

City Cooling - Intelligente Fernkälteversorgung Wien

O. Pol, A. Preisler, et al.

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

38/2010

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

City Cooling - Intelligente Fernkälteversorgung Wien

DI Olivier Pol, Ing. Anita Preisler,
DI (FH) Gernot Haslinger
arsenal research

DI Hans-Joachim Kast
ILF beratende Ingenieure

DI Adolf Penthor, Ing. Gerhard Kempel
Fernwärme Wien

Wien, August 2008

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT. Sie wurde 2003 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT soll durch Forschung und Technologieentwicklung die Gesamteffizienz von zukünftigen Energiesystemen deutlich verbessert und eine Basis zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energieträger geschaffen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und involvierten Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Mehrfache Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist, die Projektergebnisse – sei es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit leicht zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.ENERGIESYSTEMEderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Kurzfassung	8
Abstract	10
Einleitung.....	12
I. Fernkälte: allgemeine Einführung und Herausforderungen	12
i. Steigerung des Stromverbrauchs für Klimatisierung	12
ii. Fernkälte.....	12
iii. Herausforderungen.....	13
II. Fallbeispiel TownTown, 3 Wiener Gemeindebezirk.....	15
III. Vorarbeiten zum Thema	16
IV. Fokus und Schwerpunkte der Arbeit	17
V. Einpassung in die Programmlinie.....	21
VI. Aufbau des Berichtes	22
Ziele des Projektes und Erreichungsgrad	23
Inhalte und Ergebnisse des Projektes.....	24
1. Methode	24
1.1. Vorgangsweise, Stand der Technik und Innovationsgehalt des Projektes	24
1.2. Verwendete Daten.....	24
1.3. Verwendete Werkzeuge	24
2. Gebäudestandards und Kühlsysteme	25
2.1. Rahmenbedingungen für die Raumkühlung	25
2.1.1. Raumtemperatur.....	25
2.1.2. Zeitlicher Kältebedarfsverlauf	25
2.1.3. Betriebstemperaturen der Kühlsysteme	27
2.1.4. Raumkühlungskonzepte und erzielbare Kühlleistungen	28
2.1.5. Spezifische Investitionskosten der verschiedenen Kühlsysteme.....	29
2.2. Gesamtkälteleistungen - spezifische Ansätze	29
2.3. TownTown - spezifische Leistungsansätze	31
3. Nutzungsdurchmischung: mögliche Kälteversorgung eines Stadtteiles über ein Lebensmittelmarkt.....	33
3.1. Kältebedarfsverlauf eines Lebensmittelmarktes	33
3.2. Mögliche Mitversorgung eines Stadtteils	35
4. Nutzung der Gebäudespeichermasse durch Bauteilaktivierung	38
4.1. Rahmenbedingungen	38
4.1.1. Gebäudekategorisierung	38
4.1.2. Wetterdaten	39
4.1.3. Interne Lasten.....	39
4.1.4. Gebäudehülle	40

4.1.5.	Bauteilaktivierung	40
4.1.6.	Sonnenschutz	41
4.2.	Kältebedarfsverläufe für die BTA.....	41
4.2.1.	Einfluss der Anlaufzeit der BTA	41
4.2.2.	Einfluss der Ladezeit der BTA	42
4.2.3.	BTA, Energieverbrauch und Komfort.....	44
4.2.4.	BTA als zeitlich verschiebbare Last.....	45
4.3.	Regelungsstrategien zum Betrieb der BTA	46
4.4.	Leistungskurven und gesamter Kälteenergiebedarf	49
5.	Zusatzkomponenten zur Reduzierung des Einsatzes von Kühltürmen.....	53
5.1.	Nutzung von Netzspeichern	54
5.1.1.	Speichertypen.....	54
5.2.	Abwärmenutzung einer Kältemaschine	55
5.2.1.	Direkte Abwärmenutzung	56
5.2.2.	Indirekte Abwärmenutzung	57
5.2.3.	Schlussfolgerungen	57
5.3.	Alternative Rückkühlung.....	58
5.3.1.	Abwasserkanalsystem	58
5.3.2.	Wasserlauf.....	58
5.3.3.	Abwärmespeicherung und Nachtkühlung	59
5.3.4.	Schlussfolgerungen	59
6.	Optimale Auslegung über Kältenetzsimulation	60
6.1.	Netzmodellierung.....	60
6.1.1.	Rohrmodellierung	60
6.1.2.	Anschlussmodellierung.....	63
6.1.3.	Kühllastmodellierung	64
6.1.4.	Pumpenmodellierung.....	65
6.2.	Netzsimulation	66
6.2.1.	Aufgabenstellung	66
6.2.2.	Netzkennlinien	67
6.2.3.	Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	69
7.	Betriebsoptimierung eines Fernkältenetzes	74
7.1.	Modelle zur Kostenoptimierung von thermischen Energieversorgungsnetzen.....	74
7.1.1.	Stand der Technik.....	74
7.1.2.	Beschreibung der Software DEMS	75
7.2.	Modellierung des Fernkältenetzes.....	77
7.2.1.	Kältemaschinen	79
7.2.2.	Rückkühlung.....	81

7.2.3.	Speicher- und Pumpen	90
7.2.4.	Verbrauchsgebundene Kosten	91
7.3.	Simulationsvarianten und Preisszenarien	92
7.4.	Simulationsergebnisse	93
7.4.1.	Einleitung: allgemeine Tendenzen.....	93
7.4.2.	Auswertung der einzelnen Simulationen	94
7.4.3.	Variantenvergleich	100
7.4.4.	Diskussion	101
	Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie	103
	Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie	103
	Einbeziehung der Zielgruppen.....	104
	Umsetzungspotenzial	104
	Verbreitungspotenzial	104
	Realisierungspotenzial	105
	Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen	106
	Gewonnene Erkenntnisse	106
	Weiterarbeit des Projektteams und der Zielgruppen	107
	Ausblick und Empfehlungen.....	107
	Chancen / Schwierigkeiten / Risiken bei der Umsetzung.....	107
	Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	108
	Danksagung	108
	Literatur-, Abbildung- und Tabellensverzeichnisse	109
	Literaturverzeichnis.....	109
	Abbildungsverzeichnis	113
	Tabellenverzeichnis	116

Kurzfassung

Ausgangssituation und Motivation

Die derzeit vorwiegend zur Gebäudekühlung eingesetzten Kompressionskältemaschinen weisen einen hohen Strombedarf auf. Eine Alternative dazu bieten mit Wärme angetriebene Absorptionskältemaschinen, welche aus energetischer und ökologischer Sicht große Vorteile mit sich bringen, vor allem wenn Abwärme aus thermischen Kraftwerken vorhanden ist, und als Antriebsenergie genutzt werden kann. Diese Kältemaschinen können entweder direkt bei den Gebäuden errichtet und betrieben werden (dezentrale Kälteversorgung), oder mehrere Objekte über ein Fernkältenetz versorgen (zentrale Kälteversorgung).

Bei der U-Bahnstation Erdberg in Wien entsteht der mit Fernwärme versorgte Bürogebäudekomplex TownTown. Aufgrund der Bebauungsdichte und des hohen Kühlbedarfs ist parallel zum Fernwärmenetz ein Fernkältenetz gebaut. Um als nachhaltiges Kühlkonzept gesehen werden zu können, soll aber die Fernkälte bestimmte Anforderungen erfüllen, die anhand dieses ersten Wiener Fernkältenetzes analysiert werden. Die Merkmale einer intelligenten Fernkälteübergabe werden hier in einer strukturierten Weise zusammengefasst.

Inhalte und Zielsetzungen

In einem ersten Schritt werden Kühlsysteme moderner Bürogebäude, sowie die geforderten technischen Rahmenbedingungen für die Fernkälteübergabe erhoben. Darüber hinaus wird eine methodische Vorgangsweise entwickelt und verfolgt, auf deren Basis eine Strategie zur Gestaltung einer intelligenten Fernkälteübergabe entwickelt wird. Bei der Evaluierung der energetischen und ökologischen Leistung der Fernkälte spielen die Auslegungs- und Betriebsparameter von Kühltürmen eine entscheidende Rolle. Es wird daher sukzessiv auf die verschiedenen Möglichkeiten eingegangen, die die Reduzierung der über Kühltürme abzuführenden Wärmemenge ermöglichen. Die Möglichkeiten der Optimierung der Gebäudeauswahl, der Nutzung von thermisch aktivierten Bauteilen (Bauteilaktivierung) und Netzspeichern, der Abwärmenutzung und der alternativen Wärmeabfuhr sowie der ökonomischen Optimierung der Netzauslegung und des Netzbetriebs werden am Fallbeispiel TownTown untersucht und unter technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekten bewertet.

Die Ziele des Projektes sind:

- Definition einer intelligenten Fernkälteübergabe unter der Berücksichtigung alternativer Rückkühlkonzepte zur Gestaltung eines effizienten Fernkältenetzes am Fallbeispiel TownTown.
- Definition von flexiblen Fernkälteübergabekonzepten für unterschiedliche Komfortstufen, Kühlsysteme in den Gebäuden und Nutzungen.
- Übertragbarkeit der entwickelten Fernkälteübergabekonzepte, sowie der Konzepte zur alternativen Rückkühlung auf zukünftige Fernkältenetze in Österreich.

Methodische Vorgehensweise

Aufgrund des breiten Untersuchungsfeldes ist der Bericht auf einer umfangreichen Literaturrecherche aufgebaut. Für die Aspekte, die in anderen Studien schon vertieft untersucht wurden, werden hier die relevanten Ergebnisse zusammengefasst und es wird auf die entsprechenden Arbeiten verwiesen. Die projektspezifischen Beiträge sind mit den folgenden Modellierungs- und Simulationsprogrammen erarbeitet worden:

- Berechnung von Kältebedarfsverläufen mittels thermischer dynamischer Gebäude- und Anlagensimulation [TRNSYS]

- Bewertung der Auswirkung der Variation verschiedener Auslegungsparameter in einem Fernkältenetz mittels thermodynamischer Anlagensimulation [DYMOLA]
- Betriebsoptimierung eines Fernkältenetzes zur Reduzierung der betriebsgebundenen Kosten mittels DEMS [DEMS]

Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden um eine methodische Vorgehensweise strukturiert, die zur Gestaltung einer Fernkältenetzversorgung empfohlen wird.

Es wurden Kennzahlen als spezifische Ansätze für die Planung eines Kühlsystems hinsichtlich einer Anbindung an die Fernkälte vorgeschlagen, sowie verschiedene Betriebsstrategien der Bauteilaktivierung in Hinsicht auf Komfortverhältnisse, Kälteenergiebedarf und Kältebedarfsverläufe evaluiert. Es wurde dann die Wirtschaftlichkeit verschiedener Netzauslegungsvarianten sowie Betriebsstrategien des Fernkältenetzes bewertet.

Parallel dazu wurden im Rahmen dieses Projektes Konzepte und Methoden zu spezifischen Fragestellungen erarbeitet und vorgeschlagen. Dies betrifft vor allem die Vergleichbarkeit zwischen Bauteilaktivierung und konventionellen Luftkühlsystemen und die Möglichkeiten der Abwärmenutzung aus Kältemaschinen.

Abstract

Initial situation and motivation

Compression chillers commonly used to cool down buildings are responsible for a high electricity demand. An alternative solution consists in using thermally driven absorption chillers which have significant energetic and ecological advantages, in particular when waste heat generated in thermal power plants is available and can be used to operate the chillers. These chillers can be installed and operated at every single building (decentralised cooling supply) or can supply several buildings through a district cooling network (centralised cooling supply).

The commercial building complex TownTown is being built at the underground station Erdberg in Vienna and is provided with district heating. Because of the housing density and the high cooling demand a district cooling grid network is built in parallel with the district heating network. However, in order to be considered as a sustainable cooling concept, district cooling has to comply with particular requirements which are analysed at the example of this first district cooling network in Vienna. The characteristic features of an intelligent district cooling supply are summarised here in a structured way.

Contents and objectives

In a first step the cooling technologies of modern office buildings and the required technical framework for a district cooling application are collected. A methodical procedure is then developed and applied as a basis of a strategy to design an intelligent district cooling application. The design and operation characteristics of cooling towers play a major role in the assessment of the energy and ecological performance of district cooling. Therefore the different possibilities of reducing the amount of rejected energy in cooling towers are analysed here. The possibilities of optimising the building mix, the use of thermally activated construction elements (TABS) and storage units, the use of rejected heat as well as the economic optimisation of the network design and operation are analysed on the example of TownTown and are evaluated under technical, economical and ecological aspects.

The targets of the project are:

- Definition of an intelligent district cooling application considering alternative heat rejection concepts for the design of energy efficient district cooling network at the example of TownTown.
- Definition of flexible district cooling applications for different comfort levels, cooling systems and cooling use.
- Replicability of the developed district cooling applications and the concepts for alternative heat rejection in future district cooling networks in Austria.

Methodology

Because of the broad field of analysis, the report is based on a comprehensive literature research. For all aspects which are analysed in other studies, the main results are summarised here and the reference to the relevant work is given. The project specific contributions have been developed by using the following modelling and simulation software:

- Calculation of cooling demand profiles using transient building and system simulation [TRNSYS]
- Evaluation of the effect of variation of different design parameters of a district cooling network using thermodynamic plant simulation [DYMOLA]

- Optimisation of district cooling network operation to reduce the operation costs with DEMS [DEMS]

Results

The results are structured around a methodological procedure which is recommended for the design of a district cooling concept.

Indexes are proposed to be used in specific approaches to design cooling systems in combination with district cooling and different operational strategies for the TABS are evaluated under comfort aspects, cooling energy use and cooling energy load profiles. The economic feasibility of different grid design scenarios and operational strategies of the district cooling are assessed.

In parallel, concepts and methods are elaborated and proposed for different issues. In particular the comparability between TABS and conventional air cooling units is being analysed and possible concepts for using heat rejected from chillers are proposed.

Einleitung

I. Fernkälte: allgemeine Einführung und Herausforderungen

i. Steigerung des Stromverbrauchs für Klimatisierung

Die hohen internen Wärmelasten in Büroräumen sowie die allgemeine Tendenz in den letzten Jahren, die Fassaden von Bürogebäuden mit hohem Glasanteil zu gestalten, führen in den Sommermonaten zu einer verstärkten Erwärmung von Büroflächen. Dementsprechend steigt der Wunsch nach einem gekühlten Arbeitsplatz. In [Blümel, 2005] wurde eine Erhöhung des Stromverbrauchs in einem Bereich von 50% bis zu 100% in einer Auswahl von 15 bestehenden österreichischen Bürogebäuden zwischen den Jahren 1992 bis 2002 festgestellt. In diesen Bürogebäuden machen die Solareinträge ca. 50% und die EDV-Ausstattung ca. 20% der gesamten Kühllast aus. Konventionelle Klimaanlage sind heutzutage beinahe überall zu erwerben und wurden in den letzten Jahren, bedingt durch die heißen Sommermonate, mit steigendem Absatz verkauft.

Aufgrund eines Mangels an nach Sektoren und Anwendungen aufgeteilten statistischen Daten ist die resultierende Steigerung des Stromverbrauchs schwer quantifizierbar. In [Constantinescu, 2006 (A)] wird trotzdem prognostiziert, dass mit einem Sättigungsgrad von 60% im Dienstleistungsbereich und 40% im Wohnbereich¹ zwischen 2000 und 2018 eine Vervierfachung der generierten Kühlenergie bis auf 660 TWh_{Kühlenergie}/yr in den 32 untersuchten europäischen Ländern² (500 TWh_{Kühlenergie}/yr für die EU15) zu erwarten ist. Wenn 100% aller gebauten Objekte klimatisiert wären, würde es einem Bedarf von ca. 1 400 TWh_{Kühlenergie} entsprechen. Die ältere aber genauere Untersuchung von [Adnot, 2003], wo eine detaillierte Untergliederung zwischen Kühlsystemen geführt wird, prognostiziert im Jahr 2020 einen Strombedarf für die Kühlung von 115 TWh_{Strom}/yr für die EU15, was ca. 300 TWh_{Kühlenergie}/yr entspricht. Obwohl in Österreich noch keine flächendeckenden statistischen Auswertungen vorliegen, ist auch schon ein enormer Anstieg des Stromverbrauchs festzustellen, was zu einer zusätzlichen Belastung der Stromnetze führt. Für Österreich rechnet [Haas, 2007] eine Erhöhung des Stromverbrauchs von 365 GWh_{Strom}/yr im Jahr 2005 auf 1 875 GWh_{Strom}/yr im Jahr 2030.

Durch eine sorgfältige energetische Gebäudeoptimierung können einige Einflussfaktoren beseitigt werden. Durch den Einsatz von geeigneten Verglasungen und Verschattungselementen können externe Wärmelasten reduziert werden. Weiters können interne Wärmelasten zum Beispiel durch eine vermehrte Tageslichtnutzung reduziert werden. Damit sind Kühlenergiebedarfsreduktionen von 70% und mehr möglich [Blümel, 2005]. Der restliche Kühlbedarf sollte durch nachhaltige und umweltschonende Technologien gedeckt werden.

ii. Fernkälte

Im Fall von dicht bebauten Bürogebäudekomplexen kann durch die Errichtung von Kältenetzen und unter bestimmten Bedingungen eine ökologische und ökonomisch günstige Kühlung von Bürogebäuden erreicht werden. In zentral gelegten Kälteanlagen wird

¹ Vergleichswert in den USA [Constantinescu, 2006 (A)]: 73% im Dienstleistungsbereich bzw. 70% im Wohnbereich

² EU32 = EU15 + NMS10 (new member states) + ACC4 (accession countries) + EFTA (Island, Norwegen und Schweiz)

Kaltwasser produziert, über wärmege­däm­mte Rohrleitun­gen an die Ver­brau­cher ge­leitet, wo die „Kälte“ dem Ver­brau­cher ab­ge­ge­ben wird und zur Kühlung von Bürogebäuden zur Ver­fü­gung steht.

Mit ca. 100 Anlagen in 14 europäi­schen Län­dern³ hat die Fern­kälte einen Anteil von ca. 1-2% am ge­samten Kühlener­giemarkt [Constantinescu, 2007]. Laut [Constantinescu, 2007] wird die größte Kühlener­giemenge aus Fern­kälte unter diesen 14 Län­dern in Frank­reich mit über 1000 GWh bezogen. Mit über 650 GWh liegt Schweden an der zweiten Stelle, wobei zwischen den Jahren 2003 und 2005 einen Zu­wachs von ca. 5% fest­ge­stellt wurde. In [Constantinescu, 2006 (B)] wird prä­sen­tiert, wie die Fern­kälte einen Marktanteil von 25% bis zum Jahr 2020 ge­win­nen kann.

In Öster­reich wurde das erste Kälte­netz im Jahr 1993 in Linz mit einer Netz­länge von ca. 1,3 km und einem An­schlusswert von 4,3 MW errichtet [Linz AG, 2008]. Das in diesem Pro­jekt un­ter­suchte Fern­kälte­netz im 3. Wiener Be­zirk (TownTown) ist daher das zweite Netz in Öster­reich. Die Fern­wärme Wien ar­bei­tet schon an der Planung weite­rer Netze [Fern­wärme Wien, 2008].

Aufgrund der Tat­sache, dass noch ziem­lich we­nige Anlagen in Europa ge­baut sind, gibt es noch we­nige Studien über die opti­malen Ein­satz­be­dingun­gen eines Fern­kälte­netzes. Wie bei der Fern­wärme spielt die Netz­be­legung (in­stallierte Kälte­leistung pro Laufmeter Fern­kälte­leitung) sowie die „Kälte­be­legung“ (ge­lieferte Kälte­energie pro Laufmeter Kälte­leitung) eine ent­scheidende Rolle. Laut [Constantinescu, 2006 (A)] liegt die Netz­be­legung von allen re­ali­sierten Kälte­netzen in Europa über 0,5 kW/m, was aber einen eher niedrigen Wert dar­stellt. Werte über die mini­male Kälte­be­legung sind aber noch nicht ge­geben. Eine aus­führ­lichere Analyse der re­ali­sierten Anlagen sollte durch­ge­führt werden, um Aus­wertun­gen zu diesen Kenn­zahlen zu be­kom­men.

iii. Herausforderungen

Die für die Er­zeu­gung des Kalt­wassers not­wen­digen Kälte­ma­schinen können ent­weder thermisch (Ab­sor­ption oder Adsorption) oder elek­trisch (Kom­pres­sion) an­ge­trieben werden. Thermisch an­ge­triebene Ab­sor­ptions­kälte­ma­schinen (AKM) können u. a. durch die an­fallende Ab­wärme von thermischen Kraft­wer­ken be­trieben werden, wo­durch im Ge­gen­satz zu elek­trisch be­triebenen Kom­pres­sions­kälte­ma­schinen (KKM) unter be­stimmten Be­dingun­gen geringere Kosten für die An­triebs­energie be­nö­tigt werden. Beiden Systemen liegen je­doch zu Grunde, dass die im Kon­den­sa­tor an­fallende Ab­wärme (in AKM auch im Ab­sorber) ab­ge­führt werden muss.

Zur Rück­kühlung der Kälte­ma­schinen kommen in den meisten Fäl­len Nass-, Trocken oder Hybrid­kühl­türme zum Ein­satz. Um die hohen Rück­kühl­men­gen be­wältigen zu können, müssen diese Kühl­türme vor allem bei der Rück­kühlung von AKM relativ groß aus­ge­legt werden und be­nö­tigen daher einen hohen Platz­be­darf. Aufgrund des hohen Wasser- und Strom­ver­brauchs ist deren Be­trieb auch sehr kosten­in­ten­siv. Die Aus­legung und der Be­trieb von Kühl­türmen sind daher bei der Evaluierung der ener­getischen und öko­logischen Leistung der Fern­kälte im Ver­gleich mit de­zen­tralen Klima­anlagen aus­schlag­ge­bend. Des­wegen soll das Ziel einer opti­malen Fern­kälte­netz­aus­legung sein, die Rück­kühl­men­gen sowie die Leistung der not­wen­digen Kühl­türme zu re­du­zieren.

³ Dänemark, Deutschland, Frank­reich, Finnland, Italien, Nieder­lan­den, Norwegen, Öster­reich, Portugal, Schweden, Schweiz, Slowenien, Spanien, Ungarn

Projektziel:

Das ursprüngliche Ziel des Projektes war die Entwicklung einer „intelligenten“ Fernkälteübergabe und alternativer Rückkühlkonzepte. „Intelligent“ ist so zu verstehen, dass die Fernkälte energetisch und ökologisch gesehen eine bessere Leistung als anderen Kühlsystemen aufweist.

Nichtziel:

Es war kein Ziel des Projektes, die Rahmenbedingungen zu quantifizieren, unter denen die Fernkälte energetisch und ökologisch gesehen eine bessere Leistung als anderen Kühlsystemen aufweist. Dies kann aber den Schwerpunkt von auf diesem Projekt aufbauenden zukünftigen Arbeiten sein.

II. Fallbeispiel TownTown, 3 Wiener Gemeindebezirk

Bei der U-Bahnstation Erdberg entsteht der Betriebsgebäudekomplex TownTown, wo bereits im Sommer 2007 die ersten Bürogebäude bezogen wurden. Aufgrund der Bebauungsdichte und des hohen Klimatisierungsbedarfs wurde im Vorfeld entschieden, das Gebiet sowohl mit Fernwärme als auch mit Fernkälte zu versorgen.

Fernwärme Wien übernimmt die Kälteversorgung als eine zusätzliche Dienstleistung und es werden mit Fernwärme angetriebene Absorptionskältemaschinen an einem zentralen Standort betrieben, um einen Teil der Kühlenergieversorgung zu gewährleisten. Das Kaltwasser wird in ein Kältenetz eingespeist und versorgt damit die angeschlossenen Bürogebäude (siehe Abbildung 1).

Die Gebäude werden in aufeinander folgenden Baustufen errichtet und das Netz entsprechend der Realisierung der Baustufen erweitert: zusätzliche notwendige Kaltwassersätze werden hierfür in Zukunft an dem zentralen Standort in das Netz eingebunden.

Der Stadtteil TownTown lässt sich als Multifunktionales Energiezentrum bezeichnen, da die Energieversorgung um die Kältebereitstellung erweitert wird. Als Teil einer großen Stadt stellt es aber kein geschlossenes System dar und muss daher immer im urbanen Zusammenhang bezüglich bestehender Bebauung, Flächenverfügbarkeit, Lärmschutz, Logistik usw. betrachtet werden. In Abbildung 2 bis Abbildung 6 ist der Stand des Baufortschrittes mit Datum 15.03.2007 zu sehen.

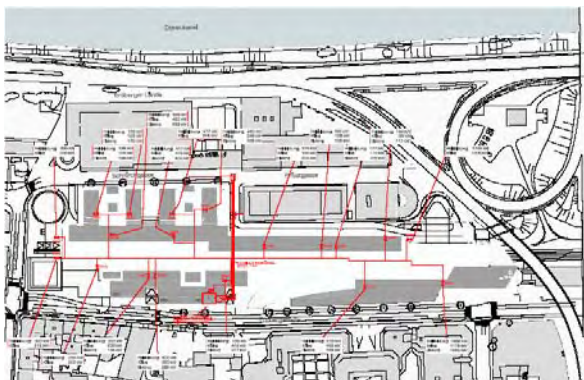


Abbildung 1: Fernkältenetz im Stadtentwicklungsgebiet TownTown



Abbildung 2: Bürogebäude TownTown mit Fernkältezentrale im Keller (CB05)

Während der ersten Baustufe mit Errichtungszeitraum 2007/2008 wurde eine Kälteleistung von ca. 4-5 MW angeschlossen. Diese Leistung wird hauptsächlich mittels Absorptionskältemaschinen mit derzeit ca. 2 x 2,2 MW Kälteleistung (siehe Abbildung 3) gedeckt, während die Spitzenlasten über Kompressionstechnik mit ca. 900 kW installierter Kälteleistung gedeckt werden (siehe Abbildung 4).



**Abbildung 3: Fernkältezentrale TownTown:
Absorptionskältemaschinen**



**Abbildung 4: Fernkältezentrale TownTown:
Kompressionskältemaschine**

Fernwärme Wien bietet unterschiedliche Komfortstufen an, die mit entsprechenden Kälteleistungen assoziiert sind. Wenn alle derzeit geplanten 19 Objekte mit der höchsten Komfortstufe versorgt werden, wird die angeschlossene Kälteleistung bei vollendetem Netz bei 8 MW liegen.

Die Rückkühlung erfolgt derzeit über einen Hybridkühler mit ca. 1,1 MW Rückkühlleistung (siehe Abbildung 5) und zwei offenen nassen Rückkühlern zu je ca. 5,5 MW Rückkühlleistung (siehe Abbildung 6).



**Abbildung 5: Fernkältezentrale TownTown:
Hybridrückkühler**



**Abbildung 6: Fernkältezentrale TownTown:
Offener Rückkühler**

III. Vorarbeiten zum Thema

Die in der Einführung erwähnten Studien und Berichte über Fernkälte [Constantinescu, 2006 (A) und (B)] und [Constantinescu, 2007] stellen hauptsächlich erste statistische Auswertungen über realisierte Anlagen sowie Hinweise über das Marktpotenzial der Fernkälte dar. Neben diesen Studien sind weitere Publikationen vor allem seit Ende der 90er Jahren erschienen, die verschiedenen Aspekte der Fernkälte behandeln.

Ein Handbuch über Fernkälte [Delbès, 1999] wurde bereits in der zweiten Auflage im Jahr 1999 veröffentlicht. Dieses Handbuch fasst alle gewonnenen Grundkenntnisse zum Thema Fernkälte seit den 80er Jahren zusammen. Das Handbuch basiert auf eine Beschreibung der einzelnen Komponenten eines Fernkältenetzes (Kühltechnologien und deren Integration, Speicherung, Verteilung und Kälteübergabe) und präsentiert die allgemeine Vor- und

Nachteile der verschiedenen Technologien und Systemen. Über die Optimierung des Gesamtsystems und die verfügbaren Rechenmodelle werden aber nur wenige allgemeine Informationen gegeben. Dabei wird auch ein Überblick über weltweit realisierte Anlagen in der Form von „case studies“ vermittelt.

Im Rahmen der IEA Task District Heating and Cooling [IEA-DHC, 2008] wurden verschiedene thematische Berichte verfasst. In [Kivistö, 1999] wird vor allem auf die Anknüpfung mit Kraftwärmekopplung und auf die Antriebsmöglichkeit von Absorptionskältemaschinen mit Fernwärme eingegangen.

In [Skagestad, 2002] wird der Fokus auf die Übergabestationen gesetzt. Die Publikation ist als Handbuch konzipiert und dafür sind vor allem Hinweise und Empfehlungen zur Auslegung der einzelnen Komponenten einer Fernkälteübergabestation formuliert. Dabei wird die Kompatibilität verschiedener Kühlsysteme in den Gebäuden in Verbindung mit Fernkälte evaluiert. Es wird vor allem auf die Maximierung der Rücklauftemperatur und der Notwendigkeit von drehzahlgeregelten Pumpen in Kombination mit Volumenstromregelung eingegangen.

Weitere Berichte aus [IEA-DHC, 2008] haben als Schwerpunkt die thermische Speicherung in Fernwärme und –Kältesystemen.

Einen interessanten Ansatz für die Evaluierung der Effizienz eines Fernkältenetzes im Vergleich mit einer dezentralen Lösung ist in [Shimoda, 2008] zu finden. Es werden dabei anhand eines konkreten Fallbeispiels die verschiedenen Einflussparameter auf die Effizienz des Fernkältenetzes in getrennter Weise ausgewertet. Die Tatsache, dass ein Fernkältenetz die Versorgung verschiedener Gebäude in einem dichten Gebiet (das in [Shimoda, 2008] so genannte „concentration effect“) gewährleistet, wird als wichtigster Einflussparameter bestätigt. Die Auslastung der Kältemaschinen (das in [Shimoda, 2008] so genannte „grade of operation“) wird als zweiter Parameter eingestuft.

IV. Fokus und Schwerpunkte der Arbeit

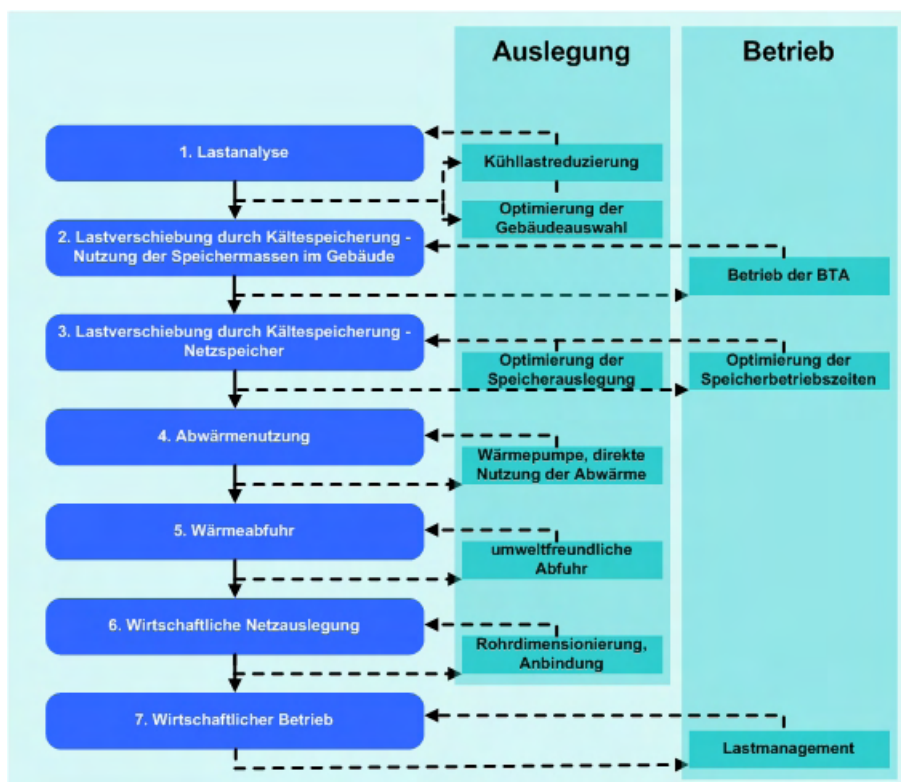


Abbildung 7: Ablaufdiagramm zur Vorgehensweise einer energetischen Kältenetzoptimierung

Um sich klar von den vorhandenen Handbüchern abzugrenzen hat sich das Projektteam als Ziel gesetzt, ein Konzept für eine intelligente Fernkälteübergabe zu präsentieren, in dem auf das energetische Optimierungspotenzial über allen Auslegungs- und Betriebsphasen eines Fernkältenetzes eingegangen wird.

Das Ablaufdiagramm in Abbildung 7 zeigt die grundsätzliche Vorgehensweise für die energetische Optimierung eines Fernkältenetzes. Es basiert auf der Erkenntnis, dass Potenzial an energetischer Optimierung bei jedem Schritt der Planung und Umsetzung eines Fernkältenetzes besteht. Es ist aus dieser Sicht sinnvoll, dieses Potenzial bei den aufeinander folgenden Schritten auszuschöpfen, von der Suche der zu versorgenden Objekte bis hin zur Betriebsoptimierung mit Lastmanagementstrategien. Diese allgemeine Vorgehensweise bildet die Grundstruktur, auf der der ganze Bericht aufgebaut ist. Im Folgenden werden die Optimierungsmöglichkeiten bei jedem Schritt einer energetischen Kältenetzoptimierung (siehe Abbildung 7) beschrieben und die Fokussierung der Arbeit in Zusammenhang mit schon realisierten Vorarbeiten eingeleitet.

1. Lastanalyse

1A. Die Kühllastreduzierung einzelner Gebäude im Versorgungsgebiet ist die erste Voraussetzung, das Gesamtenergiekonzept eines mit Fernkälte versorgten Gebietes energetisch optimal zu gestalten. Auf diesen Punkt wird hier nicht weiter eingegangen, da diese Thematik rein mit energetischer Gebäudeoptimierung hinsichtlich Kühllastreduzierung verbunden ist. Die Methoden sind längst schon bekannt und die baulichen passiven Maßnahmen reichen von der Reduzierung der internen Wärmelasten durch Tageslichtnutzung zu den gesteuerten Sonnenschutzeinrichtungen bis hin zur Befreiung der Gebäudespeichermassen. Eine ausführliche Analyse ist in [Blümel, 2005] durchgeführt, wo die einzelnen Maßnahmen ökologisch und ökonomisch ausgewertet werden. Dieser erste Schritt garantiert, dass alle versorgten Gebäude ihre Kühllasten minimiert haben und damit wird verhindert, dass das Kältenetz für zu hohe Kühllasten dimensioniert wird. Diese Maßnahme ist völlig kostenlos für den Netzbetreiber und kann nur durch eine lokale Bauordnung umgesetzt werden, wenn der Bauherr selbst die Aufgabe nicht übernimmt. In einem zweiten Schritt soll aber das bestgeeignete Kühlsystem zur Abführung dieser Kühllast ausgewählt werden. Dafür werden in diesem Bericht Hinweise über Einsatzbereiche von Kühlsystemen in Abhängigkeiten von den baulichen Gegebenheiten gegeben:

Welche Kühltechnologien können im Vorfeld mit welchen Gebäudetypen und Gebäudestandards kombiniert werden, um die auftretenden Kühllasten und Kühlenergiebedarf effizient abdecken zu können?

Ergebnis: Richtwerte für Gebäudetechniker zur Vorauswahl und Konzeption der Gebäudekühlung durch Darstellung des derzeitigen Gebäudestandards mit den dazu möglichen Kühltechnologien.

Teil 2 des Berichtes

1B. Es soll dann auf Grund einer Lastanalyse und soweit die allgemeinen Rahmenbedingungen es zulassen die Gebäudeauswahl so vorgenommen werden, dass insgesamt geringere Lastschwankungen verursacht werden, was zu einer günstigen Auslegung der Kältemaschinen führt. Unterschiedliche Gebäudetypen mit unterschiedlichen Kühllastprofilen verfügen insgesamt über geringere Lastschwankungen, wenn sie optimal untereinander kombiniert werden. Voraussetzung dafür sind jedoch Gebäude mit möglichst unterschiedlichen und komplementären Kühllastprofilen: Hotels und Bürogebäude haben eine solche Eigenschaft. Die Möglichkeiten dieser Strategie sind in [Chow, 2004 (A)] untersucht, wo die Gleichmäßigkeit des Gesamtlastprofils im Kältenetz anhand eines Faktors zur Quantifizierung der Kühllastschwankungen evaluiert wird und die Nutzungsdurchmischung durch eine Minimierung dieses Faktors optimiert wird. Diese

Möglichkeit wie in weiterer Folge des Berichtes nicht berücksichtigt, weil die Gebäudeauswahl und die entsprechende Nutzungsdurchmischung in TownTown schon definiert sind. Im Fall eines neuen Fernkälteprojektes sollte aber dieser Ansatz verfolgt werden, um ein möglichst gleichmäßiges Gesamtkältebedarfsverlauf zu erhalten. Wenn dieser Ansatz zwar rein theoretisch funktioniert ist es aber auch klar, dass in den üblichen Projektabwicklungsverfahren die organisatorischen und städtebaulichen Bedingungen meistens besondere Anforderungen setzen. In diesem Optimierungsprozess könnten aber dafür auch andere Parameter oder nicht technischen Grenzbedingungen einfließen, um sich den realen Gegebenheiten anzupassen. Zu diesem Thema und aufbauend auf [Peritsch, 2006], wo alternative Energieversorgungskonzepte für Supermärkte untersucht werden, wird in diesem Bericht die mögliche Kälteversorgung eines Stadtteiles über eine in einem Lebensmittelmarkt lokalisierte Kältezentrale analysiert. Dafür soll vor allem untersucht werden, ob die Lastsituation dafür geeignet ist.

Wie kann die Kälteversorgung von Lebensmittelmärkten in die Kälteversorgung eines Stadtteiles eingebunden werden?

Ergebnis: Analyse der Machbarkeit eines solchen Konzeptes anhand realen Kältebedarfsverläufe von Lebensmittelmärkten

Teil 3 des Berichtes

2. Lastverschiebung durch Kältespeicherung - Nutzung der Speichermassen im Gebäude

Kühllasten in Gebäuden müssen nicht immer zur Zeit deren Auftritt abgeführt werden. Der Einsatz von Bauteilaktivierung als Speicher kann zu einer künstlichen Verschiebung der Kühllasten führen, wodurch die Auslegung der Kältemaschine günstiger ausfallen kann. Dabei werden die thermischen Speichermassen der Gebäude aktiviert und die Lasten können daher in einer späteren Zeit (z. B. nachts) aus den Gebäuden abgeführt werden. Die Bauteilaktivierung oder Betonkerntemperierung (in Englisch TABS, thermally activated building systems) kommt seit einigen Jahren immer öfters in Bürogebäuden vor und es wird weiters viel über ihre Einsatzbereiche und geeignete Regelungsstrategien geforscht [Lehmann, 2007]. Üblicherweise wird diese Technologie eher in Systemen mit niedrigen Exergieverlusten eingesetzt, wo z. B. auf Umgebungswärme oder -Kälte zurückgegriffen wird. Der Einsatz der Bauteilaktivierung kann aber auch in einem Fernkältenetz als versorgungsseitiger Speicher angedacht werden, um zu einer künstlichen Lastverschiebung zu führen. Genau diese Innovation wird im Fernkältenetz TownTown eingesetzt, und im Projekt City Cooling wird die Möglichkeit der Lastverschiebung im Vorfeld untersucht. Es werden Betriebsstrategien vorgeschlagen, die sowohl aus der Sicht des Netzes als auch der Einhaltung gewünschter Komfortbereiche optimiert sind.

Welche Optimierungsmöglichkeiten der eingesetzten Kühltechnologien gibt es zur Senkung der Kälteleistung und des Kälteenergiebedarfs?

Ergebnis: Evaluierung verschiedener Betriebsvarianten der Bauteilaktivierung in Hinsicht auf Kälteleistungs-, Kälteenergiebedarf- und Komfortaspekte

Teil 4 des Berichtes

3. Lastverschiebung durch Kältespeicherung - Netzspeicher

Die Bauteilaktivierung ist eine sehr kostengünstige integrierte Kühl- und Speichertechnologie. Im Neubau sollte diese Möglichkeit unbedingt berücksichtigt werden, bevor auf einen Netz angeschlossenen Kaltwassertankspeicher zurückgegriffen wird. Wenn aber diese Möglichkeit nicht besteht oder die im Netz auftretenden Gesamtlasten immer noch durch hohen Spitzen charakterisiert sind, kann die Auslegungsleistung der

Kältemaschinen durch den Einsatz eines Kältespeichers im Kältenetz reduziert werden. Dabei spielt bei Netzspeichern sowohl die Speicherauslegung als auch die Definition der Speicherbetriebszeiten eine wichtige Rolle. In diesem Bereich sind schon sehr umfangreiche Studien wie [Urbanek, 2006] durchgeführt worden, deswegen wurde das Thema in dem hier präsentierten Projekt absichtlich nicht neu untersucht sondern es wurden hier nur die allgemeinen Erkenntnissen zusammengefasst.

4. Abwärmenutzung

Durch Umsetzung der Schritte 1 bis 3 wird idealerweise das Minimum der Kälteleistung erreicht, was die Grundlage für die Auslegung der Kältemaschinen schafft. Die Berechnung der Rückkühlleistung ergibt sich dann aus der Auswahl und Auslegung der Kältemaschinen und kann nicht reduziert werden. Der nächste Schritt in einer nachhaltigen Energieplanung besteht dann darin, die mögliche Nutzung der zur Verfügung stehenden Abwärme auf niedrigem Temperaturniveau in einem weiteren Prozess zu untersuchen, bevor diese Abwärme an die Umgebung über Rückkühlwerke abgeführt wird.

Beim Einsatz von Absorptionskältemaschinen sind aufgrund des thermischen Antriebs und der niedrigen Arbeitszahl größere Abwärmemengen im Vergleich zu konventionellen elektrisch angetriebenen Kompressionskältemaschinen abzuführen. Die Möglichkeit der Abwärmenutzung ist nun von der Tatsache abhängig, welche nahe liegende Objekte einen Bedarf an Niedertemperaturwärme haben können. Es werden hier die verschiedenen Möglichkeiten der Abwärmenutzung beschrieben und verglichen.

5. Wärmeabfuhr

Als letzter Schritt soll die anfallende Abwärme abgeführt werden, in erster Linie nachhaltig und umweltfreundlich, mit möglichst geringem Einsatz von Kühltürmen.

Wie kann die Kälteleistung (bzw. die Rückkühlleistung) in einem Kältenetz reduziert werden? Wie kann die verbleibende Rückkühlleistung über alternative und nachhaltige Technologien abgedeckt werden?

Ergebnis: Eine breite Untersuchung von technischen Möglichkeiten, den Einsatz von Kühltürmen zur Rückkühlung von Absorptionskältemaschinen zu reduzieren

Teil 5 des Berichtes

6. Wirtschaftliche Netzauslegung

Bei gegebenen Kälteleistungsbedarfsverläufen und Trassenverlegung ist die Wirtschaftlichkeit der Kältenetzauslegung von der Rohdimensionierung, der Anschlusskonfiguration der verschiedenen Abnehmer und der Regelungsstrategie der Pumpen abhängig. Es wurden hier Sensitivitätsanalysen über diese Parameter durchgeführt, um die Wirtschaftlichkeit des Auslegungszustandes zu beurteilen.

Wie wirken sich Veränderungen von Rahmenbedingungen einer Fernkälteversorgung energische und ökonomische auf das Gesamtsystem aus?

Ergebnis: Richtwerte für Kälteversorger zur Vorauswahl und Konzeption zentraler Kälteanlagen

Teil 6 des Berichtes

7. Wirtschaftlicher Betrieb

Bei einem gegebenen Fernkältenetz mit verschiedenen Möglichkeiten der Kaltwassereinspeisung, wie es in TownTown der Fall ist, bieten sich an jedem Zeitpunkt mehrere Strategien zur Abdeckung des Kältebedarfs an. Jede Variante kann mit betriebsgebundenen Kosten hinterlegt werden, und der Betrieb des Fernkältenetzes kann dann so optimiert werden, dass die betriebsgebundenen Kosten so niedrig wie möglich gehalten werden. Der Einsatz eines Betriebsoptimierungsprozesses in einem Fernkältenetz ist noch nicht sehr verbreitet und zum ersten Mal im Rahmen des Projektes City Cooling wurde die Software DEMS [DEMS] zu diesem Zweck getestet. Es gibt bereits Studien (Henning, 2006) die sich mit der Optimierung von Prozessen in Verbindung mit Strom- und Fernwärmenetzen zusammensetzen und auch Modelle [Chow, 2004 (B)] von Fernkältenetzen. Es wird hier zuerst einen Überblick über die verschiedenen Ansätze der Struktur- und Betriebsoptimierung von Fernkältenetzen gegeben. Die optimierte Betriebsweise der verschiedenen Kaltwassersätze wurden dann mit dem Betriebsoptimierungsprogramm DEMS für das Fallbeispiel TownTown ermittelt und die entsprechenden verbrauchsgebundene Kosten ermittelt.

Welche Betriebsstrategien bewirken die geringst möglichen verbrauchsgebundenen Kosten?

