauch durch Kälteerzeugung im Jahr 1999 [Quelle: Steimle et al. 20002] .....	19
Tabelle 2.2 Entwicklung der Unternehmens- und Beschäftigtenzahlen in der Nahrungsmittelherstellung [Quelle: Destatis 2004, Destatis 2009].....	20
Tabelle 2.3 Entwicklung der Ladenformate im Lebensmittel-EH zwischen 2000 und 2007 [Quelle: EHI 2007] .....	21
Tabelle 2.4 Entwicklung von Kleinverbrauchern im Bereich Lagerung / Verteilung der Nahrungsmittelindustrie zwischen 1999 und 2006 [Quelle: Steimle et al. 2002, EHI 2007] .....	21
Tabelle 2.5 Verteilung der Temperaturbereiche der Produktlagerung in der Nahrungsmittelherstellung [Quelle: Steimle et al. 2002].....	23
Tabelle 2.6 Maximal zulässige Temperaturen nach europäischer und deutscher Hygienevorschriften für Nahrungsmittel tierischen Ursprungs [Quelle: BMELV 2007].....	24
Tabelle 2.7 Einordnung der Ladenformate im Lebensmittel-EH [Quelle: Rhiemeier et al. 2008].....	25
Tabelle 2.8 Temperaturbereiche für typische, kühlbedürftige Supermarktwaren [Quelle: Rhiemeier et al. 2008] .....	26
Tabelle 2.9 Schaltanforderungen von Verdichtern [Quelle: Recknagel et al. 2009].....	41
Tabelle 3.1 Branchenzahlen der ausgewählten Branchen mit Kühlanwendungen [Quelle: Statistik-BW 2008b, Statistik-BW 2009, StadtMannheim 2009].....	49
Tabelle 3.2 Datenerhebung im Rahmen der Interviews in der Branchengruppe Nahrungsmittel – Herstellung .....	50
Tabelle 3.3 Datenerhebung im Rahmen der Interviews in der Branchengruppe Nahrungsmittel – Verteilung / Lagerung.....	52
Tabelle 3.4 Datenerhebung im Rahmen der Interviews in der Branchengruppe.....	55
Tabelle 3.5 Datenerhebung im Rahmen der Interviews in der Branchengruppe Klimatisierung.....	56
Tabelle 3.6 Technische Annahmen im Bereich Nahrungsmittel – Herstellung.....	61
Tabelle 3.7 Leistungs- und Kühlungskennzahlen für Kühllager .....	62
Tabelle 3.8 Leistungs- und Kühlungskennzahlen für den Lebensmittel-EH [Quelle: Rhiemeier et al. 2008] ...	62
Tabelle 3.9 Leistungskennzahlen für Kühlmöbel in Supermärkten [Quelle: Rhiemeier et al. 2008].....	63
Tabelle 3.10 Technische Annahmen im Bereich Nahrungsmittel – Verteilung / Lagerung Teil 1 .....	63
Tabelle 3.11 Zahl der Geschäfte des Lebensmittel-EH nach Ladenformaten .....	64
Tabelle 3.12 Technische Annahmen im Bereich Nahrungsmittel – Verteilung / Lagerung Teil 2 [Quelle: Steimle et al. 2002].....	65
Tabelle 3.13 Technische Annahmen im Bereich Sonstige [Quelle: Rhiemeier et al. 2008] .....	66
Tabelle 3.14 Gebäude- und Leistungskennzahlen im Bereich Klimatisierung – Teil 1.....	67
Tabelle 3.15 Gebäude- und Leistungskennzahlen im Bereich Klimatisierung – Teil.....	67
Tabelle 3.16 Gebäude- und Leistungskennzahlen aus der Literatur für den Bereich Klimatisierung [in Anlehnung an Gertec 2008, Steimle et al. 2002].....	68
Tabelle 3.17 Technische Annahmen im Bereich Klimatisierung .....	69
Tabelle 3.18 Kälteanlagenleistung der Gruppe Gewerbliche Klimatisierung .....	83
Tabelle 3.19 Kälteanlagenleistung der Gruppe Industrielle Klimatisierung .....	84
Tabelle 3.20 Kälteanlagenleistung der Gruppe Gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen im Lebensmittel-EH	84
Tabelle 3.21 Kälteanlagenleistung der Gruppe Gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen im Kühlhäusern.....	85
Tabelle 3.22 Kälteanlagenleistung der Gruppe Prozesskälte in Industrieranwendungen.....	85
Tabelle 3.23 Kälteanlagenleistung der Gruppe Klein- und Kleinstanlagen.....	86
Tabelle 3.24 Abschätzung der Verlagerungsdauern nach Branchen .....	88
Tabelle 3.25 Realisierbares Potenzial nach Lastprofilgruppen.....	89
Tabelle 3.26 Zeitunabhängige, maximale Lastmanagementpotenziale der Kälteerzeugung nach Branchen ...	90

Tabelle 4.1 Einflussfaktoren für das Lastmanagement bei Kälteanlagen nach Lastprofilgruppen.....98  
Tabelle 4.2 Bewertung der Implementierungsmöglichkeiten von Lastmanagement nach Branchen.....105

## Abkürzungen

BVL	Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit
bzw.	beziehungsweise
COP	Coefficient of Performance (Leistungsfaktor)
d. h.	dass heisst
DKV	Deutscher Kältetechnischer Verband e.V.
€	Euro
GLT	Gebäudeleittechnik
°C	Grad Celsius
GWh	Gigawattstunde
h	Stunde
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung
IHK	Industrie- und Handelskammer
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
k.A.	keine Angabe
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
kW	Kilowatt
kW <sub>el,inst</sub>	installierte elektrische Leistung in Kilowatt
kW <sub>el,max</sub>	maximale elektrische Leistung in Kilowatt
kW <sub>therm</sub>	Kälteleistung in Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
Lebensmittel-EH	Lebensmittel-Einzelhandel
m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
max.	maximal
MHD	Mindesthaltbarkeitsdatum
Mill.	Millionen
min	Minute
Mrd.	Milliarden
MW <sub>el</sub>	elektrische Leistung in Megawatt
NK	Normalkühlung
Nr.	Nummer
o. J.	ohne Jahr
o. N.	ohne Namen
%	Prozent
RLT	Raumluftechnische Anlage
t	Tonnen
Tier-LMHV	Tierische Lebensmittel-Hygieneverordnung
TK	Tiefkühlung
UBA	Umweltbundesamt
UDE	Universität Duisburg / Essen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.

VDKL	Verband Deutscher Kühlhäuser und Kühllogistikunternehmen e.V.
u. a.	unter anderem
$W_{el}$	elektrische Leistung in Watt
$W_{therm}$	Kälteleistung in Watt
z.B.	zum Beispiel

## 1. Einleitung

### 1.1. Ausgangslage und Problemstellung

In den letzten Jahren haben sich die Rahmenbedingungen für die Energieversorgung grundlegend geändert. Liberalisierte Energiemärkte und die Integration Erneuerbarer Energien führen zu einem neuen Energiemix. Diese Einbindung erfolgt sowohl auf zentraler als auch auf dezentraler Ebene. Die Vielzahl neuer Marktteilnehmer und die veränderten Strombeschaffungs- und -versorgungsmöglichkeiten sowie die zunehmend fluktuierenden Einspeisebedingungen erfordern eine bessere Kommunikation und eine effiziente Form des Ausgleichs von Stromangebot- und Nachfrage. Obwohl das Lastmanagement bereits seit vielen Jahren in der Stromversorgung eingesetzt wird, gibt es jedoch im Zuge der Entwicklung neuer Kommunikations- und Regelungstechnologien neue Ansätze. Bekannt ist das Lastmanagement durch die Nachtspeicherheizungen, welche die geringe Stromnachfrage in Schwachlastzeiten in der Nacht ausgeglichen haben. Mittels Informations- und Kommunikationstechnik sowie dezentralen Entscheidungsmechanismen kann eine intelligente Regelung von Verbrauchern stattfinden, die durch bidirektionale Austausch von Informationen auch sensible Verbrauchseinrichtungen schnell steuern kann. Zudem führen Informationssysteme zu einer besseren Datenlage über den aktuellen Verbrauch gerade bei Kleinverbrauchern, was in der Folge eine effizientere Planbarkeit der Stromversorgung gewährleistet.

Bei der Identifikation von möglichen Verbrauchergruppen eignen sich diejenigen, die stets verfügbar sein sollen, aber deren Steuerung bereits intern automatisiert abläuft. Zu dieser Gruppe gehören thermische Speicher wie Heiz- und Kälteanlagen. Zu Kälteanlagen gibt es bisher kaum Informationen, die das Thema Lastmanagement betreffen. Es existieren zudem in Deutschland keine Untersuchungen, die sich regional und branchenübergreifend mit der Erfassung der Kälteerzeugung sowie den Kühlanforderungen und Hemmnissen bezüglich der Umsetzung von Lastmanagement auseinandersetzen. In den letzten Jahren wurden Potenzialanalysen zum Lastmanagement durchgeführt, die auch Kühleinrichtungen einbeziehen, jedoch bilden sie die Betriebsweise der Anlagen und Einschränkungen einer flexiblen Regelung nur sehr undetailliert ab. Im Rahmen der vorangegangenen Studien ist eine Bewertung der Möglichkeiten der Implementierung von Lastmanagement in der Kälteerzeugung nicht möglich.

### 1.2. Ziel der Studie

Das Ziel der Arbeit ist die detaillierte Beschreibung eines Lastverlagerungspotenzials in der Kälteerzeugung der Stadt Mannheim. Es soll untersucht werden, ob mittels IKT und dezentralen Entscheidungsmechanismen thermische Speicher in Form von Kälteanlagen für ein Lastmanagement genutzt werden können.

Dabei beantwortet die Studie die folgenden Fragen:

- Welche sind die relevanten Branchen für die Kälteerzeugung und wie sind deren Anforderungen an die Kälteversorgung?
- Wie erfolgt die Regelung der Kälteanlagen?
- Welche technischen, anwendungsspezifischen und wirtschaftlichen Faktoren haben einen Einfluss auf die Kälteerzeugung und deren Möglichkeiten zu einer Lastverlagerung?
- Wie hoch sind die theoretischen und die realisierbaren Möglichkeiten für eine Lastverlagerung in der Kälteerzeugung und wann stehen sie zur Verfügung?
- Mit welchen Verlagerungsdauern ist bei den unterschiedlichen Anwendungen zu rechnen?

- Welche Hemmnisse existieren bei der Umsetzung von Lastmanagement bei den Anlagenbetreibern?
- Welche Branchen eignen sich im Besonderen für eine Umsetzung von Lastmanagement im Kältebereich?

Mit dieser Arbeit soll ein Verständnis für den Zusammenhang zwischen technischen Ausgangsvoraussetzungen von thermischen Speichern, dem Betrieb der Anlagen und der Möglichkeiten eines Lastmanagements entwickelt werden. Die Bewertung erfolgt vorwiegend auf Basis technischer Kriterien. Die Studie soll dabei spezifisch Aussagen für den Standort Mannheim treffen.

### **1.3. Vorgehensweise**

Die Bearbeitung des Themas erfolgte dreigliedrig. Die Studie beinhaltet einen Theorieteil, die Empirie und abschließend die Auswertung. Der Theorieteil behandelt das Thema Kälteanlagen und deren Anwendungsbereiche auf Basis einer Literaturlauswertung. Es werden außerdem die derzeitigen Erfahrungen mit Lastmanagement in der Kälteerzeugung dargestellt. Der Hauptteil umfasst die Darstellung der empirischen Untersuchung, deren Bewertung von die Durchführung der Potenzialanalyse. Die empirische Untersuchung erfolgte durch persönliche, qualitative Interviews von Kälteanlagenbetreibern, -herstellern und Verbänden auf der Basis von Fragebögen sowie durch die Analyse von Kälteanlagen vor Ort. Die Ermittlung des Potenzials wurde in Form von zeitlich aufgelösten Modellrechnungen durchgeführt, welche Verbraucher bzw. Branchen durch eine Zusammenfassung in Lastprofilgruppen differenziert betrachten. Abschließend wird eine Auswertung der Ergebnisse in Bezug auf die Umsetzung des Lastmanagements und der Eignung der jeweiligen Verbrauchsgruppen durchgeführt.

Im Rahmen dieser Vorgehensweise erfolgte die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der empirischen Untersuchung sowie der Potenzialanalyse durch das Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu). Die Verantwortlichkeit der zeitlich aufgelösten Modellrechnungen lag bei der Universität Duisburg Essen (UDE). Die Schlussfolgerungen und die Bewertung der Eignung des Lastmanagements wurden wiederum durch das ifeu erarbeitet.

## 2. Kälteerzeugungsanlagen für ein dezentrales Lastmanagement

Lastmanagement im Sinne einer Verschiebung der Betriebsleistung in einen anderen Zeitpunkt ist grundsätzlich mit allen Verbrauchern technisch durchführbar. Einschränkungen in der Umsetzung ergeben sich durch die Notwendigkeit und die Sicherheit der Verfügbarkeit der Anwendung. So kann beispielsweise die Straßenbeleuchtung in Städten nicht auf einen vorherigen oder späteren Zeitpunkt verlagert werden, da zu dem Zeitpunkt, an dem keine oder nicht ausreichend Tageslicht vorhanden ist, die stete Beleuchtung Voraussetzung für einen sicheren Straßenverkehr ist. In der Industrie wird Strom etwa in Metallpressen für die Herstellung von Karosserieteilen der Automobilindustrie oder die Produktion anderer Güter eingesetzt. Hier besteht die Anforderung in der Produktion einer Menge von Gütern in einem festgelegten Zeitraum unter Beachtung einer eingeschränkten Flexibilität von Betriebszeiten und Herstellungsprozessen. Das Abschalten der Anlage bedeutet eine direkte Unterbrechung der gesamten Produktion.

Die Erzeugung von Kälte durch den Betrieb von Kältemaschinen hat in diesem Zusammenhang keinen unmittelbaren Einfluss auf die Bereitstellung der gewünschten Kühlleistung. Der Umstand ist zurückzuführen auf das Vorhandensein thermischer Kapazitäten sowie deren Energiespeicherfähigkeit innerhalb des Systems und wird mit dem gleichen Ansatz auch für Heizungsanlagen angewendet. Ein Haushaltskühlschrank erfüllt zu jeder Zeit die Kühlanforderungen, indem er den Kühlschrankinhalt in einem festgelegten Temperaturbereich hält, obwohl die Kältemaschine nicht durchgängig eingeschaltet ist. Diese Form der anforderungsgerechten Deckung des Kühlbedarfes mit der Möglichkeit einer zeitlich begrenzten Unterbrechung oder Reduzierung der Betriebsleistung der Kältemaschine ist neben dem Haushaltskühlschrank auch für andere gewerbliche oder industrielle Kühlanwendungen denkbar.

Mit der Fokussierung auf Kühlung wird diesem Kapitel ein Überblick über bestehende Untersuchungen und Erfahrungen über Lastmanagement mit thermischen Speichern gegeben. Ein wichtiger Beitrag dieses Kapitels ist die anschließende Einordnung, Systematisierung und Charakterisierung der unterschiedlichen Kälteanwendungen. Kälteanlagen werden für unterschiedliche Zwecke und Branchen genutzt, wobei Kühlbedarfe und Auslegungen in vielen Bereichen anhand festzulegender Kriterien überschlagen und standardisiert werden können. Aktuelle Entwicklungen der Branchen komplettieren die Betrachtungen zu den Anwendungsbereichen der Kälteerzeugung. Anschließend widmet sich das Kapitel den technischen Grundprinzipien der Kälteerzeugung sowie dem Aufbau von Kälteanlagen, also dem Gesamtsystem der Kälteerzeugung. Regelung und Betriebsverhalten der Anlagen werden in der Darstellung gezielt berücksichtigt, um sowohl die Möglichkeiten der intelligenten Laststeuerung einbeziehen zu können als auch weitere Auswirkungen wie Änderungen des Wirkungsgrads auf Ökologie und Wirtschaftlichkeit darzustellen. Externe Kältespeicher bieten durch die Zwischenspeicherung von Kälte eine zusätzliche Möglichkeit der Lastverlagerung neben den eigentlichen Kühlsystemen und werden daher individuell untersucht.

### **2.1. Untersuchungen und Erfahrungen zum Lastmanagement mit thermischen Speichern**

Die Auseinandersetzung mit dem Thema Lastmanagement erfolgt gerade in den letzten zehn Jahren sowohl auf theoretischer als auch auf praktischer Ebene. Die Untersuchungen beziehen sich in der Regel auf theoretische Potenziale in Deutschland, die für unterschiedliche Branchen und Bereiche ermittelt werden, während sich die praktischen Erfahrungen dann hauptsächlich auf individuelle Projekte speziell in der Kälteversorgung beschränken. Erfahrungen in anderen Bereichen des Lastmanagements werden nicht in die Betrachtung einbezogen.

### **2.1.1. Theoretische Untersuchungen**

Grundlegende Betrachtungen zu Lastverlagerungspotenzialen wurden durch Stadler (2005), Nestle (2007) und Klobasa (2007) vorgenommen. Bei Stadler (2005) werden Energiespeicherpotenziale in Deutschland betrachtet. Neben elektrischen Speichern wurden thermische Speicher, Druckluftspeicher und Lüftungsanlagen zur Lastverlagerung in die Untersuchung einbezogen. Im Rahmen der thermischen Speicherung wurde für Warmwasseranwendungen eine positive Regelleistung von etwa 750 MW<sub>el</sub> und eine negative Regelleistung von etwa 5.000 MW<sub>el</sub> ermittelt. Die Annahmen zur Berechnung des Lastverschiebepotenzials bei Kühl- und Gefriergeräte beziehen sich auf eine Studie des DKV zur Ermittlung des Energiebedarfs zur Kälteerzeugung aus dem Jahr 2002. Aus einer Vielzahl von Anwendungen werden die Bereiche Haushalte und Lebensmitteleinzelhandel (Lebensmittel-EH) herausgegriffen, und auf weitere erschließbare Potenziale in den anderen Bereichen verwiesen. Für die Haushalte wird eine mittlere Leistungsverfügbarkeit von 1.500 MW<sub>el</sub> für Kühlschränke und weitere 1.400 MW<sub>el</sub> für Gefriertruhen zur positiven Regelleistung und jeweils etwa die dreifache Kapazität zur negativen Regelleistung ermittelt. Verschiebedauern werden aufgrund breiter Temperatur-Hysteresen in Feldtests von drei bis zehn Stunden für Kühlschränke und 1,5 bis drei Stunden für Gefriertruhen angegeben. Im Lebensmittel-EH beträgt die maximale positive Regelleistung 1.100 MW<sub>el</sub> und die maximale negative Regelleistung etwa 2.800 MW<sub>el</sub>. Dabei wurden in dieser Analyse Geschäftszeiten oder andere Einflussparameter nicht berücksichtigt. Auch auf Realisierungspotenziale wurde in dieser Arbeit nicht eingegangen.

Nestle (2007) verweist auf die Beschränkung der Verlagerbarkeit von Lasten ohne Eingriffe in den Nutzungszweck der Anwendung. Nach seiner Betrachtung gibt es nur wenige Nutzungskonflikte beim Lastmanagement von Kühlgeräten sowie Klimaanlage, sowie ein bestimmter Temperaturbereich eingehalten wird. Das Verlagerungspotenzial lässt sich durch die drei Kenngrößen installierte Leistung, durchschnittliche bzw. genutzte Leistung und Zeitdauer angeben. Die Bewertung bezieht sich auf unterschiedliche Haushaltsgeräte wie Nachtspeicherheizungen, Warmwasserversorgung, Wärmepumpen, Kühlmöbel und Haushaltsgeräte wie Waschmaschinen sowie Kühlmöbel in Lebensmittelmärkten. Aus Angaben von Stadler (2005) und des Forschungsnetzwerks Energie und Kommunikation kommt er zu einer installierten Leistung von 6.700 MW<sub>el</sub> bzw. 4.900 MW<sub>el</sub> für Kühlschränke und Gefriergeräten sowie einer durchschnittlichen Leistung von 1.500 MW<sub>el</sub> bzw. 1.400 MW<sub>el</sub>. Die Verschiebedauer beträgt nach seinen Angaben für Kühlschränke zehn bis etwa 19 Stunden und liegt für Gefriergeräte bei vier bis etwa sieben Stunden. Kühlmöbel in Lebensmittelgeschäften haben eine installierte Leistung von insgesamt 3.800 MW<sub>el</sub> und bei einer Verschiebedauer von zwei bis vier Stunden eine durchschnittliche Leistung von 1.100 MW<sub>el</sub>. Weitere Hinweise zum Lastmanagement und deren Umsetzung lassen sich nicht finden.

Klobasa (2007) analysiert für den Standort Deutschland industrielle Verbraucher und deren verlagerbare Prozesse sowie Querschnittstechnologien, zu denen neben Druckluft auch die Klimatisierung und Kühl- und Gefrieranwendungen gehören. Für den Bereich Kühl- und Gefrieranwendungen bezieht auch er sich auf Angaben der DKV-Studie, im Bereich Klimatisierung findet eine Befragung von 2.000 Unternehmen statt. Aus der Untersuchung wird auf eine maximale Leistungsverlagerung bei Kühl- und Gefrieranwendungen, zu denen der Bereich Lebensmittel, Kühlhäuser und sonstige gehört, von 1.200 MW<sub>el</sub> mit einer Verlagerungsdauer von ein bis zwei Stunden und bei der Klimatisierung, die Bürogebäude, Einzelhandel, Hotels und Gastronomie umfasst, von 5.300 MW<sub>el</sub> mit einer Verlagerungsdauer von einer Stunde. Im Haushaltsbereich liegt die maximale verlagerbare Leistung mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,33, d.h. durchschnittlich beträgt die Laufzeit des Verdichters ein Drittel der Betriebszeit der Kühleinrichtung, bei 620 MW<sub>el</sub> für Kühlschränke und 600 MW<sub>el</sub> für Gefriertruhen. Die maximale Verlagerungsdauer beträgt eine Stunde.

Nach Franz et al. (2006), der Potenzialabschätzungen für unterschiedliche Industriebereiche und Haushaltsanwendungen vornimmt, können in Deutschland lediglich 194 MW<sub>el</sub> bei Kühlgeräten und 358 MW<sub>el</sub> bei Gefriergeräten um maximal eine Stunde verschieben. Kühlanwendungen in der

Nahrungsmittelindustrie haben ein Verlagerungspotenzial von 325 MW<sub>el</sub> der Lebensmittel-EH von 400 MW<sub>el</sub>. Weitere Studien wie Auer et al. (2005) und Kamphuis et al. (2004) gehen von einem nicht quantifizierten, hohen Potenzial thermischer Speicher hinsichtlich einer zeitlichen Lastverschiebung aus.

Aus diesen verschiedenen Untersuchungen geht hervor, dass Annahmen zur Bewertung der Potenziale grundsätzlich verschieden sind, obwohl häufig von vergleichbaren Zahlen der Betriebsstätten ausgegangen wird. Daraus resultieren extreme Abweichung in der Potenzialbestimmung. Weiterhin basieren alle Studien auf Zahlen für Deutschland. Es gibt keine Studien auf lokaler Ebene, die branchenübergreifend und ausgehend von Einzeluntersuchungen Lastpotenziale betrachtet. Die Untersuchungen, die bezüglich Lastmanagement existieren, setzen sich nicht gezielt mit Hemmnissen und deren quantitativen Einfluss auf das realisierbare Potenzial auseinander. Es gibt keine Informationen bezüglich Restriktionen von Lastmanagement aufgrund von Betriebsanforderungen und -risiken in den jeweiligen Branchen.

### **2.1.2. Praktische Erfahrungen**

Während bei industriellen Verbrauchern über Rundsteuerungen schon lange Lastmanagement etabliert ist, gibt es erst seit der Mitte der 1990er Jahre Versuche im Bereich Lastmanagement mit kleinen Anwendern wie Haushalten. Dabei wurde ein variabler Tarif eingeführt, auf dessen Grundlage der Einsatz von Verbrauchseinrichtungen mit dem Ziel erfolgte, durch Spitzenlastreduktion Stromkosten zu sparen. Eines der bekanntesten Projekte war die Eckernförder Stromampel. Ergebnis dieser Untersuchungen war die Erkenntnis, das sich der Verbrauch auch im Kleinkundenbereich durch zeitlich variable Tarife steuern lässt [Klobasa 2007]. Weitere Projekte in den folgenden Jahren wie EDISON oder CRISP zielten auf zentrale Entscheidungsmechanismen sowie Handelsaktivitäten der beteiligten Stromkunden am Strommarkt [Nestle 2007]. Erste Erfahrungen mit dem Smart Metering zeigen in Deutschland ein durchaus verhaltenes Interesse der Stromversorger mit der Echtzeit-Datenerfassung der Verbrauchsprofile [Franz et al. 2006].

Hinsichtlich der praktischen Integration von Lastmanagement in der Kälteerzeugung gibt es außer im Bereich großer Kühllhäuser praktisch keine Erfahrung. In Deutschland nehmen seit Jahren große Kühllhäuser am Lastmanagement durch Rundsteuerung teil. Jedoch ist das Verlagerungspotenzial zum Zeitpunkt der Ansteuerung sehr gering, da diese bereits kostenoptimiert, d.h. optimiert am Strombörsenpreis, Strom beziehen und dadurch in Zeiträumen mit Engpässen und damit verbundenen hohen Strompreisen der Bezug bereits stark reduziert ist. In Neuseeland gab es im Jahr 2000 ein Projekt zum Einsatz von Kühllhäusern in ein Lastmanagement, um Schwachlastzeiten auszugleichen. In Verbindung mit Hochpreistarifen tagsüber und Niedrigpreistarifen in der Nacht konnte eine Lastverlagerung erfolgreich durchgeführt werden. Dafür mussten jedoch gerade die Tiefkühlkammer weit unter ihre Mindesttemperatur gekühlt werden [Stadler 2005]. In Zusammenarbeit mit der Transferstelle Bingen gibt es ein Zentrallager, welches die Einbindung von Lastmanagement in die Minutenreserve des Regelenergiemarktes plant. Dabei muss unter anderem die Bedingung erfüllt sein, dass die Kälteanlage vier Stunden um die ausgeschriebene Leistung verlagerbar ist. Nach Aussagen der Transferstelle Bingen ist diese Anforderung gewährleistet [Pohl 2009]. In Cuxhaven läuft im Rahmen des Projektes eTelligence ein vergleichbarer Versuch. Beide Projekte haben bisher noch zu keinen praktischen Erfahrungen in der Anwendung eines Gesamtsystems geführt.

Das Projekt Smart A (Smart Appliances) untersucht die Verlagerbarkeit von Haushaltsanwendungen im Zusammenhang mit der Durchführung von Fallstudien. Neben den theoretischen Betrachtungen zum Verlagerungspotenzial beispielsweise von Haushaltskühlschränken gibt es jedoch auch in diesem Projekt zu diesem Zeitpunkt noch keine praktischen Erkenntnisse.

## **2.2. Anwendungsbereiche der Kälteerzeugung**

Die Nutzung von Kälte ist sehr vielfältig und hat in vielen Bereichen des täglichen Lebens eine tragende Bedeutung. Im gesamten Wertschöpfungsprozess von Nahrungsmitteln garantiert die Kälteversorgung die Haltbarkeit und damit die einfache und komfortable Verarbeitung und Erreichbarkeit von Lebensmitteln. In Gebäuden ermöglicht eine gekühlte Lüftung auch bei hohen Außentemperaturen eine angenehm temperierte Arbeitsatmosphäre. In Deutschland wurde im Jahr 1999 mit 66.000 GWh etwa 14 % des gesamten Strombedarfes für die Kälteerzeugung benötigt [Steimle et al. 2002]. Die Kühlanforderungen an die Kälteanlagen sind jeweils abhängig von der Kälteanwendung. Die verwendeten Technologien und Anlagendimensionierungen richten sich wiederum nach den Kühlanforderungen. Zu einer Bewertung der Eignung von Kälteanlagen zum Lastmanagement scheint eine Strukturierung, Eingrenzung und Beschreibung der relevanten Kälteanwendungen daher sinnvoll. Neben den vorangegangenen technischen Grundlagen werden in diesem Abschnitt Anforderungen von Branchen für den Betrieb der zu untersuchenden Kälteanlagen erörtert. Zahlen zu den in Deutschland befindlichen Betriebsstätten und deren Stromverbrauch sowie aktuelle Entwicklungen zeigen die Bedeutung der Branchen hinsichtlich eines möglichen Lastmanagements.

### **2.2.1. Strukturierung der Bereiche**

Die Kälteerzeugung kann nach unterschiedlichen Aspekten gegliedert werden. Es können die verschiedenen Nutzungszwecke der Kälteerzeugung abgebildet werden:

- Produktlagerung (Normalkühlung, Tiefkühlung)
- Prozesskühlung (Kühlung von Herstellungsprozessen)
- Klimatisierung (Komfortkühlung, Produktionskühlung)

Die Produktlagerung umfasst die gekühlte Aufbewahrung sensibler Produkte wie Lebensmittel oder pharmazeutische Erzeugnisse, um deren Haltbarkeit in einem bestimmten zeitlichen Rahmen zu gewährleisten. Der Grund für die Produktlagerung ist die zeitliche Verzögerung zwischen Herstellung und Nutzung sowie die Aufbewahrung innerhalb verschiedener Wertschöpfungsstufen innerhalb der Kühlkette. Je nach Bedarf und Anwendung unterteilt man bei einem Kühltemperaturbereich in Normalkühlung (NK) über 0 °C und in Tiefkühlung (TK) unter 0 °C. Nach festgelegten Kühlanforderungen gelten beispielsweise Mindesthaltbarkeitsdaten (MHD) für die Lagerung.

Die Prozesskühlung ist Grundlage für die Herstellung unterschiedlicher Produkte. Durch die Kühlung können chemische oder biologische Prozesse realisiert werden. Ein Beispiel ist die Gärung zur Herstellung von Bier. Die entstehende Wärme muss abgeführt und die Würze in festgelegter Temperatur gehalten werden, damit der Gärungsprozess kontrolliert ablaufen kann. Klimatisierung bedeutet eine Raumluftkonditionierung in Gebäuden. Diese kann sowohl für das menschliche Wohlbefinden (Komfortkühlung) als auch für die Kühlung von Produktionsanlagen (Produktionskühlung) dienen.

Neben der Kategorisierung nach Nutzungszwecken kann die Kälteerzeugung nach Branchen unterteilt werden. Dabei lassen sich vier hauptsächliche Kategorien bilden [Steimle et al. 2002]:

- Nahrungsmittel (Herstellung, Transport, Verteilung / Lagerung, Haushalt)
- Industrie (Chemie, etc.)
- Sonstiges (Eissport, Medizin, Wehrtechnik, Pflanzen)
- Klimatisierung (Büro, Handel / Gewerbe, Industrie, etc.)

Die Branchengruppe Nahrungsmittel umfasst die relevanten Wertschöpfungsstufen der Nahrungsmittelherstellung und Nutzung. Die jeweiligen Ebenen können weiter unterteilt werden. In der Industrie gibt es eine überschaubare Zahl von Anwendungen, die Kälte zur Herstellung von Produkten benötigt. Dazu gehören z.B. die Chemie und Pharmazie. Auch der bereits als Zweck definierte Begriff Klimatisierung kann wiederum aufgegriffen und nach den Branchen Verwaltung, Büro, Gewerbe, Industrie, Hotel und Gastronomie untergliedert werden. Verbleibende Branchen wie Eissport, Medizin und Wehrtechnik werden unter Sonstiges zusammengefasst.

Diese Grundstruktur findet bereits im DKV-Bericht zur Kälteerzeugung in Deutschland Anwendung und soll als gemischte Darstellung gegliedert nach Nutzungszweck und Branchen in dieser Studie genutzt werden. Abbildung 2.1 zeigt die Gliederung der Kälteerzeugung.

Produktlagerung / Prozesskühlung				Klimatisierung
Nahrungsmittel		Industrie	Sonstiges	
Herstellung	Schlachthof	Chemie Pharmazie Petrochemie Raffinerie Bau Bergbau Labor TK-Technik	Medizin Eissportstätten Wehrtechnik Pflanzen	Verwaltung Büro Handel / Gewerbe Industrie Krankenhaus Sportstätte Hotel Gaststätte Wohnung
	Fleischverarbeitung			
	Fischverarbeitung			
	Transport			
	Verteilung / Lagerung			
Obst und Gemüse		Kühlhaus		
Teigwaren, Ölsamen und Fette		Lebensmittel-EH		
Bäckerei		Tankstelle		
Süßwaren		Kiosk		
Molkereiprodukte		Sonst. Filialen		
Speiseeis		Getränke-EH		
Molkerei		Hotel / Gaststätte		
Fruchtsaftherstellung		Kantine		
Brauerei		Eisdiele		
		Apotheke		
	Haushalt			

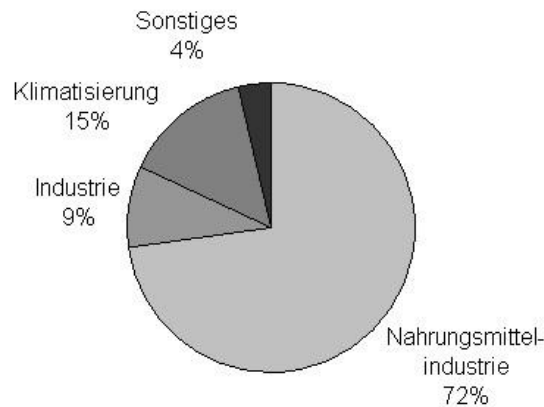
**Abbildung 2.1 Struktur der Kälteerzeugung nach Branchen [in Anlehnung an Steimle et al. 2002]**

Einige Branchen sind aufgrund des Zugangs zu Daten schwer zu untersuchen. Dazu zählen Bau, Bergbau, Labor, Tiefkühl-Technik (TK-Technik), Medizin und Wehrtechnik. In der Bauindustrie wird Kälte für Bodengefrierung und Betonkühlung eingesetzt. Der Bergbau benötigt Kälte zur Ableitung von Wärme Untertage. Forschungseinrichtungen und Labore verwenden Kühlschränke zur Aufbewahrung sensibler Präparate. In der Tiefkühltechnik werden Kryopumpen beispielsweise zu medizinischen Zwecken eingesetzt oder Kälte in Teilchenbeschleunigern erzeugt. Kühlanwendungen in der Medizin umfassen Kühlzellen für beispielsweise Blutkonserven oder in pathologischen Abteilungen. In Wehreinrichtungen werden Kälteanlagen sowohl mobil als auch stationär für Küchen und andere Gerätetechnik eingesetzt. Diese Bereiche sind spezielle Nischenanwendungen mit einer geringen aggregierten Leistung und daher wenig relevant. Sie werden sie aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Ein weiteres Ausschlusskriterium aus dem relevanten Bereich von Anwendungen ist eine sehr niedrige Durchdringungsrate, d.h. ein marginaler Anteil an Betriebsstätten innerhalb der Branchen, die über Kälteanlagen verfügen. Dieses Kriterium trifft sowohl auf die auf Wohnungen als auch auf Sportstätten aus der Branchengruppe Klimatisierung zu [Lenneke 2009]. Die Ebene Transport in der Nahrungsmittelindustrie umfasst lediglich mobile Anlagen und ist daher nicht Gegenstand der Untersuchung.

### **2.2.2. Bedeutung der Branchen für den Kältebedarf in Deutschland**

Der Bereich Nahrungsmittel erreicht bei der Kälteerzeugung mit 72 % den größten Anteil am Stromverbrauch in Deutschland (Abbildung 2.2). Mit 15 % bzw. 9 % weniger bedeutend folgen die

Klimatisierung und die Industrie. Die sonstigen Branchen spielen mit 4 % eine untergeordnete Bedeutung.



**Abbildung 2.2 Anteile der Kälteerzeugung der unterschiedlichen Branchengruppen in Deutschland nach dem Stromverbrauch [Quelle: Steimle et al. 2002]**

Für eine Abschätzung der Relevanz der Branchen zu einem möglichen Beitrag zum Lastmanagement dient die Differenzierung des Stromverbrauchs der Branchengruppen. Die Daten aus der Tabelle 2.1 basieren auf dem Untersuchungsbericht des DVK im Jahr 2002 für die Kälteerzeugung in Deutschland. Ausgehend von durchschnittlichen Leistungsdaten der Kälteanlagen bzw. durchschnittlichen Kältebedürfnissen bei nicht standardisierbaren Kälteanwendungen wird der Stromverbrauch über die Anzahl der Anlagen abgebildet. Aus diesen Angaben kann im Einzelfall eine Rückrechnung auf die installierte Leistung der Kälteanlagen in der Branche gemacht werden.

Die industriellen Nahrungsmittelhersteller benötigen trotz einer Zahl von nur 265 Unternehmen über 25 % des Stromes für die Kälteerzeugung. Mit über 28 % haben die Haushalte den höchsten Strombedarf für Kälte, werden aber durch eine Gesamtzahl von 36,5 Mill. Haushalten repräsentiert. Zwei weitere Branchen mit einem hohen Strombedarf für Kälte von jeweils über sieben Prozent sind die Gasverflüssigung der Chemieindustrie sowie der Lebensmitteleinzelhandel. In der Klimatisierung gibt es eine hohe gesamte installierte Leistung bei einem vergleichbar geringen Gesamtstrombedarf. Sie ist auf die geringe Zahl der Laststunden in der Kühlperiode zurückzuführen.

**Tabelle 2.1** Anteile der Branchen am Stromverbrauch durch Kälteerzeugung im Jahr 1999  
 [Quelle: Steimle et al. 20002]

Branchen- gruppe	Branche	Anzahl Unternehmen, Fläche, etc.	Installierte Antriebs- leistung in MW	Strom- verbrauch in GWh	relativer Anteil in %	
<b>Nahrungsmittel</b> 48.050 GWh, 72,68 %	Nahrungsmittel- industrie	265	2.890,94	17.132	25,91	
	Nahrungsmittelherstellung 19.616 GWh, 29,67 %	- Obst	40	64,20		
		- Gemüse	50	918,00		
		- Molkereiprodukte	40	497,06		
		- Fisch	30	120,80		
		- Fleisch	50	353,42		
		- Backwaren	55	272,81		
		- Sonstige	k.A.	664,65		
		Schlachthof	k.A.	k.A.	98	0,15
	Fleischerei	19.868	k.A.	874	1,32	
	Bäckerei	22.256	148,89	435	0,66	
	Brauerei	k.A.	k.A.	454	0,69	
	Fruchtsaferhersteller	k.A.	k.A.	23	0,03	
	Molkerei	k.A.	k.A.	600	0,91	
	Transport			0	0,00	
	Lagerung / Verteilung 9.804 GWh, 14,83 %	Kühlhaus	221	117,09	704	1,06
		Lebensmittel-EH	62.147	1.094,70	6.294	9,52
		Tankstelle	17.066	68,26	498	0,75
		Kiosk	18.631	51,35	198	0,30
Getränke-EH		190.800	82,04	351	0,53	
Hotel / Gaststätte		1,55 Mill. Betten / 79.468 Gastst.	k.A.	1.360	2,06	
Kantine		9.600	46,08	248	0,38	
Eisdiele		5.516	45,56	118	0,18	
Apotheke		21.590	5,61	33	0,05	
Haushalt		36,5 Mill.	4.723,34	18.630	28,18	
<b>Industrie</b> 6.097 GWh, 9,22 %	Chemie 5.442 GWh, 8,23 %	Gasverflüssigung	20	588,9	5.006	7,57
	Reaktionskühlung	k.A.	83,7	404	0,61	
	Trockeneis- herstellung	k.A.	k.A.	32	0,05	
	Bau	k.A.	k.A.	1	0,00	
	Bergbau	33	60	480	0,73	
Labor	1320	1,39	5	0,01		
TK-Technik	k.A.	k.A.	169	0,26		
<b>Sonstige</b> 2.329 GWh, 3,52 %	Medizin	k.A.	k.A.	1.078	1,63	
	Pflanzen	34.251	110,68	749	1,13	
	- Einzelhandel	33.651	104,08			
	- Großhandel	600	6,60			
	Eissportstätten	179	76,78	319	0,48	
Wehrtechnik	k.A.	k.A.	183	0,28		
<b>Klimatisierung</b> 9.640 GWh, 14,58 %	Büro / Verwaltung	96 Mill. m <sup>2</sup>	3.158,46	1.450	2,19	
	Handel / Gewerbe	78 Mill. m <sup>2</sup>	3.683,94	2.240	3,39	
	Industrie	62 Mill. m <sup>2</sup>	3.648,05	5.090	7,70	
	Hotel	47 Mill. m <sup>2</sup>	2.255,39	570	0,86	
	Gaststätten	13 Mill. m <sup>2</sup>	334,94	80	0,12	
	Sportstätten	25 Mill. m <sup>2</sup>	628,70	140	0,21	
Wohnung	11 Mill. m <sup>2</sup>	156,00	70	0,11		
<b>GESAMT</b>				<b>66.116</b>	<b>100</b>	

### 2.2.3. Aktuelle Entwicklungen des Kältebedarfs

In der Klimatisierung zeichnet sich eine Zunahme der Kälteerzeugung ab. Diese Tendenz kann beispielsweise an den jährlichen Installationszahlen von Klimaanlage deutlich gemacht werden. Durch höhere Anteile an Glasfassaden bei Gebäuden und höhere Komfortansprüche werden weltweit

jährlich 50 Mill. und allein in Deutschland jährlich 100.000 neue Klimaanlage installiert [BINE 2006]. Im Jahr 1999 war die Zahl von Rechenzentren, die oft als Bestandteil von Gebäuden zur Büroklimatisierung gezählt werden, noch weit unter 5.000. Im Jahr 2007 gab es bereits etwa 50.000 Rechenzentren [Arnemann 2009 in Anlehnung an Fichter 2007]. Die Anzahl der Shopping-Center in der Gewerbeklimatisierung ist von 279 im Jahr 2000 auf 384 im Jahr 2007 gestiegen [EHI 2007]. Im Jahr 2007 wurden 15 weitere Shopping-Center eröffnet, 64 befanden sich in der Planung.

In der Nahrungsmittelherstellung werden die Entwicklung der Unternehmens- und Beschäftigtenzahlen herangezogen. Die in Tabelle 2.2 gegenübergestellten Zahlen lassen jedoch keine eindeutige Aussage zu. Allgemein kann bei der Anzahl der Unternehmen lediglich ein leichter Rückgang verzeichnet werden. Diese Tatsache lässt aber wenig Aussagen über die Produktion bzw. der Entwicklung der Kühleinrichtungen zu.

**Tabelle 2.2 Entwicklung der Unternehmens- und Beschäftigtenzahlen in der Nahrungsmittelherstellung [Quelle: Destatis 2004, Destatis 2009]**

Branche	2002		2007	
	Anzahl	Beschäftigte	Anzahl	Beschäftigte
Schlachthof	208	24.781	219	27.171
Fleischverarbeitung	923	83.944	963	89.255
Fischverarbeitung	67	9.912	60	7.834
Obst- und Gemüseverarbeitung	149	23.003	142	21.328
Fruchtsaftherstellung	77	7.074	68	6.473
Herstellung pflanzl. und tierischer Öle	27	8.924	26	5.592
Molkereiprodukte	155	33.369	145	34.306
Speiseeisherstellung	9	4.891	11	3.596
Backwaren	2.123	199.576	2.234	230.192
Dauerbackwaren	81	20.720	77	17.492
Süßwaren	135	33.347	127	32.545
Teigwaren	30	2.578	30	2.774
Bier	318	35.984	273	30.953

Betrachtet man die Absatzzahlen von TK-Kost, kann man einen starken Anstieg erkennen. Zwischen dem Jahr 1999 und 2007 erhöhte sich der Absatz in Deutschland um fast 40 % von 2,1 Mill. Tonnen auf 2,9 Mill. Tonnen [VDKL 2008]. Die Zahlen umfassen die Produkte der Nahrungsmittelherstellung außer Getränke und Speiseeis. Diese Aussage kann durch die Kapazitätsentwicklung deutscher Kühllhäuser gestützt werden. Gab es im Jahr 1999 eine gesamte gewerbliche Kühllhauskapazität von 5,4 Mill. m<sup>3</sup> in 98 Kühllhäusern innerhalb des VDKL und 4,2 Mill. m<sup>3</sup> in weiteren Kühllhäusern außerhalb des VDKL, so hat sich diese Kapazität im Jahr 2007 um etwa 50 % auf 12,0 Mill. m<sup>3</sup> in 227 Kühllhäusern im VDKL und weitere 3,0 Mill. m<sup>3</sup> in Kühllhäusern außerhalb des VDKL erhöht. Damit kann bestätigt werden, dass das Kühlgutvolumen gestiegen ist. Es liegt die Annahme nahe, dass dieser Anstieg, da sich Kühllhäuser als Verteiler innerhalb der Kühlkette befinden, auch Rückwirkungen auf die Kühlkapazitäten der Nahrungsmittelherstellung hat. Es kann also für beide Bereiche eine steigende Tendenz beobachtet werden.

Auch der Lebensmittel-EH ist im Wandel begriffen. War im Jahr 2000 noch ein sehr hoher Anteil von Minimärkten vorhanden, reduziert sich deren Anteil stetig. Auf der anderen Seite nehmen große Ladenformate deutlich zu. Diese Entwicklung kann anhand der Tabelle 2.3 nachvollzogen werden.

**Tabelle 2.3 Entwicklung der Ladenformate im Lebensmittel-EH zwischen 2000 und 2007**  
[Quelle: EHI 2007]

Ladenformat	Anzahl der Betriebsstätten	
	2000	2007
Minimarkt	45.900	28.900
Discounter	12.970	8.170
Supermarkt	9.230	14.806
SB-Warenhaus	2.363	3.150
GESAMT	70.463	55.026

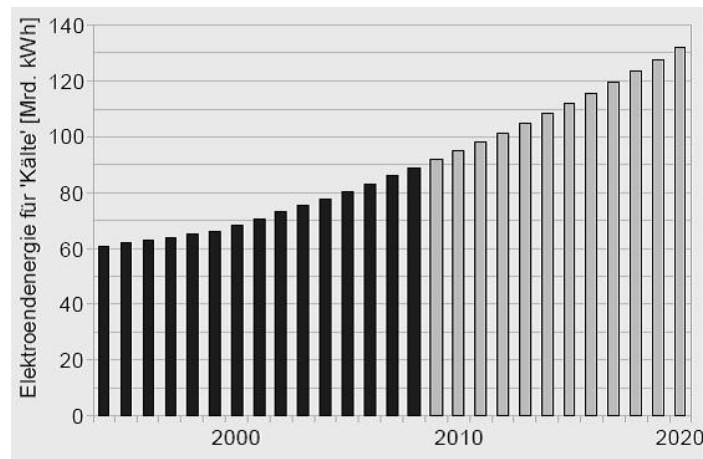
Für die Lagerung und Verteilung in der Branchengruppe Nahrungsmittel sollen Betriebszahlen weiterer Kleinverbraucher als Richtung für die Entwicklung des Strombedarfes für die Kälteerzeugung dienen. In Tabelle 2.4 kann man sehr gegensätzliche Entwicklungen sehen. Während die Zahl der Tankstellen leicht abnimmt, ist jedoch gerade bei den Kiosken ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen. Die Zahl der Betriebsstätten im Getränke-EH ist aufgrund des enormen Unterschiedes zwischen den Zahlen nicht plausibel.

**Tabelle 2.4 Entwicklung von Kleinverbrauchern im Bereich Lagerung / Verteilung der Nahrungsmittelindustrie zwischen 1999 und 2006** [Quelle: Steimle et al. 2002, EHI 2007]

Branche	DKV	EHI Retail Institute	
	1999	2000	2006
Tankstellen	17.066	16.404	15.036
Apotheken	21.590	21.592	21.551
Kiosk	18.631	22.190	47.530
Getränke-EH	190.800	-	13.050

Die Entwicklung in der Industrie kann anhand von Produktionsindizes aufgezeigt werden. Zwischen dem Jahr 2000 und dem Jahr 2007 erhöhte sich die Produktion in der chemischen Industrie um 20 %. Betrachtet man allein den Bereich der pharmazeutischen Erzeugnisse, ergibt sich sogar eine Steigerung der Produktion um 47,5 % im gleichen Zeitraum [VCI 2008]. Anhand dieser Zahlen und der Korrelation der Produktion zu den erforderlichen Produktionsprozessen kann auch in der Industrie auf einen Anstieg des Kältebedarfes geschlossen werden.

Diese steigende Tendenz der Kälteerzeugung kann über alle Branchen beobachtet werden. Abbildung 2.3 könnte die Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis zum Jahr 2020 darstellen. Demnach wird in den nächsten 10 Jahren mit einem Anstieg des Kälteenergiebedarfs um 100 % gerechnet [Probst 2009].



**Abbildung 2.3 Entwicklung des Endenergieverbrauchs zur Kälteerzeugung bis zum Jahr 2020 [Arnemann 2009 in Anlehnung an Probst 2009]**

Für eine Ermittlung aktueller, deutschlandweiter Stromverbrauchswerte müssen die in der DKV-Studie getroffenen Annahmen überarbeitet werden. Dennoch können im späteren Verlauf der Arbeit Annahmen zu Leistungswerten gerade gewerblicher Branchen vergleichend herangezogen werden

#### **2.2.4. Charakteristika der relevanten Anwendungen**

Je nach Kühlungsziel und Branche sind Kälteanlagen unterschiedlich ausgelegt. Die Betriebsführung der Anlagen variiert stark zwischen den Kühlanwendungen. Die Büroklimatechnik führt lediglich während der täglichen Arbeitszeiten den Wärmeeintrag aus der Umgebung ab und erzeugt ein angenehmes Raumklima. Dagegen muss in einem Schlachthof die Temperatur gerade geschlachteter Tiere für die Weiterverarbeitung und Lagerung abgesenkt werden. Für das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Kühlanwendung und den Anforderungen der zu untersuchenden Anlagen werden die relevanten Anwendungen und ihre Eigenschaften beschrieben.

#### **Nahrungsmittel**

Bei der Nahrungsmittelherstellung wird die Kälte sowohl für Herstellungsprozesse als auch für die Produktlagerung verwendet. In den unterschiedlichen Branchen gibt es eine Vielzahl von Herstellungsprozessen. Hierzu zählt beispielsweise die Frostung frischer Nahrungsmittel oder die Kühlung frisch gemolkener Milch oder geschlachtetem Vieh zur Vorbereitung für die Lagerung oder zur Weiterverarbeitung. Zudem wird die Kälte für biologische Reifeprozesse wie der Gärung verwendet. In der Brauerei wird beispielsweise die gesamte Kälte für Prozesse genutzt. Das gebräute Bier bedarf dabei keiner weiteren Kühlung. Der erwartungsgemäß größere Teil der Kältenutzung ist jedoch für die Produktlagerung notwendig, um entweder unverarbeitete Nahrungsmittel zur Weiterverarbeitung oder fertig hergestellte Nahrungsmittel bis zum Transport zu lagern. Die Nahrungsmittel werden je nach Bedarf im TK-Bereich oder im NK-Bereich gelagert. Die Tabelle 2.5 gibt einen Aufschluss über die Anteile von Tiefkühlung und Normalkühlung verschiedener Branchen der Nahrungsmittelherstellung. Die Tiefkühlung wird vorwiegend für eine längerfristige Lagerung von Lebensmitteln von über einer Woche eingesetzt. Auffallend ist der hohe Anteil an TK bei Molkereiprodukten. Das liegt an der Einbeziehung der industriellen Speiseeisherstellung in diese Branche. Jahreszeitliche Unterschiede im Kühlbedarf kann es aufgrund der Variabilität der Nahrungsmittelherstellung geben. So wird beispielsweise im Sommer mehr Bier gebraut und verkauft als im Winter.

**Tabelle 2.5 Verteilung der Temperaturbereiche der Produktlagerung in der Nahrungsmittelherstellung [Quelle: Steimle et al. 2002]**

Nahrungsmittelbranche	Verteilung
	Temperaturbereich NK / TK
Obst	70 / 30
Gemüse	50 / 50
Molkereiprodukte	40 / 60
Fisch	50 / 50
Fleisch	50 / 50
Backwaren	70 / 30

Aufgrund der Größe und des Produktionsumfangs der Betriebe ist zu erwarten, dass es sich bei den Kühlräumen um Kühllager bzw. Kühlzellen handelt. Die unterschiedlichen Anwendungen, Prozesstechnologien und Betriebsgrößen in der Nahrungsmittelherstellung führen zu einer individuellen Auslegung und Dimensionierung der Kälteanlagen.

Sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene gibt es Bestimmungen, die maximale Temperaturen bei der Verarbeitung und Lagerung von Nahrungsmitteln vorschreiben. Die grundlegende Verordnung ist die EG 853/2004 vom 29.04.2004. Sie enthält spezifische Hygienevorschriften für Lebensmittel tierischen Ursprungs. In Deutschland wurde sie mit der Tierischen Lebensmittel-Hygieneverordnung (Tier-LMHV) am 08.08.2007 umgesetzt. In der Tabelle 2.6 sind die wichtigen Temperaturbeschränkungen dargestellt. Ersichtlich wird, dass normalgekühlte Produkte bei maximal 0 bis +8 °C je nach Nahrungsmittel und tiefgekühlte Produkte mindestens bei –18 °C gekühlt werden müssen. Bei der Verarbeitung von frisch geschlachtetem Fleisch muss zudem darauf geachtet werden, dass es umgehend auf die notwendige Kerntemperatur gekühlt und die Temperatur konstant gehalten wird. Weitere tiefgefrorene Nahrungsmittel wie Gemüse werden auch bei etwa –18 °C gelagert. Eiskrem wird aufgrund der Erhaltung ihrer Konsistenz jedoch bei –23 °C gelagert.

**Tabelle 2.6 Maximal zulässige Temperaturen nach europäischer und deutscher Hygienevorschriften für Nahrungsmittel tierischen Ursprungs [Quelle: BMELV 2007]**

Nahrungsmittel		zulässige Temperatur
Huftiere	Fleisch	+7 °C
(Rind, Schwein, etc.)	Nebenprodukte	+3 °C
Geflügel, Hase	Fleisch	+4 °C
Wild	Großwild	+7 °C
	Kleinvild	+4 °C
Separatorenfleisch <sup>1)</sup>		+2 °C
Hackfleisch		+2 °C
Fleischzubereitungen		+4 °C
tiefgekühltes Fleisch		-18 °C
tierische Fette		+7 °C
Rohmilch		+6 bis +8 °C
Milch	für Milcherzeugnisse	+6 °C
Eier	ab dem 18. Tag	+5 bis +8 °C
Eiprodukte	kühlbedürftig	+4 °C
Fisch	frisch	+0 bis +1 °C
	tiefgekühlt	-18 °C <sup>2)</sup>

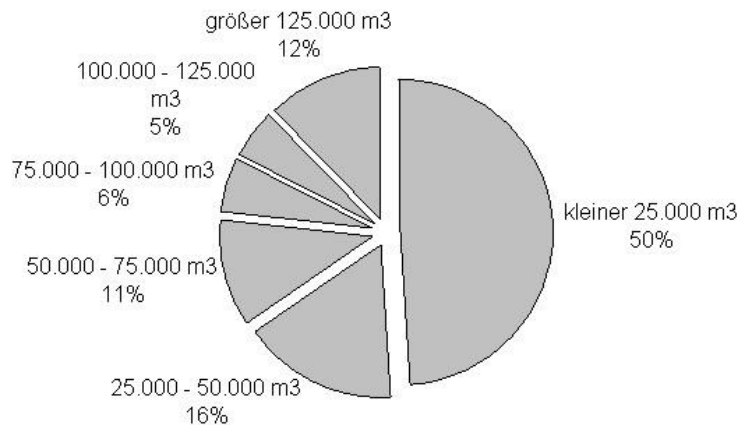
<sup>1)</sup> in einem weiteren Arbeitsschritt restliches von den Knochen abgetrenntes Fleisch

<sup>2)</sup> kurze Schwankung +3 °C zulässig

Gefrorenes Geflügel darf entgegen der Temperaturempfehlung für TK-Kost eine Maximaltemperatur von -12 °C haben [Cube et al. 1997]. Unter mikrobiologischen Aspekten ist eine Lagerung von Nahrungsmittel über -12 °C mit dem Wachstum von Bakterien, Hefen und Schimmelpilzen verbunden [Stadler 2005, Cube et al. 1997].

In der Nahrungsmittelverteilung und -lagerung wird die Kälte fast ausschließlich zur Produktlagerung verwendet. Es findet keine Weiterverarbeitung der Nahrungsmittel statt. Eine Ausnahme der Prozesskühlung bildet das Schockfrost in Kühllhäusern sowie die gewerbliche Speiseeisherstellung in Eisdielen. Die verschiedenen Branchen zeichnen sich durch ihre stark voneinander abweichende Betriebsgröße sowie durch einen differenzierten Bedarf von NK und TK aus.

Kühllhäuser werden von Großhändlern oder Kühl- und Logistikunternehmen, aber auch von Einzelhandelsketten zur Lagerung von Nahrungsmitteln verwendet, bevor sie im Einzelhandel an den Endkunden vertrieben werden. Sie können in Zentrallager und Verteillager eingeteilt werden und verfügen über getrennte TK- und NK-Bereiche. In den NK-Lagern befindet sich der Warenein- und -ausgang, der TK-Bereich liegt geschützt hinter dem NK-Lager. Die Be- und Entladung der Kühllhäuser erfolgt durch Just-In-Time-Planung und -Lieferung nachts. Tagsüber werden die NK-Lager wenig genutzt. Die je nach Jahreszeit unterschiedlichen durchschnittlichen Außentemperaturen beeinflussen den Wärmeeintrag in die Lagerhäuser. Die Größe von Kühllhäusern der im Verband Deutscher Kühllhäuser und Kühllogistikunternehmen e.V. (VDKL) beigetretenen Kühllogistikunternehmen ist in der Abbildung 2.4 dargestellt.



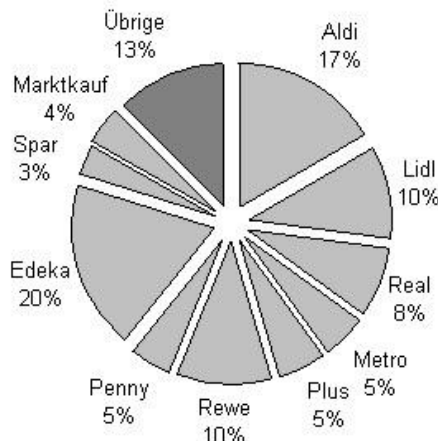
**Abbildung 2.4 Relative Verteilung der Kühlhauskapazitäten im Jahr 2007 [Quelle: VDKL 2008]**

Der Lebensmittel-Einzelhandel (Lebensmittel-EH) dient zur Verteilung von Nahrungsmitteln an der Endkunden. Die Kälte wird zur Lagerung und Frischhaltung von Lebensmitteln und zur Kühlung von Getränken benötigt. Gemäß einer UBA-Studie kann der Lebensmittel-EH in die vier Kategorien Lebensmittel-Selbstbedienungsläden (Minimarkt), Lebensmittel-Discountmarkt (Discounter), Supermärkte sowie Verbrauchermärkte und SB-Warenhäuser untergliedert werden [Rhiemeier et al 2008]. Wie in Tabelle 2.7 ersichtlich erfolgt diese Einteilung nach der Größe der Verkaufsfläche. Bezüglich der Kälteerzeugung können Verbrauchermärkte und SB-Warenhäuser zusammengefasst werden.

**Tabelle 2.7 Einordnung der Ladenformate im Lebensmittel-EH [Quelle: Rhiemeier et al. 2008]**

Ladenformat	Verkaufsfläche	lfd. Meter	
		Kühlmöbel NK	Kühlmöbel TK
Minimarkt	< 400 m²	-	-
Discounter	400 bis 800 m²	22,5 m	40 m
Supermarkt	800 bis 1500 m²	50 m	40 m
SB-Warenhaus	> 1500 m²	95 m	150 m

87 % der Läden des Lebensmittel-EH werden durch lediglich sechs Einzelhandelsketten betrieben. Darunter befinden sich die Edeka-Gruppe, die Metro-Gruppe, die Rewe-Gruppe, die Schwarz-Gruppe, die Aldi-Gruppe und die Tegelmann-Gruppe. Die in Abbildung 2.5 zusammengefassten Handelsketten kommen auf ein Jahresgesamtumsatz im Jahr 2005 von 127,5 Mrd. € [BLV 2007]. Im Falle der Eignung zum Lastmanagement könnte zur Planung von Umsetzungsmaßnahmen der Zugang auf eine Vielzahl von Filialen zentral über die Handelsketten erfolgen.



**Abbildung 2.5 Umsatzanteile der Handelsketten des Lebensmittel-EH im Jahr 2005 [Quelle: BVL 2007]**

Als Minimarkt werden kleine Selbstbedienungsläden mit Lebensmittelverkauf sowie Delikatessläden bezeichnet. Discounter, Supermarkt und SB-Warenmarkt umfassen fast ausschließlich Filialen der großen Einzelhandelsketten. Alle Ladenformate besitzen Kälteanlagen für NK und TK. Die Kühltemperaturen je nach Warenart befinden sich in Tabelle 2.8. Der Lebensmittel-EH hat meist geregelte Öffnungszeiten Montag bis Samstag von 08:00 bis 20:00 Uhr, muss aber seine Ware 24 Stunden täglich kühlen. Die Kühlmöbel werden morgens beladen. Sie befinden sich in den Verkaufsräumen und damit in klimatisierter oder im Winter beheizter Umgebung, so dass der Wärmeeintrag nur sehr gering von den jahreszeitlichen Schwankungen der Außentemperatur abhängig ist.

**Tabelle 2.8 Temperaturbereiche für typische, kühlbedürftige Supermarktwaren [Quelle: Rhiemeier et al. 2008]**

Warenart	Temperaturbereich
Tiefkühlware	-29 bis -18 °C
Speiseeis	-26 bis -21 °C
Fisch und Meeresfrüchte	-1 bis +3 °C
Frischprodukte	-3 bis +8 °C
Obst und Gemüse	+7 bis +10 °C

Im Lebensmittel-EH gibt es verschiedene Arten von Kühlmöbeln. Dazu gehören Kühlregale, -truhen und -schränke im TK- und NK-Bereich sowie NK-Kühltheken im Verkaufsbereich. Diese sind sowohl offen als auch durch Türen oder Abdeckungen verschließbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass offene Kühlregale oder -theken nachts durch Rollos oder Deckel verschlossen werden. Außer den Kühlmöbeln im Verkaufsbereich gibt es gerade bei großen Ladenformaten NK- und TK-Kühlzellen im Warenlager.

Die Branche Tankstelle beinhaltet die Kühlabteilung im Tankstellenshop für Getränke und tiefgekühlte Speisen. Der Kiosk vertreibt sowohl Getränke als auch Schnellimbisse, deren Zubereitung Lebensmittel aus der NK und TK benötigt. Die Läden sind in der Regel kleiner als 200 m<sup>2</sup>. Tankstellen sind 24 h an jedem Tag im Jahr und Kiosks vormittags bis in den späten Abend geöffnet. Die Ware wird jedoch in beiden Fällen an 24 Stunden täglich gekühlt.

Sonstige Filialen umfassen Verkaufsstätten von Bäckereien, Fleischereien, Molkereien und Fischereierzeugnissen ohne eigene Herstellung oder Verarbeitung. Die Filialen haben nur eine Verkaufstheke, die gekühlt werden muss, sowie einen NK-Kühlschrank. Der Getränke-EH verkauft unterschiedliche Arten von Getränken. Nur ein sehr geringer Teil der Getränke wird in NK-Kühlschränken gekühlt. Zudem gibt es kleine TK-Kühltruhen für Eiskrem oder Würfeleis. Filialen und der Getränke-EH haben wie der Lebensmittel-EH Öffnungszeiten von Montag bis Samstag von 8:00 bis 20:00 Uhr. Wie im Lebensmittel-EH unterliegen auch die Kühlmöbel in Tankstellen, Kioske und Filialen durch die klimatisierte bzw. beheizte Verkaufsräume nur in eingeschränktem Maße den jahreszeitlichen Schwankungen der Außentemperatur.

Hotels und Gaststätten benötigen Kälte zur Aufbewahrung und Frischhaltung der Lebensmittel für die Essenzubereitung. Dabei handelt es sich in der Regel um NK- und TK-Kühlzellen. Kantinen besitzen in der Regel ähnliche Kühleinrichtungen. Während in Hotels und Gaststätten die Hauptbetriebszeiten an jedem Tag abends liegen, werden die Kantinen lediglich zum Mittag und an Werktagen frequentiert. Dennoch wird die Kühlung an 24 Stunden täglich benötigt.

Eisdielen stellen Speiseeis her und verkaufen dieses. In manchen Eisdielen wird Eiskrem nicht selbst hergestellt, sondern nur verkauft. Die Zubereitung und Lagerung erfordern verschiedene Kühlgeräte, wobei der größte Anteil der Kühlanlagen für die TK benötigt wird. Nur ein kleiner Teil NK bleibt für Früchte und Getränke. Hauptbetriebszeiten der Eisdielen liegen nachmittags und abends und gerade am Wochenende. Zu Aufbewahrungszwecken muss außer der Eisvitrine 24 Stunden täglich gekühlt werden.

