



Innovative, energieoptimierte,
hygienische Rückkühlsysteme für
thermisch angetriebene
Kältemaschinen

VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Energie der Zukunft“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	5
1 Einleitung	7
1.1 Aufgabenstellung	7
1.2 Schwerpunkte des Projektes	8
1.3 Einordnung in das Programm	8
1.4 Methodik	8
2 Inhaltliche Darstellung	10
2.1 AP 1 – Systemevaluierung	10
2.2 AP 2 – Untersuchung des Einflusses der Rückkühlsysteme auf den Absorptionskälteprozess	11
2.3 AP 3 – Untersuchung von Maßnahmen zur Vermeidung von Hygieneproblemen ..	11
2.3.1 Hygieneproblematik	12
2.3.2 Desinfektionsverfahren	15
2.3.3 Methodische Grundlagen	15
2.3.4 Untersuchungen zur Wasserqualität und Kalkabscheidung im Kühlturm	19
2.4 AP 4 - Untersuchung alternativer Rückkühlmöglichkeiten	19
2.5 AP 5 - Technischer und wirtschaftlicher Systemvergleich	19
2.6 AP 6 - Entwicklung eines Planungswerkzeugs für Anbieter von thermisch angetriebenen Kühlturmen	20
3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen	21
3.1 AP 1 – Systemevaluierung	21
3.1.1 Anbieter von Rückkühlanlagen	21
3.1.2 Gegenüberstellung von Rückkühlösungen	23
3.1.3 Potentielle Einsatzgebiete und Rahmenbedingungen für solares Kühlen in Europa30	23
3.2 AP 2 – Untersuchung des Einflusses der Rückkühlsysteme auf den Absorptionskälteprozess	30
3.2.1 Simulationsumgebung	39
3.2.2 Ergebnisse	41
3.3 AP 3 – Untersuchung von Maßnahmen zur Vermeidung von Hygieneproblemen ..	45
3.3.1 Laboruntersuchungen	45
3.3.2 Untersuchungen im Praxisbetrieb – Technikumsanlage	48
3.3.3 Wasseruntersuchungen und hydrochemische Modellierung	60
3.3.4 Schlussfolgerungen	68
3.4 AP 4 - Untersuchung alternativer Rückkühlmöglichkeiten	71
3.4.1 Latentwärmespeicher	71
3.4.2 Erdwärme-Sonden	75
3.5 AP 5 - Technischer und wirtschaftlicher Systemvergleich	79
3.5.1 Kosten	79
3.5.2 Systemvergleich	82
3.5.3 Schlussfolgerungen	89
3.6 AP 6 - Entwicklung eines Planungswerkzeugs für Anbieter von thermisch angetriebenen Kühlturmen	89
4 Ausblick und Empfehlungen	90
5 Literaturverzeichnis	92
6 Abbildungsverzeichnis	93
7 Tabellenverzeichnis	95

Kurzfassung

Die meisten Kühlanlagen arbeiten mit elektrisch betriebenen Kompressionskältemaschinen und sind daher durch einen hohen Verbrauch an elektrischer Energie, die überwiegend aus fossilen Energieträgern gewonnen wird, gekennzeichnet. Alternativen hierzu sind thermisch angetriebene Kälteprozesse (thermally driven cooling, TDC), deren Antriebsenergie nicht elektrischer Strom sondern CO₂-neutrale Wärme aus Sonnenenergie, Abwärme oder regenerative Fernwärme ist. Der zusätzliche elektrische Energieverbrauch von thermisch angetriebenen Kälteanlagen beträgt nur etwa ein Zehntel des elektrischen Energieverbrauchs einer Kompressionskälteanlage. Der kommerzielle Einsatz von thermisch angetriebenen Kälteanlagen (Absorption, Adsorption, Desiccant, etc.) ist jedoch an bestimmte Voraussetzungen bezüglich der für den Prozess notwendigen Rückkühlung gebunden. Dies betrifft insbesondere das Temperaturniveau der Rückkühlung: Je niedriger das Temperaturniveau der Rückkühlung ist, desto höher ist die Leistungszahl (Verhältnis Kälteleistung zu zugeführter Heizleistung) des Prozesses. Niedrige Rückkühltemperaturen konnten aber unter den meisten klimatischen Rahmenbedingungen bisher nur mit Nasskühlanlagen erreicht werden, die den Nachteil der Bildung schädlicher Bakterien mit sich bringen. In einigen europäischen Ländern, insbesondere in Ländern mit hohem Potenzial für die Anwendung thermisch betriebener Kühlanlagen, wird der Einsatz von Nasskühlanlagen daher aus hygienischen Gründen durch entsprechende Verordnungen eingeschränkt. Es besteht die Vermutung, dass unter bestimmten Randbedingungen auch Trockenkühlanlagen eingesetzt werden könnten, jedoch liegen hierzu derzeit nur wenig Erfahrungen bzw. publiziertes Fachwissen vor. Das Ziel des Projekts bestand daher darin, die Fragen der Einsetzbarkeit der verschiedenen Kühlverfahren im Detail zu untersuchen und verbesserte Lösungen für Rückkühlanlagen zu finden. Insbesondere wurden Möglichkeiten geprüft, Trockenkühlanlagen verstärkt einzusetzen. Weiters wurden mögliche Sekundärmaßnahmen zur Vermeidung von Hygieneproblemen bei Nasskühlanlagen (chemische, physikalische Verfahren) untersucht. Hierzu wurden zunächst die derzeit am Markt verfügbaren Techniken analysiert. Die thermodynamischen Zusammenhänge im Prozess wurden unter Berücksichtigung verschiedener Einsatzfälle bzw. Randbedingungen mit Hilfe eines mathematischen Modells untersucht und es wurden Optimierungsvorschläge bezüglich der Auslegung und der Komponentenauswahl erarbeitet. Die Ergebnisse wurden in Form einer „Verfahrensanleitung“ für die Planung und Auslegung von Rückkühlanlagen thermisch angetriebener Kälteprozesse zusammengefasst. Es wird erwartet, dass sie zu einer deutlichen Effizienzsteigerung von thermisch angetriebenen Kälteanlagen führen und einen vermehrten Einsatz solcher Systeme zur Folge haben.

Ein wesentliches Ergebnis der Untersuchungen ist, dass alle untersuchten Verfahren grundsätzlich zur Hygienisierung von Nasskühltürmen geeignet sind. Die unterschiedlichen Wirkungsmechanismen führten in allen Untersuchungen zu signifikanten Reduktionen von bakterieller Biomasse. Unterschiede bestehen in den spezifischen Dosis-Wirkungsbeziehungen, die letztlich auch die Dynamik einer Wiederverkeimung bedingen.

Von allen untersuchten Methoden am erfolgversprechenden erwies sich die Kupfer-Silber-Ionisation. Die Untersuchungen ergaben, dass aufgrund der Depotwirkung der gelösten Metall-Ionen nachhaltige bakterizide Effekte im System bestehen. Wesentliches Kriterium für erfolgreiche Anwendungen ist jedoch eine weitere Optimierung der Dosis-Wirkungsbeziehungen, da diese in einem engen Zusammenhang mit dem Wassermanagement im Anlagenbetrieb zu sehen ist. In Tabelle 1 sind die Vor- und Nachteile der untersuchten Hygienisierungsmaßnahmen dargestellt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der untersuchten Hygienisierungsmaßnahmen

Maßnahme	Vorteile	Nachteile
UV-Desinfektion	Bakteriozide Wirkung bestätigt Keine Chemikalienzugabe erforderlich Automatisierter Betrieb möglich Einfache Handhabung	Keine Depotwirkung Regelmäßiger Kontroll- und Wartungsaufwand Eingeschränkte Wirkung in Biofiltern
Silber/Kupfer-Ionen Desinfektion	Bakteriozide Wirkung bestätigt Keine Chemikalienzugabe erforderlich Automatisierter Betrieb möglich Depotwirkung gegeben Einfache Handhabung	Dosis-Wirkungsbeziehungen sind im Einzelfall abzustimmen
Thermische Desinfektion	Bakteriozide Wirkung bestätigt Keine Chemikalienzugabe erforderlich	Keine Wuchsbelagsentfernung Rasche Wiederverkeimung Probleme mit der Hitzebeständigkeit eingesetzter Materialien

		Hoher Organisations-, Energie- und Personalaufwand Keine Depotwirkung
--	--	--

Die Erkenntnisse aus diesem Projekt sind, dass die untersuchten Verfahren UV-Desinfektion, Silber/Kupfer-Ionen Desinfektion und Thermische Desinfektion prinzipiell zur Hygienisierung geeignet sind. Als erfolgversprechendstes Verfahren hat sich die Silber/Kupfer-Ionen Desinfektion ergeben.

Abstract

Most cooling machines are driven by electricity. These machines are characterized by a high electricity demand, which is mainly produced of fossil fuels. The alternative is the use of thermally driven cooling (TDC) technologies. Their main advantage is that the driving energy is not electricity but CO₂-neutral heat from the sun, waste heat or district heat. The electricity consumption of a TDC unit is as low as one tenth of the current consumption of a compression unit.. The commercial use of thermally driven cooling machines (absorption, adsorption, desiccant, etc.) is bound to specific conditions concerning the recooling of the process. This mainly affects the temperature level of the recooling: the lower the temperature level of the heat rejection the higher the efficiency of the process. Under the most climatic conditions a low temperature level of heat rejection only can be reached with wet recooling devices. Wet recooling devices, though, have the disadvantage of hygienic problems related to the growth of harmful bacteria. In some European countries with a high potential for the use of TDC, wet recooling units are highly restricted because of hygienic reasons. Under certain boundary conditions presumably also dry recooling units can be employed, but there is too little detailed knowledge about the thermodynamic interdependencies within the TDC process available yet. The goal of the project was the detailed investigation of the applicability of various recooling technologies and the development of improved recooling solutions for TDC purposes. Possibilities were examined to increase the implementation of dry recooling systems. Moreover, procedures to avoid hygienic problems of wet recooling devices, such as chemical and physical procedures, were examined. Therefore the market available technologies were analysed. Hence the thermodynamic interdependencies of the absorption process in consideration of various applications as well as climatic boundary conditions were examined by using a mathematic model. Finally suggestions for optimisation regarding the design and the component selection were made.

The results were presented in form of a process instruction addressing the design and the dimensioning of recooling systems for TDC processes. They should contribute to the increase of the efficiency of future machines and extend the commercial use of TDC systems.

One important result of these studies is that all the disinfection processes examined are in principle suitable for disinfection of wet cooling towers. The different mode of action mechanisms resulted in significant reductions of bacterial biomass in all investigations. There are differences in the specific dose-response relationships, which ultimately cause the dynamics of the bacterial regrowth.

Of all the analysed methods most promising proved the copper-silver ionization. The investigation revealed that due to the residual effect of the dissolved metal-ion sustained bactericidal effects exist in the system. A key criterion for successful application is the further optimization of the dose-response relationships, because

these are in close connection with the water management in the plant operation. Table 1 summarizes the advantages and disadvantages of the examined disinfection measures.

Table 2: Advantages and disadvantages of the examined disinfection measures

MEASURE	ADVANTAGE	DISADVANTAGE
UV-disinfection	bactericidal effect confirmed no additional chemicals required automated operation possible easy to use	no residual effect regular inspection and maintenance limited effect in biofilters
copper-silver ionization disinfection	bactericidal effect confirmed no additional chemicals required automated operation possible depot effect given easy to use	dose-effect relationships are to be adjusted in each individual case
thermal disinfection	bactericidal effect confirmed no additional chemicals required	no growth desmutting rapid regrowth problems with the heat resistance of the used materials high organizational, energy and personnel costs no residual effect

The findings from this project are that the investigated methods UV-disinfection, copper-silver ionization disinfection and thermal disinfection are particularly well suited for disinfection. Copper silver ionization turned out to be the most promising process.

1 Einleitung

Der weltweite elektrische Energiebedarf für Kühlzwecke ist in den letzten Jahren stark angestiegen und beträgt derzeit 15 % des gesamten Stromverbrauchs. Für die nächsten Jahre ist ein weiterer Anstieg zu erwarten. Die meisten Kühlanlagen arbeiten mit elektrisch betriebenen Kompressionskältemaschinen und sind daher durch einen hohen Verbrauch an elektrischer Energie, die zu einem großen Teil aus fossilen Energieträgern gewonnen wird, gekennzeichnet. Alternativen hierzu sind thermisch angetriebene Kälteprozesse (thermally driven cooling, TDC), deren Antriebsenergie nicht elektrischer Strom sondern CO₂-neutrale Wärme aus Sonnenenergie, Abwärme oder regenerative Fernwärme ist. Der zusätzliche elektrische Energieverbrauch von thermisch angetriebenen Kälteanlagen beträgt nur etwa ein Zehntel des elektrischen Energieverbrauchs einer Kompressionskälteanlage. Dies würde ein Einsparungspotential an CO₂-Äquivalenten im Vergleich zu Kompressionskälteanlagen von bis zu 85 % bedeuten. Der kommerzielle Einsatz von thermisch angetriebenen Kälteanlagen (Absorption, Adsorption, Desiccant, etc.) ist jedoch an bestimmte Voraussetzungen bezüglich der für den Prozess notwendigen Rückkühlung gebunden. Dies betrifft insbesondere das Temperaturniveau der Rückkühlung: Je niedriger das Temperaturniveau der Rückkühlung ist, desto höher ist der Wirkungsgrad des Prozesses. Niedrige Rückkühltemperaturen können aber unter den meisten klimatischen Rahmenbedingungen bisher nur mit Nasskühlanlagen erreicht werden, die den Nachteil der Bildung schädlicher Bakterien mit sich bringen. In einigen europäischen Ländern, insbesondere in Ländern mit hohem Potenzial für die Anwendung thermisch betriebener Kühlanlagen, wird der Einsatz von Nasskühlanlagen daher aus hygienischen Gründen durch entsprechende Verordnungen erschwert. Es besteht zwar die Vermutung, dass unter bestimmten Randbedingungen auch Trockenkühlanlagen eingesetzt werden könnten, jedoch liegen hierzu derzeit nur wenig Erfahrungen bzw. geringes detailliertes Fachwissen vor.

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel des Projekts bestand darin, die Fragen der Einsetzbarkeit der verschiedenen Kühlverfahren im Detail zu untersuchen und verbesserte Lösungen für Rückkühlanlagen zu finden. Insbesondere sollten Möglichkeiten gefunden werden, Trockenkühlanlagen verstärkt einzusetzen. Des Weiteren wurden mögliche Sekundärmaßnahmen zur Vermeidung von Hygieneproblemen bei Nasskühlanlagen (chemische, physikalische Verfahren) untersucht. Hierzu wurden zunächst die derzeit am Markt verfügbaren Techniken analysiert. Die thermodynamischen Zusammenhänge im Prozess unter Berücksichtigung verschiedener Einsatzfälle bzw. Randbedingungen wurden mit Hilfe eines mathematischen Modells untersucht und

Optimierungsvorschläge bezüglich der Auslegung und der Komponentenauswahl erarbeitet.

Die Ergebnisse wurden in Form einer „Verfahrensanleitung“ für die Planung und Auslegung von Rückkühlanlagen thermisch angetriebener Kälteprozesse präsentiert. Dies soll zu einer deutlichen Effizienzsteigerung von thermisch angetriebenen Kälteanlagen und zu einem vermehrten Einsatz solcher Systeme führen.

1.2 Schwerpunkte des Projektes

Die Schwerpunkte des Projektes lagen einerseits in der Ermittlung und Darstellung der komplexen Zusammenhänge zwischen Rückkühltemperatur und Kälteprozess und andererseits in der Erforschung der mikrobiologischen Mechanismen in Nasskühltürmen. Des Weiteren wurden wirtschaftliche Zusammenhänge untersucht sowie weiterführende Untersuchungen zur Einsetzbarkeit von alternativen Rückkühlssystemen durchgeführt.

1.3 Einordnung in das Programm

Das Projekt bezog sich auf folgende 3 Themenfelder des Programms ENERGIE DER ZUKUNFT:

- Themenfeld 3: Energie in Industrie und Gewerbe
- Themenfeld 4: Energie in Gebäuden
- Themenfeld 6: Fortgeschrittene Verbrennungs- und Umwandlungstechnologien

Mit den Ergebnissen des Projekts konnte ein wesentlicher Beitrag geleistet werden zur grundlegenden Ausrichtung des Programms:

- Effizienter Energieeinsatz
- Erneuerbare Energien

und zur Erreichung der Programmziele

- Sicherung des Wirtschaftsstandortes
- Erhöhung der F&E-Qualität
- Nachhaltiges Energiesystem
- Reduktion der Klimawirkungen

1.4 Methodik

Folgende Methodik wurde zur Erreichung der Projektziele angewandt:

- Erhebungen
- Katastererstellung
- Simulation
- Versuchsreihen und Messungen im Labor- und Technikums Maßstab.
- Katasterauswertung

- Wirtschaftlichkeitsberechnung
- Erstellung eines Pflichtenheftes
- Erstellung einer Erstversion der Software

Die Arbeit wurde in 6 Arbeitspakete gegliedert:

Arbeitspaket 1:	Systemevaluierung
Arbeitspaket 2:	Untersuchung des Einflusses der Rückkühlsysteme auf den Absorptionskälteprozess
Arbeitspaket 3:	Untersuchung von Maßnahmen zur Vermeidung von Hygieneproblemen
Arbeitspaket 4:	Untersuchung alternativer Rückkühlmöglichkeiten
Arbeitspaket 5:	Technischer und wirtschaftlicher Systemvergleich
Arbeitspaket 6:	Entwicklung eines Planungswerkzeugs für Anbieter von thermisch angetriebenen Kühltürmen

Nachfolgend werden die Inhalte und Ergebnisse der Arbeiten im Detail beschrieben.

2 Inhaltliche Darstellung

Dieser Bericht stellt eine „Verfahrensanweisung“ für die Planung und Auslegung von Rückkühlanlagen thermisch angetriebener Kälteprozesse dar und soll zu einer deutlichen Effizienzsteigerung von thermisch angetriebenen Kälteanlagen führen und einen vermehrten Einsatz solcher Systeme zur Folge haben.

Ziel des Projektes war es, optimierte Lösungen für Rückkühlanlagen für Sorptionskälteanlagen zu entwickeln. Zu diesem Zweck wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das ein besseres Verständnis der komplizierten Zusammenhänge zwischen Kältemaschine, Kühlzweck und Rückkühlung unter Einbeziehung der lokalen klimatischen Rahmenbedingungen des Aufstellungsortes ermöglicht. Des Weiteren wurden alternative Rückkühlsysteme auf ihre Einsetzbarkeit und ihre Wirtschaftlichkeit hin untersucht. Im Speziellen wurden Untersuchungen zur Hygiene in Nasskühltürmen am Technikum von JOANNEUM RESEARCH durchgeführt. Dabei wurde Grundlagenforschung zur Aufkeimung im Kühlturm durchgeführt und anschließend wurden Hygienisierungstechniken erprobt. Besonderes Augenmerk lag dabei auf physikalischen Hygienisierungsverfahren. Diese gewonnenen technischen Erkenntnisse wurden im Rahmen einer ausführlichen Wirtschaftlichkeitsberechnung bewertet. Dabei wurden für ausgewählte Anwendungsbeispiele unterschiedliche Kühlturm und Sorptionskältemaschinenkombinationen erstellt und anschließend ökonomisch bewertet.

2.1 AP 1 – Systemevaluierung

In Arbeitspaket 1 wurde die technische Evaluierung der am Markt verfügbaren Rückkühlsysteme durchgeführt. Des Weiteren wurden die spezifischen Anforderungen von Sorptionskälteanlagen identifiziert und die klimatischen Rahmenbedingungen der Einsatzorte erhoben. Darüber hinaus wurden Erhebungen zu den anwenderspezifischen Rahmenbedingungen auf Basis der langjährigen Erfahrungen des Projektkonsortiums durchgeführt.

Folgende Fragen wurden für die Rückkühlvarianten (trockene und nasse Rückkühlung sowie Hybridsysteme) beantwortet:

1. Welche Anbieter von Rückkühlanlagen sind am Markt verfügbar?
2. Welche Rückkühlösungen werden am Markt angeboten?
3. Welche potentiellen Einsatzgebiete für solares Kühlen gibt es in Europa?
4. Welche Rahmenbedingungen herrschen in den potentiellen Einsatzgebieten?
5. Welche Rückkühlösungen können in Betracht der in Arbeitspaket 2 zu untersuchenden Sorptionskältemaschinen (Leistungsbereich: 5 – 70 kW Kälteleistung), deren Anwendungsgebiet (Temperaturniveau der erzeugten Kälte) und der klimatischen Rahmenbedingungen (Temperatur und

Luftfeuchtigkeit) des Einsatzortes verwendet werden?

2.2 AP 2 – Untersuchung des Einflusses der Rückkühlsysteme auf den Absorptionskälteprozess

Im diesem Arbeitspaket wurden anhand von umfassenden Simulationen die Einflüsse bzw. Auswirkungen von unterschiedlichen Rückkühlsystemen auf den Betrieb von thermisch angetriebenen Kältemaschinen unter Einbeziehung aller wesentlichen Einflussfaktoren untersucht.

Bei allen Simulationen wurden Lastkurven für Gebäude aus Ergebnissen des IEA Task 38 verwendet. Im Speziellen wurde das Zusammenwirken von Rückkühlsystem (Kühlturm) und thermisch angetriebener Kältemaschine, unter Berücksichtigung der externen Einflussfaktoren

- Typ des Wärmeerzeugers,
- Klimadaten des Standortes und
- Kühlzweck des Systems

untersucht.

Durch die iterative Berechnung des Simulationsmodells für alle 8760 Jahresstundenwerte konnte die theoretisch mögliche Kälteleistung bzw. Jahresarbeit ermittelt werden, welche von der Kälteanlage (AKM & Kühlturm) unter den gegebenen Rahmenbedingungen erreicht werden kann.

2.3 AP 3 – Untersuchung von Maßnahmen zur Vermeidung von Hygieneproblemen

In Ländern mit besonders geeigneten klimatischen Rahmenbedingungen für solare Kühlung ist der Einsatz von Nasskühltürmen für die Rückkühlung des Absorptionskälteprozesses von besonderer Bedeutung. Der Grund dafür liegt darin, dass Nasskühltürme Wärme auf einem niedrigeren Temperaturniveau als das der Umgebungsluft abführen können. Dadurch können im Absorptionskälteprozess bei gleichen Antriebstemperaturen niedrigere Kaltwassertemperaturen erreicht werden. Der Einsatz von Nasskühltürmen würde weitere Anwendungsgebiete für Absorptionskältetechnik zum Beispiel im Lebensmittelgefrierlagerbereich erschließen und ist daher von besonderer Bedeutung.

2.3.1 Hygieneproblematik

Eine große Herausforderung im Anlagenbetrieb von Nasskühltürmen stellt eine potentielle Gefährdung durch eine mögliche Kontamination des Kühlwassers durch die Anreicherung human pathogener Keime dar. So wurden in der Vergangenheit Zusammenhänge zwischen dem Betrieb von Kühltürmen und dem epidemischen Auftreten der Legionärskrankheit dokumentiert (Critchley & Bentham 2006).

Die Legionella-Bakterie kommt weltweit von Natur aus in kleinen Mengen in feuchter Umgebung vor, wie z.B. in Oberflächenwasser, feuchten Böden und Leitungswasser. Legionellen (Legionella) sind eine Gattung stäbchenförmiger Bakterien in der Familie der Legionellaceae. Legionellen lassen sich in fast allen aquatischen Süßwasserbiotopen nachweisen, sie konnten sogar aus Thermalquellen isoliert werden. Sie leben häufig vergesellschaftet mit Protozoen (z. B. Amöben), in denen sie sich intrazellulär vermehren. Sie stellen jedoch auf Grund der äußerst geringen Zellzahlen, die sie in diesen natürlichen Biotopen erreichen, keine Gefahr für den Menschen dar.

Die Infektion mit Legionellen stellt ein Paradebeispiel dafür dar, dass erst durch technische, vom Menschen geschaffene Einrichtungen, ein Lebensraum für Krankheitserreger, die in ihrer natürlichen Umgebung keine Bedrohung für den Menschen darstellen, geschaffen wird.

Mögliche Infektionsquellen:

- Trinkwasserversorgungsanlagen
- Kühltürme
- Anderen Nasskühleinrichtungen
- Innenliegenden Attraktionsbrunnen
- Aerosolerzeugenden Hydrotherapie- bzw. Wellnessseinrichtungen
- Warmsprudelbecken (WSB), die nicht nach ÖNORM M 6220 gebaut und betrieben werden
- Luftbefeuchtungseinrichtungen mit Aerosolbildung
- Zahnärztliche Behandlungseinrichtungen
- Im Kreislauf betriebene Springbrunnen und Fontänen
- Autowaschanlagen
- Feinsprühnebel zur optischen Frischhaltung von Obst und Gemüse

Im Rohwasser kommen sie nur in sehr geringer Konzentration vor. Mit diesem gelangen sie in die Wasserleitungssysteme, wo sie sich unter bestimmten Bedingungen stark vermehren können. Legionellen vermehren sich in Warmwassersystemen in einem Temperaturbereich zwischen 30 °C und 40 °C optimal.

Vermehrungsbegünstigende Umgebungsparameter sind:

- Ablagerungen in Boilern, Verteilerbalken, Leitungssystemen und Armaturen, also sedimentierte anorganische Wasserbestandteile, die große Oberflächen besitzen und gut besiedelt werden können.
- Verwendung von Materialien wie Gummi oder Silikon (in Dichtungen, Membranausdehnungsgefäßen, Duschschläuchen, etc.) die schnell von Mikroorganismen in Form eines Biofilms besiedelt werden.
- Stagnierendes Wasser in Leitungsteilen mit mangelhafter oder fehlender Zirkulation

Es sind mehr als 48 Arten und 70 Serogruppen derzeit bekannt. Die für Erkrankungen des Menschen bedeutsamste Art ist *Legionella pneumophila* (Anteil von etwa 70 bis 90 %, je nach Region), sie ist Erreger der Legionellose oder Legionärskrankheit.

Eine Übertragung von Legionellen ist prinzipiell durch Kontakt mit Leitungswasser möglich, wenn die Legionellen in die tiefen Lungenabschnitte gelangen. Nicht jeder Kontakt mit legionellenhaltigem Wasser führt jedoch zu einer Gesundheitsgefährdung. Erst das Einatmen bakterienhaltigen Wassers kann zur Erkrankung führen.

Das Infektionsrisiko wird durch nachfolgende Parameter definiert:

- Die Gegenwart von Legionellen in wasserführenden Systemen
- Das Vorhandensein von Bedingungen, die die Vermehrung der Legionellen auf eine für den Menschen bedenkliche Keimzahl in einem wasserführenden System begünstigen.
- Einrichtungen, die zur Entstehung von lungengängigen Vehikeln für die Legionellen, den Aerosolen oder aspirierbaren Wassertröpfchen führen. z.B. Auslaufarmaturen von Duschen, Waschbecken und Wannen, etc.
- Die Exposition gegenüber Legionellen-kontaminierten Wassersystemen
- Dauer und Intensität der Exposition
- Die Virulenz des übertragenen *Legionella*-Stammes
- Die Prädisposition des Exponierten (individuelles Risiko): höheres Alter, männliches Geschlecht, medikamentöse oder erworbene Immunsuppression, chronische Lungenerkrankung, starker inhalativer Nikotinabusus, chronische Alkoholkrankheit

Im Krankheitsverlauf unterscheidet man zwischen dem Pontiac Fieber und der Legionärskrankheit:

- Pontiac Fieber

Von allen Personen, die mit der *Legionella*-Bakterie infiziert werden, erkrankt ein großer Teil entweder überhaupt nicht oder fühlt sich höchstens ein paar Tage wie bei einem grippalen Infekt: das Pontiac-Fieber. Die Krankheit ist in dieser leichten Form zwar unangenehm, aber nicht richtig gefährlich und die Beschwerden können ohne Behandlung wieder verschwinden.

- Legionärskrankheit

Die Legionärskrankheit, deren Krankheitsbild sich von einer akuten fieberigen Erkrankung der Atemwege bis hin zu einer tödlichen Lungenentzündung erstrecken kann, wird hauptsächlich durch *Legionella pneumophila* sowie weitere *Legionella* spp. verursacht. Neben den Symptomen einer schweren Lungenentzündung werden viele Patienten verwirrt und leiden unter Übelkeit und Durchfall. Durch ernste Komplikationen, wie Entzündungen des Herzbeutels und Gehirns, Abszesse in den Bauchorganen mit Leber- und Nierenversagen, kann das Krankheitsbild immer wieder einen anderen Verlauf nehmen. Die Legionärskrankheit verläuft in 5 bis 25 % der Fälle tödlich.

In den offenen bzw. halboffenen Systemen gelangt das zur Kühlung verwendete Wasser durch Versprühen in die Umwelt, und kann so bei entsprechender Kontamination mit Legionellen eine Infektionsquelle darstellen. Je nach Wasservolumen, dem zu ersetzenden Verdunstungsverlust, und dem allgemeinen Wartungszustand der Anlage ist im Falle einer Kontamination eine mehr oder weniger schnelle Vermehrung der Legionellen in diesen Systemen möglich. Zurzeit gibt es keine direkt auf Rückkühlwerke zugeschnittene Norm oder Richtlinie bezüglich der hygienischen Parameter, jedoch kann ersatzweise die VDI-Norm 6022 für raumluftechnische Anlagen, als Vorlage für Untersuchungen herangezogen werden. Zur Bewertung von Legionellenbefunden kann weiters das DVGW Arbeitsblatt W551 „Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen“ (siehe Tabelle 3) herangezogen werden.

Tabelle 3: Bewertung von Legionellenbefunden nach DVGW Arbeitsblatt W551

Legionellen (KBE/100ml)	Bewertung	Maßnahmen
> 10000	extrem hohe Kontamination	Direkte Gefahrenabwehr erforderlich, (Desinfektion und Nutzungseinschränkung, z.B. Duschverbot); Sanierung erforderlich
> 1000	Hohe Kontamination	Kurzfristige Sanierung erforderlich
≥ 100	Mittlere Kontamination	Mittelfristige Sanierung erforderlich
< 100	keine nachweisbare /geringe Kontamination	keine

2.3.2 Desinfektionsverfahren

Als Maßnahmen zur Desinfektion der Kühlwässer stehen grundsätzlich chemisch-physikalische und biozide Verfahren zur Verfügung, wobei jede Methode ihre spezifischen Vorteile und Anwendungsgebiete hat. Allgemein bekannte Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Verfahren sind in Tabelle 4 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 4: Vor- (+) und Nachteile (-) unterschiedlicher Behandlungstechniken
(<http://www.lenntech.com/water-treatment-chemicals.htm>,)

Technology	Environm. friendly	Byproducts	Effectivity	Investment	Operational costs	Fluids	Surfaces
Ozone	+	+	++	-	+	++	++
UV	++	++	+	+/-	++	+	++
Chlorine dioxide	+/-	+/-	++	++	+	++	--
Chlorine gas	--	--	-	+	++	+/-	--
Hypochlorite	--	--	-	+	++	+/-	--

Im Zusammenhang mit den im Projekt untersuchten Rückkühlsystemen und thermischen Nennleistungen war ein wesentliches Auswahlkriterium neben der Effizienz der Verfahrens, spezifische Investitions- und Betriebskosten, die in einem adäquaten Verhältnis zu den Gesamtkosten der Verfahren stehen sollten.

Ziel des Arbeitspaketes war daher, Maßnahmen zur Vermeidung von Hygieneproblemen zu untersuchen und preiswerte und effektive Hygienisierungsmaßnahmen zu identifizieren und zu testen.