Ergebnis: Aufzeigen des Energie- und Kosteneinsparpotenzials durch optimierte Betriebsstrategien

Teil 7 des Berichtes

V. Einpassung in die Programmlinie

Tabelle 1: Eigenschaften zukünftiger Energiesysteme und Situation der Fernkälte am Beispiel Wien TownTown

Eigenschaften zukünftiger Energiesysteme	Situation der Fernkälte am Beispiel Wien TownTown
Dienst- bzw. Serviceleistungen (z. B. behagliches Raumklima, mechanische Energie) werden intelligent, effizient, kostengünstig und zuverlässig zur Verfügung gestellt.	Über die Fernkälte werden den Nutzern verschiedene Komfortstufen angeboten, die verschiedenen Ausrüstungsvarianten der Kühlsysteme in den Gebäuden entsprechen. Die Fernkälte wird zu einem Preis angeboten, dass sie Konkurrenzfähig mit konventionellen Kälteversorgungssystemen ist. Die Gebäudeeigentümer bzw. die Betreiber der HLK-Systeme in den Gebäuden gliedern die Kaltwassererzeugung aus ihrem Kompetenzbereich aus, was viele Vorteile mit sich bringt (Sicherheit, Platzgewinn...).
Das Zusammenspiel der Bereitstellung und Nutzung unterschiedlicher Energieträger wird optimiert.	Die Abwärme aus den bestehenden KWK-Anlagen und den Müllverbrennungsanlagen sowie die zusätzlichen Wärmeeinspeisung aus dem neuen Biomassekraftwerk in Simmering, aus der dritten Müllverbrennungsanlage Pfaffenau und der geplanten Geothermieanlage in Aspern werden bald den reinen Wärmebedarf der an das Fernwärmenetz in Wien angeschlossenen Objekte übersteigen. Wenn diese verfügbare Wärme zum Antrieb von Absorptionskältemaschinen genutzt wird, wird der Anteil an Strombedarf zur Kühlung stark verringert.
Erneuerbare Energieträger – vorzugsweise regional verfügbar – werden zu einem möglichst hohen Anteil genutzt.	Die zum Teil aus erneuerbaren Energieträgern gewonnene Wärmeenergie wird zum Antrieb von Absorptionskältemaschinen zur Kühlung genutzt.
Hochwertige Arbeitsplätze werden geschaffen, ein hoher Anteil an Wertschöpfung bleibt in der Region.	Mit der Fernkälte erhöht sich das Leistungsportfolio der Fernwärme Wien. Es werden damit Arbeitsplätze in einem neuen Tätigkeitsbereich geschaffen.
Die eingesetzten Technologien und Lösungen erfahren hohe Akzeptanz und tragen zu einem Bewusstsein für ökoeffizientes wirtschaften bei.	Die Akzeptanz gegenüber der Fernkälte in Wien TownTown ist noch nicht evaluiert worden. In anderen realisierten Fernkälteprojekten wird aber die Ausgliederung der Kaltwassererzeugung von den Gebäudeeigentümern sehr positiv angenommen, weil weniger Flächen in den Technikräumen gebraucht werden.

Treibhausrelevante Emissionen sowie sonstige negative Umweltauswirkungen werden auf ein ökologisch und sozial verträgliches Mindestmaß reduziert.	In [Krawinkler, 2007] werden deutlich niedrigere primäre Ressourcenfaktoren (i. e. Primärenergiefaktor für die nicht erneuerbare Energie) für die Fernkälte (ca. 0,18) als für eine konventionelle Kühlung mit Kompressionskältemaschinen (ca. 0,84) angegeben.
Sie zeichnen sich durch eine Vielfalt an Lösungen, hohe Anpassungsfähigkeit und gute regionale Einbindung aus.	Das Konzept Fernkälte kann in den unterschiedlichsten Formen mit einer Kombination an vielen Technologien umgesetzt werden, sowohl auf der Kaltwassererzeugungsseite als auch bei der Rückkühlseite oder bei den Speichertechnologien. Dadurch wird eine sehr große Anpassungsfähigkeit ermöglicht.

Über die Programmlinie wird eine „gesicherte und effiziente Energieversorgung zur Bereitstellung von notwendigen und Komfort erhöhenden Dienstleitungen und Produkten“ gewährleistet und somit werden Energiesysteme „in Richtung Nachhaltigkeit“ gestaltet (siehe die Beschreibung der Programmlinie „Energiesysteme der Zukunft“).

Die Fernkälte im Allgemeinen und das Projekt in Wien TownTown insbesondere können unter bestimmten Bedingungen (siehe Abbildung 7) als nachhaltige Energieversorgungskonzepte gesehen werden, in dem die in der Programmlinie definierten Eigenschaften zukünftiger Energiesysteme erfüllt werden (siehe Tabelle 1).

VI. Aufbau des Berichtes

Der Bericht verfolgt die Grundstruktur von Abbildung 7. Bei jedem Schritt wird auf die Aspekte eingegangen, die im Absatz „Fokus/Schwerpunkte der Arbeit“ grau hinterlegt sind. Das Projekt deckt ein weites Themenspektrum im Bereich Fernkälteversorgung mit unterschiedlicher Analysetiefen in den einzelnen Themenbereichen ab. Die Tiefe der Untersuchungen sowie die eingesetzten Methoden wurden an dem Stand der Technik angepasst. Wenn die erwähnten Themen schon in anderen Forschungsprojekten sehr ausführlich untersucht worden sind, dann wurde auf die entsprechenden Publikationen verwiesen. Es wurde versucht, hier nur die Aspekte ausführlich zu präsentieren, auf die in der Literatur noch wenig eingegangen worden ist.

Ziele des Projektes und Erreichungsgrad

Die ursprünglichen Ziele des Projektes waren:

Definition einer intelligenten Fernkälteübergabe unter der Berücksichtigung alternativer Rückkühlkonzepte zur Gestaltung eines effizienten Fernkältenetzes am Fallbeispiel TownTown

Erreichungsgrad:

- der Begriff „intelligent“ bezieht sich auf eine integrierte Fernkälteübergabe, die die Verbraucher- und Erzeugungseite der Fernkälte gemeinsam betrachtet.
- der Begriff „Fernkälteübergabe“ hat sich nicht auf die reine Übergabestationen begrenzt, sondern bezieht sich hier auf die allgemeine Einbindung der Fernkälte zur Versorgung eines Gebietes.

Es wurde versucht, die einzelnen im Projektantrag angesprochenen Tätigkeiten in eine allgemeine Vorgehensweise zu integrieren, um den Projektergebnissen eine Allgemeingültigkeit zu geben und die Übertragbarkeit der Konzepte zu ermöglichen.

Definition von flexiblen Fernkälteübergabekonzepten für unterschiedliche Komfortstufen, Kühlsysteme in den Gebäuden und Nutzungen.

Erreichungsgrad:

- Die Projektergebnisse sind auf der Ebene der Vorplanung einsetzbar. Die Fernkälteübergabekonzepte bestehen hauptsächlich aus qualitativen Vorgaben zur Einbindung eines Fernkältenetzes für die Kälteversorgung eines Stadtteiles. Nur einige ganz spezifische Aspekte wurden quantifiziert. Es war nicht möglich, aufgrund der Breite des Analysefeldes alle Fragen mit der gleichen Analysentiefe zu untersuchen. Vor allem einige Punkte, wie die Gegenüberstellung zwischen den Ergebnissen aus den thermischen dynamischen Gebäudesimulationen und den Ergebnissen aus den statischen Kühllastberechnungen, haben mehr Zeit in Anspruch genommen als ursprünglich geplant.

Übertragbarkeit der entwickelten Fernkälteübergabekonzepte, sowie der Konzepte zur alternativen Rückkühlung auf zukünftige Fernkältenetze in Österreich.

Erreichungsgrad:

- Um die Übertragbarkeit der Fernkälteübergabekonzepte abzusichern wurde die allgemeine methodische Vorgehensweise aus Abbildung 7 erarbeitet. Dieser Bericht wurde dann an diese Vorgehensweise angepasst, und spiegelt nicht den Ablauf der verschiedenen Arbeitspakete wieder. Es kann daher als Leitfaden gelesen werden, wo die einzelnen Schritte zur Optimierung eines Fernkältenetzes anhand des Fallbeispiels Wien TownTown erläutert werden.

Inhalte und Ergebnisse des Projektes

1. Methode

1.1. Vorgangsweise, Stand der Technik und Innovationsgehalt des Projektes

Die Vorgangsweise zur Erhaltung der Projektergebnisse verfolgt die in Abbildung 7 erläuterte Methodik. Der Stand der Technik sowie der Innovationsgehalt des Projektes sind im Teil „Fokus und Schwerpunkte der Arbeit“ präsentiert und die spezifischen Innovationen werden in den einzelnen Teilen dieses Berichtes erläutert.

1.2. Verwendete Daten

Die Daten der Bürogebäude hinsichtlich Wandaufbauten, Verglasung, Energieverteilung im Gebäude usw. wurde von ILF-Beratende Ingenieure zur Verfügung gestellt. Die bauphysikalischen Daten der verschiedenen Bürogebäude wurden vom bauphysikalischen Nachweis [Pfeiler, 2005] entnommen.

Die Fernkältezentrale wurde von Fernwärme Wien im Zuge einer öffentlichen Ausschreibung zur Errichtung vergeben. Alle technischen Daten zum Fernkältenetz stammen aus dem hydraulischen Schaltschema des Fernkältenetzes [Fernwärme Wien, 2006 (A)] und dem entsprechenden Leistungsverzeichnis [Fernwärme Wien, 2006 (B)].

1.3. Verwendete Werkzeuge

Die Gebäudekühllasten und Optimierungspotenziale der einzelnen Gebäude wurden anhand dynamisch thermischer Simulation [TRNSYS] analysiert. In der TRNSYS-Umgebung wurde ein thermisch gekoppeltes Gebäude- und Anlagenmodell aufgebaut, womit es ermöglicht war, die Rückkopplung zwischen dem Gebäude selbst und dessen HLK-Systemen in jedem Zeitschritt zu betrachten. Insbesondere wurde es damit möglich, die Leistung der Bauteilaktivierung in Abhängigkeit der Innenraumtemperatur dynamisch zu rechnen, was zu einer genauen Berechnung der Kältebedarfsverläufe führte.

Die Analyse und Bewertung verschiedener Netzauslegungsvarianten wurde mit thermodynamischer Anlagensimulation mit DYMOLA durchgeführt [DYMOLA]. In der DYMOLA-Umgebung erfolgt die Modellbeschreibung über Gleichungssysteme, die in einer objekt-orientierten Programmiersprache (Modelica) geschrieben werden. Daher hat Modelica den Vorteil, eine flexible, auf Gleichungssysteme basierte Modellbeschreibung anzubieten, die sich sehr gut für die Modellierung von zusätzlichen Komponenten in einer Modellbibliothek eignet. Die entsprechenden Grundlagen zur Modellierung werden im Teil 6.1 beschrieben.

Die Betriebsoptimierung wurde mittels eines Optimierungsprogramms für Energiemanagement [DEMS] realisiert. Die Funktionalitäten der Software DEMS werden im Teil 7.1.2 beschrieben.

2. Gebäudestandards und Kühlsysteme

2.1. Rahmenbedingungen für die Raumkühlung

2.1.1. Raumtemperatur

Kühlung wird erforderlich, um Raumtemperaturen, insbesondere die empfundene Temperatur, in einem für Menschen erträglichen Rahmen zu halten. Im Zuge der Grundlagenermittlung für die Planung ist zu klären, welche Raumtemperaturen im Sommer und insbesondere in den Übergangszeiten einzuhalten sind.

Oft besteht die Möglichkeit, Raumtemperaturgrenzen durch ein geringes Überschwingen der Raumtemperatur besonders in den Nachmittags- und Abendstunden aufzuweiten. Insbesondere auch aufgrund der Tatsache, dass dieses Überschwingen nur in einigen wenigen Tagen pro Jahr auftritt (Berechnung erforderlich). Solch eine Vereinbarung wirkt sich reduzierend auf die Kühllast und die Anlagendimensionierung aus.

Bei der Bewertung von technischen Konzepten ist insbesondere die so genannte empfundene Temperatur, die auch den Wärmeaustausch durch Strahlung berücksichtigt, zu beachten.

2.1.2. Zeitlicher Kältebedarfsverlauf

Die Dimensionierung der Kälteerzeugung ist sehr stark vom zeitlichen Leistungsverhalten der einzelnen Verbraucher abhängig. Je nach Art des Verbrauchers kann die Lastkurve im Tagesgang in ihrer Höhe stark schwanken. Bei der Dimensionierung der Kältebereitstellung ist festzustellen, wann das tageszeitliche Maximum auftritt.

Bemerkenswert ist, dass das Maximum der äußeren Kühllast, wie diverse Kühllastberechnungen zeigen, nicht im Hochsommer auftritt, sondern in den Monaten Juni, Juli bzw. September. Die Ursache liegt sowohl in der Strahlungsintensität als auch in dem tieferen Sonnenstand im September.

Im Folgenden sind beispielhafte Kältebedarfsverläufe für verschiedene Verbraucherarten dargestellt. Sie stellen die Ergebnisse von Kühllastberechnungen verschiedener typischer Gebäude und Nutzungen dar. Da diese erste Analyse aber nur qualitativ durchgeführt wird, um eine erste Einführung in das Thema zu geben, sind die Annahmen zu diesen Berechnungen nicht im Detail erläutert. Speziell zum Thema Bauteilaktivierung werden die Simulationsergebnisse im Teil 4 dieses Berichtes in Detail präsentiert.

2.1.2.1. Exemplarischer Kältebedarfsverlauf einer klassischen Bürogebäudekühlung

Eine klassische Bürogebäudekühlung wird hier ohne Speicherung und Nachtauskühlung verstanden.

Gebäude mit entsprechenden Wärmelasten (ohne Möglichkeit der thermischen Aktivierung von Speichermassen in Verbindung mit einer nächtlichen Gebäudeauskühlung) können, je nach Fassadenausrichtung, den in Abbildung 8 abgebildeten typischen Kälteleistungsverlauf aufweisen, der im vorliegenden Fall über eine Kühllastberechnung ermittelt wurde. Im dargestellten Beispiel tritt die Spitze nur kurzzeitig am späten Nachmittag auf. Fraglich ist, ob die Kältemaschinen in diesem Fall auf die auftretende Spitze auszulegen wären.

Wenn die Gebäudenutzung um z. B. 18:00 endet und eine Entwärmung der Räume in der Abendzeit bzw. in der Nacht möglich wäre, könnte die Kältemaschine kleiner dimensioniert

werden. Sollte dies nicht der Fall sein, ist die dargestellte Leistungsspitze durch die Kälteerzeugung abzudecken.

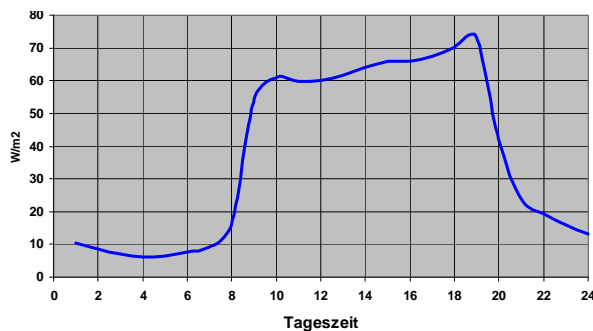


Abbildung 8: Kühllastverlauf von Gebäuden ohne thermische Aktivierung von Speichermassen

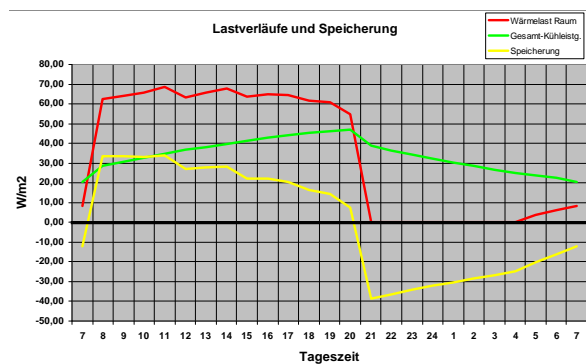


Abbildung 9: Kühllastverlauf von Gebäuden mit thermischer Aktivierung von Speichermassen

2.1.2.2. Exemplarischer Kältebedarfsverlauf eines Gebäudes mit thermischer Aktivierung der Speichermassen (Bauteilaktivierung)

Betonkernaktivierung (thermische Bauteilaktivierung) bezeichnet Systeme, welche die Gebäudespeichermassen, meistens die Gebäudedecken, zur Temperierung der Innenräume nutzen. Diese Systeme werden zur alleinigen oder ergänzenden Raumheizung oder –Kühlung verwendet. Die Betonkernaktivierung umfasst in den Massivdecken eingelegte, wasserdurchströmte Rohre, die je nach Jahreszeit die Betondecken kühlen oder erwärmen.

Gebäude mit der Möglichkeit der thermischen Aktivierung von Speichermassen in Verbindung mit einer nächtlichen Gebäudeauskühlung verursachen den in Abbildung 9 abgebildeten theoretischen Kälteleistungsverlauf ohne typische Leistungsspitze, der aus einer Simulation generiert wird [TAS]. Idealerweise ergibt sich ein vergleichmäßiger Kälteleistungsbedarf über den Tag. In der Praxis wird sich allerdings eine kleinere Leistungsspitze einstellen.

Abbildung 9 zeigt den Verlauf der Wärmelast mit der roten Linie. Die im Raum frei werdende Wärme wird zu einem gewissen Teil in der Speichermasse zwischengespeichert und kontinuierlich oder nur nachts über die Kühlung entzogen. Diese Betriebsart hat eine Verkleinerung der Systemkälteleistung gegenüber vorstehendem Beispiel zur Folge, da sich keine konstante Raumtemperatur einstellt, sondern sich durch die Speicherwirkung eine geringfügige Erhöhung der Raumtemperatur einstellen wird. Durch ihren Speichereffekt kann die Bauteilaktivierung nicht zur Einhaltung einer vorgewählten Raumtemperatur gesteuert werden.

Die Kälteerzeugung und somit die Entwärmung der Speichermasse kann auch bei entsprechender Speicherwirkung nur nachts erfolgen.

2.1.2.3. Exemplarischer Kältebedarfsverlauf von einer Kantine

Die auf einen sehr kurzen tageszeitlichen Abschnitt begrenzte Nutzung wird eine ausgeprägte Spitze des Kälteleistungsbedarfes ergeben (siehe Abbildung 10).

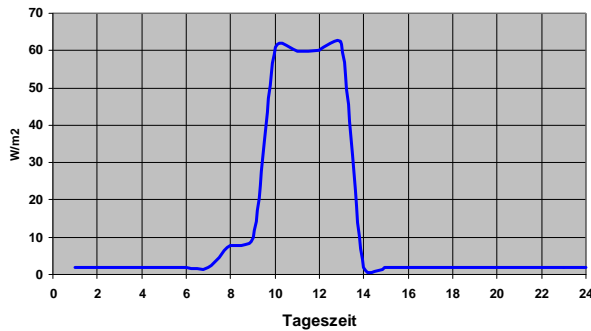


Abbildung 10: Kühllastverlauf Kantinenkühlung

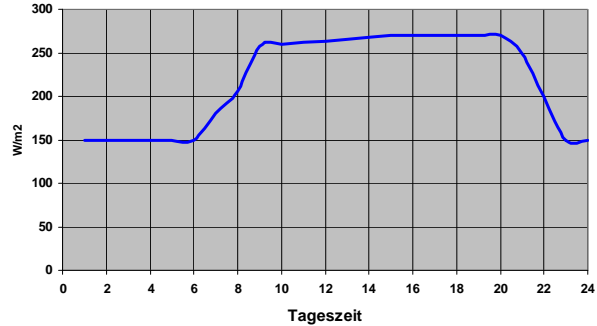


Abbildung 11: Kühllastverlauf EDV Raum

2.1.2.4. Exemplarischer Kältebedarfsverlauf eines EDV-Raumes

EDV-Zentren benötigen produktionsbedingt während des ganzen Tages relativ gleichmäßige Kälteenergie (siehe Abbildung 11). Beeinflusst wird der tageszeitliche Kälteleistungsbedarf durch den Anteil der Außenluftkühlung.

Zu beachten ist, dass Rechenzentren ganzjährig Kälteenergie benötigen.

2.1.2.5. Exemplarischer Kältebedarfsverlauf für alle Verbraucher

Durch das Zusammenspielen der Einzelverbraucher, die durchaus zu verschiedenen Tageszeiten ihre Leistungsspitze ausweisen, ergibt sich das Gesamtleistungsprofil des Verbrauchers.

Ziel der Profilanalyse eines Verbrauchers sollte es sein, Leistungsspitzen, wie in Abbildung 12 ausgewiesen, zu vermeiden.

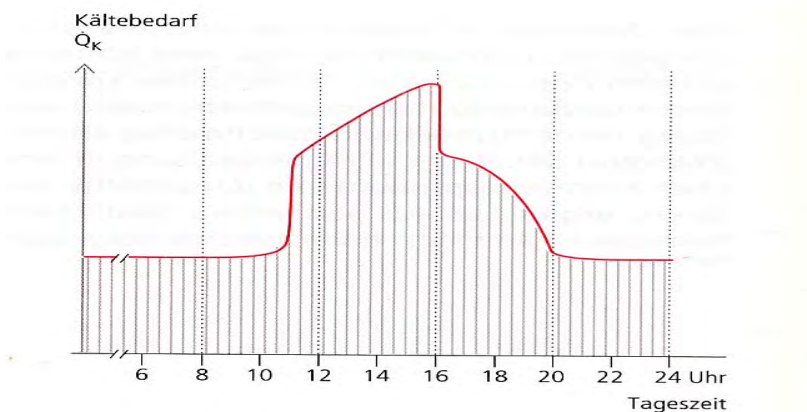


Abbildung 12: Möglicher Gesamtkältebedarfsverlauf aller Verbraucher [Danlies, 2000]

2.1.3. Betriebstemperaturen der Kühlsysteme

Je nach Aufgabe werden für die Kühlsysteme unterschiedliche Klimakaltwassertemperaturen benötigt. Die tiefsten Klimakaltwassertemperaturen werden für die Luftentfeuchtung mittels Oberflächenkühler und Taupunktunterschreitung erforderlich. Die relativ niedrige Klimakaltwassertemperatur von 6 °C wird daher nur zur Luftentfeuchtung in dafür vorgesehenen Lüftungsgeräten benötigt.

Alle anderen Kühlsysteme sollten zur Vermeidung von Kondensatanfall mit Klimakaltwassertemperaturen oberhalb des Taupunktes betrieben werden. Für den Betrieb ohne Entfeuchtung sollten daher Kaltwassertemperaturen grundsätzlich oberhalb des

Taupunktes gewählt werden. Sobald aufgrund des Außenluftzustandes keine Luftentfeuchtung mehr benötigt wird, kann die Klimakaltwassertemperatur zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und Ausnutzung der freien Kühlung angehoben werden.

Anzustreben ist noch eine möglich große Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf, um Investitionen für Transportleitungen und Pumpenergie minimieren zu können. Je nach Anteilen der verschiedenen Kühlsysteme ergeben sich Mischrücklauftemperaturen im Bereich zwischen 13 bis 18°C (siehe Abbildung 13).

Die in Tabelle 2 angegebenen Klimakaltwassertemperaturen werden in der Regel zum Betrieb der verschiedenen Kühlsysteme herangezogen:

Tabelle 2: Vor- und Rücklauftemperaturen von verschiedenen Kühlsystemen

Kühlsysteme	Vor- und Rücklauftemperaturen
Außenluftkühlung und –Entfeuchtung	6 °C / 12 °C
Bauteilkühlungssysteme	19 °C / 22 °C
Kühldeckensysteme	19 °C / 22 °C
Induktionsanlagen	13 °C / 19 °C // 16 °C / 22 °C
Fan Coil-Anlagen	13 °C / 19 °C // 16 °C / 22 °C

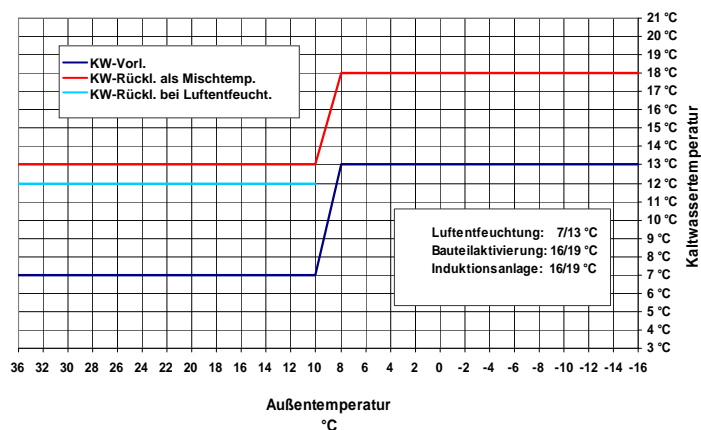


Abbildung 13: Verlauf der Klimakaltwassertemperaturen

2.1.4. Raumkühlungskonzepte und erzielbare Kühlleistungen

Orientierungswerte von erzielbaren Kühlleistungen für verschiedene Kühlsysteme sind in Tabelle 3 aufgeführt. Diese Werte sind aus unterschiedlichen Herstellerangaben zusammengefasst worden.

Anzumerken ist, dass bei der Ermittlung der Kühlleistung in der Regel bei der Bauteilaktivierung die gesamte Deckenfläche angesetzt werden kann. Bei den angebauten Kühldeckensystemen sowie den abgehängten Kühldecken sind alle durch Einbauten (Leuchten, usw.) belegte Flächen abzuziehen (ca. 15 bis 25 %). Kühlsegel sind in der Regel nur partiell im Raum angeordnet und somit ist ebenfalls nur die aktive Kühlfläche in Ansatz zu bringen.

Jeweils hinzu zu addieren ist die in den Raum eingebrachte Kühlleistung über die Zuluftmenge. Diese variiert je nach Luftwechsel und Zulufttemperatur. Richtwerte dazu sind in Tabelle 4 angegeben. In einer statischen Berechnung zur ersten Grobauslegung einer Kältemaschine können die Werte aus Tabelle 3 und Tabelle 4 addiert werden. Die Leistungswerte der Kühlsysteme aus Tabelle 3 sind jedoch stark von der Innenraumtemperatur abhängig. Im Fall einer zusätzlichen Zuluftkühlung ist daher eine thermische dynamische Gebäudesimulation notwendig, um die Rückkoppelung zwischen

den in einem Raum wirkenden Haustechniksystemen zu berücksichtigen, und die spezifischen Kühlleistungswerte in einem iterativen Prozess zu rechnen.

Tabelle 3: Spezifische Kühlleistungswerte verschiedener Kühlsysteme in Räumen ohne zusätzliche Zuluftkühlung

Kühlsysteme	Kühlleistung
Bauteilkühlungssysteme	ca. 35 – 40 W/m ² _{aktive Fläche}
Angebaute Kühldeckensysteme	ca. 60 – 70 W/m ² _{aktive Fläche}
Kühldecke (geschlossen Decke)	ca. 60 – 80 W/m ² _{aktive Fläche}
Kühldecke (offene Decke)	ca. 80 – 120 W/m ² _{aktive Fläche}
Kühlsegel	ca. 100 – 120 W/m ² _{aktive Fläche}
Schwerkraftsysteme	ca. 25 – 50 W/m ² _{Büro-Bodenfläche}
Induktionsanlagen	ca. 40 – 80 W/m ² _{Büro-Bodenfläche}
Fan Coil-Anlagen	ca. 40 – 80 W/m ² _{Büro-Bodenfläche}

Tabelle 4: erreichbare Kühlleistung über die Zuluftkühlung

Luftwechselrate	Kühlleistung [W/m ² Bürofläche]
LW: 1,4 1/h	8 - 11 W/m ²
LW: 2,0 1/h	12 - 16 W/m ²

2.1.5. Spezifische Investitionskosten der verschiedenen Kühlsysteme

In diesem Absatz werden nur die Investitionskosten der Kühlenergieabgabegeräte (Kühlsysteme) berücksichtigt. Die Komponenten der Kälteerzeugung und –Verteilung sowie der Lüftungsanlage sind hier nicht berücksichtigt.

Üblicherweise schwanken die spezifischen Anlagenkosten je nach Art des Gebäudes, der Bauweise, zusätzlicher Funktionen (wie beispielsweise akustische Funktionen bei Kühldecken) usw. in weiten Bereichen. Die in Tabelle 5 angeführten Investitionskosten stellen somit Anhaltswerte dar. Es handelt sich dabei um Erfahrungswerte aus ausgeführten Anlagen.

Tabelle 5: Investitionskosten verschiedener Kühlsysteme

Kühlsysteme	Investitionskosten
Bauteilkühlungssysteme	ca. 30 – 40 EUR/m ² _{aktive Fläche}
Angebaute Kühldeckensysteme	ca. 100 - 150 EUR/m ² _{aktive Fläche}
Kühldecke (geschlossen Decke)	ca. 150 – 250 EUR/m ² _{aktive Fläche}
Kühldecke (offene Decke)	ca. 150 – 250 EUR/m ² _{aktive Fläche}
Kühlsegel	ca. 150 – 350 EUR/m ² _{aktive Fläche}
Schwerkraftsysteme	ca. 30 – 80 EUR/m ² _{Büro-Bodenfläche}
Induktionsanlagen	ca. 60 – 120 EUR/m ² _{Büro-Bodenfläche}
Fan Coil-Anlagen	ca. 60 – 100 EUR/m ² _{Büro-Bodenfläche}

2.2. Gesamtkälteleistungen - spezifische Ansätze

Maßgebend für die Auslegung der Kälteversorgung von Gebäuden (Kältebereitstellung) sind:

- die maximale gleichzeitige Kühllast in Form von innerer und äußerer Kühllast
- der Anteil der Kälteleistung für die Kühlung und Entfeuchtung der Außenluft

Die in Tabelle 6 und Abbildung 14 dargestellten Zahlen beziehen sich auf die Bürohauptnutzfläche und enthalten auch Angaben der Kälteleistung für die Außenluftentfeuchtung. Dabei ist eine Luftwechselrate in einem Bereich von 1,4 bis 2,0 1/h angesetzt. Diese Zahlen wurden durch statische Kühllastberechnungen generiert.

Wie auch in [Blümel, 2005] an realen Gebäuden festgestellt wurde sind die äußeren Kühllasten (Solareinträge) bei der Zusammenstellung der Gesamtkühllast maßgeblich. Deswegen ist es sinnvoll, die entsprechende Kühllast in Abhängigkeit der relevanten Kenngrößen eines Gebäudes darzustellen, und zwar des Verhältnisses zwischen Fensterfläche zu Bodenfläche ($A_{\text{Fenster}} / A_{\text{Boden}}$).

Tabelle 6: Spezifische Kühllasten, Außenluftkühlung und Kälteleistungen für Büronutzung

$A_{\text{Fenster}} / A_{\text{Boden}}$	Kühllast [W/m ²]	Außenluftkühlung [W/m ²]	Kälteleistung [W/m ²]
0,1	25 - 41	28 - 40	53 - 81
0,15	28 - 44	28 - 40	56 - 84
0,2	33 - 47	28 - 40	61 - 87
0,3	40 - 55	28 - 40	68 - 95
0,4	48 - 63	28 - 40	76 - 103
0,5	56 - 71	28 - 40	84 - 111
0,7	72 - 89	28 - 40	100 - 129
Serverräume	100 - 300	28 - 40	128 - 340
EDV-Zentralen	500 - 1.000	28 - 40	528 - 1.040
Konferenzräume	100 - 140	130 - 250	230 - 390

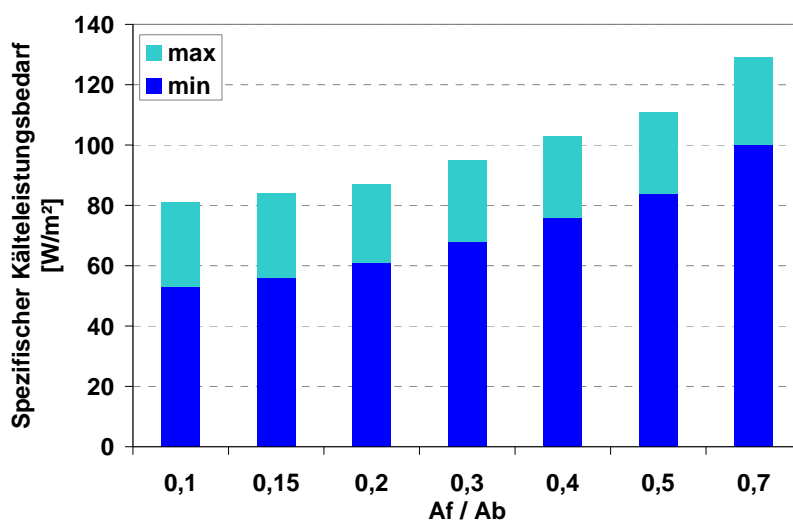


Abbildung 14: Spezifischer Kälteleistungsbedarf für Büronutzung

2.3. TownTown - spezifische Leistungsansätze

Dem Projekt TownTown Wien liegen die Flächenansätze (Flächen sind gerundet) und Nutzungen aus Tabelle 7 zugrunde. Diese Informationen stammen aus den Vermarktungsunterlagen aus dem Jahre 2006.

Tabelle 7: Beschreibung der Flächen und Nutzungen im Projekt TownTown

Objekt		Nettonutzflächen [m ²], ohne Keller und Technikräume	Nutzungskategorie
CB 05	Flachbau	4.500	Büronutzung
		320	Gastronutzung
		270	Shopnutzung
CB 06	Flachbau	3.960	Büronutzung
		430	Shopnutzung
CB 07	Flachbau	3.320	Büronutzung
		205	Shopnutzung
CB 11	Flachbau	1.930	Büronutzung
CB 12	Flachbau	1.790	Büroähnliche Nutzung
CB 13	Flachbau	5.550	Büronutzung
		240	Konferenzraum und Serverräume
CB 14	Flachbau	1.880	Büroähnliche Nutzung
CB 15	Flachbau	1.930	Büroähnliche Nutzung
CB 16	Flachbau	5.550	Büroähnliche Nutzung
		124	Shopnutzung
CB 17	Flachbau	1.780	Büroähnliche Nutzung
CB 18	Flachbau	680	Büronutzung
		230	Gastronutzung
CB 19/20	Flachbau	1.370	Büronutzung
		710	Gastronutzung

Die Berechnung der Leistungswerte für den Kältebedarf auf Basis der in Tabelle 7 gegebenen Flächen und Nutzungen ergibt die Werte aus Abbildung 15. Grundlagen zur Berechnung sind ferner:

- mechanische Lüftung der Büroräume (gekühlte Zuluft) mit einer Luftwechselrate von 1,4 1/h
- mechanische Lüftung der Besprechungsräume (gekühlte Zuluft) mit einer Luftwechselrate von 5,6 1/h
- mechanische Lüftung der Gastro- und Shopbereiche
- thermische Bauteilaktivierung (Kühlung) aller Flächen
- Vorhaltung von Reservekapazitäten für Mieterausbau
- Summierung aller Lasten ohne Gleichzeitigkeit

Durch spezifische Nutzungen, wie Serverräume und EDV-Räume wird ganzjährig Kälteenergie benötigt.

Diese statischen Kühllastberechnungen wurden für jedes Gebäude vor dem Projektstart City Cooline und unabhängig davon durchgeführt.

Zur energetischen Optimierung des Fernkältenetzes sollen die Kältebedarfsverläufe dynamisch gerechnet werden, um vor allem Lastanalysen durchführen zu können und die Gleichzeitigkeit zwischen den verschiedenen Kühlprozessen zu berücksichtigen. Die Summierung der Einzelleistungen führt zu einer großzügigeren Bemessung der Kälteverteilung.

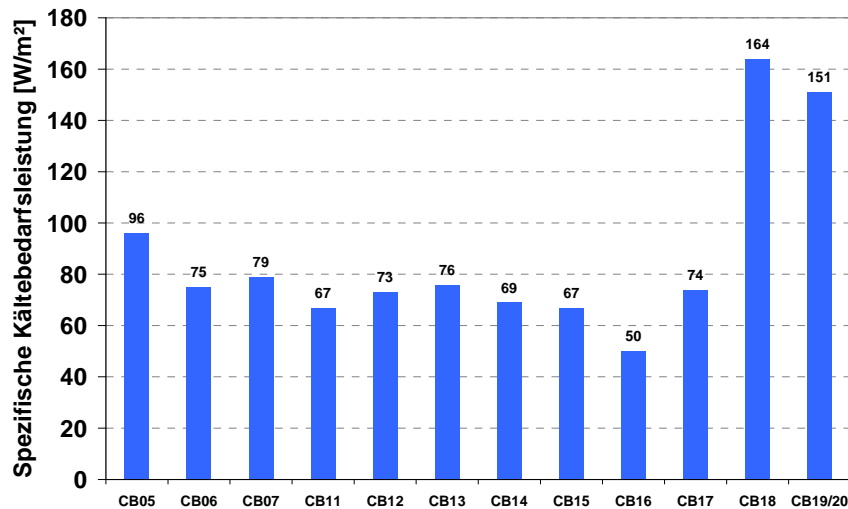


Abbildung 15: Kältebedarf der Flachbauten TownTown

Abbildung 15 zeigt, dass Gebäude mit Gastronutzung (CB18 und CB19/20) deutlich höhere Kälteleistungen benötigen. Dies macht sich besonders dann bemerkbar, wenn Gastro- und Bürobereiche gemeinsam in einem Gebäude untergebracht werden und die Betriebszeiten zusammenfallen.

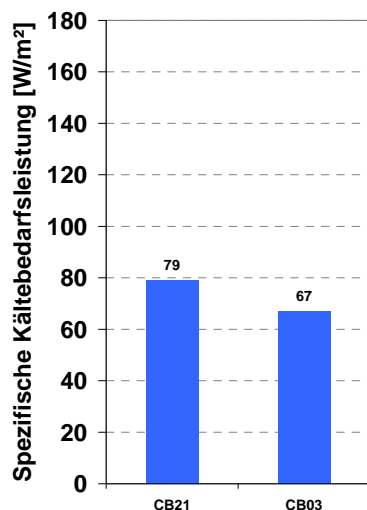


Abbildung 16: Kältebedarf Hochhäuser TownTown

3. Nutzungsdurchmischung: mögliche Kälteversorgung eines Stadtteiles über ein Lebensmittelmarkt

In [Chow, 2004 (A)] wird durch Optimierungsalgorithmen die optimale Nutzungsdurchmischung zur Erhaltung eines möglichst gleichmäßigen Gesamtkältebedarfsverlaufs in einem Kältenetz gerechnet. Anhand eines konkreten Falls in Hong-Kong wurde erstmal die optimale Gebäudeauswahl in der Form einer Aufteilung an Nutzfläche zwischen Hotels, Wohn- und Bürogebäuden und Geschäften gerechnet. Da in dieser ersten Berechnung ein Wert von über 80% an Nutzfläche für Hotels errechnet wurde, und dies städtebaulich unrealisierbar war, wurde in einem zweiten Schritt der Anteil an Hotelflächen auf 5% gesetzt und die Aufteilung zwischen den restlichen drei Gebäudekategorien wurde optimiert.

Dadurch, dass es beim Stadtentwicklungsprojekt TownTown keine Möglichkeit gab, eine Nutzungsdurchmischung zur Erhaltung eines möglichst gleichmäßigen Gesamtkältebedarfsverlaufs vorzusehen, wäre die einzige Möglichkeit gewesen, in der nahen Umgebung von TownTown im 3. Wiener Gemeindebezirk Objekte zu finden, die einen komplementären Kältebedarfsverlauf als die Bürogebäuden in TownTown haben. Im Rahmen des Projektes wurde aufbauend auf [Peritsch, 2006] die Möglichkeit der Kälteversorgung eines Stadtteils mit Einbindung von unterschiedlichen Lebensmittelmärkten untersucht.

3.1. Kältebedarfsverlauf eines Lebensmittelmarktes

Als Beispiel wurden die Kältebedarfsverläufe eines realen und repräsentativen Lebensmittelmarktes mit den Nennkälteleistungseckdaten aus Tabelle 8 genommen. Dabei werden nur die Kälteanwendungen (Kühlschränke und Kältekammer) berücksichtigt und nicht der Klimatisierungsaufwand.

Tabelle 8: Nennkälteleistungen des Beispiellebensmittelmarktes

Kälteanwendung	Nennleistung
Normalkühlung (ca. -10°C)	31,8 kW
Minuskühlung (ca. -30°C)	13,1 kW

Die Kältebedarfsverläufe wurden während einer ausgewählten Woche im Jahr 2006 erhoben und sind getrennt für die Normalkühlung in Abbildung 17 und für die Minuskühlung in Abbildung 18 dargestellt. Der Durchschnittsverlauf als Mittelwert zwischen den Leistungen von den Tagen Montag bis Samstag ist dabei auch angeführt, da alle diese Tage sehr ähnliche Kältebedarfsverläufe aufweisen. Sonntags sind bei beiden Anwendungen bandförmige Profile auf einem Teillastniveau von ca. 40% der Nennleistung zu sehen.

Wie es Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen sind sehr prognostizierbare Profile zu sehen. Die Normalkühlung ist durch eine Grundlast von ca. 40% der Nennleistung charakterisiert, die nur um ca. 06:00 morgens unterbrochen wird. Tagsüber variiert das Profil mit einer Spitze auf 100% der Nennleistung nach Mittag. Im Vergleich dazu ist das Profil für die Minuskühlung viel gleichmäßiger. Es präsentiert sich in der Form einer Grundlast mit seltenen Spitzen, weil die Kältekammern seltener als die Kühlschränke im Verkaufsbereich des Lebensmittelmarktes aufgemacht werden.

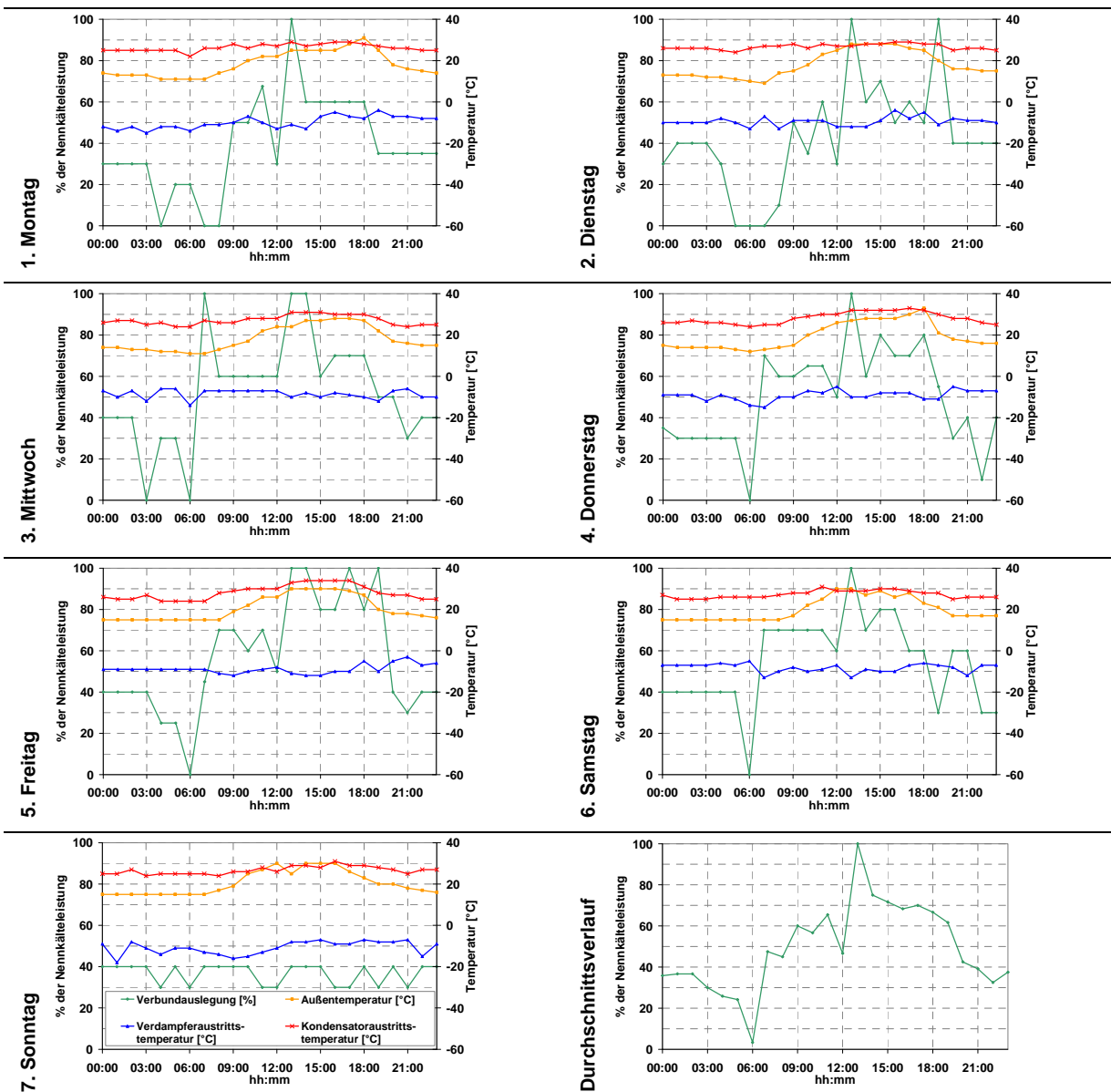


Abbildung 17: Kältebedarfsverlauf eines Lebensmittelmarktes (Normalkühlung für eine Nennkälteleistung von 31,80 kW)

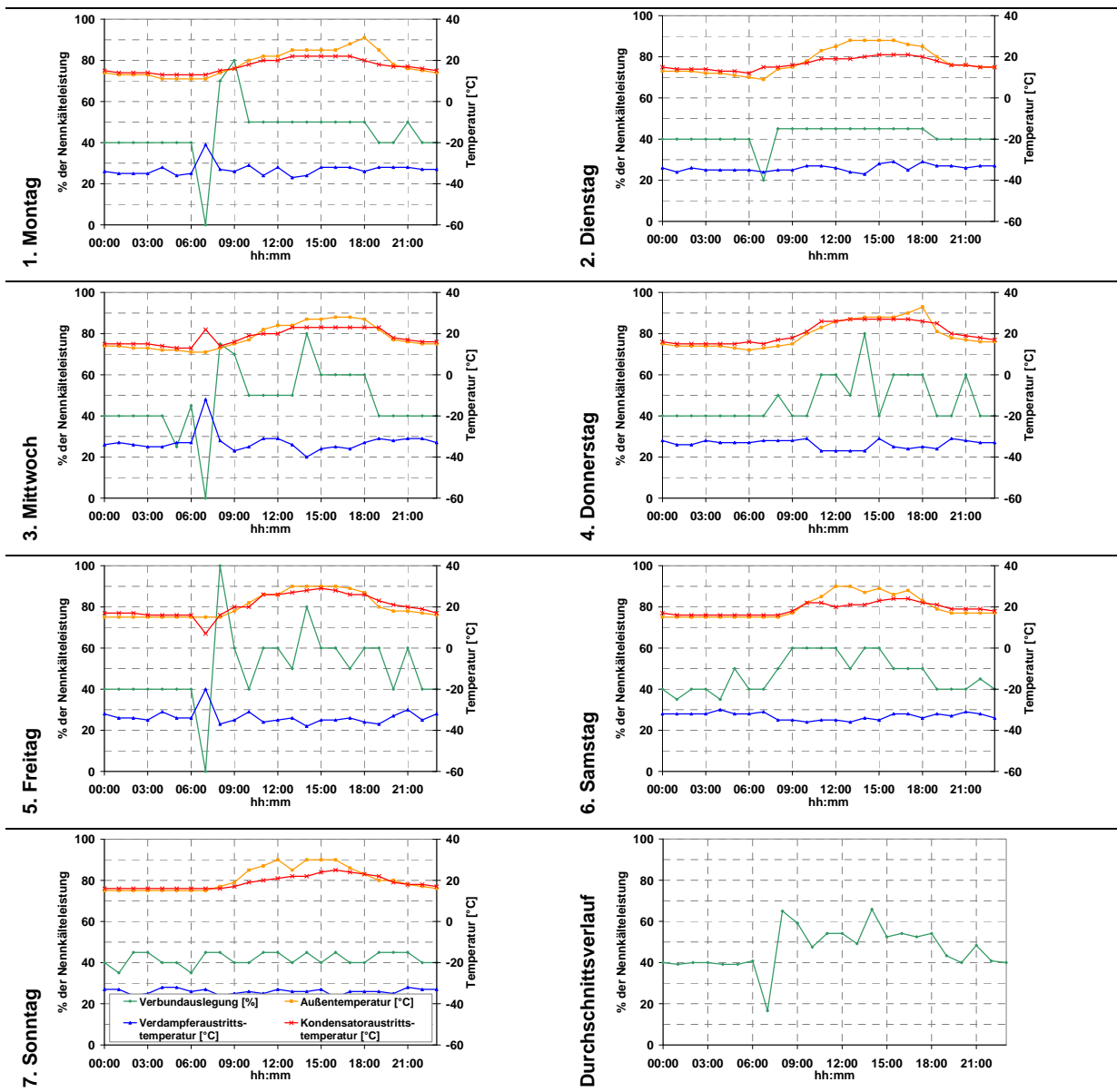


Abbildung 18: Kältebedarfsverlauf eines Lebensmittelmarktes (Minuskühlung für eine Nennkälteleistung von 13,10 kW)

3.2. Mögliche Mitversorgung eines Stadtteils

Aus Abbildung 17 und Abbildung 18 ist sichtbar, dass die eingesetzten Kältemaschinen hauptsächlich im Teillastbereich arbeiten, und dass daher Potenzial für einen höheren Ausnutzungsgrad besteht.