Apotheken lagern Medikamente und andere Produkte. Ein Teil der Medikamente benötigt eine gekühlte Umgebung. Aus diesem Grund besitzen Apotheken einen kleinen Kühlschrank. Wie in den anderen Branchen der Nahrungsmittelverteilung und -lagerung wird 24 Stunden täglich gekühlt.

### ***Industrie***

In der Industrie wird die Kälte zum großen Teil für Prozesskühlung verwendet. Sie ist hauptsächlich auf chemische Prozesse beschränkt. Generell gibt es in den Branchen der Industrie wenige Betriebsstätten mit hohem Individualisierungsgrad. Die Anlagen werden für die unterschiedlichen Aufgaben und Anforderungen genau konzipiert. Aufgrund der Betriebsgrößen handelt es sich in der Regel um Kälteanlagen in hohen Leistungsklassen.

Die Chemieindustrie erzeugt die Kälte hauptsächlich für zwei Bereiche. Einerseits werden sehr niedrige Temperaturen von etwa  $-182\text{ °C}$  zur Gasverflüssigung benötigt. Bei solchen tiefen Temperaturen ist das Verhältnis von bereitgestellter Kälteleistung zum Strombedarf besonders gering, weshalb in diesem Bereich große Leistungen zur Verfügung stehen müssen. Andererseits wird die Kälte zur Abführung von Reaktionswärme sowie zur Kühlung von Gasen oder Flüssigkeiten verwendet [Steimle et al. 2002, Winkler 2009]. Hier liegen die Kühltemperaturen zwischen  $+10$  und  $-50\text{ °C}$ .

In der Pharmazie werden Kälteanlagen unter anderem zur Eisherstellung verwendet, die zur Produktion von Medikamenten dienen. Durch die Kälte werden zudem Kühlzellen versorgt, welche die Medikamente in exakten Temperaturbereichen lagern können. Die Anzahl der Unternehmen in der Pharmazie, die Kälteanlagen verwendet, ist sehr beschränkt.

In der Chemie- und Pharmazieindustrie gibt es zwei unterschiedliche Herangehensweisen an die Nutzung von Kälteanlagen. Einerseits werden große, zentrale Verbundkälteanlagen verwendet, die gesamte Unternehmenskomplexe mit Kälte versorgen. Dabei wird in Kauf genommen, dass verschiedene Kälteanwendungen und -anforderungen mit einer Kühltemperatur versorgt werden und es dabei zu Ineffizienzen kommt. Andere Unternehmen installieren viele kleine Verbundanlagen,

die bestimmte Bereiche des Unternehmens mit ähnlichen Kühlanforderungen versorgen [Winkler 2009].

Die petrochemische Industrie und Raffinerien nutzen Kälte bei Crack-Prozessen von Ölverbindungen für die Herstellung von beispielsweise Kunststoffen [Winkler 2009]. Auch in diesen Branchen ist die Zahl der Unternehmen und damit die Zahl der Kälteanlagen sehr begrenzt.

### *Sonstiges*

Die Branchengruppe Sonstiges umfasst Branchen mit Prozess- oder Lagerkühlung, die sich nicht den anderen beiden Gruppen zuordnen lassen. Hierunter fällt einerseits der Blumenhandel. Er kann unterteilt werden in den Einzel- sowie in den Großhandel [Steimle et al. 2002]. Danach richtet sich auch die Größe der Kühlzellen. Blumen werden im Allgemeinen in der Normalkühlung bei einer Temperatur zwischen 6 bis 10 °C aufbewahrt.

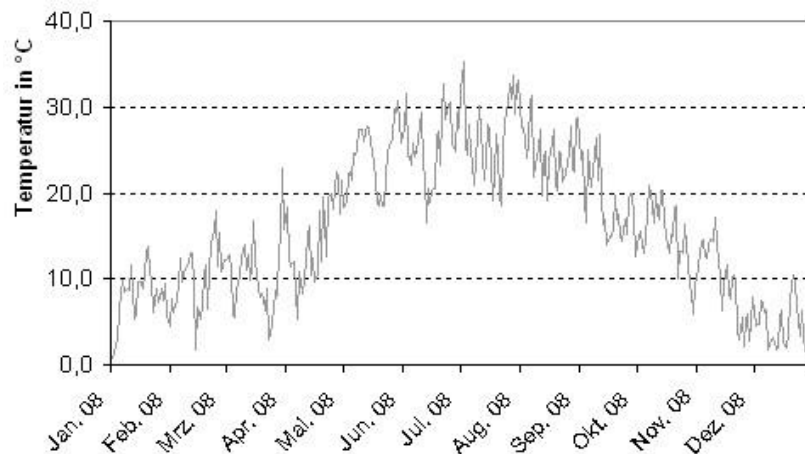
Ein weiterer Bereich ist der Eissport. Er umfasst Kunsteis-Bobbahnen sowie Hallen- und Freiluft-Eisbahnen. Diese Sporteinrichtungen werden durchschnittlich von September bis April betrieben, wobei die Saisonzeiten je Anlage durchaus um mehrere Monate schwanken kann [Steimle et al 2002, Tafler 2009]. Unter dem Kunsteis befinden sich als Verdampfer die Rohrleitungen mit dem Kältemittel, welche das Eis auf der notwendigen Temperatur zwischen – 3,5 °C und – 5 °C halten. Der Kältebedarf gerade in Freiluft-Anlagen ist in starkem Maße von der Umgebungstemperatur bzw. der Sonneneinstrahlung abhängig, weshalb in den Sommermonaten auf den Betrieb der Anlagen verzichtet wird. In Hallen-Eisbahnen wird im Winter durch Beheizung eine Lufttemperatur von 12°C bis 16 °C angestrebt, um das Befahren des Eises auch für Kunsteisläufer zu gewährleisten [Tafler 2009].

### *Klimatisierung*

Klimatisierung beschreibt allgemein die Konditionierung von Luft in Gebäuden und Produktionsstätten und kann neben der Kühlung oder Heizung auch die Zuführung von Frischluft, die Reinigung der Luft von Schadstoffen sowie die Befeuchtung der Luft umfassen. Der Kältebedarf für die Klimatisierung unterscheidet sich je nach Art des Wärmeeintrages. Es muss zwischen Wärmeeintrag von innen oder von außen differenziert werden. Am Beispiel von Verwaltungsgebäuden bedeutet innerer Wärmeeintrag z.B. die Wärmelast von Rechenzentren oder der Menschen selbst. Äußere Wärmeeinträge entstehen durch die Außentemperatur und die Sonneneinstrahlung.

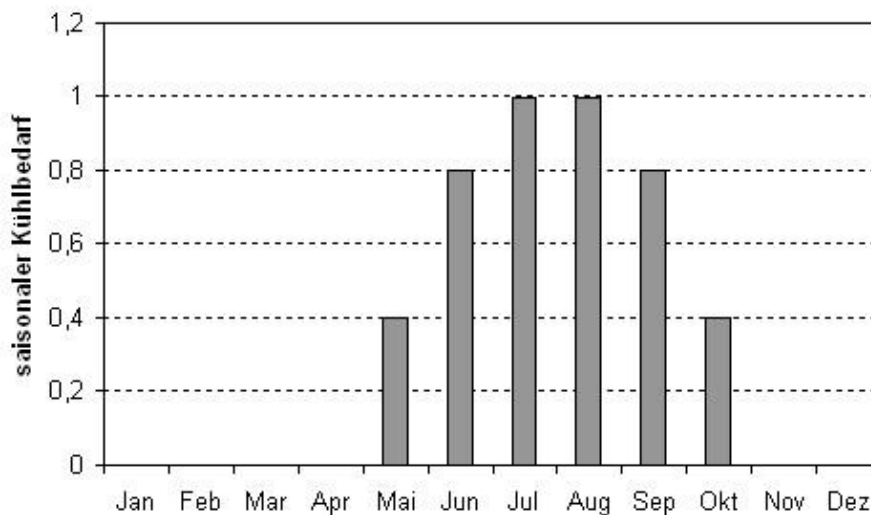
Die Klimatisierung von Gebäuden kann gerade innerhalb von Städten einen hohen Anteil am gesamten Kältebedarf haben. In den Städten befinden sich im Gegensatz zum ländlichen Raum anteilig mehr öffentliche und privatwirtschaftliche Büro- und Verwaltungsgebäude, die eine Klimatisierung erforderlich machen. Merkmale dieser Gebäude ist der hohe Anteil an Glasfassade mit einer eingeschränkten Möglichkeit zur Fensterlüftung. Die Wärmespeicherkapazität der Wände ist aufgrund der Glasfassaden und Metallkonstruktionen eingeschränkt und der Wärmeeintrag durch die Außentemperatur und die Sonneneinstrahlung im Sommer sehr hoch. Aufgrund der saisonalen Temperaturunterschiede der Außenluft wird das Jahr in eine Kühl- und eine Heizperiode unterteilt. Die Abbildung 2.6 zeigt die Jahrestemperaturkurve der täglichen, maximalen Temperaturen für die Stadt Mannheim im Jahr 2008.

Die Konditionierung der Luft erfolgt durch raumluftechnische Anlagen (RLT), ein Gesamtsystem bestehend aus einer Gebäudelüftungsanlage in Verbindung mit einer Kälteanlage und Heizung sowie eines Regelungssystems. Die Betriebszeit der Kälteanlage beschränkt sich im Allgemeinen auf die Arbeitszeiten in der Einrichtung.



**Abbildung 2.6 Maximale Tagesemperaturen der Stadt Mannheim im Jahr 2008 [Quelle: WetterstationMannheim 2009]**

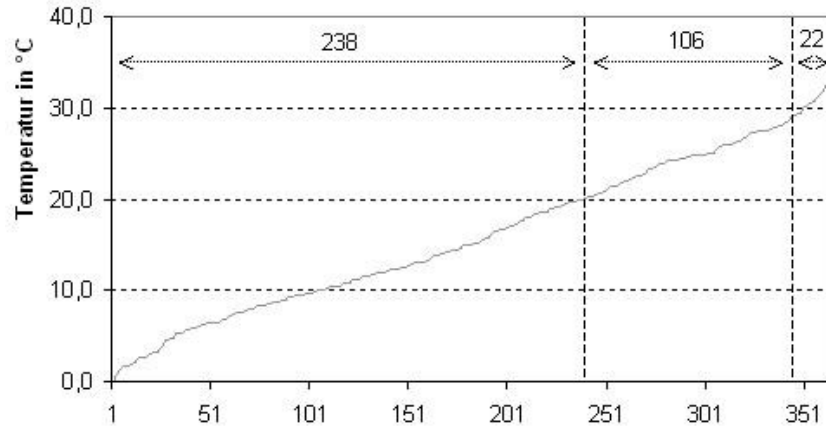
Die Auslegung der maximalen Raumtemperatur in Gebäuden beträgt bei allen Nutzungsarten 26 °C [DIN 2007]. Das gilt sowohl für Büro und Verwaltung als auch für Gewerbe, Hotels und Gaststätten. Das Komfortempfinden der Nutzer kann jedoch zu einer Festlegung der erwünschten Solltemperatur auf 22 bis 23 °C führen. Das bedeutet, dass mit einem zusätzlichen Wärmeeintrag durch die Sonneneinstrahlung ab einer Außentemperatur von etwa 20 °C gekühlt werden muss. Der VDI gibt die jährliche Variation des Kältebedarfes zur Klimatisierung von Büro- und Verwaltungsgebäuden anteilig nach der Abbildung 2.7 an. Zwar ist aufgrund der hohen Personendichte und der stärkeren Beleuchtung bei Gewerbe, Hotels und Gastronomie der Anteil der inneren Wärmelasten höher, jedoch behält der äußere Wärmeeintrag die signifikante Bedeutung. Aus diesem Grund werden auch diese Branchen im Winter nicht gekühlt, sondern müssen zusätzlich beheizt werden.



**Abbildung 2.7 Saisonale Variation des Kühlbedarfes in Büro- und Verwaltungsgebäuden [in Anlehnung an VDI 2008]**

Um einen Temperaturschock bei Betreten oder Verlassen des Gebäudes zu vermeiden, wird die Innenraum-Solltemperatur durch eine maximale Temperaturdifferenz von 6 °C zwischen Innen- und Außentemperatur variabel gestaltet. Das bedeutet, dass bei sehr hohen Außentemperaturen die Innenraum-Solltemperatur steigen kann. Ordnet man nun die Tageshöchsttemperaturen wie in Abbildung 2.8 dem Betrag nach an, kann die Anzahl der Tage abgelesen werden, an denen ein Kühlbedarf besteht. Bei einer Innenraum-Solltemperatur von 23 °C könnte an 106 von den 128 Tagen

mit Kühlbedarf eine Temperaturerhöhung von 3 °C auf 26 °C akzeptiert werden. An den restlichen 22 Tagen steigt die Außentemperatur über 29 °C und damit führt die 6 °C Differenzregel zwischen Innenraum-Solltemperatur und Außentemperatur zu einer Reduktion einer tolerierbaren Temperaturerhöhung.



**Abbildung 2.8 Geordnete Kurve der Tageshöchsttemperaturen in der Stadt Mannheim im Jahr 2008**  
 [Quelle: WetterstationMannheim 2009]

Im Unterschied zu Büro- und Verwaltungsgebäuden ist die Klimatisierung von industriellen Produktionsstätten weniger geprägt durch den äußeren Wärmeeintrag, sondern durch die Entstehung von Abwärme aus Maschinen im Produktionsprozess. Ziel der Industrieklimatisierung ist die Abführung dieser Wärme zur Schaffung der notwendigen Temperaturanforderungen für bestimmte Produktionsprozesse. Beispiele für die Industrie-klimatisierung sind der Maschinenbau, Chemie, Pharmazie und das Druckereigewerbe. Da die Produktion ganzjährig stattfindet und äußere Einflüsse wenig bedeutend sind, schwankt der Kältebedarf saisonal gering. Im Tages- und Wochenverlauf entsteht der Kältebedarf je nach Anzahl der Werktage und den täglichen Betriebszeiten.

### 2.3. Grundprinzipien der Kälteerzeugung

Zur Beeinflussung der Betriebsweise einer Kälteanlage durch ein Lastmanagement muss ein grundsätzliches Verständnis der Erzeugung und Nutzung von Kälte vorausgesetzt werden. An dieser Stelle soll ein Überblick über die technischen Aspekte einer Kälteanlage und deren Betriebsführung gegeben werden, der es erlaubt, weiterführende Informationen hinsichtlich der Kältebereitstellung sinnvoll einzuordnen und daraus Schlussfolgerungen für die Umsetzung eines Lastmanagements abzuleiten.

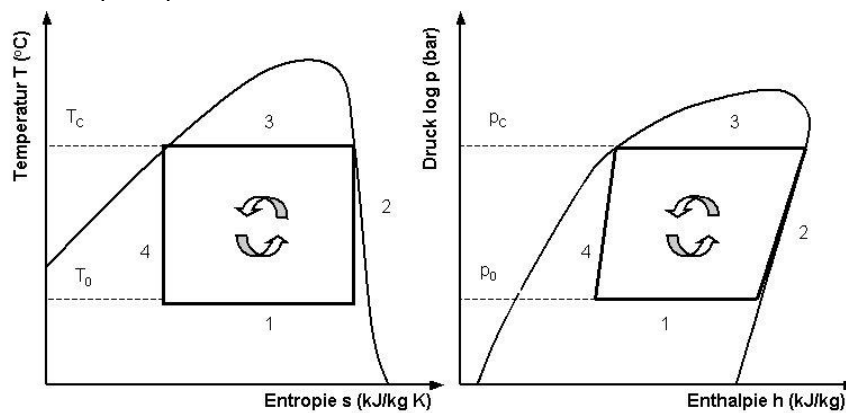
#### 2.3.1. Systematisierung der Prozesse und Technologien zur Kälteerzeugung

Der Begriff Kälte definiert den Bereich von Temperaturen, der sich unterhalb der Umgebungstemperatur befindet. Um diesen Bereich zu erreichen, ist es notwendig, einem Körper oder Raum Wärme zu entziehen [Recknagel et al. 2009]. Aus dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik lässt sich folgern, dass zum Wärmeentzug eines Körpers Energie aufgewendet werden muss. Ein Kältemedium, auch Kältemittel genannt, nimmt dabei überschüssige Wärme aus der zu kühlenden Umgebung auf und gibt diese Wärme an anderer Stelle wieder ab. Dabei wird ein thermodynamischer Kreisprozess durchlaufen, bei dem elektrische oder thermische Energie über zwei unterschiedliche Verfahren verwendet wird. Im Gegensatz zum rechtsdrehenden Kreisprozess zur Temperaturerhebung für Wärmepumpen findet für die Kälteerzeugung der gegenläufige, linksdrehende Kreislauf Anwendung.

### Kompressionskälteprozess

Der Kompressionskälteprozess ist das vorherrschende Verfahren zur Kälteerzeugung und nutzt elektrische Energie zum Entzug der Wärme. Der Kühlprozess wird zur Vereinfachung als idealisierter Carnot-Prozess beschrieben und im Allgemeinen durch das Temperatur, Entropie - Diagramm ( $T,s$ -Diagramm) beziehungsweise das besser geeignete Druck, Enthalpie - Diagramm ( $\log p,h$  - Diagramm) in Abbildung 2.9 dargestellt. Im idealen Prozess werden folgende Zustandsänderungen realisiert:

- 1 isobare / isotherme Verdampfung
- 2 isentrope Verdichtung
- 3 isobare / isotherme Verflüssigung
- 4 isentrope Expansion

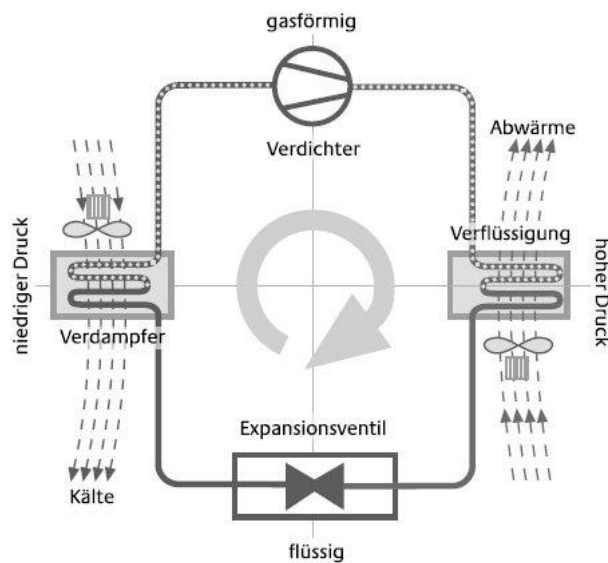


**Abbildung 2.9** Der idealisierte, linksläufige Carnot-Kältekreisprozess [in Anlehnung an Recknagel et al. 2009]

Im Schritt eins nimmt das Kältemittel über Wärmetauscher Wärme aus der zu kühlenden Umgebung auf. Die Temperatur des Kältemittels entspricht der Verdampfungstemperatur  $T_0$  unter geringem Druck  $p_0$ . Dabei speichert es die Wärme durch Zunahme der Enthalpie, d.h. das Kältemittel verdampft. Im zweiten Schritt wird der Druck des Kältemittels durch Kompression auf das Niveau  $p_c$  erhöht. Bei konstanter Wärmemenge steigt dadurch sowohl dessen Temperatur über die Temperatur eines Rückkühlmediums, normalerweise die äußere Umgebungsluft oder Wasser, als auch die Verflüssigungstemperatur  $T_c$  über das vorherige Niveau der Verdampfungstemperatur. Anschließend wird im dritten Schritt die Wärme über einen Verflüssiger (Rückkühlung) an das andere Kühlmedium abgegeben. Dabei kondensiert das Kältemittel und die Enthalpie nimmt ab. Die Temperatur des Kältemittels entspricht der Verflüssigungstemperatur. Im Schritt vier wird durch Expansion bei wiederum konstanter Wärmemenge Druck und Temperatur wieder in den Ausgangszustand  $p_0$  und  $T_0$  gesenkt.

Die Kälteanlage besteht demnach im Wesentlichen aus vier Komponenten, die in der Abbildung 2.10 dargestellt sind:

- 1 Verdampfer
- 2 Verdichter
- 3 Verflüssiger
- 4 Expansionsventil



**Abbildung 2.10 Der Kompressionskälteprozess [Quelle: dena o.J.]**

Dabei befinden sich der Verdampfer auf der Niederdruckseite und der Verflüssiger auf der Hochdruckseite. Der Strombedarf im Verdichter wird also für die notwendige Druckerhöhung des verdampften Kältemittels benötigt, damit sich das Kältemittel bei höherer Temperatur wieder verflüssigen kann. Dementsprechend wird für einen höheren Temperaturunterschied ein höherer Druckunterschied benötigt, wodurch die notwendige Antriebsleistung steigen muss. Soll stärker gekühlt werden, steigt der Strombedarf.

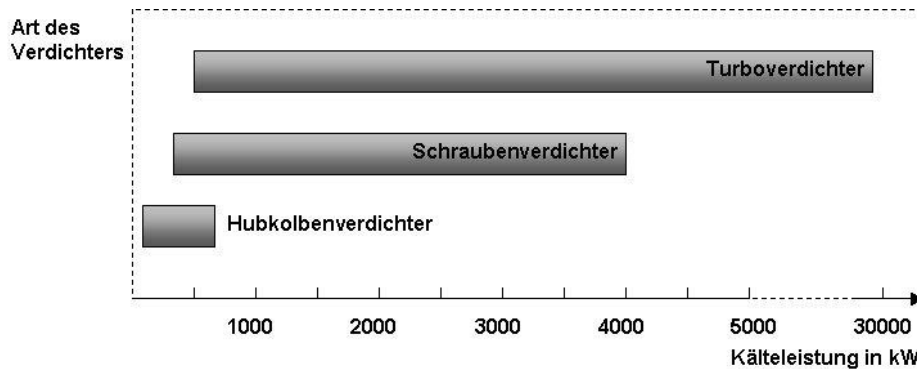
Der reale Kälteprozess läuft nicht ohne Verluste ab. Hierzu gehören sowohl Druckverluste in der Kälteanlage als auch die mangelnde Umsetzungsmöglichkeiten der isobaren und isothermen Wärmeaufnahme und -abgabe. Da jedoch weiterhin ein Kreisprozess vorherrscht, äußern sich die realen Verluste in einem erhöhten Strombedarf.

Es sind verschiedene Technologien von Kompressionskältemaschinen, auch Verdrängungsverdichter genannt, verfügbar. Die bedeutendsten Anlagenvariationen für gebräuchliche Gewerbe- und Industrieanwendungen sind:

- Hubkolbenverdichter
- Schraubenverdichter
- Turboverdichter

Hubkolbenverdichter sind Motoren, bei denen die Kompression des Kältemittels über Zylinder erfolgt. Bei Schraubenverdichtern erfolgt die Verdichtung des Kältemittels durch eine Antriebsschraube, die durch axiale Rotation und zusätzlich ineinander kämmende Zahnscheiben wandernde Verdichtungsräume entstehen [Recknagel et al 2008]. Beim Turboverdichter erfolgt die Kompression durch eine Art Radialventilation, ein Laufrad, welches die Strömung des Kältemitteldampfes beschleunigt und damit seinen Druck erhöht.

Die unterschiedlichen Technologien haben bezüglich ihrer Funktionsweise bevorzugte Anwendungsgebiete und sind für bestimmte Kühlleistungen einsetzbar (Abbildung 2.11). Hubkolben- und Schraubenverdichter sind vielseitig einsetzbar bieten sich für Anwendungen an, bei denen Temperaturen zwischen  $6^{\circ}\text{C}$  und  $-50^{\circ}\text{C}$  erreicht werden sollen. Hubkolbenverdichter werden dabei tendenziell bei geringeren Kühllasten verwendet, können aber wie die anderen Verdichtertypen auch parallel zu höheren Kühlleistungen zusammengeschlossen werden. Turboverdichter erreichen eine große Leistung, können aber aufgrund ihres Aufbaus nur geringe Druckerhöhungen bewirken. Damit eignen sie sich für Anwendungen mit tendenziell hohen Kühltemperaturen.



**Abbildung 2.11 Leistungsbreite von Kompressionskältemaschinen [in Anlehnung an Recknagel et al. 2009]**

Als Kältemittel kann prinzipiell jeder Stoff verwendet werden, der bei den speziellen Temperaturanforderungen verdampft und kondensiert sowie anlagen- und umweltspezifische Kriterien erfüllt. Heutzutage werden vor allem Verbindungen und Mischungen von Kohlenwasserstoffen verwendet, die je nach ihrer Zusammensetzung in R-Reihen (z.B. R 134A, R 404a, etc.) beschrieben sind. Zudem ist Ammoniak (R 717 aus der Reihe der anorganischen Kältemittel) ein weit verbreitetes Kältemittel [Bock et al. 2008].

### **Sorptionskälteprozess**

Bei dem Sorptionsverfahren wird der Kältemitteldruck nicht mechanisch von einem Verdichter erhöht, sondern das Kältemittel durch ein Lösungsmittel und die Zufuhr von Wärme auf die Verflüssigungsbedingungen gebracht. Diese Aufnahme durch das Lösungsmittel wird auch als Sorption bezeichnet. Die Zustandsänderungen des Kreisprozesses gleichen im Prozessablauf grundsätzlich denen der Kompressionskältemaschine. Die Funktionsweise beruht auf dem thermodynamischen Verhalten von Zweistoffgemischen [Bock et al. 2008]. Nach der Aufnahme des Kältemittels im Absorber und Abführung anfallender Absorptionswärme wird das Arbeitsstoffpaar mittels einer Pumpe auf den notwendigen Druck gebracht. Die Pumpe benötigt lediglich etwa 5 bis 8 % des gesamten Energiebedarfes zur Kälteerzeugung. Durch die Zuführung von Wärme wird im Austreiber das Stoffgemisch getrennt und das Kältemittel besitzt die notwendige Verflüssigungstemperatur für die Rückkühlung. Es gibt zwei verschiedene Möglichkeiten, das Kältemittel aufzunehmen:

- Absorption (Aufnahme des verdampften Kältemittels in einem flüssigen Lösungsmittel)
- Adsorption (Anlagerung des verdampften Kältemittels an der Oberfläche eines festen Kältemittelträgers)

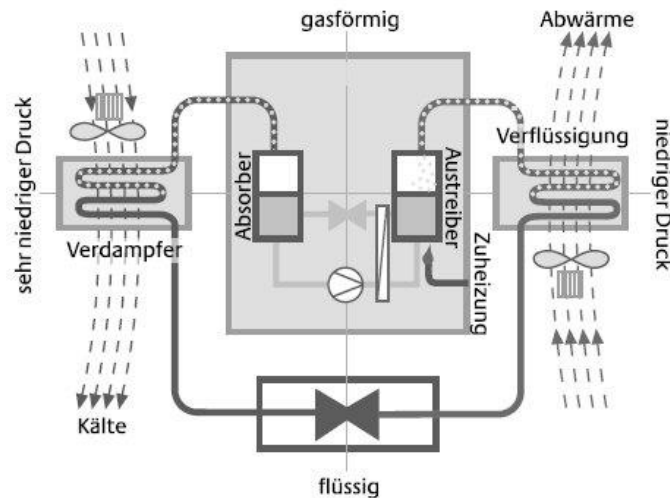


Abbildung 2.12 Der Sorptionskälteprozess am Beispiel der Absorption [Quelle: dena o.J.]

Da die Absorptionskältemaschine für die Kälteerzeugung vorrangig Wärme und nur geringfügig elektrischen Strom bedarf, wird sie in der weiteren Betrachtung keine Relevanz erfahren. Aus Gründen der Vollständigkeit ist jedoch in Abbildung 2.12 der Aufbau der Absorptionskältemaschine dargestellt. Arbeitsstoffpaare für Adsorptionskälteanlagen sind Ammoniak/Wasser mit Ammoniak als Kältemittel und Wasser als Lösungsmittel sowie Wasser/Lithiumbromid mit Wasser als Kältemittel und Lithiumbromid als Lösungsmittel.

### Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur

Kälte wird benötigt, wenn ein Raum oder ein Prozess eine geringere Temperatur benötigt als die Umgebungstemperatur  $T_U$ . Die zu erzeugende Temperatur im Kühlraum soll Kühltemperatur  $T_K$  genannt werden. Da das Kältemittel im Verdampfer die überschüssige Wärme des Kühlraumes aufnimmt, muss das Kältemittel nach dem idealisierten Carnot-Prozess die Kühltemperatur besitzen und die Verdampfungstemperatur muss unter den Niederdruckbedingungen genau diesen Wert besitzen. Im realen Kühlprozess ist jedoch die Wärmeaufnahmekapazität des Kältemittels über den Verdampfer als Wärmetauscher nicht unendlich, da die Fläche des Wärmetauschers nicht unendlich ist. Aus diesem Grund muss die Verdampfungstemperatur niedriger als die gewünschte Kühltemperatur gewählt werden. Dieser Effekt gilt in gleichem Maße auch für die Verflüssigung. Die Verflüssigungstemperatur muss höher gewählt werden als die maximal zu erreichende Umgebungstemperatur, da sonst nicht die gesamte im Kühlraum aufgenommene Wärme wieder an die Umgebung abgegeben werden kann. Diese Temperaturdifferenzen sind in Abbildung 2.13 grafisch verdeutlicht.

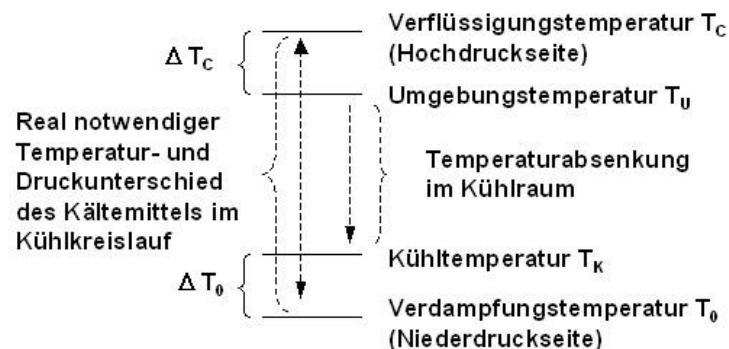


Abbildung 2.13 Temperaturdifferenzen zwischen realem und idealisiertem Kälteprozess

Letztendlich ergibt sich aus diesem Effekt ein Optimierungsproblem, da mit zunehmendem Temperaturunterschied zwischen Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur der Bedarf an Verdichterleistung und damit an Energieverbrauch steigt. Gleichzeitig erhöhen sich bei größeren Wärmetauscherflächen die Investitionskosten, so dass eine größere Dimensionierung von Verdampfer und Verflüssiger nur begrenzt möglich ist.

Nach Recknagel wird eine Temperaturdifferenz beim Verdampfer  $\Delta T_0$  und beim Verflüssiger  $\Delta T_c$  von 4 bis 6 °C angestrebt [Recknagel et al. 2009], es kann jedoch je nach Anwendung auch zu höheren Temperaturdifferenzen kommen. Da sich die meisten Verflüssiger außerhalb von Gebäuden befinden, ist die Verflüssigungstemperatur in vielen Fällen festgelegt bei 38 bis 40 °C. Diese Temperatur ergibt sich aus dem in Deutschland statistischen Maximalwert für Sommertemperaturen um 32 °C. Die Verdampfungstemperatur dagegen ist abhängig von der Kühltemperatur der Kühlanwendung. Daraus ergibt sich, dass der Energiebedarf mit der Verringerung der Kühltemperatur steigt.

### **Leistungszahl**

Bei technischen Anlagen spielt die Effizienz und damit der Wirkungsgrad eine bedeutende Rolle. Der Wirkungsgrad ist definiert als das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand und hat normalerweise einen Betrag kleiner 1.

$$\varepsilon = P_A / P_E$$

Da bei Wärme- und Kälteprozessen die zugeführte Energie nicht in die nutzbare Energieform umgewandelt wird, sondern als Pumpleistung für die Temperaturerhöhung eingesetzt wird und damit den Wärmeentzug in Höhe der Kälteleistung ermöglicht, kann der Koeffizient einen Betrag größer 1 annehmen. Dieser ergibt sich für den idealen Carnot-Prozess aus der folgenden Gleichung.

$$\varepsilon_{K, \text{ideal}} = T_0 / (T_C - T_0)$$

Dieser Wert wird auch als Leistungszahl oder Coefficient of Performance (COP) bezeichnet. Im realen Kälteprozess ist er abhängig von Parametern wie dem Verdichterwirkungsgrad oder den Druckverlusten im Rohrsystem. Aus dieser Grund wird die Leistungszahl allgemein formuliert als das Verhältnis aus abgeführter Wärmeleistung zu aufgewendeter Verdichterleistung.

$$\varepsilon_K = Q_0 / P$$

Da für höhere Temperaturdifferenzen, d.h. für niedrigere Verdampfungstemperaturen, überproportional zur erhöhter Kälteleistung eine noch größere Verdichterleistung notwendig ist, sinkt die Leistungszahl mit einer Reduktion der Verdampfungstemperatur. Dieser Effekt wird in der Abbildung 2.14 für einen realen Schraubenverdichter mit etwa 1 kW Kälteleistung und Ammoniak als Kältemittel veranschaulicht.

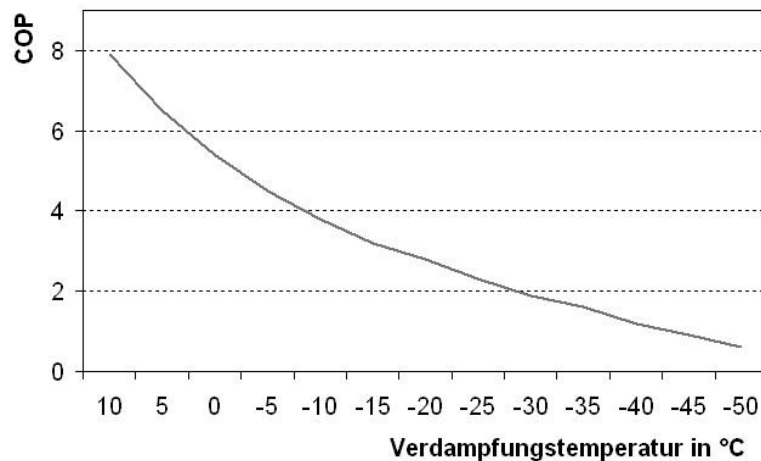


Abbildung 2.14 Abhängigkeit der Leistungszahl von der Verdampfungstemperatur [in Anlehnung an Winkler 2009]

### 2.3.2. Aufbau und Dimensionierung der Kälteversorgung

Die vier beschriebenen Komponenten der Kälteanlage ergeben zusammen ein Kältesystem, welches durch Rohrleitungen miteinander verbunden ist. Dadurch müssen sich die Komponenten nicht zwangsläufig an einem Standort befinden. Die Kälteanlage ist jeweils auf den Zweck und die Anwendung der Kühlung ausgerichtet und dimensioniert. Bei einem Haushaltskühlschrank sind beispielsweise der Verdichter, das Expansionsventil und die Lufrückkühlung an der Rückseite montiert, während sich der Verdampfer im Kühlschrankinnenraum befindet. Bei großen, industriellen Kälteanlagen kann sich der Verdichter weit außerhalb der Kühlhäuser oder Produktionseinrichtungen befinden. Das flüssige Kältemittel wird den Kühlanwendungen über Rohrsysteme zugeführt, verdampft dort unter Aufnahme von Wärme und wird dann zum Verdichter geleitet, um auf den notwendigen Druck und die Temperatur gebracht zu werden. Vom Verdichter gelangt das Kältemittel zu einem auf dem Gebäudedach befindlichen Kühlturm, der unter Zuführung von Wasser das Kältemittel kondensiert und die gespeicherte Wärme an die Umgebung abgibt. Über ein weiteres Rohrsystem gelangt das flüssige Kältemittel zum Expansionsventil, von dem aus es mit den Ausgangsbedingungen wieder zum Verdampfer zugeführt werden kann.

Die Kälteanlage kann die Kälteversorgung über zwei verschiedene Arten gewährleisten [Recknagel et al. 2009]:

- Direkt (durch Kältemittel)
- Indirekt (mit angeschlossenen Kaltwassersatz)

Findet die Kühlung lediglich über einen Kältekreislauf statt, spricht man von einer direkten Kühlung. Wie in den Beispielen beschrieben befindet sich der Verdampfer direkt in der zu kühlenden Umgebung. Dagegen bedeutet eine indirekte Kühlung die Entnahme von Wärme eines zweiten Kühlmediums in einem Sekundärkreislauf, welches dann über dessen geringere Temperatur Wärme aus der zu kühlenden Umgebung aufnehmen kann. Als Kühlmedium im Sekundärkreislauf wird meist Kaltwasser verwendet. Die Kälteanlage ist lediglich eine Kompaktanlage, da auch der Verflüssiger an einen dritten Kühlwasserkreis angeschlossen ist, der die aufgenommene Wärme zur Verflüssigung des Kältemittels über eine externe Rückkühlung abführt. Dieses System kann in verzweigten, komplexen Kühlanwendungen mit Kühltemperaturen über 0 ° angewendet werden, um Kältemittel zu sparen, hat jedoch zusätzliche Energieverluste durch die weitere Wärmeübertragung.

Nach dem Kriterium der Anzahl der angeschlossenen Kühlstellen können Kälteanlagen zudem unterteilt werden in [Rhiemeier et al. 2008]:

- Zentrale Anlagen (Verbundanlagen)
- Dezentrale Anlagen (Einzelanlagen, steckerfertige Anlagen)

Bei den Verbundanlagen werden mehrere Kühlstellen durch eine Kälteanlage versorgt. Der Verdichter kann dabei aus einem oder mehreren parallel geschalteten Kompressoren, also Einzelverdichtern, bestehen. Sind die Verdichter standardisiert und werden vorgefertigt installiert, werden sie auch als Kältesatz bezeichnet. Dezentrale Anlagen versorgen nur eine Kühlstelle, d.h. es befindet sich nur ein Verdampfer im Kühlkreislauf. Einzelanlagen bezeichnen Kälteanlagen, deren Komponenten unabhängig von der Kühlstelle aufgestellt werden können. Bei den steckerfertigen Anlagen ist wie beim Haushaltskühlschrank die Kälteanlage in der Kühlstelle integriert. Steckerfertige Kühlmöbel haben den Nachteil, dass sie durch den integrierten Verdichter und den Verflüssiger am Standort sowohl Lärm als auch Wärme entwickeln.

Im Allgemeinen wird die Kühlung an den Kühlstellen über Luftkonvektion realisiert, also durch die Umwälzung von Luft. Der Verdampfer wie auch der Verflüssiger ist ein Wärmetauscher, der je nach der Dimensionierung mehr oder weniger Wärme aufnimmt bzw. abgibt. Der Wärmeaustausch kann durch die Anbringung von Ventilatoren oder beim Verflüssiger zusätzlich durch die Verwendung von Kühlwasser beispielsweise mit Sprinkleranlagen gefördert werden. Damit verändert sich der notwendige Temperaturunterschied zwischen Verdampfungs- und Kühltemperatur bzw. Verflüssigungs- und Umgebungstemperatur und damit der Leistungsfaktor der Kälteanlage. Weitere anlagentechnische Faktoren, die Einfluss auf den Leistungsfaktor haben, sind die Anlagentechnik der Kältemaschine, Druckverluste in der Rohrleitung sowie die Betriebseinstellung der Anlage. Externe Faktoren mit Einfluss auf den Leistungsfaktor sind die inneren und äußeren Wärmelasten der Kühlstelle, die Kühltemperaturanforderung der Kühlstelle sowie die Umgebungstemperatur.

Die Dimensionierung der Kälteanlagen erfolgt nach den maximalen Kühlanforderungen der Anwendung. Für die Gebäudeklimatisierung in Deutschland wäre das die maximale, durchschnittliche Außentemperatur von 32 °C. Nach der Sollraumtemperatur, der auftretenden Kühllast durch die äußere Einstrahlung und innere Lasten wie Computer oder Personen sowie nach der Außentemperatur werden Verdampfungs- und Verflüssigungstemperaturen sowie sinnvolle Wärmetauscherdimensionen und deren Technik bestimmt. Aus den Faktoren ergibt sich der notwendige Druckunterschied für die Verdichtung und damit die Verdichterleistung. Zur Optimierung können Faktoren verändert und verschiedene Auslegungsmöglichkeiten gerechnet werden.

Indirekte Systeme werden selten bei Kühltemperaturen unter 4 °C verwendet, da das Kaltwasser dann durch Sole ersetzt werden muss, um den Gefrierpunkt zu senken. Sole ist eine Lösung aus Wasser und Salzen oder Glykolen, also Alkoholen mit niedrigerer Schmelztemperatur als Wasser, die durch Mischung einen Gefrierpunkt von -55 °C erreichen können. Zudem besteht die Gefahr von Vereisungen am Verdampfer. Aus diesem Grund erhitzen elektrische Heizstäbe oder durch den Verdampfer geführte Heißgase auf der Hochdruckseite den Verdampfer ein bis zwei Mal täglich für etwa 15 Minuten auf. Es entstehen Abtauphasen, in denen sich die Temperatur des Kühlraums je nach Volumen stark ändern kann. Werden für die Kühlung verschiedener Kühlstellen stark voneinander abweichende Kühltemperaturen benötigt, werden mehrere Kälteanlagen mit separaten Kühlkreisläufen installiert.

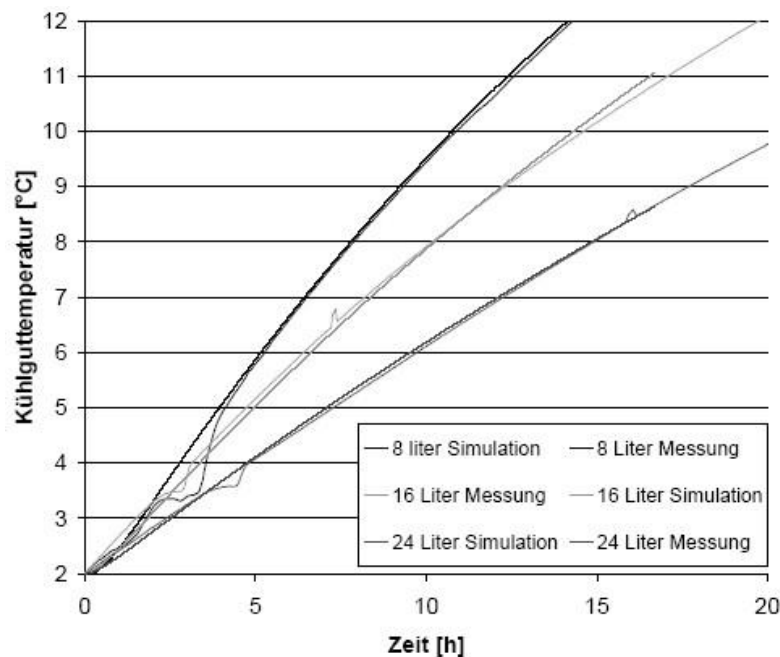
### **2.3.3. Thermische Speicherkapazität**

Ziel der Kühlung ist die Herstellung von Temperaturbedingungen an Kühlstellen, an denen zumindest zeitweise höhere Umgebungstemperaturen herrschen. Um die gewünschte Temperatur zu erreichen, wird der Kühlstelle durch eine Kälteanlage Wärme entzogen. Dadurch entsteht ein Zustand des Ungleichgewichts zwischen der Kühlstelle und ihrer Umgebung. Die ungleichen Temperaturen gleichen sich über den Wärmestrom bzw. Wärmefluss aus. Dieser Ausgleichsprozess ist von der

Wärmedämmung zwischen der Betriebsstelle und der Umgebung, dem Betrag der entzogenen Wärme, der Temperaturdifferenz zur Umgebung und der Zeit abhängig.

Die Fähigkeit dieser Kühlstelle, für einen bestimmten Zeitraum ein Ungleichgewicht zwischen der Umgebungstemperatur und ihrer eigene Temperatur halten zu können, kann als thermische Speicherfähigkeit bezeichnet werden. Wärmeentzug und Kältespeicherung können in diesem Fall synonym verwendet werden. Die thermische Speicherkapazität gibt die Höhe der möglichen Kältespeicherung an. Kühlstellen, die nicht von der Umgebung abgegrenzt sind, besitzen keine Speicherkapazität. Die entzogene Wärme gleicht sich sofort mit der Umgebung zu einem Gleichgewicht auf. Es entsteht kein Ungleichgewicht, d.h. keine Temperaturdifferenzen.

Die Unterbindung des Wärmeaustauschs und damit die Speicherung kann durch eine hohe Wärmedämmung erreicht werden. Sie wird durch den spezifischen Wärmedurchgangs-koeffizienten (U-Wert) pro Flächeneinheit ausgedrückt. Kühlräume mit offenen Türen haben einen sehr hohen U-Wert, was einen hohen Wärmedurchgang bedeutet. Wichtig für die Höhe der Wärmespeicherung ist der Inhalt der Kühlstelle. Luft ist ein Stoff mit geringer Speicherkapazität. Mit Wasser gefüllte Kühlräume haben beispielsweise eine weitaus höhere Kältespeicherkapazität. Ein weiterer Aspekt der Speicherung ist der Temperaturunterschied zwischen der Kühlstelle und der Umgebung. Die Temperaturänderung erfolgt bei höheren Temperaturdifferenzen schneller als bei geringen Temperaturdifferenzen. Daraus folgt auch, dass der Temperatursgleich zeitlich abhängig ist.



**Abbildung 2.15 Temperaturkurve eines Haushaltskühlschranks mit unterschiedlicher Wasserbefüllung zur Variation der Speicherkapazität bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C [Quelle: Stadler 2005]**

In der Abbildung 2.15 sind drei Temperatursgleichkurven mit unterschiedlichen Befüllungen in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Erkennbar sind die geringere Temperaturänderung bei höherer Befüllung aufgrund der höhere Speicherkapazität sowie die Änderung des Temperaturgradienten mit der Zeit. Diese Temperaturkurve entstehen, wenn die Kühlung der Kühlstelle nach dem Erreichen der Soll-Kühltemperatur von 2 °C bei geschlossener Tür ausgeschaltet wird. Die Abnahme des Temperaturgradienten mit der Zeit sowohl bei der Kühlung als auch bei der Erwärmung wird als Hysterese bezeichnet.

Mathematisch lässt sich dieser Temperaturverlauf der Kühlung und Erwärmung analog zum Spannungsverlauf bei der Ladung oder Beladung der Kapazität eines elektrischen Kondensators in einem Schwingkreis darstellen:

$$U_d = U_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad \text{mit } \tau = R \cdot C$$

$U_0$  ist die Soll-Kühltemperatur, wohingegen das  $U_d$  die Entwicklung der Temperatur im Ausgleichsprozess darstellt. Das  $R$  repräsentiert sowohl den Einfluss der Wärmedämmung als auch der Temperaturdifferenz zwischen Kühl- und Umgebungstemperatur. Das  $C$  bezeichnet die Speicherkapazität, also den Betrag der entzogenen Wärme. Durch Umstellung der Gleichung ist es möglich, bei bekannten Größen auf die Dauer der Erwärmung bis zu einer bestimmten Temperatur zu schließen. Die einzigen konstanten Größen in diesem System sind die Wärmedämmung der Kühlstelle aufgrund des Dämmmaterials und die festgelegte Fläche durch die Größe der Kühlstelle.

Aus der Abhängigkeit des Temperatursausgleichs bzw. des Wärmestroms von der Temperaturdifferenz zwischen der Kühlstelle und der Umgebung ändert sich bei unterschiedlichen Kühltemperaturen die Wärmeaufnahme aus der Umgebung. Wird der Kühlstelle mit einer konstanten Kälteleistung Wärme entzogen, ergibt sich in der Kühlstelle eine Temperatur, bei der sich ein Gleichgewicht zwischen Wärmeentzug und Wärmeaufnahme einstellt.

### 2.3.4. Sensorik und Aktorik

In der Realität ändern sich die Einflussgrößen auf die Kühlstellen stetig. Durch variierende Umgebungstemperaturen im Tages und Jahresverlauf oder die zeitweise Öffnung der Türen der Kühlstellen für die Be- und Entladung steigt oder fällt der Wärmeeintrag in die Kühlstelle. Die Gewährleistung der Kühlanforderungen erfordert eine regelmäßige Überprüfung und Regelung der Kühlanforderungen. Die Sensorik und Aktorik bezeichnet die dazu notwendigen mess- und regelungstechnische Komponenten.

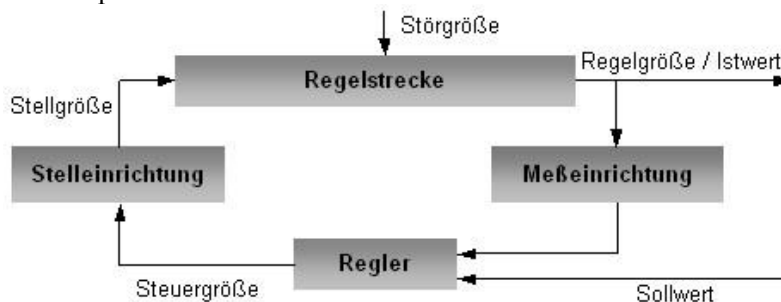


Abbildung 2.16 Vereinfachter Regelkreis

Die Vorgehensweise der Regelung kann vereinfacht anhand des in Abbildung 2.16 dargestellten Regelkreises beschrieben werden. Die Regelstrecke ist die Kühlstelle, die eine entsprechende Kühltemperatur besitzt, da ihr stetig Wärme entzogen wird. Wird die Kühlstellentür geöffnet, fließt eine größere Wärmemenge in die Kühlstelle, deren Differenz als Störgröße bezeichnet werden kann. Die Kühltemperatur in der Kühlstelle ist die Regelgröße bzw. der Istwert, der durch die Messeinrichtung erfasst wird. Bei einer ansteigenden Kühltemperatur durch die zusätzliche Wärmemenge ergibt sich eine Abweichung bezüglich der gewünschten Kühltemperatur als Sollwert. Der Regler verarbeitet diese Information und berechnet eine Anpassung in Form einer Steuergröße, die an die Stelleinrichtung, in diesem Fall der Verdichter, gesendet wird. Aufgrund einer erhöhten Leistung kann das Kältemittel mit einer niedrigeren Temperatur, welche durch die Stellgröße dargestellt ist, zum Verdampfer geleitet werden, um der Kühlstelle den erhöhten Wärmeeintrag zu entziehen. Durch eine ständige Messung der Regelgröße entsteht ein rückgekoppelter, iterativer Prozess der Anpassung der Stellgröße, um den Istwert an den Sollwert anzugleichen.

Bei der Regelung der Kälteanlage muss zwischen den dezentralen Anlagen und den Verbundanlagen unterschieden werden. Kälteanlagen wie der Haushaltskühlschrank, die nur eine Kühlstelle versorgen, können anhand der Kühlraumtemperatur als Regelgröße geregelt werden. Einzelanlagen besitzen im Allgemeinen eine 2-Punktsteuerung, d.h. sie befinden sich in angeschaltetem Zustand mit 100 % Leistung oder sind ausgeschaltet. Ihre installierte Kälteleistung liegt oberhalb der normal benötigten Kühlleistung durch Wärmeeintrag, so dass sie in angeschaltetem Zustand stets die Kühltemperatur senken. Der Sollwert stellt ein Temperaturband (Temperatur-Hysterese) dar mit einer minimalen und einer maximalen Kühltemperatur. Erfasst die Messeinrichtung eine Temperatur oberhalb der Maximaltemperatur, schickt der Regler die Steuergröße ‚an‘ an den Verdichter, der nun anschaltet und den Kühlraum kühlt. Wird die Minimaltemperatur erreicht, schaltet der Verdichter analog aus, bis wiederum die Maximaltemperatur erreicht wird. Es entstehen Schaltakte mit Schaltzeiten. Die Einstellmöglichkeit bei Haushaltskühlschränken verschiebt dabei das Temperaturband hin zu höheren oder niedrigeren Temperaturen, wodurch nicht die Leistung der Anlage geändert wird, sondern deren Taktzeiten und damit deren Stromverbrauch. Gewerbliche Anlagen werden in ihrer Leistung so ausgelegt, dass sie bei den geforderten Kühltemperaturen eine tägliche Betriebszeit von 16 Stunden erreichen [Kalbrunner 2009].

Die Regelung von Verbundanlagen muss differenziert betrachtet werden, da es mehr als nur einen Regelkreis gibt. Zudem muss die Regelung zwischen direkten und indirekten Kältesystemen unterschieden werden.

Bei direkten Kältesystemen besitzen die einzelnen Kühlmöbel eine Regelung nach ihrer eingestellten Temperatur-Hysterese. Erreicht die Kühltemperatur der jeweiligen Kühlstelle als Regelgröße ihren Minimal- oder Maximalwert, unterbricht oder öffnet ein Magnetventil die Zufuhr von Kältemittel zum Verdampfer. Der Verdampfer ist in seiner Dimensionierung ähnlich einer Einzelanlage so ausgelegt, dass deren Kälteleistung oberhalb des Wärmeeintrags liegt. Bei normalem Betrieb sind nach dem Gleichzeitigkeitsfaktor immer eine gleiche Anzahl von Kühlstellen im Kühlbetrieb. Bei einem Gleichzeitigkeitsfaktor von beispielsweise 0,5 bei verschlossenen Kühlstellen nachts würde nur 50 % der Kälteleistung benötigt. Steigt nun der Wärmeeintrag in den Kühlstellen tagsüber durch Öffnen der Kühltüren, öffnen gleichzeitig mehr Ventile und sowohl die Temperatur als auch der Saugdruck in der Rückleitung zwischen den Verdampfern und dem Verdichter steigen. Temperatur oder Druck vor dem Verdichter dienen als Regelgröße für die Leistungsregelung des Verdichters. Die Stellgröße ist die Verdichterleistung oder das Expansionsventil, mit der der Sollruck und damit die Temperatur des Kältemittels elektronisch geregelt werden. Mit der Steigerung der Verdichterleistung reduziert sich der Saugdruck und erhöht sich der Druck auf der Hochdruckseite. Es kann mehr Wärme abgeführt werden.

Je nach Kompressionstechnik des Verdichter unterscheidet sich die Stelleinrichtung. Bei Kolbenverdichtern kann die Anzahl der Kolben bzw. die Anzahl der Zylinder eines Kolbens verändert werden. Sie werden ab- oder zugeschaltet, wodurch sich eine stufenweise Leistungseinstellung ergibt. Einige Kolbenverdichter sind auch drehzahl geregelt. Schrauben- und Turboverdichter regeln ihren Kältemittelstrom bzw. ihre Leistung durch einen Schieber oder eine Drossel. Durch den geringeren Kältemittelstrom ist eine geringere Antriebsleistung zur Verdichtung notwendig.

Indirekte Kältesysteme sind in ihrer Regelung unabhängig von der Regelung der Kühlstellen. Die Regelung der Kühlstellen, die von dem Kaltwasser durchflossen werden, erfolgt durch eine Leittechnik, die am Beispiel von Gebäude zusätzlich die Regelung weiterer Aufgaben wie der Lüftung übernimmt. Als Sollgrößen für die Kühlung existieren Werte, die lediglich von der Leittechnik gemessen und über die Durchströmungsmenge des Kaltwassers geregelt werden. Da es vermieden werden sollte, den Kaltwasserstrom aufgrund von Vereisungsgefahr am Verdampfer der Kälteanlage zu variieren, erfolgt die Regelung an den Kühlstellen beispielsweise durch eine Bypass-Regelung, bei der nicht benötigtes Kaltwasser an der Kühlstelle vorbeigeleitet wird. Ein Temperatursensor misst die Vor- und Rücklauftemperatur des Kaltwassers. Bei Abweichungen zur Solltemperatur wird die

Leistung des Verdichters elektronisch verändert. Zur Übermittlung von Betriebszuständen sowie zur Einstellung von beispielsweise Betriebszeiten ist die Kälteanlage über ein Bus-System an die Leittechnik angeschlossen.

### 2.3.5. Lastverhalten im Betrieb

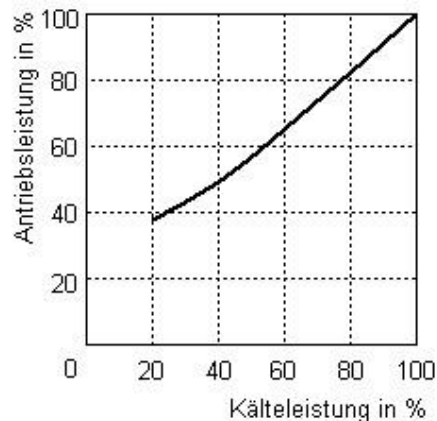
Aus der Regelung der Kälteanlage ergibt sich das Lastprofil des Verdichters. Die dezentrale Anlage kann durch die 2-Punktregelung nur mit Volllast betrieben werden. Es entsteht ein durch die Taktzeiten gekennzeichnetes Lastprofil. Die Verbundanlage weist je nach Gleichzeitigkeitsgrad der Kühlstellen und nach der Regelbarkeit des Verdichters ein fluktuierendes Lastprofil auf. Die Bandbreite des Teillastbetriebs reicht dabei von 20 % bis 100 % Kälteleistung [Bendig 2009].

Die stufenlose oder stufenweise Regelbarkeit ist von hoher Bedeutung, da gerade große Anwendungen konkrete Temperaturanforderungen besitzen. Leistungsstarke Kälteanlagen können jedoch nicht beliebig oft ein- und ausgeschaltet werden, da das beim Einschaltvorgang ausgeworfene Öl aus dem Verdichter wieder zum Verdichter zurückgelangen muss. Bei häufigen kurzen Einschaltzeiten kann Öl-mangel auftreten. Die Tabelle 2.9 stellt die Mindestschaltzeiten von Verdichtern dar. Durch große Kältemittelnetze bzw. durch Pufferspeicher für Kaltwasser in indirekten Systemen können stark fluktuierende Kältelasten ausgeglichen und zu einem begradigten Lastprofil des Verdichters überführt werden.

**Tabelle 2.9 Schaltanforderungen von Verdichtern [Quelle: Recknagel et al. 2009]**

<b>Art der Kompressionstechnik</b>	<b>maximale Einschaltungen pro Stunde</b>	<b>Mindestlaufzeit nach Einschaltung in min</b>
Hubkolbenverdichter	6 bis 8	3 bis 5
Schraubenverdichter	3	10
Turboverdichter	1	20

Im Teillastbetrieb von Verbundanlagen ist die Betrachtung des Verhältnisses der erzeugten prozentualen Kälteleistung zur benötigten, prozentualen Antriebsleistung wichtig. Mit dieser Relation kann das Stromverhaltensverhalten bei geringerem Kältebedarf bzw. bei Lastmanagement im Teillastbereich bewertet werden. Bei hohen positiven Abweichungen wäre selbst bei geringer Kälteleistung der elektrische Leistungsbedarf noch immer hoch, so dass sich bei der Wärmeabführung zu einem späteren Zeitpunkt der Gesamtenergiebedarf im Vergleich zur konstanten Wärmeentnahme erhöht. Dann würde als Lastmanagement nur die komplette Verlagerung der Last und damit die Abschaltung der Kälteanlage energetisch sinnvoll sein. Abbildung 2.17 zeigt die reale Teillastkurve eines Schraubenverdichters. Die Kurven sind für Turbo- und Kolbenverdichter vergleichbar, nur dass bei dem Kolbenverdichter die Laststufen beachtet werden müssen.



**Abbildung 2.17 Teillastverhalten eines Schraubenverdichters [in Anlehnung an Recknagel et al. 2009]**

Aus dem Verlauf der Kurve kann geschlossen werden, dass das Teillastverhalten bis etwa 60 % der Kälteleistung mit einer ähnlich starken Reduktion der Antriebsleistung einhergeht. Unter 60 % wird jedoch eine Abnahme des Wirkungsgrad deutlich sichtbar. Bei einer Absenkung der Kälteleistung auf 40 % sind immer noch 50 % der Antriebsleistung zur Kälteerzeugung notwendig. Da der Betrieb der Kälteanlage oft im Teillastbereich durchgeführt wird und eine Lastverlagerung meist zu einer Reduktion der Last auf unter 60 % eine führt, ist das Lastmanagement im Teillastbereich energetisch nicht zu empfehlen. Eine komplette Abschaltung der Kälteanlage ist aus energetischen Gründen sinnvoller. Sind jedoch mehrere Verdichter parallel zu einem Verdichtersatz zusammengeschlossen, kann auch im Teillastbetrieb der Anlage bei den Betriebspunkten erreicht werden, an dem gerade ein Verdichter abgeschaltet wurde und die noch verbleibenden Verdichter im Volllastbereich arbeiten.

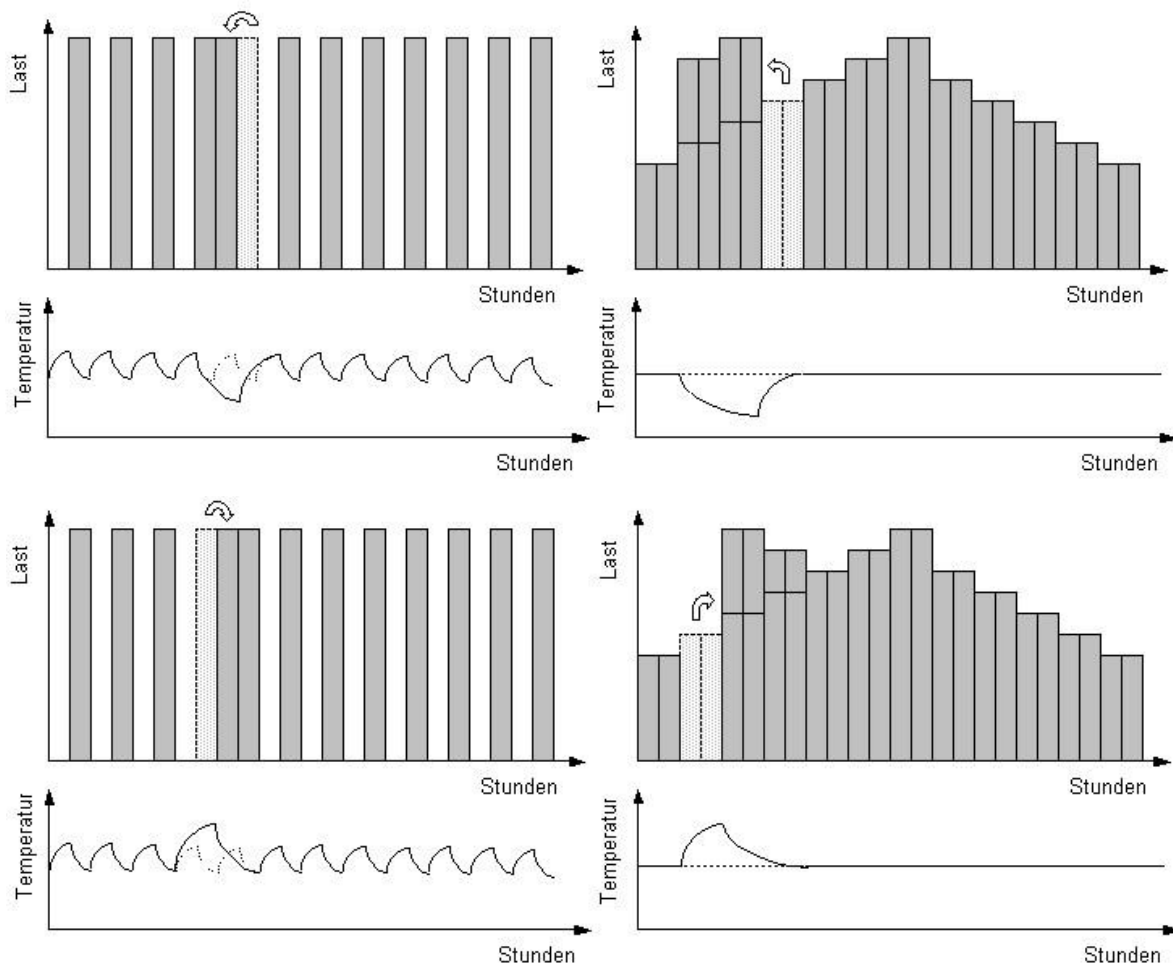
#### **2.4. Kühlstrategien zur Lastverlagerung**

Voraussetzung für ein Lastmanagement in der Kälteerzeugung ist, dass die Kühlanforderungen eingehalten werden. Damit ist gemeint, dass kurzfristige Temperaturabweichungen ohne negative Auswirkungen durchaus denkbar sind, wobei die Temperatur langfristig wieder den geforderten Sollwert annehmen soll. Energiebilanziell wird der Kühlstelle damit über den Verlagerungszeitraum insgesamt der gleiche Wärmeeintrag entzogen. Diese Aussage folgt der Annahme, dass wie bei den meisten Kühlanwendungen die tolerierbare Temperaturschwankung klein im Vergleich zum Unterschied zwischen der Kühl- und der Umgebungstemperatur ist und sich bei den Schwankungen keine Unterschiede in Wärmeströmungsverhalten ergeben.