2.3.3 Methodische Grundlagen

Grundlage der Untersuchungen bildeten standardisierte Regelwerke der Desinfektionsmittelprüfung mittels quantitativer Suspensionsverfahren. Hygienisierungsmaßnahmen wurden anhand des Indikatorkeimes *Pseudomonas aeruginosa*, der in seiner Toleranz gegenüber bakterioziden Wirkungsmechanismen jenem von Legionellen ssp. ähnelt, untersucht. Legionellenbefunde wurden im Einzelfall erhoben. Für die einzelnen Untersuchungsvarianten wurden in Batch-Kulturen im Labormaßstab, Kennlinien zu Konzentration und Expositionsdauer erarbeitet und im Praxisbetrieb evaluiert.

Hierzu wurde im Technikum des Antragstellers eine marktgängige 25 kW Nasskühlanlage aufgestellt.

Qualitative und quantitative bakteriologische Untersuchungen umfassten:

- Gesamtkeimzahl (KBE): Plattengussverfahren nach Verdünnungsprinzip auf Standard-I-Nähragar sowie mittels eines Impendanzanalysators auf Basis zeitlich geänderter Ionenkonzentrationen im Kulturmedium.
- Legionellen: Latex-Agglutinationstest OXOID DR800
- Luftkeime: Die Bestimmung der Konzentration luftgetragener Bakterien erfolgt stichprobenartig mittels eines automatischen Luftkeimsammelsystems (RCS High Flow) und anschließender Quantifizierung über Selektivagar unter standardisierten Inkubationsbedingungen. Die Überprüfung der mikrobiologischen Qualität erfolgte mittels des Biotest Luftkeimsammlers RCS Plus. Dieser arbeitet nach dem Impaktionsprinzip und ermöglicht die quantitative Abscheidung der luftgetragenen Mikroorganismen aus Sammelvolumina von 10 bis 1000 Liter. Die Quantifizierung der Kolonien erfolgte auf speziellen Luftkeimindikatoren:
 - Luftkeimindikator Biotest TC PET-RT, Caso Agar zur Bestimmung der Gesamtkeimzahl
 - Luftkeimindikator BiotestYM PET-RT, Begalrot Agar mit Streptomycin zur Bestimmung der Hefen und Schimmelpilze
 - Latex-Agglutinationstest OXOID DR800 zur Bestimmung von Legionellen

Es wurden folgende chemische und physikalische Verfahren zur Verbesserung der Hygiene untersucht:

- UV-Desinfektion

Die UV-Desinfektion mit einer Wellenlänge von 254 nm ist ein rein physikalischer Prozess. Mikroorganismen, wie Bakterien, Viren etc., welche der UV-Strahlung ausgesetzt sind, werden sekundenschnell inaktiviert. Das heißt, die Strahlung wirkt auf die DNA der Mikroorganismen, der Stoffwechsel und die Vermehrung werden massiv beeinträchtigt.

Eingesetzt wurde ein Tauchstrahler AQT2018-2K der Firma SterilAir, mit den UV Röhren UVC2018-2K (siehe Abbildung 1). Die Ausführung ist vollkommen wasserdicht und kann in offenen Kühlwassersystemen in die Wanne des Kleinkühlturmes gelegt werden. Bei reinem Wasser und geputztem Quarzglas kann eine Desinfektionswirkung im Umkreis von ca. 30 cm erreicht werden. Die Investitionskosten betragen € 470,-- exkl. MwSt.



Abbildung 1: Wasserdichte UV-C-Lampe Fa. SterilAir

- Silber-Kupfer-Ionen Desinfektion

Unter Ionisation versteht man die elektrolytische Bildung von Kupfer und Silberionen für die Behandlung von Wasser. Kupfer und Silber haben eine gewisse keimtötende Wirkung. Sie greifen die Zellwand der Mikroorganismen an. In weiterer Folge wird die Zellpermeabilität beeinträchtigt und mit zusätzlicher Proteindenaturierung kommt es zur Zellyse und Tod der Keime. Kupfer- und Silberionen sind bei einer Erhaltungskonzentration von 400 µg Kupferionen / Liter beziehungsweise von 40 µg Silberionen / Liter gegen Legionellen sowohl in planktonischer als auch in der Biofilm-Phase von Warmwassersystemen bakterizid wirksam. Für die Silberionen gilt, dass sie mit sämtlichen Thiol-Gruppen (SH-Gruppen) in Biomolekülen (z.B. Enzymen, Proteinen, Nukleinsäuren) reagieren und diese hemmen. Dementsprechend reagieren sie z.B. mit schwefel- und phosphathaltigen Enzymen der Zellwand und führen dort zu einer Störung des transmembrösen Stoffwechsels. Ein anderer Mechanismus beruht darauf, dass Silberionen genauso wie essentielle Calciumionen von den Zellen aufgenommen werden und in den Zellen an schwefel- und phosphathaltige Makromoleküle binden, sodass die DNA Replikation verhindert wird. Des Weiteren verringern die Silberionen die Adhärenz der Mikroorganismen an Oberflächen. Die toxische Wirkung von Kupferionen entsteht dadurch, dass sie sich an Thiolgruppen von Proteinen binden und Lipide der Zellmembran peroxidieren, was zur Bildung von freien Radikalen führt, welche die DNA und Zellmembranen schädigen. Angaben zur Ökotoxizität beider Metall-Ionen unterliegen starken Schwankungen in Abhängigkeit der Versuchsdurchführung und Zielgruppen.

Die notwendige Dosiermenge der Kupfer und Silberionen ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Kühlwassers, da der Anteil der in der Lösung frei verfügbaren Ionen durch unterschiedliche Fällungs- und

Komplexierungsprozesse beeinflusst wird. So kommt es beispielsweise in Wässern mit erhöhter Karbonathärte in Gegenwart von Kupferionen zur Bildung von schwerlöslichem Malachit ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$). Erhöhte Chloridgehalte oder die Anwesenheit von Schwefelwasserstoff bzw. Sulfid können ebenfalls zur verstärkten Ausfällung von Kupfer und Silberionen aus der Lösung führen. Gleichzeitig kommt es durch Komplexierungsreaktionen zu einer gewissen Reduktion der für die Desinfektion zur Verfügung stehenden Metallionen. Mit Hilfe hydrochemischer Modellprogramme lässt sich jedoch der Anteil, der in der Lösung verfügbaren, Kupfer- und Silberionen für eine bestimmte Wasserzusammensetzung berechnen, so dass die im praktischen Einsatz erforderlichen Dosiermengen abgeschätzt werden können. Die geeignete Konzentration von Metallionen kann mit Hilfe des elektrischen Stromes erzeugt werden. Bei niedrigen Spannungen sind nur einige Milliampere zur Produktion der Metallionen erforderlich. Eingesetzt wurde ein Metallionendesinfektionsgerät mit FI-Schutzschalter und Stromregulierung der Fa. ECONIC systems (siehe Abbildung 2). Die Investitionskosten betrugen € 300,-- exkl. MwSt.



Abbildung 2: Silber/Kupferelektroden des CT-Boy für Einlegen ins Becken eines Kühlturms (Photo Fa. ECONICsystems)

- Intermittierende thermische Desinfektion

Vorübergehendes Aufheizen des Kreislaufwassers auf $\geq 60^\circ \text{C}$ mit thermischer Desinfektion der Zirkulationsstränge. Das Intervall des intermittierenden Aufheizens wurde individuell an das Zeitintervall zwischen Dekontamination und etwaiger Rekontamination angepasst.

Die unterschiedlichen chemischen und physikalischen Verfahren wurden untereinander verglichen und bewertet und es wurde die technisch und wirtschaftlich beste Lösung ermittelt.

2.3.4 Untersuchungen zur Wasserqualität und Kalkabscheidung im Kühlturm

Der Betrieb des Nasskühlturmes über 52 Tage wurde von regelmäßigen Wasseranalysen (im 2-Tage-Intervall) begleitet. Analysiert wurden Wasserproben aus dem Kühlturm, in dem das Wasservolumen durch laufende Ergänzung der verdunstenden Wassermenge konstant gehalten wurde. Der in Abhängigkeit von der wissenschaftlichen Fragestellung gewählte Untersuchungsumfang beinhaltete sowohl die physikalisch chemischen Parameter pH-Wert, Leitfähigkeit, Temperatur, als auch die Gehalte an Kationen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) und Anionen (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-). Ziel der Untersuchungen war es, die durch den Verdunstungsprozess im Kühlturm bedingte Aufkonzentrierung der gelösten anorganischen Stoffe zu verfolgen und aus den gewonnenen Daten Aussagen hinsichtlich der Dynamik der Kalkabscheidung und der Entwicklung der Chloridkonzentrationen während des permanenten Betriebes des Kühlturmes ableiten zu können. Gleichzeitig sollte auf der Basis der gewonnenen Daten ein geochemisches Modell entwickelt werden, welches es gestattet, die wesentlichen hydrogeochemischen Prozesse während des Kühlturbetriebes numerisch nachzuvollziehen und unterschiedliche Szenarien für die Optimierung des Kühlturbetriebes zu simulieren. Eingesetzt wurde hierfür der Programmcode PHREEQC-2 (Parkhurst and Appelo, 1999) mit dem alle maßgeblichen hydrochemischen Reaktionen thermodynamisch nachvollzogen werden können.

2.4 AP 4 - Untersuchung alternativer Rückkühlmöglichkeiten

Im Rahmen des Projektes wurden alternative Rückkühlmöglichkeiten für Absorptionskältemaschinen gesucht, die zukünftig den Einsatz von Nasskühltürmen verbessern oder diesen generell ersetzen könnten. Ziel war es eine Übersicht über Konzepte und Einsatzmöglichkeiten zu erhalten, bereits umgesetzte Projekte zu prüfen und deren Erfahrungswerte aufzunehmen.

Als Ergebnis liegen Übersichten und Empfehlungen vor, die aufzeigen in welcher Form alternative Rückkühlungen sinnvoll eingesetzt werden können.

Im Detail wurden zwei Systeme untersucht. Die Prüfung des Einsatzes von Latentwärmespeichern und Erdsonden.

Die Ergebnisse wurden in einer kompakten Form für interessierte Planer, Installateure und Bauherren zusammengefasst.

2.5 AP 5 - Technischer und wirtschaftlicher Systemvergleich

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Arbeitspakete wurde ein technischer und wirtschaftlicher Systemvergleich angestellt. Die Ergebnisse führen zu optimalen technischen und wirtschaftlichen Systemlösungen für thermische Kühlsysteme.

Das Arbeitspaket 5 fasst die Ergebnisse der Arbeitspakete 1 bis 4 zusammen und bewertet diese aus technischer und wirtschaftlicher Sicht. Dafür wurden aus den identifizierten repräsentativen Einsatzorten sowie den unterschiedlichen Einsatzgebieten (z.B.: Lebensmittelkühlagerung, Klimatisierung) Beispiele ausgewählt, für die unter Einbeziehung der ebenfalls in Arbeitspaket 1 identifizierten Rahmenbedingungen Wirtschaftlichkeitsberechnungen angestellt wurden. Insbesondere wurden dabei unter anderem die folgenden Fragen beantwortet:

1. Wie hoch sind die Investitionskosten der Anlage?
2. Wie hoch sind die zusätzlichen Kosten für Hygienisierungsmaßnahmen?
3. Wie hoch sind die Betriebskosten insbesondere für parasitäre Aggregate der Rückkühlanlage (Ventilator, Pumpen)?
4. Wie hoch sind der Wasserverbrauch und die damit verbundenen Kosten der Rückkühlung?

2.6 AP 6 - Entwicklung eines Planungswerkzeugs für Anbieter von thermisch angetriebenen Kühltssystemen

In diesem Arbeitspaket wurde ein Hilfsmittel zur Planung und Auslegung von thermisch- bzw. solarthermisch angetriebenen Kälteanlagen für Anbieter von thermisch angetriebenen Kühltssystemen erstellt. Dieses Werkzeug (Tool) soll eine Erstabschätzung der Anlagengröße, Größe der einzelnen Komponenten sowie der erwartenden Projektkosten ermöglichen.

Im ersten Schritt wurde auf Basis der Ergebnisse der Arbeitspakete 1 bis 5 ein Pflichtenheft erarbeitet, welches die Grundlage für die weitere Entwicklung des Tools darstellte.

Das Tool wurde von der Fa. S.O.L.I.D. zusammen mit dem Institut für Softwaretechnologie (IST) der Technischen Universität Graz entwickelt. Es stellt als Erstversion eine Web-basierte Anwendung dar. Diese hat im Vergleich zu einem Tabellenkalkulationsprogramm Vorteile wie die Möglichkeit einer dezentralen Nutzung mit zentraler Wartung, Nachvollziehbarkeit individueller Anpassungen durch ein Änderungsprotokoll, Benutzerfreundlichkeit durch einfache Bedienung.

Für das Pflichtenheft wurde die Solarthermie als Wärmequelle sowie Nasskühlanlagen als häufigste angewendete Form der Rückkühlung eingesetzt. Die Schnittstelle der Wärmequelle wurde so definiert, dass neben Solarthermie auch weitere Wärmequellen (Abwärme oder Fernwärme) ergänzt werden können. Dasselbe gilt für Rückkühlsysteme.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Arbeiten in den einzelnen Arbeitspaketen dargestellt.

3.1 AP 1 – Systemevaluierung

3.1.1 Anbieter von Rückkühlanlagen

Nachfolgend sind die Anbieter von Rückkühlanlagen für Sorptionskältemaschinen im Leistungsbereich von 5 bis 70 kW Kälteleistung, welche derzeit am Markt verfügbar sind, tabellarisch aufgelistet (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Ergebnis (E1.1) Verzeichnis der am Markt vorhandenen Rückkühlsysteme.

Firma	Kontaktperson	Telefon	Fax	email	Modell	Beschreibung	Kühlleistung [kW]	Wasserdurchsatz [m³/h]	Motorleistung [kW]	Lüfterdrehzahl [U/min]	Heizung, Sieb, Zubehör €	Nettopreis (für Solid, ohne Zubehör) €
						ausgelegt für 32°C/26°C/21°C						
Axima www.axima.info	Achim Rigler	+43 316 283268-12	+43 316 283268-3	Achim.Rigler@axima.info								
					EWK 036/03	nasser Kühlturm	28	4	0.33/0.1	1430	300	2200
					EWK 064/03		48	7	0.55/0.1	900/450	300	3100
					EWK 144/03		132	19	1.5/0.35	960/470	300	5000
Sortech www.sortech.de	Katrin Spanka	++49 345 279809-17		katrin.spanka@sortech.de								
					RCS 08	trockener Kühlturm	21	0,000456621	0,65		580	3690
					RCS 15		42	0,000684932	1,2		580	6190
Güntner www.guentner.de	Joachim Weber	+41 62 289 20 36		joachim.weber@guentner.ch								
					SBK52		52					4055
					HTK 1.2/2.7- 2S-P6-CU- SLNF	Hybrid	120	18,4	3	606		49520

3.1.2 Gegenüberstellung von Rückkühlösungen

In diesem Abschnitt erfolgt eine kurze Gegenüberstellung aller gängigen (und alternativen) Rückkühlösungen für Sorptionskältemaschinen.

Trockenkühlung:

Der Trockenkühler (siehe Abbildung 3) nutzt die Umgebungsluft für die Kühlung.

Vorteil:

Es handelt sich um einen geschlossenen Kühlkreislauf, somit gibt es keinen Wasserverbrauch und keine Legionellen im System.

Die Regelung und Einbindung ist sehr einfach umsetzbar.

Der Wartungsaufwand ist gering.

Nachteil:

Der Kühlturm kann an heißen Tagen die notwendige Rückkühltemperatur für die Absorptionskältemaschine (AKM) nicht gewährleisten.

Er benötigt eine höhere elektrische Leistung als ein Nasskühlturm und hat einen größeren Platzbedarf.

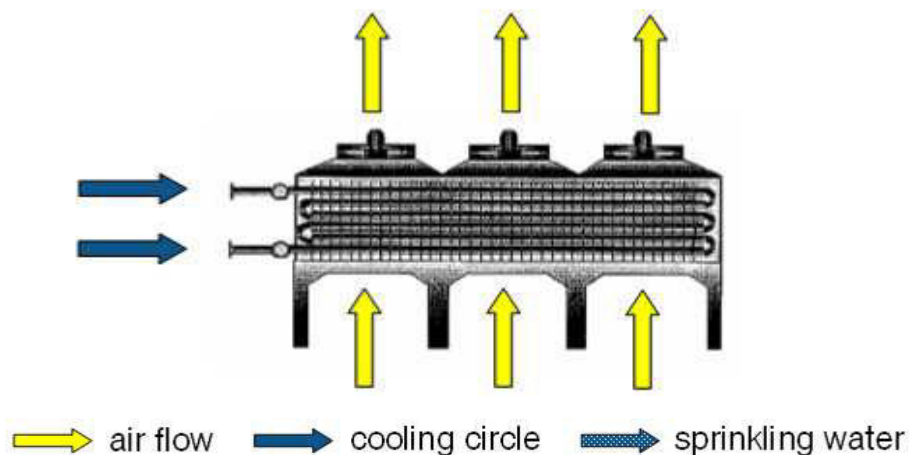


Abbildung 3: Trockenkühler

Nasskühlung:

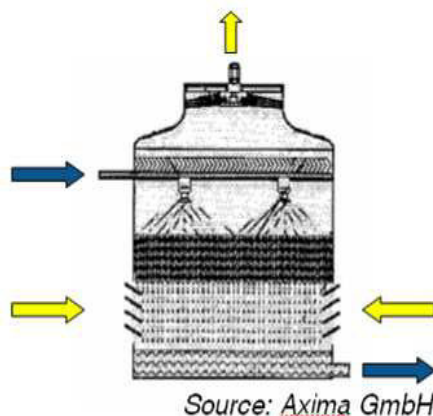
Der Nasskühlturm (siehe Abbildung 4) erreicht Rückkühltemperaturen, die um die 3 bis 4 °C über der Feuchtkugeltemperatur liegen.

Vorteil:

- Der Nasskühlturm ist eine kostengünstige, effiziente Form der Rückkühlung für AKMs.
- Die Regelung und Einbindung ist sehr einfach umsetzbar.
- Der Wartungsaufwand ist höher als bei Trockenkühltürmen.
- Die elektrische Leistung ist deutlich geringer als bei Trockenkühltürmen.

Nachteil:

- Der Nasskühlturm benötigt eine Wasseraufbereitung (Legionellenbildung).
- Es kann zu Schwadenbildung während des Betriebes kommen.
- Nasskühltürme mit höheren Leistungen haben ein höheres Gewicht als Trockenkühltürme.



 air flow
  cooling circle
  sprinkling water

Abbildung 4: Nasskühlturm

Hybridkühlung:

Der Hybridkühler (siehe Abbildung 5) ist eine Kombination aus Nass- und Trockenkühler. An Tagen mit gemäßigter Temperatur wird er wie ein Trockenkühlturm betrieben. An heißen Tagen wird Wasser besprüht und somit ein ähnlicher Betrieb wie bei einem Nasskühlturm erreicht.

Vorteil:

- Hybridkühltürme vereinigen die technisch-physikalischen Vorteile von Trockenkühlturm (Schwadenfreiheit) und Nasskühlturm (hohe Kühlleistung, besserer Wirkungsgrad).
- Der Wartungsaufwand ist höher als bei Trockenkühltürmen.

Nachteil:

- Gegenüber Nasskühltürmen besitzen sie aber wegen des Leistungsbedarfes für die notwendigen Ventilatoren einen schlechteren Wirkungsgrad.
- Zudem liegen die Investitionen für Hybridkühltürme gleicher Leistung sehr viel höher.

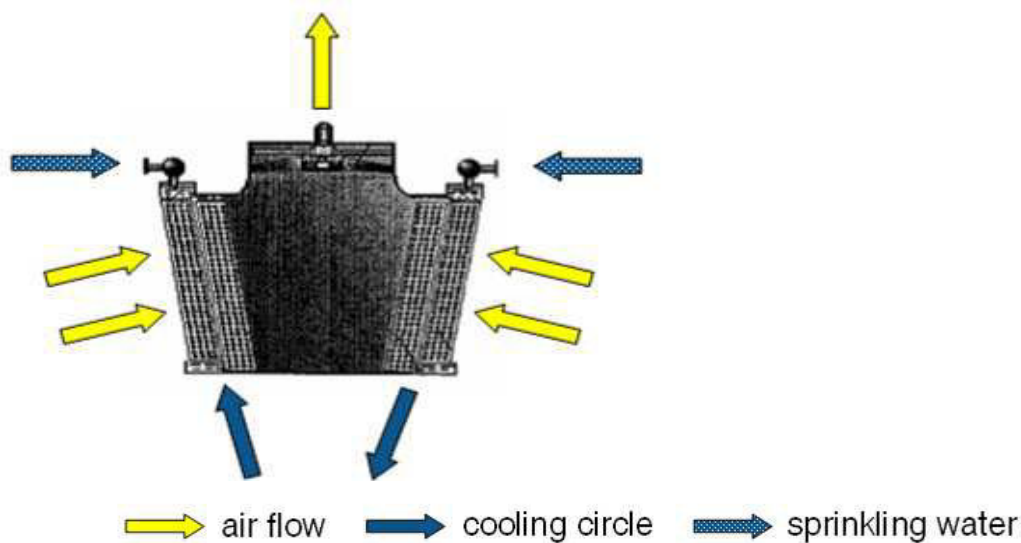


Abbildung 5: Hybridkühler

Brunnenkühlung:

Brunnenwasser wird für die Rückkühlung verwendet (siehe Abbildung 6).

Vorteil:

- Es können sehr tiefe Temperaturen erreicht werden (7 bis 12 °C) und dadurch ist oftmals eine direkte Kühlung ohne AKM möglich.
- Die Regelung und Einbindung ist sehr einfach umsetzbar.
- Der Wartungsaufwand ist gering.
- Der Investitionsaufwand ist gering.

Nachteil:

- Es gibt strenge Auflagen für die Umsetzung seitens der Behörden.
- Bedingt durch diese Auflagen und Genehmigungsverfahren ist es oftmals nicht möglich eine Brunnenkühlung zu realisieren.

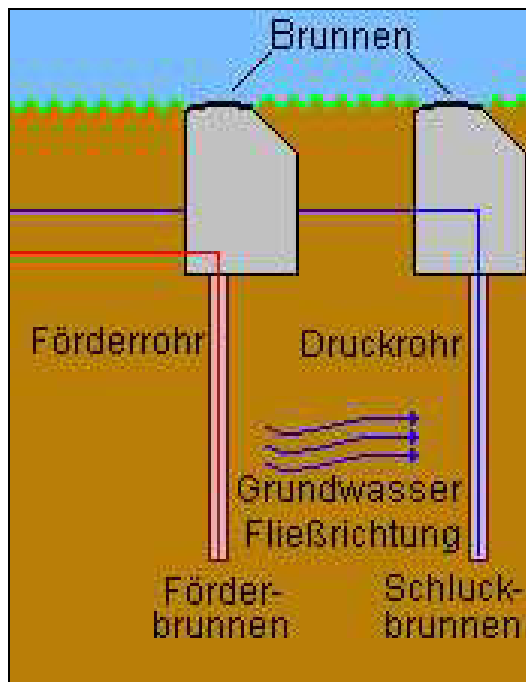


Abbildung 6: Brunnenkühlung

Zisternen:

Bei Zisternen wird gespeichertes Regenwasser als Rückkühlbecken genutzt (siehe Abbildung 7).

Vorteil:

- Es können Belastungsspitzen abgedämpft werden.
- Die Regelung und Einbindung ist sehr einfach umsetzbar.
- Der Wartungsaufwand ist gering.

Nachteil:

- Meist sind nur geringe Volumen verfügbar (besonders im Sommer an heißen Tagen).
- Es besteht die Gefahr des Algenwachstums (Beigabe chemischer Mittel notwendig).
- Zur ordnungsgemäßen Funktion muss oftmals eine zusätzliche Rückkühlung eingeplant werden (Nasskühlturm).

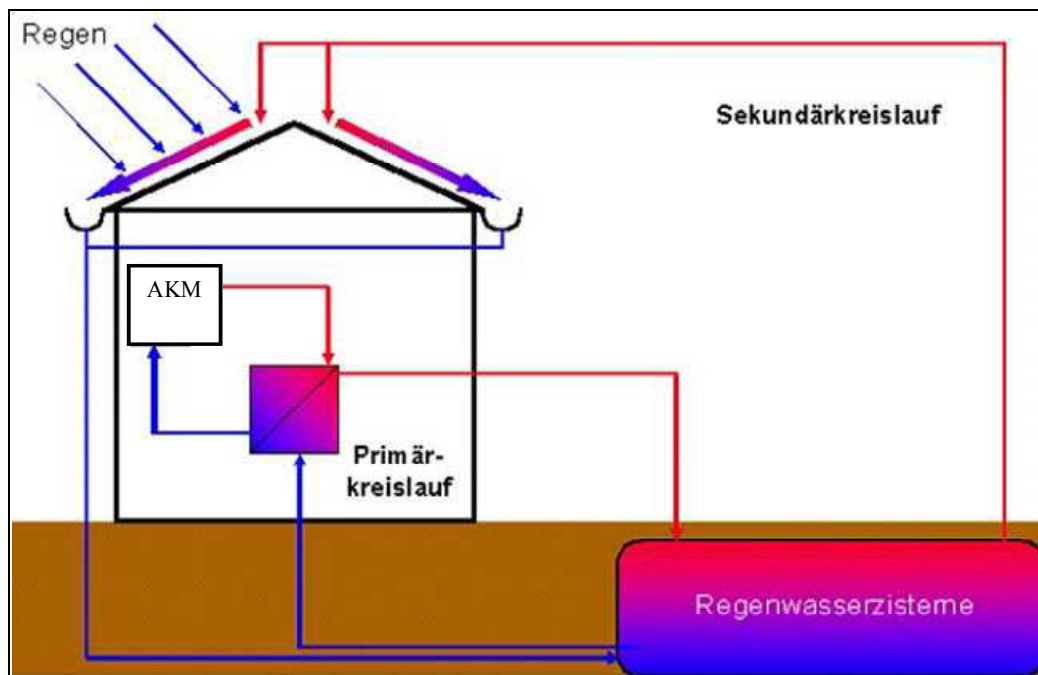


Abbildung 7: Konzept einer Zisterne (Quelle: ZAE Bayern)

Flusswasser:

Es wird Flusswasser für die Rückkühlung genutzt (siehe Abbildung 8).

Vorteil:

- Es können Temperaturen zwischen 12 und 18 °C (Sommer 20 °C) erreicht werden.
- Die Regelung und Einbindung ist sehr einfach umsetzbar.
- Das Investment und der Wartungsaufwand sind gering.
- Eine einfache Systemeinbindung ist möglich.
- Eine direkte Einbindung ohne Kältemaschine für Kühldecken ist möglich.

Nachteil:

- Aus wirtschaftlichen Gründen müssen die Leitungslängen (Verbindung vom Fluss zum Gebäude) möglichst kurz sein.
- Die Behördenauflagen und Behördengenehmigungen müssen beachtet werden.

Es wird empfohlen Filteranlagen oder Beruhigungsbecken einzuplanen, welche die Pumpleistung erhöhen und ein Zusatzinvestment verursachen.

Oftmals ist es nicht möglich eine behördliche Genehmigung für die Realisierung einer Rückkühlung über Flusswasser zu erhalten.

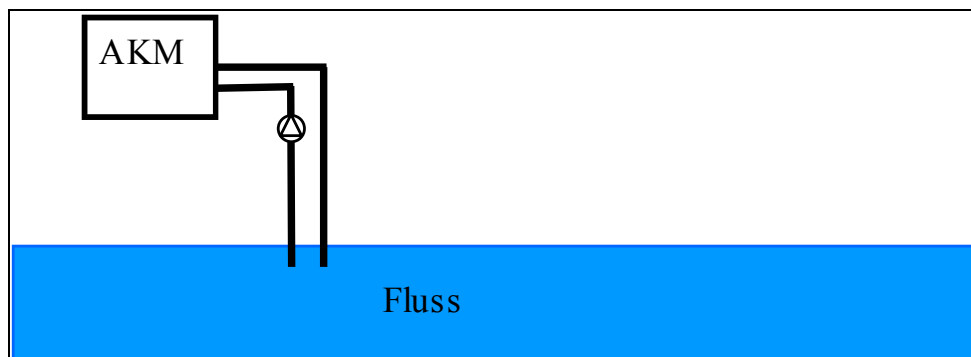


Abbildung 8: Symbolisch Flusskühlung

In Tabelle 4 sind die Rückkühlösungen in einer Übersicht dargestellt.

Tabelle 6: Übersicht über Rückkühlsysteme und ihre Vor- und Nachteile

	Trockenkühler	Nasskühler	Hybridkühler	Brunnenkühlung	Zisternen	Flusswasser	Geothermie	Trockenkühler mit Latentwärmespeicher	Kühlturm mit ER Wasseraufbereitung
Vorteile	- geschlossener Kreislauf	- niedrigeres Temperaturniveau erreichbar	- Wasserverbrauch bedarfsabhängig	- tiefe Temperaturen erreichbar (7-12 °C)	- Abdämpfen von Belastungsspitzen möglich	- tiefe Temperaturen erreichbar (12-18 °C)	- niedriges Temperaturniveau erreichbar	- geschlossener Kreislauf	- keine Wasseraufbereitung zusätzlich notwendig
	- kein Wasserverbrauch	- Feuchtkugeltemperaturabhängig	- niedrigeres Temperaturniveau auch bei hohen Außentemperaturen erreichbar	- geringer Investitionsaufwand	- Zusatzvolumen	- geringer Investitionsaufwand	- ideal in Kombination mit Wärmepumpen	- kein Wasserverbrauch	- Kombisysteme zukünftig verfügbar
	- einfache Regelung	- geringerer Platzbedarf		- einfache Regelung		- einfache Regelung	- kaum Lärmbelästigung	- einfache Regelung	- Regelungskosten entfallen, da über AKM geregelt
	- geringer Wartungsaufwand	- geringere elektr. Leistungsaufnahme		- geringer Wartungsaufwand		- einfache Systemeinbindung möglich	- kaum Platzbedarf notwendig	- geringer Wartungsaufwand	- geringere Investmentkosten als die Summe der Einzelkomponenten
	- keine Legionellenbildung	- geringe Investmentkosten		- Freecooling einfach möglich		- Bei Kühldeckenanwendung ist eine AKM oftmals nicht notwendig		- keine Legionellenbildung	- geringere Betriebskosten (Strom, Wasserverbrauch, Wartung)
		- einfache Regelung		- Bei Kühldeckenanwendung ist eine AKM nicht notwendig				- ermöglicht Kühlung bei hohen Außentemperaturen	- sehr geringer Platzbedarf
								- Speicher kann auch als Heizungsspeicher genutzt werden	- keine Chemie notwendig
									- einfache Einbindung ins System
Nachteile	- Außentemperaturabhängig	- Wasserverbrauch	- Regelung aufwendig	- Behördenauflagen	- meist zu geringe Volumen vorhanden	- oftmals keine behördliche Genehmigungen möglich	- sehr hohe Investmenkosten	- zusätzliche Investmentkosten	- relativ neues System
	- hohe elektr. Leistung	- Legionellenbildung möglich	- sehr teuer	- behördliche Genehmigung notwendig	- Wasserverfügbarkeit oft nicht gewährleistet	- kurze Leitungslänge (nähe zum Fluss) notwendig	- Geologische Gutachten notwendig	- zusätzlicher Stromverbrauch während der Nachtregeneration	- wenig Betriebserfahrungen liegen vor
	- großer Platzbedarf	- Verkalkungsgefahr	- Algenbildung möglich	- oftmals keine behördl. Genehmigung möglich	- meist nur in Kombination mit einer anderen Rückkühlung realisierbar	- Beruhigungsbecken oder Filter notwendig	- Bei Klimatisierung nur in Kombination mit Heizen und Kühlen wirtschaftlich umsetzbar (Wärmepumpe)	- für kleine Leistungen verfügbar	- keine Langzeiterfahrungswerte aufgrund Neuigkeitsgrad
	- höhere Lärmbelastung	- Dampfschwadenbildung möglich	- Verkalkung möglich		- Algenwachstum		- große Flächen für Erdsonden notwendig	- zusätzlicher Aufwand für Hydraulik	
		- Frostgefahr	- Frostgefahr		- oftmals chemische Zusätze notwendig		- teilweise tiefe Bohrungen notwendig	- noch im Entwicklungsstadium	
		- hohes Gewicht	- hoher Platzbedarf		- zusätzlicher Regelungsaufwand		- keine Pauschalaussage möglich, jedes Projekt muss kalkuliert und angefragt werden		
		- chemische Wasseraufbereitung notwendig	- Wasseraufbereitung notwendig						

3.1.3 Potentielle Einsatzgebiete und Rahmenbedingungen für solares Kühlen in Europa

Um die potentiellen Einsatzgebiete für solares Kühlen in Europa zu identifizieren wurde ein Simulationsmodell erstellt in welchem exemplarisch 7 Einsatzorte erfasst und ihren Klimadaten evaluiert wurden.