Am Beispiel der Normkälte zeigt Abbildung 19 das komplementäre Leistungsprofil zur Erhaltung einer Vollastnutzung der Kältemaschine. Dieses Profil würde sich nur für spezielle Anwendungen oder für die Beladung eines Speichers eignen, weil gerade bei dem üblichen Auftritt von Kühllasten (Nachmittagsanfang) die Kurve das Minimum erreicht. Der Kältebedarfsverlauf bei der Minuskälte ist für eine Nutzung des komplementären Profils viel geeigneter.

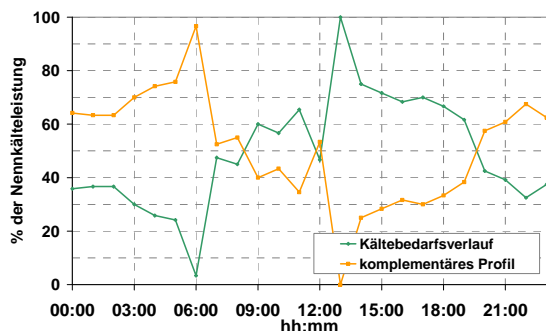


Abbildung 19: Kältebedarfsverlauf und komplementäres Profil

In [Peritsch, 2006] wird die Einsatzmöglichkeit von Absorptionskältemaschinen zur Kälteversorgung von Supermärkten untersucht. Gerade im kleinen Leistungsbereich sind noch keine Produkte am Markt verfügbar, mit der Ausnahme von den direkt mit Gas befeuerten Kältemaschinen. Als Beispiel wird eine mit Heißwasserdampf angetriebene Kältemaschine mit einer Leistung von ca. 50 kW [Peritsch, 2006] genommen. Es wäre technisch möglich, eine solche Anlage zu bauen und damit weitere Objekte zu versorgen.

Da sehr tiefe Temperaturen erzeugt werden, sollten möglichst weitere Tiefkälteanwendungen (Lebensmittelindustrie bzw. –Märkte) mitversorgt werden.

Tabelle 9: Energie- und Kostenbilanz für eine Betriebswoche

	Variante Kompressionskälte (ohne Kühlturm)	Variante Absorptionskälte (ohne Kühlturm)
Kälteleistung	13 kW	50 kW
COP	1,47	0,42
Wöchentlicher Kälteenergieverbrauch des Lebensmittelmarktes	989 kWh	989 kWh
Wöchentlicher Wärmeverbrauch zur Abdeckung des Kältebedarfsverlaufs für den Lebensmittelmarkt		2.355 kWh
Wöchentlicher Stromverbrauch zur Abdeckung des Kältebedarfsverlaufs für den Lebensmittelmarkt	672 kWh	97 kWh
Wöchentliche Energiekosten	74 €	199 €

Tabelle 10: angenommene Energiepreise

Energieträger	Energiepreise
Strom	0,11 €/kWh
Wärme (Heißwasserdampf)	0,08 €/kWh

Wie es Tabelle 9 zeigt könnte eine Absorptionskältemaschine unter den in Tabelle 10 gegebenen Energiepreisen nicht wirtschaftlicher sein als die im Lebensmittelmarkt installierte Kompressionskältemaschine, da die Energiekosten beinahe dreimal so hoch wären als bei der bestehenden Lösung.

Unter der Annahme, dass die Absorptionskältemaschine dauernd auf Volllast betrieben wird, und dass die überschüssige Kälteenergie an weiteren Objekten verkauft wird, könnte ab einem Kältepreis von 0,22 EUR/kWh einen wirtschaftlichen Betrieb dieser Anlage vorgesehen werden (siehe Tabelle 11). Ab diesem Kältepreis würde der Verkauf des

Kälteüberschusses die Mehrkosten der Absorptionskälte im Betrieb kompensieren und eine Finanzierung der Absorptionskältemaschine könnte über Energiecontracting vorgesehen werden.

Tabelle 11: Bestimmung des minimalen Kälteverkaufspreises

Wöchentliche Energiekosten der Absorptionskältemaschine im Fall eines dauernden Volllastbetriebs	1.690 €
Mehrkosten gegenüber den Energiekosten der Kompressionskältemaschine	1.616 €
Kälteüberschuss	7.411 kWh
Minimaler Kälteverkaufspreis	0,22 €/kWh

4. Nutzung der Gebäudespeichermasse durch Bauteilaktivierung

4.1. Rahmenbedingungen

4.1.1. Gebäudekategorisierung

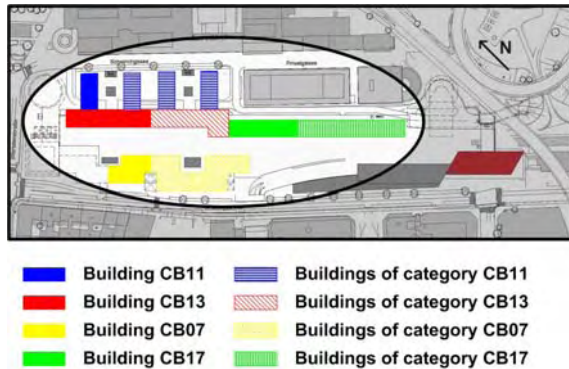


Abbildung 20: Lageplan von TownTown und modellierte Gebäudekategorien



Abbildung 21: Aussicht aus CB16 Richtung Nordwesten über CB07 (Stand März 2007)

Der Stadtteil TownTown wird in zwei Baustufen gebaut. Die in Abbildung 20 farbiger dargestellten Gebäude gehören alle zu der ersten Bauphase und sind alle schon in den Jahren 2007 und 2008 fertig gestellt und bezogen worden. Wie in Abbildung 20 dargestellt befinden sich die Gebäude dieser ersten Phase im nördlichen Bereich des Areals. Das ganze Viertel ist einem Bürokomplex gewidmet, das ursprünglich geplante Hotel wird nicht gebaut.

Um die Analysen zu vereinfachen wurde der gesamte Bürokomplex in vier Kategorien unterteilt, hauptsächlich auf Basis der baulichen Merkmale und der Orientierung der Gebäude. Wie es Tabelle 7 zeigt, machen die eventuellen Unterschiede zwischen einzelnen Nutzerprofilen keinen wesentlichen Grund für eine weitere Kategorisierung der Gebäude aus, weil die Bürofläche mit ca. 34 000 m² Nutzfläche ca. 93% der Nutzung dieses Stadtteiles ausmacht. Aus jeder Kategorie wird ein Gebäude ausgewählt, das maßgeblich für alle anderen Gebäude dieser Kategorie thermisch modelliert und simuliert wurde. Die Positionierung und Orientierung der ausgewählten Gebäude CB07, CB11, CB13 und CB17 im Verhältnis mit den Gebäuden derselben Kategorien sind in Abbildung 20 sichtbar und die entsprechenden Eckdaten sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Die Ergebnisse der Untersuchungen der ausgewählten Gebäude wurden dann in einem zweiten Schritt mit den Gebäuden der entsprechenden Kategorien interpoliert.

Tabelle 12: Eckdaten der Gebäudekategorisierung

Name	Name der Gebäude der gleichen Kategorien	Gesamte Nutzfläche aller Gebäude einer Kategorie [m ²]
CB07	CB05, CB06	13.005
CB11	CB12, CB14, CB15	7.530
CB13	CB16	11.464
CB17	CB18, CB19, CB20	4.770

Tabelle 13: Haupteigenschaften der verschiedenen Gebäudekategorien

Name	Anzahl der Geschosse	Nettovolumen der einzelnen Gebäude [m ³]	Gekühlte Nutzfläche der einzelnen Gebäude [m ²]	Anteil an Glasfläche in der Südwestfassade [%]	Anteil an Glasfläche in der Südostfassade [%]	Anteil der Kategorie an der Gesamtfläche [%]
CB07	8	14.425	2.970	45	15	35.4
CB11	4	5.940	1.400	0	24	20.5
CB13	7	19.995	4.160	38	6	31.2
CB17	3	5.851	1.226	31	0	13.0

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die Haupteigenschaften dieser Gebäude. Die Gebäude der Kategorie von CB07 machen den größten Teil des Stadtteiles aus (35,4% der gesamten gekühlten Fläche). Diese Gebäude haben auch den größten Anteil an Glasfläche in der Südwestfassade. Die Gebäude der Kategorie CB17 haben den kleinsten Flächenanteil des Stadtteiles (22,7% der gesamten gekühlten Fläche): es sind dies die niedrigsten Bauten des Stadtteiles. Die Gebäude der Kategorie CB11 verfügen über keine südwestlich orientierte Fassadenfläche, da sie angrenzend zu den Gebäuden der Kategorie CB13 gebaut sind. Diese letzte Kategorie (CB13) hat ähnliche Eigenschaften wie die von der Kategorie CB07, weil sie parallel orientiert sind, aber der Anteil an Glasflächen ist niedriger (38%).

4.1.2. Wetterdaten

Der Wetterdatensatz für ein Referenzjahr ist mit der Software METEONORM [Meteotest] für den Standort Wien bereitgestellt worden.

4.1.3. Interne Lasten

Wie schon im Teil 2 erwähnt, ist nach den Solareinträgen die Gebäudenutzung der ausschlaggebende Faktor für die Berechnung der Kühllasten, weil die entsprechenden internen Lasten dadurch definiert werden.

In Bezug auf die Kühlung im Büroktor spielen vor allem Besprechungs- oder Veranstaltungsräume sowie die Widmung eines Bürobereichs als Rechenzentrum eine wichtige Rolle. In Besprechungsräumen bestehen Unsicherheiten zu deren Nutzung, vor allem zu der Häufigkeit und Dauer der Besprechungen bzw. Veranstaltungen und der entsprechenden Personenbelegung. Idealerweise sollten dafür stochastische Modelle genutzt werden, wie in [Page, 2007] beschrieben wird. Diese Modelle sind aber zurzeit bei den involvierten Projektpartnern nicht vorhanden und es war kein Ziel des Projektes, diese Modelle zu integrieren. Die hier präsentierten Ergebnisse beziehen sich daher auf mittlere Lastprofile. Laut Tabelle 7 sind in CB13 Serverräume auf einer Nutzfläche von ca. 240 m² eingebracht. Zur Bestimmung des Kälteleistungsbedarfs dieser Räume sind keine Simulationen notwendig, sondern es kann ein Profil in der Form einer Grundlast angenommen werden (siehe Abbildung 11).

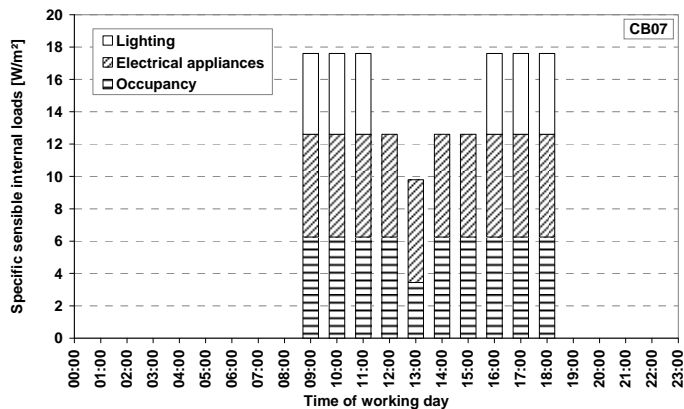


Abbildung 22: mittlere spezifische interne Lastprofile für einen Arbeitstag

In Abbildung 22 sind die mittleren spezifischen Profile für die internen Lasten von einem Arbeitstag dargestellt. Diesem Profil liegt zugrunde, dass die verfügbare Nutzfläche pro Mitarbeiter auf 12 m²/Person angenommen worden ist. In dem mittleren Fall übersteigen die internen Lasten nie den Wert 18 W/m². Die Abwärme aus den elektrischen Geräten (hauptsächlich EDV) und den Personen macht den größten Anteil an den gesamten internen Lasten aus (65%). Die Beleuchtung ist mit einem Wert von 5 W/m² berücksichtigt worden.

Die in [Blümel, 2005] an realen Bürogebäuden durchgeführten Untersuchungen zeigen eine Belegungsdichte von 8 bis 20 m²_{Bürofläche}/Person und mit einem vergleichbaren Anwesenheitsprofil wie auf Abbildung 22 spezifische Personenlasten von 4 (Mittags) bis 12 W/m². Die hier angenommenen Wärmeeinträge durch Beleuchtung und EDV-Geräte (Rechner und Bildschirme) sind auch vergleichbar mit den in [Blümel, 2005] gegebenen Werten.

4.1.4. Gebäudehülle

Die Daten zur Gebäudehülle (Wandaufbauten, Fensterbeschreibungen...) wurden aus dem bauphysikalischen Nachweis [Pfeiler, 2005] entnommen.

4.1.5. Bauteilaktivierung

Die aktivierten Decken wirken sich hauptsächlich auf die unten stehenden Büroräumen aus, weil keine abgehängten Decken eingebaut sind und weil Hohlräume die technische Versorgung der Büroräume gewährleisten. Daher haben die Decken idealerweise eine einzige wirkende Wärmeaustauschfläche (Deckeunterkante) mit den angrenzenden Räumen; Deckenoberkanten sind keine absichtliche Wärmeaustauschfläche. Es besteht trotzdem ein geringer Wärmeaustausch mit dem darüber liegenden Raum, der in den folgenden Berechnungen berücksichtigt und quantifiziert wurde.

Die charakteristischen Auslegungsmerkmale der Bauteilaktivierung sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: charakteristische Auslegungsmerkmale der Bauteilaktivierung

angenommene Werte in den Simulationen	
Abstand zwischen Rohren	20 cm
Durchmesser der Rohre	2 cm
Stärke der massiven Decke	25 cm
Anzahl an hydraulischen Kreisläufe pro Decke	5-10
Massenstrom	12 kg/m ² .h
Vorlauftemperatur	19°C

4.1.6. Sonnenschutz

Als Sonnenschutzeinrichtungen wurden außenliegende Jalousien eingesetzt. Deren Betrieb hat eine bedeutende Auswirkung auf die außen induzierten Kühllasten (Solareinträge). Deswegen spielt der Schwellwert der Solarstrahlung, ab wann die Jalousien herunter gezogen werden, eine sehr wichtige Rolle. Es wurden dafür die Erfahrungswerte aus Tabelle 15 angenommen.

Tabelle 15: Annahmen für die Nutzung der Jalousien

Parameter	Wert
Verhältnis zwischen opaker Fläche der Jalousie und gesamter Glasfläche	0.74
Schwellwert für die globale Solarstrahlung auf die Fensterfläche	150 W/m ²

Es wurden zwei Varianten berücksichtigt: in der ersten wurden die Werten aus Tabelle 15 verwendet; in der zweiten wurde keine Sonnenschutzeinrichtungen berücksichtigt, um damit den Einfluss des Sonnenschutzes quantifizieren zu können.

4.2. Kältebedarfsverläufe für die BTA

Im Teil 2.3 und speziell auf Abbildung 15 sind die aus einer statischen Kühllastberechnung ermittelten spezifischen Werte des Kälteleistungsbedarfs für alle Bürogebäude der Bauphase 1 zusammengefasst. Durch eine solche Berechnung können aber keine Erkenntnisse über den Einfluss verschiedener Betriebsstrategien der BTA gewonnen werden. Mit Hilfe einer thermischen dynamischen Gebäudesimulation [TRNSYS] konnten nun Kältebedarfsverläufe für die ausgewählten Gebäude und unter den im Teil 4.1 angegebenen Rahmenbedingungen gerechnet werden.

Die größten Einflussgrößen auf die sich aus dem Betrieb der BTA ergebenden Kältebedarfsverläufe sind die Anlaufzeit der BTA (die Zeit, ab wann die BTA in Betrieb genommen wird) und die Ladezeit der BTA (die Dauer, wie lang Wasser durch die Bauteile durchgeströmt wird). Diese beiden Parameter ergeben sich aus der ausgewählten Regelstrategie der BTA. Auf diese wird im Teil 4.3 näher eingegangen.

Die in den Teilen 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 und 4.2.4 präsentierten Ergebnisse sind schon in [Pol, 2007] im Laufe der Projektlaufzeit erschienene Publikation veröffentlicht worden. Die englische Version dieser Publikation ist im Anhang 1 beigelegt. Hier wurden die wesentlichen Teile dieser Publikation auf Deutsch zusammengefasst.

4.2.1. Einfluss der Anlaufzeit der BTA

Da die Lüftungsanlage den minimalen hygienischen Luftwechsel garantiert, können deren Betriebszeiten nicht verschoben werden. Die Ladezeit der BTA kann aber so festgelegt werden, dass die Betriebsgleichzeitigkeit beider Systeme vermieden wird. Bei gegebener Ladezeit beeinflusst die Anlaufzeit der BTA die maximale Kälteleistung. Dies wird in Abbildung 23, Abbildung 24 und Abbildung 25 für die erste Juliwoche dargestellt. Falls die Bauteile ab 00:00 beladen werden (siehe Abbildung 23) gibt es eine totale Entkopplung zwischen den Leistungen, die auf einer Seite über die BTA und auf der anderen Seite über die Lüftungsanlage abgeführt werden. In diesem Fall wird die Spitzenleistung ausschließlich von der BTA bestimmt.

Falls die Bauteile um 06:00 beladen werden (siehe Abbildung 24) ist die maximale Spitzenleistung immer hauptsächlich der BTA zurückzuführen. Diese Spitzenleistung tritt am Anfang der Ladezeit auf, wenn der Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf im Wasserkreislauf den höchsten Wert hat. Zu diesem Zeitpunkt ist die Lüftungsanlage immer

noch nicht in Betrieb, und in den nächsten Stunden reduziert sich schon die von der BTA abgeführte Leistung.

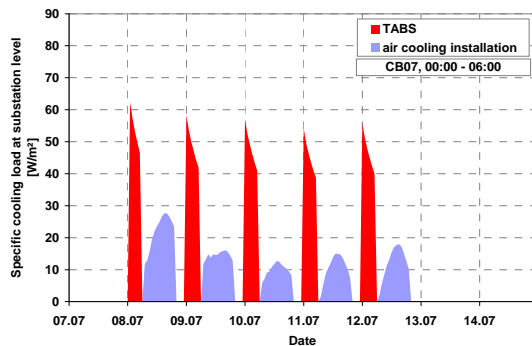


Abbildung 23: spezifischer Kältebedarfsverlauf für eine Beladung um 00:00

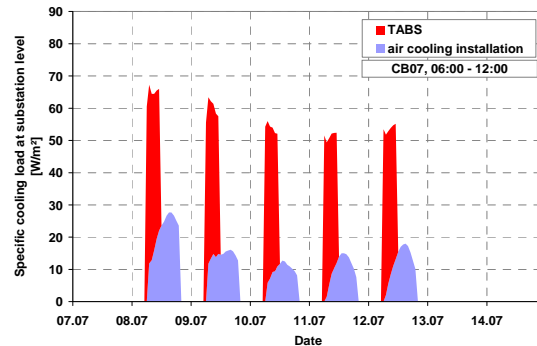


Abbildung 24: spezifischer Kältebedarfsverlauf für eine Beladung um 06:00

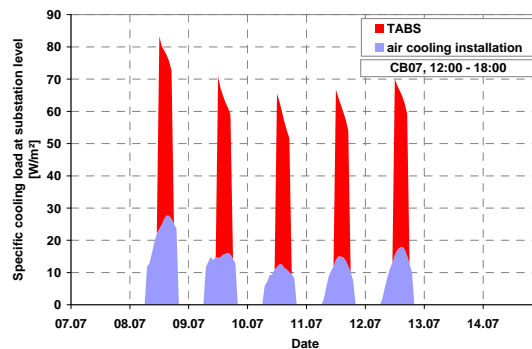


Abbildung 25: spezifischer Kältebedarfsverlauf für eine Beladung um 12:00

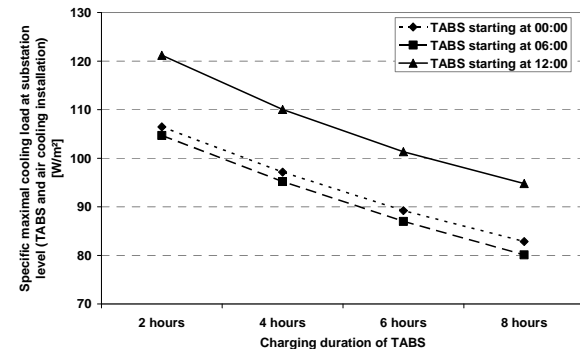


Abbildung 26: spezifische maximale Kühlleistung bei der Übergabestation

Der ungünstigste Fall ist in Abbildung 25 dargestellt und entspricht einer Situation, wo die BTA und die Lüftungsanlage gleichzeitig ihre maximalen Leistungen erreichen. In der betrachteten Woche beträgt die maximale Leistung 83 W/m², während dieser Wert im Fall einer Bauteilbeladung um 00:00 auf ca. 60 W/m² reduziert werden kann.

Abbildung 26 stellt die maximalen Leistungen während einer Kühlperiode dar (zwischen 01/05 und 30/09). Für eine Ladezeit von 6 Stunden erhöht sich die maximale Leistung um ca. 15%, wenn eine ungünstige Anlaufzeit angenommen wird. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich auch für andere Ladezeiten.

4.2.2. Einfluss der Ladezeit der BTA

Die Ladezeit der BTA (die Dauer, wie lang Wasser durch die Bauteile durchgeströmt wird) hat auch eine relevante Auswirkung auf die Lastprofile. Eine optimierte Ladezeit kann über die Analyse der Abbildung 27 bis Abbildung 30 definiert werden.

Die Ergebnisse entsprechen einem theoretischen Fall, bei dem bei sehr kurzen Ladezeiten der BTA sehr hohe Spitzenleistungen auftreten, wenn es keine Leistungsbegrenzung bei der Kälteaufbringungsseite gibt. In der Realität würde die Auslegung der Kälteaufbringungsseite und der Fernkälteübergabestation diese Spitzen nicht zulassen und als Ergebnis würde sich eine höhere Vorlauftemperatur ergeben. Eine Auslegung mit sehr kurzen Ladezeiten und hohen Spitzenleistungen würde nicht wirtschaftlich sein.

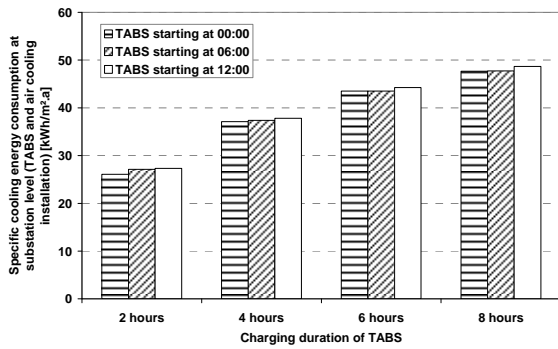


Abbildung 27: spezifischer Kühlenergiebedarf bei der Übergabestation, für die Kühlperiode 01/05-30/09, ohne Berücksichtigung der Fan coils

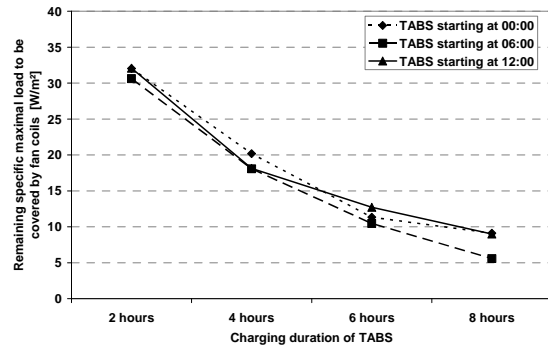


Abbildung 28: Kühllastanteil, der über die Fan coils abgeführt werden soll

Mit einer kurzen Ladezeit von 2 Stunden ergibt sich der kleinste Kühlenergiebedarf für die BTA und die Lüftungsanlage (ca. 26 kWh/m².a) (Abbildung 27). In diesem Fall würde aber die Spitzenlast bei der Bauteilbelastung um 28% höher als im Fall einer Ladezeit von 8 Stunden (Abbildung 26) sein. Am Ende der Entladezeit hat sich die Rücklauftemperatur im Wasserkreislauf mit der Betonkerntemperatur und der Oberflächentemperatur ausgeglichen. Dies entspricht der höchsten Temperaturspannung zwischen Vorlauf und Rücklauf im Wasserkreislauf, was im Fall einer theoretisch groß dimensionierten Übergabestation zu einer hohen Spitzenleistung führen würde. Damit die Temperatur-Komfortbedingungen gehalten werden können (Temperatur von 26°C) sollen die restlichen Lasten über die Fan coils gedeckt werden. Abbildung 29 zeigt, dass die Fan coils dafür im Fall einer Ladezeit von 2 Stunden während ca. 250 Stunden betrieben werden sollen. Der entsprechende Kühlenergiebedarf ist aber in Abbildung 27 und Abbildung 30 nicht berücksichtigt.

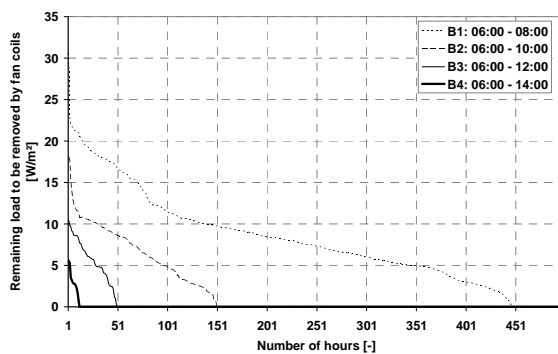


Abbildung 29: geordneter Kühllastanteil, der über die Fan coils abgeführt werden soll

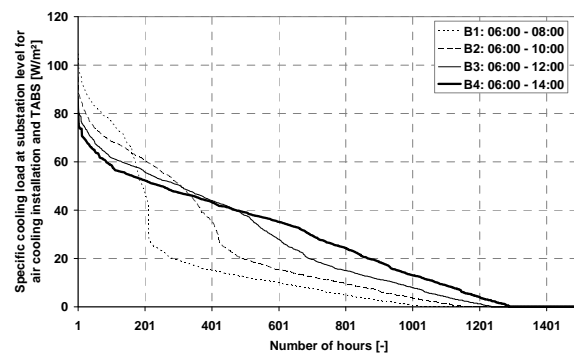


Abbildung 30: geordnete spezifische Kühlleistung (ohne Berücksichtigung der Fan coils), Beladung um 06:00

Auch wenn der Kühlenergiebedarf für die BTA und die Lüftungsanlage für Ladezeiten über 6 Stunden viel größer ist (ca. 40-50 kWh/m².a für die Kühlperiode 01/05-30/09) (Abbildung 27), reduzieren sich die spezifischen Lasten um ca. 20% während ca. 200 Stunden, wie es Abbildung 30 zeigt. Außerdem reduziert sich die Anzahl der Stunden, wo die Fan coils die restlichen Kühllasten abdecken sollen, unter 50 Stunden. Durch eine höhere Ladezeit der BTA reduziert sich der Kühllastanteil, der über Fan coils abgeführt wird. Dadurch ergeben sich höhere Komfortverhältnisse.

4.2.3. BTA, Energieverbrauch und Komfort

Abbildung 27 bis Abbildung 30 dienen nur zur partiellen Quantifizierung der Effekte verschiedener Betriebsstrategien der BTA. Beim Vergleichen zwischen BTA und konventionellen Luftkühlsystemen wurden die Berechnungen unter vergleichbaren Komfortbedingungen durchgeführt, um die Kühlenergiebedarfswerte auf der Basis gleichwertiger Nutzung gegenüberstellen zu können. Während der Projektlaufzeit ist dafür eine Publikation veröffentlicht worden [Pol, 2008], die auf diese Punkte eingeht und eine Methode zur korrekten Quantifizierung der Vorteile der BTA gegenüber konventioneller Luftkühlsysteme präsentiert. Die englische Version dieser Publikation ist im Anhang 2 beigelegt. Hier wurden die wesentlichen Erkenntnisse dieser Publikation auf Deutsch zusammengefasst. Die gesamte Beschreibung ist aus [Pol, 2008] im Anhang 2 zu entnehmen.

Durch Abbildung 31 wird angedeutet, wie die Ladezeit der BTA die Komfortbedingungen in den Räumen beeinflusst (Ergebnisse einer thermischen dynamischen Gebäudesimulation mit [TRNSYS]). Ein permanenter Betrieb der BTA garantiert in der untersuchten Woche, dass die operative Raumtemperatur nie über 26 °C hinausgeht. Reduziert sich die Ladezeit der BTA, dann reduziert sich auch die Wärmeaufnahme in den Bauteil, was zu einer Erhöhung der operativen Raumtemperatur führt. Bemerkenswert ist dabei, dass bei gleicher Ladezeit eine nächtliche Betriebsvariante (21:00 – 08:00) bessere Komfortbedingungen als eine tägliche Betriebsvariante (06:00 – 14:00) schafft. Dieser Unterschied ist auf den Speichereffekt der massiven Decken zurückzuführen.

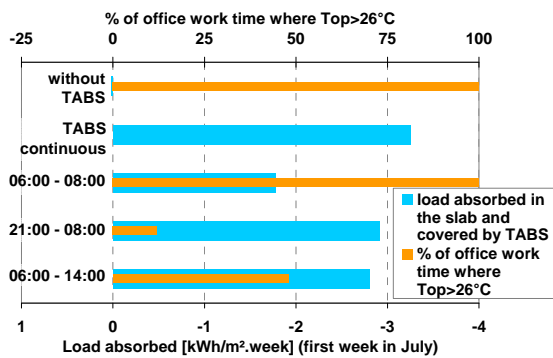


Abbildung 31: Wärmeaufnahme in die Decke und Komfortbedingungen

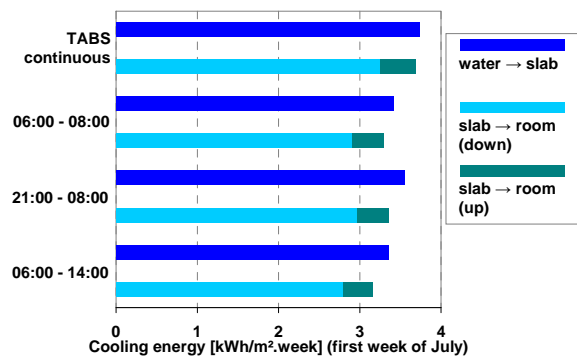


Abbildung 32: Kühlenergiebilanz an einer Decke

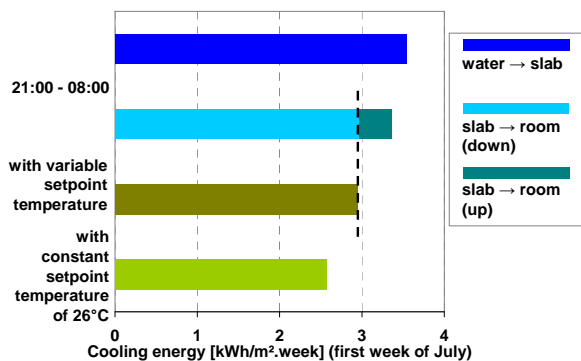


Abbildung 33: Vergleich zwischen BTA und Fan coils aufgrund des Kühlenergiebedarfs

Weiters kommt die gesamte in den Wasserkreislauf aufgenommene Wärmemenge nicht zu 100% aus dem unten liegenden gekühlten Raum. Wie es Abbildung 32 zeigt, macht der Wärmetransfer aus dem oben liegenden Raum ca. 10% des gesamten Wärmeaustauschs an den Deckengrenzen aus. Weiters besteht bei der Kühlenergiebilanzierung eines Bauteils in

der untersuchten Woche keine totale Übereinstimmung zwischen Wärmeabgabe an den Wasserkreislauf (dunkelblauer Balken) und Wärmeaufnahme aus den oben und unten liegenden Räumen. Die Zyklenlänge der Be- und Entladung des Bauteils ist auch von deren Zeitkonstante abhängig. Um die Bilanz genau zu prüfen müsste eine Variante untersucht werden, in der eine einmalige Kühlung des Bauteils erfolgen würde. Man sollte dann rechnen, wie viel Zeit der Bauteil braucht, um das Verhalten eines unaktivierten Bauteils wieder zu erreichen. Die Kühlenergiebilanzierung müsste dann auf diese Zeitspanne abgestimmt werden.

Die in [Pol, 2008] präsentierte Methode sieht eine erste Berechnung für einen mit BTA ausgerüsteten Raum vor. Die sich aus der Simulation ergebene Raumtemperatur bzw. operative Raumtemperatur wird dann als Solltemperatur für die Simulation eines Raumes mit Luftkühlsystem angenommen. Erst dann können beide Kühlsysteme verglichen werden, weil die Berechnungen zu vergleichbaren Kühlenergiebedarfswerten führen. Diese Tatsache ist auf Abbildung 33 sichtbar (Ergebnisse von thermischen dynamischen Gebäudesimulationen mit [TRNSYS]). Bei Nutzung eines variablen Sollwertes für die operative Raumtemperatur ergibt sich in der Variante mit Luftkühlsystem ein vergleichbarer Wert des Kühlenergiebedarfes. Wenn die Berechnung aber mit einem konstanten Sollwert (z. B. 26°C) gemacht wird ergeben sich Energiebedarfswerte, die nicht mit der Variante eines mit BTA ausgerüsteten Raums vergleichbar sind.

4.2.4. BTA als zeitlich verschiebbare Last

4.2.4.1. Tagesprofile

Abbildung 34 zeigt die Wirkung verschiedener Anlaufzeiten der BTA auf die entsprechenden Lastprofile für eine gegebene Ladezeit (6 Stunden). Die Spitzenleistung bei der Anlaufzeit reduziert sich, wenn die Bauteilbeladung später in der Nacht gestartet wird, weil der Bauteil „alleine“ Wärme schon während der ersten Stunden der Nacht (nach 20:00) abführen kann. Nach einer bestimmten Zeit (ca. um 00:00) ändert sich der Wert der Spitzenleistung nicht mehr mit der Anlaufzeit der BTA. In diesem Fall (Anlaufzeit ab 00:00) ist die Spitzenleistung um ca. 20% niedriger als wenn die Bauteilbeladung um 20:00 erfolgt.

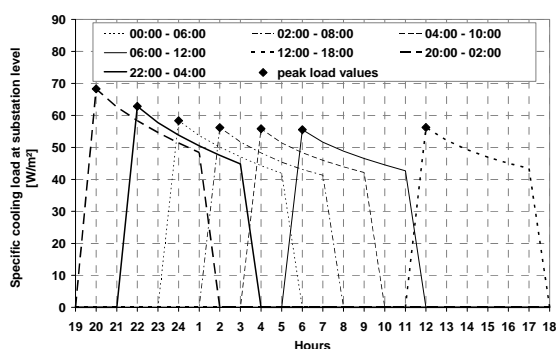


Abbildung 34: spezifische Kühllastprofile der BTA für verschiedene Anlaufzeiten (09/07 – 10/07)

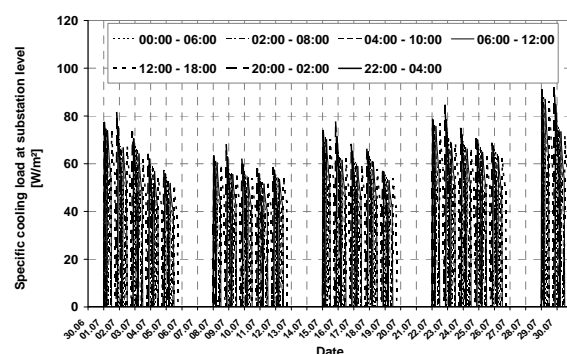


Abbildung 35: spezifische Kühllastprofile der BTA für verschiedene Anlaufzeiten (01/07 – 31/07)

4.2.4.2. Wochenprofile

Ein ähnliches Phänomen wird auf der Skala einer Woche festgestellt. Abbildung 35 zeigt für den Julimonat, dass Montag der Wochentag mit den höchsten Spitzenleistungen für den Betrieb der BTA ist. An den Wochenenden können die Bauteile während einer langen

Zeit Wärme aufnehmen und daher ist der Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf im Wasserkreislauf am Montag höher als an einem anderen Wochentag. Diesen Effekt könnte man mit der kontrollierten Nutzung der Verschattungselemente am Wochenende begrenzen.

4.2.4.3. Monatsprofile

Die Abhängigkeit der Spitzenleistungen mit der Jahreszeit wurde bei der Berücksichtigung der Außentemperaturbedingungen untersucht. Abbildung 36 zeigt die Lastprofile und den entsprechenden gleitenden Außentemperaturmittelwert über 168 Stunden (1 Woche).

Abbildung 37 zeigt die Abhängigkeit zwischen maximaler wöchentlicher Kühlleistung (Spitzenleistung am Montag) und gleitendem Außentemperaturmittelwert. Dabei kann eine grobe lineare Kennlinie ausgelesen werden, die z. B. in prognosegeführten Regelungskonzepten verwendet werden könnte.

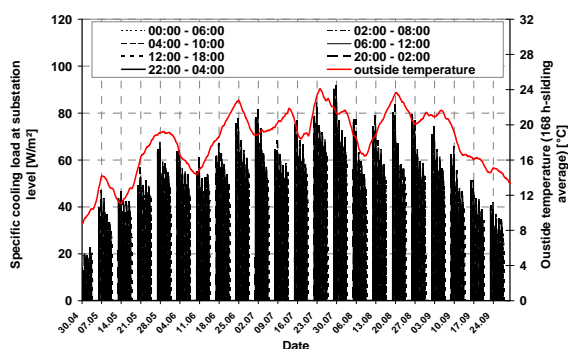


Abbildung 36: spezifische Kühllastprofile der BTA für verschiedene Anlaufzeiten (01/05 – 30/09)

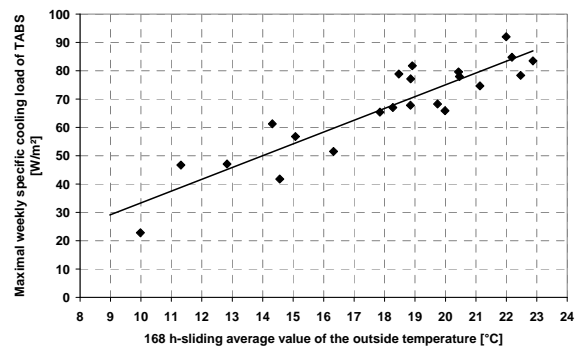


Abbildung 37: maximale wöchentliche spezifische Kühllast in Abhängigkeit des gleitenden Außentemperaturmittelwertes über die letzten 168 Stunden

4.3. Regelungsstrategien zum Betrieb der BTA

In 4.2.1, 4.2.2 und 4.2.4 differenzieren sich die Betriebsvarianten der BTA ausschließlich auf Basis zeitlicher Parameter, die Anlaufzeit und die Ladezeit der BTA. Im realen Betrieb eines solchen Systems erfolgt die Regelung auf Basis der Messung von Zustandsgrößen und deren Gegenüberstellung mit Sollwerten. Die neuesten Erkenntnisse im Bereich der Regelung der BTA sind in [Olesen, 2005], [Lehmann, 2008] und [Himmler, 2008] ausführlich dargestellt. In [Lehmann, 2008] ist vor allem eine neue Methode (UBB) zur gekoppelten Berücksichtigung des HLK Systems und der Regelungstechnik angeführt, die auf die Definition von Bandbreiten für die unbekannt internen Gewinnen beruht, auf welcher Basis die Entscheidung zwischen Heiz- oder Kühlfall dann getroffen wird. In [Himmler, 2008] wird, ausgehend von den Erkenntnissen von [Olesen, 2005] und den Betriebsdaten des Energieforums in Berlin, eine Methode zur wetterprognosegeführten Regelung präsentiert und auf Basis einer Gebäudesimulation evaluiert. Im Folgenden wurde die zeitlich gesteuerte Variante mit einer Variante verglichen, wo eine Senkung der Vorlauftemperatur die Erhöhung der Außentemperatur kompensiert (Kühlkurve). Dafür wurden die allgemeinen Betriebszeiten aus Tabelle 16 entnommen.

Tabelle 16: allgemeine Betriebszeiten für die BTA

Betriebszeiten	
Montag bis Freitag	von 21:00 bis 08:00
Wochenende	Start am Montag um 00:00

- Zeitlich gesteuerte Variante ohne Leistungsbegrenzung

$$T_{VL} = 19^{\circ}C$$

Die zeitlich gesteuerte Variante ohne Leistungsbegrenzung entspricht dem theoretischen Fallbeispiel aus dem Teil 4.2, wo eine konstante Vorlauftemperatur von 19°C angenommen wird und sich die Rücklauftemperatur aufgrund der im Bauteil aufgenommenen Wärme während der vordefinierten Ladezeit (siehe Tabelle 16) ergibt. Da der Temperaturunterschied nicht begrenzt ist, können sich bei kurzen Betriebszeiten hohe Spitzenleistungen ergeben.

- Zeitlich gesteuerte Variante mit Leistungsbegrenzung

$$T_{VL} = 19^{\circ}C \text{ wenn } T_{RL} \leq 22^{\circ}C$$

$$T_{VL} = T_{RL} - 3 \text{ wenn } T_{RL} \geq 22^{\circ}C$$

Falls die Rücklauftemperatur zu hoch ist, kann aufgrund der Leistungsbegrenzung der Kältemaschine die Vorlauftemperatur von 19°C nicht mehr gewährleistet werden. Die Leistungsbegrenzung lässt sich in dieser Variante durch eine Begrenzung von 3 K des maximalen Temperaturunterschieds zwischen Vorlauf und Rücklauf abbilden. Damit werden Spitzenleistungen auf Kosten der Komfortbedingungen vermieden.

- Mit außentemperaturabhängiger Vorlauftemperatur

$$T_{VL} = 0.35 \times (18 - T_{\text{Außentemperatur}}) + 18$$

In [Olesen, 2005] ist die Kühlkurve aus Abbildung 38 angenommen worden. Je höher die Außentemperatur, desto niedriger die Vorlauftemperatur; dadurch werden die höheren Kühllasten über eine Senkung der Vorlauftemperatur kompensiert. In dieser Variante gibt es keine Leistungsbegrenzung in der Simulation. Dabei soll aber auf Kondensatbildungsrisiko bei hohen Außentemperaturen und relativen Feuchtigkeitswerten geachtet werden und die Kühlkurve aus Abbildung 38 sollte bei hohen Außentemperaturen bei einem minimalen Wert der Vorlauftemperatur begrenzt werden, um die Taupunktunterschreitung zu vermeiden.