Der Zeitpunkt und bei den Verbundanlagen zusätzlich die Höhe der Last können also unter der Bedingung variiert werden, dass die Wärmeentnahmearbeit über dem Zeitraum konstant bleibt. Für einen festgelegten Zeitraum der Anlagenabschaltung zu Lastmanagementzwecken kann die Einhaltung dieser Bedingung mit zwei Strategien realisiert werden:

- Vorkühlstrategie
- Nachkühlstrategie

Entweder muss der Kühlstelle vor dem Abschalten der Kälteanlage genügend Wärme entzogen werden, damit sie nach der Lastverlagerung den alten Temperaturpfad erreicht, oder der Wärmeentzug des erhöhten Wärmeeintrages erfolgt direkt im Anschluss an die Abschaltung. Die beiden Strategien mit der Lastverlagerung und der Temperaturänderung sind in Abbildung 2.18 sowohl für dezentrale Anlagen auf der linken Seite als auch für Verbundanlagen auf der rechten Seite grafisch dargestellt. Das Lastprofil der Verbundanlage ist beispielhaft gewählt.



**Abbildung 2.18 Vorkühl- (oben) und Nachkühlstrategie (unten) bei dezentralen Anlagen und Verbundanlagen**

Sowohl bei der dezentralen als auch der Verbundanlage ist das Lastprofil ohne Lastverlagerung zu sehen. Im Fall der Lastverlagerung wird hell hinterlegte Bereich nach den Pfeilen in den davor liegenden bzw. den danach folgenden Zeitbereich verschoben. Dabei entstehen die jeweils abgebildeten Temperaturveränderungen. Die verlagerte Last kann jedoch nicht einer Erhöhung über die installierte Leistung der Anlage hinaus führen. Aus diesem Grund könnte sich die Abführung der zusätzlichen Wärme auf einen langen Zeitraum erstrecken.

Zu beachten ist, dass wie im Kapitel 2.3.1 beschrieben mit einer Verringerung der Verdampfungstemperatur des Kältemittels auch eine Verringerung des COP und damit ein erhöhter Stromverbrauch zur gleichen Wärmeentnahme erfolgt. Deshalb sollte nach Möglichkeit die reduzierte Temperatur der Vorkühlstrategie ohne Verringerung der Verdampfungstemperatur erreicht werden.

## 2.5. Zusätzliche externe Kältespeicher

Neben dem Einsatz von Kühleinrichtungen als thermische Speicher können auch zusätzliche externe Kältespeicher zur Lastverlagerung verwendet werden. Es kann unterschieden werden zwischen:

- Sensible Speicher (ohne Phasenübergang)
- Latente Speicher (mit Phasenübergang)

Eisspeicher als latente Speichereinrichtungen, welche die Kälte beim Phasenübergang von Wasser auf Eis speichern haben besondere Vorteile im Volumen. Im Gegensatz zu Kaltwasserspeicher mit einer Speicherkapazität von  $1,16 \text{ kWh/m}^3 \text{ K}$  kann ein Eisspeicher etwa 40 bis  $60 \text{ kWh/m}^3$  aufnehmen.

Kältespeicher eignen sich besonders für den Betrieb von Kälteanlagen bei:

- Kühlanwendungen, die eine Kühltemperatur im Bereich von  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  haben
- Ausnutzung von zeitlich dynamischen Tarifsystemen bei Lastverlagerung
- Kälteanwendungen mit elektrischen Lastspitzen oder hohen Kältelasten innerhalb von wenigen Stunden am Tag

Eisspeicher können technisch effizient bei Prozessen oder der Lagerung wie der NK-Kühlung angewendet werden, die knapp über den Gefriertemperatur liegen. Zur Eisbildung im Eisspeicher muss die Verdampfungstemperatur des Kältemittels zwischen  $-3$  und  $-8 \text{ }^\circ\text{C}$  liegen [Hilligweg, Kalb 2005, Bendig 2009]. Für die Klimatisierung liegt sie deutlich unter der notwendigen Temperatur, wodurch der Leistungsfaktor abnimmt und es zu einem höheren Energieverbrauch zur Deckung der Kältelast kommt. Kühlanwendungen im negativen Temperaturbereich können durch Eisspeicher gar nicht versorgt werden. Zur Variierung der Gefriertemperatur ist es möglich Sole als latentes Speichermedium zu nutzen. Diese Anwendungen konnten jedoch im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet werden.

Wirtschaftlich vorteilhaft kann ein Kältespeicher nur arbeiten, wenn durch die Lastspitzenreduktion oder die Lastverlagerung kalkulierbare Kosteneinsparungen entstehen, d.h. wenn beispielsweise die Spitzenlast und damit der Arbeitspreis des Strombezuges langfristig sinkt oder regelmäßige Lastverlagerungen im Zusammenhang mit dynamischen Tarifen zu Kosteneinsparungen führen, welche die Investitionskosten in einem geeigneten zeitlichen Rahmen refinanzieren. Die Investitionskosten für Eisspeicher liegen bei etwa  $30 \text{ €/kWh}$  Speicherkapazität [Recknagel et al. 2009]. Die Dimensionierung der Anlage erschließt sich aus dem Leistungsbedarf und der Verlagerungsdauer.

### 3. Lastmanagementpotenziale der Kälteerzeugung in der Stadt Mannheim

Mannheim ist eine Industriestadt mit etwa 310.000 Einwohnern im Südwesten Deutschlands an der Mündung des Neckars in den Rhein. Die Stadt ist bekannt für zahlreiche Unternehmenssitze und Produktionsstätten. Von den 145 Mill. m<sup>2</sup> Stadtfläche sind 55,6 % Siedlungs- und Verkehrsfläche. Mit 14.990.000 m<sup>2</sup> beträgt der Anteil der Gewerbe- und Industriefläche damit 10,3 % am gesamten Stadtgebiet. Bei einem Durchschnitt von 1,9 Personen pro Haushalt zählt die Stadt 169.770 Haushalte [Statistik-BW 2008a]. Es gibt in Mannheim in allen Geschäftsbereichen 8.124 Betriebsstätten mit 163.618 sozialversicherungspflichtig Beschäftigten [Statistik-BW 2008b]. Diese Zahlen schließen sowohl die Landwirtschaft, das produzierende Gewerbe, den Dienstleistungssektor als auch den öffentlichen Sektor ein. Wie bereits im Kapitel 2.2 ausführlich beschrieben gibt es typische Anwendungsbereiche, in denen Kälte benötigt wird. Diese Anwendungen sollen im folgenden Kapitel speziell für die Stadt Mannheim ausführlich untersucht werden, um Rückschlüsse auf das Lastmanagementpotenzial der Stadt ziehen zu können.

Eine detaillierte technische Untersuchung aller vorhandenen Kälteanlagen in der Stadt Mannheim kann nicht geleistet werden. Die Ermittlung der für ein Lastmanagement zur Verfügung stehenden Leistung von Kälteanlagen soll über typische Lastkategorien im Rahmen einer Potenzialanalyse erfolgen. Deren Durchführung macht eine vorangestellte, differenzierte Beschreibung der Methodik und Informationsbeschaffung erforderlich. Beschreibungen und die Zwischenergebnisse der empirischen Untersuchung zu den Anforderungen an Kälteanlagen sowie die Ausarbeitung von Hemmnissen stellen den Ausgangspunkt der Ermittlung des Lastmanagementpotenzials dar. Auf Basis dieser Darstellungen kann die Modellierung des zeitlich variablen Potenzials durchgeführt werden. Die Vorgehensweise führt jedoch zur Verwendung von Informationen und zur Bestimmung von Annahmen, die weitergehend hinterfragt und bestätigt werden müssen. In der Form von kritischen Anmerkungen werden diese Punkte eingehend diskutiert.

#### 3.1. Methodischer Ansatz

Dieses Kapitel wählt eine empirische Herangehensweise als methodischen Ansatz zur Herleitung von quantitativen Aussagen für ein Lastmanagement im Bereich der Kälteerzeugung. Empirische Vorgehensweisen eignen sich prinzipiell für wissenschaftliche Fragestellungen, bei denen keine fundierten theoretischen Beschreibungen vorliegen und dessen Zusammenhänge komplex verknüpft sind, so dass sie nicht aus rein logischen Schlussfolgerungen abgeleitet werden können. Zwar wurden bereits in Kapitel 2.1 deutschlandweit Aussagen zu Leistungs- oder Energiemengen in Bezug auf Lastverschiebung getroffen, jedoch sind diese Zahlen rein theoretische Abschätzungen und blenden weitere bedeutende Aspekte der Kälteerzeugung bzw. limitierende Faktoren der Kältenutzung aus. Differenzierte Informationen und Erfahrungen mit Lastmanagement bei Kälteanlagen sind kaum vorhanden. Anhand der durch die Empirie erlangten Vielzahl von Daten und deren Auswertung können Rückschlüsse bezüglich der wissenschaftlichen Fragestellung gezogen werden. Zwar sind die Ergebnisse abhängig von den in vielen Fällen subjektiven Informationen der verschiedenen Bezugsquellen, jedoch soll die Subjektivität der Aussagen durch Verifizierung anhand von Übereinstimmungen und den Vergleich zu bestehenden Informationen als allgemeingültige Informationen bestätigt werden.

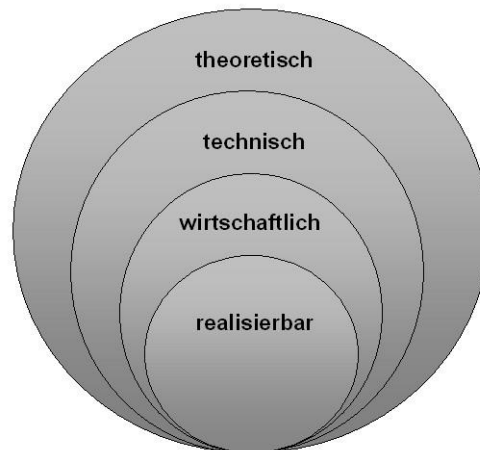
#### *Potenzialanalyse*

Die Aussagen aus der empirischen Untersuchung sollen die Grundlage für eine strukturierte Bewertung von Umsetzungsmöglichkeiten von Lastmanagement in der Kälteerzeugung einfließen. Diese Umsetzungsmöglichkeiten sind verschiedenen Formen von Hemmnissen unterworfen, die deren Realisierung behindern. Für die Herausarbeitung von Möglichkeitsniveaus in Abhängigkeit von

unterschiedlichen Einschränkungen ist die Potenzialanalyse ein geeignetes Instrument. Das Potenzial in unterschiedliche Dimensionen unterteilt [Seefeldt et al. 2007]:

- Theoretisches Potenzial
- Technisches Potenzial
- Wirtschaftliches Potenzial
- Realisierbares Potenzial

Dieser Unterteilung obliegt die Annahme, dass das darunter liegende Potenzial jeweils eine Teilmenge des darüber befindlichen Potenzials darstellt. Die Abbildung 3.1 zeigt den Zusammenhang grafisch. Als das theoretische Potenzial wird die erreichbare Gesamtmenge unter theoretisch möglichen, idealen Voraussetzungen betrachtet. Das technische Potenzial umfasst die Menge im technisch realisierbaren Umfang, wobei das wirtschaftliche Potenzial von der Menge unter der Bedingung des wirtschaftlich größten Nutzens ausgeht. Das realisierbare Potenzial beschreibt die verbleibende Menge, die nach Abzug des durch Hemmnisse nicht umsetzbaren Anteils erhalten bleibt.



**Abbildung 3.1 Struktur der Potenzialanalyse**

Für die Quantifizierung der Lastmanagementpotenziale wird in dieser Studie von den aktuell installierten Anlagen ausgegangen. Zukünftige Entwicklungen als auch Änderungen der installierten Technologien oder mögliche Effizienzverbesserungen werden vorerst nicht betrachtet. Dies ist für Eingrenzung einer sinnvollen Größenordnung ausreichend. Danach ist das theoretische Potenzial die gesamte je nach Branche zeitlich variable, elektrische Last der Kälteanlagen. Das Potenzial ist durch die Zeitvariabilität abhängig vom typischen Tages-, Wochen- und Jahreslastverlauf. Das maximale theoretische Potenzial ist die aggregierte, installierte elektrische Leistung der Anlagen abzüglich ihrer Überdimensionierung, da die Leistung der Kälteanlagen auf die maximale Kältelast unter Berücksichtigung einer branchenunterschiedlichen Leistungsredundanz dimensioniert ist.

Unter dem technischen Potenzial ist die Leistung zu verstehen, die unter Berücksichtigung von technischen Anforderungen der Kälteanlagen sowie gesetzlichen Bestimmungen zu Kühlanforderungen verlagerbar ist. Als wirtschaftliche Potenziale werden alle technischen Potenziale bezeichnet, die wirtschaftlich vorteilhaft sind. Realisierbare Potenziale gehen davon aus, dass es Hemmnisse unterschiedlicher Art gibt, die zu einer Einschränkung der Umsetzung von Lastmanagement führen.

## Vorgehen

Das Vorgehen bei der Potenzialanalyse für Lastmanagement erfolgt in mehreren Schritten. Auf Basis der vorangegangenen theoretischen Erkenntnisse werden Fragenkataloge erstellt, welche die Grundlage für die empirische Untersuchung bilden. Es werden daraus Bezugsquellen ausgewählt, die über die notwendigen Informationen verfügen. Zur Absicherung und Verifizierung der Informationen werden zu jeder Bezugsquelle mehrere Akteure befragt. Aus der Abbildung 3.2 gehen die unterschiedliche Bezugsquellen hervor. Dabei handelt es sich um Anlagenbetreiber, Forschungsinstitute, Anlagenhersteller sowie statistische Ämter oder die Stadtverwaltung der Stadt Mannheim. Anhand der Bezugsquellen wird die Kontaktaufnahme mit Gesprächspartner und letztendlich das Interview durchgeführt.



**Abbildung 3.2 Bezugsquellen zur empirischen Untersuchung**

Insgesamt wurden die Daten auf den folgenden Wegen beschafft:

- 28 Persönliche Interviews und Vor-Ort-Besuche auf Basis eines Fragenkatalogs
- 32 Telefoninterviews auf Basis eines Fragekatalogs
- Wissenschaftliche Fachliteratur
- Teilnahme an Fachtagungen

Für Daten bezüglich installierter Kälteanlagen beinhaltet der Fragenkatalog diese Themengebiete (ausführlicher Fragebogen siehe Anhang):

- Kältetechnik
  - Einsatzzweck
  - Technologie
  - Leistung
  - Regelung
  - Art und Größe der Kühlräume
- Kühlanforderungen
  - Temperaturbereiche

- Sonstige Kühlanforderungen
- Äußere Einflüsse
- Technische und wirtschaftliche Betriebsführung
  - Betriebszeiten
  - Einflüsse aus die Betriebsführung
  - Lastprofile bzw. andere Formen der Energieverbrauchserfassung
  - Tarifgestaltung
- Motivation für Lastmanagement

Die Auswertung der Daten erfolgt durch die Bestimmung charakteristischer Kennzahlen und Betriebsführungen der Kälteerzeugung innerhalb der Branchen. Über die Aggregation von Branchenzahlen und typischen Leistungen von Betriebsstätten wird das gesamte Leistungsangebot für die Kälteerzeugung dargestellt. Zur Einordnung und Strukturierung werden Lastprofilgruppen für die Branchen gebildet, die über vergleichbare Stromlastgänge der Kälteerzeugung verfügen. Dieses Leistungsangebot entspricht dem maximalen, theoretischen Potenzial der Kälteanlagen in der Stadt Mannheim. Mit den Ausschlusskriterien zur Bestimmung des technischen Potenzials und den Hemmnissen zur Schlussfolgerung auf das realisierbare Potenzial werden quantifizierte, maximal verlagerbare und damit zeitlich nicht variierende Verlagerungsleistungen als Zwischenergebnisse zusammengefasst. Die Zeitvariabilität der Potenziale wird durch eine Modellierung umgesetzt, mit der die verschiebbare Last je nach Potenzialart und Branche zeitlich differenziert ermittelt wird. Die kritischen Anmerkungen hinterfragen die Vorgehensweise, der Qualität der Informationen und Annahmen bezüglich ihrer Aussagefähigkeit. Es werden mögliche Auswirkungen auf die Energieversorgung und die Umwelt beleuchtet und weiterführende Fragestellungen herausgestellt.

### **3.2. Branchenzahlen für die Stadt Mannheim**

Für die Bestimmung des Lastmanagementpotenzials der Kälteerzeugung ist es sinnvoll, ein geeignetes Kriterium für die jeweilige Branche zu finden, über das Aussagen zur aggregierten Leistung getroffen werden können. Das Kriterium **Unternehmenszahlen** entspricht dem Kriterium **Betriebsstättenzahlen**, wenn ein Unternehmen jeweils nur einen Standort hat. Da viele Unternehmen in den untersuchten Branchen Filialen besitzen, erscheint das Kriterium Betriebsstättenzahlen für die weitere Betrachtung im Bereich der Prozesskühlung und Produktlagerung aufschlussreich. Bei der Klimatisierung ist allein die Erfassung der Zahl von Betriebsstätten nicht sinnvoll, da sich die Kälteanlagen in ihrer Dimensionierung und Auslegung nach der Größe des Gebäudes richten. Daher scheint das Kriterium **Flächenzahlen** in diesem Fall geeignet. Statistische Flächenzahlen beziehen sich aber häufig nur auf die Grundfläche der Standorte, nicht auf die Nutzfläche der Gebäude. Die Nutzfläche kann jedoch indirekt über die **Beschäftigungszahlen** der Branchen bestimmt werden. Aus diesem Grund werden die Branchenzahlen in der Tabelle 3.1 auf Basis der Beschäftigungszahlen angegeben.

**Tabelle 3.1** Branchenzahlen der ausgewählten Branchen mit Kühlanwendungen [Quelle: Statistik-BW 2008b, Statistik-BW 2009, StadtMannheim 2009]

	Branchen-		Branchen-		Betriebs-	Beschäftigungszahl / Zahl der Betten*	
	gruppe	Branche	gruppe	Branche			stättenzahl
<b>Nahrungsmittel</b>	<b>Herstellung</b>	Schlachthof	1	<b>Industrie</b>	Chemie	33	
		Fleischverarbeitung	47		Pharmazie	4	
		- davon Einzelhandel	31		Petrochemie	-	
		Fischverarbeitung	-		Raffinerie	-	
		Obst und Gemüse	-	<b>Sonstige</b>	Eissport-	2	
		Teigwaren, Ölsamen und Fette	4		stätte		
		Bäckerei	35	Pflanzen <sup>4)</sup>	116		
		- davon Einzelhandel	27				
		Süßwaren	1				
		Molkereiprodukte	-				
	Speiseeis	-					
	Molkerei	-					
	Fruchtsaftherstellung	-					
	Brauerei	1					
	<b>Verteilung / Lagerung</b>	Kühlhaus	10	<b>Klimatisierung</b>	Verwaltung	53	5.772
		Lebensmittel-EH	429		Büro	2.740	43.517
		- davon Minimarkt	202		Handel / Gewerbe	1.437	21.639
		Tankstelle	30		Industrie	330	33.930
		Kiosk <sup>1)</sup>	313		Hotel	47	5.220*
		Sonst. Filialen	249		Gaststätte	600	2.981 <sup>5)</sup>
Getränke-EH		57					
Hotel / Gaststätte		647					
Kantine <sup>2)</sup>		80					
Eisdiele <sup>3)</sup>		43					
Apotheke	101						

<sup>1)</sup> inkl. 50 % mobile Imbissstellen

<sup>2)</sup> Großkantinen mit über 100 Essen täglich

<sup>3)</sup> Eisdiele mit und ohne eigener Herstellung

<sup>4)</sup> umfasst Einzelhändler im Blumengroßmarkt wie auch die im Branchenhandbuch aufgeführten Läden außerhalb des Großmarktes

<sup>5)</sup> Zahl der Beschäftigten für 529 Gaststätten

Die Anzahl der Unternehmen in der Nahrungsmittelherstellung ist gering. Neben einem Schlachthof, einem Süßwarenhersteller und einer Brauerei gibt es vier Unternehmen im Bereich Teigwaren, Ölsamen und Fette sowie 47 Fleischverarbeitungsbetriebe und 35 Bäckerei mit eigener Produktion. Zu den Fleischverarbeitungsbetrieben gehören Fleischzerlegungsbetriebe, Geflügelfleischzubereitungsbetriebe und Fleischereien im Einzelhandel mit eigener Herstellung. Zu den Bäckereien zählen sowohl Großbäckereien als auch Bäckereien im Einzelhandel mit eigener Herstellung. Die Betriebe haben jeweils eine Betriebsstätte.

Im Bereich Verteilung / Lagerung von Nahrungsmittel gibt es 227 Discounter, Supermärkte und SB-Warenhäuser sowie 202 Minimärkte. Die Zahl der Kioske beträgt 313, wobei zwischen mobilen und stationären Imbissstellen differenziert werden muss. Die 249 sonstigen Filialen umfassen Fleischerei-, Fisch-, Molkereiprodukte-, Obsthändler sowie Bäckereifilialen ohne eigene Herstellung. Die Zahl der Hotels und Gaststätten schließt Cafés und Bars aus.

Auch die Zahl der relevanten Industriebetriebe ist mit 33 Chemieunternehmen und 4 Pharmazieunternehmen eingeschränkt. In Mannheim gibt es zudem im Bereich Sonstiges 2 Eissportanlagen und 116 Blumenhändler. Darunter befinden sich im Blumengroßmarkt 51 Einzelhändler und 65 weitere im restlichen Stadtgebiet.

In der Klimatisierung umfasst die Verwaltung 53 Betriebsstellen mit 5.772 Beschäftigten. Bürogebäude werden vom Verlagswesen, Medienunternehmen, Telekommunikations-unternehmen, Informationsdienstleistern, Finanzdienstleistern, Versicherungen, Beratungsunternehmen, Ingenieurbüros, Marktforschungsunternehmen sowie Unternehmen im Gesundheitswesen genutzt. Innerhalb dieser Unternehmen existieren in Mannheim 2.740 Betriebsstätten mit 43.517 Beschäftigten. Handel und Gewerbe werden durch 1.437 Betriebsstätten mit Einzel- und Großhandel mit insgesamt

21.639 Beschäftigten repräsentiert. Relevante Bereiche der Industrie schließen die Herstellung von Papier und Druckerzeugnissen, die chemische und pharmazeutische Industrie, Metallverarbeitung, Maschinenbau, Elektroindustrie, die Automobilindustrie sowie Forschung und Entwicklung ein. In der diesen Bereichen gibt es 330 Betriebsstätten mit 33.930 Beschäftigten. Weiterhin beträgt die Zahl der Hotels, Gasthöfe und Pensionen in Mannheim 47 mit einer Anzahl von 5.220 Betten. Es gibt 600 Gaststätten, von denen 529 mit einer Beschäftigtenzahl von 2.981 erfasst sind.

### 3.3. Empirische Daten der Betriebsführung und -anforderungen der Kälteanlagen

Die Unterschiede und Möglichkeiten der Auslegung von Kälteanlagen sind im Allgemeinen sehr groß. Kälteanlagen werden daher individuell auf die Anforderungen der jeweiligen Branche oder sogar des einzelnen Unternehmen angepasst. Die im Rahmen dieser Untersuchung erlangten Daten sollen im Folgenden einen Überblick über die in der Stadt bzw. im Raum Mannheim installierten Kältesysteme verschaffen.

Es werden die grundlegenden Aussagen aus den persönlichen Interviewgesprächen sowie weiteren Telefoninterviews dargestellt. Die Daten sind den jeweiligen Branchen zugeordnet, bleiben jedoch anonymisiert. Um eine gute Vergleichbarkeit innerhalb und zwischen den Branchen zu gewährleisten, wurde versucht, die Informationen nach dem beschriebenen Fragenkatalog thematisch zu strukturieren. Je nach Kenntnisstand und Bereitstand der Gesprächspartner konnten die Daten mehr oder weniger ausführlich zusammengetragen werden.

**Tabelle 3.2 Datenerhebung im Rahmen der Interviews in der Branchengruppe Nahrungsmittel – Herstellung**

<b>Branchengruppe: Nahrungsmittel - Herstellung</b>	
<b>Branche: Fleischverarbeitung (Schlachthof)</b>	
Kältetechnik:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 Schraubenverdichter mit 264 kW<sub>el,inst</sub> mit COP etwa 3,0</li> <li>- 5 Kühllager mit 3.205 m<sup>3</sup> NK und Schockfroster</li> <li>- max. Kältebedarf NK 444 kW<sub>therm</sub> und Schockfroster 232 kW<sub>therm</sub></li> <li>- Steuerung über Unisab II Control, manuelle Einstellung der Solltemperaturen</li> </ul>
• Kühlanforderungen:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kerntemperatur des Fleisches 4 °C für die Abholung Anforderung des Kunden)</li> <li>- Solltemperatur des Kühllagers 2 bis 4 °C</li> <li>- Kühldauer von 35 °C nach dem Frosten auf 4 °C beträgt 8 h</li> </ul>
• Betriebsführung:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schlachtung Mo bis Fr von 5:00 bis 12:00 Uhr, Abholung jeweils 3:00 bis 6:00 Uhr</li> <li>- Grundlast bei erreichter Kerntemperatur beträgt 80 kW<sub>el</sub></li> <li>- während Be- und Entladung sind Lagertüren offen sowie Verdampferenteisung (Anlagenbetrieb notwendig)</li> <li>- Lagerkühlung ganzwöchig und ganzjährig, am Wochenende evt. einzelne Lager abgeschaltet</li> <li>- Unterscheidung Tag/Nacht-Tarif</li> </ul>
<b>Branche: Fleischverarbeitung (10 Fleischverarbeitungsunternehmen)</b>	
• Kältetechnik:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 8 Kolbenverdichter mit 112 kW<sub>el,inst</sub> NK und 6 mit 84 kW<sub>el,inst</sub> TK</li> <li>- 10 Kühllager mit 2.500 m<sup>3</sup> NK, 2.500 m<sup>3</sup> Verarbeitungsraum im Sommer schwach gekühlt sowie 500 m<sup>3</sup> TK</li> </ul>
• Kühlanforderungen:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solltemperatur NK bei 2 bis 4 °C, TK bei -18 °C</li> </ul>
• Betriebsführung:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lagerkühlung ganzwöchig und ganzjährig</li> <li>- Fleischverarbeitungsunternehmen sind Nutzer, nicht aber Betreiber der Kälteanlage</li> </ul>

<b>Branche: Molkereiprodukte (außerhalb Mannheim)</b>	
• Kältetechnik:	- 3 Kolbenverdichter mit 10,5 kW <sub>el,inst</sub> NK - Eiswasserspeicher mit 210 kW Speichervolumen - 5 Kühlzellen mit 180 m <sup>3</sup> für Lagerung, 1 offenes Kühlregal mit 1,4 m <sup>3</sup> für Verkauf, 1 Kühlraum mit 12,5 m <sup>3</sup> für Reifeprozess
• Kühlanforderungen:	- 5 Kühllager mit 4 bis 6 °C, offenes Kühlregal mit 4 °C und Kühlraum mit 14 °C
• Betriebsführung:	- Lagerkühlung und Prozesskühlung ganzwöchig und ganzjährig
<b>Branche: Brauerei</b>	
• Kältetechnik:	- 3 Schraubenverdichter mit 2432 kW <sub>therm</sub> (etwa 810 kW <sub>el,inst</sub> bei COP 3,0) - Prozesskühlung für Gärungsprozess, Würzekühlung und Glykolkühlung für weitere Prozessschritte - Steuerung durch Siemens Energy Control System (ECS), 6-stufige Leistungsregelung
• Kühlanforderungen:	- Würze im Gärungsprozess muss innerhalb von 14 Tagen zwischen 14 °C bis 0 °C kontrolliert gekühlt werden - Würzekühlung erfolgt mit Eiswasser bei 3 °C im 3 h-Takt - individuelle Anforderungen der anderen Prozesse
• Betriebsführung:	- saisonale Produktionsschwankungen (im Sommer höhere Produktion) - Stromfondtarif orientiert an den Strombezugspreisen

Einige Unternehmen im Bereich der industriellen und gewerblichen Nahrungsmittelhersteller führen bereits Projekte zu Energieeffizienz bei Anlagenkomponenten durch. Gerade die kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) haben bei der Ansprache angemerkt, dass sie keine Ressourcen besitzen, um sich mit dem Thema Lastmanagement zu beschäftigen. Einige andere Unternehmen waren jedoch an einem Gespräch und der Auseinandersetzung mit diesem Thema sehr interessiert.

Je nach Größe der Anwendung werden Kolben- oder Schraubenverdichter in einem direkten Kältekreislauf eingesetzt (Tabelle 3.2). Durch die individuellen **Anwendungen** sind die Anlagen in Größe und Auslegung nicht standardisierbar. Der Anteil von Prozess- und Lagerkühlung ist von Branche zu Branche unterschiedlich. Während die Brauereien die Kälte lediglich zu Prozesszwecken benötigen, verfügt die Branche der Molkereiprodukte fast ausschließlich über Anlagen zur Lagerkühlung. Bei der Fleischverarbeitung besitzen große Betriebe oder Schlachthöfe neben der Lagerkühlung zusätzliche Einrichtungen zur Schockfrostung. Der Anteil NK / TK der Kühllagerung bei der Fleischverarbeitung sowie der Molkereiprodukte beträgt 100 % / 0 %, d.h. sie verfügen in dieser Untersuchung nur über NK.

Lagerkühlung wird 24 Stunden täglich benötigt, wobei gerade bei Be- und Entladezeiten der Wärmeaustausch durch geöffnete Türen steigt und der Betrieb der Anlagen gewährleistet werden muss. Im Schlachthof liegen diese Be- und Entlade- sowie Schlachtzeiten zwischen 3:00 und 12:00 Uhr.

Gelangen tierische Nahrungsmittel wie zum Beispiel im Schlachthof mit Kerntemperaturen oberhalb der Sollagertemperatur in die Kühllager, muss Kälte erzeugt werden, um die Kerntemperatur umgehend auf den Sollwert abzusenken. Gerade in der Fleischverarbeitung übertreffen die **Anforderungen** an die Lagertemperatur die in Kapitel 2.2.4 beschriebenen gesetzlichen Richtlinien. Die hohen Anforderungen sind auf den darauf folgenden Transport zurückzuführen, bei dem oftmals eine konstante Lagertemperatur nicht gehalten werden kann. Im Schlachthof wird auf diesem Grund eine Raumsolltemperatur von etwa 2 °C angestrebt, damit die Kerntemperatur des Fleisches am Ende der Lagerung 4 °C beträgt und während des Transports die vorgeschriebene Temperatur von 7 °C nicht überschreitet. Die Prozesskühlung fällt sowohl zeitlich als auch mengenmäßig nach Bedarf an.

Der gesamte Bereich der Nahrungsmittelkühlung wird von der Lebensmittelüberwachung der Stadt Mannheim kontrolliert. Nach dem Hazard Analysis and Critical Control Point-Konzept (HACCP), einem standardisierten Verfahren zum Qualitätsmanagement bei Lebensmitteln, muss jede Betriebsstelle täglich die Temperaturen ihrer Kühlstellen aufnehmen und für Kontrollen speichern.

Nicht immer ist der **Betreiber** der Kälteanlagen auch der Nutzer der Kälte. In einem Fall bestehen die Nutzer aus mehreren Unternehmen mit unterschiedlichen Kühlanforderungen und Nutzungspräferenzen gegenüber dem Betreiber. Kühlleistungen werden dabei nicht individuell zugeordnet und abgerechnet, sondern insgesamt erfasst. In der Branchengruppe Nahrungsmittelherstellung werden als Daten der Kälteerzeugung mit Ausnahme der Brauerei nur monatliche oder jährliche Stromverbrauchswerte erfasst.

Die **Tarifstrukturen** gleichen denen industrieller oder gewerblicher Kunden. Es gibt sowohl normale Tarife basierend auf Leistungs- und Arbeitspreis, Niedriglast- und Hochlasttarife als auch Stromfonds-Tarife orientiert an den Strombezugspreise des Energieversorgers. Sie gewichten den Tarif nach dem Bezug von Grundlast- und Spitzenlastprodukten.

**Tabelle 3.3 Datenerhebung im Rahmen der Interviews in der Branchengruppe Nahrungsmittel – Verteilung / Lagerung**

<b>Branchengruppe: Nahrungsmittel – Verteilung / Lagerung</b>	
<b>Branche: Kühlhaus 1</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:</li> <li>• Kühlanforderungen:</li> <li>• Betriebsführung:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 4 Schraubenverdichter mit 1.800 kW<sub>therm</sub> Kälteleistung, etwa 1.200 kW<sub>el,max</sub> Strom bei 70 % Kühlung, also 840 kW<sub>el,max</sub> Antriebsleistung (COP 2,1), zusätzlich Schockfroster</li> <li>- 165.000 m<sup>3</sup> Kühlfläche, davon 95 % TK und 5 % NK</li> <li>- TK-Temperatur nach Kundenanforderung, normal – 18 °C</li> <li>- Temperaturkonstanz ist Qualitätskriterium</li> <li>- Grundlast bei geschlossenen Türen beträgt etwa 100 kW Strom (auch Rechner, etc.), stetig Wärmeeintrag durch z.B. Licht</li> <li>- Lufttemperaturänderung bei 24 h Anlagenunterbrechung etwa 3 °C (geschlossene Türen vorausgesetzt)</li> <li>- Just-In-Time-Logistik, d.h. Lager wird täglich abends beladen und nachts entladen</li> <li>- Lagerkühlung und Prozesskühlung ganzwöchig und ganzjährig</li> <li>- Lastverlauf entgegengesetzt zum Strompreis</li> <li>- Teilnahme an Lastmanagement durch Rundsteuersignal</li> <li>- Tarifstruktur mit Strombändern und Spotmarktpreisen</li> </ul>
<b>Branche: Kühlhaus 2</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:</li> <li>• Kühlanforderungen:</li> <li>• Betriebsführung:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 7 Kolbenverdichter (2 x 3 Verdichter und 1 extra), 28.748 kWh Stromverbrauch im August, etwa 80 % für Kühlung</li> <li>- 5 Kühllager mit 776 m<sup>3</sup> NK, 1 Durchgangsraum mit 436 m<sup>3</sup> NK sowie 2 Kühllager mit 1232 m<sup>3</sup> TK</li> <li>- Steuerung über BKT MMA1</li> <li>- Kühllager NK bei 1 bis 3 °C, Kühllager TK bei – 24 °C</li> <li>- Just-In-Time-Logistik, d.h. Lager wird täglich abends beladen und nachts entladen</li> <li>- Lagerkühlung und Prozesskühlung ganzwöchig und ganzjährig</li> </ul>
<b>Branche: Kühlhaus 3</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:</li> <li>• Kühlanforderungen:</li> <li>• Betriebsführung:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 6 Kühllager mit 510 m<sup>2</sup> NK-Kühlfläche, d.h. etwa 2000 m<sup>3</sup> für Obst und Gemüse</li> <li>- NK-Kühlung je Kühllager zwischen 2 und 8 °C</li> <li>- Lagerkühlung und Prozesskühlung ganzwöchig und ganzjährig</li> </ul>

<b>Branche: Kühlhaus 4</b>	
• Kältetechnik:	- 3.000 m <sup>2</sup> NK-Kühlung für Fleischwaren, d.h. etwa 12.000 m <sup>3</sup>
• Kühlanforderungen:	- NK-Kühlung bei 2 °C
• Betriebsführung:	- Lagerkühlung und Prozesskühlung ganzwöchig und ganzjährig
<b>Branche: Kühlhaus 5</b>	
• Kältetechnik:	- 3 Kolbenverdichter für NK und 2 Kolbenverdichter für TK mit 60 kW <sub>therm</sub> Kälteleistung - 1 NK-Kühlager mit 2000 m <sup>3</sup> und 1 TK-Kühlager mit 50 m <sup>3</sup>
• Kühlanforderungen:	- Solltemperatur der NK-Kühlung bei 2 °C mit Schwankungsrahmen um +2 °C (MHD), TK-Kühlung bei -18 °C
• Betriebsführung:	- Just-In-Time-Logistik, d.h. Lager wird täglich abends zwischen 21:00 und 0:00 Uhr beladen und nachts zwischen 1:00 und 5:00 Uhr entladen - Lagerkühlung und Prozesskühlung ganzwöchig und ganzjährig - TK-Kühlung wird nur unregelmäßig benötigt - durch geringe Isolierung hoher Wärmeeintrag und stetig hoher Kühlbedarf
<b>Branche: Lebensmittel-EH (Supermarkt 1 mit etwa 1500 m<sup>2</sup> Verkaufsfläche)</b>	
• Kältetechnik:	- 4 Kolbenverdichter für NK und 4 Kolbenverdichter für TK, Kälteleistung nicht bekannt - 22 Kühlmöbel und 14 Kühlzellen: 76 m NK- und 25 m TK-Kühlmöbel sowie 144 m <sup>3</sup> NK- und 72 m <sup>3</sup> TK-Kühlzellen, zudem etwa 72 m <sup>2</sup> Weinabteilung - 40 % der NK- und 0 % der TK-Kühlmöbel offen (nachts und außerhalb der Öffnungszeiten verschließbar) - 5,3 % der NK- und 4 % der TK-Kühlmöbel steckerfertig - Steuerung durch Frigodata XP
• Kühlanforderungen:	- TK bei etwa -20 °C sowie NK zwischen 0 und 8 °C je nach Anwendung - kurze Temperaturschwankungen von ±2 °C sind möglich - Alarm bei 6 °C Sollwert-Temperaturüberschreitung oder 60 min ohne Kühlung
• Betriebsführung:	- morgens Beladung der Kühlmöbel, tagsüber regelmäßige Öffnung verschlossener Kühlmöbel, abends bis 20:00 Uhr Hauptgeschäftszeit - 2 Mal pro Tag Auftauphase der Verdampfer gegen Vereisung
<b>Branche: Lebensmittel-EH (Supermarkt 2 mit etwa 1500 m<sup>2</sup> Verkaufsfläche)</b>	
• Kältetechnik:	- Kälteleistung nicht bekannt - 80 m NK- und 22,5 m TK-Kühlmöbel - 92,5 % der NK- und 0 % der TK-Kühlmöbel offen (nachts und außerhalb der Öffnungszeiten verschließbar) - 26,9 % der NK- und 35,6 % der TK-Kühlmöbel steckerfertig
• Kühlanforderungen:	- siehe Beschreibung der Anwendungsbereiche
• Betriebsführung:	- siehe Supermarkt 1
<b>Branche: Lebensmittel-EH (Discounter 1 mit etwa 600 m<sup>2</sup> Verkaufsfläche)</b>	
• Kältetechnik:	- Kälteleistung nicht bekannt - 23 m NK- und 20 m TK-Kühlmöbel - 65,2 % der NK- und 0 % der TK-Kühlmöbel offen (nachts nicht verschließbar) - 34,8 der NK- und 100 % der TK-Kühlmöbel steckerfertig
• Kühlanforderungen:	- siehe Beschreibung der Anwendungsbereiche
• Betriebsführung:	- siehe Supermarkt 1
<b>Branche: Lebensmittel-EH (Discounter 2 mit etwa 700 m<sup>2</sup> Verkaufsfläche)</b>	
• Kältetechnik:	- Kolbenverdichter mit etwa 30 kW <sub>therm</sub> , d.h. etwa 10 kW <sub>el,inst</sub> (COP 3,0) nur für NK - 3 Kühlmöbel und 3 Kühlzellen: 16 m NK- und 5 m TK-Kühlmöbel sowie 25 m <sup>2</sup> NK-Kühlzellen - 100 % der NK- und 0 % der TK-Kühlmöbel offen (50% NK nachts nicht verschließbar)

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kühlanforderungen:</li> <li>• Betriebsführung:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0 % der NK- und 100 % TK-Kühlmöbel steckerfertig</li> <li>- siehe Beschreibung der Anwendungsbereiche</li> <li>- siehe Supermarkt 1</li> </ul>
<b>Branche: Lebensmittel-EH (Minimarkt mit etwa 400 m<sup>2</sup> Verkaufsfläche)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:</li> <li>• Kühlanforderungen:</li> <li>• Betriebsführung:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3 m NK- und 18 m TK-Kühlmöbel</li> <li>- 100 % der NK- und 0 % der TK-Kühlmöbel offen</li> <li>- 100 % der NK- und TK-Kühlmöbel steckerfertig</li> <li>- siehe Beschreibung der Anwendungsbereiche</li> <li>- siehe Supermarkt 1</li> </ul>
<b>Branche: Hotel / Gaststätte</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:</li> <li>• Kühlanforderungen:</li> <li>• Betriebsführung:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3 Kolbenverdichter für NK mit 7,5 kW<sub>el,inst</sub> und 2 Kolbenverdichter für TK mit 5 kW<sub>el,inst</sub></li> <li>- 29 NK-Kühlmöbel, 12 NK-Kühlräume und 2 TK-Kühlräume</li> <li>- k.A.</li> <li>- k.A.</li> </ul>

Die Nahrungsmittelverteilung und -lagerung zeichnet sich dadurch aus, dass der Großteil der Betriebsstätten Filialen sind und die angestellten Mitarbeiter vor Ort über wenig Informationen bezüglich der Anlagentechnik oder der Betriebsführung verfügen. In dieser Branchengruppe gibt es standardisierte Anlagentechnik zur Lagerkühlung in der Form von serienproduzierten Anlagenkomponenten. Bei kleinen Kühllhäusern überwiegt der Anteil an NK, während die großen Kühllhäuser vorwiegend bei TK lagern. Große Kühllhäuser verfügen wie das hier beschriebene Kühlhaus 1 über Schockfroster (Tabelle 3.3).

Als **Anlagentechnologie** werden lediglich bei dem großen Kühlhaus Schraubenverdichter eingesetzt, sonst werden Kolbenverdichter verwendet. TK-Bereiche der Kühllhäuser sind bei einem schlechteren COP besser gedämmt und werden über den NK-Bereich be- und entladen. Damit haben TK-Bereiche von Kühllhäusern etwa den gleichen Leistungsbedarf pro m<sup>2</sup> wie NK-Bereiche. Allgemein konnte festgestellt werden, dass große Kühllhäuser besser gedämmt sind und eine effiziente Technologie zur Be- und Entladung besitzen. Bei geschlossenen Türen würde sich die Lufttemperatur eine gut gedämmten Kühllhauses um etwa 3 °C pro Tag erwärmen. Jedoch ist eine regelmäßige, tägliche Be- und Entladung und damit die Öffnung der Türen durch die Just-In-Time-Logistik erforderlich. Angaben zur Leistung der Kälteanlagen konnten nur wenige Betreiber machen.

Während Kühllhäuser, der Lebensmittel-EH mit Ausnahme der Minimärkte sowie Hotels und Gaststätten Verbundanlagen zur Kälteerzeugung verwenden, betreiben die übrigen Branchen Einzelanlagen oder steckerfertige Kühlanlagen [Kalbrunner 2009]. Diese Anlagen besitzen eine 2-Punkt-Regelung und sind auf 16 Stunden Betriebszeit pro Tag ausgerichtet. Sie haben einen Temperaturdifferenzbereich von 2 °C und damit einen Schalttakt von etwa fünf bis zehn Minuten. In Fleischerei- und Bäckereifilialen sind offene Theken installiert, die eine Länge von etwa sechs Metern besitzen. Die Kälteanlagen sind in diesem Fall Einzelanlagen, die außerhalb des Verkaufsraumes stehen, um Lärmbelästigung durch die Kältemaschinen sowie gerade im Sommer eine Aufheizung des Raumes zu vermeiden. Auch Eisdielen nutzen für ihre jeweiligen Kühlmöbel Einzelanlagen. Im Lebensmittel-EH befinden sich neben den Kühlmöbeln gerade in großen Ladenformaten wie Supermärkten und SB-Warenhäuser zusätzliche Kühlzellen zur Lagerung außerhalb der Verkaufsflächen. Kühlzellen im Lebensmittel-EH benötigen bei geschlossenen Türen etwa fünf Stunden zum Erreichen einer für das Kühlgut kritischen Temperatur bzw. zur Auslösung des Alarms.

In allen Branchen der Verteilung / Lagerung wird die Lebensmittelüberwachung nach HACCP durchgeführt. Für die Verteilunternehmen ist die Einhaltung der Temperaturen wichtig, da sie direkten Einfluss auf das MHD hat. Wird eine Ware nicht im vorgegebenen Temperaturbereich übergeben, kann sie zurückgewiesen werden.

Die Datenerfassung und –analyse des Energieverbrauchs von Kälteanlagen wird aufgrund Relevanz von Kosteneinsparmaßnahmen in dieser Branchengruppe vorangetrieben. Wurden bisher nur monatliche und jährliche Verbrauchswerte aufgenommen, so stellen aktuell einige der größeren Filialen im Lebensmittel-EH auf Lastprofilmessung um. Es werden sogar zentral Unternehmensbereiche in Handelsketten gegründet, die sich filialübergreifend mit Energie- und Energiekosteneinsparung sowie der Auswertung dieser Lastprofile auseinandersetzen.

Wie in der Nahrungsmittelherstellung gleichen die **Tarifstrukturen** denen industrieller oder gewerblicher Kunden. Es gibt sowohl die Arbeits- und Leistungspreis basierten Tarife, Niedriglast- und Hochlasttarife als auch zentral durch Handelsketten oder Verbände filialübergreifend erworbene Strombänder oder Spotmarktprodukte. Betriebsstätten wie große Kühlhäuser richten damit schon jetzt ihren Lastgang und damit Stromverbrauch nach den jeweiligen Bezugspreisen.

**Tabelle 3.4 Datenerhebung im Rahmen der Interviews in der Branchengruppe**

<b>Branchengruppe: Industrie</b>	
<b>Branche: Chemie</b>	
• Kältetechnik:	- Schraubenverdichter mit 1200 kW <sub>therm</sub> , d.h. etwa 600 kW <sub>el,inst</sub> (COP 2,0) für unterschiedliche Anwendungen
• Kühlanforderungen:	- Kältemittel mit –25 °C Verdampfungstemperatur
• Betriebsführung:	- k.A.
<b>Branche: Pharmazie</b>	
• Kältetechnik:	- etwa 120 Anlagen mit jeweils bis zu 500 kW <sub>therm</sub> Kälteleistung für Eisherstellung, Warenlagerung und Gaskühlung - Gesamtleistung nicht bekannt
• Kühlanforderungen:	- Solltemperaturen je nach Anforderung, oft 5 °C zur Lagerung - Soll-Temperaturvorgaben müssen exakt (mit wenig Hysterese) eingehalten werden (Qualitätskriterium)
• Betriebsführung:	- jede Anlagen als Verbundanlage für mehrere Anwendungen - für Kühlzellen Temperaturbereich ±0,5 °C mit 2-Punktregelungsventil (an / aus), Prozesse oft als Batchprozesse, d.h. Kühlung wird in einem bestimmten Zeittakt benötigt - Kältepuffer im Kältemittel vorhanden, wodurch der Leistungsbedarf der Kältemaschinen begradigt wird

Das Interesse der Industrie an der an der Untersuchung von Lastmanagementpotenzialen ist ausgesprochen zurückhaltend. Zudem ist die Anzahl der **Unternehmen** in den jeweiligen Branchen in Mannheim, die über Kälteanlagen für die Prozesskühlung verfügen, sehr gering. Von sieben kontaktierten Unternehmen der Pharmazie- und Chemieindustrie verfügen nur 3 Unternehmen über Industriekälteanlagen. Eines der Unternehmen aus dem Bereich der Gasverflüssigung hat keine Produktionseinrichtungen in Mannheim. Es kann also nicht wie im Bereich Nahrungsmittel davon ausgegangen werden, dass jede Betriebsstelle einer Branche über Kälteerzeugungsanlagen verfügt. Alle Unternehmen verfügen jedoch über Büroklimatisierung.

Die zur Verfügung gestellten Informationen bezüglich der Kälteversorgung der Industrie sind nicht detailliert. Die Kälteerzeugung ist Grundlage für die Herstellung der Produkte Daher ist die exakte Kälteversorgung ein Qualitätskriterium der Produktion. Eine **Datenerfassung** des Kältebedarfes findet sehr genau statt.

**Kühlanwendungen** sind entweder in mittelgroßen dezentralen oder großen zentralen Verbundanlagen zusammengefasst. Die Vielzahl der Prozesse und damit der Kältebedarf sind stetig oder regelmäßig wiederkehrend in festgelegten Zeitabständen (Batchprozesse). Im Verbund entsteht damit eine fluktuierende Kältelast, die allerdings sehr genau durch die Speicherkapazität des

Kältemittels als Puffer begradigt werden kann und zu einem gleichförmigen Lastgang der Kältemaschine führt. Kühlzellen, die unter anderem in der Prozesskühlung mit Kälte versorgt werden und mit einem Ventil ein- oder ausgeschaltet werden, verfügen bei einer Solltemperatur von 5 °C und einer Temperaturdifferenz der Abkühl- und Auftauphase von ±0,5 °C über einen Schaltzeitraum von etwa einer Stunde (Tabelle 3.4).

Die Kälteanlagen und deren Auslegung sind aufgrund der Größe und der Unterschiedlichkeit der Anwendungen und notwendigen Verdampfungstemperaturen nicht standardisiert. Eine Verschiebung von Lasten bzw. eine Abgabe der Lastführung an dezentrale Entscheidungsmechanismen wird nicht erwünscht.

In der **Branchengruppe Sonstige** werden Eisportstätten sowohl privat als auch öffentlich betrieben. Die Hallen besitzen im Allgemeinen eine Eisfläche vom 60 x 30 Meter Größe. Der kontaktierte Anlagenbetreiber nutzt zwei Hallen für Eiskunlauf und für Eishockey mit einer Eistemperatur von – 3,5 bzw. –5 °C. Die Anlagenleistung beträgt 5 x 315 kW<sub>therm</sub>, wobei im normalen Betrieb nur 3 Verdichter im Verbund benötigt werden. Die Betriebszeiten der Halle liegen zwischen August und April. Weitere Informationen zur Betriebsführung sind nicht bekannt. Blumengeschäfte haben Kühlzellen zur Lagerung der Blumen sowohl tagsüber als auch nachts. Sie sind an Einzelanlagen angeschlossen, die eine Temperatur je nach Anforderung zwischen 2 und 8 °C erzeugen.

**Tabelle 3.5 Datenerhebung im Rahmen der Interviews in der Branchengruppe Klimatisierung**

<b>Branchengruppe: Klimatisierung</b>	
<b>Branche: Büro / Verwaltung 1</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:</li> <li>• Kühlanforderungen:</li> <li>• Betriebsführung:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schraubenverdichter mit 192 kW<sub>el,inst</sub>, Begrenzung auf 125 kW<sub>el,max</sub> (ein weiterer Verdichter als Redundanz installiert)</li> <li>- 14.500 m<sup>2</sup> Nutzfläche mit 50 % Glasfassade über 8 Stockwerke</li> <li>- Kühlung des Hauptluftstroms, 4 Sekundärluftströmen und den Kühlregistern in Büros</li> <li>- Steuerung über Gebäudeleittechnik (GLT)</li> <li>- Solltemperatur beträgt 23 °C Raumtemperatur mit individueller Variation von 2,5 °C in den Büros, keine Temperaturabweichung über 1 °C erwünscht</li> <li>- Anpassung der Solltemperatur durch 6 °C-Differenzregel</li> <li>- Kühlung des Hauptluftstroms mit 6°C/12°C</li> <li>- Betriebszeiten Mo bis Fr von 7:00 bis 20:00 Uhr, außerhalb nur Stützbetrieb (kein Betrieb bis max. Raumtemperatur 30 °C)</li> <li>- keine Temperaturabweichung über 1 °C erwünscht</li> <li>- Nutzer ist nur Mieter</li> </ul>
<b>Branche: Büro / Verwaltung 2</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:</li> <li>• Kühlanforderungen:</li> <li>• Betriebsführung:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3 Schrauben- und 1 Kolbenverdichter mit 2500 kW<sub>therm</sub>, dazu Freikühlung 300 kW<sub>therm</sub> (durch Rückkühlung in Flusswasser hoher Wirkungsgrad von 6,0 und damit 416 kW<sub>el,inst</sub>), zusätzliche Anlagen in Planung</li> <li>- 60.000 m<sup>2</sup> Nutzfläche und 35.000 m<sup>2</sup> klimatisierte Bürofläche mit 40 % Glasfassade über 15 Stockwerke</li> <li>- Kühlung des Hauptluftstroms, 5 weitere Sekundärluftströme und Kühlregister in Büros</li> <li>- mit integriertem Rechenzentrum etwa 250 kW<sub>therm</sub> Grundlast</li> <li>- Steuerung über GLT</li> <li>- individuelle Raumtemperatur zwischen 20 und 24 °C</li> <li>- im Empfangsbereich des Gebäudes an warmen Tagen Übergangstemperatur von 26 bis 28 °C</li> <li>- Kühlung des Hauptluftstroms mit 6°C/12°C</li> <li>- keine Temperaturabweichung über 1 °C erwünscht</li> <li>- Betriebszeiten Mo bis Sa von 6:30 bis 19:30 Uhr, außerhalb nur Lüftung</li> <li>- Betreiber ist Nutzer</li> </ul>

<b>Branche: Büro / Verwaltung 3</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 Turboverdichter mit 1000 kW<sub>therm</sub>, lastbegrenzt auf 517 kW<sub>therm</sub>, bei COP 4,5 also 222 kW<sub>el,inst</sub> und 115 kW<sub>el,max</sub></li> <li>- 10.000 m<sup>2</sup> Bürofläche mit 50 % Glasfassade über 8 Stockwerke</li> <li>- Kühlung des Hauptluftstroms, weitere Umluftkühlung in den Büros</li> <li>- Steuerung über GLT</li> </ul> </li> <li>• Kühlanforderungen:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- Standardsolltemperatur bei 21 °C</li> <li>- Kühlung des Hauptluftstroms mit 6°C/12°C</li> <li>- höhere Temperaturabweichungen nicht erwünscht, aber ±2 °C Schwankungen kommen durchaus vor</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebsführung:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- Betriebszeiten Mo bis Fr von 7:00 bis 19:00 Uhr, außerhalb nur Lüftung</li> <li>- Nutzer sind nur Mieter, Beteiligung der Mieter an Stromkosten über etagenweise Kühllastmessung</li> </ul> </li> </ul>
<b>Branche: Büro / Gewerbe</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 4 Kolbenverdichter mit 1100 kW<sub>therm</sub> (Volllast kann bei sommerlichen Bedingungen erreicht werden), also 275 kW<sub>el,inst</sub> bzw. 192,5 kW<sub>el,max</sub> bei COP 4,5</li> <li>- 19.000 m<sup>2</sup> Büro- und Gewerbefläche mit 30 % Glasfassade über 5 Stockwerke</li> <li>- Steuerung über GLT</li> </ul> </li> <li>• Kühlanforderungen:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- Solltemperatur im Gebäude 21 °C mit Anpassung an Außentemperatur und individuelle Variation um ±3 °C</li> <li>- Kühlung des Hauptluftstroms mit 6°C/12°C</li> <li>- kurzzeitige Schwankungen der Temperatur um ±2 °C möglich</li> </ul> </li> <li>• Betriebsführung:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- Betriebszeiten Mo bis Sa von 6:00 bis 21:00 Uhr, sonst Lüftung</li> <li>- Nutzung des Gebäudes für Verwaltung und Gewerbe</li> <li>- 4 stufige Leistungsregelung durch Ein- und Ausschalten der Verdichter</li> <li>- Nutzer ist zum Teil auch Betreiber, Beteiligung der Mieter an Stromkosten über Flächenanteile</li> </ul> </li> </ul>	
<b>Branche: Gewerbe (Warenhaus)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 Schrauben- und 1 Turboverdichter mit 2000 kW<sub>therm</sub> (Turboverdichter ist alt und wird im Bedarfsfall hinzu geschaltet), also 444 kW<sub>el,inst</sub> bei COP 4,5 und 355 kW<sub>el,max</sub> bei 50 % Leistungsüberschuss des 800 kW<sub>therm</sub> Turboverdichters</li> <li>- etwa 15.000 m<sup>2</sup> Verkaufsfläche mit 40 % Glasfassade</li> <li>- Steuerung über GLT</li> </ul> </li> <li>• Kühlanforderungen:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- Solltemperatur bei 22 °C mit variabler Außentemperatur-anpassung</li> <li>- Schwankungen sind nicht erwünscht, kommen aber im Bereich ±2 °C durchaus vor</li> </ul> </li> <li>• Betriebsführung:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- Betriebszeiten Mo bis Sa von 6:00 bis 21:00 Uhr, außerhalb nur Lüftung</li> <li>- Nutzer ist auch Betreiber</li> </ul> </li> </ul>	
<b>Branche: Industrie 1</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- mehrere Absorptionskältemaschinen mit einer Kälteleistung von etwa 25.000 kW<sub>therm</sub> bei 7.000 Mitarbeitern</li> <li>- Klimatisierung von Produktionseinrichtungen für chemischer Prozesse unterschiedlicher Art</li> </ul> </li> <li>• Kühlanforderungen:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- viele Anwendungen mit einer Raumsolltemperatur von 19 °C</li> <li>- Kaltwassertemperatur 6 °C / 12 °C</li> </ul> </li> <li>• Betriebsführung:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kälteerzeugung über Contracting</li> </ul> </li> </ul>	
<b>Branche: Industrie 2</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 3 Kältesysteme mit jeweils 4 bis 5 Schraubenverdichtern mit 10.000 kW<sub>therm</sub>, also etwa 1.538 kW<sub>el,inst</sub> bei COP 6,5, zudem Freikühlung zur Unterstützung der Kühlung in den Winter- und Übergangsmonaten, etwa 5.300 Mitarbeiter</li> <li>- Versorgung von Produktionsmaschinen mit Kaltwasser</li> <li>- zusätzlich Büroklimatisierung mit mehreren Verbundanlagen mit etwa 1.500 kW<sub>therm</sub>, also 375 kW<sub>el,inst</sub> bei COP 4,0</li> </ul> </li> </ul>	

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kühlanforderungen:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kaltwassertemperatur der Industriekühlung bei 16 °C / 22 °C</li> <li>- Kaltwassertemperatur der Büroklimatisierung bei 6 °C / 12 °C</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebsführung:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produktion und Betrieb über 24 h und 7 Tage in der Woche, jedoch tagsüber 100 % und nachts 75 % Auslastung mit konstanten Lastprofil</li> <li>- jährlichen Verlauf: in Winter- und Übergangsmonaten etwa 50 % und im Sommer 100 % Strombedarf, obwohl Kältebedarf geringer schwankt</li> </ul>
<b>Branche: Hotel</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 4 Kolbenverdichter mit 174 kW<sub>el,inst</sub></li> <li>- Klimatisierung vom 140 Gästezimmern und 13 Tagungsräumen (etwa 10.000 m<sup>2</sup> Nutzfläche)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kühlanforderungen:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kaltwasser 6 °C / 12 °C</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebsführung:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- k.A.</li> </ul>
<b>Branche: Krankenhaus</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kältetechnik:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3 Kolbenverdichter mit 150 kW<sub>el,inst</sub> zur Klimatisierung von 6 OP-Sälen mit etwa 2.500 m<sup>2</sup></li> <li>- zudem eine Absorberanlage für weiteren Krankenhausbereich und eine kleine Kompressionsanlage für die Pathologie</li> <li>- kleiner Eisspeicher für Sommerlastspitzen manuell in Stundenbereich zuschaltbar (optional)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kühlanforderungen:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solltemperatur 18 bis 19 °C je nach OP-Saal</li> <li>- Temperaturschwankungen aufgrund der Arbeitsbedingungen und Gewährleistung auch bei Notfällen sowie Keimvermehrung und nicht erwünscht</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebsführung:</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Betriebszeiten an 24 h über das ganze Jahr</li> <li>- tagsüber ist der Kältebedarf durch die stärkere Nutzung höher als nachts</li> </ul>

Bei Kälteanlagen zur Klimatisierung können je nach Größe sowohl Kolbenverdichter, Schraubenverdichter oder auch Turboverdichter eingesetzt werden (Tabelle 3.5). Bei kleineren Betriebsstellen mit wenigen Beschäftigten gibt es gerade im Gewerbe oft dezentrale Einzelanlagen. Bei großen Betriebsstellen werden dagegen zentrale Kälteanlagen eingesetzt, die im Verbund mit einer Lüftung das gesamte Gebäude klimatisieren.

Die zentrale Kälteanlage ist in allen untersuchten Fällen der Büro-, Gewerbe-, Hotel- und Krankenhausklimatisierung an eine GLT angeschlossen, welche die **Betriebsführung** der Klimatisierung einschließlich Lüftung, Raumbefeuchtung und oft auch anderer Verbraucher überwacht und steuert. Die Klimatisierung erfolgt im Gegensatz zu den meisten Prozess- und Lagerkühlungsanwendungen durch einen indirekten Kältekreislauf mit Kaltwasser. Von der GLT wird die Messung der Raumtemperatur und damit die Regelung der Kältemenge an die Lüftung übernommen. Einstellungen der Solltemperaturen werden ebenso manuell über einen zentralen Rechner der GLT durchgeführt.

Die Vor- und Rücklauftemperatur des Kaltwassers beträgt 6 °C bzw. 12 °C. Nach dieser benötigten Kältemenge regelt sich die Anlagenleistung der Kältemaschine. In den betrachteten Fällen der Industrieklimatisierung wird das Kaltwasser direkt in die Produktionsräume bzw. zu den Maschinen geleitet. Die Vor- und Rückkühltemperatur des Kaltwassers ist dabei auf den Kühlbedarf der industriellen Anwendungen abgestimmt. In den untersuchten Fällen beträgt sie sowohl 6 °C / 12 °C als auch 16 °C / 22 °C. Die Kaltwassertemperatur hat Auswirkungen auf die Verdampfungstemperatur des Kältemittels und damit auf den **Leistungsfaktor**. Zudem ist auch die Art der Kältetechnik, die Auslegung und das Medium der Rückkühlung einflussgebend auf den COP. Wird beispielsweise mit Flusswasser rückgekühlt, können niedrigere Verflüssigungstemperaturen gewählt werden, wodurch der COP steigt. Prinzipiell sind bei effizient ausgelegten Klimaanlage Leistungsfaktoren zwischen 3,0 und 7,0 denkbar.

Die **Nutzfläche** eines Gebäudes ist nicht gleich der klimatisierten Bürofläche. Zur Nutzfläche zählen auch Verkehrsflächen wie Flure und Abstellräume, die im Allgemeinen nicht klimatisiert werden. In einem Beispiel beträgt der Anteil der klimatisierten Fläche etwa 60 % an der Nutzfläche. Weiterhin muss der **Klimatisierungsgrad** betrachtet werden. Nicht jedes Gebäude oder jede Produktionseinrichtung ist klimatisiert. Von vier kontaktierten Unternehmen der Metallverarbeitung hatten zwei Unternehmen keine Produktionseinrichtungen und ein Unternehmen trotz Produktionseinrichtung keine Industrieklimatisierung. Alle Unternehmen verfügen jedoch wie die Unternehmen der Chemieindustrie über Klimatisierung ihrer Verwaltungseinrichtungen. Ein Unternehmen der Chemie verfügt über Absorptionsanlagen zur Kälteerzeugung, die in dieser Studie nicht Gegenstand der Betrachtung sind.

**Kältespeicher** finden in der Klimatisierung kaum eine Anwendung. Kaltwasserspeicher müssten dafür zu groß dimensioniert werden. Bei einem Kaltwasserströmungsmenge in einem Bürohaus von beispielsweise 400 m<sup>3</sup>/h wäre für eine Lastverlagerung um eine Stunde ein Speichervolumen von 400 m<sup>3</sup>, also 400 Tonnen, nötig. Oftmals werden kleine Puffer eingebaut, um Taktungen und kurze Lastwechsel zu vermeiden sowie bei Stromausfällen die Zeit bis zum Start der Notstromaggregate zu überbrücken.

Der Anschluss von Eisspeichern an die Kälteversorgung ist ineffizient, da das Wasser anstatt auf 6 °C nun auf 0 °C gekühlt werden muss und dadurch der COP deutlich gesenkt wird. Diese Senkung geht mit einem erhöhten Strombedarf für die gleiche zur Verfügung gestellte Kältemenge einher. Es gibt jedoch die Idee, unterirdisch Eisspeicher zu installieren, die im Winter die überschüssige Kälte von Wärmepumpen speichern. Diese Eisspeicher können bis zur Hälfte der in der Kühlperiode benötigten Kälte speichern [Hecker 2009]. Aufgrund der Nutzung zuvor überschüssiger Kälte ist diese Form der Eisspeichernutzung energiebilanziell vorteilhaft.