Die untersuchten Einsatzorte sind:

1. Griechenland, Athen
2. Dänemark, Kopenhagen
3. Deutschland Freiburg
4. Frankreich, Perignan
5. Spanien Madrid
6. Italien, Palermo
7. Niederlande, Meridol

Die Rahmenbedingungen im erstellten Simulationsmodell sind die Klimadaten der Einsatzgebiete, die als Stundenwerte erfasst werden. Dies ermöglicht eine genaue Simulation des Verhaltens der untersuchten Kühltürme zum Einsatz mit verschiedenen Sorptionskältemaschinen. Im Arbeitspaket 1 wurden diese Daten beschafft.

3.2 AP 2 – Untersuchung des Einflusses der Rückkühlsysteme auf den Absorptionskälteprozess

Im Zentrum der Berechnungen stand das Zusammenwirken von Rückkühlsystem (Kühlturm) und thermisch angetriebener Kältemaschine (AKM), wobei auf dieses System wiederum folgende externe Einflussfaktoren wirken: (siehe Abbildung 9)

- Typ des Wärmeerzeugers
- Klimadaten des Standortes
- Kühlzweck des Systems

Durch die iterative Berechnung des Simulationsmodells für alle 8760 Jahresstundenwerte konnte die theoretisch mögliche Kälteleistung bzw. Jahresarbeit ermittelt werden, welche von der Kälteanlage (AKM & Kühlturm) unter den gegebenen Rahmenbedingungen erreicht werden kann.

Das Ergebnis der Simulation stellte schließlich der Vergleich der theoretisch möglichen Leistung bzw. Jahresarbeit mit der tatsächlich am Standort abzudeckenden Leistung bzw. Jahresarbeit dar. Basierend auf diesen technischen Betrachtungen konnten in weiterer Folge auch wirtschaftliche Berechnungen durchgeführt werden.

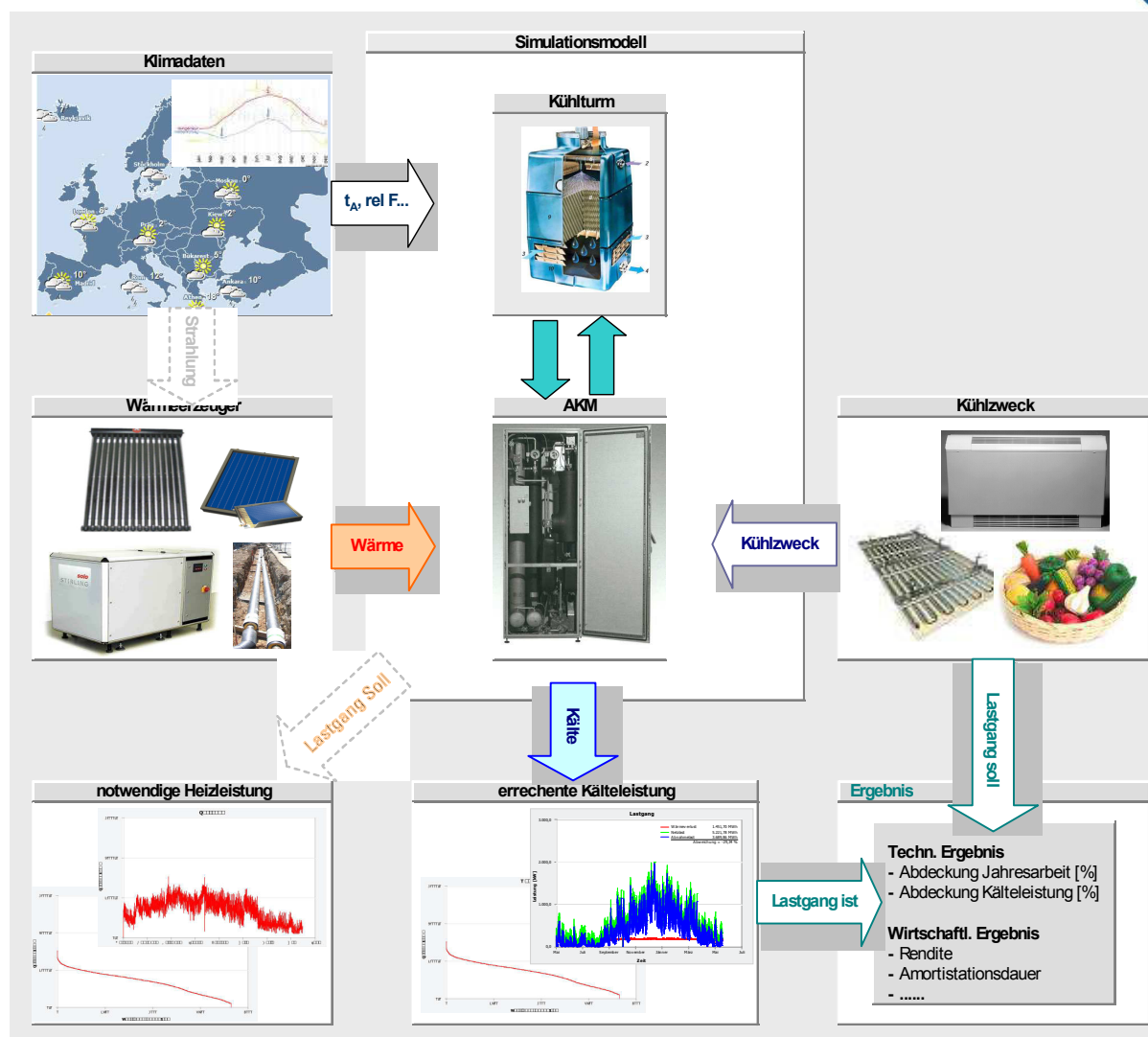


Abbildung 9: Aufbau des Simulationsmodells

Eingabedaten

Die mögliche Kälteleistung bzw. Jahresarbeit von thermisch angetriebenen Kälteanlagen hängt vor allem vom verwendeten Rückkühlsystem bzw. der eingesetzten Kältemaschine ab. Einen ganz entscheidenden Einfluss haben allerdings auch die zuvor erwähnten Einflussfaktoren.

So wird z.B. eine Kälteanlage für eine Kühldeckenanwendung mit hohen Kaltwassertemperaturen (von 15 bis 18 °C) in Nordeuropa bei einer guten Rückkühlung (von 24 bis 29 °C) sowohl hinsichtlich Leistung als auch Effizienz wesentlich bessere Werte ermöglichen als eine Kälteanlage für Lebensmittelkühlung bei der tiefe Kaltwassertemperaturen benötigt werden und welche in Südeuropa mit einer durch den Standort schlechten Rückkühlung (von 27 bis 34 °C) kombiniert ist. Deshalb stellte die Erfassung aller für die Simulation relevanten Eingabedaten einen wesentlichen Bestandteil dieses Arbeitspaketes dar.

Rückkühlsystem

Hauptsächlich werden Ad- und Absorptionsanlagen in Kombination mit trockenen und feuchten Kühltürmen eingesetzt. Aber auch andere Varianten wie z.B. Brunnenkühlung oder Erdsonden sind denkbar (siehe Arbeitspaket 4). Da allerdings für diese alternativen Rückkühlösungen keine brauchbaren Datenblätter bzw. Berechnungsunterlagen vorhanden waren, wurden diese Varianten bei der Simulation nicht weiter berücksichtigt.

Hingegen waren für einige Kühltürme (trocken und feucht) die notwendigen Planungs- bzw. Berechnungsunterlagen verfügbar. Wie in Abbildung 10 ersichtlich wurden insgesamt fünf Kühltürme unterschiedlicher Leistung und unterschiedlichen Typs in die Simulation aufgenommen:

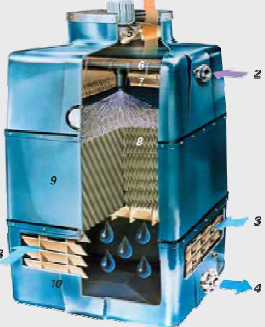
Kühlturm			
	Art	Hersteller	Typ
	- Nasskühlturm	Axima	EWK 036
	- Trockenkühler	Sortech	RTC 15
	- Nasskühlturm	Axima	EWK 064
	- Trockenkühler	Güntner	052 B3
	- Nasskühlturm	Axima	EWK 144

Abbildung 10: Kühltürme die in die Simulation aufgenommen wurden

Als Eingabeschema in die Simulation diente ein aus vermessenen Kühltürmen

erstelltes Kennfeld des jeweiligen Kühlturms, mit dem alle simulationsrelevanten Zusammenhänge mit der nötigen Genauigkeit dargestellt werden konnten.

Beispielhaft wird in Abbildung 11 ein Kennfeld des Kühlturms „Axima - EWK 036“ dargestellt, welches die Abhängigkeit der Rückkühlleistung für unterschiedliche Feuchtkugeltemperaturen sowie Eintrittstemperaturen des MT-Kreises in den Kühlturm zeigt.

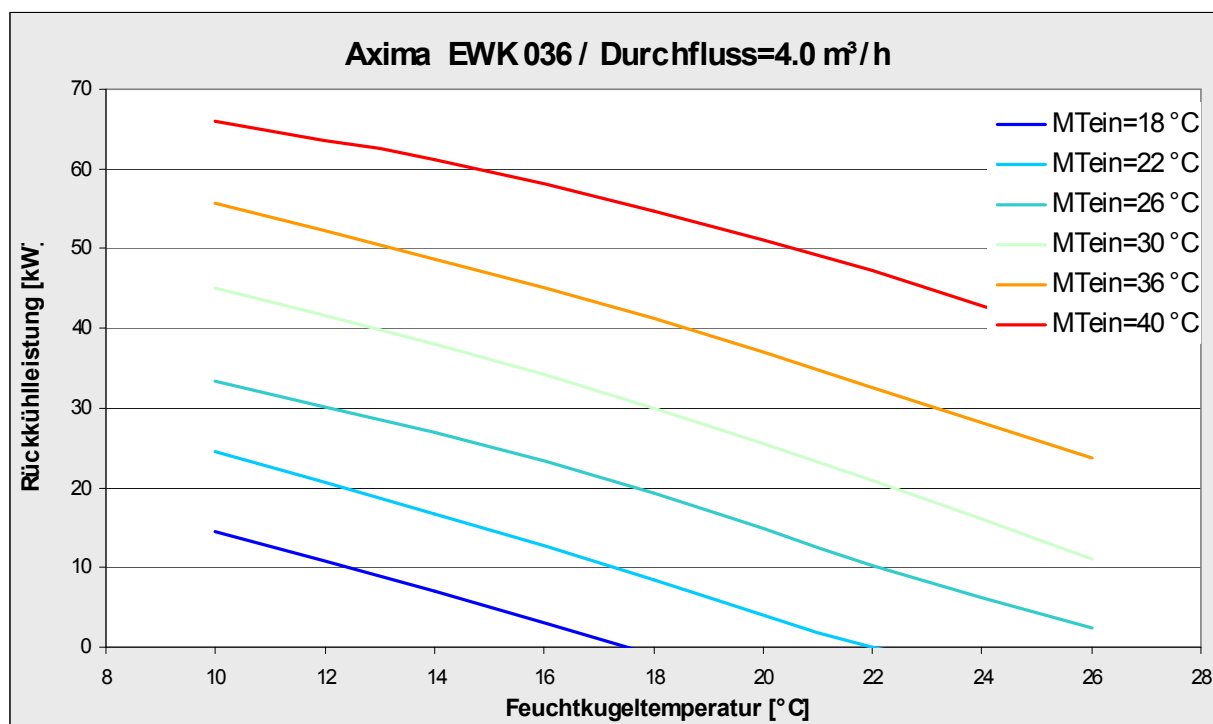


Abbildung 11: Kennfeld „Axima - EWK 036“

Kältemaschine

Die Erfassung der Daten, die das Betriebsverhalten der Kältemaschinen beschreiben, wurde ebenfalls über die Auswertung und anschließende Erstellung von Kennfeldern realisiert, wobei folgende Kältemaschinen in der Simulation berücksichtigt wurden (siehe Abbildung 12):

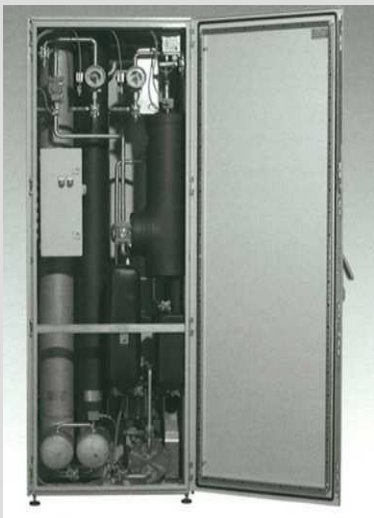
AKM		
	Art	Hersteller
	- Adsorption	Sortech
	- Adsorption	Invensor
	- Absorption	Pink
	- Adsorption	Sortech
	- Absorption	Yazaki
	- Absorption	Pink
	- Absorption	Yazaki
	- Absorption	Yazaki
		Typ
		STC 8
		ISC 10
		PSC 14
		STC 15
		WFC 17
		PSC 19
		WFC 36
		WFC 70

Abbildung 12: *In der Simulation berücksichtigte Kältemaschinen*

Beispielhaft wird in Abbildung 13 ein Kennfeld für die Absorptionskältemaschine „Pink PSC 14“ dargestellt, das die Abhängigkeit der Kälteleistung von unterschiedlichen Eintrittstemperaturen des Rückkühlkreises (MT) und Heizkreises (HT) bei einer Abkühlung des Kaltwassers von 12 auf 6 °C zeigt.

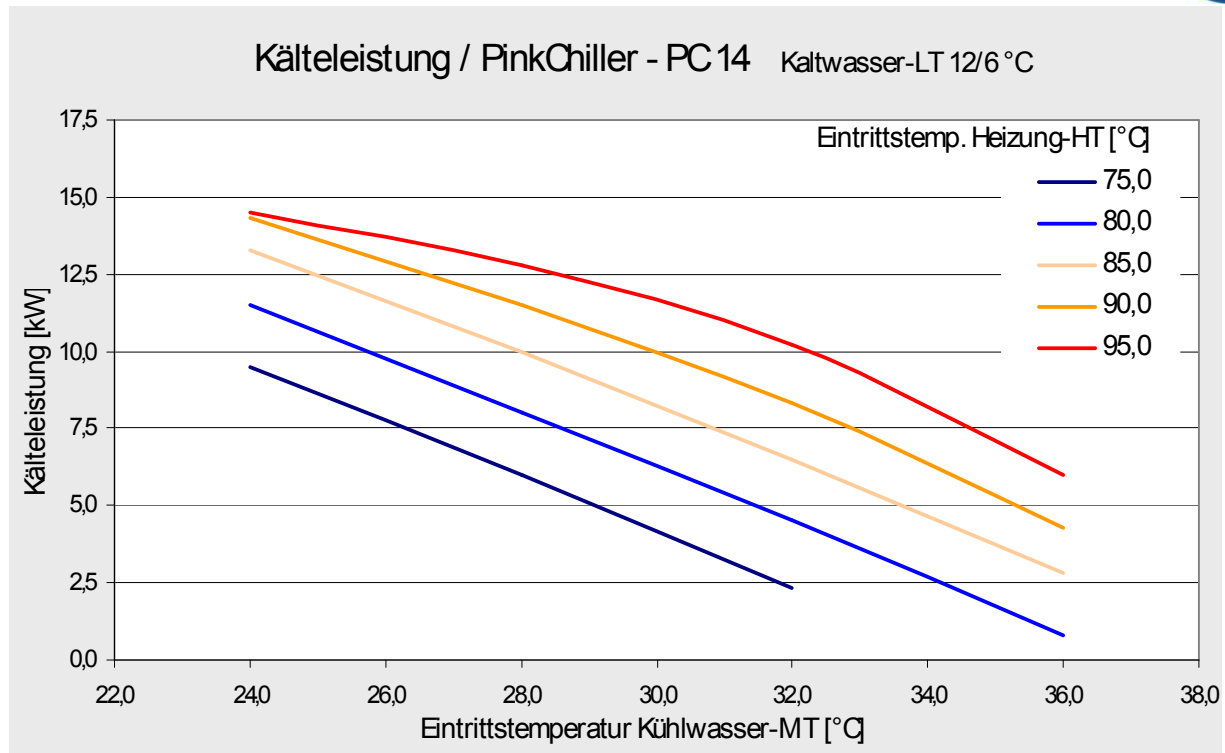


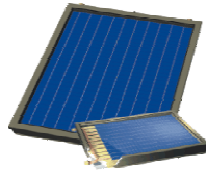
Abbildung 13: Kennfeld „Pink – PSC 14“

Wärmeerzeuger

Bei der Bereitstellung der für den Betrieb der Kältemaschine benötigten Wärme wurde vereinfacht angenommen, dass die Wärmeleistung immer in ausreichendem Ausmaß (infini) verfügbar ist. Es werden bei der Simulation also keine realen Wärmeerzeuger mit endlichen Leistungen berücksichtigt. Diese starke Vereinfachung des Simulationsmodells ist aber aufgrund des Projektinhalts gerechtfertigt, bei dem nur die Auswirkungen der Rückkühlung genau untersucht werden sollen. Des Weiteren konnte dadurch vermieden werden, dass die theoretisch mögliche Kälteleistung bzw. Jahresarbeit der Gesamtanlagen vorrangig durch die Größe des Wärmeerzeugers bestimmt wird, was mitunter gänzlich falsche Rückschlüsse auf das Rückkühlsystem mit sich bringen könnte.

Bei der Solaranlage wurde auch bezüglich der erreichbaren Eintrittstemperatur eine vereinfachte Annahme getroffen, nach der sich die verfügbare Temperatur je nach Gesamtstrahlungswert zwischen 60 und 90°C bewegt (siehe Abbildung 14). Ferner wurde festgelegt, dass die Kälteanlage bei gänzlich fehlender Strahlung nicht betrieben werden kann. Mit diesen Annahmen konnten, neben dem Tag-Nachtbetrieb, auch die Vorteile für den Betrieb von Kältemaschinen in z.B. südlichen, sonnenreichen Regionen im Vergleich zu nördlichen Regionen mit nur wenigen Sonnenstunden berücksichtigt werden.

Wärmeerzeuger



- **Solarkollektoren** **60-90 °C**
proportional zu Strahlung
- **BHKW/Fernwärme** **80 °C**
- **Kessel/Prozesswärme** **90 °C**

- **infinite Wärmequelle**
es wird von ausreichend
thermischer Leistung ausgegangen

Abbildung 14: *In der Simulation berücksichtigte Wärmeerzeuger*

Kühlzweck

Da der Kühlzweck der Kälteanlage auch einen wesentlichen Einfluss auf die mögliche Kälteleistung bzw. Jahresarbeit hat, wurden im Simulationsmodell insgesamt drei verschiedene Varianten von Kühlzwecken berücksichtigt (siehe Abbildung 15). Die tiefen Austrittstemperaturen für die Gewerbe / Tiefkühlung konnte bei den simulierten AKM's nur mit der PSC 14 und 19 der Fa. Pink erreicht werden.

Kühlzweck	
	- Kühldecke/Gebäudeteilkühlung +15 °C Austrittstemp AKM
	- Fancoils +6 °C Austrittstemp AKM
	- Gewerbe/Tiefkühlung -3 °C Austrittstemp AKM

Abbildung 15: *Kühlzwecke der Simulation*

Standort

Wie bereits erwähnt, herrschen in unterschiedlichen Regionen unterschiedliche Voraussetzungen für den Betrieb von thermisch angetriebenen Kältemaschinen. Deshalb wurden die Simulationen an insgesamt sieben ausgewählten Standorten bzw. Klimaregionen in Europa durchgeführt, wobei jeweils Stundenwerte über Außentemperatur, relative Feuchte bzw. Feuchtkugeltemperatur sowie die Gesamtstrahlung (Diffus, Global- und Direktstrahlung) verfügbar sein mussten. In Abbildung 16 werden die simulierten Standorte aufgelistet.

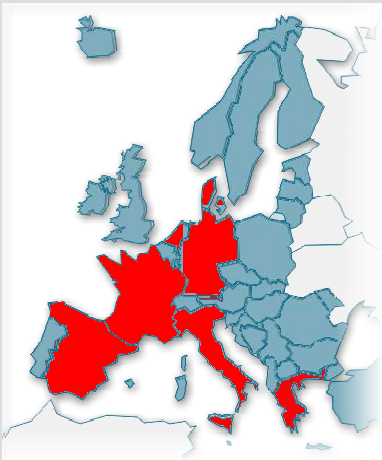
Standort																	
	<table> <tr> <th>Land</th><th>Stadt</th></tr> <tr> <td>- Griechenland</td><td>Athen</td></tr> <tr> <td>- Dänemark</td><td>Kopenhagen</td></tr> <tr> <td>- Deutschland</td><td>Freiburg</td></tr> <tr> <td>- Frankreich</td><td>Perignan</td></tr> <tr> <td>- Spanien</td><td>Madrid</td></tr> <tr> <td>- Italien</td><td>Palermo</td></tr> <tr> <td>- Niederlande</td><td>Meridol</td></tr> </table>	Land	Stadt	- Griechenland	Athen	- Dänemark	Kopenhagen	- Deutschland	Freiburg	- Frankreich	Perignan	- Spanien	Madrid	- Italien	Palermo	- Niederlande	Meridol
Land	Stadt																
- Griechenland	Athen																
- Dänemark	Kopenhagen																
- Deutschland	Freiburg																
- Frankreich	Perignan																
- Spanien	Madrid																
- Italien	Palermo																
- Niederlande	Meridol																

Abbildung 16: in der Simulation berücksichtigte Standorte

Verbraucher

Als letzter Einflussfaktor auf das Simulationsmodell wurde der Lastgang des Kälteverbrauchs berücksichtigt, wobei insgesamt vier verschiedene Abnehmer-Kategorien untersucht wurden (siehe Abbildung 17). Als Eingabewerte dienten die Stundenwerte der Kälteleistung, die im Gebäude benötigt wird.

Verbraucher	
 Büro  Seminar  Gewerbe  Hotel	- Bürogebäude - Hotel - Gebäude mit Seminarräumen - Gewerbebetrieb

Abbildung 17: In der Simulation berücksichtigte Verbraucher

3.2.1 Simulationsumgebung

Alle Simulationen dieses Arbeitspakets wurden auf der Simulationsumgebung „simplex“ durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine Software, die ursprünglich für die Berechnung von Wärmenetzen entwickelt wurde. Folgende wesentlichen Merkmale der Software machten die Anwendung auch für die Berechnungen im Rahmen des Projekts möglich sowie sinnvoll.

Merkmale der Software:

- **Jahressimulation**
Die Berechnung von 8760 Stundenwerten oder kleineren Intervallen (z.B. 10 Minutenschritten) war möglich.
- **Datenbankanbindung**
Der Import und Export von nahezu beliebig großen Datenmengen war sehr einfach möglich.
- **Modularer Aufbau**
Eine beliebige Erweiterung um zusätzliche Module (z.B. Kältemaschine, Rückkühler) sowie Einbindung in die vorhandene Berechnungsstruktur war einfach möglich.
- **Die Möglichkeit der Interpolation von mehrdimensionalen Stützpunkten**, wie sie sich aus den Kennfeldern von Kältemaschinen sowie Kühltürmen ergeben, war gegeben.

Aufgrund der beträchtlichen Anzahl der Einflussfaktoren ergab sich eine dementsprechend große Anzahl von über 10.000 verschiedenen möglichen Varianten. Um diese Variantenvielfalt beherrschen zu können, musste die Software hinsichtlich einer selbständigen, automatisierten Verwaltung angepasst werden, was durch den offenen Aufbau der Simulationsumgebung möglich war.

Durch umfangreiche Programmierarbeiten konnte die Simulationsumgebung schließlich so angepasst werden, dass sie genau den Anforderungen des Projekts „InnoCOOL“ entsprach (siehe Abbildung 18).

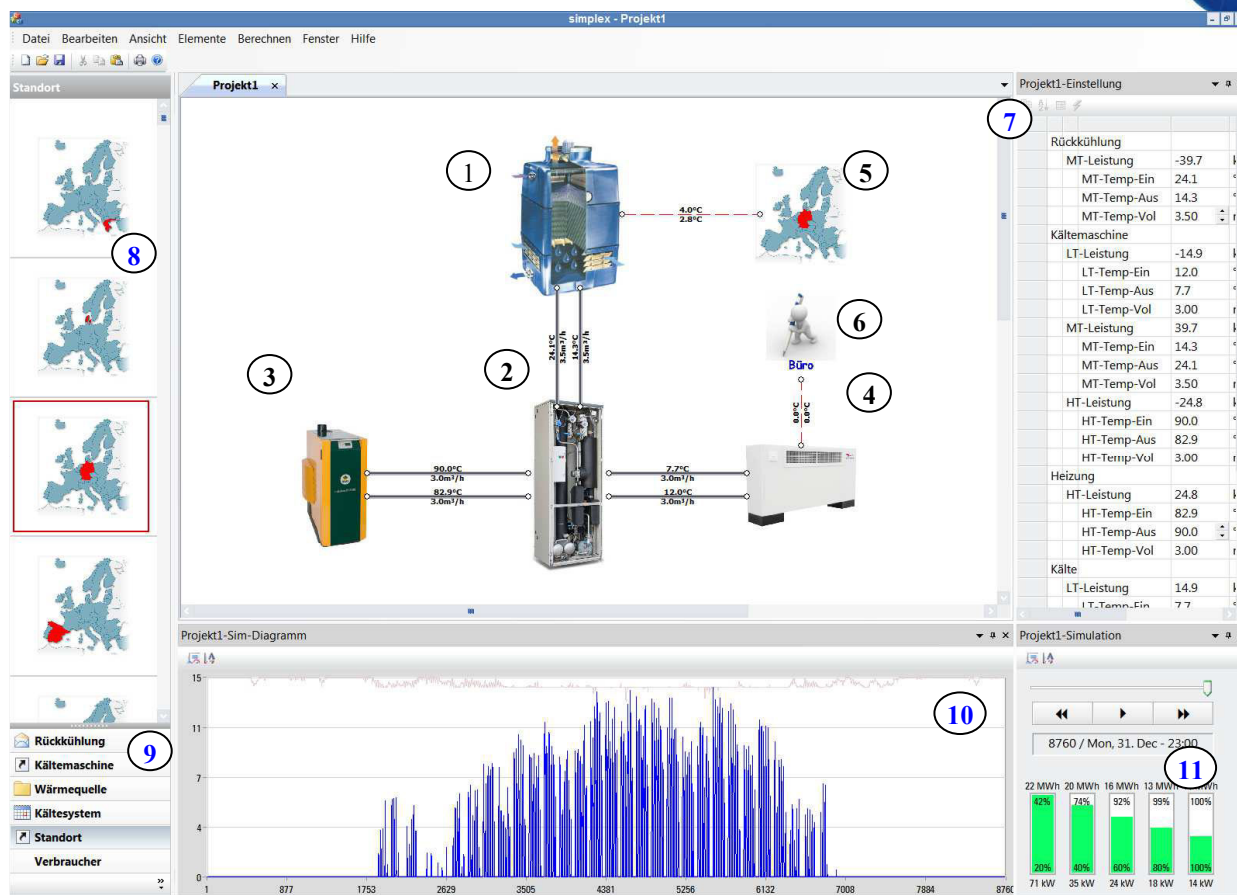


Abbildung 18: *Simulationsumgebung „simplex“*

Beispielhaft ist in Abbildung 18 ein Simulationsmodell ersichtlich, welches sich aus folgenden Komponenten zusammensetzt:

- Kühlturm – Axima EWK 036, (1)
- Kältemaschine – Pink PSC 14, (2)
- Wärmequelle – Kessel 90 °C, (3)
- Kältesystem – Fancoils +6 °C, (4)
- Standort – Freiburg in Deutschland, (5)
- Verbraucher – Bürogebäude, (6)

Weiter sind die Detailergebnisse für die einzelne Stundensimulation (7), der Auswahlbereich der unterschiedlichen Standorte (8), der Auswahlbereich der unterschiedlichen Einflussfaktoren (9), die Gegenüberstellung der theoretisch möglichen Kälteleistung und der Standort für das Gebäude benötigte Kühllast über den Zeitraum eines gesamten Jahres (10) sowie die Navigation für die Jahressimulation sowie die Auswertung der Ergebnisse (11) sichtbar.

3.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse aus der Simulation einer thermisch angetriebenen Kälteanlage stehen in vielfältiger Form zu Verfügung.

Detailergebnisse

Einerseits können detaillierte Werte über z.B. Temperaturen, Massenströme sowie Leistungen für jede einzelne Stunde der Jahressimulation angegeben werden, wobei sowohl die Darstellung in grafischer als auch tabellarischer Form verfügbar ist (siehe Abbildung 19 bzw. Tabelle 7).

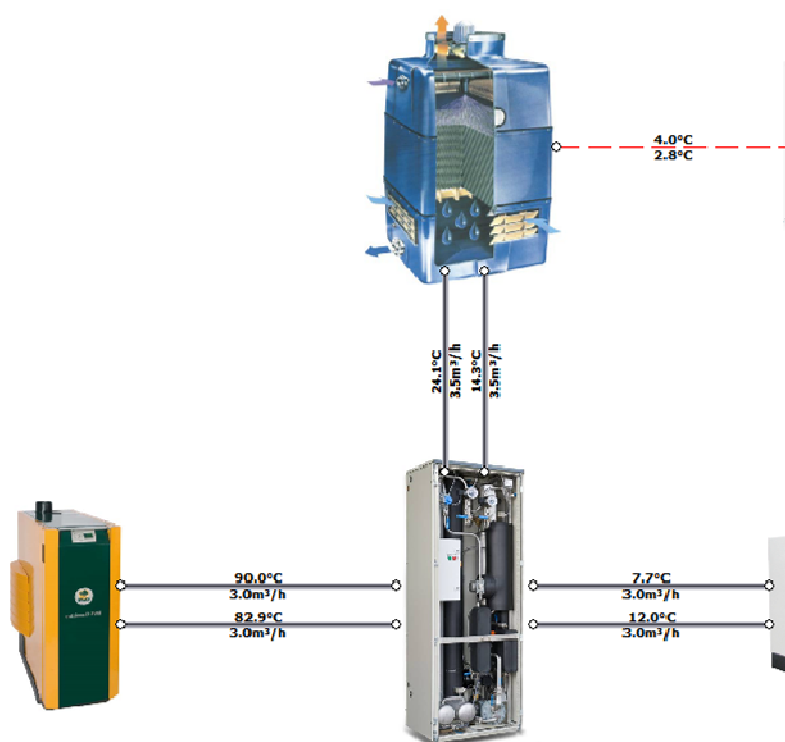


Abbildung 19: *Detailergebnisse für einen einzelnen Stundenwert als Graphik*

Tabelle 7: Detailergebnisse für einen einzelnen Stundenwert als Tabelle

Rückkühlung	
MT-Leistung	-39.7
MT-Temp-Ein	24.1
MT-Temp-Aus	14.3
MT-Temp-Vol	3.50
Kältemaschine	
LT-Leistung	-14.9
LT-Temp-Ein	12.0
LT-Temp-Aus	7.7
LT-Temp-Vol	3.00
MT-Leistung	39.7
MT-Temp-Ein	14.3
MT-Temp-Aus	24.1
MT-Temp-Vol	3.50
HT-Leistung	-24.8
HT-Temp-Ein	90.0
HT-Temp-Aus	82.9
HT-Temp-Vol	3.00
Heizung	
HT-Leistung	24.8
HT-Temp-Ein	82.9
HT-Temp-Aus	90.0
HT-Temp-Vol	3.00
Kälte	
LT-Leistung	14.9

Jahressimulation

Durch die Berechnung von allen 8760 Stundenwerten eines Jahres konnte der Lastgang der theoretisch möglichen Kälteleistung und in weiterer Folge die Jahreskältearbeit der Kälteanlage ermittelt werden. Definitionsgemäß wurden diese möglichen Werte den tatsächlich am Standort geforderten Leistungen gegenübergestellt, wobei die maximale Kälteleistung so angepasst wurde, dass die Kältemaschine die gesamte Kältelast des Abnehmers abdecken kann.