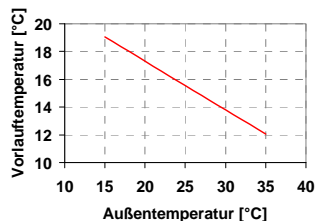


Abbildung 38: Beispiel einer Kühlkurve für die BTA

In [Olesen, 2005] sind auch Regelungskonzepte untersucht, wo die durchschnittliche Wassertemperatur gesteuert wird. Im Fall, wo die durchschnittliche Wassertemperatur konstant gehalten wird (z. B. auf 22°C), ergeben sich schlechtere Komfortbedingungen. Dies

wurde auch hier bestätigt. Im Fall, wo die mittlere Wassertemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur und der operative Temperatur angenommen wird, ist aber die in [Olesen, 2005] vorgeschlagene Funktion nicht nachvollziehbar.

Alle drei untersuchten Varianten ergeben für die Monate Juni bis August sehr vergleichbare Kühlenergiebedarfswerte, wie es Tabelle 17 zeigt. Für die untersuchte Nachtbetriebsvariante (21:00 – 06:00) ist daher eine detaillierte Abbildung des Regelungskonzeptes im Simulationsmodell nicht unbedingt notwendig, um den gesamten Kühlenergiebedarf zu rechnen. Um die Allgemeingültigkeit dieser Aussage zu bestätigen sollten auch andere Regelungsstrategien untersucht werden.

Tabelle 17: Kühlenergiebedarf für die untersuchten Regelungsstrategien.

	Zeitlich gesteuerte Variante ohne Leistungsbegrenzung	Zeitlich gesteuerte Variante mit Leistungsbegrenzung	mit außentemperaturabhängiger Vorlauftemperatur
Kühlenergiebedarf Juni - August	20,6 kWh/m ²	20,9 kWh/m ²	21,3 kWh/m ²

Die Stundenverteilung während der Arbeitszeiten in den verschiedenen Temperaturbereichen zeigt, dass auch die Variante mit Leistungsbegrenzung noch komfortable Innenraumverhältnisse schafft (während ca. 10% der Arbeitszeit liegt die operative Temperatur über 26°C, siehe Abbildung 39). Die entsprechenden geordneten Leistungswerte sind auf Abbildung 41 zu finden.

Die beste Variante aus Komfortsicht ist diejenige, wo die Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur angenommen wird. Aufgrund der hohen Temperaturunterschiede ergeben sich aber Spitzenleistungen von über 40 W/m² (Abbildung 40). Mit der Leistungsbegrenzung würden diese Werte im realen Fall aber nicht Zustande kommen.

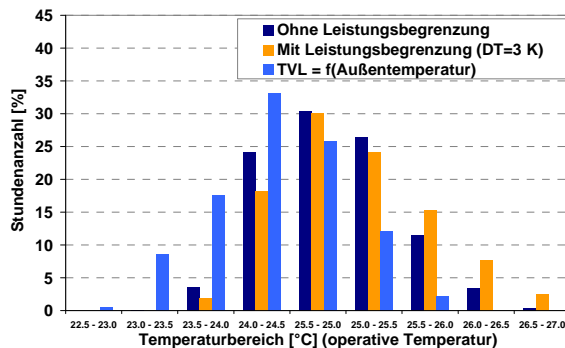


Abbildung 39: Verteilung in den verschiedenen Temperaturbereichen

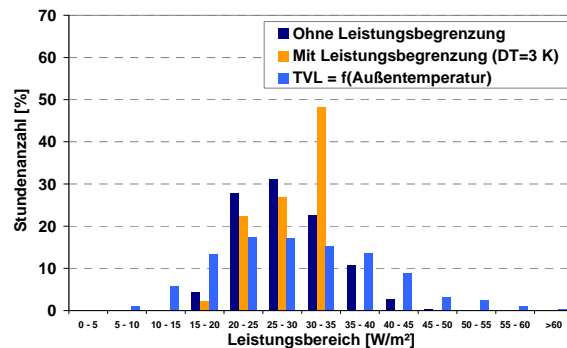


Abbildung 40: Verteilung in den verschiedenen Temperaturbereichen

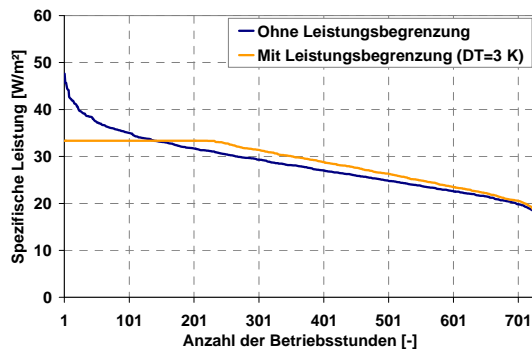


Abbildung 41: geordnete Leistungswerte

4.4. Leistungskurven und gesamter Kälteenergiebedarf

Für zwei gegebenen Betriebsvarianten der BTA wurde nun der gesamte Kälteenergiebedarf für die vier repräsentativen Gebäude (CB07, CB11, CB13 und CB17) gerechnet.

Abbildung 42 und Abbildung 44 zeigen die spezifischen Leistungskurven für die Nachtbetriebsvariante (21:00 – 09:00), jeweils mit und ohne Leistungsbegrenzung bei der BTA. Für alle Gebäude befinden sich die Kurven in einem ähnlichen Bereich.

Abbildung 43 und Abbildung 45 zeigen die spezifischen Leistungskurven für einen dauernden Betrieb der BTA, jeweils mit und ohne Nutzung der Sonnenschutzeinrichtungen (die entsprechenden Nutzungsparameter sind in Tabelle 15 beschrieben). Dabei ist anzumerken, dass das Objekt CB07 wesentlich auf Änderungen der Solareinträge reagiert. Die spezifische Kälteleistung liegt über der von den anderen Objekten im Fall, wo die Jalousien nicht genutzt werden. Wie in Tabelle 13 ersichtlich ist CB07 das Objekt mit dem größten nach Südwesten orientierten Glasanteil in der Fassade (45%) und verfügt auch über nach Südosten orientierte Fenster. Die Objekte CB13 und CB17 haben eine ähnliche Orientierung wie CB07 (siehe Abbildung 20) aber weniger Glasanteil in der Fassade, was den Unterschied erklären kann.

Die Varianten mit Nachtbetrieb und mit dauerndem Betrieb der BTA führen zu unterschiedlichen Leistungskurven und unterschiedlichen Werten des gesamten Kälteenergiebedarfs (Tabelle 18). Die Erklärungen dafür sind:

- Durch die längere Betriebszeit in der Variante mit dauerndem Betrieb der BTA ergibt sich natürlich eine größere Anzahl an Vollbenutzungsstunden. Die Leistungskurve ist daher auch regelmäßiger als in der Variante mit Nachtbetrieb der BTA.

- Da die BTA zeitlich gesteuert wird und meistens die Innenraumtemperatur unter 26°C liegt (auch bei der Nachtbetriebsvariante, siehe Abbildung 39) gibt es in der Simulation wenige Stunden, wo die Fan coils den restlichen Kühllastanteil (die Solltemperatur ist 26°C) abführen sollen. Beide Varianten führen daher zu unterschiedlichen Temperaturprofilen in den Räumen und sind daher aus energetischer Sicht nicht vergleichbar, deswegen auch die unterschiedlichen Werte des Kühlenergiebedarfs in Tabelle 18. Die Vergleichbarkeit kann nur dann erreicht werden, wenn die in 4.2.3 eingeleitete und im Anhang 2 beschriebene Methodik verfolgt wird. Dabei soll als Raumtemperatursollwert für die Nachtbetriebsvariante die sich aus der Variante mit dauerndem Betrieb der BTA ergebene Raumtemperatur genommen werden. Das Ergebnis daraus ist ein erhöhter Nutzen der Fan coils während der Tagesstunden, das sich durch eine Verlängerung der Leistungskurve in Abbildung 44 auswirkt (siehe die Kurve „CB17 mit Sollwert aus dauerndem Betrieb“). Dadurch erhöht sich auch der gesamte Kühlenergiebedarf von 33 kWh/m².yr auf 41 kWh/m².yr, was mit dem Wert des Kühlenergiebedarfs für die Variante mit dauerndem Betrieb der BTA (42 kWh/m².yr) vergleichbar ist (siehe Werte in Tabelle 18).

In Abbildung 42 bis Abbildung 45 sind die Leistungskurven für die reine Büroraumkühlung dargestellt. Wie in Tabelle 7 beschrieben sind in den Objekten auch weitere Nutzungen angedacht und zum Teil schon vorhanden. Da die Büronutzung in TownTown mit 93% der Nutzfläche maßgeblich für den Kühlenergiebedarf ist wurde im Folgenden eine Grundlast zur Abbildung der Kühlung verschiedener Serverräume pauschal mit einer Kühlleistung von 4 bis 8 kW pro Geschossdecke angenommen. Es ergeben sich daraus die gesamten Leistungskurven aus Abbildung 46 und Abbildung 47.

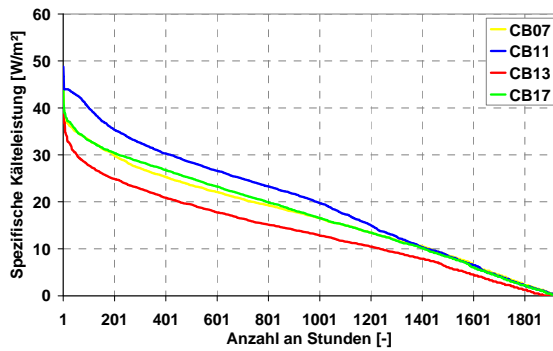


Abbildung 42: spezifische Leistungskurve, Variante mit Nachtbetrieb der BTA und mit Leistungsbegrenzung

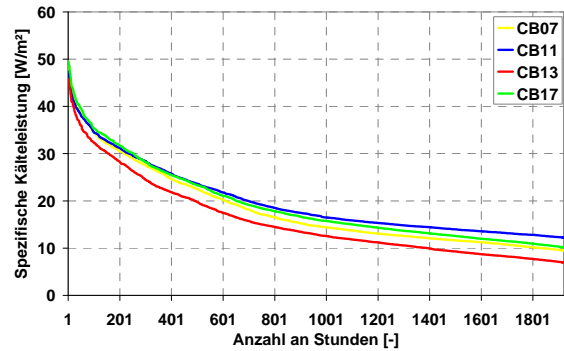


Abbildung 43: spezifische Leistungskurve, Variante mit dauerndem Betrieb der BTA und mit Sonnenschutz

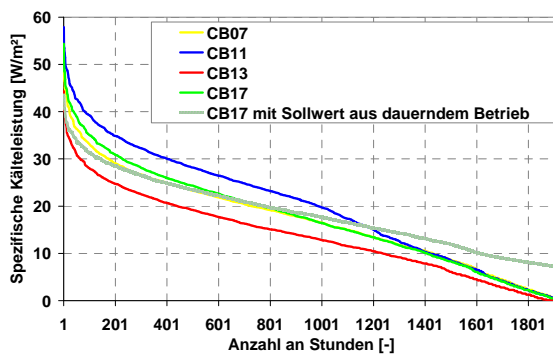


Abbildung 44: spezifische Leistungskurve, Variante mit Nachtbetrieb der BTA und ohne Leistungsbegrenzung

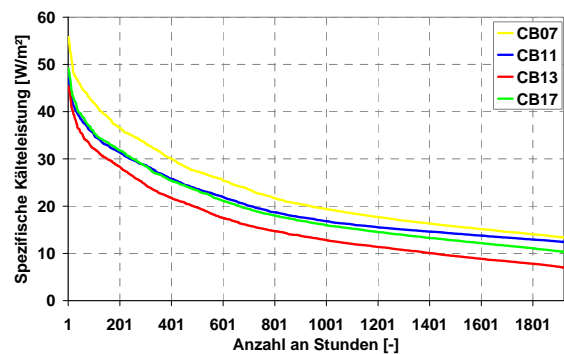


Abbildung 45: spezifische Leistungskurve, Variante mit dauerndem Betrieb der BTA und ohne Sonnenschutz

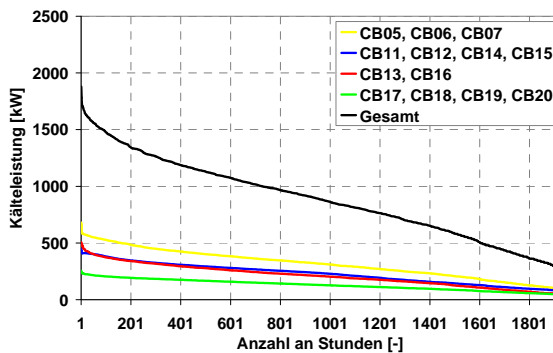


Abbildung 46: Leistungskurve, Variante mit Nachtbetrieb der BTA und mit Leistungsbegrenzung

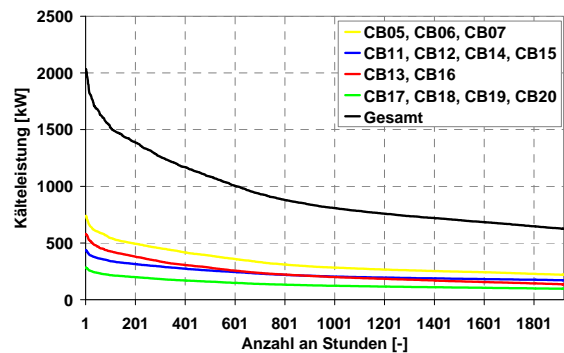


Abbildung 47: Leistungskurve, Variante mit dauerndem Betrieb der BTA und mit Sonnenschutz

Ein allgemeiner Vorteil der Fernkälte besteht darin, dass bei vielen angeschlossenen Gebäuden die Spitzenleistungen nicht gleichzeitig überall auftreten, und daher muss die in ein Fernkältenetz einspeisende Kältemaschine nicht als Summe von einzelnen dezentralen Kältemaschinen ausgelegt werden; zur Dimensionierung kann ein Gleichzeitigkeitsfaktor genutzt werden. Die Leistungskurve „Gesamt“ von Abbildung 46 und Abbildung 47 berücksichtigt diese Gleichzeitigkeit, weil die Gesamtkälteleistung dynamisch gerechnet wird. Wenn diese Leistungskurve mit der Summe der Leistungskurven der einzelnen Gebäude verglichen wird, ergibt sich aber in diesem Fall nur ein Unterschied von ca. 20 kW. Durch die

Annahme, dass alle Objekte einer Gebäudekategorie den gleichen Kältebedarfsverlauf aufweisen, und dass sich am Ende nur vier unterschiedlichen Verläufe ergeben, wird der erwartete Unterschied unterschätzt. Es ist zu erwarten, dass bei der Berücksichtigung der Kältebedarfsverläufe jedes einzelnen Objektes einen größeren Unterschied festzustellen wäre.

Tabelle 18: spezifischer gesamter Kühlenergiebedarf (Monate Mai bis September)

Variante	CB07 mit Sonnen- schutz	CB07 ohne Sonnen- schutz	CB11 mit Sonnen- schutz	CB11 ohne Sonnen- schutz	CB13 mit Sonnen- schutz	CB13 ohne Sonnen- schutz	CB17 mit Sonnen- schutz	CB17 ohne Sonnen- schutz	CB17 mit Soll- wert
Nachtbetrieb der BTA (21:00 – 06:00)	33		38		26		33		41
Dauernder Betrieb der BTA	40	51	45	45	33	33	42	42	
Grundlast (Serverräume...)	27	27	39	39	18	18	37	37	37

Tabelle 18 gibt einen Überblick über den gesamten Kühlenergiebedarf der verschiedenen Objekte für die Monate Mai bis September. Dabei ist anzumerken, dass die Objekte CB11, CB13 und CB17 sehr wenig empfindlich gegenüber Solareinträgen sind (kleinerer Fensterflächenanteil als in CB07). Der Kühlenergiebedarf ändert sich in der ersten Kommastelle.

$$f = \frac{N \times \dot{Q}_{\max} - \sum_{i=1}^N \dot{Q}_i}{N \times \dot{Q}_{\max}} \quad (\text{Eq 1})$$

wo N die Stundenanzahl in der untersuchten Zeitperiode, \dot{Q}_i die mittlere Kälteleistung während der Stunde i und \dot{Q}_{\max} die maximale Kälteleistung in der untersuchten Zeitperiode sind.

Der Schwankungsindex f ist gleich 0 im Fall eines bandförmigen Kältebedarfsverlaufes (Grundlast) und nähert sich dem Wert 1 je ungleichmäßiger der Kältebedarfsverlauf wird.

Tabelle 19: Schwankungsindex für verschiedene Betriebsstrategien der BTA in den Monaten Mai bis September

	Schwankungsindex f
Dauernder Betrieb (mit Sonnenschutz)	0,67
Nachtbetrieb ohne Leistungsbegrenzung (mit Sonnenschutz)	0,72
Nachtbetrieb mit Leistungsbegrenzung (mit Sonnenschutz)	0,68
Ohne BTA	0,70

Für die 3.672 Stunden der Monate Mai bis September ergeben sich die Schwankungsindexwerte der Tabelle 19. Es wird bestätigt, dass die höchste Gleichmäßigkeit des Kältebedarfsverlaufs in der Variante mit dauerndem Betrieb der BTA erreicht wird (0,67). Im Fall eines Nachtbetriebes ohne Leistungsbegrenzung erhöht sich der Schwankungsindex bis auf dem Wert 0,72. Eine Berechnung ohne BTA ergibt einen Wert von 0,70.

5. Zusatzkomponenten zur Reduzierung des Einsatzes von Kühltürmen

Der Teil 5 ist im Rahmen einer Diplomarbeit [Kokalj, 2006] erarbeitet worden. Es werden hier nur die projektrelevanten Aspekte präsentiert.

In den Teilen 3 und 4 werden zwei Möglichkeiten präsentiert, die Kälteleistung einer Kältemaschine und die entsprechende Rückkühlleistung über verbraucherseitige Maßnahmen zu reduzieren: über eine optimale Gebäudeauswahl und die Kältespeicherung in den Gebäudespeichermassen. Es besteht auch die Möglichkeit, über im Netz integrierte Zusatzkomponenten denselben Effekt zu erzielen.

In Abbildung 48 ist die Ausgangslage dargestellt. Die Kältemaschinen (AKM und KKM) werden über Kühltürme (KT) rückgekühlt. Diese Darstellung mit einem Kühlturm je Kältemaschine dient zur Erklärung der Vorgehensweise und bildet nicht das reale Schaltschema von TownTown ab.

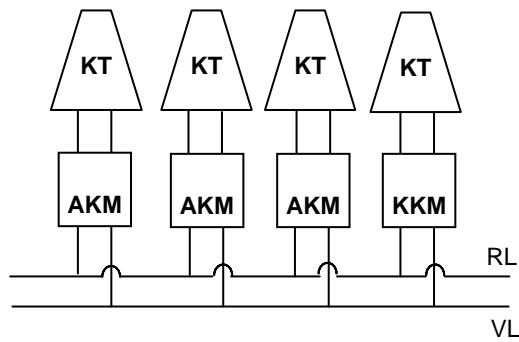


Abbildung 48: Ausgangslage

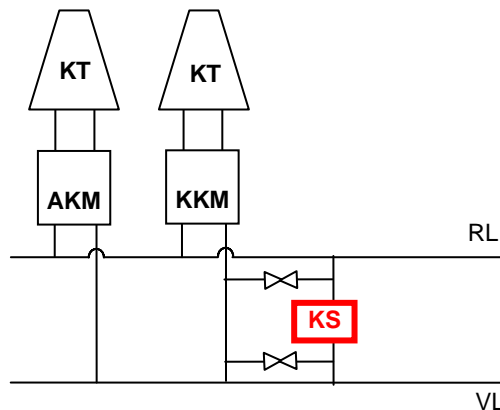


Abbildung 49: Reduzierung der Kälteleistung durch Einsatz eines Speichers

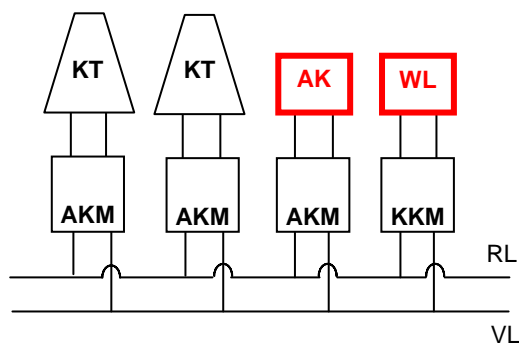


Abbildung 50: Abwärmeabfuhr ohne Reduzierung der Kälteleistung

Legende:

- KS Kaltwasserspeicher
- WL Wasserlauf
- AK Abwasserkanal

Durch den Einsatz von Kältespeichern kann Kälte in Zeiten niedrigen Kältebedarfs gespeichert werden und bei hohem Bedarf wieder abgegeben werden, um zu dieser Zeit keine weitere Kältemaschine zu betreiben. Dadurch soll eine Reduzierung der Kälteleistung erreicht werden, wodurch wiederum der Einsatz von Kühltürmen reduziert werden kann (Abbildung 49). Die Auslegung der Kältemaschinen kann auf einem niedrigen Leistungsniveau erfolgen. Der Effekt ist vergleichbar mit dem der BTA, wobei die Speicherfähigkeit der Bauteile begrenzt ist und Netzspeicher über mehrere Auslegungsmöglichkeiten verfügen.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Abwärmenutzung zur Warmwasserbereitung dar. Diese kann entweder direkt oder indirekt über eine Wärmepumpe erfolgen.

Sollte die Rückkühlmenge trotz der Durchführung der oben genannten Möglichkeiten immer noch zu hoch sein, kommen alternative Rückkühlungskonzepte zum Einsatz. Dabei wird die Abwärme über diverse Einrichtungen abgeführt. Eine mögliche Abfuhr der Abwärme über das Abwasserkanalsystem (AK) oder einen Wasserlauf (WL) stehen im Fall von TownTown in Wien dabei im Mittelpunkt (siehe Abbildung 50).

5.1. Nutzung von Netzspeichern

5.1.1. Speichertypen

Durch die Integration von Kältespeichern in ein Kältenetz kann eine Verringerung der Rückkühlmenge erreicht werden, indem Kältemaschinen mit geringer Leistung dauernd auf Vollast betrieben werden und in Zeiten geringen Kältebedarfs (nachts, Wochenende) den Kältespeicher beladen. Steigt der Kältebedarf, wird dieser zugleich durch die Kältemaschine und den Kältespeicher gedeckt. Je nach Betriebsstrategie übernimmt die Kältemaschine nur mehr einen Teil der Kühllast (Grundlast), der Rest wird vom Kältespeicher gedeckt.

Verschiedene Kältespeichersysteme mit unterschiedlichen Speichermedien, Beladungs- und Entladungsvorgängen sind derzeit im Einsatz. Die grundlegenden Speichermedien sind Wasser, Eis, Eisbrei und eutektische Salze. Tabelle 20 gibt einen allgemeinen Überblick über die verfügbaren Technologien und Richtwerte für deren Speicherkapazitäten. Die Untersuchung des Einsatzes eines Speichers ist ein komplexes multidimensionales Problem, wo die Kopplung zwischen technischen und ökonomischen Faktoren behandelt werden soll, und es sollen dafür sehr detaillierte Machbarkeitstudien realisiert werden [Urbanek, 2006], um eine optimierte Lösung in Hinsicht auf die vielen Einflussparameter zu finden.

Tabelle 20: Übersicht über Speichersysteme [Hofmann, 2003]

Speichersystem	Speichermedium	Kälte­träger beim Laden	Kälte­träger beim Entladen	Speicher­kapazität [kWh/m ³]
Kaltwasserspeicher	Wasser	Wasser	Wasser	7 (bei $\Delta T=6$ K)
externe Schmelze	Eis	Sole	Wasser	40 bis 44
interne Schmelze	Eis	Sole	Sole	53
ice harvesting	Brucheis	Kältemittel	Wasser	-
encapsulated ice	Eis	Sole	Sole	53
PCM Speicher	PCM	Sole	Sole	-

Eine qualitative Entscheidungsgrundlage für den Einsatz eines Speichers sowie die Analyse der Kriterienerfüllung für TownTown ist in Tabelle 21 gegeben. Die Sensitivität des Kältebedarfsverlaufs mit der Betriebsstrategie der BTA wird im Teil 4 analysiert. Grundsätzlich wird durch die BTA ermöglicht, gleichmäßige Kältebedarfsverläufe zu erhalten, wie es vor allem Tabelle 19 zeigt. Deswegen wäre aus dieser Sichtweise ein zusätzlicher Netzspeicher nicht unbedingt notwendig.

Alle weiteren Punkte (Platzverfügbarkeit, Bengrenzung der Antriebsenergiemenge...) treffen für TownTown nicht zu. Bedeutend ist auch vor allem, dass die Leistungsbedarfsverläufe bekannt sein sollen, bevor die Entscheidung für einen Kältespeicher getroffen wird. Die endgültige Entscheidung sollte vor allem auf Basis realer Messwerte gemacht werden.

Tabelle 21: Einsatzfälle eines Kältespeichers

Speicher sollen eingesetzt werden, wenn...	In TownTown	Speicher sollten nicht eingesetzt werden, wenn...	In TownTown
- die maximale Kälteleistung bedeutend höher ist als die Grundlast (große Lastschwankungen).	Bedingt	- die Kälteleistungen wenig schwanken und die Spitzenlasten geglättet sind.	Bedingt
- an dem Standort Antriebsenergie nur begrenzt zur Verfügung steht.	Nein	- der erforderliche Platz für einen Speicher begrenzt ist.	Ja
- in der Tarifstruktur des Energieversorgers hohe Lastkosten enthalten sind.	Nein	- die Lastkosten in Spitzenzeiten niedrig sind.	Nein
- bestehende Tanks, welche sich zur Kältespeicherung eignen, verfügbar sind.	Nein	- die Leistungsbedarfsverläufe nicht gut bekannt sind oder schwierig vorhersehbar sind (bei einer völlig neuen Anlage).	Ja
- ein bestehendes Kältesystem erweitert wird.	Nein		

In Tabelle 22 sind die allgemeinen Einsatzbereiche der verschiedenen Speichertypen zusammengefasst.

Tabelle 22: Einsatzbereiche verschiedener Speichertypen

Speichertyp	Einsatzbarkeit	Einsatz nicht empfohlen
Kaltwassertankspeicher (alle Typen)	<ul style="list-style-type: none"> - in Systemen mit großen Leistungen. - wo Speicher mit großen Volumina eingesetzt werden können, wodurch die Anschaffung mehrerer Speicher mit kleinen Volumina wegfällt. - wenn eine Synergie mit vorhandenen Vorrattanken für Brandschutz besteht. 	<ul style="list-style-type: none"> - bei Platzmangel oder nicht geeignetem Aufstellungsort. - wenn keine Wasseraufbereitung vorhanden oder geplant ist. - wenn die Rücklauftemperatur im Fernkältenetz nicht hoch genug ist.
Eisspeicher (alle Typen)	<ul style="list-style-type: none"> - wenn nicht genügend Platz für Kaltwassertankspeicher vorhanden ist. - wenn tiefe Wassertemperaturen benötigt sind - wenn hohe Speicherkapazitäten benötigt sind 	<ul style="list-style-type: none"> - Bei gewünschtem niedrigen Energieverbrauch
Aquiferspeicher	<ul style="list-style-type: none"> - Wenn die Grundwasserbedingungen geeignet sind. 	<ul style="list-style-type: none"> - Wenn Bohrarbeiten nicht möglich sind oder die Grundwasserbedingungen nicht geeignet sind.

Um eine genaue Machbarkeitsstudie für den Einsatz eines Speichers in einem Fernkältenetz zu realisieren sollte der in [Urbanek, 2006] am Beispiel des Fernkältenetzes Chemnitz präsentierte Ansatz verfolgt werden. Diese sehr umfangreiche Machbarkeitstudie fokussiert auf Kaltwassertankspeicher und präsentiert die Ergebnisse einer breiten Sensitivitätsanalyse über die verschiedenen Auslegung- und Betriebsparameter (z. B. Speichervolumen und Leistungsanteil der Absorptionskältemaschinen).

5.2. Abwärmenutzung einer Kältemaschine

Eine Möglichkeit, den Einsatz von Kühltürmen zu vermeiden, ist die Nutzung der in den Kältemaschinen anfallenden Abwärme. Dadurch wird keine Reduktion der Kältemaschinenleistung vorgenommen, weshalb die Rückkühlmengen auch nicht verringert werden. Es wird nur ermöglicht, dass eine geringere Wassermenge für die Rückkühlung verbraucht wird, weil der Rückkühlungskreislauf mit der Nutzung einer Wärmepumpe gekoppelt ist oder zur direkten Nutzung der Abwärme verwendet wird.

5.2.1. Direkte Abwärmenutzung

Durch die niedrige Temperatur der Abwärme sind die möglichen Einsatzgebiete beschränkt. Exergetisch gesehen ist aber die direkte Nutzung der Abwärme in Prozessen, wo Wärme auf niedrigem Temperaturniveau gebraucht wird, die sinnvollste Variante. Damit wird vermieden, wieder Primärenergie zur Wärmezeugung einzusetzen. Zur Abwärmenutzung sollen vor allem Synergien zwischen der Kälteanlage und ihrer nahen geographischen Umgebung gesucht werden, was nur im Rahmen eines integrierten Planungsprozesses erfolgen kann. Auf dieser Basis könnten sogar Geschäftsmodelle entwickelt werden, wo der Abwärme ein monetärer Wert gegeben wird.

Die Abwärme auf einem Temperaturniveau von ca. 30°C könnte in den folgenden Anwendungen genutzt werden:

- Wassererwärmung von Wasserbecken in Schwimmbädern: in den bestehenden Schwimmbädern werden sehr oft noch Gaskessel eingesetzt. In den letzten Jahren sind immer öfters solare Absorberanlagen zum Einsatz gekommen, die für die Wasserbeckenerwärmung im Sommer sehr geeignet sind. Im Fall, wo Kältemaschinen auch im Winter betrieben werden sollen, z. B. zur Kühlung eines Rechenzentrums oder eines Krankenhauses, könnte die anfallende Abwärme direkt zur Nutzung eines nahe liegenden Wasserbeckens in einem Hallenbad genutzt werden.
- Flächenheizsysteme in Gebäuden (z. B. BTA): Flächenheizsysteme können mit niedrigen Vorlauftemperaturen betrieben werden. Die Rückkühlung einer Kältemaschine könnte über mit einer Flächenheizsystem gekoppelt werden.
- Rasenheizung in Stadien: Fußballstadien werden immer mehr mit Rasenheizungssystemen ausgerüstet, die den Boden Frost- und Schneefrei halten sollen, um eine ganzjährige Nutzung des Feldes zu ermöglichen.
- Straßenheizung (Brücken, Parkplätze, Eingangsbereiche bei speziellen öffentlichen Einrichtungen (U-Bahnstationen, außen liegende Bahnsteige in Bahnhöfen...)): verschiedene öffentliche Bereiche sollen zur Sicherheit Frost- und Schneefrei gehalten werden.

Dabei ist eindeutig, dass die meisten Anwendungen durch einen saisonalen Betrieb charakterisiert sind, und dass im Winter Kältemaschinen nur bedingt genutzt werden. Im Winter bleiben die Energiekosten der konventionellen Rückkühlanlagen auch eher gering, weil meistens direkt über die kühle Außenluft rückgekühlt werden kann. Der Vorteil ist eher auf der Nutzungsseite zu finden, wo die direkte Abwärmenutzung vermeiden kann, Öl- oder Gaskessel einzusetzen, wie es bei Fußballstadien noch häufig vorkommt.

Diese Synergienutzungen werden dann interessant, wenn Kühlenergie in großen Mengen auch im Winter gebraucht wird. Bei Rechenzentren, Krankenhäusern, Lebensmittelmärkten oder in der Industrie könnte die Abwärme direkt genutzt werden.

In [Petrák, 2004 (A)] wird das Hauptaugenmerk auf die Erhöhung der Verflüssigungstemperatur zur direkten Abwärmenutzung gelegt. Die Abwärmenutzung erfolgt über einen Enthitzer und einen Verflüssiger. Der ungenutzte Teil der Abwärme soll aber auch über einen zweiten Verflüssiger und einen entsprechenden Kühlturm an die Umgebung abgeführt werden können. In [Petrák, 2004 (A)] wird vor allem die Definition einer energetischen Kennzahl einer Kältemaschine für den Fall, wo Abwärme genutzt wird, eingeführt. Diese Kennzahl ist als Verhältnis zwischen der Zunahme an ausgenutzten Wärme und der entsprechenden Zunahme an Antriebsenergie definiert. Die Energiezunahmen sind immer in Verbindung mit einem Referenzzustand formuliert, wo z. B. keine Abwärme genutzt wird. Wenn die ausgenutzte Wärme dem Wärmeertrag der Wärmepumpe im Heizmodus entspricht, entspricht diese Kennzahl der Arbeitszahl der Wärmepumpe im Heizmodus.

Es wird dann aufgezeigt, wie diese Kennzahl mit der zu erreichenden Warmwassertemperatur abnimmt und es wird empfohlen, Warmwassertemperaturwerte von

max. 50-55°C in dieser Konfiguration zu erreichen. In dem aufgezeigten Beispiel (Ammoniakkältemaschine mit einer Verdampfungstemperatur von -10°C) erreicht die energetische Kennzahl Werte von ca. 7 bis 19 bei einer Warmwassertemperatur von 35°C und ca. 3 bis 7 bei einer Warmwassertemperatur von 55°C. Weiters erhöht sich die energetische Kennzahl bei steigender Verflüssigungstemperatur.

Im Fall einer AKM ist dies nicht gerechnet worden, weil die Erhöhung der Verflüssigungstemperatur nur über die Erhöhung der Antriebstemperatur der Kältemaschine erreichbar ist, und ist soweit nicht sinnvoll.

5.2.2. Indirekte Abwärmenutzung

In [Petrák, 2004 (B) und (C)] wird anhand von KKM diskutiert, wie Wärmepumpen zur Warmwasserbereitung effizient eingebunden werden können. Bei KKM ist die Nutzung der Abwärme sinnvoll, da es sich um einen elektrisch betriebenen Prozess handelt, und Wärme sonst nicht verfügbar ist. Bei AKM bleibt diese Möglichkeit fraglich, weil Antriebswärme sonst auch vorhanden ist: die Generatöraustrittstemperaturen sind immer hoch genug (noch über 70°C), um weitere Wärmeverbraucher in Serie mit den Kältemaschinen anzuschalten. In [Petrák, 2004 (B)] wird vor allem auf die verschiedenen Schaltungsvarianten zwischen Kältemaschine und Wärmepumpe eingegangen (Unterkühlung, Wasservorwärmung und Enthitzertrennung) und die Berechnung der entsprechenden Leistungszahlen wird auch anhand eines Beispiels vorgeführt, um die bestgeeignete Variante zu definieren.

5.2.3. Schlussfolgerungen

Die Abwärmenutzung kann entweder direkt oder indirekt über eine Wärmepumpe erfolgen. In Fällen wie TownTown, wo ein Teil des Kältebedarfs von mit Fernwärme angetriebenen AKM abgedeckt wird, wird der Einsatz einer Wärmepumpe nicht empfohlen, weil Wärme noch in der Rücklaufleitung der Fernwärme zu Verfügung steht und noch ausgenutzt werden könnte. In diesen Fällen macht eine direkte Abwärmenutzung einen Sinn, wenn dadurch auf einen bestehenden Öl- oder Gaskessel verzichtet werden kann.

5.3. Alternative Rückkühlung

Bei der Untersuchung alternativer Konzepte zur Rückkühlung von AKM wird im Speziellen auf eine Wärmeabfuhr über einen Abwasserkanal und einen Wasserlauf eingegangen. Diese beiden Varianten wären im Fall von TownTown vorhanden, weil sowohl ein Hauptsammelkanal als auch der Donaukanal nahe am Standort liegen.

5.3.1. Abwasserkanalsystem

Eine Abwärmeabfuhr über den rechten Hauptsammelkanal im 3. Wiener Gemeindebezirk stellt zwar eine Alternative zur Rückkühlung mit Kühltürmen dar, jedoch ist diese Möglichkeit mit einigen Nachteilen behaftet.

Es wird in keiner Rechtsvorschrift angegeben, inwieweit die Abwassertemperatur bei einer Wärmezufuhr in den Abwasserkanal ansteigen darf. Diesbezügliche Vorschriften bestehen nur bei einer Einleitung von Flüssigkeiten, nicht bei einer Wärmezufuhr.

Bei einer Abzuführenden Wärmeleistung von 1 MW und einem Volumenstrom von 3 m³/s im Hauptsammelkanal (Mindestvolumenstrom) wäre eine Temperaturerhöhung von ca. 0,8 K zu erwarten. Es würde dafür Wärmeaustauscherfläche von ca. 600 m² benötigen, die aber im Sammelkanal aus Platzmangel nicht untergebracht werden könnte. Die Lösung könnte dann darin bestehen, die notwendige Abwassermenge aus dem Kanal abzupumpen und direkt zur Rückkühlung der Kältemaschinen zu nutzen. In Sandvika (Norwegen) wurde diese Lösung umgesetzt (siehe [Energie Schweiz]) und es wurde dafür eine zweistufige Filteranlage zur Vorreinigung des Abwassers eingebaut.

Beim Ersatz einer bestehenden Abwasserkanalleitung wäre die Wärmeabfuhr über den Abwasserkanal mit einem höheren Aufwand verbunden. Es müssten Kanalgrabungsarbeiten durchgeführt werden, um die notwendigen Wärmeaustauscher einsetzen zu können, was sich wiederum massiv auf die Kosten auswirken würde.

Eine Wärmeabfuhr über den Abwasserkanal ist durchaus denkbar, jedoch müssen die genannten Einschränkungen genau analysiert werden. Grenzwerte und eine maximal zugelassene Temperaturerhöhung des Abwassers müssen für jedes Projekt exakt bestimmt werden. Bei TownTown ließe sich nur die Variante umsetzen, wo die notwendige gefilterte Abwassermenge aus dem Kanal abgepumpt und direkt zur Rückkühlung der Kältemaschinen eingesetzt wird. Der entsprechende Energieaufwand müsste aber gerechnet werden und dem konventionellen Rückkühlkonzept gegenübergestellt werden.

Leitfaden zur Projektentwicklung für die Wärmerückgewinnung aus Abwasserkanälen sind in [Bucar, 2007] und [Energie Schweiz] vorhanden. Dabei werden die allgemeinen Rahmenbedingungen zur Realisierung eines solchen Projektes angeführt und realisierte Beispiele präsentiert.

5.3.2. Wasserlauf

Einer Wärmeabfuhr über den Donaukanal stehen im Grunde nicht so viele Hindernisse im Wege wie einer Abfuhr über den Abwasserkanal. Auf Grund des hohen Durchflusses und der relativ niedrigen durchschnittlichen Temperatur des Wassers wird keine so große Wärmeaustauscherfläche benötigt: bei einer Abzuführenden Wärmeleistung von 1 MW und einer aus dem Donaukanal gepumpten Wassermenge von 0,4 m³/s wäre eine Temperaturerhöhung von 0,6°K zu erwarten, die im Verhältnis mit dem gesamten Volumenstrom des Donaukanals im Sommer (ca. 150 m³/s) eine sehr geringe Auswirkung haben würde.

Da es sich um zwei (relativ) reine Flüssigkeiten handelt, kommen auch Verschmutzungen kaum zum Tragen und Reinigungsarbeiten müssen nicht so oft durchgeführt werden, wodurch auch ein besserer Wärmeübergang stattfinden kann.

Grenzwerte und Randbedingungen müssen jedoch auch bei einer Wärmeabfuhr über den Donaukanal genau auf das Projekt abgestimmt und überprüft werden. Wasserrechtliche Vorschriften und Einschränkungen müssen eingehalten werden, um ökologische Schäden zu vermeiden.

Eine Wärmeabfuhr über den Donaukanal ist durchaus möglich und eine Umsetzung sowohl in wirtschaftlicher als auch ökonomischer sowie ökologischer Hinsicht durchführbar.

5.3.3. Abwärmespeicherung und Nachtkühlung

Eine weitere Möglichkeit der Abwärmeabfuhr könnte darin bestehen, das warme Kühlwasser in großen Wasserbehältern zu speichern, und die Rückkühlanlagen erst in der Nacht zu betreiben. Damit könnte die Antriebsleistung der Kühltürme reduziert werden, vor allem weil die niedrigeren Lufttemperaturen in der Nacht es ermöglichen, die Rückkühlung effizienter zu betreiben, z. B. mit niedrigem Wasserverbrauch oder Ventilatorleistung. Dafür würden aber zwei große Wasserbehälter gebraucht, der eine für das warme Kühlwasser und der andere für das gekühlte Kühlwasser, das am folgenden Tag wieder zur Rückkühlung der Kältemaschinen genutzt werden kann. Eine Variante dieses Konzeptes könnte mit Aquifer- oder Erdsondenspeichern ausgeführt werden.

5.3.4. Schlussfolgerungen

Die günstige Lage von TownTown würde sich dafür eignen, eine Kombination von den ersten beiden vorgestellten Lösungen heranzuziehen. Dabei müsste nicht die gesamte Abwärme über den Wasserlauf oder den Abwasserkanal abgeführt werden, sondern nur einen Teil davon. Die Berechnung der entsprechenden Rückkühlleistung sollte aufgrund von detaillierten Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchgeführt werden.

Die hier präsentierten Konzepte sollten nun mit Modellierungs-, Simulations- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen hinterlegt werden, um eine wissenschaftlich basierte Entscheidungsgrundlage zu bieten. Wegen des notwendigen Aufwandes konnten diese Arbeiten im Rahmen des hier präsentierten Projektes nicht durchgeführt werden. Dies sollte der Schwerpunkt eines Nachfolgeprojektes werden.

Tabelle 23: Rohrabmessungen

DN	D _i	dt ₁	dt ₂
60	53,9	3,2	32,35
70	69,7	3,2	31,95
80	82,5	3,2	35,55
100	107,1	3,6	42,85
125	132,5	3,6	42,65
150	160,3	4,0	40,85
200	210,1	4,5	47,95
250	263,0	5,0	63,5
300	312,7	5,6	63,05
350	343,8	5,6	72,2
400	393,7	6,3	86,5
450	444,4	6,3	86,5
500	495,4	6,3	101

Die verwendeten Materialien haben folgende Eigenschaften:

1. Stahl (dt₁): ρ=7,801 kg/m³, λ=43 W/m.K, c_p=473 J/kg.K
2. Isolierung PUR-Schaumdämmung (dt₂), ρ=40 kg/m³, λ=0,027 W/m.K, c_p=1.500 J/kg.K

Wird die Schwerkraft vernachlässigt, kann die Bilanz der Bewegungsgröße für ein Volumenelement von Abbildung 51 in Eq 2 geschrieben werden:

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (\text{Eq 2})$$

Eq 2 wird integriert und ergibt:

$$\frac{dm}{dt} = A_f \frac{\Delta p}{\Delta L} - \pi D_i \tau_w \quad (\text{Eq 3})$$

wo A_f die Fläche des Strömungsquerschnittes ($\pi D_i^2 / 4$) und τ_w die Reibung sind. Diese ist definiert mit:

$$\tau_w = \frac{f}{8\rho A_f} \dot{m}^2 \quad (\text{Eq 4})$$

wo der Reibungskoeffizient f normal in der Moody-Tabelle gegeben ist oder in Abhängigkeit von Re_D definiert ist ($\equiv \rho u_{avg} D_i / \mu$).

Eq 3 kann gelöst werden, um \dot{m} in Abhängigkeit der Randbedingungen an einem Zeitpunkt t zu bestimmen. Allerdings können dynamische Profile für \dot{m} direkt aus den Kühllastprofilen bei konstanter Vor- und Rücklauf­temperatur definiert werden. Da diese Profile als Inputdaten für die Simulation genommen werden, muss Eq 3 nicht gelöst werden. Außerdem wird die Lösung von Eq 3 innerhalb einer sehr kurzen Zeit stationär, und die Lösung ist für die Zeitskala dieser Untersuchung nicht relevant. Deswegen wird der dynamische Teil vernachlässigt.

Auf der anderen Seite wird die Energiebilanz auf das Volumenelement von Abbildung 51 wie in Eq 5 geschrieben:

$$\rho C_p \Delta V \frac{dT}{dt} = \dot{m} C_p (T_i - T_{i+1}) - \dot{Q}_r \quad (\text{Eq 5})$$

wo ΔV das Elementvolumen und \dot{Q}_r die Wärmeübergangszahl zwischen Wasser und Rohroberfläche sind. Diese definiert sich mit:

$$\dot{Q}_r = \alpha_w \Delta A_w (T_{i+1} - T_w) \quad (\text{Eq 6})$$

wo α_w der konvektive Wärmeübergangskoeffizient zwischen Wasser und Stahlrohr, ΔA_w ($\equiv \pi D_i \Delta L$) die Wärmeübergangsfläche und T_w die Oberflächentemperatur auf der Innenseite des Rohres sind.