Die **Datenerfassung** erfolgt in der Klimatisierung bis auf die Industrieklimatisierung nur in geringem Umfang. Die Begründung liegt im Verhältnis vom Nutzen für die Betreiber und deren Aufwand für Messung, Speicherung und eventuell deren Kontrolle. Nutzer der Kälte und damit die Kostenträger der Kältebereitstellung sind in der Regel die Mieter der Büroräume. Die Betreiber sind vorrangig verantwortlich für die Einhaltung der Kühlanforderungen und dem Funktionieren der Kälteanlage. An einer Einflussnahme von Dritten oder dezentralen Entscheidungsinstanzen auf den Betrieb der Anlage sind die Betreiber wenig interessiert.

In allen Branchen hat die Lärmentstehung während des Anlagenbetriebs keinen Einfluss auf Lastverlagerungsmöglichkeiten der Kälteanlagen. Die Anlagen befinden sich entweder im Erd- oder im Dachgeschoss, so dass dort Lärm sowohl innerhalb als auch außerhalb der aktuellen Betriebszeiten kein Problem darstellt.

### **3.4. Bewertung der Informationen im Hinblick auf die Potenzialanalyse**

#### **3.4.1. Annahmen zur technischen Auslegung von Kälteanlagen**

Um aus den individuellen Daten der untersuchten Kälteanlagen Rückschlüsse auf die gesamte installierte Kälteleistung der Stadt Mannheim zu schließen, werden Annahmen zu technischen Charakteristika getroffen, die innerhalb der Branchen gleich oder ähnlich ausgestaltet sind. Zu diesen Charakteristika zählen:

- Typische Leistung bzw. Leistungskennzahl
- COP (nur für Klimatisierung)
- Überdimensionierung (Anteil der installierten Leistung über der maximal genutzten Leistung)
- Durchdringungsrate (Klimatisierungsgrad)

- Anteile Prozess- / Lagerkühlung, Anteile NK / TK
- Betriebszeiten der Kälteanlage
- Verlagerungsanteil (Anteil der zur Lastverlagerung geeigneten Leistung) und Verlagerungszeitraum (geeignete tägliche Betriebszeiten für eine Lastverlagerung)
- Abschätzung der Verlagerungsdauer (mögliche Dauer der Lastverlagerung)

Die Werte leiten sich nach Möglichkeit aus den Aussagen der empirischen Untersuchung ab. Vergleichend werden Angaben aus der Literatur hinzugezogen. Zu den Bereichen, zu denen keine Informationen aus den Interviews gesammelt werden konnten, muss allein auf die bereits durchgeführter Studien als Bezugsquelle zurückgegriffen werden. Dieses Vorgehen kann bei Branchen angewandt werden, deren Kälteerzeugung durch standardisierte Anlagen erfolgt. Der Fall tritt vorwiegend bei kleinen Anlagengrößen im Bereich der Verteilung und Lagerung von Nahrungsmitteln auf.

Außerdem ist es möglich, bei bestimmten Kälteanwendungen eine Relation zwischen der Größe der Anwendung und deren Kältebedarf herzustellen. Aus dieser Relation kann eine Leistungskennzahl abgeleitet werden, welche die Bestimmung der Leistung über eine Vielzahl von Anlagen ermöglicht. Bei der Klimatisierung kann beispielsweise die Größe der Anwendung anhand der klimatisierten Fläche bestimmt werden. Die Annahmen dienen im weiteren Verlauf als technische Referenzwerte für eine durchschnittliche Kälteanlage der jeweiligen Branche.

Quantitative und belastbare Aussagen zu Verlagerungsanteil, -zeitraum und –dauer existieren kaum. Die im Rahmen dieser Studie festgelegten Angaben beziehen sich entweder auf qualitative Informationen der Gesprächspartner oder auf Untersuchungsergebnisse von Feldtests vorangegangener Arbeiten.

### ***Nahrungsmittel***

In der Nahrungsmittelherstellung lassen sich aufgrund der eingeschränkten Zahl der meisten Herstellungsbetriebe im Untersuchungsraum und deren individueller Größenordnungen keine Annahmen zu deren Kältebedarf bzw. zu deren Anlagenleistungen schließen. Da keine typischen Leistungszahlen aus anderen Studien existieren, können keine Aussagen zu Anlagenleistungen gegeben werden. Eine Ausnahme bilden die Fleischverarbeitung und Bäckereien. Wie in Tabelle 3.6 ersichtlich konnten in der Fleischverarbeitung die Kälteanlagen von zehn Unternehmen zusammenhängend untersucht werden und ein mittlerer elektrischer Leistungsbedarf von 19,6 kW ermittelt werden. Eine durchschnittliche Fleischerei im Einzelhandel mit TK- und NK-Kühlräumen sowie einer Theke hat dagegen etwa 7 kW elektrischen Leistungsbedarf [Kalbrunner 2009]. Der Leistungsbedarf von Bäckereien im Einzelhandel wird in der deutschlandweiten DKV-Studie mit 3,9 kW angegeben [Steimle et al. 2002]. Verwendet man die Relation zwischen dem Großhandel der Fleischverarbeitung und dem Fleischerei-Einzelhandel auch für die Bäckereien, ergibt sich für die größeren Bäckereien ein elektrischer Leistungsbedarf von 10,9 kW.

Für die Branchen der Nahrungsmittelherstellung wird aufgrund der konkreten Kühlanforderungen eine Überdimensionierung von 0 % und eine Durchdringungsrate der Kälteanlagen in den Branchen von 1 angenommen. Für den Schlachthof, die Fleischverarbeitung und die Brauerei können die Anteile an Prozess- und Lagerkühlung, NK und TK sowie den Betriebszeiten auf Basis der empirischen Daten abgeleitet werden. Für die Bäckerei erfolgt das gleiche Vorgehen nach den Daten der Studie.

Der technische Lastverlagerungsanteil wird auf die Lagerkühlung eingegrenzt, da Prozesskühlung immer dann anfällt, wenn sie benötigt wird und nicht verlagert werden kann. Der Verlagerungszeitraum beschränkt sich auf die Zeiten, zu denen keine Be- und Entladung der Lagerräume stattfindet. Für viele Bereiche der Nahrungsmittelherstellung sind diese unregelmäßig

---

und nur kurzzeitig. Im Schlachthof gibt es meist konkrete Belade- und Entladezeiträume, zu denen die Kühlhaustüren offen stehen. Zudem kann in der Zeit der Kühlung der Fleisches auf Kerntemperatur bis etwa 20:00 Uhr die Kühlung nicht unterbrochen werden. Die Verlagerungsdauern stellen eine Abschätzung aufgrund der Art und Größe der Kühlräume in Bezug zu den später erwähnten Kühlhäusern und Kühlzellen der Kleinanlagen wie in Gaststätten oder Kantinen dar.

**Tabelle 3.6 Technische Annahmen im Bereich Nahrungsmittel – Herstellung**

Branche	Fleisch-			Teigwaren, Ölsamen und	
	Schlachthof	verarbeitung	Bäckerei	Fette, etc.	Brauerei
typische Leistung / Leistungskennzahl in kW <sub>el</sub>	k.A.	19,6 / 7 (Einzelh.)	10,9 / 3,9 (Einzelh.)	k.A.	k.A.
Überdimensionierung in %	0	0	0	k.A.	0
Durchdringungsrate	1	1	1	1	1
Anteil Prozess / Lagerung in %	35 / 65	0 / 100	50 / 50	k.A.	100 / 0
Anteil NK / TK in % (Lagerung)	100 / 0	60 / 40	80 / 20	k.A.	-
Betriebszeiten Prozess	5:00 bis 12:00 Uhr	-	k.A.	k.A.	24 h
Betriebszeiten Lagerung	24 h	24 h	24 h	24 h	-
techn. Verlagerungsanteil in %	65	100	50	nur Lagerung	-
Verlagerungszeitraum	20:00 bis 03:00 Uhr	k.A.	k.A.	k.A.	-
Abschätzung der Verlagerungsdauer	NK 1 bis 2 h	NK 1 h TK 1 bis 2 h	NK 1 h TK 1 bis 2 h	k.A.	-

Bei den im Bereich der Nahrungsmittelverteilung und –lagerung einzuordnenden Kühlhäusern fällt eine typische Leistungsabschätzung ebenso schwierig. Zu den untersuchten Kühlhäusern gehören eines der größten Zentrallager in Deutschland sowie vier deutlich kleinere Verteillager. Die errechneten Leistungskennzahlen sowie ein durchschnittliches Kühllager eines VDKL-Mitgliedsunternehmens sind in der Tabelle 3.7 dargestellt. Nach den Angaben der DKV-Studie liegt die durchschnittliche Antriebsleistung bei NK- und TK-Kühlung zwischen 9,3 bis 11,63 W/m<sup>3</sup> [Steimle et al. 2002].

Aus der Verteilung der Lager- und Einfrierkapazitäten ergeben sich die durchschnittlichen Werte eines Kühlhauses eines VDKL-Mitgliedsunternehmens mit einer Lagerkapazität von 52.000 m<sup>3</sup> und einer NK / TK – Verteilung von 23 % / 77 % [VDKL 2008]. In Mannheim befinden sich keine weiteren Kühlhäuser von VDKL-Mitgliedsunternehmen. Es ist damit zu rechnen, dass die übrigen nicht untersuchten Kühlhäuser eine durchschnittliche Kapazität der bereits untersuchten Verteillager haben. Danach hat ein durchschnittliches Verteillager in Mannheim eine Lagerkapazität von 5.000 m<sup>3</sup>, eine elektrische Antriebsleistung von 60 kW bei einer Leistungskennzahl von 12 W/m<sup>3</sup> sowie eine NK / TK – Verteilung von 90 % zu 10 %. Der Verlagerungszeitraum liegt außerhalb der Be- und Entladezeiten von 6:00 bis 22:00 Uhr. Je nach Dämmung und der Kältespeicherkapazität, die mit der Größe der Kühlhäuser zunimmt, beträgt die Verlagerungsdauer für TK durchschnittlich zwischen zwei und vier Stunden, kann aber je nach möglicher Temperaturerhöhung auch darüber hinaus gehen [Weilhardt 2009, Pohl 2009]. Im NK-Bereich ist aufgrund der geringen, möglichen Temperaturdifferenzen und dem erhöhten Wärmeeintrag durch die Lagertüren die Verlagerungsdauer auf 1 bis 2 h beschränkt.

Das Zentralkühlhaus wird bereits in ein börsenorientiertes Strombezugsmanagement einbezogen, wo durch der Strombezug nach den Strompreisen optimiert und Lastmanagement angewandt wird. Ein weiteres nicht in Mannheim befindliches Kühlhaus ist in der Vorbereitung der Teilnahme am Minutenreservemarkt, wodurch dieses Kühlhaus eine Verlagerungsdauer der ausgeschriebenen Last positiv oder negativ um vier Stunden garantieren muss. Damit kann die Verlagerungsdauer in dieser Größenordnung bestätigt werden. Kleine Kühlhäuser besitzen oft keine effiziente Dämmung und können aufgrund der Kühlung nahe 0 °C Lastverschiebestrategien wenig nutzen. Dadurch können die Verlagerungsdauern dieser Anlagen auch deutlich geringer ausfallen.

**Tabelle 3.7 Leistungs- und Kühlungskennzahlen für Kühllager**

	Kühlhaus 1	Kühlhaus 2	Kühlhaus 3	Kühlhaus 4	Kühlhaus 5	VDKL- Lager	durchschnittl. Verteillager
inst. Leistung in kW <sub>el</sub>	840	38,6	k.A.	k.A.	24	520	60
Lagerkapazität in m <sup>3</sup>	165.000	2.444	12.000	2.000	2.050	52.000	5.000
Leistungskennzahl in W <sub>el</sub> /m <sup>3</sup>	5,1	15,8	k.A.	k.A.	11,8	10	12
Anteil NK / TK in %	5 / 95	50 / 50	100 / 0	100 / 0	97,5 / 2,5	23 / 77	90 / 10

Beim Lebensmittel-EH werden die unterschiedlichen Ladenformate getrennt voneinander betrachtet. Den jeweiligen Ansprechpartnern waren in vier von fünf Fällen die installierten Leistungen nicht bekannt. Wie in Tabelle 3.8 ersichtlich sind die ermittelten Kennwerte jedoch auch innerhalb der Ladenformate noch sehr unterschiedlich.

Um auf eine größere Grundgesamtheit empirischer Werte zurückzugreifen, werden die Werte einer UBA-Studie zu Kälteanwendungen in Supermärkten betrachtet. Diese Studie hat durchschnittliche Kühlmöbellängen für die Ladenformate Discounter bis SB-Warenhaus erhoben. Diese Werte gelten nach Angaben eines Kälteanlageninstallateurs als vertretbar. In Discountern gängigen Handelsketten können durchaus Kälteanlagen mit 160 kW, in Supermärkten mit 380 kW und in SB-Warenhäusern mit 500 kW elektrischer Leistung installiert sein [Kottwitz 2009]. Dabei ist zu beachten, dass der Leistungsbedarf für die Klimatisierung bereits eingeschlossen ist. Für die Minimärkte werden Kühlmöbellängen von 5 Meter NK und 15 Meter TK angenommen.

**Tabelle 3.8 Leistungs- und Kühlungskennzahlen für den Lebensmittel-EH [Quelle: Rhiemeier et al. 2008]**

	Mini- markt	Discounter 1	Discounter 2	Super- markt 1	Super- markt 2	UBA Discounter	UBA Supermarkt	UBA SB- Warenhaus
inst. Leistung in kW <sub>el</sub>	k.A.	k.A.	10	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Länge NK / TK - Kühlmöbel in m	3 / 18	23 / 20	16 / 5	76 / 25	80 / 22,5	22,5 / 40	50 / 40	95 / 150
Kapazität NK / TK Kühl- zellen in m <sup>3</sup>	k.A.	k.A.	25 / 0	144 / 72	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Anteile NK / TK in %	15 / 85	50 / 50	75 / 25	70 / 30	80 / 20	35 / 65	55 / 45	60 / 40
Anteile dezentraler Anlagen NK / TK in %	100 / 100	34,8 / 100	0 / 100	5,3 / 4	1,8 / 0	k.A. / 100	k.A.	k.A.
Anteile verschließbare Kühlräume NK / TK in %	0 / 100	34,8 / 100	0 / 100	60 / 100	7,5 / 100	0 / 100	0 / 95	0 / 75

Auf der Basis durchschnittlicher, jährlicher Stromverbräuche für NK-Regale und TK-Truhen werden in Tabelle 3.9 die Leistungskennzahlen für Kühlmöbel in Verkaufsflächen pro Meter berechnet. Die Kälteversorgung der Kühlmöbel ist prinzipiell für eine tägliche Laufzeit von 16 Stunden täglich ausgelegt und wird durch Magnetventil an- oder ausgeschaltet. Verbundanlagen verfügen aufgrund der Vielzahl eingebundener Kühlmöbel über ein fluktuierendes Lastprofil, wohingegen dezentrale Einzelanlagen eine Ein- und Ausschaltcharakteristik besitzen.

**Tabelle 3.9 Leistungskennzahlen für Kühlmöbel in Supermärkten [Quelle: Rhiemeier et al. 2008]**

Kühlmöbel	NK-Regal (offen steckerfertig)	NK-Regal (offen Verbund)	NK-Regal (verschießbar steckerfertig)	TK-Truhe (verschießbar Verbund)	TK-Truhe (verschießbar steckerfertig)
jährlicher, durchschnittlicher Stromverbrauch in kWh/m	4.500	3.000	1.500	2.400	3.500
Leistungsbedarf in kW <sub>el</sub> /m	0,8	0,5	0,25	0,4	0,6

Die ermittelten Daten lassen die Annahme zu, dass in den Discountern 10 % der NK-Kühlmöbel verschließbar und dezentral sowie 90 % offen und an Verbundanlagen angeschlossen sind. 100 % der TK-Truhen sind dezentral und verschließbar. Bei Supermärkten und SB-Warenhäuser sind 100 % der NK-Kühlmöbel zentral angeschlossen und offen. Die TK-Kühltruhen sind zu 100 % zentral und verschließbar. In den Minimärkten sind 100 % der Kälteanlagen dezentral, wobei 50 % der NK-Kühlmöbel offen und alle TK-Kühlmöbel verschließbar sind.

Aus der Relation der jeweiligen Kühlmöbellänge ergeben sich in Tabelle 3.10 die NK- / TK- Anteile abhängig von der elektrischen Leistung. Aus diesen Angaben in Verbindung mit den Leistungskennzahlen kann auf die installierte, elektrische Leistung der Anlagen je nach Ladenformat geschlossen werden. Der Verlagerungsanteil ergibt sich aus den jeweiligen Anteilen offener und verschließbarer Kühlmöbel. Verschließbare Kühlmöbel können nach technischen Aspekten zu jeder Zeit die Last verlagern. Offene Kühlmöbel werden außerhalb der Geschäftszeiten zu 100 % per Rollo verschlossen, so dass nachts eine Verlagerung stattfinden kann.

Beim Verlagerungszeitraum sind prinzipiell die Befüllung der Kühlmöbel von 7:00 bis 9:00 Uhr und die Hauptgeschäftszeiten von 17:00 bis 20:00 Uhr auszuschließen, da zu diesen Zeiten eine regelmäßige Öffnung der Türen erfolgt. Tagsüber ist die komplette Abschaltung der Anlagen nicht realistisch, da durch Türöffnungen Wärmeeintrag erfolgt, der abgeführt werden muss. Die Leistung kann tagsüber um 50 % reduziert werden.

**Tabelle 3.10 Technische Annahmen im Bereich Nahrungsmittel – Verteilung / Lagerung Teil 1**

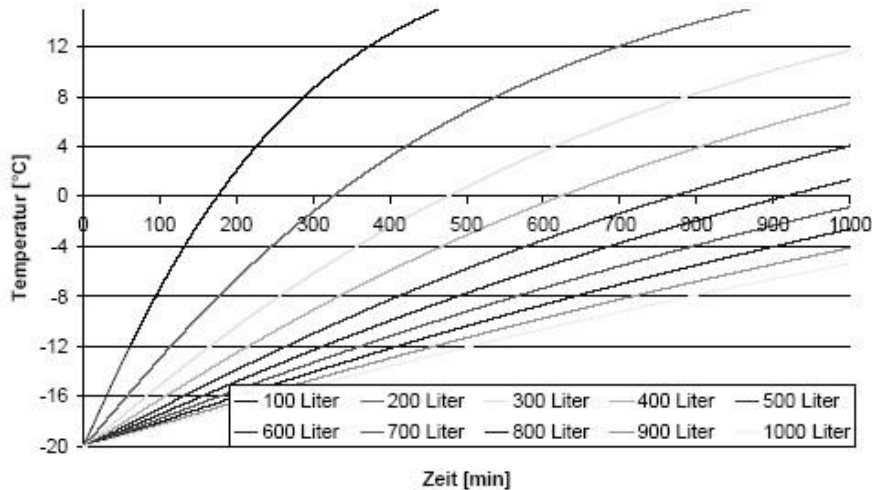
Branche	Kühlhaus (Zentral-)	Kühlhaus (Verteil-)	Minimarkt	Discounter	Supermarkt	SB-Warenmarkt
typische Leistung in kW <sub>el</sub>	840	60	13	34,7	41	107,5
Überdimensionierung in %	-	-	-	-	-	-
Durchdringungsrate	1	1	1	1	1	1
Anteil NK / TK in % <sup>1)</sup>	5 / 95	90 / 10	30 / 70	30 / 70	60 / 40	45 / 55
Anteil dezentrale Anlagen	-	-	100 / 100	7 / 100	- / -	- / -
NK / TK in % <sup>1)</sup>						
Anteile verschließbare Kühlräume NK / TK in % <sup>1)</sup>	100	100	40 / 100	7 / 100	- / 100	- / 100
Betriebszeiten	24 h	24 h	24 h	24 h	24 h	24 h
techn. Verlagerungsanteil in % <sup>1)</sup>	100	100	12 (dezentral NK nachts) 18 (dezentral NK)	28 (Verbund NK nachts) 2 (dezentral NK)	60 (Verbund NK nachts) 40 (Verbund TK)	45 (Verbund NK nachts) 55 (Verbund TK)
Verlagerungszeitraum	6:00 bis 22:00	6:00 bis 22:00	9:00 bis 17:00 <sup>2)</sup> 21:00 bis 7:00	9:00 bis 17:00 <sup>2)</sup> 21:00 bis 7:00	9:00 bis 17:00 <sup>2)</sup> 21:00 bis 7:00	9:00 bis 17:00 <sup>2)</sup> 21:00 bis 7:00
Abschätzung der Verlagerungsdauer	4 h TK 1 bis 2 h NK	4 h TK 1 bis 2 h NK	verschließbar 1 h nachts verschließbar 30 min	verschließbar 1 h nachts verschließbar 30 min	verschließbar 1 h nachts verschließbar	verschließbar 1 h nachts verschließbar 30 min

<sup>1)</sup> Anteile in Prozent der elektrischen Leistung

<sup>2)</sup> eine Reduktion des Leistung ist tagsüber nur zu 50 % möglich

Je nach Dämmung, Kältespeicherkapazität und Temperaturdifferenz der Kühlmöbel zur Umgebung variiert die Verlagerungsdauer. In der Abbildung 3.3 sind Kühltruhen unterschiedlichen Volumens und ihr Auftauverhalten dargestellt. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die

Verlagerungsdauer für eine Temperaturerhöhung von 2 °C durchschnittlich eine Stunde beträgt. Da bei den offenen Kühlmöbeln nachts nur ein Rollo zur Kältespeicherung dient, ist die Dämmung geringer und die Verlagerungsdauer reduziert sich auf 30 Minuten.



**Abbildung 3.3 Aufwärmverhalten von Kühltruhen im Lebensmittel-EH bei einer Ausgangstemperatur von - 20 °C [Quelle: Stadler 2005]**

Neben den technischen Aspekten der Kälteanlagen des Lebensmittel-EH hat die Frage nach der Aufteilung der 227 Läden auf die drei verschiedenen Ladenformate eine große Bedeutung für die aggregierte Leistung dieser Branche. Da die drei Ladenformate sehr gleichmäßig und ohne regionale Unterschiede innerhalb von Deutschland verteilt sind, kann deren Relation untereinander für eine Differenzierung in der Stadt Mannheim verwendet werden. Tabelle 3.11 zeigt die Anzahl der Ladenformate des Lebensmittel-EH nach den deutschlandweiten Anteilen der Ladenformate.

**Tabelle 3.11 Zahl der Geschäfte des Lebensmittel-EH nach Ladenformaten**

Ladenformat	EHI Retail Institut 2007 (deutschlandweit)	Zahl in Mannheim	relativer Anteil in %
Discounter	8.170	71	0,31
Supermarkt	14.806	129	0,57
SB-Warenhaus	3.150	27	0,12
GESAMT	26.126	227	1,00

Für die sonstigen Filialen wird eine durchschnittliche Thekenlänge von 6 Meter angenommen. Nimmt man zur Berechnung der typischen Leistung den jährlichen Stromverbrauch eines offenen NK-Regals von 3.000 kWh/m unter der Bedingung einer täglichen Volllastzeit bei kleinen Anlagen von 16 Stunden, erhält man eine Leistung von 3,1 kW. Mit einer weiteren NK-Truhe mit 1,5 kW ergibt sich eine Anlagenleistung für NK von 4,6 kW. Die NK-Theken werden außerhalb der Geschäftszeiten ausgeräumt und ausgeschaltet. Sie können deshalb nicht zur Lastverlagerung beitragen. Aufgrund mehrerer Kühlstellen werden die sonstigen Filialen mit Verbundanlagen versorgt.

Aufgrund der Datenlage wird für die verbleibenden Branchen der Nahrungsmittelverteilung und -lagerung auf die Leistungsangaben der DKV-Studie in Tabelle 3.12 verwiesen. Ausnahmen wie das untersuchte Kongresshotel spielen wegen ihrer überdurchschnittlichen Größe für Annahmen der typischen Leistung eine untergeordnete Rolle. Bei den Eisdielen sind die Geräte zur Eisherstellung nicht Gegenstand der Betrachtung, da sie nicht alle Eisdielen besitzen und deren Einsatz als Prozesskälte nicht verlagerbar ist. Das gilt im gleichen Maße für gastronomische Kleingeräte bei Kantinen. Die Verteilung von NK und TK kann aus der DKV-Studie abgeleitet werden. Die

Betriebszeiten der Anlagen in der Verteilung und Lagerung liegen hauptsächlich bei 24 Stunden täglich. Die offenen Kühleinrichtungen werden außerhalb der Öffnungszeiten ausgeschaltet und können so weder tagsüber noch nachts zur Lastverlagerung dienen. Sie sind damit generell nicht zum Lastmanagement geeignet. Die restlichen Kühlmöbel eignen sich uneingeschränkt zur Verlagerung.

**Tabelle 3.12 Technische Annahmen im Bereich Nahrungsmittel – Verteilung / Lagerung Teil 2**  
[Quelle: Steimle et al. 2002]

Branche	Tank- stelle	Kiosk	Sonstige Filialen	Getränke- EH	Hotel / Gaststätte	Kantine	Eisdielen	Apotheke
typische Leistung in kW <sub>el</sub>	4	3,2	4,6	0,43	2,12	3,3	3,1	0,26
Überdimensionierung in %	0	0	0	0	0	0	0	0
Durchdringungsrate	1	1	1	1	1	1	1	1
Anteil NK / TK in %	60 / 40	80 / 20	100 / -	70 / 30	60 / 40	30 / 70	15 / 85	100 / -
Anteil dezentrale Anlagen NK / TK in %	100 / 100	100 / 100	100 / -	100 / 100	100 / 100	100 / 100	100 / 100	100 / -
Anteile verschließbare Kühlräume NK / TK in %	80 / 100	80 / 100	30 / -	100 / 100	100 / 100	100 / 100	0 / 65	100 / -
Betriebszeiten	24 h	24 h	offen 8:00 bis 20:00 verschließbar 24h	24 h	24 h	24 h	offen 10:00 bis 24:00 verschließbar 24h	24 h
techn. Verlagerungsanteil in %	88	84	30	100	100	100	55	100
Verlagerungszeitraum	24 h	24 h	24 h	24 h	24h	24 h	24 h	24 h
Abschätzung der Verlagerungsdauer	20 min	20 min	1 h	20 min	1 h	1 h	1 h	20 min

Die Verlagerungsdauer kann für die Kühlmöbel, die regelmäßig geöffnet werden, aus der Taktzeit von 5 bis 10 Minuten bei einer Temperatur-Hysterese von 2 °C auf maximal 20 Minuten geschätzt werden. Sonstige Filialen, Kantinen, Gaststätten und Eisdielen verfügen über Kühlzellen mit höherer Dämmung und werden weniger geöffnet, da sie sich nicht im Verkaufsbereich befinden. Sie haben tendenziell niedrigere Taktzeiten. Bei diesen Kühlmöbeln kann eine Verlagerungsdauer in mindestens der Höhe der Kühlmöbel des Lebensmittel-EH, also von einer Stunde, angenommen werden.

### Industrie

Industrielle Kühlanwendungen sind nicht standardisierbar. Aus diesem Grund gibt es keine typischen Leistungen oder Leistungskennzahlen. Die Daten zu den Anlagen müssen individuell eingeholt werden. Aufgrund der Komplexität der Anlagen und dem geringen Interesse der Branchengruppe an der Untersuchung können keine belastbaren Informationen angegeben werden. Da der Großteil der Anwendungen jedoch Prozesse sind, die eine genaue Temperatureinhaltung erfordern und der Kältepuffer der Kältenetze gerade für die Begradigung des Lastprofils reicht, erscheint aus technischer Sicht eine Lastverschiebung als nicht sinnvoll.

### Sonstige

Der Bereich Sonstige umfasst lediglich die Branchen Eissportstätte und Pflanzen. Aus der Untersuchung geht hervor, dass für zwei Eisbahnen eine Leistung von 1.575 kW<sub>therm</sub> installiert ist bzw. eine maximal eine Leistung von 945 kW<sub>therm</sub> benötigt wird. Bei der Kühltemperatur von -5 °C und einen COP von 2,5 erhält man eine installierte und maximale, elektrische Leistung von 630 kW<sub>el,inst</sub> bzw. 378 kW<sub>el,max</sub>. Das macht pro Halle eine Leistung von 315 kW<sub>el,inst</sub> oder 189 kW<sub>el,max</sub>. Bezüglich der Verlagerung können keine Annahmen gemacht werden. Die Branche Pflanzen beschränkt sich auf den Blumeneinzelhandel. Zwar gibt es in Mannheim einen Blumengroßmarkt, jedoch besteht dieser aus 51 Einzelhändlern mit eigenen Kälteanlagen. Da keine weiteren Leistungsdaten zur Verfügung stehen, wird auch in dieser Branche auf die DKV-Studie zurückgegriffen. Laut Tabelle 3.13 beträgt die typische, elektrische Leistung in einem kleinen Blumengeschäft zur Kühlung von Schnittblumen bei NK 2,25 kW<sub>el</sub>. Die Kühlzelle ist verschließbar und somit jederzeit für eine Lastverlagerung geeignet.

Wie auch bei ähnlichen Kühlanwendungen mit vergleichbaren Kühlzellen ist mit einer Verlagerungsdauer von einer Stunde zu rechnen.

**Tabelle 3.13 Technische Annahmen im Bereich Sonstige [Quelle: Rhiemeier et al. 2008]**

Branche	Eisportstätte	Pflanzen
typische Leistung in kW <sub>el</sub>	315	2,25
Überdimensionierung in %	66	0
Durchdringungsrate	1	1
Anteil NK / TK in %	- /100	100 / -
Anteil dezentrale Anlagen		
NK / TK in %	- / 0	100 / -
Anteile verschließbare		
Kühlräume NK / TK in %	- / -	100 / -
Betriebszeiten	24 h <sup>D</sup>	24 h
techn. Verlagerungsanteil in %		
	k.A.	100
Verlagerungszeitraum	k.A.	24 h
Abschätzung der		
Verlagerungsdauer	k.A.	1 h

<sup>D</sup> von August bis April

### **Klimatisierung**

Die untersuchten Bürogebäude sind mehrstöckige, moderne Gebäude mit einem Anteil an Glasfassade von etwa 50 %. Die Flächenkennzahl in Tabelle 3.14 bezieht sich auf die Nutzfläche und beträgt etwa 35 m<sup>2</sup> pro Angestellten. Der Anteil der klimatisierten Fläche kann größtenteils nicht bestimmt werden, wodurch die weitere Berechnung mittels der Nutzfläche durchgeführt wird. Als Quotient aus der maximalen Leistung und der Nutzfläche ergibt sich eine Leistungskennzahl von etwa 40 bis 50 W<sub>therm</sub>/m<sup>2</sup>. Der COP variiert je nach Auslegung und Art der Rückkühlung zwischen 4,5 und 6,0 mit einer Tendenz zur 4,5. Die COP von 6,0 kann durch die Flusswasserrückkühlung eher als ein Extremwert betrachtet werden. Auch die Überdimensionierung variiert zwischen 0 % und 100 % beträchtlich.

Für den Gewerbebereich wird mit 106 W<sub>therm</sub>/m<sup>2</sup> eine höhere Leistungskennzahl ermittelt. Sie ergibt sich aus dem höheren, inneren Wärmeeintrag. Die Betriebszeiten liegen von Mo bis Fr oder bis Sa von etwa 6:00 bis 21:00 Uhr.

**Tabelle 3.14 Gebäude- und Leistungskennzahlen im Bereich Klimatisierung – Teil 1**

	Büro 1	Büro 2	Büro 3	Büro / Gewerbe	Gewerbe
Nutzfläche in m <sup>2</sup>	14.500	60.000	10.000	19.000	15.000
klimatisierte Fläche in m <sup>2</sup>	k.A.	35.000	k.A.	k.A.	k.A.
Anzahl Beschäftigte	500	1.500	k.A.	k.A.	k.A.
Flächenkennzahl in m <sup>2</sup> /Bezugsgröße	29	40	k.A.	k.A.	k.A.
Anteil klimatisierte Fläche an	k.A.	58	k.A.	k.A.	k.A.
installierte Leistung in kW <sub>el</sub>	192	416	222	275	444
maximale Leistung in kW <sub>el</sub>	125	416	115	192,5	355
COP	k.A.	6,0	4,5	4,5	4,5
Leistungskennzahl in W <sub>el</sub> /m <sup>2</sup>	8,6	6,9	11,5	10,1	23,7
Leistungskennzahl in W <sub>therm</sub> /m <sup>2</sup> Nutzfläche	k.A.	41,6	51,8	45,6	106,5
Überdimensionierung in %	53,6	0,0	93,0	42,9	25,1
Betriebszeiten	Mo bis Fr 7:00 bis 20:00	Mo bis Fr 6:30 bis 19:30	Mo bis Fr 7:00 bis 19:00	Mo bis Sa 6:00 bis 21:00	Mo bis Sa 6:00 bis 21:00

In der Industrie kann wie in Tabelle 3.15 dargestellt die Flächenkennzahl mittels der Zahl der Beschäftigten sowie eines Faktors der Nutzfläche pro Beschäftigter ermittelt werden. Aufgrund der Kaltwassertemperatur von 16 °C kann ein COP von 6,0 erreicht werden. Aus der installierten Leistung und dem Faktor der Fläche pro Beschäftigter wird ein Kältebedarf von 97 W<sub>therm</sub>/m<sup>2</sup> errechnet.

Bei dem Hotel ergibt sich aus der Nutzfläche des Gebäudes und der Zahl der Betten die Flächenkennzahl von 33 m<sup>2</sup> pro Bett. Die Leistungskennzahl von 17,4 W<sub>el</sub> pro Bett ist möglicherweise zu hoch. Es ist nicht bekannt, ob die Anlage überdimensioniert ist. In dem untersuchten Krankenhaus wurden lediglich die Operationssäle klimatisiert. Als Leistungskennzahl wird mit 60 W<sub>el</sub>/m<sup>2</sup> auch in dieser Branche ein relativ zu den anderen Bereichen hoher Wert ermittelt. Die maximal benötigte Leistung ist nicht bekannt. Sowohl Hotels als auch Krankenhäuser werden an 24 Stunden täglich klimatisiert.

**Tabelle 3.15 Gebäude- und Leistungskennzahlen im Bereich Klimatisierung – Teil**

	Industrie 2	Hotel	Krankenhaus
Nutzfläche in m <sup>2</sup>	-	10.000	-
klimatisierte Fläche in m <sup>2</sup>	-	k.A.	2.500
Anzahl Beschäftigte / Betten	5.300 Angestellte (3.180 in Industrie)	140 Gästezimmer (etwa 300 Betten)	-
Flächenkennzahl in m <sup>2</sup> /Bezugsgröße	k.A.	33	-
Anteil klimatisierte Fläche an Nutzfläche in %	-	k.A.	-
installierte Leistung in kW <sub>el</sub>	1.538	174	150
maximale Leistung in kW <sub>el</sub>	1.538	k.A.	k.A.
COP	6,0	k.A.	k.A.
Leistungskennzahl in W <sub>el</sub> pro Bezugsgröße	484 W <sub>el</sub> pro Beschäftigter	17,4 W <sub>el</sub> pro m <sup>2</sup> Nutzfläche	60 W <sub>el</sub> pro m <sup>2</sup> klimat. Fläche
Leistungskennzahl in W <sub>therm</sub> /m <sup>2</sup> Nutzfläche	97 (30 m <sup>2</sup> pro Beschäftigter)	k.A.	k.A.
Überdimensionierung in %	0	k.A.	k.A.
Betriebszeiten	24 h	24 h	24 h

Anhand der Tabelle 3.16 werden Kennzahlen dargestellt, die aus vorangegangenen empirischen Studien abgeleitet wurden. Die Flächenkennzahlen beziehen sich auf Münster und die

Leistungskennzahlen auf Deutschland. Ein Vergleich der Werte aus der Literatur mit den Zahlen aus der eigenen Untersuchung belegt, dass es diese mit geringfügigen Anpassungen auch für die Stadt Mannheim angenommen werden können.

**Tabelle 3.16 Gebäude- und Leistungskennzahlen aus der Literatur für den Bereich Klimatisierung [in Anlehnung an Gertec 2008, Steimle et al. 2002]**

	Verwaltung	Büro	Handel / Gewerbe	Industrie	Hotel	Gaststätte	Kranken- haus
Flächenkennzahl in m <sup>2</sup> /Bezugsgröße (Gertec Ingenieurbüro)	21,21 m <sup>2</sup> pro Beschäftigter	38,58 m <sup>2</sup> pro Beschäftigter	35,43 m <sup>2</sup> pro Beschäftigter	30 m <sup>2</sup> pro Beschäftigter	30 m <sup>2</sup> pro Bett	30 m <sup>2</sup> pro Beschäftigter	42 m <sup>2</sup> pro Bett
Leistungskennzahl in W <sub>therm</sub> /m <sup>2</sup> (DKV 2002)	50	50	80	120	30 bis 50	30 bis 50	k.A.
Durchdringungsrate (Klimatisierungsgrad nach DKV 2002)	0,64	0,64	0,8	0,2 bis 1	k.A.	k.A.	k.A.
Leistungsfaktor (DKV 2002)	0,9	0,9	0,8	0,6	0,8	0,8	k.A.
Betriebszeiten (DKV 2002)	6:00 bis 20:00	6:00 bis 20:00	6:00 bis 21:00	24 h	hauptsächlich nachmittags bis abends	hauptsächlich nachmittags bis abends	k.A.

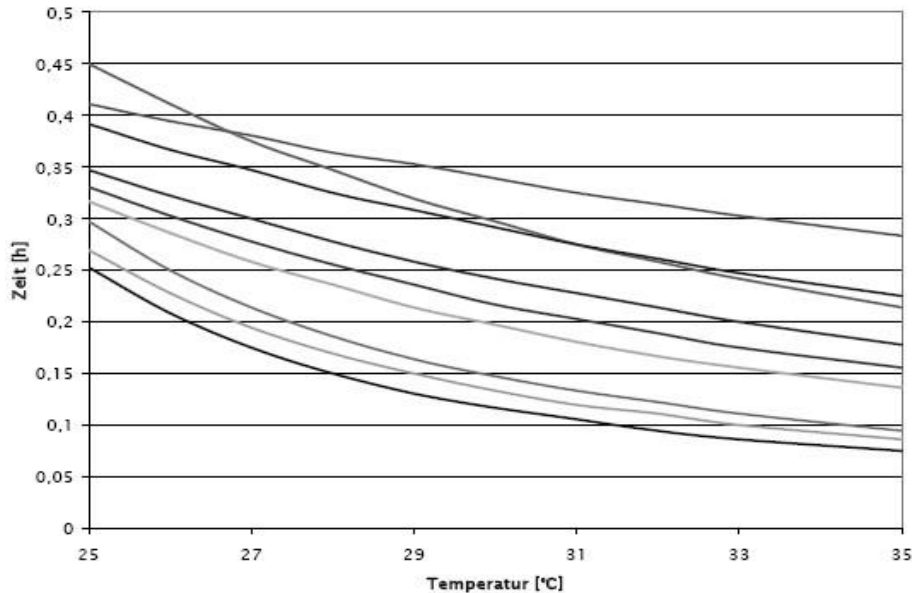
Die dargestellten Kennzahlen werden als allgemeingültige Annahmen für die Stadt Mannheim gewählt. Zur verbesserten Betrachtung des Klimatisierungsgrades wird eine relevante Betriebsgröße eingeführt, ab der die Betriebsstätten Klimatisierungen einsetzen. Diese bewegt sich je nach Branche zwischen 10 und 50 Beschäftigten. In Industrieunternehmen arbeitet ein Teil der Beschäftigten in der Verwaltung. Daher wird eine Bereinigung der Beschäftigtenzahlen der Industrie vorgenommen und 40 % der Beschäftigten in Industriebetrieben zum Bereich Büro dazu gezählt.

Die Durchdringungsrate bzw. der Klimatisierungsgrad wird auf die Erfahrungen der eigenen Untersuchung angepasst. Für die Verwaltungen und Büros wird in Mannheim aufgrund eines hohen Anteils moderner Bürogebäude eine Durchdringungsrate von 0,8 angenommen. Die Durchdringungsrate in der Industrie wird wegen dem Anteil an Absorptionskälte auf 0,7 festgelegt. Die Flächenkennzahlen werden unter dem Einfluss der empirischen Daten korrigiert. Der COP wird nach der Auslegungen und Dimensionierung der Branche festgelegt. Die Industrie hat aufgrund der höchsten Kaltwassertemperaturen den höchsten COP. Kleinere Anlagen wie im Gewerbe und bei Hotels und gerade auch Gaststätten haben mit geringeren Dimensionierungen einen reduzierten COP. Je größer die Dimensionierung der Anlage, je leistungsfähiger ist die installierte Technik [Bendig 2009]. Das lässt sich beispielsweise auf den Wechsel von Kolben- zu Schrauben- und Turboverdichtern sowie auf den Wechsel von Luft- auf Wasserrückkühlung zurückführen.

Nach der DKV-Studie variiert der Leistungsfaktor von 0,6 in der Industrie bis 0,9 im Bereich der Büroklimatisierung. Dieser Faktor ist gleichbedeutend mit der Überdimensionierung der Kälteanlage. Aufgrund der Abweichungen zwischen der Studie und den empirischen Daten wird gemittelt eine übergreifende Überdimensionierung von 15 % angenommen. Die Überdimensionierung hat keine Auswirkung auf das Verschiebepotenzial, da im Folgenden mit der maximal genutzten Leistung gerechnet wird.

Als Betriebszeit wurden die durchschnittlichen Werte der empirischen Daten verwendet. Aus technischer Sicht ist es möglich, bis auf die Industrie 100 % der Last zu verlagern. Diese Verschiebung ist jedoch auf die Kühlperiode zwischen Mai und Oktober beschränkt. In der Industrie ist die Funktion von Maschinen bereits bei kleinen Temperaturunterschieden gefährdet. Zudem haben die Maschinen aufgrund der eigenen Wärmeentwicklung keine Kältespeicherkapazitäten. Aus diesem Grund kann hier bereits technisch kein Lastmanagement realisiert werden.

Je nach äußeren Bedingungen ist für die Büro – und Verwaltungsklimatisierung eine Verlagerungsdauer von etwa 30 Minuten bis zu einer Stunde möglich. Sie ergibt sich aus der Erhöhung der Solltemperatur von 22 bis 23 °C auf maximale 26 °C. Die Abbildung 3.4 zeigt hierzu das Aufwärmverhalten unterschiedlicher Gebäudetypen um 1 °C bei einer Raumtemperatur von 22 °C. Durch den erhöhten inneren Wärmeeintrag in den Branchen Handel / Gewerbe, Hotel und Gaststätte kann nur eine minimale Dauer von 30 Minuten zum Lastmanagement genutzt werden.



**Abbildung 3.4 Aufwärmdauer von verschiedenen Bürogebäudetypen um 1 °C [Quelle: Bukvic 2007]**

Die Annahmen für den Bereich Klimatisierung werden in der Tabelle 3.17 zusammengefasst. Krankenhäuser werden aufgrund der geringen, verfügbaren Informationen und der geringen Bedeutung für die Lastverschiebung aus der weiteren Betrachtung herausgenommen.

**Tabelle 3.17 Technische Annahmen im Bereich Klimatisierung**

Branche	Gewerbe /					
	Verwaltung	Büro	Handel	Industrie	Hotel	Gaststätte
	ab 20 Beschäftigte	ab 20 Beschäftigte	ab 10 Beschäftigte	ab 50 Beschäftigte	keine Pensionen / Garni	ab 10 Beschäftigte
relevante Betriebsgröße	-	-	-	60 % Industrie / 40 % Büro	-	-
Bereinigung der Betriebsgröße	-	-	-	-	-	-
Flächenkennzahl in m <sup>2</sup> /Bezugsgröße	25	35	30	30	30	30
COP	4	4,5	3,5	5,0	4,0	3,0
Leistungskennzahl in W <sub>them</sub> /m <sup>2</sup> Nutzfläche	50	50	80	120	40	40
Leistungskennzahl in W <sub>el</sub> /m <sup>2</sup> klimatisierte Fläche	12,5	11,1	22,9	24,0	10,0	13,3
Durchdringungsrate (Klimatisierungsgrad)	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8
Überdimensionierung in %	15	15	15	15	15	15
Betriebszeiten	6:00 bis 19:00	6:00 bis 19:00	6:00 bis 21:00	24 h	24 h	10:00 bis 23:00
techn. Verlagerungsanteil in	100	100	100	0	100	100
Verlagerungszeitraum	Mai bis Okt	Mai bis Okt	Mai bis Okt	ganzjährig	Mai bis Okt	Mai bis Okt
Abschätzung der Verlagerungsdauer	30 min bis 1 h	30 min bis 1 h	30 min	-	30 min	30 min

## Haushalt

Die Haushalte wurden im Rahmen der empirischen Untersuchung nicht betrachtet. Auch sie verfügen über Kühleinrichtungen zur Aufbewahrung von Lebensmitteln. In der Abbildung 3.5 ist das Lastprofil eines Haushaltes aufgenommen. Neben weiteren Haushaltsverbrauchern bewegt sich das Kühlgerät periodisch über 24 Stunden im unteren Leistungsbereich.

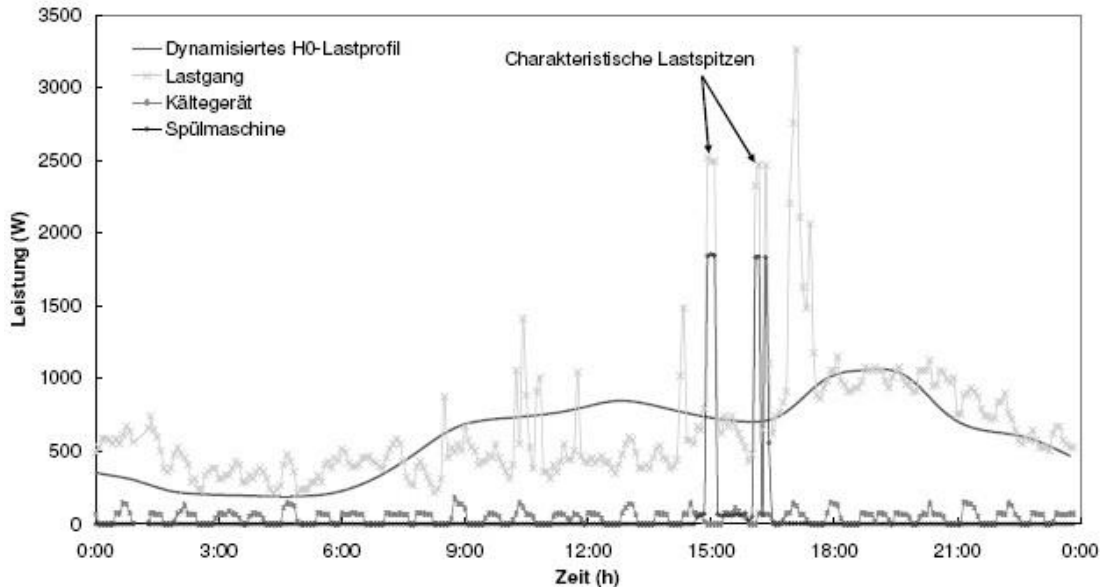


Abbildung 3.5 Haushaltslastprofil [Quelle: Jentzsch 2008]

Man kann davon ausgehen, dass durchschnittlich pro Haushalt ein Kühlschrank bzw. eine Kühl- / Gefrierkombination installiert ist. Diese Kühleinrichtungen sind steckerfertige, dezentrale Anlagen und weisen daher die 2-Punktregelungs-Charakteristik auf. Nach einer Studie der MVV Energie AG wurde die Schalthysterese untersucht. Dabei wurde ein Kühlschrank mit einer Leistung vom 90 W<sub>el</sub> untersucht. Nach der DKV-Studie haben Haushaltskühlgeräte eine Leistung zwischen 70 und 129 W<sub>el</sub>. Es kann eine durchschnittliche Leistung von Haushaltskühleinrichtungen von 90 W<sub>el</sub> angenommen werden.

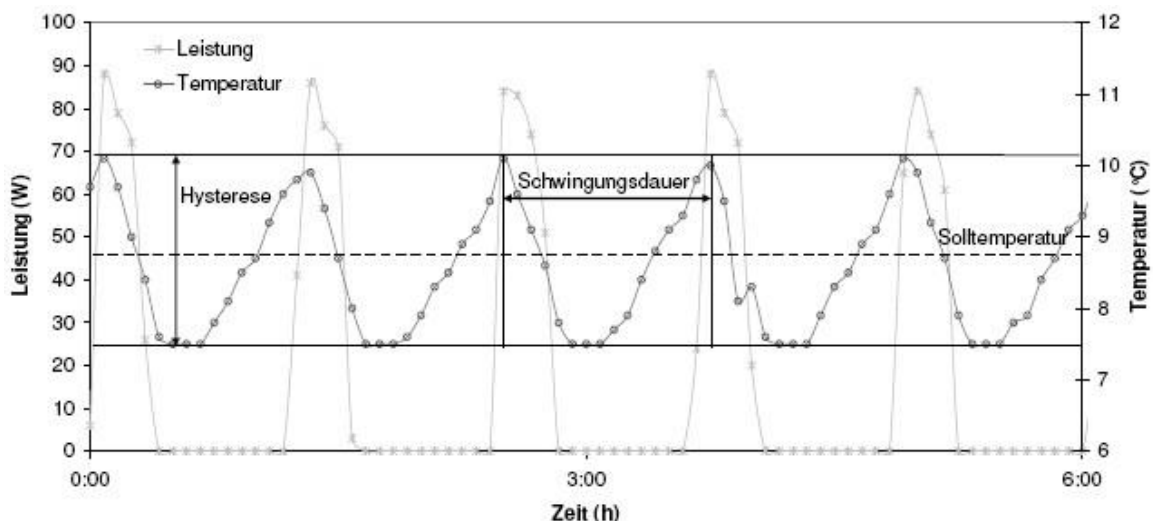


Abbildung 3.6 Temperatur-Hysterese eines Haushaltskühlschranks [Quelle: Jentzsch 2008]

Aus der Abbildung 3.6 ergibt sich eine Schaltperiode von etwa einer Stunde bei einer Einschaltzeit von etwas weniger als 30 Minuten oder etwa 40 %. Damit kann auf einen Gleichzeitigkeitsfaktor des Betriebs der Haushaltskühleinrichtungen von 0,4 geschlossen werden. Dieser ergibt sich aus dem Anteil der Betriebszeit des Verdichters an der Verfügbarkeit der Kühlanwendung

### **3.4.2. Gruppierung von vergleichbaren Lastprofilen**

Aus der Beschreibung der Anwendungen sowie aus den empirischen Daten können für die jeweiligen Branchen typische Kälteprofile hergeleitet werden. In den meisten Fällen stimmen die Kältelastverteilungen auch mit den daraus folgenden Stromlastprofilen der Kälteanlagen überein. Es lässt sich feststellen, dass verschiedene Branchen über gleiche oder ähnliche Lastprofile verfügen. Zudem sollen es sinnvolle Vereinfachungen erlauben, eine übersichtliche Anzahl von Lastgruppen zu erhalten. Um einen differenzierten Blick auf das Lastverhalten zu erhalten, wird sowohl der typische Tagesverlauf der Last als auch die Lastverteilung über das Jahr dargestellt. Diese Lastprofile werden in diesem Abschnitt vorgestellt. Sie ergeben sich aus den qualitativen Darstellungen der Anlagenbetreiber zum Kältebedarf sowie aus zur Verfügung gestellten, konkreten Verbrauchswerten der Anlagen. Die Einteilung erfolgt in die folgenden Gruppen:

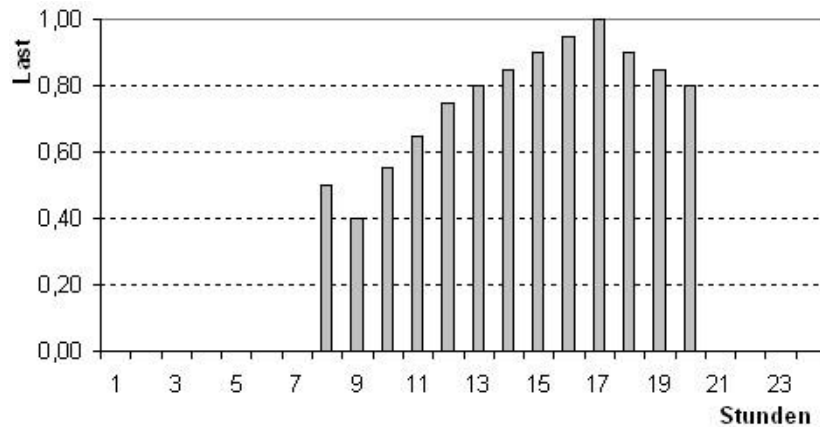
- Gewerbliche Klimatisierung (GK)
- Industrielle Klimatisierung (IK)
- Gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen im Lebensmittel-EH (LM)
- Gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen in Kühllagern (KL)
- Prozesskälte in Industrieanwendungen (PI)
- Klein & Kleinstanlagen (KK)

Mit Ausnahmen der Klein- und Kleinstanlagen erfolgt der Lastverlauf bei allen Lastprofilgruppen innerhalb des Tages kontinuierlich. Die Kälteanlage ist durchgängig mit dem jeweiligen Lastfaktor in Betrieb. Die Darstellung des Lastprofils der Klein- und Kleinstanlagen verdeutlicht, dass aufgrund der 2-Punktregelung von einer unterbrechenden Betriebsweise der Kälteanlage ausgegangen wird.

#### ***Gewerbliche Klimatisierung***

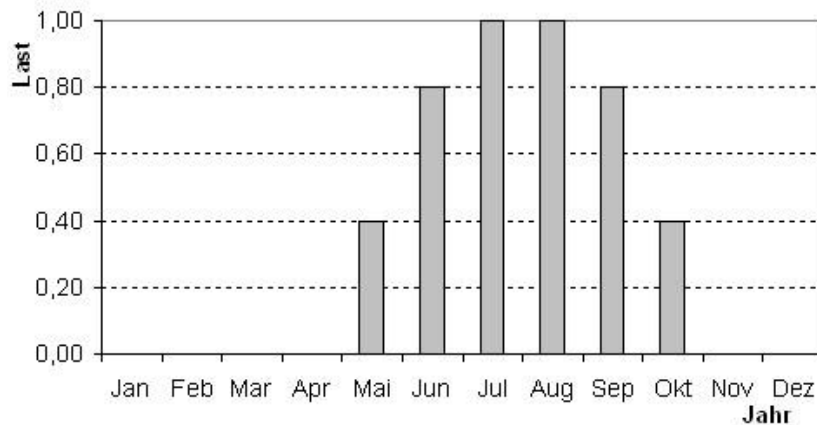
Das Lastprofil der gewerblichen Klimatisierung folgt dem typischen Lastverlauf der Büroklimatisierung. Im Tagesverlauf steigt der Kältebedarf mit dem äußeren Wärmeeintrag, wobei zu Beginn um 7:00 Uhr eine kleine Spitze aufgrund der Abführung der nachts angefallenen Wärme. Ab etwa 16 Uhr bis zum Ende der Betriebszeit um 20:00 Uhr fällt der Kältebedarf wieder leicht. Dieser in der Abbildung 3.7 dargestellte Verlauf kann vereinfachend auf die folgenden Branchen angewendet werden:

- Verwaltungsgebäude
- Bürogebäude
- Handel und Gewerbe
- Hotel
- Gaststätte



**Abbildung 3.7 Tageslastprofil für die gewerbliche Klimatisierung**

Es soll dem Aspekt Rechnung getragen werden, dass ein bedeutender Teil des Wärmeeintrags durch die äußere Umgebung erfolgt. Gerade im Jahresverlauf hat dieser Einfluss eine besondere Bedeutung. Im Gegensatz zu anderen Gruppen ist die gewerbliche Klimatisierung wie in Abbildung 3.8 ersichtlich nur von Mai bis Oktober notwendig. Auf diese Charakteristik wurde bereits in der Beschreibung der Anwendungen im Kapitel 2.2.4 näher eingegangen.



**Abbildung 3.8 Jahreslastprofil für die gewerbliche Klimatisierung**

### *Industrielle Klimatisierung*

Die industrielle Klimatisierung ist durch den konstanten Verlauf des Kältebedarfs gekennzeichnet. Grund hierfür ist der gleichförmige Wärmeeintrag durch Produktionsmaschinen, die eine konstante Kühltemperatur benötigen. Unterschiede im täglichen Kältebedarf sind zwischen der Tag- und der Nachtproduktion in der Abbildung 3.9 dargestellt.

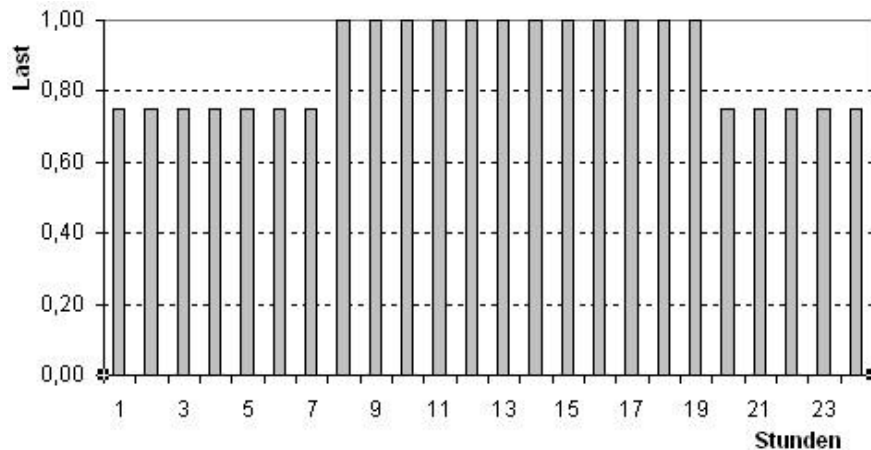


Abbildung 3.9 Tageslastprofil für die industrielle Klimatisierung

Im Jahresverlauf kann ein bedeutender Unterschied zwischen dem Strombedarf im Winter und im Sommer beobachtet werden. Das liegt einerseits an den äußeren Bedingungen in Bezug auf den Anteil des äußeren Wärmeeintrag als auch an einem höheren COP durch effizientere Rückkühlung. Zum Anderen wird oftmals im Winter und in den Übergangsmontaten eine zusätzliche freie Kühlung eingesetzt, welche die Verdichterleistung teilweise ersetzt. Dieser Zusammenhang wird in der Abbildung 3.10 ersichtlich.

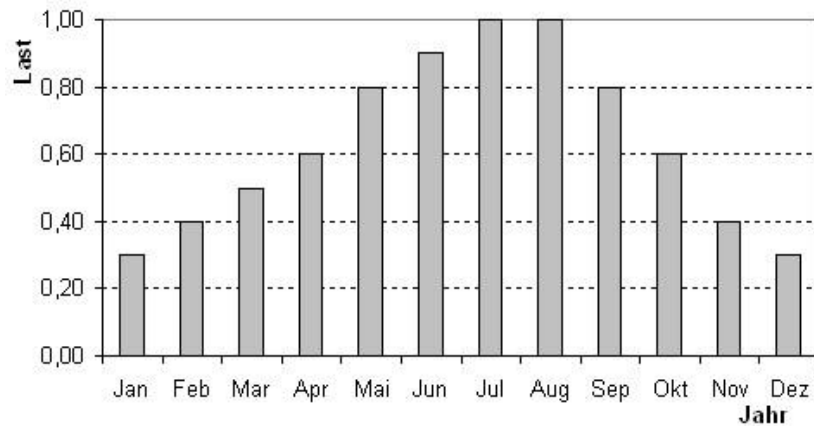


Abbildung 3.10 Jahreslastprofil für die industrielle Klimatisierung

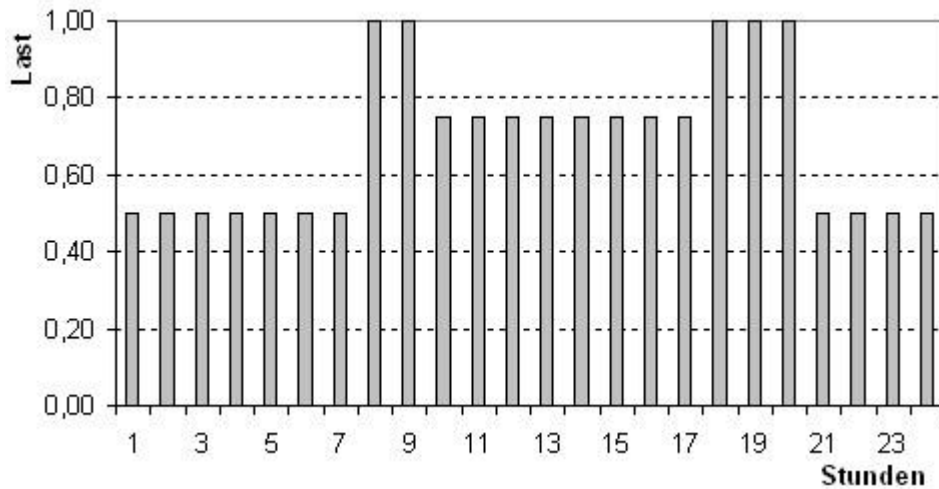
### *Gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen im Lebensmittel-EH*

Zu den gewerblichen Kühlanlagen im Lebensmittel-EH gehören alle Kälteanlagen, die als zentrale Verbundanlage mit mehreren Kühlmöbeln und Kühlzellen zusammengeschlossen sind. Diese Gruppe umfasst demnach:

- Lebensmittel-EH (Supermarkt, SB-Warenhaus, Verbundanteil der Discounter)
- Sonstige Filialen

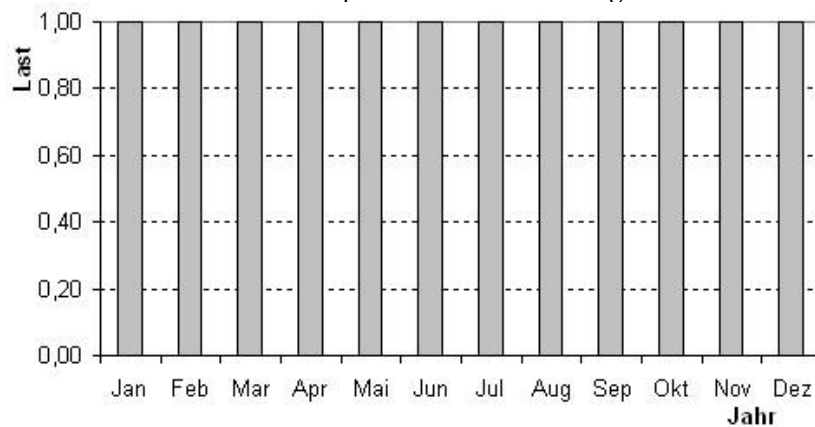
Die Geschäftszeiten des Lebensmittel-EH laufen Montag bis Samstag von 8:00 bis 20:00 Uhr. Etwa 7:00 bis 9:00 Uhr werden täglich die Waren angeliefert und die Kühlzellen bzw. Kühlmöbel bestückt. In der Zeit von 9:00 bis 17:00 Uhr ist der Betrieb aufgrund einer geringen Kundenfrequenz und damit weniger Türöffnungen der Kühlmöbel nicht ausgelastet. Die Hauptgeschäftszeit mit voller Kältelast liegt zwischen 17:00 und 20:00 Uhr. Zwischen 20:00 und 7:00 sind die Türen der Kühlmöbel und -zellen sowie die Rollos der NK-Regale geschlossen und der Leistungsbedarf zur Kälteerzeugung reduziert sich um 50 %. Die Abbildung 3.11 zeigt über den Tag verteilten Lastanteil. Werden die

Lastanteile der Tagesstunden addiert, gelangt man zu einer Volllastbetriebszeit der Kälteanlagen wie im kleingewerblichen Bereich üblich von etwa 16 Stunden.



**Abbildung 3.11 Tageslastprofil für gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen im Lebensmittel-EH**

Da der Lebensmittel-EH klimatisiert oder zumindest aber im Winter beheizt ist, bleibt das Kühllastprofil im Jahresverlauf etwa stetig. Die Kälteanlage besitzt jedoch im Winter aufgrund der geringeren Außentemperaturen für die Rückkühlung einen besseren COP, sofern sich die Verflüssiger außerhalb des Gebäudes befinden. Dieser Aspekt wird in Abbildung 3.12 nicht mit einbezogen.