Es wurde ein fiktiver Verbraucher festgelegt, der genau den Möglichkeiten der Kälteanlage entspricht. Durch diese Vorgangsweise wurde vermieden, dass die Aussagekraft der Simulationsergebnisse hinsichtlich der Rückkühlung von ungünstigen Auslegungsverhältnissen von Gebäudekühllast zu Kälteleistung der Kälteanlage beeinflusst wird.

Die Simulationsergebnisse waren wieder in tabellarischer als auch grafischer Form verfügbar. Als Summenwert konnte jeweils noch dem Jahresbedarf an Kälte angegeben werden.

In Abbildung 20 sind die Ergebnisse der Jahressimulation aus dem Simulationsprogramm dargestellt.

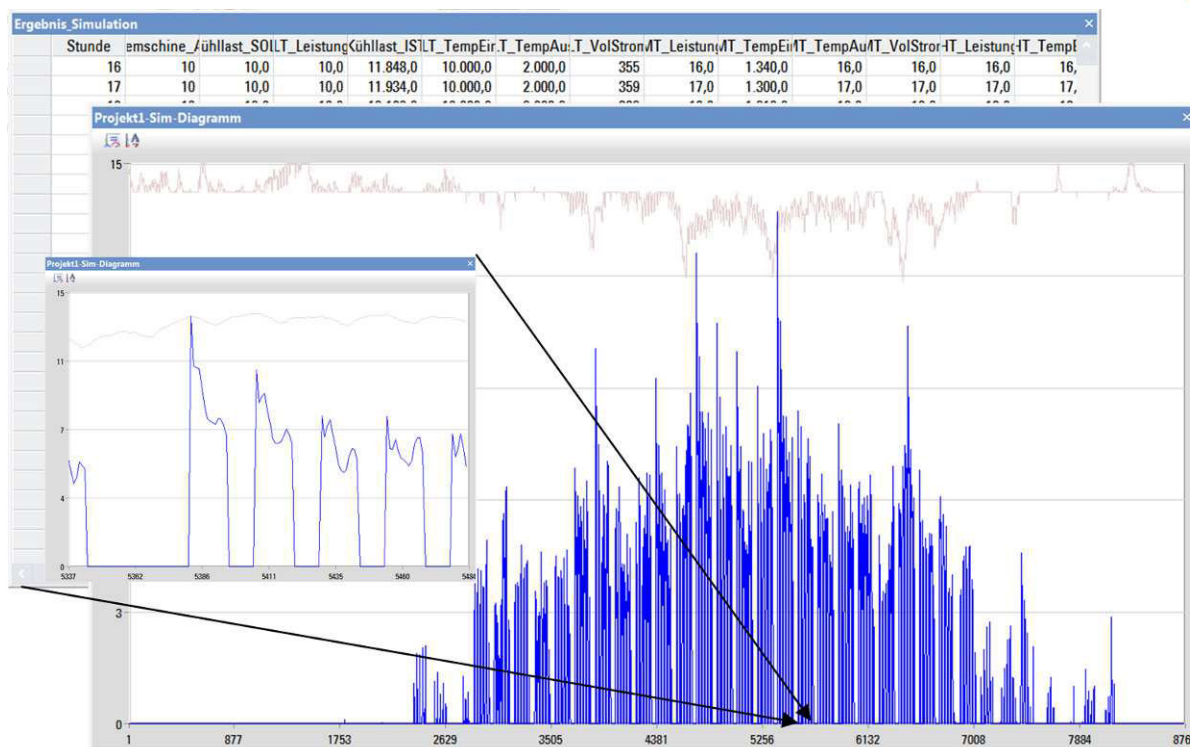


Abbildung 20: Ergebnisse der Jahressimulation

Leistungsabdeckung

Neben dem Fall, bei dem die theoretisch mögliche Kälteleistung der Kälteanlage für jeden Stundenwert größer oder gleich der angepassten Kälteleistung des Gebäudes ist, wurden noch weitere Varianten mit einer tolerierten Unterversorgung untersucht. Es wurde also bewusst in Kauf genommen, dass in manchen Stunden des Jahres die Gebäudelast über der zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Kälteleistung der Kälteanlagen liegt. Dafür wurde die Gebäudelast in 20 % Schritten gesteigert. In **Abbildung 21** wurde beispielhaft die 100 % Maximalleistungsabdeckung der 40 % Maximalleistungsabdeckung gegenübergestellt.

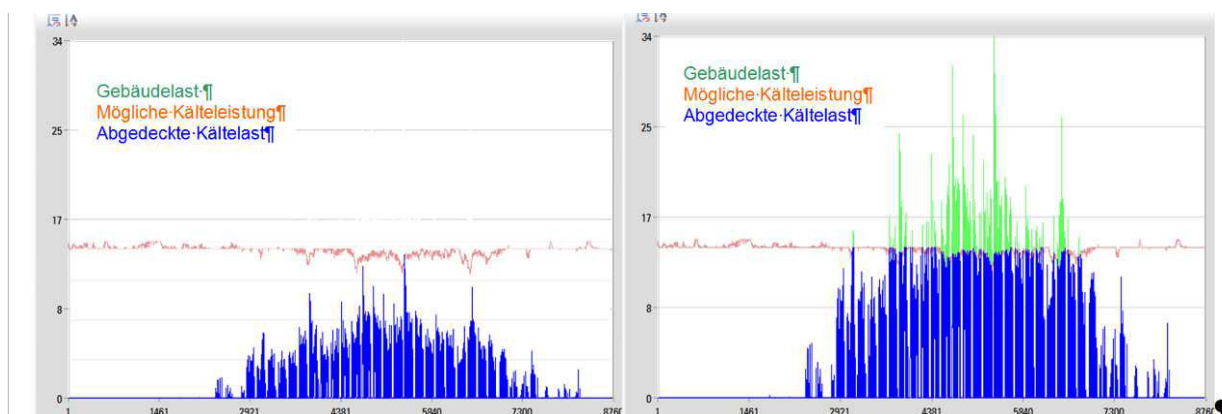


Abbildung 21: Unterschiedliche Leistungsabdeckung

In dieser Gegenüberstellung ist ersichtlich, dass trotz der großen Unterdimensionierung von 60 % der Großteil des jährlichen Kältebedarfs des Gebäudes, nämlich 99 % der Gebäudekühllast abgedeckt werden kann.

Variantenrechnung

Durch die automatisierte Berechnung aller verschiedenen Kombinationen von Kühltürmen mit Kältemaschinen unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussfaktoren wurden insgesamt mehr als 10.000 Varianten von thermisch angetriebenen Kältemaschinen für unterschiedliche Leistungsabdeckungen berechnet. Die Ergebnisse wurden jeweils als eigener Datensatz in eine Datenbank eingetragen, wobei immer die theoretisch mögliche Leistung der Kälteanlage (Leistung AKM), die maximale Kälteleistung des Gebäudes (Leistung Verbraucher), der Anteil der abgedeckten Jahresarbeit (Anteil Arbeit), der von der thermisch angetriebenen Kälteanlage abgedeckten Kältebedarf (Arbeit AKM) sowie der gesamte Kältebedarf des Gebäudes (Arbeit Verbraucher) notiert wurden (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Exemplarischer Datensatz der Simulationsergebnisse

Microsoft Access - [Ergebnis_Varianten : Tabelle]														
	ID	Kühlturm	AKM	Wärmequelle	Kältesystem	Standort	Verbraucher	Leistung_Anteil	Leistung_AKM	Leistung_Verbraucher	Arbeit_Anteil	Arbeit_AKM	Arbeit_Verbraucher	W
	12246	Axima EWK 144	Invensor ISC 10	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	20	7951	39755	51	11126	21973		
	12247	Sortech 08	Sortech STC 08	Kessel 85 °C	FanCoils +6 °C Kopenhagen	Seminar	40	4338	10846	93	1591	0		
	12247	Axima EWK 144	Invensor ISC 10	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	40	7951	19878	81	8866	10986		
	12248	Sortech 08	Sortech STC 08	Kessel 85 °C	FanCoils +6 °C Kopenhagen	Seminar	60	4338	7230	98	1117	0		
	12248	Axima EWK 144	Invensor ISC 10	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	60	7951	13252	95	6942	7324		
	12249	Sortech 08	Sortech STC 08	Kessel 85 °C	FanCoils +6 °C Kopenhagen	Seminar	80	4338	5423	100	848	0		
	12249	Axima EWK 144	Invensor ISC 10	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	80	7951	9939	99	5466	5493		
	12250	Sortech 08	Sortech STC 08	Kessel 85 °C	FanCoils +6 °C Kopenhagen	Seminar	100	4338	4338	100	681	0		
	12250	Axima EWK 144	Invensor ISC 10	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	100	7951	7951	100	4395	4395		
	12251	Axima EWK 036	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	20	13891	69457	46	17702	38390		
	12252	Axima EWK 036	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	40	13891	34729	77	14802	19195		
	12253	Axima EWK 036	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	60	13891	23152	93	11913	12797		
	12254	Axima EWK 036	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	80	13891	17364	99	9516	9597		
	12255	Axima EWK 036	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	100	13891	13891	100	7678	7678		
	12256	Sortech 15	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	20	4888	24438	77	10431	13507		
	12257	Sortech 15	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	40	4888	12219	94	6370	6753		
	12258	Sortech 15	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	60	4888	8146	99	4451	4502		
	12259	Sortech 15	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	80	4888	6109	100	3372	3377		
	12260	Sortech 15	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	100	4888	4888	100	2701	2701		
	12261	Güntner SBK 52	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	20	5253	26263	76	11100	14516		
	12262	Güntner SBK 52	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	40	5253	13131	94	6827	7258		
	12263	Güntner SBK 52	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	60	5253	8754	99	4781	4839		
	12264	Güntner SBK 52	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	80	5253	6566	100	3624	3629		
	12265	Güntner SBK 52	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	100	5253	5253	100	2903	2903		
	12266	Axima EWK 064	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	20	14870	74350	44	17984	41094		
	12267	Axima EWK 064	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	40	14870	37175	74	15305	20547		
	12268	Axima EWK 064	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	60	14870	24783	92	12551	13698		
	12269	Axima EWK 064	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	80	14870	18587	99	10151	10273		
	12270	Axima EWK 064	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	100	14870	14870	100	8219	8219		
	12271	Axima EWK 144	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	20	14870	74350	44	17984	41094		
	12272	Axima EWK 144	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	40	14870	37175	74	15305	20547		
	12273	Axima EWK 144	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	60	14870	24783	92	12551	13698		
	12274	Axima EWK 144	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	80	14870	18587	99	10151	10273		
	12275	Axima EWK 144	PinkChiller PSC1	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	100	14870	14870	100	8219	8219		
	12276	Sortech 08	Invensor ISC 10	Kessel 85 °C	FanCoils +6 °C Kopenhagen	Seminar	20	5573	27867	69	3021	0		
	12276	Axima EWK 036	Sortech STC 15	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	20	7854	39269	52	11295	21704		
	12277	Sortech 08	Invensor ISC 10	Kessel 85 °C	FanCoils +6 °C Kopenhagen	Seminar	40	5573	13933	92	2018	0		
	12277	Axima EWK 036	Sortech STC 15	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	40	7854	19635	82	8869	10852		
	12278	Sortech 08	Invensor ISC 10	Kessel 85 °C	FanCoils +6 °C Kopenhagen	Seminar	60	5573	9289	98	1431	0		
	12278	Axima EWK 036	Sortech STC 15	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	60	7854	13090	95	6876	7235		
	12279	Sortech 08	Invensor ISC 10	Kessel 85 °C	FanCoils +6 °C Kopenhagen	Seminar	80	5573	6967	100	1089	0		
	12279	Axima EWK 036	Sortech STC 15	BHKW 80 °C	Kühldecke +15 °C Madrid	Seminar	80	7854	9817	100	5399	5426		

Dieser Kataster in Form einer Datenbank mit den Ergebnissen der Variantenrechnung stellte eine wesentliche Berechnungsgrundlage für die weiteren Untersuchungen in den nachfolgenden Arbeitspaketen des Projekts dar.

3.3 AP 3 – Untersuchung von Maßnahmen zur Vermeidung von Hygieneproblemen

3.3.1 Laboruntersuchungen

Nachfolgend dargestellte Untersuchungsreihen wurden im Batch Ansatz mit einem Gesamtvolumen von 25 Liter Frischwasser durchgeführt. Beimpft wurden die Ansätze mit einer Bakteriensuspension von Pseudomonas sp. aus einer 24 Stunden Voranreicherung in Standard-I-Nährbouillon.

UV Desinfektion

Unmittelbar nach Beimpfung wurde der Tauchstrahler in die Becken eingebracht und kontinuierlich bis zum Versuchsende betrieben. In regelmäßigen Zeitintervallen wurden Proben aus den Becken entnommen und hinsichtlich der Keimkonzentration untersucht. In den Versuchen konnte die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Systems beobachtet werden. Ausgehend von einer durchschnittlichen Konzentration von $1,7 \times 10^6$ KBE / ml konnten in Versuchsvarianten Keimreduktionsraten von bis zu 100 % bei einer Bestrahlungsdauer von mindestens 180 Minuten festgestellt werden. Die Leistungsfähigkeit des Systems wurde jedoch bei längerer Betriebsdauer durch eine Film- und Schlierenbildung auf den Röhren signifikant reduziert. Während dieser Betriebsphasen war eine desinfizierende Wirkung nicht feststellbar (siehe dazu Tabelle 9 und Abbildung 22).

Tabelle 9: Ergebnisse der UV Desinfektionsmaßnahme im Batch-Versuch

	Mittelwerte der Versuchsreihen	
Inkubationszeit	Keimkonzentration	Wirkungsgrad
(Minuten)	(KBE / ml)	(%)
0	1,66E+06	---
15	2,20E+05	86,7415
30	1,30E+04	99,2144
45	6,96E+03	99,5805
60	1,62E+02	99,9902
90	3,50E+02	99,9789
120	2,31E+02	99,9861
150	2,33E+02	99,9860
180	0,00E+00	100,0

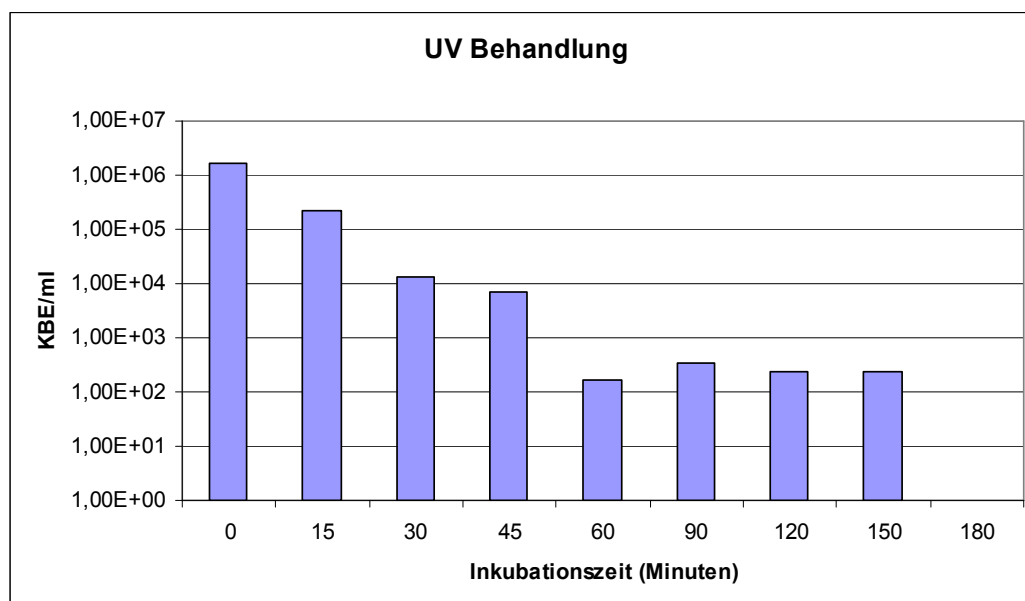


Abbildung 22: Ergebnisse der UV Desinfektionsmaßnahme im Batch-Versuch

Kupfer-Silber-Ionisation

Die Untersuchungen ergaben Keimreduktionsraten von bis zu 4 log-Stufen innerhalb von 6 Stunden Inkubationszeit, nach 24 Stunden sind keine Keime in den Proben nachweisbar. Auch nach Außerbetriebnahme der Elektrode kam es zu keiner Wiederverkeimung im Medium (siehe dazu [Tabelle 10](#) und [Abbildung 23](#)).

Tabelle 10: Ergebnisse der Metall - Desinfektionsmaßnahme im Batch-Versuch

Mittelwerte der Versuchsreihen		
Inkubationszeit (Minuten)	Keimkonzentration (KBE / ml)	Wirkungsgrad (%)
0	3,88E+06	---
30	1,76E+06	99,5448
60	3,77E+05	99,9027
90	1,92E+04	99,9950
120	3,61E+03	99,9991
150	3,94E+03	99,9990
180	2,44E+03	99,9994
240	2,45E+03	99,9994
300	1,01E+03	99,9997
360	7,83E+02	99,9998

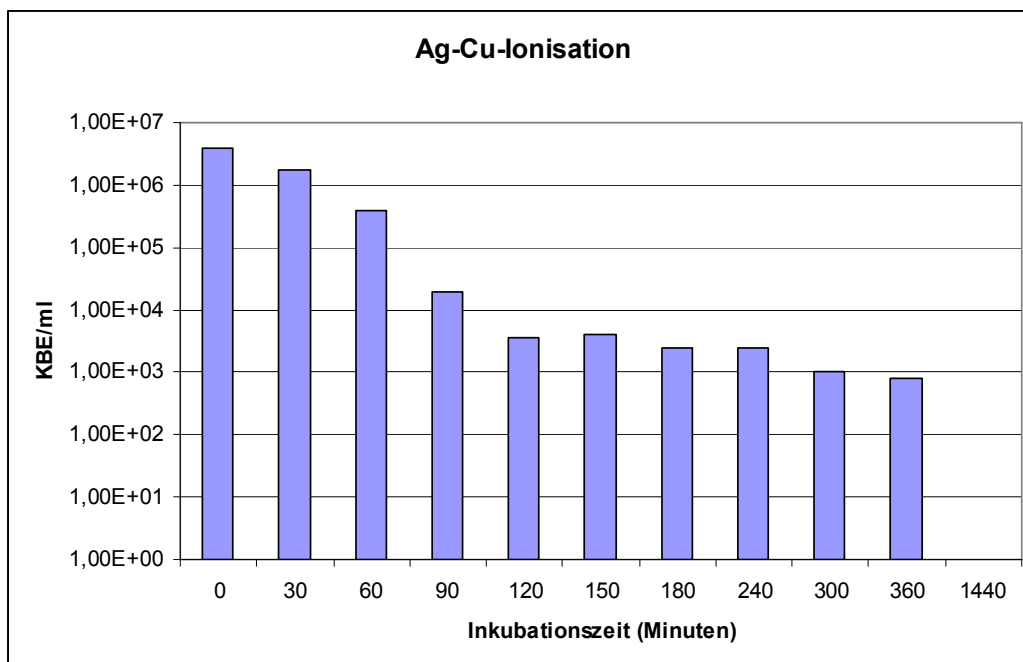


Abbildung 23: Ergebnisse der Metall - Desinfektionsmaßnahme im Batch-Versuch

Thermische Desinfektion

Die thermische Behandlung von Wasserkreisläufen ist eine etablierte Methode der Wasserdeseinfektion. So werden präventive Maßnahmen in Krankenhäusern etwa durch die Anwendung der ÖNORM B5019 durchgeführt. In der Regel wird ein Aufheizen der Wasserkreisläufe auf $\geq 70^\circ\text{C}$ bei einer Dauer von mindestens 3 Minuten angeführt. Auch die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zeigen den Einfluss der Temperatur auf die Keimkonzentration in Abhängigkeit der Wirkdauer. Unter den Versuchsbedingungen kommt es bei Temperaturen $\geq 70^\circ\text{C}$ und einer Inkubationszeit von 15 Minuten zu einer vollständigen Desinfektion des Mediums (siehe [Tabelle 11](#) und [Abbildung 24](#)).

Tabelle 11: Ergebnisse der thermischen Desinfektion im Batch-Versuch

Temperatur (°C)	Inkubationszeit (Minuten)	Ausgangskonzentration (KBE / ml)	Endkonzentration (KBE / ml)	Wirkungsgrad (%)
50°C	30	1,10E+04	8,03E+02	92,7
55°C	30	1,07E+04	0,00E+00	100,0
60°C	30	1,07E+04	0,00E+00	100,0
65°C	30	9,66E+06	0,00E+00	100,0
70°C	30	2,67E+03	0,00E+00	100,0
75°C	30	3,90E+04	0,00E+00	100,0
50°C	15	9,73E+05	3,96E+05	59,3
55°C	15	6,58E+07	1,58E+06	97,6
60°C	15	1,14E+09	4,40E+06	99,6
65°C	15	8,07E+08	0,00E+00	100,0
70°C	15	1,57E+04	0,00E+00	100,0
75°C	15	8,07E+08	0,00E+00	100,0

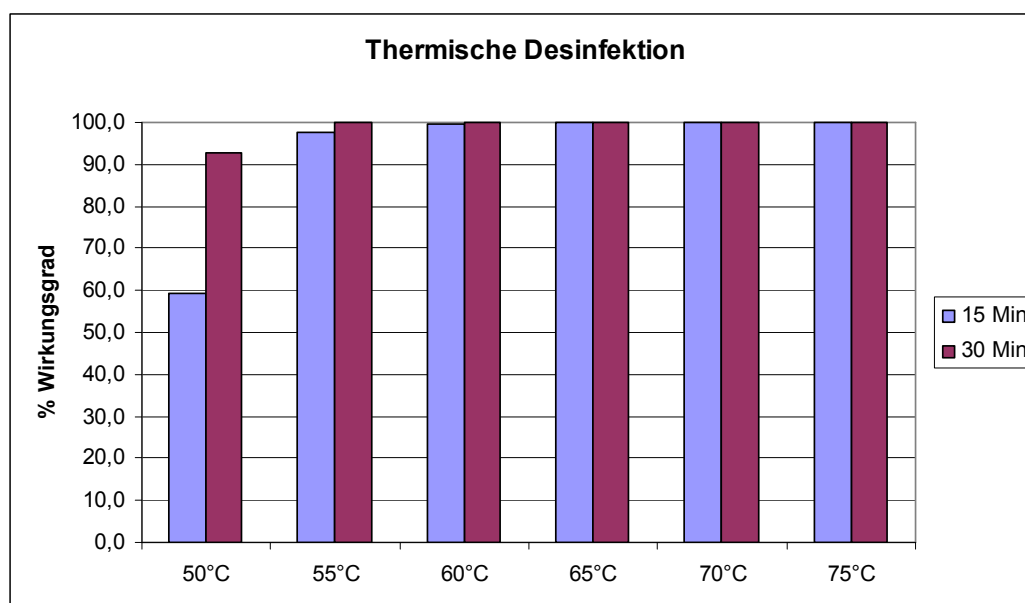


Abbildung 24: Ergebnisse der thermischen Desinfektion im Batch-Versuch

3.3.2 Untersuchungen im Praxisbetrieb – Technikumsanlage

Durch den Teststand war es möglich für die erforderlichen Untersuchungen die Kühlwasserbedingungen und die Kühlturm-Luftbedingungen in einem weiten Bereich zu variieren. Mit der Datenerfassungsanlage wurden die Messwerte visualisiert und in Excel kompatiblen Files abgespeichert.

Wie in Abbildung 25 ersichtlich wurde der Kühlturm mit den Luftkanälen im Freien aufgestellt. Die Komponenten des Kühlwasserkreises und des Heizkreises befinden sich in einem nebenliegenden, frostsicheren Raum und sind in Abbildung 26 zu sehen.



Abbildung 25: *Teststandkomponenten im Freien*



Abbildung 26: *Teststandkomponenten im frostsicheren Gebäude*

Die Abbildung 27 zeigt das Schema des Teststandes.

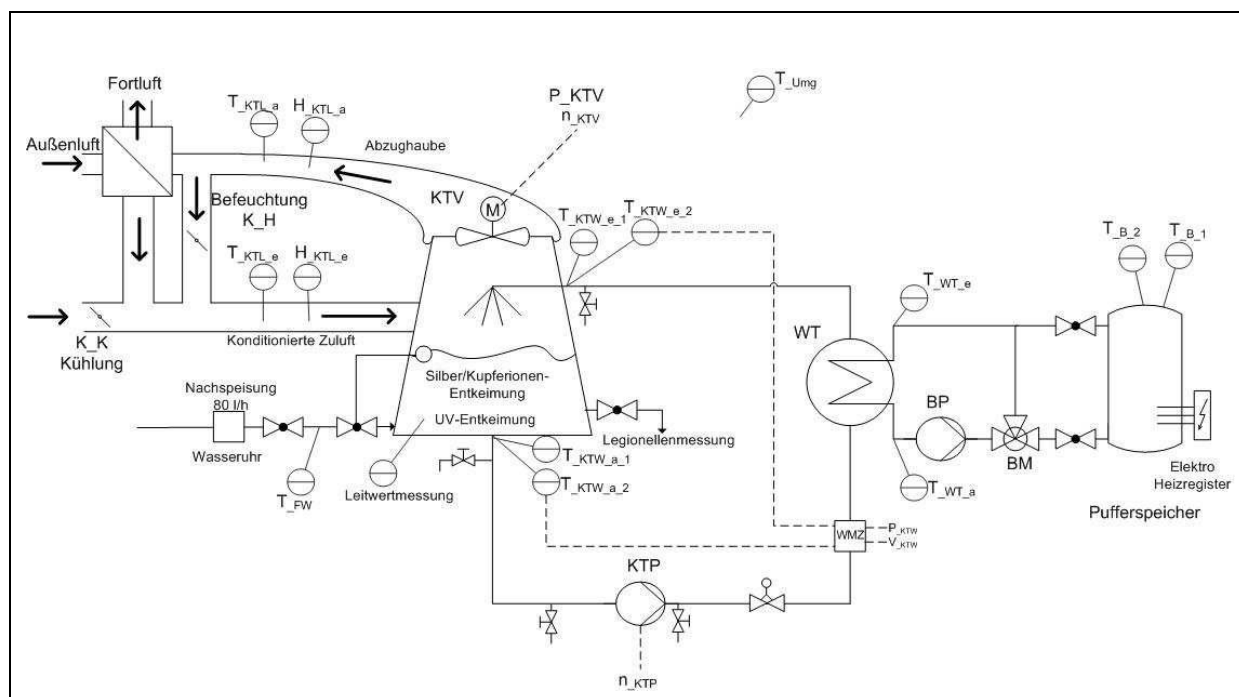


Abbildung 27: Schema des Teststandes

Der Kühlturm (Fa. Annen; Bakt 0606-06-19; 48 kW) wurde dicht an die Luftkanäle angeschlossen. Die Luftzirkulation durch das System erfolgte durch den drehzahlregelbaren Axial-Ventilator (KTV) oben am Kühlturm. Die einströmende Außenluft wird im Plattenwärmetauscher durch die warme, feuchte Fortluft vorgewärmt. Die Konditionierung der Zuluft in den Kühlturm erfolgt einerseits durch Beimischen von kühler Außenluft über die Regelklappe K_K und andererseits durch Beimischen feuchter Abluft über die Regelklappe K_H.

Das Kühlwasser des Kühlturms wird über einen Plattenwärmetauscher (WT) von einem geschlossenen Wasser-Heizkreis erwärmt. In diesem Heizkreis befindet sich ein 500 Liter Pufferspeicher mit Elektro-Heizregister (67 kW). Die Wärmeabgabe an den Kühlkreis wird mit dem Mischventil BM geregelt.

Die Kühlwassermenge durch den Kühlturm kann mit der drehzahlregelbaren Kühlturmpumpe (KTP) variiert werden. Das benötigte Frischwasser wird über ein Schwimmerventil, das den Wasserstand in der Kühlturmwanne konstant hält, eingespeist. Die unterschiedlichen Entkeimungsvorrichtungen wurden bei Bedarf in die Kühlturmwanne eingebaut. Wasserproben für die Wasseranalyse wurden aus der Kühlturmwanne entnommen.

Praxisnahe Untersuchungen am Teststand

zugeführte Luftstrom. Einflussfaktoren des Bakterienwachstums sind einerseits die Umgebungstemperatur und andererseits der kontinuierliche Anstieg der Nährstoffkonzentration im Wasser (siehe Abbildung 29).

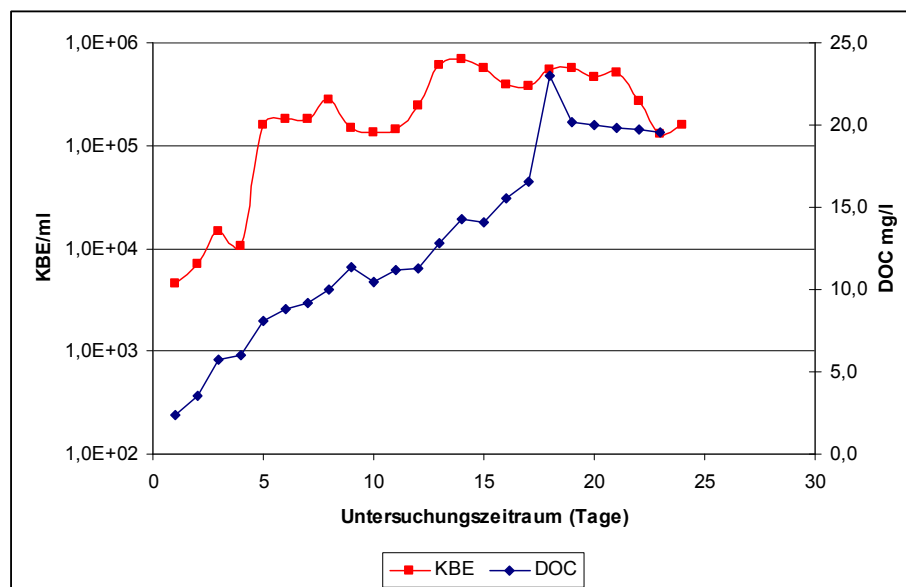


Abbildung 29: *Natürliche bakterielle Besiedelung der Technikumsanlage nach Inbetriebnahme im Vergleich zur Entwicklung des gelösten organischen Kohlenstoffs im Wasserkreislauf*

UV Desinfektion

Ausgehend von einer durchschnittlichen Keimbelastung von $1,8 \times 10^6$ KBE / ml kam es im Mittel zu einer Keimreduktion von rund 3 log-Stufen innerhalb der ersten Stunden nach Inbetriebnahme des Tauchstrahlers im Wasserkreislauf. Bei weiterer Bestrahlung waren keine darüber hinaus gehenden Hemmwirkungen feststellbar. Weiters konnte nach Abschalten des Tauchstrahlers nach 72 Stunden keine wesentliche Wiederverkeimung beobachtet werden (siehe Tabelle 12 und Abbildung 30).