Der Temperaturmittelwert T_r im Stahlrohr ergibt sich in der Energiebilanz auf das entsprechende Rohrelement, wo die Wärmeleitung mit den angrenzenden Elementen vernachlässigt ist:

$$(\Delta MC_p)_r \frac{dT_r}{dt} = \dot{Q}_r - \dot{Q}_m \quad (\text{Eq 7})$$

wo $(\Delta MC_p)_r$ die thermische Kapazität eines Rohrelementes ist, und die Wärmeübergangszahlen \dot{Q}_r und \dot{Q}_m in Eq 8 und Eq 9 definiert sind:

$$\dot{Q}_r = \frac{2\pi k_r (T_w - T_r)}{\ln(\bar{R}_r / R_i)} \quad (\text{Eq 8})$$

$$\dot{Q}_m = \frac{2\pi k_{rm} (T_r - T_m)}{\ln(\bar{R}_m / \bar{R}_r)} \quad (\text{Eq 9})$$

wo

$$\bar{R}_m = \left[(R_r^2 + R_m^2) / 2 \right]^{0.5}, \quad \bar{R}_r = \left[(R_r^2 + R_i^2) / 2 \right]^{0.5} \quad \text{und}$$

$$k_{rm} = \left[k_r (R_r - \bar{R}_r) + k_m (\bar{R}_m - R_r) \right] / (\bar{R}_m - \bar{R}_r)$$

Wie in Eq 7 ist der Temperaturmittelwert T_m in der Schaumdämmung mit der Energiebilanz auf das entsprechende Dämmelement definiert:

$$(\Delta MC_p)_m \frac{dT_m}{dt} = \dot{Q}_m - \dot{Q}_s \quad (\text{Eq 10})$$

wo $(\Delta MC_p)_m$ die thermische Kapazität der Schaumdämmung ist, und die Wärmeübergangszahl \dot{Q}_s zum Erdreich in Eq 11 gegeben ist:

$$\dot{Q}_s = \frac{2\pi k_m (T_m - T_s)}{\ln(R_m / \bar{R}_m)} \quad (\text{Eq 11})$$

wo T_s die Oberflächentemperatur auf der Außenseite der Schaumdämmung ist.

Wird der Wärmeübergangswiderstand zwischen Erdreich und Schaumdämmung berücksichtigt, kann \dot{Q}_s auch wie in Eq 12 geschrieben werden:

$$\dot{Q}_s = \alpha_s \Delta A_s (T_s - T_g) \quad (\text{Eq 12})$$

wo α_s der konvektive Wärmeübergangskoeffizient zwischen Schaumdämmungsoberfläche und Erdreich, ΔA_s ($\equiv 2\pi R_m \Delta L$) die Wärmeübergangsfläche und T_g die Erdreichtemperatur sind.

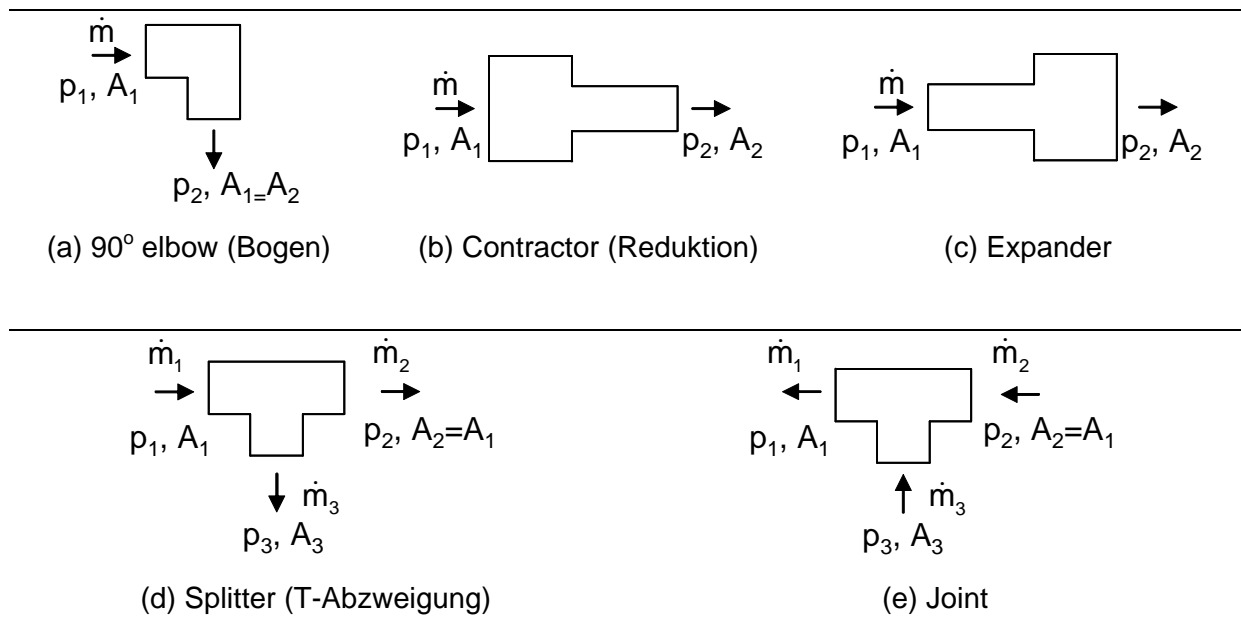
Während der Simulation werden Eq 5, Eq 7 und Eq 10 gleichzeitig gelöst.

6.1.2. Anschlussmodellierung

Im Netz gibt es verschiedene Typen von Anschlüssen. Da sie im Vergleich mit den Leitungslängen ziemlich klein sind, wird angenommen, dass sie in stationären und adiabaten Bedingungen arbeiten.

In Tabelle 24 sind alle Anschlusstypen schematisch dargestellt.

Tabelle 24: Schematische Darstellung von Anschlüssen



Unter stationären und adiabaten Bedingungen werden nur die folgenden Gleichungen gelöst. Für jede Komponente in Tabelle 24 gilt die Energiebilanz von Eq 13:

$$\sum \dot{Q} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2 (\pm \dot{m}_3 h_3) = 0 \quad (\text{Eq 13})$$

Der Druckverlust wird von Eq 14 und Eq 15 gegeben:

$$p_2 - p_1 = K_{12} \times \rho u_1^2 / 2 \quad (\text{Eq 14})$$

$$p_3 - p_1 = K_{13} \times \rho u_1^2 / 2 \quad (\text{Eq 15})$$

wo u_1 die Strömungsgeschwindigkeit am Punkt A_1 ist, und der Druckverlustkoeffizient K von den folgenden Formeln gegeben ist:

90° elbow (Verhältnis zwischen Radius und Rohrdurchmesser=2,26):

$$K_{12} = -0,0004474127259 \operatorname{Re} + 2,172843526 \quad \text{für } \operatorname{Re} \leq 4.000$$

$$K_{12} = -2,275779376E-005 \operatorname{Re} + 0,6753717026 \quad \text{für } 4.000 < \operatorname{Re} \leq 18.000$$

$$K_{12} = -2,6e-006 \operatorname{Re} + 0,306 \quad \text{für } 18.000 < \operatorname{Re} \leq 55.000$$

$$K_{12} = -6,510791367E-008 \operatorname{Re} + 0,1673633094 \quad \text{für } 55.000 < \operatorname{Re}$$

Contractor:

$$K_{12} = 0,42(1 - A_r^2)^2 \quad \text{mit } A_r \equiv A_2/A_1$$

Expander:

$$K_{12} = (1 - A_r^2)^2 / A_r^2 \quad \text{mit } A_r \equiv A_2/A_1$$

Splitter:

$$K_{12} = 0,003776223776 - 0,4024475524 m_r + 0,7797202797 m_r^2$$

$$K_{13} = 0,968951049 - 0,5408857809 m_r + 0,8717948718 m_r^2 + 0,42(1 - A_r^2)^2 (m_r/A_r)^2$$

mit $A_r \equiv A_3/A_1$ und $m_r \equiv m_3/m_1$

Joint:

$$K_{12} = 0,06045454545 + 0,5481818182 m_r$$

$$K_{13} = -0,9976923077 + 3,129463869 m_r - 1,233100233 m_r^2 + (1 - A_r^2)^2 (m_r/A_r)^2$$

mit $A_r \equiv A_3/A_1$ und $m_r \equiv m_3/m_1$

6.1.3. Kühllastmodellierung

In Abbildung 52 ist eine Fernkälteübergabestation mit Trenntauscher schematisch dargestellt.

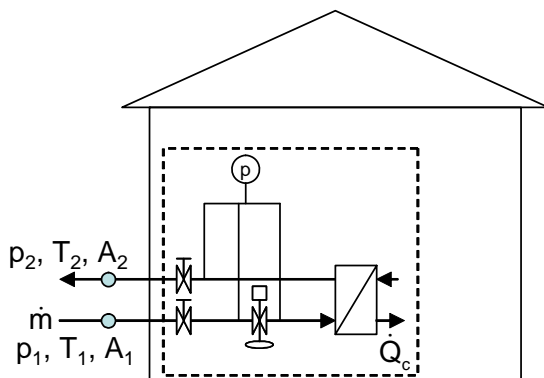


Abbildung 52: Schematische Darstellung einer Fernkälteübergabestation

Der Druckverlust wird im Anschlussmodell gerechnet:

$$p_2 - p_1 = K_{12} \times \rho u_1^2 / 2 \quad \text{(Eq 16)}$$

wo K der Druckverlustkoeffizient der gesamten Fernwärmeübergabestation ist.

Die Rücklauftemperatur T_2 wird mit der Energiebilanz bei der Fernwärmeübergabestation gerechnet:

$$(MC_p)_s \frac{dT_2}{dt} = \dot{m}C_p (T_1 - T_2) - \dot{Q}_c \quad (\text{Eq 17})$$

wo $(MC_p)_s$ die thermische Kapazität der Übergabestation ist, und \dot{Q}_c die Kühllast des Verbrauchers.

$T_1 - T_2$ und \dot{Q}_c werden als Eingabedaten in die Simulation genommen (Kühllastprofile TRNSYS und konstante Temperaturen bei variablem Volumenstrom – mengenvariabler Betrieb), d. h. Eq 17 muss nicht gelöst werden.

Der benötigte Gesamtmassenstrom bzw. -volumenstrom zur Versorgung der Abnehmer, wird über die Summe der Kühllastprofile sowie der Gesamtverluste des Rohrnetzes im jeweiligen Zeitschritt, bei konstanter Vor- und Rücklauftemperatur von 6°C bzw. 12°C berechnet und dem Pumpenmodell als Input übergeben.

6.1.4. Pumpenmodellierung

Die Berechnung der elektrischen Leistungsaufnahme der Pumpe wird durch folgenden Gleichungsansatz gelöst, wobei die Druckdifferenz dp im Falle der Drehzahl geregelten Pumpe über einen Differenzdrucksensor zw. Vor- und Rücklauf bestimmt wird und der Volumenstrom \dot{V} , wie im vorherigen Kapitel beschrieben, als Inputvariable übergeben wird.

Im Falle der ungeregelten Pumpe, wird dp über den Verlauf der Pumpenkennlinie beim jeweiligen Volumenstrom bestimmt. Hierzu wurde die Pumpenkennlinie aus dem Datenblatt der Netzpumpe mathematisch abgebildet. Derselbe Vorgang erfolgt bei beiden Varianten von Netzpumpen mit der Wirkungsgradkennlinie zur Bestimmung von η beim jeweiligen Volumenstrom.

$$P = \frac{dp \times \dot{V}}{\eta} \quad (\text{Eq 18})$$

6.2. Netzsimulation

Das Kältenetz TownTown wurde mit den in Kapitel 6.1 beschriebenen Komponenten in der Ausbaustufe 2 abgebildet. Bei dieser Ausbaustufe ist eine Anschlussleistung von 8,2 MW bei einem Volumenstrom von ca. 1160 m³/h angedacht, was als Annahme in der Netzsimulation genommen wird. Abbildung 53 zeigt den Netzaufbau in der Simulationsumgebung DYMOLA.

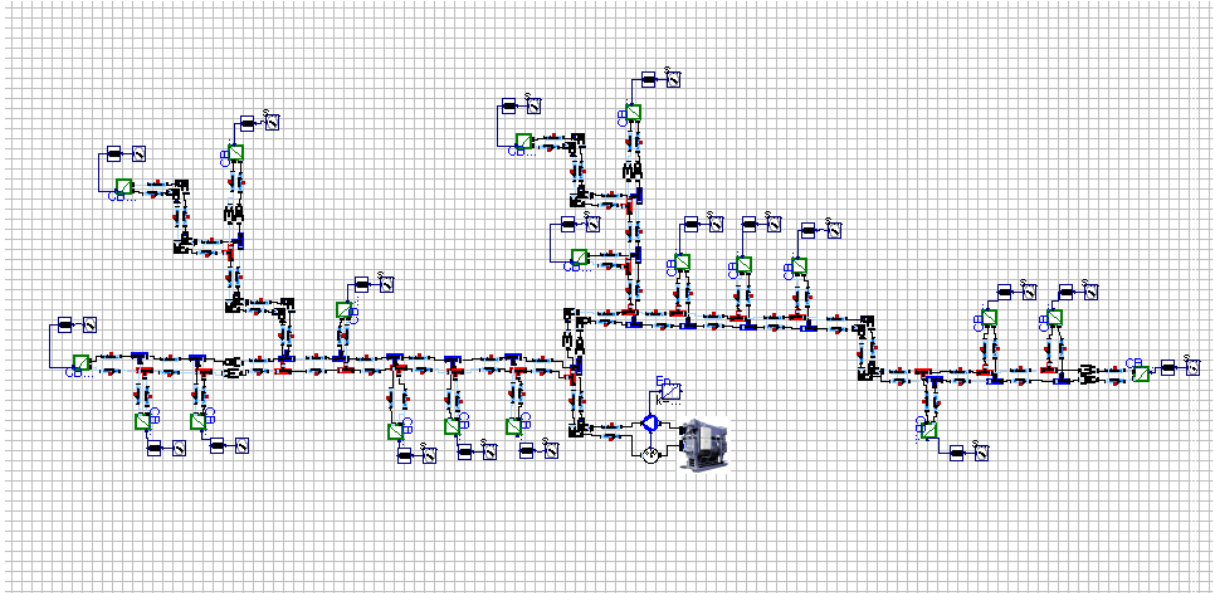


Abbildung 53: Netzabbildung in DYMOLA

6.2.1. Aufgabenstellung

Es sollte Anhand einer Netzsimulation nachgerechnet werden, ob die vorgeschlagene Netzauslegung tatsächlich einem wirtschaftlichen Optimum entspricht. Bei verschiedenen Simulationsvarianten wurden in Form einer Sensitivitätsanalyse die jeweiligen Investitionen, Pumpenstromverbräuche und Leitungsverluste ermittelt. Somit wurden die Betriebskosten bzw. im nächsten Schritt die Investitionskosten gerechnet, um die für Kältenetze optimale Auslegung hinsichtlich Gesamtkosten bzw. Gesamtenergieeinsatz zu finden.

Tabelle 25: Variantenüberblick

Variante	DN	Trenntauscher	Drehzahlgeregelte Pumpe
1	Rohrauslegungszustand: „DN“	ja	ja
2	„DN+1“	ja	ja
3	„DN-1“	ja	ja
4	„DN-2“	ja	ja
5	Rohrauslegungszustand: „DN“	nein	ja
6	Rohrauslegungszustand: „DN“	ja	nein

In dem Fall einer indirekten Anbindung von Gebäuden an das Kältenetz über Trenntauscher (Übergabestation) wurden erstmal die Rohrdurchmesser variiert und die resultierenden Kosten verglichen. Folgende unterschiedliche Varianten wurden dafür abgebildet. Als Referenzvariante beschreibt Variante 1 den Zustand laut Auslegung seitens der Fernwärme Wien; bei Variante 2 wird der Durchmesser der Rohre um eine Größe bezogen auf DN-Klasse vergrößert und bei den Varianten 3 bzw. 4 um eine bzw. zwei Größen verkleinert. Die jeweiligen Rohrstärken und Dämmstärken wurden den neuen Durchmessern entsprechend angepasst.

In einem zweiten Schritt erfolgte ein Vergleich im Rohrauslegungszustand zwischen Trenntauscher und Direktanschluss. Dafür wurde Variante 5 eingeführt, in der die Kaltwasserübergabe an den Gebäuden direkt (ohne Trenntauscher) erfolgt.

Letztens wurden die Unterschiede im Rohrauslegungszustand in den Fällen mit und ohne Einsatz einer drehzahlgeregelten Pumpe evaluiert. Dafür wurde Variante 6 eingeführt, in der die Regelung über Drosselung (ohne drehzahlgeregelter Pumpe) erfolgt.

Tabelle 25 gibt einen Überblick über alle Varianten und deren charakteristischen Parametern.

6.2.2. Netzkennlinien

Abbildung 54 zeigt die unterschiedlichen Netzkennlinien ohne Trenntauscher. Hierbei ergibt sich nach folgenden Gleichungen eine flachere Kennlinie bei größerem Rohrdurchmesser und steilerer Kennlinie bei kleinerem Rohrdurchmesser.

Der Massenstrom \dot{m} ist wie folgt über Volumenstrom \dot{V} und Dichte ρ definiert.

$$\dot{m} = \dot{V} \times \rho \quad (\text{Eq 19})$$

Der Volumenstrom selbst lässt sich über Strömungsfläche A und Geschwindigkeit w wie folgt abbilden.

$$\dot{V} = A \times w \quad (\text{Eq 20})$$

Durch Ersetzen des Volumenstroms in Eq 19 ergibt sich:

$$\dot{m} = A \times w \times \rho \quad (\text{Eq 21})$$

Bei gleich bleibendem Massenstrom aber sich änderndem Rohrdurchmesser stellt sich eine Änderung der Geschwindigkeiten in den Rohren ein, die wie folgt Einfluss auf den Druckverlust im Rohrmodell hat:

$$dp = \xi \times \frac{l}{d} \times \frac{\rho \times w^2}{2} \quad (\text{Eq 22})$$

wo ξ der Druckverlustbeiwert, l die Rohrlänge und d der Rohrdurchmesser sind.

Durch Einsetzen von Eq 21 in Eq 22 und Vereinfachung ergibt sich folgende Gleichung, die den Druckverlust in Abhängigkeit von Massenstrom und Rohrquerschnitt bzw. -durchmesser beschreibt.

$$dp = \xi \times \frac{l}{d} \times \frac{m^2}{2 \times A^2 \times \rho} \quad (\text{Eq 23})$$

Über Eq 23 werden die Netzkennlinien der in Tabelle 25 zusammengefassten Varianten definiert. In Abbildung 54 und Abbildung 55 werden sie dargestellt.

Als Referenzvariante dient Variante 1 (Auslegungszustand). Eine Verringerung des Strömungsquerschnittes und somit des Rohrdurchmessers führt über eine Geschwindigkeitserhöhung bei gleich bleibendem Massenstrom zu einem größeren Druckverlust und somit steilerer Netzkennlinie, wie in Abbildung 54 in der Variante 3 und 4 dargestellt. Hingegen führt eine Vergrößerung des Rohrdurchmessers bei gleich bleibendem Massenstrom zu einer Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit und somit Verringerung des Druckverlustes. Dies resultiert in einem flacheren Verlauf der Netzkennlinie, wie Abbildung 54 in der Variante 2 zeigt. Der Einfluss des zusätzlichen Druckverlustes in den Trenntauschern ist in Abbildung 55 dargestellt. Im Betriebspunkt (1160 m³/h Förderstrom und

33,7 m Förderhöhe) zeigt sich eine zusätzliche Erhöhung des Drucks von ca. 10 m bzw. 1bar bezogen auf die Abbildung des Netzes ohne Trenntauscher.

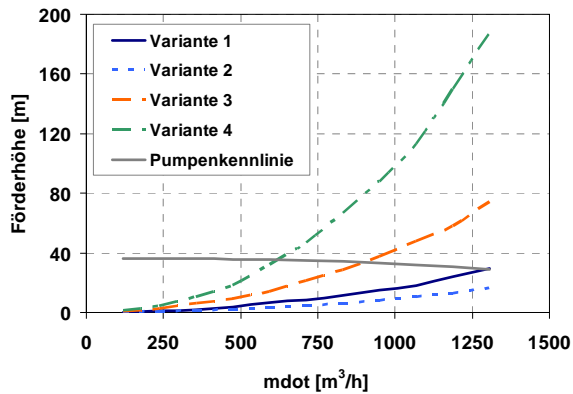


Abbildung 54: Netzennlinien bei Variation der Rohrdurchmesser ohne Trenntauscher

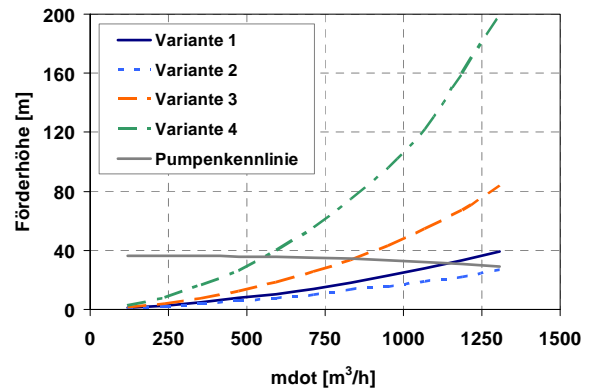


Abbildung 55: Netzennlinien bei Variation der Rohrdurchmesser mit Trenntauscher

Zur Darstellung der Gesamtkälteleistung in der Ausbaustufe 2 werden für die nicht mit TRNSYS simulierte Gebäude Einzelprofile der Abnehmer entsprechend der Anschlussleistung erstellt. Der Verlauf der resultierenden Gesamtkälteleistung, die in folgender Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendet wird, ist in Abbildung 56 für Varianten mit 1 MW Grundlast, mit 3 MW Grundlast und mit 4 MW Grundlast dargestellt. Dies soll die unterschiedlichen Ausbaustufen und daher den Einfluss des variierenden Massenstroms (siehe Tabelle 26) bei unterschiedlichen Rohrdurchmessern auf die Gesamtkosten darstellen.

Tabelle 26: Massenstrom Gesamtkühllastprofile

Variante	Massenstrom
1 MW	143 – 923 m ³ /h
3 MW	429 – 1.209 m ³ /h
4 MW	572 – 1.352 m ³ /h

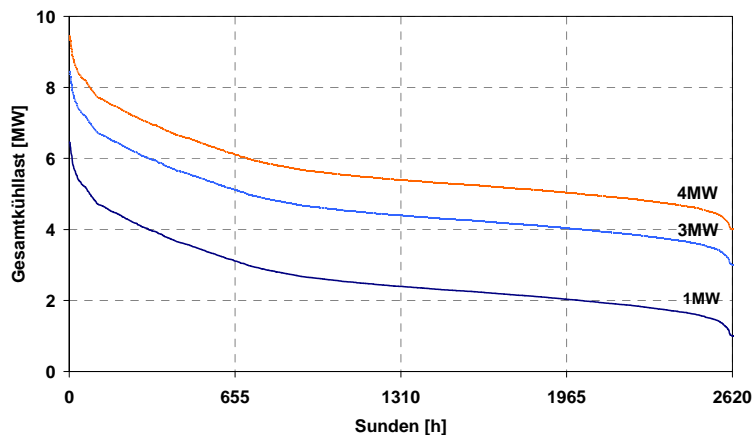


Abbildung 56: Jahresdauerlinie Gesamtkälteleistung TownTown bei Variation der Grundlast

6.2.3. Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden die in Tabelle 25 angeführten Simulationsvarianten durchgeführt, jeweils mit den in Abbildung 56 beschriebenen Kühllastprofilen für die Ausbaustufe 2.

Die ermittelten Gesamtkosten setzen sich aus den Investitionskosten und den laufenden Betriebskosten zusammen. Bei den Investitionskosten handelt es sich um die Rohrleitungskosten und bei den Betriebskosten um die Aufwendungen für den Strom für den Betrieb der Pumpen und die Wärmeverluste.

Die Berechnung der Investitionskosten der Rohrleitung erfolgt mittels Annuitätenmethode mit einem Zinssatz von 5% und einer technischen Nutzungsdauer für Rohrleitungen nach (VDI 2067, 2000) von 40 Jahren. Für die einzelnen Rohrdurchmesser wurden folgende Kosten in €/lfm Rohrleitung seitens der Fernwärme Wien bereitgestellt, wobei bei bestimmten unbekanntem Zwischengrößen eine Näherung durch lineare Interpolation erfolgte.

Tabelle 27: Rohrleitungskosten

DN	Kosten [€/lfm]
60	180
70	190
80	195
100	210
125	220
150	250
200	270
250	300
300	330
350	370
400	415
450	460
500	520

Für die Berechnung der Betriebskosten wurden für die Pumpenstromkosten 0,11 €/kWh und für die Wärmeverlustkosten, also bei der Betrachtung von Kältenetzen der Wärmeeintrag vom Erdreich oder der Umgebungsluft in das kältere Transportmedium Kaltwasser, 0,0195 €/kWh herangezogen.

Abbildung 57 zeigt die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bei den unterschiedlichen Simulationsvarianten mit einer Grundlast von 3 MW, wobei die Darstellung jeweils in €/lfm Leitung und Jahr erfolgt.

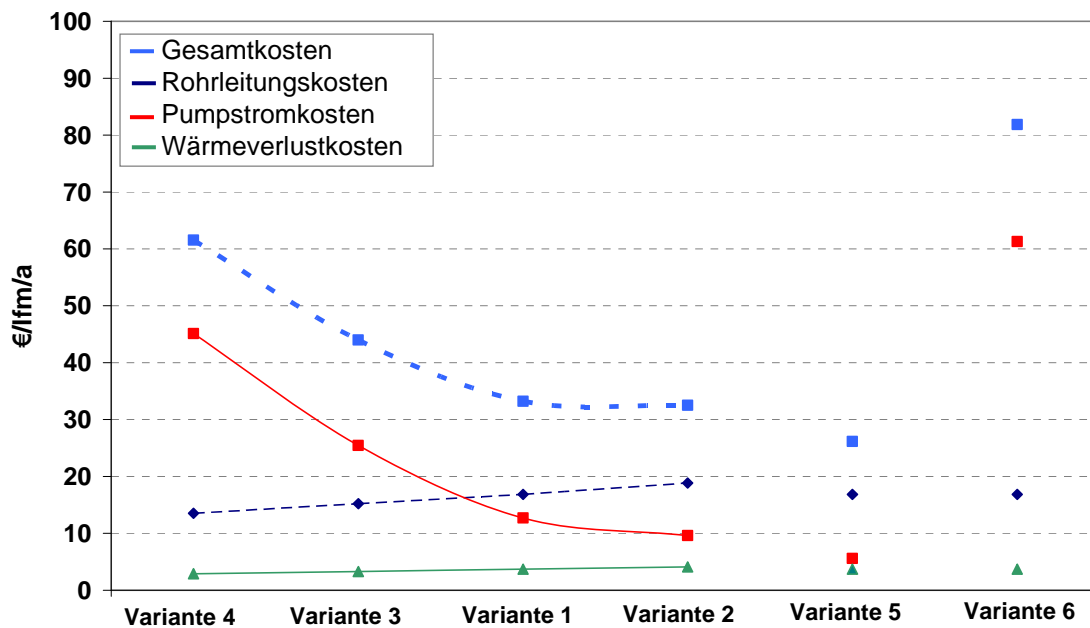


Abbildung 57: Wirtschaftliche Kältenetzdimensionierung Grundlast 3 MW

Im ersten Bereich des Diagramms sind die Varianten 1 – 4 dargestellt, die den Einfluss der Rohrdimensionierung auf Investitionskosten und Betriebskosten wiedergeben. Aufgrund des hohen Druckverlustes (steile Netzkennlinie) im Netz bei den Varianten 3 und 4 ergeben sich dementsprechend hohe Pumpenstromkosten, die durch die geringeren Investitionskosten für kleinere Rohrdurchmesser in diesem Ausmaß nicht kompensiert werden können, und somit zu sehr hohen Gesamtkosten führen. Die Wärmeverlustkosten, also bei der Betrachtung von Kältenetzen der Wärmeeintrag vom Erdreich in das kältere Transportmedium Kaltwasser, haben im Vergleich zu Fernwärmenetzen auf Grund der kleinen Temperaturdifferenz zwischen Erdreich und Kaltwasser einen sehr geringen Einfluss, wodurch sich ein sehr geringer Beitrag an den Gesamtkosten ergibt. Dieser Verlauf ändert sich nur geringfügig bei Variation der Rohrdurchmesser, da die Dämmstärken immer entsprechend der Rohrdimension angepasst werden. Im Vergleich zum Auslegungsfall (Variante 1) kann bei der Variante 2 der Anteil an Pumpenstromkosten auf Grund der flacheren Netzkennlinie und somit geringerem Druckverlust, weiter gesenkt werden. Dies führt beim Vergleich der ersten vier Varianten zu einem Minimum an Gesamtkosten und wäre in diesem Fall die zu empfehlende Dimensionierung.

Im Vergleich dazu liegen bei Wärmenetzen die Wärmeverlustkosten bei zunehmendem Rohrdurchmesser deutlich höher und somit würden bei ähnlichem Verlauf von Investitionskosten und Pumpenstromkosten, die Gesamtkosten in Bereichen kleinerer Durchmesser ein Minimum aufweisen, wie Abbildung 58 aus (Oberberger, 1997) zeigt.

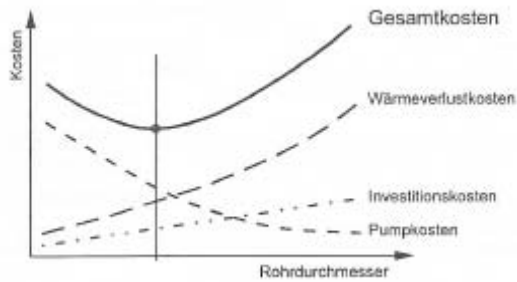


Abbildung 58: Wirtschaftliche Wärmenetzdimensionierung, aus (Oberberger, 1997)

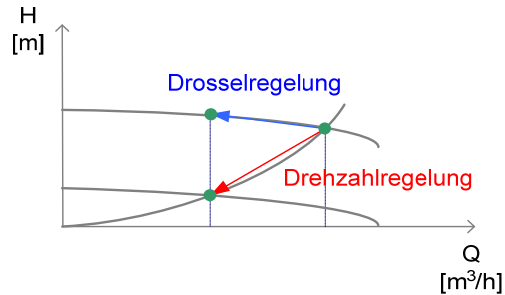


Abbildung 59: Vergleich zwischen Drehzahlregelung und Drosselregelung

Im rechten Bereich des Diagramms in Abbildung 57, erfolgt die Auswertung von den Varianten mit Direktanschluss (Variante 5) und unregelter Pumpe (Variante 6), jeweils im Verhältnis zusehen mit der Referenzvariante (Variante 1).

Die Variante 5 führt aufgrund der sehr flachen Netzkennlinie (siehe Variante 1 in Abbildung 54), da hierbei der zusätzliche Druckverlust des Leitungsnetzes im Gebäude von der Umwälzpumpe im Gebäude selbst überbrückt wird, zu entsprechend geringen Pumpenstromkosten der Netzpumpe und somit geringsten Gesamtkosten.

Die Variante 6 weist entsprechend hohe Pumpenstromkosten auf, da durch die fehlende Drehzahlregelung beim jeweiligen Förderstrom die Förderhöhe immer entsprechend Pumpenkennlinie bestimmt wird (Drosselregelung), wie Abbildung 59 beispielhaft anhand der unterschiedlichen Regelungsstrategien aufzeigt.

Abbildung 60 zeigt die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Variante mit 1 MW Grundlast, entsprechend den Simulationsergebnissen. Durch den sehr geringen Massenstrom im Netz ergeben sich entsprechend geringe Pumpenstromkosten, und somit geringe Gesamtkosten über den gesamten Bereich der variierenden Rohrdurchmesser. Erst bei größer werdendem Massenstrom steigen die Pumpenstromkosten bei kleineren Rohrdurchmessern entsprechend an, wie es Abbildung 57 zeigt. Jedoch liegt auch bei sehr kleinem Massenstrom das Kostenminimum bei der Auslegungsvariante (Variante 1). Der Schritt zu einer kleineren Rohrdimension würde bereits bei niedrigem Massenstrom zu einer Erhöhung der Gesamtkosten führen.

Die Unterschiede zwischen Drehzahlregelung und Drosselregelung sind bei kleinem Massenstrom besonders deutlich sichtbar, wie der Unterschied in den Gesamtkosten bei den Varianten 1 und 6 zeigt.

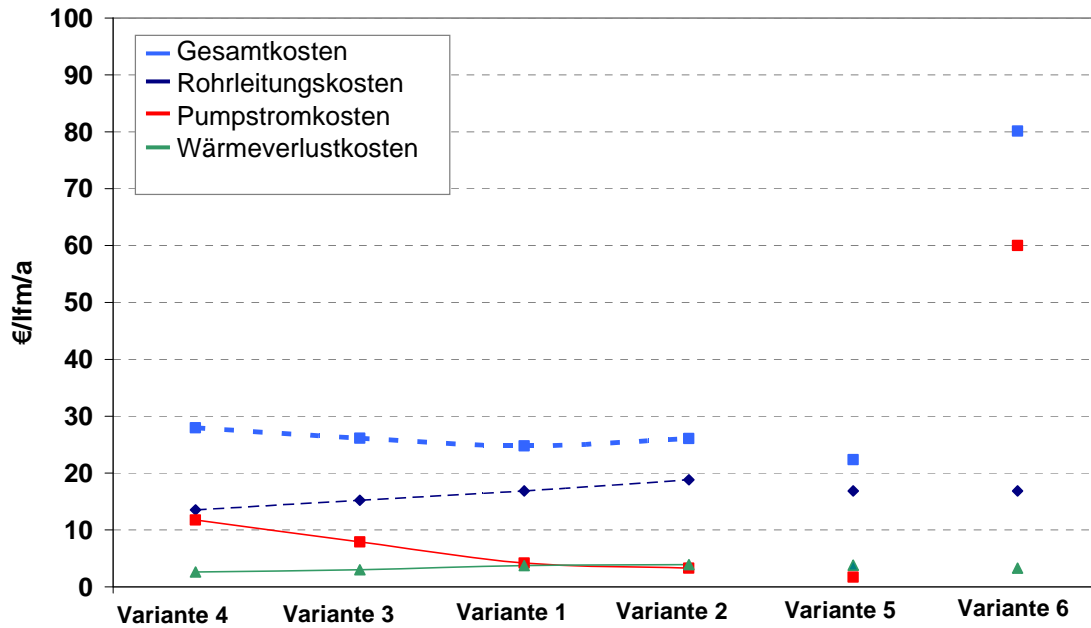


Abbildung 60: Wirtschaftliche Kältenetzdimensionierung Grundlast 1 MW

Abbildung 61 zeigt den Einfluss bei weiterer Erhöhung des Massenstroms. Hierbei steigen die Pumpstromkosten bei kleiner werdendem Durchmesser weiter an, und es stellt sich ein Minimum bei den Gesamtkosten bei der Variante 2 ein.

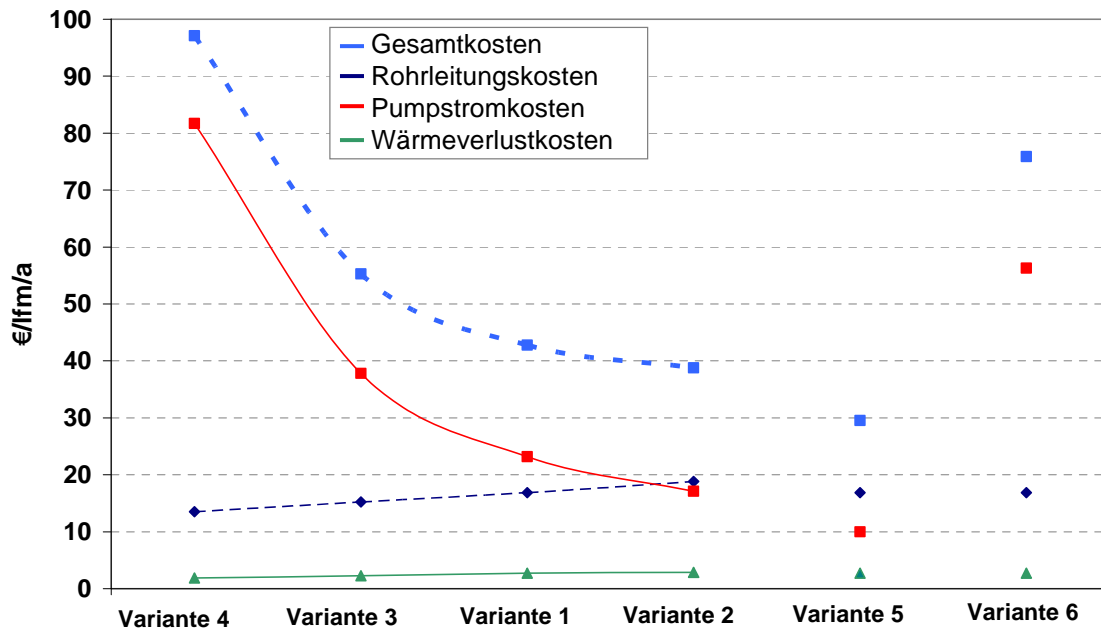


Abbildung 61: Wirtschaftliche Kältenetzdimensionierung Grundlast 4 MW

Im Vergleich zu Wärmenetzen zeigt sich bei Kältenetzen ein deutlicher Unterschied in der wirtschaftlichen Dimensionierung der Rohrleitungen. Bei Kältenetzen ist aufgrund der geringen Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf ein sehr großer Massenstrom erforderlich, um die benötigte Kälteleistung zu übertragen. Weiters ist die

Temperaturdifferenz zwischen Umgebungstemperatur und Kälte­trä­ger­tem­pe­ra­tur sehr gering.

Dies führt dazu, dass der Einsatz größerer Rohrdurchmesser, in Bezug auf den geringeren Pumpstromaufwand und die nur leicht steigenden Wärme­ver­lust­kos­ten, zu bevorzugen ist.

Die zwar dadurch verursachte geringfügige Erhöhung der Rohrleitungskosten, wird aber von der deutlichen Verringerung der Pumpstromkosten kompensiert und führt somit zu einem Minimum an Gesamtkosten bei größer werdendem Rohrdurchmesser.

Der Direktanschluss der Abnehmer wäre aus energetischer Sicht, sowohl bei Kälte- als auch bei Wärmenetzen zu bevorzugen, hierbei wird jedoch aus sicherheitstechnischen Aspekten des Netzbetriebs, der Einsatz von Wärmaustauschern favorisiert werden.

Unabhängig von der Rohrleitungsdimensionierung ist der Einsatz einer Drehzahlregelung anstelle einer Drosselregelung immer zu bevorzugen.

7. Betriebsoptimierung eines Fernkältenetzes

Viele Aspekte des Teils 7 sind im Rahmen einer Diplomarbeit [Pirker, 2007] erarbeitet worden. Es werden hier nur die projektrelevanten Ergebnisse präsentiert.

7.1. Modelle zur Kostenoptimierung von thermischen Energieversorgungsnetzen

7.1.1. Stand der Technik

Im allgemein soll die Kostenoptimierung von Fernwärme- und Fernkältenetzen sowohl in der Planungs- als auch in der Betriebsphase erfolgen. Dadurch sollen Investitions- und Betriebskosten reduziert werden. Obwohl in diesem Teil nur auf die Betriebsoptimierung eingegangen wird, gibt es Modelle, die die Investitionsaspekte mitberücksichtigen, was eine gesamte Kostenoptimierung aus der Sicht der Lebenszyklen ermöglicht. [Ortiga, 2007] gibt einen kurzen Überblick über verschiedenen Optimierungsmethoden für Fernwärme und Fernkälte. Dabei sind vor allem die Art des Optimierungsalgorithmus und die Funktionalitäten der verschiedenen Modelle bei der Auswahl des einen oder des anderen Systems entscheidend. Im Folgenden werden die von [Ortiga, 2007] erwähnten Modelle durch weitere, hauptsächlich im deutschsprachigen Raum vorhandene Modelle, ergänzt. Die Modelle können sich in den beiden Kategorien der Struktur- (Investitionskosten) und Betriebsoptimierung (Betriebskosten) unterteilen.

7.1.1.1. Struktur- und Betriebsoptimierung

In [Richter, 2007 (A)] ist ein Modell präsentiert, in dem die Energiesysteme und die entsprechenden Energiebilanzen mit dem Werkzeug „Polis“ (Programmpaket zur Optimierung Lokaler InfrastrukturSysteme) optimiert werden und die hydraulischen Restriktionen mit dem Netzberechnungswerkzeug „sisHYD“ in einem iterativen Prozess eingebunden werden. Damit werden Energieversorgungsunternehmen und Versorgungsnetzbetreiber bei wichtigen strategischen Entscheidungen über die gesamte Energieinfrastruktur unterstützt (Strukturoptimierung). Das Modell kann aber auch in erster Linie zur Betriebsoptimierung der gesamten Energieinfrastruktur eingesetzt werden, weil Simulationen auf Basis von Lastprofilen durchgeführt werden können.

Das in [Söderman, 2006] beschriebene Modell kombiniert auch die beiden Aspekte der Struktur- bzw. der Betriebsoptimierung. Alle Komponenten der Energieinfrastruktur (Erzeugung, Verteilung, Speicher, Verbraucher) werden anhand Energie- und Kostenfunktionen abgebildet und die Optimierung erfolgt auf Basis eines „MILP“-Modells (mixed integer linear programming). Zur Vereinfachung und besseren Veranschaulichung der Ergebnisse werden nur 8 Perioden berücksichtigt (4 Jahreszeiten und Tag- bzw. Nachtbetrieb). In [Söderman, 2007] werden für ein konkretes Fernkältenetz die Lokalisierung und Auslegung der verschiedenen Kältemaschinen und Speicher sowie die optimale Trassenführung der Kälteleitungen auf Basis dieses Modells vorgeschlagen.

Mit „MODEST“ (Model for Optimisation of Dynamic Energy Systems with Time dependent components and boundary conditions) [Henning, 1997] können auch Investitions- und Betriebskosten von Energieversorgungsnetzen auf Basis eines „LP“-Modells (linear programming) optimiert werden. Dieses System wird für lokale, regionale und nationale Strukturen eingesetzt. „MODEST“ kann beinahe für fast alle Branchen (Fernwärme oder industrielle Prozesse), Zeitbereiche (Tag-Jahr) und Energiearten (zum Beispiel Wärme, Strom, Kälte) eingesetzt werden. In [Henning, 2005] wird mit spezieller Hinsicht auf die Fernwärme ein Beispiel mit „MODEST“ gerechnet.

In [Weber, 2007] ist der Fokus auf die Optimierung gesetzt. Um die thermodynamische Aspekte des Modells in das Energiesystemoptimierungsmodul zu integrieren wird das Optimierungsproblem in zwei Subprobleme („master“ und „slave“) aufgeschlüsselt.

In [Chow, 2004 (B)] ist der Fokus auf die Modellierung und nicht auf die Optimierung gesetzt. Dabei werden das Kältenetz und deren Komponenten in der [TRNSYS] Umgebung abgebildet und der Gesamtenergieverbrauch für den Betrieb des Fernkältenetzes wird dementsprechend gerechnet.

Alle hier kurz beschriebene Modelle sind speziell für die thermische leitungsgebundene Energieverteilungsnetze (Fernwärme und/oder –Kälte) geeignet. Es gibt noch weitere übergeordnete Modelle wie [TIMES], die für die regionale Planung eingesetzt werden, und dafür alle Komponente eines regionalen Energiesystems (inkl. Verkehr, Industrie usw.) berücksichtigen.

7.1.1.2. Betriebsoptimierung

Neben den integralen Werkzeugen, die sowohl die Struktur- als auch die Betriebsoptimierung ermöglichen, sind Werkzeuge entwickelt worden, die sich speziell auf die Betriebsoptimierung konzentrieren. Als Voraussetzung dafür liegt eine technische Beschreibung des Energiesystems vor, dessen Betriebskosten minimiert werden. Durch die Nutzung solcher Werkzeuge wird nichts an der Auslegung der untersuchten Energiesysteme geändert, sondern nur deren Betriebsparameter.

[Sakawa, 2002] präsentiert vor allem ein Optimierungsalgorithmus und dessen Einsatzmöglichkeit im Bereich der Fernwärme und –Kälte.

Die „DEMS“ (Dezentrales Energiemanagement System) Software [Siemens, 2003 (B)] wurde hauptsächlich zur Unterstützung der Integration von dezentral erzeugenden Energieversorgern entwickelt, um dabei die Energiebereitstellung zu optimieren. Bis jetzt ist der Fokus auf die Stromnetze gelegen und in dem hier präsentierten Projekt wurde die Software zum ersten Mal an einem Fernkältenetz angewandt. Im Vergleich zu den oben genannten Modellen hat DEMS beide Vorteile, auf einer Seite zeitlich verschiebbare Lasten zu definieren und auf der anderen Seite in Online-Optimierungsprozessen direkt die Steuerung von realen Prozessen zu gewährleisten.

7.1.2. Beschreibung der Software DEMS

Mit DEMS können Simulationen bzw. Prognosen durchgeführt werden, die dann über eine Schnittstelle zur Überwachung und Beeinflussung realer Prozesse verwendet werden können. Die in Abbildung 62 dargestellten Funktionen des Energiemanagementsystems [Siemens, 2003 (B)] sind:

Prognosen

- Wetterprognose: Wetterdaten werden von einem meteorologischen Institut importiert. Diese Daten werden als Input für die Funktionen Lastprognose und Erzeugungsprognose herangezogen.

- Lastprognose: Basierend auf historischen Lastdaten und Wetterdaten und unter Berücksichtigung des Kalenders (Feiertage, Ferientage, Urlaubszeit) bzw. von Produktionsplänen kann der Energiebedarf für verschiedene Energieformen prognostiziert werden.

- Erzeugungsprognose: Mit diesem Modul werden zu erwartende Leistungsabgaben von regenerativen Erzeugern (Windkraftanlagen, Photovoltaik, Kleinwasserkraftanlagen, etc.) aufgrund deren Charakteristika und prognostizierten Wetterbedingungen berechnet.

- Einsatzplanung: Mit diesem Modul werden die Fahrpläne aller beeinflussbaren Betriebsmittel im Verrechnungsraster (15/30/60 min.) für einen Planungshorizont von bis zu 7 Tagen in der Zukunft unter Berücksichtigung von technischen Randbedingungen (zum

Beispiel Leistungsgrenzen, Geschwindigkeit der Leistungsänderung, Wirkungsgradkurven, etc.) so definiert, dass die Lastabdeckung sämtlicher Lasten mit minimalen Betriebskosten erfüllt wird. Hierbei verwendete Betriebsmittel können z. B. Kältemaschinen, Kraftwerke, Heizwerke, Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, Druckluftherzeuger etc. sein. Als Speicherbetriebsmittel kommen Wärmespeicher, Primärenergiespeicher oder Batterien in Frage. Weitere Betriebsmittel sind beeinflussbare Lasten und Verträge (Bezugsverträge bzw. Lieferverträge für Strom, Wärme und Primärenergie).

Schnittstellen zu Prozessen

- Erzeugungsmanagement und Speichermanagement: Diese Module bilden im realen Fall die Schnittstelle vom Energiemanagementsystem DEMS zum Prozessgeschehen für Erzeuger und Speicher. Die Sollwerte werden entsprechend den Vorgaben von DEMS Komponenten, dem momentanen Zustand der Betriebsmittel, deren technische Charakteristika und die lokale Automatisierungstechnik weitergegeben und der Zustand bzw. das Folgeverhalten der Betriebsmittel wird überwacht. Bei Auftreten von Störungsfällen werden den überlagerten Funktionen des Programms die geänderten Randbedingungen zur Einleitung von Korrekturmaßnahmen weitergegeben.
- Lastmanagement: Dieses Modul stellt die Schnittstelle von DEMS zum Prozessgeschehen für beeinflussbare (elektrische) Lasten dar. Das Lastmanagementsystem hat die Aufgabe, unter Berücksichtigung der momentanen Leistungsaufnahme der Lastgruppen, die gewünschten Sollwerte so genau wie möglich zu erreichen.
- Energiebezugsüberwachung und Online Optimierung: Diese Module haben den Zweck der Überwachung bzw. der Ausregelung der elektrischen Übergabe zum Vorlieferanten. Dadurch soll der angemeldete Strombedarf möglichst genau eingehalten werden. Aufbauend auf dem aktuellen Energiebezug wird der erforderliche Leistungskorrekturbedarf ermittelt. Dieser Korrekturbedarf wird auf Betriebsmittel (Erzeuger, Speicher und Lasten) aufgeteilt, welche sich aufgrund technischer Möglichkeiten und aktueller Prozesszustände an der Regelung der Übergabe beteiligen können.

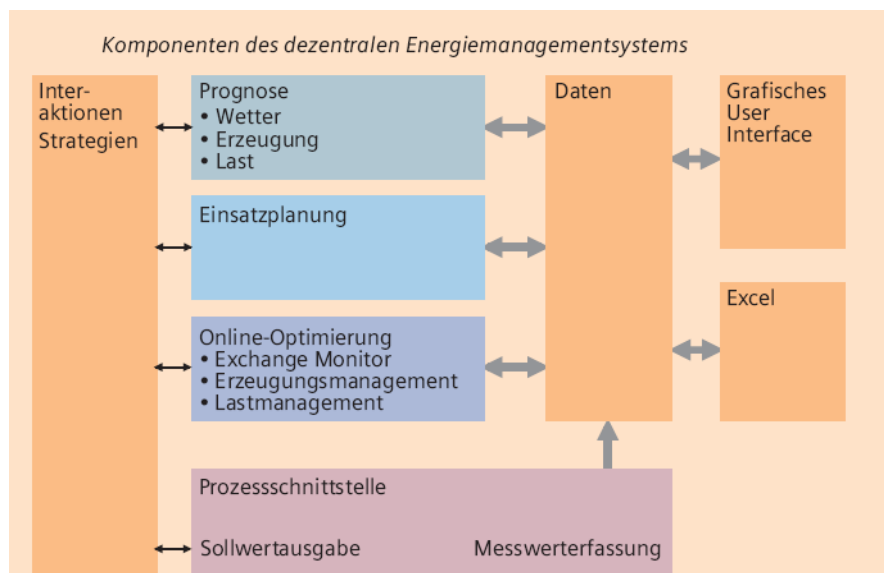


Abbildung 62: DEMS Funktionsübersicht [Siemens, 2003 (A)]

Die Datenein- und -ausgaben werden mit Excel-Sheets vorgenommen.

Im Folgenden wird die in DEMS verfügbare Funktion Einsatzplanung herangezogen, mit der die Kältebereitstellung optimiert wird. Es handelt sich dabei um eine reine Simulation; die anderen Prognosemodule wurden daher nicht genutzt und es besteht keine Schnittstelle zum realen Prozess.

7.2. Modellierung des Fernkältenetzes

Die realen Komponenten des Fernkältenetzes in Wien TownTown wurden durch programmbedingte Komponenten dargestellt. Diese Komponenten wurden unterteilt in:

- Knoten: In Knoten werden gleichartige Energieströme oder Stoffströme zusammengefasst. Abgesehen von den Wasser- und Stromknoten hat jedes thermische Knoten wie Kälte-, Abwärme- und Fernwärmeknoten ein bestimmtes Temperaturniveau. Für Knoten gilt die erste Regel von Kirchhoff. In diesem Fall besagt sie, dass die Summe aller elektrischen und thermischen Leistungen bzw. die Summe aller Wasservolumenströme in den jeweiligen Knoten null ist.
- Lasten: Die Kältebedarfsverläufe der verschiedenen Gebäudetypen werden als Eingabedaten eingelesen. Dafür werden die Profile angenommen, die in 4.4 mit thermischer dynamischer Gebäudesimulation erstellt worden sind.
- Produktion-Betriebsmittel
 - Kältemaschinen-Betriebsmittel: alle 3 Betriebsmitteln hängen an dem Kälte- und Abwärmeknoten. Die KKM hängen an dem Stromknoten während die AKM noch zusätzlich an dem Fernwärmeknoten anhängen, weil sie thermisch betrieben werden.
 - Rückkühlung-Betriebsmittel: die verschiedenen Rückkühlung-Betriebsmittel hängen an dem Abwärmeknoten, und je nachdem, ob sie nass oder trocken betrieben werden, an dem Wasser- und bzw. oder Stromknoten.
 - Free-Cooling-Betriebsmittel: obwohl die gleichen Kühltürme, die die Rückkühlung der Kältemaschinen gewährleisten, auch die Kühlung direkt übernehmen können (free cooling) werden sie im Modell von zwei verschiedenen Betriebsmitteln abgebildet. Der Free-Cooling-Betriebsmittel hängt direkt an dem Kälteknoten während die verschiedenen Rückkühlungsbetriebsmittel an dem Abwärmeknoten anhängen.
- Speicher-Betriebsmittel
- Zusatz-Betriebsmittel
- Zusatz-Einheiten: Einheiten sind keine wirklichen physikalisch existenten Komponenten im Kältenetz, sie sind jedoch für das Funktionieren des Modells von Bedeutung.
- Vertrag-Einheiten

Das Modell wird über die Verschaltungen der verschiedenen Betriebsmittel und Einheiten mit den entsprechenden Parametrierungen abgebildet. Die Grundstruktur des Modells ist auf Abbildung 63 dargestellt.

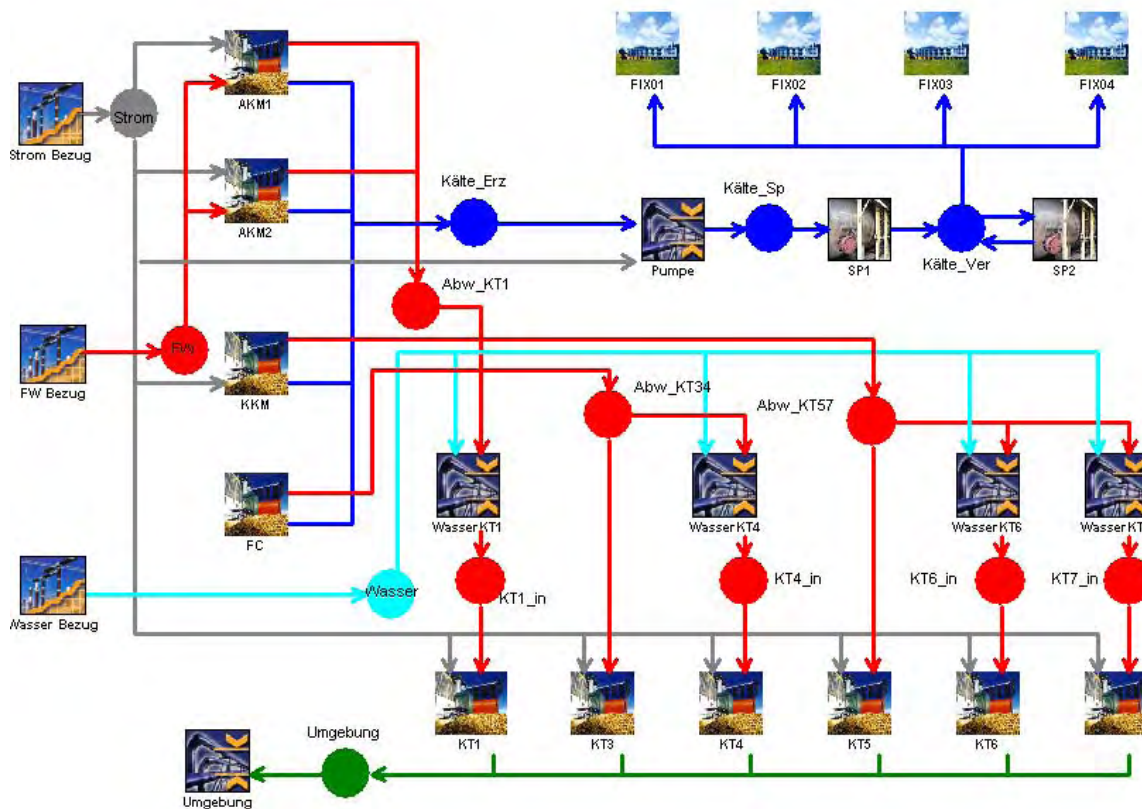


Abbildung 63: Modell des Kältenetzes

Die Lasten FIX01 bis FIX04, die den 4 verschiedenen Gebäudetypen CB07, CB11, CB13 und CB17 zugeordnet sind, werden von der Kältebereitstellung gedeckt und hängen daher direkt an dem Kälteknoten. Über die Vertragseinheiten wird die Kältemaschinen-Betriebsmittel mit Strom und Fernwärme versorgt, die den Antrieb der Kältemaschinen gewährleisten. Die bei der Kältebereitstellung entstehende Abwärme wird über die entsprechenden Abwärmeknoten zur Rückkühlung befördert. Die Abwärme wird von der Rückkühlung an die Umgebung abgegeben. Die Pumpe hängt an den Strom- und Wasserknoten sowie die Rückkühlungsbetriebsmittel.

Die Modellierung basiert auf Übertragungsfunktionen und Ergänzungsfunktionen von Betriebsmitteln oder Einheiten:

- Als Übertragungsfunktionen werden Gleichungen bezeichnet, die auch in das Simulationsprogramm DEMS eingegeben werden. Eine Übertragungsfunktion beschreibt das Verhalten einer Größe bei Veränderung einer anderen Größe.
- Als Ergänzungsfunktion wird eine Funktion bezeichnet, die neben einer Übertragungsfunktion ein System genauer beschreibt. Ein Beispiel für eine Ergänzungsfunktion ist die Außentemperaturabhängigkeit der elektrischen Leistungsaufnahme eines Kühlturmes. Eine solche Funktion gibt in diesem Fall an, in welchem Außentemperaturbereich welche Übertragungsfunktion zur Anwendung kommt.

Alle Kennlinien werden mit Daten von Hersteller- und Planungsangaben erarbeitet. Da das Modell nur lineare Kennlinien zulässt, werden die realen Kennlinien nach Bedarf linearisiert. Für die Eingabe in DEMS können lineare Übertragungsfunktionen mit konstanter Steigung oder mit zwei verschiedenen Steigungen in zwei sukzessiven Abschnitten einzugeben.

Im Folgenden werden die Modelle der Produktionsbetriebsmittel in Detail beschrieben.

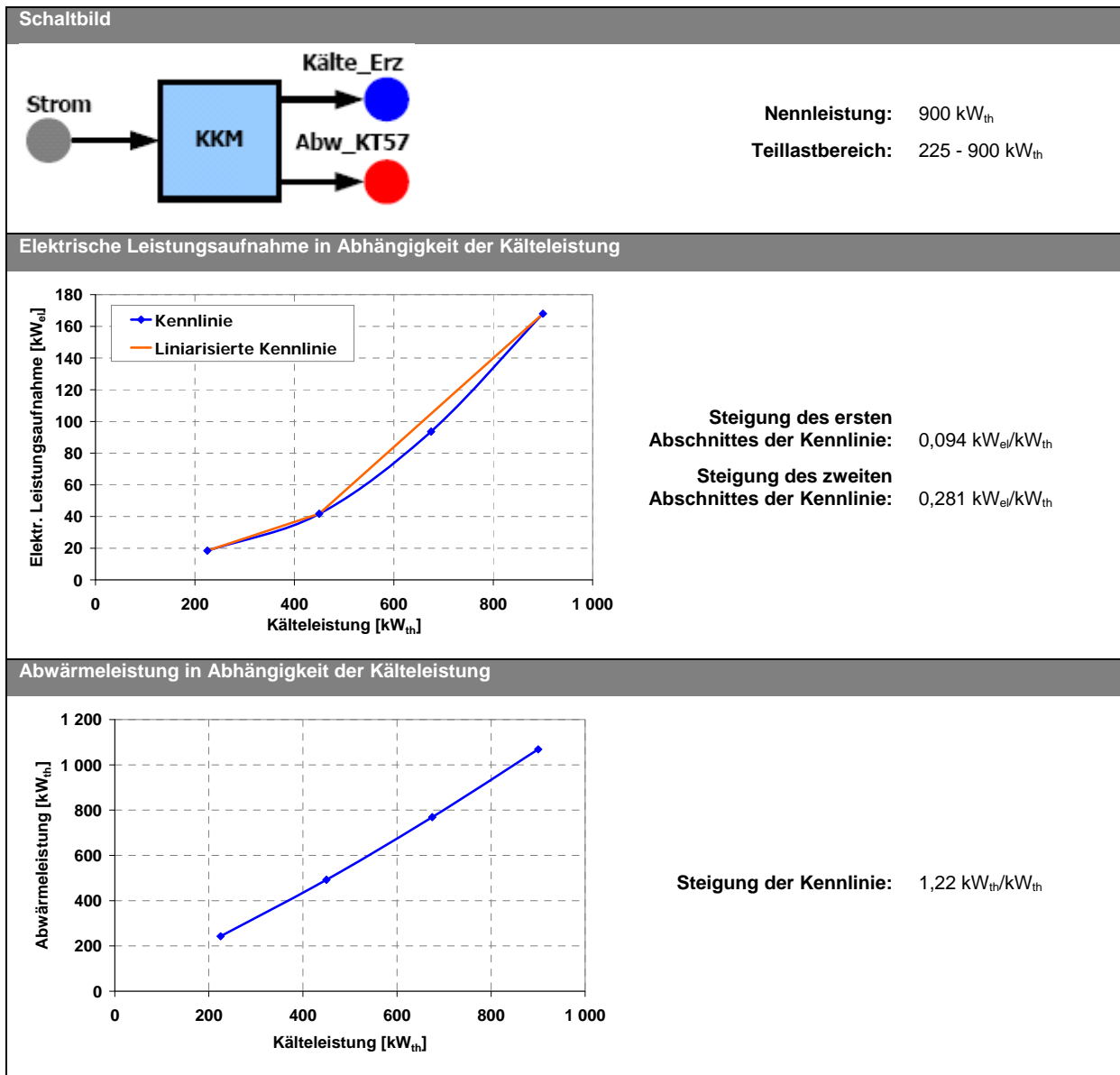
Die im Folgendem beschriebenen Modellkomponenten basieren alle auf die in [Fernwärme Wien, 2006 (A) und (B)] gegebene technische Beschreibungen.

7.2.1. Kältemaschinen

7.2.1.1. KKM

Das Schaltbild des KKM-Betriebsmittels sowie ihre Eckdaten sind in Tabelle 28 dargestellt.

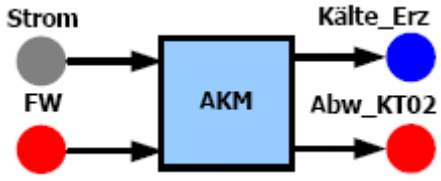
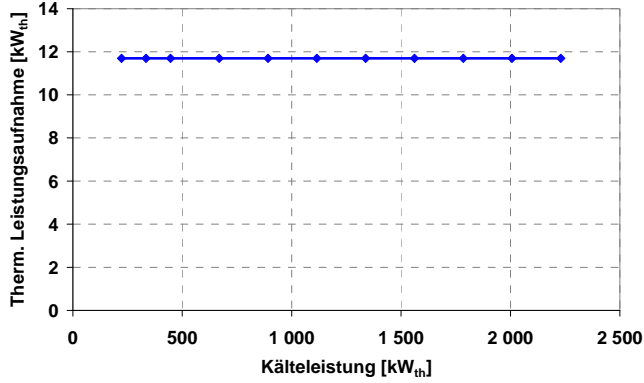
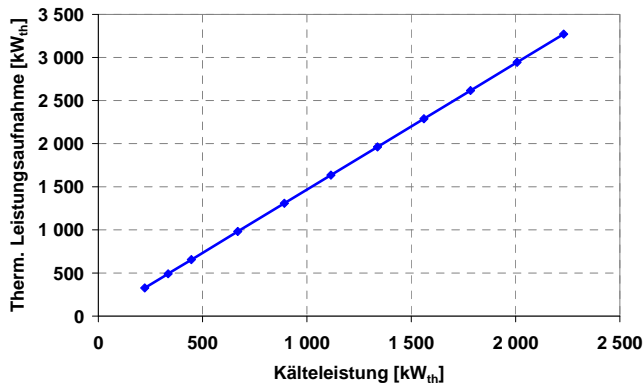
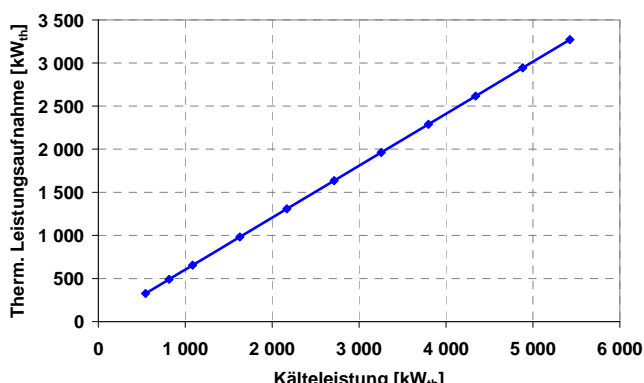
Tabelle 28: Eckdaten zur Modellierung der KKM



Die im Kondensator entstehende Abwärme ist die Summe aus der im Verdampfer aufgenommenen Kälteenergie und der durch den Verdichter zugeführten Energie. In diesem Fall ist die Abwärmeleistung über den gesamten Kälteleistungsbereich um das 1,2-fache höher als die Kälteleistung.

7.2.1.2. AKM1 und AKM2

Tabelle 29: Eckdaten zur Modellierung der AKM

Schaltbild	
	<p>Nennleistung: 2.200 kW_{th}</p> <p>Teillastbereich: 220 – 2.200 kW_{th}</p>
Elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Kälteleistung	
	<p>Elektrische Leistung: 11,7 kW_{el}</p>
Thermische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Kälteleistung	
	<p>Steigung der Kennlinie: 1,466 kW_{th}/kW_{th}</p>
Thermische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Abwärmeeistung	
	<p>Steigung der Kennlinie: 0,6 kW_{th}/kW_{th}</p>

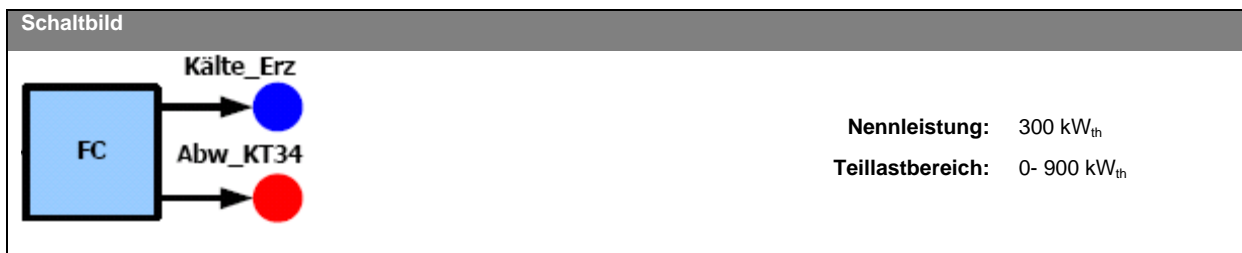
Die elektrische Leistungsaufnahme der Lösungspumpe ist über dem gesamten Teillastbereich mit 11,7 kW_{el} konstant [Fernwärme Wien, 2006 b; S. 27] [York, 2003].

Ein COP von 0,68 für die Nennleistung wird errechnet. Für den Teillastbereich wird dieser Wert als konstant angenommen, da laut Herstellerangaben der COP im realen Betrieb im Teillastverhalten nur geringfügig vom Nennleistungs-COP-Wert abweicht (York, 2003; S. 47). Es gilt nun für den gesamten Kälteleistungsbereich.

Bei gleicher thermischer Leistungsaufnahme ist die erzeugte Abwärmeleistung erheblich höher als die Kälteleistung der AKM. Im Vergleich zur oben angeführten KKM ist die Abwärmemenge der AKM bei jeweils maximaler Kälteleistung um 125% höher.

7.2.1.3. Free Cooling

Tabelle 30: Eckdaten FC-Betriebsmittel



Diese Einheit wurde mit zwei Ausgängen modelliert. Ein Ausgang liefert Kaltwasser zum Knoten Kälte_Erz und einer fördert das erwärmte Wasser zurück zu den Kühlturnmodi 1 und 2 des Hybridkühlturmes. Diese Modi werden unter Rückkühlungs-Betriebsmittel für FC beschrieben.

Der Leistungsbereich des FC – Betriebsmittels liegt bei 0 bis 300 kW_{th}. In diesem Bereich wurde angenommen, dass die Kälteleistung (Knoten Kälte_Erz) der abgegebenen Abwärmeleistung (Knoten Abw_KT34) entspricht.

7.2.2. Rückkühlung

Die Kältemaschinen können auf sehr einfacher Weise über lineare Kennlinienmodelle abgebildet werden. Die Modellierung von Kühltürmen in DEMS kann aber nicht gleichermaßen über spezifische Betriebsmittel erfolgen, weil das Betriebsverhalten von den Kühltürmen durch verschiedene Betriebsmodi charakterisiert wird. Dadurch, dass DEMS kein thermodynamisches Modell beinhaltet, sollen die Kühltürme dann über verschiedene Teilmodelle abgebildet werden. Die thermodynamischen Restriktionen (d. h. die Entscheidung, ob auf das eine oder das andere Teilmodell zugegriffen wird) werden daher über Zusatzfunktionen abgebildet.

Sobald in einem gegebenen Modus Wasser zur Rückkühlung gebraucht wird, wird auf eine modellbedingte Zusatzeinheit zurückgegriffen, die die Berechnung des Wasserverbrauchs ermöglicht, weil in DEMS kein Betriebsmittel zur Verfügung steht, wo drei Eingänge (Strom für den Antrieb der Ventilatoren, Wasser und die abzuführende Abwärme) verarbeitet werden können. Erst in dem nächsten Schritt wird über das tatsächliche Rückkühlungs-Betriebsmittel die elektrische Leistungsaufnahme berechnet. Beide Berechnungen erfolgen in Abhängigkeit der abzuführenden Abwärmemenge.

Die elektrische Leistungsaufnahme eines Kühlturmes bzw. der spezifische Frischwasserverbrauch eines nass betriebenen Kühlturmes, sind von zwei Faktoren abhängig:

- die abzuführende Abwärmeleistung

- der Außenluftzustand (thermodynamische Restriktion: Außenlufttemperatur und Feuchtkugeltemperatur)

Steigt die abzuführende Abwärmeleistung an, muss je nach Steuerungsstrategie des Kühlturmes mehr Luft gefördert werden und/oder mehr Frischwasser versprüht werden. Bei steigender Außenlufttemperatur und gegebener in den Kühlturm eintretender Abwärmeleistung, muss wieder, je nach Steuerungsstrategie, die Ventilatorleistung und oder die versprühte Wassermenge steigen.

Für die beschriebenen Kühltürme wurden daher jeweils Abhängigkeiten von der abzuführenden Abwärmeleistung und der Außenlufttemperatur angegeben.

7.2.2.1. Hybridkühlturm für Free Cooling (Modi 1 und 2)

Free Cooling wird in TownTown von einem Hybridkühlturm gewährleistet, dessen Betriebscharakteristik in fünf Modi aufgeteilt ist. Die verschiedenen Betriebsmittel und deren Verschaltungen zur Beschreibung der Eigenschaften des Hybridkühlturms sind in Abbildung 64 dargestellt. Nur die ersten zwei Modi entsprechen dem Free Cooling-Betrieb, der ausschließlich bei niedrigen Außentemperaturen möglich ist. Modi 3 bis 5 werden zur Rückkühlung der KKM herangezogen. In den Modi 1 und 2 ist der Kühlturm außenlufttemperaturgesteuert und es wird daher in Abhängigkeit von der Außentemperatur ein bestimmter Modus gefahren. In Tabelle 31 sind die Außenlufttemperaturbereiche dargestellt, in denen Modus 1 und Modus 2 betrieben werden.

Tabelle 31: Außentemperaturbereiche für die Modi 1 und 2

Außentemperaturbereich [°C]	Modus
15 bis 9,1°C	1
9,1 bis 10°C	2

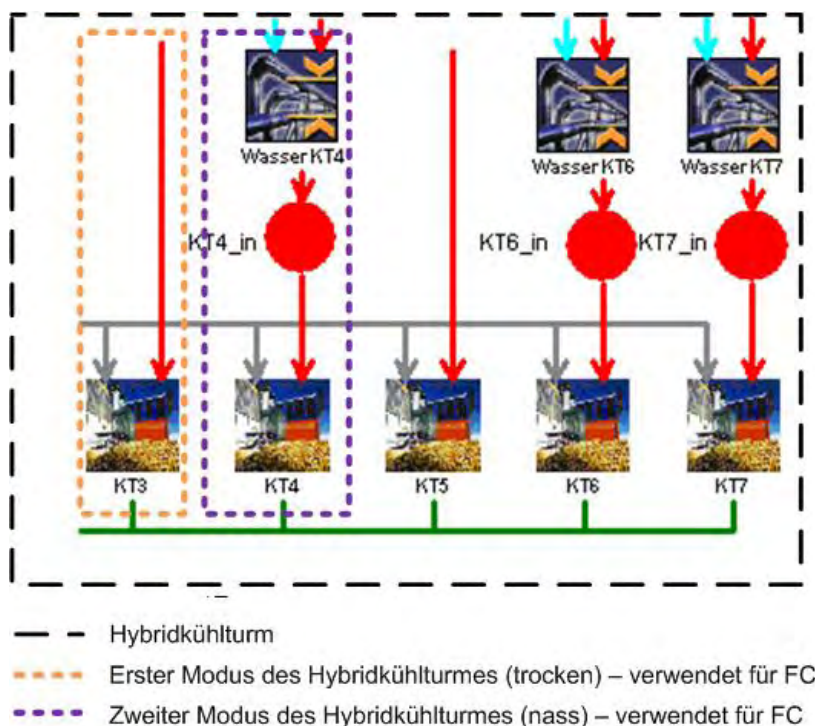


Abbildung 64: Modellierung des Hybridkühlturmes (Free Cooling)

Der erste Modus (KT3) wird rein trocken betrieben, d. h. die Kühlung erfolgt nur über die Wärmeübertragung zwischen dem zu kühlenden Wasser und der Außenluft auf niedrigem Temperaturniveau. Der zweite Modus besteht aus dem Rückkühlungs-Betriebsmittel KT4

und der modellbedingten Zusatz-Einheit WasserKT4. In diesem Modus erfolgt die Kühlung über die Außenluftzufuhr, die sensible Wärmeübertragung zwischen dem zu kühlenden Wasser erfolgt durch indirekte Verdunstungskühlung vom versprühten Wasser.

Tabelle 32: Eckdaten zur Modellierung von Free Cooling

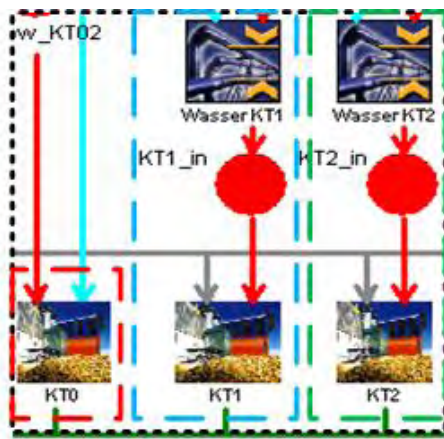
Schaltbild KT3	
	<p>Nennleistung: 300 kW_{th}</p> <p>Teillastbereich: 0 – 300 kW_{th}</p>
Schaltbild KT4	
	<p>Nennleistung: 300 kW_{th}</p> <p>Teillastbereich: 0 – 300 kW_{th}</p>
Elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Außentemperatur (bei der Nennleistung)	
	<p>Steigung des ersten Abschnittes der Kennlinie: 0,06 kW_{el}/K</p> <p>Steigung des zweiten Abschnittes der Kennlinie: 1,83 kW_{el}/K</p>
Frischwasserverbrauch in Abhängigkeit der Außentemperatur (bei der Nennleistung)	
	<p>Steigung der Kennlinie: 0,6 kW_{th}/kW_{th}</p>

7.2.2.2. Offener Kühlturm

Zusammen mit den modellbedingten Zusatz-Einheiten WasserKT1 und WasserKT2 wurden mit den Rückkühlungs-Betriebsmitteln KT0, KT1 und KT2 die offenen Kühltürme nachgebildet, (siehe Abbildung 65).

Die offene Rückkühlanlage besteht aus drei Kühltürmen mit jeweils 3.900 kW Rückkühlleistung. Da alle drei Einheiten dieselbe Betriebscharakteristik aufweisen, wurden sie im Modell aus Vereinfachungsgründen als ein Kühlturm mit 11.700 kW_{th} Rückkühlleistung dargestellt. Im Modell wurde dieser Kühlturm durch seine Betriebsweise in drei verschiedenen Modi unterteilt.

Im ersten Modus (KT0) erfolgt die Kühlung zu 100% über Verdunstungskühlung durch das Versprühen von Wasser. Steigt die abzuführende Abwärmeleistung an, werden die Ventilatoren zugeschaltet, da die natürliche Konvektion nicht mehr ausreicht, um die für die Kühlung notwendige Luftmenge zu bewegen. Es wird zusätzlich zum Wasser auch elektrischer Strom verbraucht und deswegen soll in diesem zweiten Modus (KT1) eine Zusatz-Einheit WasserKT1 eingebunden werden, um die Stromleistung und den Wasserbrauch rechnen zu können. Übersteigt die abzuführende Abwärmeleistung den Bereich von Modus 2, wird der dritte Modus (KT2) aktiviert, der wie KT1 konfiguriert wurde aber mit anderen Kennlinien hinterlegt ist, nämlich mit höherer Ventilatorleistung.



- Offener Kühlturm
- Erster Modus des offenen Kühlturmes (nass)
- Zweiter Modus des offenen Kühlturmes (nass+Ventilatoren)
- Dritter Modus des offenen Kühlturmes (nass+Ventilatoren)

Abbildung 65: Modellierung des offenen Kühlturms

Für die Berechnung des Frischwasserverbrauchs wird Eq 23 herangezogen (Schramek, 2001):

$$\dot{W}_F = \dot{W}_0 + \dot{W}_A + \dot{W}_S \quad (\text{Eq 24})$$

wo \dot{W}_F der spezifischer Frischwasserverbrauch des offenen Kühlturmes, \dot{W}_0 die Verdunstungswasserverluste, \dot{W}_A die Abschlämmwassermenge und \dot{W}_S die Sprühwasserverluste in [l/h] sind.

Die Verdunstungswasserverluste werden über Eq 24 ermittelt (Schramek, 2001):

$$\dot{W}_0 = \dot{L} \cdot (x_2 - x_1) \quad (\text{Eq 25})$$

wo \dot{L} die durch den Kühlturm beförderte Luftmenge in [kg/s] ist und x_1 bzw. x_2 die absolute Feuchte der in den Kühlturm eintretenden bzw. austretenden Luft in [g/kg] sind.

Für die Berechnung der Verdunstungswasserverluste wurden Wetterdaten [Meteotest] für eine erste Juliwoche herangezogen. Aus diesen Daten wurden die absoluten Feuchtwerte x_1 für diese beiden Wochen entnommen. Die Austrittstemperatur der feuchten Luft beträgt 27°C und die relative Feuchte wurde mit 95% angenommen (100% kann nur ein idealer Kühlturm erreichen). Aus diesen Daten wurde die absolute Feuchte x_2 berechnet. Für die durch den Kühlturm bewegte Luftmenge wurde der maximal mögliche Wert herangezogen, um den spezifischen Frischwasserverbrauch, bei maximaler Rückkühlleistung berechnen zu können.

Die Abschlämmwassermenge wird mit Eq 25 berechnet (Schramek, 2001):

$$\dot{W}_A = \frac{\dot{W}_0}{E - 1} \quad (\text{Eq 26})$$

wo E das Eindickungsverhältnis ist.

Für das Eindickungsverhältnis wurde der Wert 3 aus Herstellerangaben verwendet.

Die Sprühwasserverluste betragen laut Herstellerangaben $0,00002 \text{ kg/s}$.

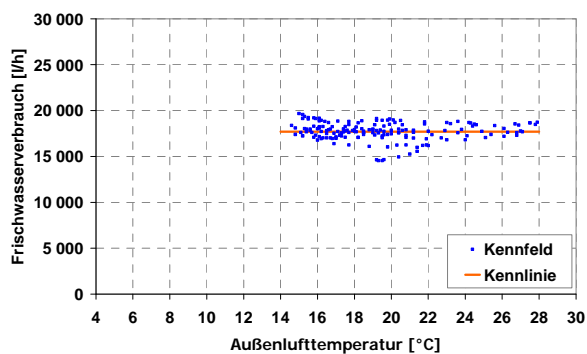


Abbildung 66: Spezifischer Frischwasserverbrauch des offenen Kühlturmes in der ersten Juliwoche in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur bei einer maximalen Rückkühlleistung von $11.700 \text{ kW}_{\text{th}}$

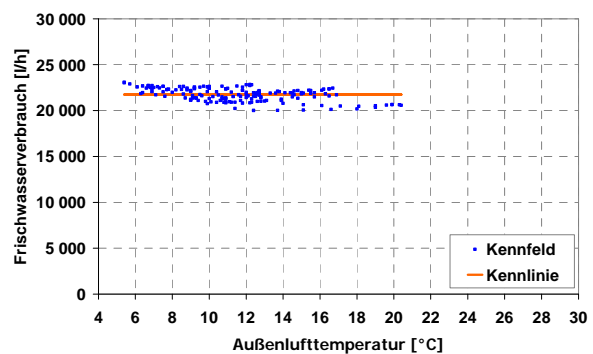
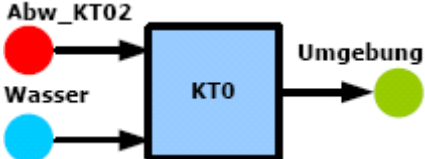
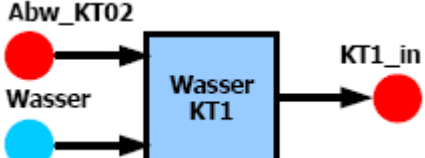
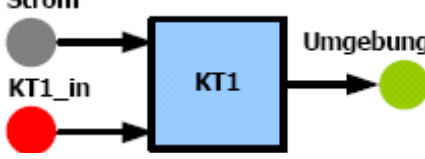
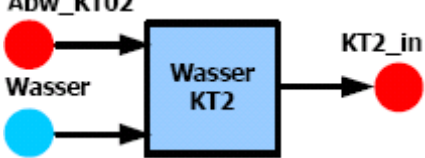
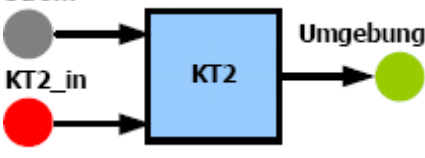
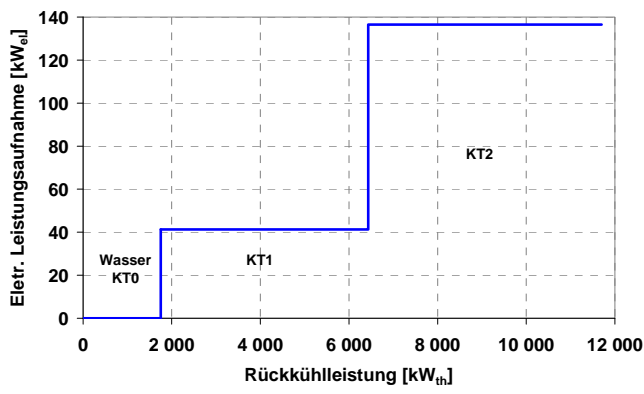
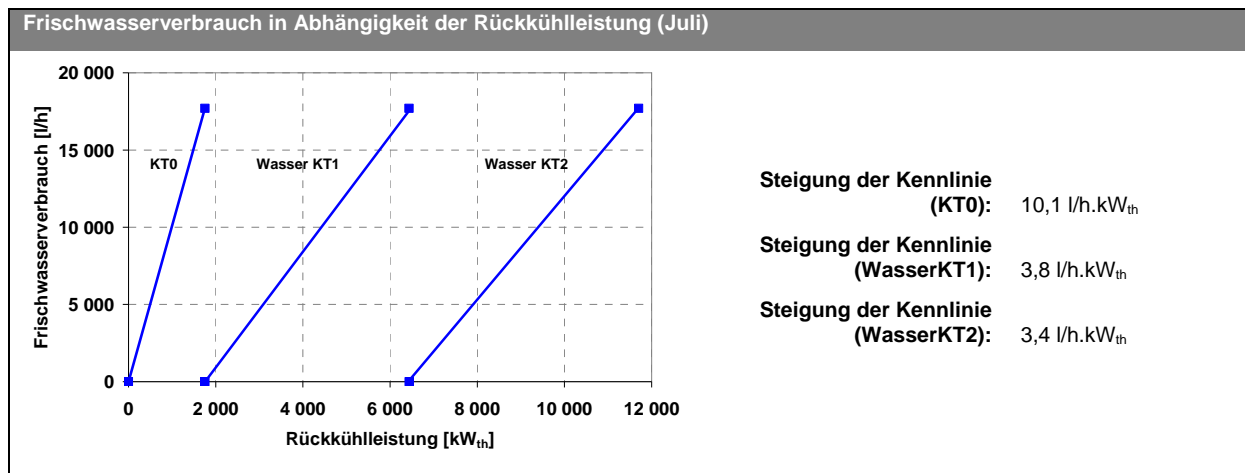


Abbildung 67: Spezifischer Frischwasserverbrauch des offenen Kühlturmes in der zweiten Maiwoche in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur bei einer maximalen Rückkühlleistung von $11.700 \text{ kW}_{\text{th}}$

Aus den Kennfeldern in Abbildung 66 und Abbildung 67 ist deutlich sichtbar, dass der Frischwasserverbrauch in den untersuchten Wochen wenig von der Außentemperatur abhängig ist. Dadurch muss die Außentemperaturabhängigkeit im Modell nicht mehr berücksichtigt werden und es kann für die weiteren Berechnungen der Mittelwert von ca. 17.700 l/h angenommen werden, der den spezifischen Frischwasserverbrauch bei maximaler Rückkühlleistung darstellt. Im Teillastbereich wird in erster Annäherung angenommen, dass eine lineare Abhängigkeit zwischen Frischwasserverbrauch und Rückkühlleistung besteht (siehe Tabelle 33).

Tabelle 33: Eckdaten zur Modellierung des offenen Kühlturms

Schaltbild KT0	
	Leistungsbereich: 0 – 1.755 kW _{th}
Schaltbild KT1 und WasserKT1	
	Leistungsbereich: 1.755 – 6.435 kW _{th}
	
Schaltbild KT2 und WasserKT2	
	Leistungsbereich: 6.435 – 11.700 kW _{th}
	
Elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Rückkühlleistung	
	<p>Elektrische Leistungsaufnahme KT0: 0 kW_e</p> <p>Elektrische Leistungsaufnahme KT1: 41 kW_{el}</p> <p>Elektrische Leistungsaufnahme KT2: 137 kW_{el}</p>



7.2.2.3. Hybridkühlturm (Modi 3, 4 und 5)

Die drei Rückkühlung-Betriebsmittel KT5, KT6 und KT7 bilden zusammen mit den modellbedingten Zusatz-Einheiten WasserKT6 und WasserKT7 die Modi 3, 4 und 5 des Hybridkühlturmes (siehe Abbildung 69). Diese Modi wurden für die Rückkühlung der KKM verwendet und laut Herstellereingaben ist jeder Modus einem Temperaturbereich assoziiert (siehe Tabelle 34).

Tabelle 34: Außentemperaturbereiche für die Modi 3, 4 und 5

Außentemperaturbereich [°C]	Modus
10 bis 18°C	3
18 bis 23°C	4
23 bis 31°C	5

Im dritten Modus (KT5) erfolgt die Kühlung zu 100% im Trockenbetrieb. Steigen die abzuführende Abwärmeleistung oder die Außentemperatur an, wird der Kühlturm hybrid betrieben, mit einer teilweisen Wasserbenetzung. Es wird zusätzlich zum elektrischen Strom auch Wasser verbraucht und deswegen soll in diesem vierten Modus (KT6) eine Zusatz-Einheit WasserKT6 eingebunden werden, um die Stromleistung und den Wasserbrauch rechnen zu können. Übersteigt die abzuführende Abwärmeleistung den Bereich von Modus 4 oder erhöht sich die Außentemperatur, wird der fünfte Modus (KT7) aktiviert, der wie KT6 konfiguriert wurde aber mit anderen Kennlinien hinterlegt ist, nämlich mit höherem Wasserverbrauch.

Der Betrieb vom Hybridkühlturm ist daher von zwei unabhängigen Regeln charakterisiert:

- Regel 1: Die Außentemperatur bestimmt den Modus, in dem der Kühlturm betrieben wird.
- Regel 2: In jedem Modus ist die maximale mögliche Rückkühlleistung limitiert, wie es Abbildung 69 und Abbildung 70 aus Herstellerdaten zeigen. Falls aber aufgrund des Betriebs der Kältemaschine einen höheren Modus gebraucht wird, um mehr Abwärme abzuführen zu können, tritt Regel 2 in Konflikt mit Regel 1.

Es ist eindeutig, dass ein thermodynamisches Modell des Kühlturms gebraucht wird, um den Konflikt zwischen beiden Regeln abzuklären. Da die Software DEMS die Integration eines solchen Modells nicht zulässt und keine Programmierungsarbeit im Rahmen des Projektes durchgeführt werden konnte, wurde durch Vereinfachung wie bei dem offenen Kühlturm (siehe 7.2.2.2) die Außentemperaturabhängigkeit gelöst.

Dafür wurden die Kennlinien aus Tabelle 35 verwendet. Diese Kennlinien basieren auf die Annahme, dass die Modi unabhängig von der Außentemperatur festgelegt werden, und dass

alleine die abzuführende Abwärmeleistung bei der Berechnung der Stromleistung und des Wasserverbrauchs ausschlaggebend ist.

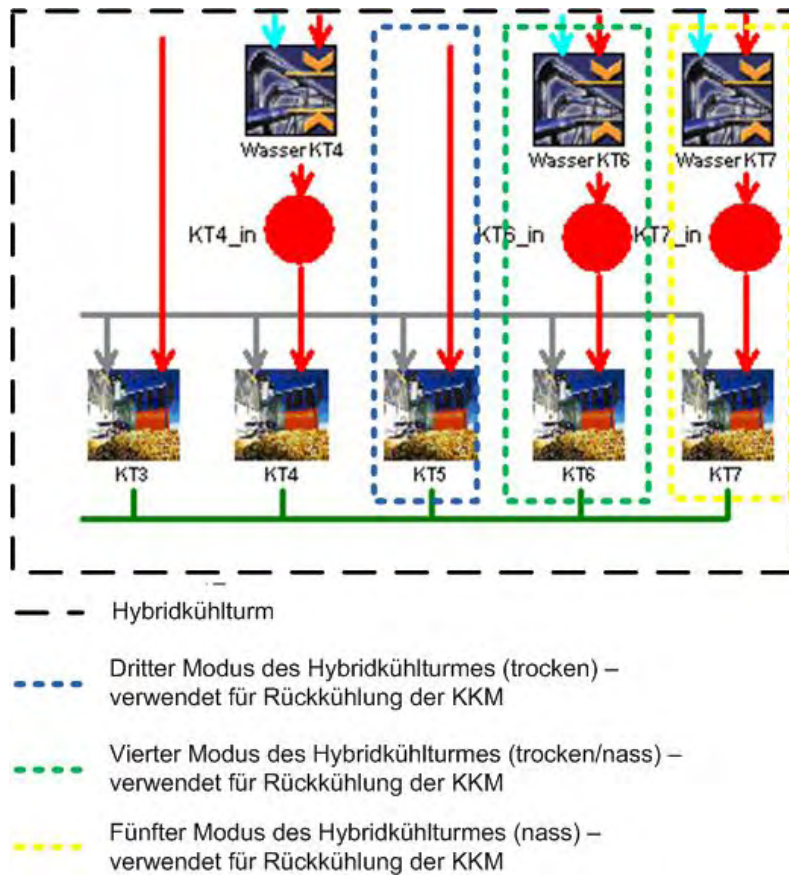


Abbildung 68: Modellierung des Hybridkühlturmes (Modi 3, 4, und 5)

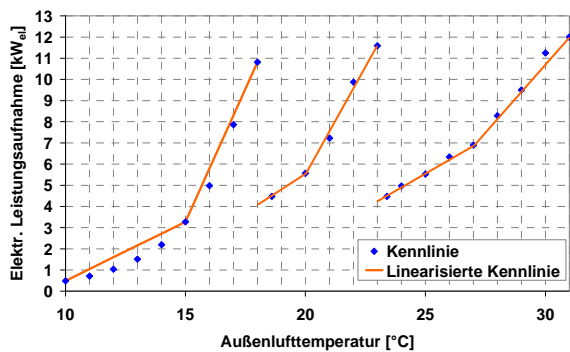


Abbildung 69: Elektrische Leistungsaufnahme von KT5, KT6 und KT7 in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur bei maximal möglicher Rückkühlleistung

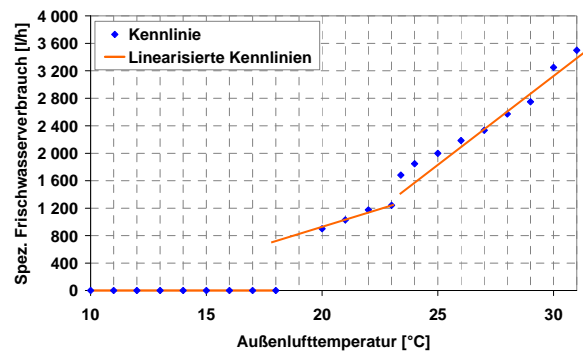
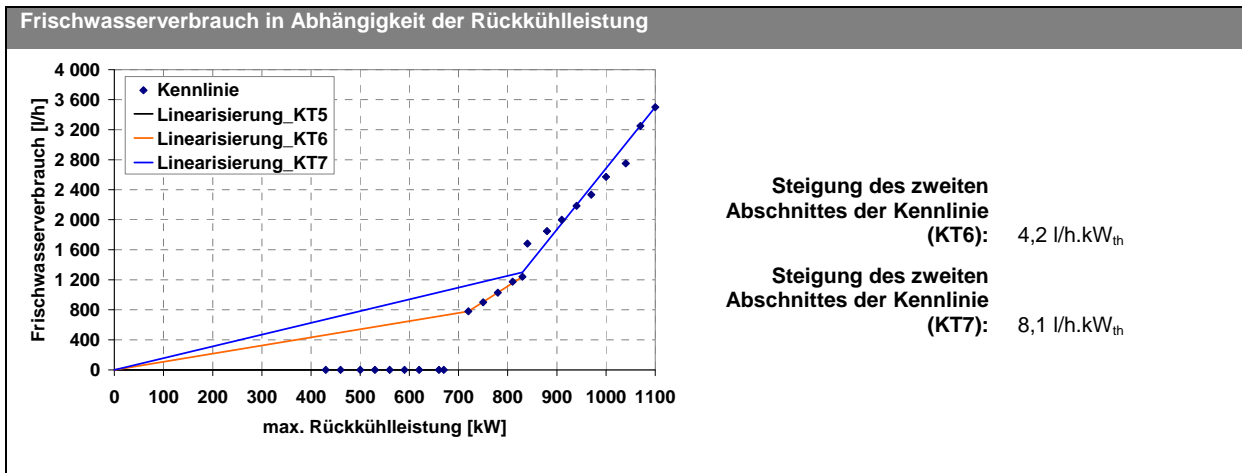


Abbildung 70: Spezifischer Frischwasserverbrauch von WasserKT6 und WasserKT7 in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur bei maximal möglicher Rückkühlleistung

Tabelle 35: Eckdaten zur Modellierung des Hybridkühlturms (Modi 3, 4, und 5)

Schaltbild KT5	
	Leistungsbereich: 0 – 670 kW _{th}
Schaltbild KT6 und WasserKT6	
	Leistungsbereich: 670 – 830 kW _{th}
Schaltbild KT7 und WasserKT7	
	Leistungsbereich: 830 – 1.100 kW _{th}
Elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Rückkühlleistung	
	<p>Steigung des zweiten Abschnittes der Kennlinie (KT5): 0,08 kW_e/kW_{th}</p> <p>Steigung des zweiten Abschnittes der Kennlinie (KT6): 0,07 kW_e/kW_{th}</p> <p>Steigung des zweiten Abschnittes der Kennlinie (KT7): 0,03 kW_e/kW_{th}</p>

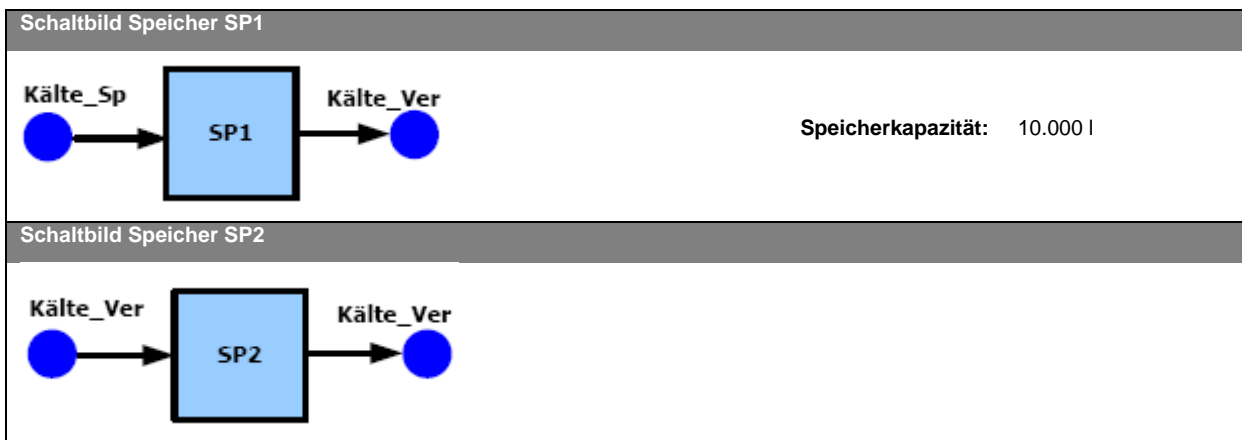


7.2.3. Speicher- und Pumpen

7.2.3.1. Speicher

Der Kaltwasserspeicher SP1 wurde seriell eingebunden und wird als Pufferspeicher mit einer Kapazität von 10.000 l angenommen. Es besteht die Möglichkeit, einen zweiten Speicher SP2 zu verwenden, der aber im Rahmen dieser Arbeit nicht genutzt wurde.

Tabelle 36: Eckdaten Speicher

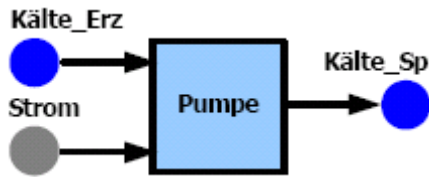


7.2.3.2. Pumpen

Zur Vereinfachung des Modells wurden nur die Pumpen des Verbraucherkreises herangezogen. Die Pumpen des Erzeugerkreises wurden im Modell nicht berücksichtigt, weil deren elektrische Leistungsaufnahme im Vergleich zum Verbraucherkreis bei niedrigen Kälteleistungen sehr gering ist und in erster Annäherung vernachlässigt werden kann.

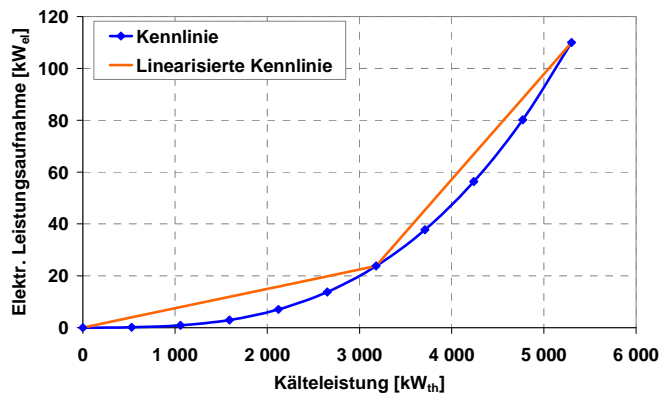
Tabelle 37: Eckdaten Pumpe

Schaltbild Pumpe



Leistungsbereich: 0 – 5.300 kW_{th}

Elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Kälteleistung



Steigung des ersten Abschnittes der Kennlinie: 0,014 kW_e/kW_{th}
 Steigung des zweiten Abschnittes der Kennlinie: 0,077 kW_e/kW_{th}

7.2.4. Verbrauchsgebundene Kosten

7.2.4.1. Strom- und Fernwärmepreise

Es wurden Simulationen mit verschiedenen Energiekosten durchgeführt, um die Auswirkungen des Fernkältenetzbetriebs auf die Energiekosten aufzuzeigen. Die Bandbreite der möglichen Energiekosten ist in Tabelle 38 aufgezeigt.

Tabelle 38: Bandbreite der Energiepreise

Energieträger	Niedrige Preise	hohe Preise
Strom [€/kWh _e]	0,10	0,12
Fernwärme [€/kWh _{th}]	0,016	0,023

7.2.4.2. Wasserpreise

Beim Betrieb eines Nass- oder Hybridkühlturmes sind die zuzuführenden Frischwassermengen und die abzuführenden Abwassermengen von Bedeutung. Beim Verdunsten des Wassers konzentrieren sich gelöste Salze im Kühlwasser, wodurch ständig ein Teil der Wassermenge abgeführt werden muss. Diese Abwassermenge muss in den Kanal abgeführt werden, wofür ein Abwasserpreis zu bezahlen ist. Für einen Liter zugeführten Frischwassers muss also auch ein bestimmter Anteil an Abwasser abgeführt werden, welcher vom Kühlturmtyp abhängig ist. Im Modell gibt es zwei Möglichkeiten, den Abwasserpreis zu berücksichtigen:

- Im Modell könnte ein Abwasserknoten definiert werden, an dem die Kühltürme zusätzlich anhängen würden. Die Abfuhr von Abwasser würde dann direkt an dem Abwasserpreis gekoppelt sein, was aber zu einer Verkomplizierung des Modells führen würde.

- Die zweite Möglichkeit, die hier verfolgt wurde, besteht um eine Erhöhung des Frischwasserpreises um den umgerechneten Abwasserpreis, woraus sich der Gesamtwasserpreis ergibt. Dafür wurde der Abwasserpreis in €/l Frischwasser umgewandelt.

Das Preisband für Frischwasser erstreckt sich von 0,0025 bis 0,004 €/l und der Abwasserpreis beträgt 0,0013 €/l. Die Umrechnung vom Frischwasser- und vom Abwasserpreis auf den Gesamtwasserpreis für den offenen bzw. den Hybridkühlturm ergibt die in Eq 27 und Eq 28 beschriebenen Formeln. Für den offenen Kühlturm wird mit dem halben Abwasserpreis gerechnet, da pro Liter verwendetem Frischwasser ein halber Liter Abwasser abgeführt werden muss. Beim Hybridkühlturm wird der Abwasserpreis durch drei dividiert, da hier pro Liter Frischwasser ca. 0,33l Abwasser entsteht. Da die Preisunterschiede für die zwei Typen von Kühltürmen gering sind, wird der Mittelwert aus dem Gesamtwasserpreis des offenen bzw. des Hybridkühlturmes zur Bildung des Gesamtwasserpreises berechnet (Eq 29).

Die sich ergebenden Gesamtwasserpreise für die niedrigen und hohen Frischwasserpreise sind in Tabelle 39 dargestellt.

$$P_{Wasser_offen} = P_{Frischwasser} + \frac{1}{2} \cdot P_{Abwasser} \quad (\text{Eq 27})$$

$$P_{Wasser_Hybrid} = P_{Frischwasser} + \frac{1}{3} \cdot P_{Abwasser} \quad (\text{Eq 28})$$

$$P_{Wasser_gesamt} = \frac{P_{Wasser_offen} + P_{Wasser_Hybrid}}{2} \quad (\text{Eq 29})$$

mit:

P_{Wasser_offen}	Gesamtwasserpreis für den offenen Kühlturm [€/l _{Frischwasser}]
P_{Wasser_Hybrid}	Gesamtwasserpreis für den Hybridkühlturm [€/l _{Frischwasser}]
P_{Wasser_gesamt}	Gesamtwasserpreis von offenen Kühlturm und Hybridkühlturm [€/l _{Frischwasser}]
$P_{Frischwasser}$	Frischwasserpreis [€/l]
$P_{Abwasser}$	Abwasserpreis [€/l]

Tabelle 39: berechnete Gesamtwasserpreise

Preisniveau	niedrig	hoch
Frischwasserpreis [€/l]	0,0025	0,0040
Abwasserpreis [€/l]	0,0013	0,0013
Gesamtwasserpreis-offen [€/l _{Frischwasser}]	0,0032	0,0047
Gesamtwasserpreis-hybrid [€/l _{Frischwasser}]	0,0029	0,0044
Gesamtwasserpreis-gesamt [€/l _{Frischwasser}]	0,0030	0,0045

7.3. Simulationsvarianten und Preisszenarien

Abgesehen von den verschiedenen Kältebedarfsverläufen wurden zwei verschiedenen Preisszenarien angenommen. Im Preisszenario „pro AKM“ soll der Einsatz der AKM aufgrund einer vorteilhaften Energiepreisstruktur gegenüber der KKM begünstigt werden. Dafür werden für Fernwärme und Wasser die möglichst niedrigen Kosten angesetzt, weil die

Absorptionskältetechnologie von diesen Preisen sehr abhängig ist. Für den Betrieb von AKM sind die Fernwärme- und Wasserkosten entscheidend, weil Fernwärme die Hauptantriebsenergie ist und für die Rückkühlung mit offenen Kühltürmen große Mengen an Wasser erforderlich sind.

Das Preisszenario „pro KKM“ charakterisiert sich im Gegenteil durch niedrige Strompreise, um den Einsatz der KKM zu begünstigen. Der Betrieb von KKM ist stromintensiv und für die Rückkühlung mit dem Hybridkühlturm sind die nötigen Wassermengen geringer als bei offenen Kühltürmen. In Tabelle 40 sind die Preisstrukturen der zwei Preisszenarien „pro KKM“ und „pro AKM“ dargestellt.

Tabelle 40: berechnete Gesamtwasserpreise

	„pro KKM“	„pro AKM“
Strom [€/kWh _e]	0,10	0,12
Fernwärme [€/kWh _{th}]	0,023	0,016
Wasser [€/l]	0,0045	0,0030

7.4. Simulationsergebnisse

7.4.1. Einleitung: allgemeine Tendenzen

Das Optimierungsverfahren sucht die zur Abdeckung des Kältebedarfs günstigste Kälteaufbringungsmöglichkeit aus. Dabei sind nicht nur die reinen Energiekosten der Kältemaschinen relevant, sondern auch die Kosten der Rückkühlwerke und Pumpen. Um die Simulationsergebnisse nachvollziehen zu können, müssen zuerst die absoluten Energiekosten der verschiedenen Anlagenkomponenten bei den in 7.3 angegebenen Preisszenarien dargestellt werden. Die absoluten Energiekosten wurden in Abhängigkeit der Kälteenergie bzw. der Abwärmeenergie in Abbildung 71 bis Abbildung 73 aufgezeigt. Sie basieren alle auf die in 7.2 beschriebenen Kennlinienmodelle.

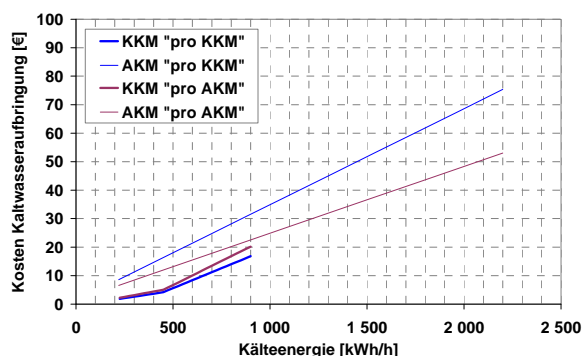


Abbildung 71: Energiekosten für die Kaltwasseraufbringung (Kältemaschinen ohne Kühlturm)

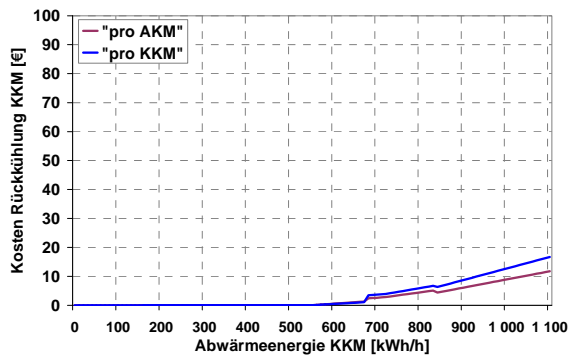


Abbildung 72: Kosten für die Rückkühlung der KKM

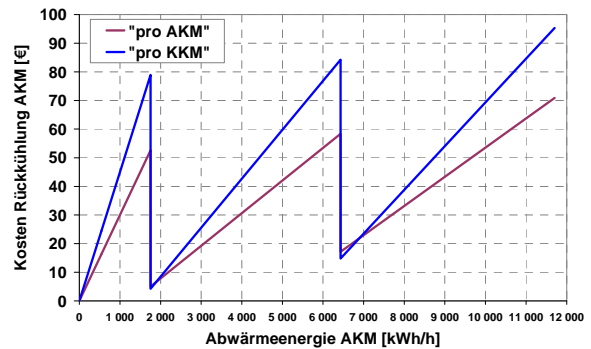


Abbildung 73: Kosten für die Rückkühlung der AKM

Bei niedrigen Kälteleistungen (unter 500 kW) wird die KKM mit niedrigeren Energiekosten als die AKM betrieben. Auch die Kosten für die Rückkühlung werden niedrig gehalten (Trockenmodus des Hybridkühlturms: Modus 3), was den Betrieb des Fernkältenetzes zu Gunsten von der KKM führt.

Auf der AKM-Seite sind vor allem die Wasserkosten der Rückkühlanlage sehr relevant. Auf Abbildung 73 sind zwar die einzelnen Stufen sichtbar, die den konstanten Stromverbrauch der einzelnen Modi charakterisieren, aber es sind die Wasserkosten, die die höchsten Kostenspitzen verursachen.

Auf Abbildung 73 ist auch sichtbar, dass es unwirtschaftlich ist, den zweiten Modus des offenen Kühlturms auf „Volllast“ zu betreiben, weil dadurch sehr hohe Wasserkosten entstehen würden. Es ist da sinnvoller, die AKM auf einer höheren Leistung zu betreiben, um damit in den dritten Modus des offenen Kühlturms zu gelangen, der im Vergleich mit dem zweiten Modus im unteren Leistungsbereich sehr niedrige Energiekosten verursacht.

7.4.2. Auswertung der einzelnen Simulationen

7.4.2.1. Dauernder Betrieb der BTA

Obwohl die Varianten mit dauerndem Betrieb der BTA durch einen regelmäßigen Kältebedarfsverlauf charakterisiert sind, der sich für eine 100%ige Abdeckung über die AKM eignen würde, ist es aus Kostenoptimierungssicht immer sinnvoll, einen Teil des gesamten Kältebedarfs über die KKM abzudecken.

Das Leistungsverhältnis zwischen AKM und KKM ergibt sich aus der Energiepreisstruktur. In der Variante „pro KKM“ (siehe Tabelle 42) wird die KKM fast dauernd auf Volllast betrieben (900 kW). In der Variante „pro AKM“ wird die KKM so betrieben, dass möglichst niedrige Kosten bei der Rückkühlung entstehen, d. h. ab einer Abwärmeleistung von 760 kW (siehe Abbildung 72 und Tabelle 41).

Zwischen 8:30 und 9:30 gibt es bei beiden Preisszenarien die Möglichkeit, dass die AKM einen größeren Anteil des Kältebedarfs abdecken, und dass die KKM in der Leistung zurückgenommen wird. Die abzudeckende Rückkühlleistung beträgt über 6.435 kW, die dann dem dritten Modus (KT2) des offenen Kühlturms entspricht. Im Vergleich mit dem zweiten Modus (KT1) wird der niedrige Wasserbrauch durch eine höhere Ventilatorleistung kompensiert (siehe Tabelle 33), wodurch niedrige Kosten entstehen können (siehe Abbildung 73).

Ab diesen Zeitpunkt wird dann bei beiden Preisszenarien die zweite AKM zugeschaltet. Da beide AKM laut Herstellerangaben einen konstanten COP auch im Teillastbereich aufweisen (siehe Tabelle 29) gibt es aus Optimierungssicht keinen Grund, die eine oder die andere AKM zu bevorzugen. Um zu vermeiden, dass durch diese Unbestimmtheit abwechselnd

zwischen beiden AKM umgeschaltet wird, was keiner realen Betriebsstrategie entsprechen würde, wurden die Kosten der AKM2 um wenige Prozente niedriger gehalten als bei der AKM1.

Um 19:45 kommen die Verhältnisse wieder vor, die zwischen 8:30 und 9:30 festgestellt worden sind. Die KKM wird in ihrer Leistung wieder zurückgenommen, weil die Kosten der Rückkühlung der AKM niedrig gehalten werden können.

In der Variante „pro AKM“ ist im Berechnungsverfahren das mathematische Optimum nicht gefunden worden. Um 8:30 wird der Modus 5 (KT7) zur Rückkühlung der KKM noch verwendet, wo aber der Modus 3 (KT5) zu niedrigeren Kosten geführt hätte. Da der Preisunterschied aber nicht sehr groß ist (siehe Tabelle 35) ist die Auswirkung nicht sehr relevant.

7.4.2.2. Nachtbetrieb der BTA

Wie bei der Variante mit Nachtbetrieb der BTA ergibt sich das Leistungsverhältnis zwischen AKM und KKM aus der Energiepreisstruktur. In der Variante „pro AKM“ ist die Rückkühlleistung der KKM in vielen Stunden auf 670 kW begrenzt, weil damit auch die Kosten der Rückkühlung niedrig gehalten werden können. Ab 13:30 und für ca. 3 Stunden wird der Kältebedarf sogar ausschließlich von den AKM abgedeckt, weil dadurch der dritte Modus des offenen Kühlturms eingeschaltet werden kann (KT2). Im niedrigen Leistungsbereich bleibt der Wasserverbrauch auf einem niedrigen Niveau, was zu niedrigen Kosten führt (siehe Tabelle 43). Bei der Variante „pro KKM“ kommt dies nicht vor, weil die Kombination zwischen KKM und AKM unter Berücksichtigung der entsprechenden Kühltürme immer zu niedrigeren Kosten führt.

Tabelle 41: Energie- und Kostenbilanz, Variante „pro AKM“ mit dauerndem Betrieb der BTA

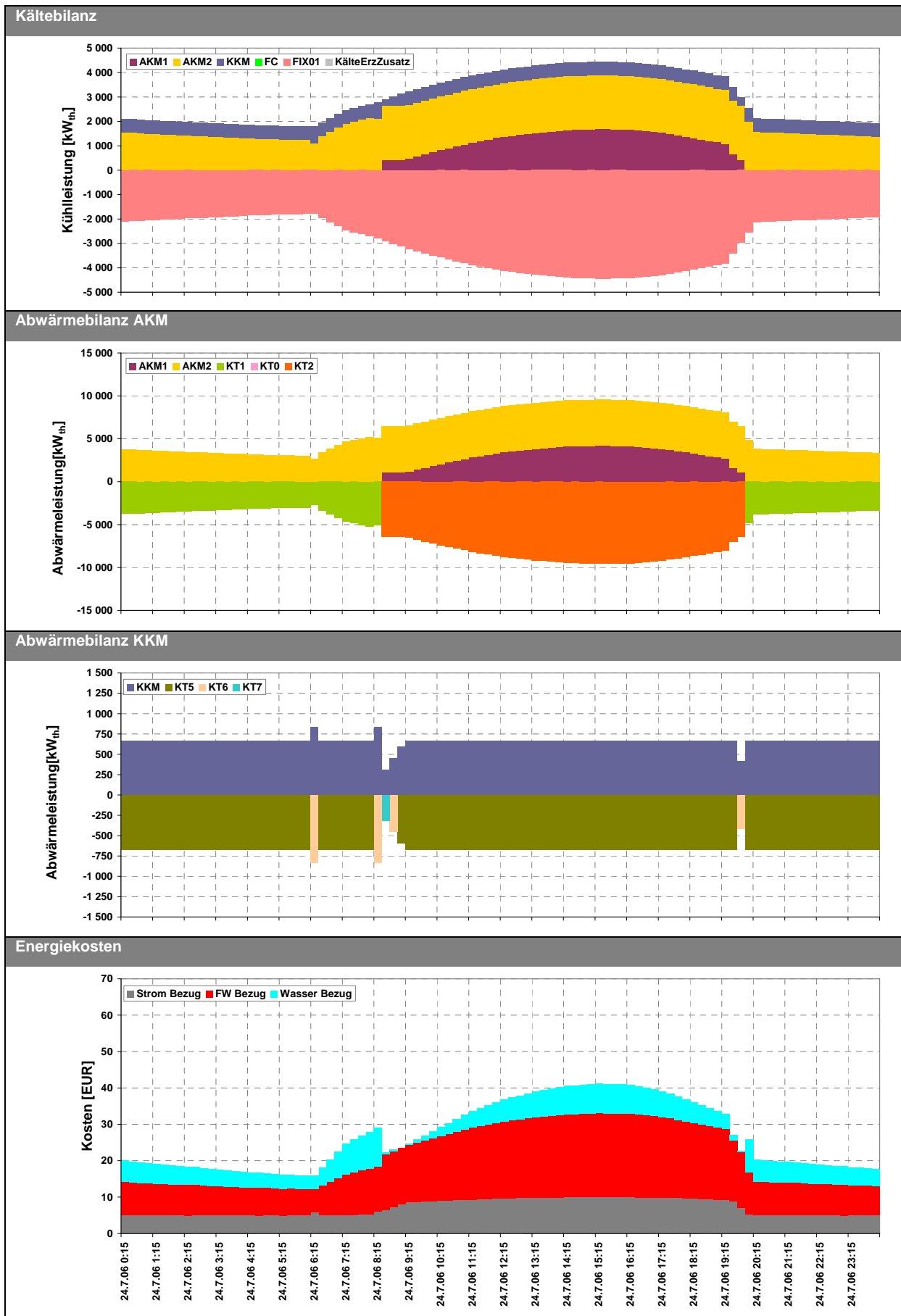


Tabelle 42: Energie- und Kostenbilanz, Variante „pro KKM“ mit dauerndem Betrieb der BTA

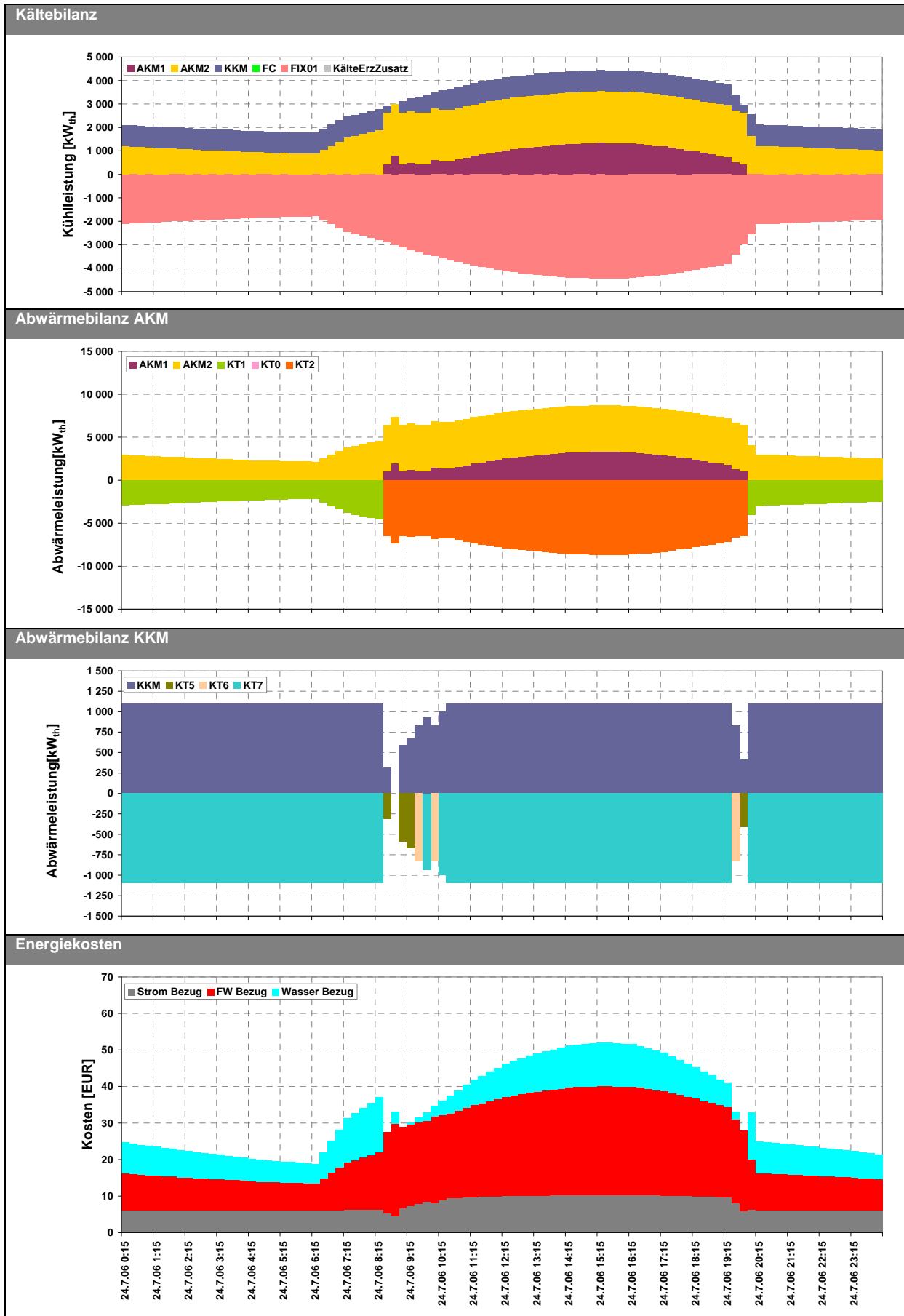


Tabelle 43: Energie- und Kostenbilanz, Variante „pro AKM“ mit Nachtbetrieb der BTA

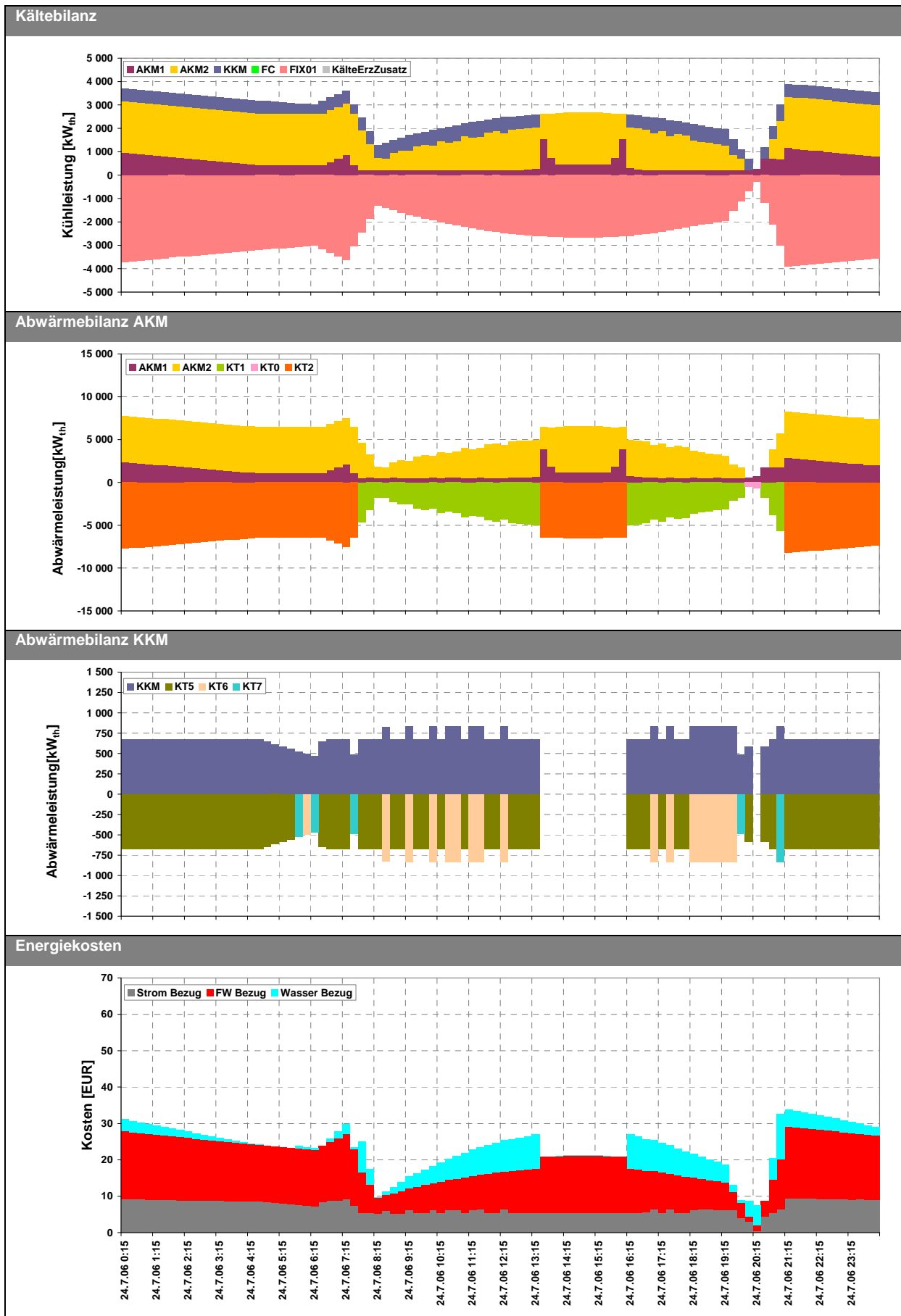
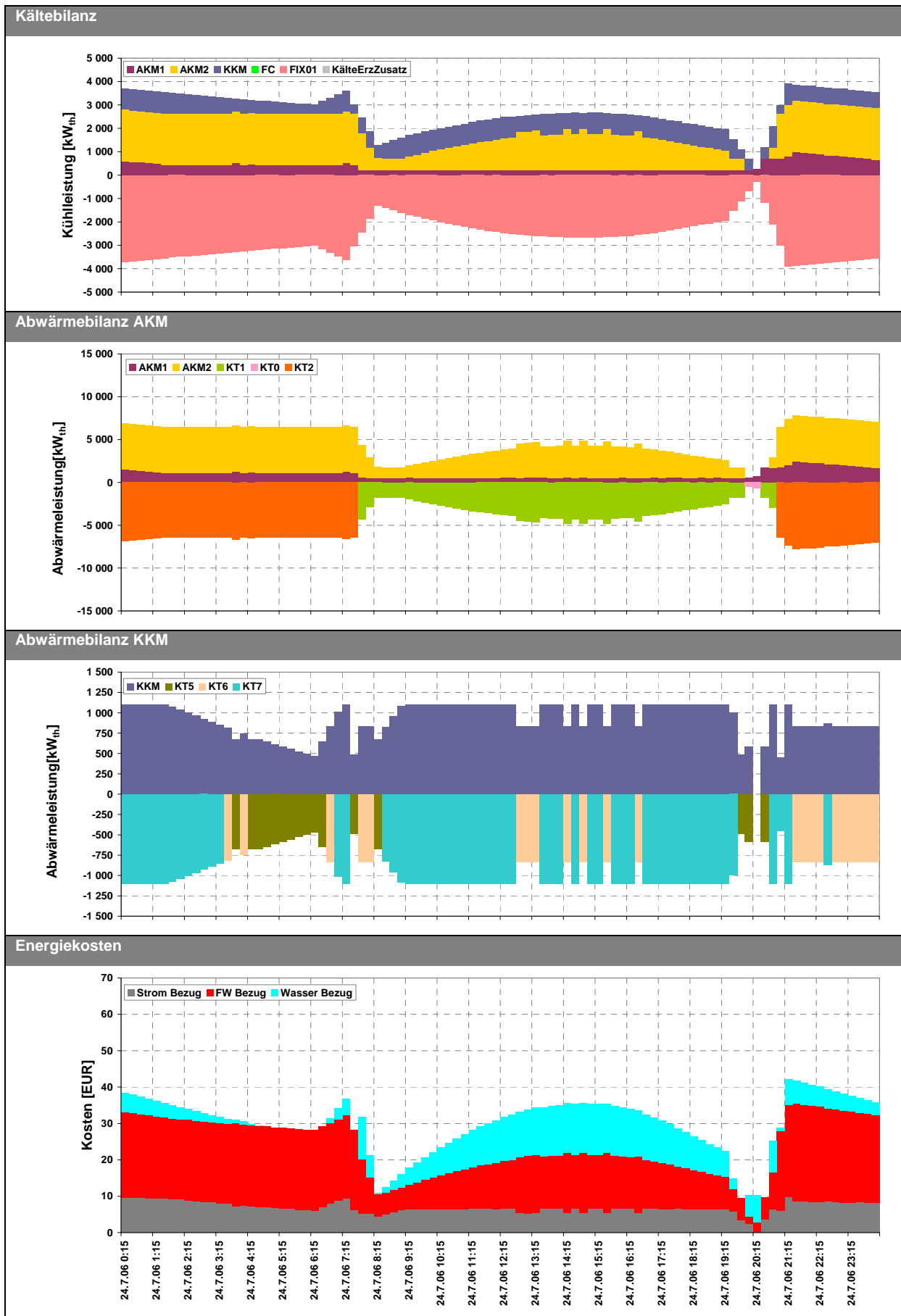


Tabelle 44: Energie- und Kostenbilanz, Variante „pro KKM“ mit Nachtbetrieb der BTA



7.4.3. Variantenvergleich

Abbildung 74 und Abbildung 75 verdeutlichen die Auswirkungen der verschiedenen Preisszenarien. Bei beiden Betriebsvarianten der BTA erhöht sich die Anzahl an Vollbetriebsstunden der AKM deutlich, aber trotzdem nicht genug, um die KKM während einer längeren Zeitperiode (z. B. nachts) abzuschalten. Die Preisstruktur ist dafür nicht geeignet.

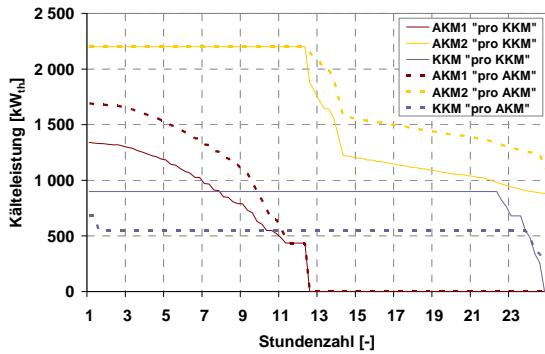


Abbildung 74: Leistungskurven für die Varianten mit dauerndem Betrieb der BTA

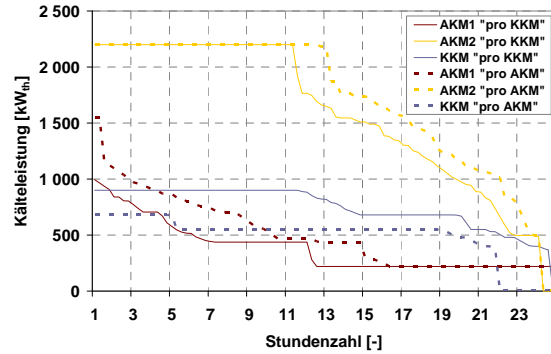


Abbildung 75: Leistungskurven für die Varianten mit Nachtbetrieb der BTA

In Abbildung 76 bzw. Abbildung 77 wird die Aufteilung der Kälteerzeugung zwischen den Kältemaschinen bzw. die Aufteilung des Stromverbrauchs für die verschiedenen Varianten gezeigt. In den Varianten „pro AKM“ wird ca. 80% des Kältebedarfs von den AKM abgedeckt gegenüber ca. 70% in den Varianten „pro KKM“. Ca. 35% bis auf 50% der Stromkosten fallen zum Antrieb der KKM an.

In Abbildung 78 sind die allgemeinen verbrauchsgebundene Kosten für den ausgewählten Tag dargestellt. Vor allem die Fernwärme- und die Wasserkosten haben einen großen Einfluss auf die Gesamtkosten. Wenn der Kältepreis nur zur Kompensation der verbrauchsgebundene Kosten zum Betrieb des Kältenetzes festgelegt würde, würden sich die spezifischen Kältepreise aus Abbildung 79 ergeben, die zwischen 0.035 €/kWh und 0.045 €/kWh liegen würden. In dem ausgewählten Tag wäre der Kältepreis nicht sehr von der Betriebsstrategie der BTA abhängig.

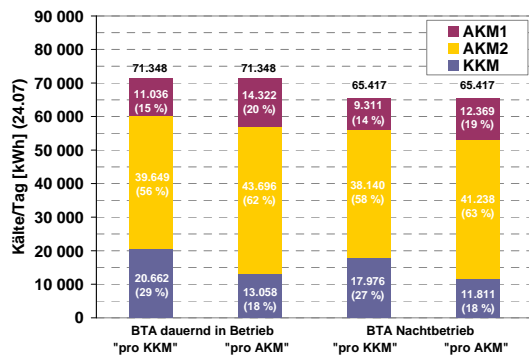


Abbildung 76: Aufteilung der Kälteerzeugung zwischen den Kältemaschinen

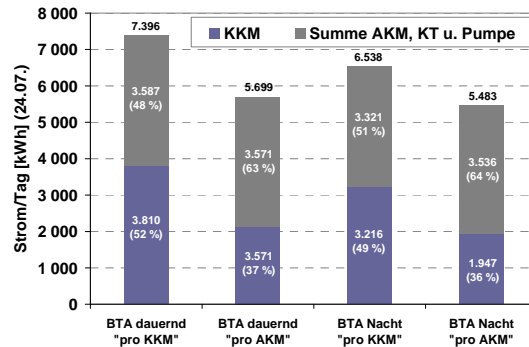


Abbildung 77: Aufteilung des Stromverbrauchs

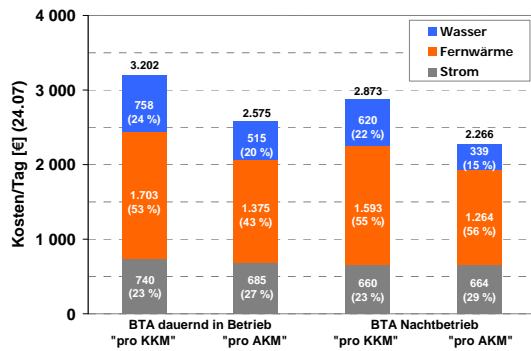


Abbildung 78: Aufteilung der Energiekosten

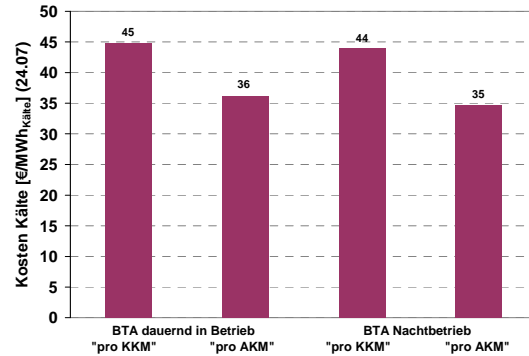


Abbildung 79: sich ergebende Kältepreise

In [Krawinkler, 2007] werden gesamte Kältepreise für verschiedene Varianten der Kälteerzeugung gerechnet. Im Fall der Kälteerzeugung über eine zentral gelegene Absorptionskältemaschine (Fernkälte) wird ein Kältepreis von 0,111 €/kWh_{Kälte} gerechnet, wobei sowohl die Annuitäten der Investitionskosten als auch die betriebsgebundene Kosten mitberücksichtigt werden. In Abbildung 79 sind die reinen verbrauchsgebundene Kosten angegeben.

7.4.4. Diskussion

Die in 7.4.2 und 7.4.3 präsentierten Ergebnisse sind nur in Anknüpfung mit dem verwendeten Modell zu betrachten. Verschiedene Faktoren, die entweder vom Modell oder von der genutzten Software selbst abhängig sind, beeinflussen die Ergebnisse und sollen klar erläutert werden.

7.4.4.1. Modellbedingte Faktoren

Die Kältemaschinen können ziemlich gut über Kennlinienmodelle abgebildet werden. Dafür wird vor allem angenommen, dass die Temperaturverhältnisse (Heizwassereintritt, Kaltwasseraustritt, Kühlwassereintritt) konstant gehalten werden können, was aber im realen Betrieb nicht immer der Fall ist. Komplexere Erscheinungen wie z. B. die Erhöhung der Kälteleistung mit der Antriebstemperatur oder die Reduzierung der Kälteleistung mit der Erhöhung der Kühlwassereintrittstemperatur können mit dem bestehenden Modell nicht abgebildet werden.

Die Außentemperaturabhängigkeit der Kühltürme wird im Modell nicht berücksichtigt. Für die offenen Kühltürme kann diese Annäherung gut verteidigt werden, weil der Wasserverbrauch in der untersuchten Woche bei maximaler Rückkühllleistung sehr wenig von der Außentemperatur abhängig ist (siehe Abbildung 66 und Abbildung 67). Die Hybridkühltürme haben aber ein viel komplexeres Betriebsverhalten und die genaue Steuerungsstrategie sollte bekannt werden, bevor das Modell weiterentwickelt wird.

Sowohl für die Kältemaschinen als auch für die Kühltürme sollten die thermodynamischen Restriktionen im Modell näher abgebildet werden, um aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten. Dafür wären weitere Zusatzeinheiten im Modell nötig, die nur im Rahmen eines geeigneten Projektes entwickelt werden können.

Des Weiteren werden die Pumpen im Erzeugerkreis nicht berücksichtigt. Bei niedrigen Kälteleistungen hat dies für die Stromkosten einen geringen Einfluss. Bei hohen Kälteleistungen kann dies jedoch schon von Bedeutung werden. Eine viel detaillierte Analyse der Stromkosten könnte nur dann realisiert werden, wenn jede einzelne Pumpe im Modell abgebildet wäre. Einen solchen Ansatz wird in [Chow, 2004 (B)] in der TRNSYS Umgebung verfolgt, wo u. a. auch die thermodynamischen Aspekte besser abgebildet werden können. In [Chow, 2004 (B)] wird aber keine Optimierung durchgeführt.

Um das Modell zu vereinfachen werden der Gesamtwasserpreis des Hybridkühlturmes und des offenen Kühlturmes zusammengefasst. Mit der Betrachtung eines Abwasserknotens könnten genauere Ergebnisse erhalten werden. Dies hätte aber nur dann einen Sinn, wenn die anderen Modellkomponenten genauer abgebildet werden würden.

Die in den Kaltwasserleitungen gespeicherte Kälteenergie wird in diesem Modell nicht berücksichtigt. Dies sollte aber berücksichtigt werden, um zu realistischeren Ergebnissen zu kommen.

7.4.4.2. Softwarebedingte Faktoren

In der Softwareumgebung DEMS können Übertragungsfunktionen nur als lineare Funktionen mit maximal einem Knick definiert werden. Dadurch entstehen Linearisierungsfehler. Dies führt bei der gegebenen Anzahl an Übertragungsfunktionen zu einer erheblichen Fehlerfortpflanzung.

Um eine optimale Lösung im Optimierungsprozess zu erhalten, müssten den Iterationsprozessen der Software sehr viel Zeit geben werden. Diese langen Simulationszeiten konnten dem Programm im Rahmen dieser Arbeit nicht gegeben werden. Dadurch erhält man eine optimierte Lösung für die verschiedenen Varianten. Diese Lösung ist eine an die optimale Lösung angenäherte Lösung.

Wenn im Modell zwei identische Betriebsmittel wie AKM1 und AKM2 definiert sind, kann dies die Simulation ebenfalls beeinflussen, da die Software kein eindeutiges Entscheidungskriterium für die Auswahl der Betriebsmittel hat.

7.4.4.3. Schlussfolgerungen

In der Bandbreite der vorgegebenen Energiekosten ergibt sich, dass die Variante, wo die Absorptionskältemaschinen bevorzugt werden (niedrige Fernwärme- und Wasserkosten, Variante „pro AKM“) sich wenig von der Variante unterscheidet, wo die Kompressionskältemaschinen begünstigt werden (niedrige Stromkosten, Variante „pro KKM“). In beiden Varianten arbeiten alle Kältemaschinen in vergleichbaren Leistungsverhältnissen.

Die Preise für Strom, Fernwärme und Wasser haben in der angegebenen Bandbreite einen geringen Einfluss auf die Einsatzhäufigkeit und die Kälteleistung der Kälteerzeuger. Soll der Anteil der AKM an der Kältebereitstellung erhöht werden, müsste die Fernwärme noch günstiger bezogen werden können. Mit den gegebenen Preisbändern ist es nicht möglich, eine Situation zu schaffen, in der bei niedrigen, an das Kältenetz angeschlossenen Kälteleistungen, die gesamte Kälteenergie von den AKM bereitgestellt wird. Bei hohen angeschlossenen Kälteleistungen besteht ohnehin nicht die Möglichkeit, den Kältebedarf ausschließlich durch AKM zu decken, da hier die Kältebereitstellung mit allen Kältemaschinen bis an die Leistungsgrenze gefordert wird.

Die Preisstrukturen für Strom, Fernwärme und Wasser haben einen erheblichen Einfluss an den Gesamtkosten.

Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie

Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie

Tabelle 45: Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklungen und Beiträge der Projektergebnisse

Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklungen	Beiträge der Projektergebnisse
<p>Prinzip der Dienstleistungs-, Service- und Nutzenorientierung</p> <p>In einer nachhaltig zukunftsverträglichen Wirtschaft ist die Bereitstellung von Energie, von Gütern und Produkten nicht primär von reinen Versorgungsüberlegungen (was kann wo angeboten und verkauft werden) geprägt, sondern konzentriert sich zunächst auf die mit Energie, Gütern und Produkten zu erfüllenden Funktionen bzw. Dienst- oder Serviceleistungen.</p>	<p>Die Fernkälteübergabe wird flexibel angeboten und kann sich verschiedenen Komfortstufen anpassen. Durch die Nutzung der Bauteilaktivierung sind zusätzlich hohe Sommerkomfortverhältnisse zu erwarten.</p>
<p>Prinzip der Nutzung erneuerbarer Ressourcen</p> <p>Dabei ist die energetische und stoffliche Versorgung möglichst durch erneuerbare und/oder nachwachsende Ressourcen zu bewerkstelligen.</p>	<p>Wenn die Kaltwassererzeugung über Absorptionskältemaschinen gewährleistet wird und, wie im Fallbeispiel TownTown in Wien, einen Anteil der Wärme über erneuerbare Energieträger generiert wird, ergeben sich für die Fernkälte niedrige Primärenergiefaktoren.</p>
<p>Effizienzprinzip</p> <p>Wichtige Zielsetzung ist, Dienst- oder Serviceleistungen so energie- und materialeffizient, aber auch so kosteneffizient wie möglich zu erfüllen.</p>	<p>An jedem Schritt der Gestaltung eines Fernkältenetzes gibt es Möglichkeiten, die Energieeffizienz des Gesamtsystems so hoch wie möglich zu halten. Über die Projektergebnisse wird auch aufgezeigt, wie die verbrauchsgebundenen Kosten eines Fernkältenetzes niedrig gehalten werden können.</p>
<p>Prinzip der Rezyklierungsfähigkeit</p> <p>Besonders in Bereichen, in denen die Nutzung erneuerbarer Ressourcen noch nicht oder nur schwer möglich ist, ist eine Rezyklierung oder kaskadische Nutzung der Ressourcen anzustreben.</p>	<p>Im Projekt wird die kaskadische Nutzung der Ressourcen an mehreren Stellen empfohlen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nutzung der verfügbaren Abwärme aus thermischen Kraftwerken zum Antrieb von Absorptionskältemaschinen - Nutzung der Niedertemperaturabwärme aus Kältemaschinen
<p>Prinzip der Einpassung, Flexibilität, Adaptionfähigkeit und Lernfähigkeit</p> <p>Zukunftsverträgliche Entwicklungen sind als innovative, dynamische Prozesse zu begreifen, die in Bezug auf Technologien einerseits eine Einpassung an vorhandene (z.B. regionale) Rahmenbedingungen und Gegebenheiten, andererseits eine kontinuierliche Anpassung an neue Entwicklungen und Gegebenheiten erfordern.</p>	<p>Die Fernkälte kann in eine bestehende regionale Energieversorgungsinfrastruktur integriert werden und es werden daraus weitere Innovationen geschaffen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Die Kopplung mit der Bauteilaktivierung ist eine innovative Lösung, die sowohl im Komfort- als auch im Lastmanagementbereich große Vorteile mit sich bringt. - Aufbauend auf diesem Projekt können in Zukunft weitere Innovationen gefordert werden (Integration von Speichern, Optimierung der Gebäudeauswahl usw.)
<p>Prinzip der Fehlertoleranz und Risikovorsorge</p> <p>Auch die Vorsorge gegenüber Störfällen mit maßgeblichen Auswirkungen durch fehlertolerante Technologien und Systeme gehört zum Konzept einer "Nachhaltigen Entwicklung".</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Die Kaltwassererzeugung erfolgt über verschiedene Kältemaschinen. Bei niedrigen Lasten ist daher eine gewisse Redundanz vorhanden, die als Risikovorsorge gesehen werden kann. Bei einem dezentralen Kälteversorgungskonzept gibt es keine Versorgungsalternative, wenn eine Kältemaschine aufgrund einer Störung ausfällt. - Der Effekt der Bauteilaktivierung kann auch als Risikovorsorge gesehen werden: im Fall der Einstellung der Kältemaschinen kann über eine gewisse Zeit der Kühleffekt immer noch geleistet werden, weil die in den Kaltwasserleitungen gespeicherte Kühlenergie als Vorrat gesehen werden kann und die Bauteilaktivierung durch Zeitverzögerung charakterisiert wird.
<p>Prinzip der Sicherung von Arbeit, Einkommen und Lebensqualität</p> <p>Durch die Erhaltung und Schaffung hochwertiger sinnvoller Arbeit einerseits, sowie einer lebenswerten Umwelt andererseits soll eine Erhöhung der Lebensqualität erreicht werden.</p>	<p>In dieser Hinsicht sind die Beiträge der Projektergebnisse limitiert. Arbeitsplätze werden insofern geschaffen, dass die Fernkälte als zusätzliche Dienstleistung für die Fernwärme Wien gesehen wird.</p>

Die Projektergebnisse zeigen auf, dass Fernkälte, wenn intelligent gestaltet und betrieben, ein energieeffizientes und flexibles Energiesystem ausmachen kann. Daher ist das System mit den vorgeschlagenen Optimierungen langfristig in der Lage, Teile unseres Energiebedarfs zu decken.

Die Beiträge der Projektergebnisse zu den Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklungen sind in Tabelle 45 zusammengefasst.

Einbeziehung der Zielgruppen



Abbildung 80: Einbeziehung der Akteure und Zielgruppen

Wie es Abbildung 80 zeigt hat sich das Projekt auf die Ebene der Planung und Umsetzung konzentriert und daher sind die entsprechenden Unternehmen (ESCO und Integrale Haustechnikplanung) als Finanzierungs- und Konsortialpartner im Projekt involviert worden.

- ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH war der Haustechniker des Projektteams und war für die Planung der Haustechnik der verschiedenen Objekte in TownTown involviert. Es wurde damit die Schnittstelle zwischen den Projektergebnissen und der konkreten Planung gewährleistet.

- Die Fernwärme Wien GmbH war als Konsortial- und Finanzierungspartner involviert und konnte daher die Interessen des Energieversorgers vertreten.

- Die SPAR-AG war als Konsortialpartner involviert und wurde über die Möglichkeit des Anschlusses an ein Fernkältenetz, ausgehend von den durch SPAR-AG zur Verfügung gestellten Lastprofilen unterschiedlicher Lebensmittelmärkte, informiert.

Die anderen Zielgruppen (Entscheidungsträger, Nutzer und Betreiber) wurden am Projektbeginn über das Projekt informiert und sind an der projektabschließenden Infoveranstaltung eingeladen worden.

Umsetzungspotenzial

Verbreitungspotenzial

Innerhalb von Wien gibt es ein hohes Potenzial für Übertragbarkeit auf weitere Bezirke, wo die Gebäudekühlung als Dienstleistung gesehen werden kann. Die Fernwärme Wien GmbH plant weitere Fernkältenetze zu bauen und wird aus den Projektergebnissen konkrete Informationen ziehen können.

Weiters können die Projektergebnisse in jedem Stadtteil umgesetzt werden, wo der Einsatz eines Kältenetzes sinnvoll erscheint. Dafür kann ein Kältenetz in verschiedenen Formen, im Zusammenschluss von einigen wenigen Gebäuden bis hin zu ganzen Stadtteilen, umgesetzt werden. Die erarbeiteten Empfehlungen stellen also eine wichtige Grundlage für viele

konkrete Umsetzungsbeispiele dar. Weil sich die Projektergebnisse auf der Ebene der Vorplanung befinden, richten sie sich sowohl an die Entscheidungsträger (Aspekte der Gebäudeauswahl) als auch an die Planer solcher Netze (Technologische Fragen).

Die Rückkühlungsproblematik betrifft nicht nur die Fernkälte, sondern auch dezentrale Kälteerzeugungseinheiten mit großer Leistung. Überall dort, wo Kühltürme zum Einsatz kommen, werden die geführten Untersuchungen im Bereich alternativer Rückkühlssystemen Anwendungen finden. Die durchgeführte Erhebung des Standes der Technik stellt eine Informationsquelle für weitere Projekte dar.

Realisierungspotenzial

Tabelle 46: Umsetzbarkeit der einzelnen Optimierungsschritte

Optimierungsschritt	Zuständig für die Umsetzung	Kosten ¹	Umsetzbarkeit ²
1A. Lastanalyse: Kühllastreduzierung	Auf der Initiative vom Bauherr (öffentliche Hand oder PPP), unterstützt von der lokalen Bauordnung Realisiert vom Architekt bzw. Planer	---	+++
1B. Lastanalyse: Optimierung der Gebäudeauswahl	Auf der Initiative vom Bauherr (öffentliche Hand oder PPP) Realisiert von Forschungseinrichtungen	---	---
2. Nutzung der Speichermassen im Gebäude	Auf der Initiative vom Bauherr Realisiert vom Planer	---	++
3. Netzspeicher	Auf der Initiative vom lokalen Energieversorger (ESCO) Realisiert vom lokalen Energieversorger (oder in Auftrag gegeben)	+++	-
4. Abwärmennutzung	Auf der Initiative vom lokalen Energieversorger (ESCO) Realisiert vom lokalen Energieversorger (oder in Auftrag gegeben)	+	+
5. Wärmeabfuhr	Auf der Initiative vom lokalen Energieversorger (ESCO) Realisiert vom lokalen Energieversorger (oder in Auftrag gegeben)	+	+
6. Wirtschaftliche Netzauslegung	Auf der Initiative vom lokalen Energieversorger (ESCO) Realisiert vom lokalen Energieversorger (Planungsabteilung)	---	+++
7. Wirtschaftlicher Betrieb	Auf der Initiative vom lokalen Energieversorger (ESCO) Realisiert vom lokalen Energieversorger (Abteilung Betriebsführung)	---	++

¹ „- - -“: sehr kostengünstig / „+ + +“: sehr teuer

² „- - -“: schwer umsetzbar / „+ + +“: leicht umsetzbar

Die methodische Vorgehensweise von Abbildung 7 findet sein größtes Realisierungspotenzial in einem integrierten Ansatz, weil jeder involvierte Akteur (siehe Abbildung 80) einen Beitrag zur Umsetzung liefern kann, und die relevanten Entscheidungen nur im Rahmen eines fachlichen Beirates (Steuerungsgruppe) getroffen werden können. In den üblichen Projektabwicklungsverfahren können meistens nur Teile davon wirklich umgesetzt werden. Wichtig ist aber, dass zumindest einer der drei ersten Schritte berücksichtigt wird, um die Überdimensionierung des Fernkältenetzes zu vermeiden und dessen Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten. Tabelle 46 gibt einen qualitativen Überblick über

die Umsetzbarkeit (i. e. das Realisierungspotenzial) der verschiedenen Schritte. Vor allem die Zuständigkeiten und die entsprechenden Kosten spielen auch eine sehr bedeutende Rolle.

Im Fall von TownTown sind nur die leicht umsetzbaren Schritte berücksichtigt worden. Die Kühllastreduzierung hat in einigen Maßen unabhängig vom hier präsentierten Projekt stattgefunden, und der Anteil an Glasflächen in den Fassaden ist zum Beispiel in allen Gebäuden der ersten Baustufe ziemlich niedrig (Lochfassadentypologie). Die Bauteilaktivierung hat sich durchgesetzt und ist daher ein wichtiger Bestandteil des Projektes City Cooling. Dies konnte aber nur deswegen so leicht umgesetzt werden, weil alle Immobilien noch dem Projektentwickler gehören und die einzelnen Objekte gemietet werden. Ein einheitliches und integriertes Konzept mit Bauteilaktivierung und Fernkälte konnte insofern umgesetzt werden, indem ein Haustechnikplaner für die Planung des gesamten Areals beauftragt wurde. In dem Fall, wo die einzelnen Grundstücke an einzelnen Immobilienentwicklern verkauft werden, sollte die Bauteilaktivierung in den Entwicklungsleitfaden vorgeschrieben werden, was als zu restriktiv empfunden werden könnte.

Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Gewonnene Erkenntnisse

Tabelle 47: Im Projekt gewonnenen Erkenntnisse

Gewonnenen Erkenntnisse	Art der Erkenntnisse	Nützlich für...
Allgemeine methodische Vorgehensweise für die optimale Gestaltung eines Fernkältenetzes	Methode	- Bauherr / Investor - ESCO
Spezifische Planungsansätze für die Planung eines Kühlsystems hinsichtlich einer Anbindung an die Fernkälte	Kennzahlen	- Haustechnikplaner - ESCO
Möglichkeiten der Definition einer optimalen Gebäudeauswahl	Methode	- Bauherr / Investor - ESCO
Optimale Betriebsstrategien der Bauteilaktivierung (Komfortverhältnisse, Kälteenergiebedarf und Kältebedarfsverläufe)	Methode Kennzahlen zu Bewertung verschiedener Szenarien	- Haustechnikplaner - ESCO
Vergleichbarkeit zwischen Bauteilaktivierung und konventionellen Luftkühlsystemen	Methode	- Bauherr / Investor - Haustechnikplaner
Möglichkeiten des Einsatzes von Netzspeichern	Zusammenfassung einer Literaturrecherche	- ESCO
Möglichkeiten der Abwärmenutzung aus Kältemaschinen	Konzepte	- Haustechnikplaner - ESCO
Wirtschaftliche Netzauslegung	Methode	- ESCO
	Konzepte Kennzahlen	
Wirtschaftlicher Betrieb	Methode	- ESCO
	Kennzahlen	

In Tabelle 47 wird versucht, einen Überblick über die wichtigsten im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zu vergeben. Diese teilen sich unter den folgenden Kategorienebenen auf (Art der Erkenntnisse):

- Zusammenfassung einer Literaturrecherche: Für die Aspekte, wo im Projekt keine neue Erkenntnisse gewonnen wurden, wurde auf die Arbeiten verwiesen, die sich auf die behandelte Frage grundsätzlich konzentrieren.
- Methode: Im Projekt wurden an verschiedenen Stellen Methoden vorgeschlagen und verfolgt, die sich zur Beantwortung verschiedener Fragen notwendig gemacht haben.
- Konzepte: Konzepte bestehen aus einer qualitativen Beschreibung einer Technologiekombination
- Kennzahlen: Im Projekt wurden konkrete Kennzahlen gerechnet, die in zukünftigen Projekten erst unter der Voraussetzung weiter verwendet werden können, dass die Annahmen mit den projektspezifischen Rahmenbedingungen übereinstimmen.

Weiterarbeit des Projektteams und der Zielgruppen

Die in Tabelle 47 genannten Zielgruppen können mit den verschiedenen Projektergebnissen weiterarbeiten:

- Die zuständige Organisationen für die Entwicklung eines Neubaugebietes (öffentliche Hand, PPP als Entwickler und gegebenenfalls Investor)
- ESCO können die vorgeschlagenen Methoden und gerechneten Kennzahlen an weiteren Fernkälteprojekten nutzen.
- Haustechnikplaner verfügen über mehr Grundwissen über die Einbindung von Kühlsystemen an einem Fernkältenetz.

Ausblick und Empfehlungen

Chancen / Schwierigkeiten / Risiken bei der Umsetzung

Im Fernkältenetzprojekt in TownTown konnten einige sehr innovativen Aspekte umgesetzt werden (Kombination zwischen Bauteilaktivierung und Fernkälte). Andere Aspekte (alternative Abwärmeabfuhr) konnten nicht realisiert werden, weil die Umsetzung zur Zeit der Projektarbeit sehr weit fortgeschritten war, und diese Elemente nicht mehr ins Konzept integrierbar waren.

Die Projektergebnisse zeigen deutlich vor, dass einige Entscheidungen sehr früh getroffen werden sollen, um das Kosten- und Energieeinsparungspotenzial ausschöpfen zu können. In den ersten Phasen bestehen noch viele Handlungsmöglichkeiten, sowohl auf der Stadtplanungsebene als auch in Zusammenhang mit anderen potenziellen Akteuren (z. B. Kanalbetriebsbehörde). Je weiter sich das Projekt entwickelt, desto begrenzter werden diese Handlungsmöglichkeiten und teurer die technologischen Lösungen zur Optimierung des gesamten Energiesystems.

Die Kombination zwischen Bauteilaktivierung und Fernkälte konnte aus den folgenden Gründen in TownTown umgesetzt werden:

- nur Neubauten werden an das Fernkältenetz angeschlossen
- alle Immobilien gehören einem Immobilienentwickler, der die Umsetzung der Technologie in allen Bauten ermöglicht hat.

In bestehenden Stadtteilen oder wenn das Fernkältenetz zur Versorgung von Objekten ausgelegt werden soll, die von verschiedenen Immobilienentwickler gebaut werden, sollen ganz spezifische Zielkriterien formuliert werden und die Projekte sollen im Rahmen einer ganz engen Kooperation zwischen allen involvierten Akteuren realisiert werden. Dafür ist ein radikales Umdenken in den Stadtentwicklungsprozessen notwendig, die nur im Rahmen eines integrierten Ansatzes (siehe die CONCERTO initiative von der EC) stattfinden kann.

Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Das Projekt ist sehr themenübergreifend orientiert und es konnten daher Potenziale für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu verschiedenen Themen identifiziert werden (siehe Tabelle 48).

Tabelle 48: weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Themengebiet	Art der F&E Arbeit	Ergebnisse nützlich für...
Evaluierung der realen Performance des Kältenetzes in TownTown	Feldversuch und Monitoring	- Bauherr / Investor - ESCO
Berechnung von charakteristischen Kennwerten zu realisierten Fernkältenetzen (Netzbelegung, „Kältebelegung“, Schwankungsindex, Primärenergiefaktor für die nicht erneuerbare Energie...)	Benchmarking über realisierte Anlagen	- Bauherr / Investor - ESCO
Definition von technisch-wirtschaftlichen Standards für Fernkälte	Entwicklung einer Methode zur Durchführung von Machbarkeitsstudien für Fernkälte und Definition von Grenzwerten	- Bauherr / Investor - ESCO
Strukturoptimierung von Fernkältenetzen	Modellierung und Definition von Optimierungsalgorithmen	- ESCO
Modellierung verschiedener Systeme zur alternativen Rückkühlung von Kältemaschinen	Modellierung	- Haustechnikplaner - ESCO
Erweiterung der Modelle zur Betriebsoptimierung zur Berücksichtigung der thermodynamischen Restriktionen	Modellierung	- ESCO
Nutzung der Bauteilaktivierung als zeitlich verschiebbare Last	Aus Simulationen basierende Machbarkeitsstudien	- ESCO
Definition von anderen Zielfunktionen für die Betriebsoptimierung (Minimierung des Ressourceneinsatzes, der CO ₂ -Emissionen)	Simulationen	- ESCO
Nutzung der Optimierungsergebnisse in der Konkreten Einsatzplanung der Anlagen	Programmierung einer Schnittstelle zwischen Simulation und Steuerungsfunktionen der Anlagen	- ESCO

Danksagung

Das Projektteam bedankt sich bei der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft, der FFG und der Fernwärme Wien GmbH für die Finanzierung der hier präsentierten Arbeit.

Literatur-, Abbildung- und Tabellensverzeichnisse

Literaturverzeichnis

- Adnot J. et al., 2003, EECCAC, Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners, final report, April 2003
- Blümel E. et al., 2005, COOLSAN, Kältetechnische Sanierungskonzepte für Büro- und Verwaltungsgebäude, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 25/2005, August 2005
- Bucar G. et al., 2007, Abwasserwärmenutzung, Leitfaden zur Projektentwicklung, Bericht aus dem Projekt WasteWaterHeat
- Constantinescu N. et al., 2006 (A), Possibilities with more district cooling in Europe, final report from the project ECOHEATCOOL (WP5), Euroheat & Power
- Constantinescu N. et al., 2006 (B), The European Cold Market, final report from the project ECOHEATCOOL (WP5), Euroheat & Power
- Constantinescu N. et al., 2007, District Heating and Cooling, country by country 2007 survey, Euroheat & Power
- Chan A. L. S. et al., 2006, Performance evaluation of district cooling plant with ice storage, Energy, vol. 31, n°14, pp 2750-2762
- Chow T. T. et al., 2004 (A), Building-mix optimization in district-cooling system implementation, Applied Energy 77, pp 1-13
- Chow T. T. et al., 2004 (B), Energy modelling of district cooling system for new urban development, Energy and Buildings 36, pp 1153-1162
- Daniels K., 2000, Gebäudetechnik, Ein Leitfaden für Architekten und Ingenieure, 3. Auflage 2000, R. Oldenbourg Verlag, ISBN-10: 3486264141
- Delbès J., Vadrot A., 1999, District Cooling Handbook, ELYO and European Marketing Group District Heating and Cooling, 2nd Edition 1999
- DYMOLA, Dynamic Modeling Laboratory, User's Manual, <http://www.dynasim.com>: Dynasim AB, 2004
- Energie Schweiz, Heizen und Kühlen mit Abwasser, Ratgeber für Bauherrschaften und Gemeinden
- Fernwärme Wien, 2008, Webseite der Fernwärme Wien GmbH <http://www.wienenergie.at/we/ep/contentView.do?contentType=1001&channelId=-25556&displayPage=%2fep%2fcontent%2fcontentDetailsTextRightBottom.jsp&programId=13871&pageTypeld=11894&contentId=16117>, letzter Zugriff am 05.06.2008
- Fernwärme Wien, 2006 (A), Schema des Fernkältenetzes in TownTown, Fernwärme Wien GmbH
- Fernwärme Wien, 2006 (B), Leistungsverzeichnis Wien TownTown, Fernwärme Wien GmbH, Abteilung Hausanlagen
- Gebhardt M., Kohl H., Steinrötter T., Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung, Teil IV: Anlagen zur Kälteerzeugung Projektträger: Stiftung Energieforschung
- Gebhardt M., Kohl H., Steinrötter T., Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung, Teil VII: Anlagen zur Wärme- und Kältespeicherung

- Haas R. et al., 2007, Wärme und Kälte aus Erneuerbaren 2030, für den Dachverband Energie-Klima, Maschinen und Metallwaren Industrie und die Wirtschaftskammer Österreich Abteilung Umwelt- und Energiepolitik, Oktober 2007
- Henning D., 1997, MODEST - An energy-system optimisation model applicable to local utilities and countries, Energy 22/12, pp 1135-1150
- Henning D., Amiri S., Holgrem K., 2006, Modelling and optimisation of electricity, steam and district heating production for a local Swedish utility, European Journal of Operational Research 175, pp 1224-1247
- Himmler R., 2008, Methode zur wetterprognosegeführten Regelung von Systemen zur Betonkerntemperierung, ISBN: 978-3-89959-698-4, Dissertation an der TU Braunschweig
- Hofmann P., 2003, Vordimensionierung von Eisspeichern, die Größe der Kälteanlage minimieren, TGA Fachplaner, 6/2003
- IEA-DHC, 2008, Webseite der IEA Task District Heating and Cooling, <http://www.iea-dhc.org/>, letzter Zugriff am 05.06.2008
- Kivistö M. et al., 1999, District Cooling, Balancing the Production and Demand in CHP, published by NOVEM, Netherlands Agency for Energy and the Environment, ISBN-90-5748-009-3
- Kokalj M., 2006, Untersuchung von Technologien zur Reduzierung des Einsatzes von nassen Kühltürmen in einem Kältenetz, Diplomarbeit für die Fachhochschule Joanneum (Studiengang Infrastrukturwirtschaft / Urban Technologies) bei arsenal research
- Krawinkler R., Simader G., 2007, Meeting cooling demands in SUMMER by applying HEAT from cogeneration, technology report for Austria, deliverable from the project SUMMERHEAT
- Lehmann B. et al., 2007, Application range of thermally activated building systems tabs. Energy and Buildings 39, pp 593-598
- Lehmann B. et al., 2008, Control of thermally-activated building systems (TABS). Applied energy 85, pp 565-581
- Linz AG, 2008, Webseite der Linz AG <http://www.linzag.at/content/section,id,308,nodeid,88,country,gas,language,de.html>, letzter Zugriff am 05.06.2008
- Meteotest, Software METEONORM Version 5.2, Global Meteorological Database for Solar Energy and Applied Meteorology, Bern
- Obernberger I., 1997, Möglichkeiten der technologischen und wirtschaftlichen Optimierung von Biomasse-Nahwärme- und Mikronetzen, Tagungsband zur internationalen ALTENER Konferenz „Mikronetze – Gebäudeübergreifende Wärmeversorgung auf Biomassebasis“, Salzburg
- Ortiga J. et al., 2007, Review of optimization models for the design of polygeneration systems in district heating and cooling networks, proceedings of the 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE17
- Olesen B. W., Currò Dossi F., 2005 (A), Neue Erkenntnisse über Regelung und Betrieb für die Betonkernaktivierung – Teil 1, HLH 56 Nr. 1
- Olesen B. W., Currò Dossi F., 2005 (B), Neue Erkenntnisse über Regelung und Betrieb für die Betonkernaktivierung – Teil 2, HLH 56 Nr. 3
- Page J., 2007, Simulating occupant presence and behaviour in buildings, Thèse n°3900 in Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- Peritsch M. et al., 2006, Supermärkte als Energiezentralen, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 2/2006, Jänner 2006

- Petrák M., 2004 (A), Abwärmenutzung einer Kälteanlage zur Warmwasserbereitung, Erhöhung der Verflüssigungstemperatur, KI Luft und Kältetechnik 2/2004, pp 62-66
- Petrák M., 2004 (B), Abwärmenutzung einer Kälteanlage zur Warmwasserbereitung, Wärmepumpen, KI Luft und Kältetechnik 3/2004, pp 104-109
- Petrák M., 2004 (C), Abwärmenutzung einer Kälteanlage zur Warmwasserbereitung, Vergleich, KI Luft und Kältetechnik 5/2004, pp 185-188
- Pfeiler, 2005, Projekt Town Town Wien, Einreichung Baugruppe 2, Nachweis des ausreichenden Wärme- und Schallschutzes gemäß Bauordnung für Wien, Dr. Pfeiler GmbH
- Pirker C., 2007, Betriebsoptimierung des Kältenetzes in Wien Town-Town für eine effiziente Einbindung verschiedener Technologien zur Gebäudekühlung und eine optimale Abdeckung der entsprechenden Lastprofile, Diplomarbeit für die Fachhochschule Burgenland (Kernkompetenz Energie- und Umweltmanagement) bei arsenal research
- Pol O., Preisler A., 2007, Optimized load profiles for a district cooling network supported by absorption chillers using thermally activated building component systems (TABS). In: Proceedings of the ISHVAC 2007 conference. Beijing, China, paper ID E031
- Pol O., Preisler A., Kast H.-J., 2008, A method to quantify and compare the performance of thermally activated buildings systems (TABS) with conventional air cooling units. In: Proceedings of the IEECB 2008 conference. Frankfurt, Deutschland.
- Richter S. et al., 2007 (A), Stukturoptimierung leitungsgebundener Energieträger, EuroHeat&Power 6/2007, pp 40-47
- Richter S. et al., 2007 (B), Stukturoptimierung im Ballungsgebiet München, EuroHeat&Power 7-8/2007
- Sakawa M. et al., 2002, Operational planning of district heating and cooling plants through genetic algorithms for mixed 0-1 linear programming, European Journal of Operational Research 137, pp 667-687
- Schramek, E. R., Albers, K.-J., Amberg, H.-U., 2001, Recknagel Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, München, Oldenburg Verlag
- Shimoda Y. et al., 2008, Verification of energy efficiency of district heating and cooling system by simulation considering design and operation parameters, Building and Environment 43, pp 569-577
- Siemens, 2003 (A), Dezentrales Energie-Managementsystem DEMS, Produktbeschreibung, Firma Siemens AG Österreich
- Siemens, 2003 (B), Dezentrales Energiemanagementsystem-DEMS, Systemübersicht, Firma Siemens AG Österreich
- Skagestad B., Mildenstein P. et al., 2002, District Heating and Cooling Connection Handbook, published by NOVEM, Netherlands Agency for Energy and the Environment, ISBN-90-5748-026-3
- Söderman J., Pettersson F., 2006, Structural and operational optimisation of distributed energy systems, Applied Thermal Engineering 26, pp 1400-1408
- Söderman J., 2007, Optimisation of structure and operation of district cooling networks in urban regions, Applied Thermal Engineering 27, pp 2665-2676
- TAS, Software package for the thermal analysis of buildings, A.M. Jones, EDSL Ltd., 13/14 Cofferridge Close, Stony Stratford, Milton Keynes, Mk11 1BY, UK
- TRNSYS 16.1, a transient simulation and program. University of Wisconsin, Madison (WI), USA, Solar Energy Laboratory, 1996

- Urbaneck T., Uhlig U., Platzer B., Schirmer U., Göschel T., Zimmermann D., 2006, Machbarkeitsstudie zur Stärkung der Kraft–Wärme–Kälte–Kopplung durch den Einsatz von Kältespeichern in großen Versorgungsnetzen
- VDI 2067, 2000 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenrechnung
- Weber C. et al., 2007, Design and optimization of district energy systems, proceedings of the 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE17

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fernkältenetz im Stadtentwicklungsgebiet TownTown	15
Abbildung 2: Bürogebäude TownTown mit Fernkältezentrale im Keller (CB05)	15
Abbildung 3: Fernkältezentrale TownTown: Absorptionskältemaschinen	16
Abbildung 4: Fernkältezentrale TownTown: Kompressionskältemaschine	16
Abbildung 5: Fernkältezentrale TownTown: Hybridrückkühler	16
Abbildung 6: Fernkältezentrale TownTown: Offener Rückkühler	16
Abbildung 7: Ablaufdiagramm zur Vorgehensweise einer energetischen Kältenetzoptimierung	17
Abbildung 8: Kühllastverlauf von Gebäuden ohne thermische Aktivierung von Speichermassen	26
Abbildung 9: Kühllastverlauf von Gebäuden mit thermischer Aktivierung von Speichermassen	26
Abbildung 10: Kühllastverlauf Kantinenkühlung	27
Abbildung 11: Kühllastverlauf EDV Raum	27
Abbildung 12: Möglicher Gesamtkältebedarfsverlauf aller Verbraucher [Danlies, 2000]	27
Abbildung 13: Verlauf der Klimakaltwassertemperaturen	28
Abbildung 14: Spezifischer Kälteleistungsbedarf für Büronutzung	30
Abbildung 15: Kältebedarf der Flachbauten TownTown	32
Abbildung 16: Kältebedarf Hochhäuser TownTown	32
Abbildung 17: Kältebedarfsverlauf eines Lebensmittelmarktes (Normalkühlung für eine Nennkälteleistung von 31,80 kW)	34
Abbildung 18: Kältebedarfsverlauf eines Lebensmittelmarktes (Minuskühlung für eine Nennkälteleistung von 13,10 kW)	35
Abbildung 19: Kältebedarfsverlauf und komplementäres Profil	36
Abbildung 20: Lageplan von TownTown und modellierte Gebäudekategorien	38
Abbildung 21: Aussicht aus CB16 Richtung Nordwesten über CB07 (Stand März 2007)	38
Abbildung 22: mittlere spezifische interne Lastprofile für einen Arbeitstag	40
Abbildung 23: spezifischer Kältebedarfsverlauf für eine Beladung um 00:00	42
Abbildung 24: spezifischer Kältebedarfsverlauf für eine Beladung um 06:00	42
Abbildung 25: spezifischer Kältebedarfsverlauf für eine Beladung um 12:00	42
Abbildung 26: spezifische maximale Kühlleistung bei der Übergabestation	42
Abbildung 27: spezifischer Kühlenergiebedarf bei der Übergabestation, für die Kühlperiode 01/05-30/09, ohne Berücksichtigung der Fan coils	43
Abbildung 28: Kühllastanteil, der über die Fan coils abgeführt werden soll	43
Abbildung 29: geordneter Kühllastanteil, der über die Fan coils abgeführt werden soll	43
Abbildung 30: geordnete spezifische Kühlleistung (ohne Berücksichtigung der Fan coils), Beladung um 06:00	43
Abbildung 31: Wärmeaufnahme in die Decke und Komfortbedingungen	44

Abbildung 32: Kühlenergiebilanz an einer Decke.....	44
Abbildung 33: Vergleich zwischen BTA und Fan coils aufgrund des Kühlenergiebedarfs	44
Abbildung 34: spezifische Kühllastprofile der BTA für verschiedene Anlaufzeiten (09/07 – 10/07)	45
Abbildung 35: spezifische Kühllastprofile der BTA für verschiedene Anlaufzeiten (01/07 – 31/07)	45
Abbildung 36: spezifische Kühllastprofile der BTA für verschiedene Anlaufzeiten (01/05 – 30/09)	46
Abbildung 37: maximale wöchentliche spezifische Kühllast in Abhängigkeit des gleitenden Außentemperaturmittelwertes über die letzten 168 Stunden	46
Abbildung 38: Beispiel einer Kühlkurve für die BTA.....	47
Abbildung 39: Verteilung in den verschiedenen Temperaturbereichen.....	48
Abbildung 40: Verteilung in den verschiedenen Temperaturbereichen.....	48
Abbildung 41: geordnete Leistungswerte	48
Abbildung 42: spezifische Leistungskurve, Variante mit Nachtbetrieb der BTA und mit Leistungsbegrenzung.....	50
Abbildung 43: spezifische Leistungskurve, Variante mit dauernden Betrieb der BTA und mit Sonnenschutz	50
Abbildung 44: spezifische Leistungskurve, Variante mit Nachtbetrieb der BTA und ohne Leistungsbegrenzung.....	50
Abbildung 45: spezifische Leistungskurve, Variante mit dauerndem Betrieb der BTA und ohne Sonnenschutz	50
Abbildung 46: Leistungskurve, Variante mit Nachtbetrieb der BTA und mit Leistungsbegrenzung.....	50
Abbildung 47: Leistungskurve, Variante mit dauerndem Betrieb der BTA und mit Sonnenschutz	50
Abbildung 48: Ausgangslage.....	53
Abbildung 49: Reduzierung der Kälteleistung durch Einsatz eines Speichers.....	53
Abbildung 50: Abwärmeabfuhr ohne Reduzierung der Kälteleistung.....	53
Abbildung 51: Volumenelement und Bilanzgrenzen.....	60
Abbildung 52: Schematische Darstellung einer Fernkälteübergabestation.....	64
Abbildung 53: Netzabbildung in DYMOLA	66
Abbildung 54: Netzkennlinien bei Variation der Rohrdurchmesser ohne Trenntauscher.....	68
Abbildung 55: Netzkennlinien bei Variation der Rohrdurchmesser mit Trenntauscher.....	68
Abbildung 56: Jahresdauerlinie Gesamtkälteleistung TownTown bei Variation der Grundlast	68
Abbildung 57: Wirtschaftliche Kältenetzdimensionierung Grundlast 3 MW.....	70
Abbildung 58: Wirtschaftliche Wärmenetzdimensionierung, aus (Oberberger, 1997).....	71
Abbildung 59: Vergleich zwischen Drehzahlregelung und Drosselregelung	71
Abbildung 60: Wirtschaftliche Kältenetzdimensionierung Grundlast 1 MW.....	72
Abbildung 61: Wirtschaftliche Kältenetzdimensionierung Grundlast 4 MW.....	72
Abbildung 62: DEMS Funktionsübersicht [Siemens, 2003 (A)].....	76

Abbildung 63: Modell des Kältenetzes	78
Abbildung 64: Modellierung des Hybridkühlturmes (Free Cooling)	82
Abbildung 65: Modellierung des offenen Kühlturms.....	84
Abbildung 66: Spezifischer Frischwasserverbrauch des offenen Kühlturmes in der ersten Juliwoche in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur bei einer maximalen Rückkühlleistung von 11.700 kW _{th}	85
Abbildung 67: Spezifischer Frischwasserverbrauch des offenen Kühlturmes in der zweiten Maiwoche in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur bei einer maximalen Rückkühlleistung von 11.700 kW _{th}	85
Abbildung 68: Modellierung des Hybridkühlturmes (Modi 3, 4, und 5).....	88
Abbildung 69: Elektrische Leistungsaufnahme von KT5, KT6 und KT7 in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur bei maximal möglicher Rückkühlleistung	88
Abbildung 70: Spezifischer Frischwasserverbrauch von WasserKT6 und WasserKT7 in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur bei maximal möglicher Rückkühlleistung	88
Abbildung 71: Energiekosten für die Kaltwasseraufbringung (Kältemaschinen ohne Kühlturm)	93
Abbildung 72: Kosten für die Rückkühlung der KKM	94
Abbildung 73: Kosten für die Rückkühlung der AKM	94
Abbildung 74: Leistungskurven für die Varianten mit dauerndem Betrieb der BTA	100
Abbildung 75: Leistungskurven für die Varianten mit Nachtbetrieb der BTA	100
Abbildung 76: Aufteilung der Kälteerzeugung zwischen den Kältemaschinen.....	100
Abbildung 77: Aufteilung des Stromverbrauchs	100
Abbildung 78: Aufteilung der Energiekosten	101
Abbildung 79: sich ergebende Kältepreise.....	101
Abbildung 80: Einbeziehung der Akteure und Zielgruppen.....	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften zukünftiger Energiesysteme und Situation der Fernkälte am Beispiel Wien TownTown.....	21
Tabelle 2: Vor- und Rücklauftemperaturen von verschiedenen Kühlsystemen.....	28
Tabelle 3: Spezifische Kühlleistungswerte verschiedener Kühlsysteme in Räumen ohne zusätzliche Zuluftkühlung.....	29
Tabelle 4: erreichbare Kühlleistung über die Zuluftkühlung	29
Tabelle 5: Investitionskosten verschiedener Kühlsysteme.....	29
Tabelle 6: Spezifische Kühllasten, Außenluftkühlung und Kälteleistungen für Büronutzung .	30
Tabelle 7: Beschreibung der Flächen und Nutzungen im Projekt TownTown.....	31
Tabelle 8: Nennkälteleistungen des Beispiellebensmittelmarktes.....	33
Tabelle 9: Energie- und Kostenbilanz für eine Betriebswoche.....	36
Tabelle 10: angenommene Energiepreise	36
Tabelle 11: Bestimmung des minimalen Kälteverkaufspreises	37
Tabelle 12: Eckdaten der Gebäudekategorisierung	38
Tabelle 13: Haupteigenschaften der verschiedenen Gebäudekategorien	39
Tabelle 14: charakteristische Auslegungsmerkmale der Bauteilaktivierung	40
Tabelle 15: Annahmen für die Nutzung der Jalousien	41
Tabelle 16: allgemeine Betriebszeiten für die BTA	47
Tabelle 17: Kühlenergiebedarf für die untersuchten Regelungsstrategien.	48
Tabelle 18: spezifischer gesamter Kühlenergiebedarf (Monate Mai bis September).....	51
Tabelle 19: Schwankungsindex für verschiedene Betriebsstrategien der BTA in den Monaten Mai bis September	52
Tabelle 20: Übersicht über Speichersysteme [Hofmann, 2003]	54
Tabelle 21: Einsatzfälle eines Kältespeichers	55
Tabelle 22: Einsatzbereiche verschiedener Speichertypen	55
Tabelle 23: Rohrabmessungen	61
Tabelle 24: Schematische Darstellung von Anschlüssen.....	63
Tabelle 25: Variantenüberblick.....	66
Tabelle 26: Massenstrom Gesamtkühllastprofile	68
Tabelle 27: Rohrleitungskosten.....	69
Tabelle 28: Eckdaten zur Modellierung der KKM	79
Tabelle 29: Eckdaten zur Modellierung der AKM	80
Tabelle 30: Eckdaten FC-Betriebsmittel.....	81
Tabelle 31: Außentemperaturbereiche für die Modi 1 und 2	82
Tabelle 32: Eckdaten zur Modellierung von Free Cooling.....	83
Tabelle 33: Eckdaten zur Modellierung des offenen Kühlturms	86

Tabelle 34: Außentemperaturbereiche für die Modi 3, 4 und 5	87
Tabelle 35: Eckdaten zur Modellierung des Hybridkühlturms (Modi 3, 4, und 5)	89
Tabelle 36: Eckdaten Speicher	90
Tabelle 37: Eckdaten Pumpe	91
Tabelle 38: Bandbreite der Energiepreise	91
Tabelle 39: berechnete Gesamtwasserpreise	92
Tabelle 40: berechnete Gesamtwasserpreise	93
Tabelle 41: Energie- und Kostenbilanz, Variante „pro AKM“ mit dauerndem Betrieb der BTA	96
Tabelle 42: Energie- und Kostenbilanz, Variante „pro KKM“ mit dauerndem Betrieb der BTA	97
Tabelle 43: Energie- und Kostenbilanz, Variante „pro AKM“ mit Nachtbetrieb der BTA	98
Tabelle 44: Energie- und Kostenbilanz, Variante „pro KKM“ mit Nachtbetrieb der BTA	99
Tabelle 45: Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklungen und Beiträge der Projektergebnisse	103
Tabelle 46: Umsetzbarkeit der einzelnen Optimierungsschritte	105
Tabelle 47: Im Projekt gewonnenen Erkenntnisse	106
Tabelle 48: weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	108