**Abbildung 3.12 Jahreslastprofil für gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen im Lebensmittel-EH**

### *Gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen in Kühllagern*

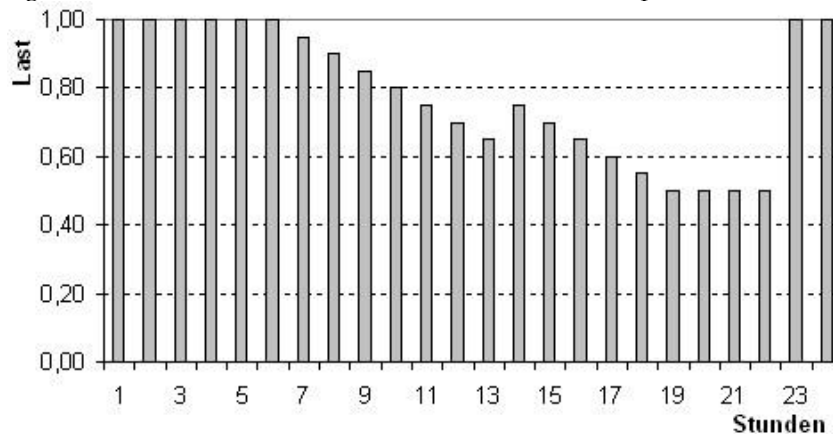
Die gewerbliche Kühlung in Kühllagern beinhaltet neben den eigentlichen Kühlhäusern auch andere große Kühllager oder Kühlzellen, die durch Verbundanlagen betrieben werden. Zu den Branchen gehören:

- Schlachthof
- Fleischverarbeitung
- Süßwaren
- Teigwaren, Ölsamen und Fette
- Bäckerei
- Kühlhaus

- Kantine
- Hotel / Gaststätte

Die Abbildung 3.13 zeigt einen typischen Verlauf des Kühlbedarfs im Tagesverlauf. Zwischen 22:00 und 6:00 Uhr erfolgt die Be- und Entladung durch die Just-In-Time-Logistik. Die regelmäßig öffnenden Türen der Kühlager erfordern die maximale Kühlleistung. Durch die Türöffnung und die eventuell etwas wärmeren Güter relativ zur Lagersolltemperatur muss die damit verbundene Temperaturerhöhung innerhalb der nächsten Stunden aus dem Kühlager ausgebracht werden. Durch die Annäherung an die Solltemperatur sinkt der Kühlbedarf im Tagesverlauf. Mittags kann es vorkommen, dass Transporter zurückkommen und Leergut oder nicht abgenommene Ware zurück ins Lager stellen.

Die Be- und Entladezeit stellt nur eine verallgemeinernde Annahme dar und kann zwischen den einzelnen Branchen variieren. Zudem kann gerade in großen Kühllhäusern festgestellt werden, dass das Stromverbrauchsprofil aufgrund der Verlagerbarkeit der Kälteerzeugung bereits an eine optimierte Strombeschaffung angepasst ist. Dabei korreliert das Lastprofil der Kälteanlage durch die Strombeschaffung an der EEX teilweise der inversen Preiskurve am Spotmarkt [Weilhardt 2009].



**Abbildung 3.13 Tageslastprofil für gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen in Kühllagern**

Aus der Annahme, dass sich Kühllager außerhalb von Gebäuden und damit nicht in klimatisierter Umgebung befinden, resultiert, dass es auch hier zu einer jahreszeitlich unterschiedlichen Verteilung der Last kommt. Während im Sommer die maximale last benötigt wird, beschränkt sich der Bedarf im Winter auf etwa 60%. Die Werte in Abbildung 3.14 stammen von einem durchschnittlichen Verteillager. Für die Branchen Bäckerei, Kantine und Hotel / Gaststätte trifft die Annahme der außerhalb des Gebäudes befindlichen Kühlzellen nicht uneingeschränkt zu. Sie werden dennoch zu dieser Kategorie hinzugerechnet.

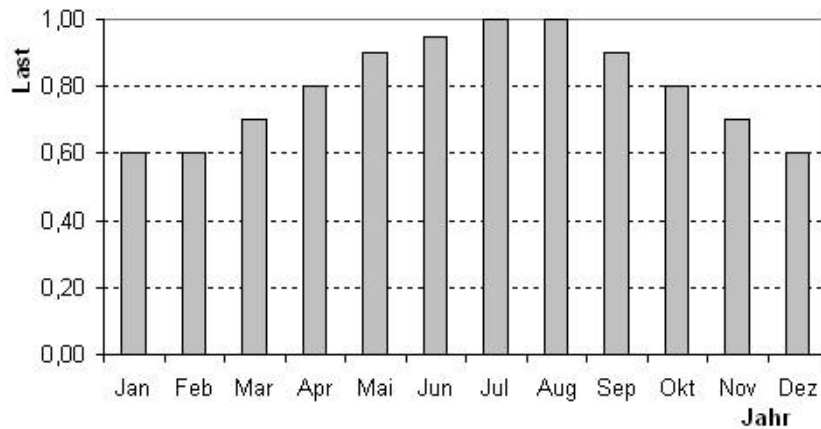


Abbildung 3.14 Jahreslastprofil für gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen in Kühl lagern

### *Prozesskälte in Industrieanwendungen*

In dieser Gruppe wird die Kälte ausschließlich oder zum Großteil für Produktionsprozesse verwendet. Damit ist ihr Bedarf an Produktionszeiten gekoppelt und gleicht dem Tageslastprofil der industriellen Kühlung. Obwohl das Stromlastprofil in Abbildung 3.15 tagsüber und nachts sehr konstant läuft, gibt es in den Verbundanlagen durch ungleichmäßig verteilte Prozessintervalle hohe Fluktuationen, die durch die bedingte Kältespeicherfähigkeit des Kältenetzes ausgeglichen werden können. Im Gegensatz zur Industrieklimatisierung arbeiten Prozesskälteanwendungen auf sehr unterschiedlichen Kühltemperaturniveaus. Für die Verteilung der Tageslast wird zwischen Tagesproduktion von 7:00 bis 19:00 Uhr und Nachtproduktion von 19:00 bis 7:00 Uhr differenziert.

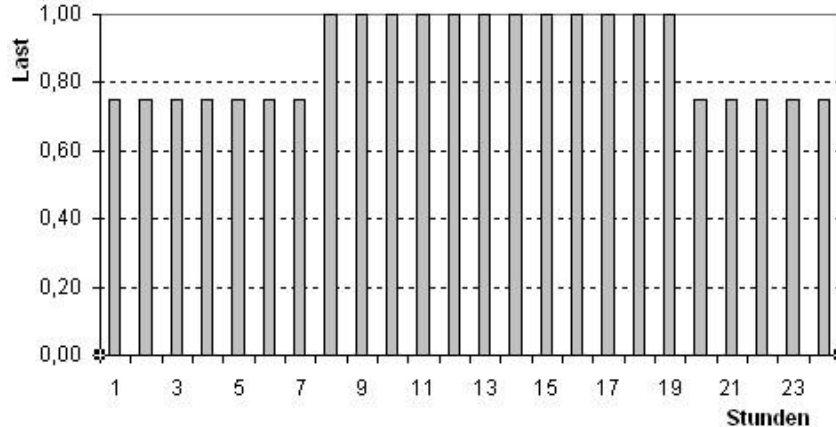


Abbildung 3.15 Tageslastprofil für Prozesskälte in Industrieanwendungen

Das Jahreslastprofil für die Prozesskälte variiert nur in unbedeutendem Maße. Die Kühlung kann nicht durch zusätzliche freie Kühlung mit Hilfe der Außenlufttemperaturen durchgeführt werden. Aus diesem Grund wird in Abbildung 3.16 für die Prozesskälte eine gleichmäßige Lastverteilung über das Jahr angenommen.

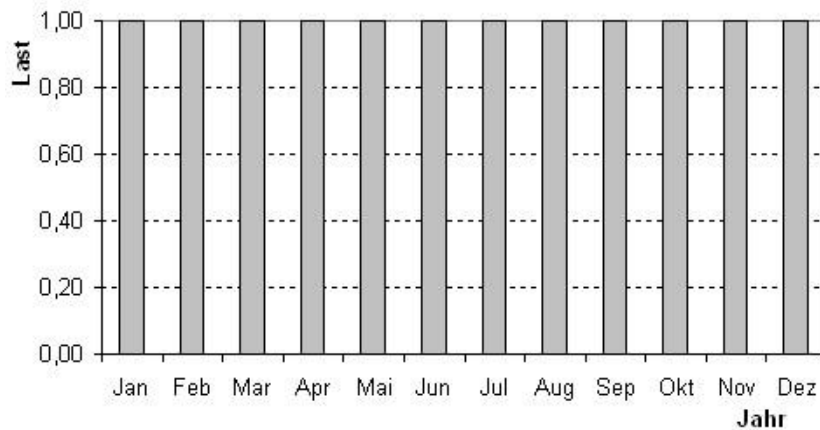


Abbildung 3.16 Jahreslastprofil für Prozesskälte in Industrieanwendungen

### *Klein- und Kleinstanlagen*

Klein- und Kleinstanlagen bezeichnen dezentrale Kälteanlagen, je jeweils nur ein Kühlmöbel oder eine Kühlzelle versorgen. Dabei können sowohl steckerfertige Anlagen als auch ein oder mehrere Einzelanlagen verwendet werden. Typische Anwendungen für dezentrale Kälteanlagen sind:

- Dezentrale Anlagen bei Discountern
- Minimarkt
- Tankstelle
- Kiosk
- Getränke-EH
- Eisdiele
- Apotheke
- Pflanzen

Diese Anlagen sind typisch für Kleinanwendungen im Bereich der Verteilung bzw. des Verkaufs von Lebensmittel an den Endkunden. Die Anlagen sind standardisiert und im Allgemeinen auf einen Temperaturdifferenzbereich von 2 °C ausgelegt. Bei Erreichen der Grenztemperatur schalten sie entweder ein oder aus (2-Punkt-Regelung). Die Schaltzeiten variieren je nach Dämmung der Kühlmöbel und Frequenz bzw. Dauer der Türöffnung. Kühlmöbel in Verkaufsräumen mit regelmäßiger Öffnung schalten etwa alle fünf bis zehn Minuten. Durch die Schaltvorgänge entsteht der in Abbildung 3.17 dargestellte unterbrochene Tagesstromverlauf.

Aus dem Stromverlauf folgt, dass die durchschnittliche Leistung über eine Vielzahl von Anlagen geringer als die aggregierte installierte Leistung sein muss, da die Taktzeiten jeder Anlagen unabhängig voneinander erfolgen. Die durchschnittlich verfügbare Leistung ergibt sich aus dem Gleichzeitigkeitsfaktor. Dieser bestimmt den Anteil der Anlagen die im Durchschnitt gleichzeitig laufen und berechnet sich aus dem Anteil der täglichen Betriebszeit des Verdichters an der Verfügbarkeit der Kühleinrichtung. Bei einer Verfügbarkeit von 24 Stunden täglich und einer Laufzeit des Verdichters von 16 Stunden beträgt der Gleichzeitigkeitsfaktor 0,67. Damit stehen 2/3 der installierter Leistung der Klein- und Kleinstanlagen für ein Lastmanagement zur Verfügung.

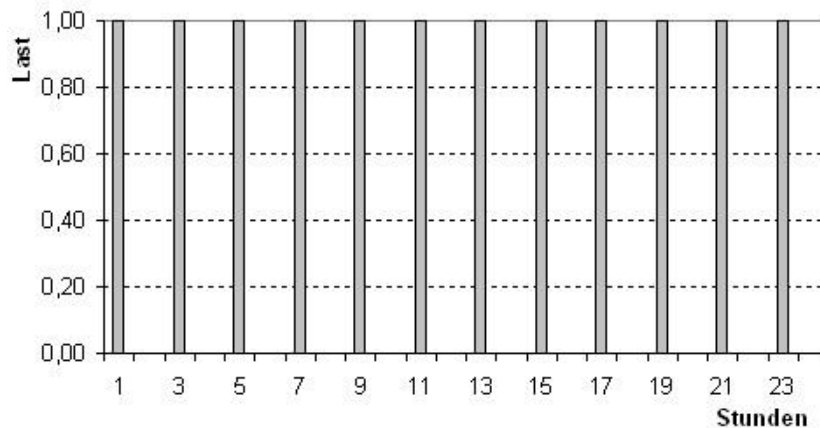


Abbildung 3.17 Tageslastprofil für Klein- und Kleinstanlagen in der Gewerbebekälte

Da sich die Kühlmöbel in klimatisierten Umgebungen befinden, schwankt deren Wärmeeintrag im Jahresverlauf kaum. Die Abbildung 3.18 stellt demnach das Jahreslastprofil von Klein- und Kleinstanlagen dar.

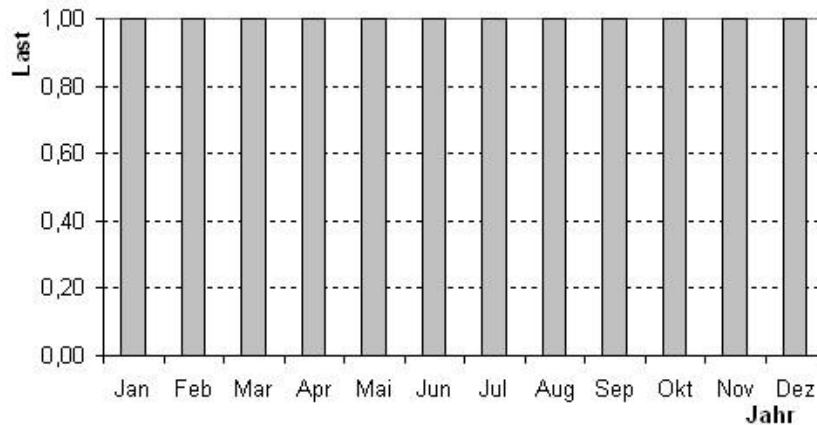


Abbildung 3.18 Jahreslastprofil für Klein- und Kleinstanlagen in der Gewerbebekälte

Die Eissportstätte passt aufgrund ihres individuellen Lastprofils in keine der definierten Gruppen. Da in diesem Bereich die Informationen zur Lastverlagerung sehr gering und Aussagen nur abschätzbar sind, wird er aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

### 3.4.3. Hemmnisse für Betreiber von Kälteanlagen zur Umsetzung von Lastmanagement

Verschiedene Hemmnisse reduzieren das technisch-wirtschaftliche Potenzial auf das realisierbare Potenzial. Sie können unterteilt werden in:

- Informatorische Hemmnisse
- Technische Hemmnisse
- Rechtliche Hemmnisse
- Finanztechnische Hemmnisse
- Organisatorische Hemmnisse

### *Informatorische Hemmnisse*

Für viele Unternehmen der relevanten Branchen sind die Energiekosten ein bedeutender Faktor bei den Betriebskosten. In diesen Energiekosten nehmen die Stromkosten für die Kälteerzeugung wiederum einen beträchtlichen Teil ein. Im Lebensmittel-EH liegt beispielsweise der Anteil der Kosten für die Kälteerzeugung bei 48 % der Gesamtstromkosten [Rhiemeier et al 2008]. Dennoch haben Unternehmen in vielen Branchen einen mangelnden **Kenntnisstand zur Kältetechnik**. Die empirische Untersuchung belegt, dass nur wenige Betreiber detaillierte Informationen zu den Leistungsdaten ihrer Anlagen haben. Priorität hat die Erfüllung der Kühlanforderungen. Zwar wird die Überwachung der Kühlanforderungen vom Betreiber übernommen, jedoch erfolgt die technische Betreuung durch Kältefachunternehmen. Tendenziell verringert sich das Wissen um die Anlagentechnik mit der Verringerung der Kälteleistung pro Betriebsstätte. In größeren Unternehmen oder Handelsketten gibt es Verantwortliche oder verantwortliche Bereiche, die sich mit technischen Fragen der Energieeffizienz auseinandersetzen. Dabei geht es um die Anlageneffizienz, die Optimierung der Betriebsführung oder des Wärmeeintrages in die Kühlräume. In Branchen mit kleineren Kälteanlagen gibt es solche verantwortlichen Bereiche nicht. Mangelnde Kenntnisse zur installierten Technik verhindern eine detaillierte Bewertung des Lastmanagements.

Über **Erfahrung mit Lastmanagement** im Kühlbereich können bisher nur große Kühlhausbetreiber sowie die Industrie einordnen. In der Industrie spielen die exakten Kältebedingungen eine weitaus wichtigere Rolle als Lastmanagement. Außerdem sind Kälteanwendungen gerade in der Industrie oft nicht die bedeutendsten Kostenfaktoren. Betreiber mit einem hohen Stromverbrauch sind in der Regel Sondertarifkunden, die ihren Strom angepasst an die Strombezugspreise der Stromversorger bzw. selbst den Strom über Stromhändler an der Strombörse beziehen. Ja nach Verlagerungspotenzial betreiben Branchen wie Kühlhäuser (Zentralkühllager bzw. Kühlhausbetreiber mit mehreren Standorten) bereits Lastmanagement, indem sie ihr Verbrauchprofil nach den Bezugspreisen richten. Tarifkunden haben in der Regel keinen variablen Arbeitspreis und damit kein Anreiz zur Lastverlagerung. Gerade kleine und mittelständische Unternehmen verfügen zudem nicht über die Ressourcen, sich intensiv mit jedem neuesten technologischen Trend auseinander zu setzen.

Im Zusammenhang mit der Einführung von dezentral gesteuertem Lastmanagement steht die Entwicklung und Anwendung von Informationstechnologien, die wie der Betreiber selbst die Eingriffsmöglichkeit in den Betrieb der Anlagen besitzen soll. Anlagenbetreiber verfügen über keine **Erfahrungen mit externen Regelungsmechanismen** ihrer Kälteanlagen. Die Abgabe von Kompetenzen führt zu einer Implizierung des Auftretens von Funktionsstörungen gerade bei neu entwickelten Technologien mit gleichzeitigem Einflussverlust zur Fehlerbehebung. Die Folgen bei nicht eingehaltenen Kühlanforderungen sind über alle Branchen nicht zu unterschätzen. Es betrifft die Senkung der Mindesthaltbarkeit von Lebensmitteln, Beschwerden von Beschäftigten oder Kunden über schlechte Klimatisierung bis zu Produktionsunterbrechungen in der Industrie. Die daraus entstehenden Folgen drücken sich auch in Schäden finanzieller Art und in Reputationsverlusten aus. Aus Mangel an praktischen Erfahrungen zur Betriebssicherheit entstehen Unsicherheiten, wodurch die Betreiber dieser Form von Lastmanagement ablehnend gegenüber stehen.

### *Rechtliche Hemmnisse*

Rechtliche Bestimmungen in der Kälteerzeugung haben mehrere Hintergründe. Es gibt Bestimmungen, welche die Anlagentechnik, deren Sicherheit und weitere Aspekte wie die Lärmemission betreffen. Sie haben eine zentrale Bedeutung für die Planung, die Auslegung der Komponenten und den Standort der Anlagen. Für die Durchführung von Lastmanagement spielen sie keine Rolle.

Ein weiterer Hintergrund der gesetzlichen Bestimmungen wurde bereits im Kapitel 2.2.4 beschrieben. Dabei geht es um die Temperaturanforderungen von Kühlgütern, speziell für Lebensmittel.

Festgelegte Grenztemperaturen dürfen bei der Lagerung nicht überschritten werden, sonst gibt es Auswirkungen auf das Mindesthaltbarkeitsdatum der Lebensmittel bzw. Abnehmer von Lebensmittel können diese zurückweisen. Diese Richtlinie wirkt sich auf die Verlagerungsdauer und damit auf die praktische Umsetzbarkeit von Lastmanagement aus, ist aber unentbehrlich für ein kontrollierbares und effizientes Verteilungssystem von Lebensmitteln zum Schutz der Bevölkerung. Auf die Höhe der verschiebbaren Leistung gibt es keinen Einfluss, da Lastmanagement als solches nicht reglementiert wird. Demnach kann nicht von rechtlichen Hemmnissen gesprochen werden.

Neben den bereits vorhandenen rechtlichen Bestimmungen können Haftungsfragen sowohl auf der Seite der Anlagenbetreiber als auch auf der Seite der Versorgungsunternehmen eine Rolle bei der Umsetzung von Lastmanagement spielen. Dabei sind Haftungsfragen in Bezug auf die Erhaltung der Kühlgutes als auch in Bezug auf die Beschädigung der Kälteanlage zu unterscheiden. Es ist davon auszugehen, dass das Versorgungsunternehmen die Gewährleistung der Kühlanforderungen im Falle einer über die dezentrale Regelung durchgeführten Lastverschiebung übernimmt. Hier könnten Festlegungen in Anlehnung an das Wärme- bzw. Kältecontracting getroffen werden. Des Weiteren kann bei Eingriff in die Kälteanlage zum Anschluss der externen Regelung oder während des Betriebes durch die Schaltung Schäden in der Kälteanlage selbst entstehen. Diese Art der Haftung ist für das Versorgungsunternehmen mit dem Hersteller der Kälteanlage zu klären. In dieser Studie werden die Haftungsfragen nicht in eine quantitative Bewertung einbezogen, da sie ein Ausschlusskriterium sind und als Bedingung für jegliche Form der Umsetzung von Lastmanagement erforderlich sind.

### *Technische Hemmnisse*

Lastmanagement für Kälteanlagen kann nur umgesetzt werden, wenn die notwendigen technischen Voraussetzungen geschaffen werden. Das umfasst sowohl die Messung des Stromverbrauchs und der Kühlanforderungen sowie die Kommunikationsinfrastruktur, deren Anbindung an die Kälteanlage und die Regelung des Verdichters sowie der Kühlstellen. Das Lastmanagement, welches aktuell durch Großverbraucher umgesetzt wird, ist lediglich unidirektional gesteuert, d.h. in eine Richtung. Durch Preisinformationen des Versorgers entscheidet der Verbraucher manuell, ob und in welchem Umfang das Lastmanagement durchgeführt wird. Ein intelligentes, dezentrales Lastmanagement erfordert jedoch das Vorhandensein der Regeltechnik, der Kommunikationsstandards sowie der Schaltinstrumente zur automatischen Regelung, ohne dessen eine umfangreiche, branchenübergreifende Implementierung ausgeschlossen ist. Dieses technische Hemmnis muss daher stets für die Planung von Lastmanagement bedacht und im Rahmen weiterer Entwicklungen abgebaut werden. In dieser Studie werden die technischen Voraussetzungen nicht in eine quantitative Bewertung einbezogen, da auch sie ein Ausschlusskriterium für Lastmanagement sind und die Umsetzungsmöglichkeiten bei gegebener technischer Realisierbarkeit im Vordergrund stehen.

### *Finanztechnische Hemmnisse*

Wie für jede Investition steht auch beim Lastmanagement die Frage, zu welchem Nutzen die möglichen Aufwendungen die Einführung, die Infrastruktur und den Betrieb des Lastmanagementsystems führen. Diese Fragestellung ist gerade dann relevant, wenn das Investitionsprojekt wie bei der Kälteerzeugung nicht in das Kerngeschäft passt. Nur bei ausreichenden Renditen und kurzen Amortisationszeiten wird die Investition durchgeführt. Die Finanzierung ist in diesem Fall an die Erwartung an das Kosten-Nutzen-Verhältnis gebunden, die als organisatorisch-motivatorisches Hemmnis später beschrieben wird.

Äußere finanztechnische Hemmnisse spielen hier in Deutschland und im Zusammenhang mit der Kälteerzeugung keine besondere Rolle. Aus diesem Grund werden die finanztechnischen Hemmnisse nicht weiter in die Betrachtung einbezogen.

### *Organisatorische Hemmnisse*

Sowohl aus den zuvor genannten gesetzlichen Kühlanforderungen und einem damit verbundenen Anspruch an die Gewährleistung der Einhaltung als auch aus dem Komfortempfinden von Beschäftigten bei einer bestimmten Temperatur für die Klimatisierung folgt eine qualitativ noch über den festgelegten Richtlinien stehende, erhöhte Anforderung an die Kühlung. Im Schlachthof wird das Schweine- und Rinderfleisch nicht auf 7 °C gekühlt, sondern auf 4 °C. Damit ist die Solltemperatur der Raumluft im Kühllager auf 2 °C eingestellt. Mit dieser Anforderung der Kunden, welche die Ware abholen, soll vorgebeugt werden, dass das Fleisch während des Transports möglicherweise über die Grenztemperatur steigt, falls die Kühlkapazitäten des Transporters nicht ausreichen. Da das NK-Lager nicht zufrieren soll, sind Temperaturen unter 0 °C nicht erlaubt. Durch die Anforderungen sinkt also die Temperaturspanne, die eine Lastverlagerung mit sich bringt und dadurch die Verlagerungsdauer.

Eine weitere erhöhte Kühlanforderung ist die Einhaltung bestimmter Kühltemperaturen mit einer maximalen Schwankungsbreite von 0,5 bis 1 °C. Diese Anforderungen finden sich sowohl in der Klimatisierung als auch in Kühllhäusern. Das Komfortempfinden von Menschen in einem klimatisierten Gebäude kann sich bereits bei einer Temperaturerhöhung von 1 °C merklich verschlechtern. In den meisten Gebäuden ist damit eine Abweichung von der Raumsolltemperatur nicht akzeptierbar. Es kommt zu Beschwerden, die mit Aufwand verbunden sind. Die Temperaturgrenze von 26 °C ist nicht relevant. Durchschnittliche Raumsolltemperaturen bewegen sich zwischen 22 bis 23 °C. In Kühllhäusern fordern Kunden die Lagerung ihrer Kühlgüter bei einer konstanten Temperatur, um eine mögliche kristalline Strukturänderung von Lebensmitteln wie beispielsweise Eiskrem nicht zu fördern. Diese **erhöhten Kühlanforderungen werden zum Qualitätskriterium**, für das die Kunden zahlen und nicht bereit sind, durch Energie- und Kosteneinsparungen Einschränkungen zu machen.

Ein Unternehmer wird ein Projekt nur durchführen, wenn dieses Projekt für ihn einen vertretbaren Aufwand darstellt und es für ihn eine angemessene Rendite einbringt. Für viele Betreiber ist aufgrund der nicht vorhandenen Erfahrungen der Aufwand nicht kalkulierbar. Gerade kleine und mittelständische Unternehmen haben, wie bereits erwähnt, kaum Ressourcen verfügbar, um sich mit einem für sie neuem Geschäftsmodell auseinanderzusetzen. Dem nur schwer kalkulierbaren Aufwand steht ein möglicher Ertrag gegenüber, der genauso wenig berechenbar ist, zumal er durch die dezentrale Steuerung nicht durch eigene Aktivitäten umsetzbar ist, sondern von externen Einflüssen wie der Stromversorgungssituation abhängt. Viele Unternehmen schätzen den erzielbaren, zusätzlichen Ertrag bzw. die möglichen Kosteneinsparungen nicht so hoch ein, als dass sie die für sie angemessene Rendite einbringen. Dabei spielen sowohl Kenntnisse über die Entwicklung auf den Energiemärkten als auch das Wissen um die eigenen Möglichkeiten zum Lastmanagement eine Rolle. Es entsteht die **Erwartung an unvorteilhaftes Kosten-Nutzen-Verhältnis**. Aufgrund dessen ist das Interesse am Lastmanagement beispielsweise in der Lebensmittelherstellung relativ gering, obwohl es bei dem Thema Effizienzsteigerungen sehr wohl Aktivitäten bei den Unternehmen gibt.

Der Begriff **Betreiber-Nutzer-Dilemma** kann zurückgeführt werden auf den bereits etablierten Terminus Mieter-Vermieter-Dilemma im Gebäudebereich. Vorrangig in der Klimatisierung aber auch in anderen Branchen sind die Nutzer der Kälte nicht die Betreiber der Kälteanlagen. Die Nutzer, meist handelt es sich um mehrere Parteien, tragen lediglich die Kosten der Kälteerzeugung. Bei der Klimatisierung sind die Betreiber die Vermieter der Gebäude und die Nutzer die Mietparteien. In anderen Branchen wird entweder die eigene Kälteerzeugung durch Contracting an einen Dienstleister abgegeben, der die Kälteanlage betreibt, oder das eigene Kältenetz ist an ein Fernkältenetz angeschlossen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Nutzung von Gewerbeflächen in einem Gewerbegebiet, in dem die Kälteerzeugung lediglich von einem Unternehmen durchgeführt wird und die anderen Unternehmen die Verdichter zur Versorgung der eigenen Kühllager mitnutzen.

Bei mehreren Nutzern müssen sich alle Nutzer auf die Ausgestaltung der Kühlanforderungen bei Lastverschiebung einigen. Es hat sich herausgestellt, dass Kompromisse zwischen unterschiedlichen Nutzer oft sehr schwierig zu erreichen sind. Ein weiteres Problem könnte die nutzergerechte Aufteilung der Kostenersparnisse für den Fall sein, dass nicht genau bestimmt werden kann welcher Nutzer zur Zeit der Lastverschiebung gerade von einer reduzierten Versorgung betroffen war.

Andererseits gibt es Informationsasymmetrien zwischen dem Betreiber und den Nutzern bzw. dem Nutzer, da nur der Betreiber der Anlage weiß, wann tatsächlich Lastverschiebungen stattgefunden haben und wie hoch die Erlöse daraus sind. Inwieweit diese dann den Nutzern transparent dargelegt werden und eine Aufteilung erfolgt, ist von den Betreibern abhängig. Diese Tatsachen können die Motivation zur Umsetzung von Lastmanagement mindern.

### **3.5. Bestimmung des Lastmanagementpotenzials**

#### **3.5.1. Aggregation des theoretischen Potenzials**

Aus den Branchenzahlen der Stadt Mannheim und den technischen Annahmen zu den Kälteanlagen kann nun die gesamte elektrische Anlagenleistung errechnet werden. Sie bildet den Ausgangspunkt für die Modellierung der Lastmanagementpotenziale. Die aggregierte Kälteanlagenleistung umfasst das maximale, theoretische Lastverlagerung ungeachtet des zeitlichen Betriebes und der technischen Umsetzbarkeit der Leistungsverlagerung. Bei der Berechnung erfolgt bereits die Einordnung der Anlagen anhand der Gruppierung der Lastprofile.

#### ***Gewerbliche Klimatisierung***

Die aggregierte Leistung in der Gruppe der gewerblichen Klimatisierung wird auf der Grundlage der Beschäftigtenzahlen der jeweiligen Branche ermittelt. Wie in Tabelle 3.18 deutlich wird, schränkt sich bei der Betrachtung der relevanten Größe die Zahl der Betriebsstätten sehr stark ein, ohne jedoch großen Einfluss auf die Zahl der Beschäftigten zu üben. Über dieses Vorgehen wird eine hohe Zahl kleiner Betriebe unter zehn bzw. 20 Beschäftigten oder im Fall der Hotels die Pensionen, Herbergen, Gasthöfe und Hotel Garni herausgefiltert, bei denen der Klimatisierungsgrad ähnlich dem Wohnbereich gering ausfällt. Eine weitere Umverteilung erfolgt über die bereinigte Größe, bei der 40 % der Beschäftigten aus der Gruppe der Lastprofile für industrielle Klimatisierung zu den Beschäftigten im Bereich Büroklimatisierung überführt werden. Gerade große Industrieunternehmen haben in Mannheim neben den Produktionsstätten auch Bürogebäude bzw. nur Bürogebäude ohne Produktionsstätten. Von der Zahl der Betriebsstätten kann nicht auf die Zahl der Gebäude und dementsprechend auf die Zahl der Verbundkälteanlagen geschlossen werden, da ein Gebäude von mehreren Mietern oder umgekehrt ein Betrieb mehrere Gebäude nutzen kann.

**Tabelle 3.18 Kälteanlagenleistung der Gruppe Gewerbliche Klimatisierung**

Branche	Branchenzahlen		relevante Branchenzahlen <sup>1)</sup>		bereinigte Branchenzahlen <sup>2)</sup>		Flächenkennzahl in m <sup>2</sup> /Größe	Nutzfläche in m <sup>2</sup>
	Betriebsstätten	Beschäftigte/ *Betten	Betriebsstätten	Beschäftigte/ *Betten	Beschäftigte/ *Betten	Beschäftigte/ *Betten		
Verwaltung	53	5.782	25	5.623	5.623		25	140.575
Büro	2.740	43.517	328	34.755	47.499		35	1.662.465
Handel / Gewerbe	1.437	21.639	341	18.311	16.168		30	485.040
Hotel*	47	5.220	19	3.550	3.550		30	106.500
Gaststätte	600	2.981	68	1.869	1.869		30	56.070
GESAMT	4.877	79.139	781	64.108				2.450.650

Branche	Nutzfläche in m <sup>2</sup>	Leistungskennzahl in W <sub>therm</sub> /m <sup>2</sup>	COP	Durchdringungsrate	Überdimensionierung in %	maximal genutzte Leistung in MW <sub>el</sub>	installierte Leistung in MW <sub>el</sub>
Büro	1.662.465	50	4,5	0,8	15	14,78	16,99
Handel / Gewerbe	485.040	80	3,5	0,8	15	8,87	10,20
Hotel*	106.500	40	4,5	0,8	15	0,76	0,87
Gaststätte	56.070	40	3,0	0,8	15	0,60	0,69
GESAMT	2.450.650					26,42	30,37

<sup>1)</sup> Ausschluss von Unternehmen mit Beschäftigtenzahlen unter 10 bzw. 20 Beschäftigte

<sup>2)</sup> 40 % der Beschäftigten in der Industrie arbeiten in Bürogebäuden

Über die Flächenkennzahl kann auf die Nutzfläche der einzelnen Branchen geschlossen werden. Dabei fällt fast 70 % auf die Bürogebäude. Die Flächenzahl stimmt mit der im Jahr 2006 durch Fehrmann in Zusammenarbeit mit der MVV durchgeführten Studie überein, die eine gewerbliche Gebäudefläche in Mannheim von 2,43 Mill. m<sup>2</sup> ermittelt haben [Eisenhauer 2006]. Anhand der weiteren bereits in den Annahmen beschriebenen Kennzahlen werden die maximal genutzte und die installierte elektrische Leistung errechnet. Diese unterscheiden sich um die Überdimensionierungsrate. Wesentlich für die Berechnung des theoretischen Potentials ist die maximal genutzte elektrische Leistung. Diese beträgt insgesamt 26,41 MW<sub>el</sub> und ergibt sich zu 56 % aus der Anlagenleistung der Bürogebäude. Einen weiteren bedeutenden Anteil hat der Bereich Handel / Gewerbe mit etwa 34 %.

### Industrielle Klimatisierung

Die aggregierte Leistung der Kälteanlagen in der industriellen Klimatisierung wird über das gleiche Verfahren berechnet wie bei der gewerblichen Klimatisierung. Die Anzahl der Betriebsstätten reduziert sich durch die Beschränkung auf eine Mindestzahl von 50 Beschäftigten auf 26 %, obwohl die Gesamtzahl der Beschäftigten nur auf 94 % sinkt. Über die bereits angeführten Kennzahl ergibt sich die in Tabelle 3.19 ermittelte maximal genutzte elektrische Leistung von 9,63 MW<sub>el</sub>. Da eine Überdimensionierung von 15 % angenommen wird, liegt die installierte elektrische Leistung bei 11,08 MW<sub>el</sub>.

**Tabelle 3.19 Kälteanlagenleistung der Gruppe Industrielle Klimatisierung**

Branche	Branchenzahlen		relevante Branchenzahlen		bereinigte Branchenzahlen	Flächen-	Fläche in m <sup>2</sup>
	Betriebsstätten	Beschäftigte/ *Betten	Betriebsstätten	Beschäftigte/ *Betten	Beschäftigte/ *Betten	kennzahl in m <sup>2</sup> /Größe	
Industrie	330	33.930	87	31.861	19.117	30	573.510

Branche	Nutzfläche in m <sup>2</sup>	Leistungs-kennzahl in W <sub>therm</sub> /m <sup>2</sup>	COP	Durchdringungsrate	Überdimensionierung in %	maximal genutzte Leistung in MW <sub>el</sub>	installierte Leistung in MW <sub>el</sub>

### *Gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen im Lebensmittel-EH*

Für den Bereich der gewerblichen Kühl- und Gefrieranlagen im Lebensmittel-EH wird lediglich der Anteil der Anlagenleistungen betrachtet, der durch Verbundanlagen bereitgestellt wird. Diese Annahme ist für das Ladenformat Discounter relevant, da dort die gesamten TK-Kühlmöbel und ein Teil der NK-Möbel steckerfertig betrieben werden und dieser Teil damit in die Gruppe Klein- und Kleinstanlagen fällt. Aus den Annahmen zur durchschnittlichen Länge installierter Kühlmöbel und deren Leistung geht die maximal genutzte Leistung hervor. Da angenommen wird, dass es keine Überdimensionierung gibt, ist die maximal genutzte Leistung auch gleich der installierten Leistung.

**Tabelle 3.20 Kälteanlagenleistung der Gruppe Gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen im Lebensmittel-EH**

Branche	Zahl der Betriebsstätten	Leistung der Verbundanlage in kW <sub>el</sub>	Leistung		gesamte Leistung in MW <sub>el</sub>
			verschließbarer Kühlmöbel in kW <sub>el</sub>	offener Kühlmöbel in kW <sub>el</sub>	
Discounter (Verbund)	71	9,7	-	9,7	0,69
Supermarkt	129	41	16,4	24,6	5,29
SB-Warenhaus	27	107,5	59,1	48,4	2,90
Sonstige Filialen	249	4,6	1,5	3,1	1,15
GESAMT	476				10,03

Multipliziert man die Leistung mit der Zahl der jeweiligen Betriebsstätten, erhält man die gesamte Leistung. Nach der Tabelle 3.20 beträgt diese für alle Verbundanlagen der 476 Betriebstätten zusammen 10,03 MW<sub>el</sub>. Die größte Leistung in dieser Gruppe besitzen aufgrund ihrer hohen Anzahl die Supermärkte.

### *Gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen in Kühllagern*

Für die Kühllager muss beachtet werden, dass nicht alle Betriebsstätten in die Berechnung einfließen. Gerade bei den Nahrungsmittelherstellung konnten keine Informationen zu Anlagenleistungen erlangt werden. Jedoch haben diese Angaben aufgrund der Zahl der Betriebsstätten keine besondere Bedeutung. Die Leistungen und die Zahl der jeweiligen Betriebsstätten ergeben die aggregierte Anlagenleistung. In Tabelle 3.21 ergibt sich eine gesamte Leistung von 3,98 MW<sub>el</sub>.

**Tabelle 3.21 Kälteanlagenleistung der Gruppe Gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen im Kühlhäusern**

Branche	Zahl der Betriebsstätten	Leistung pro Betriebsstätte in kW <sub>el</sub>	Anteil Prozess / Lagerung	NK - Leistung TK - Leistung		gesamte Leistung in MW <sub>el</sub>
				pro Betriebsstätte in kW <sub>el</sub>	pro Betriebsstätte in kW <sub>el</sub>	
Schlachthof	1	264	35 / 65	172	-	0,26
Fleischverarbeitung	47					0,53
- davon Großhandel	16	19,6	- / 100	11,8	7,8	
- davon Einzelhandel	31	7	- / 100	4,2	2,8	
Süßwaren	1	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Teigwaren, Ölsamen und Fette	1	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Bäckerei	35					0,19
- davon Großhandel	8	10,9	50 / 50	4,4	1	
- davon Einzelhandel	27	3,9	50 / 50	1,6	0,4	
Kühlhäuser	10					1,38
- davon Zentrallager <sup>1)</sup>	1	840	- / 100	40	800	
- davon Verteillager	9	60	- / 100	54	6	
Kantine	80	3,3	- / 100	1	2,3	0,26
Hotel / Gaststätte	647	2,1	- / 100	1,2	0,9	1,36
<b>GESAMT</b>	<b>822</b>					<b>3,98</b>

<sup>1)</sup> Schockfroster als Teil der Prozesskühlung sind nicht Gegenstand der Betrachtung

Interessant in dieser Gruppierung sind die Kühlhäuser, die sie mit einer geringer Anzahl zu 35 % an der Gesamtleistung beitragen. Hier liegt der Großteil zudem bei einem einzigen Kühlhaus. Bis auf die den Schlachthof sind die anderen Anwendungen aufgrund der geringen Leistung pro Betriebsstätte relativ unbedeutend.

### Prozesskälte in Industrieanwendungen

Über den Bereich Prozesskälte bei Industrieanwendungen können nur wenige Aussagen getroffen werden. Wie die Tabelle 3.22 verdeutlicht, konnten bei den Industrie- und Pharmazieunternehmen keine Leistungen ermittelt werden. Zudem ist es auch nicht möglich, auf der Grundlage anderer empirischer Untersuchungen auf durchschnittliche, regionale Leistungsgrößen zu schließen. Die Anlagen sind in ihrer Leistungskapazität nicht standardisierbar.

**Tabelle 3.22 Kälteanlagenleistung der Gruppe Prozesskälte in Industrieanwendungen**

Branche	Zahl der Betriebsstätten	Leistung der Verbundanlage in kW <sub>el</sub>	gesamte installierte Leistung in MW <sub>el</sub>
Chemie	4	k.A.	k.A.
Pharmazie	33	k.A.	k.A.
Brauerei	1	810	0,81
<b>GESAMT</b>	<b>38</b>		<b>0,81</b>

Es konnte lediglich die installierte Leistung der Brauerei mit 0,81 MW<sub>el</sub> ermittelt werden. Dieser Wert entspricht jedoch auf keinen Fall der gesamten Leistungskapazität dieser Lastprofilgruppe.

### Klein- und Kleinanlagen

Zu dem Klein- und Kleinstgeräten gehören eine Reihe von Anwendungen im Bereich der Nahrungsmittelverteilung und -lagerung. Die aggregierte Leistung dieser Gruppe beträgt nach Tabelle 3.23 insgesamt 5,45 MW<sub>el</sub>. Von großer Bedeutung in dieser Gruppe sind die dezentralen Anlagen der Discounter, vorwiegend TK-Truhen, und die Minimärkte aus dem Bereich Lebensmittel-

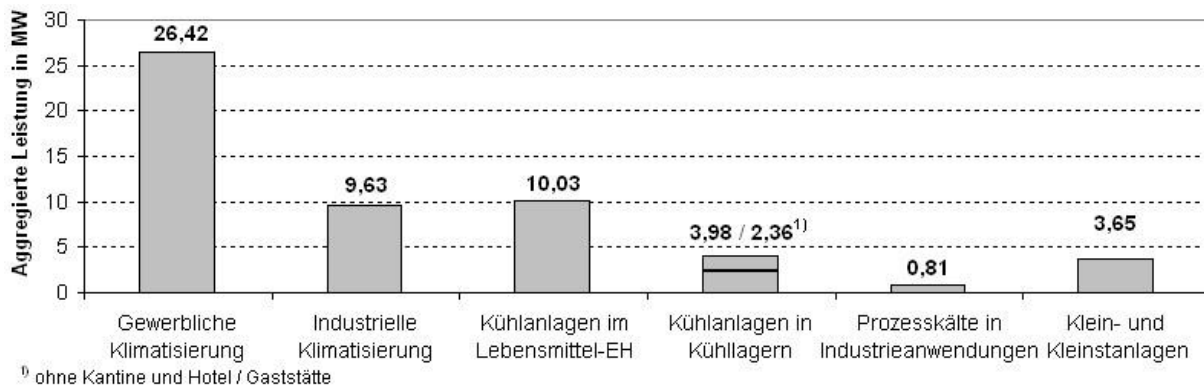
EH mit einem Anteil von zusammen 81 %. Alle weiteren Branchen liefern nur einen sehr begrenzten Beitrag zur gesamten Anlagenleistung.

**Tabelle 3.23 Kälteanlagenleistung der Gruppe Klein- und Kleinstanlagen**

Branchen	Zahl der Betriebsstätten	Leistung der dezentralen Anlage in kW <sub>el</sub>	verschießbarer Kühlmöbel in kW <sub>el</sub>	offener Kühlmöbel in kW <sub>el</sub>	Gleichzeitigkeitsfaktor	gesamte Leistung in MW <sub>el</sub>
Discounter (dezentral)	71	25	25	-	0,67	1,19
Minimarkt	202	13	11,4	1,6	0,67	1,76
Tankstelle	30	4	3,5	0,5	0,67	0,08
Kiosk	150	3,2	2,7	0,5	0,67	0,32
Getränke-EH	57	0,43	0,43	-	0,67	0,02
Eisdiele	43	3,1	1,7	1,4	0,67	0,09
Apotheke	101	0,26	0,62	-	0,67	0,02
Pflanzen	116	2,25	2,25	-	0,67	0,17
GESAMT	770					3,65

### Zusammenfassung

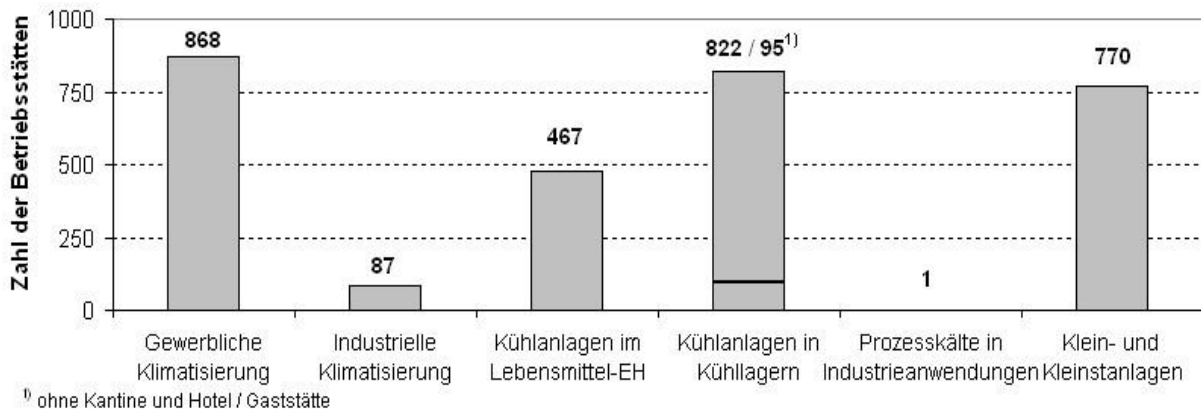
Über alle Lastprofilgruppen werden insgesamt maximal 54,34 MW<sub>el</sub> Anlagenleistung für die Kälteerzeugung genutzt. Die mit 49 % bedeutendste Gruppe ist die der gewerblichen Klimatisierung. Nach Abbildung 3.19 besitzen die anderen Gruppen eine deutlich geringere aggregierte Leistungskapazität.



**Abbildung 3.19 Aggregierte Kälteanlagenleistung nach Lastprofilgruppen**

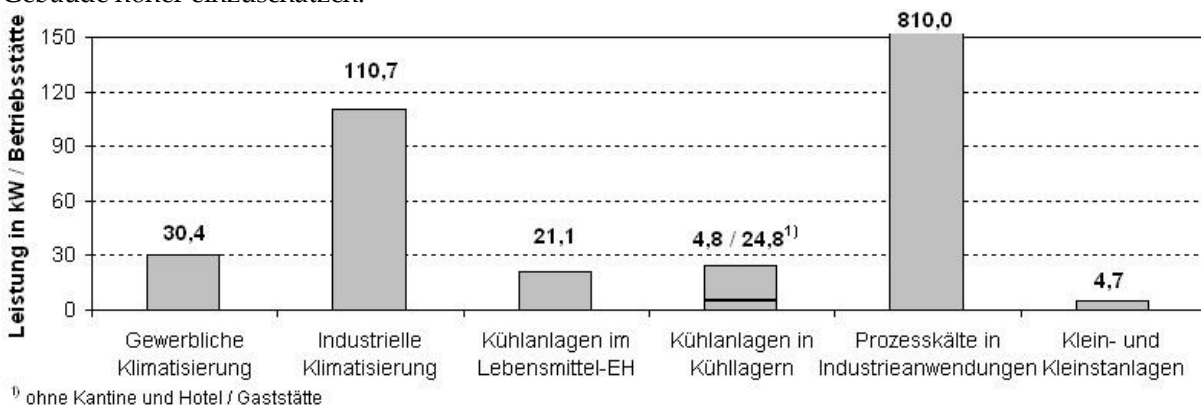
Hinzu kommt der Bereich Haushalt bei 169.770 Haushalten mit einer Leistung der Kühleinrichtung von 90 W<sub>el</sub> auf eine gesamte Leistung von 15,28 MW<sub>el</sub>. Bezieht man den Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,4 mit ein, so liegt die ständig benötigte Last durch Haushaltskühleinrichtungen immer noch bei 6,11 MW<sub>el</sub>.

Unter dem Aspekt der Zahl der Betriebsstätten als bereinigte Größe verfügt die gewerbliche Klimatisierung durch die Einbindung der Industriebetriebe mit 868 auch über die größte Anzahl. Aus der Abbildung 3.20 kann zudem entnommen werden, dass auch die Kühllager sowie die Klein- und Kleinstanlagen mit 822 bzw. 770 eine hohe Zahl an Betriebsstätten erreichen. Schließt man jedoch die Hotels / Gaststätten und Kantinen aus der Berechnung aus, reduziert sich die Zahl der Betriebsstätten in der Gruppe Kühllager auf lediglich 95. Der Lebensmittel-EH und die industrielle Klimatisierung besitzen mit 467 und 87 Betriebsstätten eine überschaubare Anzahl an Betriebsstätten.



**Abbildung 3.20 Aggregierte Zahl der Betriebsstellen nach Lastprofilgruppen**

Die Abbildung 3.21 stellt nun die Relation aus der aggregierten Leistung der Lastprofilgruppen und deren Zahl der Betriebsstätten dar. Dabei hat die Industrie sowohl bei der Prozesskälte als auch bei der Klimatisierung die höchsten Leistungen pro Betriebsstätte. Etwas irreführend ist der Werte der gewerblichen Klimatisierung mit nur etwa 30 kW<sub>el</sub> pro Betriebsstätten. Da Gebäude von mehreren Mietern genutzt werden können, ist die durchschnittliche Leistung für Klimaanwendungen pro Gebäude höher einzuschätzen.



**Abbildung 3.21 Durchschnittliche Leistung pro Betriebsstätte nach Lastprofilgruppen**

Schließt man wiederum die Hotels und Gaststätten aus der Bewertung aus, verfügen die Kühllager sowie der Lebensmittel-EH mit 24,8 kW<sub>el</sub> und 21,1 kW<sub>el</sub> über vergleichbare, durchschnittliche Leistungskapazitäten. Erwartungsgemäß haben die Klein- und Kleinstanlagen mit 4,5 kW<sub>el</sub> pro Betriebsstätte die geringste installierte Leistung.

### 3.5.2. Ermittlung des wirtschaftlich-technischen und realisierbaren Potenzials

Das theoretische Lastverlagerungspotenzial umfasst die gesamte zeitlich aufgelöste genutzte Leistung. Es wird eingeschränkt durch:

- Anwendungen in der Industrie, die durch eigene prozesstechnische Wärmeentwicklung über keine Speicherkapazitäten verfügen
- Andere prozesstechnische Kühlanwendungen, bei denen die Kältebereitstellung eine Notwendigkeit für die Durchführbarkeit des Prozesses darstellt
- Notwendigkeit des Betriebs der Kälteanlagen bei hohem Wärmeeintrag in Kühlräume wie bei offenen Kühlmöbeln, während der Be- und Entladung von Kühl lagern sowie zu Hauptgeschäftszeiten oder zur Reduzierung der Temperatur von Nahrungsmitteln sowie während der Abtauung der Verdampfer durch Heißgase (z.B. Schlachthof)

Eine Lastverlagerung bei der Kälteerzeugung ist durch Wärmeeintrag immer mit einem Temperaturanstieg verbunden. Er ist von der Dämmung und den Bedingungen der Umgebung abhängig. Der tolerierbare Bereich der Temperaturschwankung spielt eine entscheidende Rolle. Im Lebensmittelbereich gibt es mit der Tier-LMHV gesetzliche Anforderungen an die maximale Lagertemperatur. Für andere Bereiche wie der Komfortklimatisierung und Pflanzen gelten Richtlinien oder Empfehlungen. So liegt nach der DIN V 18599 die maximale Auslegung der Kühltemperatur für die Gebäudeklimatisierung bei 26 °C. Je nach Anwendung ergeben sich daraus unterschiedliche Möglichkeiten der Verlagerungsdauer. Da in den empirischen Untersuchungen oft qualitative und subjektive Aussagen bezüglich der Verlagerungsdauer getroffen wurden und diese Angaben in vielen Fällen hohen Schwankungsbreiten unterliegen, sind im Kapitel 3.4.1 lediglich Abschätzungen gemacht worden. Diese sind in Tabelle 3.24 zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 3.24 Abschätzung der Verlagerungsdauern nach Branchen**

4 h	1 bis 2 h	1 h	30 min	20 min
Kühlhaus (TK)	Schlachthof	Lebensmittel-EH	Lebensmittel-EH	Tankstelle
	Fleischverarbeitung (TK)	(Verschließbare Kühlmöbel)	(offene Kühlmöbel	Kiosk
	Bäckerei (TK)	Sonstige Filialen	nachts verschließbar)	Getränke-EH
	Kühlhaus (NK)	(verschließbare Kühlzellen)	Verwaltungsklimatisierung <sup>1)</sup>	Apotheke
	Kantine (TK)	Fleischverarbeitung (NK)	Büroklimateisierung <sup>1)</sup>	
	Hotel / Gaststätte (TK)	Bäckerei (NK)	Klimatisierung Handel / Gewerbe	
	Eisdiele	Kantine (NK)	Klimatisierung Hotel	
		Hotel / Gaststätte (NK)	Klimatisierung Gaststätte	
		Pflanzen		
		Haushalt		

<sup>1)</sup> je nach äußeren Temperatur und Einstrahlungsbedingung auch bis eine Stunde

Das technische Potenzial wird aufgrund der Annahme einer wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit durch Kosteneinsparungen auf das wirtschaftliche Potenzial reduziert. Da in dieser Studie nicht detailliert geklärt werden kann, ob die durch Lastmanagement erzielbaren Kosteneinsparungen größer als die Kosten der Umsetzung der Maßnahmen für das Lastmanagement sind, wird damit das wirtschaftliche und das technische Potenzial als technisch-wirtschaftliches Potenzial zusammengefasst.

Die verschiedenen Hemmnisse wirken sich in unterschiedlicher Intensität auf die Branchen aus. Für einige Branchen sind sie irrelevant, in anderen Branchen haben sie eine geringen Wirkung und für bestimmte Branchen können sie eine starke Reduzierung des vorhandenen Potenzials bedeuten. Um diese Effekte den Branchen zuzuordnen und deren Auswirkung zu bewerten, wird in Tabelle 3.25 eine Skala von ‚unbedeutend‘ (-) über ‚von Bedeutung, aber ohne starken Einfluss‘ (+/-) bis ‚von Bedeutung und mit starkem Einfluss‘ (+) eingeführt. Mit der Bewertung wird der Einfluss der Hemmnisse in eine quantitative Abschätzung umgewandelt und ergibt eine Bandbreite des realisierbaren Potenzials der jeweiligen Branche.

**Tabelle 3.25 Realisierbares Potenzial nach Lastprofilgruppen**

<b>Lastprofilgruppen</b>	<b>GK</b>	<b>IK</b>	<b>LM</b>	<b>KL</b>	<b>PI</b>	<b>KK</b>
Kenntnisstand zur Kälteerzeugung	-	-	-/+	-/+	-	-/+
Erfahrung mit Lastmanagement	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+
Erfahrung mit IKT und Lastmanagement	+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+
(Erhöhte) Kühlanforderung als Qualitätskriterium	+	+	-/+	+	+	-/+
Erwartung an Kosten-Nutzen-Verhältnis	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+
Betreiber-Nutzer-Dilemma	+	-/+	-	-/+	-/+	-
<b>Realisierbares Potenzial</b>	0 bis 10 %	-	50 bis 100 %	20 bis 50 %	-	50 bis 100 %

Lediglich zwei Hemmnisse sind in mindestens einer Lastprofilgruppe unbedeutend. Die meisten Hemmnisse haben eine Bedeutung für die Kälteerzeugung, sind aber bei einer Umsetzung nicht von großem Einfluss bzw. können durch einfache Maßnahmen beseitigt werden. Die erhöhten Kühlanforderungen, die in den Branchen als Qualitätskriterium gelten und auch durch die Aussicht auf Kosteneinsparungen nicht zurückgesetzt werden, sind das Hemmnis mit dem stärksten Einfluss. Durch sie kann das realisierbare Potenzial in den Gruppen gewerbliche Klimatisierung und Kühlung von Kühl lagern bis auf 0 % bzw. 20 % sinken. Am stärksten wirken sich die Hemmnisse auf die gewerbliche Klimatisierung aus, so dass in dieser Gruppe selbst das maximal realisierbare Potenzial nur bei 10 % liegt. Die Gruppen industrielle Klimatisierung und Prozesskälte in Industrieanwendung wurden bereits mit 0 % an technischem Potenzial bewertet. Haushalte können aufgrund der Vergleichbarkeit der Anwendungen und Kühleinrichtungen bei der Hemmnisanalyse mit zu den Klein- und Kleinstanlagen geordnet werden.

Die Ermittlung der realisierbaren Potenziale der Lastverlagerung in der Kälteerzeugung erfolgt durch die Zuordnung und Bewertung der Hemmnisse für die sechs Lastprofilgruppen. Die Tabelle 3.26 zeigt die Höhe der maximalen theoretischen, technisch-wirtschaftlichen sowie der realisierbaren Potenziale nach Branchen sowie deren zeitliche Einschränkung im Tagesverlauf. Die Darstellung entspricht aufgrund der Zuordenbarkeit der Branchen der zu Beginn der Studie durchgeführten Differenzierung nach Branchengruppen.

**Tabelle 3.26 Zeitunabhängige, maximale Lastmanagementpotenziale der Kälteerzeugung nach Branchen**

Branchen- gruppe	Branche	Last- profil- gruppe	maximales	Differenzierung	maximales	Beschränkung	maximales		
			theoretisches	nach	technisches	der	realisierbares		
			Potenzial in	Kühlanwendungen	Potenzial in	Verfügbarkeit	Potenzial in		
			MW <sub>el</sub>	in MW <sub>el</sub>	MW <sub>el</sub>	des Potenzials	MW <sub>el</sub>		
Nahrungsmittel	Herstellung	Schlachthof	KL	0,26	-	0,17	20:00 bis 03:00	0,09	
		Fleischverarbeitung	KL	0,53	0,32 NK / 0,21 TK	0,53	-	0,27	
		Teigwaren, etc.	KL	k.A.	-	-	-	-	
		Süßwaren	KL	k.A.	-	-	-	-	
		Bäckerei	KL	0,19	0,08 NK / 0,02 TK	0,10	-	0,05	
	Verteilung / Lagerung	Kühlhaus	Brauerei	PI	0,81	-	-	-	-
			Kühlhaus	KL	1,38	0,53 NK / 0,85 TK	1,38	6:00 bis 22:00	0,69
		Lebensmittel-EH - davon dezentral	KK	2,95	2,76 verschleißbar / 0,19 offen	1,38 tagsüber <sup>1)</sup> / 1,48 nachts	19:00 bis 17:00 20:00 bis 7:00	1,38 / 1,48	
			LM	8,88	3,71 verschleißbar / 5,17 offen	1,86 tagsüber <sup>1)</sup> / 4,44 nachts <sup>2)</sup>	9:00 bis 17:00 20:00 bis 7:00	1,86 / 4,44	
		Tankstelle	KK	0,08	-	0,07	-	0,07	
		Kiosk	KK	0,32	-	0,27	-	0,27	
		Sonst. Filialen	LM	1,15	-	0,19 tagsüber <sup>1)</sup> und nachts <sup>2)</sup>	9:00 bis 17:00 20:00 bis 7:00	0,19	
			Getränke-EH	KK	0,02	-	0,02	-	0,00
		Hotel / Gaststätte	KL	1,36	0,78 NK / 0,58 TK	1,36	-	0,68	
		Kantine	KL	0,26	0,08 NK / 0,18 TK	0,26	-	0,13	
		Eisdiele	KK	0,09	-	0,05	-	0,05	
		Apotheke	KK	0,02	-	0,02	-	0,02	
		Haushalte	-	6,11	-	6,11	-	6,11	
Industrie	Chemie	PI	k.A.	-	-	-	-		
	Pharmazie	PI	k.A.	-	-	-	-		
Sonstige	Klimatisierung	Pflanzen	KK	0,17	-	0,17	-	0,17	
		Verwaltung	GK	1,41	-	1,41	7:00 bis 20:00	0,14	
		Büro	GK	14,78	-	14,78	7:00 bis 20:00	1,48	
		Handel / Gewerbe	GK	8,87	-	8,87	7:00 bis 20:00	0,89	
		Industrie	IK	9,63	-	-	-	-	
		Hotel	GK	0,76	-	0,76	7:00 bis 20:00	0,08	
		Gaststätte	GK	0,60	-	0,60	7:00 bis 20:00	0,06	
		<b>GESAMT</b>			<b>60,63</b>		<b>43,04</b>		<b>17,36</b>

<sup>1)</sup> aufgrund des Kältebedarfs durch Öffnung der Kühlmöbel wird 50 % der Antriebsleistung benötigt

<sup>2)</sup> nachts beträgt der Leistungsbedarf zur Kühlung konstant nur 50 %

Im Bereich der Nahrungsmittelherstellung und der Industrie konnten nicht alle Kälteanlagenkapazitäten erfasst werden. Es hat sich jedoch ergeben, dass die geringe Zahl der Betriebsstätten in der Nahrungsmittelindustrie kaum eine Bedeutung auf das insgesamt realisierbare Potenzial hat. Die Industrie verfügt aufgrund der Anforderungen an die Prozesskälte zudem über keine Lastverlagerungspotenziale.

Die Gebäudeklimatisierung erscheint aufgrund der hohen Einschränkung durch die Hemmnisse vorerst als ungeeignet für das Lastmanagement. Mit der Zunahme von Erfahrungen im Lastmanagement kann aber dieser Bereich gerade durch die hohen Leistungen interessant werden. Die Verlagerungsdauer ist bei der Klimatisierung aber mit etwa 30 Minuten sehr beschränkt.

Die Verteilung und Lagerung von Nahrungsmitteln besitzt quantitativ den größten Anteil an realisierbaren Potenzial. Die Kühllhäuser stehen dabei aufgrund ihrer spezifischen Eigenheiten wie dem bereits optimierten Strombezug großer Lager oder dem konstanten Kältebedarf kleiner Lager nicht im Vordergrund. Die Verbundanlagen sowie die dezentralen Anlagen des Lebensmittel-EH, Hotels und Gaststätten und der sonstigen Filialen bieten durch den geringen Einfluss der Hemmnisse ein hohes Potenzial. Zudem verfügen die Kühlzellen über eine Verlagerungsdauer von etwa einer Stunde.

Auch für die Klein- und Kleinstanlagen außerhalb des Lebensmittel-EH ist das realisierbare Potenzial kaum durch Hemmnisse eingeschränkt. Jedoch ist das Verhältnis zwischen der Zahl der Geräte und deren Leistung sehr gering. Zudem befinden sich die meisten Kühlanwendungen im Verkaufsraum,

wobei regelmäßige Öffnungen der Kühlmöbel nur zu kurzen Verlagerungsdauern von etwa 20 Minuten führen. Aus diesem Grund erscheinen die Klein- und Kleinanlagen unbedeutend für ein Lastmanagement.

### 3.5.3. Ergebnisse der zeitlichen Modellierung der Verlagerungspotenziale innerhalb der Lastprofilgruppen

Im folgenden werden die ermittelten Potenziale für jede Lastprofilgruppe zeitlich aufgelöst dargestellt. Diese zeitliche Auflösung erfolgt für einen Tag im Sommer, d.h. jeweils in dem Monat, in dem der Lastbedarf am höchsten ist. Für weitere Informationen zu den monatlichen Lastanteilen kann auf das Kapitel 3.4.2 verwiesen werden. Die Angabe der Verlagerungspotenziale erfolgt sowohl für das theoretische, das wirtschaftlich-technische als auch das realisierbare Potenzial.

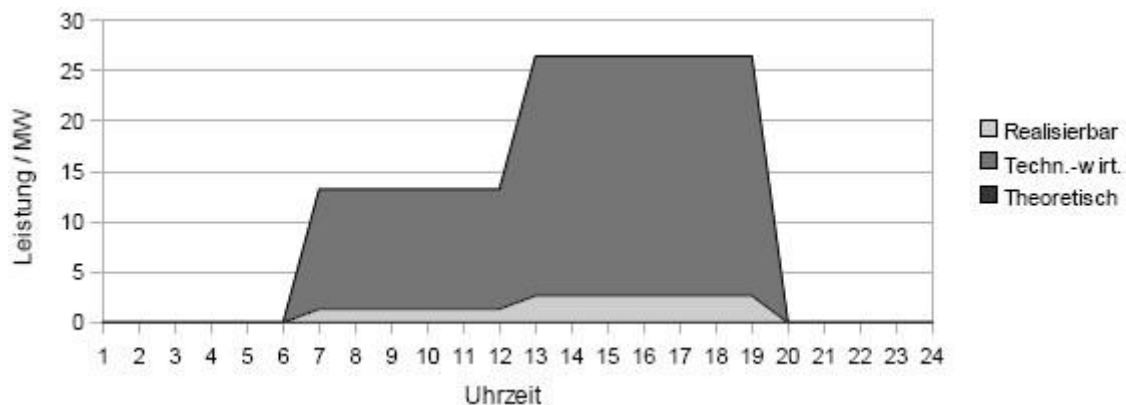


Abbildung 3.22 Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf der Gruppe GK

Die Abbildung 3.22 zeigt den Lastverlauf der gewerblichen Klimatisierung. Die Kühlung der Luft erfolgt lediglich zwischen 7:00 und 20:00 Uhr. Zur Vereinfachung der Modellierung wird angenommen, dass vormittags ein Lastbedarf von 50 % und nachmittags von 100 % vorhanden ist. Das realisierbare Potenzial beträgt lediglich 10 % des theoretischen und wirtschaftlich-technischen Potenzials.

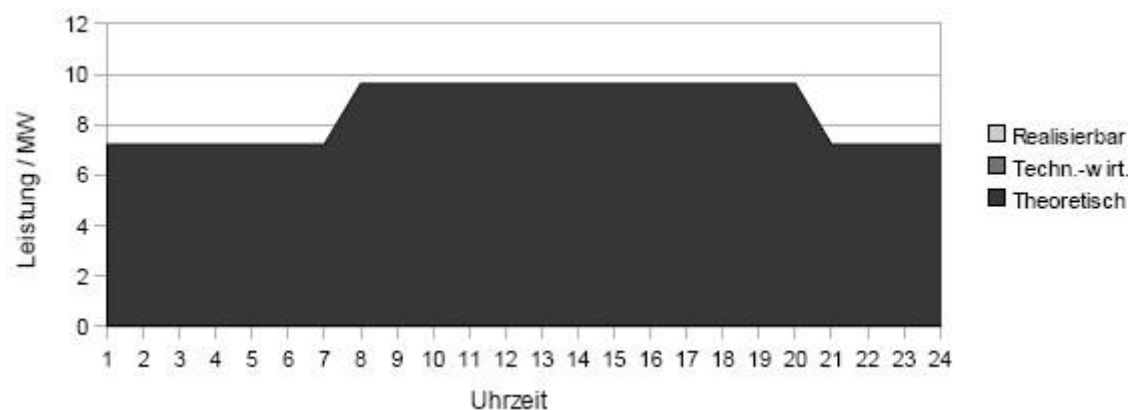


Abbildung 3.23 Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf der Gruppe IK

Für die industrielle Klimatisierung wird eine Hauptproduktionszeit von 7:00 bis 19:00 Uhr und eine Nebenproduktionszeit von 19:00 bis 7:00 Uhr angenommen, wobei der Lastbedarf zur Nebenproduktionszeit nur 75 % beträgt. Innerhalb der Produktionszeiten ist der Lastverlauf gleichförmig. Durch die Prozesskühlung gibt es nur theoretisches Potenzial. Wirtschaftlich-technisches und realisierbares Potenzial ist nicht vorhanden.

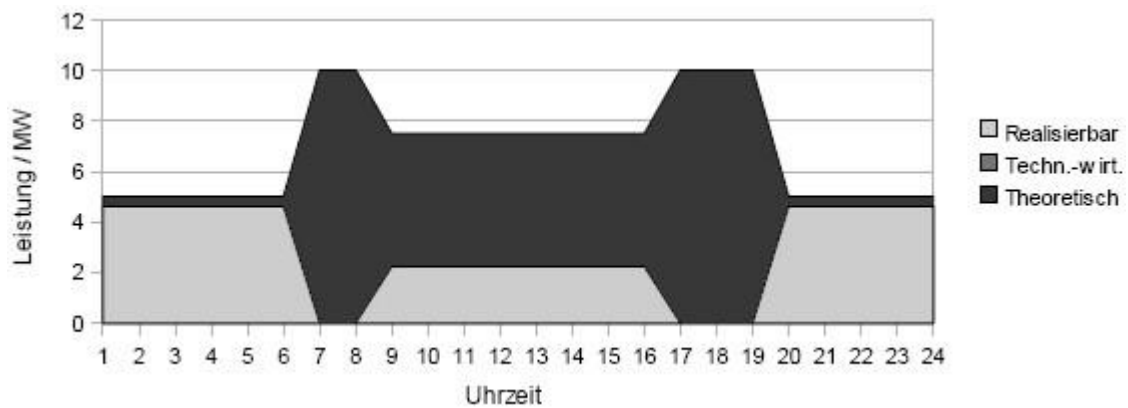


Abbildung 3.24 Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf der Gruppe LM

In der Lastgruppe Kühlanlagen im Lebensmittel-EH wird zwischen Geschäftszeiten und Nachtzeiten unterschieden (Abbildung 3.24). Während der Geschäftszeiten gibt es Be- und Entladezeiten sowie Hauptgeschäftszeiten, zu denen die Kälteanlagen vollgenutzt werden und damit ein hohes theoretisches Potenzial besitzen, dieses aber aufgrund der Notwendigkeit der Kühlung nicht verlagern können. Während der Nebengeschäftszeit von 9:00 bis 17:00 Uhr läuft die Anlage bei 75 %. Eine Lastverlagerung kann aber aufgrund von unregelmäßigen Öffnungen der Türen nicht komplett durchgeführt werden. 50 % der Last können verlagert werden, während 25 % der Anlagenleistung gewährleistet werden muss. In der Nacht sind 50 % der Anlagenleistung notwendig, die komplett verlagerbar sind.

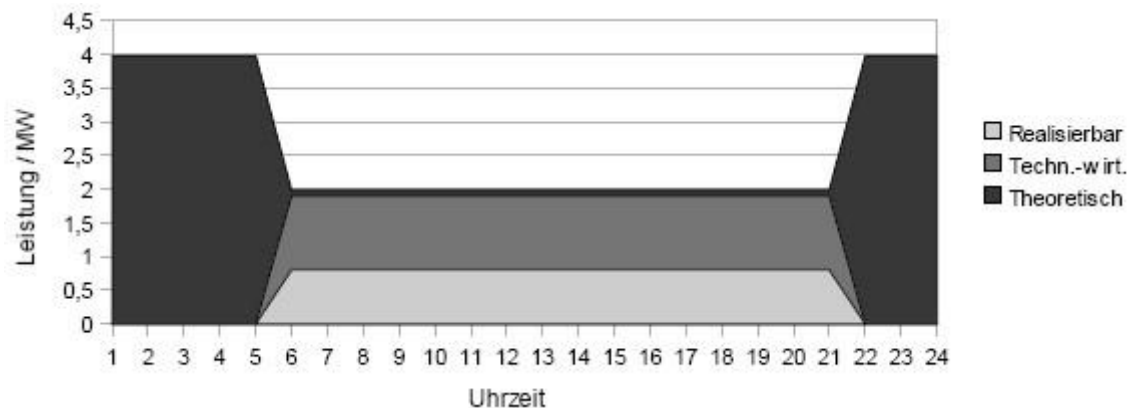


Abbildung 3.25 Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf der Gruppe KL

In Abbildung 3.25 wird der Lastverlauf der Kühlanlagen im Kühlager dargestellt. Zwischen 22:00 und 6:00 Uhr findet die Be- und Entladung statt, während der ein Kühlbetrieb zu 100 % notwendig. Daraus folgt, dass trotz des theoretischen Potenzials in diesem Zeitraum kein realisierbares oder wirtschaftlich-technisches Potenzial zur Lastverlagerung vorhanden ist. Tagsüber reduziert sich der Lastbedarf und wird in der Darstellung vereinfachend mit 50 % angenommen. Tatsächlich kann nach dem Lastprofil der Kühlager im Kapitel 3.4.2 kurzfristig eine maximale Last von 100 % angenommen werden. Dies entspricht dem theoretischen und dem wirtschaftlich-technischem Potenzial. Das realisierbare Potenzial liegt bei 50 % des wirtschaftlich technischen Potenzials.

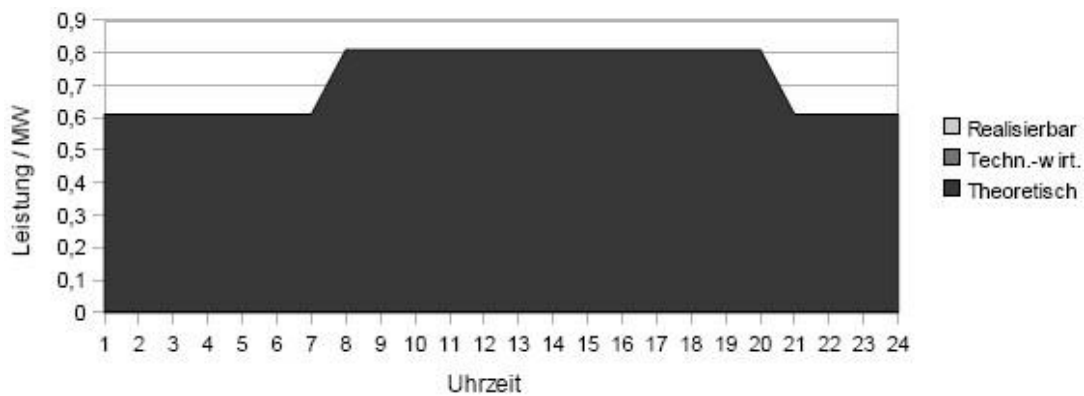


Abbildung 3.26 Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf der Gruppe PI

Im Verlauf vergleichbar mit dem Lastprofil der industriellen Klimatisierung kennzeichnet die Gruppe Prozesskälte in Industrieanwendungen die Unterteilung in Haupt- und Nebenproduktionszeiten (Abbildung 3.26). Durch die Prozesskühlung verfügt auch diese Gruppe nur über theoretisches Potenzial. Wirtschaftlich-technisches und realisierbares Potenziale sind nicht vorhanden.

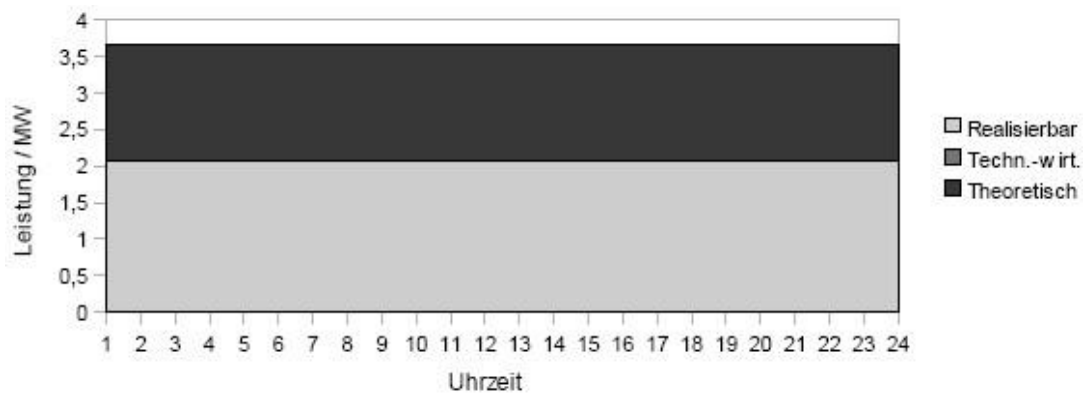


Abbildung 3.27 Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf der Gruppe KK

Die Klein- und Kleinstanlagen in Abbildung 3.27 haben zu jeder Tageszeit eine durchschnittliche Leistungsverfügbarkeit nach dem Gleichzeitigkeitsfaktor zu, die durch das theoretische Potenzial dargestellt wird. Aufgrund des nicht zum Lastmanagement betragenden Anteil an offenen Kühleinrichtungen sinkt das wirtschaftlich-technische Potenzial. Da weiterhin keine bedeutenden Hemmnisse vorhanden sind, ist das wirtschaftlich-technische Potenzial gleich dem realisierbaren Potenzial.

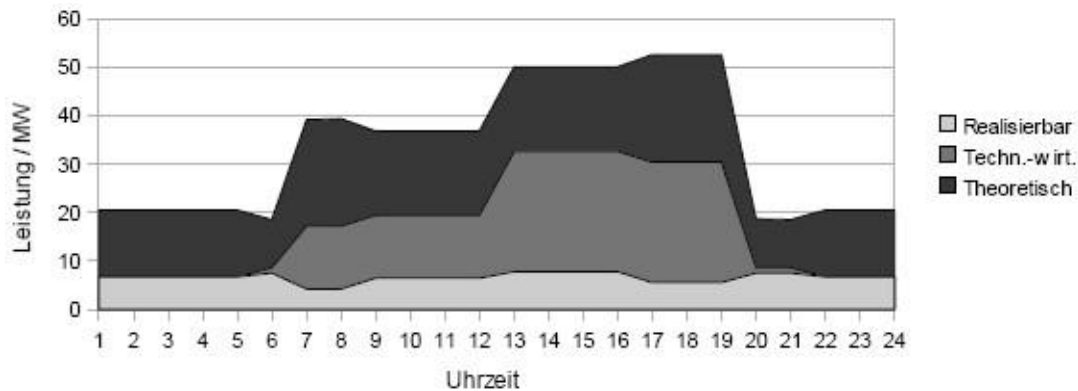


Abbildung 3.28 Gesamte Lastmanagementpotenziale im Tagesverlauf

Fügt man die Potenziale der unterschiedlichen Lastprofilgruppen zusammen, erhält man das theoretische, das wirtschaftlich-technische sowie das realisierbare Potenzial in zeitlicher Auflösung über einen Tag. Während der Hauptteil der theoretischen Lastverlagerung tagsüber stattfinden kann und zwischen 17:00 und 19:00 das maximale theoretische Potenzial fast erreicht wird, ist das realisierbare Potenzial sehr gleichmäßig über den Tag verteilt. Das zeitlich aufgelöste realisierbare Potenzial reicht im Tagesverlauf mit unter 10 MW<sub>el</sub> nicht an das aggregierte, realisierbare Potenzial mit 17,34 MW<sub>el</sub> heran.

### 3.6. Kritische Anmerkungen

Zur Bestimmung von Lastverlagerungspotenzialen und deren überschaubarer Darstellung müssen aufgrund der Vielfalt der Anwendungen von Kälteanlagen Vereinfachungen getroffen werden. Im Rahmen dieser Potenzialanalyse werden daher eine Reihe von Aussagen gemacht und Annahmen getroffen, welche die Festlegung der Möglichkeiten von Lastmanagement durchaus beeinflussen und damit diskutiert werden müssen. Dazu gehören sowohl methodische als auch qualitative und quantitative Betrachtungen.

Weiterhin hat das Lastmanagement ökologische und ökonomische Auswirkungen auf die Energieversorgung. Ziel dieser Studie ist es nicht, diese Wirkungen detailliert zu ermitteln und auszuwerten, da dies im Rahmen weiterer Untersuchungen erfolgt. Dennoch soll im Folgenden auch darauf eingegangen werden.

#### 3.6.1. Vorgehen der Potenzialanalyse

##### Informationsbeschaffung und -diversifizierung

Die empirische Untersuchung basierte auf der Auswertung qualitativer Interviews von unterschiedlichen Bezugsquellen. Aufgrund der Vielfalt der Anwendungsbereiche und Branchen konnten im Rahmen dieser Untersuchung nicht alle Kälteanlagenbetreiber und nicht alle Branchen eingehend befragt werden. Aus diesem Grund musste im Laufe der Auswertung auch auf Werte zurückgegriffen werden, die in vorangegangenen Studien aus Befragungen und Annahmen ermittelt wurden und damit einer gewissen Ungenauigkeit unterliegen. Ein weiterer Teil der Branchen konnte gar nicht einbezogen werden, da entweder keine Informationen vorlagen oder die vorhandenen Informationen für Rückschlüsse auf ein Lastverlagerungspotenzial nicht ausgereicht haben. Der Hauptteil der Informationen konnte jedoch durch verschiedene Betreiber je Branche eingeholt und verglichen werden. Zur Verifizierung dienten weitere Bezugsquellen wie Fachexperten aus Verbänden, Herstellern bzw. andere Unternehmen oder Projekte mit Lastmanagementenerfahrung. Weiterhin konnten Daten aus Projektberichten sowie weiterer Fachliteratur zur Diversifizierung der Bezugsquellen genutzt werden.

### ***Technischen Annahmen und Kennzahlen***

Auf Basis der empirischen Daten erfolgt eine Festlegung von technischen Annahmen und Kennzahlen. Sie sollen sich auf einen in dem jeweiligen Anwendungsbereich oder der jeweiligen Branche durchschnittlichen Wert beziehen, der für eine typische Anlage oder für ein typisches Verhältnis der Dimensionierung zu einer Bezugsgröße dient. Nach Aussagen von Fachexperten ist jedoch die Angabe eines typischen Wertes aufgrund der Diversität der Anlagen und Anforderungen innerhalb einer Branche kaum möglich [Bendig 2009, Kalbrunner 2009]. Da eine Untersuchung der Grundgesamtheit der Anlagen nicht umzusetzen ist, müssen auf Basis einer Stichprobe Annahmen und Kennzahlen entwickelt werden. Dabei ist nach Abschätzungen mit einer Bandbreite einer eventuellen Abweichung von 4 bis 20 % zu rechnen [Hecker 2009, Klobasa 2007].

Weiterhin werden zu einer übersichtlichen Berechnung und Darstellung vereinfachende Annahmen getroffen, die sich sowohl in einer Erhöhung als auch einer Reduktion des Lastmanagementpotenzials auswirken können. Ein Beispiel hierfür sind die offenen Kühlmöbel im Lebensmittel-EH. In der Studie wird angenommen, dass 100 % dieser Kühlmöbel nachts verschlossen werden und damit nachts zum Lastmanagement beitragen können. Nach der UBA-Studie gilt dies jedoch beispielsweise bei NK-Regalen nur zu 98 % [Rhiemeier et al. 2008]. Zudem werden in dem Bericht Bedenken geäußert, dass von den manuell abdeckbaren Kühlmöbeln nicht alle auch wirklich abgedeckt werden, so dass sich reell nachts das Verlagerungspotenzial in Bezug auf die getroffene Annahme verringern würde. Zudem sind in der Annahme Kühlzellen außerhalb der Verkaufsräume des Lebensmittel-EH nicht einbezogen, da keine aussagefähigen Informationen eingeholt werden konnten und auch in der UBA-Studie die Kühlzellen nicht explizit erwähnt wurden. Diese Kühlzellen könnten das Lastverschiebepotenzial wiederum erhöhen. Auch in anderen Anwendungsbereichen müssen Vereinfachungen akzeptiert werden. In Abbildung 3.4 wird angedeutet, dass eine Verlagerungsdauer bei Bürogebäuden sehr abhängig von gebäudetechnischen Aspekten wie der Fassade bzw. Gebäudehülle als Dämmung ist.

Die getroffenen Annahmen bilden die Anwendungsbereiche und Branchen jedoch in einem ausgewogenem Verhältnis zwischen notwendiger Genauigkeit und Vereinheitlichung zur Übersichtlichkeit und Berechenbarkeit ab. Die Analyse kann daher nicht als exakte Bestimmung der Verlagerungspotenziale dienen, jedoch als eine realistische Abschätzung der Größenordnung.

### ***Einführung von Lastprofilgruppen***

Ähnlich den technischen Annahmen verfolgt die Verwendung von Lastprofilgruppen das Ziel, durch die Zusammenfassung vergleichbarer Anlagen bezüglich charakteristischer Merkmale die Übersichtlichkeit und Berechenbarkeit der Potenziale zu erhöhen. Im Fall der Lastgruppen dient ein zeitlich aufgelöstes Tageslastprofil zur Differenzierung der maximalen Lastmanagementpotenziale. Auch hier gibt es trotz der Vergleichbarkeit der Kühlanwendungen durchaus Abweichungen beispielsweise in den Hauptbetriebszeiten, den generellen Geschäftszeiten oder der Definition von Werktagen. In diesem Fall kommt es nicht zu einer Änderung der maximalen Potenziale, jedoch kann es zu Abweichungen bzw. zu Verschiebungen im täglichen Verlauf führen.

## **3.6.2. Wirkungen des Lastmanagements**

### ***Ökologische Betrachtung des Lastmanagements***

Nach Wiechmann kommt es bei Lastverschiebung von unterbrechbaren Verbrauchseinrichtungen zu einem Nachholen der Energiemengen in gleichem Umfang [Wiechmann 2008]. Ein umwelttechnischer Aspekt der Einführung von Lastmanagement bei Kälteanlagen ist jedoch die Wirkung auf die Energiebilanz bei Verlagerung der Last. Senkt sich die Verdampfungstemperatur des Kältemittels zur Reduzierung der Kühltemperatur im Voraus (Vorkühlstrategie), reduziert sich der Leistungsfaktor

und es entsteht zur Bereitstellung der gleichen Kälteleistung ein Mehrbedarf an Anlagenleistung von etwa drei Prozent je ein Grad Celsius. Diese Tatsache führt im Endeffekt zu einem erhöhten Strombedarf. Muss die Kühltemperatur vor der Lastverlagerung nicht gesenkt werden, entsteht kein erhöhter Energieaufwand.

Der individuellen Wirkung der einzelnen Kälteanlage steht der ökologische Nutzen des Lastmanagements in der Stromerzeugung gegenüber. Durch Lastmanagement kann eine effiziente Integration und Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen erreicht werden. Dieser Strom muss nicht verlustbehaftet in beispielsweise Pumpspeicherkraftwerken oder Luftdruckspeichern zwischengespeichert werden. Es kann eine optimierte Fahrweise von konventionellen Kraftwerken bzw. die Vermeidung des Einsatzes zusätzlicher Kraftwerke erfolgen. Diese Wirkung verringert den Bedarf an Primärenergie zur Stromerzeugung. Der ökologische Gesamtnutzen über die individuellen Wirkungen des Betriebes der Kälteanlage hinaus muss in der Bewertung von Lastmanagement einbezogen werden und wird in einem späteren Arbeitspaket untersucht.

### ***Zukünftige Entwicklung der Lastmanagementpotenziale***

Der Bedarf an Kälteerzeugung wird sich nach Einschätzung der Entwicklung der Branchen und Anwendungsbereiche innerhalb der nächsten Jahre steigern. Neben der allgemeinen Erhöhung des Kältebedarfes bestehen aber auch Möglichkeiten der Erhöhung von Lastmanagementpotenzialen bestehender Kälteanwendungen. So könnte zukünftig der Anteil an verschließbaren Kühlmöbeln im Lebensmitteleinzelhandel steigen. Beispiele zeigen, dass neu geplante Supermarktfilialen auf verschließbare Kühlmöbel zur Reduzierung des Energieverbrauchs setzen [KI 2009]. In den Niederlanden müssen nach einem Urteil des Verwaltungsgerichts Amsterdam im Jahr 2007 90 % der Amsterdamer Supermärkte im Zuge einer Verpflichtung zu energiesparenden Maßnahmen ihrer Kühlmöbel mit einer Tagesabdeckungen ausgestattet sein [Baumanns 2007]. Diese Entwicklung senkt den gesamten Leistungsbedarf, erhöht jedoch den Anteil der verlagerbaren Last tagsüber und die Verlagerungsdauer der Kühlmöbel, die vorher nur nachts mit einem Rollo verschließbar waren.

### ***Energieökonomische Betrachtung des Lastmanagements***

Neben dem möglichen ökologischen Nutzen auf der Versorgungsseite kann das Lastmanagement auch zu bedeutenden ökonomischen Vorteilen führen. Diese Vorteile bestehen nicht nur in der Einsparung von Primärenergie einer angepassten Stromerzeugung, sondern zudem in der Optimierung des Strombezugs sowie im Netzmanagement oder der Vermarktung von Regelenergieprodukten. Nach Abzug der Kosten für die IKT-Infrastruktur zur Steuerung und sonstiger Aufwände können die wirtschaftlichen Vorteile an die Verbraucher als Anreiz zur Durchführung von Lastmanagement weitergegeben werden. Für die Verbraucher könnte zukünftig eine Entscheidung durch das Angebot an Möglichkeiten zur Energiekostenreduktion bestimmt werden. Bei der Entwicklung von unterschiedlichen Anreizmodellen sind die Wirkungen auf die Transparenz der Preisgestaltung und damit Wettbewerbssituation unter den Stromversorgern zu beachten. Ähnlich wie bei den undurchsichtigen Tarifangeboten im Telekommunikationsbereich kann eine Tarifvielfalt bei Lastmanagement zur Abnahme von Transparenz führen.

## 4. Schlussfolgerungen zum Lastmanagementpotenzial in der Kälteerzeugung

In diesem Kapitel erfolgt eine Auswertung der ermittelten Ergebnisse der Potenzialanalyse. Es werden die Einflussfaktoren auf die Anlagen der sechs Lastprofilgruppen sowie der Haushalte dargestellt und die einzelnen Potenziale bewertet. Daraus folgend lassen sich Empfehlungen für die Implementierung von Lastmanagement in der Kälteerzeugung ableiten.

### 4.1. Einflussparameter auf das Lastmanagementpotenzial

Anwendungsmöglichkeiten für Kälteanlagen können sehr unterschiedlich sein. Generell existieren dabei technischen Faktoren sowie unterschiedliche Motivation zur Durchführung von Lastmanagement. Bereiche, die ein Einflusspotenzial auf die Anlagen besitzen, sind im direkten und indirekten Sinne die Anlagentechnik, die Anforderungen an die Betriebsführung und die Kühlanwendungen sowie die Wirtschaftlichkeit des gegenwärtigen Betriebs im Vergleich zu möglichen Alternativen. Aus diesem Grund waren diese Bereiche auch zentrale Themen in der empirischen Untersuchung. Die Einordnung der Anwendungsbereiche der Kälteerzeugung bzw. der Branchen, die über Kälteanlagen verfügen, erfolgte anhand von Lastprofilgruppen, die innerhalb ihrer Gruppe über vergleichbare Charakteristika der Auslegung und Betriebsweise sowie Anforderungen der Kälteanlagen verfügen. Das Hauptkriterium der Zusammenfassung der Gruppen war jedoch die zeitliche Lastverteilung der Kälteerzeugung. Diese Charakteristika, welche zugleich die Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit Lastverlagerungsmöglichkeiten darstellen, sind in der Tabelle 4.1 für die Lastprofilgruppen einschließlich der Haushaltsanwendungen gegenübergestellt.

Beispielsweise zeigt der Einflussbereich Dämmung / Wärmeeintrag, dass die Einflussfaktoren für die Lastprofilgruppen sehr unterschiedlich sind. In der gewerblichen Klimatisierung ist der Anteil der Glasfassade am Gebäude bzw. der Gebäudetyp wichtig für die Speicherkapazität und der benötigten Kälteleistung. Bei Kühlanlagen hat sich empirisch herausgestellt, dass die Dämmung abhängig ist von dem Alter und der Größe des Kühllagers. Kleine Lager sind in einigen Fällen nur nachgerüstete einfache Lagerhallen. Moderne Lager verfügen über eine Vielzahl von installierten Optimierungsmaßnahmen zur Verringerung des Wärmeeintrags. Es kann daraus geschlossen werden, dass die Potenziale und deren Einflussfaktoren nicht allein von der Zuordnung zu den Lastprofilgruppen bestimmt werden, sondern dass der Leistungsbedarf und die Verlagerungsdauer auch innerhalb einer Lastprofilgruppe und sogar innerhalb einer Branche verschieden sein kann. Gerade im Gespräch mit Fachleuten wird deutlich, dass die Auslegungen von Kälteanlagen auch bei Branchen mit einem hohen Anteil von Standardisierungen individualisiert erfolgt. Trotzdem macht in diesem Zusammenhang die Einordnung vergleichbarer Anwendungsbereiche und Branchen in Lastprofilgruppen zur Darstellung und Abschätzung der Lastmanagementpotenziale Sinn.

Bedeutend für die Durchführung von Lastmanagement sind die Einflussbereiche *Besonderheiten im Kühlablauf* und *Kühlzweck*. Deren Ausgestaltung kann zum Ausschluss vom Lastmanagement führen. So ist zum Beispiel in den Hauptgeschäftszeiten des Lebensmittel-EH keine Lastverlagerung möglich, da die verschließbaren Kühlmöbel ständig geöffnet werden und die Kälteanlagen unter Vollast den Wärmeeintrag abführen müssen. Auch im Fall von Prozesskühlung kann eine Lastverlagerung ausgeschlossen werden. Diese Lastprofilgruppen führen innere Prozesswärmelasten direkt ab und verfügen damit nicht über übliche, abgrenzbare Kühlstellen mit thermischen Speicherkapazitäten. Zudem erlauben die Kühlanforderungen nur sehr geringe Temperaturschwankungen und damit eine stetige Kühlung während des Prozesses.

Tabelle 4.1 Einflussfaktoren für das Lastmanagement bei Kälteanlagen nach Lastprofilgruppen

Einflussbereiche	Gewerbliche Klimatisierung	Industrielle Klimatisierung	Kühlanlagen im Lebensmittel-EH	Kühlanlagen in Kühllagern	Prozesskälte in Industrieanwendungen	Klein- und Kleinstanlagen	Haushalt
<b>Anlagentechnik</b>							
- Dämmung / Wärmeeintrag	Glasfassade, Gebäudetyp Sonneneinstrahlung Außentemperatur	keine Dämmung innere Wärmelast	Verschließbarkeit durch Abdeckung / Rollo	Kapazität Baujahr	innere Wärmelast	Verschließbarkeit durch Abdeckung / Rollo	Energieklasse
- Regelung	indirekt über GLT	direkt durch die Kälteanlage	direkt durch die Kälteanlage	direkt durch die Kälteanlage	direkt durch die Kälteanlage	ein / aus (2-Runkt)	ein / aus (2-Runkt)
<b>Betriebsführung</b>							
- Betriebszeiten	Geschäftszeiten	Produktionszeiten	Ladenöffnungszeiten 24 Stunden	24 Stunden	Produktionszeiten	Ladenöffnungszeiten 24 Stunden	24 Stunden
- Besonderheiten im Kühlablauf	zeitliche Änderung der äußeren Wärmelast	konstanter Leistungsbedarf evt. Freikühlung	Hauptgeschäftszeiten Be- und Entladung	Be- und Entladung	konstanter Leistungsbedarf	keine	keine
<b>Kühlanwendung</b>							
- Kühlzweck	Komfortklimatisierung	Produktionsklimatisierung	Lagerung	Lagerung	Prozess	Lagerung	Lagerung
- Kühlgut	Räume	Maschinen	Lebensmittel	Lebensmittel	Produktionsprozesse	Lebensmittel	Lebensmittel
- Temperaturanforderungen	20 bis 26 °C ohne mit Schwankungen ± 1 °C	nach Anforderung mit Begrenzung +0,5 °C	NK 0 bis 8 °C TK - 18 bis -23 °C mit Schwankungen ± 2 °C	NK 0 bis 8 °C TK - 18 bis -23 °C mit Schwankungen ± 2 °C	nach Anforderung mit Begrenzung +0,5 °C	NK 2 bis 8 °C TK - 18 bis -23 °C mit Schwankungen ± 2 °C	NK 2 bis 8 °C TK - 18 bis -23 °C mit Schwankungen ± 2 °C
<b>Wirtschaftlichkeit</b>							
- bestehender Stromtarif	AP / LP <sup>1)</sup> gewerblicher Stromtarif	AP / LP <sup>1)</sup> Strombezug nach Börsenpreis	AP / LP <sup>1)</sup> gewerblicher Stromtarif	AP / LP <sup>1)</sup> Strombezug nach Börsenpreis	AP / LP <sup>1)</sup> Strombezug nach Börsenpreis	gewerblicher Stromtarif	Haushaltsstromtarif

<sup>1)</sup>Arbeitspreis / Leistungspreis

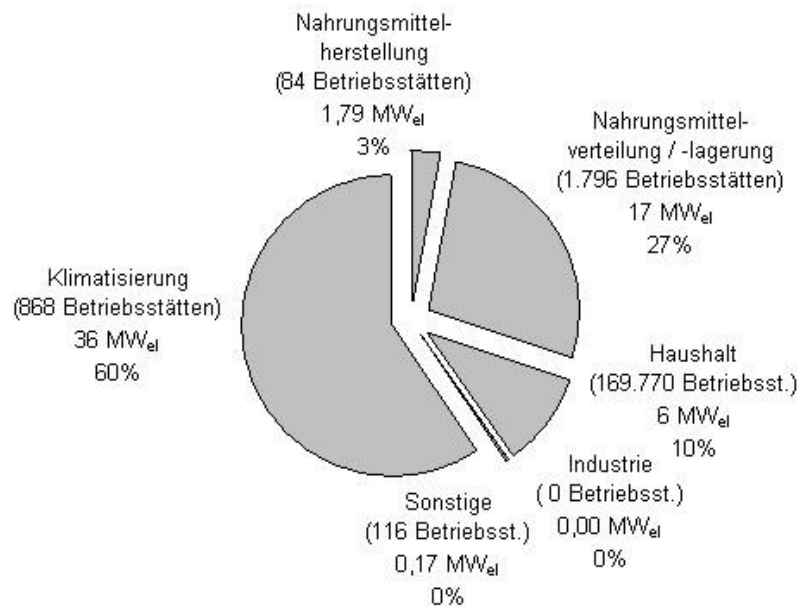
#### **4.2. Quantifizierung des theoretischen, technisch-wirtschaftlichen und realisierbaren Potenzials**

Innerhalb der Potenzialanalyse werden stufenweise Einschränkungen vorgenommen, die vom theoretischen Potenzial über das technisch-wirtschaftliche Potenzial auf das realisierbare Potenzial führen. Neben der maximal genutzten Leistung als theoretisches Potenzial kann jedoch auch die insgesamt installierte Leistung der Kälteerzeugung dargestellt werden. Diese Leistung umfasst zusätzlich, sofern vorhanden, Leistungsüberdimensionierungen bei Verbundanlagen, die im praktischen Betrieb nicht genutzt werden. Bei dezentralen Anlagen schließt die installierte Leistung die Differenz zwischen der durchschnittlich genutzten Leistung einer Vielzahl von Anlagen (Gleichzeitigkeitsfaktor) und der tatsächlichen Leistung ein. Sie ergibt sich daraus, dass beispielsweise bei Haushaltskühlschränken nicht ständig der Verdichter läuft. Daraus folgt eine reale Verfügbarkeit von nur einem bestimmten Anteil von Anlagen zu einer Lastverlagerung im positiven Regelbereich. Diese Tatsache führt zu der Annahme, dass die restliche, nicht aktivierte Leistung als Lastverlagerungspotenzial im negativen Regelbereich dienen kann. Die gesamte **installierte Leistung** der Kälteerzeugung in der Stadt Mannheim beträgt  $77\text{MW}_{\text{el}}$  ohne die Kälteleistungsangaben einzelner Unternehmen der Nahrungsmittel-, Chemie- und Pharmazieindustrie.

Insgesamt liegt das in der Potenzialanalyse ermittelte, **theoretische Lastverlagerungspotenzial** durch die Kälteerzeugung in der Stadt Mannheim bei  $61\text{MW}_{\text{el}}$ . Aus der empirischen Untersuchung der gewerblichen Kälteversorgung ergeben sich  $55\text{MW}_{\text{el}}$ . Für die Haushalte wurde eine theoretisch verschiebbare Leistung von  $6\text{MW}_{\text{el}}$  ermittelt. Diese Zahlen beziehen sich auf die maximal genutzte Leistung innerhalb der betrachteten Branchen für eine positive Regelleistung. Bei der Betrachtung wird berücksichtigt, dass dezentrale Anlagen nicht gleichzeitig laufen und deren gesamte durchschnittliche Last mittels eines Korrekturwertes, dem Gleichzeitigkeitsfaktor, ausgedrückt wird.

Die Stadt Mannheim hat über alle Verbraucher im Sommer eine Höchstlast von etwa  $420\text{MW}_{\text{el}}$  bzw. im Winter von  $340$  bis  $380\text{MW}_{\text{el}}$ . Aus der täglichen Verfügbarkeit der Lastmanagementpotenzials ergibt sich ein Anteil der Kälteerzeugung an der Gesamtlast von etwa  $14\%$ . Damit hat die Kälteerzeugung durchaus einen Einfluss auf den Strombedarf bzw. kann durch Lastmanagement prinzipiell einen merklichen Einfluss auf den Lastgang erreichen.

Im Vergleich mit der DKV-Studie kann festgestellt werden, dass die Leistungen der Anwendungsbereiche der Kälteerzeugung in Mannheim verhältnismäßig vom bundesdeutschen Durchschnitt abweichen. Die Angaben für die Stadt Mannheim beziehen sich in diesem Fall auf das maximale theoretische Potenzial. Nach Abbildung 4.1 hat die Klimatisierung einen Anteil von  $60\%$  an der theoretisch verlagerbaren Leistung. Die Nahrungsmittelherstellung hat lediglich eine untergeordnete Bedeutung. Wichtig für eine mögliche Lastverlagerung sind mit  $27\%$  und  $10\%$  auch die Nahrungsmittelverteilung und -lagerung bzw. die Haushalte.

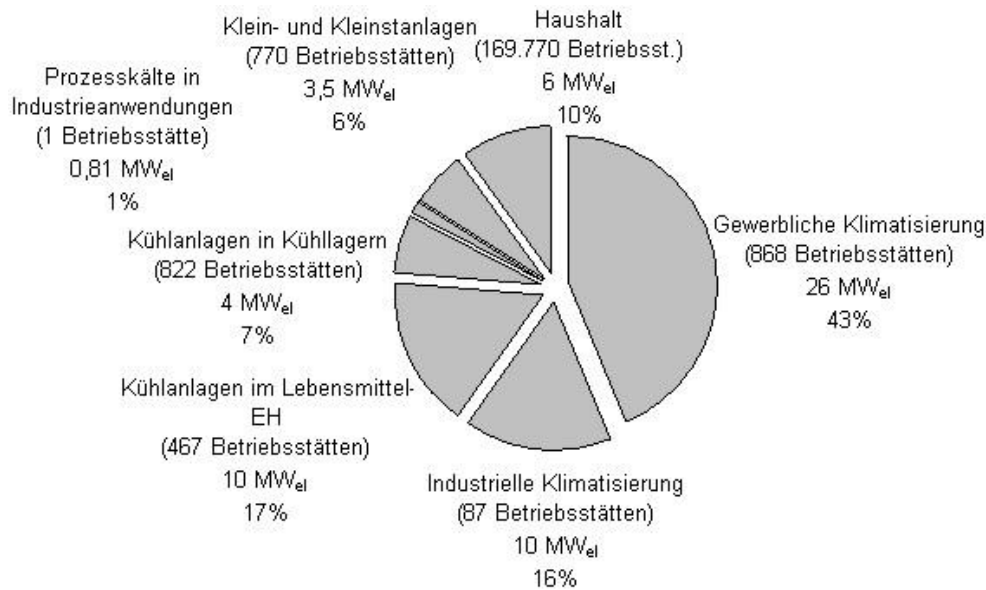


**Abbildung 4.1 Aufteilung des maximalen theoretischen Lastverlagerungspotenzials der Kälteerzeugung in der Stadt Mannheim nach Branchen**

Neben der Aufteilung des Lastpotenzials ist auch die Zahl der Betriebsstätten je Branchengruppe dargestellt. Sie gibt Aufschluss über den nötigen Umfang an Aktivitäten und Infrastrukturen, um dieses theoretische Potenzial erschließen zu können. So hat die Nahrungsmittelverteilung und -lagerung bei einem bedeutenden Lastanteil von 17 MW<sub>el</sub> eine Betriebsstättenzahl von 1.796, wohingegen 169.770 Haushalte eingebunden werden müssen, um ein Potenzial von 6,11 MW<sub>el</sub> nutzen zu können.

Die angegebenen Werte beziehen sich jeweils auf den maximalen, zeitlich undifferenzierten Betrag der Lastverlagerung. Für den zeitlichen Verlauf der Lastmanagementpotenziale muss an dieser Stelle auf das Kapitel 3.5.3 verwiesen werden. Dort befinden sich zeitaufgelöste Lastverlagerungspotenziale für einen typischen Werktag im Sommer. Für die Bestimmung der jahreszeitlichen Änderungen der Potenziale innerhalb der Lastprofilgruppen dient das Kapitel 3.4.2. Je nach den jahreszeitlichen Lastprofilen kann die Verfügbarkeit von Lastverlagerungsmöglichkeiten in der Kälteerzeugung im Winter stark abnehmen. Die gewerbliche Klimatisierung wird beispielsweise im Winter gar nicht eingesetzt, wodurch auch keine Lastmanagementpotenziale vorhanden sind.

Betrachtet man das theoretische Lastmanagementpotenzial unter dem Aspekt der Lastprofilgruppen, ergibt sich auch hier der hohe Anteil sowohl der gewerblichen als auch der industriellen Klimatisierung mit 43 % und 16 % (Abbildung 4.2). Etwas diversifizierter stellen sich die übrigen Gruppen dar. Kühlanlagen im Lebensmittel-EH nehmen mit 17 % eine bedeutende Stellung ein. Klein- und Kleinstanlagen sowie Kühlanlagen in Kühlhäusern haben mit 6 % bzw. 7 % ein geringeres theoretisches Potenzial.

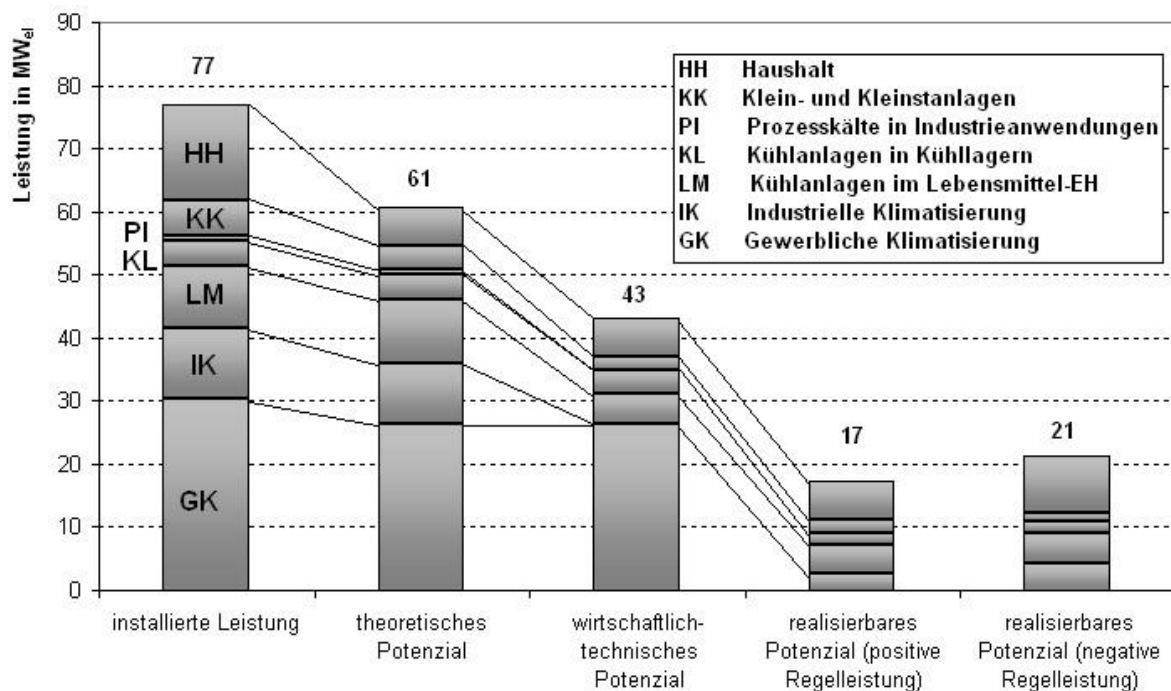


**Abbildung 4.2 Aufteilung des maximalen theoretischen Lastverlagerungspotenzials der Kälteerzeugung in der Stadt Mannheim nach Lastprofilgruppen [eigene Darstellung]**

Bei der Bewertung muss beachtet werden, dass die Unternehmen der Nahrungsmittelherstellung wie beispielsweise im Bereich Teigwaren oder Süßwaren nicht in der Auswertung enthalten sind, da zu diesem Betriebsstätten keine Daten eingeholt werden konnten. Auch in der Chemie- und Pharmaziebranche gibt es keine verfügbaren Informationen. Hier ist auch die Durchdringung der Branchen mit Kälteanlagen nicht eindeutig. Tendenziell ist der Einfluss dieser Branchen aufgrund der Zahl der Betriebsstätten jedoch nicht als hoch einzuschätzen.

Einschränkungen für das **technisch-wirtschaftliche Potenzial** bestehen im Ausschluss von Prozesskälte aufgrund nicht vorhandenen Speicherkapazitäten sowie offener Kühleinrichtungen und bestimmte Betriebszeiten vom Lastmanagement aufgrund des hohen Wärmeeintrags und der folglich nicht verschiebbaren Kälteversorgung. Dieses verbleibende Potenzial beträgt über alle Lastprofilgruppe 43 MW<sub>el</sub>. Es wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass das technische Potenzial durch die Energiekosteneinsparungen für die Anlagenbetreiber bei der Umsetzung des Lastmanagements grundsätzlich wirtschaftlich ist, da durch die intelligente Steuerung kaum zusätzlicher Aufwand entsteht. Diese Annahme muss im Rahmen fortlaufender Untersuchungen jedoch erst verifiziert werden. In dieser Potenzialanalyse sind Kältespeicher, da sie bisher aufgrund fehlender Anreize nicht verbreitet sind, nicht Gegenstand der Betrachtung. Für zukünftige Entwicklungen können aufgrund der Einbeziehung von Kältespeichern die Verteilung der Potenziale durchaus positiver ausfallen.

Das **realisierbare Potenzial** wurde auf Basis einer Abschätzung der Intensität von Hemmnissen mittels eines Einflussdiagramms ermittelt. Ergebnis dieser Bewertung ist ein hoher, negativer Einfluss erhöhter Kühlanforderungen gerade im Bereich der Klimatisierung und bei Kühllagern innerhalb der Lebensmittelkühlkette auf das realisierbare Potenzial. Im Bereich Klimatisierung bestehen zudem die meisten Hemmnisse, die einen bedeutenden Einfluss auf die Durchführung von Lastmanagement haben. Aus diesem Grund ist hier die Reduktion vom technisch-wirtschaftlichen zum realisierbaren Potenzial besonders stark. Bei den Klein- und Kleinstanlagen sowie bei den Kühlanlagen im Lebensmittel-EH gibt es Hemmnisse, jedoch wirken diese sich nach Einschätzung der Studie nicht in bedeutendem Umfang auf eine Umsetzung von Lastmanagement aus.



**Abbildung 4.3 Reduzierung des maximalen Lastmanagementpotenzials nach Potenzialstufen**

Das theoretische und das technisch-wirtschaftliche Potenzial beziehen sich jeweils auf eine Verlagerungsmöglichkeit im positiven Regelbereich, also der Abschaltung der Last. Daraus wurde ein realisierbares Potenzial mit 17 MW<sub>el</sub> ermittelt. Die höchsten realisierbaren Verlagerungsmöglichkeiten liegen mit 5 MW<sub>el</sub> und 6 MW<sub>el</sub> im Lebensmittel-EH sowie bei den Haushalten. Lastverlagerung kann auch in der Zuschaltung von Last, also der Bereitstellung negativer Regelleistung, bestehen. Sie ergibt sich aus der Differenz der genutzten Leistung und der installierten Leistung für den Anteil an Kälteerzeugung, der durch das realisierbare Potenzial abgedeckt werden kann. Hierbei liegt das verlagerbare Potenzial bei 21 MW<sub>el</sub>. In der Abbildung 4.3 werden aufgrund des zeitlichen Lastverlaufs innerhalb der Lastprofilgruppen nur Maximalwerte für einen Werktag im Sommer dargestellt.

Da kein realisierbares Potenzial im Bereich der Prozesskühlung vorhanden ist, wird die Bereitstellung negativer Regelleistung für die industrielle Klimatisierung und die Prozesskälte in Industrieenanwendungen ausgeschlossen. In der gewerblichen Klimatisierung ergibt sich der Betrag negativer Regelleistung aus dem minimalen Lastanteil im Betrieb von 50 % und der Überdimensionierung der Anlage. Auch im Lebensmittel-EH sowie in den Kühltälern beträgt die Minimallast 50 %, wodurch eine Last um 50 % auf 100 % zugeschaltet werden kann. Bei Klein- und Kleinstanlagen sowie bei den Haushalten beträgt der Gleichzeitigkeitsfaktor 0,67 und 0,4, so dass durchschnittlich 33 % bzw. 60 % der Last nicht genutzt und damit zugeschaltet werden können. Bei der Bereitstellung negativer Regelleistung und niedrigeren Kühltemperaturen führt jedoch eine niedrigere Verdampfungstemperatur zu einem geringeren Leistungsfaktor und damit zu einem höheren Strombedarf, obwohl der zeitverlagerten Kältebedarfs betragsmäßig gleich bleibt. Verringert sich die Verdampfungstemperatur für die Wärmeentnahme aus der Kühlstelle um 1 °C, erhöht sich der Strombedarf um 3 bis 3,5 %.

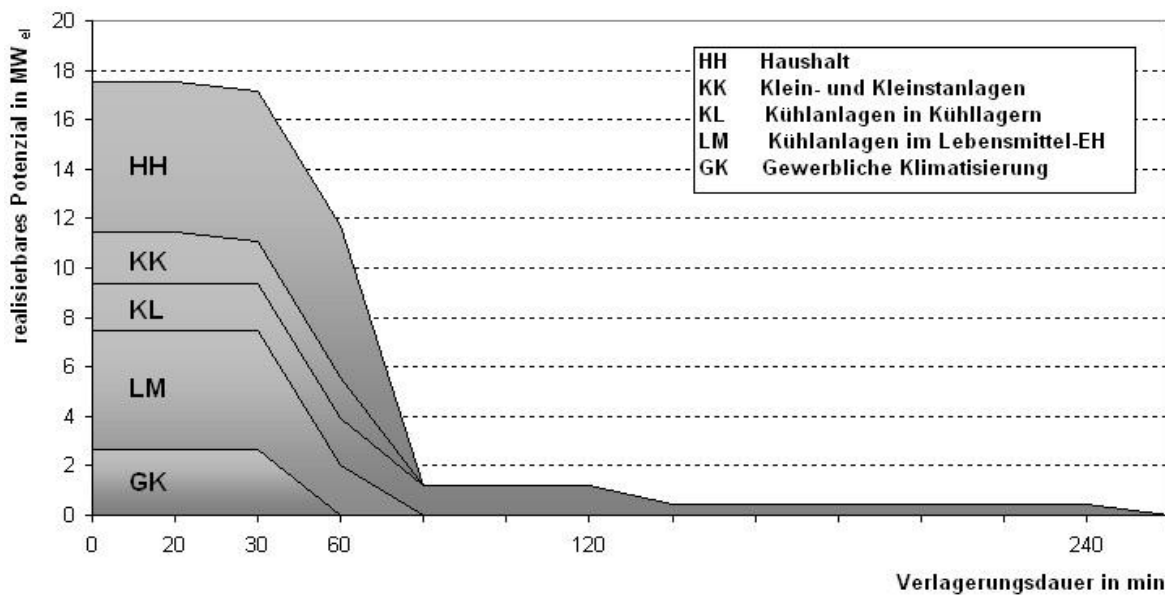


Abbildung 4.4 Maximales realisierbares Lastmanagementpotenzial nach Verlagerungsdauer

Ordnet man das maximal realisierbare Potenzial nach den Verlagerungsdauern der Branchen an, erhält man den Verlauf in Abbildung 4.4. Bei dem Großteil der Anwendungsbereiche beschränkt sich die Verlagerungsdauer auf 30 Minuten oder 1 Stunde. Es wurden die Annahmen der Einflussfaktoren für die Temperaturanforderungen und der akzeptablen Temperaturschwankungen aus Tabelle 4.1 berücksichtigt. Lediglich in der Lastprofilgruppe *Kühlanlagen in Kühllagern* gibt es mit den Kühlhäusern sowie der TK-Kühlzellen der Nahrungsmittelindustrie Anwendungen, die eine Verlagerungsdauer von über einer Stunde besitzen. Diese Dauer erscheint in erster Betrachtung nur eingeschränkt erfolgversprechend für ein Lastmanagement zur Optimierung des Strombezug oder des Netzmanagements. Ein Vorteil bietet in diesem Fall die intelligente Regelung der Lasten, die im Rahmen einer Art von Pooling die Lasten nacheinander anordnen kann, so dass sich die Höhe der verlagerbaren Last reduziert, damit aber die individuelle Verlagerungsdauer der einzelnen Kälteanlagen auf eine Gesamtverlagerungsdauer des Kälteanlagenpools verlängert wird.

### 4.3. Implementierungsmöglichkeiten von Lastmanagement in der Kälteerzeugung

Die Bewertung der Möglichkeiten der Umsetzung von Lastmanagement zielt ab auf eine Betrachtung der einzelnen Branchen. Die Kälteanlagenbetreiber müssen selbst ein Interesse zur Durchführung von Lastmanagement haben. Aus den empirischen Untersuchungen geht hervor, dass das primäre Interesse in den finanzielle Anreize besteht. Das Interesse für die Kälteanlagenbetreiber an einer Umsetzung des Lastmanagements steigt im Vorhandensein der folgenden Faktoren:

- Geringer Einfluss durch Hemmnisse
- Finanzielle Anreizmöglichkeiten (z.B. im Vergleich zu bestehender Tarifstruktur)
- Geringer eigener Ressourceneinsatz für Betrieb und Überwachung der Regelung und Abrechnung
- Geringer Eingriff in die Betriebsweise der Kälteanlagen

Der Ressourceneinsatz zur Überwachung der Kühleinrichtungen (tagsüber / nachts) oder zur Überprüfung der Abrechnung und der Eingriff in die Betriebsweise hängen in hohem Maße von der technischen Weiterentwicklung der Geräte sowie der Umsetzung tariflicher Anreizsysteme zusammen. In den Branchen wird der Aufwand tendenziell von der Größe der Betriebsstellen und damit auch von Umfang des möglichen Lastmanagements abhängen. Da die letzten beiden Merkmale branchenübergreifend gelten,

werden sie aus der Bewertung der einzelnen Branchen ausgeschlossen, spielen aber dennoch eine wichtige Rolle für die einzelnen Betreiber.

Für den Anbieter von Lastmanagementdienstleistungen, beispielsweise das Stromversorgungsunternehmen, ist ein gutes Verhältnis zwischen Aufwand, notwendige Infrastruktur, Regelung zu der Verfügbarkeit von Regelleistung entscheidend. Für ihn sind die folgenden Kriterien relevant:

- Einfache technische Einbindung der Kälteanlage in die Regelungsinfrastruktur
- Unkomplizierte Erreichbarkeit einer Vielzahl von Betriebsstätten
- Hohes Lastverschiebepotenzial pro Betriebsstätte mit wenigen technischen und zeitlichen Einschränkungen

Mit der technischen Einbindung ist der Aufwand der Installation und die Komplexität der Regelungsprozesse gemeint, die mit der dezentralen Regelbarkeit der Kälteanlagen einhergeht. Bei individualisierten Kälteanlagen und Anlagen, die indirekt durch andere Leittechniken geregelt werden, ist der Aufwand tendenziell größer, da hier sehr spezifisch und mit vielen Abstimmungsprozessen vorgegangen werden muss. Die unkomplizierte Erreichbarkeit umfasst sowohl die Möglichkeit, über Unternehmenszentralen Zugang auf viele Filialen zu erhalten, oder eine hohe Wahrscheinlichkeit, bei der Kundensuche auf interessierte Unternehmen zu stoßen. Gerade in Branchen, bei denen eine hohe Reduktion des realisierbaren Potenzials aufgrund von Hemmnisse auftritt, ist diese Wahrscheinlichkeit eher gering.

Die Tabelle 4.2 stellt eine Übersicht zur Bewertung der beschriebenen Implementierungsmöglichkeiten nach den relevanten Branchen dar. Dabei werden die Indikatoren ‚sehr geeignet‘ (+) sowie ‚geeignet‘ (+ / -) und ‚weniger geeignet‘ (-) verwendet. Die Ergebnisse dieser Tabelle gehen von einer gegenwärtigen Bewertung der Kriterien aus. Es ist demnach nur eine kurzfristige Betrachtung eines ersten Engagements im Bereich Lastmanagement. Durch eine andere Bewertung der Hemmnisse, der technischen Anbindung oder der finanziellen Anreizmöglichkeiten kann das Interesse zu einem späteren Zeitpunkt für die Umsetzung von Lastmanagement deutlich anders ausfallen.

Tabelle 4.2 Bewertung der Implementierungsmöglichkeiten von Lastmanagement nach Branchen

Branchen- gruppe	Branche	Finanzielle				Potenzial pro Betriebsstätte	GESAMT	
		geringe Hemmnisse	Anreizmöglich- keiten	technische Einbindung	Erreichbarkeit			
Nahrungsmittel	Schlachthof	+/-	+/-	+/-	+/-	+	+/-	
	Herstellung	Fleischverarbeitung	+/-	+/-	+/-	+	+	
	Teigwaren, etc.	+/-	-	-	+/-	+	-	
	Süßwaren	+/-	-	-	+/-	+	-	
	Bäckerei	+/-	+/-	+/-	+	+	+	
	Brauerei	+/-	-	+/-	+/-	+	+/-	
	Kühlhaus	+/-	-	+/-	+	+	+/-	
	Verteilung / Lagerung	Lebensmittel-EH						
		- davon dezentral	+	+	+/-	+	+	+
		- davon Verbund	+	+	+	+	+	+
		Tankstelle	+	+	+	+	+/-	+
		Kiosk	+	+	+	+/-	+/-	+
		Sonst. Filialen	+	+	+	+	+/-	+
		Getränke-EH	+	+	+	+/-	-	+/-
		Hotel / Gaststätte	+	+	+	+/-	+/-	+
		Kantine	+	+	+	+/-	+/-	+
Eisdiele		+	+	+	+/-	-	+/-	
Apotheke	+	+	+	+/-	-	+/-		
Haushalte	+	+	+	+/-	-	+/-		
Industrie	Chemie	-	-	-	+/-	+	-	
	Pharmazie	-	-	-	+/-	+	-	
Sonstige	Pflanzen	+	+	+	+/-	+/-	+	
Klimatisierung	Verwaltung	-	+/-	-	-	+	-	
	Büro	-	+/-	-	-	+	-	
	Handel / Gewerbe	-	+/-	-	-	+	-	
	Industrie	-	+/-	-	-	+	-	
	Hotel	-	+/-	-	-	+	-	
Gaststätte	-	+/-	-	-	+	-		

+ sehr geeignet +/- geeignet - weniger geeignet

Anhand der Branchenbewertung zur Implementierung von Lastmanagement fallen Anwendungsbereiche der Klimatisierung, der Industrie und Nahrungsmittelherstellung heraus. Zwar sind sie durch ihre Betriebsgröße sehr geeignet, jedoch gibt es gerade auf der Seite der Betreiber starke Hemmnisse. Kühlhäuser sind durch ihre bestehende Tarifgestaltung und des bereits etablierten Lastmanagementaktivitäten nur bedingt geeignet für weitere Aktivitäten in diesem Rahmen. Einige Klein- und Kleinstverbraucher sind für das Lastmanagementpotenzial gut geeignet, aber aufgrund der verfügbaren Leistung von geringer Relevanz. Speziell Haushalte haben trotz ihrer hohen Zahl von Betriebsstellen nur ein sehr geringes Potenzial pro Betriebsstätte. Als geeignet für ein gegenwärtiges Engagement im Lastmanagement erscheinen der Lebensmittel-EH, Bäckereien und Fleischereien, sonstige Filialen und Kleinverbraucher wie Tankstellen, Kioske, Hotels / Gaststätten, Kantine und der Blumenhandel. Der Lebensmittel-EH hat den besonderen Vorteil, dass die Erreichbarkeit durch die sehr geringe Zahl an Unternehmen erleichtert wird. Generell bietet die Lebensmittelverteilung wenig bedeutende Hemmnisse, standardisierte Kälteanlagen und in den Tarifsystemen Möglichkeiten zur Optimierung.

Aus einer ersten Umsetzung von Lastmanagement mit Gruppen, die relativ einfach in ein Lastmanagement einzubinden sind, sollten Erfahrungen gewonnen und damit eventuelle Hemmnisse abgebaut werden. Diese Reduzierung der Hemmnisse umfasst sowohl die Unsicherheiten im technischen Betrieb als auch die wirtschaftlichen Erwartungen an mögliche Erlöse. Aus diesen Erfahrungen im Zusammenhang mit etablierten Tarifen und Anreizen für Lastmanagement können auch langfristige Überlegungen angestellt werden, in einer weiteren Phase beispielsweise Kältespeicher mit in die Planung von Kältesystemen aufzunehmen und dadurch die Option eines weitaus breiteren Portfolios an realisierbarem Potential aufzubauen.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Nutzung von Kälte ist sehr vielfältig und hat in vielen Bereichen des täglichen Lebens eine tragende Bedeutung. Die Kälteerzeugung kann sowohl in die Anwendungsbereiche Produktlagerung und Prozesskühlung als auch in die Klimatisierung unterteilt werden. Darunter lassen sich jeweils Branchen und Branchengruppen ordnen, die in der folgenden Abbildung 5.1 dargestellt sind.

Produktlagerung / Prozesskühlung			Klimatisierung	
Nahrungsmittel	Industrie	Sonstiges		
<b>Herstellung</b> Schlachthof Fleischverarbeitung Fischverarbeitung Obst und Gemüse Teigwaren, Ölsamen und Fette Bäckerei Süßwaren Molkereiprodukte Speiseeis Molkerei Fruchtsaftherstellung Brauerei	<b>Transport</b> Kühlhaus Lebensmittel-EH Tankstelle Kiosk Sonst. Filialen Getränke-EH Hotel / Gaststätte Kantine Eisdiele Apotheke	Chemie Pharmazie Petrochemie Raffinerie Bau Bergbau Labor TK-Technik	Medizin Eissportstätten Wehrtechnik Pflanzen Verwaltung Büro Handel / Gewerbe Industrie Krankenhaus Sportstätte Hotel Gaststätte Wohnung	
	<b>Verteilung / Lagerung</b> Kühlhaus Lebensmittel-EH Tankstelle Kiosk Sonst. Filialen Getränke-EH Hotel / Gaststätte Kantine Eisdiele Apotheke			
	<b>Haushalt</b>			

Abbildung 5.1 Anwendungsbereiche der Kälteerzeugung

Diese Anwendungsbereiche bzw. Branchen haben je nach Anwendungszweck unterschiedliche technische Auslegungen und Dimensionierungen ihrer Kälteanlagen. Zudem unterscheiden sich die Branchen hinsichtlich ihrer Kühlanforderungen und Betriebsführungen der Anlagen. Während industrielle Unternehmen in der Nahrungsmittelherstellung, der Chemie oder der Pharmazie aufgrund ihrer Betriebsstättengröße über individuell geplante Kälteanlagen verfügen, verwenden die Unternehmen und Filialen in der Nahrungsmittelverteilung in der Regel standardisierte Anlagen. Kälteanlagen können in ihrer Auslegung in zentrale Verbundanlagen mit mehreren Kühlräumen oder dezentrale Anlagen mit nur einem Kühlraum. Diese Unterscheidung hat Auswirkungen auf das Lastverhalten und die Möglichkeiten der Regelung der Kälteanlage. Im folgenden sind einige Beispiele für Kälteanlagen aus unterschiedlichen Anwendungen zusammengetragen (Abbildung 5.2).



Abbildung 5.2 Beispiele für analysierte Kälteanlagen in Mannheim in unterschiedlichen Branchen

Mittels einer empirischen Untersuchung wurde für die Stadt Mannheim eine Schätzung des Potenzials zur Ermittlung der Lastverlagerungsmöglichkeiten in der Kälteerzeugung durchgeführt. Es wurden 26 Anlagenbetreiber in persönlichen Gesprächen interviewt und Anlagenbesichtigungen vor Ort durchgeführt sowie weitere 32 Gespräche per Telefon durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung fließen in die Potenzialanalyse ein. Es wurden Branchenzahlen verwendet, Annahmen zur Bestimmung von Leistungskapazitäten getroffen und sechs typische Lastprofilgruppen für die Branchen angelegt.

Für die Bewertung der Potenziale kann unterschieden werden in:

- Installierte Leistung
- Theoretisches Potenzial
- Technisch-wirtschaftliches Potenzial
- Realisierbares Potenzial (positive und negative Regelleistung)

Während die installierte Leistung sich auf die gesamte, installierte Nennleistung bezieht, entspricht dem theoretischen Potenzial die reell genutzte Leistung zur Kälteerzeugung. Einschränkungen für das technisch-wirtschaftliche Potenzial bestehen im Ausschluss von Prozesskälte aufgrund nicht vorhandenen Speicherkapazitäten sowie offener Kühleinrichtungen und bestimmte Betriebszeiten vom Lastmanagement aufgrund des hohen Wärmeeintrags und der folglich nicht verschiebbaren Kälteversorgung. Das realisierbare Potenzial hebt sich vom technisch-wirtschaftlichen Potenzial durch eine Reihe von weiteren Hemmnissen ab. Diese Hemmnisse sind sowohl informeller, technischer als auch organisatorischer Natur und im folgenden zusammengefasst dargestellt:

- Kenntnisstand zur Kälteerzeugung
- Erfahrungen mit Lastmanagement
- Erfahrungen mit externen Regelungsmechanismen und Lastmanagement
- Erhöhte Kälteanforderungen als Qualitätskriterium
- Erwartungen an Kosten-Nutzen Verhältnis von Lastmanagement
- Betreiber-Nutzer-Dilemma

Im Bereich des Lastmanagements unterteilt diese Studie das realisierbare Potenzial in positive und negative Regelleistung, wobei die positive Regeleistung die abschaltbare und die negative Regelleistung die zuschaltbare Last impliziert. In Abbildung 5.3 sind getrennt nach den Lastprofilgruppen die jeweiligen Lastverlagerungspotenziale der Kälteerzeugung für die Stadt Mannheim aufgetragen. Diese Potenziale sind jeweils maximal nutzbare, zeitlich nicht aufgelöste Leistungen in  $MW_{el}$  für einen Werktag im Sommer.

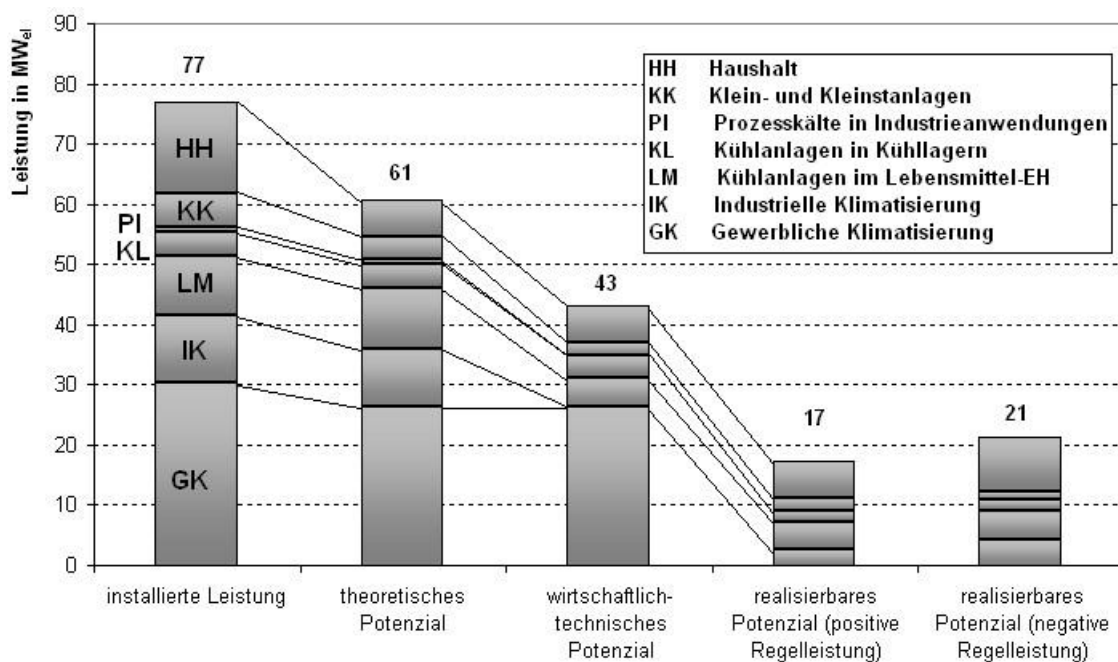


Abbildung 5.3 Potenzialanalyse der Kälteerzeugung nach Lastprofilgruppen für die Stadt Mannheim

In jeder Lastprofilgruppe können diese Potenziale weiterhin innerhalb des Tages und innerhalb des Jahres zeitlich differenziert werden. Die Abbildung 5.4 zeigt den aggregierten Lastverlauf aller Lastprofilgruppen

über einen Sommertag. Durch diese zeitliche Auflösung findet eine Verteilung der Verlagerungspotenziale über den Tag statt. Das dort dargestellte realisierbare Potenzial stellt die maximale positive Regelleistung dar.

Die Stadt Mannheim hat über alle Verbraucher im Sommer eine Höchstlast von etwa 420 MW<sub>el</sub> bzw. im Winter von 340 bis 380 MW<sub>el</sub>. Aus der täglichen Verfügbarkeit der Lastmanagementpotenzials ergibt sich ein Anteil des theoretischen Potenzials der Kälteerzeugung an der Gesamtlast von etwa 14%. Damit hat die Kälteerzeugung durchaus ein Einfluss auf den Strombedarf bzw. kann durch Lastmanagement prinzipiell ein merklicher Einfluss auf den Lastgang erreicht werden.

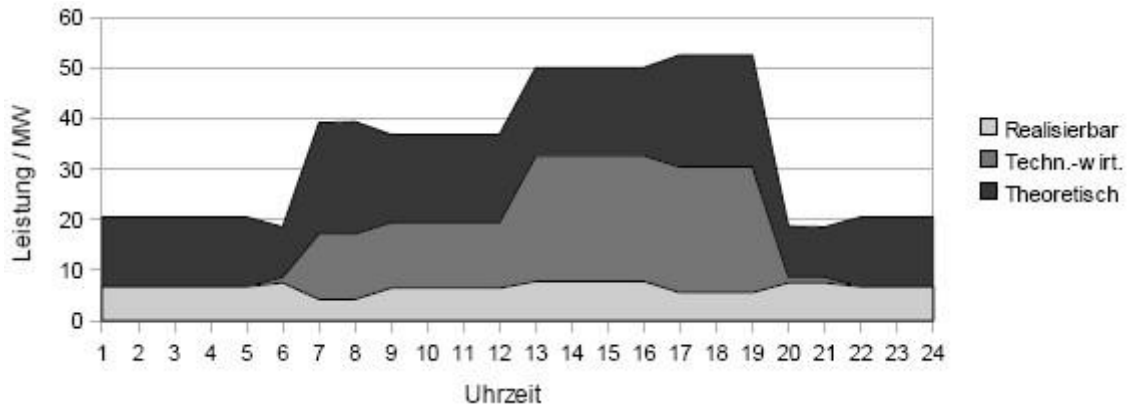


Abbildung 5.4 Aggregierter Lastverlauf der Lastprofilgruppen über einen Sommertag

Als Verlagerungsdauern können je nach Anwendung Zeitspannen von 20 Minuten bis vier Stunden angenommen werden. Für den Hauptteil der Anwendungen beträgt die Verlagerungsdauer aufgrund der Kühlanforderungen zwischen 30 Minuten und einer Stunde (Abbildung 5.5). Durch Einsatz moderner Kommunikationstechnologien können die Lasten jedoch geregelt und an die jeweilige Versorgungssituation so angepasst werden, dass sie zeitlich versetzt auftreten und damit zu einer insgesamt längeren Verlagerungsdauer jedoch mit einem geringeren Volumen an Regelleistung beitragen.

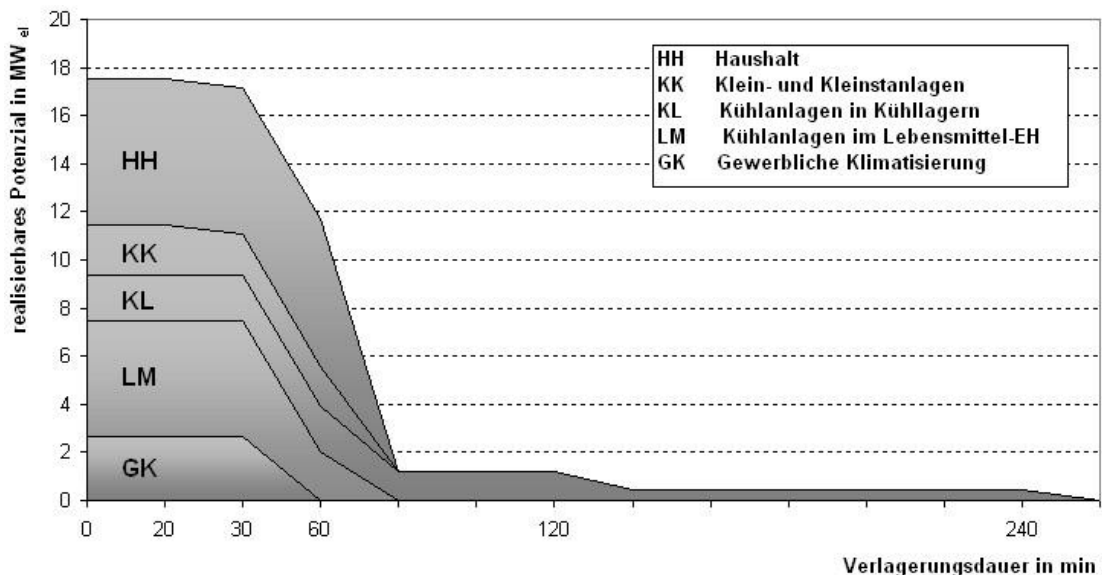


Abbildung 5.5 Verlagerungsdauern von Kälteanlagen nach Lastprofilgruppen

Die Bewertung der Branchen bezüglich der Eignung zum Lastmanagement ergab, dass für eine erste Umsetzungsphase Kälteanlagen aus dem Bereich der Nahrungsmittelverteilung und -lagerung wie beispielsweise der Lebensmittel-EH herangezogen werden sollten. Diese verfügen zwar tendenziell über ein

geringes Leistungsangebot pro Betriebsstelle, jedoch erfüllen sie die meisten Kriterien für Anlagenbetreiber und Versorgungsunternehmen, die ein Lastmanagement favorisieren. Bei großen Unternehmen und großen Betriebsstellen kommt es auf der Seite der Anlagenbetreiber zu Umsetzungsproblemen durch vorhandene Hemmnisse und mangelnder finanzieller Anreize aufgrund bestehender Tarife und teilweise bereits optimierten Strombezug nach anderen Kriterien.

Auf Basis erster technischer Umsetzungen von Lastverlagerung mit Anwendungsgruppen, die relativ einfach in ein Lastmanagement einzubinden sind, sollten zunächst Erfahrungen gewonnen und damit Hemmnisse abgebaut werden. Die Reduzierung der Hemmnisse umfasst sowohl Unsicherheiten im technischen Betriebs als auch die Erwartungen an das Kosten-Nutzen-Verhältnis. Aus diesen Erfahrungen im Zusammenhang mit etablierten Tarifen und Anreizen für Lastmanagement können auch langfristige Überlegungen angestellt werden, in einer weiteren Phase beispielsweise Kältespeicher, die in der aktuellen versorgungswirtschaftlichen Situation nicht verbreitet sind, mit in die Planung von Kältesystemen aufzunehmen und dadurch die Option eines weitaus breiteren Portfolios an realisierbarem Potential aufzubauen.

## 6. Literaturverzeichnis

- [**Arnemann 2009**] Arnemann, M., Arbeitsgemeinschaft Kälte: Die Bedeutung der Kälte- und Klimatechnik. In: Kälte- und Klimatechnik im Kontext der Energie- und Klimaschutzpolitik der Bundesregierung (BMU-Fachtagung am 26. März 2009), Berlin.  
[http://www.co2online.de/fileadmin/CO2online/Kampagnen\\_und\\_Projekte/Vortr%C3%A4ge\\_K%C3%A4lte/2009-03-26\\_B\\_Bedeutung\\_K%C3%A4ltetechnik\\_-\\_MArnemann.pdf](http://www.co2online.de/fileadmin/CO2online/Kampagnen_und_Projekte/Vortr%C3%A4ge_K%C3%A4lte/2009-03-26_B_Bedeutung_K%C3%A4ltetechnik_-_MArnemann.pdf) (Zugriff am 06. Mai 2009).
- [**Auer et al. 2006**] Auer, H., Haas, R., Faber, T., et al.: Faire Wettbewerbsbedingungen für Virtuelle Kraftwerke. TU Wien (u.a.), Projektbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2006.  
[http://www.energiesystemederzukunft.at/edz\\_pdf/0645\\_virtuelle-kraftwerke.pdf](http://www.energiesystemederzukunft.at/edz_pdf/0645_virtuelle-kraftwerke.pdf) (Zugriff am 18. Juni 2006).
- [**Baumanns 2007**] Baumanns, D., REMIS GmbH: Schriftliche Anmerkungen zu "Urteil zur Abdeckung von Kühlmöbeln" (deutsche Übersetzung) am 18. Oktober 2007, Köln.
- [**Bendig 2009**] Bendig, T., Johnson Controls Systems & Service GmbH: Persönliches Interview am 04. Juni 2009, Mannheim.
- [**BMELV 2007**] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV): Verordnung über Anforderungen an die Hygiene beim Herstellen, Behandeln und Inverkehrbringen von bestimmten Lebensmitteln tierischen Ursprungs (Tierische Lebensmittel-Hygieneverordnung - Tier-LMHV); 2007.  
<http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/tier-lmhv/gesamt.pdf> (Zugriff am 09. April 2009).
- [**Bock et al. 2008**] Bock, W., Hainbach, C., Krug, N., et al.: Pohlmann – Taschenbuch der Kältetechnik. C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 19. Auflage, 2008.  
ISBN: 978-3-7880-7824-9.
- [**BVL 2007**] Bundesverband des Deutschen Lebensmittelhandels (BVL) e.V.: Lebensmittel-Einzelhandel 2006/2007. Berlin, 2007.
- [**Cube et al. 1997**] Cube, H. L. v., Steimle, F., Lotz, H., et al.: Lehrbuch der Kältetechnik - Band 2. C. F. Müller Verlage, Heidelberg, 4. Auflage, 1997.  
ISBN: 3-7880-7509-0.
- [**dena o.J.**] Deutsche Energie-Agentur (dena) GmbH: Infoblätter Kältetechnik: Physikalische Grundlagen der Kälteerzeugung. Berlin, o.J.  
[http://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Download/Dokumente/Publikationen/Strom/IEE/Infoblaetter\\_Kaeltetechnik.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Publikationen/Strom/IEE/Infoblaetter_Kaeltetechnik.pdf) (Zugriff am 02. März 2009).
- [**Destatis 2004**] Statistisches Bundesamt: Produzierendes Gewerbe - Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden 2002. Fachserie 4 / Reihe 4.3 - Tabelle 6 und 7, Wiesbaden, 2004.  
<https://www-ec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls> (Zugriff am 15. Juni 2009).
- [**Destatis 2009**] Statistisches Bundesamt: Produzierendes Gewerbe - Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden 2007. Fachserie 4 / Reihe 4.3, Wiesbaden, 2009.  
<https://www-ec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls> (Zugriff am 15. Juni 2009).
- [**DIN 2007**] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN V 18599 - Blatt 10, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz- End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. Berlin, 2007.
-

- [EHI 2007]** EHI Retail Institut GmbH: Handel aktuell - Struktur, Kennzahlen und Profile des internationalen Handels - Schwerpunkt Deutschland, Österreich, Schweiz. EHI Retail Institut GmbH, Köln, 2007.  
ISBN: 978-3-87257-310-0.
- [Eisenhauer 2006]** Eisenhauer, M.: Analyse des Zukunftsmarktes für Kälteversorgungssysteme im Versorgungsgebiet der MVV Energie in Mannheim, inklusive einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verschiedener Kältesysteme, um diesen Kältebedarf zu decken. Berufsakademie Mannheim, Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit MVV AG, 2006.
- [Fichter 2007]** Fichter, K.: Zukunftsmarkt Energieeffiziente Rechenzentren. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Fallstudie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, 2007.  
<http://opus.kobv.de/zlb/volltexte/2008/6394/> (Zugriff am 06. Mai 2009).
- [Franz et al. 2006]** Franz, O., Wissner, M., Büllingen, F., et al.: Potenziale der Informations- und Kommunikations-Technologien zur Optimierung der Energieversorgung und des Energieverbrauchs (eEnergy). wik-Consult (u.a.), Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bad Honnef, 2006.  
<http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Service/publikationen,did=184714.html> (Zugriff am 12. März 2009).
- [Gertec 2008]** Gertec GmbH - Ingenieurgesellschaft: COOLREGION - Der regionale Kältemarkt - Stadt Münster & Kreis Steinfurt. Essen, 2008.  
<http://www.kaelteenergieeffizienz.de/files/RegionaleKaltemAnalyse.pdf> (Zugriff am 24. März 2009).
- [Hecker 2009]** Hecker, W., Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe (VDKF) e.V.: Telefoninterview am 09. Juli 2009, Bonn.
- [Hilligweg, Kalb 2005]** Hilligweg, A., Kalb, A.: Weniger Arbeit mit Eisspeichern. In: TGA Fachplaner, Vol. 11/2005.
- [Jentzsch 2008]** Jentzsch, B.: Technische Machbarkeit und unternehmerische Potentiale für mehr Energieeffizienz durch innovatives Energiemanagement. Fachhochschule Koblenz, Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit MVV AG, 2008.
- [Kalbrunner 2009]** Kalbrunner, W., Kalbrunner & Rausch GmbH & Co. Kältetechnik KG: Telefoninterview am 25. Juni 2009, Dossenheim.
- [Kamphuis et al. 2004]** Kamphuis, R., Carlsson, P., Kester, J., et al.: Market-oriented online supply-demand matching. ECN Netherlands (u.a.), 2004.  
<http://www.ecn.nl/crisp/deliverables/D1.2.pdf> (Zugriff am 20. März 2009).
- [KI 2009]** o.N.: Transkritische CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen auf dem Vormarsch. In: KI Kälte Luft Klimatechnik, Vol. April 2009, S. 16-17.
- [Klobasa 2007]** Klobasa, M.: Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten. Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Dissertation, 2007.  
<http://publica.fraunhofer.de/starweb/servlet.starweb?path=pub0.web&search=N-68615> (Zugriff am 12. März 2009)
- [Kottwitz 2009]** Kottwitz, Epta GmbH (BKT): Telefoninterview am 08. Juli 2009, Mannheim.
- [Lennecke 2009]** Lennecke, Stadtverwaltung Mannheim - Fachbereich Sport: Telefoninterview am 23. April 2009, Mannheim.
-

- [Nestle 2007]** Nestle, D.: Energiemanagement in der Niederspannungsversorgung mittels dezentraler Entscheidung - Konzept, Algorithmen, Kommunikation und Simulation. Universität Kassel, Dissertation 2007.  
<http://www.upress.uni-kassel.de/publi/abstract.php?978-3-89958-390-8#preis> (Zugriff am 12. März 2009)
- [Pohl 2009]** Pohl, C., Transferstelle Bingen (Fachhochschule Bingen): Telefoninterview am 26. Mai 2009, Bingen.
- [Probst 2009]** Probst, J.: Ein Netzwerk für effiziente Kältetechnik. In: Kälte Klima Aktuell 01/2009.  
[http://www.kka-online.info/artikel/kka\\_Ein\\_Netzwerk\\_fuer\\_effiziente\\_Kaeltetechnik\\_\\_85228.html](http://www.kka-online.info/artikel/kka_Ein_Netzwerk_fuer_effiziente_Kaeltetechnik__85228.html) (Zugriff am 26. Mai 2009).
- [Recknagel et al. 2009]** Recknagel, H., Sprenger, E., Schramek, E.-R., et al.: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik. Oldenbourg Industrieverlag, München, 74. Auflage, 2009.  
ISBN: 978-3-8356-3134-2.
- [Rhiemeier et al. 2008]** Rhiemeier, J.-M., Kauffeld, M., Leisewitz, A., et al.: Vergleichende Bewertung der Klimarelevanz von Klimaanlageanlagen und -geräten für den Supermarkt. Ecofys Germany GmbH (u.a.), Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), Nürnberg, 2008.  
[http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql\\_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3624](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3624) (Zugriff am 16. April 2009).
- [Schmidt-Pleschka, Milles 2006]** Schmidt-Pleschka, R., Milles, U.: Energie sparen bei der Kälteerzeugung. Fachinformationszentrum (FIZ) Karlsruhe, BINE Informationsdienst basis Energie 20, Büro Bonn, 2006.  
[http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Basis\\_Energie/Basis\\_Energie\\_Nr.\\_20/basis20internetx.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Basis_Energie/Basis_Energie_Nr._20/basis20internetx.pdf) (Zugriff am 12. März 2009).
- [Seefeldt et al. 2007]** Seefeldt, F., Baumgartner, D. W., Matthes, D. U., et al.: Potenziale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklungen. Prognos AG (u.a.), Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Basel/Berlin, 2007.  
<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/studie-prognos-energieeinsparung,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf> (Zugriff am 04. Mai 2009).
- [Stadler 2005]** Stadler, I.: Demand Response - Nichtelektrische Speicher für Elektrizitätsversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Universität Kassel, Habilitation 2005.
- [StadtMannheim 2009]** Stadt Mannheim - Fachbereich Verbraucherschutz: Telefoninterview am 04. Juni 2009, Mannheim.
- [Statistik-BW 2008a]** Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Flächenerhebung 2008 im Stadtkreis Mannheim - Erhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung. Stuttgart, 2008.  
<http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/SRDB/Tabelle.asp?01515217GE222000> (Zugriff am 14. Juli 2009).
- [Statistik-BW 2008b]** Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Statistische Erfassung der Betriebsstätten und Beschäftigtenzahlen nach Branchen in Mannheim. Stuttgart, 2008. (Zugang über IHK Rhein-Neckar)
- [Statistik-BW 2009]** Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Beherbergungsdaten 2007 und 2008 nach Betriebsdaten. Stuttgart, 2009.  
<http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/SRDB/Tabelle.asp?08063000GE222000> (Zugriff am 09. Juni 2009).
-

- [Steimle et al. 2002]** Steimle, F., Kruse, H., Wobst, E., et al.: Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte. Deutscher Kälte- und Klimatechnische Verein (DKV) e.V., Statusbericht Nr. 22, Stuttgart, 2002. (einschließlich Teilberichte zum Forschungsvorhaben)
- [Tafler 2009]** Tafler, Stadt Mannheim - Fachbereich Sport: Telefoninterview am 26. Mai 2009, Mannheim.
- [VCI 2008]** Verband der chemischen Industrie (VCI) e.V.: Chemische Industrie in Zahlen. Frankfurt, 2008.  
<http://www.vci.de/default~cmd~shd~docnr~124152~lastDokNr~-1.htm> (Zugriff am 26. Mai 2009).
- [VDI 2008]** Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e.V.: VDI 3807 - Blatt 4, Energie- und Wasserverbrauchswerte für Gebäude - Teilkennwerte Elektrische Energie. Düsseldorf, 2008.
- [VDKL 2008]** Verband Deutscher Kühlhäuser und Kühllogistikunternehmen (VDKL) e.V.: Jahresbericht 2007 / 2008. Bonn, 2008.
- [Weilhardt 2009]** Weilhardt, M., MUK Logistik GmbH: Telefoninterview am 30. Juni 2009, München.
- [WetterstationMannheim 2009]** Private Wetterstation Mannheim-Seckenheim: Wetterdatenarchiv. 2009.  
URL: [http://archiv.mannheim-wetter.info/2008\\_daten.shtml](http://archiv.mannheim-wetter.info/2008_daten.shtml) (Zugriff am 26. Mai 2009).
- [Wiechmann 2008]** Wiechmann, H.: Neue Betriebsführungsstrategien für unterbrechbare Verbrauchseinrichtungen - Ein Modell für eine markt- und erzeugungsorientierte Regelung der Stromnachfrage über ein zentrales Lastmanagement. Universität Karlsruhe, Dissertation 2008.  
ISBN: 978-3-86644-279-5.
- [Winkler 2009]** Winkler, C., Johnson Controls Systems & Service GmbH: Persönliches Interview am 04. Juni 2009, Mannheim.

## 7. Anhang

### 7.1. Fragebogen für Kälteanlagenbetreiber

IFEU-Institut · Wilckensstraße 3 · D-69120 Heidelberg

**Betreff: Kälteanlagen im Projekt Modellstadt Mannheim**

Sehr geehrter Herr ,

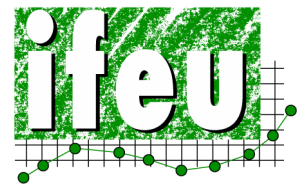
„Kühlen, wenn der Wind weht“? Ganz so einfach ist es natürlich nicht. Dennoch: ein Konsortium um die MVV Energie untersucht in dem von der Bundesregierung geförderten Leuchtturmprojekt „Modellstadt Mannheim“ im Rahmen des Programms „E-Energy“ ([www.e-energie.info](http://www.e-energie.info)), wie dezentrale Energieanlagen, aber auch Stromkunden mittels intelligenter Kommunikations-, Zähler- und Steuertechnik miteinander vernetzt werden können.

Dieses „intelligente Modellnetz“ wird in einem Feldtest mit bis zu 3.000 VersuchsteilnehmerInnen in Mannheim analysiert. Weitere Informationen finden Sie unter [www.modellstadt-mannheim.de](http://www.modellstadt-mannheim.de). Das IFEU-Institut koordiniert gemeinsam mit der Universität Duisburg-Essen einige der Teilstudien in diesem Vorhaben.

Sie als Betreiber von Kälteanlagen sind ein Schwerpunkt des Pilotversuches. Ziel dieses Versuches ist es, Kälteanlagen unter Verwendung modernster Informations- und Kommunikationstechnologie so auszustatten, dass diese durch Lastverschiebung Regelleistung bereitstellen können, ohne dabei die Kühlung zu beeinträchtigen. Damit könnten Sie einen entscheidenden Beitrag der Versorgungssicherheit der Stromnetze, auch bei zunehmend schwankender Energieerzeugung beispielsweise aus erneuerbaren Energien, leisten und die Notwendigkeit des Vorhaltens konventioneller und teurer Regelleistung reduzieren.

Durch die Entwicklung geeigneter Geschäftsmodelle würden sich für den Kälteanlagenbetreiber zudem Kosteneinsparungen ergeben.

Mit diesem Anschreiben und dem beigefügten Fragebogen wollen wir im Vorfeld die Voraussetzungen für einen solchen Feldversuch ausloten. Außerdem soll die Bereitschaft von Kälteanlagenbetreibern im Großraum Mannheim zur Teilnahme am Projekt „E-Energy“ und das sich daraus ergebende Potenzial zur Bereitstellung von Regelleistung erörtert werden.



**ifeu -  
Institut für Energie-  
und Umweltforschung  
Heidelberg GmbH**

Wilckensstraße 3  
D-69120 Heidelberg  
Deutschland - Germany

Telefon +49/(0)6221-4767-0  
Telefax +49/(0)6221-4767-19

<http://www.ifeu.de>

Arne Grein direkt: Telefon -53  
[arne.grein@ifeu.de](mailto:arne.grein@ifeu.de)

März 2009

**Geschäftsführer:**

Dr. Ulrich Höpfner, Dipl.-Chem.

**Fachbereichsleiter/Prokuristen:**

Markus Duscha, Dipl.-Ing.  
Bernd Franke, Biologe  
Jürgen Giegrich, Dipl.-Phys.  
Hans Hertle, Dipl.-Ing. (FH)  
Udo Lambrecht, Dipl.-Phys.  
Dr. Martin Pehnt, Dipl.-Phys.  
Dr. Guido Reinhardt, Chem./Biol.

**Handelsregister:**

Amtsgericht Mannheim HRB 334263  
Sitz der Gesellschaft: Heidelberg  
Steuernummer 32489/20374  
beim Finanzamt Heidelberg

**Bankverbindung:**

HypoVereinsbank Heidelberg  
Nr. 4880191204; BLZ 672 202 86

UID-Nr. DE 143446610

IBAN: DE53 6722 0286 4880 1912 04  
SWIFT (BIC): HYVEDEMM479

**Mit der Teilnahme an dieser Befragung verpflichten Sie sich zu nichts – Sie unterstützen lediglich einen innovativen Forschungs- und Technologieansatz.**

### Infobox

**Lastmanagement** ist die gezielte Beeinflussung der Höhe und zeitlichen Struktur der Stromnachfrage. Wenn der Strom knapp oder die Nachfrage nach Elektrizität groß sind, könnten bestimmte Verbraucher ihre Last verringern oder abschalten. Der Stromkunde wird für seine Flexibilität finanziell belohnt. Auch in Deutschland laufen erste Versuche mit zeitvariablen Tarifen. Waschen in der Nacht, automatische Kühlschränke und große Kühllhäuser, die in Zeiten hoher Nachfrage kurzzeitig ausschalten – mit solchen technischen Feinessen wird die Notwendigkeit reduziert, mit Hilfe von Regelkraftwerken auf der Versorgungsseite die Fluktuationen nachzuregeln. Es entstehen neue Geschäftsmodelle auf Basis intelligenter Stromzähler. Der Fortschritt bei den Kommunikationstechnologien vereinfacht diese Art von Lastmanagement erheblich. Es gibt eine Vielzahl von Strom konsumierenden Maschinen, die problemlos für einige Zeit abgeschaltet werden können, beispielsweise Kühlmaschinen, Wasserpumpen oder Metallschmelzen. Betrachtet man den gesamten deutschen Stromverbrauch, verbraucht Deutschland etwa 14% des Stroms für Kühlen, Lüftung oder Klimatisierung. Diese Segmente sind durch thermische Speicherkapazitäten in der Regel zeitlich verschiebbar. Weitere Potenziale bieten Umwälzpumpen in Heizungen. Diese könnten sich frequenzabhängig abschalten und somit als Sofortreserve dienen. In Haushalten sind auch die Verbrauchssegmente Waschen, Spülen und Elektro-Heizen für Lastmanagement geeignet.

**Quelle: „Erneuerbare Energien – Innovationen für die Zukunft“**

Die Abfrage einiger Daten (z.B. Lastprofile) ist detailliert. Wir bitten Sie, den Fragebogen so ausführlich wie möglich auszufüllen. Sollten sich bestimmte Fragen als nicht zutreffend oder relevant erweisen oder in vertretbarem Aufwand nicht verfügbar sein, so überspringen Sie die entsprechenden Fragen. Bitte füllen Sie das folgende Formular auch und gerade aus, wenn Sie nicht am Pilotversuch teilnehmen möchten. Die Umsetzung der ersten Pilotphase soll öffentlichkeitswirksam realisiert und nach erfolgreichem Test verbreitet angewendet werden. Sollten Sie mehrere unterschiedliche Anlagen betreiben, bitten wir Sie, für diese jeweils ein neues Formular zu verwenden. Gleiches gilt für Produkte mit einander abweichenden Anforderungen an den Kühlbetrieb.

Bei Rückfragen zum Fragebogen wenden Sie sich bitte direkt an:  
Herr Arne Grein

**Tel. 06221 4767 53 oder per E-Mail an [arne.grein@ifeu.de](mailto:arne.grein@ifeu.de)**

Mit freundlichen Grüßen

Arne Grein

## 7.2. Fragebogen für Betreiber von Kälteanlagen

Dieser Fragebogen dient, wie im Anschreiben geschildert, zur Abschätzung der im Großraum Mannheim erschließbaren Menge an regelbarer Leistung und damit zur Bewertung von Lastmanagementpotenzialen von Kälteanlagen sowie möglicher Geschäftsmodelle für Kälteanlagenbetreiber zur Durchführung von Lastmanagement.

Bitte füllen Sie das folgende Formular sorgfältig aus. Mehrfache Antworten zu Fragen sind möglich. Sollten Sie unterschiedliche Kälteanlagen betreiben, bitten wir Sie, für diese jeweils ein neues Formular zu verwenden, es sei denn, die Informationen lassen sich sinnvoll in einen Fragebogen eintragen (z. B. bei mehreren gleichartigen Kälteanlagen).

Bei Rückfragen zum Fragebogen wenden Sie sich bitte direkt an:

ifeu Heidelberg, Herrn Arne Grein

Tel. 06221 4767 53 oder per E-Mail an [arne.grein@ifeu.de](mailto:arne.grein@ifeu.de)

---

### Ihre Kontaktdaten

Name der Firma / Institution:

Ansprechpartner:

Adresse der Firma / Institution:

Telefon:

Email:

Webpage:

Adresse des Standortes der Anlage:

---

### Unternehmen / Institution

---

#### Wie viele Mitarbeiter beschäftigen Sie?

\_\_\_\_\_

Gehören Sie als Filialist einem übergeordneten Unternehmen an? (z.B. Supermarkt)

Ja

Nein

Wenn ja, welchem: \_\_\_\_\_

Wie viele Kälteanlagen betreiben Sie insgesamt am Standort?

\_\_\_\_\_

In welchem Anwendungsbereich betreiben Sie die Kälteanlage?

Lebensmittel:

Erzeugung

Handel und Verteilung

Vertrieb an Endkunden

sonstiges: \_\_\_\_\_

Industrie:

Chemie

Bau

Bergbau

Pflanzen

Labors

sonstiges: \_\_\_\_\_

Klimatisierung:

Industrie

Handel bzw. Gewerbe

Büro und Verwaltung

Hotel

Gastronomie

Sport- und Veranstaltungsstätten

Rechnerzentren

sonstiges: \_\_\_\_\_

Sonstiges: (z.B. Krankenhaus) \_\_\_\_\_

Zu welchem Zweck benötigen Sie die Kühlung (wenn nicht Klimatisierung)?

Produktkühlung (Lagerung)

Prozesskühlung

beides

---

**Kühlgut und Kühlraum** (Klimatisierung nur Fragen 3.4-3.7, 3.9 b und 3.12-3.13)

Welche Produkte bzw. Prozesse werden gekühlt?

\_\_\_\_\_

---

**Wie oft wird das Kühlgut in den Kühlraum ein- bzw. ausgebracht?**

- ständig       regelmäßig, wie oft: \_\_\_\_\_ pro Tag, Woche       sporadisch

**Welche Temperatur hat das Kühlgut beim Einbringen?**

\_\_\_\_\_ °C

**Gibt es spezielle Bedingungen, welche bei der Kühlung des Gutes bzw. bei der Klimatisierung beachtet werden müssen (z.B. Lebensmittel-Hygieneverordnung, etc.)?**

- Ja      Wenn ja, welche Vorschriften bzw. Einschränkungen (z.B. Temperatur, etc.) bestehen: \_\_\_\_\_  
 Nein

**In welchem Temperaturbereich wird die Kühlung bzw. Klimatisierung durchgeführt (bei unterschiedlichen Anforderungen bzw. Kühlräumen sind mehrere Antworten möglich)?**

\_\_\_\_\_ °C Minimum      \_\_\_\_\_ °C Optimum      \_\_\_\_\_ °C Maximum  
 \_\_\_\_\_ °C Minimum      \_\_\_\_\_ °C Optimum      \_\_\_\_\_ °C Maximum  
 \_\_\_\_\_ °C Minimum      \_\_\_\_\_ °C Optimum      \_\_\_\_\_ °C Maximum

**Kann diese Temperaturdifferenz (Min. – Max.) aus 3.5 ohne Auswirkungen auf das Kühlgut bzw. klimatischen Bedürfnisse ständig oder zeitweise erhöht werden?**

- Ja      Wenn ja, inwiefern: \_\_\_\_\_  
 Nein

**Wird die Temperatur nach Möglichkeit stetig im optimalen Punkt gehalten oder schwankt sie zwischen Minimal- und Maximaltemperatur?**

- im optimalen Punkt       zwischen Min. und Max.       Sonstiges: \_\_\_\_\_

**Um welche Art von Kühlraum oder -möbel handelt es sich?**

- (Tief-)Kühlschrank       Kühltheke/-regal       (Tief-)Kühlzelle       Kühlhaus/Kühlhalle  
 Sonstiges: \_\_\_\_\_

**a) Nur für Produkt- und Prozesskühlung: Wie groß ist der Kühlraum?**

\_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>      Wie viele dieser Kühlaggregate werden verwendet: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>      Wie viele dieser Kühlaggregate werden verwendet: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ m<sup>3</sup>      Wie viele dieser Kühlaggregate werden verwendet: \_\_\_\_\_

**1.9 b) Nur für Klimatisierung: Wie groß ist die klimatisierte Fläche?**

\_\_\_\_\_ m<sup>2</sup>

**Ist der Kühlraum verschließbar (Deckel, Rollo, etc.)?**

- Ja       Nein      Wenn ja, wie: \_\_\_\_\_

**Wo befindet sich der Kühlraum?**

- In einem klimatisierten Gebäude (z.B. Supermarkt)       In einem geringfügig temperierten Gebäude (z.B. Lagerhalle)       im Freien  
 Sonstiges: \_\_\_\_\_

**Wie schnell steigt die Temperatur (im durchschnittlich gefüllten Kühlraum) ohne aktive Kühlung? (bei schwankenden Umgebungstemp., mit Nennung einer Referenztemp.)**

etwa \_\_\_\_\_ K/h

**Wie schnell kann die Temperatur im Kühlbetrieb (im durchschnittlich gefülltem Kühlraum) wieder gesenkt werden? (bei schwankenden Umgebungstemp., mit Nennung der Referenztemp.)**

etwa \_\_\_\_\_ K/h

---

## Kältetechnik, Leistung, Energie

---

### Welche Kältetechnik setzen Sie ein?

- Kompressionskältemaschine     Sorptionskältemaschine     Sonstige: \_\_\_\_\_

### Welchen Energieträger setzen Sie ein?

- Strom     Gas     Wärme (z.B. Fernwärme): \_\_\_\_\_     Sonstigen: \_\_\_\_\_

**Wie groß ist die installierte Leistung der Kälteanlage ?** (nach Herstellerangaben im Auslegungspunkt bzw. nach Standardbedingungen bei max. 35°C Umgebungstemp. und 6/12°C Kühlmitteltemp.; alternativ kann die max. notwendige Kühlleistung und die Leistungszahl angegeben werden)

\_\_\_\_\_ kW<sub>elektrisch</sub>    \_\_\_\_\_ kW<sub>thermisch</sub> (nur bei Wärmenutzung)

### Wie groß ist der jährl. Energieverbrauch der Kälteanlage bzw. Ihres Standortes gesamt?

\_\_\_\_\_ MWh<sub>elektrisch</sub>    \_\_\_\_\_ MWh<sub>thermisch</sub> (nur bei Wärmenutzung) der Kälteanlage(n)  
\_\_\_\_\_ MWh<sub>elektrisch</sub> des Standortes bzw. Unternehmens insgesamt

### Welche Daten zum Betrieb Ihrer Kälteanlagen werden bisher separat erfasst?

- Betriebsstunden     Schalt-/Kühlzeiten     \_\_\_\_\_     Lastprofil  
Kälteprofil

Sonstige: \_\_\_\_\_

(Bitte legen Sie diesem Fragebogen wenn möglich diese Daten bei)

### Verfügen Sie über Kältespeicher?

- Ja, im Kühlraum (z.B. therm. Aktivierung der Wände, etc.)     Ja, außerhalb des Kühlraums     Nein

Wenn ja, machen Sie hierzu bitte genauere Angaben (Art, Kapazität, Ladungs- bzw. Entladungsdauer): \_\_\_\_\_

### Wäre ein Kältespeicher aus technischer und baulicher Sicht in Ihre Anlage integrierbar?

- Ja    Wenn nein, welche Hemmnisse gibt es: \_\_\_\_\_  
 Nein

### Verfügen Sie über eine Notkühleinrichtung bei technischen Problemen (z.B. flüssiger Stickstoff)?

- Ja    Wenn ja, machen Sie bitte genauere Angaben zur Art und Kapazität: \_\_\_\_\_  
 Nein

---

## Betriebsführung

---

### Wie wird die Leistung Ihrer Anlage geregelt?

- stufenlos     in Stufen je \_\_\_\_\_ kW     Es existiert keine Leistungsregelung

**Ist die Kühlanlage bereits an ein System zur Gebäude- bzw. Prozessautomation angeschlossen, d.h. kann die Anlage über ein Kommunikationssystem geschaltet und/oder überwacht werden?**

- Ja    Wenn ja, geben Sie den verwendeten Standards an (z.B. Profibus, Ethercat, LON, EIB,...):  
 Nein    \_\_\_\_\_

### a) Welche Aktoren/Sensoren stehen über das Kommunikationssystem zur Verfügung?

- Aktoren:     Betriebsunterbrechung     Leistungsregelung
-

Sensoren:  Temperaturerfassung des Kühlguts bzw. -raums  Temperaturerfassung des Kältespeichers  Sonstiges: \_\_\_\_\_

**1.3 b) Verfügt die Anlage selbst oder das installierte Automationssystem über Schnittstellen, über die ein Energiemanagement auf die genannten Aktoren/Sensoren zugreifen könnte?**

Ja, direkt an der Anlage  Ja, am Kommunikationsbus  Nein

Wenn ja, welcher Standard wird verwendet (Ethernet, RS-232, Funk, etc.): \_\_\_\_\_

**Ist der Betrieb der Kälteanlage aus anlagentechnischer Sicht ohne Weiteres unterbrechbar?**

Ja Wenn nein, worin bestehen die Einschränkungen:

Nein \_\_\_\_\_

**Gibt es zeitlich unterschiedliche Betriebsbedingungen für die Kälteanlage (z.B. Arbeitsschichten, Wochenende, Tag/Nacht, Winter/Sommer etc.)?**

Ja Wenn ja, welche: \_\_\_\_\_

Nein

**Kann die anforderungsgerechte Kühlung bzw. Klimatisierung während der Betriebszeiten mit zeitlicher Verlagerung der Leistung der Kälteanlage gewährleistet werden (mehrere Nennungen sind möglich)?**

Ja, eine Verschiebung der gesamten Leistung ist möglich (Unterbrechung) Wie lang (Dauer): \_\_\_\_\_ h Wann (nachts, Wochenende, Winter, etc.): \_\_\_\_\_

Ja, aber eine Verschiebung ist nur im Teillastbereich möglich  bis \_\_\_\_\_ % Wie lang (Dauer): \_\_\_\_\_ h Wann (nachts, etc.): \_\_\_\_\_

Nein Wenn nein, was sind die Gründe (z.B. technische Einschränkungen, Anforderungen des Kühlguts, etc.): \_\_\_\_\_

**Werden im Unternehmen Optimierungsmaßnahmen zur Reduktion der Energiekosten durch-geführt, in dem Kälteanlagen integriert sind (z.B. Lastspitzenreduktion, Energiecontracting) ?**

Ja Wenn ja, bitte beschreiben Sie kurz Umfang und Zweck der durchgeführten

Nein Optimierungsmaßnahmen: \_\_\_\_\_

**Wie oft muss Ihre Kälteanlage gewartet werden?**

\_\_\_\_\_ Mal pro Jahr bzw. (evt. Anzahl der Betriebsstunden: \_\_\_\_\_)

**Ist der Betrieb Ihrer Kälteanlage mit störender Lärmentwicklung verbunden?**

Ja Wenn ja, müssen Richtlinien eingehalten werden:

Nein \_\_\_\_\_

**Ist durch eine Verschiebung der Betriebszeiten mit zusätzlicher störender Lärmentwicklung zu rechnen?**

- Ja      Wenn ja, machen Sie hierzu bitte genauere Angaben: \_\_\_\_\_
- Nein
- 

### **Bereitschaft zum Lastmanagement und zur Teilnahme am Pilotprojekt**

---

**Hat sich Ihr Unternehmen bereits mit Fragen des Lastmanagements auseinandergesetzt?** (Smart Metering, Demand Side Management, Demand Response)

- Ja, es gibt Interesse und Aktivitäten zum Thema Lastmanagement
- Nein, zwar gibt es Interesse, aber bisher keine Aktivitäten
- Nein, es besteht kein      Wenn nein, aus welchen Gründen: \_\_\_\_\_  
Interesse an derartigen  
Aktivitäten

**Welche Anreize müssten für eine Implementierung von Lastmanagementmaßnahmen geschaffen werden** (z.B. Übernahme von Implementierungskosten, geeignete Geschäftsmodelle, etc.)?

\_\_\_\_\_

**Wären Sie bereit, am beschriebenen Pilotprojekt teilzunehmen?**

- |                               |                    |   |
|-------------------------------|--------------------|---|
| <input type="checkbox"/> Ja   | Welche Bedingungen | <input type="checkbox"/> zusätzliche Informationen                                |
| <input type="checkbox"/> Nein | müssten erfüllt    | <input type="checkbox"/> technische Unterstützung                                 |
|                               | werden, damit Sie  | <input type="checkbox"/> namentliche Nennung in Veröffentlichungen bzw. Berichten |
|                               | teilnehmen:        | <input type="checkbox"/> Sonstiges: _____   |

**Haben Sie weitere Anmerkungen, Fragen oder Wünsche?**

\_\_\_\_\_

## 8. Modellbildung für die in Kälteanlagen verfügbare Regelenergie (UDE)

von Dipl.-Ing. Holger Kellerbauer

### 8.1. Einleitung

**Einordnung.** Diese Modellrechnung ist der Versuch, das verfügbare Volumen an (positiver und negativer) Regelenergie aus Kühl-, Gefrier- und Klimaanlage im Großraum Mannheim abzuschätzen. Diese Arbeit gehört damit zum Arbeitsschritt 1.6 im Arbeitspaket 1 des MoMa-Projektes.

**Ziel.** Es geht in diesem Ansatz darum, überhaupt an brauchbare Zahlen zu kommen, da dieses Volumen scheinbar völlig unbekannt ist. Es fehlen hierfür allerdings zahlreiche wichtige Daten, z.B. über die Abschaltbereitschaft auf der Verbraucherseite.

Das Modell ist deshalb so einfach gehalten, um bei Eintreffen neuer Eckdaten schnell an neue Ergebnisse zu kommen, und möglichst viele Szenarien schon im Vorfeld einfach berechnen zu können.

**Definition.** Unter „negativer Regelenergie“ wird prinzipiell die Energie verstanden, die vorsorglich zusätzlich aufgebracht wird, um in Schwachlastzeiten den tatsächlichen Verbrauch anzuheben. Hier bedeutet dies, dass Kälteanlagen unter das normale Niveau herunter gekühlt werden, um zeitnah die Möglichkeit zu haben, sie für einen gewissen Zeitraum abschalten zu können.

**Definition.** Unter „positiver Regelenergie“ wird prinzipiell die Energie verstanden, die in Spitzenlastzeiten durch das gezielte Abschalten von Verbrauchern eingespart werden kann. Hier bedeutet dies, dass Kälteanlagen, die zuvor unter das normale Niveau herunter gekühlt wurden, abgeschaltet werden, und langsam auftauen, bis sie wieder ihre normale Temperatur erreicht haben.

## 8.2. Herleitung des Modells

**Vorgabe.** Gegeben seien  $n$  Kälteanlagen, wobei die  $i$ -te Kälteanlage  $K_i$  durch folgende Parameter beschrieben ist: die Leistungsaufnahme im Dauerbetrieb  $P_i$ , den unteren Schwellwert für die Leistung  $S_i$ , einer Kältekapazität  $C_i$  und den thermischen Verlusten  $R_i$ .

**Modell.** Das Ersatzschaltbild (für konstante  $R_i$  und  $C_i$ ) ist ein einfacher versorgter Schwingkreis. Die Kapazität sei zum Zeitpunkt  $t = 0$  voll geladen und werde von einer externen Quelle auf diesem Zustand gehalten. Betrachtet werde nun die Spannung  $u(t)$  am Kondensator, nachdem zum Zeitpunkt  $t = t_1$  die Versorgung des Schwingkreises abgeschaltet wird. Betrachtet wird nicht der Resonanz-, sondern nur der Kriechfall.

*Hier wird nachgebildet, dass die Kälteanlage auf einem festen Niveau von der Versorgungsspannung gehalten wird. Soll nun Regelenergie verfügbar gemacht werden, wird die Kälteanlage für eine gewisse Zeit abgeschaltet, und beginnt zu tauen. Dieses Auftauen ist bis zu einem gewissen Maß tolerabel.*

**Funktion.** Die Funktion  $u(t)$  für das Entladen eines Kondensators, der auf eine Spannung  $U_0$  geladen ist, auf einen Widerstand, ist gegeben durch:

$$u(t) = U_0 e^{-t/\tau}$$

Die Zeit  $t$ , die ein solcher Kondensator benötigt, um sich auf einen bestimmten Wert  $U_d$  zu entladen, kann berechnet werden mit:

$$U_d = U_0 e^{-t/\tau}$$

$$\ln \frac{U_d}{U_0} = -\frac{t}{\tau}$$

$$t = -\ln \frac{U_d}{U_0} \tau$$

Mit Hilfe der Ersetzungen ...

$$\tau = R_i \cdot C_i$$

$$U_0 = \frac{P_i \cdot R_i}{S_i}$$

$$U_d = \frac{S_i \cdot R_i}{P_i}$$

Erhält man die Formel für die Zeit  $t_i$ , die eine Anlage  $K_i$  maximal (am Stück) nicht versorgt sein darf.

$$t_i = - \ln \left[ \frac{\overline{S_i R_i}}{P_i R_i} \right] C_i R_i$$

$$t_i = - \ln \left[ \frac{S_i}{P_i} C_i R_i \right]$$

**Funktion.** Schaltet man die Kälteanlage  $K_i$  für die Dauer  $t_i$  aus, ergibt sich die verfügbare Regelenergie zu:

$$W_i = P_i t_i$$

$$W_i = - P_i \ln \left[ \frac{S_i}{P_i} C_i R_i \right]$$

Damit ist das gesamte verfügbare Regelenergievolumen, welches bei gleichzeitiger Abschaltung aller  $n$  vollständig herunter gekühlten Kälteanlagen  $K_i$  verfügbar ist, gegeben durch:

$$W_{ges} = \sum_{i=1}^n - P_i \ln \left[ \frac{S_i}{P_i} C_i R_i \right]$$

**Anmerkung.** Sei  $W_{i+}$  die verfügbare Regelenergie einer Kälteanlage  $K_i$ , und  $W_{i-}$  diejenige Energie, die nach Verstreichen der Abschaltperiode zusätzlich aufgebracht werden muss, um die Anlage wieder vollständig herunter zu kühlen, dann muss nach dem Energieerhaltungssatz (idealerweise) gelten:

$$W_{i+} = W_{i-}$$

Dies gilt nur für den Fall zeitlich konstanter  $R_i$  und linearem Anlagenverhalten. Die letztere Annahme muss getroffen werden, um das Modell beherrschbar zu halten.

*In der Praxis empfiehlt es sich, die Anlage zunächst herunter zu kühlen, um sie dann auftauen zu lassen, um Schaden von den gekühlten Prozessen, bzw. Gütern abzuwenden. Am Rechenweg selbst ändert dies aber nichts.*

### 8.3. Beweis für die Korrektheit des Modells

**Problem.** Der Widerstand  $R_i$  sei nun nicht mehr konstant. Ist das Modell dennoch korrekt?

**Frage.** Ein Kältespeicher sei als Parallelschwingkreis modelliert. Der Widerstand  $R$ , welcher die thermischen Verluste modelliert, sei prinzipiell zeitabhängig. Die Umgebungstemperatur sei mit der Tageszeit linear, beschränkt, stetig und glatt verknüpft; des Weiteren ist diese Zeitabhängigkeit mit einer periodischen Rechteckfunktion überlagert, die ebenfalls beschränkt ist und die Betriebsarten während und außerhalb der Geschäftszeiten modelliert – zwei Zustände: „häufiges Öffnen“ / „dauerhaft geschlossen“.

Reicht es aus,  $R$  stückweise als konstant anzunehmen, bzw. ist die einfache exponentielle Lösung der gewöhnlichen Differentialgleichung der tatsächlichen Lösung der nicht-gewöhnlichen Differentialgleichung so ähnlich, dass der Fehler vernachlässigt werden kann, bzw. eine Frage der zeitlichen Quantisierung ist?

Die Kältekapazität werde durch einen Kondensator  $C$  modelliert.

**Situation.** Gegeben seien zwei Parallelschwingkreise  $A$  und  $B$  aus jeweils einem identischen Kondensator  $C$  und einem Widerstand  $R$ , wobei gilt, dass  $R_A$  jeweils konstant, und  $R_B$  ständig zeitabhängig, d.h. eine  $f(t)$  ist. Ansonsten weisen die Kreise keinerlei Unterschiede auf.

Bekannt seien bereits die Lösungen der jeweiligen Differentialgleichungen  $y_A = f(t, R_A)$  und  $y_B = f(t, R_B(t))$ .  $R_B(t)$  sei zunächst eine beliebige stetige und beschränkte Funktion über  $t$ .

**Feststellung.** Hat  $R_B(t)$  Plateauphasen, d.h. ist die Funktion über einem Intervall konstant ( $R_B(t) = R_A$ ), so gleichen sich die Lösungen für  $y_A$  und  $y_B$  in diesem Intervall und sind maximal um eine Zeitspanne  $\Delta t$  gegenüber der anderen Funktion verschoben.

**Definition.**  $R_A$  sei aus dem Wertemenge  $[R_{max}; R_{min}]$  konstant gewählt, und  $R_B(t)$  sei durch die Intervallgrenzen  $[R_{max}, R_{min}]$  beschränkt.

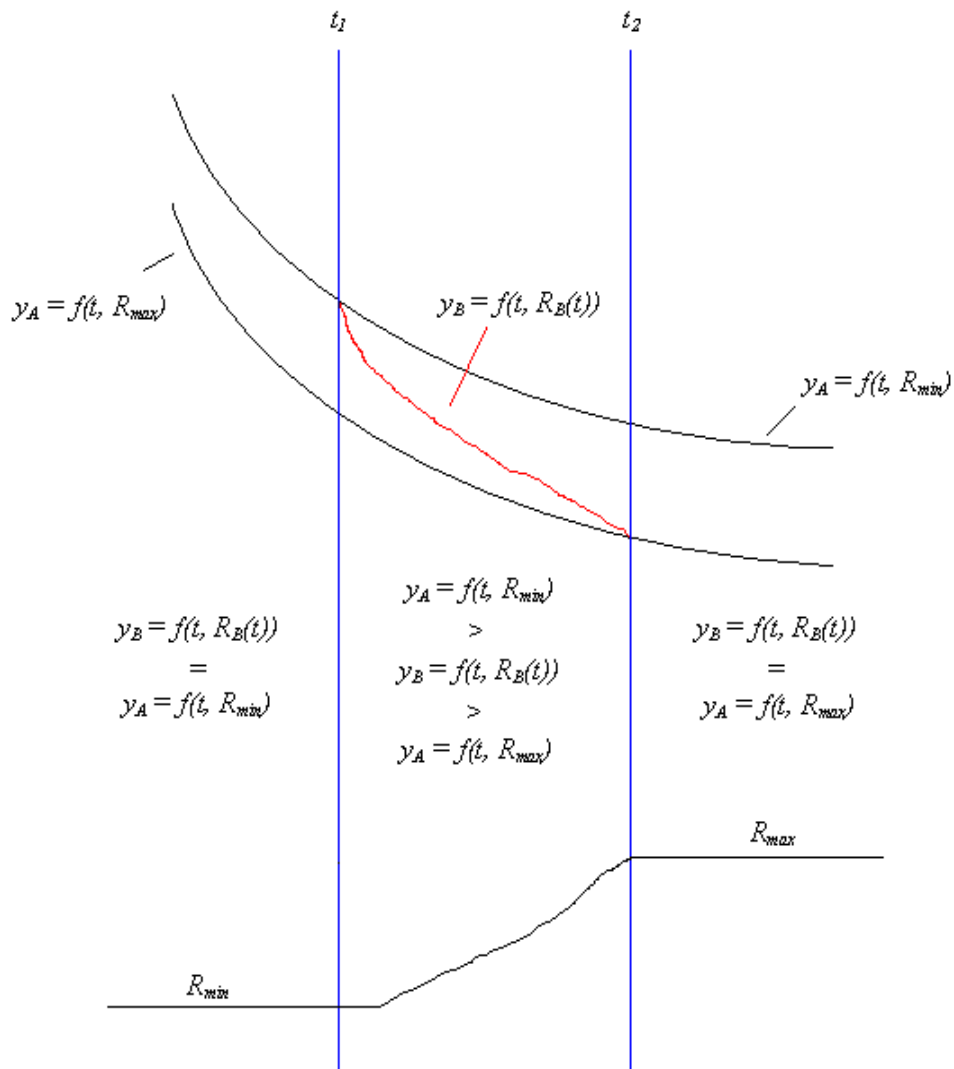
**Situation.** Gegeben sei eine konkrete Lösung für  $y_B = f(t, R_B(t))$  bei der  $R_B(t) = R_{min}$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  bis zum Zeitpunkt  $t = t_1$  und  $R_B(t) = R_{max}$  zum Zeitpunkt  $t = t_2$  bis zum Zeitpunkt  $t = \infty$ . Zwischen  $t_1$  und  $t_2$  sei die Funktion durch  $R_{max}$  und  $R_{min}$  beschränkt und stetig. Des Weiteren gebe es zwei Lösungen für  $y_A$  der Form  $y_A = f(t, R_{min})$  und  $y_A = f(t, R_{max})$ . Beide Kondensatoren seien bei  $t = 0$  voll (d.h. auf den gleichen Wert) geladen.

**Feststellung.**  $y_B = f(t, R_B(t))$  ist dann durch  $y_A = f(t, R_{min})$  und  $y_A = f(t, R_{max})$  beschränkt.

**Folgerung.** Aus  $t_2 - t_1 \rightarrow 0$  folgt sofort  $R_{max} - R_{min} \rightarrow e$  (wobei  $e$  eine durch die Quantisierung vorgegebene Konstante ist) wegen der Beschränktheit und Glätte von  $R(t)$ . D.h. zwingend, dass feinere Quantisierungen zu kleinerem Fehler führen  $\rightarrow$  Konvergenz!

*Ein kleineres Zeitintervall führt bei gegebener Funktion  $R(t)$  zu kleineren Widerstandsunterschieden zu Beginn und Ende des Intervalls (wegen der Glätte und Stetigkeit). Dies führt wiederum zu engeren Schranken und damit zu einem kleineren Fehler.*

**Fazit.** Der exponentielle Lösungsansatz der gewöhnlichen Differentialgleichung reicht aus, um das Problem bei hinreichender Quantisierungsfeinheit zu lösen.



**Bild 2.1:** Grafische Darstellung des Beweises

## 8.4. Verfeinerung des Modells

Das Modell kann durch verschiedene Maßnahmen an die Erfordernisse der Problemstellung angepasst werden. Während die Modellbildung des Zeit / Temperaturverhaltens einer genaueren Betrachtung bedarf, bietet sich für die Betrachtung der einzelnen Anlagen ein Zusammenschluss ähnlicher Anlagen zu Gruppen an.

Des Weiteren wird ein so genannter Abschaltvektor so wie ein Kompressorfaktor definiert, welche als Werkzeuge für statistische Aussagen dienen.

Diese beiden Größen sind in der Praxis vermutlich korreliert – um sie handhabbar zu halten, müssen sie für die Modellrechnung aber als unkorreliert angenommen werden.

### 8.4.1. Zeitabhängigkeit der Widerstandes $R_i$

**Definition.** Die thermischen Verluste seien nun zeitabhängig. Die Funktion  $R_i(t)$  ist dabei eine lineare Überlagerung von zwei Effekten. 1. Der Abhängigkeit von den Öffnungszeiten einer Kälteanlage  $T_a(t)$  (die Anlage wird während der Betriebszeiten häufig geöffnet und verliert dadurch Kälte) und 2. die Abhängigkeit von der Außentemperatur  $T_b(t)$  (während kalter Nächte muss nicht so stark gekühlt werden, wie z.B. Mittags im Sommer).

$$R_i(t) = R_0 + T_a(t) \cdot T_b(t)$$

**Definition.** Die Funktion  $T_a(t)$  sei eine periodische Rechteckfunktion in  $\mathbb{R}$  mit Offset. Die maximale Amplitude  $A$  modelliere die höheren Verluste während der Öffnungszeiten, der Offset  $\psi$  den Grundverlust, der auch Nachts besteht, wenn die Isolation nicht unterbrochen wird.

$$T_a(t) = \begin{cases} A; & t \in \text{Öffnungszeit} \\ \psi; & \text{sonst} \end{cases}$$

**Definition.** Die Funktion  $T_b(t)$  eine beliebige, global stetige und genügend glatte Funktion in  $\mathbb{R}$ . Sie besteht aus einem prinzipiell periodischen Teil  $p(t)$  und unterliegt gewissen statistischen Schwankungen, modelliert durch  $q(x,t)$ ; wobei  $x$  ein Ergebnis des zugrunde liegenden Zufallsprozesses ist.

$$T_b(t) = p(t) + q(x, t)$$

**Feststellung.** Für die Modellrechnung kann (bzw. muss)  $R_i(t)$  mit einer stückweise konstanten Funktion approximiert werden. Aufgrund der festgestellten Eigenschaften von Modell und Funktion ist der Fehler hierbei durch eine geeignete Wahl der Quantisierung in gewissen Grenzen einstellbar. Die in einer Kälteanlage  $K_i$  verfügbare Regelenergie ist also:

$$W_i = -P_i \ln \left[ \frac{\overline{S_i}}{P_i} \times C_i \cdot R_i(t) \right]$$

**Anmerkung.** Ist  $R_i$  zeitabhängig, gilt nicht mehr in allen Fällen  $W_{i+} = W_{i-}$ . Bei Fälle, d.h.  $W_{i+} < W_{i-}$  und  $W_{i+} > W_{i-}$  sind rein rechnerisch denkbar.

### 8.4.2. Definition eines Abschaltvektors

**Definition.** Ein Abschaltvektor  $A$  sei derjenige Vektor mit  $n$  Einträgen, der die Koeffizienten in einer Summe von  $n$  Summanden mit einem Gewicht  $A_n$  multipliziert. Dieses Gewicht ist aus der Menge  $[0;1]$ , wobei „1“ vollständige Abschaltung einer Gruppe, und „0“ Nicht-Abschalten einer Anlage bedeutet. Für einen Abschaltvektor ...

$$A = [A_1 \ A_2 \ \dots \ A_{n-1} \ A_n]^T$$

... ergibt sich die gesamte verfügbare Regelenergie zu:

$$W_{ges} = \sum_{i=1}^n A_i \times \left[ P_i \ln \left\| \frac{S_i}{P_i} \cdot C_i R_i \right\| \right]$$

Für eine sinnvolle Nutzung des Abschaltvektors für die Berechnung müssen die Kälteanlagen  $K_i$  noch zu Gruppen zusammengefasst werden.

### 8.4.3. Definition von Gruppen

**Definition.** Eine Gruppe  $G$  sei eine Menge von  $m$  Kälteanlagen  $K_i$  aus der Gesamtmenge von  $n$  Kälteanlagen, für die gilt das sie sich in ihren gesamten Merkmalen nur um ein  $\varepsilon$  unterscheiden. Es gibt genau  $n/m$  Gruppen (für den Fall, das alle Gruppen gleich groß sind).

*Ähneln sich Kälteanlagen in Größe und Verbrauch können sie gruppiert werden, um statistische Betrachtungen zu vereinfachen. Die Festlegung von Größe und Anzahl der Gruppen ist dabei beliebig.*

**Definition.** Es gibt eine durchschnittliche Kälteanlage  $K_G$  für jede Gruppe  $G$ . Die durchschnittliche Kälteanlage der  $j$ -ten Gruppe  $G_j$  heißt  $K_{G_j}$ . Sie hat die Eigenschaften:

$$R_j = \frac{1}{n/m} \times \sum_{k=1}^{n/m} R_i$$

$$C_j = \frac{1}{n/m} \times \sum_{k=1}^{n/m} C_i$$

$$P_j = \frac{1}{n/m} \times \sum_{k=1}^{n/m} P_i$$

$$S_j = \frac{1}{n/m} \times \sum_{k=1}^{n/m} S_i$$

**Folgerung.** Die in  $G_j$  verfügbare Regelenergie ist dann (ungefähr):

$$W_{G_j} = m \times \left[ P_j \ln \left[ \frac{\overline{S}_j}{P_j} C_j R_j \right] \right]$$

**Folgerung.** Die gesamte verfügbare Regelenergie ist dann:

$$W_{ges} = \sum_{j=1}^{n/m} W_{G_j}$$

#### 8.4.4. Erweiterung der Definition eines Abschaltvektors

**Definition.** Ein Abschaltvektor  $A$  sei derjenige Vektor mit  $n$  Einträgen, der die Koeffizienten in einer Summe von  $n$  Summanden mit einem Gewicht  $A_n$  multipliziert. Dieses Gewicht ist aus dem Intervall  $[0,1]$  im Raum  $\mathbb{R}$ , wobei „1“ vollständige Abschaltung einer Gruppe, und „0“ Nicht-Abschalten einer Gruppe bedeutet. Die Werte dazwischen können prozentual verstanden werden. Die Multiplikation mit einem Gewicht  $A_n$  ist eine lineare und proportionale Funktion.

**Folgerung.** Die gesamte verfügbare Regelenergie kann geschrieben werden als:

$$W_{ges} = \sum_{j=1}^{n/m} A_j \cdot W_{G_j}$$

*Werden die Anlagen nur per Tarif dazu „motiviert“ abzuschalten (d.h. Es finden keine direkten Fernschalthandlungen statt, siehe hierzu auch [2.3]), können mit dem erweiterten Abschaltvektor schnell Daten für beliebige Szenarien erzeugt werden.*

### 8.4.5. Das Kompressorproblem

Zu dem Abschaltvektor muss, bei genauerer Betrachtung, ein Kompressorfaktor hinzugerechnet werden, der abbildet, wie groß die Chance ist, dass eine Kälteanlage zum Zeitpunkt der Abschaltung tatsächlich in Betrieb ist. Da der Kompressor von vielen Anlagen nur getaktet läuft, lässt sich evtl. keine Regelenergie gewinnen, wenn die Anlage sowieso nicht läuft.

*Angenommen, der Kompressor einer gewöhnlichen, gut gefüllten (die Kältekapazität von Kühl- und Gefriergeräten basiert fast ausschließlich auf dem Inhalt, siehe [2.2]) Haushaltskühltruhe läuft pro Stunde nur etwa 5 Minuten – dann ist die Chance, dass er gerade jetzt eingeschaltet ist, bei lediglich 8,3 %.*

**Formel.** Die Chance  $p_i$  dafür, dass aus einer Kälteanlage  $K_i$ , deren Kompressor im Durchschnitt in einer Zeitperiode  $T$  nur für eine Dauer  $T'$  eingeschaltet ist, Regelenergie gewinnbar ist, berechnet sich nach:

$$p_i = \frac{T'}{T}$$

Die Chance, dass alle  $n$  Anlagen in Betrieb sind, ist:

$$p_i = \left( \frac{T'}{T} \right)^n$$

Die Chance, dass keine einzige Anlage in Betrieb ist, ist:

$$p_i = 1 - \left( \frac{T'}{T} \right)^n$$

*Greift man das obere Beispiel auf, und berechnet die Werte für eine Gruppe von 10 vergleichbaren Anlagen, so ist die Chance für die Verfügbarkeit der vollen Regelenergie bei gerade mal 0.00000000015 %. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass aktuell überhaupt keine Regelenergie verfügbar ist, läge demnach bei stolzen 42 %.*

**Formel.** (aus [2.1]) Sei  $r$  die Anzahl von  $n$  Kälteanlagen, die gerade in Betrieb sind.  $p$  sei die Chance, das eine Anlage in Betrieb ist. Die Chance  $P(r)$  dafür, das gerade  $r$  von  $n$  Anlagen in Betrieb sind, ist dann (Binomialverteilung):

$$P(r) = \binom{n}{r} \cdot p^r \cdot (1-p)^{n-r}$$

**Formel.** Der Mittelwert (bzw. Erwartungswert  $E$ ) von  $r$  (einer Binomialverteilung) berechnet sich nach [2.1] mit:

$$E[r] = \sum_{r=0}^n r \cdot P(r) = np$$

Die Varianz von  $r$  berechnet sich nach:

$$V[r] = np(1-p)$$

Der gesuchte Kompressorfaktor  $\xi_j \in IR [0, 1]$  einer Gruppe  $G_j$ , mit dem der Regelenergiewert einer Gruppe multipliziert werden muss, um ein realistischeres Bild der verfügbaren Menge zu erhalten, ist dann:

$$\xi_j = \frac{E[r]}{n}$$

*In unserem Beispiel wäre  $E(r) = 0,83$  - d.h. im Schnitt sind hier von 10 Anlagen im Mittel nur 0,83 Stück aktuell in Betrieb. Die Varianz liegt dann bei 0,76, der Kompressorfaktor bei 0,083.*

Die gesamte verfügbare Regelenergie berechnet sich dann nach:

$$W_{ges} = \sum_{j=0}^{n/m} A_j \cdot \xi_j \cdot W_{Gj}$$

**Folgerung.** Ein Vorteil dieses Faktors ist des Weiteren, das nun die Leistungsaufnahme  $P_i$  einfacher greifbar ist, da nun keine Mittelwertbildung über die Zeit mehr erfolgen muss, sondern die einfache Angabe der Spitzenleistung näherungsweise ausreicht. Wichtig ist, das der Faktor rein praktisch nur als Gewicht einer Last verstanden wird – damit sind sowohl Spitzenlasten, als auch mittlere Lasten und abgestufte Lasten prinzipiell abgedeckt.

Gegeben seien 10 Kühltruhen mit 230 W Spitzenleistung, deren Kompressoren in 60 Minuten im Schnitt für 5 Minuten laufen. Die verfügbare Regelleistung, sollten alle Kompressoren gerade laufen, ist 2300 W. Der Kompressorfaktor läge bei 0.083, d.h. von 2300 W sind sofort im Mittel nur 19,09 W verfügbar.

Aber die 10 Kühltruhen benötigen in 60 Minuten auf jeden Fall je einmal für 5 Minuten 230 W. Die Gesamtleistung ist also 191,6 Wh. - würden die Truhen durchlaufen, wären es 2300 Wh. Das Verhältnis von 5 Minuten zu 60 Minuten entspricht dem Verhältnis von 191,6 Wh zu 2300 Wh.

**Folgerung.** Diese Beispiele zeigen anschaulich, dass der Kompressorfaktor auch einfach über das Verhältnis von Einschaltdauer zu Zeithorizont bestimmt werden kann.  $\xi_j$  ist dann auch nicht mehr von  $n$  abhängig. Es ist nämlich einfach:

$$\xi_j = \frac{E[r]}{n} = \frac{n \cdot p}{n} = p = \frac{T'}{T}$$

#### 8.4.6. Mögliche Verfeinerungen des Kompressorproblems

Es scheint sinnvoll, den Kompressorfaktor ähnlich wie die thermischen Verluste  $R_i$  zeitabhängig zu machen. Ein zweistufige Funktion, welche das Kompressorverhalten innerhalb und außerhalb der Geschäftszeiten modelliert, scheint dem Problem angemessen. Man berechnet einfach den Kompressorfaktor für beide denkbaren Zustände, und erhält so einen höheren Detaillierungsgrad.

Generell ermöglicht der Kompressorfaktor die Verwendung von zwei Eingangsdatentypen für  $P_i$  – einmal die mittlere Leistung ( $\xi_j = 1$ ) bei Anlagen, die im Dauerbetrieb laufen (z.B. Klimageräte ohne Regelung); und einmal die Spitzenleistung ( $\xi_j < 1$ ) für getaktet betriebene Anlagen (z.B. Kühltruhen).

#### 8.4.7. Vereinigung der Vorfaktoren

**Definition.** Für eine greifbarere Darstellung wird der Kompressorfaktor und das zugehörige Element des Abschaltvektors zu einem Gruppengewicht  $g$  zusammengefasst. Das passende Gewicht für eine Gruppe  $G_j$  heißt  $g_j$ .

$$g_j = \xi_j A_j$$

**Fortführung.** Die gesamte verfügbare Regelenergie kann dann geschrieben werden als:

$$W_{ges} = \sum_{j=0}^{n/m} g_j W_{Gj}$$

So kann jeder Gruppe eine Art „Effektivwert“ zugeordnet werden, der eine greifbare Vorstellung davon liefert, wie viel von der theoretisch verfügbaren Regelenergie tatsächlich genutzt werden kann.

### **8.5. Bewertung des Modells**

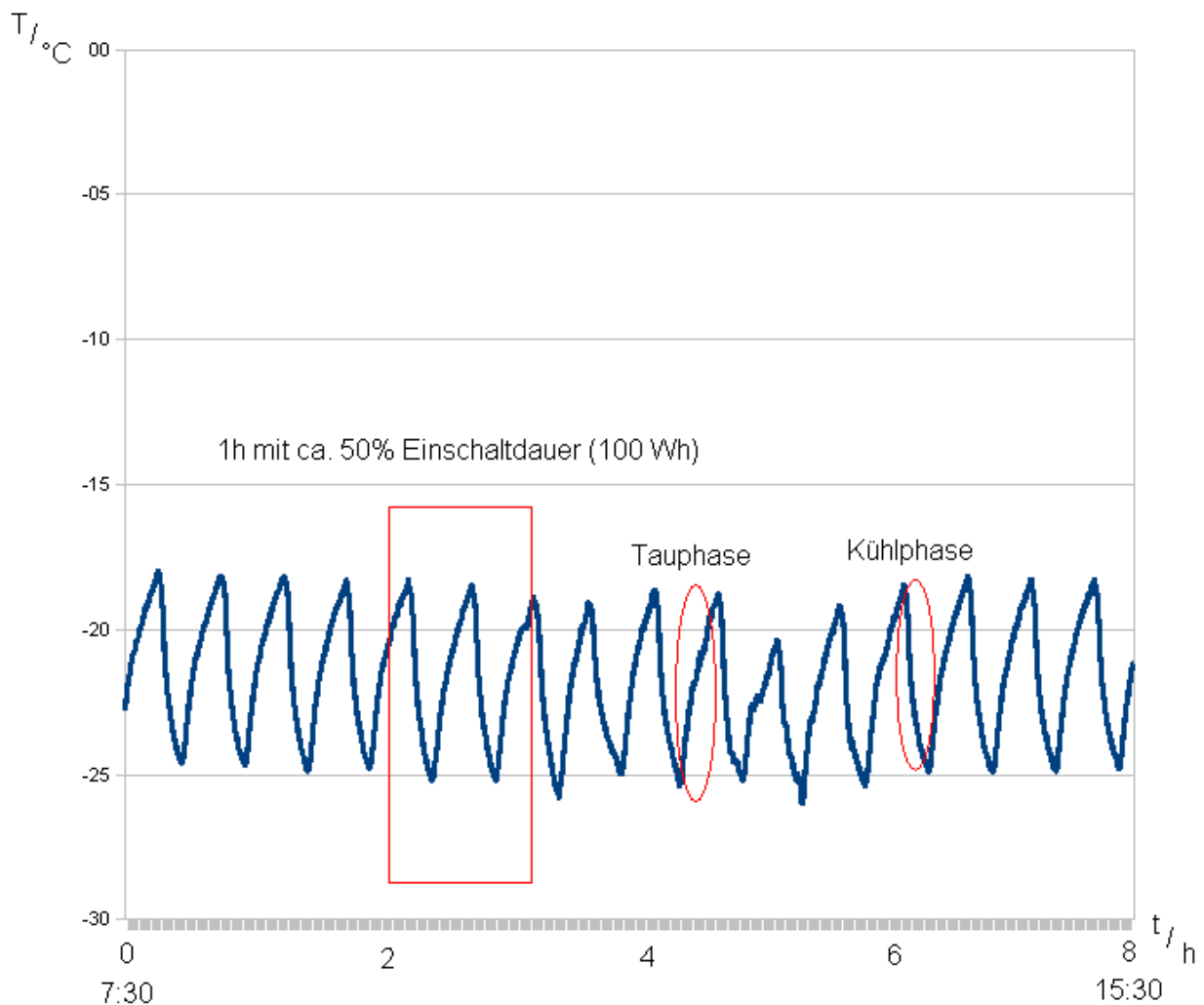
**Pro.** Das Modell ist sehr schlicht – so lassen sich schnell angepasste Datensätze zu Eingaben erzeugen. Es ist flexibel, was die Art der Eingangsdaten betrifft – im einfachsten Fall genügt die mittlere Leistung, und eine Angabe darüber wie lange die Anlage außer Betrieb bleiben kann. Dennoch ist es auch möglich, aus Kältekapazität, Spitzenleistung und Einschalthäufigkeit auf die verfügbare Regelenergie zu schließen.

**Kontra.** Das Modell ist sehr schlicht – dadurch ist es etwas undynamisch, was gewisse Regelvorgänge angeht. Es gehen einige Näherungen ein, so dass die zu erwartende Genauigkeit nicht besonders hoch ist.

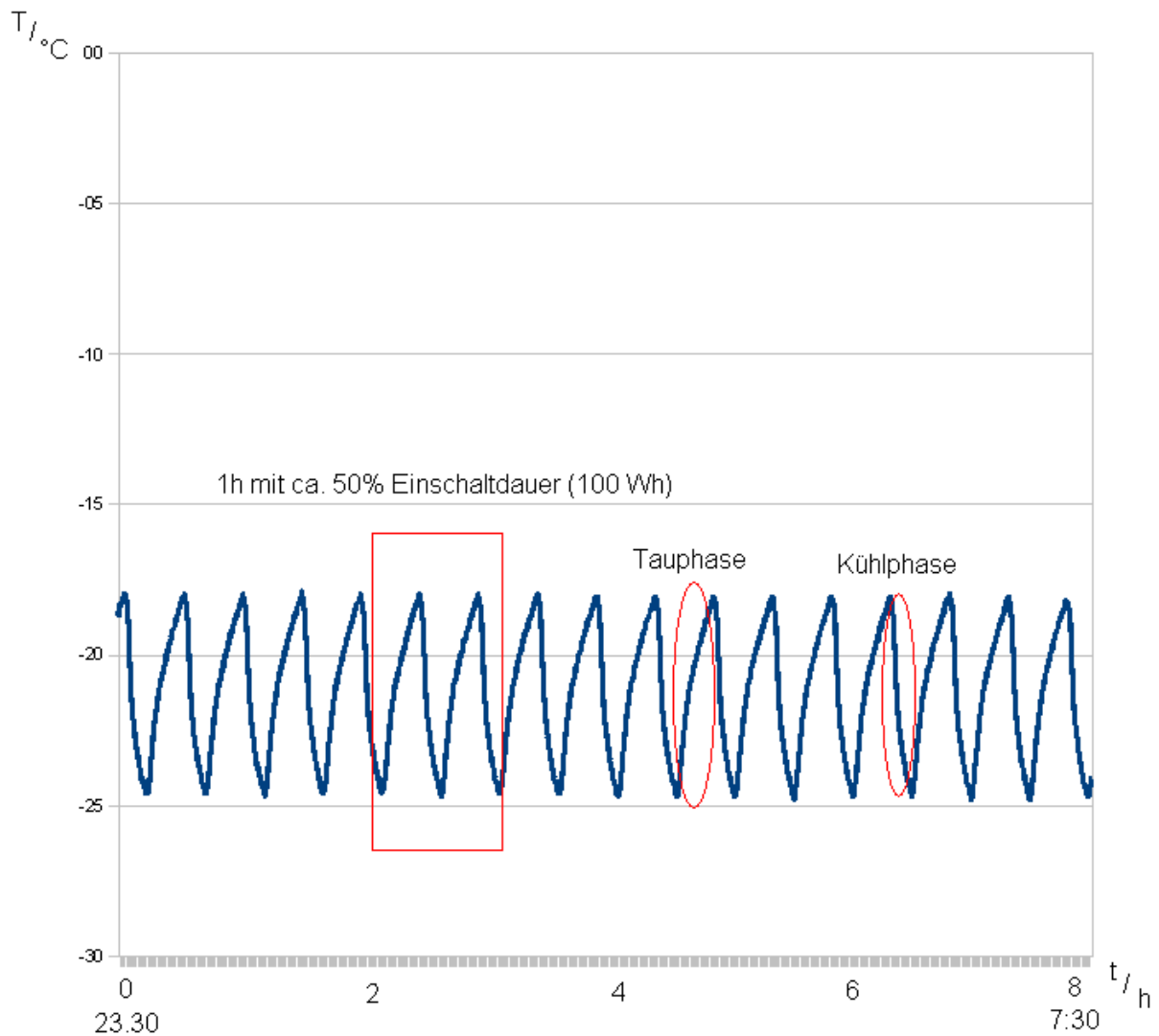
**Fazit.** Für das Ziel dieser Modellrechnung, ein Gefühl für die Menge der verfügbaren Regelenergie zu bekommen, ist das Modell offensichtlich ausreichend. Der zu Grunde liegende Datensatz ist bereits mit einigen groben Werten versehen, weshalb es wenig sinnvoll erscheint, aus unexakten Daten exakte Ergebnisse ableiten zu wollen. Die größte Unsicherheit liegt nach erstem Empfinden in der richtigen Einschätzung des Abschaltvektors, da das Kundenverhalten noch nicht durch empirische Daten aus der Praxis prognostiziert werden kann.

## 8.6. Vormessungen

Um ein Gefühl für die Arbeitsweise einer Gefriertruhe zu bekommen, wurde die Lehrstuhl-eigene Truhe an einen Messdatenschreiber angeschlossen. Zunächst werden die Daten von Tages- und Nachtzeiten verglichen. Die Außentemperatur des Raumes betrug  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ . Die Gefriertruhe hat ein Fassungsvermögen von ca. 200 Litern, eine Leistung von ca. 200 W (0,8 A) und war zu etwa 15 % befüllt.



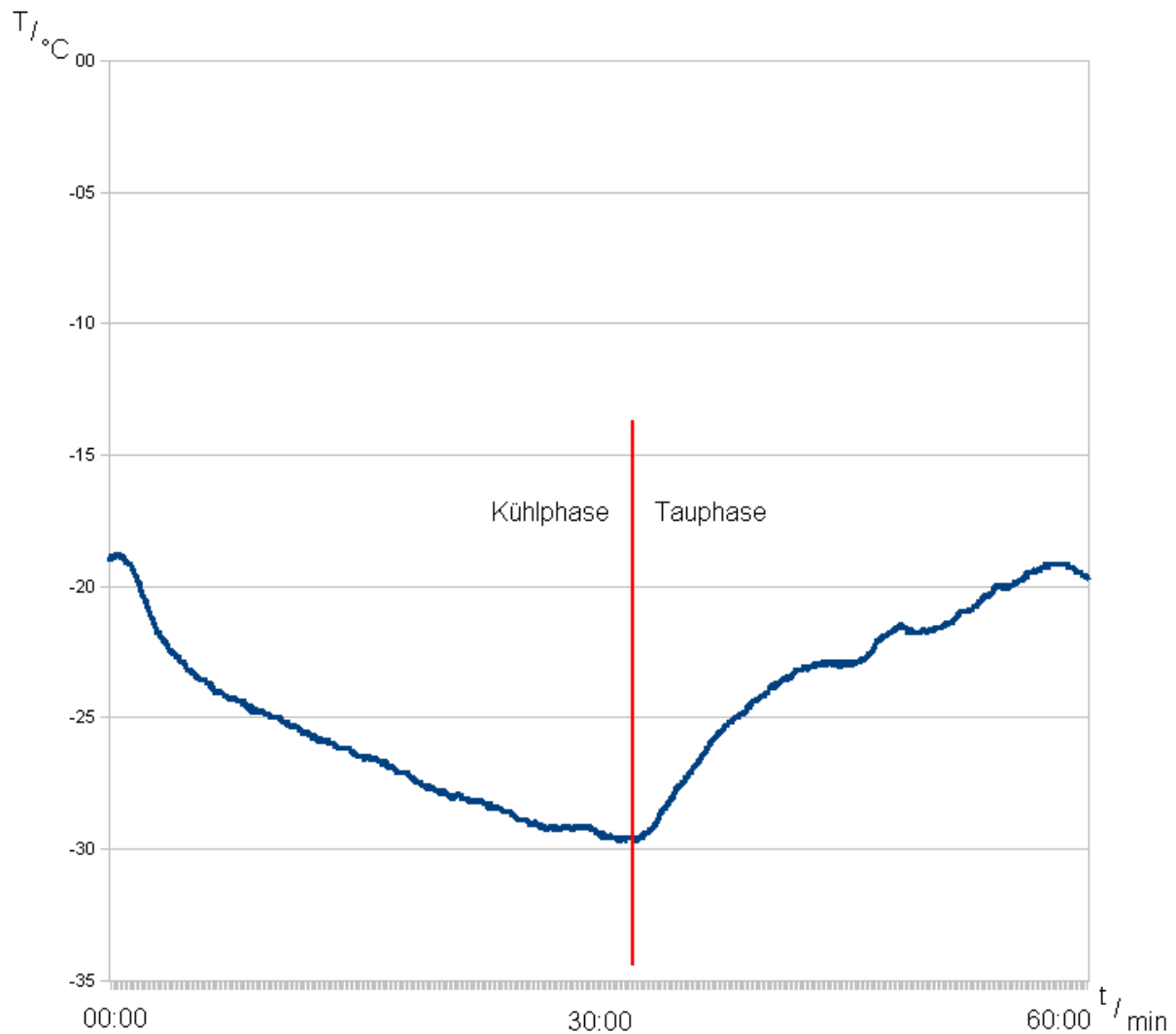
**Bild 2.2:** Innentemperatur der Gefriertruhe bei Tag



**Bild 2.3:** Innentemperatur der Gefriertruhe bei Nacht

Man kann erkennen, dass die Truhe Tagsüber nicht so gleichmäßig arbeitet (wegen des Öffnens und Schließens), sich die Tau- und Kühlphasen aber nicht merklich voneinander unterscheiden.

Als nächstes war von Interesse, wie schnell die Truhe von der normalen Temperatur (ca. -18  $^{\circ}\text{C}$ ) tief frostet (ca. -30  $^{\circ}\text{C}$ ), und von dort wieder taut.



**Bild 2.4:** Gefrieren auf  $-30\text{ °C}$  und wieder auftauen auf  $-18\text{ °C}$

Tau- und Gefrierphase haben nur unwesentlich abweichende Dauern. Dies kann aber mit der speziellen Konfiguration des Versuchsaufbaus zusammenhängen und besitzt vermutlich keine Allgemeingültigkeit.

**Erkenntnis.** Da Gefriergut nicht über  $-18\text{ °C}$  gelagert werden darf, ist es zur Bereitstellung von Regelenergie in größerem Umfang praktisch unerlässlich, die Temperatur zunächst deutlich abzusenken. Dies ist aber eine schöne Möglichkeit zur Lastspitzenverbreiterung, die mancher Orts bereits genutzt wird [2.2]. Für Kühlgut in ein engeren Temperaturbereich vorgeschrieben, weshalb die Möglichkeiten hier nicht so umfangreich scheinen.

## 8.7. Gewonnene Erkenntnisse

Durch Literaturrecherche und aus zahlreichen Interviews mit Betreibern, Produzenten und Fachleuten für Klima-, Kühl- und Gefrieranlagen ließen sich einige wichtige Erkenntnisse belastbar gewinnen.

### 1. Allgemeines

Tagsüber (während der Öffnungs- bzw. Beschickungszeiten) laufen viele Anlagen (besonders im Lebensmittelsektor) durch, bzw. haben sogar Schwierigkeiten, bei häufiger Unterbrechung der Isolation die Solltemperatur zu halten. Dies macht Lastverschiebungen zu diesen Zeiten unmöglich. Normalerweise werden solche Anlagen so dimensioniert, das sie pro 24 Stunden etwa 15 Stunden laufen, davon 70% am Tag (ca. 10,5 Stunden) und 30% in der Nacht (4,5 Stunden) [2.6]. Ein Supermarkt benötigt etwa 48 % seiner gesamten Verbrauchsenergie für Kälteanwendungen [2.12].

- **Klimaanlagen**

Anlagen zur Klimatisierung von Lager- und Büroräumen sind schlecht für das Lastmanagement geeignet, da die Toleranzen für die einzuhaltenden Temperaturen extrem klein sind, und sich nach [2.9] Gebäude überhaupt nur dann (evtl.) sinnvoll eignen, wenn sie entsprechend saniert sind, oder es sich um Neubauten handelt. Es besteht praktisch keine Möglichkeit, die Temperatur vorsorglich zu senken, um hinterher die Zeit der Erwärmung als Regelenergiegewinn zu nutzen - dies würde zwar mit Eisspeichern funktionieren, diese haben aufgrund der schlechten Energiebilanz und der hohen Anschaffungskosten praktisch keine Marktdurchdringung [2.6].

Eine potenzielle Quelle für Regelenergie ist allerdings die Luftfiltration. Die Partikeldichte kann (bzw. könnte) im Gegensatz zur Temperatur in Vorleistung stärker als normal gesenkt werden, um dann in der Folgezeit keine Energie hierfür bereit stellen zu müssen [2.2], gesetzt den Fall, das die verwendete Anlage technisch dazu imstande ist, d.h. das es Sensoren hierfür gibt (diese scheinen aber selten bis gar nicht vorhanden zu sein auch Vermerke in den Interviews).

Ein Betreiber einer großen Klimaanlage gab die zulässige Abweichung der Temperatur gerade mal mit +/- 1 °C an, da größere Abweichungen nach seinen Angaben bereits für einen merklichen Komfortverlust sorgen (Diese Angabe konnte in weiteren Interviews mehrfach bestätigt werden). Dieser speziellen Anlage fehlt ein Kältespeicher (was wohl bei den allermeisten Anlagen der Fall ist), weshalb sie praktisch überhaupt nicht zum Lastmanagement geeignet ist (siehe auch in den Interviews).

Ein Interview mit einem Krankenhaustechniker brachte die Erkenntnis, dass weder die Klimatisierung, noch die Notstromaggregate, oder der Eisspeicher (ein echter Exot, wie er betonte – in Neubauten wären Eisspeicher grundsätzlich nicht vorgesehen – der installierte Speicher ist 26 Jahre alt) aus sicherheitstechnischen Gründen in keinem Falle dem Lastmanagement dienen kann. Evtl. könnte aber die Aufrüstung von Speicherlementen für Kältetechnik gefördert werden [2.12].

Gewöhnlich laufen Klimaanlagen nicht nachts (auch nicht „stoßweise“), weshalb sie auch dann nicht zur Lastverschiebung geeignet sind (siehe auch in den Interviews).

- **Kühlanlagen**

Das Problem bei Kühlanlagen ist das Gleiche, wie bei Klimaanlage – der vom Gesetzgeber vorgeschriebene Temperaturbereich ist recht klein (max. +2 bis +7 °C, eher kleiner – siehe auch [2.5]), so dass die Menge der potenziellen positiven und negativen Regelenergie eher als sehr klein anzusehen ist. Es ist sehr fraglich, ob das Volumen von praktischem Nutzen sein kann, da Temperaturschwankungen in der Kühlung im Lebensmittelbereich (und hierfür wird der absolute Großteil (66 %) der Kühlenergie verwendet, siehe [2.2]) keine erwünschte Sache sind, da die Güter hierdurch beschädigt werden können, und an Wert und Qualität verlieren.

Ähnlich wie bei den Klimaanlage lohnen sich Eisspeicher praktisch nicht (aus den gleichen Gründen). Des Weiteren kommt hinzu, dass viele dieser Anlagen über Nacht keine (oder nur geringe) Kältekapazität besitzen, da sie außerhalb der Beschickungszeiten in der Regel leer stehen (nach [2.2] ist der absolute Großteil der Kälte einer Anlage in der eingelagerten Ware gespeichert), oder nur wenig Ware führen (z.B. Schlachthöfe, Zwischenlager, usw.) [2.6].

Gerade bei Schlachthöfen und Zwischenlagern ist es nicht möglich, den Zeitraum des „forcierten“ Herunterkühlens zeitlich zu verlagern, da die Ware bereits gekühlt angeliefert wird (Zwischenlager), oder sich der Lagerbestand dauernd ändert (Schlachthof) – siehe auch in den Interviews.

Ein weiteres Problem ergibt sich mit offenen Kühltheken oder -regalen, da diese aufgrund ihrer Bauform praktisch keine nennenswerte Kältekapazität haben. Eine „Pflicht“ zur Verschließbarkeit von sämtlichen Kühlaggregaten im Lebensmitteleinzelhandel würde hier evtl. ein gewisses Potential erzeugen. Nachtrilos aus Aluminium bringen an Regalen etwa 13 % Ersparnis, Glastüren sogar 68 % [2.12].

Eine „rechtliche Grauzone“ ergibt sich dabei bei privatem Kältebedarf, da für diesen kein starrer Vorgabenrahmen wie für gewerbliche Kunden existiert. Ist man hier bei dem Betrieb der Haushaltskühlschränke etwas großzügiger, ließe sich ein gewisses Potential erschließen [2.10]. Ob dies jedoch vom Kunden akzeptiert würde, ist unklar.

- **Gefrieranlagen**

Anders als bei Kühlgut kann bestimmtes Gefriergut theoretisch deutlich tiefer als normal abgekühlt werden (allerdings bei Weitem nicht alles – bestimmte Vitamine nehmen bei Temperaturen unter -18 °C Schaden, siehe [2.2] und [2.6]). Bestimmte Haushaltskühlgeräte erlauben mit einer Schnellfrietaste (die eigentlich für das Einbringen von relativ warmen Lebensmitteln gedacht ist) Temperaturen von bis zu -35 °C. Damit sind Gefrieranlagen theoretisch hervorragend für das Lastmanagement geeignet.

Es gibt aber zwei Probleme, die dagegen sprechen. Erstens sind viele Anlagen nicht für beliebig tiefe Temperaturen ausgelegt, bzw. altern überproportional schneller, wenn sie häufiger bei hoher (bzw. bei sich ständig ändernder) Leistung gefahren werden. Zweitens ist die elektrische Leistungsaufnahme zwar konstant, aber die effektive Kälteleistung sinkt (bis ca. Faktor 3), so dass die Laufzeiten des Kompressors bei tieferen Temperaturen deutlich ansteigen ( $\epsilon$ -Funktion) [2.6].

## 8.8. Berechnungen

Nach [2.4] wird der potenzielle (gesamte) gewerbliche Kältebedarf pro Jahr auf 194,5<sup>1</sup> GWh beziffert; dies bedeutet pro Tag eine Energie von 532,87 MWh und (gemittelt) pro Stunde eine Leistung von 22,20 MWh. Im Raum Mannheim befinden sich nach [2.4] etwa 3200 gewerbliche Kunden mit „industriellem“ Kältebedarf. Nach [2.12] sind alle Berechnungen aber mit einer nicht unerheblichen Unsicherheit belastet, da die Schwankungsbreite des Energieverbrauches selbst bei weitgehend identischen Kälteanlagen innerhalb nur einer geografischen Region breiter als die Schwankungsbreite ist, die bei Verwendung unterschiedlicher Technologien zu erwarten wäre.

- **Der Kompressorfaktor**

Mit den Zahlen aus [2.6] kann der Kompressorfaktor für Tages- und Nachtzeiten berechnet werden. Geht man von der 70/30-Verteilung aus, ergibt sich (bei Annahme von 12 Stunden Beschickungszeit und 12 Stunden Ruhezeit) für den Kompressorfaktor in erster Näherung:

$$k_i = \left\{ \begin{array}{l} 0,875 \text{ innerhalb der Beschickungszeiten} \\ 0,375 \text{ ausserhalb der Beschickungszeiten} \end{array} \right\}$$

Tagsüber werden also etwa insgesamt 373,01 MWh, und Nachts 159,86 MWh an Kälteenergie verbraucht. Pro Stunde bedeutet das tagsüber eine Leistung von ca. (d.h. im Mittel) 31,08 MWh pro Stunde und Nachts eine Leistung von ca. 13,32 MWh pro Stunde. Nach [2.12] erhöht eine um eine Stunde verlängerte Öffnungszeit / Beschickungszeit den Energieverbrauch im statistischen Mittel um etwa 4 % - diese Angabe ermöglicht es, ein Gefühl für die Belastbarkeit der erzeugten Ergebnisse zu bekommen.

Da keine weiteren Zahlen vorliegen, muss dieser Faktor für alle Gruppen als identisch angenommen werden. Für alle Gruppengewichte gilt deshalb:

$$g_j = \left\{ \begin{array}{l} 0,875 \cdot A_j \text{ innerhalb der Beschickungszeiten} \\ 0,375 \cdot A_j \text{ ausserhalb der Beschickungszeiten} \end{array} \right\}$$

Es ist zu beachten, dass für manche Gruppen auch  $A_j$  von der Tageszeit abhängig ist.

---

<sup>1</sup> Diese Zahl ist mit Vorsicht zu genießen, da diese statistisch ermittelte Zahl nur auf Daten von Kunden basieren kann, die einen Lastganzähler haben – und dies gilt i.A. nur für größere gewerbliche Gebäude [2.4].

- **Der Abschaltvektor**

Im Gegensatz zum Kompressorfaktor hängt der Anteil des Abschaltvektors am Gruppengewicht sehr von der jeweiligen Gruppe ab. Eine Studie im Rahmen des EEnergy-Projektes kam zu dem Schluss, dass eine Marktdurchdringung im privaten Sektor für Lastmanagement bei etwa 20 % liegt – man kann also zumindest hier nicht von Werten über 20 % [2.7] ausgehen (einige Fachleute [2.11] gehen sogar nur von Marktdurchdringungsquoten von 3-8 % aus, selbst wenn die Maßnahmen für den Endkunden kostenlos sind). Für den Industrie- und Logistikbereich existieren solche Studien nicht, oder sind nicht aufzutreiben.

Nach den Interviews und [2.6] müssen die  $A_j$  für folgende Gruppen als „0“ (keine Abschaltung möglich, bzw. in einem nicht-lohnenswerten Rahmen) eingeschätzt werden:

1. Schlachthöfe
2. Krankenhäuser
3. Klimaanlage ohne Eisspeicher
4. Kühlanlagen ohne Eisspeicher
5. Zwischenlager
6. Gefrieranlagen (mit redundanzlosen Leistungseigenschaften)

Aufgrund der praktisch nicht vorhandenen Marktdurchdringung mit Eisspeichern sind folgende Gruppen als so klein anzusehen, dass das  $A_j$  praktisch auch mit „0“ angenommen werden muss:

1. Klimaanlage mit Eisspeicher
2. Kühlanlagen mit Eisspeicher

Nach den Ergebnissen aus den Interviews muss davon ausgegangen werden, dass sich ausschließlich robust dimensionierte Gefrieranlagen zum Lastmanagement in spürbarer Weise nutzen lassen. Für die Modellrechnung wird hierfür zunächst der Best Case angenommen, d.h. alle diese Anlagen haben maximale Abschaltbereitschaft ( $A_j = 1$ ).

**Zwischenrechnung.** Nimmt man die Zahlen für die stündlichen Leistungen an Tag und Nacht, geht von einer Marktdurchdringung von grob 20 % aus, und unterstellt, dass diese 20 % eine 100 %-tägige Abschaltbereitschaft haben, und man ihre Geräte zumindest für eine halbe Stunde (0,5 h) abschalten könnte, dann ergibt sich ein Regelenergiepotential von etwa:

$$31,08 \text{ MWh pro Stunde } 0,2 \cdot 0,5 \text{ h} = 3,11 \text{ MWh } \quad \boxed{\text{tagsüber}} \quad \square$$

$$13,32 \text{ MWh pro Stunde } 0,2 \cdot 0,5 \text{ h} = 1,33 \text{ MWh } \quad \boxed{\text{nachts}} \quad \square$$

... was jeweils 10 % der stündlich benötigten Energie / Leistung beträgt.

Gewichtet mit dem Kompressorfaktor ergeben sich die Zahlen zu:

$$\begin{aligned} 3,11 \text{ MWh} \cdot 0,875 &= 2,721 \text{ MWh} \quad \text{tagsüber} \\ 1,33 \text{ MWh} \cdot 0,375 &= 0,498 \text{ MWh} \quad \text{nachts} \end{aligned}$$

... was jeweils 8,75 % (tagsüber) und 3,77 % (nachts) der stündlich benötigten Energie / Leistung beträgt. Diese Größenordnung ist der Abschätzung aus [2.2] ähnlich (siehe auch Kapitel „Ergebnisse anderer Modellrechnungen / Studien“), d.h. die (realistische) abschaltbare Leistung liegt nach ersten Schätzungen im **einstelligen Megawatt-Bereich** mit einem Zeithorizont von 30 Minuten bis ca. 2 Stunden.

Bei vollständiger Marktdurchdringung erscheinen in grober erster Näherung etwa 30 MW als obere Schranke für die verfügbare Regelleistung (mit den Zahlen aus [2.2] kombiniert, d.h. Industrie und Haushalte).

$$\begin{aligned} 2,721 \text{ MW} &\square 4,25 \text{ MW} = 5,971 \text{ MW} \\ 100/20 &= 5 \\ 5,971 \text{ MW} \cdot 5 &= 29,855 \text{ MW} \end{aligned}$$

Im Folgenden soll der Detaillierungsgrad dieser Prognose erhöht werden.

- **Das Gruppengewicht**

Die Gruppengewichte  $g_j$  für alle Gruppen von großzügig dimensionierten Gefrieranlagen sind demnach (d.h. optimale Abschaltbereitschaft) identisch zu:

$$g_j = \left\{ \begin{array}{l} 0,875 \quad \text{innerhalb der Beschickungszeiten} \\ 0,375 \quad \text{ausserhalb der Beschickungszeiten} \end{array} \right\}$$

**Feststellung.** Es hat sich gezeigt, dass diese Art der Berechnung nicht zu 100% sinnvoll für die Behandlung aller Gruppen ist; im Folgenden wird also stärker differenziert.

### **8.8.1. Berechnungen auf den realen Daten**

**Einteilung.** Im Folgenden Kapitel werden die einzelnen Gruppen mit ihren Eigenschaften vorgestellt. Der Detaillierungsgrad war aufgrund der Tiefe der erhobenen Daten nicht besser zu realisieren. Die vorgestellte Berechnungsform ließ sich nicht zu 100% auf den Datensatz anwenden.

Stattdessen wurde versucht, die Erkenntnisse aus der Modellbildung möglichst gut in die Operationen auf dem verfügbaren Datensatz einfließen zu lassen.

Insgesamt wurde die Verbraucher in 6 Gruppen mit jeweils ähnlichem Verhalten (unabhängig von ihrem Anteil am reinen Leistungsvolumen) eingeteilt.

**Definition.** Mit „theoretisches Potential“ ist die Leistungsmenge gemeint, die man erhält, wenn alle Systeme „brute-force“ abgeschaltet werden (d.h. 100% Marktdurchdringung und 100% Abschaltbereitschaft). Mit „technisch-wirtschaftliches Potential“ ist die Leistungsmenge gemeint, die unter Rücksichtnahme auf Verbraucherbedürfnisse und bei Installation von Speicherelementen erzielbar wäre. Mit „realisierbares Potential“ wird die (abgeschätzte) aktuell verfügbare Regelenergie bezeichnet.

Für die letzten beiden Potentiale gibt es aufgrund der Eigenschaften des Datensatzes die Abschätzungen „0,00%“, wenn keine Bereitschaft zur Abschaltung bei den Betreibern besteht (entweder aus Furcht vor Qualitätsminderungen oder Komforteinbußen, oder aus prozessinherentem Zwang), und „>0,00%“, wenn generell die Möglichkeit, und oder die tatsächliche Bereitschaft zur Bereitstellung von Regelenergie besteht.

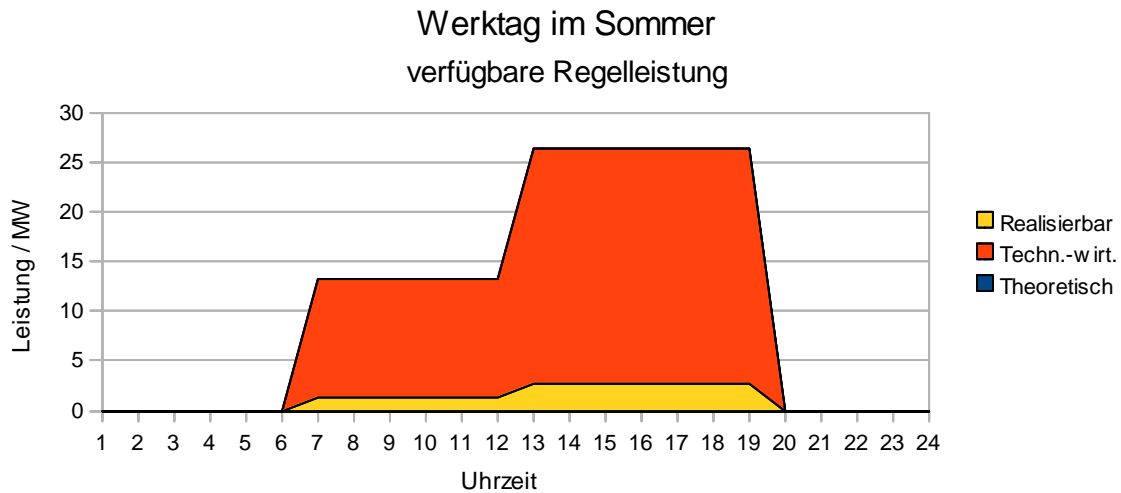
Gemeint ist in diesem Kapitel mit der Einheit „MW“ grundsätzlich die elektrische Leistung.

### 8.8.2. Einteilung in Gruppen

#### Gruppe 1: Gewerbliche Klimatisierung

Typ	Klimatisierung
Theoretisches Potential	Insgesamt 26,42 MW, davon 1,41 MW Verwaltungsgebäude 14,78 MW Gewerbliche Bürogebäude 8,87 MW Handel und Gewerbe 0,76 MW Hotels 0,60 MW Gastronomie
Überdimensionierung (bereits eingerechnet)	15,00%
Tagesauslastung	Nachts 0%, Morgens 50%, Nachmittags 100%
Wochenauslastung	Mo.-Fr. 100%, Sa.-So. 0%
Jahresauslastung	Mai – September 50% - 100%, Wintermonate 0%
Besonderheiten	Stufenlose Regelung (in der Praxis)
Abschaltquote (technisch-wirtschaftliches Potential)	Max. 26,42 MW (ausser 20:00 – 7:00 Uhr)
Abschaltquote (realisierbares Potential)	Max. 2,65 MW (ausser 20:00 – 7:00 Uhr)

Bei der gewerblichen Klimatisierung könnte bei großflächiger Förderung von Speicherelementen (bei angemessener Wirtschaftlichkeit) ein umfangreiches Potential an abschaltbarer Leistung erschlossen werden. Aktuell sind diese Maßnahmen aber von den Nutzern unerwünscht, weshalb das aktuell realisierbare Potential sehr gering geschätzt werden muss.

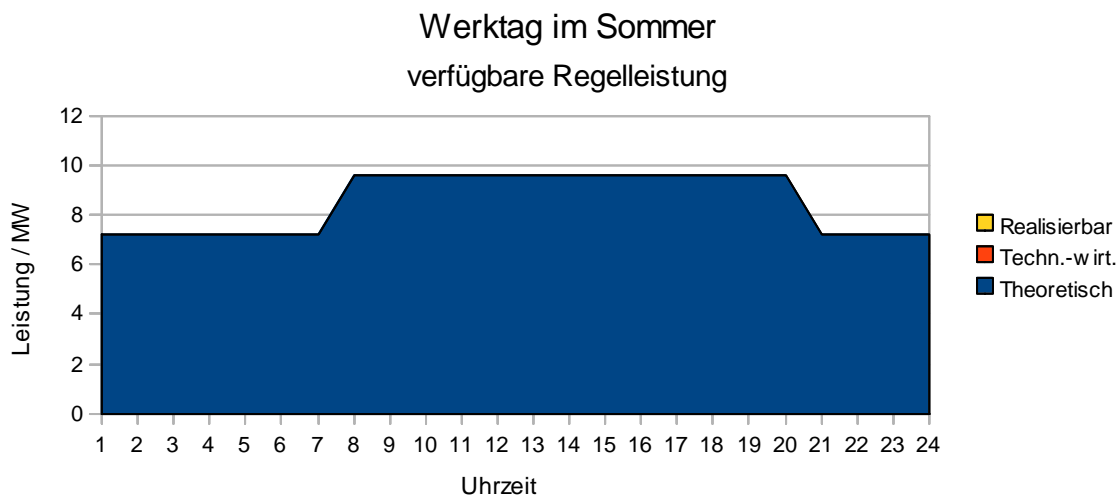


**Grafik 2.1:** Tageslastkurven (Gruppe 1)

**Gruppe 2: Industrielle Klimatisierung**

Typ	Klimatisierung
Theoretisches Potential	9,63 MW (Krankenhäuser <sup>2</sup> werden nicht betrachtet – hauptsächlich innere Lasten)
Überdimensionierung (bereits eingerechnet)	15,00%
Tagesauslastung	07:00 – 19:00 Uhr Hauptzeit 100% 19:00 – 07:00 Uhr Nebenzeit 75%
Wochenauslastung	Mo.-Fr. 100%, Sa.-So. 0% (tw. auch 100%)
Jahresauslastung	100,00% in den Produktionszeiten (praktisch ganzjährig)
Besonderheiten	Stufenlose Regelung (in der Praxis)
Abschaltquote (technisch-wirtschaftliches Potential)	0,00%
Abschaltquote (realisierbares Potential)	0,00%

Bei der industriellen Klimatisierung könnte bei großflächiger Förderung von Speicherelementen (bei angemessener Wirtschaftlichkeit) ein mäßiges Potential an abschaltbarer Leistung erschlossen werden. Aktuell sind diese Maßnahmen aber von den Nutzern unerwünscht, weshalb das aktuell realisierbare Potential zu 0,00 MW geschätzt werden muss.



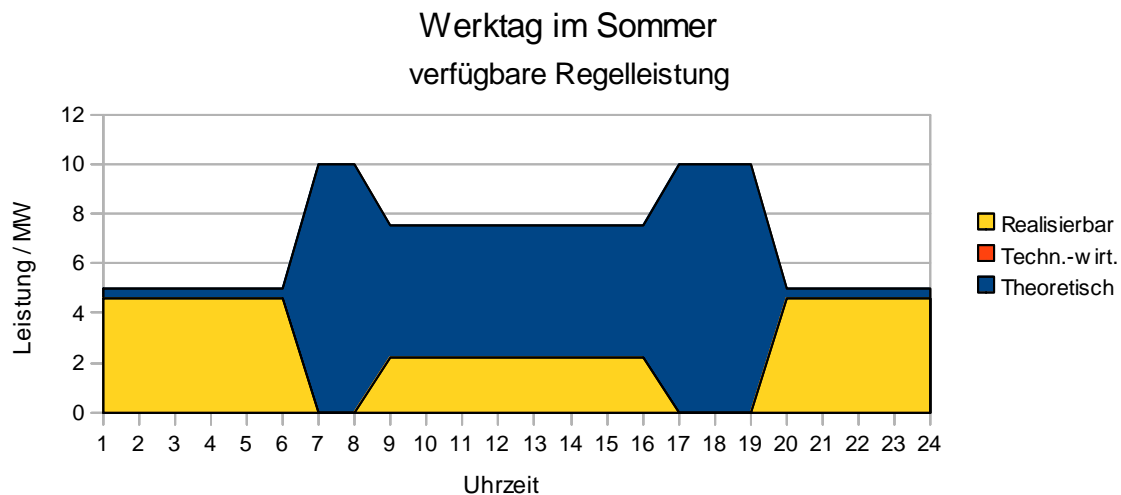
**Grafik 2.2:** Tageslastkurven (Gruppe 2)

<sup>2</sup> Krankenhäuser fallen ein wenig aus dem Lastprofil heraus, aber die in ihnen installierte Leistung macht nur einen so kleinen Teil aus, dass der hierdurch entstehende Fehler vernachlässigbar ist. Krankenhäuser sind generell nicht zur Lastverschiebung geeignet.

**Gruppe 3: Gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen im Lebensmitteleinzelhandel**

Typ	Kühlung und Tiefkühlung
Theoretisches Potential	Insgesamt 10,03 MW, davon 8,88 MW Lebensmitteleinzelhandel (Verbund) 1,15 MW Sonstige Filialen (nur NK)
Überdimensionierung	0,00%
Tagesauslastung	07:00 – 09:00 Uhr Beschickungszeit 100% 09:00 – 17:00 Uhr Geschäftszeit 75% 17:00 – 20:00 Uhr Hauptgeschäftszeit 100% 20:00 – 07:00 Uhr Nachtkühlung 50%
Wochenauslastung	Mo.-Sa. 100%, Sonntag nur Nachtkühlung (50%)
Jahresauslastung	Ganzjährig 100%
Besonderheiten	Die Abschaltquote ist bei nicht-verschließbaren Kühlmöbeln 0% (das gilt für alle NK innerhalb der Geschäftszeiten), sowie während der Beschickungs- und Hauptgeschäftszeiten.
Abschaltquote (technisch-wirtschaftliches Potential)	07:00 – 09:00 Uhr Beschickungszeit 0 MW 09:00 – 17:00 Uhr Geschäftszeit 2,23 MW 17:00 – 20:00 Uhr Hauptgeschäftszeit 0 MW 20:00 – 07:00 Uhr Nachtkühlung 4,63 MW
Abschaltquote (realisierbares Potential)	07:00 – 09:00 Uhr Beschickungszeit 0 MW 09:00 – 17:00 Uhr Geschäftszeit 2,23 MW 17:00 – 20:00 Uhr Hauptgeschäftszeit 0 MW 20:00 – 07:00 Uhr Nachtkühlung 4,63 MW

Es ist wichtig, bei dieser Gruppe zwischen Normalkühlung (NK) und Tiefkühlung zu unterscheiden, da NK-Geräte häufig offen sind (Kühlregale, offene Theken), aber TK-Geräte zum größten Teil verschließbar sind und eine gewisse nutzbare Kältekapazität besitzen.

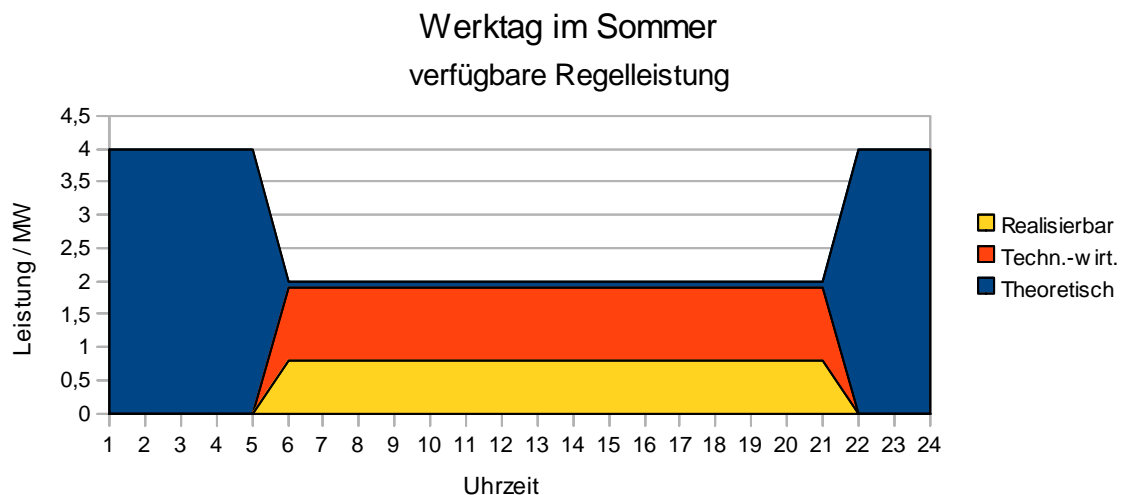


**Grafik 2.3:** Tageslastkurven (Gruppe 3)

**Gruppe 4: Gewerbliche Kühl- und Gefrieranlagen in Kühllagern**

Typ	Kühlung und Tiefkühlung
Theoretisches Potential	Insgesamt 3,98 MW <sup>3</sup> , davon 0,26 MW Schlachthöfe (nur NK) 0,53 MW Fleischverarbeitung (0,21 MW TK) 0,19 MW Bäckerei, Konditorei (0,02 MW TK) 0,26 MW Kantinen (groß, d.h ca. 1000 Port./Tag - 0,18 MW TK) 1,36 MW Gastronomie (0,58 MW TK) 1,38 MW Kühllhäuser (0,85 MW TK)
Überdimensionierung	0,00%
Tagesauslastung	22:00 – 06:00 Uhr Beschickungszeit 100% 06:00 – 22:00 Uhr Lagerung 50%
Wochenauslastung	Ganzwöchig 100%
Jahresauslastung	Mai – September 50% - 100%, Wintermonate 50%
Besonderheiten	---
Abschaltquote (technisch-wirtschaftliches Potential)	22:00 – 06:00 Uhr Beschickungszeit 0 MW 06:00 – 22:00 Uhr Lagerung 1,90 MW
Abschaltquote (realisierbares Potential)	22:00 – 06:00 Uhr Beschickungszeit 0 MW 06:00 – 22:00 Uhr Lagerung 0,80 MW

Bei dieser Gruppe muss beachtet werden, dass manche Kühllhäuser nachts, und andere tagsüber beschickt werden. Zur Vereinheitlichung im Rahmen der Modellrechnung wurden diese aber über einen Kamm geschoren, da keine quantitative Differenzierung aufgrund des Datenmaterials möglich ist.



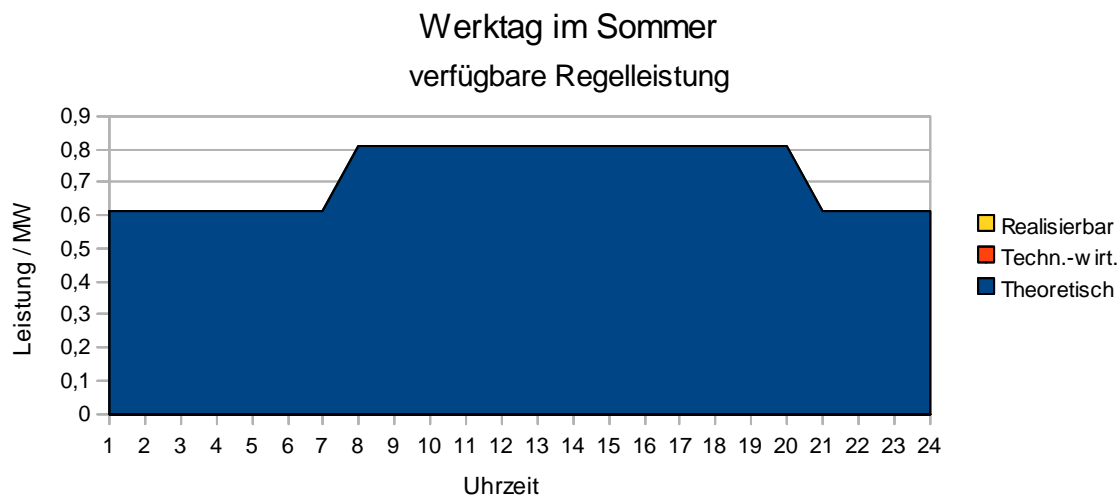
**Grafik 2.4:** Tageslastkurven (Gruppe 4)

<sup>3</sup> Produktionsstätten von Teigwaren, Ölsamen, Speisefetten und Süßwaren konnten nicht in die Berechnung mit aufgenommen werden, da hierzu (zum Zeitpunkt der Berechnungen) keine Zahlen vorliegen. Eisportanlagen sind in dieser Gruppe nicht aufgeführt, da sie nicht dem Lastprofil entsprechen – aufgrund der geringen in Mannheim installierten Leistung ist der Fehler nicht sehr groß.

**Gruppe 5: Prozesskälte in Industrieanwendungen**

Typ	Kühlung und Tiefkühlung
Theoretisches Potential	Insgesamt 0,81 MW, davon 0,81 MW Brauereien ?? MW Chemische Industrie (keine Angabe) ?? MW Pharmazie (keine Angabe)
Überdimensionierung	0,00%
Tagesauslastung	07:00 – 19:00 Uhr Hauptzeit 100% 19:00 – 07:00 Uhr Nebenzeit 75%
Wochenauslastung	Mo.-Sa. 100%, So. 0% (tw. auch Sonntags)
Jahresauslastung	Ganzjährig 100%
Besonderheiten	Kälte muss für bestimmte Prozessschritte ad hoc verfügbar sein (im Intervallbetrieb, oder durchgängig). Brauereien haben im Winter geringeren Kältebedarf.
Abschaltquote (technisch-wirtschaftliches Potential)	0,00%
Abschaltquote (realisierbares Potential)	0,00%

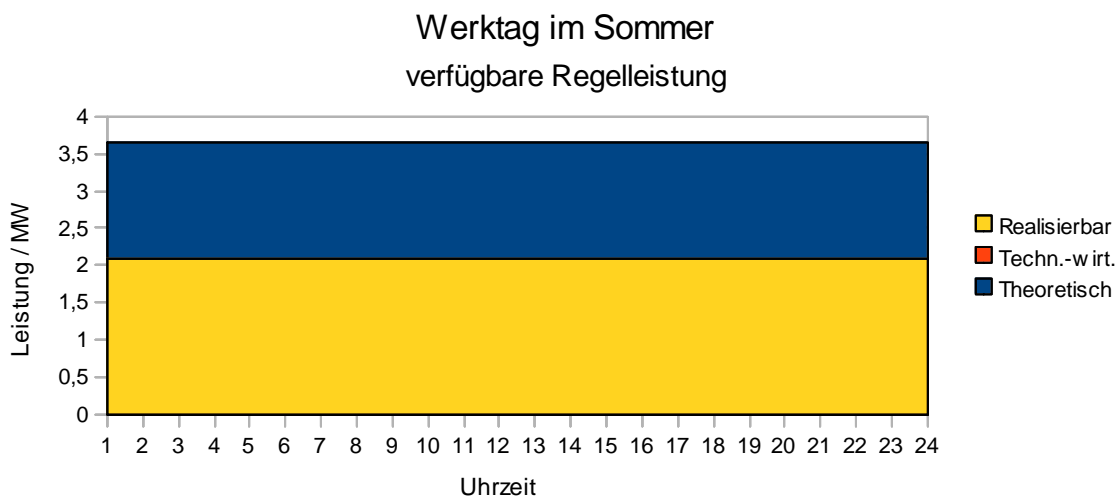
Das realisierbare Potential wird hier zu 0,00 MW geschätzt, da Prozesskälte "termingerecht" für Prozesse in vollem Umfang bereit stehen muss. Speicher sind gewöhnlich nicht vorhanden und unwirtschaftlich. Bei sensiblen Prozessen dulden die Nutzer keine Manipulationen von außen, da sonst die Produktqualität leiden könnte. Durch den Einbau von zuverlässigen Speichern könnte evtl. ein kleines Potential an Regelleistung erschlossen werden.


**Grafik 2.5:** Tageslastkurven (Gruppe 5)

**Gruppe 6: Klein- & Kleinstanlagen**

Typ	Kühlung und Tiefkühlung
Theoretisches Potential	Insgesamt 3,65 MW, davon 0,32 MW Kioske 0,02 MW Getränkeeinzelhandel 0,09 MW Eisdieleen 0,02 MW Apotheken 2,95 MW Lebensmitteleinzelhandel (dezentral) 0,08 MW Tankstellen (60% verschleißbare Anlagen) 0,17 MW Blumenhandel
Überdimensionierung	0,00%
Tagesauslastung	Ganztägig 100%
Wochenauslastung	Mo.-So. 100% (Waren müssen dauerhaft gekühlt werden)
Jahresauslastung	Ganzjährig 100%
Besonderheiten	2-Punkt-Regelung
Abschaltquote (technisch-wirtschaftliches Potential)	Max. 2,08 MW
Abschaltquote (realisierbares Potential)	Max. 2,08 MW

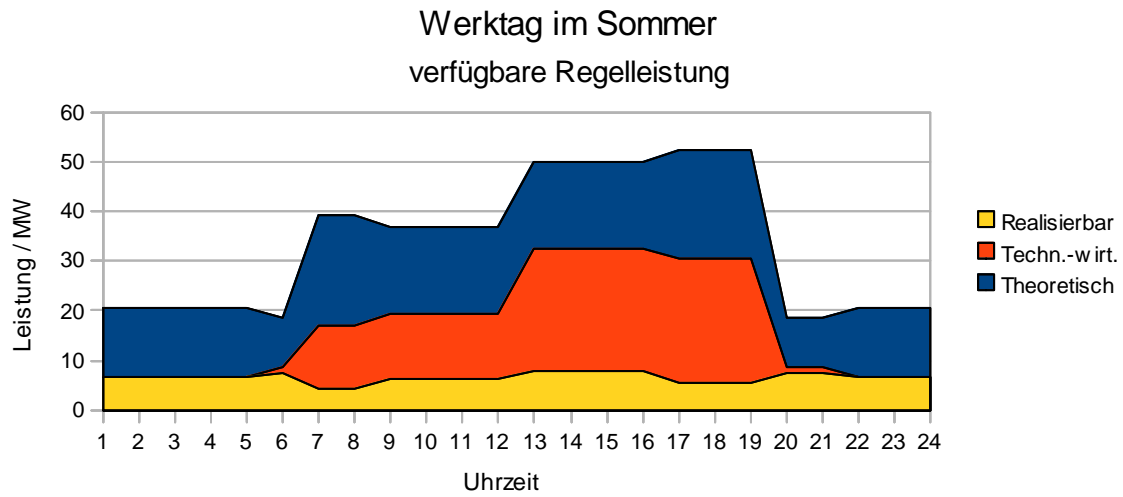
Das Potential dieser Gruppe wurde aus 2 Gründen sehr gering ( sowohl technisch-wirtschaftlich, als auch realisierbar) geschätzt. Zum einen lohnen Anstrengungen zur Nutzbarmachung sich nicht, zum anderen, weil die Einzelgeräte (die 0,48 MW bei Kiosken verteilen sich auf ca. 300 Einzelgeschäfte) für die Betreiber aufgrund der kleinen Unternehmensgröße möglichst günstig sein müssen. Hier sind vor allem steckerfertige Klein- und Kleinstgeräte im Einsatz, bei denen eine Aufrüstung mit entsprechender Speichertechnologie ein vielfaches des ursprünglichen Kaufpreises ausmachen würde. Wegen der 2-Punkt-Regelung ist das Potential evtl. noch um ca. 20% geringer (siehe „Kompressorfaktor“).



**Grafik 2.6:** Tageslastkurven (Gruppe 6)

### 8.8.3. Ergebnisbildung über alle Gruppen

Die Summation über alle Gruppen ergibt folgendes Endergebnis dieser Modellrechnung:



**Grafik 2.6:** Tageslastkurven (Gesamt)

### **8.9. Ergebnis / Bewertung dieser Modellrechnung**

Das Ergebnis dieser Modellrechnung weicht im Detaillierungsgrad stark vom ursprünglich geplanten ab, da mehrere ungünstige Faktoren eingewirkt haben. Zunächst war von MVV vorgesehen, 400 Adressen für ifeu zusammenzutragen, um dann 400 Fragebögen mit konkreten Daten zu erhalten. Auf dieser Basis war die Modellrechnung geplant.

MVV ist dieser Zusage aber nicht nachgekommen, und so wurden von ifeu persönliche Interviews durchgeführt, um an verlässliche Zahlen zu kommen. Die meisten Betreiber haben aber gar keine Daten von ihren Anlagen vorliegen, die einen ausreichenden Detaillierungsgrad besitzen, um zu belastbaren Ergebnissen zu kommen.

Trotz der Beschaffenheit des Zahlenmaterials konnte eine Prognose abgegeben werden, die sich mit denen anderer Modellrechnungen in der Größenordnung deckt, und speziell für die Modellstadt Mannheim zugeschnitten ist. In Zukunft könnte dieses Volumen an Regelleistung und -energie durch die flächendeckende Installation von Eisspeichern theoretisch deutlich angehoben werden.

Über den Zeithorizont, den die Leistung bereitgestellt werden könnte, konnte leider keine Aussage getroffen werden.

### 8.10. Ergebnisse anderer Modellrechnungen / Studien

Die Modellrechnung von Prof. Dr.-Ing. Ingo Stadler (siehe [2.2]) beziffert das in ganz Deutschland verfügbare maximale positive Regelleistungsvolumen auf folgende Werte:

- 1,119 GW in Kühlmöbeln des Lebensmitteleinzelhandels
- 1,404 GW in Gefriergeräten in Haushalten

Die in der Industrie (Prozesskälte, Lebensmittelerzeugung und Klimatisierung) verwendeten Leistungen von insgesamt 36,1 TWh wurden in der Studie nicht berücksichtigt.

**Folgerung.** Rechnet man die in der Studie angegebenen Werte für Gesamtdeutschland auf die Einwohnerzahl von Mannheim herunter, ergeben sich Regelleistungsvolumen von:

$$\frac{309 \times 10^3}{82 \times 10^6} = \frac{309}{82000} = 0,0038$$

$$1,119 \text{ GW} \times 0,00380 = 0,0043 \text{ GW} = 4,25 \text{ MW}$$

$$1,404 \text{ GW} \times 0,00380 = 0,0053 \text{ GW} = 5,33 \text{ MW}$$

Bei Annahme von 82 Mio. Deutschen und 309.000 Mannheimern. Die Höhe dieser Energiemengen erscheint nach den durchgeführten Befragungen durch ifeu deutlich zu hoch eingeschätzt. Wenn man sich das Ergebnis prozentual am Gesamtbedarf ansieht, wirken die Zahlen sehr klein.

$$\frac{3,94 \times 10^{12} \text{ kWh/a}}{365 \text{ d/a}} = 10,79 \times 10^9 \text{ kWh/d} \quad \square \text{ gesamte BRD, 1999} \square$$

$$10,79 \times 10^9 \text{ kWh/d} \cdot 0,00380 = 41,02 \times 10^6 \text{ kWh/d} \quad \square \text{ Mannheim} \square$$

$$\frac{41,02 \times 10^6 \text{ kWh/d}}{24 \text{ h/d}} = 1700 \text{ MW}$$

Der Anteil an verfügbarer Regelleistung in Kühlmöbeln des Lebensmitteleinzelhandels und der Gefriergeräte in Haushalten macht zusammen also gerade mal 0,58 % des Gesamtleistungsbedarfs aus.

### 8.11. Die verwendeten Formelzeichen

$U$	Spannung
$t$	Zeit
$e^x$	e-Funktion
$\tau$	Zeitkonstante eines Schwingkreises
$\ln$	Logarithmus Naturalis
$R$	Widerstand
$C$	Kapazität
$P$	Leistung
$W$	Energie
$T$	Temperatur
$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen
$S$	definierter Leistungswert
$G$	Gruppe
$A$	Gewicht für ein Reihenglied
$p$	Wahrscheinlichkeit
$E$	Erwartungswert
$V$	Varianz
$\xi$	Gewicht für ein Reihenglied
$g$	Gruppengewicht