Tabelle 12: Ergebnisse der UV Desinfektion in der Technikumsanlage

Stunden	KBE / ml		
	Versuch I	Versuch II	Mittelwert
0	3,5E+06	1,4E+05	1,8E+06
0,5	1,1E+04	8,3E+03	9,9E+03
1	7,7E+03	4,1E+03	5,9E+03
1,5	5,2E+03	6,6E+03	5,9E+03
2	1,9E+04	1,8E+03	1,0E+04
3	7,1E+03	3,3E+03	5,2E+03
8	3,1E+04	4,5E+03	1,8E+04
24	2,6E+03	1,1E+03	1,8E+03
48	1,2E+05	9,9E+02	6,3E+04
72	2,6E+04	5,0E+03	1,6E+04
<i>Abschaltung des Tauchstrahlers</i>			
96	7,4E+04	1,6E+03	3,8E+04
144	4,8E+04	2,2E+04	3,5E+04
168	2,3E+03	1,7E+04	9,9E+03

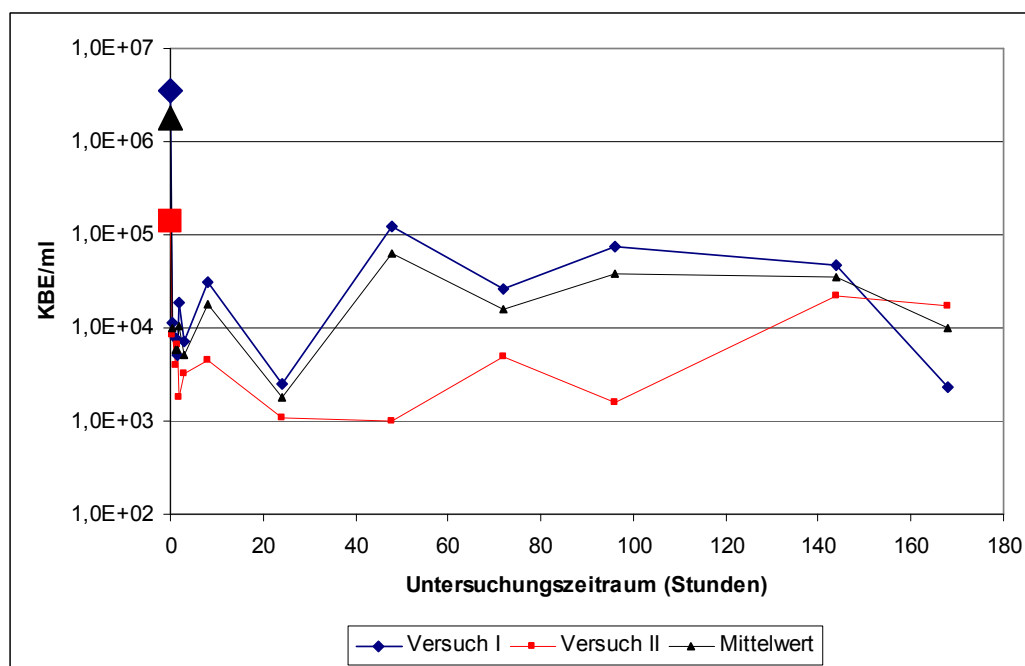


Abbildung 30: Ergebnisse der UV Desinfektion in der Technikumsanlage

Die Ergebnisse hinsichtlich luftgetragener Keimbelastungen ergaben bei einer durchschnittlichen Luftbelastung von $3,8 \times 10^3$ KBE / m³ in der Umgebungsluft der Anlage keine zusätzlichen Belastungen aus der Abluft des Kühlturms (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Entwicklung der Konzentration an luftgetragenen Keimen in der Abluft des Kühlturms im Vergleich zur Grundbelastung der Umgebung

Untersuchungszeitraum (Stunden)	KBE/m ³ Kühlturm	KBE/m ³ Kühlturm	Mittelwert
	Versuch I	Versuch II	KBE/m ³ Kühlturm
0	1,6E+03	3,0E+03	2,3E+03
1	2,3E+03	4,7E+03	3,5E+03
2	2,5E+03	2,4E+03	2,5E+03
3	1,7E+03	3,9E+03	2,8E+03
8	2,1E+03	1,1E+03	1,6E+03
24	1,4E+03	2,4E+03	1,9E+03
144	2,8E+03	5,3E+03	4,1E+03

Untersuchungszeitraum (Stunden)	KBE/m ³ Referenzumgebung	KBE/m ³ Referenzumgebung	Mittelwert
	Versuch I	Versuch II	KBE/m ³ Referenzumgebung
0	5,4E+03	3,8E+03	4,6E+03
1	2,2E+03	7,5E+03	4,9E+03
2	3,0E+03	4,9E+03	4,0E+03
3	1,6E+03	8,0E+03	4,8E+03
8	2,0E+03	1,0E+03	1,5E+03
24	1,1E+03	4,9E+03	3,0E+03
144	2,6E+03	5,4E+03	4,0E+03

Kupfer-Silber-Ionisation

Ausgehend von einer durchschnittlichen Keimbelastung von $3,2 \times 10^7$ KBE / ml kam es im Mittel zu einer kontinuierlichen Keimreduktion von rund 3 log-Stufen innerhalb eines Untersuchungszeitraumes von 221 Stunden (siehe [Abbildung 31](#)). Tendenziell setzt sich der Trend reduzierter Keimbelastungen auch nach Außerbetriebnahme der Elektrode fort. Dies erklärt sich durch eine nachhaltige Wirkung der gelösten Cu und Ag Ionen im System. Die maximale Wirksamkeit des Systems wird bedingt durch den möglichen Sättigungsgrad an Metall-Ionen in Abhängigkeit der Wasserqualität des zugeführten Frischwassers. Die weitere Produktion von Metall-Ionen führt zu keiner Steigerung der Konzentration der aktiven Metall-Ionen, sondern es werden die durch Elektrolyse in Lösung gehenden Metall-Ionen von den verschiedenen Anionen gebunden. Eine Steigerung der Konzentration ist dann nicht mehr möglich.

In den durchgeführten Praxisuntersuchungen wurden nach einer kontinuierlichen Betriebsdauer von 7 Tagen Werte von $1,15 \mu\text{g} / \text{l}$ an Silber-Ionen bzw. $173 \mu\text{g} / \text{l}$ an Kupfer-Ionen gemessen. Da insbesondere die Konzentration der Silber-Ionen deutlich unter dem theoretischen Sättigungswert lag, ist davon auszugehen, dass die toxische Wirkung überwiegend dem Kupfer zuzuschreiben ist. Darüber hinaus weisen vorliegende Untersuchungsergebnisse darauf hin, dass durch die stetige Veränderungen in der Ionenbilanz des Kühlwassers durch Akkumulierungsprozesse

im Betrieb, auch Anpassungen an den Elektrodenbetrieb und seiner Dosierleistung zu erfolgen hat.

Vergleicht man die Konzentrationen an luftgetragenen Keimen während der gesamten Untersuchungszyklen, so ergibt sich aus der durchschnittlichen Grundbelastung des Referenzsystems mit $2,0 \times 10^4$ KBE / m³ im Vergleich zu $1,4 \times 10^4$ KBE / m³ in der Abluft aus dem Kühlturm kein Hinweis auf eine signifikante Anreicherung von Bakterien aus dem System (siehe Abbildung 32).

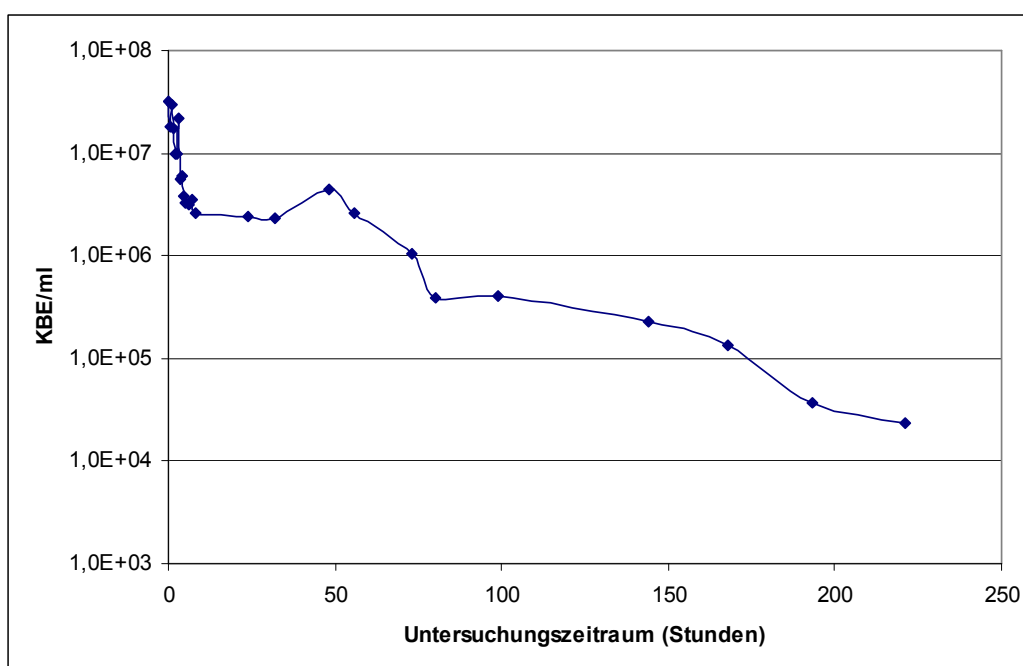


Abbildung 31: *Durchschnittliche Verlaufskurven der Keimkonzentration bei Behandlung des Wasserkreislaufs mit einer Kupfer-Silber Elektrode in der Technikumsanlage*

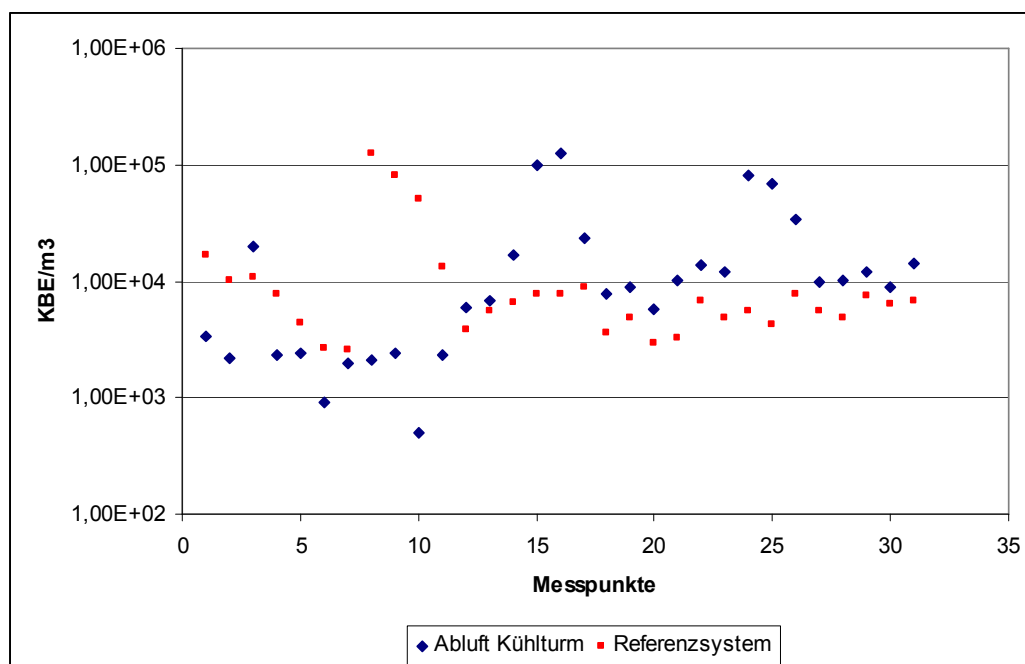


Abbildung 32: Keimbelastungen aus der Abluft des Kühlturms im Vergleich zur Keimbelastung der Umgebungsluft während der Behandlung des Kühlwassers mittels einer Kupfer-Silber Elektrode in der Technikumsanlage

Thermische Desinfektion

Untersuchungsserien zur intermittierenden thermischen Desinfektion wurden in den Varianten a) Temperaturerhöhung auf 60 °C für 30 Minuten, b) Temperaturerhöhung auf 60 °C für 120 Minuten und c) Temperaturerhöhung auf 60 °C für 240 Minuten durchgeführt. In den Varianten a und b wurde dieser Vorgang nach Abkühlung auf normale Betriebstemperatur jeweils 2-fach wiederholt und die anschließende Entwicklung beobachtet.

Zusammengefasst ist in allen Versuchsvarianten eine rasche Wiederverkeimung im Wasserkreislauf feststellbar und somit eine ausreichende Desinfektionswirkung nicht erkennbar.

Im Einzelnen war in der Variante a) Temperaturerhöhung auf 60 °C für 30 Minuten, nach der ersten Heizphase eine Abnahme der Keimbelastung um rund 3 log-Stufen feststellbar (siehe [Abbildung 33](#)). Anschließende Temperaturerhöhungen bewirkten wesentlich geringere Reduktionsraten. Im Normalbetrieb lagen die gemessenen Keimkonzentrationen auf dem Niveau der Ausgangssituation.

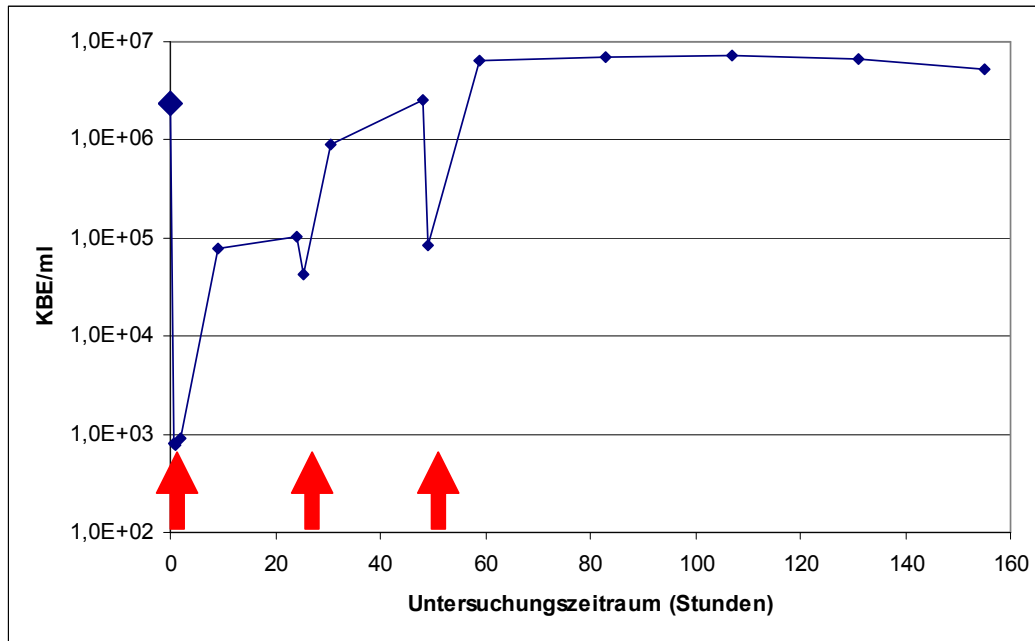


Abbildung 33: Durchschnittliche Verlaufskurven der Keimkonzentration bei intermittierender thermischer Behandlung (Zyklus 60°C-30 Minuten) des Wasserkreislaufs

Ähnlich verhielt sich die Situation in der Variante b) Temperaturerhöhung auf 60 °C für 120 Minuten. Nach der 1. Heizphase war eine Abnahme der Keimbelastung um ebenfalls rund 3 log-Stufen feststellbar (siehe [Abbildung 34](#)). Anschließende Temperaturerhöhungen bewirkten ebenfalls geringere Reduktionsraten. Im Normalbetrieb lagen die gemessenen Keimkonzentrationen wiederum auf dem Niveau der Ausgangssituation.

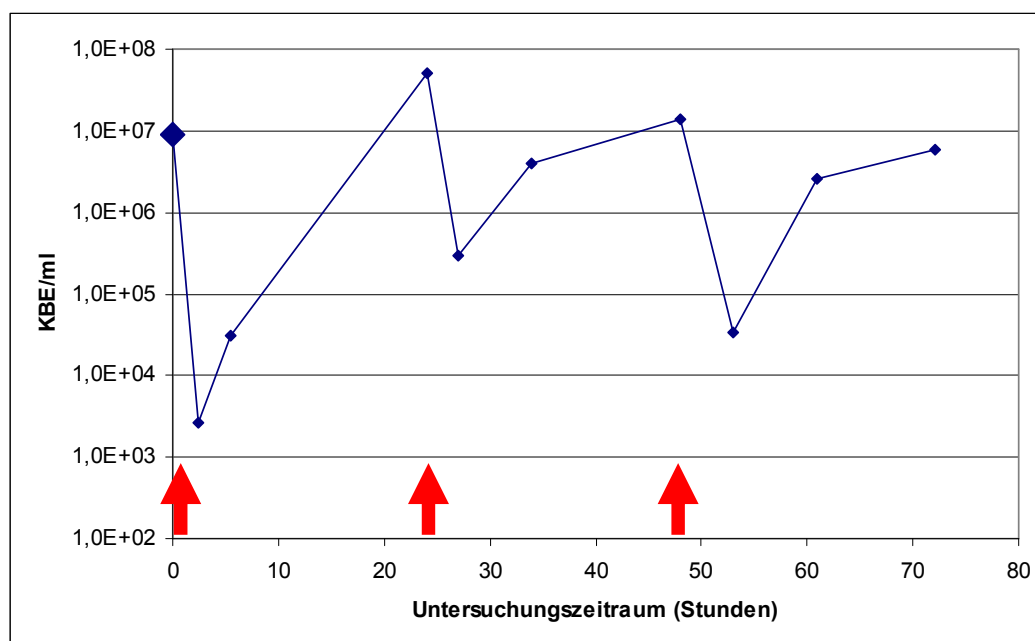


Abbildung 34: Durchschnittliche Verlaufskurven der Keimkonzentration bei intermittierender thermischer Behandlung (Zyklus 60 °C – 120 Minuten) des Wasserkreislaufs

In der Variante c) Temperaturerhöhung auf 60 °C für 240 Minuten wurde nur ein Behandlungszyklus analysiert, da sich bereits nach der 1. Heizphase ein ähnliches Bild wie in den Varianten a) und b) darstellte (siehe [Abbildung 35](#)).

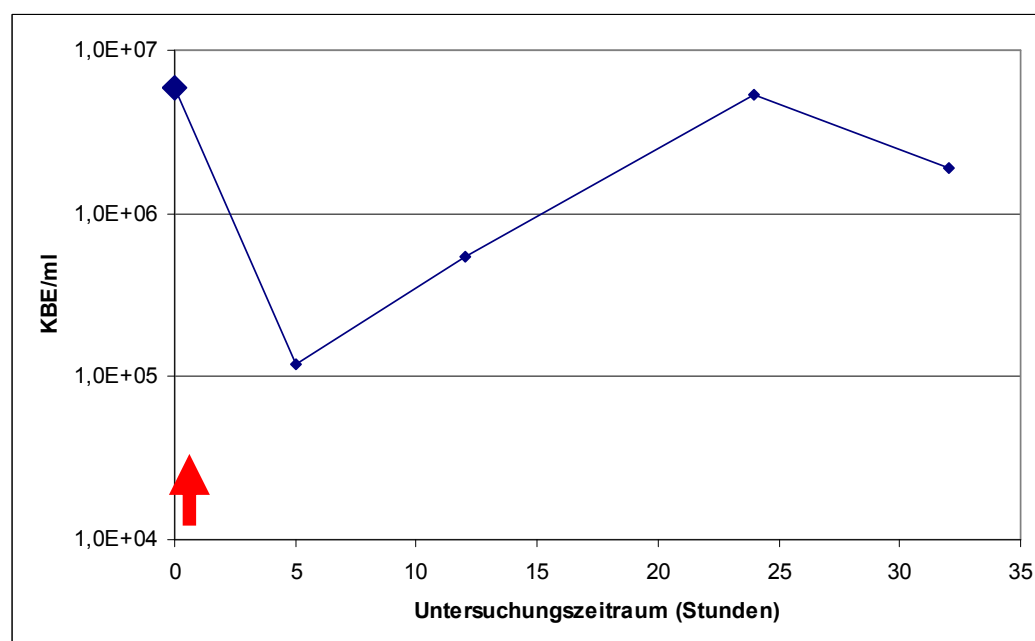


Abbildung 35: Durchschnittliche Verlaufskurven der Keimkonzentration bei intermittierender thermischer Behandlung (Zyklus 60 °C – 240 Minuten) des Wasserkreislaufs

Vergleicht man auch bei diesen Behandlungsvarianten die Konzentrationen an luftgetragenen Keimen aus der Abluft des Kühlturms im Vergleich zur Umgebungsluft, so ist auch in diesem Fall keine Mehrbelastung feststellbar (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: *Entwicklung der Konzentration an luftgetragenen Keimen in der Abluft des Kühlturms im Vergleich zur Grundbelastung der Umgebung bei unterschiedlichen thermischen Desinfektionsmaßnahmen*

	KBE / m ³ Kühlturm	KBE / m ³ Referenzumgebung
	Mittelwerte	
60°C/30 Minuten	3,2E+02	2,8E+02
60°C/120 Minuten	1,6E+02	2,0E+02
60°C/240 Minuten	6,5E+01	2,4E+02

Standortuntersuchungen

Zur Abschätzung möglicher gesundheitlicher Risiken im Betrieb von Nasskühltürmen wurden an 2 Standorten stichprobenartige Untersuchungen durchgeführt (siehe Tabelle 15).

Tabelle 15: *Bakteriologische Untersuchungsergebnisse aus dem Wasserkreislauf von 2 Nasskühltürmen in der Steiermark*

			Gesamtkeimzahl
Probenbezeichnung	Entnahmeort	Entnahmedatum	[KBE/ml]
Kühlturm I	Becken	25.09.2008	2,6 x 10 ³
Kühlturm I	Hahn	25.09.2008	9,8 x 10 ²
Kühlturm II			5,7 x 10 ⁴

			Gesamtcoliforme
Probenbezeichnung	Entnahmeort	Entnahmedatum	[KBE/100ml]
Kühlturm I	Becken	25.09.2008	0
Kühlturm I	Hahn	25.09.2008	0
Kühlturm Gleisdorf			5,8 x 10 ⁵

			E.coli
Probenbezeichnung	Entnahmeort	Entnahmedatum	[KBE/100ml]
Kühlturm I	Becken	25.09.2008	0
Kühlturm I	Hahn	25.09.2008	0
Kühlturm Gleisdorf			0

			Legionellen
Probenbezeichnung	Entnahmeort	Entnahmedatum	[KBE/100ml]
Kühlturm I	Becken	25.09.2008	0
Kühlturm I	Hahn	25.09.2008	0
Kühlturm Gleisdorf			0

Aufgrund der erhobenen Daten ist bei beiden Anlagen, hinsichtlich der erhobenen Parameter und dem Zeitpunkt der Probenahme, von keiner gesundheitlichen Gefährdung auszugehen.

3.3.3 Wasseruntersuchungen und hydrochemische Modellierung

Der für die Untersuchungen eingesetzte Kühlturm besitzt ein Prozesswasservolumen von 80 Liter. Die während des Kühlbetriebes auftretenden Verdunstungsverluste wurden kontinuierlich mit frischem Leitungswasser kompensiert. Die hydrochemische Zusammensetzung des Prozesswassers wurde in regelmäßigen Abständen untersucht. Eine zusammenfassende Darstellung aller Wasseranalysen findet sich in Tabelle 17.

Wasseranalysen

Die Zusammensetzung des Prozesswassers im Kühlturm zu Beginn des Versuchsbetriebes entspricht der des Grazer Leitungswassers. Infolge des relativ hohen Kalziumgehaltes des Wassers und der Angleichung des internen CO_2 Partialdruckes in der Lösung an den der Atmosphäre, ist bereits die initiale Lösung in Bezug auf die Mineralphase Kalzit deutlich übersättigt ($\text{SI} = 1,15$). Dies bedeutet, dass bereits zu Beginn des Versuchsbetriebes Kalkabscheidungen im Reaktor zumindest theoretisch möglich sind.

Im Zuge des Kühlturbetriebes, bei dem das verdunstende Wasser mit Leitungswasser kontinuierlich ergänzt wurde, ist eine stete Aufkonzentrierung fast aller im Prozesswasser gelösten anorganischen Verbindungen erkennbar. Im Gegensatz dazu steigen die Kalzium- und die Hydrogenkarbonatkonzentration nur bis zum dritten Versuchstag an und sinken dann aufgrund der einsetzenden Kalziumkarbonatfällung zunächst deutlich ab. Erklären lässt sich dieses Verhalten durch eine kinetische Hemmung der Karbonatfällung zu Beginn des Versuches. Im weiteren Verlauf bleiben die Gehalte dieser Ionen in der Lösung infolge der Fällungsprozesse nahezu konstant. Zur quantitativen Verfolgung des Verdunstungsprozesses selbst, wurde die Chloridkonzentration in der Lösung herangezogen, da sich Chlorid während des gesamten Prozessverlaufes konservativ verhält. Zwischen der Anfangs- (13,6 mg/L) und der Endkonzentration (391,2 mg/L) liegt ein Faktor von etwa 30 (28,75).

Modellierung der hydrochemischen Prozesse im Kühlturm

Vorbemerkung

Mit dem Softwarepaket PHREEQC-2 wurde zunächst ein Programmcode erstellt, mit dem die abgelaufenen Prozesse modellhaft nachvollzogen werden konnten.

Anschließend wurden die wesentlichen Modellparameter anhand der vorliegenden experimentellen Daten kalibriert und dann mit dem kalibrierten Modell Simulationsrechnungen für unterschiedliche Betriebsszenarien durchgespielt.

Simulationen auf der Grundlage der experimentellen Daten des Kühlturbetriebes

Als Startlösung für die Simulationsrechnungen diente die hydrochemische Zusammensetzung des Grazer Leitungswassers, welche im Zuge einer Wasseranalyse bestimmt wurde. Als maßgebliche Prozesse wurden im Modellcode einerseits die kontinuierliche Verdunstung von Prozesswasser und andererseits die Zumischung von Leitungswasser zum Ausgleich des Wasserverlustes implementiert. Bei der Modellierung des Kühlturms wurde von einem Startvolumen von 80 Litern ausgegangen. Die Simulation des Kühlturbetriebes erfolgte mit definierten Prozessinkrementen, bei denen jeweils 1/10 des im Kühlturm befindlichen Wassers (8 Liter) verdunstet und anschließend dieses Volumen mit Leitungswasser ersetzt wird.

Die im Prozessverlauf auftretenden Änderungen der Chloridkonzentration lassen sich mit dem Modell in ihrem generellen Verlauf gut nachvollziehen wie ein Vergleich der gemessenen und simulierten Konzentrationen zeigt Abbildung 36. Im Diagramm wurde die Chloridkonzentration gegen die zugeführte Wassermenge aufgetragen. Die blauen Punkte zeigen die gemessenen Werte aus den Analysen, die grüne Kurve zeigt die simulierten Werte aus dem Modell. Die leichten Abweichungen der gemessenen Werte von den simulierten Daten erklären sich aus geringfügigen Schwankungen der Chloridkonzentration des Grazer Leitungswassers, die im Modell nicht berücksichtigt sind.

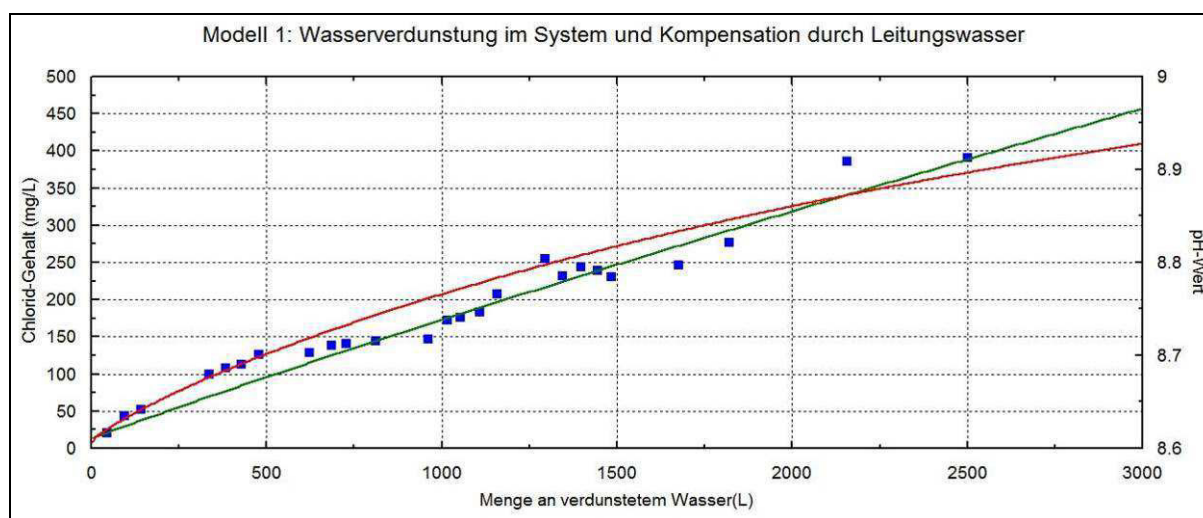


Abbildung 36: Verlauf der Chloridkonzentration und des pH-Wertes (Sekundärachse) in der Simulation (grüne und rote Kurve) und Darstellung der gemessenen Chloridwerte (blaue Quadrate)

Der Endwert der Chloridkonzentration von 391,2 mg / Liter, gemessen nach 52 Tagen, wurde in der Simulation nach der Verdunstung von 2500 Liter Prozesswasser erreicht. Da keine detaillierten Aufzeichnungen über die während des Kühlturbetriebes tatsächlich zugeführte Wassermenge vorliegen, ist ein direkter Vergleich mit experimentellen Daten nicht möglich.

Im Modell wurde der Endwert der Chloridkonzentration nach 310 Prozessinkrementen (Verdunstungs- und Auffüllungsschritte) erreicht. Abbildung 37 zeigt den simulierten Wert für die Kalkabscheidung in mg / L (rote Kurve) pro Verdunstungsschritt.

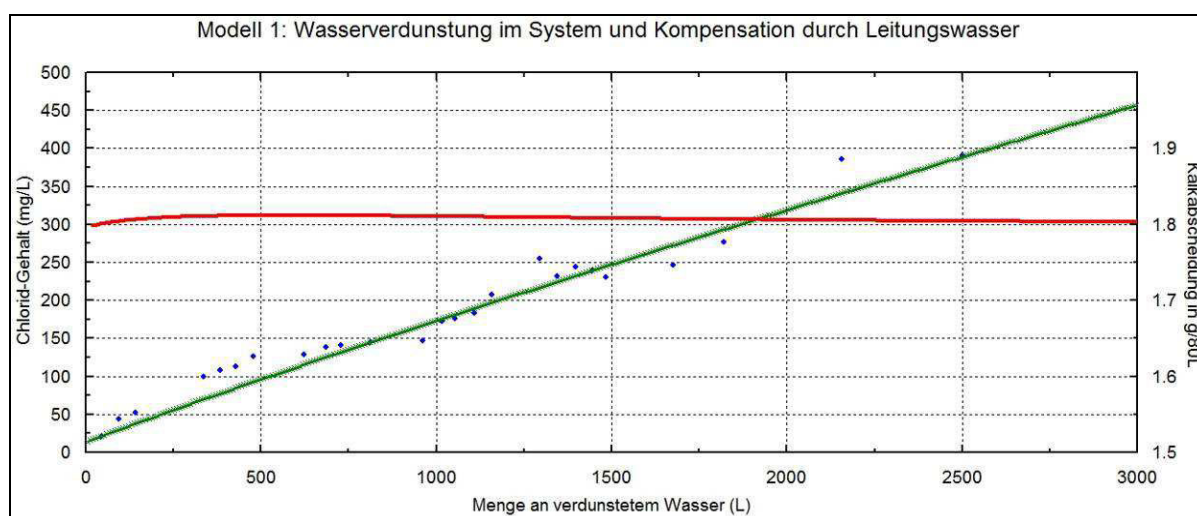


Abbildung 37: Verlauf der Kalkabscheidung (rote Kurve, Sekundärachse) pro Simulationsschritt und der Chloridkonzentration in der Simulation (grüne Kurve), sowie Darstellung der gemessenen Chloridkonzentrationen (blaue Quadrate).

Der Verlauf der Kalkabscheidung während des Kühlturbetriebes gestaltet sich weitgehend konstant. Der tendenziell leicht abnehmende Trend der Kalkabscheidung mit fortschreitendem Prozessverlauf erklärt sich im Wesentlichen aus der Abnahme der Ionenaktivität der Kalziumionen mit zunehmender Ionenstärke. Mit dem Erreichen des Endzustandes nach 310 Simulationsschritten und einer durchschnittlichen Ausfällung von ca. 1,8 g Kalziumkarbonat pro Simulationsschritt bedeutet dies eine akkumulierte Kalkabscheidung von 558 g CaCO_3 bezogen auf das Prozesswasservolumen des Kühlturms.

Dies stimmt sehr gut mit der Massenbilanz überein, nach der ca. 572 g Kalk gefällt werden müssen, wenn man den Berechnungen eine Wassermenge 2500 Litern Leitungswasser mit einer durchschnittlichen Konzentration von 90 mg/L Ca^{2+} und einer Endkonzentration von 35,3 mg / Liter Ca^{2+} im Prozesswasser zugrunde legt.

Simulation des Kühlturbetriebes – Erstbefüllung mit Umkehrosmosewasser (Szenario 1)

Abbildung 38 zeigt das Szenario 1, bei dem die Erstbefüllung des Kühlturmes mit Umkehrosmosewasser vorgenommen wird. In diesem Szenario wurde als Startlösung für die Simulation ein synthetisches Umkehrosmosewasser verwendet, dessen Ausgangsmineralisierung 90 % unter der des Leitungswassers lag. Vergleicht man Abbildung 38 mit Abbildung 37, so lässt sich erkennen, dass die Aufkonzentrierung nur leicht verzögert wird. Der gemessene und oben erwähnte Endwert für die Chloridkonzentration würde demnach um 2 Tage später erreicht werden. Die Kalkabscheidung liegt in der gleichen Größenordnung von 1,8 g pro Simulationsschritt, das entspricht einer Kalkabscheidung von ca. 10,7 g pro Tag.

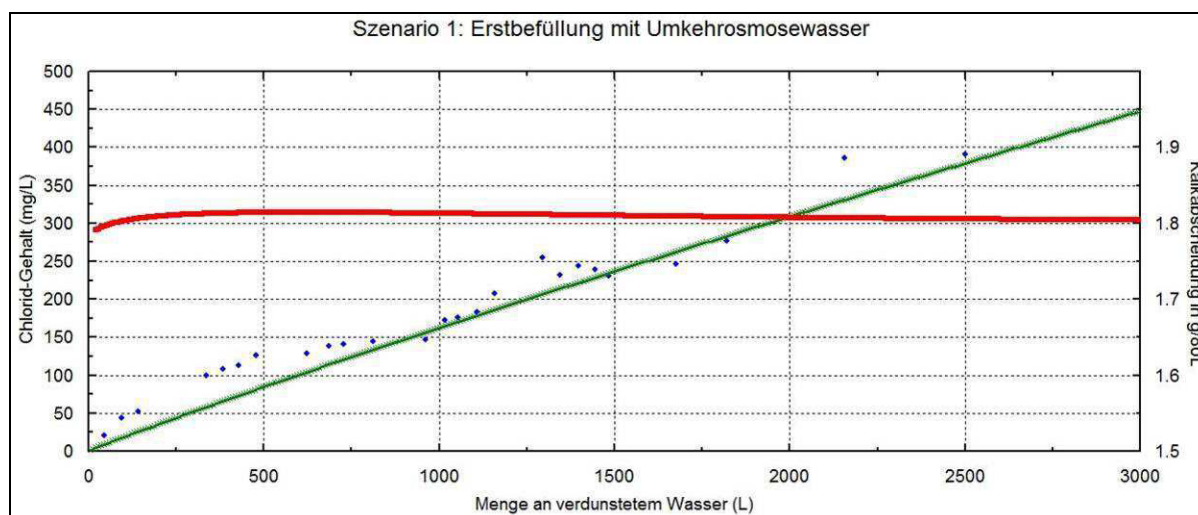


Abbildung 38: *Verhältnisse bei Verwendung von Umkehrosmosewasser für die Erstbefüllung des Kühlturmes. Verlauf der Kalkabscheidung (rote Kurve, Sekundärachse) pro Simulationsschritt und der Chloridkonzentration in der Simulation (grüne Kurve), sowie Darstellung der gemessenen Chloridkonzentrationen (blaue Quadrate).*

Simulation des Kühlturbetriebes mit Umkehrosmosewasser (Szenario 2)

Im zweiten Szenario wurde nicht nur die Erstbefüllung, sondern auch der Betrieb mit Umkehrosmosewasser simuliert. Hier zeigt sich, dass sowohl der Grad der Aufkonzentrierung als auch der der Kalkabscheidung auf 1/10 im Vergleich zum Betrieb mit Leitungswasser reduziert werden kann (siehe Abbildung 39).

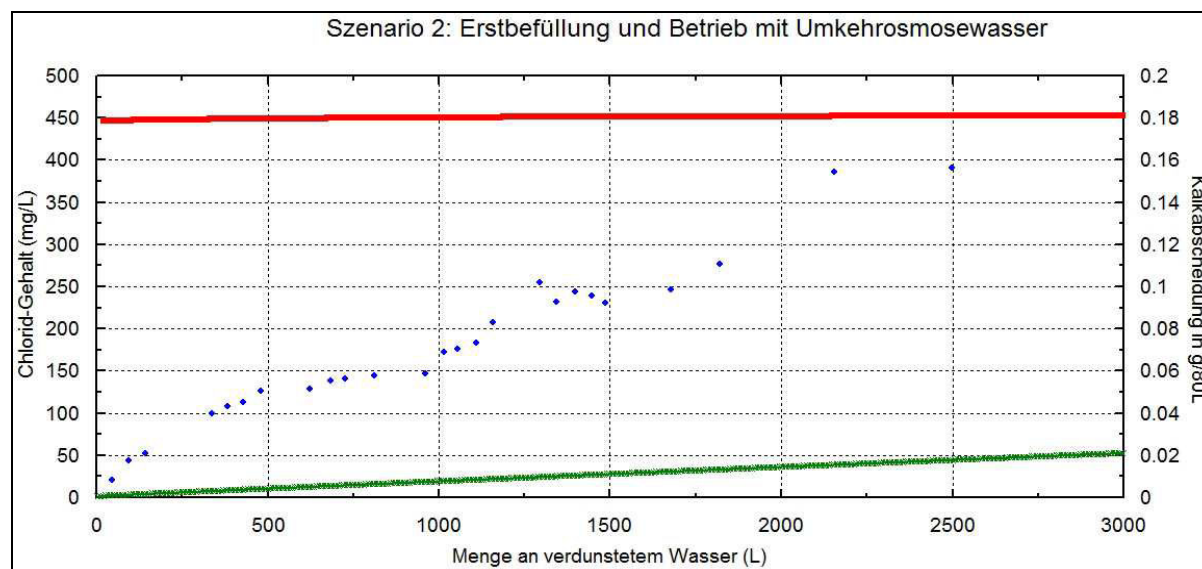


Abbildung 39: *Verhältnisse bei Erstbefüllung und Betrieb mit Umkehrosmosewasser. Verlauf der Kalkabscheidung (rote Kurve, Sekundärachse) pro Simulationsschritt und der Chloridkonzentration in der Simulation (grüne Kurve), sowie Darstellung der gemessenen Chloridkonzentrationen (blaue Quadrate).*

Simulation des kontinuierlichen Kühlturbetriebes durch Austausch von Prozesswassers mit unterschiedlicher Frischwassermengen (Szenario 3 und 4)

Da der Betrieb mit Umkehrosmosewasser wirtschaftlich deutlich aufwendiger ist, wurden 2 weitere Szenarios definiert, in denen kontinuierlich eine bestimmte Menge des im Kühlturm befindlichen Prozesswassers abgelassen und durch frisches Leitungswasser ersetzt wird. Ziel dieser Betriebsführung mit einer kontinuierlichen Abschlämmung ist einerseits eine Verringerung des Anstieges der Chloridkonzentration und andererseits eine Reduktion der Kalkabscheidungen im System. Durch das Ablassen von 24 (Szenario 3) bzw. 12 Litern (Szenario 4) Wasser pro Tag wird ein stationärer Zustand erreicht, der weit unter dem, im experimentellen Versuchsbetrieb erreichten Konzentrationsniveau liegt (Abbildung 40 und Abbildung 41).

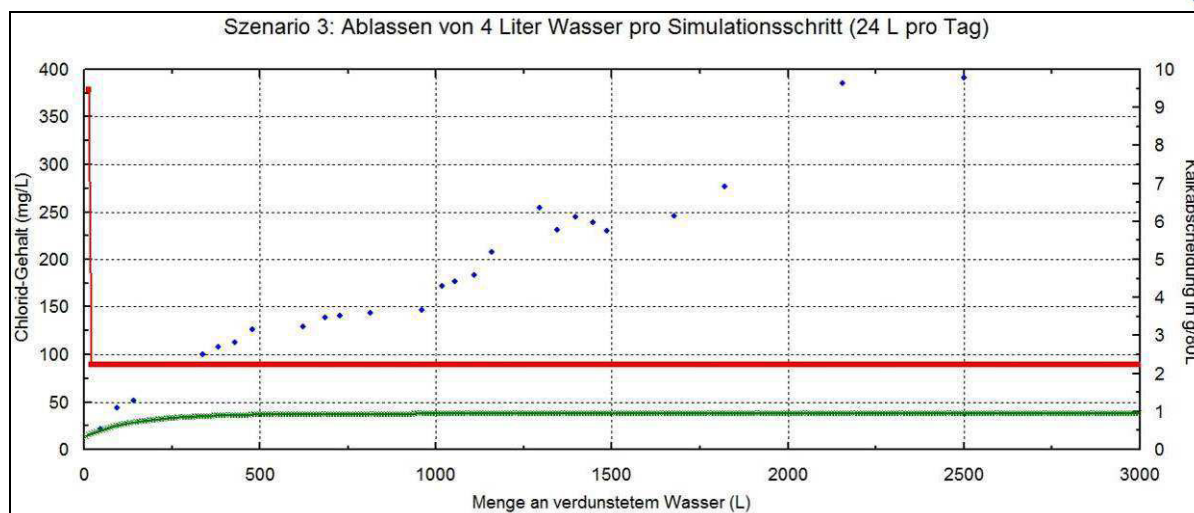


Abbildung 40: *Verhältnisse bei kontinuierlichem Betrieb durch Ablassen von 24 Liter Wasser aus dem Kühlturm pro Tag und Kompensation durch Leitungswasser. Verlauf der Kalkabscheidung (rote Kurve, Sekundärachse) pro Simulationsschritt und der Chloridkonzentration in der Simulation (grüne Kurve), sowie Darstellung der gemessenen Chloridkonzentrationen (blaue Quadrate).*

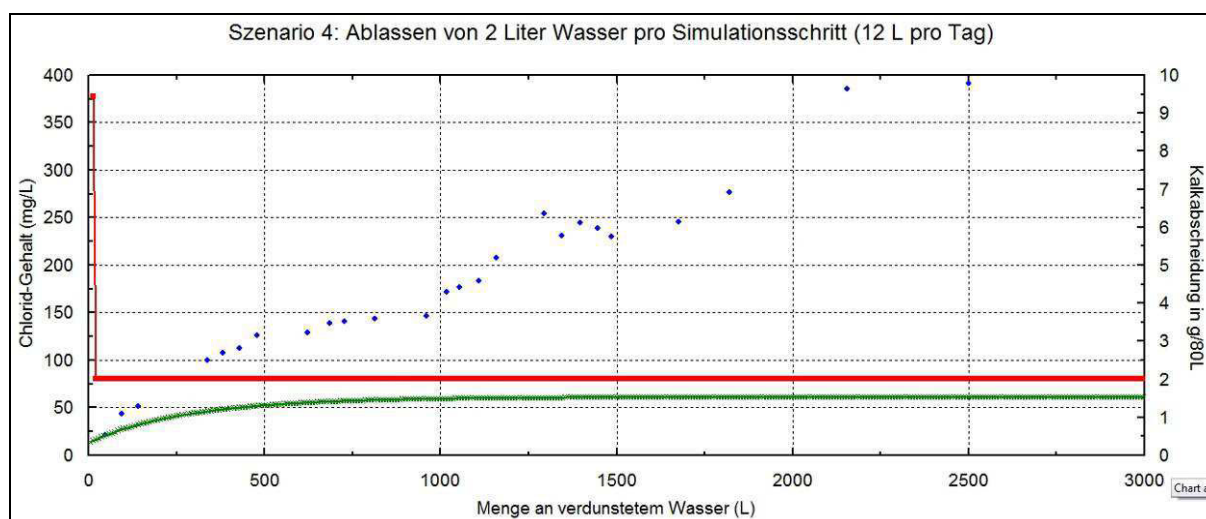


Abbildung 41: *Verhältnisse bei kontinuierlichem Betrieb durch Ablassen von 12 Liter Wasser aus dem Kühlturm pro Tag und Kompensation durch Leitungswasser. Verlauf der Kalkabscheidung (rote Kurve, Sekundärachse) pro Simulationsschritt und der Chloridkonzentration in der Simulation (grüne Kurve), sowie Darstellung der gemessenen Chloridkonzentrationen (blaue Quadrate).*

Beim Vergleich von Abbildung 40 und Abbildung 41 fällt auf, dass sich bei Szenario 3 die Chloridkonzentration auf 37,4 mg / Liter, also auf den 2,75 fachen Wert der Startlösung einpendelt, bei Szenario 4 auf 61,3 mg / Liter, also etwa auf das 4,5

fache. Die Kalkabscheidung erscheint höher, da mehr Wasser gebraucht wird. Letztere findet aber anteilmäßig auch im abgelassenen Wasser statt, also außerhalb des Systems.

Tabelle 16 fasst die Kalkabscheidung aller Szenarien unter Berücksichtigung der oben erwähnten Umstände zusammen:

Tabelle 16: *Kalkabscheidung im Kühlturm für die verschiedenen Szenarios über 52 Tage*

	Beschreibung	Kalkabscheidung g CaCO ₃	Chloridkonzentration mg/L
durchgeführter Versuch	Betrieb über 52 Tage	560	391,2
Szenario 1	Erstbefüllung mit Umkehrosmosewasser	560	379
Szenario 2	Erstbefüllung und Betrieb mit Umkehrosmosewasser	56	44,2
Szenario 3	Ablassen von 24 Liter / Tag (30% des Prozessvolumens)	486	37,4
Szenario 4	Ablassen von 12 Liter / Tag (15% des Prozessvolumens)	541	61,3

Es ist ersichtlich, dass die Kalkbildung im System nur durch den Betrieb mit Umkehrosmosewasser wesentlich geringer wird. Dieses Szenario ist jedoch in der Praxis wirtschaftlich deutlich aufwendiger. Effizienter lässt sich die Aufkonzentrierung durch kontrollierte Abschlammung reduzieren, bei der im laufenden Betrieb kontinuierlich Prozesswasser aus dem System entnommen und durch Frischwasser ergänzt wird. Die Abschlammung sollte dabei so gestaltet werden, dass ein Großteil des ausgefallenen Kalziumkarbonates (Bodensatz) ebenfalls aus dem System entfernt wird.

Tabelle 17: Ergebnisse der Wasseranalysen

Zeit [Tage]	Sample ID	pH	Cond μS/cm	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Mg ²⁺ [mg/l]	Ca ²⁺ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	SO ₄ ²⁻ [mg/l]	Alkalinity [mval/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	TOC mg/l	DOC mg/l	KBE 22°C n/ml	Menge verdunstetes Wasser in Liter
																berechnet
0	KT d0	8,49	420	6,47	11,79	14,43	82,3	13,64	8,36	36,50	4,64	283,1	3,3	2,3	4,5E+03	0,0
0,96	KT d1	8,55	600	14,43	5,35	32,69	105,1	21,05	18,41	90,56	5,84	356,4	5,4	3,6	7,0E+03	45,9
1,96	KT d2	8,6	729	23,96	9,10	53,76	99,9	44,14	28,24	144,92	6,04	368,6	6,1	5,8	1,5E+04	93,8
2,96	KT d3	8,6	847	29,67	8,92	70,26	106,1	51,78	37,17	199,97	6,23	380,2	6,7	6,0	1,1E+04	141,8
7,02	KT d6	8,6	1155	54,76	20,34	143,33	54,9	100,07	84,87	403,62	4,70	286,8	8,7	8,1	1,6E+05	336,4
7,98	KT d7	8,59	1192	59,59	21,63	157,89	35,7	108,01	92,50	436,92	3,89	237,4	9,3	8,8	1,8E+05	382,4
8,94	KT d8	8,63	1267	61,79	21,62	161,74	46,9	112,90	94,36	449,48	4,53	276,4	9,7	9,1	1,8E+05	428,3
10,00	KT d9	8,43	1307	66,84	49,09	175,11	42,1	126,28	104,39	492,10	4,45	271,5	10,2	10,0	2,8E+05	479,2
13,00	KT d12	8,63	1361	72,06	24,72	183,25	44,8	128,82	112,15	527,71	4,72	288,0	11,5	11,4	1,5E+05	623,0
14,29	KT d13	8,66	1505	77,86	22,76	185	65,4	138,6	108,4	518	6,25	381,4	10,5	10,4	1,3E+05	684,9
15,17	KT d14	8,64	1490	82,31	22,03	198	44,7	140,7	112,0	526	4,90	299,0	11,5	11,2	1,4E+05	726,8
16,96	KT d16	8,55	1480	80,20	26,00	192	43,7	143,9	111,0	529	4,76	290,5	11,5	11,3	2,4E+05	812,6
20,04	KT d19	8,65	1665	83,22	21,50	226	23,4	146,5	114,1	528	5,43	331,3	13,7	12,9	6,2E+05	960,4
21,21	KT d20	8,7	1705	99,65	26,58	229	44,8	171,9	134,9	617	5,47	333,8	14,5	14,3	6,9E+05	1016,3
22,00	KT d21	8,59	1765	103,04	26,05	236	47,6	176,3	138,4	632	5,72	349,0	14,9	14,1	5,6E+05	1054,2
23,13	KT d22	8,64	1842	106,62	25,45	246	46,1	183,4	147,1	666	5,71	348,4	15,7	15,6	3,9E+05	1108,2
24,17	KT d23	8,65	1955	118,16	27,60	270	44,7	208,0	165,5	745	6,06	369,8	16,7	16,6	3,8E+05	1158,1
27,04	KT d24	8,75	2230	142,29	31,74	325	31,8	254,7	207,6	906	6,00	366,1	23,2	23,0	5,5E+05	1295,8
28,04	KT d25	8,75	2240	136,45	32,13	308	24,4	231,3	205,4	859	5,98	364,9	20,43	20,21	5,7E+05	1343,8
29,17	KT d26	8,75	2220	138,72	42,78	319	20,9	244,5	205,4	880	5,84	356,4	20,35	19,98	4,7E+05	1397,7
30,17	KT d27	8,79	2221	138,29	39,75	318	24,1	239,3	203,7	873	5,96	363,7	20,08	19,78	5,0E+05	1445,6
31,00	KT d28	8,79	2221	136,52	34,47	309	24,3	230,0	196,8	851	6,01	366,7	20,5	19,7	2,7E+05	1485,5
35,00	KT d32	8,76	2340	146,82	35,65	330	48,9	245,9	208,8	911	7,51	458,3	20,13	19,51	1,3E+05	1677,2
38,00	KT d35	8,75	2570	166,05	41,68	377	35,5	276,7	233,4	1014	7,36	449,1	21,6	19,9	1,6E+05	1821,0
45,00	KT d42	8,87	3320	218,10	63,41	483	21,1	385,4	296,0	1359	7,20	439,3	23,74	23,2	1,5E+05	2156,4
52,17	KT d49	8,78	3350	234,68	66,39	477,99	35,3	391,19	333,05	1340,10	7,58	462,5			3,5E+04	2499,8

3.3.4 Schlussfolgerungen

Die Auswahl der untersuchten Verfahren erfolgte entsprechend den Anforderungen der Anlagenbauer von alternativen Rückkühlsystemen. Die Behandlungsmaßnahmen sollten möglichst ohne den Einsatz von biozid wirkenden Chemikalien erfolgen, Investitionskosten sollten in einem adäquaten Verhältnis zu den gesamten Systemkosten stehen, das Verfahren sollte weitestgehend automatisiert sein um Organisations- und Personalaufwand im Anlagenbetrieb möglichst gering zu halten.

In einer vergleichenden Beurteilung ist bei allen untersuchten Verfahren von einer grundsätzlichen Eignung für Hygienisierungsmaßnahmen bei Nasskühltürmen auszugehen. Die unterschiedlichen Wirkungsmechanismen führten in allen Untersuchungen zu signifikanten Reduktionsraten an bakterieller Biomasse. Unterschiede bestehen in den spezifischen Dosis-Wirkungsbeziehungen, die letztlich auch die Dynamik einer Wiederverkeimung bedingen.

In diesem Zusammenhang sind insbesondere die thermischen Desinfektionsmaßnahmen zu nennen. Unter der Bedingung einer max. zulässigen Temperatur im Wasserkreislauf von 60 °C, aufgrund der Materialeigenschaften einzelner Anlagenteile, kam es auch bei entsprechend langer Wirkdauer, nach Abkühlung auf normale Betriebstemperatur innerhalb relativ kurzer Zeit wieder zu erheblichen Biomassezuwächsen. In Relation zu den erforderlichen Energieaufwendungen für die Heizphasen ist die Effizienz der Desinfektionsmaßnahme unbefriedigend und die Anwendbarkeit im Praxisbetrieb als problematisch einzustufen.

Als nachteilig in der UV Bestrahlung ist die Schlierenbildung innerhalb relativ kurzer Betriebsdauer an den Oberflächen der UV Röhren anzuführen, die damit verbundene Abnahme der Lichtintensität und somit auch der Wirkleistung. Der Betrieb erfordert regelmäßige Kontrollen des Systems und die Durchführung von Wartungsarbeiten. Als ein Hauptproblem erscheint weiters die lokale Wirkung der Maßnahme und die damit ungenügenden Wirkungen gegenüber Bakterien in Biofilmen.

Von den untersuchten Methoden am erfolgversprechenden erwies sich die Kupfer-Silber-Ionisation. Aus den Untersuchungsergebnissen ist abzuleiten, dass aufgrund der Depotwirkung der gelösten Metall-Ionen nachhaltige bakterizide Effekte im System bestehen (siehe Tabelle 16). Wesentliches Kriterium für erfolgreiche Anwendungen ist jedoch eine weitere Optimierung der Dosis-Wirkungsbeziehungen, da diese in einem engen Zusammenhang mit dem Wassermanagement im Anlagenbetrieb zu sehen ist.

Tabelle 18: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der untersuchten Desinfektionsmaßnahmen

Maßnahme	Vorteile	Nachteile
UV-Desinfektion	Bakteriozide Wirkung bestätigt Keine Chemikalienzugabe erforderlich Automatisierter Betrieb möglich Einfache Handhabung	Keine Depotwirkung Regelmäßiger Kontroll- und Wartungsaufwand Eingeschränkte Wirkung in Biofiltern
Silber/Kupfer-Ionen Desinfektion	Bakteriozide Wirkung bestätigt Keine Chemikalienzugabe erforderlich Automatisierter Betrieb möglich Depotwirkung gegeben Einfache Handhabung	Dosis-Wirkungskurven sind im Einzelfall abzustimmen
Thermische Desinfektion	Bakteriozide Wirkung bestätigt Keine Chemikalienzugabe erforderlich	Keine Wuchsbelagsentfernung Rasche Wiederverkeimung Probleme mit der Hitzebeständigkeit eingesetzter Materialien Hoher Organisations-, Energie- und Personalaufwand Keine Depotwirkung

Im Folgenden werden die Kosten für die beiden Desinfektionsmethoden UV-Licht und Silber/Kupfer-Ionen beim Einsatz an einem 30 kW Nasskühlturm miteinander verglichen. In Tabelle 19 werden die Investitionskosten und die Betriebskosten über einen Zeitraum von 15 Jahren gegenübergestellt.

Tabelle 19: *Jahreskosten für hygienische Maßnahmen für einen Nasskühlturm (30 kW) über eine Betriebszeit von 15 Jahren*

Methode	Investition	Betrieb	Wartung & Ersatz
	Euro	Euro/a	Euro/a
UV-C Desinfektion ¹⁾	450 bis 1000	90	65
Silber/Kupfer Ionen Desinfektion ²⁾	300 - 400	0,5	55

¹⁾Bauart nach Abbildung 1

²⁾Bauart nach Abbildung 2

Die Zahlenwerte in Tabelle 19 sind für einen 30 kW Nasskühlturm unter folgenden Betriebsbedingungen gerechnet:

UV-Desinfektion

- Jährliche Betriebszeit 1.500 h/a
- Elektrische Leistung für 30 W UV-C Lampe: (40W Verbrauch) 60 kWh/a
- Stromkosten: (0,16 €/kWh) 9,6 €/a
- Wartung: Wechsel der UV-C Lampe alle 6,6 Jahre (Preis: 200 €/Lampe) 40 €/a
- Zeit für Wartung/a: 2 Stunden (50 €/h) 100 €/a

Silber-Kupfer-Ionen Desinfektion

- 0,5 W , für 1500 h/a 0,12 €/a
- Ersatz der Elektroden, 30 €/Stück, einmal pro Jahr 30 €/a
- Wartungszeit pro Jahr: 30 Minuten 25 €/a

Aus derzeitiger wirtschaftlicher Sicht bestehen bei beiden Verfahren keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf Investitions- und Betriebskosten.

Interpretation der Ergebnisse und Empfehlungen für den laufenden Betrieb

In der Darstellung der Ergebnisse zeigt sich deutlich, dass es im Prozess zu einer deutlichen Aufkonzentrierung des Wassers im Kühlturmsystem kommt. Dies resultiert aus der Kompensation des ständigen verdunstenden Prozesswassers durch Leitungswasser.

In der Versuchsanlage wurde das Wasservolumen von 80 Liter konstant gehalten. Im Durchschnitt lag die verdunstende Wassermenge in der Größenordnung von 50 Liter pro Tag. Der zeitliche Verlauf der Aufkonzentrierung konnte anhand der Chloridkonzentrationen verfolgt werden. Dabei zeigte sich, dass während des Kühlturbetriebes nach 52 Tagen im Prozesswasser eine Aufkonzentrierung um den Faktor 30 erfolgte. Gleichzeitig konnte eine kontinuierliche Kalkabscheidung beobachtet werden, die mit zunehmender Konzentration der Lösung einen leicht abnehmenden Trend zeigte.

Bei der Verwendung von Umkehrosmosewasser reduziert sich die Aufkonzentrierung um Faktor 10. Allerdings erfordert diese Lösung einen technischen Mehraufwand und ist daher wirtschaftlich deutlich aufwendiger.

Die optimalste Lösung zur Verringerung der Aufkonzentrierung stellt eine kontinuierliche Abschlammung des Kühlturms dar, bei der ein Teil des Prozesswassers abgelassen und durch frisches Wasser ergänzt wird.

3.4 AP 4 - Untersuchung alternativer Rückkühlmöglichkeiten

3.4.1 Latentwärmespeicher

In herkömmlichen Systemen werden zur Abgabe der Abwärme einer Absorptionskältemaschine (AKM) an die Umgebung Nasskühltürme eingesetzt. Wie im Projekt eingehend beschrieben, hat dies Vorteile für die Effizienz der Absorptionskältemaschine, hat aber auch Nachteile, beispielsweise könnten im schlimmsten Fall ohne eine chemische Wasseraufbereitung Legionellen im Kühlturm auftreten. Diese Legionellen könnten sich durch die Sprühnebel in der Umgebungsluft der Kühltürme verbreiten. Die notwendige chemische Wasseraufbereitung verursacht jedoch zusätzliche Betriebskosten und ist oftmals mit der ökologischen und ökonomischen Idee der Solaren Kühlung nicht vereinbar.

Neben dem Nachteil des Wasserverbrauchs und einer eventuellen Schwadenbildung des Nasskühlturms ist es oftmals aus technischen oder behördlichen Gründen nicht möglich einen Nasskühlturm einzusetzen. Vor allem in südeuropäischen Ländern, beispielsweise in Spanien, setzten Behörden dem Einsatz von Nasskühltürmen Grenzen. Südeuropa ist jedoch für die solare und thermische Kühlung ein Hoffungsmarkt. Der Einsatz von Trockenkühltürmen ist bedingt durch hohe Lufttemperaturen oftmals technisch nicht sinnvoll möglich. Daher wurden neue Konzepte mit Latentwärmespeichern entwickelt, die die Vorteile von Latentwärmespeichern mit denen von Trockenkühltürmen verbinden.

Konzept

Das ZAE Bayern (Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung) arbeitet an der Kombination eines Trockenkühlturms mit einem Latentwärmespeicher. Der Trockenkühlturm dient generell als Rückkühlung für die Kältemaschine. Der Latentwärmespeicher unterstützt den Trockenkühlturm in Zeiten, da dieser nicht mehr effizient arbeiten kann, also in Fällen wenn hohe Außentemperaturen auftreten. In Fällen mit hoher Außentemperatur wird ein Teil der Rückkühlwärme in den Latentwärmespeicher gepuffert. Während der Nacht, bei geringeren Außentemperaturen, wird die Wärme über den Trockenkühler aus dem Latentwärmespeicher wieder abgeführt. Somit kann der geleerte Latentwärmespeicher tagsüber den Trockenkühler bei Hitzespitzen wiederum unterstützen und geladen werden. Zusätzlich bietet der Latentwärmespeicher auch den Nutzen, dass er in Zeiten ohne Kühlbedarf als Heißwasserspeicher eingesetzt werden kann.

In nachfolgender Abbildung 42 erkennt man das Grundprinzip des Latentwärmespeichers. Bedingt durch den Phasenwechsel kann deutlich mehr Wärme als bei einem reinen Warmwasserspeicher gespeichert werden. Somit benötigt beispielsweise ein Latentwärmespeicher (für die gleiche Speicherkapazität) ein Volumen von 1,5 m³ gegenüber 20 m³ eines Warmwasserspeichers. Dies bedeutet aufgrund des geringeren Platzbedarfes einen klaren Vorteil bei der baulichen Umsetzung.

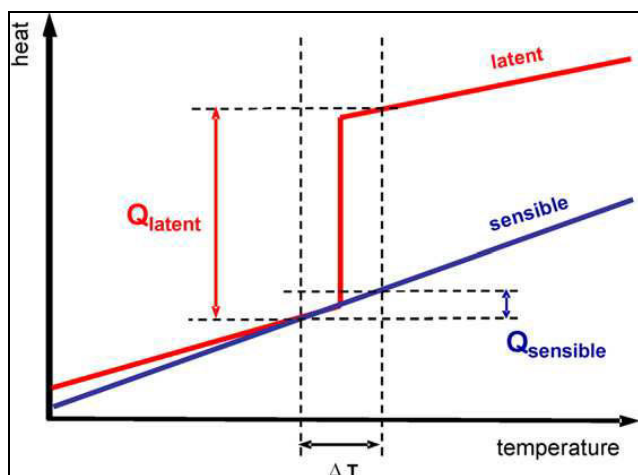


Abbildung 42: *Steigerung der Speicherfähigkeit durch latente Wärme (Quelle: ZAE Bayern)*

Ladung des Latentwärmespeichers

Betrachtet man den Temperaturverlauf des MT-Kreises (Temperatur der Rückkühlung der Absorptionskältemaschine) bei einer Außentemperatur von 32 °C, so erkennt man, dass die Temperatur von 40 °C aus der Kältemaschine von dem Trockenkühlturm auf ca. 36 °C abgekühlt werden kann. Um diese Temperatur von 36 °C nochmals auf 32 °C zu reduzieren wird der Latentwärmespeicher genutzt und ein Teil der Wärmeenergie im Speicher zwischengepuffert (siehe Abbildung 43).

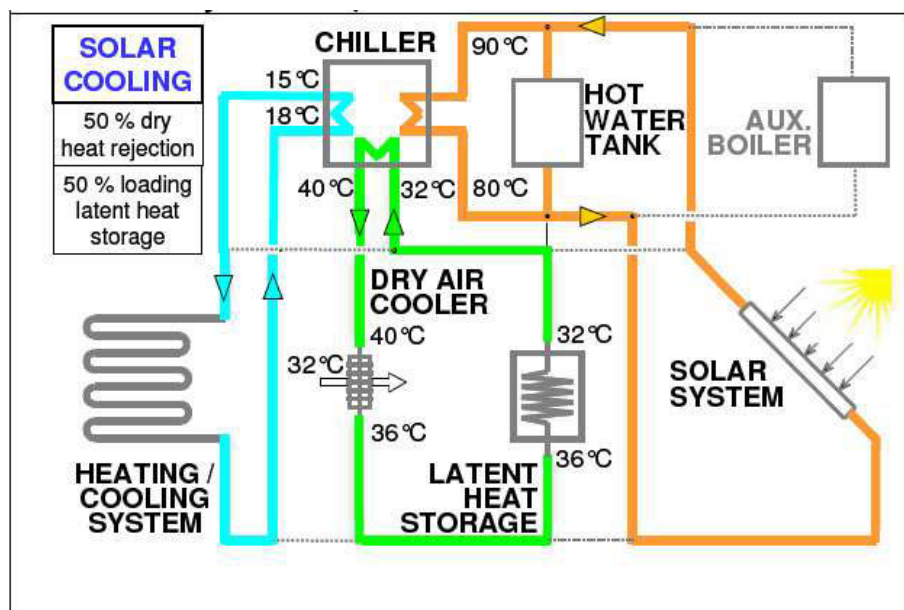


Abbildung 43: *Ladung des Latentwärmespeichers während des Tages (Quelle: ZAE Bayern)*

Entladung des Latentwärmespeichers

In den Nachtstunden, bei beispielsweise 18 °C Außentemperatur, wird durch die Nutzung des Trockenkühlturms der Latentwärmespeicher entleert. Somit ist er am nächsten Tag wiederum betriebsbereit. Der Latentwärmespeicher kann zusätzlich während der Heizperiode als Wärmespeicher für das Solarsystem eingesetzt werden (siehe dazu [Abbildung 44](#)).

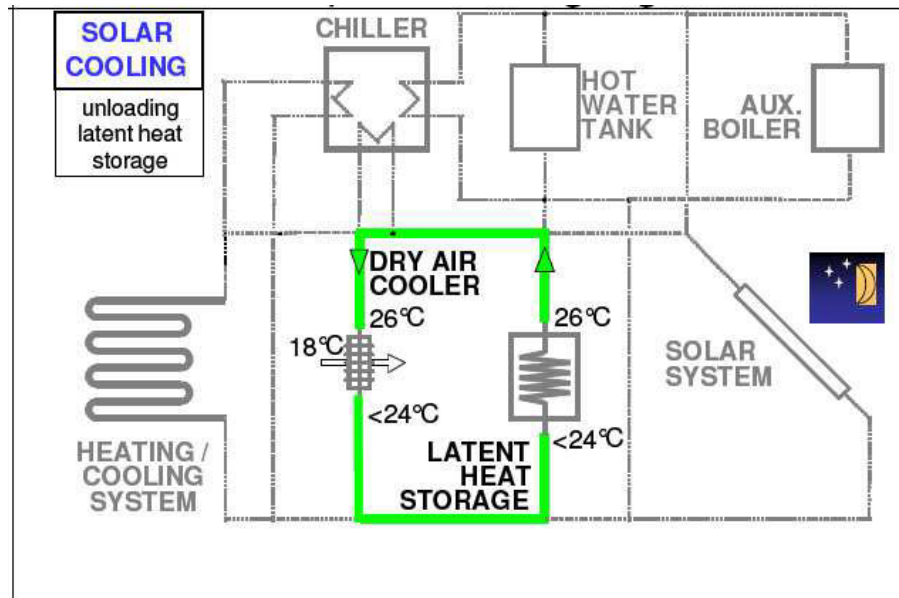


Abbildung 44: Entladung des Latentwärmespeichers während der Nacht (Quelle: ZAE Bayern)

Abgestimmt ist das System derzeit auf eine Kältemaschine mit 10 kWc Kälteleistung, wobei jeweils die Hälfte der Wärme über den Trockenkühler abgeführt wird und die restliche Hälfte im Latentwärmespeicher gepuffert wird.

Technische Eckdaten

- Absorptionskältemaschine 10 kWc
- Speichermaterial $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- Speicherkapazität: 120 kWh
- Volumen: 1,5 m³
- Gewicht: 2,2 t

Wirtschaftlichkeit

Nach Rücksprache mit den verantwortlichen Personen bei ZAE liegt der Zielpreis des Latentwärmespeichers bei ca. 3.000 € für ein System mit 10 kWc Kälteleistung. Ergänzend fallen zusätzlich Kosten für den Trockenkühlturm, die Verrohrung und die Regelung an. Das Projektkonzept befindet sich derzeit im Forschungsstadium und es

liegen noch keine Langzeiterfahrungen für potenziell größere Anlagen vor. Bedenkt man jedoch den Zusatznutzen als Wärmespeicher, so scheint diese Lösung ein wirtschaftlich interessantes Konzept zu sein.

Resümee

Die Kombination eines Trockenkühlturms mit einem Latentwärmespeicher ist ein vielversprechender Ansatz um Nasskühltürme auch in südlichen Ländern zu vermeiden. Ein wesentlicher Faktor für die Weiterentwicklung des Konzeptes ist die Übertragbarkeit auf größere Kälteleistungen (größer 35 kWc). Bis erste standardisierte Produkte am Markt verfügbar sein werden, könnte es jedoch noch zumindest ein bis zwei Jahre dauern.

3.4.2 Erdwärme-Sonden

Erdsonden sind seit Jahren in Österreich in Kombination mit Wärmepumpen im Einsatz. Vor allem im Passiv- und Niedrigenergiehausbereich hat sich diese Technologie etabliert. Es gibt bei den Planern Langzeiterfahrungen in der Planung von Erdsonden Anlagen zum Heizen und Kühlen. Auch gibt es große Erfahrungen bei der baulichen Umsetzung. Spezialfirmen bieten die Erdbohrung als Dienstleistung für den Bauherren an. Somit scheint diese Form der Rückkühlung sehr vielversprechend zu sein.

Einbindung der Erdsonden bei der thermischen Kühlung (Systemkonzept)

Die Solare oder thermische Kühlung besteht aus folgenden Komponenten:

Einer Wärmequelle, beispielsweise Solaranlage oder Biomassekessel, einer Kältemaschine (Chiller), der Kälteverteilung (z.B. Kühldecke, FanCoils, Betonkernaktivierung) und der Rückkühlung. In Abbildung 45 ist die Einbindung einer Erdsonde bei einer Absorptionskältemaschine schematisch dargestellt.

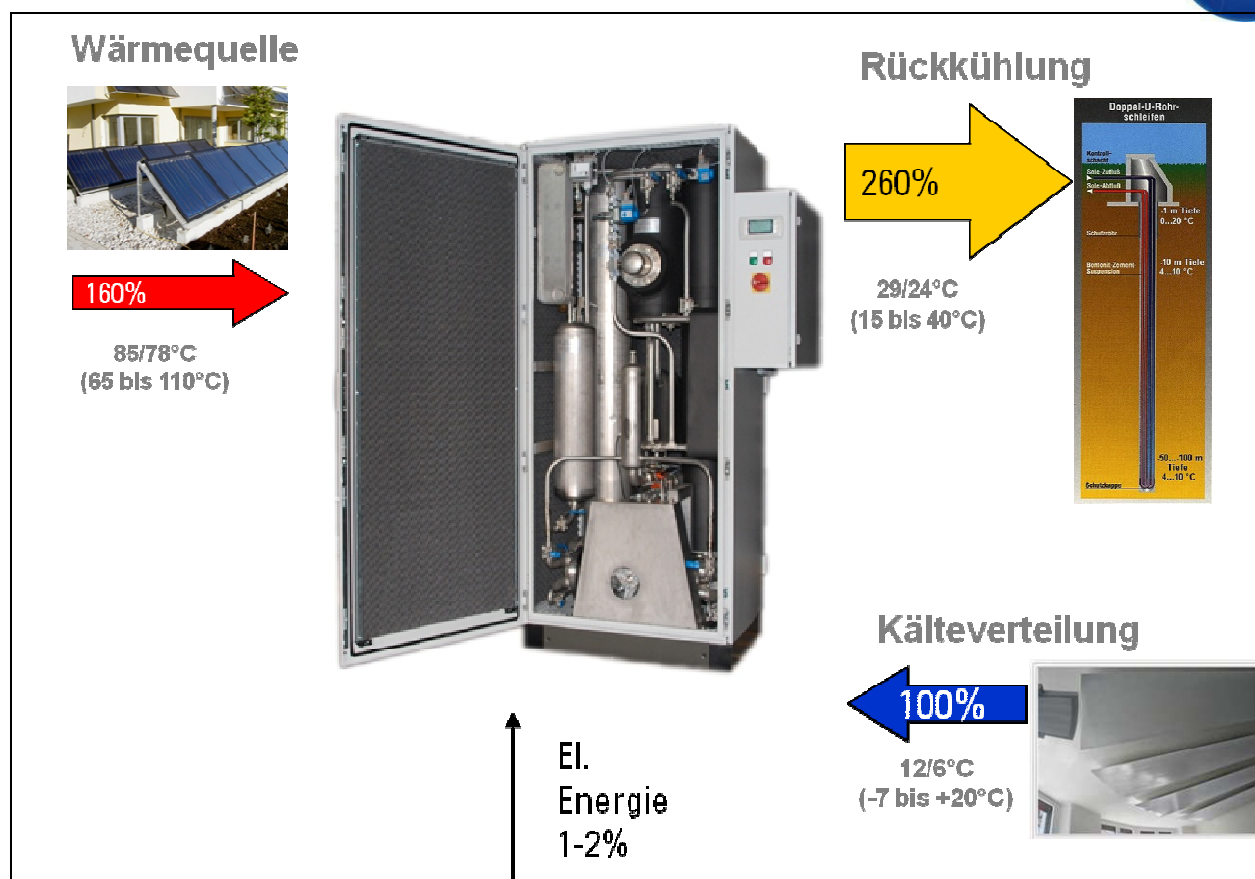


Abbildung 45: Einbindung Erdsonden bei thermischer Kühlung

Einbindungskonzept

Die Rückkühlung erfolgt über Erdsonden, die senkrecht in den Boden eingelassen werden (siehe Abbildung 46). Der Planer legt aufgrund der Rückkühlleistung die Anzahl und die Tiefe der Sonden fest. Generell liegen die Tiefen der einzelnen Erdsonden zwischen 50 und 100 Meter. Eine Bohrung über 100 Meter Tiefe ist aus rechtlichen (beispielsweise Baurecht Deutschland, Behördenauflagen) und technischen (Untergrund, Druckwasser) und wirtschaftlichen Gründen kaum üblich. Je nach Bohrtiefe variieren die Temperaturen des Erdreiches. Bei einer Bohrung von ca. 100 Meter Tiefe erreicht die Sole eine Temperatur von ca. 8-10 °C. Für die thermische Rückkühlung ist dies eine optimale Temperatur. Je nach Konzept des Planers wird die Sole direkt mit der Kältemaschine verrohrt oder es wird ein Puffer zwischen Kältemaschine und Erdsonde installiert. Im Einsatzgebiet Prozesskühlung kann bei höheren Temperaturen die Erdsonde auch im Modus Freecooling (hydraulische Umgehung der Kältemaschine) genutzt werden.

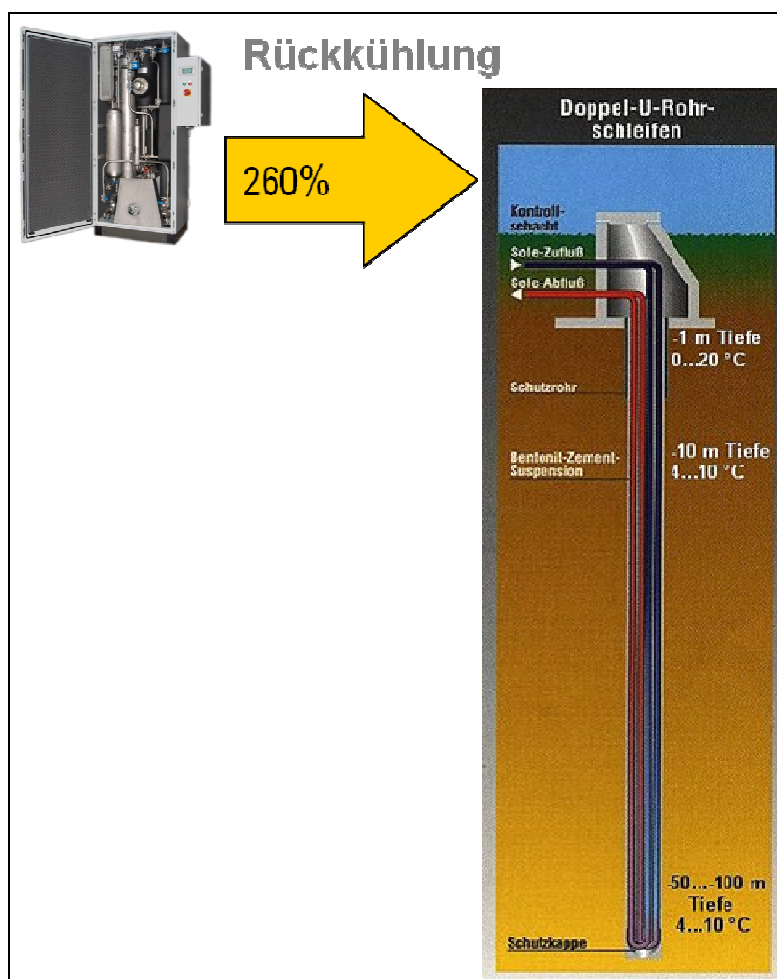


Abbildung 46: Einbindung Erdsonden

Die durchschnittliche Kühlleistung der Sonde beträgt 35-40 W / m Tiefe.

Die generelle Rückkühlleistung ist jedoch abhängig von der Bodenbeschaffenheit (Geologie) und davon ob ein Grundwasserstrom, der die eingebrachte Wärme abführt vorhanden ist. Bei der Projektplanung sind zusätzlich behördliche Auflagen zu berücksichtigen.

Aus technischer Sicht bietet sich die Rückkühlung über Erdsonden für den Betrieb mit Absorptionskältemaschinen an.

Wirtschaftlichkeit

Die Systemkosten, also die Kosten für ein installiertes System, liegen (nach Rücksprache mit mehreren Planern) im Bereich von 60 bis 70 € /m Sondentiefe.

Beispielsweise ergibt sich für eine 19 kWc Absorptionskältemaschine, die eine Rückkühlleistung von 47 kWc für den Betrieb benötigt eine ungefähre Sondenlänge von 1.100 m. Bei Systemkosten von ca. 65 € / m ergeben sich Investmentkosten von 71.500 €. Ein handelsüblicher Naßkühlturm mit Wasseraufbereitung mit der gleichen Rückkühlleistung hat dem gegenüber einen Preis von ca. 8.000 - 10.000 € (ohne Regelung). Somit ist die Rückkühlung über Erdsonden um den Faktor 8 - 10 teurer

als Systeme die derzeit eingesetzt werden.

Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten wird eine Rückkühlung über Erdsonden daher nur zu Kühlzwecken kaum eingesetzt werden.

Resümee

Erdsonden sind eine erprobte Technologie, die technisch gesehen ein großes Potential für den Einsatz von thermisch betriebenen Kältemaschinen haben. Aufgrund der relativ hohen Investmentkosten sind die Chancen für den Einsatz bei Absorptionskältemaschinen jedoch eher gering.

Der Einsatz von Erdsonden für den Zweck Heizen und Kühlen ist wirtschaftlich sinnvoll. Für diesen Anwendungsfall gibt es jedoch Wärmepumpensysteme, die Heizen und Kühlen als Funktion anbieten. Somit wird sich der Bauherr für Erdsonden eher bei der Umsetzung für Wärmepumpenanwendungen entscheiden.

3.5 AP 5 - Technischer und wirtschaftlicher Systemvergleich

3.5.1 Kosten

Investitionskosten der Anlage am Beispiel des Rückkühlsystems Axima EWK 064 mit dem Pink Chiller 19 kW und solarer Wärmequelle für den Standort Freiburg bei 20 % Leistungsabdeckung betrachtet.

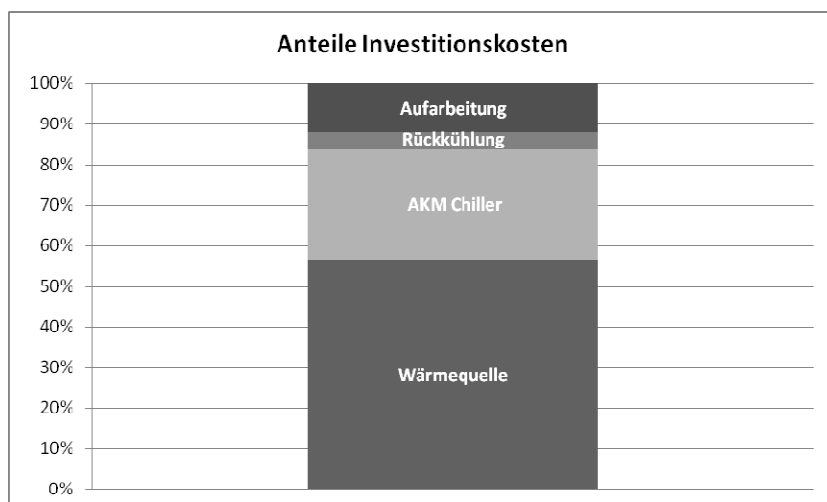


Abbildung 47: Anteile der Investitionskosten

In Abbildung 47 ist deutlich zu erkennen, dass die Kosten für die Wärmequellen ungefähr 55 %, die des Chillers 25 %, die der Aufbereitung des Wassers 15 % und die der Rückkühlung 5 % der Investition ausmachen.

In Abbildung 48 werden weitere Kosten für Hygienisierungsmaßnahmen, die Betriebskosten insbesondere für parasitäre Aggregate der Rückkühlanlage (Ventilator, Pumpen) und der Kosten für den Wasserverbrauch dargestellt.

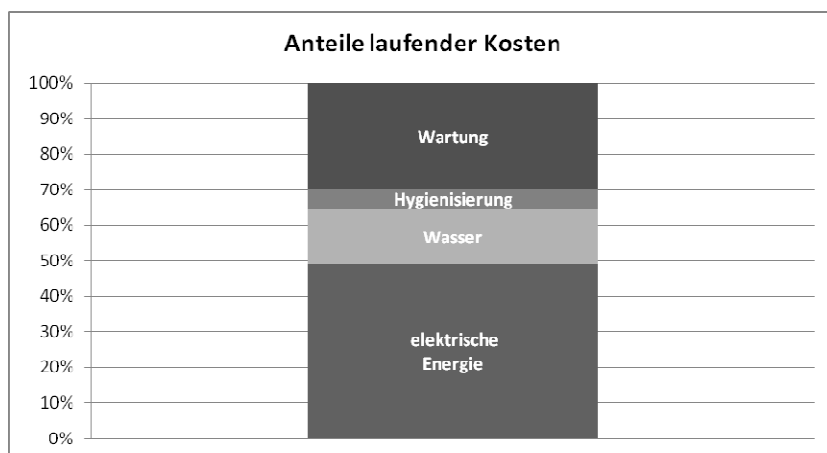


Abbildung 48: Anteile der laufenden Kosten

Wie in Abbildung 48 ersichtlich entfallen 49 % der laufenden Kosten auf die elektrischen Energiekosten. Davon sind 29 % des Verbrauchsanteils für den Ventilator und 37 % für die Zirkulationspumpe der Rückkühlung ermittelt worden. Diese Zusammenhänge werden in Abbildung 49 genau dargestellt.

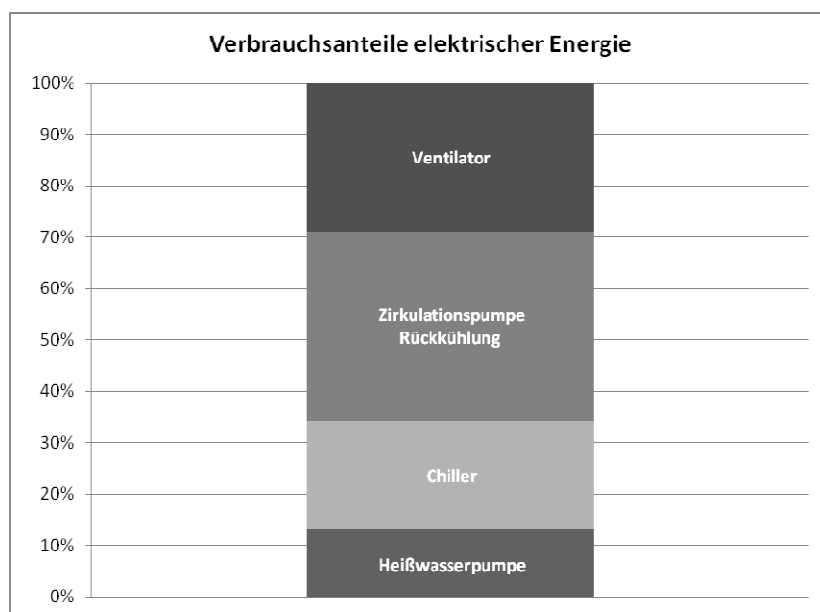


Abbildung 49: *Verbrauchsanteile der elektrischen Energie*

Die Kosten für die Hygienisierungsmaßnahmen wurden als betriebsgebundene Kosten aufgeschlüsselt und gehen auf die Erkenntnisse von H. Moser und E. Podesser¹ zurück. In diesem Beispiel wurde UV-C Desinfektion ausgewählt, aber die Berechnung wurde auch mit der Silber-Kupfer-Ionen-Desinfektion angestellt. Verglichen zur konventionellen Anwendung von Bioziden sind diese beiden Alternativen kostengünstig.

Die Kosten bei nassen Rückkühlssystemen für den Wasserverbrauch lassen sich aus Abbildung 48 mit 16 % beziffern. 30 % der Betriebskosten entfallen für die Wartung von den Systemkomponenten.

¹ Hygienic Aspect of Small Wet Cooling Towers, A technical report of subtask C of Task 38 Solar Air-conditioning and refrigeration, Harald Moser und Erich Podesser, 2009

Investitionskosten für alternative Rückkühlanlagen (Erdkollektoren und Latentwärmespeicher)

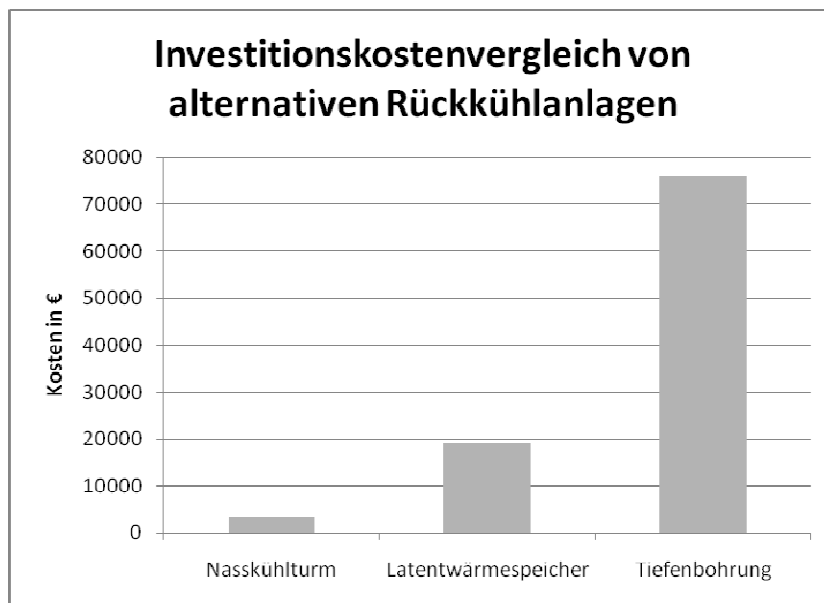


Abbildung 50: Investitionskostenvergleich von alternativen Rückkühlanlagen

Alternative Rückkühlssysteme zu Nass- oder Trockenkühltürmen wie Latentwärmespeicher oder Tiefenbohrung zeigen deutlich höhere Investitionskosten (wie in Abbildung 50 zu erkennen ist). Außerdem kann am Beispiel Latentwärmespeicher noch nicht auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Rückkühlung mittels Tiefenbohrung ist in der Kühlanwendung nicht wirtschaftlich.

Betriebskosten für alternative Rückkühlanlagen

Verglichen zur Anwendung eines Nasskühlturms, wird bei der Rückkühlung über Tiefenbohrungssonde nur die elektrische Arbeit für die Zirkulationspumpe benötigt. Wie in Abbildung 51 zu erkennen ist, fallen aber für den Nasskühlturm auch Wasserkosten an. Alle Erkenntnisse sind bezogen auf 3600 Volllaststunden/Jahr und 50 kW Rückkühlleistung.

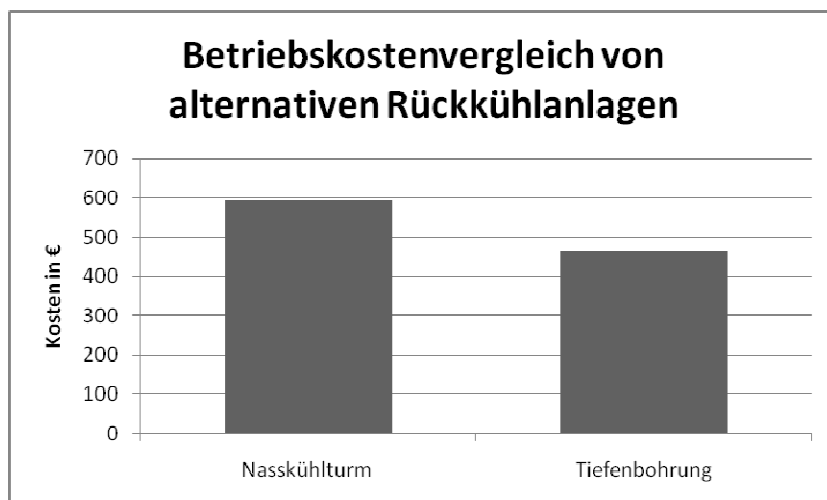


Abbildung 51: Betriebskostenvergleich von alternativen Rückkühlanlagen

3.5.2 Systemvergleich

In diesem Kapitel wird die Wirtschaftlichkeit von thermisch angetriebenen Kälteanlagen für Beispielregionen und Beispielanwendungen mit einem Referenzsystem verglichen. Dazu wurden an zwei repräsentativen Europäischen Standorten, die unterschiedliche Klimata und damit unterschiedliche Lastprofile aufweisen, verglichen. Ein weiteres Augenmerk wurde auf die unterschiedlichen Rückkühlsysteme für die jeweiligen Anwendungen gelegt. Diese haben neben den klimatischen Rahmenbedingungen und der Anwendung (Klimatisierung oder Tiefgefrierlagerung) einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Die Ergebnisse basieren auf den Erkenntnissen aus den technischen Simulationen aus Arbeitspaket 2.

Stellvertretend für einen Standort mit einem heißen und feuchten Klima wurde Athen gewählt. Für einen Standort mit kontinentalem Klima wurde Freiburg gewählt. Neben wirtschaftlichen Faktoren wie Strompreis und Wasserpreis wirken sich klimatische Unterschiede gravierend auf die Effizienz der Rückkühlsysteme aus. Abhängig von der lokalen relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur (Feuchtkugeltemperatur) unterscheiden sich nasse Kühltürme stark von trockenen Kühltürmen. In einem trockenen kontinentalen Klima wie in Freiburg kann der nasse Kühlturm Wärme besser abgeben als das trockene Rückkühlsystem. Die wirtschaftlichen Berechnungen in Form der Cashflow Berechnung beruhen auf den technischen Ergebnissen von AP2. Für jeweils drei verschiedene Leistungsabdeckungen wurden Amortisationskurven berechnet: Das heißt, dass die Anlagengröße (die Leistung der Maschine) konstant bleibt. Die Kühllastkurven werden so gewählt, dass ein bestimmter Prozentanteil der Kühllast des Gebäudes von der Sorptionskältemaschine abgedeckt werden kann. Somit wird die Leistungsabdeckung des Kühlbedarfes durch die Gebäudegröße verändert. Bei 100 % Leistungsabdeckung und dem Einsatz einer Absorptionskältemaschine, AKM, mit 19 kW Kühlleistung ist die Kühllast des

Gebäudes auch 19 kW. Bei 50 % Leistungsabdeckung und 19 kW Kühlleistung würde die Gebäudekühllast 38 kW entsprechen. Die Differenz wird nicht durch eine Kompressionskältemaschine abgedeckt. Je weniger Spitzenlastanteil die AKM leistet, desto mehr Volllaststunden werden von der Anlage erreicht, wodurch die Wirtschaftlichkeit erhöht wird.

Die in Abbildung 52 bis Abbildung 57 dargestellten Kurven zeigen wie die Investitionen sich über den betrachteten Zeitraum von 20 Jahren ökonomisch entwickeln, d.h. wie groß die Barwertdifferenz der Investition und der Betriebskosten zu jedem Zeitpunkt ist. Zu erkennen ist das Erreichen des Amortisationszeitpunkts als Schnittpunkt der Kurven mit der Abszisse. Die negativen Zahlenwerte entsprechen den Kosten für den Betreiber. Zu jedem Zeitpunkt sind die Kosten (negative Zahlenwerte) oder nach dem Amortisationszeitpunkt die Einsparungen (positive Zahlenwerte) dargestellt. Ausgehend von den Investitionskosten wird der eingesparte Kältepreis, der die Kosten der Kompressionskältemaschine beinhaltet, den anfallenden Zinsen und den laufenden Betriebskosten gegengerechnet. Je höher der eingesparte Anteil, verglichen zu den laufenden Kostenanteilen, ist, desto schneller amortisieren sich die Anlagen. Laufende Betriebskosten bestehen aus Strom-, Wasserpreis und Wartungskosten. Die Wartungskosten werden prozentuell von den Investitionskosten und abhängig von den Betriebszeiten berechnet.

Basierend auf der Leistung und den unterschiedlichen Funktionsweisen (trockene oder feuchte Rückkühlung) der Rückkühlanlagen ergeben sich die laufenden Kosten für Strom und beim nassen Kühlturm zusätzlich auch für Wasser.

Die ökonomischen Rahmenbedingungen wurden wie folgt festgelegt:

Zinssatz	3 %
Kältepreis	100 €/MWh
Preiserhöhung Wasser & Betrieb	1,3 %
Preiserhöhung Strom	3 %
Subvention Solaranlage	40 %
Subvention Kälteanlage	30 %
Subvention Rückkühlung	30 %
Strompreis Deutschland	8,58 €ct/kWh
Wasserpreis Deutschland	1,76 €/m ³
Strompreis Griechenland	5,7 €ct/kWh
Wasserpreis Griechenland	0,84 €/m ³

Technische Rahmenbedingungen

Als Wärmequelle für die Absorptionskältemaschine werden Solarkollektoren mit ausreichend vorhandener Antriebswärme zwischen 60 und 90 °C angenommen. Die Daten stammen aus der Simulation (vergleiche Kapitel 3.2.2). Als Absorptionskältemaschine wurde das Modell Pink 19 mit 19 kW Kälteleistung gewählt. Verglichen wurden fünf verschiedene Rückkühlsysteme: Drei verschiedene Leistungsgrößen von Axima, die als nasse Rückkühlsysteme ausgeführt sind, ein trockener Kühlturm mit der Möglichkeit Wasser einzuspritzen von Sortech und ein Hybridsystem von Güntner. Bei Sortech wird nur dann Wasser eingespritzt, wenn die Wärme nicht mehr abgeführt werden kann.

Freiburg, Deutschland

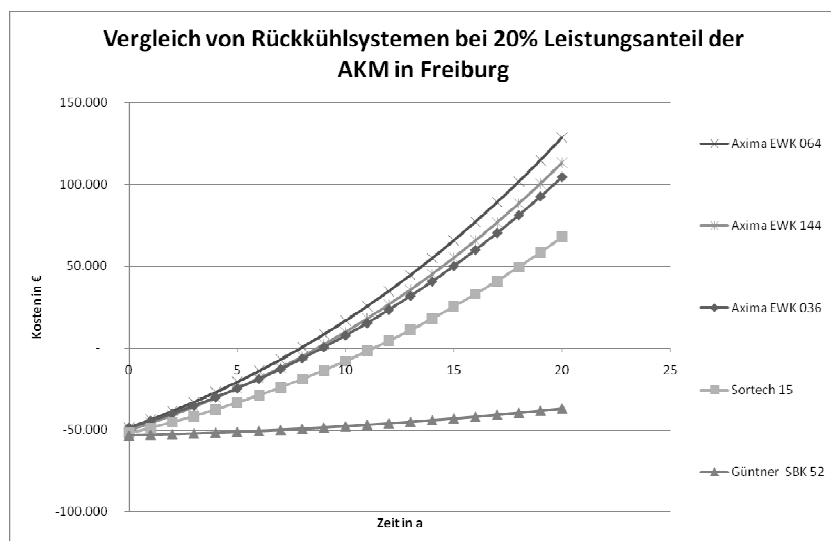


Abbildung 52: Vergleich der Amortisationskurven bei 20 % Leistungsabdeckung der Spitzenlast am Standort Freiburg

In Abbildung 52 werden für die unterschiedlichen Rückkühlanlagen Amortisationskurven für 20 % Spitzenlastabdeckung, das entspricht ca. 3700 Volllaststunden im Jahr, dargestellt. Die Investitionskosten unterscheiden sich um maximal 10 % vom Investitionspreis von einander. Die Amortisationszeit wird zwischen 7 und 11 Jahren erreicht, außer das System von Güntner kann sich an diesem Standort nicht amortisieren. Die Betriebskosten für Wasser und Strom und die Zinsen für den Kredit der Investitionskosten werden von den Einsparungen nicht maßgeblich getilgt.

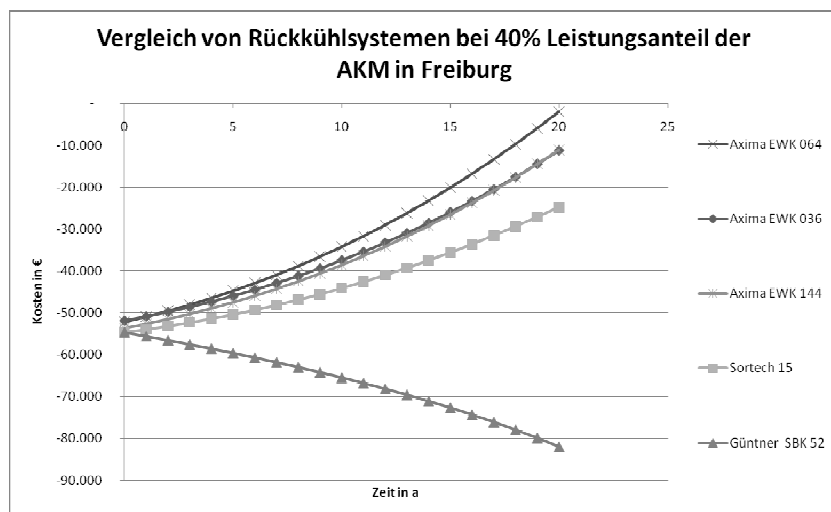


Abbildung 53: Vergleich der Amortisationskurven bei 40 % Leistungsabdeckung der Spitzenlast am Standort Freiburg

In Abbildung 53 werden dieselben Komponenten wie in Abbildung 52 miteinander verglichen. In diesem Fall werden nur 40 % der Spitzenlast, das entspricht ca. 1800 Volllaststunden im Jahr, abgedeckt. Somit sinken die Volllaststunden und folglich die zu erzielenden Einsparungen. Einzig die Rückkühlung Axima EWK 064 amortisiert sich beinahe nach 20 Jahren. Beim System von Guntner können die Einsparungen die anfallenden Zinsen und Betriebskosten nicht mehr abdecken.

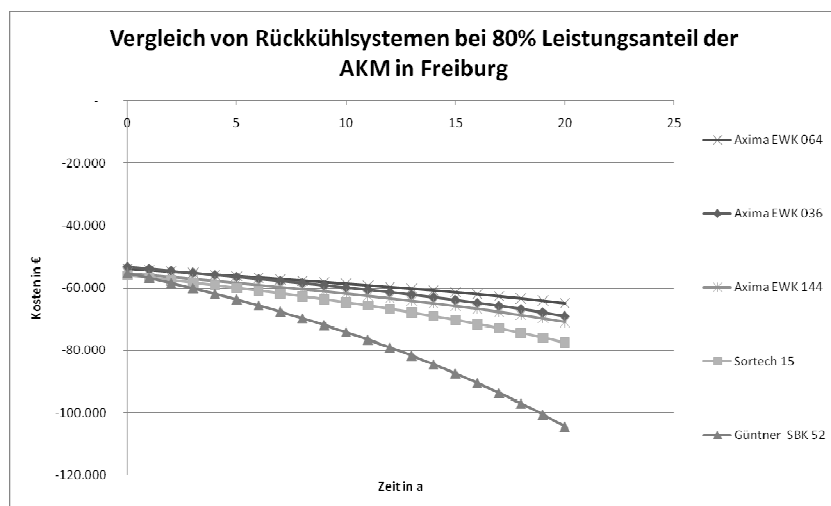


Abbildung 54: Vergleich der Amortisationskurven bei 80% Leistungsabdeckung der Spitzenlast am Standort Freiburg

In Abbildung 54 werden die verschiedenen Rückkühlsysteme bei 80% Spitzenlastabdeckung, das entspricht ca. 800 Volllaststunden im Jahr, verglichen. Bei so wenigen Volllaststunden kann sich kein System amortisieren. Die Einsparungen sind bei allen Systemen geringer als betriebsbezogene Kosten.

Athen, Griechenland

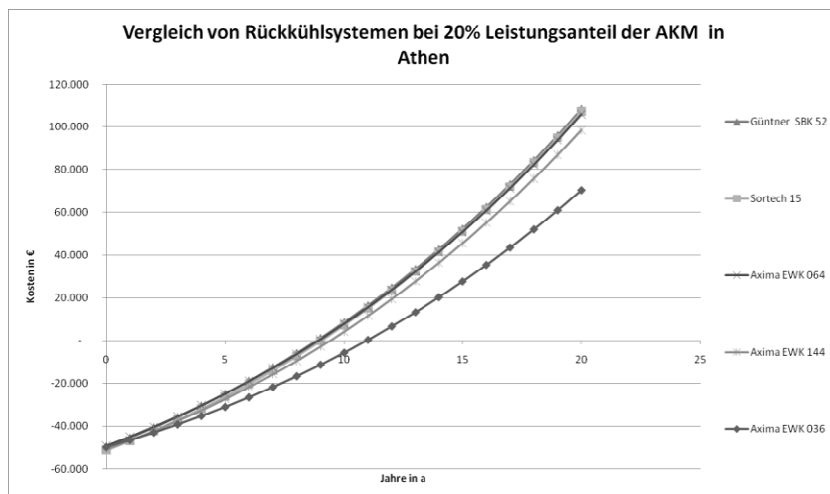


Abbildung 55: Vergleich der Amortisationskurven bei 20 % Leistungsabdeckung der Spitzenlast am Standort Athen

In Abbildung 55 werden für die unterschiedlichen Rückkühlanlagen Amortisationskurven für 20 % Spitzenlastabdeckung, das entspricht ca. 3700 Volllaststunden im Jahr, dargestellt. Die Investitionskosten unterscheiden sich um maximal 10 % vom Investitionspreis von einander. Die Amortisationszeit beträgt zwischen 8 und 11 Jahren. Verglichen zu einem Standort in Deutschland können sich alle Systeme schnell amortisieren.

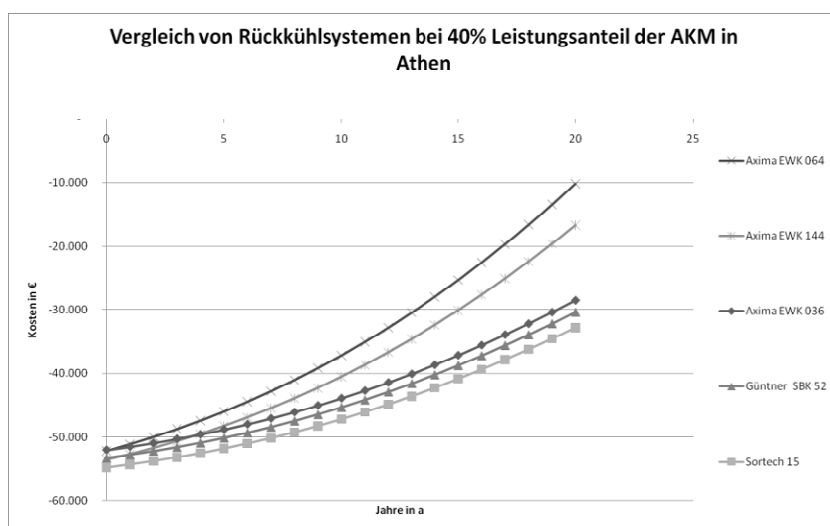


Abbildung 56: Vergleich der Amortisationskurven bei 40 % Leistungsabdeckung der Spitzenlast am Standort Athen

In Abbildung 56 werden dieselben Komponenten wie in Abbildung 55 bei 40 % der Spitzenlastabdeckung, das entspricht ca. 1800 Volllaststunden im Jahr, miteinander

verglichen. Somit sinken die Volllaststunden und folglich die zu erzielenden Einsparungen. Bei allen Systemen sind die Einsparungen noch größer als die betriebsgebundenen Kosten und anfallende Zinsen.

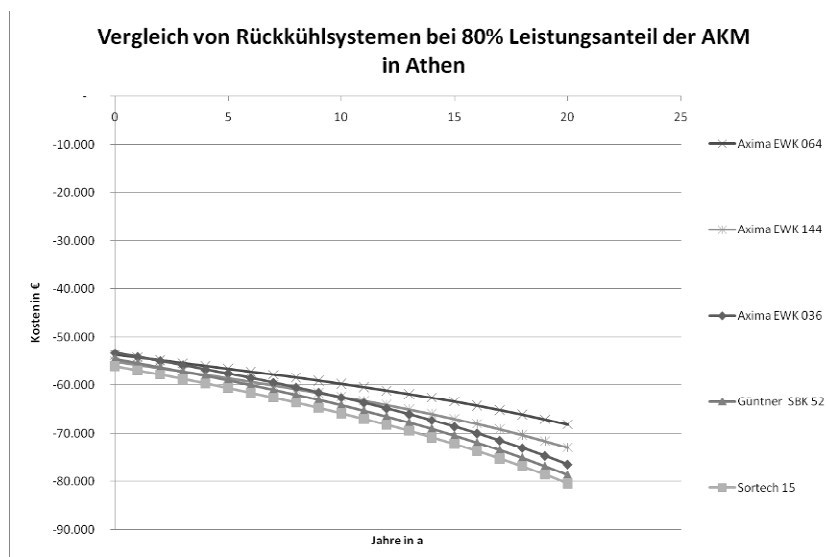


Abbildung 57: Vergleich der Amortisationskurven bei 80 % Leistungsabdeckung der Spitzenlast am Standort Athen

In Abbildung 57 werden die verschiedenen Rückkühlsysteme bei 80 % Spitzenlastabdeckung, das entspricht ca. 800 Volllaststunden im Jahr, verglichen. Bei so geringen Volllaststunden kann kein System sich amortisieren. Einsparungen sind bei allen Systemen geringer als die betriebsbezogenen Kosten.

Wirtschaftlichkeitsberechnung für Anwendungsbeispiele

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit von thermisch angetriebenen Kühltürmen stark von der Dauer des jährlichen Betriebes, sprich den Volllaststunden abhängt. Demnach ist der Einsatz von thermisch angetriebenen Sorptionskälteanlagen wirtschaftlich durchaus sinnvoll, wenn bei der Auslegung der Systeme darauf geachtet wird, dass eine hohe Anzahl von Betriebsstunden erreicht wird. Die Untersuchungen haben ergeben, dass sich ein Betrieb ab 1700 jährlichen Volllaststunden innerhalb von 20 Jahren amortisiert. Das entspricht ungefähr 35 % der Leistungsabdeckung eines Bürogebäudes. Auf Grund der Ergebnisse wird empfohlen, dass thermisch angetriebene Kälteanlagen zur Abdeckung der Grundlast eingesetzt werden sollen. Für die Auslegung bedeutet das, dass 20 % Maximalleistungsabdeckung angestrebt werden sollen. Hier können Amortisationszeiten von 7 bis 11 Jahren erreicht werden. Für trockene kontinentale Klimata wird empfohlen Nasskühlanlagen einzusetzen. In heißen und feuchten Regionen sollten Trockenkühltürme eingesetzt werden.

3.5.3 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Cashflow Diagramme zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit von thermisch angetriebenen Kühlsystemen stark von der Dauer des jährlichen Betriebes, sprich den Volllaststunden abhängt. Demnach ist der Einsatz von thermisch angetriebenen Sorptionskälteanlagen wirtschaftlich durchaus sinnvoll, wenn bei der Auslegung der Systeme darauf geachtet wird, dass eine hohe Anzahl von Betriebsstunden erreicht wird. Die Untersuchungen haben ergeben, dass sich ein Betrieb ab 1700 jährlichen Volllaststunden innerhalb von 20 Jahren amortisiert. Das entspricht ungefähr 35 % der Leistungsabdeckung eines Bürogebäudes.

Auf Grund der Ergebnisse wird empfohlen, dass thermisch angetriebene Kälteanlagen zur Abdeckung der Grundlast eingesetzt werden sollen. Für die Auslegung bedeutet das, dass 20 % Maximalleistungsabdeckung angestrebt werden sollen. Hier können Amortisationszeiten von 7 bis 11 Jahren erreicht werden. Für trockene kontinentale Klimata wird empfohlen Nasskühlanlagen einzusetzen. In heißen und feuchten Regionen sollen Trockenkühltürme eingesetzt werden (vergleiche Abbildung 52 bis Abbildung 57).

3.6 *AP 6 - Entwicklung eines Planungswerkzeugs für Anbieter von thermisch angetriebenen Kühlsystemen*

Das Pflichtenheft (siehe Anhang) bildet einige Screenshots von der Erstversion des Planungswerkzeugs für Hersteller ab. Die Oberfläche wurde möglichst Bedienerfreundlich gestaltet und ermöglicht eine einfache Benutzung.

4 Ausblick und Empfehlungen

Die Erkenntnisse aus diesem Projekt haben Forschungsthemen präzisiert, welche in einem Folgeprojekt untersucht werden sollen.

1. Wasserverbrauch

Im Zuge der Verdunstung des Kühlwassers können in Abhängigkeit vom Grad der Verdunstung und der chemischen Zusammensetzung des Frischwassers verschiedene unerwünschte hydrochemische Prozesse wie z.B. Kalkabscheidung oder Korrosion ablaufen, die die Funktionsfähigkeit des Kühlturms nachteilig beeinflussen. Andererseits führen zu kurze Abschlammintervalle zu einem überhöhten Wasserverbrauch. Bisher fehlen allerdings sowohl eine gesicherte Datenbasis als auch geeignete messtechnische Konzepte für eine optimierte und prozessgesteuerte Regelung der Abschlammung von Kühltürmen. Im Rahmen des angestrebten Projektes sollen daher neue innovative Lösungen für die genannten Fragestellungen entwickelt und getestet werden.

2. Grauwasser

Grauwasser ist geringer mit Nährstoffen belastet als kommunales Abwasser und auch die für die biologischen Abbauprozesse notwendigen Nährstoffverhältnisse sind anders. Generell ist die Zusammensetzung des Grauwassers von den einbezogenen Anfallstellen in Gebäuden abhängig. Küchenabwässer weisen eine für biologische Prozesse günstigere Zusammensetzung auf als z.B. Grauwasser von Duschen. Grauwasser hat zwar im Vergleich mit herkömmlichem Abwasser eine geringere hygienische Belastung, eine Aufbereitung ist für die sichere Anwendung als Brauchwasser aber jedenfalls erforderlich.

3. Hygienisierung

Wasserkreisläufe in Rückkühlwerken in offener bzw. halboffener Bauweise neigen zur Verkeimung durch Mikroorganismen, die sich natürlich ansiedeln. Deshalb können sie eine langfristig unmittelbare Kontaminationsquelle für die Umgebung darstellen. In den offenen bzw. halboffenen Systemen gelangt das zur Kühlung verwendete Wasser durch Versprühen in die Umwelt, und kann so bei entsprechender Kontamination mit Legionellen eine Infektionsquelle darstellen. Je nach Wasservolumen, dem zu ersetzenden Verdunstungsverlust, und dem allgemeinen Wartungszustand der Anlage ist im Falle einer Kontamination eine mehr oder weniger schnelle Vermehrung der Legionellen in diesen Systemen möglich. Zurzeit gibt es keine direkt auf Rückkühlwerke zugeschnittene Norm oder Richtlinie bezüglich der hygienischen Parameter, jedoch kann ersatzweise die VDI-Norm 6022 für raumluftechnische Anlagen, als Vorlage für Untersuchungen herangezogen werden. Hiernach sollten Legionellen in einem

Untersuchungsvolumen von 1 ml nicht nachweisbar sein.

Die Ergebnisse aus diesem Projekt zeigten, dass bei den untersuchten Strategien zur Wasserdesinfektion, insbesondere die UV-Behandlung und eine Metall-Ionendesinfektion mit Kupfer- und Silberionen, erfolversprechende und wirtschaftliche Methoden einer kontinuierlichen Wasserbehandlung von offenen Kühlkreisläufen in kleinen Rückkühlanlagen darstellen könnten. Aufbauend auf den Ergebnissen sind weiterführende Untersuchungen zur Optimierung der Regelungstechnik der Verfahren, unter besonderer Berücksichtigung des erforderlichen Wassermanagements in den Rückkühlanlagen bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen, erforderlich. Wesentliches zusätzliches Kriterium ist die Untersuchung der Übertragbarkeit der bisherigen Ergebnisse auf den Einsatz unterschiedlich aufbereiteter Grauwässer für den Kühlkreislauf.

4. Simulation

Um die komplexen physikalischen Zusammenhänge innerhalb des Systems Kühlung zu verstehen und zu erforschen ist die mathematische Simulation ein wichtiges Instrument. Dazu wird aufbauend auf den Projektergebnissen des Vorprojektes InnoCOOL das bereits bestehende mathematische Modell erweitert. Bisher konnten folgende Bestandteile eines thermisch betriebenen Kühlsystems in die Simulation aufgenommen werden: verschiedene Kältemaschinentypen, verschiedene Kühltürme, verschiedene Anwendungsfälle. Um das gesamte System richtig abbilden zu können, müssen die verschiedenen Wärmequellen (Solar, BHKW, Biomasse Fernwärme) sowie Speicher, wärme- und kälteseitig in das Modell integriert werden. Weiters sollte es kühlturmseitig um einen neuartigen Trockenkühlturm mit Wassereindüsung erweitert werden.

5 Literaturverzeichnis

PROTOZOA IN COOLING TOWERS: IMPLICATIONS FOR PUBLIC HEALTH & CHEMICAL CONTROL, Critchley & Bentham 2006, http://www.health.vic.gov.au/environment/downloads/protozoa_cooling_towers.pdf

Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J. (1999): User's guide to PHREEQC (version 2)--A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 312 p

ÖNORM M 6220

ÖNORM B5019

VDI-Norm 6022 Blatt 1 und 2

DVGW Arbeitsblatt W551 „Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen“

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Wasserdichte UV-C-Lampe Fa. SterilAir	17
Abbildung 2:	Silber/Kupferelektroden des CT-Boy für Einlegen ins Becken eines Kühlturms (Photo Fa. ECONICsystems)	18
Abbildung 3:	Trockenkühler	23
Abbildung 4:	Nasskühlturm	24
Abbildung 5:	Hybridkühler	25
Abbildung 6:	Brunnenkühlung	26
Abbildung 7:	Konzept einer Zisterne (Quelle: ZAE Bayern)	27
Abbildung 8:	Symbolisch Flusskühlung	28
Abbildung 9:	Aufbau des Simulationsmodells	31
Abbildung 10:	Kühltürme die in die Simulation aufgenommen wurden	32
Abbildung 11:	Kennfeld „Axima - EWK 036“	33
Abbildung 12:	In der Simulation berücksichtigte Kältemaschinen	34
Abbildung 13:	Kennfeld „Pink – PSC 14“	35
Abbildung 14:	In der Simulation berücksichtigte Wärmeerzeuger	36
Abbildung 15:	Kühlzwecke der Simulation	37
Abbildung 16:	in der Simulation berücksichtigte Standorte	38
Abbildung 17:	In der Simulation berücksichtigte Verbraucher	38
Abbildung 18:	Simulationsumgebung „simplex“	40
Abbildung 19:	Detailergebnisse für einen einzelnen Stundenwert als Graphik	41
Abbildung 20:	Ergebnisse der Jahressimulation	43
Abbildung 21:	Unterschiedliche Leistungsabdeckung	43
Abbildung 22:	Ergebnisse der UV Desinfektionsmaßnahme im Bach-Versuch	46
Abbildung 23:	Ergebnisse der Metall - Desinfektionsmaßnahme im Batch-Versuch	47
Abbildung 24:	Ergebnisse der thermischen Desinfektion im Batch-Versuch	48
Abbildung 25:	Teststandkomponenten im Freien	49
Abbildung 26:	Teststandkomponenten im frostsicheren Gebäude	49
Abbildung 27:	Schema des Teststandes	50
Abbildung 28:	Verfahrensschema der Technikumsanlage mit einer Darstellung der Entnahmepunkte der Proben zur bakteriologischen Quantifizierung	51
Abbildung 29:	Natürliche bakterielle Besiedelung der Technikumsanlage nach Inbetriebnahme im Vergleich zur Entwicklung des gelösten organischen Kohlenstoffs im Wasserkreislauf	52
Abbildung 30:	Ergebnisse der UV Desinfektion in der Technikumsanlage	53
Abbildung 31:	Durchschnittliche Verlaufskurven der Keimkonzentration bei Behandlung des Wasserkreislaufs mit einer Kupfer-Silber Elektrode in der Technikumsanlage	55
Abbildung 32:	Keimbelastungen aus der Abluft des Kühlturms im Vergleich zur Keimbelastung der Umgebungsluft während der Behandlung des Kühlwassers mittels einer Kupfer-Silber Elektrode in der Technikumsanlage	56
Abbildung 33:	Durchschnittliche Verlaufskurven der Keimkonzentration bei intermittierender thermischer Behandlung (Zyklus 60°C-30 Minuten) des Wasserkreislaufs	57
Abbildung 34:	Durchschnittliche Verlaufskurven der Keimkonzentration bei intermittierender thermischer Behandlung (Zyklus 60 °C – 120 Minuten) des Wasserkreislaufs	58

Abbildung 35:	Durchschnittliche Verlaufskurven der Keimkonzentration bei intermittierender thermischer Behandlung (Zyklus 60 °C – 240 Minuten) des Wasserkreislaufs.....	58
Abbildung 36:	Verlauf der Chloridkonzentration und des pH-Wertes (Sekundärachse) in der Simulation (grüne und rote Kurve) und Darstellung der gemessenen Chloridwerte (blaue Quadrate).....	61
Abbildung 37:	Verlauf der Kalkabscheidung (rote Kurve, Sekundärachse) pro Simulationsschritt und der Chloridkonzentration in der Simulation (grüne Kurve), sowie Darstellung der gemessenen Chloridkonzentrationen (blaue Quadrate).....	62
Abbildung 38:	Verhältnisse bei Verwendung von Umkehrosmosewasser für die Erstbefüllung des Kühlturmes. Verlauf der Kalkabscheidung (rote Kurve, Sekundärachse) pro Simulationsschritt und der Chloridkonzentration in der Simulation (grüne Kurve), sowie Darstellung der gemessenen Chloridkonzentrationen (blaue Quadrate).	63
Abbildung 39:	Verhältnisse bei Erstbefüllung und Betrieb mit Umkehrosmosewasser. Verlauf der Kalkabscheidung (rote Kurve, Sekundärachse) pro Simulationsschritt und der Chloridkonzentration in der Simulation (grüne Kurve), sowie Darstellung der gemessenen Chloridkonzentrationen (blaue Quadrate).....	64
Abbildung 40:	Verhältnisse bei kontinuierlichem Betrieb durch Ablassen von 24 Liter Wasser aus dem Kühlturm pro Tag und Kompensation durch Leitungswasser. Verlauf der Kalkabscheidung (rote Kurve, Sekundärachse) pro Simulationsschritt und der Chloridkonzentration in der Simulation (grüne Kurve), sowie Darstellung der gemessenen Chloridkonzentrationen (blaue Quadrate).....	65
Abbildung 41:	Verhältnisse bei kontinuierlichem Betrieb durch Ablassen von 12 Liter Wasser aus dem Kühlturm pro Tag und Kompensation durch Leitungswasser. Verlauf der Kalkabscheidung (rote Kurve, Sekundärachse) pro Simulationsschritt und der Chloridkonzentration in der Simulation (grüne Kurve), sowie Darstellung der gemessenen Chloridkonzentrationen (blaue Quadrate).....	65
Abbildung 42:	Steigerung der Speicherfähigkeit durch latente Wärme (Quelle: ZAE Bayern).....	72
Abbildung 43:	Ladung des Latentwärmespeichers während des Tages (Quelle: ZAE Bayern).....	73
Abbildung 44:	Entladung des Latentwärmespeichers während der Nacht (Quelle: ZAE Bayern).....	74
Abbildung 45:	Einbindung Erdsonden bei thermischer Kühlung.....	76
Abbildung 46:	Einbindung Erdsonden	77
Abbildung 47:	Anteile der Investitionskosten	79
Abbildung 48:	Anteile der laufenden Kosten	79
Abbildung 49:	Verbrauchsanteile der elektrischen Energie	80
Abbildung 50:	Investitionskostenvergleich von alternativen Rückkühlanlagen	81
Abbildung 51:	Betriebskostenvergleich von alternativen Rückkühlanlagen.....	82
Abbildung 52:	Vergleich der Amortisationskurven bei 20 % Leistungsabdeckung der Spitzenlast am Standort Freiburg	85
Abbildung 53:	Vergleich der Amortisationskurven bei 40 % Leistungsabdeckung der Spitzenlast am Standort Freiburg	85

Abbildung 54:	Vergleich der Amortisationskurven bei 80% Leistungsabdeckung der Spitzenlast am Standort Freiburg	86
Abbildung 55:	Vergleich der Amortisationskurven bei 20 % Leistungsabdeckung der Spitzenlast am Standort Athen	87
Abbildung 56:	Vergleich der Amortisationskurven bei 40 % Leistungsabdeckung der Spitzenlast am Standort Athen	87
Abbildung 57:	Vergleich der Amortisationskurven bei 80 % Leistungsabdeckung der Spitzenlast am Standort Athen	88

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bewertung von Legionellenbefunden nach DVGW Arbeitsblatt W551 ..	14
Tabelle 2:	Vor- (+) und Nachteile (-) unterschiedlicher Behandlungstechniken (http://www.lenntech.com/water-treatment-chemicals.htm ,)	15
Tabelle 3:	Ergebnis (E1.1) Verzeichnis der am Markt vorhandenen Rückkühlsysteme.	22
Tabelle 4:	Übersicht über Rückkühlsysteme und ihre Vor- und Nachteile.....	29
Tabelle 5:	Detaillergebnisse für einen einzelnen Stundenwert als Tabelle	42
Tabelle 6:	Exemplarischer Datensatz der Simulationsergebnisse.....	44
Tabelle 7:	Ergebnisse der UV Desinfektionsmaßnahme im Batch-Versuch.....	45
Tabelle 8:	Ergebnisse der Metall - Desinfektionsmaßnahme im Batch-Versuch	46
Tabelle 9:	Ergebnisse der thermischen Desinfektion im Batch-Versuch	48
Tabelle 10:	Ergebnisse der UV Desinfektion in der Technikumsanlage.....	53
Tabelle 11:	Entwicklung der Konzentration an luftgetragenen Keimen in der Abluft des Kühlturms im Vergleich zur Grundbelastung der Umgebung.....	54
Tabelle 12:	Entwicklung der Konzentration an luftgetragenen Keimen in der Abluft des Kühlturms im Vergleich zur Grundbelastung der Umgebung bei unterschiedlichen thermischen Desinfektionsmaßnahmen.....	59
Tabelle 13:	Bakteriologische Untersuchungsergebnisse aus dem Wasserkreislauf von 2 Nasskühltürmen in der Steiermark.....	59
Tabelle 14:	Kalkabscheidung im Kühlturm für die verschiedenen Szenarios über 52 Tage	66
Tabelle 15:	Ergebnisse der Wasseranalysen	67
Tabelle 16:	Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der untersuchten Desinfektionsmaßnahmen	69
Tabelle 17:	Jahreskosten für hygienische Maßnahmen für einen Nasskühlturm (30 kW) über eine Betriebszeit von 15 Jahren.....	70

IMPRESSUM

Verfasser

JOANNEUM RESEARCH
Forschungsgesellschaft mbH

Wolfgang Pribyl
Leonardstraße 59, 8010 Graz
E-Mail: gef@joanneum.at

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH