

NEUE ENERGIEN 2020

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Zero CO₂ Cooler – der Kühlschrank mit Warmwasseranschluss

Projektleiter:

GrAT – Gruppe Angepasste Technologie

Projektpartner:

SolarFrost Forschung und Entwicklung GmbH

EUDORA/ADL Dienstleistung und Systemvertrieb für Elektrogeräte GmbH

Autoren und Autorinnen:

Kapitel 1, 2, 6, 7, 8, 9:

Dr. Robert Wimmer

Chaipipat Pokpong, MID

DI (FH) Sören Eikemeier

DI Shima Goudarzi

Magdalena Burghardt, MA

GrAT – Gruppe Angepasste Technologie

Kapitel 3, 4, 5:

Dr. Gerhard Kunze

SolarFrost

2014

NEUE ENERGIEN 2020

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Inhalt

1	Einleitung	6
2	Grundlagenanalyse und Anforderungsprofil	7
2.1	Hintergrund: Herausforderungen und Motivation	7
2.1.1	Wachsender Kühlbedarf	7
2.1.2	Steigender Stromverbrauch	7
2.1.3	Anpassung an den tatsächlichen Energiebedarf	8
2.1.4	Entwicklung erneuerbarer Energien: Solarwärme	11
2.1.5	Kühlen ohne Strom – historischer Hintergrund	13
2.2	Marktanalyse	14
2.2.1	Derzeit erhältliche Kühl- und Gefriergeräte	14
2.2.2	Eigenschaften von Kühl- und Gefriergeräten	15
2.2.3	Umweltrelevanz	16
2.3	Definition der Zielgruppe	18
2.3.1	Anforderungen der Zielgruppe an Kühl- und Gefriergeräte – Fragebogenerhebung	21
2.3.2	Ergebnisse der Fragebogenerhebung	23
2.4	Grundlegende Kriterien für die Entwicklung des Zero CO ₂ Cooler	25
2.4.1	Grundlegende technische Funktionen des ZCC	25
2.4.2	Mögliche Zusatznutzen für die KonsumentInnen	26
2.5	Klärung rechtlicher Rahmenbedingungen	28
3	Planung von Funktionsmodellen (Dr. Kunze, SolarFrost)	29
3.1	Konventionelle Kühlung mit Ammoniak-Wasser	29
3.1.1	Grundprinzip	29
3.1.2	Die konventionelle Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschine	30
3.2	Ammoniak (NH ₃) als Kältemittel	31
3.2.1	Sicherheit beim Arbeiten mit Ammoniakkühlung	31
3.2.2	Problemgebiete	32
3.2.3	Klassifikation der Aufstellungsbereiche von Ammoniak-Kälteanlagen	35
3.2.4	Schlussfolgerungen für die Verwendung von Ammoniak	36
4	SolarFrost und das Icebook (Dr. Kunze, SolarFrost)	38
4.1	Grundideen	38
4.1.1	Diskussion der Projektvorgaben und deren theoretischer Umsetzbarkeit	38
4.1.2	Bauweise, die in automatischer Massenproduktion gefertigt werden kann	40

4.2	Darstellung des Konzepts (Patente)	41
4.3	Neuartige Bauteile und Komponenten inklusive Erfahrungen	46
4.3.1	Verdampfer	46
4.3.2	Absorber	48
4.3.3	Generator	49
4.3.4	Schwimmerventile statt Drosseln	50
4.3.5	Druckabsenker (DAS)	54
4.3.6	Plattenbauweise	55
4.4	Innovative Lösungsbewegung	58
4.5	Variable Lösungskonzentration	58
5	Praktische Umsetzung des Konzepts, Funktionsmodelle (Dr. Kunze, SolarFrost)	59
5.1	Das 1kW-Icebook	61
5.2	Das 500W-Icebook mit Behältern	64
5.3	Das 200W-Icebook ohne externe Behälter	79
5.4	Das voll integrierte Icebook, 500 W	81
5.5	Vergleich der Funktionsmodelle	84
5.6	Tests für optimale Position der Zu- und Ableitungen	85
5.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	87
6	Entwurf möglicher Produktvarianten	89
6.1	Designkonzept	89
6.1.1	Nutzeranforderungen	90
6.1.2	Anwenderfreundlichkeit	90
6.1.3	Vereinfachte und günstige Produktion	91
6.2	Designvarianten	91
6.2.1	Design A	92
6.2.2	Design B	93
6.2.3	Design C	94
6.3	Evaluation der Designs	95
6.3.1	Zugänglichkeit	96
6.3.2	Handhabung der Lebensmittel	96
6.3.3	Luftzirkulation	98
6.3.4	Platzbedarf für das Öffnen der Tür	98
6.3.5	Reinigung	99
6.3.6	Zusammenfassung	100
6.4	Weiterentwicklung des Designs und der Details	100
6.4.1	Doppelwandige Glastür	100
6.4.2	Energiesparendes Design	101
6.4.3	Musterversuche	102
6.5	Konstruktion des Prototyps	103
6.6	Entwicklung des Verdampfers	107
6.7	Funktionen und Spezifikationen des ZCC-Prototyps	109
7	Integration in ein Gesamtsystem	111
7.1	Standort des Prototyps	111
7.2	Technische Beschreibung des Systems	112
7.2.1	Vakuumkollektoren	113
7.2.2	Biomassekessel	115
7.2.3	Warmwasserspeicher	115

7.3	Die Haushaltsanwendungen im Layout	116
7.3.1	Geschirrspüler	116
7.3.2	Waschmaschine	117
7.3.3	Thermischer Wäschetrockner	118
7.3.4	Thermischer Haartrockner	119
7.3.5	Anschluss elektrisch betriebener Geräte für Vergleichsmessungen	120
7.4	Zero CO ₂ Cooler	121
7.4.1	Anschluss des Zero CO ₂ Coolers	121
7.4.2	Inbetriebnahme und Test	122
7.5	Steuer-, Regelungs- und Kontrollsystem	124
7.6	Monitoringsystem	126
8	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	132
9	Ausblick und Empfehlungen	133
10	Literaturverzeichnis	135
11	Abbildungsverzeichnis	137
12	Tabellenverzeichnis	143
13	Anhang	144

1 Einleitung

Der Gebäudesektor gehört neben Verkehr und Industrie zu den größten Energieverbrauchern (40 % des Energieverbrauchs in der EU¹). Der steigende Bedarf an elektrischer Energie im Haushalt fällt zusammen mit einem stärkeren Verbrauch von Ressourcen für die Bereitstellung. Dieser Entwicklung kann begegnet werden, indem Versorgung und Bedarf gemeinsam berücksichtigt werden: erstens indem erneuerbare Energien für die Stromproduktion verstärkt genutzt werden oder Elektrizität durch andere Energieformen ersetzt wird, zweitens indem überprüft wird, welche Energiedienstleistungen von den NutzerInnen tatsächlich gebraucht werden, und indem darauf angepasste Lösungen auf Basis erneuerbarer Energie entwickelt werden. Die erste Methode setzt an der Versorgungsseite an, die zweite an der Verbraucherseite.

Das Projekt Zero CO₂ Cooler griff diese doppelte Strategie auf, um ein alternatives Kühl- und Gefriergerät mit einer thermisch basierten Kühltechnologie zu entwickeln, welches ohne die Verluste funktioniert, wie sie üblicherweise bei der Umwandlung von thermischer in elektrische Energie und bei der weiteren Umwandlung von elektrischer Energie für thermische Energiedienstleistungen (z. B. Heizen, Kühlen) auftreten. Damit wird den Zielen des Programms Neue Energien 2020 in Bezug auf Energiebedarf und -versorgung sowie Klimaschutz entsprochen.

Die Kühltechnologie, die für den Zero CO₂ Cooler herangezogen wurde, wird „Icebook“-Technologie genannt. Das Icebook des Projektpartners SolarFrost ist eine Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschine, die mit einem patentierten Kühlkreislauf bei einem Temperaturniveau (Warmwasser) läuft, welches bisher dafür ungeeignet erschien, da für konventionelle Absorptionskühlgeräte eine höhere Betriebstemperatur erforderlich ist. Ebenfalls neu sind das Konstruktionsprinzip und die Form. Im Gegensatz zu konventionellen Kühlsystemen, die aus einer Reihe von Wärmetauschern bestehen, die durch ein relativ kompliziertes Netz aus gebogenen Rohren und Verschraubungen verbunden werden, ist das Icebook wie ein Buch aus einem Plattenblock aus verschiedenen Materialien aufgebaut. Für die Nutzung in einem Haushaltskühlschrank müssen Anpassungen dieser Technologie vorgenommen werden. Entsprechende Weiterentwicklungen wurden von SolarFrost im Rahmen dieses Projekts durchgeführt.

Das Design des Haushaltskühlschranks Zero CO₂ Cooler wurde von GrAT basierend auf einer Zielgruppen- und Marktanalyse entwickelt und in 3D-Modellen und einem Designprototyp umgesetzt. Im folgenden Kapitel 2 werden die Ausgangssituation und die Grundlagen für die Entwicklung des solar betriebenen thermischen Kühlschranks dargelegt. Dazu gehören Fragen des Energieverbrauchs sowie eine Analyse der Zielgruppen für ein solches neues Produkt. Die Kapitel 3, 4 und 5 wurden vom Projektpartner SolarFrost verfasst und beschreiben dessen Kühltechnologie der Absorptionskältemaschine Icebook und die Entwicklungen, die von SolarFrost im Zuge dieses Projekts durchgeführt wurden. Kapitel 6 zeigt verschiedene von GrAT entworfene Designvarianten für den Zero CO₂ Cooler und die Herstellung eines Designprototyps auf Grundlage der ausgewählten Variante.

¹ RICHTLINIE 2010/31/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, S. 1.

2 Grundlagenanalyse und Anforderungsprofil

Das Projekt Zero CO₂ Cooler verfolgte das Ziel, eine Alternative zu konventionellen Kühl- und Gefriergeräten zu entwickeln, die einen geringeren Primärenergieverbrauch und damit geringere CO₂-Emissionen mit sich bringt. Für den Zero CO₂ Cooler sollten erneuerbare Energieträger (Solarwärme) genutzt und ein Produkt entwickelt werden, das KonsumentInnen durch seine Neuheit und seine ökologischen Vorteile anspricht. Dementsprechend wurden Zielgruppen definiert und darauf aufbauend das Anforderungsprofil für Design und Entwicklung des Kühlschranks abgeleitet. Diese Aspekte werden im Folgenden dargestellt.

2.1 Hintergrund: Herausforderungen und Motivation

2.1.1 Wachsender Kühlbedarf

Der globale Kühlbedarf steigt kontinuierlich. Im Sommer werden vermehrt Klimaanlage und KonsumentInnen erwerben aufgrund wirtschaftlicher und praktischer Überlegungen zunehmend Tiefkühlprodukte. Die dadurch verstärkte Nutzung von Kühlung, Klimatisierung und Gefrierung resultiert in steigenden Energiekosten und Kohlendioxidemissionen. Hier liegt daher ein gewaltiges Einsparpotenzial.

2.1.2 Steigender Stromverbrauch

Der weltweite Energieverbrauch ist in den letzten Jahren ebenfalls stetig angestiegen. Das unten abgebildete Diagramm und die folgende Tabelle zeigen die globale Stromproduktion und den Verbrauch an. Die Differenz zwischen dem produzierten und dem verbrauchten Strom ist der Verlust, welcher durch Leitung und Verteilung mit einzukalkulieren ist (Index Mundi, o. J.a, b).

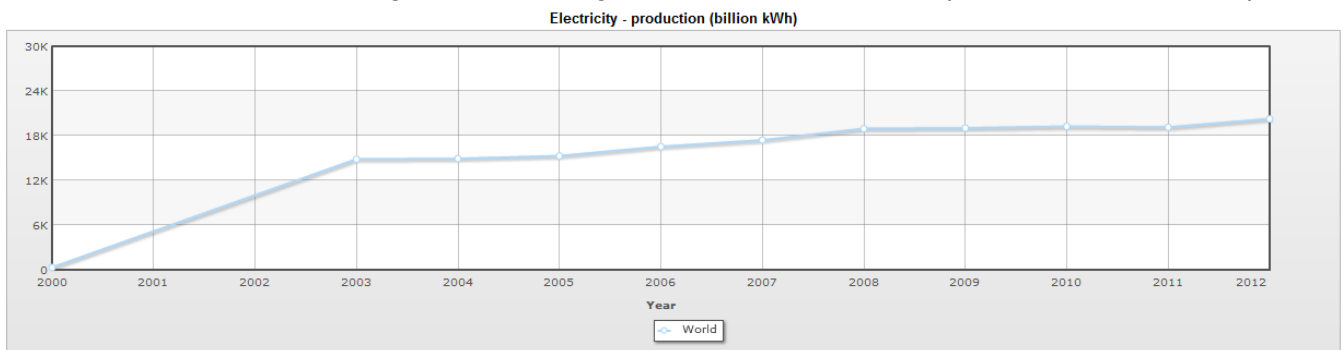


Abbildung 1: Globale Produktion von Elektrizität von 2003 bis 2012 (Index Mundi, o. J.a)

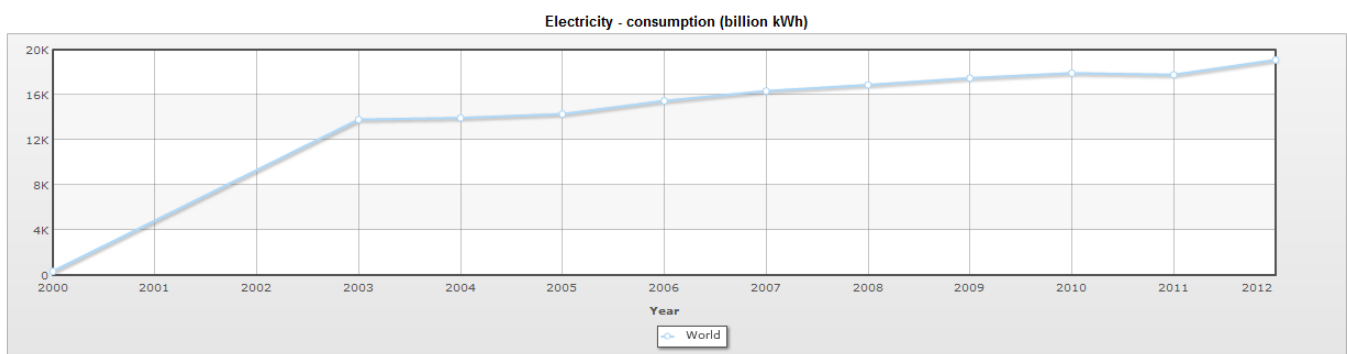


Abbildung 2: Globaler Verbrauch von Elektrizität von 2003 bis 2012 (Index Mundi, o. J.b)

Tabelle 1: Globale Produktion und Verbrauch von Elektrizität von 2003 bis 2010 (Quelle der Daten: Index Mundi, o. J.a, b)

Jahr	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Produktion von Elektrizität	14,85	14,93	15,29	16,54	17,40	18,96	19,02	19,25	19,12	20,25
Verbrauch von Elektrizität	13,81	13,94	14,28	15,45	16,33	16,88	17,48	17,93	17,78	19,09

Aufgrund des Bevölkerungswachstums und des technischen Fortschritts wird auch in den nächsten Jahren der Stromverbrauch steigen. Des Weiteren werden höchstwahrscheinlich auch der erhöhte Bedarf an Elektroautos (laut Umweltministerium sollen bis 2020 250.000 E-Autos auf Österreichs Straßen unterwegs sein [e-connected, o. J.]; Stichtag 31.12.2012: 1389 E-Autos [Statistik Austria, o. J.]) und die Telekommunikationsbranche unweigerlich diesen Trend beschleunigen. Die International Energy Agency schätzt, dass der weltweite Energiebedarf sich bis 2030 bis 53 % erhöhen wird (IEA, 2006). Die European Environment Agency hat analysiert, dass das mit der Attraktivität von Elektrizität zusammenhängt, speziell mit den flexiblen Anwendungsmöglichkeiten von elektrischer Energie (EEA, 2008).

2.1.3 Energieverbrauch ist einer der Hauptgründe für die Ausbeutung von Primärenergieressourcen. Etwa 80 % der zur Verfügung gestellten elektrischen Energie werden aus fossilen Brennstoffen wie Kohle, Erdöl und Erdgas sowie durch Atomkraft gewonnen, was auch mit hohen Verlusten einhergeht (EEA, 2008; U.S. Environmental Protection Agency, 2008). Ein herkömmliches Kohlekraftwerk hat lediglich einen Wirkungsgrad von 34 % (IEA, 2008). Einige Nationen setzen vorwiegend auf nukleare Energiegewinnung. Allerdings hat erst in jüngster Vergangenheit der Reaktorunfall in Fukushima die gewaltigen Risiken der Atomenergie für die Menschheit und die möglichen ökologischen Auswirkungen für zahlreiche zukünftige Generationen gezeigt. Deutschland und die Schweiz haben daraufhin den vollständigen Ausstieg aus der Nuklearenergie bis 2034 beziehungsweise 2022 angekündigt (Cole, 2011). Die Schließung dieser Kraftwerke setzt natürlich voraus, dass rasch Lösungen gefunden werden, welche den Verbrauch elektrischer Energie reduzieren. Anpassung an den tatsächlichen Energiebedarf

Ein Weg zur Reduktion des Stromverbrauchs liegt darin, den tatsächlichen Energiebedarf genauer zu betrachten und daran angepasst die Energie in der effizientesten Form gezielt bereitzustellen. Damit werden Verluste vermieden, welche vor allem bei der Umwandlung von thermischer in elektrische Energie entstehen. Denn die meisten neuen Produkte in Haushalt oder im Büro benötigen Strom zum Betrieb, unabhängig davon, welche Energiedienstleistung (z. B. Heizen, Kühlen, ...) sie eigentlich erbringen.

Abbildung 3 und Tabelle 2 zeigen die Aufteilung des Stromverbrauchs in österreichischen Haushalten. Raumheizung hat statistisch mit 20,5 % nach wie vor den größten prozentuellen Anteil. Große Haushaltsgeräte wie Herde, Öfen, Waschmaschinen, Trockner und Geschirrspüler haben einen Anteil von ca. 17,4 % am gesamten Stromverbrauch, gefolgt von der Warmwasserbereitung mit 17,1 %. Kühlschränke und Gefrierschränke sind für etwa 12 % des Verbrauchs verantwortlich. Die

Beleuchtung benötigt 9 %. Alle anderen Küchen-, Haushalts- und Unterhaltungsgeräte, wie z. B. Staubsauger oder PC, beanspruchen in Summe weniger als 25 % des gesamten Stromverbrauchs.

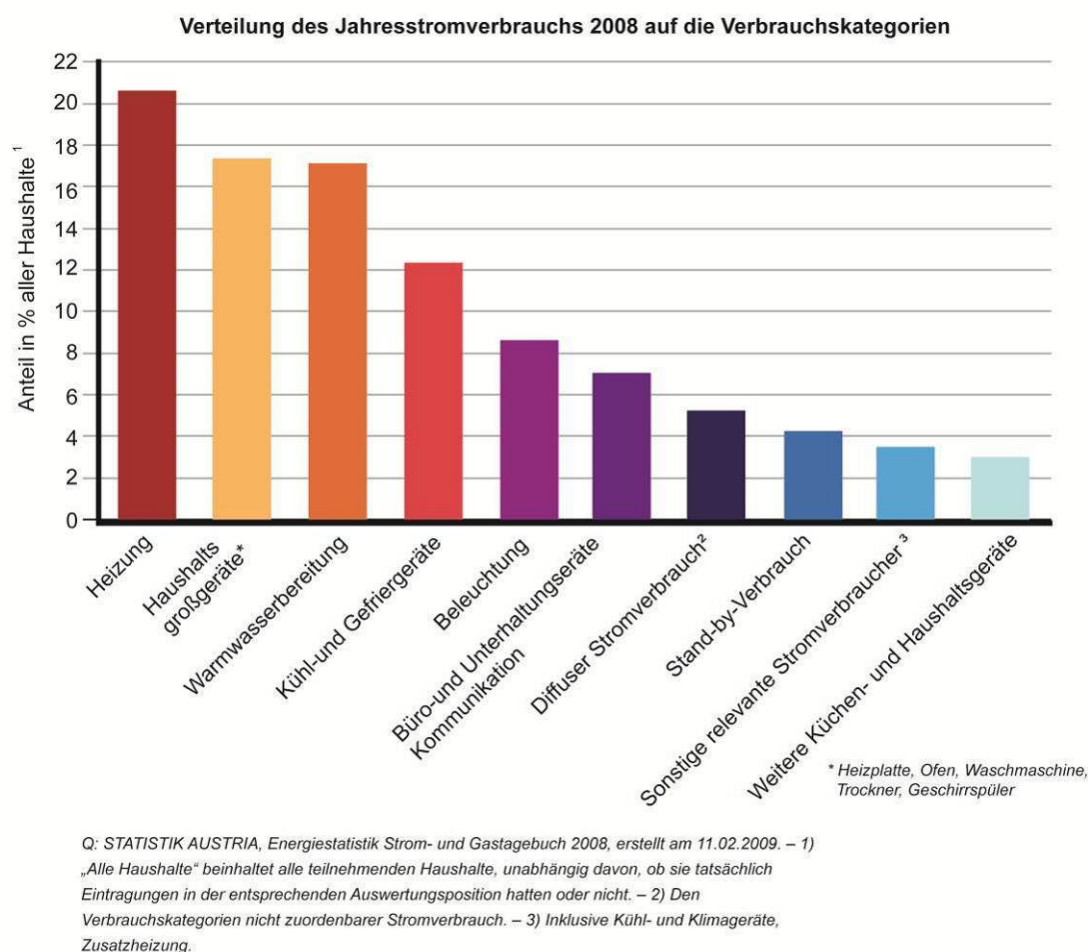


Abbildung 3: Jahresstromverbrauch 2008 nach Verbrauchskategorien (Statistik Austria, 2009)

Tabelle 2: Stromverbrauch 2008 nach Verbrauchskategorien und Geräten (Statistik Austria, 2009)

	Anteil in %
Gesamtverbrauch (basierend auf täglichen Messungen)	100,0
Heizung	20,5
Heizung inklusive unterstützender Elektrizität	15,2
Umwälzpumpe für das Heizsystem	5,3
Große Haushaltsgeräte	17,4
Herd, Backrohr	7,7
Waschmaschine	4,0
Geschirrspüler	4,0
Wäschetrockner	1,7
Warmwasserbereitung	17,1
Kühl- und Gefriergeräte	12,3
Kühlschrank	7,0
Gefriergerät	5,3
Beleuchtung	8,6

Büro-, Unterhaltungs- und Telekommunikationsgeräte	7,0
Unterhaltungselektronik (TV etc.)	4,2
Bürogeräte (PC, Laptop etc.)	2,2
Telekommunikationsgeräte	0,6
Unspezifizierter Verbrauch	5,2
Stand-by-Verbrauch	4,2
Unterhaltungselektronik (TV etc.)	2,9
Küchen- und Haushaltsgeräte	0,7
Bürogeräte (PC, Laptop etc.)	0,3
Herd, Backrohr	0,3
Andere Küchen- und Haushaltsgeräte	3,6
Andere relevante Geräte	2,7
Andere relevante Geräte	2,3
Ladegeräte	0,4

Betrachtet man nicht den Verbrauch, sondern die erbrachte Energiedienstleistung, dann kann die Tabelle neu gruppiert werden in 1) thermische Energiedienstleistungen und 2) Energiedienstleistungen, die nicht mittels anderer Energieträger realisiert werden können (siehe Tabelle 3 und Abbildung 4). Der Gesamtstromverbrauch der Geräte, die thermische Energiedienstleistungen erfüllen, beträgt 75 %, die zweite Gruppe verbraucht 25 %.

Tabelle 3: Neugruppierung von Haushaltsgeräten nach Energieform

Thermische Energiedienstleistungen	Elektrische Energiedienstleistungen
Raumheizung Große Haushaltsgeräte Warmwasserbereitung Kühl- und Gefrierschrank	Beleuchtung Büro-, Unterhaltungs- und Telekommunikationsgeräte Andere Küchen- und Haushaltsgeräte
75 % des gesamten Stromverbrauchs	25 % des gesamten Stromverbrauchs

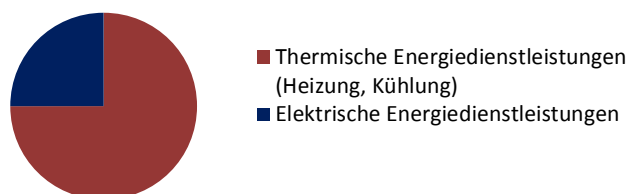


Abbildung 4: Aufteilung des Stromverbrauchs nach Energieform

Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass die thermischen Anwendungen wie Heizen oder Kühlen den Großteil der Elektrizität verbrauchen. Andere Funktionen dieser Geräte, wie z. B. Ventilator im Backrohr, Antrieb der Trommel in der Waschmaschine brauchen bei weitem nicht so viel Elektrizität wie Heizstäbe oder Kühlaggregate.

Anhand dieser Analyse zeigt sich ein signifikantes Einsparpotenzial für elektrischen Strom, wenn man die thermischen Energiedienstleistungen direkt mit thermischer Energie betreibt, z. B. mit Solarthermie, Biomasse und Biogas. Das Elektrizitätseinsparpotenzial durch diese direkte thermische Energieversorgung kann auf mehr als 80 Prozent des derzeitigen Verbrauchs geschätzt werden.

Um das Einsparpotenzial im Sektor der Kühl- und Gefriergeräte besser einschätzen zu können, wurden verschiedene Gerätegruppen bzgl. ihres Energieverbrauches verglichen (Tabelle 4). Die Jahresverbrauchsdaten wurden mithilfe des Online-Tools <https://www.energiesparcheck.at/> ermittelt.

Tabelle 4: Stromverbrauch unterschiedlicher Kühlgeräte

Szenarios	Beschreibung der Parameter	Energieverbrauch / Jahr (kWh)
Kühlschrank	Ein altes Modell (>20 Jahre) mit einem Nutzvolumen >200 l ohne Gefrierfach	401,5
	Ein modernes Modell (<5 Jahre) mit einem kleineren Nutzvolumen (< 200 l) ohne Gefrierfach, Energielabel A++ ²	85
Kühl-/ Gefrierkombination	Ein altes Modell (>20 Jahre) mit einem Nutzvolumen >200 l und einem Gefrierfach	885
	Ein modernes Modell (<5 Jahre) mit einem kleineren Nutzvolumen (<200 l) und einem Gefrierfach, Energielabel A++	172
Gefriergerät	Ein altes Modell (>20 Jahre) mit einem großen Nutzvolumen (>200 l)	991
	Ein modernes Modell (<5 Jahre) mit einem kleineren Nutzvolumen (<200 l), Energielabel A++	132
Gefriertruhe, nach oben zu öffnen	Ein altes Modell (>20 Jahre) mit einem großen Nutzvolumen (>200 l)	942
	Ein modernes Modell (< 5 Jahre) mit einem kleineren Nutzvolumen (<200 l), Energielabel A++	147

Die oben angeführte Tabelle zeigt auf, wie viel Strom bei Kühl- und Gefriergeräten eingespart werden kann. Abhängig vom Alter und Volumen der betriebenen Geräte können mindestens 85 kWh und maximal 942 kWh Strom pro Jahr eingespart werden, wenn man sie mit thermischer Energie betreiben kann. Der Trend bei Neugeräten geht dabei zu energieeffizienteren, aber größeren Geräten, wodurch oft die höhere Effizienz wieder kompensiert wird.

Thermische Energie wird im industriellen Maßstab häufig für Kühlzwecke eingesetzt, im kleinen Maßstab sind thermisch betriebene Kühlgeräte allerdings unüblich und auf Sonderfälle beschränkt, z. B. mobile Kühlschränke in Wohnmobilen oder geräuschlose Minibar-Kühlschränke in Hotels.

2.1.4 Entwicklung erneuerbarer Energien: Solarwärme

Können erneuerbare Ressourcen fossile Brennstoffe ersetzen? Die folgende Abbildung zeigt eine Aufteilung des Energieverbrauchs (REN21, 2013). Trotz des erhöhten Interesses an erneuerbaren Energiequellen stellen diese lediglich 19 % der gesamten Energieversorgung dar. Eine schnellere und effizientere Entwicklung in diesem Bereich bei gleichzeitiger Reduktion der nicht erneuerbaren Ressourcen ist daher unbedingt notwendig.

² Im Jahr 1992 wurde das EU-Energielabel eingeführt, und es dauerte mehrere Jahre, bis es am Markt verbreitet war. Daher ist das Energielabel für die meisten Produkte, die älter als 15 Jahre sind, nicht vorhanden.

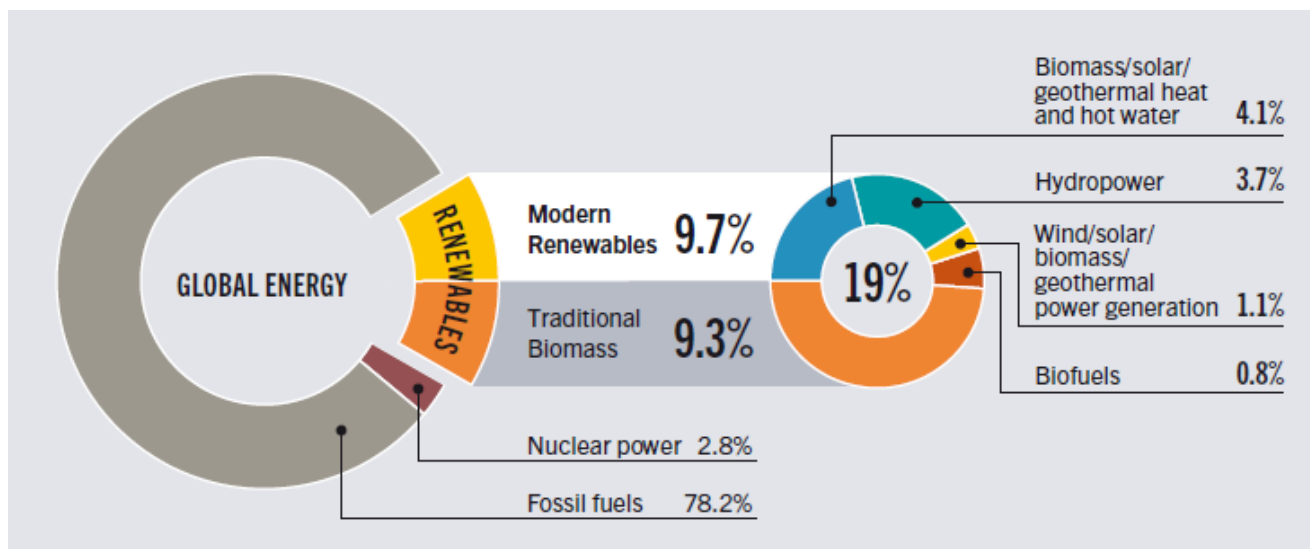


Abbildung 5: Anteil erneuerbarer Energieträger am globalen Gesamtenergieverbrauch (REN21, 2013)

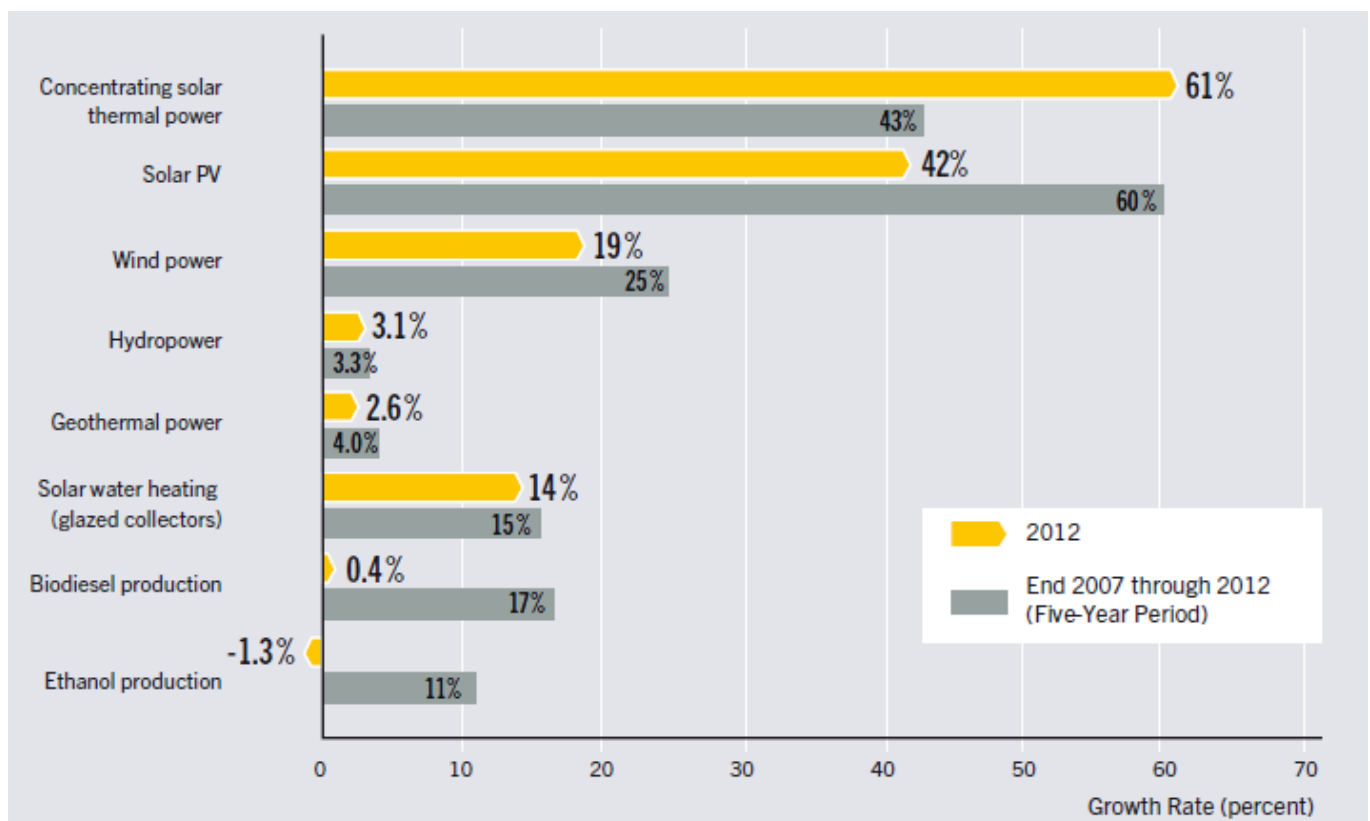


Abbildung 6: Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten der Kapazität erneuerbarer Energien und Biotreibstoffproduktion, 2007-2012 (REN21, 2013)

Die globale solarthermische Kapazität sämtlicher Kollektortypen stieg von 234,6 GW_{th} in 2011 auf geschätzte 282 GW_{th} in 2012, wovon sowohl für die neu installierten als auch für die Gesamtkapazitäten die größten Anteile mit ca. 90 % in China und Europa zu finden sind.

Solarkollektoren werden weltweit von mehr als 70 Millionen Haushalten verwendet, aber auch von zahlreichen Schulen, Krankenhäusern, Hotels und öffentlichen Gebäuden.

In Österreich wurden im Jahr 2012 209.630 m² thermische Solarkollektoren installiert, womit am Ende des Jahres 2012 insgesamt 4,9 Millionen m² in Betrieb waren. (Biermayr et al., 2013)

Auch der Einsatz von Biomasse und geothermischer Energie für Industrie, Wohngebäude und Landwirtschaft wird immer populärer. Zusätzlich zeigt sich der Trend, solare Ressourcen für die Produktion von Prozesswärme in der Industrie zu nutzen, und das Interesse an solarem Kühlen steigt ebenso (REN21, 2013).

2.1.5 Kühlen ohne Strom – historischer Hintergrund

Kühlgeräte auf Basis von Solarwärme sind eigentlich nicht neu, und erste Prototypen wurden bereits vor langer Zeit entwickelt und demonstriert. Im Jahr 1867 wurde von A. Mouchot eine Solardampfmaschine entwickelt, die für den Betrieb einer Eismaschine verwendet werden konnte. Somit wurden die Möglichkeiten des solaren Kühlens bereits bei der EXPO Paris 1878 (Exposition Universelle) veranschaulicht.

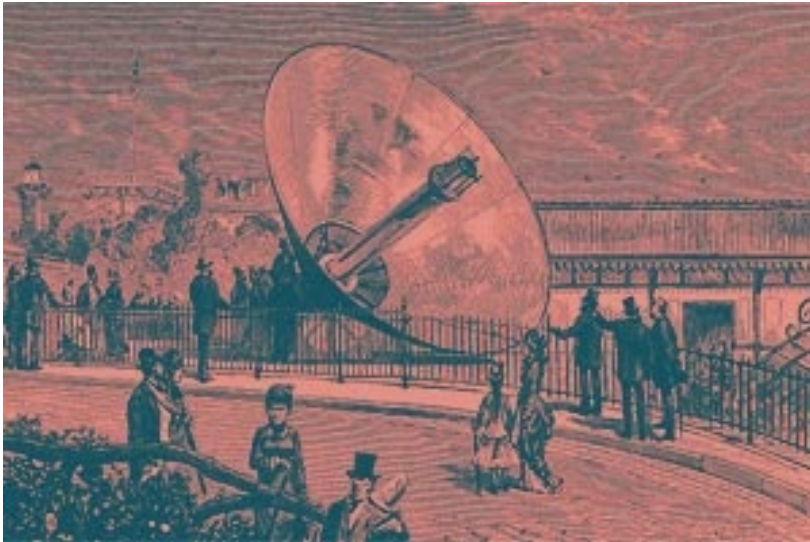


Abbildung 7: Solardampfmaschine für die Erzeugung von Eis, EXPO Paris 1878 (Leuschner, U.) Eiserzeuger

Diese solarbasierten Kühltechnologien wurden kontinuierlich weiterentwickelt. Im August 1935 wurde vom amerikanischen Ingenieur Otto H. Mohr ein Kühlgerät vorgestellt, das mit zwei Stunden solarer Einstrahlung pro Tag betrieben werden konnte (Modern Mechanix, 1935). Die folgende Abbildung zeigt eine Illustration des Wirkungsmechanismus auf Basis von Ammoniak und Solarwärme.

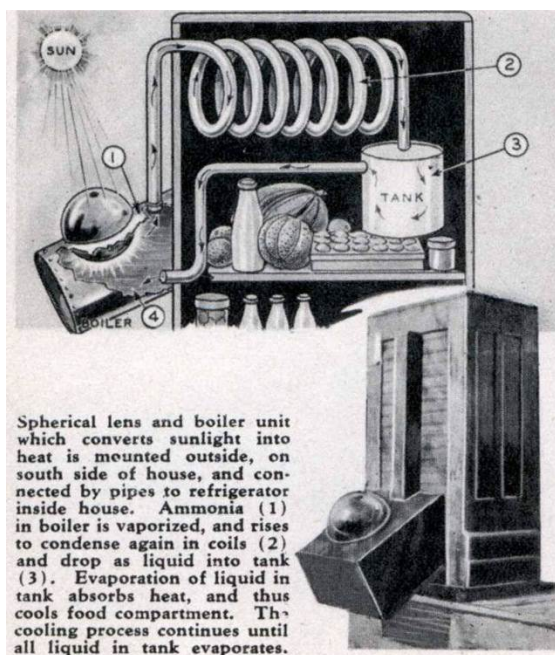


Abbildung 8: Artikel über einen solaren Kühlschrank (Modern Mechanix, 1935)

Ungeachtet der Machbarkeit des solaren Kühlens und der Realisierung in einem konkreten Konsumprodukt wurden diese Lösungen durch die Verfügbarkeit von billigem Strom vom Markt verdrängt. Kompressorbetriebene Kühlschränke erfuhren aufgrund deutlicher Preiserückgänge eine gesteigerte Akzeptanz in den 1930er-Jahren. Billiger Strom, bedingt durch die massiv gestiegene Exploration fossiler Ressourcen, trug ebenfalls erheblich zur Verbreitung elektrisch betriebener Kühlgeräte bei. Heutzutage sind keine solarthermisch betriebenen Kühlschränke am Haushaltsgerätemarkt verfügbar.

Das solare Kühlen wurde in jüngster Zeit eigentlich nur im Industriemaßstab angewandt. Mit dem Zero CO₂ Cooler soll diese mit Solarwärme compatible Anwendung auch in privaten Haushalten ermöglicht werden. Mit einer derartigen Lösung kann der wachsende Kühlbedarf gedeckt werden, ohne gleichzeitig den Stromverbrauch und den Verbrauch fossiler Energieträger weiter zu erhöhen. Für die Entwicklung eines Haushaltsgerätes ist zunächst der Markt genau zu analysieren. Weiters sind die Anforderungen der NutzerInnen zu berücksichtigen, um die Spezifikationen des Produkts an den Bedarf anzupassen und um die Attraktivität des Produkts für die Zielgruppe zu erhöhen. Diese Markt- und Zielgruppenanalyse wird im Folgenden dargestellt.

2.2 Marktanalyse

Der ZCC wurde als Alternative zu konventionellen Kühlgeräten entwickelt. Im folgenden Überblick werden am Markt erhältliche Produkte in Bezug auf Typen, technische und Nutzerfunktionen sowie Design-Aspekte verglichen sowie Entwicklungstrends analysiert. Dabei wurden auch Funktionen betrachtet, die über das Kühlen und Gefrieren hinausgehen.

2.2.1 Derzeit erhältliche Kühl- und Gefriergeräte

Es gibt verschiedene Typen von Kühlgeräten, die auf unterschiedliche Nutzergruppen und Bedürfnisse abgestimmt sind. Neben allgemein üblichen Produkten gibt es Geräte mit speziellen Temperatur- und Feuchtigkeitslevels. Tragbare Kühlgeräte werden für Camping, militärische oder medizinische Zwecke verwendet.



Abbildung 9: Unterschiedliche am Markt erhältliche Kühl-/Gefriergeräte³

2.2.2 Eigenschaften von Kühl- und Gefriergeräten

Kühlgeräte am Markt haben üblicherweise ähnliche Erscheinungsformen (Form, Material, Farbe) und ähnliche Kühlsysteme. Das Kühlsystem, bestehend aus Kompressor, elektrischem Motor und Wärmetauscher hinter dem Gerät, beeinflusst direkt die Größe und Leistung des Produkts. Zusätzliche Komponenten sind Tür(en), Deckel und andere Elemente wie z. B. Wasserspender. Diese Elemente sind meistens sichtbar und deshalb wichtig für die Kaufentscheidung.

Die folgende Liste (Tabelle 5) zeigt kühlspezifische und zusätzliche Eigenschaften, die derzeitige Produkte am Markt bieten.

Tabelle 5: Verschiedene Funktionen und Eigenschaften bestehender Geräte

Kühlspezifische Funktionen	Zusätzliche Eigenschaften
☐ No-frost-Kühlschrank ☐ Frischezone bei 0 °C ☐ Individuelle Temperaturregelung für verschiedene Fächer ☐ Schockkühlung (dynamic cooling) für einzelne Fächer ☐ Schmelzalarm: Ton, wenn Tür länger als 1 Minute offen ist ☐ In Tür integrierter Wasser-/Eisspender	☐ Display für Innentemperatur ☐ Bakterienschutz ☐ Geruchsbindung ☐ Bei Stromausfall: Information über verbleibende Lagerungszeit ☐ Tür adaptierbar für Links-/Rechtshänder ☐ Änderbare Grafik/Material auf Tür ☐ Sicherheitsglas ☐ Integrierter LCD-Bildschirm/DVD-Player ☐ Integrierter Flaschenhalter ☐ Internetverbindung/elektronische Rezepte ☐ Musik bei Türöffnen (z. B. „Indischer Markt“)

³ Bildquellen: 1) <http://www.samsungusanews.com/index.jsp?menu=photos&album=7&gallery=13>

2) <http://www.priceit.in/price-of-refrigerators/electrolux-eqe600-600l-frost-free-refrigerator-price/>

3) <http://www.foodandhome.com/product/whirlpool-helps-consumers-cook-and-clean-efficiently>

4) <http://compareindia.in.com/smart-shopping-specials/electronics/the-hightech-womans-ultimate-kitchen-part-ii/1102/2>

5) <http://www.warnersstellian.com/products/10609>

6) <http://www.theelectricdiscount.com.au/asps/category1.asp?category=Top%20mount%20less%20than%20400%20litre>

7) <http://www.tradekorea.com/sell-leads-detail/S00030526/wine%20cooler%20refrigerator.html>

8) <http://www.chinawholesalegift.com/2/refrigerator/>

9) <http://www.samstores.com/Store.asp?CtgID=634>

10) <http://www.lusso-online.co.uk/hotpoint-ncd191i-90cm-fridge-drawer.html>

Einige der aufgelisteten Funktionen, wie ein integrierter LCD-Bildschirm, ein DVD-Player oder Internetverbindung, sind am Markt nicht weit verbreitet und hängen stark von kulturellen und individuellen Vorlieben ab.

Die International Standardisation Organisation (ISO) kategorisiert Kühlgeräte nach einer Reihe von technischen Funktionen, nach der Art des Türmechanismus, Temperaturlevels usw. Diese Details wurden bei der Definition der grundlegenden Ausführung und der funktionalen Spezifikationen des ZCC berücksichtigt. Von den zusätzlich möglichen Funktionen sollen diejenigen im ZCC berücksichtigt werden, die anhand der Zielgruppenanalyse (siehe Kap. 2.3) als prioritär eingestuft werden.

2.2.3 Umweltrelevanz

Der einzige verfügbare Indikator für die Umweltrelevanz eines Kühlgeräts ist dessen Stromverbrauch. Die Energieeffizienz von Kühlgeräten hat sich in den letzten Jahren deutlich erhöht, die Nachfrage nach effizienteren Geräten ebenso. Aktuelle Modelle verbrauchen viel weniger Energie als ältere. Seit Jänner 2011 werden die neuen EU-Energieeffizienzlabel angebracht (A+++ bis D). Eine Reihe von Parametern werden bei der Berechnung der Energieeffizienz berücksichtigt, z. B. Energieverbrauch, Volumen, niedrigste Temperatur usw. (topprodukte.at, 2011). Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für das neue Label mit den entsprechenden Informationen.



- 1 **Hersteller** Typenbezeichnung
- 2 **Energieeffizienzklasse**
- 3 **Energieverbrauch** in kWh/Jahr*
- 4 **Gesamtnutzzinhalte aller Kühlfächer**
(Fächer ohne Sternkennzeichnung)
- 5 **Gesamtnutzzinhalte aller Tiefkühlfächer**
(Fächer ohne Sternkennzeichnung)
- 6 **Geräuschemission** in dB(A)

Abbildung 10: Energieeffizienzlabel (topprodukte.at, 2011)

Tabelle 6 zeigt die Energieeffizienzklassen von Kühl- und Gefriergeräten (topprodukte.at, 2011). Sie zeigt, dass ein Gerät der Klasse A++ um etwa 40 % weniger Energie verbraucht als eines mit gleichem Nutzvolumen der Klasse A.

Tabelle 6: Energieeffizienzklassen von Kühl- und Gefriergeräten (topprodukte.at, 2011)

Energieeffizienzklasse	Energie-Effizienz-Index (EEI)	Durchschnittliche Einsparung im Vergleich mit Klasse „A“
A+++ (höchste Effizienz)	EEI < 22	60 %
A++	22 ≤ EEI < 33	40 %
A+	33 ≤ EEI < 44	20 %

A	$44 \leq \text{EEI} < 55$	
B	$55 \leq \text{EEI} < 75$	
C	$75 \leq \text{EEI} < 95$	
D	$95 \leq \text{EEI} < 110$	

Die aktuelle Marktsituation in Österreich zeigt einen zunehmenden Trend von energieeffizienten Kühlgeräten (Neugeräte). Der Anteil der verkauften Kühlgeräte der Energieeffizienzklasse A++ stieg im Zeitraum 2010-2011 von 15,3 % auf 20,3 % und der Anteil in der Geräte der Energieeffizienzklasse A+ von 39,8 % auf 48,3 %. Der Anteil weniger effizienter Kühlschränke hingegen ging deutlich zurück (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Verkaufte Kühlgeräte in Österreich 2010/2011 (Branchenrecherche Eudora)

Verkaufte Kühlgeräte in Österreich (Angaben in Tsd.)	2010		2011	
Type - Gesamt	209,6	%	219,1	%
Freistehend	111,1	53,0	121,2	55,3
Einbau	98,6	47,0	97,9	44,7
Unbekannt	0,0	0,0	0,0	0,0
Tür/Höhe/Gefrierkombi - Gesamt	209,6	%	219,1	%
1 Tür/ bis zu 80 cm	3,0	1,4	3,9	1,8
1 Tür/ 81 - 90 cm	98,1	46,8	94,2	43,0
1 Tür/ >90 cm	25,2	12,0	29,0	13,2
2 Türen/ Gefrierfach oben	22,3	10,6	21,4	9,8
2 Türen/ Gefrierfach unten	55,2	26,3	63,7	29,1
Doppeltür	5,4	2,6	6,5	3,0
3+ Türen	0,3	0,1	0,3	0,1
Unbekannt	0,2	0,1	0,1	0,0
Breite - Gesamt	209,6	%	219,1	%
Bis zu 50 cm	26,6	12,7	24,9	11,4
51 - 55 cm	95,1	45,4	93,3	42,6
56 - 60 cm	81,2	38,7	91,9	42,0
61 - 70 cm	0,6	0,3	1,5	0,7
> 70 cm	6,0	2,9	7,3	3,3
Unbekannt	0,2	0,1	0,2	0,1
Energieeffizienzklasse - Gesamt	209,6	%	219,1	%
A++	32,0	15,3	44,4	20,3
A+	83,5	39,8	105,9	48,3
A	85,1	40,6	60,2	27,5
B	8,5	4,0	5,4	2,5
C	0,1	0,0	0,1	0,0
D	0,0	0,0	0,0	0,0
E	0,0	0,0	0,0	0,0
F	0,1	0,0	0,1	0,0
G	0,0	0,0	0,0	0,0
Unbekannt	0,4	0,2	3,1	1,4

2.3 Definition der Zielgruppe

Der Zero CO₂ Cooler unterscheidet sich von anderen Systemen durch seine Technologie, seine Eigenschaften und auch sein Design. Deshalb ist auch die Zielgruppe der NutzerInnen anders definiert als jene für konventionelle Kühlgeräte. Der ZCC soll speziell auf ausgewählte Konsumentengruppen abzielen.

Die Methode der sogenannten Sinus-Milieus® wird genutzt, um diese Zielgruppen einzugrenzen. Die Sinus-Milieus differenzieren gesellschaftliche Gruppen nach ihrer sozialen Lage („Unterschicht“ bis „Oberschicht“) und ihrer Grundorientierung (von „Traditionelle Werte“ über „Modernisierung“ bis „Neuorientierung“).

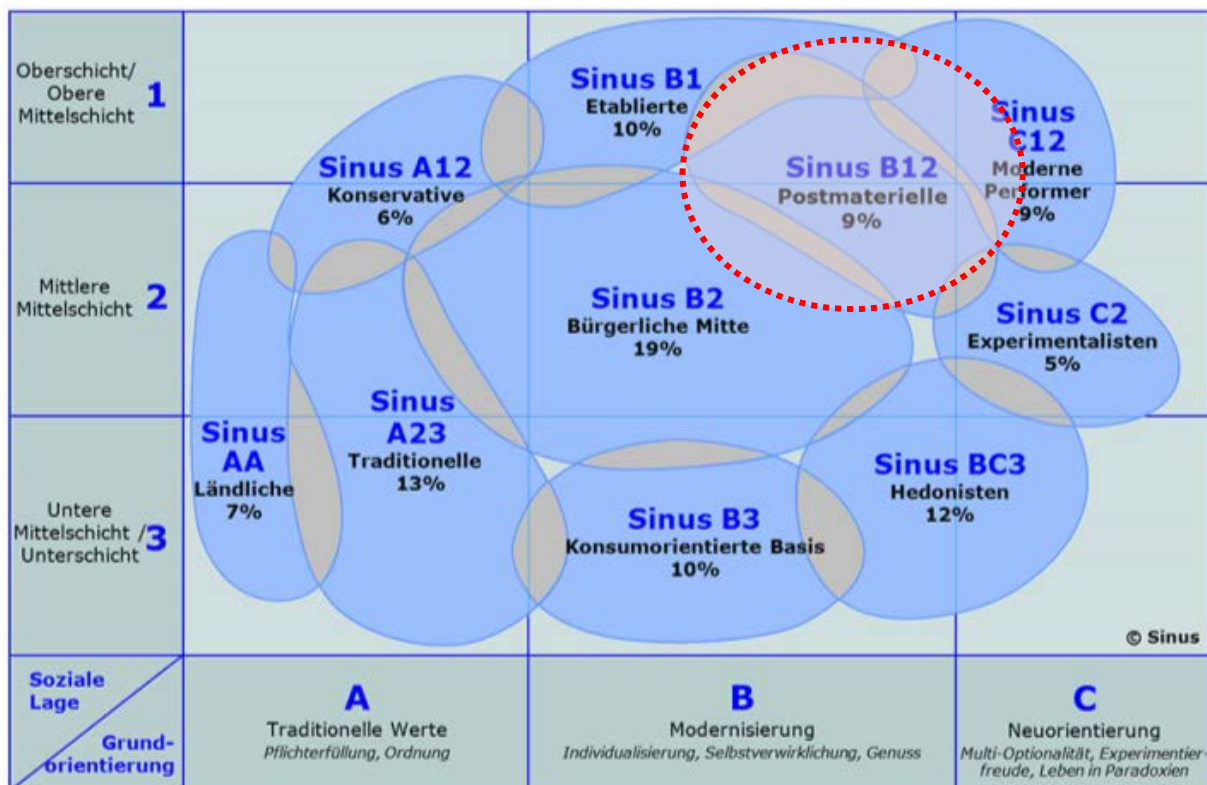


Abbildung 11: Sinus-Milieus® in Österreich: soziale Lage und Grundorientierung (Sinus) und Zielgruppe des Zero CO₂ Coolers (rot umrandet) (Sinus, bearbeitet)

Tabelle 8: Kurzcharakteristik der Sinus-Milieus (Medienforschung-ORF, 2007)

GEOBENE MILIEUS		
Etablierte 12 %	Postmaterielle 12 %	Moderne Performer 10 %
Die erfolgs- und leistungsbewusste Elite: Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsdenken; ausgeprägte Exklusivitätsansprüche	Aufgeklärt, kosmopolitisch, progressiv; Deregulierungs- und Globalisierungskritiker; vielfältige kulturelle und intellektuelle Interessen	Die junge, unkonventionelle Nachwuchselite: flexibel und leistungsorientiert; intensiv leben, beruflich wie privat; Multimedia-begeistert
TRADITIONELLE MILIEUS		
Konservative 6 %	Traditionelle 13 %	Ländliche 6 %
Christlich-soziales Gedankengut; ausgeprägtes Pflicht- und Verantwortungsgefühl; hohe	Die Sicherheit und Stabilität liebende Kriegs- und Nachkriegsgeneration; verwurzelt in der alten	Im traditionell-ländlichen Milieu verwurzelt: Landbesitz, Familie, Gemeinde und Kirche werden als selbstverständlicher

Wertschätzung von Bildung und Kultur	kleinbürgerlichen Welt bzw. in der traditionellen Arbeiterkultur	Rahmen des Alltagslebens gesehen
MAINSTREAM-MILIEUS		
Bürgerliche Mitte 19 %		Konsumorientierte Basis 8 %
Der konventionelle Mainstream: Streben nach einem angemessenen sozialen Status und einem komfortablen, harmonischen Privatleben		Die stark materialistisch geprägte moderne Unterschicht: Anschluss halten an die Konsumstandards der breiten Mitte als Kompensationsversuch sozialer Benachteiligungen
HEDONISTISCHE MILIEUS		
Experimentalisten 6 %		Hedonisten 8 %
Die extrem individualistische neue Bohème: Freiheit, Spontaneität und Originalität, Leben mit den Widersprüchen		Die jüngere Unter- und untere Mittelschicht: Suche nach Spaß und Unterhaltung; Verweigerung gegenüber den Erwartungen und Konventionen der Leistungsgesellschaft

Aus der Analyse der Sinus-Milieus ergibt sich eine erste Zielgruppe für den ZCC: Diese besteht aus den sogenannten modernen Performern, den Postmateriellen und den Experimentalisten. Diese Milieus werden durch ihre soziale Situation und durch ihre progressive Einstellung gegenüber neuen (technologischen) Entwicklungen und Experimenten definiert. Es ist anzunehmen, dass sie neue Haushaltsgeräte, die sich von konventionellen Massenprodukten abheben und die neue Erfahrungen oder Nutzungsmöglichkeiten versprechen, mit Interesse aufnehmen und (auch zu einem höheren Preis) kaufen werden, insbesondere dann, wenn sie klare Umweltvorteile bieten. Diese Konsumentengruppen präsentieren sich wahrscheinlich auch gerne als Avantgarde, indem sie innovative Nischenprodukte besitzen und nutzen. Das Design ist in diesem Fall besonders wichtig, da es die Besonderheit des Produkts und die Identität der NutzerInnen unterstreicht.

Diese Erkenntnisse flossen in das Design des ZCC ein (vgl. Kapitel 6). Für diese Zielgruppe wurde ein Stand-alone-Modell entwickelt, das nach individuellen Vorlieben in der Wohnung oder im Haus platziert werden kann. Das entwickelte Modell kann beispielsweise auch in einem anderen Raum als der Küche installiert werden, um Repräsentationszwecke zu erfüllen. Aber nicht nur das Design, sondern vor allem die Art der Energieversorgung präsentiert den ZCC als innovativ (vgl. Kapitel 4.2).

Eine zweite Möglichkeit neben dem Stand-alone-Modell wäre ein integriertes Modell, das zusammen mit dem Energieversorgungssystem installiert werden kann. Daraus ergibt sich eine zweite Zielgruppe für den ZCC (die sich teilweise auch mit der soeben beschriebenen überschneiden), nämlich solche, die einen Hausbau planen. Die gemeinsame Installation (z. B. mit einer Solaranlage zur Bereitstellung der thermischen Energie) ist einfacher vorzunehmen, wenn das Haus neu geplant und errichtet wird, also bei Neubauten, aber auch bei Gesamtanierungen.

Die Zielgruppe der „Hausbauer“ ist statistisch bekannt: Für das Jahr 2010 wurden für Österreich 15.127 neu gebaute Ein- und Zweifamilienhäuser angegeben (siehe Abbildung 11).

Jahr	Ein- und Zweifamilienhäuser - Hausbau	Veränderung gegenüber Vorjahr	Mehrgeschossbauten	Veränderung gegenüber Vorjahr	Sontige Gebäude	Veränderung gegenüber Vorjahr
2005	17562		18266	1606+	7831	
2006	19013	1451+	19872	1606+	8549	718+
2007	17602	1411-	18384	1488-	7838	712-
2008	16088	1513-	15443	2942-	6825	1013-
2009	15260	828-	14981	462-	6596	228-
2010	15127	133-	14796	155-	5574	1023-
2011	13735	1393-	14235	531-	5849	276+
Detaillierte Aufteilung 2010						
Österreich	15127					
Burgenland	830					
Kärnten	1050					
Niederösterreich	4165					
Oberösterreich	2571					
Salzburg	988					
Steiermark	2378					
Tirol	1521					
Vorarlberg	834					
Wien	790					
<i>Quelle Statistik Austria, Wifo</i>						

Abbildung 12: Statistische Daten zum Hausbau (Ein- und Zweifamilienhäuser) in Österreich

Für den ZCC sind vor allem jene Gebäude interessant, in denen Solaranlagen installiert werden. Im Jahr 2012 wurden 209.630 m² Solarkollektoren neu installiert, davon etwa 50 % im Neubau und etwa 20 % im Rahmen einer Gesamtanierung, der Rest (30 %) entfällt auf Einzelmaßnahmen. Insgesamt waren in Österreich Ende 2012 etwa 4,9 Mio. m² Kollektoren in Betrieb. Fast alle bestehenden Kollektoren (90 % der Gesamtfläche) befinden sich auf Einfamilienhäusern, der Rest auf Mehrfamilienhäusern, Hotels und Fernwärmesystemen. Im Bereich der Mehrfamilienhäuser ist im Jahr 2012 bei den neu installierten Kollektoren ein Anstieg von 30% zu beobachten. Im Vergleich zur Gesamtfläche stellen sie jedoch weiterhin nur einen geringen Prozentsatz dar (Biermayr et al. 2013).

Aus den Daten ergibt sich für den ZCC die Zielgruppe der EigentümerInnen, die das Energieversorgungssystem ihres Hauses auf thermische Energie (mit Solaranlagen, aber auch mit anderen erneuerbaren Energieträgern) ausrichten.

Eine besondere Untergruppe der Neubauten ergibt sich mit dem wachsenden Fertigteilhaussektor. Der Anteil von Einfamilienhäusern in Fertigteilbauweise am österreichischen Markt für Neubauten beträgt für das Jahr 2012 31 % bzw. 27 % für Fertigteilhäuser nach ÖNORM B 2310 (Österreichischer Fertighausverband, 2013). Durch die werkseitige Installation von Haustechnik und Komponenten kann der ZCC optimal in das Energieversorgungssystem integriert werden.

Durch die verschiedenen technischen und nutzerspezifischen Anforderungen wird sich die alternative integrierte Variante auch im Design vom Stand-alone-Modell unterscheiden.

2.3.1 Anforderungen der Zielgruppe an Kühl- und Gefriergeräte – Fragebogenerhebung

Um mit bestehenden Produkten am Markt konkurrieren zu können, soll der ZCC nicht nur technische Funktionen erfüllen, sondern auch in Bezug auf Nutzerfreundlichkeit, ökologische und ökonomische Aspekte und ästhetische Eigenschaften besser abschneiden.

Die Entwicklung des Geräts ist daher stark auf die Nutzeranforderungen ausgerichtet: Welche funktionalen und ästhetischen Charakteristika werden erwartet und gewünscht? Und wie können diese Anforderungen in technische und Design-Lösungen überführt werden? Diese Fragen werden mithilfe der bereits beschriebenen Marktanalyse und der folgenden Nutzeranalyse beantwortet.

Um die verschiedenen Erwartungen der NutzerInnen an Kühl- und Gefriergeräte zu ermitteln, wurde ein Fragebogen erstellt, der Informationen über NutzerInnen, ihre Wünsche und Meinungen sowie Vorlieben in Bezug auf Kühlgeräte und Nutzerverhalten erhob. Im Folgenden werden die verschiedenen erfragten Aspekte beschrieben und erklärt, wieso diese für die Entwicklung des ZCC relevant sind. (Fragebögen und Auswertung finden sich im Anhang I–III.)

Analyse aktueller Geräte

Im Fragebogen wurde nach den Kühl- und Gefriergeräten gefragt, welche die Befragten derzeit besitzen und nutzen.

Anzahl und Typ der Geräte: Heutzutage hat jeder Haushalt mindestens einen Kühlschrank, aber viele haben zusätzliche Kühl- und Gefriergeräte für verschiedene Zwecke und unterschiedliche Typen – entweder nur Kühl-/nur Gefriergerät, getrennte oder kombinierte Geräte. Dieser Aspekt wurde gemeinsam mit der demografischen Information analysiert und damit, ob die Kapazität angemessen ist und welche Funktionen die NutzerInnen sich wünschen.

Aufstellungsort: Wo sind die Kühlgeräte platziert? Meistens stehen sie in der Küche. zusätzliche Kühlschränke können auch im Keller oder im Wohnzimmer aufgestellt werden. Mithilfe der Ergebnisse aus dieser Frage kann das System für die Kaltluftzufuhr entwickelt werden.

Alter und Energieeffizienz: Anhand dieser Eigenschaften kann das Energiesparpotenzial ermittelt werden.

Faktoren für (Un-)Zufriedenheit: Sind die NutzerInnen zufrieden mit ihren jetzigen Kühlgeräten? Welche Aspekte sind zufriedenstellend, welche nicht? Durch das Feedback zu den bestehenden Produkten können die Probleme und Nutzeranforderungen ermittelt werden, z. B. in Bezug auf Geruch, Geräusche, Kühlleistung, Funktionen, Nutzerfreundlichkeit und Design.

Präferenzen: Zusätzlich wird danach gefragt, welche speziellen Funktionen und Eigenschaften die NutzerInnen gerne bei ihrem Gerät oder bei einem neuen Gerät hätten (z. B. Wasserspender, transparente Tür,...). Wenn solche speziellen Vorlieben mit dem ZCC erfüllt werden, ergeben sich für das Produkt Marktvorteile und zusätzliche Kaufanreize.

Kühlfunktionen und Interface

Passendes Temperaturniveau:

Die elementare Funktion eines Kühlschranks ist es, Lebensmittel frischzuhalten. Die Temperatur ist dabei wesentlich, lebensmittelgefährdende Bakterien wachsen rapide bei Temperaturen zwischen 4 und 60 °C. Verschiedene Lebensmittelgruppen benötigen unterschiedliche Temperaturbereiche, um ihre Qualität zu bewahren. Die derzeitigen Geräte erfüllen diese Anforderung oft nicht ausreichend. Normalerweise werden Lebensmittel zusammen und ohne Unterscheidung bei derselben Temperatur gelagert. Die Innentemperatur eines Kühlschranks ist üblicherweise eine Kompromiss-Temperatur,

obwohl es notwendig wäre, angemessene Temperatur- und Feuchtigkeitsniveaus für unterschiedliche Arten von Lebensmitteln bereitzustellen.

Die folgende Abbildung zeigt die optimalen Temperaturniveaus für verschiedene Produktgruppen.

Lebensmittelgruppe	Kühlen	Tiefkühlen	Quelle
Fleischprodukte 	4°C, 1–2 Tage	–17°C, 3–4 Monate	(FSIS, 2010)
Milchprodukte & Eier 	4°C	-	(P. Fellows, A. Hampton, 1992)
Obst 	0–2°C (90–95 % Feuchtigkeit)	-	(Smith, Keith L.)
Gemüse 	4–10°C (95–100 % Feuchtigkeit)	-	(Isenberg, Mackay, Susan)
Eis, gefrorene Lebensmittel 	-	–18°C	
Trinkwasser und Getränke 	Maximal 15°C (empfohlen)	-	(Margaret Eckenfelder, 2001)

Abbildung 13: Temperaturniveaus für unterschiedliche Kühlschranksinhalte⁴

Kalte Luft strömt nach den Gesetzen der Thermodynamik von oben nach unten; die NutzerInnen müssten also, um ihre Lebensmittel an der passenden Stelle zu platzieren, die jeweilige Temperatur abschätzen. Das macht es schwierig, Lebensmittel bei der richtigen Temperatur zu lagern. Was das Interface der Temperaturregelung betrifft, so zeigen die meisten Produkte Nummern (z. B. 1–5)

⁴ (Bildquellen: http://wallpapers.free-review.net/21__Meat_products.htm;
<http://www.meatfeastcompany.com/productShowcase.aspx?pn=84>;
<http://yeesinorfe07.blogspot.co.at/2012/09/when-to-eat-fruits.html>;
<http://www.qatartodayonline.com/qnfsp-downplays-the-impact-of-saudi-vegetables-export-ban/>;
<http://www.chow.com/recipes/28645-rich-chocolate-ice-cream>;
<http://wellandgoodnyc.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2012/07/safe-bottled-drinking-water.jpg>)

oder grafische Elemente (z. B. Farbverlauf von Rot nach Blau), aber nicht die absolute Temperatur in °C. Der Fragebogen erhebt, welche Art von Interface die NutzerInnen haben und ob sie anhand dessen die Temperatur erkennen können.

Nutzerverhalten

Zeitspanne der Nutzung: Die NutzerInnen wurden gebeten, die Zeitspannen anzugeben, in denen sie ihr Kühl-/Gefriergerät verwenden. Interessant ist hier vor allem, wie lange der Kühlschrank nicht genutzt wird (z. B. in der Nacht, aber auch untertags bei berufstätigen Personen).

Demografische und andere persönliche Informationen

Art und Größe der Unterkunft: Es wurde gefragt, ob die NutzerInnen in einem Ein-/Zweifamilienhaus oder in einer Wohnung leben. Daraus ergeben sich Anforderungen an die Dimensionierung und das Energieversorgungssystem eines Geräts. Zusätzlich kann auch die Zielgruppe für den ZCC genauer bestimmt werden.

Anzahl der NutzerInnen: Je mehr Personen sich einen Kühlschrank teilen, desto mehr Lebensmittel werden üblicherweise gekühlt und gelagert. Die Anzahl und das Alter der NutzerInnen können ein wichtiger Faktor sein, um die Größe des Geräts entsprechend ihren Ernährungsbedürfnissen zu bestimmen. Beispielsweise trinken Kinder tendenziell viel Milch, die auch viel Platz einnimmt. Manchmal ist ein Baby oder ein Kind der Grund, ein zusätzliches Gerät anzuschaffen.

Der Fragebogen wurde durch Probebefragungen verbessert, an 200 Personen verteilt und ausgewertet. Mit einem zweiten Fragebogen wurde ermittelt, welche Faktoren den Befragten bei einem Kühlschrank wichtig sind. 22 Faktoren wurden von 1 (nicht wichtig) bis 5 (sehr wichtig) bewertet, z. B. „Leichte Zugänglichkeit“, „Flexibles Fassungsvermögen“ oder „Geruchsregulierung“. Dieser zweite Fragebogen wurde ebenfalls von 200 Personen ausgefüllt.

2.3.2 Ergebnisse der Fragebogenerhebung

Die Auswertung des ersten Fragebogens brachte folgende Ergebnisse (vgl. auch Anhang II):

Analyse aktueller Geräte

Anzahl und Typ der Geräte: 57 % der Befragten haben nur ein Kühl-/Gefriergerät zuhause, 37 % besitzen zwei Geräte. Die folgenden Fragen bezogen sich immer auf das hauptsächlich genutzte Gerät. Knapp die Hälfte der Befragten besitzt einen eintürigen Kühlschrank mit Gefrierfach, 28 % ein zweitüriges Gerät mit Gefrierschrank unten.

Aufstellungsort: Nahezu alle hauptsächlich genutzten Geräte sind in der Küche platziert.

Alter und Energieeffizienz: Rund die Hälfte der Befragten wusste nicht, welcher Energieeffizienzklasse ihr Kühlschrank angehört. 43 % besitzen ein Gerät, das älter als 5 Jahre ist.

Faktoren für (Un-)Zufriedenheit: Zufriedenheitsfaktoren sind für die Befragten vor allem die Kühlfunktion und wenig Lärm (jeweils über 50 % der Befragten) sowie ein großes Fassungsvermögen (35 %). Faktoren für Unzufriedenheit waren generell weniger relevant, am meisten wurden hier Eisbildung im Gefrierbereich (21 %), geringes Fassungsvermögen (17 %) und schwierig zu reinigen (14 %) ausgewählt.

Präferenzen: Von den Vorschlägen, welche Funktionen und Eigenschaften ein Kühl-/Gefriergerät haben sollte, wurden folgende bevorzugt: energiesparend (43 %), Eiswürfelmaschine (34 %), geruchlos (24 %).

Kühlfunktionen und Interface

Passendes Temperaturniveau: Etwas mehr als die Hälfte der Befragten wusste nicht, welche Temperatur ihr Kühl- bzw. Gefriergerät hat. 30 % haben nur die Möglichkeit der Einstellung eines Temperaturlevels und keine Temperaturanzeige. Neuere Geräte hingegen verfügen über eine digitale Temperaturanzeige mit Einstellungsmöglichkeit der gewünschten Temperatur.

Nutzerverhalten

Zeitspanne der Nutzung: In der Früh und am Abend wird der Kühlschrank wie erwartet am öftesten genutzt: Mehr als drei Viertel der Befragten nutzen ihren Kühlschrank zwischen 6 und 9 Uhr morgens, 84 Prozent nutzen ihn zwischen 18 und 21 Uhr.

Demografische und andere persönliche Informationen

Art und Größe der Unterkunft: Knapp zwei Drittel der Befragten wohnen in einer Wohnung, rund ein Drittel in einem Haus. Etwa zwei Drittel wohnen auf mehr als 80 m².

Anzahl der NutzerInnen: 40 % der Befragten nutzen das Kühl-/Gefriergerät mit einer weiteren Person zu zweit, 24 % nutzen es zu dritt, 17 % zu viert, 12 % allein, und 9 % nutzen es mindestens zu fünft.

Der zweite Fragebogen (siehe Anhang III) brachte zusätzliche Ergebnisse in Bezug auf **Faktoren, die den NutzerInnen bei einem Kühlschrank wichtig sind:**

Für mehr als drei Viertel der Befragten war folgender Faktor wichtig:

- Erhält die Qualität der Lebensmittel (78 %)

Für 50–75 % der Befragten waren folgende Faktoren wichtig:

- Zuverlässig (65 %)
- Energiesparend (62 %)
- Langlebig (59 %)
- Umweltfreundlich (53 %)
- Angemessener Preis (53 %)
- Sicherheit (52 %)
- Ausreichendes Fassungsvermögen (50 %)
- Einfach zu reinigen (50 %)

Für weniger als die Hälfte, aber mehr als ein Drittel der Befragten waren folgende Faktoren wichtig:

- Minimale Geräuschbildung (46 %)
- Leichte Zugänglichkeit (44 %)
- Einfaches Öffnen und Schließen (43 %)
- Einfache Wartung (37 %)
- Geruchsregulierung (37 %)
- Umluftkühlung (34 %)

Weniger als ein Drittel der Befragten fanden folgende Faktoren bei einem Kühlschrank wichtig:

- Trockenfunktion (29 %)
- Gleichmäßige Kälte (29 %)
- Einfaches Regeln der Temperatur (22 %)
- Flexibles Fassungsvermögen (18 %)

- Passt zu den anderen Möbeln (17 %)
- Temperaturanzeige (15 %)
- Hinweise auf verschiedene Produktzonen (8 %)

Die Ergebnisse zeigen zunächst, weniger überraschend, dass den NutzerInnen eines Kühlschranks vor allem die Hauptfunktion, das Kühlen, wichtig ist, ebenso wie Faktoren, die generell bei elektrischen Geräten gefordert werden: Zuverlässigkeit, Langlebigkeit, Sicherheit und ein angemessener Preis. Energiesparen und Umweltfreundlichkeit werden erwünscht, allerdings zeigte die Fragebogenerhebung, dass den NutzerInnen die Faktoren, die hinter einem niedrigen Energieverbrauch stecken, wenig bewusst sind. Beispielsweise senkt die Anpassung der Innentemperatur an den tatsächlichen Bedarf (Art und Menge der Lebensmittel) den Energieverbrauch und wird durch eine genaue Temperaturanzeige, durch Hinweise auf verschiedene Produktzonen und einfache Regelungsfunktion begünstigt. Diese Faktoren wurden jedoch von den Befragten nicht als relevant eingestuft. Dieser Widerspruch zwischen Anforderungen an Energieeffizienz und Bewusstsein über energieeffiziente Nutzung zeigt, dass ein Produkt bereits so entwickelt werden sollte, dass die NutzerInnen selbst möglichst wenig zur Energieeffizienz beitragen müssen – das Gerät muss effizient und störungsfrei funktionieren, ohne dass man sich als NutzerIn viel damit befassen muss. Alternativ müsste ein entsprechendes Bewusstsein für den Zusammenhang zwischen Energieeffizienz und Nutzerverhalten geschaffen werden.

2.4 Grundlegende Kriterien für die Entwicklung des Zero CO₂ Cooler

Die am meisten verbreiteten Kühlschränke und Gefriergeräte sind Geräte mit elektrisch betriebenen Kompressoren. Diese sind in verschiedenen Ausführungen erhältlich, z.B. mit einem Schwing- oder einem Hermetik-Kompressor. Alternativ gibt es noch Absorberkühlschränke, deren Verwendung jedoch bisher hauptsächlich für die Verwendung in Wohnmobilen oder in Minibars beschränkt ist. Wie bereits erwähnt, erfordert der steigende Bedarf an Energie für Kühlung dringend alternative, ökologisch und ökonomisch sinnvolle Lösungen. Der folgende Abschnitt zeigt die grundlegenden Kriterien für die Entwicklung des ZCC sowie zusätzliche Vorteile, die sich aus dem innovativen Design ergeben.

2.4.1 Grundlegende technische Funktionen des ZCC

Die technischen Funktionen und Spezifikationen des ZCC wurden entsprechend den Rahmenbedingungen der EN ISO 15502 definiert: „Haushaltskühlgeräte und -gefriergeräte – Eigenschaften und Prüfmethoden“ (ISO 15502:2005), außerdem entsprechend den Bedürfnissen der NutzerInnen, welche durch die Fragebogenerhebung ermittelt wurden. Die folgende Tabelle spezifiziert die einzelnen Funktionen des ZCC.

Kühl- und Gefrierschrank

Der ZCC soll die erforderlichen Temperaturniveaus bereitstellen können, da dies eine vom Großteil der Nutzer geforderte Anforderung ist.

Art der Energieversorgung

Neben der Nutzung thermischer Energie (Warmwasser im Niedertemperaturbereich) zur Bereitstellung von Kälte mittels Ammoniak-Wasser-Absorption (siehe detaillierte Beschreibung der Icebook-Technologie [Solarfrost] in Kapitel 4) wird der Energiebedarf für weitere Funktionen wie z.B.

Beleuchtung auf ein Minimum reduziert. Unter dieser Voraussetzung kann die benötigte Energie über thermische Solarkollektoren bereitgestellt werden.

Aufbewahrungsfächer

Die Anzahl der Aufbewahrungsfächer kann je nach Anforderung variieren. Grundsätzlich ist jedoch die Einteilung in drei Kategorien vorgesehen: ein Aufbewahrungsfach für die Lagerung von frischen Lebensmitteln, eines für die Lagerung von tiefgekühlten Lebensmitteln bis zu einer Temperatur von bis zu -6 °C und eines für die Lagerung von tiefgekühlten Lebensmitteln bis zu einer Temperatur von bis zu -12 °C.

Entfernung des Tauwassers

Automatisch abtauende Kühlschränke heizen die inneren Kühlstäbe in regelmäßigen Abständen auf. Das verhindert die Frostbildung und erlaubt effektives Kühlen des Kühl-/Gefriergerätes. Allerdings verbraucht das Gerät dann mehr Energie, da sich ein Heizelement im Kühlraum befindet (U.S. Environmental Protection Agency, 2008).

Tauwasser soll nur in externen Auffangbehältern gesammelt werden. Die Auffangschale oder andere Behälter sollten ein angemessenes Volumen haben, externe Auffangbehälter sollten außerdem angemessene Verdampfungsmöglichkeiten haben.

2.4.2 Mögliche Zusatznutzen für die KonsumentInnen

Neben der Nutzung thermischer Energie für den Betrieb bietet der ZCC durch sein Design weitere Vorteile im Vergleich zu herkömmlichen Kühltechniken und verfügbaren Kühlschränken.

Marktpionier

In den letzten Jahren hat sich die Solarwärmetechnologie signifikant verbessert, und man darf annehmen, dass diese Form der erneuerbaren Energie zukünftig noch stärker zur Abdeckung der steigenden Energienachfrage genutzt wird, jedoch gibt es nach wie vor Differenzen zwischen theoretischen oder experimentellen Technologieansätzen und der praktischen Nutzung in Haushalten. Der ZCC kann ein neues Anwendungsgebiet eröffnen.

Geringe Lärmentwicklung und keine Vibration

Viele NutzerInnen fühlen sich durch den Lärm und die Vibrationen des Kompressors gestört. Besonders in kleineren Wohnungen kann das sogar beim Einschlafen stören. Ein Absorptionskühlgerät nutzt eine Wärmequelle, wie beispielsweise eine Gastherme, Solarwärme oder ein elektrisches Heizelement. Diese Wärmequellen sind erheblich leiser als ein typischer Kompressormotor in einem herkömmlichen Kühlschrank, da die einzigen sich bewegenden Teile ein Ventilator oder eine Pumpe sind. Im Falle des ZCC werden diese Störgeräusche deutlich minimiert.

Schnelles Abtauen

Bedingt durch die Betriebsweise des ZCC (Nutzung von Warmwasser, keine elektrische Energie) wird das Abtauen anders als bei konventionellen Lösungen funktionieren. Die erforderliche Dauer zum Abtauen kann verkürzt werden und eine Umwandlung von elektrischer in thermische Energie ist nicht erforderlich.

Keine Mischung von Gerüchen

Jedes Lebensmittel hat seinen individuellen Geruch, der sich nicht mit anderen vermischen sollte. Das Design des ZCC teilt den zur Verfügung stehenden Raum systematisch auf unterschiedliche Fächer bzw. Behältnisse auf, so verbleiben die Gerüche in den jeweiligen Einheiten.

Äußeres Design

Heute erhältliche Kühl- und Gefrierschränke sind ziemlich monoton gestaltet. Abgesehen von unterschiedlichen Türvarianten, der Raumaufteilung und den Farben haben die meisten Geräte eine vergleichbare Schrankform. Die Icebook-Technologie erlaubt komplett neue Formen und Strukturen von Kühlgeräten, ermöglicht durch die neue Technologie der Kältebereitstellung. Beispielsweise besteht keine Notwendigkeit, an der heute allgegenwärtigen Schrankform oder an der Art der Türöffnung und der Lagerungsweise festzuhalten.

Ethische Werte

Mittlerweile haben sich „grüne“ KonsumentInnen, also Personen, die besonders auf Umweltfreundlichkeit bei Produkten und Service achten, als Zielgruppe etabliert. Im Bereich der Kühl- und Gefriergeräte ist derzeit die beste Wahl für diese Zielgruppe das Gerät, welches die höchste Energieeffizienz aufweist. Der ZCC, besonders in Kombination mit einer erneuerbaren Energiequelle (z. B. Solarwärme), ist eine zusätzliche Option für diese KonsumentInnen.

Beitrag zum Umweltschutz

Neben der Reduzierung des Stromverbrauchs im Haushalt und der Verwendung erneuerbarer Energien leistet der ZCC weitere Beiträge zum Umweltschutz. Herkömmliche Kühlschränke arbeiten mit FKW und FCKW, welche beide Ozon abbauen. Ammoniak hat kein Ozonabbau Potenzial (ODP = 0) und keinen direkten Treibhauseffekt (GWP = 0). Aufgrund der hohen Energieeffizienz ist auch der Beitrag zum indirekten Treibhauseffekt gering. Dank der hohen Energieeffizienz ist der Beitrag zur globalen Erwärmung gering (eurammon, o. J.). Die modulare Bauweise der Technologie erleichtert Reparaturen und Kapazitätserweiterungen und verlängert die Nutzungsdauer des Kühlgeräts, da z. B. bei Änderung des Nutzerverhaltens Kammern hinzugefügt oder reduziert werden. Auch defekte Teile können einfach ausgetauscht werden; im Gegensatz zu konventionellen muss nicht das ganze Kühlgerät entsorgt werden.

Verbesserte Ergonomie

Typische Bewegungen bei der Nutzung von Kühlschränken und Gefrierschränken sind: Türe öffnen, sich vorbeugen/hinunterbeugen, um das gewünschte Lebensmittel zu erreichen, Lebensmittel einzuräumen oder das Gerät zu reinigen. Das intelligente Design der Lagerflächen und Behältnisse des ZCC ermöglicht eine ergonomischere Nutzung des Kühlschranks. Beispielsweise können Vegetarier Fächer für Gemüse auf Augenhöhe anordnen. Behältnisse für alkoholische Getränke, Medizin und Kosmetika können höher, für Kinder unerreichbar, angeordnet werden.



Abbildung 14: NutzerInnen beim Gebrauch von Kühlschränken

Einfache Produktion

Während des Entwicklungsprozesses des ZCC wurden bei der Wahl der Materialien sowohl die Verfügbarkeit als auch die Verarbeitungsmöglichkeiten berücksichtigt, da die Fertigung des ZCC nach Möglichkeit aus regional verfügbaren Materialien von geschulten Facharbeitern mit üblichen vorhandenen Maschinen auf KMU-Level durchgeführt werden soll.

2.5 Klärung rechtlicher Rahmenbedingungen

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Regulationen und rechtlicher Bedingungen für die Entwicklung und den Betrieb von Kühlgeräten. Entsprechend dem internationalen Standard ergeben sich aus den ISO-Anforderungen folgende Voraussetzungen, die für die Entwicklung des Zero CO₂ Cooler relevant sind:

- Es muss möglich sein, dass die Außentür, Klappen und Laden des Kühlschranks von innen geöffnet werden können.
- Beim Kondenswassertest darf kein Wasser aus dem Kühlgerät austreten.
- Das Verdunstungselement muss so gestaltet bzw. geschützt werden, dass es keinen Schaden durch Öffnen und Schließen der Außentür davontragen kann. Die Oberfläche des Wärmetauschers muss aus korrosionsfreiem Material hergestellt werden oder mit einer ungiftigen, korrosionsverhindernden Oberflächenbehandlung beschichtet werden, die Temperaturveränderungen und der abwechselnden Frostbildung und Entfrostung standhalten kann.
- Rohre und Verbindungen sich bewegender oder elastischer Teile müssen so angebracht werden, dass die Lärmentwicklung möglichst minimiert wird und keine Berührung oder Vibrationsübertragung zu anderen Teilen gegeben ist. Außerdem muss Alterungserscheinungen möglichst vorgebeugt werden. Alle anderen Rohre und Verbindungen müssen sicher verankert werden. Wenn notwendig, müssen Rohre und Ventile ordentlich isoliert werden.

Neben internationalen Standards müssen auch Richtlinien und Gesetze für die Nutzung von Ammoniak als Kühlmittel sowie für Druckgeräte und Kälteanlagen eingehalten werden. Diese sind in Kapitel 3.2 dargestellt.

3 Planung von Funktionsmodellen (Dr. Kunze, SolarFrost)

Absorptionskühlung ist die Basis für den Zero CO₂ Cooler, im Folgenden werden daher die erforderlichen Grundlagen herkömmlicher Kühlprozesse analysiert.

3.1 Konventionelle Kühlung mit Ammoniak-Wasser

3.1.1 Grundprinzip

Ein Großteil der technischen Kühlung beruht auf der Verdampfung eines flüssigen Kältemittels, das zur Umwandlung in Dampf Wärme benötigt, die der Umgebung entzogen wird, und dadurch diese abkühlt. Es gibt eine große Zahl unterschiedlicher Kältemittel. Eines der am frühesten zur Anwendung gekommenen ist Ammoniak.

Um aus der Verdampfungskühlung einen kontinuierlichen Prozess zu machen, braucht man eine Kältemaschine, die den Dampf wieder verflüssigt, sodass er erneut verdampfen kann. Wenn ein Kältemittel bei gegebenem Druck und Temperatur verdampft, so kann es bei höherem Druck auch bei einer höheren Temperatur wieder kondensieren, wobei Kondensationswärme freigesetzt wird, die abgeführt werden muss.

Um den Dampf also in den flüssigen Zustand zurückzuführen, muss der Dampf verdichtet werden und dabei mit einer gekühlten Fläche in Kontakt stehen. Man nennt diesen Vorgang „Rückkühlung“, im Gegensatz zur eigentlichen Kühlung, die durch die Verdampfung erreicht wird.

Zur Verdichtung des Dampfes kommen unterschiedliche Techniken zum Einsatz, von denen zwei besonders wichtig sind:

- Kompressionskühlung: Der Druck wird mittels einer Gasdruckpumpe, auch Kompressor genannt, erzeugt.
- Absorptionskühlung: Man nutzt dabei die Eigenschaft des Ammoniaks, dass es in kaltem Wasser sehr gut löslich ist, aber in heißem Wasser schlecht. Man absorbiert also das bei der Verdampfung entstehende Ammoniak in kaltem Wasser, das anschließend erhitzt wird und den Ammoniakdampf mit höherem Druck wieder austreibt.

Im Gegensatz zur Kompressionskühlung ist die Absorptionskühlung in der Lage, direkt mit Wärmeeinsatz Kälte zu erzeugen, doch auch die konventionelle Wasser-Ammoniak-Absorptionskältemaschine kommt nicht ganz ohne Kompressor aus, da die kalte Ammoniaklösung vom Absorber, der den niedrigen Verdampfendruck hat, in den heißen Austreiber oder Generator gebracht werden muss, der auf dem hohen Druck des Kondensators stehen muss. Allerdings braucht dieser Kompressor nur einen Bruchteil der Leistung, die die Druckpumpe einer Kompressorkühlanlage benötigt.

Der Wirkungsgrad einer Kältemaschine wird als COP (= Coefficient of Performance) angegeben, definiert als Kühlleistung dividiert durch die dafür benötigte mechanische oder thermische Leistung. Gute Kompressionskältemaschinen haben einen COP von ungefähr 1–3 (je nach Kühltemperatur – je kälter, desto niedriger der COP), bezogen auf den verbrauchten elektrischen Strom.

Für sehr gute Absorptionskältemaschinen liegt der COP zwischen 0,3 und 1, was zunächst viel schlechter aussieht. Aber man kann Wärmeenergie nicht 1:1 mit elektrischem Strom gleichsetzen:

Bedenkt man, dass der Strom aus dem thermischen Kraftwerk inklusive Verluste durch die Stromleitung nur mit einem Wirkungsgrad von etwa 0,3 aus Wärme hergestellt wird, so ist der COP einer Kompressionskältemaschine bezogen auf primäre Wärme ebenfalls nur 0,3–1.

3.1.2 Die konventionelle Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschine

Die konventionelle Kältemaschine (siehe Abbildung 13) besteht aus 4 Reaktoren oder Wärmetauschern:

- Verdampfer, wo der Ammoniak verdampft und die Kälte erzeugt wird
- Absorber, wo der entstandene Ammoniakdampf in kaltem Wasser absorbiert wird
- Generator oder Austreiber, wo die Ammoniaklösung erhitzt wird und heißer Ammoniakdampf mit hohem Druck entsteht
- Kondensator, wo der so entstandene heiße Dampf bei hohem Druck abgekühlt und dabei verflüssigt wird

Dazu kommen noch Regelemente wie Rückschlagventile, Drosseln und die schon erwähnte Druckpumpe.

Im Verdampfer wird flüssiges Kältemittel auf ein von dem zu kühlenden Medium durchflossenes Rohrsystem gesprüht. Dabei entsteht Ammoniakdampf, der über ein Rückschlagventil in den Absorber geleitet wird. Im Absorber rieselt kaltes Wasser über ein mit Rückkühlmedium durchflossenes Rohrsystem, und dabei wird an der Oberfläche der Wassertropfen Ammoniakdampf absorbiert. Am Boden des Absorbers sammelt sich wässrige Ammoniaklösung, die von einer Druckpumpe in den Generator befördert wird. Der Generator ist ein Behälter, der von einem Heizmedium auf hohe Temperatur gebracht wird, die dazu führt, dass der Ammoniakdampf als Dampfblasen freigesetzt wird. Die ausgekochte Lösung ist spezifisch schwerer als die angereicherte kalte Lösung und sammelt sich am Boden des Generators, von wo sie durch eine Drossel zurück in den Absorber fließt. Die Drossel stellt einen hohen Strömungswiderstand dar, der groß genug ist, um die Druckdifferenz zwischen Generator und Absorber aufrechtzuerhalten. Der im Generator entstandene Dampf geht durch ein weiteres Rückschlagventil in den Kondensator. Rückschlagventile dienen dazu, bei Temperaturschwankungen der Wärmemedien zu verhindern, dass die auftretenden Druckdifferenzen zu einem Fluss gegen die vorgesehene Richtung führen. Im Kondensator verflüssigt sich der heiße Dampf an einem mit Rückkühlmedium durchflossenen Rohrsystem, und der flüssige Ammoniak sammelt sich am Boden des Kondensators, von wo er durch eine weitere Drossel in den Verdampfer gelangt. Auch hier soll die Drossel einen Strömungswiderstand darstellen, der groß genug ist, um die Druckdifferenz zwischen Kondensator und Verdampfer aufrechtzuerhalten.

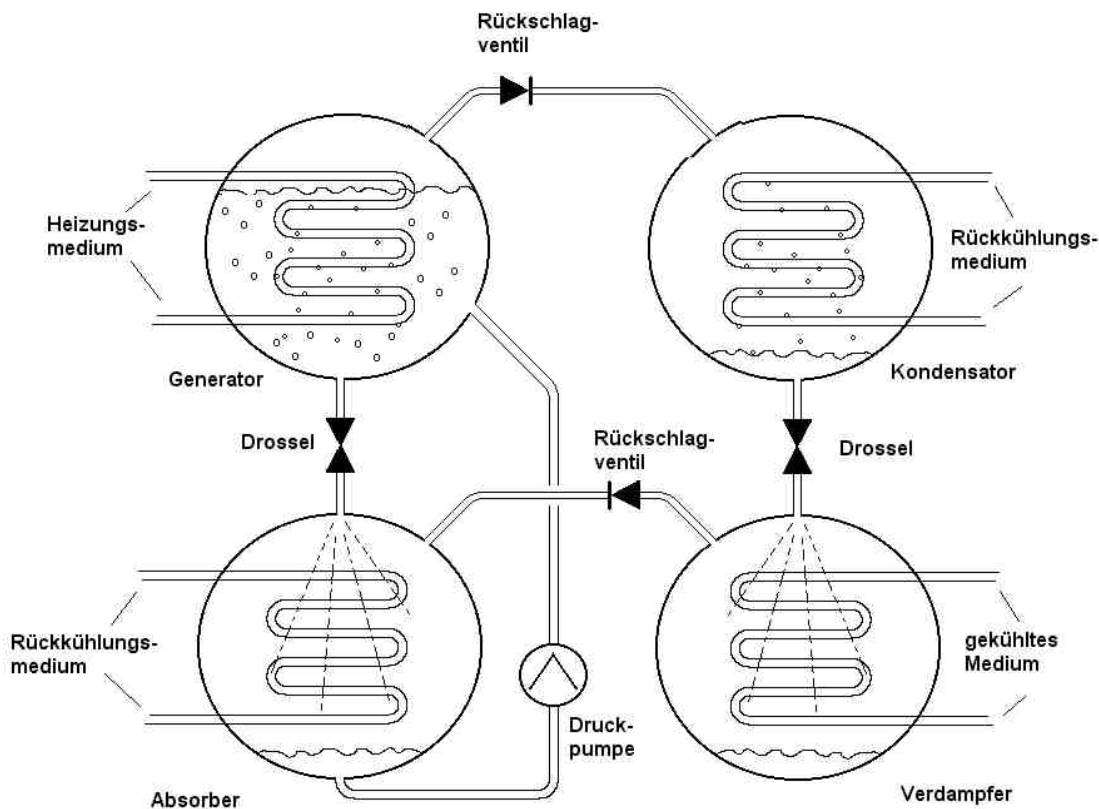


Abbildung 15: Konzept der konventionellen Wasser-Ammoniak-Kältemaschine

Nachteile der konventionellen Wasser-Ammoniak-Absorptionskältemaschine

Wasser-Ammoniak-Absorptionskältemaschinen haben sich in den letzten 80 Jahren wenig verändert. Sie entsprechen in vielen Aspekten kaum den Anforderungen an moderne (vor allem kleine) Systeme. Die wichtigsten Probleme dabei sind:

- Wärmetauscher, die einen großen Temperaturunterschied zwischen verdampfendem Ammoniak und dem zu kühlenden Medium sowie zwischen dem kondensierenden Ammoniak und dem Rückkühlmedium erfordern
- niedriger COP
- Maschinen vor allem für große Leistungen entwickelt
- Maschinen sind im Verhältnis zur Leistung relativ groß und schwer
- Herstellungskosten viel höher als die von Kompressorkühlmaschinen, weil automatisierte Serienproduktion fehlt

3.2 Ammoniak (NH₃) als Kältemittel

Im Folgenden werden Informationen zur Verwendung von Ammoniak als Kältemittel dargestellt und in Bezug auf den Zero CO₂ Cooler analysiert.

3.2.1 Sicherheit beim Arbeiten mit Ammoniakkühlung

„Ammoniak ist ein farbloses, unter Druck verflüssigtes Gas mit stechendem Geruch. Als Kältemittel ist es unter der Bezeichnung R 717 bekannt. Ammoniak wird für die Nutzung im Kälteprozess synthetisch erzeugt, gilt aber als natürliches Kältemittel, da es in den Stoffkreisläufen der Erde

vorkommt. Ammoniak hat kein Ozonabbaupotenzial ($ODP = 0$) und keinen direkten Treibhauseffekt ($GWP = 0$).

... Ammoniak (NH_3) hat sich in der industriellen Kälteerzeugung seit über 120 Jahren bewährt. Obwohl in den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts die so genannten Sicherheitskältemittel – zum Beispiel die heute verbotenen FCKW – bei Neuanlagen zunehmend zum Einsatz kamen, hat Ammoniak seine Dominanz in der Industrie- Kältetechnik immer behaupten können. Gerade auf Grund der Umweltdiskussion um Ozonabbau und Treibhauseffekt gibt es heutzutage wieder einen steigenden Marktanteil bei Ammoniak-Kältetechnik und Unternehmen mit langer Tradition und Erfahrung, die bevorzugt mit Ammoniak arbeiten.“

(eurammon, 2011)

Ammoniak ist zweifellos nicht ungefährlich. Es existiert eine ausführliche Literatur über Gefahren durch Ammoniak bzw. die erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen. Der Umgang mit Ammoniak ist durch offizielle Normen, Gesetze und Verordnungen in allen nur denkbaren Bereichen geregelt.

Bei der Betrachtung der Gefahren durch Ammoniakverwendung ist allerdings zu beachten, dass diese Gefahrenbeschreibungen und Sicherheitsvorkehrungen sich fast ausschließlich auf Großanlagen beziehen, in denen viele Tonnen Ammoniak zur Anwendung kommen können, und der Gesetzgeber macht eine klare Trennung zwischen Groß- und Kleinanlagen. Beispielsweise ist erst ab einer Füllmenge von 50 kg Ammoniak eine Gaswarnanlage vorgeschrieben. Für Anlagen unter 10 kg Ammoniak-Füllmenge gibt es keine speziellen Sicherheitsauflagen, die über das, was jedem mit der Materie vertrauten Techniker klar sein muss, hinausgehen.

Die Ammoniakmenge in einem Hauskühlschrank liegt in der Größenordnung von ungefähr 100 Gramm, wobei dieser Ammoniak zum allergrößten Teil mit Wasser verdünnt ist, sodass real nur ca. 2–5 Gramm reiner Ammoniak ein Gefahrenpotenzial darstellen.

Von der Firma ELEKTROLUX sind im vergangenen Jahrhundert etwa 50 Millionen Ammoniakkühlschränke für Haushalte in allen Ländern der Erde verkauft worden, und es ist kein ernsterer Unfall bekannt geworden. Die Lebensdauer solcher Systeme betrug ohne Nachfüllen von Kältemittel bis zu 70 Jahre.

Dennoch sollen im Weiteren die realen Gefahren dargestellt und anhand von Literaturziten beleuchtet werden, denn selbst dann, wenn man die Gefahr, die durch solch kleine Ammoniakmengen hervorgerufen werden, als gering einstuft, muss man zugestehen, dass jeder Kontakt mit Ammoniak unangenehm ist. Ängste potenzieller KonsumentInnen wären der Verbreitung einer neuen Technologie jedenfalls sehr abträglich.

3.2.2 Problemgebiete

3.2.2.1 Giftigkeit

„Ammoniak ist giftig, besitzt aber einen charakteristischen Geruch mit hoher Warnwirkung und ist bereits ab einer Konzentration von 3 mg/m^3 in der Luft wahrnehmbar, was bedeutet, dass die Warnwirkung lange vor einer gesundheitsschädlichen Konzentration ($> 1.750 \text{ mg/m}^3$) eintritt. Ammoniak ist leichter als Luft und steigt deshalb schnell auf.“

„Flüssiges Ammoniak kann Gefrier- oder Ätزشäden an Haut und Augen verursachen.“

Grenzwerte für Ammoniak:

Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) $14 \text{ mg/m}^3 = 20 \text{ ppm}$ ($0,7 \text{ mg/m}^3/1 \text{ Vppm}$).

Belästigungsschwelle 250 ppm 175 mg/m^3

Erträglichkeitsgrenze $500\text{-}1.000 \text{ ppm}$ $350\text{-}700 \text{ mg/m}^3$

Vergiftungserscheinungen 2.500 ppm 1.750 mg/m^3

Tödliche Konzentration $> 5.000 \text{ ppm}$ 3.500 mg/m^3

Langzeitwirkung nicht kanzerogen, nicht mutagen

Für die Unschädlichkeit von Ammoniak in kleinen Mengen spricht die Tatsache, dass unser Körper selbst Ammoniak produziert:

Gehalt im menschlichen Blut 0,8-1,7 ppm

Tägliche Produktion im menschlichen Körper 17 g

Wassergefährdungsklasse 2, Kenn-Nr. 211“

(eurammon, 2011)

Das bedeutet, dass ein Mensch in einer Woche selbst so viel Ammoniak erzeugt, wie in einem Haushaltskühlschrank enthalten ist.

Sollte aus einem Hauskühlschrank langsam Ammoniak austreten und sich mit der Raumluft vermischen, kann eine Vergiftung der BewohnerInnen dieses Hauses normalerweise ausgeschlossen werden, weil die damit verbundene extreme Geruchsbelästigung ein eindeutiger Indikator für eine Fehlfunktion darstellt und Maßnahmen zur Mängelbehebung eingeleitet werden können.

Damit beschränken sich die unmittelbaren Gefahren für Personen auf Explosion oder Platzen des Druckgefäßes, die in den nächsten beiden Abschnitten behandelt werden sollen.

Sollten die maximal 5 g wasserfreien Ammoniaks, die in einem Haushaltskühlschrank vorhanden sind, wegen eines Überdruckunfalls in einen kleinen Wohnraum mit 20 m³ Luftvolumen plötzlich freigesetzt werden, so ergäbe das eine Ammoniakkonzentration in der Raumluft von nur 250 mg/m³, was noch unterhalb der Erträglichkeitsgrenze liegt und weit unterhalb der Grenze von 1750 mg/m³, bei der Vergiftungserscheinungen auftreten.

3.2.2.2 Brennbarkeit

„Ammoniak ist bedingt brennbar. Die erforderliche Zündenergie ist jedoch 50-mal höher als die von Erdgas, und ohne Stützflamme brennt Ammoniak nicht weiter. In Verbindung mit der hohen Affinität von Ammoniak zur Luftfeuchtigkeit hat das zur Einstufung als schwer entzündlich geführt.“

„Ammoniak ist entzündbar. Es verbrennt jedoch nur bei Anwesenheit einer Stützflamme; die Ammoniakflamme allein erlischt immer wieder. Die Explosionsgrenzwerte liegen eng beieinander und sind hoch – zwischen 15 und 35 Volumenprozent. Die Verbrennungsgeschwindigkeit ist gering.“

(eurammon, 2011)

Die Berufsgenossenschaftliche Richtlinie (BGR 500) stellt für Kältemaschinen mit Ammoniak keine besonderen Anforderungen an den Explosionsschutz für die elektrischen Betriebsmittel. Gefahr ist nur in einem nicht belüfteten Raum eines Gebäudes zu erwarten, wenn dort die Konzentration mit 105 Gramm pro Kubikmeter den unteren Explosionswert überschreitet und energiereiche Zündquellen vorhanden sind.

Explosionsgrenzen 15 Vol.-% bis 34 Vol.-%

108.000 mg/m³ bis 240.000 mg/m³

Zündtemperatur 650 °C

Zündenergie (20 °C, 101 kPa) 14 mJ

Eine Entzündung des Ammoniaks in einem Haushaltskühlschrank ist mit Sicherheit auszuschließen, da sich im Inneren seines Systems wegen dessen Überdrucks kein Sauerstoff befinden kann. Bei einer Freisetzung des Ammoniaks in die Umgebungsluft könnten dagegen wegen der kleinen Ammoniakmengen niemals 15–34 Vol.-% erreicht werden.

3.2.2.3 Druckgefäße

Ammoniak, auch in wässriger Verdünnung, hat bei höheren Temperaturen einen Druck, der über dem Atmosphärendruck liegt. **Es muss deshalb in Druckbehältern aufbewahrt werden.**

Bei einer Leckage kann flüssiges Ammoniak austreten. Durch die damit verbundene Verdampfung werden größere Dampfmengen freigesetzt.

Gemäß der Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit über sicherheitstechnische Bestimmungen für Prüfungen bei der Inbetriebnahme und während des Betriebes von Druckgeräten (Druckgeräteüberwachungsverordnung, Fassung vom 28.03.2011) muss Folgendes beachtet werden:

Druckinhaltsprodukt:

Das ist jener Wert, der für die im Dampfkessel oder Druckbehälter gespeicherte Energie maßgebend ist, also für Druckbehälter das Produkt aus dem festgesetzten höchsten Betriebsdruck in bar multipliziert mit dem Volumen in Litern.

Das Druckinhaltsprodukt wird nur als Maßzahl (ohne Dimension) angegeben.

Folgende Arten von Dampfkesseln, Druckbehältern und Rohrleitungen sind von einer Sonderbestimmung gemäß Anlage 3 erfasst:

Druckbehälter und Rohrleitungen in Kälteanlagen und Wärmepumpenanlagen (Anlage 3 Z 2).

Kleinanlagen: Für Druckbehälter oder Rohrleitungen, die in Kälte- oder Wärmepumpenanlagen integriert sind, die den nachstehenden Kriterien entsprechen, gilt für deren Überwachung:

- a) Die Kälte- oder Wärmepumpeneinheiten sind entweder komplett abgeschlossen (steckerfertig) oder werden mit vor Ort gefertigten oder erstellten Verdampfern oder Kondensatoren verbunden.
- b) Die Kälte- oder Wärmepumpenanlagen werden mit einem speziellen Wärmeübertragungsmedium (Kältemittel) in geschlossenem Kreislauf betrieben.
- c) Vom größten in der Kälte- oder Wärmepumpenanlage integrierten Druckbehälter wird der Wert von 700 für das Druckinhaltsprodukt nicht überschritten.
- d) Abweichend von den §§ 3 Abs. 2 und 4 Abs. 1 sind für Druckbehälter und Rohrleitungen in Kleinanlagen die Bestimmungen des § 5 anzuwenden. Es besteht keine Meldepflicht an Kesselprüfstellen.

Die DIN 8975 gilt für alle Arten von Kälteanlagen, also nicht nur für Ammoniakanlagen. Für die Auslegung der Anlagenkomponenten gilt, gemäß Teil 1, für die Niederdruckseite ein Druck von 12 bar, für die Hochdruckseite 16 / 23 bar – je nachdem, ob die Anlage wasser- oder luftgekühlt betrieben wird. Für erschwerte Bedingungen gilt ein Druck von 28 bar.

Aus den zitierten Regelwerken folgt, dass eine Kleinanlage nicht meldepflichtig ist, solange ihr Druckbehältervolumen nicht größer als 25 Ltr. ist. Das trifft auf die im Forschungsprojekt entwickelte Kältemaschine zu.

3.2.2.4 Umwelt

„Beim Emittieren von Ammoniak in die Atmosphäre darf es nicht zu Umweltschäden kommen. Der ERGP-2 liegt bei 150 ppm = 105 mg/m³ (ERGP = Emergency Response Planning Guidelines). Es darf deshalb in die Atmosphäre abgelassen werden.

Ammoniak ist in der TA-Luft nicht aufgeführt.“

(eurammon, 2011)

3.2.2.5 Entsorgung

„Steigt die Konzentration in der Abluft über den von der örtlichen Behörde genehmigten Wert, muss der Ammoniakgehalt durch Auswaschen mittels Wasser in der Luft oder direkte Beaufschlagung der Leckagestelle mit Wasser abgesenkt werden.“

Entsorgung über Leihgebinde

Im Bedarfsfall stellen NH_3 -Lieferanten Leihgebinde zur Entsorgung von Gebrauch-Ammoniak zur Verfügung. Die Rücknahme erfolgt mit dem Ziel der wirtschaftlichen Weiterverwertung, z.B. in Form von Ammoniakwasser.

Verbrennung des Ammoniaks vor Ort

Das zu entsorgende Ammoniak wird dampfförmig aus der Kälteanlage entnommen und mit einem speziellen Hochdruckschlauch der Entsorgungsanlage zugeführt. Nach kurzer Aufheizzeit mit Propangas wird der Brennraum der Entsorgungsanlage auf eine bestimmte Betriebstemperatur gebracht. Bei genau bemessener Luft- und NH_3 -Zufuhr entzündet sich das NH_3 selbstständig – ohne Propangaszufuhr – und brennt nun kontrolliert und ruhig weiter. Die Flammtemperatur beträgt zirka 700 °C. Bei dieser Art von Verbrennung besteht der wesentliche Vorteil gegenüber der katalytischen Verbrennung darin, dass die Verweildauer des NH_3 in der Flammenzone sehr lang ist und dass das bei 700 °C instabile NO in Stickstoff und Sauerstoff zerfällt.“

(eurammon, 2011)

3.2.3 Klassifikation der Aufstellungsbereiche von Ammoniak-Kälteanlagen

Aufstellungsbereich A	Aufstellungsbereich B
Räume, Gebäudeteile, Gebäude • in denen Personen schlafen dürfen • in denen Personen in ihrer Bewegung eingeschränkt sind • in denen sich eine unkontrollierte Anzahl von Personen aufhält, ohne persönlich in den Sicherheitsvorkehrungen ausgebildet zu sein zum Beispiel: Krankenhäuser, Gerichts- und Gefängnisgebäude, Theater, Supermärkte, Schulen, Vortragsräume, Bahnhöfe, Hotels, Wohnungen, Gaststätten	Räume, Gebäudeteile, Gebäude • in denen sich nur eine bestimmte Anzahl von Personen aufhalten darf, von denen mindestens einige mit den allgemeinen Sicherheitsvorkehrungen der Einrichtung vertraut sein müssen. zum Beispiel: Büro- oder Geschäftsräume, kleine Läden, kleine Gaststätten, Laboratorien, Räume für allgemeine Fabrikations- und Arbeitszwecke

Zulässigkeit und max. NH₃-Füllmenge von Kälteanlagen und Wärmepumpen bei Aufstellung:

Fall 1 ohne besonderen Maschinenraum oder im Freien

Fall 2 in besonderem Maschinenraum oder im Freien

	Aufstellungsbereich A	Aufstellungsbereich B
Fall 1		
Indirekt geschlossene Systeme*	zulässige Füllmenge berechnet sich nach dem praktischen Gegenwert der Luftmenge	10 kg NH ₃
Fall 2		
Indirekt geschlossene Systeme*	mit Ausgang ins Freie: Füllmenge unbeschränkt	ohne direkten Zugang zu einem Personen-Aufenthaltsbereich: Füllmenge unbeschränkt

(Schrempf & Sontheim, 2004)

*) Der Zero CO₂ Cooler ist ein indirekt geschlossenes System.

3.2.4 Schlussfolgerungen für die Verwendung von Ammoniak

Aus dem oben zusammengestellten Informationsmaterial ergibt sich, dass die Verwendung von Ammoniak in Haushaltskühlschränken unbedenklich ist. Nichtsdestotrotz bleibt das Argument des sehr unangenehmen Geruchs im Falle einer niemals ganz auszuschließenden Leckage, welches allenfalls ein Hindernis für die Markteinführung darstellen könnte.

In einem systemischen Zusammenhang mit Solarkollektoren kann der Zero CO₂ Cooler ohnehin niemals zur Gänze in einem Wohnraum untergebracht sein, daher empfiehlt es sich in diesem Fall, die Ammoniak führenden Anlagenteile zusammen mit den Solarkollektoren im Freien aufzustellen, was technisch kein besonderes Problem bedeutet.

In keinem Fall sollen mögliche Sorgen aber die Verwendung von Ammoniak verhindern, weil die Vorteile deutlich überwiegen, wie das folgende Zitat erklärt:

„Im Vergleich zu anderen Kältemitteln haben Anlagen mit Ammoniak deshalb eine günstigere TEWI-Bilanz (Total Equivalent Warming Impact). Bei dieser Methode werden der direkte Treibhauseffekt, resultierend aus Leckage- und Rückgewinnungsverlusten des Kältemittels, und der indirekte Treibhauseffekt, bezogen auf die in der Lebenszeit der Anlage verbrauchte Energie, addiert. Bei insgesamt gleichen Bedingungen verfügen Kaltdampfverdichtungssysteme, die für den Betrieb mit Ammoniak entwickelt wurden, bei der Reduzierung der indirekten Emissionen (z.B. CO₂) über bessere Eigenschaften ...

Ammoniak besitzt eine äußerst hohe latente Wärme, sodass im Vergleich zu den meisten HFKWs ein weitaus geringerer Kältemittelmassendurchfluss benötigt wird, um eine bestimmte Kälteleistung zu erzeugen. Dies reduziert den Energieaufwand für den Verdichter erheblich. Grundsätzlich ist Ammoniak in seinem ganzen Betriebsbereich (-40 Grad Celsius bis +40 Grad Celsius) sehr effizient. In Normaltemperatursystemen kann seine Leistung (z. B. Klimaanlage) allerdings von R123 in Turboverdichterkälteanlagen bzw. von R22 oder R410A erreicht oder sogar übertroffen werden. Die Nutzung von R123 und R22 wird jedoch in den Ländern der EU bis zum Jahr 2015 eingestellt werden. Es gibt zwar bislang noch keinen Ersatz, der die Effizienz von R123 in Turboverdichterkälteanlagen erreicht, Ammoniak ist jedoch in der Lage, die Leistung von R22 in Niedrigtemperatursystemen zu erreichen oder sogar zu übertreffen. Es gibt zwar Kältemittel, die die Effizienz von Ammoniak erreichen oder geringfügig übertreffen können – keines von ihnen hat

jedoch ein Treibhauspotenzial von Null, wie das bei Ammoniak der Fall ist. Daher weist Ammoniak einen deutlichen Vorteil auf, der bei der Kalkulation des TEWI ersichtlich wird. Ammoniak-Leckagen sollten zwar aus Sicherheitsgründen kein Vorschub geleistet werden, die Emissionen des Kältemittels haben jedoch keinen Einfluss auf den Treibhauseffekt. Zudem können Leckagen schnell erkannt und abgestellt werden, sodass kaum die Gefahr besteht, dass ein System aufgrund geringer Kältemittelfüllmenge mit verminderter Effizienz läuft.“
(eurammon, 2008)

4 SolarFrost und das Icebook (Dr. Kunze, SolarFrost)

SolarFrost hat mit seinem Icebook eine Methode entwickelt, mit der sich Kältemaschinen mit beliebigem thermodynamischen Zyklus einfach, klein und billig bauen lassen. Zwischen 2005 und 2006 entwickelte SolarFrost entsprechende Röhrenwärmetauscher mit eingebauten Längsspiralen, die sich für den Prozess der Absorptionswärmerückgewinnung eignen. Parallel dazu entstand eine Dampfpumpe (ohne bewegliche Teile außer den Rückschlagventilen und ohne elektrischen Strom), mit der es möglich ist, in Wasser-Ammoniak-Kältemaschinen die Lösung über die große Druckdifferenz vom Absorber zum Austreiber zu befördern. Dadurch wurde auch das Problem der Lösungspumpen gelöst.

Da die Herstellungskosten noch immer hoch waren, weil die Röhrenwärmetauscher ein aufwendiges Herstellungsverfahren erforderten, experimentierte SolarFrost mit geschraubten Plattenwärmetauschern. Um die nötige große hydraulische Länge zu erreichen, wurde zwischen je zwei Metallplatten eine Kunststoffplatte mit schmalem eingeschnittenen Zickzack-Kanal gelegt. Solche Wärmetauscher ergaben erstaunlich gute Resultate. Kleine und billige Wärmetauscher mit Temperatureffizienzen von über 95% wurden gebaut und getestet. Das gilt auch für Wasser-Luft-Wärmetauscher, die bisher auch einen Schwachpunkt herkömmlicher Kühlgeräte darstellten. Eine hohe Temperatureffizienz der Rückkühlung bedeutet nämlich, dass die Abwärme nahezu bei der Außenlufttemperatur abgegeben werden kann.

Bereits vor Projektbeginn wurde eine Möglichkeit entwickelt, das Bypassprinzip auch in Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschinen mit zwei unterschiedlichen Drucken für Kondensation und Austreibung anzuwenden.

Mit diesen Entwicklungen war die Grundlage für den **Zero CO₂ Cooler** gelegt.

Unmittelbar vor Projektbeginn gab es bereits erste Versuche mit sogenannten Icebooks, das sind Kältemaschinen, die nach der oben angedeuteten Methode der geschraubten Plattenwärmetauscher mehrere Wärmetauscherelemente wie Generator, Absorber und Kondensator samt deren Verbindungen in einem einzigen Plattenblock vereinigen, es war damals aber noch nicht möglich, Bauteile wie eine Dampfpumpe, Regelventile oder Speichergefäße oder gar den recht klobigen Bypass mit seinen zwei unabhängigen Dampfpumpen, der schon in der Vorbereitungsphase zu diesem Projekt gebaut und getestet worden ist, in diesen Plattenblock zu integrieren.

Hauptproblem dabei waren die Dampfpumpen, deren Aktion von der Schwerkraft mitbestimmt war und die es verlangten, dass der heiße Teil der Pumpe gerade in einer Position zu liegen kommen musste, die die Rückkühlung der Kältemaschine störte, wenn man versuchte, alle Teile in einem festgefügt Block zu integrieren.

Für das vorliegende Projekt wurde versucht, einen neuartigen, theoretisch erarbeiteten und modellierten Zyklus mithilfe der Icebook-Bauweise praktisch zu verwirklichen.

4.1 Grundideen

4.1.1 Diskussion der Projektvorgaben und deren theoretischer Umsetzbarkeit

Kühltemperaturen ($T_{\text{kühl}}$), Heiztemperaturen (T_{heiz}), Rückkühltemperaturen ($T_{\text{rück}}$)

Der Arbeitszustand einer Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschine wird durch drei Temperaturen bestimmt, und zwar durch die Kühltemperatur, die Heiztemperatur und die Rückkühltemperatur, das ist die Temperatur, bei der die Abwärme des Prozesses weggeführt wird. Im Gegensatz zu elektrischen Kompressionskühlaggregaten ist es bei einer Absorptionsmaschine nicht leicht, z. B. die Kühltemperatur zu ändern oder auch nur konstant zu halten, wenn die

genannten drei Temperaturen nicht gleichzeitig kontrolliert und geregelt werden. Eine Absorptionskältemaschine ist am ehesten als passives Element zu beschreiben, wo die erzielte Kühltemperatur das Resultat der vorgegebenen Heiz- und Rückkühltemperaturen und der verwendeten Lösungskonzentration ist, während der Wirkungsgrad (COP) nicht ein fester Wert, sondern eine für jede Kältemaschine andere komplexe Funktion von Kühltemperatur, Heiztemperatur und Rückkühltemperatur ist.

Für alle Kühlgeräte gilt aber, dass der COP umso schlechter ist, je höher die Rückkühltemperatur und je niedriger die Kühltemperatur ist. Dagegen ist der COP umso höher, je höher die Heiztemperatur ist. Herkömmliche Kühlschränke führen die Abwärme über einen Luftwärmetauscher ohne Gebläse weg. Da mit hohen Lufttemperaturen gerechnet werden muss, wenn der Kühlschrank überall auf der Welt verkauft werden soll, liegt die Auslegungstemperatur für die Rückkühlung bei herkömmlichen Kühlschränken zwischen 50 und 60°C. Beim Zero CO₂ Cooler, der ohnehin für seine Beheizung an das Wassersystem des Hauses angeschlossen ist, empfiehlt es sich aber, die Rückkühlung in den Kaltwasserkreislauf hineinzuführen, also bei Temperaturen zwischen 10 und 20 °C, also in einem Bereich, wo eine gute Absorptionskältemaschine einen COP von über 1 hat, was etwa vergleichbar ist mit dem auf die Primärenergiezufuhr bezogenen COP eines guten elektrischen Kompressorkühlgeräts für eine solche Anwendung.

Abtauautomatik

Die Abtauautomatik soll beim herkömmlichen Kühlschrank dem Benutzer die Mühe sparen, den Kühlschrank in regelmäßigen Abständen abzuschalten, zu warten, bis alles Eis geschmolzen ist, und dann das Kühlschrankinnere mit desinfizierender Seife auszuwaschen. Die Abtauautomatik ist aber nur eine Scheinlösung, da sie zwar das Eis kontinuierlich entfernt, dabei aber vergessen macht, dass der Kühlschrank auch in kurzen Abständen ordentlich gesäubert werden muss. Aber es ist noch schlimmer: Die Abtauautomatik kann das aufgetaute Kondenswasser nicht in einen Kanal abführen, da ein Kühlschrank in der Regel keinen solchen Anschluss hat. Daher wird es in einen nach oben offenen Behälter oberhalb des heißen Kühlschrankkompressors geleitet, wo es verdunsten soll. Dieses Kondenswasser löst aber organische Reste von der Kühlschrankinnenwand, bevor es in den Verdunstungsbehälter gelangt. Es verwundert, dass die Gesundheitsbehörden noch nie Bedenken gegen diese Art der „Entsorgung“ erhoben haben: Der Verdampfungsbehälter mit organischen Resten, Feuchtigkeit und Wärme hat die idealen Bedingungen für die Zucht von Mikroben aller Art. Er ist gewissermaßen eine offene Kloake in der Küche, in unmittelbarer Nähe zu Plätzen, die hygienisch sauber sein sollten. Für einen „alternativen Kühlschrank“ wollen wir daher ganz bewusst auf diese Abtauautomatik verzichten.

Kühlleistungsbedarf

Auch wenn es dem Selbstverständnis von Naturwissenschaftlern zu widersprechen scheint: Es gibt keine einfache Formel für den Kühlbedarf eines Kühlschranks. Frühe Kühlschränke aus den Jahren 1910–1930 waren schon so groß wie heutige Geräte, hatten aber nur Kühlleistungen von 20–50 W. Die Wärmedämmung war damals aber ca. 10 cm dick, also viel dicker als die heute üblichen 3–5 cm. In den darauffolgenden Dekaden stieg der Leistungsbedarf von Kühlschränken kontinuierlich an und erreichte mit der ersten Energiekrise (1973) seinen Höhepunkt. Es gab damals Kühlschränke mit einer elektrischen Leistung von bis zu 1 kW. Das lag einerseits an der Tendenz, die Wärmedämmung immer dünner zu machen, und andererseits an den steigenden Erwartungen an die Kühlung, gemessen an der Menge der Produkte, die man bei einem einzigen Einkauf nach Hause brachte, und der Zeit, die man bereit war zu warten, bis diese Nahrungsmittel kalt waren. Speziell der letzte Faktor ist wesentlich wichtiger für die erforderliche Kühlleistung als die Wärmedämmung.

Seit 1973 ist die Kühlleistung von Kühlschränken wieder gesunken. Trotzdem bleibt für den wissenschaftlichen Beobachter eine gewisse Unschlüssigkeit, welche Kühlleistung der Zero CO₂ Cooler denn nun haben soll. Diese Unsicherheit spiegelt sich auch in der Reihe von Prototypen wider, die im Laufe dieses Projekts getestet wurden. Wir hatten Kühlleistungen zwischen 200 W und 1000 W.

Anforderungen; realistische Version

Aus dem Gesagten ergibt sich der Schluss, dass der Zero CO₂ Cooler nicht einfach eine Imitation herkömmlicher Kühlgeräte sein kann, bloß weil es einfacher sein könnte, dem Konsumenten ein Gerät anzubieten, das vollkommen seinen bisherigen Gewohnheiten entspricht. Da es ohnehin nicht möglich sein wird, ein mit nachhaltigen Energien betriebenes Kühlgerät zu bauen, das billiger wäre als die herkömmlichen elektrischen Kühlschränke, kann die Argumentation für den Zero CO₂ Cooler nur darin bestehen, zu zeigen, warum dieses Gerät besser ist als der alte Kühlschrank. Dafür bieten sich zwei Ansatzpunkte: die schon angesprochene Hygiene und eine bessere Verteilung der Kälte innerhalb der Kühlbox, gepaart mit einer relativ hohen Kühlleistung, weil z. B. Solarenergie ja doch billiger kommt als elektrischer Strom, wenn der Wirkungsgrad (COP) der Absorptionskältemaschine vergleichbar ist mit dem eines herkömmlichen Kompressionsgeräts.

Daraus ergeben sich die folgenden Anforderungen für den Zero CO₂ Cooler:

- Keine Abtauautomatik
- Rückkühlung über das Kaltwasser
- Der Wärmetauscher des Verdampfers in der Kühlbox geht für große Kühlschränke über die gesamte Innenfläche und für kleine Kühlgeräte über die gesamte obere Deckfläche
- Kühlleistung (Spitzenlast) 1000 W

4.1.2 Bauweise, die in automatischer Massenproduktion gefertigt werden kann

Das Icebook besteht aus einem Block fest aufeinandergepresster dünner Platten, wobei immer abwechselnd eine Platte aus Stahl über einer Platte aus Dichtungsmaterial zu liegen kommt. Dabei werden in die Platten aus Dichtungsmaterial Kanäle geschnitten, die einerseits Wasser-Ammoniak-Lösung und andererseits Heiz-, Kühl- oder Rückkühlmedien enthalten. Die Stahlplatten trennen diese Medien voneinander, andererseits erlauben Löcher in den Platten die Herstellung von Verbindungen in orthogonaler Richtung zu den Plattenebenen, sodass komplexe dreidimensionale Verbindungsschemata dargestellt werden können, wie sie für die thermodynamischen Vorgänge in Kühlprozessen typisch sind.

Die Regelelemente sind Rückschlagventile, Drosseln und Schwimmerventile, die so klein oder so flach sein müssen, dass sie in dieses Plattenkonzept hineinpassen.

Wesentliche Verkleinerung der Kosten und des Volumens

Ein Nebeneffekt dieser Bauweise besteht darin, dass alle Wärmetauscher als Plattenwärmetauscher gebaut werden müssen. Die spezielle Art von Plattenwärmetauschern hat serpentinenförmige Kanäle. Diese erlauben es im Gegensatz zu herkömmlichen Plattenwärmetauschern, dass die Temperaturunterschiede zwischen Primärmedium und Sekundärmedium nahezu gegen null gehen. Dies erlaubt eine viel kleinere Bauweise der Wärmetauscher und damit der gesamten Maschine. Im Vergleich zu den konventionellen Wasser-Ammoniak-Absorptionskältemaschinen konnte dadurch das Gesamtvolumen der Maschine bei gleicher Leistung auf nur 3 % des ursprünglichen Volumens gesenkt werden. Damit könnten natürlich im Fall einer industriellen Produktion auch die Herstellungskosten deutlich gesenkt werden.

Im Falle einer zukünftigen Industrieproduktion könnten die Platten alle aus Stahl hergestellt werden, man könnte sie stanzen und mit einer Präzisions-Laserapparatur verschweißen und hätte damit auch alle Dichtigkeitsprobleme und Fragen der langen Haltbarkeit gelöst.

Dabei muss man anmerken, dass in einem Icebook auf jeder Platte Bauteile und Verbindungleitungen zu liegen kommen, die sehr unterschiedliche Betriebsdrücke haben. Es genügt daher nicht, die Platten am Außenrand zu verschweißen, wie dies bei Plattenwärmetauschern geschieht. Man muss auch in den Plattenzentren Schweißnähte zwischen Nachbarplatten anbringen, wobei für jedes Nachbarplattenpaar andere Positionen solcher inneren Schweißnähte nötig sind.

Bei Tests, die in der Werkstatt von SolarFrost ausgeführt wurden, zeigte sich, dass dieses Verfahren, solange es nur handwerklich ausgeführt wird, nur für maximal 3–4 Platten möglich ist. Mit jeder zusätzlichen Platte vergrößern sich die Verwerfungen der Platten so weit, dass eine zusätzliche neue Platte schließlich gar nicht mehr in Position gebracht werden kann.

Händisches großflächiges Schweißen eines Plattenblocks ist also leider nicht möglich, da sich durch die dabei auftretenden Temperaturunterschiede die Teile zu stark verziehen und verbiegen.

Es stellt sich natürlich die Frage, ob es kein brauchbares industrielles Verfahren gibt, um eine derartige Flächenverschweißung zu ermöglichen. Es gibt schließlich auch ein anderes in Massenfertigung hergestelltes Produkt, wo mehrere Stahlplatten flächig miteinander verschweißt werden müssen, nämlich Autotüren. Bezüglich der Unternehmen, die diese Technologie beherrschen, gibt es aber nicht viel Auswahl. Fast alle wichtigen Autohersteller der Welt lassen ihre Türen bei der VOEST in Linz verschweißen, die (laut Aussage eines befragten VOEST-Ingenieurs) jährlich rund 100 Millionen Autotüren fertigt. Diese Anlage wurde von SolarFrost besichtigt, und es wurde ein ausführliches Gespräch mit einer Gruppe von VOEST-Ingenieuren abgehalten. Wir einigten uns darauf, dass das VOEST-Verfahren tatsächlich dafür geeignet ist, Icebooks in Massenfertigung ganz aus flächig verschweißten Stahlplatten herzustellen. Allerdings wurde vonseiten der VOEST darauf hingewiesen, dass ein Icebook keine Autotür sei und dass daher als Vorbedingung an ihrer Anlage einige Umbauten vorgenommen werden müssten. Diese Umbauten würden etwa 10 Millionen Euro kosten.

Für das vorliegende Projekt wurden die Platten daher aus einem Verbund von Stahlplatten mit Dichtungsmaterialplatten (Klingersil) mit Laser bzw. mit Wasserstrahl und manchmal sogar mit der Hand geschnitten und mit Schrauben zusammengepresst, was langsam und teuer ist. Insbesondere bei Labormodellen, die zum Zweck der Optimierung sehr oft zerlegt, umgebaut und wieder zusammengebaut werden mussten, kam es häufig zu Dichtigkeitsproblemen.

4.2 Darstellung des Konzepts (Patente)

Die in diesem Projekt weiterentwickelten, gebauten und getesteten Kühlmaschinen entsprechen alle weitgehend dem gleichen neuen Icebook-Konzept, das auf die erwähnte Dampfpumpe und den in den Vorversuchen zu diesem Projekt verwendeten Bypass verzichtet. Dabei arbeitet eine aus Form- und Trennplatten gebaute Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschine ohne Lösungspumpe und ohne Rektifikation im Batch-Verfahren.

SolarFrost Icebook Zyklus

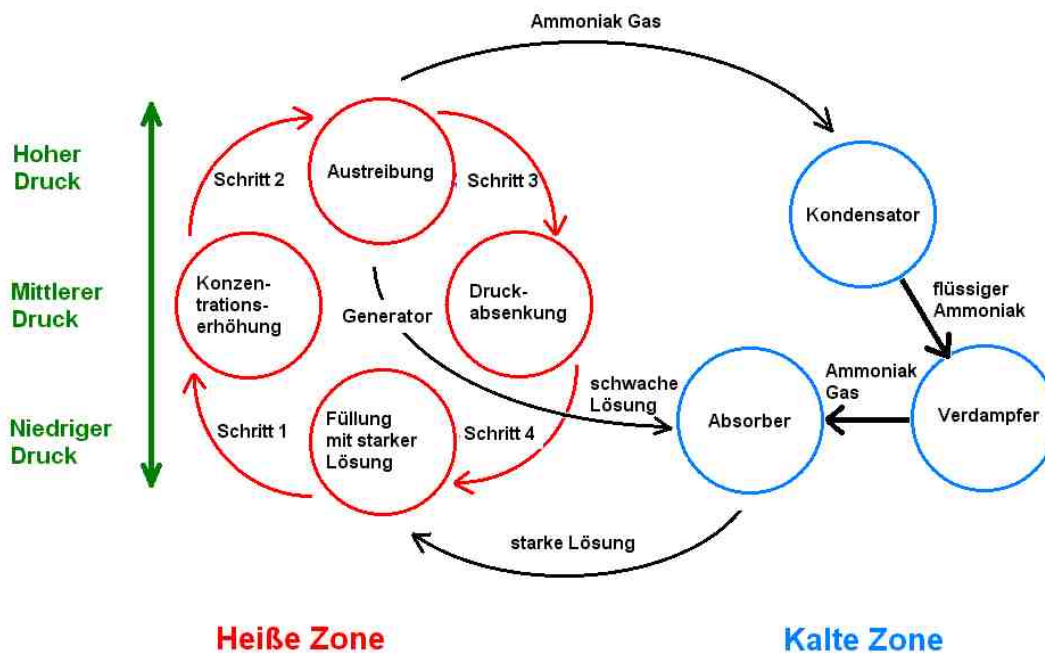


Abbildung 16: Flussdiagramm des Icebook-Zyklus

Allerdings gab es im Lauf der Entwicklungsarbeit des neuen Icebooks kleine, aber in ihren Folgen wichtige Veränderungen. Der Generator bekam einen eingebauten Druckabsenker und eine automatische Lösungskonzentrationsoptimierung, womit sich der in alten SolarFrost-Modellen verwendete Bypass erübrigt. Stattdessen fällt der Generatordruck wegen des Druckabsenkers in regelmäßigen Zeitabständen unter den Absorberdruck. Dabei wird jeweils eine feste Menge kalter Ammoniaklösung in den Generator gedrückt oder gesaugt. Diese wird im Generator zunächst mit zusätzlichem Ammoniak angereichert, dann erhitzt, wobei das entstehende Gas mit hohem Druck zum Kondensator geleitet wird, während die verbleibende schwache Lösung unter gleichzeitiger Druckabsenkung des Generators in den Absorber geleitet wird. Gleichzeitig läuft verflüssigter Ammoniak aus dem Kondensator durch eine enge Kanüle zum Verdampfer, wo es verdampft und dabei über einen Wärmetauscher ein flüssiges Medium kühlt. Nach der Verdampfung strömt der entstandene Dampf in den Absorber, wo er sich in der schwachen vom Generator kommenden Lösung unter Wärmeabgabe löst. Diese Abwärme wird dem Heizwasser, nachdem es sich im Generator abgekühlt hat, zugeführt, sodass die Nettoheizleistung der Maschine bedeutend kleiner ist als ohne diese Wärmerückführung.

Zum besseren Verständnis sei hier ein Abschnitt aus der entsprechenden Patentschrift (Österreichisches Patent: 511 228) zitiert:

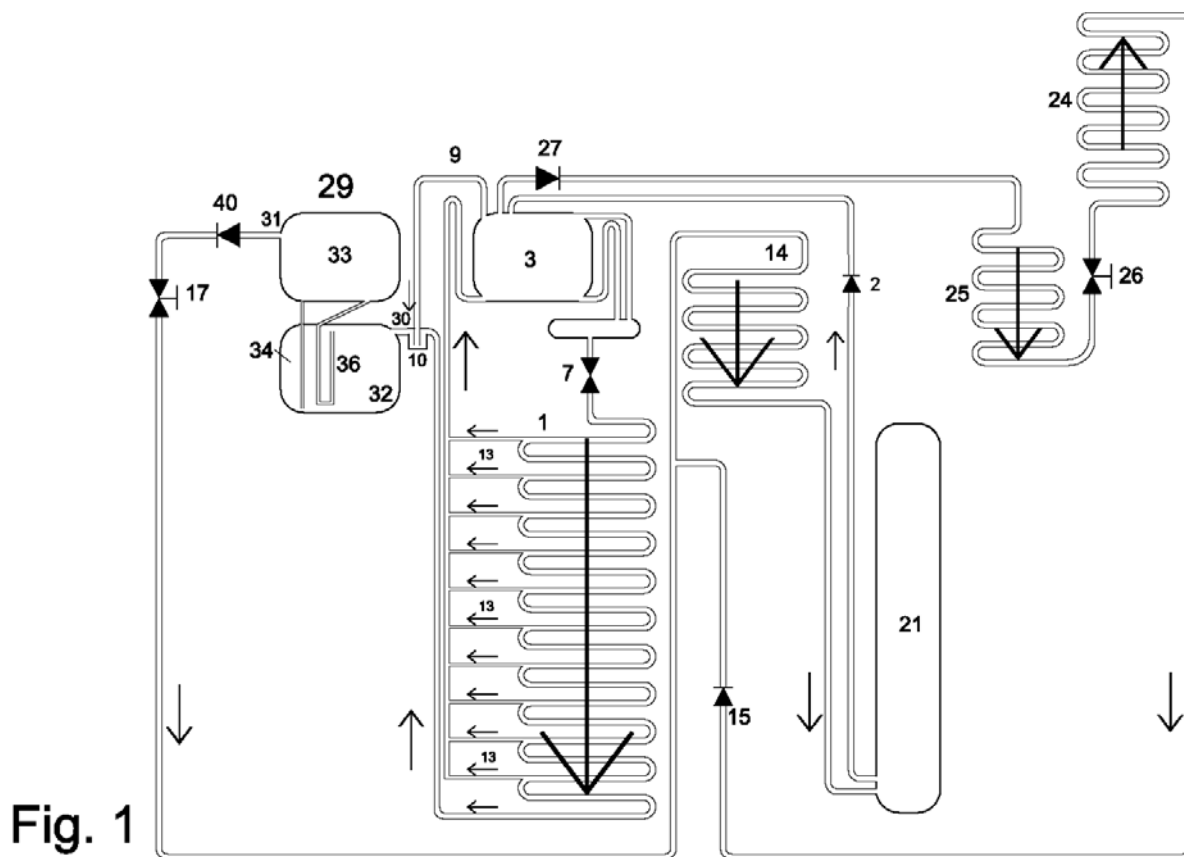


Fig. 1

Abbildung 17: Funktionsschema der Kältemaschine in der einfachsten Ausführungsform ohne Wärmerückgewinnung

„Zu sehen sind ein Generator -1- mit Eingangsgefäß -3- und Druckabsenker -29-, ein Absorber -14- mit Absorberausgangsgefäß -21-, ein Kondensator -25- und ein Verdampfer -24-. Die Pfeile geben die Hauptflussrichtung von Lösung bzw. Gas an. Heiz- und Kühlmedien sind nicht eingezeichnet.

Jeder Prozesszyklus beginnt mit der Füllung des Generatoreingangsgefäßes -3- durch stark konzentrierte Lösung aus dem Absorberausgangsgefäß -21-, welche über das Eingangs Rückschlagventil -2- angesaugt wird, sobald der Generatordruck niedriger ist, als der Absorberdruck. Während das Lösungsniveau im Generatoreingangsgefäß -3- steigt, steigt es auch im ersten Siphon oder Heber -4-. Sobald das Flüssigkeitsniveau die Höhe des oberen Scheitels des Hebers -4- erreicht hat, rinnt zunächst wegen des Gaswiderstands im Heberrohr -4- nur ein dünnes Rinnsal in das Sammelbecken -5-, reißt dabei aber Gas mit, wodurch der Lösungsfluss schneller wird, so dass sich das Sammelbecken -5- rasch füllt, wobei das Gas über die Entlüftung -6- zurück in das Eingangsgefäß -3- strömt. Vom Sammelbecken -5- läuft die Lösung dann langsam durch einen engen Verbindungskanal -7- in den beheizten Generator -1-. Dort erwärmt sich die Lösung bis zum Sieden und verdampft dabei Ammoniak, der durch die Dampfleitungen -13- und den zweiten Siphon oder Heber -8- mit dem Eingangsgefäß -3- verbunden ist. Der Ammoniakdampf blubbert dann von unten durch die kalte Lösung, die sich noch im Eingangsgefäß -3- befindet, wobei in der Anfangsphase des Zyklus dieser Dampf ganz in der Lösung absorbiert wird. Dadurch steigt ihre Konzentration und damit auch der Druck im Generatorsystem -1- und wegen der Verbindung durch das Rückschlagventil -27- auch im Kondensator -25-. Sobald im Kondensator -25- der Verflüssigungsprozess des Ammoniaks beginnt, wird im Kondensatoreingangsgefäß -3- kein weiterer Ammoniak mehr absorbiert, weil die Lösung unter diesen Bedingungen schon gesättigt ist. Zusätzlicher Ammoniakdampf wird also zur Gänze zum Kondensator -25- weitergeleitet.

Während dieses Prozesses läuft Lösung vom Eingangsbehälter -3-, über den Heber -4-, durch das Sammelbecken -5-, durch den Verbindungskanal -7-, durch den heißen Generator -1- wo die Lösung den Großteil ihres Ammoniaks wegkocht, und dann durch das Lösungssammelbecken -10- zum Eingang -30- des rückgeköhlten Druckabsenkers -29- der sich im oberen Teil des Behälters -32- befindet. Im Normalfall sind beide Behälter -32- und -33- mit kalter schwach konzentrierter Lösung gefüllt. Die heiße durch den Eingang -30- einströmende Lösung erkaltet rasch. Sie strömt dann vom unteren Behälter -32- durch die beiden Leitungen -34- und -36- in den oberen Behälter -33- und von dort durch das Rückschlagventil -40- und das Regelventil -17- zum Absorber -14-. Sobald die gesamte Lösung aus dem Eingangsgefäß -3- und dem Generator -1- verbraucht ist, gelangt in den unteren Behälter -32- Gas an Stelle der Lösung. Es bildet sich eine Gasblase im unteren Behälter -32- und das Lösungsniveau sinkt, während die Lösung durch die Leitung -34- in den oberen Behälter -33- verdrängt wird. Gleichzeitig sinkt der Lösungsspiegel in dem Schenkel der Siphon-Leitung -36- welcher sich zum unteren Behälter -32- hin öffnet. Da dieser Lösungsteil mit der Lösung im unteren Behälter -32- über den Umweg durch den oberen Behälter -33- hydrostatisch verbunden ist, befinden sich der Lösungsspiegel in der Leitung -36- und im unteren Behälter -32- während dieses Verdrängungsvorganges immer auf gleicher Höhe, bis der untere Extrempunkt der Leitung -36- erreicht ist. In diesem Moment – wir nennen ihn die Auslösung des Druckabsenkers – dringt Gas in den aufwärts zum oberen Behälter -33- strebenden Schenkel der Leitung -36- und gelangt in den Unterteil des oberen Behälters -33-. Dem hydrostatischen Druckgefälle folgend strömt nun Lösung vom oberen Behälter -33- durch die Leitung -34- in den unteren Behälter -32- und saugt dabei Gas durch die Leitung -36- aufwärts. Da dieses Gas aber sofort in der kalten Lösung des Behälters -33- absorbiert wird (weil es von unten kommt), sinkt der Druck im Druckabsenker -29- sehr schnell stark ab. Die Saugwirkung pflanzt sich über den Siphon oder Heber -9- in das Generator Eingangsgefäß -3- fort, so dass dieses neue Lösung ansaugt. Das Rückschlagventil -40- verhindert, dass Lösung aus dem Absorber -14- in den Druckabsenker -29- gesaugt wird. Über das Rückschlagventil -40- und das Regelventil -17- gelangt die schwach konzentrierte Lösung in den Absorber -14-. In dieser einfachsten Version der Maschine ist die Strömungsrichtung im Absorber immer nur abwärts, der Schwerkraft folgend. Im rückgeköhlten Absorber -14- absorbiert die Lösung den durch das Rückschlagventil -15- kommenden Ammoniakdampf, welcher zuvor nach seiner Kondensation im Kondensator -25- durch die Drossel oder Druckstufe -26- in den Verdampfer -24- gelangt ist und dort wieder in Gas verwandelt wurde, wobei der gewünschte Kühleffekt entstanden ist.“

Nicht nur die Funktion des Icebooks, sondern auch die Bauweise unterscheidet sich von konventionellen Absorptionskältemaschinen grundsätzlich. Sie beruht auf dem Konzept hydropneumatischer Systeme in Form eines einzigen Plattenblocks (Österreichisches Patent Nr. 506.358). Beim Bau von herkömmlichen Absorptionskältemaschinen werden Standardteile verwendet, insbesondere Wärmetauscher sowie Mess- und Regelungselemente, die durch ebenso standardisierte Verrohrungselemente verbunden werden. Dies führt zu unverhältnismäßig großen Baudimensionen und einem damit einhergehenden schlechten Wirkungsgrad der Bauteile, wie man bei Betrachtung der dabei meist eingesetzten Plattenwärmetauscher leicht einsehen kann.

Die beim Icebook verwendete Bauweise besteht darin, dass das primär dreidimensionale System einer Kältemaschine in ein System zweidimensionaler überlagerter Plattenelemente aufgeteilt wird. Dabei werden Verbindungen innerhalb der jeweiligen Platte durch Kanäle und Verbindungen zwischen den Platten durch korrespondierende Öffnungen in den Platten hergestellt. Diese Platten können auch zusätzliche Bauteile enthalten, bestehend aus einer Anzahl vorwiegend zweidimensionaler Elemente, das heißt glatter, ebener Platten aus unterschiedlichen Materialien,

nämlich Trennplatten aus gut wärmeleitfähigem Material – vorzugsweise Metall –, Isolierplatten aus schlecht wärmeleitfähigem Material, Formplatten aus elastischem Dichtungsmaterial und Regelungsplatten mit beweglichen Teilen (für Ventile), die durch Kleben, Schrauben oder andere geeignete Methoden dicht und flächig aufeinandergefügt und zu einem festen Block verbunden sind. Wärmetauscher werden durch benachbarte und durch gut wärmeleitende Trennplatten getrennter Formplatten gebildet, deren Schlitze oder Kanäle miteinander weitgehend, aber nicht notwendig flächendeckend korrespondieren. Dabei können auf einem von einer Trennplatte geteilten Formplattenpaar auch mehrere Wärmetauscher untergebracht werden. Umgekehrt ist es möglich, eine größere Zahl von Formplatten und dazwischenliegenden Trennplatten zu einem einzigen Wärmetauscher zu vereinigen.

Regelungselemente können im Prinzip die folgenden sein, wobei eine wesentliche Aufgabe zur Verwirklichung der Ziele des vorliegenden Projekts darin bestand, herauszufinden, welche davon die empfehlenswertesten sind:

- Regenschirmventile („umbrella valves“), das sind kleine Rückschlagventile aus einem einzigen Stück Elastomer in der Form eines geöffneten Regenschirms, der durch ein Plattenloch gesteckt wird
- Regelmembranen, ebenfalls nur aus Elastomer, die zwischen zwei Platten geklemmt werden
- Kanülen aus dem medizinischen Labor als genau definierte Strömungswiderstände
- Schwimmerventile, die über eine Mechanik ein Drehventil öffnen und schließen können
- Schwimmerventile mit einfachem Klappenverschluss, deren Teile aus einer Teflonplatte geschnitten und die innerhalb einer Formplatte eingefügt werden können

In der Praxis ergibt sich die Daumenregel, dass eine Kältemaschine, die nach dem Icebook-Prinzip gebaut ist, nur etwa 3 % des Volumens (und der Baukosten!⁵) einer herkömmlichen Absorptionskältemaschine gleicher Leistung hat.

Wasser-Ammoniak-Absorptionskältemaschinen ohne Pumpen

In jeder Wasser-Ammoniak-Absorptionskältemaschine muss eine Lösung aus Wasser und Ammoniak zwischen einer heißen Hochdruckzone (Generator, ca. 10 bar) und einer kalten Niederdruckzone (Absorber ca. 3 bar) hin- und herpendeln. Die Bewegung von der Hochdruckzone zur Niederdruckzone geht problemlos, man muss dabei sogar bremsen, was z. B. mit einer Kanüle geht. Umgekehrt muss aber Arbeit geleistet werden. In der Regel verwendet man dafür ammoniakresistente Lösungspumpen. Für große Kältemaschinen verwendet man dazu Kreislumpen. In einem Aggregat für einen Kühlschrank braucht man allerdings nur einen Lösungsfluss von weniger als einem Milliliter pro Sekunde. Eine solche Kreislumpe müsste die Präzision eines (kleinen) Uhrwerks mit einer Umdrehungszahl von etwa 100.000 rpm (wegen der großen Druckdifferenz und des kleinen Radius) kombinieren und wäre entsprechend teuer.

In älteren Versionen des Icebooks wurden daher Dampfpumpen ohne bewegliche Teile, abgesehen von zwei Rückschlagventilen, eingesetzt. Für das gegenständliche Projekt wurde dagegen ein neuer Weg beschritten, in dem es gar keine Pumpe mehr gibt. Stattdessen nimmt der Generator bei Niederdruck jeweils nur eine beschränkte Lösungsmenge vom Absorber auf, die dann erhitzt und verarbeitet wird. Der Generator hat einen eingebauten Druckabsenker, der den Generatordruck

⁵ Nach persönlicher Auskunft des technischen Leiters der Firma EMBRACO, eines der größten Kältemaschinenherstellers der Welt, ist in der Großserienherstellung von Kältemaschinen der einzige relevante Kostenfaktor die Menge des verwendeten Rohmaterials.

nachher unter den Absorberdruck bringt, sobald die Lösung zum Absorber hin ausgetrieben ist, worauf der Generator von selbst wieder Lösung ansaugt.

Mikromodule

Die Icebook-Bauweise von Absorptionskältemaschinen eignet sich für Anwendungen aller Art, weil sie optimal für modulare Bauweise ist. Hat man einmal eine Funktion eines Systems durch eine Gruppe von Platten dargestellt, so kann man größere gleichartige Systeme dadurch erstellen, dass man zusätzliche solcher Plattengruppen zu dem Paket hinzufügt. Die Verbindung mehrerer Module in einem Block ist deshalb vorteilhaft, weil die Trennplatten eines Icebooks sehr dünn sind und für sich alleine nie dem Druck einer Absorptionskältemaschine standhalten könnten. Man muss daher einen Plattenblock immer zwischen zwei „Buchdeckel“ aus dicken Stahlplatten klemmen, die mit kräftigen Schrauben verbunden sind. Offensichtlich ist es für die Stärke dieser Platten unwesentlich, wie viele weitere Platten diesem Block hinzugefügt werden.

Praktisch ist zu beachten, dass es für ein modulares Icebook zwei verschiedene Grundkonzeptionen gibt:

- *geschlossene, autonome Module*, wo jedes Modul eine ganze Kältemaschine enthält
- *offene, miteinander verbundene Module*, wo jedes Modul nur wichtige Maschinenkomponenten enthält und es zusätzliche Platten gibt, die andere Funktionen für alle Module gemeinsam erfüllen

Bei den geschlossenen Modulen liegt der Hauptvorteil darin, dass jedes Modul sein eigenes Ammoniak-Wasser-System hat. Sollte es zu einer Undichtigkeit kommen, so wird lediglich eine kleine, ungefährliche Menge Ammoniak freigesetzt. Nachteil ist der relative Platzmangel innerhalb eines Moduls. Dazu kommt, dass aufwendigere Regelelemente wie Schwimmerventile in jedem Modul wiederholt werden müssen, wodurch die Herstellungskosten steigen.

Mit offenen Modulen kann man den zur Verfügung stehenden Platz besser nützen, sodass das Gesamtsystem etwas kleiner wird. Lösungsspeicher oder Ventile können gemeinsam von allen Modulen genutzt werden.

4.3 Neuartige Bauteile und Komponenten inklusive Erfahrungen

Beim Icebook gibt es einerseits Komponenten, die zwar auch in der konventionellen Wasser-Ammoniak-Absorptionskältemaschine vorkommen, wo aber die Form geändert werden musste, um die Funktion zu verbessern, mehr aber noch, um sie überhaupt in der angestrebten Plattenbauweise realisieren zu können.

Um Wiederholungen im späteren Kapitel über die Resultate der Experimente mit verschiedenen Kühlmaschinenmodellen zu vermeiden, werden nun die neuartigen Komponenten hier einzeln aufgelistet und einzelne Vorversuche samt den Resultaten beschrieben, da mehrere der hier beschriebenen Komponenten in allen oder mehreren untersuchten Kühlmaschinenmodellen getestet worden sind.

4.3.1 Verdampfer

Im Prinzip ist ein Verdampfer ein einfacher Wärmetauscher, bei dem auf der Primärseite ein flüssiges Medium verdampft und auf der Sekundärseite ein Medium gekühlt wird. Im Kühlschrank ist das Medium auf der Sekundärseite die Kühlschrankluft.

Es gibt folgende Anforderungen:

- Die aktive Fläche dieses Wärmetauschers muss groß genug sein.

- Der Strömungswiderstand auf der Primärseite muss klein genug sein. Dieser ist aber sehr stark vom verwendeten Kältemittel abhängig, dabei gehen nicht nur die Zähigkeit desselben, sondern mehr noch die Oberflächenspannung und die spezifische Verdampfungswärme in die Rechnung ein.
- Sollte Wasser in die Primärseite des Wärmetauschers gelangen, dann muss dieses abfließen können.

Zur Wahl der optimalen Verdampferform wurden Vorversuche gemacht:

Für einzelne Experimente war es aufgrund der Projektziele nötig, den Verdampfer aus der Kältemaschine heraus direkt in einen Kühlschrank zu platzieren, da diese Anordnung die energetisch optimale Lösung der Kälteübertragung darstellt. Es gab dafür einerseits einen von der Firma Eudora zur Verfügung gestellten Kühlschrank und andererseits einen von der GrAT entwickelten Prototyp bzw. ein Vormuster von diesem (siehe Kapitel 5.2).

Der von der Firma Eudora zur Verfügung gestellte Kühlschrank hatte noch seinen Originalverdampfer mit eingebaut. Es zeigte sich schnell, dass dieser leider nicht für den Betrieb mit Ammoniak geeignet war.

Als Alternative bot sich an, anstelle der vorhandenen sehr engen Serpentinrohrschlangen andere mit größerem Innendurchmesser zu verwenden. Das hätte den Vorteil, dass der Kühlschrank seine alte Form und sein Aussehen bewahren könnte.

Eine zweite Variante bestand darin, einen neuen Plattenwärmetauscher nach dem Icebook-Prinzip in Serpentinform zu bauen, angepasst an die Dimensionen des Prototyps.

Das Problem dabei war, dass bei den Wärmetauschern, die für das Icebook gebaut wurden, als „Buchdeckel“ zwei dicke schwere Stahlplatten dienten, die den hohen Gasdruck kompensierten. Der Verdampfer musste aber frei im Inneren des Kühlschranks aufgehängt werden. Um trotzdem eine entsprechende Druckbeständigkeit zu erreichen, musste ein solcher Plattenwärmetauscher über die ganze Fläche stabilisierende Elemente enthalten. Für die Umsetzung wurden verschiedene Varianten erprobt:

- flächiges Verkleben der Wärmetauscherplatten
- Befestigung der Wärmetauscherplatten durch Nieten entlang der Stege zwischen den Serpentin
- Verlöten oder Verschweißen der Wärmetauscherplatten

Erfahrungen und Messungen

- Der Versuch, eine eigene Serpentinrohrschlange mit größerem Innendurchmesser (6 mm) zu bauen, brachte nicht das gewünschte Resultat. Es war nicht möglich, Temperaturen unter 15 °C zu erreichen. (Zum Vergleich: Die alten Elektrolux-Absorberkühlschränke verwendeten Rohre mit einem Innendurchmesser von 2 cm, die aber frei im oberen Bereich des Kühlschranks hingen, was wir aus Gründen der Akzeptanz vermeiden wollten.)
- Die geklebte Variante konnte dem Druck nicht standhalten.
- Ein Plattenwärmetauscher mit Nieten wurde in den ersten Kühlschrankprototyp der GrAT eingebaut und funktionierte (siehe den Abschnitt 5.2). Allerdings verfügten die Platten nicht über eine ausreichende Stärke, damit sie vollständig dicht verpresst werden konnten, weshalb sie zusätzlich mit Klebstoff abgedichtet werden mussten.
- Die Herstellung eines gelöteten bzw. geschweißten Plattenwärmetauschers wurde von der GrAT durchgeführt (siehe Kapitel 6.6). Eine besondere Schwierigkeit dabei war, dass nicht nur die Außenkanten, sondern sämtliche Serpentinstränge der Platten miteinander verbunden werden mussten.

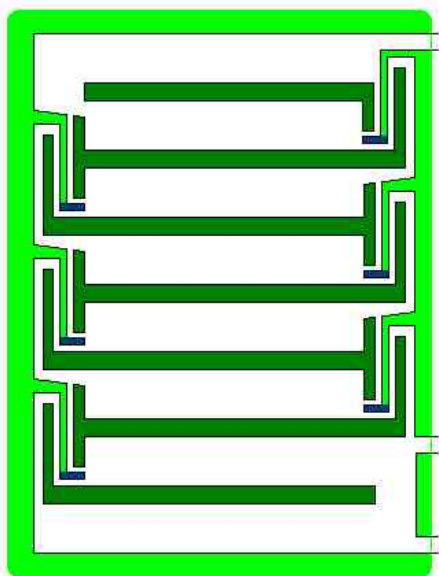
4.3.2 Absorber

Konventionelle Absorptionskältemaschinen verwenden den sogenannten „falling film“: Dabei rieselt Lösung in einem Ammoniakgasraum über eine gekühlte Fläche. Das funktioniert gut, braucht aber sehr viel Volumen und Lösungsmenge. Will man einen Absorber in ein Plattenkonzept integrieren, ist eine solche Bauform nicht praktisch.

Geht man von der Form der Icebook-Wärmetauscher aus, wäre die einfachste Absorberform eine gekühlte Kanalserpentine, durch die von unten nach oben Gas und Lösung strömen. Das Problem dabei ist aber, es funktioniert nur gut, wenn Gas und Flüssigkeit vorher gut vermischt werden, da in einem engen Kanal ein Mischvorgang nur sehr begrenzt stattfinden kann.

Im Rahmen dieser Entwicklungsarbeit wurde daher ein Kanalsystem ausgedacht, in welchem das Gas von unten nach oben strömt und die Lösung im Gegenstrom dazu von oben nach unten.

Die dritte Möglichkeit besteht in einer Serie von Kleinbehältern, die in die Platte auf gleicher Höhe integriert werden.



Konzept eines Absorbers mit fallender Lösung



Analyse und Verbesserung nach optischer Begutachtung des Verhaltens (hinter Plexiglas)

Abbildung 18: Entwicklung der Form eines Absorbers in einer Formplatte

Absorber horizontal

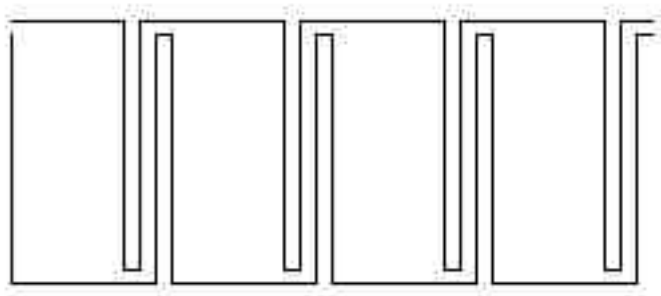


Abbildung 19: Absorber integriert in Formplatte als horizontale Aneinanderreihung von kleinen Behältern

Erfahrungen – Beobachtung hinter Plexiglasscheibe

Ein Absorber, der nur aus einfachen Serpentinaen aufwärts besteht, führt zu Stau mit Gaseruptionen: In der Regel findet keine gleichmäßige Vermischung von Gas und Lösung statt. Zusätzliche Probleme treten auf, wenn vom Verdampfer her unverdampfter flüssiger Ammoniak kommt. Beim Eintritt von flüssigem Ammoniak in den Absorber findet eine spontane Erwärmung statt, die zu explosionsartigem Druckanstieg führen kann, der den gesamten Lösungsinhalt des Absorbers in den Absorberspeicher befördert. Gas, das unmittelbar danach kommt, findet dann keine Lösung vor, in der es absorbiert werden könnte, und so erhöht sich der Absorberdruck weiter. Der Verdampfer hört dann kurzzeitig zu kühlen auf.

Baut man ein Absorbersystem mit Gegenstrom (Abbildung 16), wo die Lösung abwärts und das Gas aufwärts fließt, kommt es ebenfalls zum Lösungsstau, weil die komplexen Kanäle gepaart mit mangelnder Präzision beim Zuschneiden der Platten häufig die gewünschten Siphoneffekte nicht erfüllen, die die beiden beteiligten Phasen vermischen sollten.

Die Serie mehrerer horizontal nebeneinander angeordneter Behälter (Abbildung 17) erwies sich den beiden anderen Systemen gegenüber als vorteilhaft, weil es zu keinem Lösungsstau kommt. Als Nachteil erwies sich, dass das System instabil gegenüber Druckschwankungen ist, die z. B. durch plötzlichen Wechsel der Rückkühltemperatur hervorgerufen werden können oder wenn die Maschine abgeschaltet wird. Dann absorbieren sich alle Gasblasen in den einzelnen Behältern und das System ist kompakt mit Lösung gefüllt und funktioniert genau so schlecht wie die einfachen Serpentinaen. Es braucht etwa eine halbe Stunde, bis sich nach Wiederherstellung konstanter Druckverhältnisse im Absorber optimale Arbeitsbedingungen des Absorbers einstellen. An der Optimierung des Absorbers muss noch weiter gearbeitet werden.

4.3.3 Generator

Konzepte

Der Generator ist im Prinzip nichts anderes als ein normaler Kocher. Wie beim normalen Kochen muss verhindert werden, dass der Behälter durch zu viel Schaumbildung übergeht. Von den Vorproben her war nur die Serpentinaenform bekannt. Als neue Formen in diesem Projekt wurden eine spezielle Serpentinaenform mit seitlicher Entlüftung sowie zwei von der Entlüftung her aufwendigere Konzepte probiert, eines mit horizontalem Lösungsfluss und eines mit vertikalem Fluss von oben nach unten.

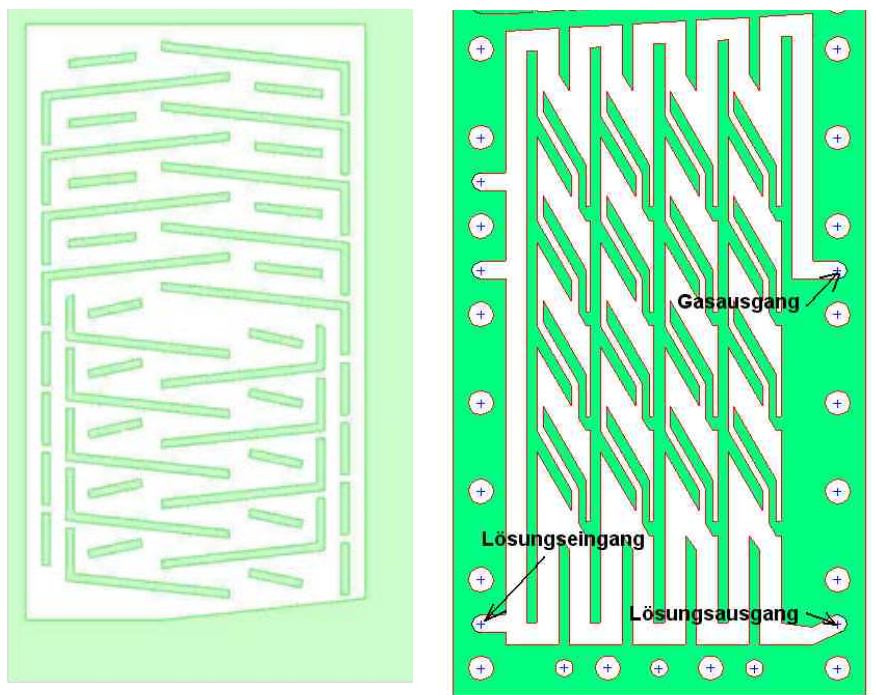


Abbildung 20 Links: Formplatte für einen Generator mit vertikalem Lösungsfluss von oben nach unten. Lösungseintritt in der Mitte der Platte (durch die benachbarte Trennplatte) funktioniert gut, solange nicht zu viel Lösung eingespritzt wird; rechts: Formplatte für einen Generator mit horizontalem Lösungsfluss von links nach rechts. Die Lösung strömt im unteren Teil der Form und erhitzt sich dabei. Es entsteht Schaum, der nach oben abgeleitet wird, wobei sich aber Gas von der Lösung trennt.

Erfahrungen – Beobachtung hinter Plexiglasscheibe

Die Serpentinform mit seitlicher Entlüftung neigt zum Überkochen der Lösung in den Kondensator. Der vertikale Lösungsfluss von oben nach unten funktioniert nur mit einem relativ großen Volumen im Verhältnis zur verarbeiteten Lösungsmenge, weil Lösung und Gas dabei im Gegenstrom stehen und einander gegenseitig behindern.

Beim horizontalen Generator sind die Flüsse von Gas und Lösung wegen der Schwerkraft voneinander getrennt.

4.3.4 Schwimmerventile statt Drosseln

Drosseln sind Druckstufen. Sie sollen den Druckunterschied zwischen Generator und Absorber bzw. zwischen Kondensator und Verdampfer aufrechterhalten, obwohl zwischen diesen Komponenten ein regelmäßiger Flüssigkeitsstromfluss stattfinden soll. In der einfachsten Form handelt es sich um Strömungswiderstände wie z. B. enge Kanülen oder halbdurchlässige Membranen.

Wenn sich die Rückkühltemperatur einer Kältemaschine ändert, so ändert sich auch der besagte Druckunterschied. Damit verändern sich auch die Strömungsverhältnisse in der Maschine. Nicht regelbare Drosseln sind daher ein Funktionsrisiko.

Die einfachste Regelung einer Druckstufe ist ein Schwimmerventil, das nur dann Flüssigkeit aus dem Generator oder Kondensator herauslässt, wenn zu viel davon da ist. Wir haben in diesem Projekt zwei verschiedene Arten davon ausprobiert, eine mit Drehventil, die andere mit einem einfachen Klappenverschluss. Das Problem mit Schwimmerventilen bei sehr hohen Druckstufen ist, dass der Druckunterschied (-5–10 bar) den Öffnungsvorgang eines Ventils verhindert. Daher braucht man spezielle Konstruktionen, die einerseits die Kraft des Schwimmers erhöhen können (Drehventil mit Hebel, siehe auch Abbildung 32), oder welche, die die Anströmfläche des Ventils verkleinern

(Mikrodüse mit Mikroklappe). Ein zusätzliches Problem besteht darin, dass flüssiges Ammoniak eine Dichte von 0,6 kg/Liter hat, sodass es kaum einen Körper gibt, der darin schwimmt, weil Hohlkörper wegen des hohen Drucks nicht einsetzbar sind. Eine mögliche Lösung des Problems besteht darin, den Schwimmer an einer Feder aufzuhängen, die den Großteil seines Gewichts neutralisiert. Das ist ein zusätzliches mechanisches Problem, weil auf engstem Raum gearbeitet werden muss. Ein Schwimmerkasten ist ein Totraum, der im Verhältnis zur Gesamtlösungsmenge in der Maschine große Mengen an Ammoniaklösung erfordert.

Die Drehventile verbrauchten in dieser Hinsicht ganz besonders viel Raum und wurden daher nur einmal verwendet (500W-Maschine mit externen Behältern), obwohl sie von der Funktion her klaglos arbeiteten. Ersatzweise wurde bei dieser Maschine auch mit einer ersten Version von Schwimmerventilen mit Klappen in externen Behältern experimentiert (Abbildung 19), was zwar ein geringeres Lösungsvolumen in der Maschine erforderte, aber wegen der Rohranschlüsse die Maschine nicht einfacher zu bauen machte.

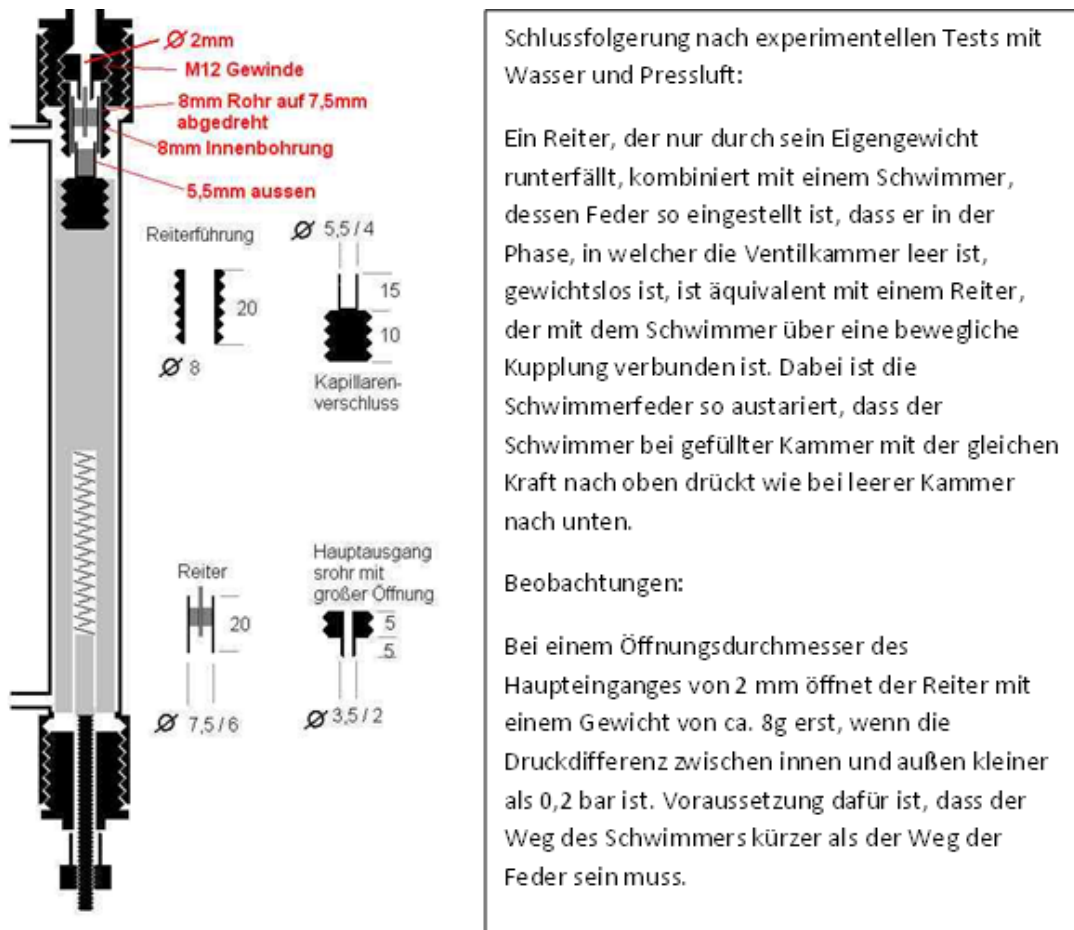


Abbildung 21: Komplettes Gasventil zur Druckabsenkung im Generatoreingangsgefäß mit zylindrischem Schwimmer, dessen Nettogewicht von unten über eine Druckfeder eingestellt werden kann. Design und Konstruktion SolarFrost.

Abbildung 20 zeigt die Grundform des Klappenventils, dabei ist ganz unten eine Kanüle zu erkennen, durch die Flüssigkeit aus dem Schwimmerraum austreten kann. Die senkrechte Schwimmerachse mit einem eingearbeiteten Gummipropfen an ihrem Unterende steht normalerweise auf dieser Kanüle und verschließt sie. Sobald der Schwimmer diese Achse hochbewegt, öffnet sich dieser Verschluss. Dieses Ventil kommt am Generator und am Kondensatorausgang zur Anwendung.

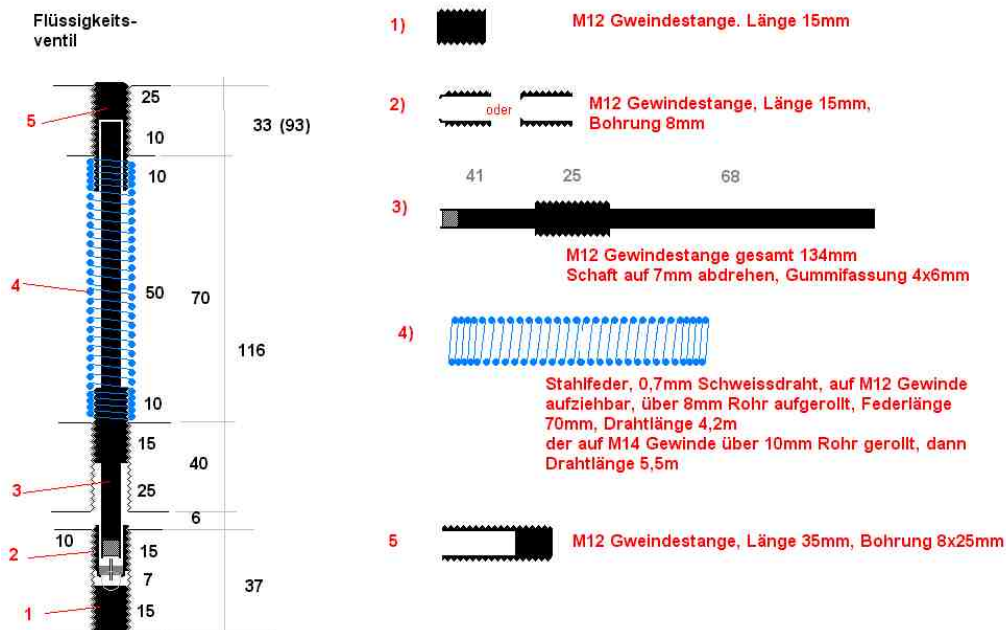


Abbildung 22: Flüssigkeitsventil mit Verschlussklappe und Schwimmer und seine Komponenten; Design und Konstruktion SolarFrost. Teil 3 wird in einen flachen Schwimmerkörper (nicht dargestellt) eingeschraubt. Zahlen geben Dimensionen in mm an.

Abbildung 21 zeigt ein Gasventil in analoger Bauweise, aber von unten nach oben gespiegelt, das sich öffnet, sobald sich der Schwimmer abwärtsbewegt. Es kommt bei einer Sonderform des Druckabsenkers in der Generatorvorkammer zum Einsatz. In Abbildung 21 sind nur die Komponenten des Ventils ohne Schwimmer dargestellt, und Abbildung 22 zeigt eine Ansicht des gesamten Ventils, wie es in den Plattenstapel eingebaut wird.

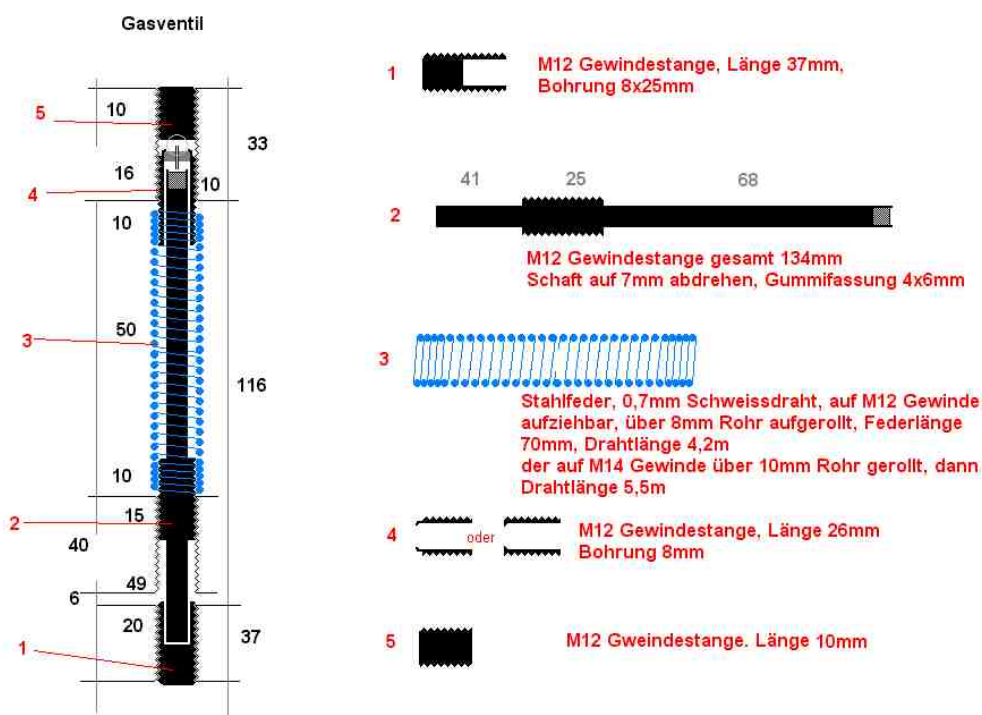


Abbildung 23: Gasventil für Schwimmer und seine Komponenten; Design und Konstruktion SolarFrost. Teil 2 wird in einen flachen Schwimmerkörper (Abbildung 22) eingeschraubt. Zahlen geben Dimensionen in mm an.

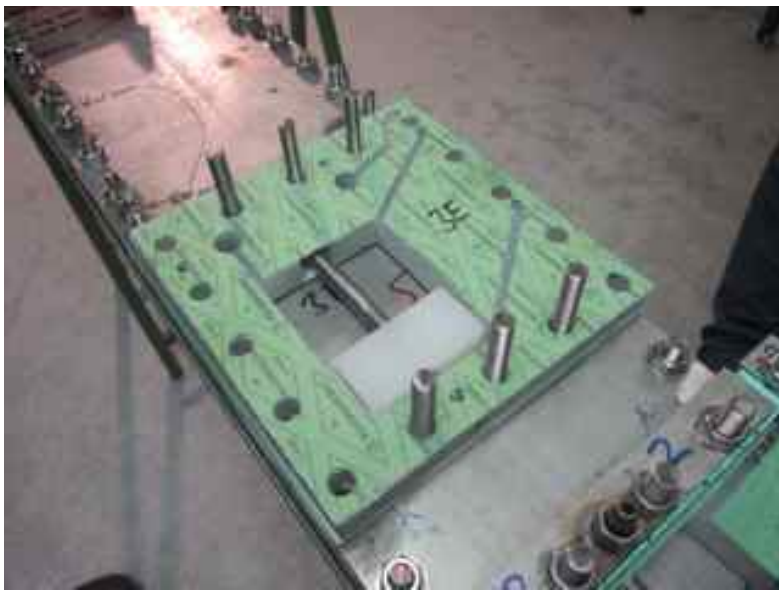
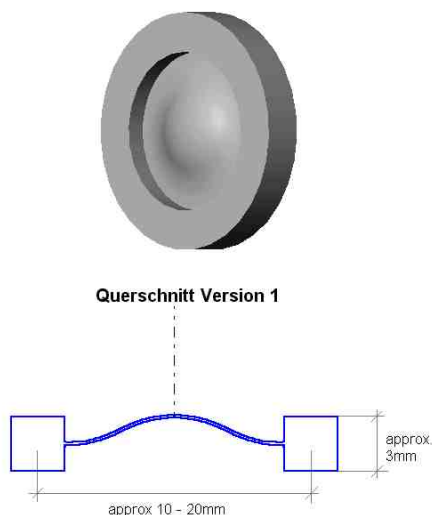


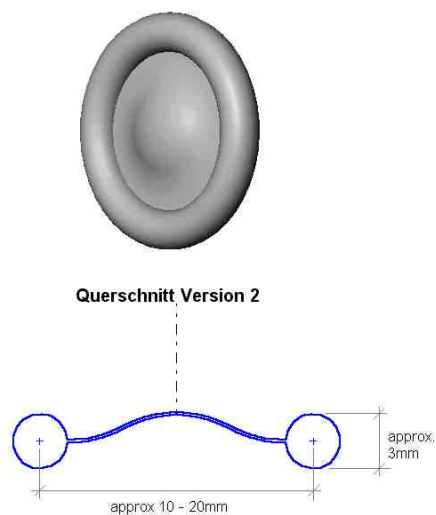
Abbildung 24: Das gleiche Gasventil von Abbildung 21, in das Plattensystem einer Ventilbox eingebaut

Eine dritte Möglichkeit der Steuerung der Flüsse besteht in einem automatischen Membranventil, das je nach kleinen Druckschwankungen, wenn sich der Kondensator oder der Generator füllt, ein nur 2 mm großes Nadelventil öffnen kann. Dieses Ventil sitzt z. B. direkt am unteren Ende einer Kondensatorplatte vor einem kleinen Loch zur Nachbarplatte und wird von der Membran je nach den Druckbedingungen im Kondensator gehalten oder losgelassen. Die passende Membran zu finden war schwierig (Abbildung 23). Die Version rechts konnten wir tatsächlich bekommen, allerdings gab es den Außenring der Membran nur in einer Stärke von 2 mm, was zwischen unseren Platten von 2 mm Standarddicke nicht genügend Dichtung gewährleistete.

Version 1 mit rechteckigem Ringprofil



Version 2 mit rundem Ringprofil



Anfrage an Vernay wegen Ringmembran
von SolarFrost, 14.5.2012, Dr. Kunze

Abbildung 25: Mikromembran

Erfahrungen

Die Membranventile waren bei weitem die kleinsten und sind für eine spätere industrielle Fertigung solcher Kältemaschinen sicher eine gute Option. Leider gelang es in der Zeit der Projektdauer nicht, geeignete Mikromembranen in der erwünschten Qualität aufzutreiben.

Die Schwimmerventile in allen Versionen funktionierten zufriedenstellend. Die mit dem Mikroklappenverschluss waren deutlich kleiner und werden wohl auch in zukünftigen Projekten zur Anwendung kommen.

4.3.5 Druckabsenker (DAS)

Konzepte

Druckabsenker erfüllen die Aufgabe einer mechanischen Pumpe ohne bewegliche Teile. Wenn in einem Behälter mit hohem Ammoniakgasdruck eine kalte schwache Lösung dieses Gas aufnimmt, sinkt der Druck in dem Behälter um einige bar. Der Behälter saugt dann frische Lösung an. Wird diese erhitzt, steigt der Druck wieder und die Lösung wird über ein Rückschlagventil woandershin gepumpt. Der Druckabsenker ist dann in der Lage, das überschüssige Gas erneut aufzunehmen.

Im gegenständlichen Projekt wurden mehrere neue Druckabsenkertypen (siehe Österreichisches Patent: 511 228) getestet.

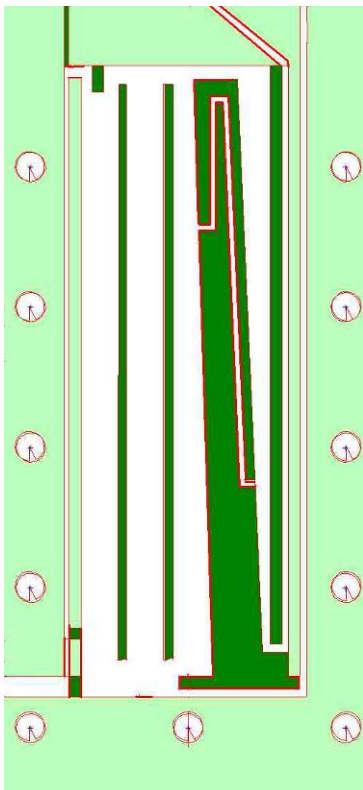


Abbildung 26: Eine einfache Druckabsenkerversion, die sich ziemlich gut bewährt hat. Die Zeichnung, ebenfalls aus dem Arbeitsprotokoll, zeigt die Veränderungen am ursprünglichen Formplattenkonzept. Hellgrüne Teile bleiben vom vorherigen Konzept erhalten, dunkelgrüne kommen neu hinzu.

Erfahrungen

Von den drei in der genannten Patentschrift beschriebenen Druckabsenkervarianten konnte in der optischen Analyse (hinter Plexiglasscheibe) die zweite Version, so wie in der Plattendarstellung Abbildung 24, als optimal identifiziert werden.

4.3.6 Plattenbauweise

Die Plattenbauweise mit Serpentinwärmetauschern hat SolarFrost schon bei früheren Kältemaschinen eingesetzt und patentiert (Österreichisches Patent Nr. 506.358).

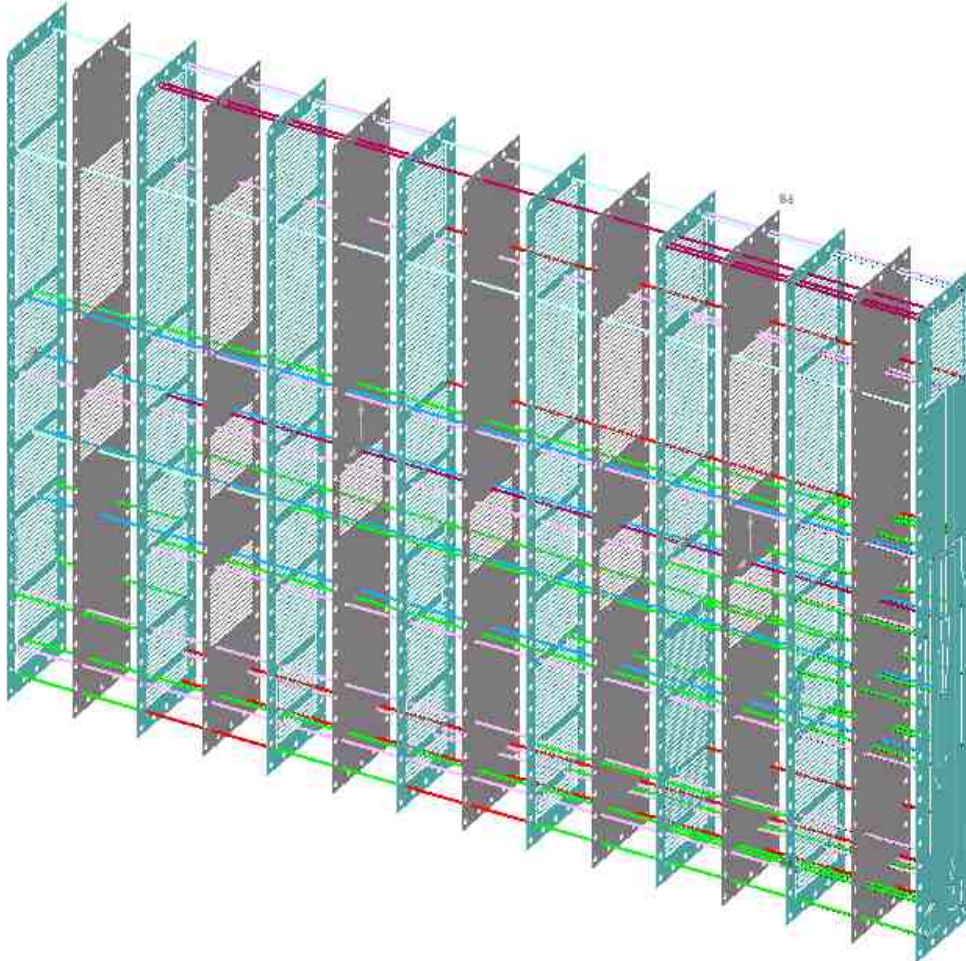


Abbildung 27: Typischer Aufbau eines klassischen SolarFrost-Icebooks: Die grauen sogenannten Trennplatten sind aus Stahl, die grünen sogenannten Formplatten aus dem Dichtmaterial Klingsil. Die Linien in verschiedenen Farben geben Flüsse von Wasser, Gas oder verschiedenen Lösungskonzentrationen⁶ an.

Das Design jedes Icebook-Modells ist extrem kompliziert, wie die obige Abbildung zeigt. Selbst eine kleine Kältemaschine hat in den Trennplatten zusammen mehrere Tausend Lochpositionen, durch die Flüssigkeit oder Gas von einer vorderen zu einer spezifischen hinteren Platte (oder umgekehrt) gelangen soll (in Abbildung 25 als farbige Linien gezeichnet, die jeweils mehrere Platten miteinander verbinden). Damit ein Medium x von der Position y auf der Platte z zur Position r auf der Platte s gelangen kann, muss es in der Regel zuerst durch einen Lochkanal y bis zur Platte p geleitet werden, wo es durch einen Kanal innerhalb dieser Platte p zur Position m geleitet wird, von wo es durch einen weiteren Lochkanal m zur Platte t gelangt, wo es durch einen weiteren Kanal innerhalb der Platte t zur Position r gelangt, wo es durch den Lochkanal r zur Position r auf der Platte s findet. Sehr oft sind solche Wege aber noch länger und machen mehr und größere Umwege, weil einerseits beachtet werden muss, dass Lösungen unterwegs nicht erhitzt werden sollen, damit kein Schaum entsteht, und dass zwei Medien mit unterschiedlichem Druck oder unterschiedlicher Temperatur nicht unmittelbar nebeneinander fließen sollen, damit es einerseits keinen Wärmeaustausch gibt und

⁶ Jede Komponente einer Absorptionskältemaschine hat eine andere Lösungskonzentration.

andererseits nicht Lösung oder Gas an einer leicht undichten Stelle den Kanal wechselt. Natürlich haben wir viele Versuche gemacht, ein möglichst genaues Schema zu zeichnen, das einerseits alle Funktionen klar wiedergibt, andererseits auch alle Gefahrenquellen, wie Temperaturverhältnisse in unmittelbarer Nachbarschaft einer Lösungsleitung und lokale Druckverhältnisse, aber auch die geometrischen Bedingungen, wie die Formen der beteiligten Platten und aller potenziellen Plattendurchgänge angeordnet sind, damit es zu keinen Fehlern kommt.

Wir haben auch Formen gefunden, alle solche Probleme in gezeichneten Schemata darzustellen. Leider sind diese nicht sehr übersichtlich, weil sich nicht vermeiden lässt, dreidimensionale Elemente zweidimensional darzustellen.

Während des Herstellungsprozesses der Platten müssen aber einerseits alle Löcher der Lochkanäle an der jeweiligen Position geöffnet werden, und sie dürfen jenseits der Stelle, wo ein Lochkanal in eine Platte einmündet, nicht in die Platten gebohrt werden. Diese Arbeit kann entweder händisch Loch für Loch geschehen, wobei auch jedes Loch (von tausend möglichen Löchern!) dann einzeln von einem Menschen, der dabei ermüdet und Fehler macht, kontrolliert werden muss, oder man schreibt eine Computersoftware, die jede einzelne Platte einzeln aufgrund des vorgegebenen Funktionsschemas berechnet, alle Lochpositionen definiert und die fertige Plattenform als dwg-File an eine Firma liefert, die nach dieser Datei die Platte mit Laser schneidet. Hier liegt das Problem darin, dass die entsprechende Software von uns selbst geschrieben werden muss und dass sie fehlerfrei sein muss. Wir haben beides probiert und glauben, dass für die Phase, in der man beim Bau von mehreren Laborprototypen große Änderungen an den Maschinen vornehmen muss, der Aufwand, vor jeder neuen Maschine die Software umzuschreiben und dann wieder lange „Debugging“-Phasen in Kauf nehmen zu müssen, nicht zu rechtfertigen ist. Der Computer ist insbesondere bei manchen geometrischen Problemen überfordert: An gewissen strategischen Stellen der Maschine wird der dabei zur Verfügung stehende Platz knapp, sodass die Kanäle in den Plattenebenen anders verlegt werden müssen. Man kann es dem Computer nicht erlauben, sich von selbst eine andere Platte zu suchen, das heißt, er darf das mühsam ausgeklügelte System nicht verlassen. Je komplexer die Funktionen werden, die das System erfüllen soll, desto häufiger passiert es dem Computer, dass er nicht erkennt, wenn er für die Formplatten, welche die Verbindungskanäle enthalten, Teilbereiche so zeichnet, dass sie beim Aufheben einer Platte herausfallen (im einfachsten Fall zwei konzentrische Kreise), und solche Teile automatisch fixiert, was zu Problemen bei der Herstellung führt. Die Laserschneidemaschinen melden dann regelmäßig Systemfehler und unterbrechen die Arbeit, so lange, bis ein Mensch interveniert und die jeweilige Form umzeichnet. Überlässt man diese Arbeit der Laserfirma, wird es sehr teuer, weil der dortige Angestellte auch erst bei SolarFrost genaue Instruktionen einholen muss, was er in jedem einzelnen Fall eigentlich verändern darf, um den herausfallenden Teil zu fixieren, und das kostet Material (für die falsch geschnittene Platte) und Zeit.

In jedem Fall brauchen neue Modelle in der Regel mehrere Wochen bis Monate, bis die letzten Fehler beseitigt sind.

Eine der Aufgaben im Rahmen der Komponentenoptimierung bestand daher darin, neue Systeme für die Formplatten auszuprobieren, wo keine Teile herausfallen können. Die beste Idee war schließlich die, immer zwei Formplatten mit einander kreuzenden Kanälen aufeinanderzulegen, etwa nach dem Schema der folgenden Abbildung 26 und Abbildung 27.

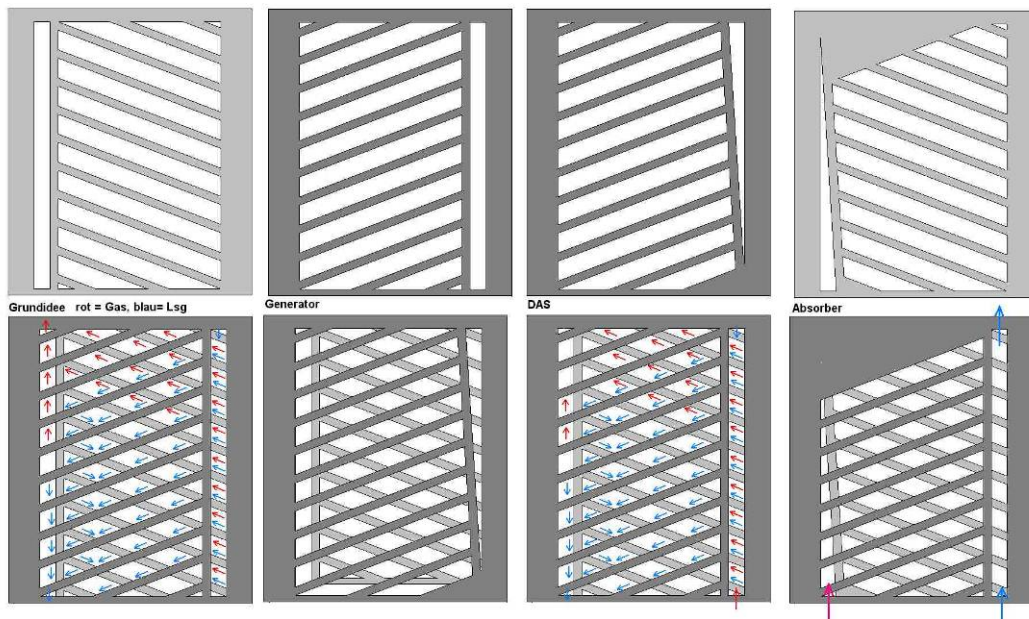


Abbildung 28: Darstellung des Prinzips der Doppelplatte in der oberen Reihe die Einzelplatten, in der unteren die sich daraus ergebenden Kombinationen.



Abbildung 29: Das Mikromodul des 200W-Icebooks ohne Behälter mit Doppelplatten, A1 und A2 ergeben gemeinsam eine doppelte Formplatte für Ammoniaklösung, und W1 und W2 geben gemeinsam eine doppelte Formplatte für die drei Wasserkreisläufe, die die Ammoniakplatte temperieren sollen.

4.4 Innovative Lösungsbewegung

Konzepte

Im ursprünglichen Projektkonzept war vorgesehen, den Druckabsenker im Generator zu lokalisieren. Dann sinkt der Druck im Generator am Ende der Kochphase selbsttätig unter den Absorberdruck, und der Generator holt sich neue Lösung. Während der vielen Experimente während des Projektes zeigte sich, dass dieses Prinzip Nachteile hat:

- Am Zyklusende fließt kalte Lösung (die des Druckabsenkers) aus dem Generator, was die Wärmerückgewinnung behindert.
- Die Pumpzyklen sind sehr langsam.
- Der Druckabsenker verbraucht Gas, das dem Kondensator zugeführt werden könnte, und vermindert dadurch die Kühlleistung.

Für die letzte der vier aufgezählten Maschinenvarianten wurde daher ein Druckabsenker mit eigenem, schwimmergesteuertem Gasventil im Generatoreingangsbehälter ausprobiert, das diese Nachteile nicht hat.

Erfahrungen

Der Druckabsenker im Generatoreingangsbehälter ist eindeutig die bessere Variante, weil die Lösung, die aus dem Generator austritt noch so heiß ist, dass im Absorber ein größerer Teil der zugeführten Wärme wieder zurückgewonnen werden kann.

4.5 Variable Lösungskonzentration

Konzepte

Im Abschnitt über die mathematischen Modelle (siehe Anhang IV) wird der Zusammenhang zwischen mittlerer Lösungskonzentration in einer Kältemaschine und der Kühltemperatur besprochen. Nun kann man bei einer konventionellen Kältemaschine nicht die Lösungskonzentration wechseln, wenn man eine andere Temperatur wünscht, weil dazu die ganze Lösung ausgetauscht werden müsste.

Der Ansatz beim Icebook ist folgender: Im Kondensator staut sich regelmäßig eine gewisse Menge flüssiges Ammoniak, bevor dieses vom Schwimmerventil in den Verdampfer entlassen wird. Dieses Ammoniak ist der Gesamtlösung entzogen worden, sodass die Konzentration kleiner geworden ist. Macht man nun den Raum, in dem sich dieses flüssige Ammoniak staut, größer, bevor der Schwimmer öffnet, so sinkt die Lösungskonzentration weiter und die Kühltemperatur wird niedriger. Die Vergrößerung des für das flüssige Ammoniak zur Verfügung stehenden Raumes kann einfach durch ein in seiner Position variables Niveaugefäß bewerkstelligt werden.

Erfahrungen

Ein derartiges Niveaugefäß wurde an die 500W-Maschine mit externen Behältern angefügt. Zukünftige Absorptionskältemaschinen werden also auch bei sehr unterschiedlichen Temperaturverhältnissen mit gleichbleibenden Temperaturen kühlen können, ohne im „Stop and go“-Rhythmus arbeiten zu müssen. Besonders für Kältemaschinen, die mit Solarwärme betrieben werden, ist das sehr wichtig.

5 Praktische Umsetzung des Konzepts, Funktionsmodelle (Dr. Kunze, SolarFrost)

Die in diesem Projekt gebauten und getesteten Kühlmaschinen entsprechen alle weitgehend dem gleichen neuen Icebook-Konzept. Dabei arbeitet eine aus Form- und Trennplatten gebaute Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschine ohne Lösungspumpe und ohne Rektifikation im Batch-Verfahren.

Allerdings gab es im Lauf der Entwicklungsarbeit kleine, aber in ihren Folgen wichtige Veränderungen. Der Generator hat einen eingebauten Druckabsenker und eine automatische Lösungskonzentrationsoptimierung. Wegen des Druckabsenkers fällt der Generatordruck in regelmäßigen Zeitabständen unter den Absorberdruck. Dabei wird jeweils eine feste Menge kalter Ammoniaklösung in den Generator gedrückt oder gesaugt. Diese wird im Generator zunächst mit zusätzlichem Ammoniak angereichert, dann erhitzt, wobei das entstehende Gas mit hohem Druck zum Kondensator geleitet wird, während die verbleibende schwache Lösung unter gleichzeitiger Druckabsenkung des Generators in den Absorber geleitet wird. Gleichzeitig läuft verflüssigter Ammoniak aus dem Kondensator durch eine enge Kanüle zum Verdampfer, wo es verdampft und dabei über einen Wärmetauscher ein flüssiges Medium kühlt. Nach der Verdampfung strömt der entstandene Dampf in den Absorber, wo er sich in der schwachen vom Generator kommenden Lösung unter Wärmeabgabe löst. Diese Abwärme wird dem Heizwasser, nachdem es sich im Generator abgekühlt hat, zugeführt, sodass die Nettoheizleistung der Maschine bedeutend kleiner ist als ohne diese Wärmerückführung.

Dieses Konzept lässt sich auch gut mathematisch modellieren (siehe Anhang mathematische Modelle). Wir versuchten eine reale Maschine zu bauen, die das beschriebene Konzept möglichst genau wiedergibt. Wenn das gelingt, so ist zu erwarten, dass sich diese Maschine auch so verhält wie vom Rechenmodell vorhergesagt.

Die Zahl der Konstruktionsdetails, die in Kombination mit anderen Elementen ein Verhalten der Maschine verursachen, das man ursprünglich nicht vorhersehen konnte, ist aber sehr groß. Derartige „Fehler“ führen in der Praxis aber nicht zu einer Verschlechterung der Leistung oder des COP, sondern sie bewirken in der Regel, dass eine Maschine gar nicht funktioniert oder dass sie den ihr zugeordneten Zweck gar nicht erfüllen kann.



Abbildung 30: Links: Fertigung der Formplatte mit der Hand; rechts: Verkleben der Platten

Die ursprünglich angepeilte Arbeitsmethode, nämlich mindestens drei verschiedene Prototypenmodelle zu bauen und dann das Beste davon auszusuchen, war so nicht ausführbar. Stattdessen bauten wir vier verschiedene Grundtypen von Modellen, von denen alle bis auf das letzte Dutzende Male umgebaut werden mussten, um überhaupt zu funktionieren. Mit anderen Worten handelt es sich um vier Modelle mit jeweils mehreren Varianten. Die einzelnen Modelle haben zwar eine zeitliche Abfolge, sind aber nicht notwendigerweise Weiterentwicklungen des vorangegangenen Modells, wenn auch logischerweise Erfahrungen aus den Vorgängermodellen in das jeweilige neue Modell einfließen.

Der Aufbau der Maschinen bestand aus einem Block zwischen zwei Außenplatten aus 10 mm starkem Edelstahl, in dem abwechselnd Form- und Trennplatten aneinanderliegen. Die Trennplatten waren aus 1 mm Edelstahl. Die Formplatten für Ammoniaklösung und Temperierungsmedien bestanden aus dem Dichtungsmaterial Klingsil C-4300, einem synthetischen Faserverbundstoff, der als Dichtungsmaterial für Flanschverbindungen eingesetzt wird. Die Bearbeitungsmethoden sind ähnlich wie für dicken Karton. Industriell wird es entweder mit einer feinen Säge, einem Nibbler oder mit Wasserstrahl geschnitten, für unsere Versuchsmaschinen machten wir es meistens mit der Hand, weil zwischen Auftragsvergabe und Lieferung in industrieller Fertigung manchmal mehrere Wochen vergehen und unser Arbeitsrhythmus normalerweise so war, dass unmittelbar nach der Erprobung einer Maschine, die normalerweise nur wenige Stunden dauert, sofort die möglichen Verbesserungen am Plattendesign diskutiert wurden. Am nächsten Tag wurde die Maschine dann entleert und geöffnet, es wurden die entsprechenden Plattenänderungen geschnitten, die Maschine wieder geschlossen, mit Lösung befüllt, und am Nachmittag des gleichen Tages fand der nächste Probelauf statt. Bei einer Vergabe der Änderungen an Auftragsfirmen hätten wir zwar immer frische Klingsilplatten gehabt und keine ausgebesserten, dadurch hätten wir auch viel weniger Probleme mit Lecks gehabt, aber die Gesamtarbeitszeit wäre 5-mal so lang gewesen und auch die Kosten würden sich dem entsprechend vervielfachen.

Die Klingsilplatten wurden mit einem Spezialkleber auf Silikonbasis auf eine dünne Edelstahlplatte geklebt. Das ist nötig, da das Design der Klingsilplatten derart ist, dass es viele Elemente darin

gibt, die physisch nicht mit dem Plattenrand zusammenhängen. Beim Bewegen oder Montieren der Platte würden diese Teile herausfallen. Vor dem Kleben werden diese Teile mit Klebestreifen befestigt (siehe Abbildung 28, rechts: in der Mitte der Platte als cremefarbener Streifen zu sehen). Sobald die Klingsilplatte mit allen diesen Elementen am Stahl fest sitzt, wird der Klebstreifen entfernt.

5.1 Das 1kW-Icebook

Vorausgehende Überlegungen

Für die Konstruktion des 1kW-Icebooks sollten alle funktionalen Elemente in einem einzigen Plattenblock untergebracht werden, inklusive aller Lösungsbehälter, Regelemente, Verbindungsleitungen und Wärmetauscher.

Wichtigster Unterschied zu den Vorversuchen vor Projektbeginn war die Elimination aller Dampfpumpen. Dafür wurde ein gänzlich neuartiges System des Lösungstransports durch eine Absorptionskältemaschine erfunden und in mehreren Kleinmaschinen hinter einer Plexiglasscheibe untersucht und überprüft (siehe Österreichisches Patent: 511 228).

Der naive Ansatz, ein Icebook zu bauen, wäre der, einen Plattenstapel zu nehmen und die theoretisch notwendigen Funktionselemente entsprechend ihren gegenseitigen Beziehungen der Reihe nach auf den „Blättern des Buchs“ anzuordnen. Aus der Modellrechnung hatte sich ergeben, dass wir dafür optimal eine Plattengröße von 23 x 150 cm wählen sollten und dann 23 solcher Platten brauchten.

Modularer Aufbau war beim ersten Modell noch kein Thema. Einzige Einschränkung war die offensichtliche Tatsache, dass verschiedene Funktionselemente einer Absorptionskältemaschine unterschiedliche Temperaturen haben. Da die Trennplatten aus Metall sind, bedeutet das, dass die Anordnung möglichst so sein sollte, dass immer nur Teile mit ähnlichen Temperaturen nah beieinander zu liegen kamen.

Ein weiteres Problem waren aber die unterschiedlichen Drücke der einzelnen Teile der Maschine, kombiniert mit dem Bedarf an mehreren Lösungsbehältern. Da es sich bei dem Kühlprozess um ein Batch-Verfahren handelt, muss an mehreren Stellen dieses Kreisprozesses Lösung zwischengelagert werden. Im Prinzip kann man natürlich auch Behälter in einem Plattenblock darstellen. Dafür muss man relativ große Ausschnitte aus den Platten machen, aber dennoch klare Strukturelemente zwischen diesen Ausnehmungen stehen lassen, damit der Plattenblock den gewaltigen Kräften standhalten kann, die auf diese Strukturelemente wirken, wenn unter ungünstigen Bedingungen der maximale Systemdruck der Maschine 20 bar beträgt.

Aus diesen Gründen hatte es während der Vorversuche keine in die Plattensysteme integrierten Behälter gegeben.

Dabei muss man bedenken, dass der Plattenblock abwechselnd aus Stahlplatten (sog. „Trennplatten“) und Formplatten (aus einem Kunststoffdichtungsmaterial) mit eingeschnittenen Kanälen besteht. Um die Behältervolumina möglichst groß zu machen, wurden aber nicht nur die Formplatten streifenförmig aufgeschnitten, sondern auch die Trennplatten. Dabei sollten genügend dünne parallele Metallstreifen stehen bleiben, um ein Auseinanderreißen der Trennplatten bei hohem Druck zu verhindern.

Wesentliche verwendete Elemente

Generator in einfacher Serpentinform mit 2 Vorkammern und Druckabsenker, Kondensator, Verdampfer in Serpentinform, 2 Absorber mit fallender Lösung im Gegenstrom zum Gas mit Wärmerückgewinnung, externer Starter, der darin bestand, dem Absorber anstelle von

Rückkühlwasser heißes Wasser zuzuführen. Alle Wärmetauscher in Form von Plattenwärmetauschern mit serpentinenförmigen Kanälen.

Rückschlagventile in Pilzform, Drosseln in Nadelventilform in externen Ventilboxen. Externer Starter über das Wassersystem.

Besonderheiten

Regelemente in externen Ventilboxen, da Funktionsprobleme in erster Linie von diesen Regelementen erwartet wurden. Verwendete Ammoniakmenge ca. 500 g.

Bis auf die Rückschlagventile in Pilzform und die Drosseln in Nadelventilform war keines dieser Elemente in den älteren Kühlmaschinenmodellen verwendet worden, auch derartige Ventilboxen waren eine Neuerung.



Abbildung 31: Das 1kW-Icebook

Ergebnisse der praktischen Tests

Die Abbildung 29 zeigt die fertige 1kW-Maschine. Man erkennt außen auf der Stahlplatte die sogenannten Ventilboxen. Da wir von früheren Maschinen wussten, dass Rückschlagventile speziell bei Verunreinigungen leicht ausfallen, und das Zerlegen eines ganzen Plattenstapels sehr mühsam und zeitaufwendig ist, wurden die Ventile in diesen Ventilboxen untergebracht, wo man sie leichter erreichen kann.

Am ersten Tag der Tests, zunächst noch mit sehr niedriger Rückkühltemperatur, funktionierte die Maschine etwa eine Stunde lang mit sehr langsamen Zyklen (Dauer ca. 20 Minuten statt der erwarteten 2–3 Minuten). Ein leichter Kühleffekt war zu beobachten (siehe Abbildung 30). Aber langsam zeigten alle Manometer der verschiedenen Teile den gleichen Druck an, bis keinerlei Aktivität mehr an der Maschine zu beobachten war. Offensichtlich verlor die Maschine zwar nach außen kein Ammoniak, aber es musste innen undichte Zonen zwischen Abschnitten mit verschiedenem Druck geben.

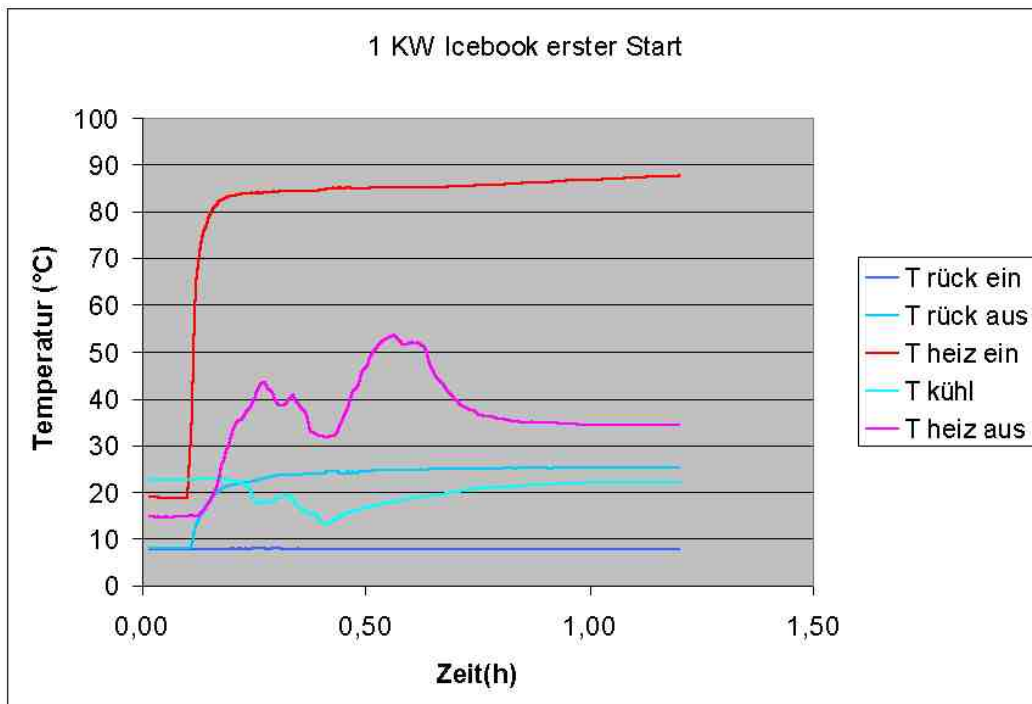


Abbildung 32: Fehlstart des 1kW-Icebooks wegen mechanisch bedingter Undichtigkeiten

Es brauchte sehr viele Experimente, bis wir eine brauchbare Methode fanden, wie man in einem undurchsichtigen Plattenstapel innere Leckagen finden kann. Nachdem diese Aufgabe gelöst war (die Lösung mit Farbe versetzen, die Maschine kurz starten, gleich wieder entleeren und dann schnell zerlegen – man sieht dann, aufgrund der farblichen Markierung auf den Trennplatten, welchen Weg die Lösung genommen hat), stellte sich das Problem, wie man einen Spalt zwischen Trennplatte und Formplatte abdichtet. Versuche mit verschiedenen Klebstoffen, Silikon und sogar das Einbringen zusätzlicher Teflonfolien brachten keine nennenswerten Ergebnisse. Offenbar behinderte die Anwesenheit von Behältern im Plattenstapel die Fortpflanzung des Drucks von den stählernen Außenplatten bis zu den inneren Formplatten.

Daher kam die Idee auf, einen „hydraulischen Druckpolster“ an einer Stelle zwischen die Platten des Blocks einzufügen. Dieser Polster sollte von außen mit einer Flüssigkeit aufgepumpt werden, deren Druck größer als der maximale Systemdruck des Icebooks sein sollte. Die Maschine hielt jedoch dem gewählten Druck von 25 bar nicht stand; die Seitenflanken der Formplatten verbogen sich.

Eine spätere Analyse ergab dann Folgendes: Offenbar schon in früheren Tests hatte der Systemdruck langsam die linearen Strukturelemente der Lösungsbehälter leicht seitlich verschoben. Für die Stabilität eines Plattenpakets – speziell wenn man einen hohen Außendruck anlegt – ist es aber ganz wichtig, dass benachbarte Platten weitgehend kongruente Formen haben, damit der Plattendruck von jeder Platte zur Nachbarplatte weitergegeben werden kann, ohne diese zu verbiegen. Als dann der hydraulische Polster mit seinen 25 bar dazukam, implodierte und kollabierte der Plattenstapel in den Bereichen, wo Behälter lagen, weil diese Behälter für einen Überdruck von innen nach außen, aber nicht für einen Druck von außen nach innen ausgelegt waren. Dieser Kollaps führte zum Gasaustritt.

Schlussfolgerungen

Das Problem dieser Maschine war offenbar nicht eine Frage des Funktionierens oder Nichtfunktionierens des thermodynamischen Systems und auch nicht eine Frage der verwendeten Komponenten, sondern es ging bei allen Problemen dieser Maschine um die Positionierung der

Behälter und deren innere Aussteifung. Neu war eben, dass wir zum ersten Mal versucht hatten, Behälter in den Plattenstapel hineinzunehmen. Diese Integration hatte die Maschine gegenüber früheren Modellen zwar wesentlich leichter und kleiner gemacht, aber wir beschlossen für das nächste Modell, doch wieder die Behälter draußen zu lassen, weil es galt, vor allem das thermodynamische System zu testen.

Für eine zukünftige industrielle Produktion ist die Form dieser Maschine zweifellos interessant, dabei müssten aber noch folgende Probleme gelöst werden:

- Alle Platten aus flächig verschweißtem Stahl, um die mechanische Steifigkeit der Behälter zu verbessern.
- Sämtliche Klingersil-C-4300-Elemente müssten durch ein geeigneteres Dichtungsmaterial ersetzt werden.
- Drossel-Kanülen müssten durch automatische Regulierventile ersetzt werden.

5.2 Das 500W-Icebook mit Behältern

Vorausgehende Überlegungen

Das in Abschnitt 4.2 beschriebene patentierte Funktionskonzept einer neuartigen Kältemaschine war zwar schon durch Modellrechnung (siehe Anhang - mathematische Modelle) überprüft worden, aber der erste Versuch (siehe Abschnitt 5.1), eine solche Maschine auch zu bauen, war fehlgeschlagen.

Dabei sollten alle Wärmetauscher im Plattenblock untergebracht werden, die Regelemente und die Lösungsbehälter aber außerhalb des Blocks montiert und durch Stahlrohre mit diesem verbunden werden.

Vor dem Bau machten wir zuerst eine „durchsichtige Testversion“, bestehend aus nur einem sogenannten Ammoniakblatt und einem Wasserblatt, beide durch eine dünne Edelstahlplatte getrennt, das Ganze vorne mit einem Fenster aus einem Paar durchsichtiger dicker Acrylglasplatten mit einem hydraulischen Wasserdruckpolster dazwischen und hinten mit einer 10 mm dicken Stahlplatte als sichere druckfeste Basis. Das Ammoniakblatt gleich hinter der Acrylglasplatte enthält die wesentlichen Bauteile wie Generator, Kondensator, Absorber, Dampfpumpe, Druckabsenker etc., je nach dem speziellen Konzept der betreffenden Maschine. Das Wasserblatt liegt gleich hinter der ersten Trennplatte und enthält mehrere Abschnitte, durch deren Serpentin Wasserzyklen für Beheizung, Rückkühlung und eventuell auch ein zu kühlendes flüssiges Medium laufen.

In der Abbildung 31 sieht man außerdem rechts die Füllapparatur, darunter ein Manometer, das den Druck im Generator angibt, und links ein Thermometer, das sowohl die Raumtemperatur als auch die Temperatur am Verdampfer angibt. Das sind für die optische Beurteilung des Prozesses die wichtigsten Informationen, die man braucht, um sich zu orientieren. Außerdem wurden auch elektronische Temperatursensoren an allen wichtigen Punkten der Maschine (alle Ein- und Ausgangstemperaturen aller Medienzyklen) angebracht, deren Signale per Computer für die nach jedem Probelauf einer Maschine erfolgende Detailanalyse aufgezeichnet wurden.



Abbildung 33: Das 500W-Icebook mit Behältern

Als Regelelemente dienten bei den ersten Versuchen einerseits Rückschlagventile („umbrella valves“) zur Regelung der Lösungsflussstärke und andererseits sogenannte „flow controls“ (kleine Gummischeiben mit einem Zentralloch), beide von der Firma Vernay hergestellt. Bei den späteren Versuchen wurden an den Ausgängen von Generator und Kondensator nicht „flow controls“, sondern Schwimmerventile eingesetzt. Im Rahmen vieler Tests kamen dabei unterschiedliche Schwimmerventile zum Einsatz. Die Abbildung 32 (links) zeigt den Zusammenbau eines solchen Schwimmerventils. Im Zylinderkörper befindet sich ein solider und voller Kunststoffschwimmer, der an einer Spiralfeder hängt, um sein Gewicht zu neutralisieren, er bewegt über einen Hebel ein Drehventil aus Teflon, das auf einer Spitze mit Andruckfeder drehbar gelagert ist, wie die Abbildung 32 (rechts) zeigt.

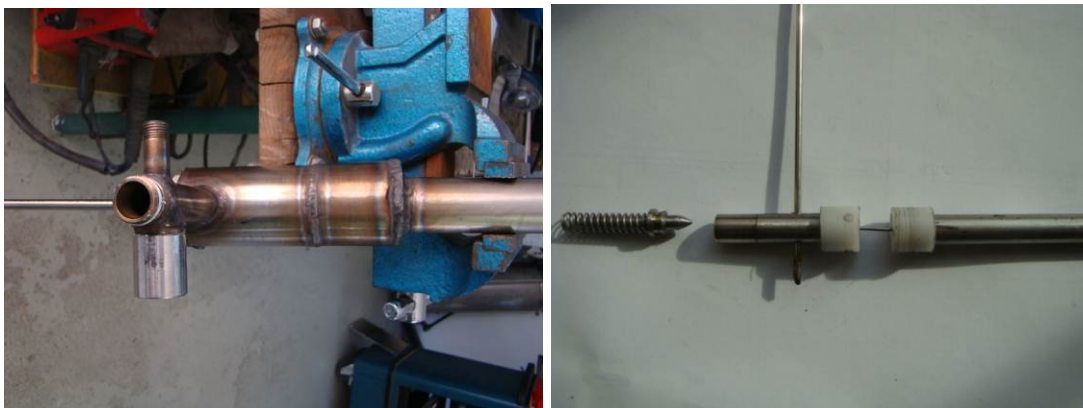


Abbildung 34: Links: Fertigung der Außenhaut eines Schwimmerventils mit Drehventil; rechts: Details des Drehventils

Im Vergleich zu den Kanülen oder den „flow controls“ erlauben die Schwimmerventile einen wesentlich besseren Wirkungsgrad der Maschine, da die feste Vorgabe einer Flussstärke durch eine Kanüle die optimale Betriebsweise der Maschine behindert. Ist das Angebot an Flüssigkeit, die aus

dem Generator oder Kondensator ausströmt, zu groß, so sinkt der Druck in diesen Bauteilen, was beim Kondensator zu einem kurzfristigen Totalausfall der Kondensation führen kann, beim Generator hingegen dazu, dass außer der Lösung auch Ammoniakgas zum Absorber geleitet wird, was die Kühlleistung absenkt.

Eine zusätzliche Neuerung dieses Modells war eine eigenständige Regelung der Kühltemperatur bei konstanter Rückkühltemperatur, welche auf dem Prinzip der variablen Lösungskonzentration beruht. Die Möglichkeit, in einer Kühlmaschine bei laufendem Betrieb die Konzentration der Lösung zu wechseln, beruht auf einem einfachen Trick: Über zwei dünne Stahlröhrchen war ein bewegliches Niveaugefäß mit dem Kondensator verbunden, sodass darin ein Teil des im Kondensator gebildeten flüssigen Ammoniaks gespeichert wurde. Dieser Teil des Ammoniaks wurde also dem Gesamtsystem entzogen. Durch Auf- und Abwärtsbewegen des Niveaugefäßes konnte man diese abgesonderte Ammoniakmenge leicht variieren. In seiner untersten Position war das Niveaugefäß ganz voll, in seiner obersten Position ganz leer.

Wesentliche verwendete Elemente

Generator bei ersten Versuchen in Serpentinform, später in vertikaler Bauweise mit 2 Vorkammern und Druckabsenker, Kondensator, Verdampfer in Serpentinform, 2 Absorber mit fallender Lösung im Gegenstrom zum Gas mit Wärmerückgewinnung, Starter, variable Konzentrationseinstellung. Externe Behälter für Absorberlösung, Konzentrationsvariation und 1. Vorkammer. Nur die im Plattenblock integrierten Wärmetauscher in Form von Plattenwärmetauschern mit serpentin förmigen Kanälen auf der Wasserseite. Die externen Behälter zwecks Temperierung mit von Wasser durchflossenen Mantelgefäßen.

Rückschlagventile in Pilzform, 2 Drosseln in Form von großen rohrförmigen Schwimmentilen mit Wassermantel in externem Rohrsystem. Externer Starter über das Wassersystem.

Besonderheiten

Die Ammoniakmenge war trotz der kleineren Maschinenleistung wegen des großen Volumens der Schwimmentile relativ groß, nämlich ca. 400 g.

Wesentliche Unterschiede zum vorhergehenden Modell:

- Drosseln in Form von Schwimmentilen
- Kühltemperatur über die Lösungskonzentration einstellbar
- Externe Behälter

Ergebnisse der praktischen Tests

An allen wichtigen Punkten und Bauteilen der Maschine wurden elektronische Temperatursensoren angebracht, deren Anzeige per Computer als Grafik des zeitlichen Ablaufs kontinuierlich dargestellt wurde. Allerdings ist für die Begutachtung eines Plattendesigns das wichtigste Kriterium der optische Befund, weshalb ja auch das Acrylfenster verwendet wurde. Der optische Befund zeigt besser als jede andere Methode an, ob das System das tut, was man von ihm erwartet, wie z. B.:

- Wenn in einem Wärmetauscherkanal, in dem Flüssigkeit fließen sollte, Gasblasen sind, so kann man das sehen; ohne optische Kontrolle, nur mit Temperatursensoren, käme man zu dem Fehlschluss, der Wärmetauscher sei falsch dimensioniert.
- Wenn ein Siphon keine Lösung transportiert, so kann man bei optischer Kontrolle erkennen, dass sich im Gasrohr Blasen bilden (weil vielleicht die Umgebung zu warm ist und die Lösung ausgasst), die den Fluss behindern.
- Die Formeln für die Strömungsberechnung. Wenn zwischen Bauteilen mit verschiedenem Systemdruck undichte Stellen sind, so sieht man das.

Das Problem bei Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschinen besteht nämlich darin, dass wir es mit einem Mehrphasensystem zu tun haben, das in den meisten Phasenübergängen Schaum unterschiedlicher Konsistenz bildet, der mit normalen Methoden der Berechnung von Flüssigkeits- oder Gasströmen nicht zu beschreiben ist. Die Formeln für die Strömungsberechnung bei Wärmeübergängen enthalten (temperaturabhängige) Materialkonstanten wie z. B. Viskosität, Dichte, Wärmeleitfähigkeit oder Wärmekapazität. Diese Konstanten sind in Schäumen aber nicht bekannt, und selbst wenn sie es für einen genau normierten Schaum wären, würden sich die entsprechenden Werte mit der jeweiligen momentanen Blasengröße ändern. Aber es gibt noch nicht einmal eine Theorie, die fähig wäre, die Blasengröße eines Schaumes vorherzusagen. Und das nächste Problem wäre dann, die Beständigkeit des jeweiligen Schaums vorherzusagen.

In der Abbildung 33 ist ein Ausschnitt einer Ammoniakplatte während des Betriebs gezeigt, der diese Vorgänge anschaulich illustriert. Die unterschiedlichen Farbtöne des Schaums sind ein Indiz für seine sehr unterschiedliche Konsistenz an sehr nahe beieinanderliegenden Stellen.



Abbildung 35: Beobachtung der Schaumbildung im Betrieb eines Icebooks hinter einer Plexiglasscheibe

Daraus folgt eine Arbeitsmethode, die mehr einem langen Ausprobieren als einem zügigen Berechnen und Verifizieren der Berechnungen entspricht. Denn eine Maschine, in der der Schaum nicht so wie vorgesehen im richtigen Moment an den gewünschten Ort abfließt, funktioniert meist nur kurz während der Aufwärmphase und dann, wenn durch die Hitze zu starker Schaum entsteht, gar nicht mehr. Genaue Temperaturmessungen oder gar COP-Berechnungen erübrigen sich dann. Man kann aber aus der Beobachtung der ungefähren Lebensdauer eines neu gebildeten Schaumpfropfens Faustregeln ableiten, wie weit der Minstdurchmesser eines beheizten Kanals sein muss, damit der Schaum nicht die Funktion des jeweiligen Bauteils behindert.

Die erste Probemaschine hatte keinen eingebauten Verdampfer, da ein neuer Verdampfer parallel in Anlehnung an das neue Design des Kühlschranks entwickelt wurde.



Abbildung 36: Links: Eisbildung am externen Spiralverdampfer; rechts: Eisbildung an der Zuleitung des Verdampfers

Daher wurde an der Rückseite außen an der 10mm-Stahlwand eine Rohrspirale angebracht (Abbildung 34), innerhalb derer das flüssige Ammoniak verdampfen konnte.

Die Kälteentwicklung war so stark, dass die Eisbildung auf die an den Verdampfer angrenzenden Rohre übergriff. Auch die Temperatur in der Umgebung dieser Spirale sank um einige Grade.

Je nach Luftfeuchtigkeit im Raum, aber auch je nach Kühltemperatur im Verdampfer ist diese Eisschicht dicker oder dünner bzw. dehnt sie sich auch auf die benachbarten Rohrleitungen aus.

Das Digitalthermometer (Abbildung 35) zeigt oben die Oberflächentemperatur des Verdampfers an, im konkreten Fall minus 8,7 °C, und darunter die Raumtemperatur im Labor 19,3 °C.

Links daneben zeigt das Manometer den Druck im Absorber in bar an. Je niedriger dieser Druck ist, desto kälter ist die Verdampfertemperatur. Der Absorberdruck seinerseits hängt von der Konzentration der Lösung in der Maschine und von der Raumtemperatur ab.



Abbildung 37: Thermometer außen am Icebook. Die obere Zahl zeigt die Temperatur am Verdampfer an, die untere die Raumtemperatur.

Der COP wurde für dieses Experiment mit etwa 0,3 bestimmt, im Gegensatz zum speziell für diese Temperaturkonstellation in Kombination mit der momentanen Lösungskonzentration mit unserer Software berechneten Erwartungswert von 0,4. Dazu ist einschränkend zu bemerken, dass die Maschine einen außenliegenden Verdampfer ohne Wassermantel hatte, sodass die Bestimmung der Kühlleistung durch Eintauchen der Kühlspirale in ein Kalorimetergefäß bei gleichzeitiger Zeitmessung bestimmt wurde.

Um die Leistung des Verdampfers genau bestimmen zu können, braucht eine Kältemaschine einen eingebauten Verdampfer. Man kann dann mit einem zu kühlenden flüssigen Medium dessen Eintritts- und Austrittstemperatur messen, wobei dessen Flussstärke bekannt sein muss. Was dabei aber tatsächlich gemessen wird, ist eine komplexe Frage, auf die es keine eindeutige Antwort geben kann. Denn die naive Vorstellung, man könne aus der Abkühlung des Wassers direkt auf die Verdampferleistung schließen, ist ein Irrtum: Die Leistung eines Verdampfers kann zwar nicht größer sein, als der zur Verfügung stehenden Menge an flüssigem Ammoniak entspricht, die pro Zeiteinheit dem Verdampfer zugeführt wird. Sie kann aber sehr wohl kleiner sein, was in der Regel auch der Fall ist. Denn nur ein Teil dieses Ammoniaks verdampft tatsächlich, je nachdem, wie viel Wärme dem Verdampfer von außen zugeführt wird. Das unverdampfte Ammoniak fließt ohne weitere interessante Effekte in den Absorber. Somit ist die Verdampferleistung durch das zur Verfügung stehende Wärmeangebot bestimmt.

Bei einem frei an der Luft stehenden Verdampfer kann man mit Sicherheit davon ausgehen, dass nicht alles Ammoniak verdampft, weil nicht genug Wärme zur Verfügung steht, denn diese müsste ja von der Raumluft durch den Eismantel in das Innere des Verdampfers gelangen. Einerseits ist schon der Wärmewiderstand zwischen Luft und einem Festkörper sehr groß, und andererseits ist Eis ein schlechter Wärmeleiter.

Wir haben daher in einige Probemaschinen auch Verdampfer eingebaut, die von einem Wärmemedium umspült wurden. Ist dieses Medium warm genug, kann man mit Sicherheit sagen, dass alles Ammoniak dabei verdampft. Abbildung 36 zeigt den zeitlichen Temperaturverlauf eines solchen Kühlprozesses (die Zacken ergeben sich aus dem zyklischen Arbeitsverlauf der Maschine). Die oberste Linie gibt die Temperatur des zu kühlenden Mediums am Verdampfereingang an (die regelmäßigen Schwankungen sind eine Folge der Wärmeleitung vom Verdampfer heraus auf das Zuleitungsrohr und der Nähe des Sensors zum Verdampfer hin). Die zweite Linie darunter ist die Temperatur des Mediums am Ausgang des Verdampfers, und die unterste Temperaturlinie wurde direkt an der Verdampferoberfläche gemessen. Die Grafik gibt den Anfahrprozess einer Maschine wieder. Offensichtlich wirkt sich auch die allgemeine Erwärmung der Maschine auf die Einlauftemperatur des zu kühlenden Mediums aus.

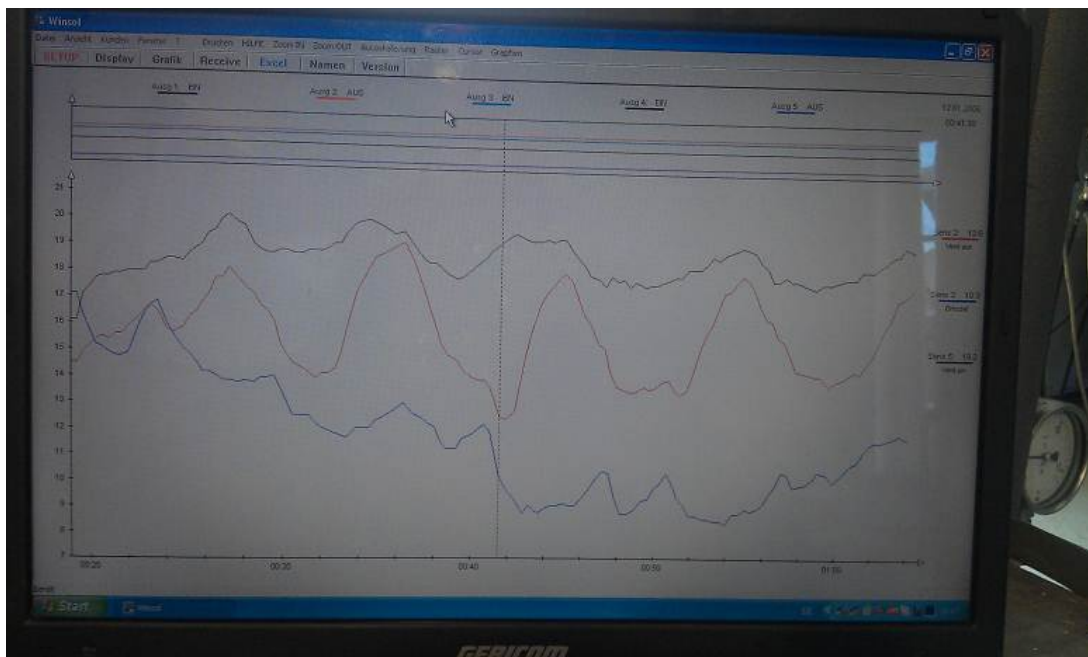


Abbildung 38: Bildschirm des Computers mit den Temperaturaufzeichnungen des im Text beschriebenen Experiments

Tatsächlich erlaubt diese Methode, eine Leistung zu berechnen. Allerdings ist diese Leistung nicht die, die dem Arbeitspunkt und der Temperatur in einem Kühlschrank entspricht. Es ist davon auszugehen, dass in einem Verdampfer in der realen Situation in einem Kühlschrank fast nie alles Ammoniak verdampft, da die Auslegung der Kältemaschine für Fälle besonders hohen Bedarfs (z. B. Einlagerung warmer Speisen in den Kühlschrank) eine Reserve einplanen muss. In diesem Zusammenhang muss noch auf eine weitere Besonderheit der Ammoniak-Absorptionskältemaschinen hingewiesen werden: Die tiefste mögliche Kühltemperatur ist eine Frage der jeweiligen Systemauslegung. Sobald der Verdampfer diese Minimaltemperatur erreicht hat, findet überhaupt keine Verdampfung mehr statt und der COP wird gleich null. Dies kann z. B. dann passieren, wenn ein Kühlschrank im Winter in einem ungeheizten Raum verwendet wird. Man muss das System also unter gewissen Bedingungen abschalten. Der COP eines solchen Kühlschranks ist somit eine Funktion des Benutzerverhaltens – je weniger jemand seinen Kühlschrank belastet, desto schlechter ist der COP, und je mehr Leistung er von seinem Kühlschrank verlangt, desto höher ist dessen Kühltemperatur und somit auch nicht aussagekräftig.

Die Situation ist vergleichbar mit der Frage nach dem Treibstoffverbrauch eines Autos. Er hängt ebenfalls vom Nutzerverhalten ab. Man versucht daher, dieses Nutzerverhalten zu normieren, und definiert gesetzlich verbindliche Normen wie ÖNORM, DIN oder andere. Es existiert aber noch keine Norm für eine solar betriebene Kältemaschine, die als Allzweckmaschine sowohl Räumlichkeiten kühlen können soll als auch gleichzeitig wahlweise evtl. sogar mehrere Kühlschränke und/oder Tiefkühltruhen, wie es in der Zielvorgabe für den zukünftigen Zero CO₂ Cooler vorgesehen ist. Selbst wenn diese Maschine nur einen einzigen Kühlschrank betreibt, sind die Testvorgaben für elektrische Geräte gedacht.

Entsprechend der Zielsetzung einer Steigerung der Energieeffizienz und der Reduzierung von CO₂-Emissionen ist nicht der direkte Vergleich mit dem COP eines elektrisch betriebenen Kühlschranks relevant, sondern der Einsatz dieser Technologie an sich.

Beim derzeitigen Stand der Entwicklung kann eine Messung unserer Maschinen also nur eine (zugegebenermaßen subjektive) Orientierungshilfe sein, ob die weitere Arbeit an solchen Projekten sinnvoll ist.

Für die Bestimmung des „maximalen COP“ unserer 500W-Icebooks benutzten wir daher eine andere Messmethode, die darauf beruht, dass die Maschine nach dem Batch-Verfahren in jedem Zyklus eine genau definierte Lösungsmenge in den Generator befördert, aus dem sich bei bekannter Generatortemperatur und Generatordruck leicht die Menge flüssigen Ammoniaks errechnen lässt, die in den Verdampfer gelangt. Da die Verdampfungswärme dieses Ammoniaks bekannt ist, ergibt sich daraus die Kühlwärme pro Zyklus, und damit folgt aus der Zyklusdauer die Kühlleistung der Maschine, ohne dass man durch eine Erwärmung des Verdampfers den Zustand des Kühltanks verändern müsste.

Mit diesem Verfahren wurde der COP der 500W-Maschine wie folgt für drei verschiedene Heiztemperaturen ermittelt.

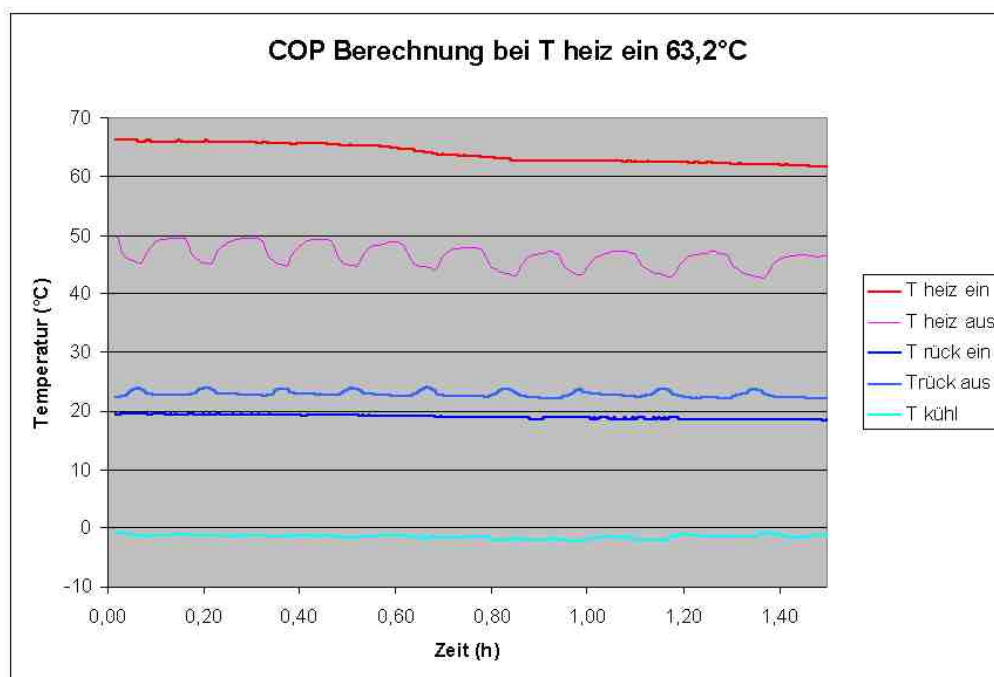


Abbildung 39: Temperaturen der Heiz und Rückkühlwasserkreisläufe sowie die Temperatur des externen Verdampfers. Die mittleren Temperaturen betrugen: $T_{\text{heiz ein}}=63,2^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{heiz aus}}=45,9^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{rück ein}}=18,7^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{rück aus}}=22,5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{kühl}}=-1,5^{\circ}\text{C}$, die Wasserflüsse waren für den Heizkreislauf $F_1=4,5\text{ml/sec}$ und für den Rückkühlungskreislauf $F_2=31,5\text{ml/sec}$. Die mittlere Zyklusdauer betrug 9,5min, entsprechend einer Kühlleistung von 177,8W. Daraus folgt ein COP von 0,55.

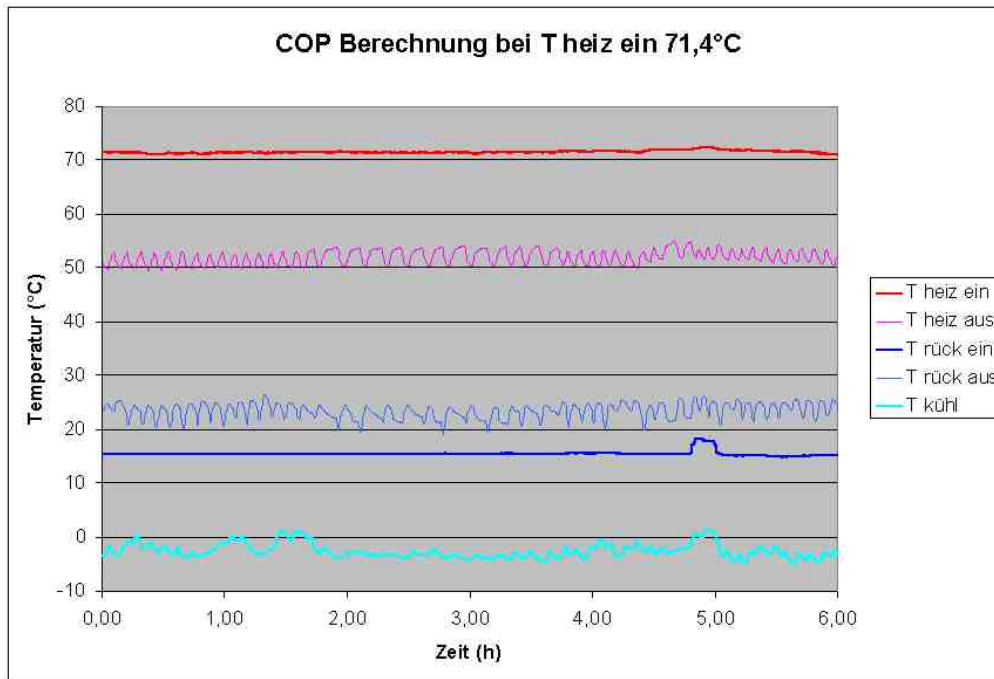


Abbildung 40: Temperaturen der Heiz und Rückkühlwasserkreisläufe sowie die Temperatur des externen Verdampfers. Die mittleren Temperaturen betrugen: $T_{\text{heiz ein}}=71,4^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{heiz aus}}=51,9^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{rück ein}}=15,4^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{rück aus}}=23,4^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{kühl}}=-2,7^{\circ}\text{C}$, die Wasserflüsse waren für den Heizkreislauf $F_1=6\text{ml/sec}$ und für den Rückkühlungskreislauf $F_2=24,6\text{ml/sec}$. Die mittlere Zyklusdauer betrug 6,3min, entsprechend einer Kühlleistung von 333W. Daraus folgt ein COP von 0,68.

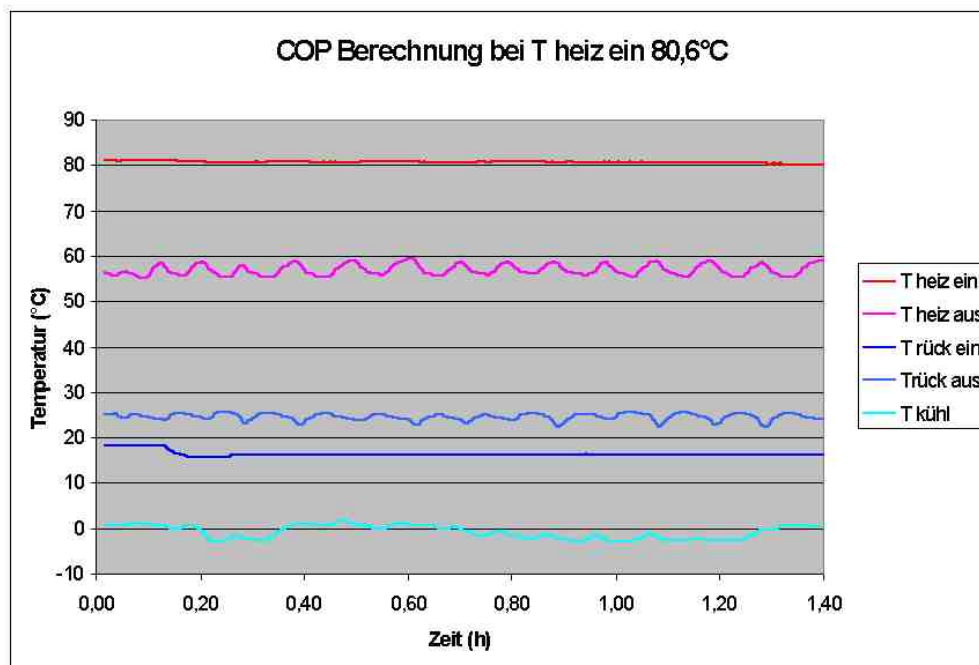


Abbildung 41: Temperaturen der Heiz und Rückkühlwasserkreisläufe sowie die Temperatur des externen Verdampfers. Die mittleren Temperaturen betrugen: $T_{\text{heiz ein}}=80,6^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{heiz aus}}=56,9^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{rück ein}}=16,3^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{rück aus}}=24,6^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{kühl}}=-0,9^{\circ}\text{C}$, die Wasserflüsse waren für den Heizkreislauf $F_1=5,8\text{ml/sec}$ und für den Rückkühlungskreislauf $F_2=30,2\text{ml/sec}$. Die mittlere Zyklusdauer betrug 5,4min, entsprechend einer Kühlleistung von 472W. Daraus folgt ein COP von 0,83.

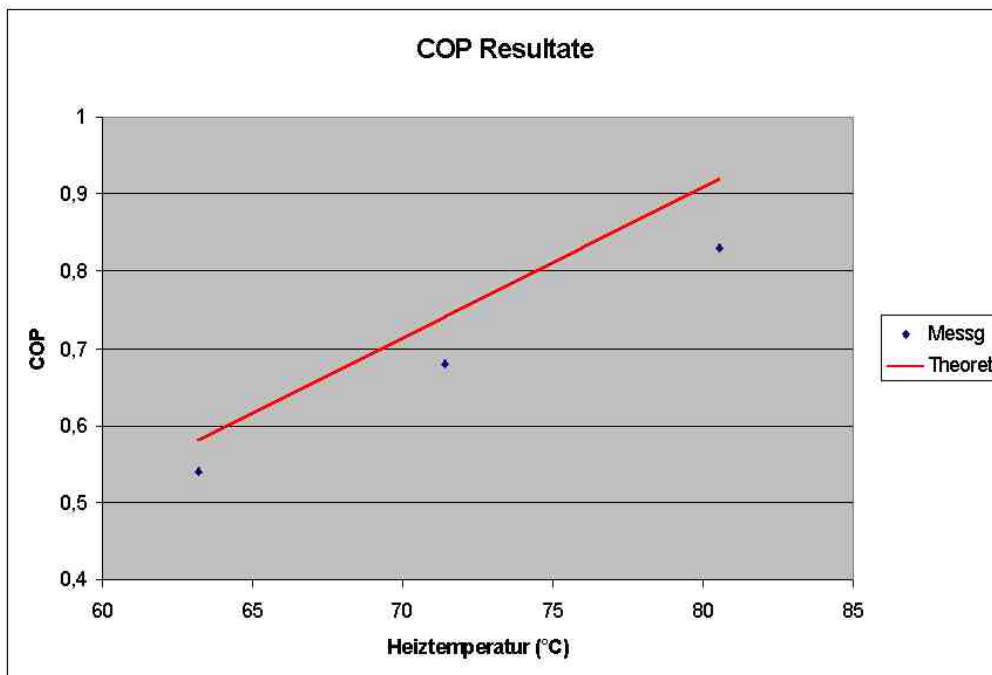


Abbildung 42: Zusammenschau der obigen drei COP-Ermittlungen im Vergleich zu dem, was aus dem mathematischen Simulationsmodell für diesen Kühlkreislauf zu erwarten ist. Die Unterschiede zwischen Theorie und Praxis lassen sich auf Wärmeverluste der Maschine zurückführen, die ja keinerlei Wärmedämmung hatte.

Bei diesen Messungen ist zu beachten, dass es sich nur um punktuelle Einzelwerte handelt, die in ganz speziellen Situationen gemessen wurden. Der COP ändert sich je nach der Heiz-, Rückkühl- und Kühltemperatur sehr stark, wie am obigen Beispiel (Beschreibung zu Abbildung 35) zu sehen ist. In jenem Beispiel lag die Kühltemperatur bei minus 8,7 °C und erklärt den deutlich niedrigeren COP von 0,3. Was mit diesen Messungen jedoch gezeigt werden soll, ist, dass der COP der betreffenden Maschine tatsächlich zwischen 0,3 und 1 liegt, wie es von einer guten Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschine zu erwarten ist.

Eine Besonderheit dieser Maschine war die schon oben beschriebene einstellbare Lösungskonzentration, die darauf beruhte, dass man einen Zusatzbehälter am Kondensator hatte, der je nach der Höhe dieses Behälters unterschiedliche Mengen flüssigen Ammoniaks speicherte. Damit konnte man mit einem Handgriff über die Konzentration der Lösung die Kühltemperatur einstellen. Es dauerte nur relativ kurze Zeit (ca. 10 Minuten), bis die Maschine sich nach einer solchen Konzentrationsänderung auf eine neue stabile Kühltemperatur einstellte.

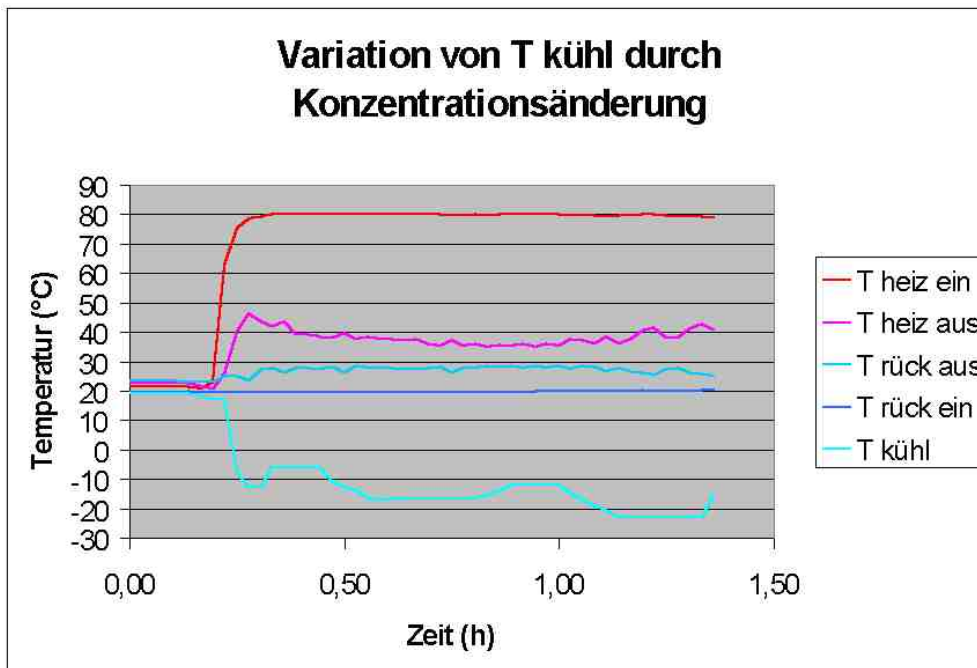


Abbildung 43: Änderung der Kühltemperatur über die Konzentration: Die Kurve der Kühltemperatur zeigt Abschnitte mit relativ konstanter Kühltemperatur und die relativ schnellen Übergänge dazwischen je nach Einstellung der Konzentration. Die Kühltemperatur ist im Bereich zwischen 10°C und -20°C frei wählbar. Auf dieser Abbildung ist auch die Grenze des Möglichen gut zu erkennen. Am Ende des Versuchs (etwa beim Zeitpunkt 1,1) wurde versucht, eine Temperatur von -22°C einzustellen. Man erkennt an den Linien von T heiz aus (rosa) und T rück aus (mittelblau), dass sich die Zyklen der Maschine stark verlangsamen, dann geht T kühl plötzlich ganz schnell nach oben, was anzeigt, dass der Verdampfer offenbar kein flüssiges Ammoniak mehr bekommt.

Versuche wurden sowohl mit einem von der Firma Eudora zur Verfügung gestellten Kühltankschrankgehäuse (ohne Kompressorkühlmaschine) als auch mit dem von der GrAT entworfenen Vormuster der Kühlkammer gemacht. Wesentlicher Unterschied dabei waren die Verdampfertypen. Der Verdampferwärmetauscher besteht dabei aus einem sehr engen, sehr langen, zu einer Serpentine gebogenen Rohr (Abbildung 43). Der Eudora-Kühltankschrank wird normalerweise mit Propangas als Kältemittel betrieben. Dieses hat eine sehr geringe Oberflächenspannung, sodass es während der Verdampfung an der Innenseite des Verdampferrohrs anhaftet und dabei einen zentralen Kanal freilässt, der das ungehinderte Abströmen des gebildeten Kältemitteldampfs erlaubt. Ammoniak dagegen hat eine sehr hohe Oberflächenspannung und bildet in einem engen Rohr rundum anliegende Tropfen, die kein Gas daneben durchlassen. Stattdessen werden diese Flüssigkeitstropfen mit hoher Geschwindigkeit aus dem engen Rohr ausgetrieben, bevor sie verdampfen können.

Für die Kühlkammer (Abbildung 44) wurde daher ein spezieller, weiträumig ausgelegter Verdampfer aus vernieteten und verklebten Platten entworfen.



Abbildung 44: Das Vormodell der 500W-Maschine mit Acrylglasfenster in Verbindung mit dem Eudora-Kühlschrank



Abbildung 45: Links: Serpentinrohrwärmetauscher im Eudora-Kühlschrank; rechts: Der Serpentinrohrwärmetauscher des Verdampfers im Eudora-Kühlschrank war für Propangas als Kältemittel ausgelegt und funktionierte mit Ammoniak nur sehr schlecht. Die tiefste erreichbare Temperatur betrug 15 °C.



Abbildung 46: Links: Vormuster der von der GrAT entwickelten Kühlkammer; rechts: Der Verdampfer des Vormusters von unten gesehen. Die beiden schwarzen Kabel sind Sensoren zur Messung der Temperatur.

Ein derartiger Verdampfer war vorher nie ausprobiert worden, und der Versuch stellte ein gewisses Risiko dar. Man kann zwar mit Pressluft die Druckfestigkeit überprüfen, aber wie gut der Klebstoff auf einer Aluminiumoberfläche in Ammoniakatmosphäre bei minus 20 °C hält, war nicht vorhersehbar. Das erste Experiment (Abbildung 44 und Abbildung 45) sollte daher bei besonders niedrigem Verdampfungsdruck gemacht werden, wie er mit keiner unserer Kältemaschinen erreicht werden kann. Der flüssige Ammoniak kam dabei nicht aus der Kältemaschine, sondern direkt aus der Ammoniakflasche (niedriger Druck und hohe Flussmenge ergeben extrem niedrige Temperatur und niedrigen Druck), um einerseits den Verdampfer beim ersten Test zu schonen und andererseits die Grenzen des Kühlschranks auszuloten. Der große Temperaturunterschied zwischen Verdampfer und den beiden Sensoren in der Mitte und am Boden des gekühlten Raumes ist auf Kälteverluste durch Wärmebrücken und die fehlende Türdichtung des Vormusters für die Kühlkammer zurückzuführen.

Um Luftzirkulation zwischen innen und außen zu vermeiden, wurde der Kühlschrankprototyp gut eingewickelt (Abbildung 46 und Abbildung 47) und mit der 500W-Kältemaschine verbunden. Zusätzlich zu den mit dem Messcomputer verbundenen Sensoren gab es auch ein mit der Hand zu bedienendes Thermometer, welches im Moment des Fotos (Abbildung 46) 6,5 °C anzeigt. Der Pressluftschlauch, der flüssiges Ammoniak von der Kältemaschine zum Kühlschrank transportiert, ist dick vereist.

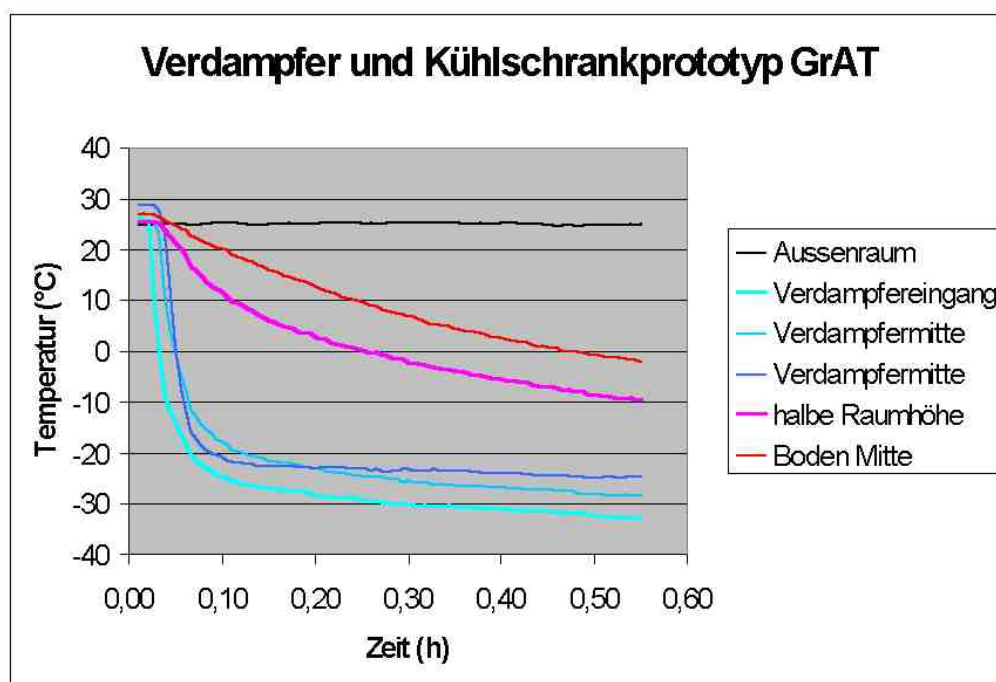


Abbildung 47: Erster Test des Verdampfers im Vormuster der sich in Entwicklung befindlichen Kühlkammer



Abbildung 48: Die eingewickelte Kühlkammer beim zweiten Experiment

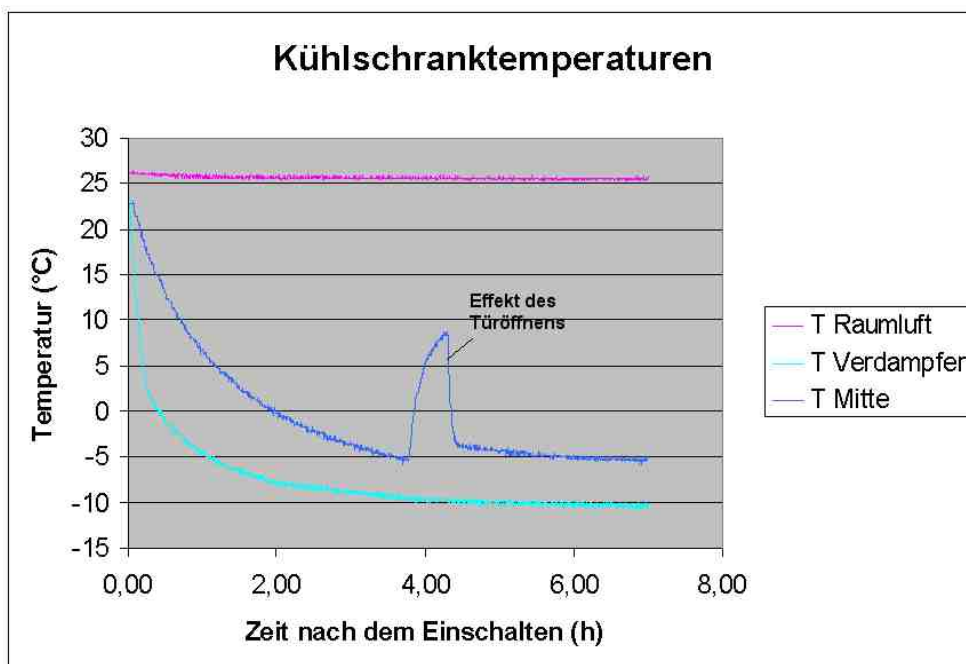


Abbildung 49: Ergebnisse der Verbindung des Vormusters der Kühlkammer mit der 500W-Kältemaschine

Für einen Test des Vormusters der Kühlkammer mit der 500W-Kältemaschine, aber ohne ein Risiko des Platzens des Verdampfers (siehe Risikobeschreibung oben) einzugehen, wurde die Maschine nicht direkt mit dem Verdampfer verbunden, da der Verdampferdruck bei abgeschalteter Maschine je nach Raumtemperatur bis zu 4 bar betragen kann. Stattdessen wurde der Kühlschrankverdampfer in paralleler Strömung zum bestehenden Spiralverdampfer an der Kältemaschine montiert, mit zwei Ventilen, die es ermöglichten, den Kühlschrank erst bei laufender Maschine, wo der Verdampferdruck bei 1,5 bar liegt, dazu zuschalten.

Für dieses Experiment (Abbildung 47) wurde beim Einschalten flüssiges Ammoniak von der bereits laufenden 500W-Kältemaschine durch den Pressluftschlauch zum Kühlschrank umgeleitet und die Temperaturen verfolgt. Der Effekt einer kurzzeitigen Öffnung der Kühlschranktür in der Mitte des Bodens des Kühlschranks nach ca. 4 Stunden ist gut sichtbar (Abbildung 47). Die

Verdampfertemperatur (in einer Tauchhülse im Inneren des Verdampfers gemessen) sinkt sehr viel schneller ab als die Lufttemperatur im Kühlschrank, weil einerseits der Wärmeübergang zwischen Luft und Verdampferoberfläche sehr schlecht ist und andererseits die Luft, während sie kälter wird, zusätzlich auch noch die Kühlschrankwände abkühlen muss. Beim Öffnen der Kühlschranktür steigt die Innentemperatur des Kühlschranks rasch an, fällt aber beim Schließen der Tür sehr rasch wieder ab, weil die Kühlschrankwände ja noch kalt sind.

Schlussfolgerungen

Damit war zwar prinzipiell bewiesen, dass das in Abschnitt 4.2 beschriebene Konzept richtig ist. Die endgültige Maschine dieses Typs (siehe Abbildung 48) als solche ist im Vergleich zu konventionellen Ammoniak-Absorptionskältemaschinen oder Adsorptionskühlgeräten sehr klein, jedoch für die Anwendung zum Betrieb eines Kühlschranks im Haushalt immer noch vergleichsweise groß. Die Außenmaße der Abschlussversion ohne Acrylplatte (Abbildung 48) sind (ohne Füße) 25 x 35 x 90 cm. Die Schwimmerventile waren leider noch größer als die externen Behälter. Die Maschine funktionierte sehr gut und bestätigte im Rahmen der zu erwartenden Messgenauigkeit auch die Modellrechnungen. Die tiefste stabile Temperatur, die wir damit erreichen konnten, war minus 20 °C, bei einer Heiztemperatur von 75 °C und einer Rückkühltemperatur von 15 °C. Der höchste COP bei einer Heiztemperatur von 80 °C wurde mit 0,83 bestimmt.

Als weiteres Problem muss genannt werden, dass sich eine Maschine dieser Bauweise auch in Serienfertigung nur in sehr großen Serien zu einem akzeptablen Preis herstellen lässt. Die Behälter und die vielen Rohrverbindungen außen lassen sich nur durch teure Roboter herstellen.

Trotz der positiven Erfahrungen mit der 500W-Maschine müssten für eine 500W-Maschine in industrieller Serienfertigung noch folgende Probleme gelöst werden:

- kleinere Schwimmerventile, evtl. sogar elektronisch gesteuerte Magnetventile
- Klingsil C-4300 müsste durch ein geeigneteres Dichtungsmaterial oder durch geschweißte Stahlplatten ersetzt werden
- Behälter in die Platten integrieren



Abbildung 50: Die fertige Maschine ohne Acrylglasplatten

5.3 Das 200W-Icebook ohne externe Behälter

Vorausgehende Überlegungen

Die gemeinsamen Schlussfolgerungen aus den beiden ersten Modellen waren:

- Das prinzipielle Konzept funktioniert.
- Behälter müssen ins Icebook integriert werden.
- Behälter, die mehr als eine Platte miteinander verbinden, sind riskant.
- Schwimmerventile sind zwar ein klarer Vorteil, müssten aber in das Icebook integriert werden, wofür erst ein neues Schwimmerventilkonzept entwickelt werden müsste, weshalb vorher noch ein Versuch mit den kleinen Membranventilen gemacht werden sollte.
- 500 W Leistung ist für einen Kühlschrank deutlich zu groß. Da die Kühlmaschine ihre Leistung nicht drosseln kann, wenn zu wenig Kühlung abgenommen wird, muss man kleinere Einheiten machen.
- Das Grundmodul einer Maschine sollte daher nur aus einer Ammoniakplatte mit benachbarten Wasserplatten bestehen, was sehr einfach und billig zu produzieren wäre.
- Wenn man alle Komponenten auf einer einzigen Ammoniakplatte darstellen will, so erfordert diese Aufgabe wegen der dabei auftretenden einander kreuzenden Kanäle die Verwendung von verdoppelten Formplatten (siehe Kapitel 4.3.6).

Als Folge dieser Überlegungen ist die 200W-Maschine nicht eine Weiterentwicklung der 500W-Maschine, sondern wegen der hier aufgelisteten Schlussfolgerungen eine parallele Entwicklung des im zitierten Patent dargestellten Konzeptes (Kapitel 4.2).

Es wurde also eine Maschine geplant, die über ein oder mehrere Module verfügt, wobei jedes dieser Module aus zwei Platten besteht, nämlich aus einer Ammoniakplatte und einer Wasserplatte. Bei der Endmontage mehrerer Module müsste man dann eine zusätzliche Wasserplatte an einem der Enden des Plattenblocks einfügen.

Verwendete Elemente

Mikromodul; folgende wesentliche Elemente wurden auf einer einzigen Doppelplatte untergebracht: Generator in Kreuzrippenbauweise mit 2 Vorkammern und Druckabsenker, Kondensator, Verdampfer (je nach Version intern oder extern), Absorber mit steigender Lösung im Parallelfluss mit dem Gas. Alle Wärmetauscher in Form von Plattenwärmetauschern mit Doppelplatten und gekreuzten Kanälen. Rückschlagventile in Pilzform, Drosseln mit druckgesteuerten Mikromembranventilen oder Kanülen.

Besonderheiten

Wesentliche Unterschiede zu den vorhergegangenen Modellen:

- verwendete Ammoniakmenge 30 g
- voll integrierte Behälter
- extrem vereinfachte Bauweise
- Formplatten als Doppelplatten mit einander kreuzenden Rippen
- als Drosseln durch Membran gesteuerte Mikroventile

Ergebnisse der praktischen Tests

Es musste das gesamte komplexe System der Verrohrung auf einer einzigen Platte untergebracht werden. Dafür mussten die Behälter stark verkleinert werden. Damit reduzierte sich die Leistungsgröße eines Moduls (bei gleicher Plattengröße wie bei den vorhergegangenen Modellen) auf eine maximale Kühlleistung von 200 W.

Problematisch bei diesem Ansatz waren die Schwimmerventile. Die müssten dann in eine 2 mm dicke Formplatte eingefügt werden. Nach mehreren vergeblichen Versuchen wurde das Konzept geändert. Die Regelung des Lösungsflusses, sodass immer nur dann Flüssigkeit aus einem Generator oder Kondensator austreten kann, wenn noch ein kleiner Rest dort zurückbleibt, muss ja nicht mit einem Schwimmer gemessen werden. Unabhängig davon steigt nämlich der Druck in einem Generator oder einem Kondensator, wenn dieser sich mit Lösung füllt. Also müsste man die Flussregulierung auch über eine Druckmembran steuern können. Von der Firma Vernay wurden uns eigens dafür dimensionierte Mikromembranen zur Verfügung gestellt. Dabei zeigte sich aber, dass unsere Kunststoffformplatten (Klingersil C-4300) unter Betriebsbedingungen einer Ammoniak-Absorptionskältemaschine ihre Dicke nicht überall konstant halten können. An einigen Stellen begannen sie zu quellen, und an anderen Stellen gaben sie dem Druck der benachbarten Stahlplatten etwas nach. Die Mikromembranen funktionierten also nur wenige Stunden nach der Montage. Dann waren sie entweder so lose, dass ihre Dichtungen am Rand undicht wurden, oder sie wurden zerquetscht und konnten sich nicht mehr bewegen.

Wir ersetzten die Flussregulierung also doch wieder durch Kanülen, was aufgrund der kleineren Auslegung im Vergleich zur 1kW-Maschine zu einem weiteren Problem führte. Bei dieser war der Fluss an allen Stellen 5-mal so groß wie bei einer Maschine mit 200 W, also waren die Kanülen auch entsprechend dicker. Zusätzlich hatten wir in der großen Maschine Platz genug, um feine Siebe einzubauen, um kleine Schmutzpartikel aufzufangen, damit sie die Kanülen nicht verstopften. In einem 200W-Modul mussten wir die allerfeinsten Kanülen verwenden (Innendurchmesser 0,1 mm). Siebe waren zunächst aus Platzgründen nicht montiert. Erst nachdem die Flächen von Generator und Kondensator verkleinert worden waren, konnten nachträglich auf diese Platten Siebe installiert werden.

Es gelang nach langen Umbauten, die Maschine zum Laufen zu bringen. Die Resultate waren nicht sehr beeindruckend: Es konnten keine Kühlttemperaturen unter 0 °C erreicht werden, und die Kühlleistung war sehr gering.

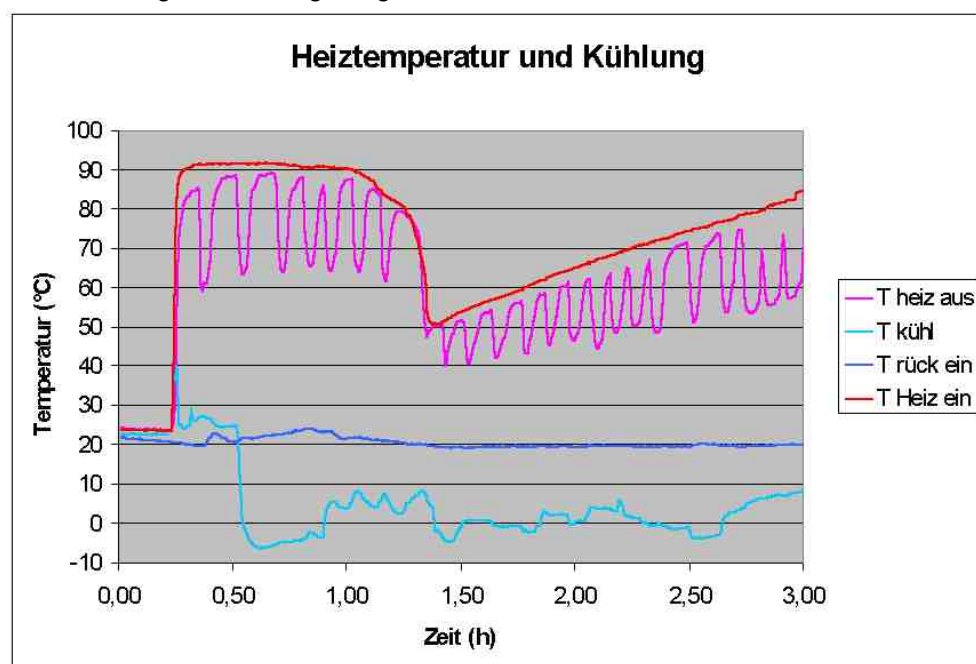


Abbildung 51: Die 200W-Maschine hatte sowohl mit Mikromembranen als auch mit Kanülen eine relativ instabile Kühlttemperaturen. Interessanterweise war das aber nicht die Folge eines instabilen Laufs der Zyklen, wie wir mit diesem Experiment nachweisen konnten: Die Heiztemperatur (T heiz ein) wurde sehr stark variiert, aber die Zyklen (rosa Linie) zeigten sich als erstaunlich stabil.

Schlussfolgerungen

Die Erfahrung mit diesem Modell belegt, wie ein an sich gutes Konzept durch Details der praktischen Ausführung unbrauchbar werden kann. Offenbar überlagern sich bei dieser Maschine die Effekte mehrerer Schwachstellen so, dass fast kein flüssiger Ammoniak in den Verdampfer gelangt, und zwar:

- Da der Generatorausgang zum Absorber hin kein Schwimmerventil hat, sondern nur eine Kanüle, passiert Folgendes: Wenn frische Lösung in den Generator kommt, muss diese erst aufgewärmt werden, bis sie den Gasdruck herstellt, der zum Kondensieren ausreicht. In dieser Phase hat der Generator im Vergleich zum Absorber bereits Überdruck, also fließt nicht ausgegaste Lösung vom Generator zum Absorber.
- Wenn der Generator unausgegaste Lösung abgibt, ist der Gasstrom vom Generator zum Kondensator kleiner als der für die Systemauslegung vorgegebene Wert. Dann entsteht an der Ausgangskanüle des Kondensators ein zu kleiner Druckabfall und der Kondensator erreicht kaum den für Ammoniakkondensation nötigen Mindestwert. Also entsteht nur wenig oder gar kein flüssiges Ammoniak, das zum Verdampfer geleitet werden könnte, um zu kühlen.
- Am Kondensatorausgang selbst war ein deutlicher Kühleffekt messbar, jedoch nicht im Verdampfer, was sich so erklären lässt, dass die Menge des flüssigen Ammoniaks im Vergleich zu der des nicht kondensierten Gases sehr klein war und gleichzeitig der Durchmesser des Rohrs vom Kondensator zum Verdampfer so groß war, dass das Gas unbehelligt durch das flüssige Ammoniak blubberte, dieses jedoch nicht in den Verdampfer förderte.

Der Ausgangspunkt aller Probleme war der, dass das 200W-Modul ursprünglich für Mikromembranventile gedacht war, die dann aber in der benötigten Dimension nicht erhältlich waren. Für Drosseln in Form von Kanülen war das 200W-Modul von Anfang an zu klein konzipiert gewesen. Das geschah deshalb, weil das Gesamtmodell als Zusammenfassung mehrerer geschlossener autonomer Module (siehe Abschnitt Mikromodule in 4.2) geplant war, sodass in jedem Modul alle Regelemente untergebracht werden mussten.

Definitiv ein unschlagbarer Vorteil gegenüber den anderen Modellen ist die Tatsache, dass die maximale Reduktion des Systems alle Toträume eines verzweigten Leitungssystems eliminiert und daher mit einer minimalen Lösungsmenge auskommt, die nur 30 g Ammoniak entspricht.

Prinzipiell ist die Bauweise in 200W-Mikromodulen richtungsweisend für die Zukunft unter den folgenden Voraussetzungen:

- Es müssen entsprechend kleine Membranventile entwickelt werden.
- Klingsil C-4300 müsste durch ein geeigneteres Dichtungsmaterial oder durch geschweißte Stahlplatten ersetzt werden.

5.4 Das voll integrierte Icebook, 500 W

Vorausgehende Überlegungen

Entsprechend der Bauweise mit Mikromodulen (siehe Abschnitt in Kapitel 4.2) folgt, dass ein modulares Icebook auch als eine Zusammenfassung offener, miteinander verbundener Module gebaut werden kann, bei der jedes Modul nur Wärmetauscher und Behälter enthält, während es zusätzliche Platten gibt, die die übrigen Funktionen für alle Module gemeinsam erfüllen, wie z. B. die Verteilung der Masseströme und die Regelung.

Mit diesem Modell wurde versucht, die Idee der verbundenen Module in die Praxis umzusetzen. Gleichzeitig sollten Schwimmerventile mit plattenförmigen Schwimmern entwickelt werden, die man zwischen die Platten des Icebook-Blocks einfügen könnte. Daraus ergab sich aber ein Problem für diese Maschine: Die im ursprünglichen Baukonzept vorgesehenen Schwimmer waren viel kleiner als in der Endversion. Das lag daran, dass in der Berechnung der Schwimmergröße nur die mechanischen Kräfte zum Öffnen einer kleinen Ventilklappe gegen die an diesem Punkt herrschende Druckdifferenz zwischen innen und außen einbezogen werden konnten. In der Praxis ergab sich aber bei der optischen Begutachtung im Betrieb hinter einer Plexiglasscheibe, dass verwirbelte Flüssigkeitsströmungen in der Schwimmerkammer den an Spiralfedern lose aufgehängten Schwimmer horizontal an die Kammerwände drängten, wo es an der Grenzschicht zwischen Flüssigkeit und Gas zu einem Anhaften des Schwimmers an der Wand kommen konnte, was eine Einschränkung in der Beweglichkeit zur Folge hatte. Dieser Effekt konnte nur durch eine Vergrößerung der Schwimmerkammern kompensiert werden, was zu einem vergrößerten Totraum und damit einem wesentlich vergrößerten Lösungsvolumen führte. Letzteres hatte zur Folge, dass der bereits im Icebook integrierte Lösungsspeicher zu klein wurde und ein zusätzlicher externer Lösungsbehälter außen an der Maschine angebracht werden musste. Wegen der Wichtigkeit der flachen integrierbaren Schwimmer wurde diese Versuchsreihe trotzdem zu Ende gebracht.

Wesentliche verwendete Elemente

Generator in den ersten Varianten mit vertikalem, später mit horizontalem Durchfluss mit 2 Vorkammern, Druckabsenker mit Gasventil in der 2. Vorkammer, Kondensator, Verdampfer, 2 Absorber mit Wärmerückgewinnung. Alle Wärmetauscher in Form von Plattenwärmetauschern mit serpentinenförmigen Kanälen.

Rückschlagventile in Pilzform, 3 Drosseln als plattenförmige Schwimmerventile in externen Ventilboxen. Externer Starter über das Wassersystem.

Besonderheiten

Wesentliche Unterschiede zu den anderen Modellen:

- verwendete Ammoniakmenge ca. 500 g
- flache bzw. kleinere integrierbare Schwimmerventile
- Ursprünglich integrierte, gegen Außendruck resistente Behälter, die allerdings später durch einen zusätzlichen Absorberspeicher ergänzt werden mussten
- kein Starter
- Ammoniak- und Wasserplatten alle identisch
- Druckabsenker in der 2. Generatorvorkammer
- Generator mit horizontalem Durchfluss
- keine Lösungskonzentrationsänderung möglich

Ergebnisse der praktischen Tests

Die Ergebnisse für das integrierte Icebook glichen, abgesehen von zwei wichtigen Unterschieden, weitgehend den Resultaten für das 500W-Icebook mit Behälter:

- Temperaturen unter 0 °C waren kaum zu erreichen, das lag daran, dass wir keine Temperaturregulierung durch variable Konzentration eingebaut hatten, weil dieses, abgesehen vom provisorischen externen Lösungsbehälter, wieder einen externen Behälter bedeutet hätte.
- Die Maschine startete sofort nach dem Einschalten der Beheizung (ohne eigenen Starter), was die Bedienung erleichterte.

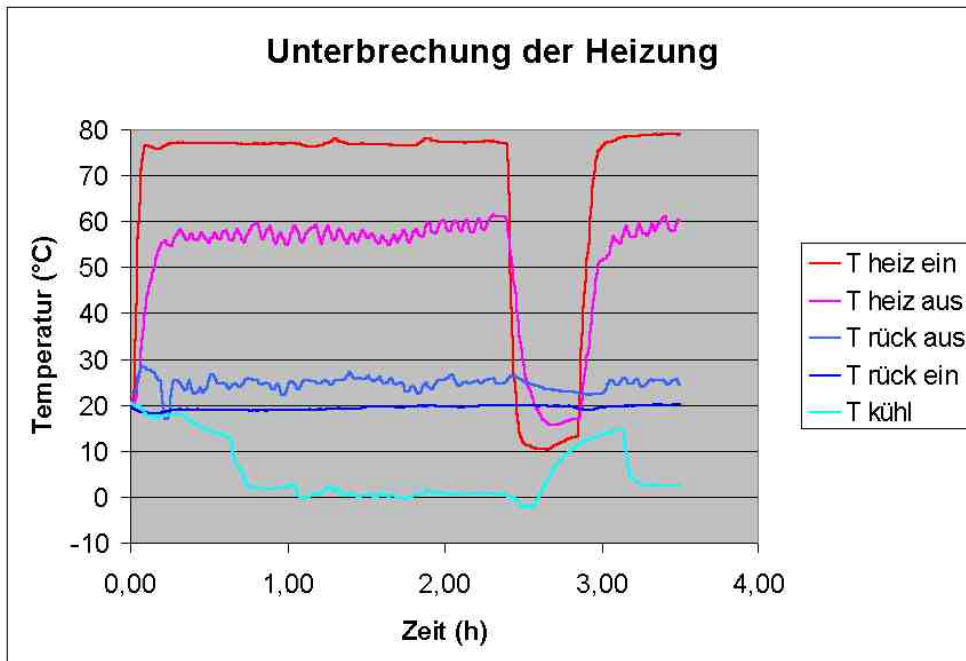


Abbildung 52: Die Kühltemperatur war kaum unter 0 °C zu bringen, da sich die Lösungskonzentration nicht verändern ließ, dafür war der allgemeine Betrieb der Maschine sehr stabil. Um dies zu überprüfen, wurde hier ein „Schockexperiment“ gemacht. Beim Heizwassereingang wurde plötzlich sehr kaltes Wasser eingeleitet. Die Maschine blieb zwar kurzzeitig stehen, nahm aber die volle Kühlleistung sofort wieder auf, sobald wieder heißes Wasser da war.

Zusätzlich wurde beobachtet, dass der Generator mit horizontalem Durchfluss deutlich sicherer gegen Überkochen ist. Das bedeutet, man könnte die Maschine auch mit größerer Leistung betreiben, ohne dass die Gefahr besteht, dass Wasser in den Kondensator überkocht.

Die letzte Version der Schwimmerventile funktionierte klaglos. Allerdings waren die dabei auftretenden Toträume nicht wesentlich kleiner als bei der 500W-Maschine mit externen Behältern.

Schlussfolgerungen

Die modulare Bauweise lässt auf niedrigere Herstellungskosten schließen. Die Tatsache, dass wegen der größeren Schwimmerventile auch ein externer Behälter angebaut werden musste, ist dabei von geringer Bedeutung. In einer weiteren Testreihe könnte von Anfang an der nötige Platz für diesen zusätzlichen Behälter eingeplant werden und wie die bereits in dieser Version integrierten Behälter innerhalb des Icebooks eingebaut werden.

Für eine zukünftige Produktion sollte vermutlich die Bauweise dieses Maschinentyps mit Elementen der 500W-Behältermaschine unter den folgenden Voraussetzungen kombiniert werden:

- Möglichkeit der Einstellung der Lösungskonzentration, um die Kühltemperatur frei variieren zu können
- Integration des provisorischen Behälters aufgrund der größeren Schwimmerventile
- Klingsil C-4300 müsste durch ein geeigneteres Dichtungsmaterial oder durch geschweißte Stahlplatten ersetzt werden

Die gebauten Kältemaschinen waren aber nur Labormodelle, welche die Sicherheitsanforderungen von ausgereiften Industriemodellen nicht erfüllen und für die man kein TÜV-Zertifikat bekommen würde. Der Betrieb an einem öffentlichen Ort ist daher zu Projektende nicht möglich. So waren z. B. die Ventile zum Befüllen und zum Entleeren der Ammoniaklösung nicht versperrenbar. Dünne Rohrleitungen, die Ammoniak enthalten, könnten im Prinzip von einer starken Person abgebrochen

werden. In dem Raum, wo die Maschine aufgestellt werden sollte, gab es keine stabile Wand- oder Deckenkonstruktion, woran die Maschine hätte befestigt werden können. Ein Umfallen der Maschine (ca. 100 kg) könnte einen schweren Unfall bedeuten.

Die Icebook-Formplatten aus dem Dichtungsmaterial Klingsil C-4300 sind im Prinzip ein geeignetes dauerhaftes Dichtungsmaterial. Kleine Gasdurchlässigkeit gibt es nur bei trockenen Platten, aber im Inneren des Icebooks sind die Platten immer nass. Das einzige Problem mit Klingsil ist, dass es bei mehrmaligem Öffnen und Schließen der zu dichtenden Stelle oft zu kleinen mechanischen Verletzungen des Materials kommt, die dann zu einer dauerhaften Undichtigkeit führen.

Im SolarFrost-Labor war das kein Problem, da die dortige Infrastruktur (z. B. alle Wasserleitungen aus Edelstahl, es gab Wasserbrausen zur Luftreinigung bei Gasaustritt, automatischer Ammoniakalarm, Erste Hilfe speziell für Ammoniakunfälle, speziell Augenspülung, versperrebare Ammoniakbehälter) irgendwelche bedeutsamen Folgeschäden verhindern konnte. Im Projektantrag war man außerdem davon ausgegangen, dass die Formplatten aus Klingsil C-4300 durch verschweißte Stahlplatten ersetzt werden könnten. Nach einem Gutachten der VOEST (siehe Kapitel 4.1.2) zeigte sich allerdings, dass ein solches Vorhaben nur in einer speziell dafür ausgerüsteten Fabrik zu für uns undenkbar hohen Kosten durchführbar wäre.

Daraus folgt auch eine grundsätzliche Beschränkung der erreichbaren Möglichkeiten für die Umsetzung der Ziele des vorliegenden Projekts. Wenn auch in der Praxis bei den Labortests nur ganz kleine und ungefährliche Ammoniakmengen austraten, war die Gefahr nicht von der Hand zu weisen, dass es zu Gefahrensituationen kommen könnte. Die Tests mussten daher auf das behördlich begutachtete Labor von SolarFrost beschränkt bleiben, und auch da wurden Experimente nur in Gegenwart von einem technischen Experten ausgeführt, sodass Dauertests, wo die Maschine über Nacht laufen müsste, nicht möglich waren. Aus dem gleichen Grund konnte auch bis zum Projektende kein Testbetrieb einer Kältemaschine in der von GrAT errichteten Prototypenanlage in Böheimkirchen durchgeführt werden, da dieses System nicht mit einer solchen Infrastruktur ausgelegt wurde, da es den Einsatz im Wohnbereich demonstrieren sollte.

5.5 Vergleich der Funktionsmodelle

Die ursprünglich angepeilte Arbeitsmethode, nämlich mindestens drei verschiedene Prototypenmodelle zu bauen und dann von diesen die beste Variante auszusuchen, war so wie gedacht nicht ausführbar. Stattdessen bauten wir verschiedene Grundtypen von Modellen, von denen alle bis auf die letzte Variante Dutzende Male umgebaut werden mussten, um überhaupt zu funktionieren.

Einen Überblick über die verschiedenen Komponenten und ihre Erprobung in unterschiedlichen Modellen und deren Varianten soll die folgende Tabelle geben (ein Plus bedeutet, dass die Komponente in einem Modell erfolgreich war, zwei Plus bedeuten, dass diese Komponente besonders empfehlenswert ist, ein Minus bedeutet, dass sie nicht erfolgreich funktionierte, und kein Eintrag bedeutet, dass diese Komponente beim gegenständlichen Modell nicht zur Anwendung kam).

Tabelle 9: Übersicht der Modelle und Komponenten

Komponente	1 kW integriert	500 W, externe Behälter	200 W Mikromodul	500 W integriert
Integrierte Behälter ohne Aussteifung	-			
Integrierte Behälter mit			++	++

Aussteifung				
Integrierte Rückschlagventile	++		++	++
Externe Rückschlagventile		+		
Externe Schwimmerventile		+		
Interne Schwimmerventile				++
Membranventile			-	
Kanülen	+	+	(+)	
Generator horizontaler Fluss				++
Generator Serpentinaen	+	+	+	
Generator mit vertikalem Fluss		+	+	+
Absorber Serpentinaen	+	+	+	-
Absorber horizontal			+	+
Absorber fallend		++	+	
Verdampfer Serpentinaenrohr	+			
Verdampfer Spirale		+	+	+
Verdampfer Plattenwärmetauscher		+		
Geschlossene Module			-	
Offene Module				++

Von der Leistung her war die 500W-Maschine mit externen Behältern die beste, da sie den vollen gewünschten Kühltemperaturbereich abdecken konnte (-20 °C bis +10 °C), und das bei Heiztemperaturen zwischen 60 °C und 80 °C. Bei einer Heiztemperatur von 80 °C betrug der COP 0,83.

Die Maschine brachte auch mit dem Kùhlschrankprototyp der GrAT eine brauchbare Kùhlung von minus 5 °C zusammen, wobei der Testbetrieb über 7 Stunden lief.

5.6 Tests für optimale Position der Zu- und Ableitungen

Die Zu- und Ableitungen von Icebook, Kùhlschrank, Energieversorgungsmedium und Rückkùhlung sind für das Design eines solchen Gesamtsystems zweifellos sehr wichtig, weil durch kurze Verbindungswege nicht nur Platz und Material gespart werden können, sondern auch die optische Attraktivität eines Systems sehr stark davon abhängt, wie einfach und übersichtlich die Anlage ist. Nichtsdestotrotz ist zumindest beim Icebook die optimale Position der Zu- und Ableitungen in erster Linie einer Frage der Energiebilanz, denn jedes Funktionselement des Icebooks hat schon von sich aus Zu- und Ableitungen, die durch hydraulische oder mechanische Gründe ziemlich unveränderbar gegeben sind. Die äußeren Anschlusspunkte für die Leitungen ergeben sich aus dem inneren Verteilungsnetz und sind zum Großteil von außen nicht sichtbar. Aber noch wichtiger als das innere Verteilungsnetz ist die thermische Optimierung der Lage der funktionellen Bauteile:

Bei der Beschreibung der Funktionsmodelle wurde schon anfangs erwähnt, dass die Position der einzelnen Wärmetauscher des Systems kritisch für den Wirkungsgrad eines Systems ist, weil wegen der kompakten Bauweise des Icebooks Wärmeverluste zwischen unterschiedlichen benachbarten Wärmetauschern auftreten können. Parallel zu den im Kapitel 5 beschriebenen Funktionstests fanden auch immer wieder Optimierungsrechnungen und Messungen statt, um die Wärmeströme zwischen benachbarten Bauteilen zu ermitteln. Die optimale Anordnung der Bauteile kann dann eigentlich nur als knifflige kombinatorische Aufgabe bezeichnet werden, die mehr auf Schätzung beruhen muss als auf systematischen Tests. Denn bei ca. 30 wichtigen Funktionsteilen mit unterschiedlichen Oberflächen und Temperaturen ist die Zahl der möglichen Kombinationen so groß, dass systematische Tests aller möglichen Konfigurationen jedes Forschungsbudget sprengen würden.

Die nachfolgende dargestellte Anordnung der Bauteile wird nach unserer derzeitigen Einschätzung mit großer Wahrscheinlichkeit nur schwer zu verbessern sein. Sie ergibt sich aus der Überlegung, dass Leistungsverluste innerhalb der Maschine zu einem sehr großen Teil durch innere Wärmeleitung entlang der stählernen Wärmetauschertrennplatten stattfinden. Wenn man nun versucht, die Bauteile einer Kältemaschine so anzuordnen, dass benachbarte Bauteile möglichst wenig Temperaturdifferenz haben sollen, kommt man zu dem folgenden Baukonzept:

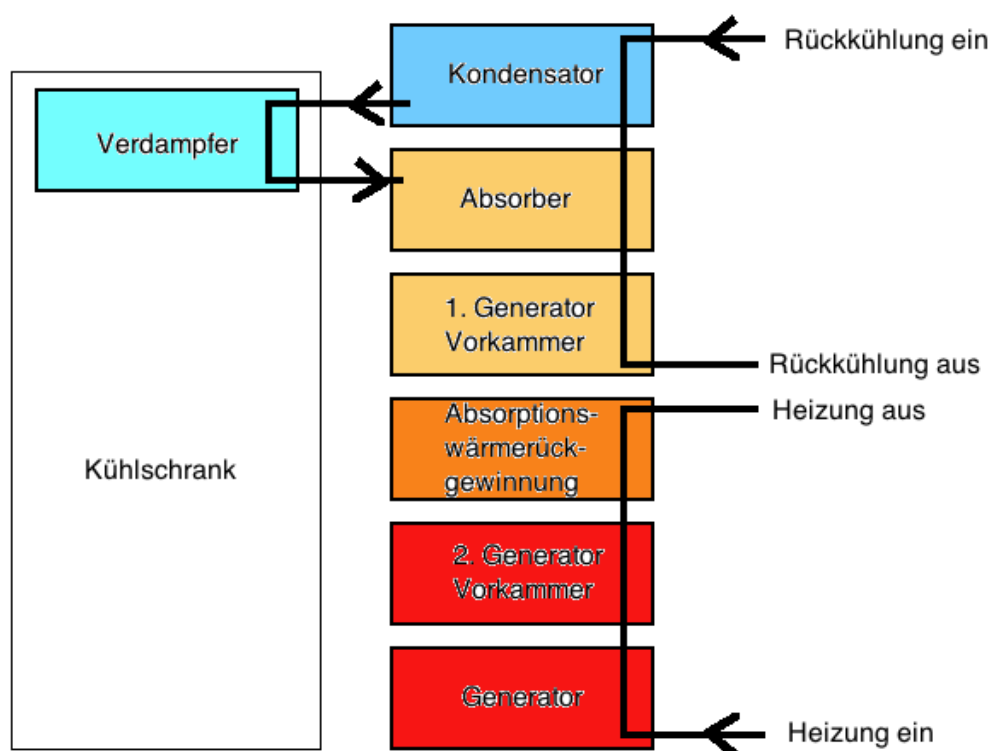


Abbildung 53: Wichtigste Bauteile des Icebooks

Die Abbildung 51 zeigt die sieben wichtigsten Bauteile des Icebooks und ihre gegenseitige Anordnung, wie sie sich aus deren Temperaturen ergibt. Dabei deutet die Farbe die Temperatur des jeweiligen Bauteils an: Rot ist heiß, Orange ist warm, Blau ist kaltes Rückkühlmedium, Hellblau ist ein gekühltes Medium. Es ist darauf zu achten, dass die Temperatur eines der Medien nicht wesentlich heißer sein soll als die Zone, durch die es sich bewegt. Zwischen Kondensator, Verdampfer und Absorber wird kein Temperierungsmedium geleitet, sondern Ammoniak. Dieses ist

auf dem Weg zwischen Kondensator und Verdampfer flüssig und zwischen Verdampfer und Absorber gasförmig.

Dieses „energetische Verteilungskonzept“ erlaubt aber nur geringe Kompromisse bzw. Anpassungen an den praktisch zur Verfügung stehenden Raum. Dazu kommt, dass es sich dabei nur um ein theoretisches Konzept handelt, das erst zum praktischen Einsatz kommen soll, sobald ein solches System tatsächlich hergestellt werden kann. Für unsere Forschungsprototypen hatte jeder der in Abbildung 51 dargestellten Bauteile seine eigene Versorgung durch Temperierungsmedien, da nur so eine Kontrolle der Vorgänge innerhalb der Maschine möglich ist, wenn man nicht eine Ammoniakplatte durch ein Acrylglas beobachten kann.

5.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wurden vier verschiedene Modelle getestet, die alle als Varianten von dem in Kapitel 4.2 beschriebenen Patent gelten können:

1. Die 1kW-Kühlmaschine, wo alle Bauelementen in einem Plattenblock integriert waren
2. Die 500W-Maschine mit externen Behältern und externen Schwimmerventilen
3. Die 200W-Maschine als Mikromodul
4. Die 500W-Maschine mit integrierten Behältern und integrierten Schwimmerventilen

Zusätzlich wurden unterschiedliche Generator-, Verdampfer- und Absorbertypen sowie Behälterformen und Regelungsmethoden an diesen Maschinen ausprobiert.

In Bezug auf die Projektziele konnten mit der 500W-Maschine mit externen Behältern und externen Schwimmerventilen die besten Ergebnisse erzielt werden.

Sie funktionierte mit Heiztemperaturen zwischen 60 und 80 °C, erreichte variable Kühltemperaturen zwischen +10 °C und -20 °C und hatte einen maximalen COP von 0,83. Es war damit möglich, die Umgebung des Verdampfers in der Raumluft merklich abzukühlen, und es wurde auch der Zusammenbau dieser Kältemaschine mit zwei verschiedenen Kühlschränken/Kühlkammern (Produkt von Eudora und Vormuster der entwickelten Kühlkammer der GrAT) überprüft, wobei nur im Falle des Letzteren eine brauchbare Kühlung erzielt werden konnte.

Für eine zukünftige industrielle Produktion solcher Kühlmaschinen ergaben sich die folgenden Elemente als besonders empfehlenswert:

- Integration aller Behälter und Regelemente in einen einzigen Block
- offene, miteinander verbundene Module, wo jedes Modul nur die als Wärmetauscher funktionierenden Maschinenkomponenten enthält und es zusätzliche Platten gibt, die andere Funktionen für alle Module gemeinsam erfüllen
- automatisch geregelte Ventile als Druckstufen
- Ersatz der Klingsilplatten durch andere Materialien, insbesondere andere Kunststoffe oder Stahl

Diese Erkenntnisse sind für die weiteren Arbeiten von SolarFrost von großer Bedeutung. SolarFrost dankt der FFG und der GrAT für die wertvolle Hilfe bei der Durchführung der entsprechenden Experimente.

SolarFrost arbeitet bereits an einem Nachfolgeprojekt zusammen mit einem großen Kunststoffhersteller. Die Abbildung 52 zeigt den Konzeptprototyp mit offenen, miteinander verbundenen Modulen sowie mit elektronisch geregelten und voll integrierten Ventilen, mit welchem

verschiedene Kunststofftypen auf ihre Eignung getestet werden sollen, um Dichtigkeit auch ohne verschweißte Stahlplatten zu garantieren.

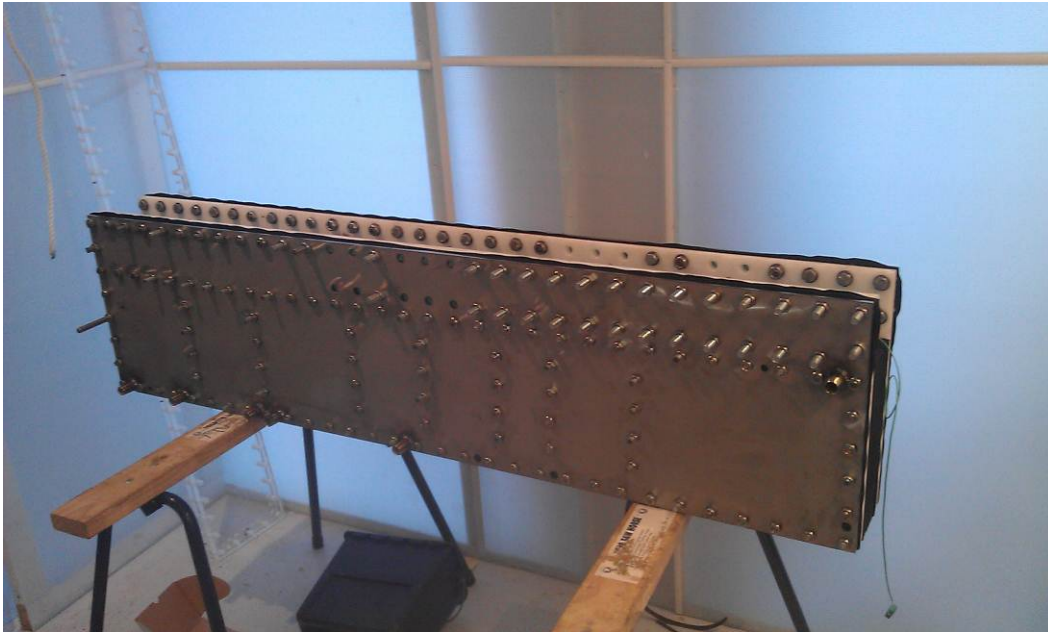


Abbildung 54: Konzeptprototyp zur Erprobung neuer Kunststoffe für die Formplatten

6 Entwurf möglicher Produktvarianten

Das folgende Kapitel zeichnet den Designprozess für den Zero CO₂ Cooler nach (siehe auch Abbildung 53): Ein Designkonzept wurde entsprechend den Anforderungen der NutzerInnen (siehe Kap. 1) und mit dem Ziel höchstmöglicher Energieeinsparung entwickelt. Auf dieser Grundlage entstanden drei Designvarianten, um verschiedene Ideen und Vorteile zu demonstrieren. Diese wurden anhand der Entwicklungskriterien (Nutzerfreundlichkeit, Energieeffizienz usw.) evaluiert und verglichen. Die Designvariante, die dem Designkonzept am besten entspricht, wurde für die Herstellung eines Prototyps ausgewählt, um in weiterer Folge in Kombination mit der Icebook-Technologie im Gesamtsystem getestet zu werden.

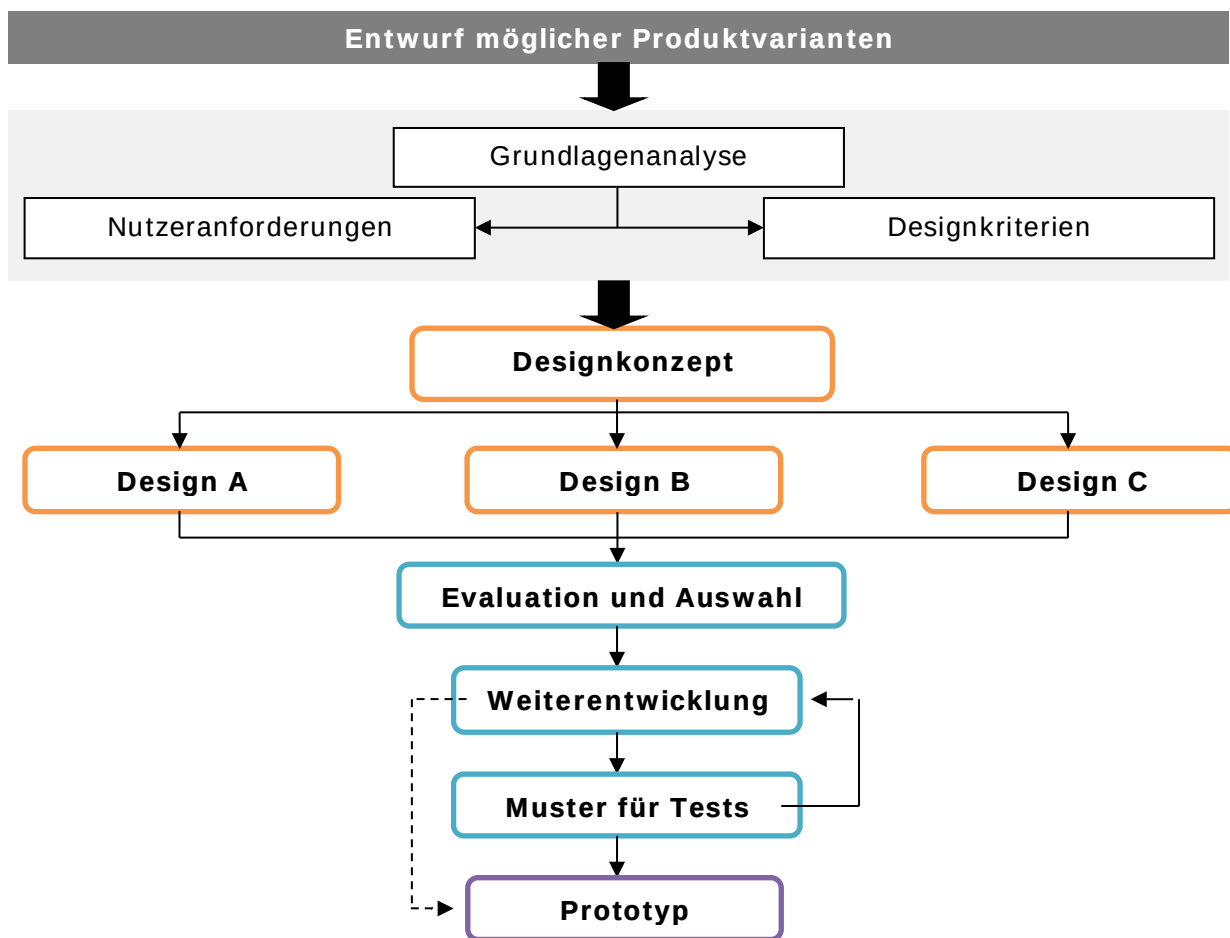


Abbildung 55: Designprozess für Zero CO₂ Cooler

6.1 Designkonzept

Um den Stromverbrauch in Haushalten zu reduzieren, wurde ein neuer Kühlschrank entwickelt, welcher nach dem Konzept der in Kapitel 4.2 beschriebenen Icebook-Technologie mit thermischer Solarenergie betrieben werden kann. Das Design soll dementsprechend einen modernen Lebensstil und Nutzerverhalten für eine bessere, nachhaltige Lebensweise widerspiegeln. Der Schwerpunkt des Designs liegt auf der Verbesserung der Produktleistung, Energieeinsparung, der Integration der Icebook-Technologie, Anwenderfreundlichkeit und einer vereinfachten Produktion. Die Entwicklungskriterien werden im Folgenden genauer beschrieben.

6.1.1 Nutzeranforderungen

Das Designkonzept baut auf den Anforderungen potenzieller NutzerInnen auf, die mittels Interviews, Fragebögen und Beobachtung erhoben wurden; sowohl quantitative als auch qualitative Daten wurden einbezogen (siehe auch 2.3.2). Die Nutzeranforderungen wurden kreativ in konkrete Produktdesigns umgesetzt. Drei Varianten wurden in weiterer Folge entwickelt (siehe 6.2).

6.1.2 Anwenderfreundlichkeit

Aufbewehrungsmodule

Der Kühlschrank sollte mehrere Aufbewehrungsmodule haben, um Lebensmittel, die unterschiedliche Temperaturen benötigen, getrennt zu lagern und Gerüche unter Kontrolle zu halten. NutzerInnen können je nach Bedarf für jede Zone eine eigene Temperatur einstellen.

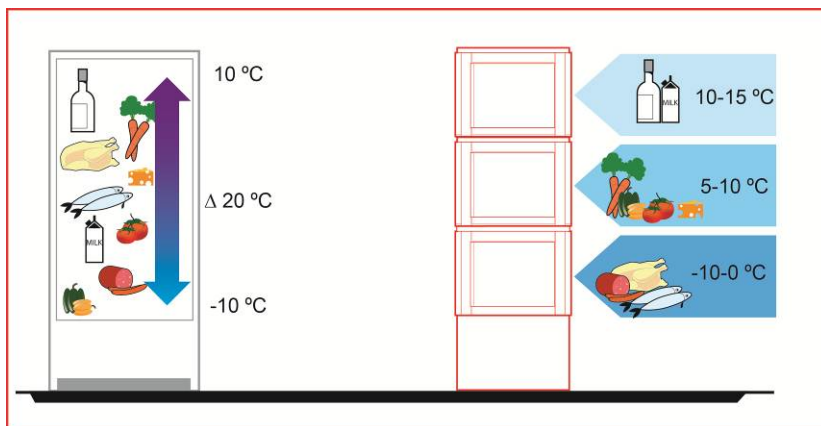


Abbildung 56: Gliederung des Kühlschranks, um innerhalb eines Moduls möglichst geringe Temperaturunterschiede zu erreichen

Flexible Kapazität

Der Kühlschrank sollte so entworfen werden, dass das Lagervolumen verändert werden kann, indem Module hinzugefügt oder entfernt werden, da sich im Laufe der Nutzungszeit die Anforderungen an das Lagervolumen ändern können. Wie sich in der Erhebung des Nutzerprofils gezeigt hat, kaufen NutzerInnen oft einen größeren Kühlschrank, als sie tatsächlich benötigen, um für einen möglichen zukünftigen Bedarf mehr Spielraum zu haben.

Eine flexible Kapazität kann nicht mit einer einzelnen großen Kühlkammer, dafür aber mit einem modularen Kammersystem erreicht werden (siehe Abbildung 55). Dementsprechend kann auch das Kühlvolumen verringert oder vergrößert werden, indem die Kühlung für einzelne Module aktiviert oder deaktiviert wird. Die Menge an Lebensmitteln, die gelagert werden soll, ändert sich laufend in Abhängigkeit von Lebensphasen und Ereignissen, z. B. wird vor einer Weihnachtsfeier mehr Raum benötigt, während des Urlaubs wiederum weniger. Studierende, die allein leben, brauchen vielleicht nur ein Modul, können aber bei Bedarf in der nächstgrößeren Wohnung zusätzliche Module hinzufügen, ohne den alten Kühlschrank entsorgen zu müssen. Gleiches gilt für eine geänderte Personenanzahl in einer Familie bzw. in einer Wohnungsgemeinschaft, da jedes Modul über ein individuelles Regelungssystem verfügt und je nach Bedarf aktiviert oder deaktiviert werden kann.



Abbildung 57: Flexible Kapazität des Kühlschranks je nach Nutzeranforderungen

Flexible Position

Die Aufbewahrungsmodule sollen je nach Zweckmäßigkeit und Umgebung horizontal oder vertikal angeordnet werden können. Die Anordnung kann sich nach der Nutzungshäufigkeit oder aber auch nach ergonomischen Kriterien richten.

Eine vertikale Anordnung übereinander ermöglicht die Zugänglichkeit für mehrere unterschiedliche NutzerInnen. In diesem Fall eignen sich die unteren Module besonders für die Nutzung durch die jüngeren Familienmitglieder. Bevorzugte Lebensmittel können dann in den leichter zugänglichen Modulen gelagert werden.

Eine horizontale Anordnung in einer passenden Höhe an der Wand kann wiederum aus ergonomischen Gründen gewählt werden, da sie den Vorteil bietet, dass man sich z. B. während des Kochens nicht ständig hinunterbeugen muss, um Zutaten im Kühlschrank zu suchen.

Hygienisches Design

Das Design sollte scharfe Kanten und Fugen vermeiden, um Schmutzansammlungen zu verringern. Die Innenwand kann mit einer glatten, wasserfesten Oberfläche ausgeführt werden, sodass gegen Bakterienansammlungen vorgebeugt wird. Ein Wasserabfluss im Boden des Kühlschranks hilft den Innenraum trocken zu halten, für den Fall das Schmelzwasser am Verdampfer entstehen sollte.

6.1.3 Vereinfachte und günstige Produktion

Der Kühlschrank, unabhängig von der Kühltechnologie betrachtet, kann von einem kleinen oder mittleren Unternehmen hergestellt werden. Die meisten Teile sollten einfach durch Schneiden, Walzen, Biegen und Schweißen produziert werden können. Eine Gussform oder spezielle Werkzeuge werden ebenso wenig gebraucht wie High-Tech-Ausstattung. Das Konzept sieht allgemein am Markt erhältliche Materialien vor und einfache Mechanik, um die Produktionskosten so niedrig wie möglich zu halten. Auch eigene Reparaturen oder Wartung vor Ort sollen möglich sein.

6.2 Designvarianten

Die auf der Grundlage des Designkonzeptes entwickelten Varianten A, B und C sind im nachfolgenden Abschnitt beschrieben. Die Evaluation der einzelnen Vorteile und Eigenschaften erfolgt im Anschluss.

6.2.1 Design A

Das wesentliche Charakteristikum des freistehenden Kühlschranks vom Design A ist, dass er aus voneinander unabhängigen Kühleinheiten besteht. Dadurch kann seine Kapazität flexibel an den aktuellen Bedarf angepasst und individuelle Temperaturen eingestellt werden.

Das äußere Erscheinungsbild ist, im Sinne der Nutzerakzeptanz, an am Markt erhältlichen Kühlschränken angelehnt. Die äußere Hülle besteht bei dieser Variante aus farbig beschichteten Metallplatten. Die integrierten Griffe bieten eine komfortable Haptik. Die Kühlschranktür kann je nach Einstellung entweder von links oder von rechts geöffnet werden.

Durch die Verwendung von gitterartigen Kunststoff-Ablageflächen in den Kühlkammern kann im Innenraum sowohl die Luft als auch Wasser nach unten strömen bzw. tropfen. Im Boden ist zusätzlich ein Ablaufloch vorgesehen, um den Innenraum trocken und hygienisch sauber zu halten. Der Verdampfer wird im oberen Teil installiert.

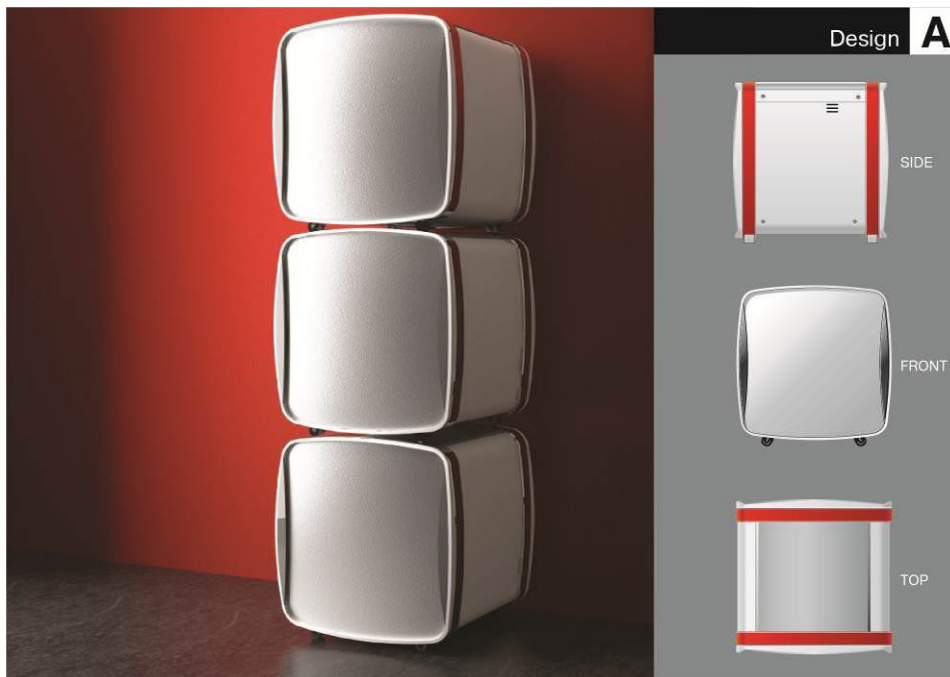


Abbildung 58: Design A

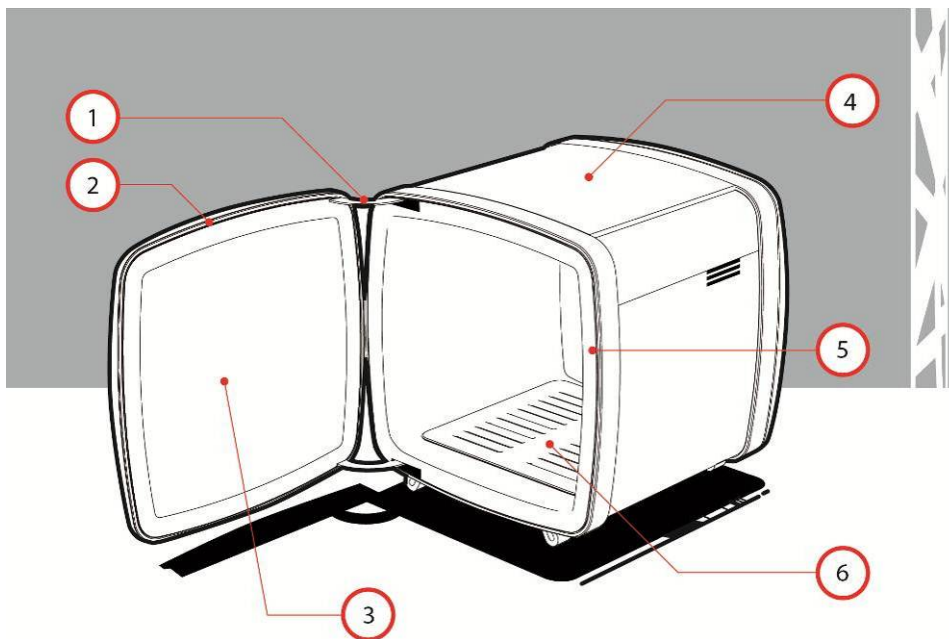


Abbildung 59: Design A - 1) Türangel 2) Türdichtung 3) Tür 4) Verdampfer 5) Innenwand 6) Ablagefläche

6.2.2 Design B

Dieses Design für einen Kühlschrank mit Schubladen soll einen handlicheren und leichteren Zugriff ermöglichen. Das Herausziehen einer ganzen Schublade nach vorne, ermöglicht dem Nutzer eine leichtere Zugabe und Entnahme von Lebensmitteln in bzw. aus dem Kühlschrank.

Das äußere Erscheinungsbild ist ein klares Design mit einem integrierten Türgriff. Die oberste Kühlkammer hat zusätzlich einen Deckel, sodass auch Dinge aus dem hinteren Bereich leicht von oben entnommen werden können.

Das Innere der Kühlkammern ist so entworfen, dass Ecken, die schwierig zu reinigen sind, vermieden werden. Der Verdampfer ist bei dieser Variante in der seitlichen Wand vorgesehen. Durch dieses Schubladensystem sind keine Leuchtmittel in den Kühlkammern notwendig.

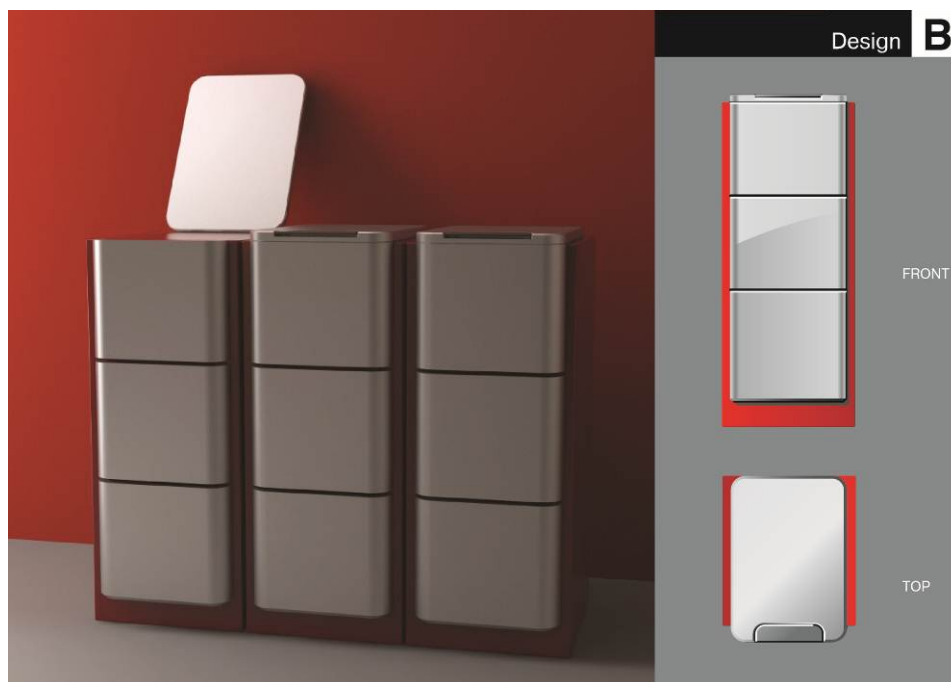


Abbildung 60: Design B

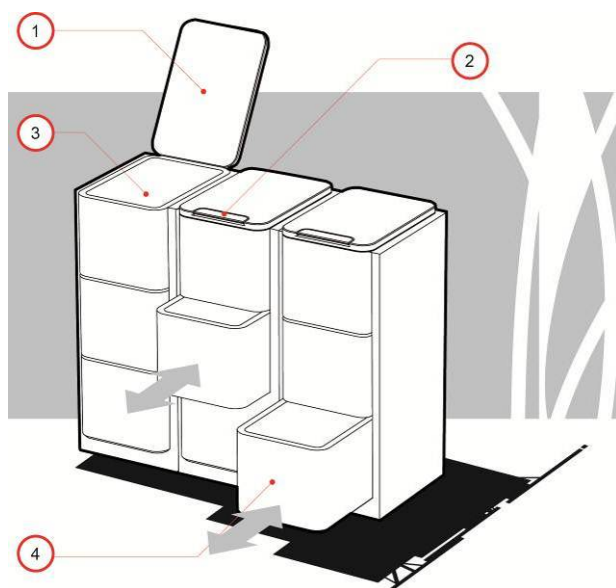


Abbildung 61: Design B - 1) Deckel 2) Deckelgriff 3) Kühlkammer 4) Schublade

6.2.3 Design C

Durch die zylindrische Form hebt sich dieses Design deutlich von marktgängigen Kühlschränken ab und kann daher ein Alleinstellungsmerkmal für einen energieeffizienten Kühlschrank werden. Das Design wurde gemäß dem Prinzip „inside-out“ entwickelt: Die äußere Form ergibt sich aus der runden, drehbaren Ablagefläche im Inneren. Die Innenwand verläuft entlang dem Rand der Ablagefläche. Die Schiebetür braucht nur eine sehr kleine Abstandfläche vor dem Gerät, wenn sie geöffnet wird. Die einzelnen Kammern werden unabhängig voneinander gekühlt, sodass die Kapazität des Kühlschranks durch Hinzufügen oder Wegnehmen einer Kammer je nach Bedarf geändert werden kann.

Die Innenwand hat durch die zylindrische Form weniger Kanten als eine Quaderform, wodurch die Reinigung der Kammern erleichtert wird. Schmelzwasser kann durch den Spalt zwischen

Ablagefläche und Innenwand bis zum Ablaufloch im Boden der Kammer abfließen. So wird der Kühlschrank trocken gehalten, was wiederum das Kühlsystem entlastet. Der Verdampfer ist im oberen Teil jeder Kammer positioniert.



Abbildung 62: Design C

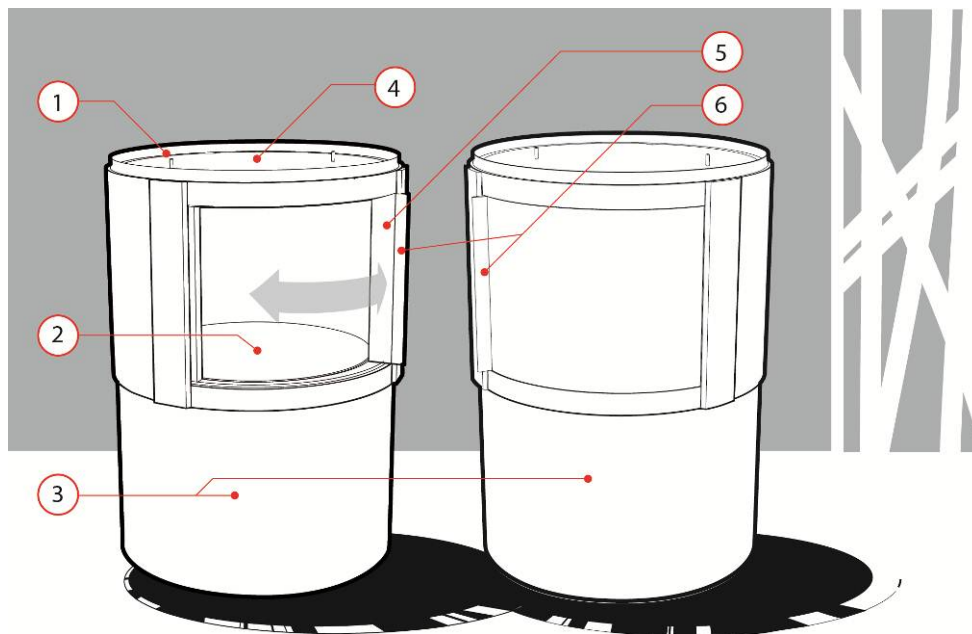


Abbildung 63: Design C – Zulauf für Kältemittel; 2) drehbare Ablagefläche; 3) Sockel; 4) Verdampfer; 5) Türdichtung; 6) Türgriff

6.3 Evaluation der Designs

Im Folgenden werden die Designvarianten A, B und C evaluiert und verglichen. Jedes Design wird anhand der festgelegten Hauptkriterien Zugänglichkeit, Handhabung der Lebensmittel, Luftzirkulation, Platzbedarf für das Öffnen der Tür und Reinigung bewertet. Wird dem Konzept und

den Kriterien in großem Maß entsprochen, erhält das Design 2 Punkte. Eine teilweise Entsprechung wird mit 1 Punkt bewertet. Wird das Kriterium nicht erfüllt oder widerspricht das Design sogar dem Konzept, gibt es keinen Punkt bzw. wird mit -1 bewertet.

6.3.1 Zugänglichkeit

Das Design C wurde gemäß den Prinzipien “inside-out” und “form follows function” entwickelt. Ein spezielles Feature dieses Designs ist die drehbare Ablage, durch welche NutzerInnen problemlos auf den gesamten Innenraum zugreifen können. In einem konventionellen Kühlschrank können Gegenstände im hinteren Bereich wegen der Entfernung und mangelnder Sicht nur schwer erreicht werden; als Folge muss der Kühlschrank länger offen bleiben, damit Gegenstände hervorgeholt werden können (siehe Abbildung 62, links). Mit einer drehbaren Ablage können Gegenstände aus dem hinteren Bereich einfach nach vorne befördert werden (siehe Abbildung 62, rechts).

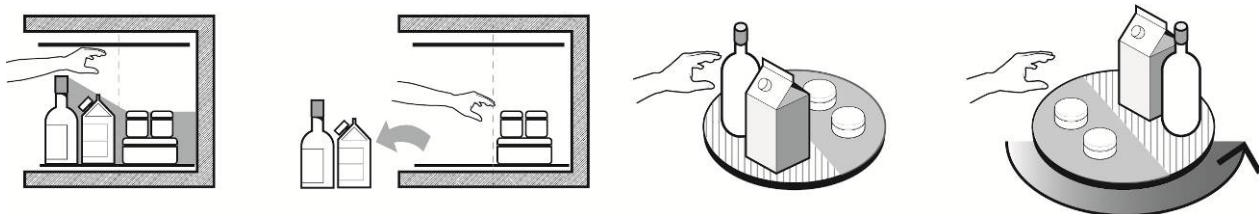


Abbildung 64: links: Zugriff wird durch größere Gegenstände im vorderen Bereich blockiert; rechts: Drehen ermöglicht Zugriff auf den hinteren Bereich

Die Zugänglichkeit ist ein wichtiger Aspekt für die Nutzerzufriedenheit, nicht nur im Sinne einer leichten Nutzbarkeit, sondern auch in Bezug auf Ordnung, Reinigung und Energieverbrauch. NutzerInnen können mit dem Design A den Innenraum nur von vorne erreichen, sodass der hintere Bereich schwerer zugänglich ist. Das Schubladensystem von Design B ermöglicht hingegen den Zugriff von oben. Durch die drehbare Ablagefläche in Design C kann der hintere Bereich einfach nach vorne bewegt werden.

Tabelle 10: Bewertung der Zugänglichkeit

Design	Beschreibung	Wertung
Design “A”	Zugriff nur von vorne, sodass der hintere Bereich schwerer zu erreichen ist	1
Design “B”	Zugriff von oben, sodass die gesamte Ablagefläche zugänglich ist	2
Design “C”	Zugriff von vorne mit leichter Zugänglichkeit von vorderem und hinterem Bereich	2

6.3.2 Handhabung der Lebensmittel

Die meisten NutzerInnen platzieren neue Lebensmittel üblicherweise im vorderen Bereich des Kühlschranks und schieben damit ältere weiter nach hinten, wo diese oft so lange verbleiben bis sie verdorben sind.

Das Design A bietet die konventionelle Art der Aufbewahrung. Die NutzerInnen können den Innenraum in verschiedene Bereiche einteilen, wobei üblicherweise nach Lebensmittelgruppe und nicht nach Ablaufdatum sortiert wird. Ältere Lebensmittel sind bei diesem Design vorwiegend im hinteren, schwerer zugänglichen Bereich aufzufinden.

Die Anordnung der Lebensmittel beim Design "B" erfolgt entsprechend dem Design "A" üblicherweise ebenfalls nach Lebensmittelgruppe. Jedoch ist bei diesem Design eine bessere Sicht und Zugänglichkeit zum hinteren Bereich gegeben. Nachteilig ist jedoch, dass die NutzerInnen dafür den Kühlschrank ganz öffnen und das Schubfach vollständig herausziehen müssen, was einen höheren Kühlenergieverlust zur Folge hat.

Das Design "C" bietet mit seiner drehbaren Ablage eine bessere ergonomische Zugänglichkeit sowohl zum vorderen als auch zum hinteren Bereich. Das Oberflächendesign der Ablage hilft den NutzerInnen zusätzlich die Lebensmittel nach Prioritäten einzuteilen und ergänzend dazu muss im Gegenteil zum Design "B" die Kühlschranktür nicht vollständig geöffnet werden.

Mit der drehbaren Ablage des Designs "C" können die Lebensmittel im Kühlschrank entsprechend dem Prinzip "first in – first out" geordnet werden, wodurch die Verschwendung von Lebensmitteln vermieden wird. Die drehbare Ablage hilft den NutzerInnen, ältere Lebensmittel wieder nach vorne zu bringen und leichter zugänglich zu machen (siehe Abbildung 63).

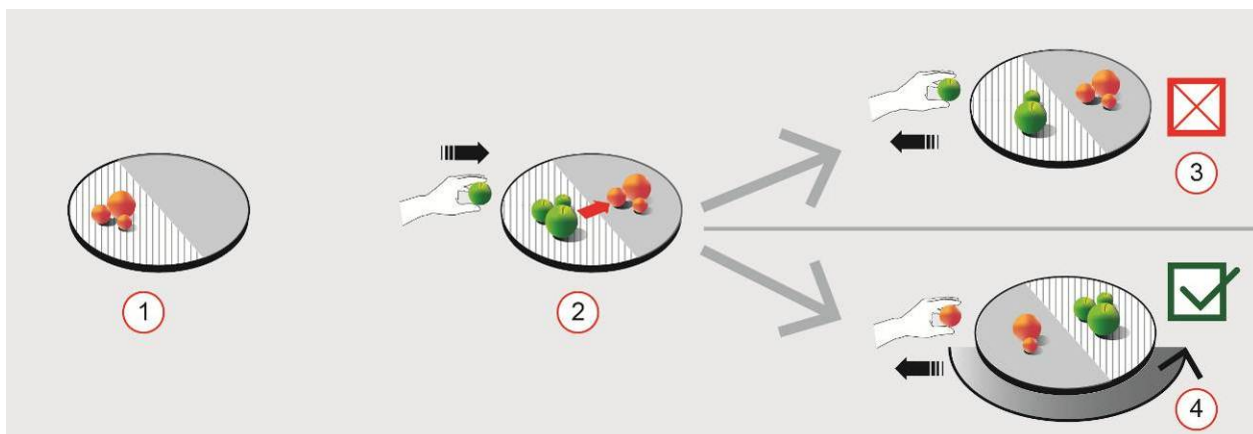


Abbildung 65: Nutzung der drehbaren Ablage – 1) der vordere Bereich wird genutzt; 2) neue Lebensmittel kommen in den vorderen Bereich und verdrängen ältere nach hinten; 3) neue Lebensmittel werden entnommen, ältere bleiben im hinteren Bereich; 4) durch Drehen der Ablage kommen ältere Lebensmittel in den vorderen Bereich

Tabelle 11: Bewertung der Handhabung der Lebensmittel

Design	Beschreibung	Wertung
Design "A"	Zonierung; Handhabung der Lebensmittel durch Erinnerungsvermögen beeinflusst	1
Design "B"	Zonierung; Handhabung der Lebensmittel durch Erinnerungsvermögen und Zugänglichkeit beeinflusst	1
Design "C"	Zonierung; Handhabung der Lebensmittel nach dem "first in – first out"-Prinzip	2

6.3.3 Luftzirkulation

Die Positionierung des Verdampfers in der Kühlkammer beeinflusst die Luftzirkulation und die Kühlwirkung. Es gibt zwei Möglichkeiten, den Verdampfer zu positionieren: oben oder seitlich.

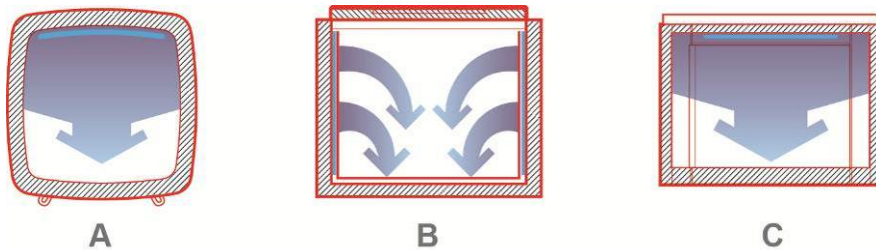


Abbildung 66: Luftzirkulation der verschiedenen Kühlausrichtungen in den Designvarianten A, B und C

In Design A und C ist der Verdampfer im Deckenbereich positioniert. Eine Kühlung von oben entspricht der natürlichen Luftzirkulation. Die kalte Luft strömt von oben nach unten, während warme Luft aufsteigt. Der Abstand von Ablagefläche zum Verdampfer ist immer gleich (siehe Abbildung 64) und ermöglicht daher die gleichmäßige Kühlung des gesamten Innenraumes eines Aufbewahrungsmoduls sowie deren enthaltener Lebensmittel.

In Design B ist der Verdampfer hingegen an den Seitenwänden positioniert, wodurch Gegenstände im Kühlbereich weniger gleichmäßig temperiert werden können. Der Grad der Kühlung ist dabei abhängig vom Abstand des zu kühlenden Gegenstandes zum Verdampfer. Gegenstände am Rand der Ablagefläche, mit Ausnahme des Türbereiches, erreichen tiefere Temperaturen als solche in der Mitte. Zusätzlich wird der Kühleffekt durch die Seitenwände der Schublade vermindert.

Tabelle 12: Bewertung der Luftzirkulation

Design	Beschreibung	Wertung
Design "A"	Verdampfer an der Decke der Kühlkammer	2
Design "B"	Verdampfer in Seitenwand der Kühlkammer	1
Design "C"	Verdampfer an der Decke der Kühlkammer	2

Design A und C sind, die Zirkulation der Kaltluft betreffend, am besten geeignet, da die zu kühlenden Gegenstände, unabhängig von der Lage in der Kühlkammer, immer gleichmäßig temperiert werden.

6.3.4 Platzbedarf für das Öffnen der Tür

Entsprechend den drei Designvarianten verfügen die Kühlschränke über verschiedene Türtypen unterschiedlicher Bauform.

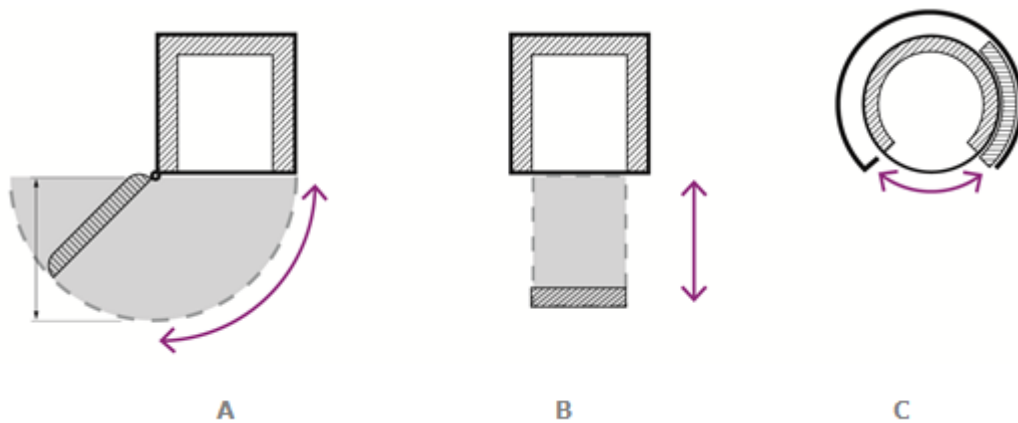


Abbildung 67: Vergleich von verschiedenen Bauformen von Türen und benötigter freier Fläche

Design A benötigt am meisten Platz für das Öffnen der Kühlschranktür. Die Schwingtür benötigt freie Fläche vor der Tür sowie zusätzliche freie Fläche daneben, die tatsächlich benötigte Fläche hängt zusätzlich von den Abmessungen der Tür ab.

Die Schubladen in Design B brauchen weniger Platz als die Schwingtür in Design A. Jedoch benötigt die Schiebetür des zylindrischen Designs C keine freie Fläche vor oder neben dem Kühlschrank, da die Tür in der Zylinderform verborgen werden kann (siehe Abbildung 65). Dieses Design eignet sich daher auch optimal in kleinen Räumen oder bei beengten Platzverhältnissen.

Tabelle 13: Bewertung der Bauform der Tür

Design	Beschreibung	Wertung
Design "A"	Schwingtür benötigt eine relative große freie Fläche	1
Design "B"	Schublade benötigt freie Fläche vor dem Kühlschrank	1
Design "C"	Schiebetür benötigt den geringsten Platz für das Öffnen	2

6.3.5 Reinigung

Die Anzahl und die Größe der Ecken und Kanten in einer Kühlkammer sind maßgeblich für den Reinigungsaufwand, da diese schwieriger zu säubern sind als Flächen oder abgerundete Kanten.

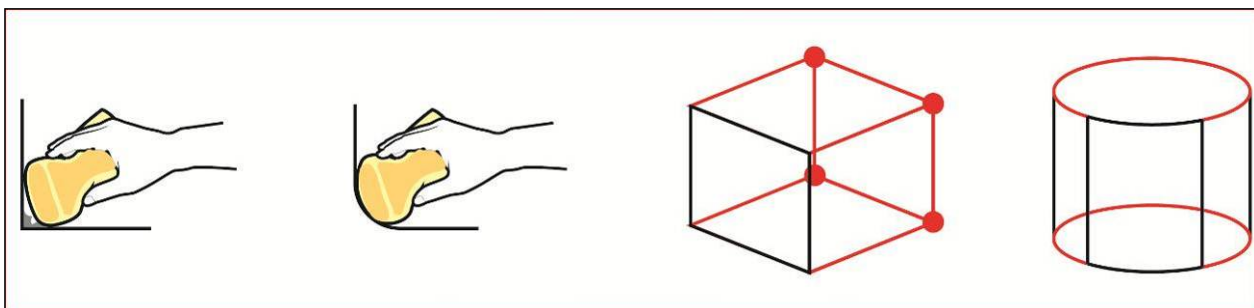


Abbildung 68: Vergleich der kritischen zu reinigenden Positionen bei runden und eckigen geometrischen Körpern

Das kubische Design in den Varianten A und B hat etwa gleich viele Ecken und Kanten innerhalb der Kühlkammer, wohingegen Design C keine Ecken und weniger Kanten zu reinigen hat.

Tabelle 14: Bewertung der Handhabung der notwendigen Reinigung

Design	Beschreibung	Wertung
Design "A"	Einige Ecken und Kanten vorhanden	1
Design "B"	Einige Ecken und Kanten vorhanden	1
Design "C"	Keine Ecken und nur wenige Kanten vorhanden	2

6.3.6 Zusammenfassung

Tabelle 15: Übersicht der Bewertungsergebnisse

	Zugänglichkeit	Handhabung der Lebensmittel	Luftzirkulation	Platzbedarf für das Öffnen der Tür	Reinigung	Gesamt
Design "A"	1	1	2	1	1	6
Design "B"	2	1	1	1	1	6
Design "C"	2	2	2	2	2	10

Das Design C wurde aufgrund von den Ergebnissen der durchgeführten Evaluation (10 Punkte) für die Weiterentwicklung des Kühlschranks ausgewählt. Es entspricht in allen untersuchten Kriterien dem Gesamtkonzept.

6.4 Weiterentwicklung des Designs und der Details

6.4.1 Doppelwandige Glastür

Die NutzerInnen können durch eine Glastür in den Kühlschrank sehen, um Dinge auszuwählen oder um zu überlegen, wo diese platziert werden sollen, bevor sie die Tür öffnen. So kann der Kühlverlust während des Öffnens reduziert werden. Aufgrund des großen Temperaturunterschieds zwischen Innen- und Außenraum kann es zu einem Beschlagen des Glases und damit zu einer erschwerten Durchsicht kommen. Eine Doppelverglasung kann diesen Effekt verringern. Nachteilig sind bei dieser Technologie aber die höheren Produktionskosten, da die Herstellung einer gebogenen Doppelverglasung aufwendiger ist.

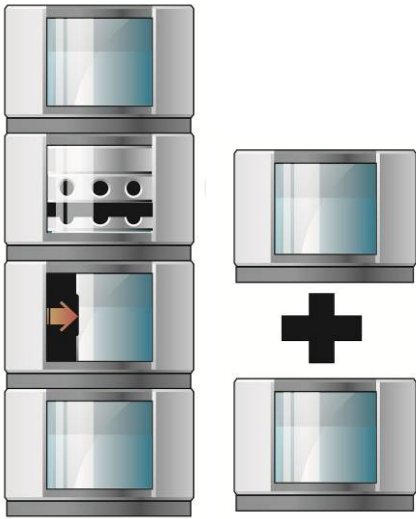


Abbildung 69: Vorentwurf des Designs

Das Design sieht für die Schiebetür anstelle einer Laufrolle reibungsarmes Material zwischen Tür und Führungsschiene vor. So können Produktionskosten und Wartungsarbeiten reduziert werden. Eine erhöhte Führungsschiene ist leichter zu reinigen als eine eingefräste Schiene, aus der Schmutz und Wasser nur schwer zu entfernen sind, was zu hygienischen und Geruchsproblemen im Innenraum des Kühlschranks führen könnte. Eine erhöhte Führungsschiene verhindert außerdem das Ausströmen kalter Luft von innen nach außen.

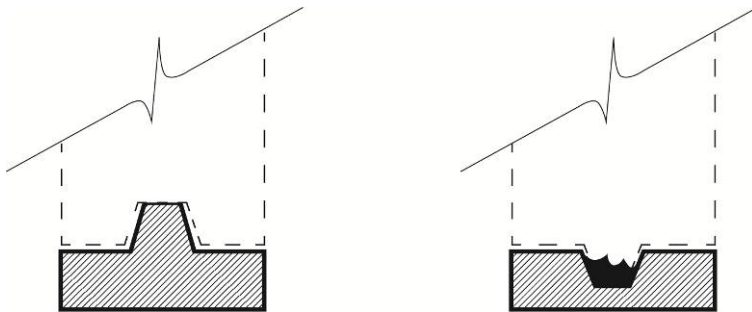


Abbildung 70: links: erhöhte Führungsschiene für die Schiebetür; rechts: eingefräste verschmutzte Führungsschiene

6.4.2 Energiesparendes Design

Der Verdampfer wird oberhalb des Aufbewahrungsmoduls installiert, da eine Kühlung von oben den gesamten Innenraum eines Moduls erreicht. Eine individuelle Temperaturregelung reduziert den Energieverbrauch, da dieser an die tatsächliche Nutzung angepasst wird.

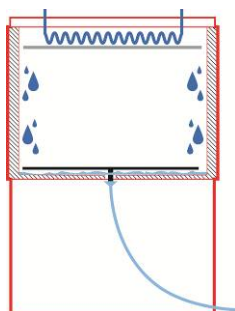


Abbildung 71: Position des Verdampfers und Entwässerungssystem

6.4.3 Musterversuche

Eine Reihe von Versuchsmodellen wurde gebaut, um Größe, Proportionen und bewegliche Teile der Aufbewahrungsmodule zu testen. Die Herstellung dieser ersten Modelle erfolgte aus Karton und Acrylnitril-Butadien-Styrol- (ABS-)Platten aufgrund der leichten Verarbeitungsweise dieser Materialien. Zwei Designs sollten die äußere Form und die Proportionen des Moduls demonstrieren: Das erste Modell mit seiner rechteckigen Form kann gut neben andere Möbel platziert werden, die üblicherweise auch rechteckig sind. Die eckige Form passt jedoch nicht gut zu der runden Ablagefläche innerhalb des Kühlmoduls, da die Bereiche zwischen Ecken und Ablagefläche nicht genutzt werden können (schwarze Flächen in

Abbildung 70, links). Das Innenvolumen des Moduls und damit auch die Betriebslast des Kühlsystems werden vergrößert, ohne dass damit Vorteile verbunden wären.

Eine zylindrische Form passt besser zur runden, drehbaren Ablagefläche. Bei dieser Form ergeben sich Lücken zwischen Außenwand des Kühlmoduls und umgebenden Möbeln (schwarze Flächen in Abbildung 70, rechts), diese bieten aber Raum für die Abwärme des Kühlmoduls.

Beide Formen – eckig und zylindrisch – führen also zu freien Flächen; während diese aber bei der eckigen Form im Inneren liegen und nicht genutzt werden können, dienen sie bei der zylindrischen Form der Luftzirkulation.

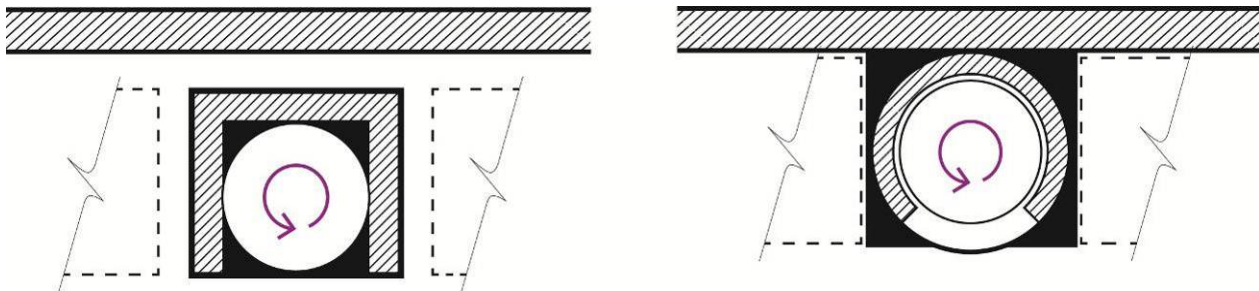


Abbildung 72: Nutzbarer Innenraum (weiße Fläche) bei eckiger Form (links) und runder Form (rechts)

Um die Details im Inneren weiterzuentwickeln, wurde die zylindrische Form mit verschiedenen Materialien wie dem Kunststoff ABS und Schaumpolystyrol gebaut. Damit konnte die Mechanik der drehbaren Ablagefläche und der Tür getestet werden. Auch das Schließsystem für die horizontale Verbindung mehrerer Module und die Dicke der Wand wurden vom Designer ausgearbeitet.

Ein vollmaßstäbliches Modell wurde schließlich aus Karton konstruiert, um die tatsächliche Größe zu testen. Das Modell im Maßstab 1:1 hilft bei der Definition der benötigten Größe und dabei, einzelne Teile des Moduls für den tatsächlichen Gebrauch zu verbessern.



Abbildung 73: Maßstabgetreue Modelle (1:5 und 1:1) aus verschiedenen Materialien

6.5 Konstruktion des Prototyps

Ausgehend von den beschriebenen Detail- und Konzeptentwicklungen wurde das nachfolgende Design C für den Zero CO₂ Cooler entworfen.

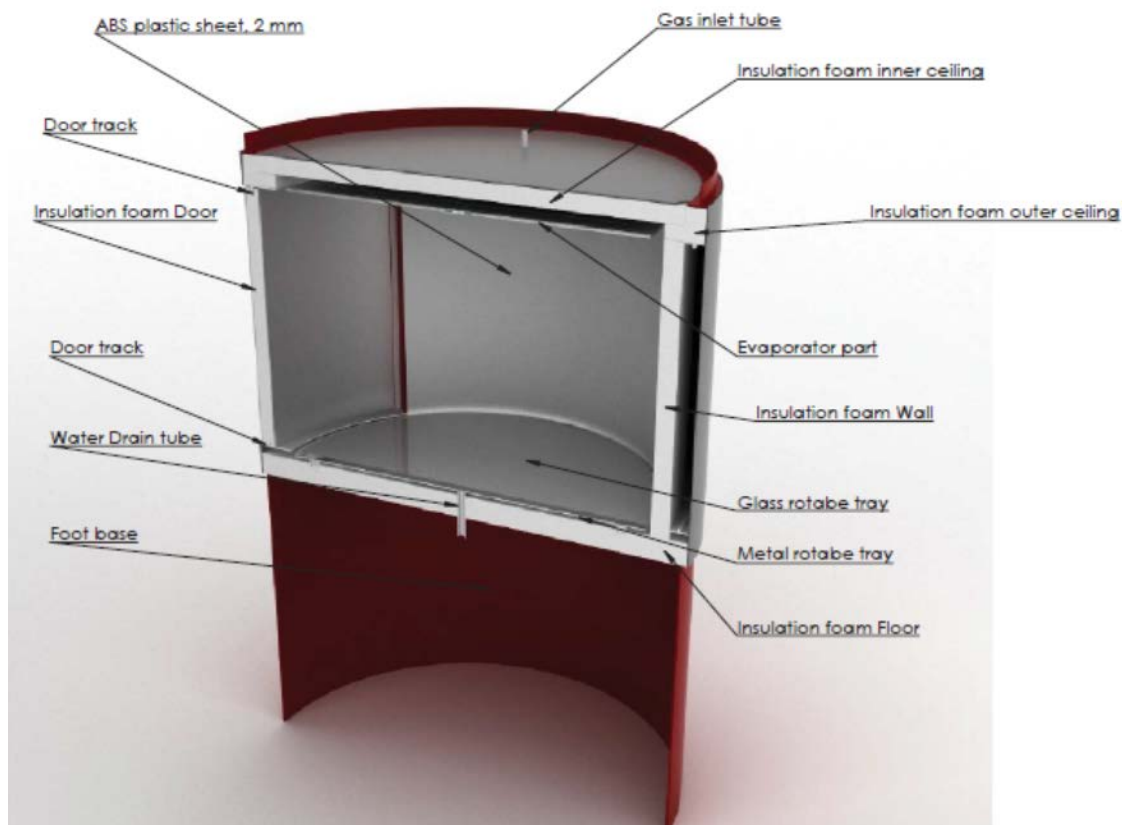


Abbildung 74: Design des Prototyps

In diesem energiesparenden Design mit dem Verdampfer im oberen Bereich wurden sowohl die platzsparende Schiebetür auf der erhöhten Führungsschiene als auch die drehbare Ablage für eine gute Zugänglichkeit der Lebensmittel integriert (siehe Details des Designkonzeptes in Abbildung 73 und Abbildung 74).

Laut ISO 15502 dürfen die für die Innenausstattung genutzten Materialien keine Gerüche oder Geschmack an gelagerte Lebensmittel abgeben, selbstverständlich dürfen die Materialien die Lebensmittel nicht kontaminieren oder gar vergiften. Sie müssen widerstandsfähig gegenüber Feuchte und Lebensmittelsäuren sein. Alle Oberflächenbehandlungen müssen stabil, genügend hart, farbecht, glatt und leicht zu reinigen sein.

Die helle Farbe des Innenraums unterstützt die NutzerInnen dabei, Dinge zu finden. Außerdem hilft sie, die Farbe der Lebensmittel zu erkennen und etwaige Verschmutzungen frühzeitig zu erkennen, was die Hygiene des ZCC verbessert. Deshalb sind fast alle Kühlschränke innen weiß.

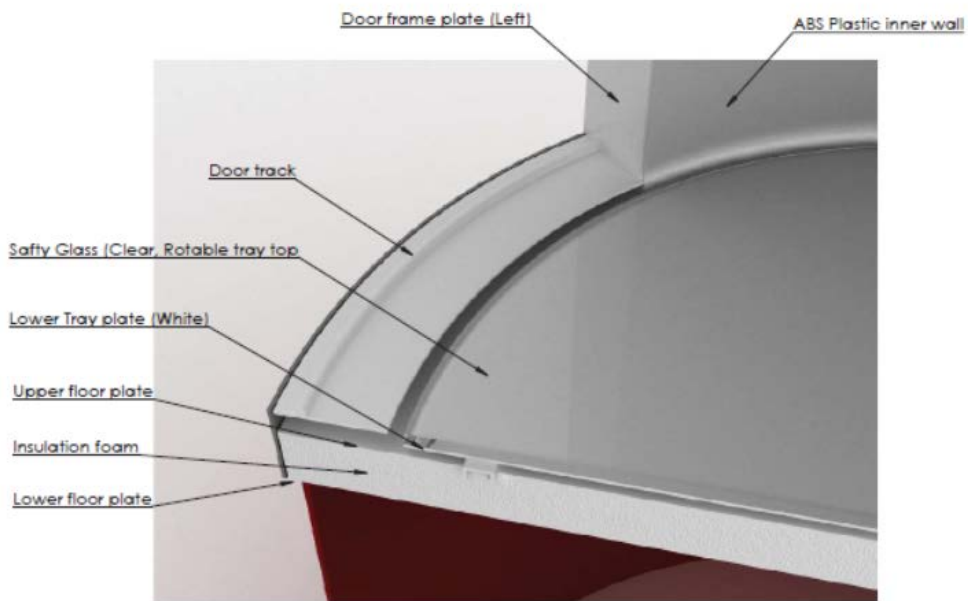


Abbildung 75: Designdetails unterer Kühlbereich

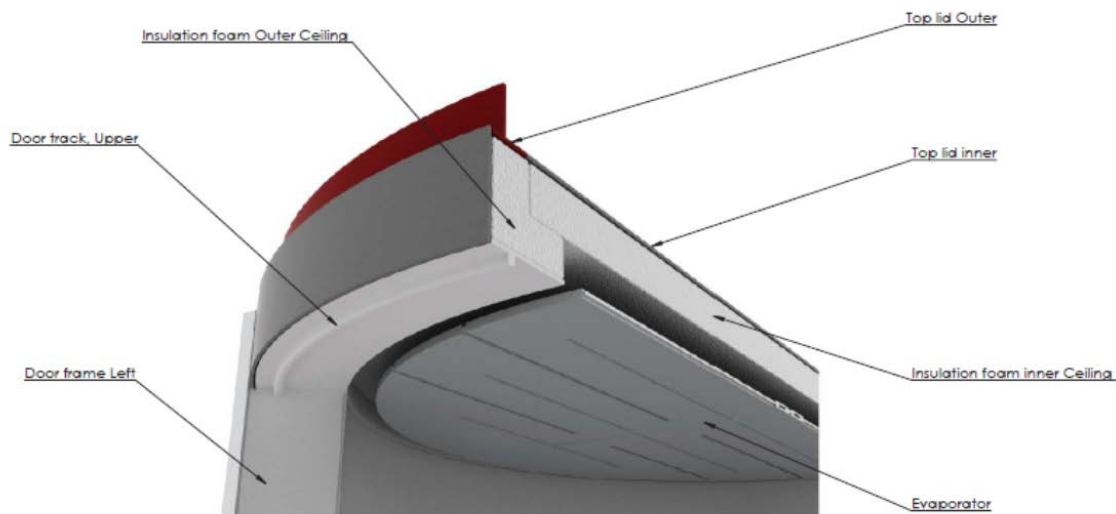


Abbildung 76: Designdetails oberer Kühlbereich

Die Komponenten für eine Kühlkammer des ausgewählten Designs können in vier grundsätzlichen Arbeitsschritten hergestellt und anschließend zum vollständigen Produkt zusammengesetzt werden:

- Zuschneiden
- Walzen/Biegen
- Montage
- Oberflächenveredelung

Zuschneiden

Das Zuschneiden der Komponenten kann prinzipiell entweder manuell oder mittels CNC (Computer Numerical Control) erfolgen. Für manuelles Zuschneiden werden Werkzeuge wie Handsäge,

Schneidbrenner, Plasmaschneider oder Fräse verwendet. Diese Methoden sind kostengünstig, können aber je nach Erfahrung und Fähigkeiten sehr zeitaufwendig sein.

Für CNC (Computer Numerical Control) werden CAD (Computer Aided Design) und CAM (Computer Aided Machine) benötigt. Der Prozess ist weniger zeitaufwendig und führt in der Regel zu einem exakten Ergebnis. Für die Herstellung einer geringen Stückzahl sind die Investitionskosten für die Anschaffung der Maschinen jedoch relativ hoch; für größere Mengen können sie sich jedoch rentieren. Im Projekt Zero CO₂ Cooler wurden die Metallplatten maschinell mit Laser zugeschnitten, um Zeit zu sparen. Sie können aber ebenso per Hand mit einer der oben genannten Methoden zugeschnitten werden.

Formgebung / Biegen

Walzen und Biegen sind kostengünstige Methoden, um Metall zu formen. Die entworfene Kühlkammer hat eine geometrische Form, die mit diesen Methoden einfach hergestellt werden kann.

Montage einzelner Komponenten

Der Prototyp wurde mittels Lichtbogenschweißen, Punktschweißen und Verschraubungen zusammengebaut. Lichtbogenschweißen ermöglicht einen starken Verbund. Dabei werden bei sehr hoher Temperatur zwei Metallteile verbunden. Abhängig von Stärke und Art der Metalle kann besonders bei dünnen Komponenten zu Verformungen kommen. Diese Methode erfordert ein gewisses Maß an Erfahrung und Geschick. Nach der Montage muss die Oberfläche außerdem geschliffen werden. Aus diesen Gründen wird Punktschweißen verwendet, wenn die geplante Belastung nicht zu hoch ist und die Fläche später sichtbar sein wird, da bei dieser Methode kein zusätzliches Schleifen notwendig ist. Einige Schrauben wurden in nicht sichtbaren Bereichen verwendet, da sie eine einfache und nachjustierbare Befestigungsart darstellen.

Oberflächenveredelung

Die Oberflächenbehandlung ist die abschließende Phase für die Herstellung der Komponenten. Mittels Schleifverfahren wird die Oberfläche geglättet und für den Farbauftrag vorbereitet. Schweißnähte von mittels Lichtbogenschweißverfahren hergestellten Komponenten müssen in jedem Fall im Anschluss abgeschliffen werden.

Montage des Prototyps

Nach der Herstellung der einzelnen Komponenten und Teilbereiche können diese entsprechend den beschriebenen Verfahren für die Montage der einzelnen Komponenten in einem festgelegten Ablauf (siehe Abbildung 75) zum vollständigen Prototyp zusammengebaut werden (siehe Abbildung 76).



Abbildung 77: Ablauf des Zusammenbaus



Abbildung 78: Vollständig montierter Prototyp

6.6 Entwicklung des Verdampfers

Der Verdampfer ist einer der wichtigsten Teile des Kühlsystems eines Kühlschranks. Mehrere Versuche und Weiterentwicklungen wurden dafür durchgeführt, die im Folgenden beschrieben werden.

Der Verdampfer des Icebooks besteht aus drei Schichten zugeschnittener Metallplatten. In der mittleren Platte werden Kanäle für den Ammoniak- und Wasserfluss des Systems ausgeschnitten, die anderen beiden Platten schließen die Kanäle ab.

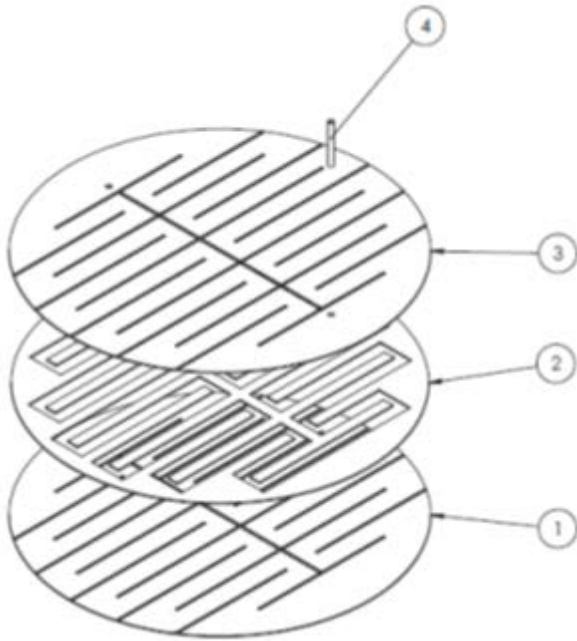


Abbildung 79: Aufbau neues Verdampferkonzept – untere (1), mittlere (2), obere (3) Verdampferplatte, Zufluss (4)

Als Material für den Verdampfer wurde zunächst 3 mm starkes Aluminium mit einem Radius von 545 mm ausgewählt, da es sich wegen seiner hohen Wärmeleitfähigkeit besonders für diesen Einsatzzweck eignet. Die Schnittlinien in der oberen und unteren Platte sind bei 5 mm angesetzt.

Rohrspirale

Bei den früher durchgeführten Versuchen wurde ein Spiralverdampfers verwendet (siehe Kapitel 5.1 – Ergebnisse der praktischen Tests).

Kleber

Im ersten Experiment zur Verbindung der Aluminiumplatten und Abdichtung der Kältemittelkanäle wurde ein spezieller Kleber verwendet (Loctite 94555 A&A), der einem Druck von 5 bar standhalten sollte. In einem Test unter Wasser wurde Luft bei steigendem Druck in den Verdampfer geleitet. Die Abdichtung löste sich bereits bei 2 bar, an den Bruchlinien bildeten sich Luftbläschen. Eine stärkere Verbindung war also notwendig, da der Kleber den Anforderungen der Icebook-Technologie von mindestens 5 bar nicht standhalten konnte.



Abbildung 80: Verbindung der Verdampferplatten mit Kleber

Kleber und Nieten

In einem zweiten Experiment wurde der Verdampfer mit Nieten entlang der Schnittlinien befestigt (siehe Kapitel 1 – Ergebnisse der praktischen Tests), um die Platten zu verbinden, zusätzlich wurde wieder Kleber für die Abdichtung verwendet. Abermals wurde unter Wasser mit einem Luftdruck von 5 bar getestet. Diese Variante des Verdampfers war zwar an der Oberfläche nicht glatt und ebenmäßig, konnte aber dem Druck standhalten.

Schweißen

Ein weiteres Experiment bestand darin, drei Aluminiumplatten mit einer glatten Oberfläche zusammenzuschweißen. Die Schnittlinien wurden von 5 mm auf 2 mm verschmälert, um den Produktionsprozess zu vereinfachen und Kosten sowie Zeit zu sparen. Durch die schmäleren Schnittlinien reicht statt einer doppelten eine einfache Schweißlinie aus (siehe Abbildung 79). Dadurch können ca. 50 % an Zeit und Kosten eingespart werden.

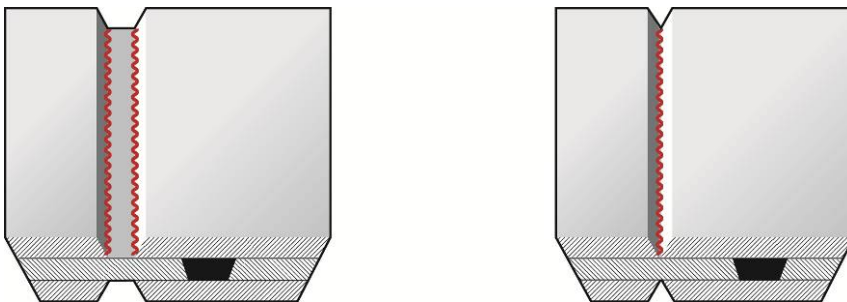


Abbildung 81: Vergleich von doppelter Schweißlinie bei breiterer Schnittlinie (links) und einfacher Schweißlinie bei schmalerer Schweißlinie (rechts)

Der erste Versuch für die Herstellung eines Verdampfers aus verschweißtem Aluminium führte aufgrund der hohen Temperatur auf der großen Fläche sowie der geringen Stärke der Platten zu starken Verformungen. In einem zweiten Versuch mit identischem Aufbau wurde hingegen die Temperatur beim Laserschweißen reduziert, wodurch der Grad der Verformung deutlich reduziert werden konnte. Trotz der Möglichkeit einer sehr präzisen Arbeitsweise beim Laserschweißen konnten jedoch leichte Verformungen nicht vermieden werden. Der anschließende Druckbeständigkeitstest mit 5 bar wurde erfolgreich durchgeführt.

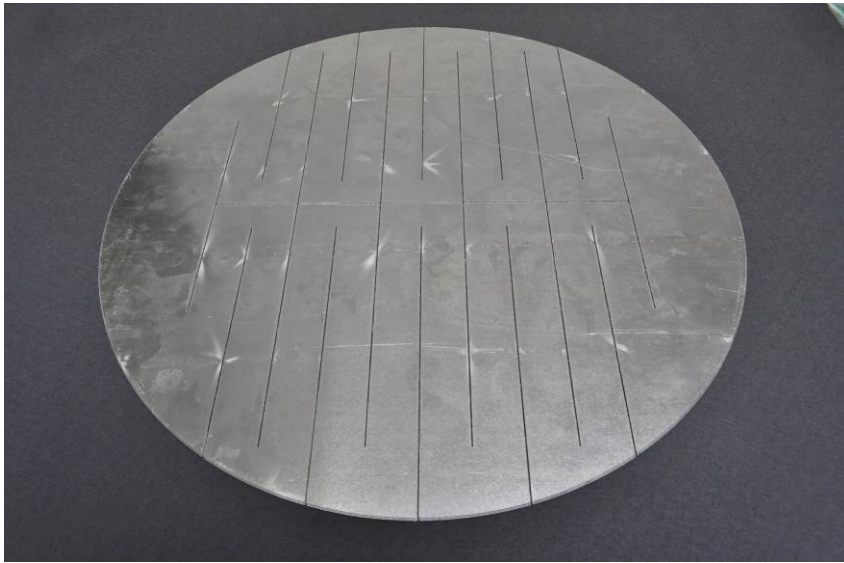


Abbildung 82: Verdampfer-Prototyp aus Aluminium (3 Platten)

Alternative Herstellungsmöglichkeiten

Um eine Verformung der Platten beim Schweißen zu vermeiden, könnte abgesehen von einer veränderten Plattenstärke auch ein anderes Material wie z.B. Stahlblech anstelle von Aluminium für die Herstellung des Verdampfers verwendet werden. Zwar verfügt dieses über eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Aluminium, ist es im Gegenzug widerstandsfähiger gegenüber einer möglichen Verformung durch große Hitze oder hohem Druck. Weitere Vorteile sind günstigere Materialkosten sowie eine leichtere Schweißbarkeit.

6.7 Funktionen und Spezifikationen des ZCC-Prototyps

Ausgehend von den in Arbeitspaket 1 erhobenen nutzerspezifischen Anforderungen, der Icebook-Technologie und dem entwickelten Design sind in der nachfolgenden Tabelle die Funktionen und Eigenschaften des ZCC-Prototyps dargestellt.

Tabelle 16: Technische Spezifikationen des ZCC

	Spezifikationen des ZCC
Typ	Der ZCC kann sowohl als Kühlschrank als auch als Gefrierschrank verwendet werden
Kühlmittel	Ammoniak
Energieversorgung	Nutzung thermischer Energie (Warmwasser im Niedertemperaubereich von ca. 80°C) zur Bereitstellung von Kälte mittels Ammoniak-Wasser-Absorption. Bereitstellung der benötigten Energie durch Solarkollektoren möglich. Der Energiebedarf für weitere Funktionen wie z.B. Beleuchtung wird auf ein Minimum reduziert.
Kühlkapazität	Bis zu einem Maximum von 1 kW (abhängig von der Dimensionierung und den entwickelten Funktionsmodellen)
Energieverbrauch	Abhängig von der Gesamtdimensionierung (Anzahl und Art der Module) und dem Nutzerverhalten
Aufbewahrungsfächer	Die Anzahl und Art der Aufbewahrungsfächer kann je nach Anforderung variieren. Grundsätzlich ist jedoch die Einteilung in drei Kategorien gedacht. Ein Aufbewahrungsfach ist für die Lagerung von frischen Lebensmitteln vorgesehen, eines für die Lagerung von

	tiefgekühlten Lebensmittel bis zu einer Temperatur von bis zu -6°C und eines für die Lagerung von tiefgekühlten Lebensmitteln bis zu einer Temperatur von bis zu -20°C. Die Anordnung der Aufbewahrungsfächer kann je nach Bedarf im Sinne einer verbesserten Ergonomie erfolgen. Durch die systematische Aufteilung der Lebensmittel in unterschiedliche Fächer wird ein Vermischen der individuellen Gerüche vermieden.
Äußeres Design	Die alternative Kühltechnologie ermöglicht ein individuelles Design in Zylinderform, abweichend von der konventionellen Schrankform, für eine optimierte Handhabung der lagernden Lebensmittel.
Türentype	In der Kühlkammer verborgene Schiebetür für einen minimalen Platzbedarf vor und neben dem ZCC.
Innenfarbe	Die helle Farbe des Innenraums (weiß oder ein leicht abweichender Farbton) unterstützt die Farbe der Lebensmittel und etwaige Verschmutzungen frühzeitig zu erkennen, was die Hygiene des ZCC verbessert.
Entfernung des Tauwassers	Das Schmelzwasser kann durch einen Spalt zwischen Ablagefläche und Innenwand bis zum Ablaufloch im Boden der Kammer abfließen und wird nur in externen Auffangbehältern gesammelt.
Abtaufunktion	Bedingt durch die Betriebsweise des ZCC (die Nutzung von Warmwasser, keine elektrische Energie) kann die erforderliche Abtauzeit verkürzt werden. Durch das Leiten von Warmwasser durch die Kühltürhülle ist eine Umwandlung von elektrischer in thermische Energie für den Abtauprozess nicht notwendig. Diese Funktion des ZCC wurde in diesem Prototype nicht integriert, sondern ist erst für einen späteren Prototypen vorgesehen.
Eisbereiter und -spender	Trotz der hohen Präferenz der Fragebogenerhebung wurde von der Integration eines Eisbereiter/-spender abgesehen, da dieser den Energieverbrauch um 14 bis 20 % erhöhen würde. Außerdem würde sich dadurch auch der Preis signifikant (um 75–250 \$) (U.S. Environmental Protection Agency, 2008) erhöhen.

7 Integration in ein Gesamtsystem

Das Potenzial des Zero CO₂ Cooler in Bezug auf Energieeffizienz und Ressourcenverbrauch wird besonders wirkungsvoll innerhalb eines Gesamtsystems, das die Energieversorgung mit einschließt. Da das Kühlgerät mit Warmwasser statt mit elektrischer Energie betrieben wird, kann thermische Energie aus erneuerbaren, vor Ort verfügbaren Quellen (Solarenergie, Biomasse) genutzt werden. Nachdem dies nicht nur für Kühlgeräte möglich ist, sondern auch für andere thermische Energiedienstleistungen im Haushalt (Wäsche- und Haartrockner, Geschirrspüler, Waschmaschine), ist es sinnvoll, ein Gesamtsystem zu entwerfen, das die Versorgung mit erneuerbarer Energie optimal auf alle thermischen Verbraucher abstimmt. Ein solches Gesamtsystem wurde am Zentrum für Angepasste Technologie in Böheimkirchen, Niederösterreich entwickelt.

7.1 Standort des Prototyps

Für die Planung der Versorgung mit Solarenergie sind die Standortdaten des Systems von Bedeutung. Entsprechend den geografischen Daten des Standortes von 15.762° Länge, 48.198° Breite und einer Seehöhe von 228 m gelten die in den nachfolgenden Abbildungen dargestellten klimatischen Wetterdaten für Lufttemperatur und Solarstrahlung.

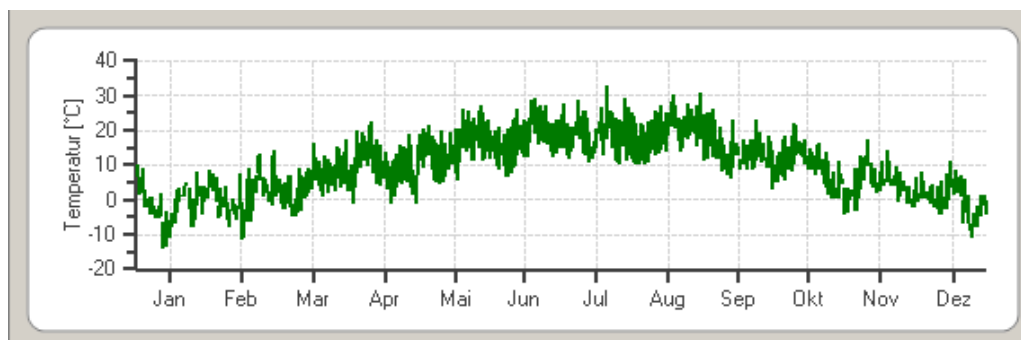


Abbildung 83: Lufttemperatur am Standort Böheimkirchen (Quelle: Meteonorm)

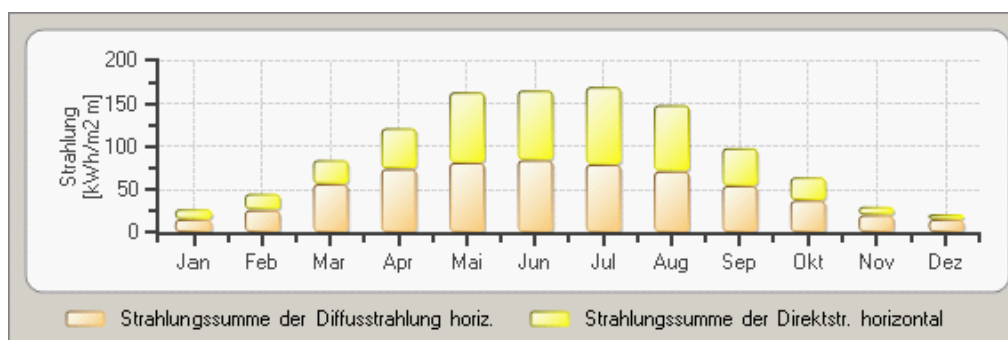


Abbildung 84: Diffuse und direkte Solarstrahlung am Standort Böheimkirchen (Quelle: Meteonorm)

Die einzelnen Monatsmittel- sowie die Gesamtjahreswerte der horizontalen Direkt-, Diffus- und Gesamtstrahlung für den Standort in Böheimkirchen sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17: Monatliche, Mittel- und Jahreswerte der Solarstrahlung in Böheimkirchen (Meteonorm)

	Temperatur	Globalstrahlung	Direktstrahlung	Diffusstrahlung
		horizontal	horizontal	horizontal
Monat	[C]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
Januar	-0,8	27	15	20
Februar	1,4	45	26	42
März	4,9	84	56	62
April	10,0	121	74	85
Mai	15,5	164	81	114
Juni	18,3	166	84	130
Juli	19,3	169	79	124
August	19,8	148	71	94
September	14,5	98	54	77
Oktober	10,0	64	37	55
November	4,8	29	20	26
Dezember	-0,1	20	15	20
Mittel	9,8	95	51	71
Gesamt	-	1135	612	849

Das ausgewählte Gebäude selbst ermöglicht eine räumliche Aufteilung der Komponenten des Gesamtsystems, entsprechend konventionellen Aufstellungsorten, in Küche, Waschraum und Technikraum. Die nach Süden ausgerichtete Dachfläche mit einer Neigung von ungefähr 42° bietet ausreichend Platz für die vom Gesamtsystem benötigte Kollektorfläche von 13 m².

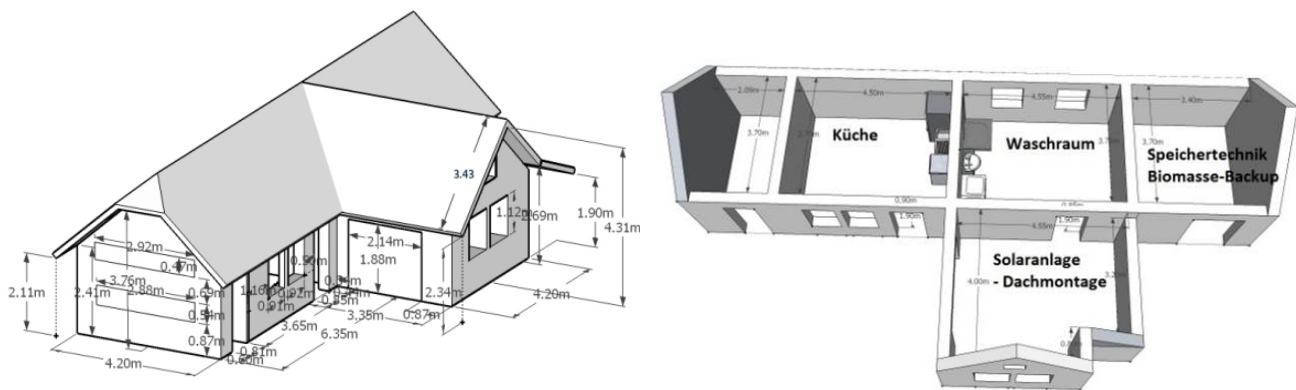


Abbildung 85: CAD-Profil des Gebäudes für das Prototypensystem (GrAT)

7.2 Technische Beschreibung des Systems

Das System besteht aus zwei Teilen: der thermischen Energieversorgung und den thermischen Verbrauchern. Zur Versorgung gehören thermische Solarkollektoren, Biomassekessel, Wärmetauscher, zwei Pufferspeicher, Systemregelung, Rohrleitungen, Pumpen usw. Das Biomasse-Backup-System wird für die Winterzeit und jene Tage vorgesehen, an denen nicht genügend Solarstrahlung für den Betrieb des Systems vorhanden ist.

Die Verbraucherseite umfasst den Zero CO₂ Cooler, einen thermisch betriebenen Haar- sowie einen Wäschetrockner, eine Warmwasserentnahmestelle, eine Waschmaschine und einen Geschirrspüler

mit Warmwasseranschluss. Der Vorteil solcher thermisch betriebenen Geräte ist, dass die Umwandlung von Elektrizität in andere Energieformen stark vermindert wird. Um Energieverluste zu vermeiden, ist keine Warmwasserzirkulationspumpe in der Anlage vorgesehen. Das ist möglich, indem der Warmwasserspeicher nahe an den Verbrauchern eingeplant wird.

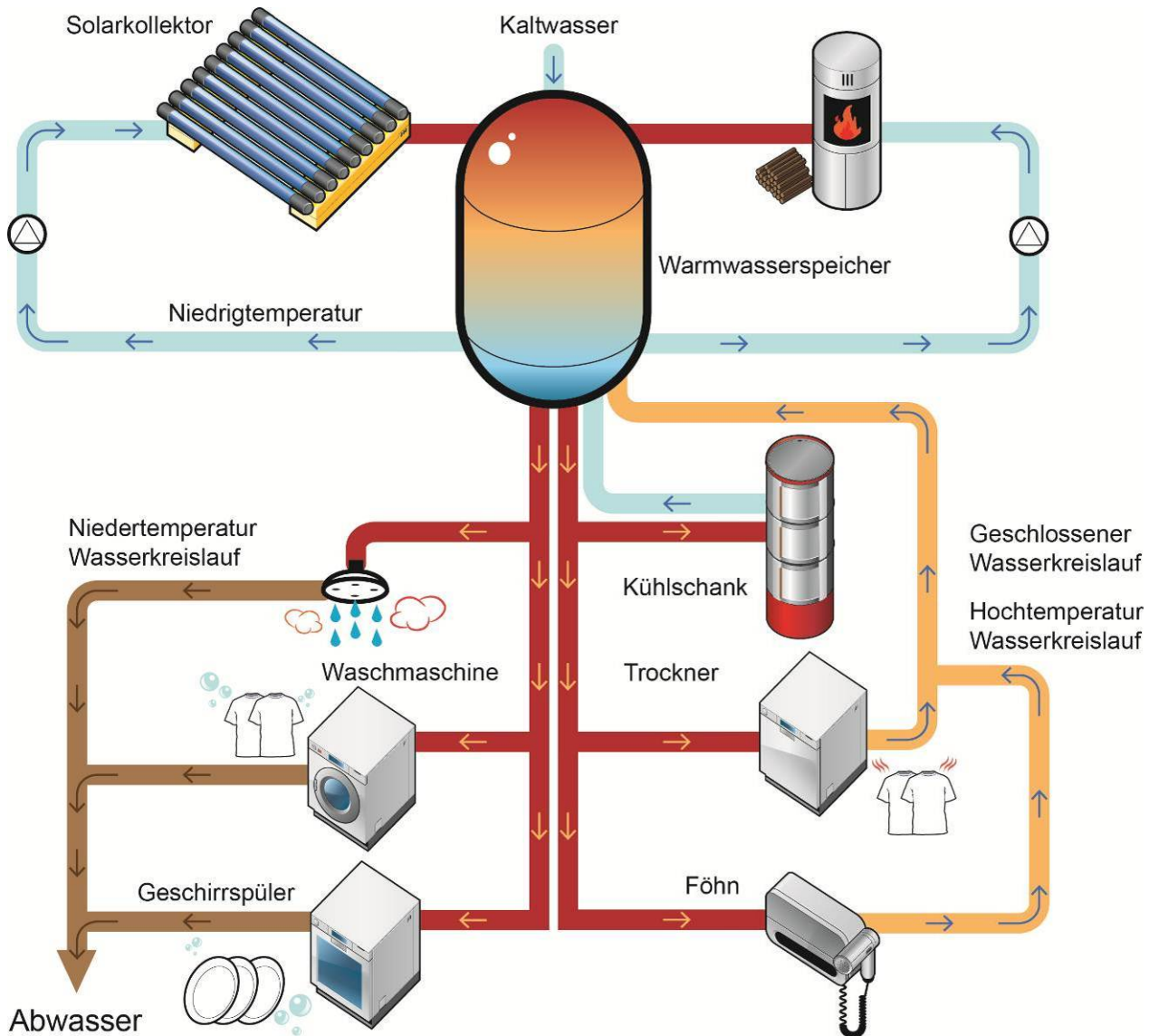


Abbildung 86: Layout der thermischen Anwendungen

Der Solarkreislauf (Primärkreis) verbindet die Solarkollektoren mit dem Wärmetauscher. Der Sekundärkreis verbindet den Wärmetauscher mit dem Speicher. Der Speicher ist mittels Versorgungsleitungen mit den Verbrauchern verbunden (Verbraucherkreis). Die einzelnen Komponenten für die Bereitstellung (Erzeugung und Speicherung) der benötigten thermischen Energie sind nachfolgend im Detail dargestellt.

7.2.1 Vakuumkollektoren

Die im Projekt verwendeten Kollektoren sind Sydney-Vakuumkollektoren von Aschoff Solar⁷, die üblicherweise für das Aufheizen von Wasser oder Luft im Wohnbau eingesetzt werden.

⁷ <http://www.aschoff-solar.com/>

Vakuumkollektoren weisen weniger Wärmeverluste auf und sind dementsprechend effizient. Sie bewegen sich typischerweise im Temperaturbereich zwischen 80 und 140 °C. Die in Böheimkirchen montierte Anlage mit einer 13 m² großen Kollektorfläche besteht aus 100 nach DIN EN 12975-2 getesteten Röhren.



Abbildung 87: links: Solarkollektoren für das Prototypensystem auf der Südseite des Daches in Böheimkirchen; rechts: Aschoff-Vakuumröhre

Die Solarenergie erhitzt das Wasser in den Absorberröhren, die Wärme wird zu einem Warmwasserspeicher oder einem Wärmetauscher geleitet. Direkte Wärmeleitung zum Wasser sorgt für eine hohe Effizienz der Kollektoren; eine ausreichende Menge Wasser verhindert eine Stagnation in den Kollektoren und gewährleistet eine lange Lebensdauer des Systems.

Tabelle 18: Technische Daten der verwendeten Aschoff-Solarkollektoren

Typ	Sol50V
Max. Betriebsdruck [MPa]	0,05
Vakuumröhren	Borsilikat 3,3; Ø 47 mm / 37 mm; L = 1500 mm
Kollektorrahmen	Aluminiumprofile 40/40, 30/30
Dichtungsringe	Silikon
Apertur-/Brutto-Fläche [m ²]	4,88/5,96
Anzahl der Röhren	100
Abmessungen l x h x t [mm]	3,100 x 2,000 x 210
Masse ohne/mit Wasser [kg]	100/180
Kollektorwirkungsgrad nach DIN EN 12975	0,756
U-Wert [W/m ² K]	2,33

Die Ausrichtung der Kollektoren beeinflusst die Effizienz des Gesamtsystems in Abhängigkeit von eintreffender Solarstrahlung sowie Verschattung durch Nachbargebäude und landschaftliche Gegebenheiten.

7.2.2 Biomassekessel

Für die Winterzeit und andere Tage, an denen nicht ausreichend Sonnenstrahlung vorhanden ist, soll das System durch einen Biomassekessel unterstützt werden. Dieser erhitzt das Wasser im Speicher direkt und wird je nach Bedarf manuell oder automatisch in Betrieb genommen.

Als Biomassekessel für die Prototypenanlage wurde ein Holzvergaser vorgesehen, der als Brennstoff Stückholz verwendet:

- Verbrennung vom Weich- und auch Hartholz in großer Brennkammer mit dem Volumen 105 l
- Wirkungsgrad 84-86%
- Möglichkeit, mit großen Holzstücken zu beschicken, maximale Länge der Holzscheite 1 m

Eine Abschätzung der Energiemenge vom Biomassekessel zum System zeigt die folgende Abbildung.

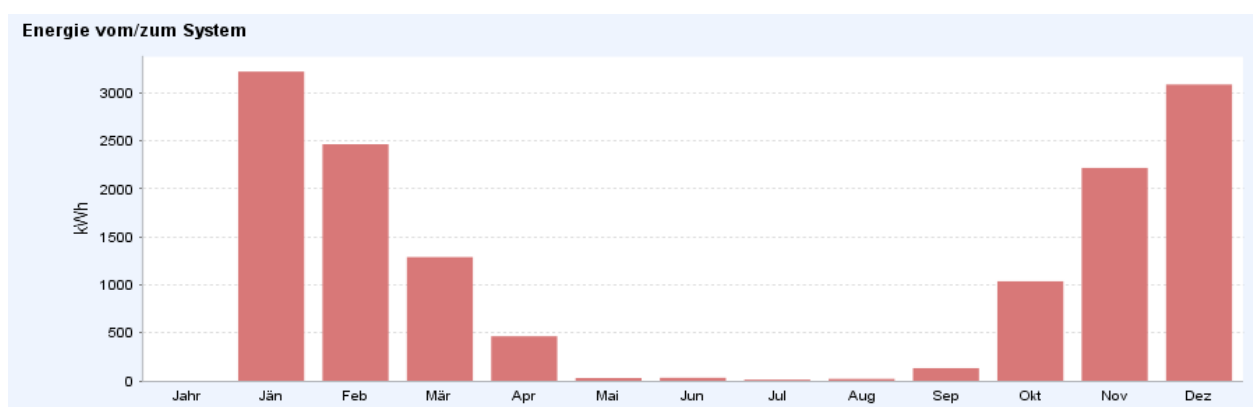


Abbildung 88: Energie vom Biomassekessel zum System – Simulation mit PolySun

7.2.3 Warmwasserspeicher

Eine zweite wichtige Komponente für ein effizientes System ist die Wahl des passenden Wärmespeichers, welcher hauptsächlich über die Nutzeranforderungen und die klimatischen Bedingungen des jeweiligen Standortes definiert wird. Bereits in der Planungsphase müssen bei der Dimensionierung des Speichers Schlechtwetterperioden mit keiner oder sehr niedriger Solarstrahlung berücksichtigt werden.

Für das System wurde daher ein Hygiene-Kombispeicher mit einer Kapazität von 1500 l ausgewählt (siehe Abbildung 87). Da jedoch das Icebook im Gegensatz zu den anderen Endgeräten für den Betrieb eine kontinuierliche Versorgung mit Warmwasser von 80 °C benötigt, wurde für dieses ein separater Speicher (in weiterer Folge „Hochtemperaturspeicher“ genannt) mit einer Kapazität von 200 l eingeplant, um die benötigte Energie für die Speicherladung durch das Backup-System in Zeiten zu geringer Solarstrahlung möglichst niedrig zu halten.



Abbildung 89: Hygiene-Kombispeicher (1500 l) und Speicher (200 l) im Prototypengebäude in Böheimkirchen

7.3 Die Haushaltsanwendungen im Layout

Die integrierten thermischen Energieverbraucher, welche über das Warmwassersystem betrieben werden, sind abgesehen vom Icebook ein Geschirrspüler, eine Waschmaschine, ein Haartrockner und ein Wäschetrockner. Weiters wurden eine Dusche, ein Waschbecken und ein Spülbecken am System angeschlossen.

Um ein Maximum der im Haushalt benötigten Energie mit thermischer Energie zu betreiben, verfügen alle diese Geräte über einen Warmwasseranschluss. Energieverluste durch Umwandlung werden dadurch minimiert. Der thermische Haartrockner und der Wäschetrockner wurden von GrAT entwickelt bzw. adaptiert, die Waschmaschine und der Geschirrspüler mit Warmwasseranschluss gehören zu den mit dem „Green Brands Award“ ausgezeichneten Produkten der Firma Elektribregenz.

7.3.1 Geschirrspüler

Geschirrspüler im Haushalt werden ebenso wie Waschmaschinen üblicherweise mit elektrischer Energie betrieben, die für das Erwärmen des Wassers und für Motoren, Pumpen usw. genutzt wird. In der Prototyp-Anlage in Böheimkirchen wurde hingegen ein Gerät mit Warmwasseranschluss installiert. Die Wasserzugabe erfolgt direkt über den Anschluss an das Leitungssystem. Entsprechend dem verwendeten Modell (Energieeffizienzklasse A+++) von BEKO, einer ebenfalls zu Arçelik gehörenden Marke wie Elektribregenz, wurde das Leitungssystem für den Anschluss des Geschirrspülers mit folgenden Spezifikationen ausgestattet:

- Kaltwasser: bis 30 °C, Verschraubung $\frac{3}{4}$ “, Fließdruck 3 bar (1-10 bar), Volumenstrom 10 l/min
- Warmwasser: bis 60 °C, Verschraubung $\frac{3}{4}$ “, Fließdruck 3 bar (1-10 bar), Volumenstrom 10 l/min. Thermostat-Mischventil im Trinkwasserkreis
- Ablauf: Flexibler Ablaufschlauch (bis 20 l/min)



Abbildung 90: Geschirrspüler mit Warmwasseranschluss im Küchenbereich

7.3.2 Waschmaschine

Entsprechend dem installierten Geschirrspüler in 7.3.1 wurde ebenfalls eine Waschmaschine mit Warmwasseranschluss der Firma Elektra Bregenz an das Prototypen-System angeschlossen.

Das Leitungssystem vor Ort wurde für den Betrieb des Modells WAF 816630 A (Energieeffizienzklasse A+++) mit nachfolgenden Spezifikationen ausgestattet:

- Kaltwasser: bis 30°C, Verschraubung $\frac{3}{4}$ ", Fließdruck 3 bar (1-10 bar), Volumenstrom 10 l/min
- Warmwasser: bis 60°C, Verschraubung $\frac{3}{4}$ ", Fließdruck 3 bar (1-10 bar), Volumenstrom 10 l/min. Thermostat-Mischventil im Trinkwasserkreis
- Ablauf: Flexibler Ablaufschlauch (bis 25 l/min)



Abbildung 91: Links: Badbereich mit elektrischem Trockner, Waschmaschine, thermischem Trockner (v.l.o.); rechts: Anschlussleitungen mit Mengenzähler

7.3.3 Thermischer Wäschetrockner

Um die Umwandlung elektrischer in thermische Energie zu vermeiden, wurde von GrAT ein konventioneller Standard-Wäschetrockner für eine thermische Betriebsweise adaptiert. Auf diese Weise kann ebenfalls Energie aus Solarstrahlung und Biomasse für den Trocknungsvorgang verwendet werden.

Der Trockner ist mit folgenden Spezifikationen in das Gesamtsystem eingebunden:

- Vorlauf vom Hochtemperaturspeicher, $\frac{1}{2}$ " Durchmesser auf der Rückseite (entsprechend der Verrohrung am Gerät – Cu, DN18) , bis zu 3 bar Wasserdruck
- Rücklauf zum Hochtemperaturspeicher, $\frac{1}{2}$ " Durchmesser (entsprechend der Verrohrung am Gerät – Cu, DN18), bis zu 3 bar Wasserdruck
- Durchfluss-Regelventil am Abfluss
- Elektrische Energie (230 V)
- Elektrisches Back-up (2 kW)
- Hauptmotoren und Gebläse (400 W)
- Elektrischer Schalter für „Wärmeanforderungssignal“
- Mechanischer Hauptschalter, um das Gerät vom Strom zu nehmen
- Luftfilter zur Reinigung der Luft vor Eintritt in den Luft-Wärmetauscher
- Feuchtigkeitssensor

Der Wärmetauscher im thermischen Wäschetrockner wurde so ausgewählt, dass ein Temperaturunterschied von mindestens 10 K zwischen Input und Output bei einer Durchflussmenge von $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht wird. Das entspricht einer Wärmetauscherleistung von etwa 3 kW. Die Wasserdurchflussmenge wird durch ein Regelventil auf der Rückseite gesteuert.

Öffnen und Schließen des Warmwasserkreislaufs erfolgt über das Gerät mittels eines elektrischen Ventils.

Wenn der Nutzer ein Programm auswählt, wird der Trockner über den Wärmetauscher auf die gewünschte Betriebstemperatur erhitzt. Sobald die Temperatur erreicht ist, wird das Ventil des Heizkreislaufes geschlossen und das Wärmeanforderungssignal abgeschaltet. Der Trockenvorgang wird fortgesetzt, bis der Feuchtigkeitssensor die eingestellte niedrige Feuchtigkeit signalisiert.

Der Kondensationsvorgang erfolgt über einen Luft-Wärmetauscher, welcher Kühltemperaturen von etwa 20 °C bereitstellt. Die Luft gelangt in den Wärmetauscher und wird über einen separaten Luftstrom ohne Feuchteanreicherung gewärmt.



Abbildung 92: Auf der Rückseite des thermischen Wäschetrockners ist der Wärmetauscher sichtbar

7.3.4 Thermischer Haartrockner

Ergänzend zu den großen thermischen Verbrauchern im Haushalt wurde von GrAT ein thermischer Haartrockner konstruiert, der mit nachfolgenden Spezifikationen in das Gesamtsystem eingebunden wurde:

- Vorlauf (80 °C) vom Hochtemperaturspeicher (200 l), ½" Durchmesser auf der Rückseite, bis zu 3 bar Wasserdruck
- Rücklauf (70 °C) zum Hochtemperaturspeicher (200 l), ½" Durchmesser, bis zu 3 bar Wasserdruck
- Durchfluss-Regelventil am Abfluss
- Elektroanschluss für das Gebläse (100 W)
- Luftfilter (Klasse G3) zur Reinigung der Luft vor Eintritt ins Gerät

Im thermischen Haartrockner sorgt ein Wärmetauscher mit Temperaturunterschied von 10 K (3 kW) zwischen Vorlauf und Rücklauf für den Transport der Wärmeenergie vom Speicher zum Verbraucher. Die Wasserdurchflussmenge ist auf 0,2 m³/h eingestellt. Wenn der Nutzer den Haartrockner einschaltet, öffnet sich ein elektrisches Ventil und startet die Zirkulation des Warmwassers im

Wärmetauscher für den Betrieb des Haartrockners. Optional könnte ein Sensor installiert werden, der Personen unter dem Haartrockner wahrnimmt und das Gerät automatisch ein-/ausschaltet. Mit einer höheren Warmwassertemperatur im Vorlauf steigt auch die Leistung des Geräts, aber eine Temperatur von 40 °C ist ausreichend.



Abbildung 93: Thermischer Haartrockner, konstruiert von GrAT; rechts: Zu- und Ableitungen

7.3.5 Anschluss elektrisch betriebener Geräte für Vergleichsmessungen

Um den Energieverbrauch der thermisch betriebenen Endgeräte mit konventionellen im Handel erhältlichen Produkten zu vergleichen, wurden für eine direkte Gegenüberstellung nachfolgende energieeffiziente und mit dem Green Brand Award ausgezeichnete Modelle der Firma Elektrabregenz im Prototypengebäude installiert.

Im Küchenbereich sind dies der KTS 1132 Kühlschrank mit 130 Liter Nutzinhalt, einem Geräuschpegel von 35 dB und einer Einteilung in die Energieeffizienzklasse A++ sowie der FST 5533 Tisch-Gefrierkühlschrank mit einem Bruttonutzinhalt von 102 Litern, einem Geräuschpegel von 36 dB und ebenfalls einer Einteilung in die Energieeffizienzklasse A++.



Abbildung 94: Gegenüberstellung thermischer und energieeffizienter elektrisch betriebener Endgeräte

Im Badbereich wurde der Wärmepumpentrockner TKF 8362 mit einer maximalen Kapazität von 8 kg, einem Geräuschpegel von 66 dB und einer Energieeffizienzklasse A-60% installiert (siehe auch Abbildung 89).

7.4 Zero CO₂ Cooler

Ergänzend zu den bereits beschriebenen Endgeräten sollten entsprechend dem Projektantrag die entwickelten Funktionsmodelle der Firma Solarfrost in das errichtete Gesamtsystem, ein System mit solarer Energieversorgung, eingebunden werden, um zum einen die Wirkungsweise und Effizienz des entwickelten Kühlgerätes und zum anderen die Funktionalität des vollständigen System in der Praxis zu testen.

Aufgrund der Einteilung der bereits beschriebenen Endgeräte in die Bereiche Küche und Bad sollte der Zero CO₂ Cooler entsprechend seinem Nutzungszweck wie der Geschirrspüler im Bereich der Küche in das in Böheimkirchen errichtete Gesamtsystem integriert werden.

7.4.1 Anschluss des Zero CO₂ Coolers

Anschluss Systemseite

Da zu Beginn der Errichtung des Gesamtsystems die genauen Anschlussbedingungen für den Zero CO₂ Cooler noch nicht definiert waren, wurde die Systemseite für den Anschluss mit nachfolgenden Parametern vorbereitet.

Anschluss an „Energiekreis“:

- Vorlauf (80 °C) vom Hochtemperaturspeicher (200 l), ¾" Durchmesser
- Rücklauf zum Hochtemperaturspeicher (200 l), ¾" Durchmesser

Anschluss für Rückkühlung:

- über Kaltwasser: ¾" Durchmesser
- Rücklauf des Kaltwassers, ¾" Durchmesser

Ergänzend dazu wurde zur Sicherheit ein Abfluss für das Kondenswasser errichtet (nicht zwingend erforderlich) sowie ein Elektroanschluss mit 230 V (Sicherung nach Bedarf, Schuko-Stecker) für z. B. den Anschluss der Beleuchtung angelegt.

Anschluss Cooler-Seite

Im Laufe des Projektes zeigte sich jedoch, dass aufgrund des erforderlichen Wasserdrucks für den Betrieb des Icebooks ein deutlich geringer Volumenstrom erforderlich sein wird als ursprünglich angenommen, weshalb die Anschlüsse der Systemseite mit einem Durchmesser von ¾" mittels zusätzlichen Reduzierungsstücks auf ½" verringert wurden.

Weiters ergab sich durch die Modularisierung der Icebook-Komponenten eine Positionsänderung für die Ein- und Ausgänge des Kaltwasserkreislaufes am Icebook. Bei dem optimierten Funktionstyp liegen diese nun auf gegenüberliegenden Seiten, was eine Verlängerung der Zu- und Ableitungen für den Systemanschluss erforderte.



Abbildung 95: Links: Schichtweise Montage der einzelnen Module; rechts: Position der Anschlussleitungen

Vorbereitungsmaßnahmen für den Anschluss des ZCC in Böheimkirchen

Ergänzend zur Auslegung und Installation des Systems wurde die technische Ausstattung für die Inbetriebnahme des Zero CO₂ Coolers vorbereitet. Diese beinhaltet z. B. die Einrichtung von zusätzlichen Zu- und Ableitungen (Wasseranschluss von ca. 5 bar), damit im System des Coolers mittels Unterdruck durch ein Venturirohr ein notwendiges Vakuum erzeugt werden kann.

Des Weiteren ist auch eine Pumpe für die Einrichtung der Druckpolster (siehe Kapitel 5.2) bei der Montage notwendig.

7.4.2 Inbetriebnahme und Test

In den nachfolgenden Abbildungen ist die Aufstellung sowohl des optimierten Icebooks als auch des entwickelten Kühltisch-Prototyps (siehe Kapitel 6) für den Anschluss am dafür vorgesehenen Platz im Küchenbereich des errichteten Gesamtsystem zu sehen (siehe Abbildung 94 und Abbildung 95). Da es sich bei diesem Funktionstyp jedoch noch nicht um eine endgültige Version des Icebooks handelt, wurde von einer dauerhaften Befestigung am Standort abgesehen und stattdessen ein Kran für eine temporäre Aufstellung verwendet. Der Einbau des Icebooks in eine an das Design des Zero CO₂ Cooler angepasste Technikbox ist möglich, zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht zweckmäßig, da für einen sicheren und effizienten Betrieb des Icebooks weitere Optimierungsmaßnahmen erforderlich sind.



Abbildung 96: Montage des Icebook-Prototyps am Standort des Gesamtsystems in Böheimkirchen



Abbildung 97: Aufstellung des Kühltank-Prototyps am Standort in Böheimkirchen

Ebenfalls aus Sicherheitsgründen konnte der Zero CO₂ Cooler bzw. das Icebook nicht im vollständig vorbereiteten Gesamtsystem getestet werden. Aufgrund der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Herstellungsproblematik der vollflächig verschweißten Platten und der damit verbundenen temporären Nutzung der Klingsil-Platten für die optimierten Prototypen des Icebooks kann keine absolute Sicherheit für eine 100%ige Dichtheit des Ammoniakkreislaufes im Icebook gegeben werden. Infolgedessen wäre ein Betrieb mit Ammoniak als Kältemittel außerhalb des SolarFrost-Labors zu diesem Zeitpunkt nicht zulässig.

Die Aufstellung und der Anschluss dienten in diesem Fall ausschließlich zur Demonstration der Betriebsbereitschaft des vorbereiteten Gesamtsystems für eine Einbindung der Komponenten des Zero CO₂ Coolers (siehe nachfolgende Abbildung 96).



Abbildung 98: Küchenbereich mit thermisch und elektrisch betriebenen Endgeräten inklusive Zero CO₂ Cooler (ganz links)

Die Funktionalität des Prototypensystems und dessen innovatives Steuer-, Regelungs- und Kontrollkonzept werden in den nachfolgenden Kapiteln durch den Betrieb der anderen installierten Endgeräte und der damit verbundenen Datenaufzeichnung der Energieströme, von der Erzeugung über die Speicherung bis zum Verbrauch, dargestellt.

7.5 Steuer-, Regelungs- und Kontrollsystem

Solarenergie ist die Hauptenergiequelle für die Anlage; die Regelung des Solarkreislaufs und des Verbraucherkreislaufs wird von Sensoren übernommen, die an verschiedenen Stellen des Systems installiert sind (siehe Abbildung 97 und Tabelle 19). Im Nachfolgenden erfolgt eine detaillierte Beschreibung für die einzelnen Teilbereiche: Solaranlage, „Hochtemperatur“-Verbraucherkreis, Heizkreis Wandheizung/Fußbodenheizung und Biomassekessel.

In Abbildung 97 ist ersichtlich, dass es drei Sensoren an den Kollektoren gibt (S1, S2, S3). S1 misst die Solarstrahlung, S2 die Außentemperatur und S3 die Wassertemperatur in den Kollektoren.

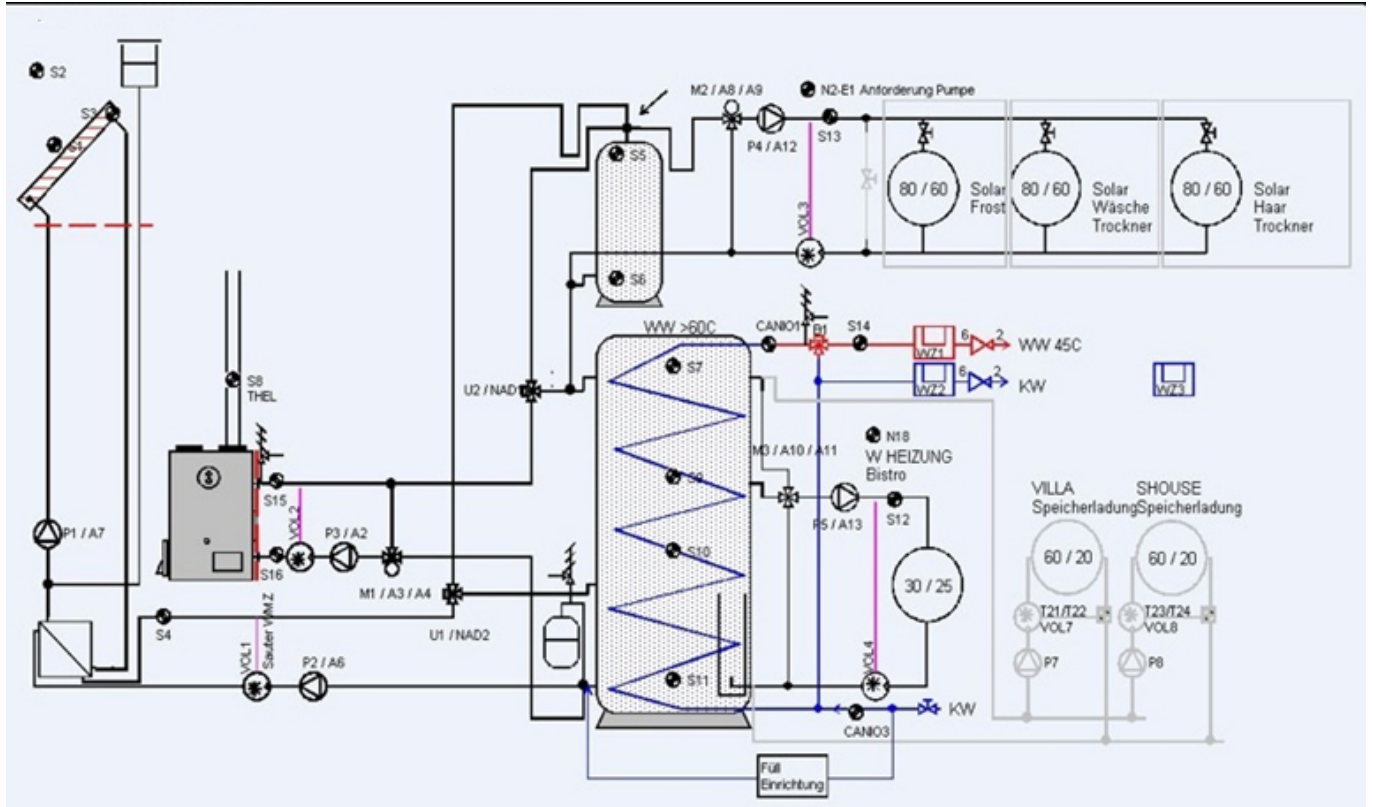


Abbildung 99: Ausgeführtes Hydrauliksystem (Quelle: Lopaur, 2013)

Solaranlage

- Die Pumpen (P1) und (P3) werden gemeinsam über einen PID-Regler drehzahl geregelt. Bei entsprechender Sonneneinstrahlung (S1) oder Kollektortemperatur (S3) > untere Puffertemperatur (S11) laufen die Pumpen (P1) und (P3) an.
- Sollte die Einstrahlung (S1) > 500 W/m² betragen, so erfolgt die PID-Regelung der Vorlauftemperatur (S4) auf 80°C und der „Hochtemperaturspeicher“ wird geladen.
- Bei Einstrahlung < 500 W/m² werden die Pumpen (P2) und (P1) auf voller Drehzahl betrieben; Ladung via Umschaltventil (U1) des Pufferspeichers mit der sich ergebenden Temperatur (maximale Effizienz). Dabei erwärmt sich der Bereich über dem unteren Pufferspeicheranschluss gleichmäßig bis auf maximal 90 °C. Danach greift die Notkühlung. Sollte sich trotzdem Dampf im Kollektor befinden, so greift eine Sicherheitssperre, bis sich der Dampf in der Nacht wieder abgebaut hat.

„Hochtemperatur“-Verbraucherkreis

- Die Solltemperatur (T13) wird via Fixpunktregelung auf 80 °C festgelegt. Eine 3-Punkt-Regelung via Mischer (M2) hält die Temperatur konstant.
- Die Pumpe bzw. der ganze Heizkreis läuft nur auf Anforderung von einem der Geräte via (N2-E1) Signalleitungen (potenzialfreier Kontakt). Sollte die Bedarfsanforderung durch die Geräte nicht möglich sein, so müsste die Pumpe (P4) ständig laufen.

Biomassekessel

Art: Manuelle Inbetriebnahme, Leistung ist schwankend.

- Wenn das Rauchgasthermometer (S8) über 100 °C steigt, schaltet die geregelte Ladepumpe (P3) auf minimaler Leistung ein. Regelung der Rücklauftemperatur (S16) auf z.B.: 50 °C via Mischer (M1) mit 3-Punkt-Regelung.
- Die Regelung der Vorlauftemperatur erfolgt via PID-Drehzahl-Regelung der Pumpe (P3) auf 80 °C oder 60 °C, je nachdem, ob der Hochtemperaturspeicher (S6) schon geladen ist oder nicht. Primäre Ladung des Hochtemperaturspeichers bis 80 °C, danach Ladung des Pufferspeichers auf 60 °C via Umschaltventil (U2).
- Endprogramm: Bei einer Rauchgastemperatur unter 100 °C: Pumpennachlauf für eine definierte Zeit, Öffnen des Mischers, um den Kessel nach dem Betrieb mit kühlem Wasser aus dem Pufferspeicher schnell abzukühlen (Nutzung der Restwärme).

Tabelle 19: Bezeichnung der Sensoren im hydraulischen System

Sensornummer	Messparameter
S1	Solarstrahlung
S2	Außentemperatur
S3	Wassertemperatur in den Kollektoren (Solar-Primär-Vorlauf)
S4	Solar-Sekundär-Vorlauf
S5	Temperatur der oberen Schicht im kleinen Speicher (200 Liter)
S6	Temperatur der unteren Schicht im kleinen Speicher
S7,S9,S10,S11	Temperatur verschiedener Schichten im 1500-Liter-Speicher
S8	Abgastemperatur des Biomassekessels
S12	Vorlauftemperatur der Wandheizungselemente
S13	Vorlauftemperatur Hochtemperatur-Kreis
S14	Warmwassertemperatur GS/WM
S15-S16	Vorlauf-/Rücklauftemperatur des Biomassekessels
Vol1	Volumenstrom und Temperatur Solar-Sekundär-Kreis
Vol2	Volumenstrom des Wassers von/zu Biomassekessel
Vol3	Volumenstrom des Wassers Hochtemperatur-Kreis
Vol3	Volumenstrom Wandheizung
P1	Pumpe in Solarkreis
P2	Pumpe in Speicherkreis
P3	Pumpe für Biomassekreis
P4	Pumpe für Wandheizung
P5	Pumpe für Hochtemperatur-Kreis
U1	Umschaltventil Speicherkreis
U2	Umschaltventil Biomassekreis
M1	Mischventil Biomassekreis
M2	Mischventil Hochtemperatur-Kreis
M3	Mischventil Wandheizung

7.6 Monitoringsystem

Parallel zur Planung des Gesamtsystems wurde außerdem ein Monitoringsystem zur Messung und Speicherung der relevanten Parameter der Anlage entwickelt. Mit dem Monitoringsystem ist es daher

möglich, sämtliche Energieströme und Betriebsdaten wie z. B. den Deckungsgrad von Solarenergie und Biomasse über einen definierten Zeitraum zu erfassen, aufzuzeichnen und zu analysieren.

Mit dem Programm Winsol können die vom Datenlogger aufgezeichneten Messwerte erfasst und ausgewertet werden. Auch die Kombination weiterer Anlagen bzw. das Verwalten von Messwerten mehrerer Datenlogger ist mit diesem Programm möglich.⁸ Eine Anzeige wie in Abbildung 98 dargestellt zeigt die Daten (Logfiles) im Tagesverlauf. Das Winsol-Programm in Böheimkirchen kann folgende Daten überwachen und speichern:

- Temperatur verschiedener Teile der Anlage, wie z. B. Vorlauf- und Rücklauftemperatur jedes Kreislaufs
- Status der Pumpen
- Temperatur verschiedener Schichten der Speicher
- Temperatur im Biomassekreislauf
- Außentemperatur
- Einstrahlungsmenge (Direkt- und Diffusstrahlung) auf den Kollektoren

Die gemessenen Daten können in Echtzeit im Diagramm angezeigt werden, sodass es möglich ist, den Temperaturverlauf und damit die Funktion und den Betrieb des Systems zu überprüfen.

Abbildung 98 zeigt beispielhaft, dass an einem sonnigen Tag in Böheimkirchen die Solarstrahlung 1158 W/m^2 erreicht, die Wassertemperatur in den Kollektoren beträgt zwischen 50 und 59 °C. Zwischen 11 und 17 Uhr ist die Strahlung abgesehen von einer kurzen Zeitspanne zwischen 14 und 15 Uhr am höchsten.

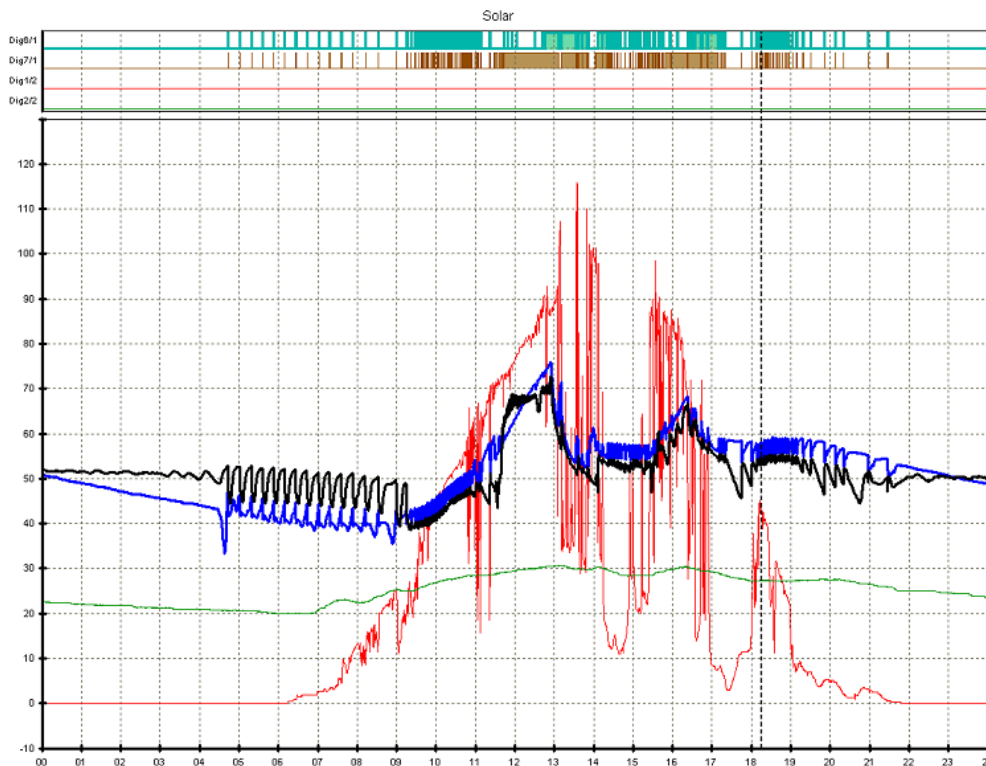


Abbildung 100: Beispielhaftes Messwertdiagramm von Winsol (Böheimkirchen,– Solarstrahlung (rot), Außentemperatur (grün), Wassertemperatur in den Kollektoren (blau), Vorlauf-Wassertemperatur im Sekundärkreis (schwarz); (X-Achse: Zeit [Stunden], Y-Achse: Temperatur [°C]).

⁸ Firma Technische Alternative: <http://ta.co.at/>

In der folgenden Abbildung 99 wird sichtbar, dass auch bei einer niedrigeren Außentemperatur von weniger als 15 °C die erforderliche Temperatur von 70 °C in der oberen Schicht im kleinen Speicher erreicht werden kann, um ausreichend Energie für den Betrieb des Icebooks bereitzustellen.

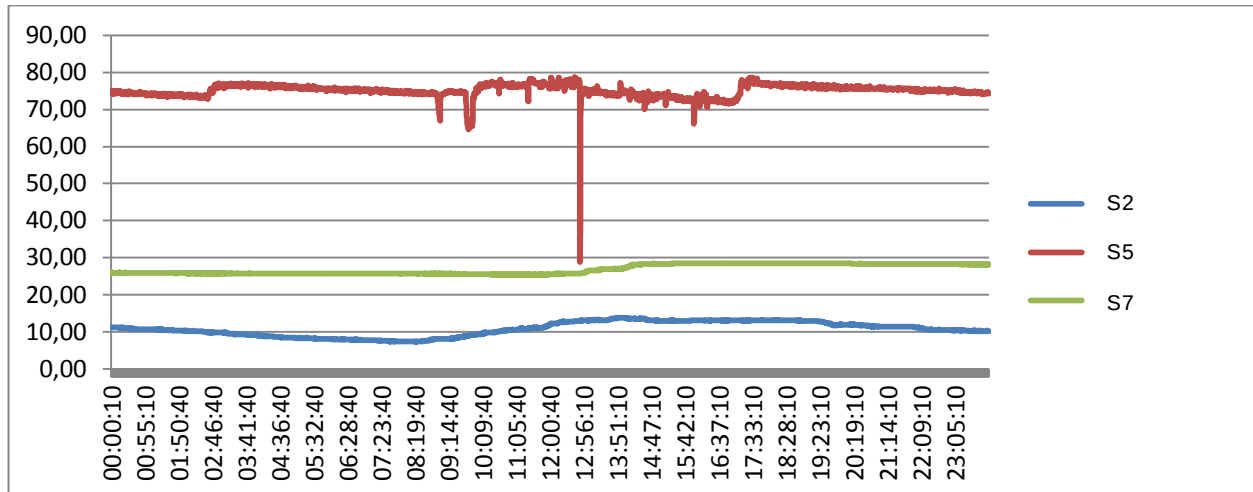


Abbildung 101: Daten aus Winsol im Laufe eines Tages mit Außentemperatur (blau – S2), Temperatur der oberen Schicht im kleinen Speicher (200 Liter) (rot – S5), Temperatur der oberen Schicht im großen Speicher (1500 Liter) (grün – S7); (X-Achse: Zeit [hh:mm:ss], Y-Achse: Temperatur [°C]).

Für eine bessere Analyse wird das Monitoring durch das Computerprogramm „Volkszähler“⁹ ergänzt. Dieses ist ein Open-Source-Programm, mit dem es möglich ist, die Messdaten der produzierten Solarenergie wie auch die der verbrauchten Energien zu speichern und grafisch darzustellen. Die Messparameter des Programms sind in Abbildung 100 sichtbar, darunter auch die Gesamtmenge an elektrischer Energie, die z. B. für den Betrieb der Pumpen und des Monitoringsystems benötigt wird. Für das gegenständliche Projekt wurde „Volkszähler“ so programmiert, dass es die folgenden Spezifikationen speichert und darstellt:

- Energieverbrauch im Gebäude
- Stromverbrauch des konventionellen elektrischen Kühl-/Gefrierschranks
- Strom- und Warmwasserverbrauch des thermischen Haartrockners
- Warmwasserverbrauch des Icebooks
- Stromverbrauch des Wärmepumpentrockners
- Strom- und Warmwasserverbrauch des solaren (thermischen) Trockners
- Strom- und Warmwasserverbrauch von Geschirrspüler und Waschmaschine

⁹<http://volkszaehler.org/>

Kanal hinzufügen ✕

Kanal abonnieren

öffentliche Kanäle

Kanal erstellen

Eigenschaft	Wert
Middleware:	../middleware.php
Typ:	Strommesser
Auflösung	Gruppe
Titel	Nutzer
Toleranz	Gebäude
Kosten	Fließgeschwindigkeit
Lokale Adresse	Wärmemengenzähler
Beschreibung	Spannungssensor
Öffentlich	Strommesser
Farbe	Stromsensor
Aktiv	Stromzaehler
Style	Gas
Hyperlink	Wasser
	Temperatur
	Luftdruck
	Luftfeuchtigkeit
	Windgeschwindigkeit
	Radioaktivität (Dosis)
	Lichtstärke
	Betriebsstundenzähler
	Ventil

Erstellen

Cookie: ☐

Abbildung 102: Mögliche Messparameter des Programms „Volkszähler“

Abbildung 101 und Abbildung 102 stellen beispielhaft Anzeigen für die Anlage im Prototypengebäude in Böheimkirchen dar, z. B. für die Menge an gewonnener Solarenergie.

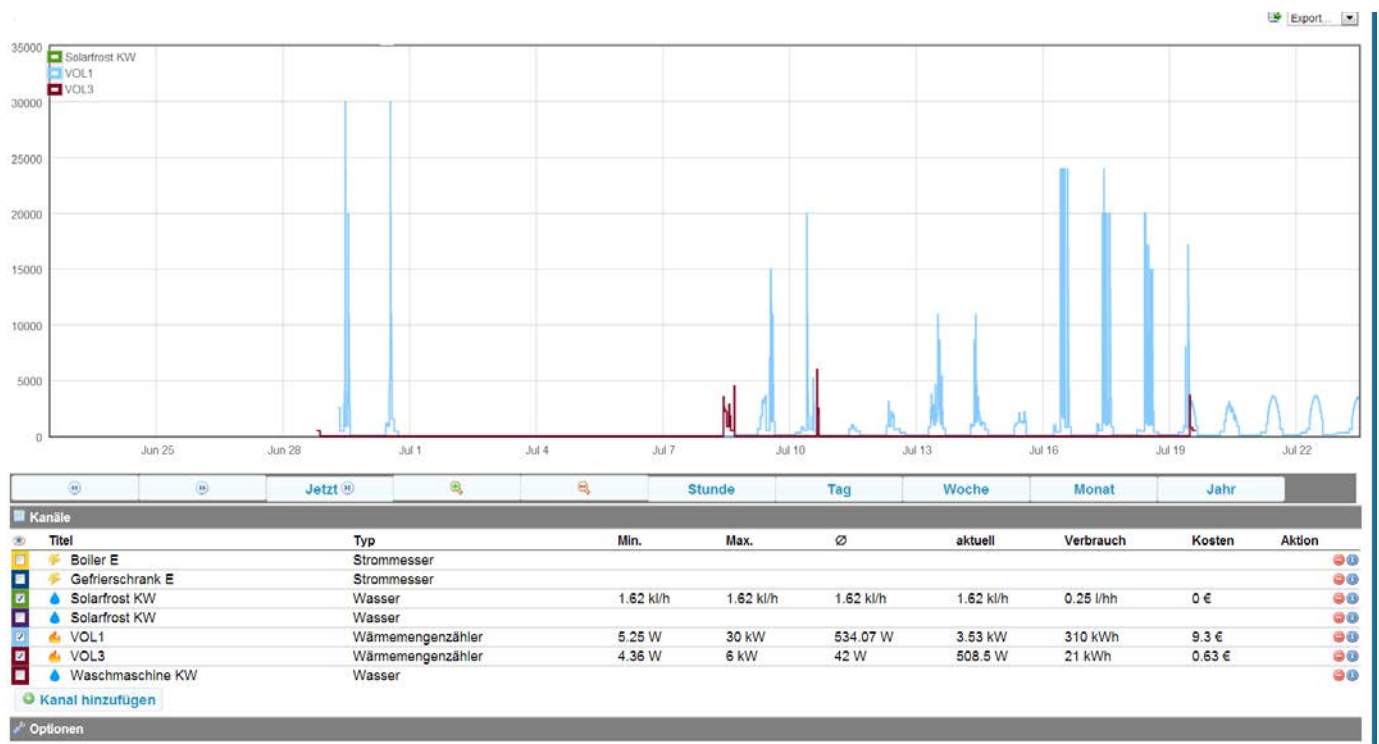


Abbildung 103: Menge an Solarenergie, die innerhalb von drei Wochen zum System übertragen wurde (X-Achse: Datum [Tage], Y-Achse: Leistung [Watt]). Insgesamt wurden 27 kWh an Solarenergie gewonnen.

In den zwei folgenden Abbildungen wird die Energiemenge sichtbar, die vom Wärmetauscher zu den Speichern übertragen wird. Der Sensor Vol1 misst dafür den Volumenstrom und den Temperatur-Solar-Sekundär-Kreis. Abbildung 102 zeigt die Energiemenge innerhalb eines Tages. Das Maximum wird hier zwischen 12 und 14 Uhr erreicht. Abbildung 103 zeigt die Verteilung über einen Monat. Die Energiemenge variiert hier je nach Solarstrahlung.

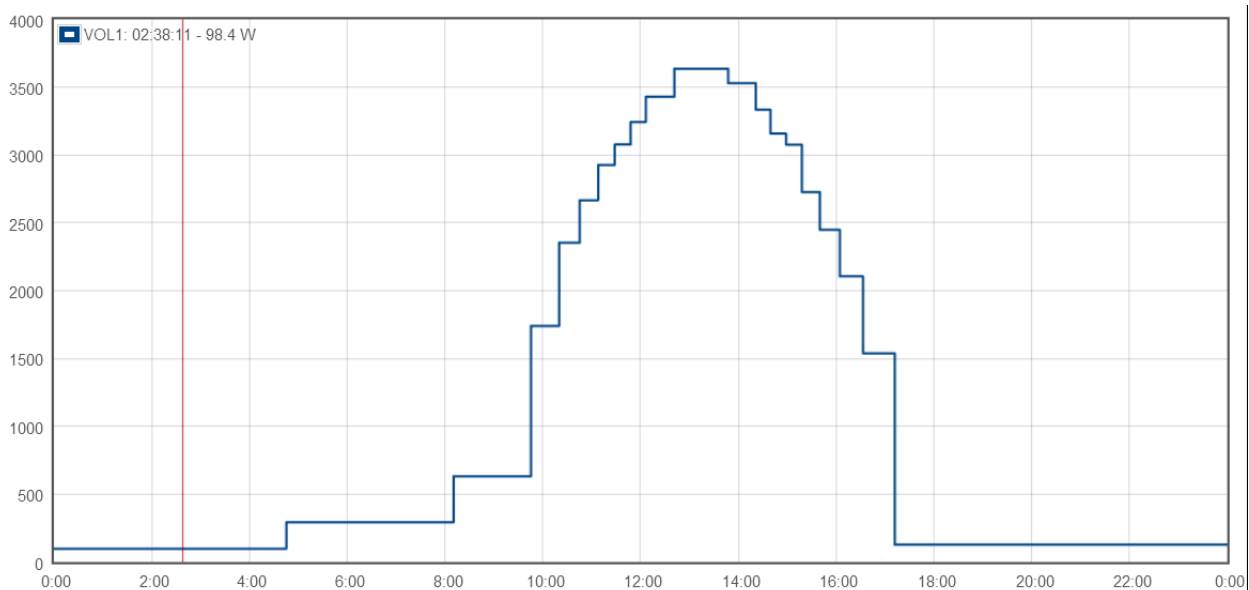


Abbildung 104: Menge an Solarenergie, die an einem Sommertag (X-Achse: Uhrzeit [Stunden]) von den Kollektoren über den Wärmetauscher zu den Speichern übertragen wurde (Y-Achse: Leistung [Watt]). Insgesamt wurden 27 kWh an Solarenergie gewonnen.

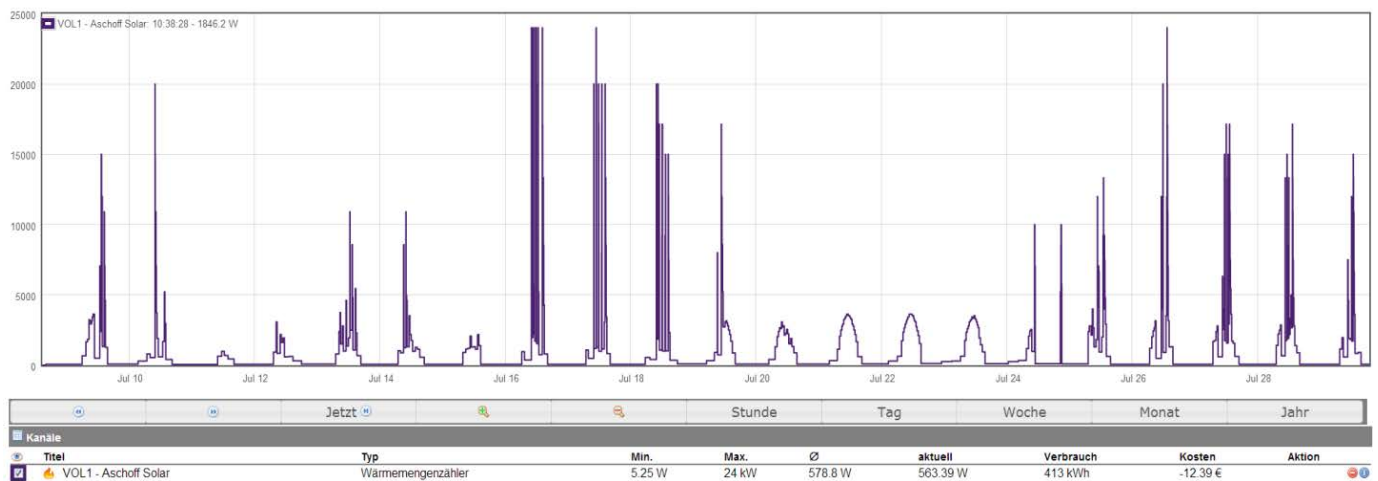


Abbildung 105: Solarenergie, die von den Kollektoren über den Wärmetauscher zu den Speichern transportiert wird (X-Achse: Datum [Tage], Y-Achse: Leistung [Watt]).

Die Diagramme zeigen aber auch, in Kombination mit der bereits beschriebenen Abbildung 99 bzgl. der Temperatur im 200l-Speicher, dass die benötigte thermische Energie für den Betrieb des Zero CO₂ Coolers mit dem installierten System bereitgestellt werden kann.

8 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Der Zero CO₂ Cooler ist ein Haushaltskühlschrank, der mit erneuerbaren Energieträgern thermisch betrieben werden kann und dementsprechend den Bedarf an elektrischer Energie in Wohngebäuden und den Verbrauch fossiler Energiequellen drastisch senken kann. Im Projekt wurde das Design dieses Kühlschranks entwickelt, das sich von dem konventioneller Geräte deutlich abhebt. Anstelle eines quaderförmigen Kühlschranks wurde eine zylindrische Form gewählt, die in Form von Modulen individuell erweiterbar ist und in Bezug auf Bedienbarkeit, Lebensmittellagerung und Energieeffizienz nahe an den Bedürfnissen der NutzerInnen entworfen wurde. Beispielsweise sorgt eine drehbare Ablagefläche im Inneren des Kühlschranks dafür, dass Lebensmittel leicht auch aus dem hinteren Bereich entnommen werden können, und eine transparente Schiebetür ermöglicht es, den Kühlschrank geschlossen zu halten, während Lebensmittel gesucht werden, und ihn nur so weit wie gerade notwendig zu öffnen. Damit werden Energieverluste minimiert, und der Platz im Inneren kann effizient genutzt werden. Äußerlich soll das neue Produkt vor allem experimentierfreudige, technologieaffine Zielgruppen ansprechen. Ein Prototyp dieses Designs wurde gebaut.

Ein Gesamtsystem, das thermisch betriebene Haushaltsgeräte und den Zero CO₂ Cooler integriert, wurde in Böheimkirchen geplant, vorhandene Geräte wurden gemeinsam installiert. Messungen ergaben, dass am Standort Böheimkirchen (Niederösterreich) eine Unterstützung der Energieversorgung mittels Biomasse aufgrund möglicher Perioden mit nicht ausreichender Sonnenstrahlung zu empfehlen ist, um das Gesamtsystem inklusive Zero CO₂ Cooler zu betreiben.

Als Kühltechnologie im Zero CO₂ Cooler sollte die von Projektpartner SolarFrost entwickelte Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschine Icebook zur Anwendung kommen.

Obwohl es gelungen ist, in der Projektlaufzeit eine Anzahl von Bestandteilen zu optimieren bzw. sogar einige der Teilkomponenten erfolgreich durch alternative Technologien zu ersetzen und daher die im Projekt konstruierten Varianten des Icebooks, im Vergleich zum Ausgangsmodell bei Projektbeginn, deutlich optimiert werden konnten, besteht für eine Einführung des Produktes auf dem Markt noch weiterer Entwicklungsbedarf.

Dieses liegt unter anderem an der Dichtigkeit der Materialien in Zusammenhang mit der Verwendung von Ammoniak bzw. der für die Herstellung der Komponenten des Icebooks erforderlichen Verarbeitungsmöglichkeiten.

Mit einer zeitnahen Markteinführung des Zero CO₂ Cooler in dieser Form kann, entsprechend dem aktuellen Entwicklungsstand der Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschine, daher nicht gerechnet werden, da der Optimierungsbedarf dieser Technologie doch um einiges größer ist als zu Projektbeginn angenommen wurde.

Für eine zeitnahe Realisierung des übergeordneten Zieles dieses Projektes, der Errichtung eines Gesamtsystems inklusive solarem Kühlen, sollten daher alternative Kühltechnologien in Erwägung gezogen werden, die sich in das vorbereitete und in Kapitel 7 beschriebene System integrieren lassen (siehe auch nachfolgendes Kapitel 9).

9 Ausblick und Empfehlungen

Eine mögliche Alternative als Ersatz für die Icebook-Technologie wäre zum Beispiel die Adaptierung eines bereits existierenden gasbetriebenen Kühlschranks. Für dessen Einbindung in das Gesamtsystem zwar ebenfalls Modifikationen notwendig sind, da diese Geräte eine höhere Betriebstemperatur erfordern als die Icebook-Technologie, welche aber im Vergleich zum derzeitigen Entwicklungsstand der Icebook-Technologie mit geringem Aufwand umgesetzt werden könnten.

Während das Icebook über Warmwasser im Niedertemperaturbereich betrieben werden kann, ist für diese Gaskühlschränke ein höheres Temperaturniveau erforderlich, daher werden sie üblicherweise über flüssiges Propangas (LPG-Liquefied Petroleum Gas) versorgt. Diese Energie kann alternativ aber auch mit Hilfe eines Wärmetauschers über ein flüssiges Wärmeträgermedium wie z.B. Thermoöl, welches teilweise bereits für den Betrieb von Geräten in Großbäckereien in Österreich eingesetzt wird, bereitgestellt werden. Der Vorteil dabei ist die vorhandene Erfahrung mit der Technologie.

Mittels Stein-Öl-Speicher und z.B. einem Parabolrinnenkollektor oder ergänzenden Spiegeln für eine höhere Konzentration der solaren Einstrahlung ist sogar das Erreichen des höheren Temperaturlevels über einen thermosiphonen Betrieb möglich (Schwarzer, C.). Auch die Kombination mit einem Solarkocher zu einer indirekt betriebenen Kochstelle ist möglich wie die von der GrAT entwickelte mobile Solarkochstelle (siehe nachfolgende Abbildung 104).



Abbildung 106: Mobiler indirekt betriebener Solarkocher/-cooler (GrAT)

Diese mobile solarbetriebene Variante kann entsprechend den Anforderungen von österreichischen Haushalten für einen stationären Betrieb adaptiert und optimiert werden.

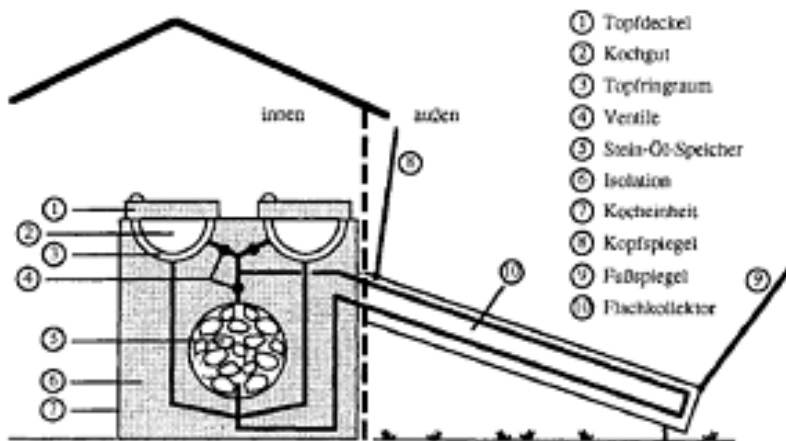


Abbildung 107: Technisches Konzept für stationäre indirekt betriebene Solarkochstelle (Schwarzer, C. –deutsches Patent: DE 41 42 119 A1)

Die Integration des ergänzenden Kreislaufes in das in diesem Projekt entwickelte Gesamtsystem mit Versorgungsmöglichkeit über das Biomasse-Back-up kann auf folgende Weise erfolgen (siehe nachfolgende Abbildung 106).

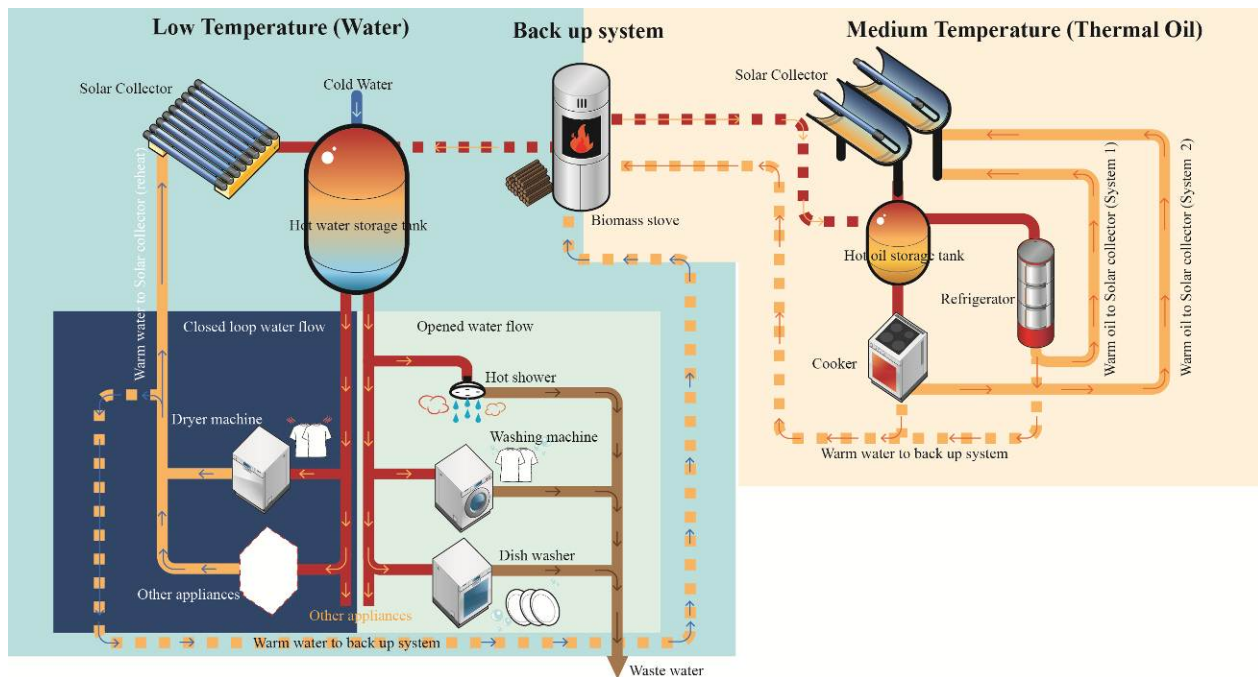


Abbildung 108: Gesamtsystem mit zusätzlichem Thermoölkreislauf

Eine Herausforderung dabei ist, die Anforderungen der österreichischen Haushalte bzgl. Nutzeranwendung zu erfüllen.

10 Literaturverzeichnis

- Biermayr, P., Eberl, M., Ehrig, R. et al. (2013). Innovative Energietechnologien in Österreich. Marktentwicklung 2012. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpen. Wien: BMVIT.
- Cole, D. (2011). Fukushima Fallout: Germany Abandons Nuclear Energy. smh.com.au: <http://www.smh.com.au/world/fukushima-fallout-germany-abandons-nuclear-energy-20110530-1fczb.html>. Abgerufen am 17. 08. 2011.
- e-connected. (o. J.). E-Mobilitätsmodellregionen wachsen weiter. <http://www.e-connected.at/content/e-mobilit%C3%A4tsmodellregionen-wachsen-weiter>, Abgerufen am 28. 06. 2013.
- EEA. (2008). Indicator: EN18 Electricity Consumption. http://themes.eea.europa.eu/Sectors_and_activities/energy/indicators/EN18%2C2008.11. Abgerufen am 22. 08. 2011.
- eurammon. (o. J.). Auf einen Blick. Datenblatt. www.eurammon.com. Abgerufen am 12. 09. 2011.
- eurammon. (2011). eurammon-Information Nr. 2 / überarbeitete Version. <http://www.eurammon.com/download/eurammon02dt.pdf>. Abgerufen am 28. 08. 2011.
- Europäisches Parlament. (2010). RICHTLINIE 2010/31/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden.
- IEA (2006). World Energy Outlook 2006: Fact Sheet – Global Energy Trends. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,3701,en.html>. Abgerufen am 12. 09. 2011.
- IEA. (2008). Energy Efficiency Indicators for Public Electricity Production from Fossil Fuels. http://www.iea.org/textbase/Papers/2008/cd_energy_efficiency_policy/7-Energy%20utilities/7-En_Efficiency_Indicators.pdf. Abgerufen am 12. 09. 2011.
- Index Mundi. (o. J.a). Energy: Electricity – production. <http://www.indexmundi.com/g/g.aspx?v=79&c=xx&l=en>. Abgerufen am 27. 06. 2013.
- Index Mundi. (o. J.b). Energy: Electricity – consumption. <http://www.indexmundi.com/g/g.aspx?v=81&c=xx&l=en>. Abgerufen am 27. 06. 2013.
- INTEGRAL Markt- und Meinungsforschungsges.m.b.H. (o. J.). Sinus-Milieus®. http://www.integral.co.at/de/sinus/milieus_at.php. Abgerufen am 18. 08. 2011.
- ISO. (o. J.). ISO 15502:2005. Household refrigerating appliances – Characteristics and test methods.
- Leuschner, U. ENERGIE-WISSEN. Vom Brennglas zur Solar-Dampfmaschine. <http://www.udo-leuschner.de/basiswissen/SB111-06.htm>.
- Medienforschung-ORF. (2007). Die Sinus-Milieus® im TELETEST. http://mediaresearch.orf.at/index2.htm?fernsehen/fernsehen_sinus.htm. Abgerufen am 05. 05. 2008.
- Modern Mechanix. (1935). Refrigerator Uses Solar Energy.
- Österreichischer Fertighausverband. (2013). Pressemappe-PK: 7 Mai 2013. <http://www.fertighaus.org/download/Pressemappe%20PK%2007.05.2013.pdf>. Abgerufen am 18. 06. 2013.
- Österreichisches Patent Nr. 511 228
- Österreichisches Patent Nr. 506.358

- REN21. (2011). Renewables Global Status Report 2011. <http://www.ren21.net/>. Abgerufen am 26. 08. 2011.
- Schrempf, B. & Sontheim, B. (2004). Planung und Betrieb von Ammoniak-Kälteanlagen. Leitfaden auf Basis aktueller Regelwerke, Stand Juni 2004.
- Schwarzer, C. – deutsches Patent: DE 41 42 119 A1 (1993). Offenlegungsschrift DE 4142119 A1, Solarkocher, Deutsches Patentamt, Bundesrepublik Deutschland, 1993
- SolarFrost. (2008). Basics: The Solarfrost Innovation. <http://www.solarfrost.com/PDF/icebook.pdf>. Abgerufen am 22. 08. 2011.
- SolarFrost. (o. J.). Icebook. <http://www.solarfrost.com/en/icebook.html>. Abgerufen am 18. 08. 2011.
- Statistik Austria. (2009). Verteilung des Jahresstromverbrauchs auf die Verbrauchskategorien 2008. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energieeinsatz_der_haushalte/035460.html. Abgerufen am 21. 08. 2011.
- Statistik Austria. (o. J.). Kraftfahrzeuge – Bestand. https://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html. Abgerufen am 20. 08. 2013.
- topprodukte.at. (2011). Das neue EU-Energieeffizienzlabel. <http://www.topprodukte.at/de/service.html#1>. Abgerufen am 29. 08. 2011.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2008). Energy Star, Refrigerators for Consumers. http://www.energystar.gov/index.cfm?fuseaction=find_a_product.showProductGroup&pgw_code=RF. Abgerufen am 21. 08. 2011.
- Wimmer, R. (2008). Strategieentwicklung für energieautarke Gebäude. Wien: BMVIT.
- Wimmer, R., & Kang, M.-J. (2009). Need-oriented Design for Energy Self-sufficient Households. International Association of Societies of Design Research 2009 Proceedings. Seoul, Korea.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Globale Produktion von Elektrizität von 2003 bis 2012 (Index Mundi, o. J.a)	7
Abbildung 2: Globaler Verbrauch von Elektrizität von 2003 bis 2012 (Index Mundi, o. J.b).....	7
Abbildung 3: Jahresstromverbrauch 2008 nach Verbrauchskategorien (Statistik Austria, 2009).....	9
Abbildung 4: Aufteilung des Stromverbrauchs nach Energieform	10
Abbildung 5: Anteil erneuerbarer Energieträger am globalen Gesamtenergieverbrauch (REN21, 2013)	12
Abbildung 6: Durchschnittliche jährliche Wachstumsraten der Kapazität erneuerbarer Energien und Biotreibstoffproduktion, 2007-2012 (REN21, 2013).....	12
Abbildung 7: Solardampfmaschine für die Erzeugung von Eis, EXPO Paris 1878 (Leuschner, U.) Eiserzeuger	13
Abbildung 8: Artikel über einen solaren Kühlschrank (Modern Mechanix, 1935).....	14
Abbildung 9: Energieeffizienzlabel (topprodukte.at, 2011)	16
Abbildung 10: Sinus-Milieus® in Österreich: soziale Lage und Grundorientierung (Sinus) und Zielgruppe des Zero CO ₂ Coolers (rot umrandet) (Sinus, bearbeitet).....	18
Abbildung 11: Statistische Daten zum Hausbau (Ein- und Zweifamilienhäuser) in Österreich.....	20
Abbildung 12: Temperaturniveaus für unterschiedliche Kühlschrankinhalte (Bildquellen: http://wallpapers.free-review.net/21__Meat_products.htm ; http://www.meatfeastcompany.com/productShowcase.aspx?pn=84 ; http://yeesinorfe07.blogspot.co.at/2012/09/when-to-eat-fruits.html ; http://www.qatartodayonline.com/qnfsp-downplays-the-impact-of-saudi-vegetables-export-ban/ ; http://www.chow.com/recipes/28645-rich-chocolate-ice-cream ; http://wellandgoodnyc.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2012/07/safe-bottled-drinking-water.jpg).....	22
Abbildung 13: Konzept der konventionellen Wasser-Ammoniak-Kältemaschine	31
Abbildung 14: Flussdiagramm des Icebook-Zyklus.....	42
Abbildung 15: Funktionsschema der Kältemaschine in der einfachsten Ausführungsform ohne Wärmerückgewinnung.....	43
Abbildung 16: Entwicklung der Form eines Absorbers in einer Formplatte.....	48
Abbildung 17: Absorber integriert in Formplatte als horizontale Aneinanderreihung von kleinen Behältern	48
Abbildung 18 Links: Formplatte für einen Generator mit vertikalem Lösungsfluss von oben nach unten. Lösungseintritt in der Mitte der Platte (durch die benachbarte Trennplatte) funktioniert gut, solange nicht zu viel Lösung eingespritzt wird; rechts: Formplatte für einen Generator mit horizontalem Lösungsfluss von links nach rechts. Die Lösung strömt im unteren Teil der Form und erhitzt sich dabei. Es entsteht Schaum, der nach oben abgeleitet wird, wobei sich aber Gas von der Lösung trennt.	50
Abbildung 19: Komplettes Gasventil zur Druckabsenkung im Generatoreingangsgefäß mit zylindrischem Schwimmer, dessen Nettogewicht von unten über eine Druckfeder eingestellt werden kann. Design und Konstruktion SolarFrost.	51
Abbildung 20: Flüssigkeitsventil mit Verschlussklappe und Schwimmer und seine Komponenten; Design und Konstruktion SolarFrost. Teil 3 wird in einen flachen Schwimmerkörper (nicht dargestellt) eingeschraubt. Zahlen geben Dimensionen in mm an.....	52
Abbildung 21: Gasventil für Schwimmer und seine Komponenten; Design und Konstruktion SolarFrost. Teil 2 wird in einen flachen Schwimmerkörper (Abbildung 22) eingeschraubt. Zahlen geben Dimensionen in mm an.....	52

Abbildung 22: Das gleiche Gasventil von Abbildung 21, in das Plattensystem einer Ventilbox eingebaut.....	53
Abbildung 23: Mikromembran	53
Abbildung 24: Eine einfache Druckabsenkerversion, die sich ziemlich gut bewährt hat. Die Zeichnung, ebenfalls aus dem Arbeitsprotokoll, zeigt die Veränderungen am ursprünglichen Formplattenkonzept. Hellgrüne Teile bleiben vom vorherigen Konzept erhalten, dunkelgrüne kommen neu hinzu.....	54
Abbildung 25: Typischer Aufbau eines klassischen SolarFrost-Icebooks: Die grauen sogenannten Trennplatten sind aus Stahl, die grünen sogenannten Formplatten aus dem Dichtmaterial Klingsil. Die Linien in verschiedenen Farben geben Flüsse von Wasser, Gas oder verschiedenen Lösungskonzentrationen an.	55
Abbildung 26: Darstellung des Prinzips der Doppelplatte in der oberen Reihe die Einzelplatten, in der unteren die sich daraus ergebenden Kombinationen.	57
Abbildung 27: Das Mikromodul des 200W-Icebooks ohne Behälter mit Doppelplatten, A1 und A2 ergeben gemeinsam eine doppelte Formplatte für Ammoniaklösung, und W1 und W2 geben gemeinsam eine doppelte Formplatte für die drei Wasserkreisläufe, die die Ammoniakplatte temperieren sollen.....	57
Abbildung 28: Links: Fertigung der Formplatte mit der Hand; rechts: Verkleben der Platten	60
Abbildung 29: Das 1kW-Icebook	62
Abbildung 30: Fehlstart des 1kW-Icebooks wegen mechanisch bedingter Undichtigkeiten	63
Abbildung 31: Das 500W-Icebook mit Behältern.....	65
Abbildung 32: Links: Fertigung der Außenhaut eines Schwimmerventils mit Drehventil; rechts: Details des Drehventils.....	65
Abbildung 33: Beobachtung der Schaumbildung im Betrieb eines Icebooks hinter einer Plexiglasscheibe	67
Abbildung 34: Links: Eisbildung am externen Spiralverdampfer; rechts: Eisbildung an der Zuleitung des Verdampfers	68
Abbildung 35: Thermometer außen am Icebook. Die obere Zahl zeigt die Temperatur am Verdampfer an, die untere die Raumtemperatur.....	68
Abbildung 36: Bildschirm des Computers mit den Temperaturaufzeichnungen des im Text beschriebenen Experiments	70
Abbildung 37: Temperaturen der Heiz und Rückkühlwasserkreisläufe sowie die Temperatur des externen Verdampfers. Die mittleren Temperaturen betrugen: $T_{\text{heiz ein}}=63,2^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{heiz aus}}=45,9^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{rück ein}}=18,7^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{rück aus}}=22,5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{kühl}}=-1,5^{\circ}\text{C}$, die Wasserflüsse waren für den Heizkreislauf $F1=4,5\text{ml/sec}$ und für den Rückkühlungskreislauf $F2=31,5\text{ml/sec}$. Die mittlere Zyklusdauer betrug 9,5min, entsprechend einer Kühlleistung von 177,8W. Daraus folgt ein COP von 0,55.	71
Abbildung 38: Temperaturen der Heiz und Rückkühlwasserkreisläufe sowie die Temperatur des externen Verdampfers. Die mittleren Temperaturen betrugen: $T_{\text{heiz ein}}=71,4^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{heiz aus}}=51,9^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{rück ein}}=15,4^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{rück aus}}=23,4^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{kühl}}=-2,7^{\circ}\text{C}$, die Wasserflüsse waren für den Heizkreislauf $F1=6\text{ml/sec}$ und für den Rückkühlungskreislauf $F2=24,6\text{ml/sec}$. Die mittlere Zyklusdauer betrug 6,3min, entsprechend einer Kühlleistung von 333W. Daraus folgt ein COP von 0,68.	72
Abbildung 39: Temperaturen der Heiz und Rückkühlwasserkreisläufe sowie die Temperatur des externen Verdampfers. Die mittleren Temperaturen betrugen: $T_{\text{heiz ein}}=80,6^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{heiz aus}}=56,9^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{rück ein}}=16,3^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{rück aus}}=24,6^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{kühl}}=-0,9^{\circ}\text{C}$, die Wasserflüsse waren für den Heizkreislauf $F1=5,8\text{ml/sec}$ und für den Rückkühlungskreislauf $F2=30,2\text{ml/sec}$. Die mittlere	

Zyklusdauer betrug 5,4min, entsprechend einer Kühlleistung von 472W. Daraus folgt ein COP von 0,83.	72
Abbildung 40: Zusammenschau der obigen drei COP-Ermittlungen im Vergleich zu dem, was aus dem mathematischen Simulationsmodell für diesen Kühlkreislauf zu erwarten ist. Die Unterschiede zwischen Theorie und Praxis lassen sich auf Wärmeverluste der Maschine zurückführen, die ja keinerlei Wärmedämmung hatte.....	73
Abbildung 41: Änderung der Kühltemperatur über die Konzentration: Die Kurve der Kühltemperatur zeigt Abschnitte mit relativ konstanter Kühltemperatur und die relativ schnellen Übergänge dazwischen je nach Einstellung der Konzentration. Die Kühltemperatur ist im Bereich zwischen 10°C und -20°C frei wählbar. Auf dieser Abbildung ist auch die Grenze des Möglichen gut zu erkennen. Am Ende des Versuchs (etwa beim Zeitpunkt 1,1) wurde versucht, eine Temperatur von -22°C einzustellen. Man erkennt an den Linie von T heiz aus (rosa) und T rück aus(mittelblau), dass sich die Zyklen der Maschine stark verlangsamten, dann geht T kühl plötzlich ganz schnell nach oben, was anzeigt, dass der Verdampfer offenbar kein flüssiges Ammoniak mehr bekommt.....	74
Abbildung 42: Das Vormodell der 500W-Maschine mit Acrylglasfenster in Verbindung mit dem Eudora-Kühlschrank.....	75
Abbildung 43: Links: Serpentinrohrwärmetauscher im Eudora-Kühlschrank; rechts: Der Serpentinrohrwärmetauscher des Verdampfers im Eudora-Kühlschrank war für Propangas als Kältemittel ausgelegt und funktionierte mit Ammoniak nur sehr schlecht. Die tiefste erreichbare Temperatur betrug 15 °C.	75
Abbildung 44: Links: Vormuster der von der GrAT entwickelten Kühlkammer; <i>rechts</i> : Der Verdampfer des Vormusters von unten gesehen. Die beiden schwarzen Kabel sind Sensoren zur Messung der Temperatur.....	75
Abbildung 45: Erster Test des Verdampfers im Vormuster der sich in Entwicklung befindlichen Kühlkammer	76
Abbildung 46: Die eingewickelte Kühlkammer beim zweiten Experiment.....	77
Abbildung 47: Ergebnisse der Verbindung des Vormusters der Kühlkammer mit der 500W-Kältemaschine	77
Abbildung 48: Die fertige Maschine ohne Acrylglasplatten.....	78
Abbildung 49: Die 200W-Maschine hatte sowohl mit Mikromembranen als auch mit Kanülen eine relativ instabile Kühltemperatur. Interessanterweise war das aber nicht die Folge eines instabilen Laufs der Zyklen, wie wir mit diesem Experiment nachweisen konnten: Die Heiztemperatur (T heiz ein) wurde sehr stark variiert, aber die Zyklen (rosa Linie) zeigten sich als erstaunlich stabil.	80
Abbildung 50: Die Kühltemperatur war kaum unter 0 °C zu bringen, da sich die Lösungskonzentration nicht verändern ließ, dafür war der allgemeine Betrieb der Maschine sehr stabil. Um dies zu überprüfen, wurde hier ein „Schockexperiment“ gemacht. Beim Heizwassereingang wurde plötzlich sehr kaltes Wasser eingeleitet. Die Maschine blieb zwar kurzzeitig stehen, nahm aber die volle Kühlleistung sofort wieder auf, sobald wieder heißes Wasser da war. .	83
Abbildung 51: Wichtigste Bauteile des Icebooks	86
Abbildung 52: Konzeptprototyp zur Erprobung neuer Kunststoffe für die Formplatten	88
Abbildung 53: Designprozess für Zero CO ₂ Cooler.....	89
Abbildung 54: Gliederung des Kühlschranks, um innerhalb eines Moduls möglichst geringe Temperaturunterschiede zu erreichen	90
Abbildung 55: Flexible Kapazität des Kühlschranks je nach Nutzeranforderungen	91
Abbildung 56: Design A.....	92
Abbildung 57: Design A - 1) Türangel 2) Türdichtung 3) Tür 4) Verdampfer 5) Innenwand 6) Ablagefläche	93

Abbildung 58: Design B.....	94
Abbildung 59: Design B - 1) Deckel 2) Deckelgriff 3) Kühlkammer 4) Schublade	94
Abbildung 60: Design C.....	95
Abbildung 61: Design C – Zulauf für Kältemittel; 2) drehbare Ablagefläche; 3) Sockel; 4) Verdampfer; 5) Türdichtung; 6) Türgriff.....	95
Abbildung 62: links: Zugriff wird durch größere Gegenstände im vorderen Bereich blockiert; rechts: Drehen ermöglicht Zugriff auf den hinteren Bereich	96
Abbildung 63: Nutzung der drehbaren Ablage – 1) der vordere Bereich wird genutzt; 2) neue Lebensmittel kommen in den vorderen Bereich und verdrängen ältere nach hinten; 3) neue Lebensmittel werden entnommen, ältere bleiben im hinteren Bereich; 4) durch Drehen der Ablage kommen ältere Lebensmittel in den vorderen Bereich	97
Abbildung 64: Luftzirkulation der verschiedenen Kühlausrichtungen in den Designvarianten A, B und C.....	98
Abbildung 65: Vergleich von verschiedenen Bauformen von Türen und benötigter freier Fläche.....	99
Abbildung 66: Vergleich der kritischen zu reinigenden Positionen bei runden und eckigen geometrischen Körpern	99
Abbildung 67: Vorentwurf des Designs.....	101
Abbildung 68: links: erhöhte Führungsschiene für die Schiebetür; rechts: eingefräste verschmutzte Führungsschiene	101
Abbildung 69: Position des Verdampfers und Entwässerungssystem.....	101
Abbildung 70: Nutzbarer Innenraum (weiße Fläche) bei eckiger Form (links) und runder Form (rechts).....	102
Abbildung 71: Maßstabsgetreue Modelle (1:5 und 1:1) aus verschiedenen Materialien	102
Abbildung 72: Design des Prototyps.....	103
Abbildung 73: Designdetails unterer Kühlbereich	104
Abbildung 74: Designdetails oberer Kühlbereich	104
Abbildung 75: Ablauf des Zusammenbaus	106
Abbildung 76: Vollständig montierter Prototyp	106
Abbildung 77: Aufbau neues Verdampferkonzept – untere (1), mittlere (2), obere (3) Verdampferplatte, Zufluss (4)	107
Abbildung 78: Verbindung der Verdampferplatten mit Kleber	108
Abbildung 79: Vergleich von doppelter Schweißlinie bei breiterer Schnittlinie (links) und einfacher Schweißlinie bei schmalerer Schweißlinie (rechts).....	108
Abbildung 80: Verdampfer-Prototyp aus Aluminium (3 Platten)	109
Abbildung 81: Lufttemperatur am Standort Böheimkirchen (Quelle: Meteonorm).....	111
Abbildung 82: Diffuse und direkte Solarstrahlung am Standort Böheimkirchen (Quelle: Meteonorm)	111
Abbildung 83: CAD-Profil des Gebäudes für das Prototypensystem (GrAT).....	112
Abbildung 84: Layout der thermischen Anwendungen	113
Abbildung 85: links: Solarkollektoren für das Prototypensystem auf der Südseite des Daches in Böheimkirchen; rechts: Aschoff-Vakuumröhre.....	114
Abbildung 86: Energie vom Biomassekessel zum System – Simulation mit PolySun	115
Abbildung 87: Hygiene-Kombispeicher (1500 l) und Speicher (200 l) im Prototypengebäude in Böheimkirchen	116
Abbildung 88: Geschirrspüler mit Warmwasseranschluss im Küchenbereich	117
Abbildung 89: Links: Badbereich mit elektrischem Trockner, Waschmaschine, thermischem Trockner (v.l.o.); rechts: Anschlussleitungen mit Mengenzähler.....	118

Abbildung 90: Auf der Rückseite des thermischen Wäschetrockners ist der Wärmetauscher sichtbar	119
Abbildung 91: Thermischer Haartrockner, konstruiert von GrAT; rechts: Zu- und Ableitungen.....	120
Abbildung 92: Gegenüberstellung thermischer und energieeffizienter elektrisch betriebener Endgeräte.....	120
Abbildung 93: Links: Schichtweise Montage der einzelnen Module; rechts: Position der Anschlussleitungen	122
Abbildung 94: Montage des Icebook-Prototyps am Standort des Gesamtsystems in Böheimkirchen	123
Abbildung 95: Aufstellung des Kühlschranks-Prototyps am Standort in Böheimkirchen.....	123
Abbildung 96: Küchenbereich mit thermisch und elektrisch betriebenen Endgeräten inklusive Zero CO ₂ Cooler (ganz links)	124
Abbildung 97: Ausgeführtes Hydrauliksystem (Quelle: Lopaur, 2013)	125
Abbildung 98: Beispielhaftes Messwertdiagramm von Winsol (Böheimkirchen,– Solarstrahlung (rot), Außentemperatur (grün), Wassertemperatur in den Kollektoren (blau), Vorlauf-Wassertemperatur im Sekundärkreis (schwarz); (X-Achse: Zeit [Stunden], Y-Achse: Temperatur [°C]).	127
Abbildung 99: Daten aus Winsol im Laufe eines Tages mit Außentemperatur (blau – S2), Temperatur der oberen Schicht im kleinen Speicher (200 Liter) (rot – S5), Temperatur der oberen Schicht im großen Speicher (1500 Liter) (grün – S7); (X-Achse: Zeit [hh:mm:ss], Y-Achse: Temperatur [°C]).	128
Abbildung 100: Mögliche Messparameter des Programms „Volkszähler“.....	129
Abbildung 101: Menge an Solarenergie, die innerhalb von drei Wochen zum System übertragen wurde (X-Achse: Datum [Tage], Y-Achse: Leistung [Watt]). Insgesamt wurden 27 kWh an Solarenergie gewonnen.....	130
Abbildung 102: Menge an Solarenergie, die an einem Sommertag (X-Achse: Uhrzeit [Stunden]) von den Kollektoren über den Wärmetauscher zu den Speichern übertragen wurde (Y-Achse: Leistung [Watt]). Insgesamt wurden 27 kWh an Solarenergie gewonnen.	130
Abbildung 103: Solarenergie, die von den Kollektoren über den Wärmetauscher zu den Speichern transportiert wird (X-Achse: Datum [Tage], Y-Achse: Leistung [Watt]).	131
Abbildung 104: Mobiler indirekt betriebener Solarkocher/-cooler (GrAT).....	133
Abbildung 105: Technisches Konzept für stationäre indirekt betriebene Solarkochstelle (Schwarzer, C. –deutsches Patent: DE 41 42 119 A1).....	134
Abbildung 106: Gesamtsystem mit zusätzlichem Thermoölkreislauf	134
Abbildung 107: Anzahl der Kühl-/Gefriergeräte im Haushalt [Prozent].....	147
Abbildung 108: Bauweise der Kühlschränke [Prozent]	147
Abbildung 109: Alter der Kühlschränke [Prozent]	148
Abbildung 110: Effizienzklasse der Kühlschränke [Prozent]	148
Abbildung 111: Aufstellungsort der Kühlschränke [Prozent]	149
Abbildung 112: Häufigkeit des Abtauens der Geräte [Prozent].....	149
Abbildung 113: Art der Temperaturanzeige [Prozent].....	150
Abbildung 114: Nutzungszeiträume der Kühlschränke (X-Achse [Stunden], Y-Achse [Nutzer])	150
Abbildung 115: Anzahl der Personen im Haushalt [Prozent]	151
Abbildung 116: COP bei T _{Kühlung} = 0,5°C und verschiedenen Heiz- und Rückkühltemperaturen..	158
Abbildung 117: COP bei T _{Kühlung} = 5,5°C und verschiedenen Heiz- bzw. Rückkühltemperaturen	159
Abbildung 118: Heizwasserfluss bei verschiedenen Temperaturen	159
Abbildung 119: T _{kühl} als Funktion der Lösungskonzentration.....	160
Abbildung 120: Lösungskonzentration als Funktion von T _{rück} und T _{kühl}	160

Abbildung 121: Lösungskonzentration als Funktion von $T_{\text{kühl}}$ und $T_{\text{rück}}$	161
Abbildung 122: $T_{\text{kühl}}$ als Funktion von $T_{\text{rück}}$ bei verschiedenen Lösungskonzentrationen	161

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Globale Produktion und Verbrauch von Elektrizität von 2003 bis 2010 (Quelle der Daten: Index Mundi, o. J.a, b).....	8
Tabelle 2: Stromverbrauch 2008 nach Verbrauchskategorien und Geräten (Statistik Austria, 2009) .	9
Tabelle 3: Neugruppierung von Haushaltsgeräten nach Energieform	10
Tabelle 4: Stromverbrauch unterschiedlicher Kühlgeräte	11
Tabelle 5: Verschiedene Funktionen und Eigenschaften bestehender Geräte	15
Tabelle 6: Energieeffizienzklassen von Kühl- und Gefriergeräten (topprodukte.at, 2011)	16
Tabelle 7: Verkaufte Kühlgeräte in Österreich 2010/2011 (Branchenrecherche Eudora).....	17
Tabelle 8: Kurzcharakteristik der Sinus-Milieus (Medienforschung-ORF, 2007)	18
Tabelle 9: Übersicht der Modelle und Komponenten	84
Tabelle 10: Bewertung der Zugänglichkeit	96
Tabelle 11: Bewertung der Handhabung der Lebensmittel	97
Tabelle 12: Bewertung der Luftzirkulation.....	98
Tabelle 13: Bewertung der Bauform der Tür	99
Tabelle 14: Bewertung der Handhabung der notwendigen Reinigung.....	100
Tabelle 15: Übersicht der Bewertungsergebnisse	100
Tabelle 16: Technische Spezifikationen des ZCC.....	109
Tabelle 17: Monatliche, Mittel- und Jahreswerte der Solarstrahlung in Böheimkirchen (Meteonorm)	112
Tabelle 18: Technische Daten der verwendeten Aschoff-Solarkollektoren.....	114
Tabelle 19: Bezeichnung der Sensoren im hydraulischen System.....	126

13 Anhang

Anhang I: Erster Fragebogen

1

Fragebogen zu Kühl- und Gefriergeräten

Vielen Dank für Ihre Teilnahme an unserer Befragung! Das Ausfüllen wird ca. 10 Minuten dauern. Mit diesen Fragen versuchen wir, mehr über Ihre Nutzungsgewohnheiten und Ihre Zufriedenheit mit Ihrem Kühlgerät zu erfahren und Ihre Präferenzen kennenzulernen. Ihre Angaben und Daten werden anonymisiert und nur für die wissenschaftliche Auswertung verwendet.

Einige Fragen beziehen sich auf Ihren derzeitigen Kühl-/Gefrierschrank (Größe, Marke etc.), daher empfehlen wir Ihnen, den Fragebogen bei sich zuhause auszufüllen

Part1 Bitte beantworten Sie uns einige Fragen über Ihr Kühl-/Gefriergerät

1 Wie viele Kühl-/Gefriergeräte haben Sie zuhause?

- ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ Mehr als 3

2 Welchen Typ Kühlschrank haben Sie? (Wenn Sie mehr als ein Gerät haben, beziehen Sie sich bitte auf den hauptsächlich verwendeten)

- ☐ Eintürige Minibar ☐ Eintürig ohne Gefrierfach ☐ Eintürig mit Gefrierfach
☐ Zweitürig (Gefrierschrank oben) ☐ Zweitürig (Gefrierschrank unten) ☐ Gerät mit Flügeltüren
☐ Andere (bitte angeben).....

3 Wie alt ist Ihr Kühlschrank? (Wenn Sie mehr als ein Gerät haben, beziehen Sie sich bitte auf den hauptsächlich verwendeten)

- ☐ Less than 1 Jahr ☐ 1-2 Jahre ☐ 2-3 Jahre ☐ 4-5 Jahre ☐ weiß nicht genau, aber älter als 5 Jahre
☐ weiß nicht

4 Bitte geben Sie die Energieeffizienzklasse Ihres Kühlschranks an. (Sie können diese am Etikett an/in dem Gerät oder in der Gebrauchsanweisung finden.)

- ☐ A++ ☐ A+ ☐ A ☐ B ☐ C ☐ weiß nicht
☐ Andere (bitte angeben).....

5 Wo ist Ihr hauptsächlich genutztes Kühl-/Gefriergerät aufgestellt?

- ☐ Küche ☐ Wohnzimmer ☐ Keller ☐ Gang
☐ Andere (bitte angeben).....

6 Wie oft tauen Sie Ihr Kühl-/Gefriergerät ab?

- ☐ Wöchentlich ☐ Monatlich ☐ Halbjährlich ☐ Jährlich ☐ Nie

7 Welche Art von Temperaturanzeige hat Ihr Kühl-/Gefriergerät?

- ☐ Digital ☐ Grafisch ☐ Thermometer ☐ Haben keine
☐ andere (bitte angeben).....

8 Kennen Sie die Temperatur Ihres Kühl-/Gefriergeräts?

- ☐ Ja (bitte angeben): Kühlschrank..... °C Gefriergerät..... °C ☐ weiß nicht

9 Wann benutzen Sie gewöhnlich Ihren Kühlschrank? (Sie können mehrere Optionen auswählen.)

AM: ☐ 00:01-03:00 ☐ 03:01-06:00 ☐ 06:01-09:00 ☐ 09:01-12:00
PM: ☐ 12:01-15:00 ☐ 15:01-18:00 ☐ 18:01-21:00 ☐ 21:01-24:00

10 Mit welchen Eigenschaften Ihres Kühlschranks sind Sie zufrieden? (Mehrfachnennung möglich)

- ☐ Großes Fassungsvermögen ☐ Design ☐ Kühlfunktion ☐ Wenig Lärm
☐ Leicht zu reinigen ☐ Keine Frostansammlung ☐ Art der Türöffnung
☐ Andere (bitte beschreiben) _____

11 Mit welchen Eigenschaften Ihres Kühlschranks sind Sie nicht zufrieden? (Mehrfachnennung möglich)

- ☐ Geringes Fassungsvermögen ☐ Design ☐ Kühlfunktion ☐ Viel Lärm
☐ Schwierig zu reinigen ☐ Frostansammlung ☐ Art der Türöffnung
☐ Andere (bitte beschreiben) _____

12 Welche Funktionen und Eigenschaften hätten Sie gerne in Ihrem Kühl-/Gefriergerät?
(Mehrfachnennung möglich)

- ☐ Wasserspender ☐ Eismaschine ☐ Transparente Tür ☐ Temperaturanzeige in °C
☐ Schöner Griff ☐ Unsichtbarer Griff ☐ Geruchlos ☐ Energiesparend
☐ Andere (bitte beschreiben) _____

13 Wie viele Personen leben in Ihrem Haushalt/nutzen Ihren Kühlschrank (inclusive Sie selbst)?

- ☐ 1 Person ☐ 2 Personen ☐ 3 Personen ☐ 4 Personen
☐ mehr als 4 Personen

14 Wohnen Sie in einem Haus oder einer Wohnung?

- ☐
- Haus
- ☐
- Wohnung

15 Wie groß ist Ihre Wohnung/Haus?

- ☐ Kleiner als 30m² ☐ 31-50 m² ☐ 51-80 m² ☐ 81-120 m² ☐ Größer als 120m²

35 Welche Funktion hätten Sie gerne an Ihrem Herd? (bitte angeben)

[illegible]

Vielen Dank für Ihre Zeit!

Falls Sie an weiteren Informationen interessiert sind, kontaktieren Sie bitte die Gruppe Angepasste Technologie (GrAT) an der TU Wien (contact@grat.at, Tel: 01-58801-49523).



Anhang II: Auswertung des 1. Fragebogens – Überblick

Frage 1: Wie viele Kühl-/Gefriergeräte haben Sie zuhause?

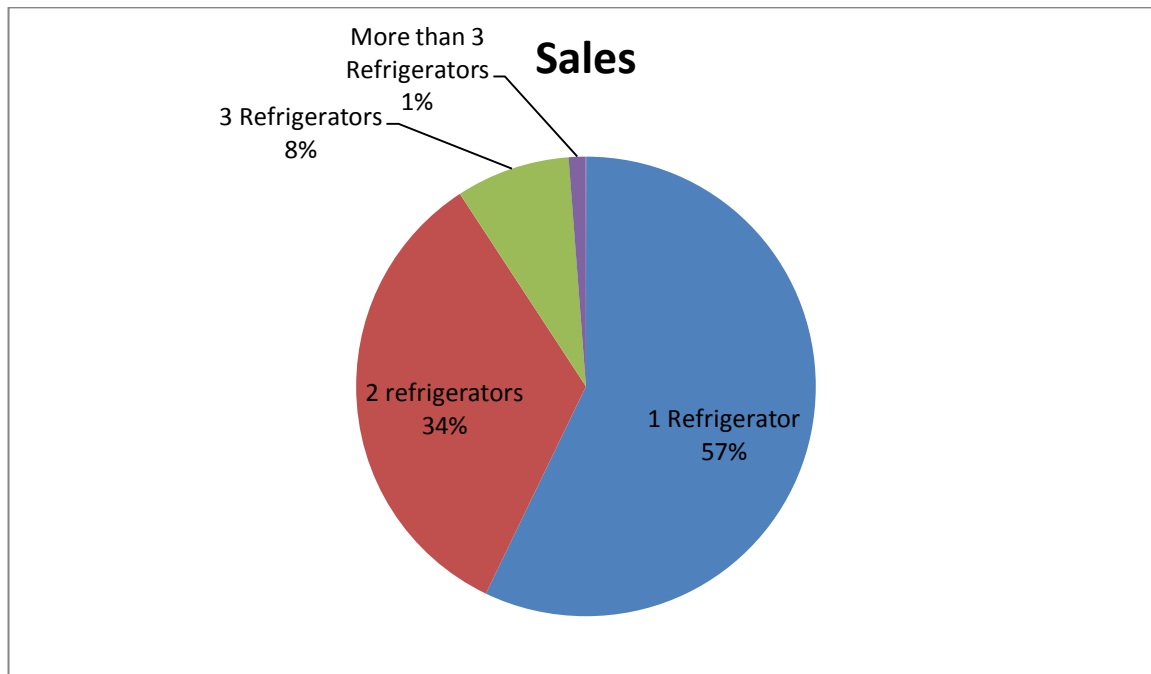


Abbildung 109: Anzahl der Kühl-/Gefriergeräte im Haushalt [Prozent]

Frage 2: Welchen Typ Kühlschranks haben Sie?

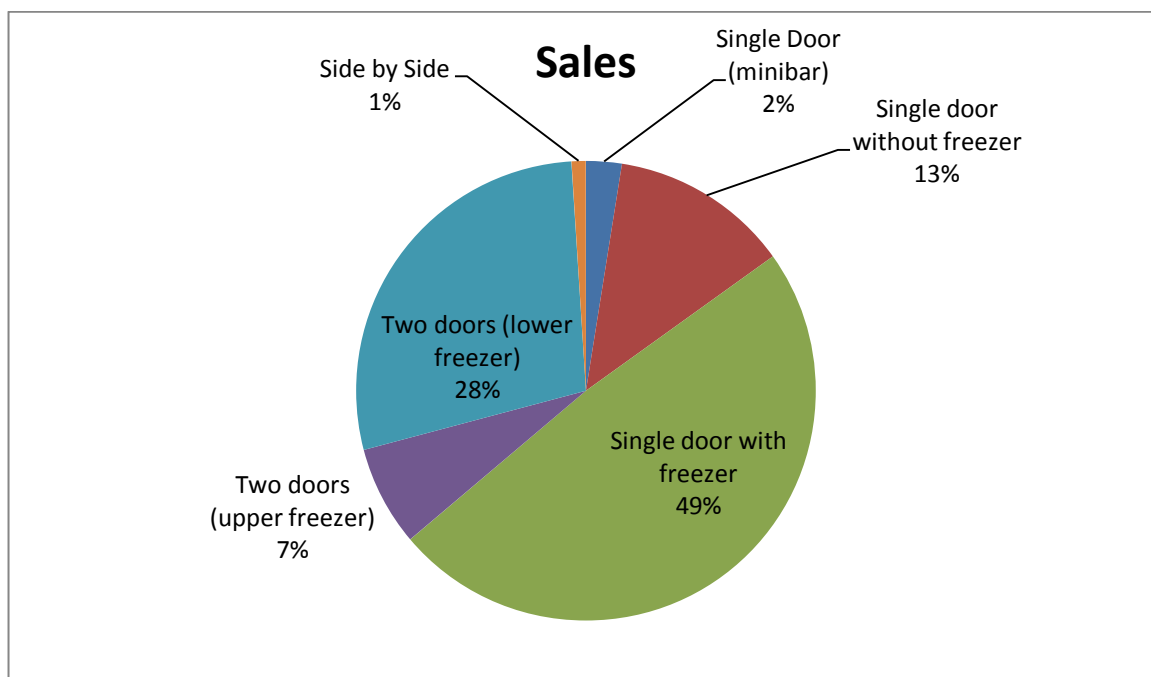


Abbildung 110: Bauweise der Kühlschränke [Prozent]

Frage 3: Wie alt ist Ihr Kühlschrank?

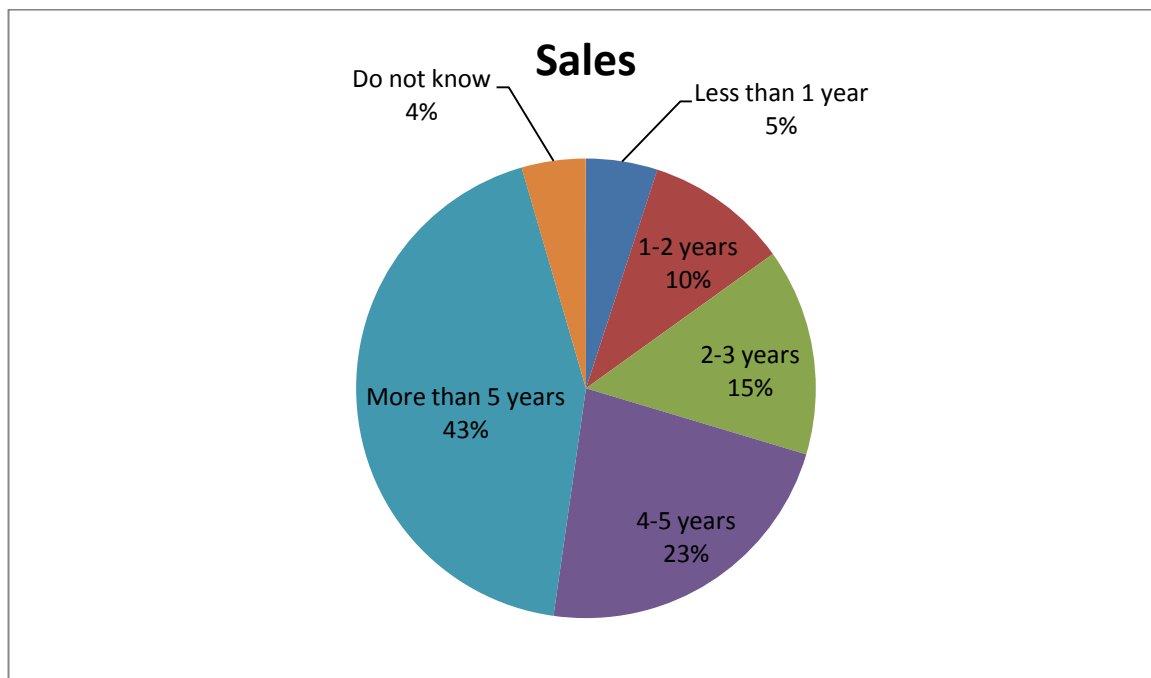


Abbildung 111: Alter der Kühlschränke [Prozent]

Frage 4: Bitte geben Sie die Energieeffizienzklasse Ihres Kühlschranks an.

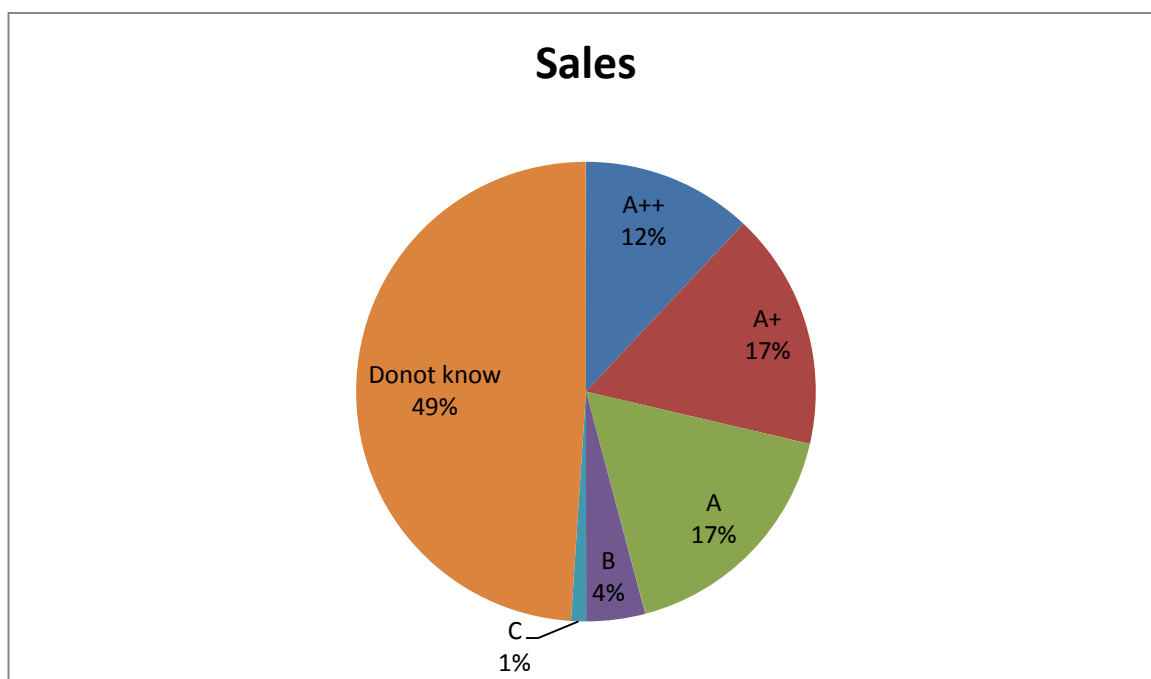


Abbildung 112: Effizienzklasse der Kühlschränke [Prozent]

Frage 5: Wo ist Ihr hauptsächlich genutztes Kühl-/Gefriergerät aufgestellt?

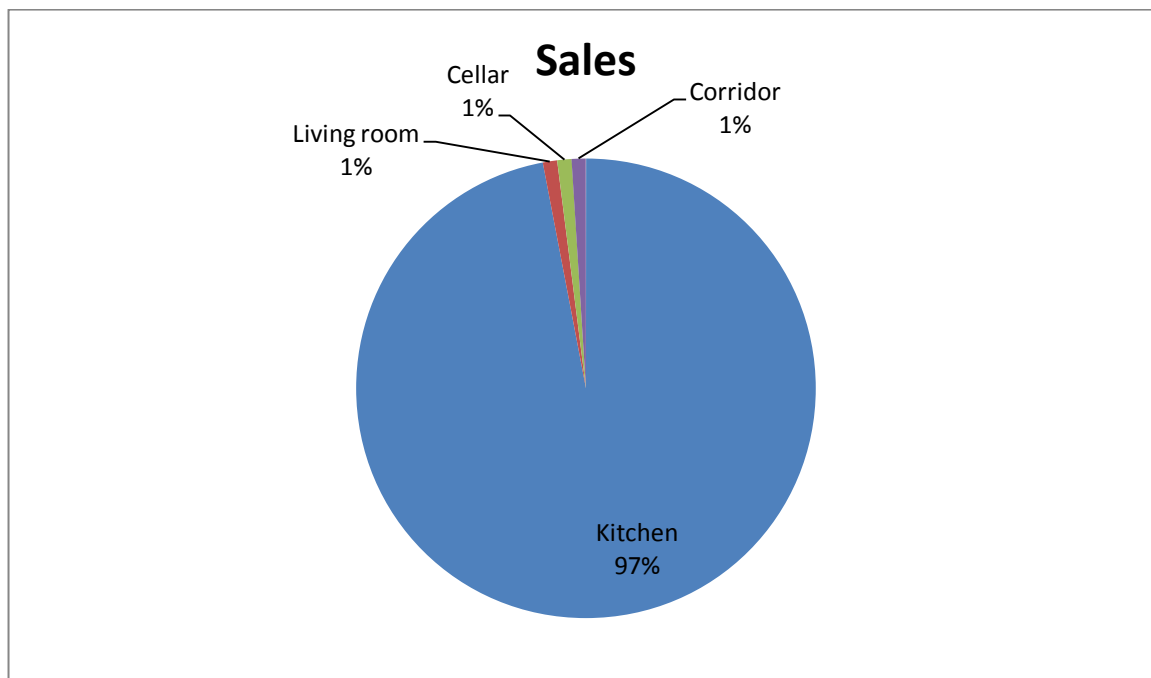


Abbildung 113: Aufstellungsort der Kühlschränke [Prozent]

Frage 6: Wie oft tauen Sie Ihr Kühl-/Gefriergerät ab?

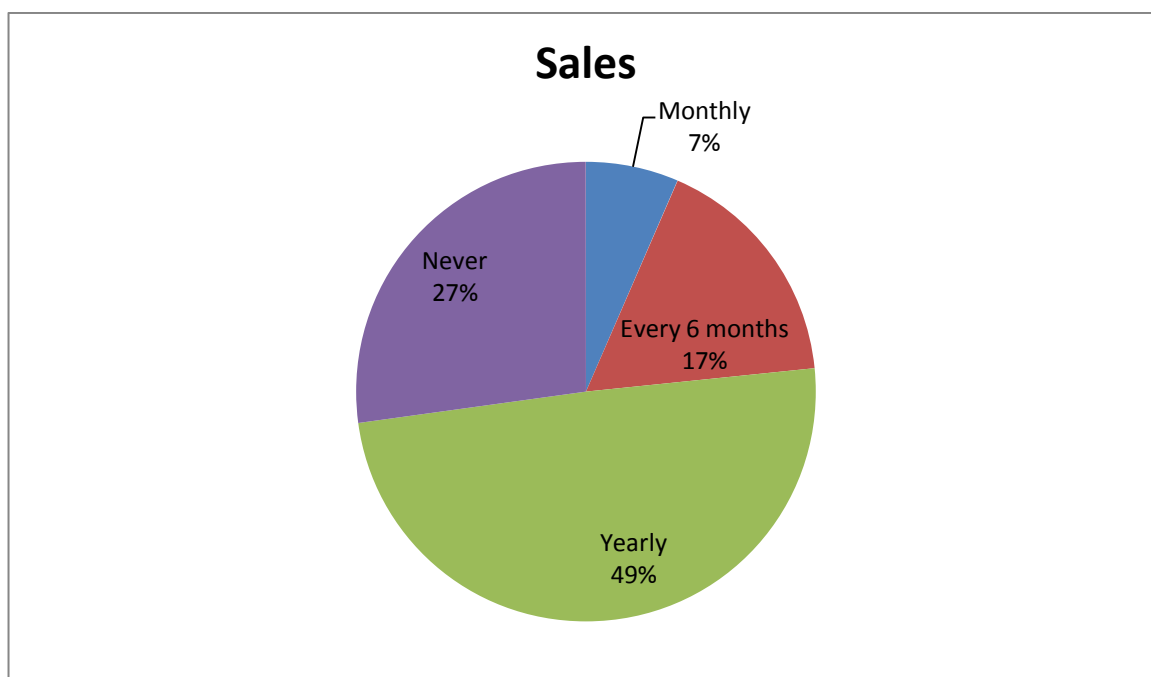


Abbildung 114: Häufigkeit des Abtauens der Geräte [Prozent]

Frage 7: Welche Art von Temperaturanzeige hat Ihr Kühl-/Gefriergerät?

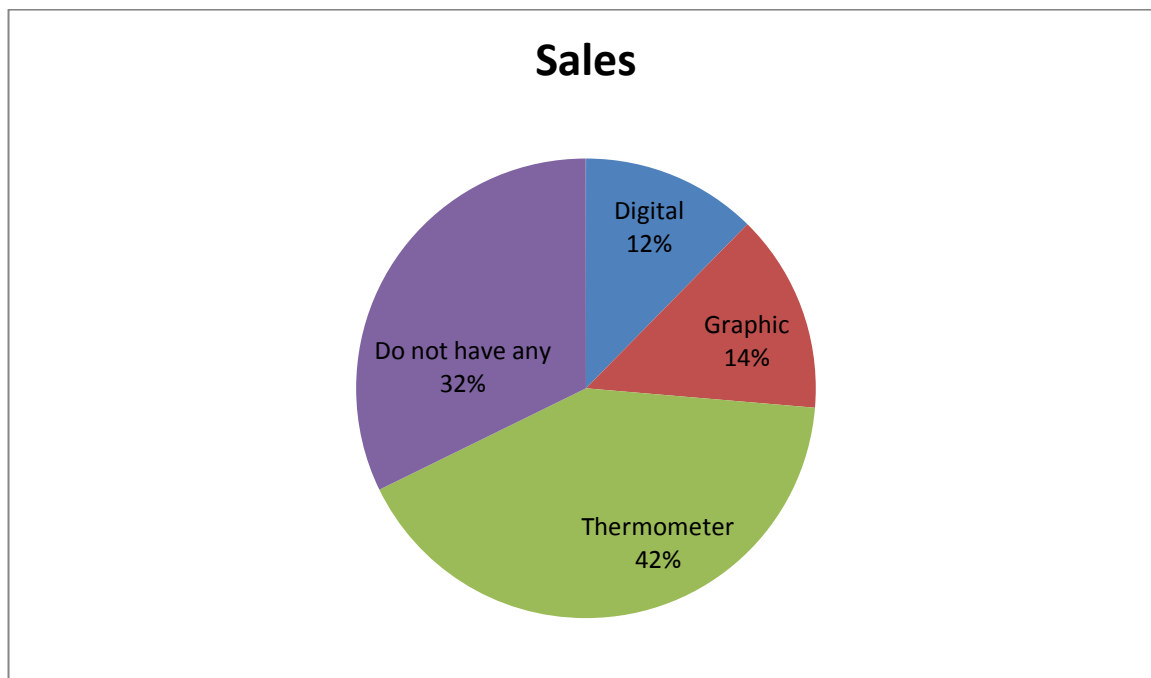


Abbildung 115: Art der Temperaturanzeige [Prozent]

Frage 9: Wann benutzen Sie gewöhnlich Ihren Kühlschrank?

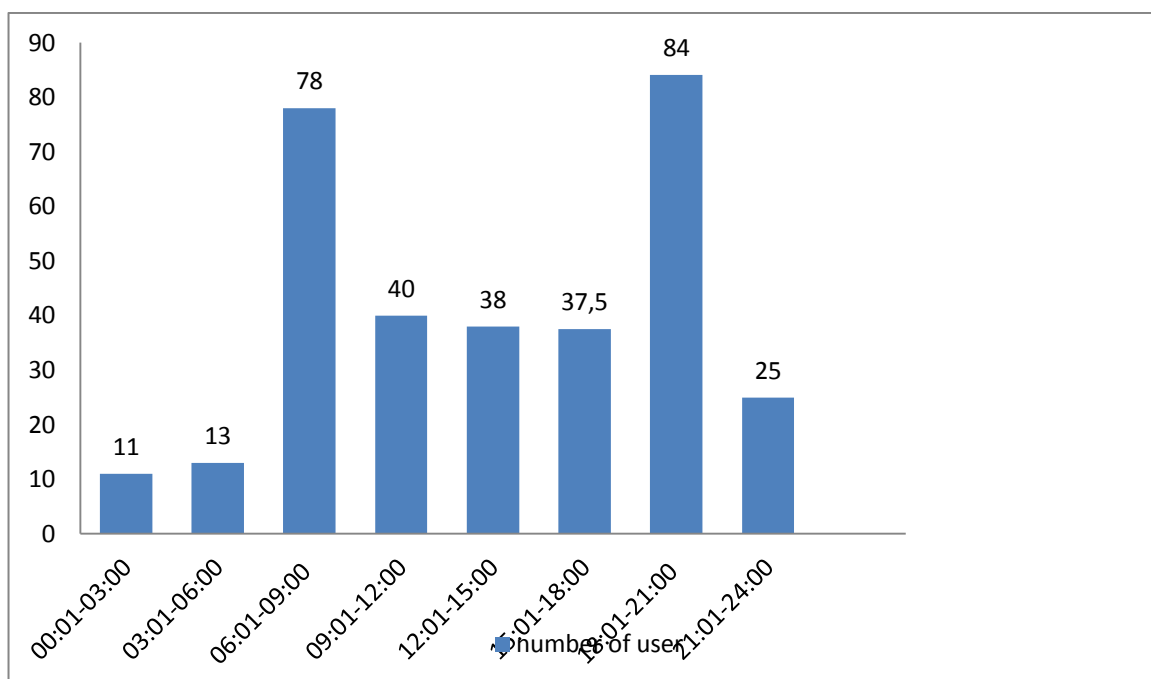


Abbildung 116: Nutzungszeiträume der Kühlschränke (X-Achse [Stunden], Y-Achse [Nutzer])

Frage 13: Wie viele Personen leben in Ihrem Haushalt/nutzen Ihren Kühlschrank (inklusive Sie selbst)?

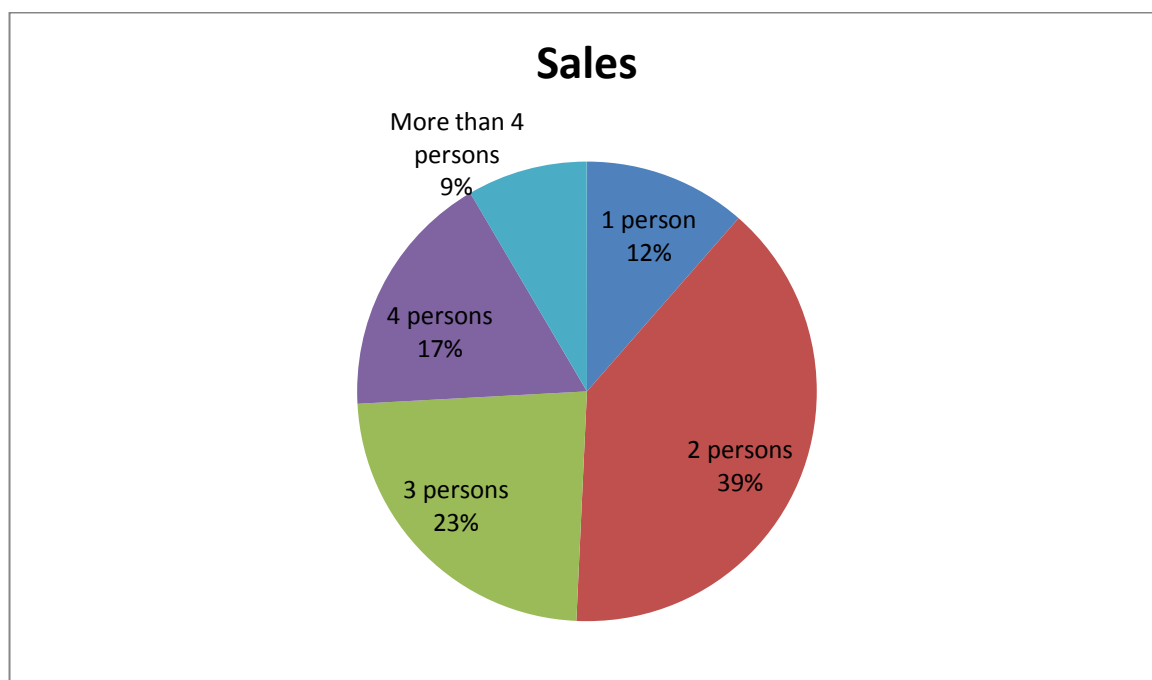


Abbildung 117: Anzahl der Personen im Haushalt [Prozent]

Anhang III: Zweiter Fragebogen

Fragebogen

Bitte geben Sie die Wichtigkeit von Kochherd und Kühlschrank an.

5 = Äußerst wichtig 4 = Recht wichtig 3 = Moderat wichtig 2 = Weniger wichtig

1 = Nicht wichtig

Kochherd

1) Leicht zum An- und Ausschalten

☐ 5 ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1

2) Beständige Hitze

☐ 5 ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1

3) Leichtigkeit beim Hitze Regulieren

☐ 5 ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1

4) Warnsignal bei Überhitzung

☐ 5 ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1

5) Energieeinsparung

☐ 5 ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1

6) Schnelles Kochen

☐ 5 ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1

7) Schnelles Erhitzen

☐ 5 ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1

8) Leichtigkeit beim Putzen

☐ 5 ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1

9) Kratzer-resistente Materialien

☐ 5 ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1

10) Chemisch-resistente Materialien

☐ 5 ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1

11) Pflegeleichtigkeit

☐ 5 ☐ 4 ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1

12) Möglichkeit verschiedene Pfannen ,Töpfe u. Woks zu verwenden	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
13) Möglichkeit verschieden große Pfannen, Töpfe u. Woks zu verwenden	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
14) Sicherheit	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
15) Nicht-toxische Materialien	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
16) Beständigkeit	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
17) Langlebigkeit	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
18) Ohne Rauchbildung (z.B. elektrisch)	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
19) Ohne Ruß	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
20) Niedrige (Erhaltungs-)kosten	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
21) Umweltfreundlichkeit	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
22) Anpassung an umliegende Möbel	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1

Kühlschrank

1) Leichte Zugänglichkeit

☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

2) Leicht beim Öffnen und Schließen

☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

3) Ausreichender Abstellraum

☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

4) Leicht zu säubern

☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

5) Energieeinsparung

☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

6) Leichte Erhaltung

☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

7) Temperaturangabe

☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

8) Einordnungshinweise für Produktklassen

☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

9) Leichte Temperatureinstellungsmöglichkeit

☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

10) Variierender Platz (dem Verbrauch angepasst)

☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

11) Erhaltung der Produkte in gutem Zustand

☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

12) Geruchskontrolle

☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

13) Pflegeleichtigkeit

☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

14) Trockenhaltung	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
15) Kältebeibehaltung	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
16) minimale Geräuschbildung	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
17) Beständigkeit	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
18) Zuverlässigkeit	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
19) Ohne Frost	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
20) Gleichbleibende Kälte	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
21) Energieeinsparung	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
22) Sicherheit	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
23) Umweltfreundlich	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1
24) Anpassung an umliegende Möbel	☐ 5	☐ 4	☐ 3	☐ 2	☐ 1

Thank you for your time

Anhang IV: Mathematische Modelle (Dr. Kunze, SolarFrost)

Zur Berechnung und Simulation der Prozesse in den ausgeführten Kältemaschinen kamen 2 verschiedene Softwaresysteme zur Anwendung, die beide als VBA für Microsoft Excel von Dr. Kunze selbst entwickelt worden sind.

- Wärmetauschermodell: Ausgehend von der Tatsache, dass eine Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschine nichts anderes ist als ein System miteinander verbundener Wärmetauscher und Behälter, wurde ein Simulationsmodell für einen Plattenwärmetauscher mit serpentinenförmigen Kanälen erstellt. Dabei werden die Platten in finite Elemente geteilt, zwischen denen parallel zur Plattenoberfläche Flüssigkeiten oder Gas fließen (bzw. kondensieren, verdampfen, absorbiert oder ausgetrieben werden) und orthogonal dazu Wärme ausgetauscht wird. Dabei werden als Randbedingungen einerseits die dem Wärmetauscher zufließenden Flüssigkeiten oder Gase sowie deren Zustände und andererseits die Plattendimensionen des Wärmetauschers vorgegeben. Dann werden die Plattendimensionen so lange variiert, bis der Zustand der Flüssigkeiten und Gase den Erwartungswerten entspricht. Kombiniert man auf diese Art alle für das System benötigten Wärmetauscher, so lässt sich mit dieser Methode nicht nur die optimale Dimensionierung aller Bauteile errechnen, sondern man erhält auch genaue Auskünfte zur Leistung und zu den Masseflüssen der Anlage.
- Es gibt ein zweites Modell, das mit einer geschätzten Vorgabe der Temperaturdifferenzen an allen Wärmetauschern zuerst die physikalischen Eckdaten des thermodynamischen Kreisprozesses der Kühlung berechnet. Anschließend werden die Dimensionen der beteiligten Wärmetauscher so ermittelt, dass sie den vorgegebenen Temperaturdifferenzen entsprechen. Alternativ dazu kann man auch die ermittelten thermodynamischen Eckdaten als Vorgabe in das Wärmetauschermodell eingeben.

Zur raschen Ermittlung der Leistungsfähigkeit einer neuen Kühlmaschinenvariante eignet sich das zweite Modell deutlich besser, da man dabei die Berechnung der Wärmetauscherdimensionen unterdrücken kann. Will man dagegen eine Maschine tatsächlich bauen, ist das erste Modell besser, da die Wärmetauscherdimensionen genauer berechnet werden. Um die Rechenzeit klein zu halten, wurden dabei in der Regel die thermodynamischen Eckdaten als Vorgabe benützt.

Resultate der Modellrechnungen

Um wichtige allgemeine Aussagen über Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschinen zu machen, sind im Folgenden Werte für eine Maschine mit 1000 W Kühlleistung berechnet worden. Dabei wurden nur Heiz- und Rückkühltemperaturwerte mit Kühltemperaturen in der Nähe von 0 °C herangezogen, die für den Zero CO₂ Cooler realistischerweise zu erwarten sind.

Die Frage, die normalerweise zuerst gestellt wird, ist die nach dem Wirkungsgrad. Dabei ist zunächst anzumerken, dass aus physikalischer Sicht ein Wirkungsgrad einer Kältemaschine nicht existiert, weil Kühlleistung und Heizleistung gleiche Vorzeichen haben, d.h. beide gehen in die Maschine hinein. Es ist also nicht so, dass die Kühlleistung nur ein Bruchteil der Heizleistung wäre, den man zum Kühlen nützen kann. Die Kühlleistung kann auch größer als die Heizleistung sein, was bei einem Wirkungsgrad nicht möglich wäre.

Man definiert also eine „Wärmezahl“ oder einen „Coefficient of Performance“ (= COP), der sich als Quotient aus Kühlleistung durch Heizleistung darstellt.

In Abbildung 116 und Abbildung 117 sieht man, dass die erwähnte Frage nicht anders zu beantworten ist als durch Kurvenscharen in mehreren Diagrammen: Je nach dem Zahlentripel ($T_{\text{kühl}}$, T_{heiz} , $T_{\text{rück}}$) variiert der Wert für den COP beträchtlich. Für eine optimal ausgelegte Wasser-

Ammoniak-Absorptionskältemaschine mit Absorptionswärmerückgewinnung sollte der COP nicht unter 0,8 liegen und kann in Einzelfällen sogar größer als 2 werden. Vereinfacht gesagt gilt: „Der COP ist meistens etwas größer als 1.“ Daher ist die Auslegung eines Gesamtsystems z. B. unter Verwendung von Sonnenkollektoren nicht elementar, wenn sowohl der Kollektorwirkungsgrad als auch der COP der Kältemaschine stark variabel sind. Da der Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors mit steigender Wassertemperatur abnimmt, während der COP einer Absorptionskältemaschine mit steigendem T_{heiz} zunimmt, gibt es eine optimale Betriebstemperatur. Für gute Sonnenkollektoren liegt dieses Optimum im Bereich zwischen 100 und 120 °C, also deutlich höher als die üblichen Nutzungstemperaturen von Sonnenkollektoren. Das kann zu notwendigen Änderungen beim Design von Solaranlagen für Kühlung führen (z. B. Wärmespeicher, Wärmedämmung, hitzebeständige Kunststoffkomponenten).

Auslegungsprobleme potenzieren sich, wenn man nach dem erforderlichen Wasserfluss fragt, mit dem die Kältemaschine beheizt werden soll (siehe Abbildung 118). Dieser Fluss variiert sehr stark mit den Temperaturen T_{heiz} und $T_{\text{rück}}$. Eine genau regelbare Wasserzufuhr ist daher empfehlenswert (das könnte mit einer elektronischen Steuerung automatisch optimiert werden). Natürlich funktioniert eine Absorptionskühlmaschine auch, wenn der Heißwasserfluss größer ist, als in diesem Diagramm angegeben ist, aber der Wirkungsgrad wird dann deutlich schlechter, wie aus Abbildung 118 hervorgeht: Wenn in irgendeinem Zustandspunkt der Heizwasserfluss erhöht wird, entspricht das im Diagramm einer Bewegung aufwärts, führt also zu einer höheren $T_{\text{rück}}$. Das ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass durch einen größeren Fluss von heißem Wasser mehr Abwärme anfällt, wodurch die Rückkühltemperatur steigt. In Abbildung 116 und Abbildung 117 sieht man aber, dass bei einem Anstieg der Rückkühltemperatur der COP fällt.

Ein ganz wesentlicher Faktor zur Beschreibung einer Absorptionskühlung ist die Lösungskonzentration in der Maschine. Es ist nicht leicht, überhaupt an Publikationen über praktische Erfahrungen mit unterschiedlichen Lösungskonzentrationen zu kommen, und Hersteller von Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschinen halten solche Informationen daher gerne geheim. Das heißt, jede Firma verlässt sich dabei auf ihre eigenen Forschungen und Erfahrungen. Die Lösungskonzentration ist durch ein komplexes Formelsystem einerseits mit den Temperaturen $T_{\text{kühl}}$ und $T_{\text{rück}}$ verbunden, andererseits aber auch mit den geometrischen Parametern der jeweils verwendeten Kältemaschine. Die Abbildung 119 gilt daher nur qualitativ für alle Absorptionskältemaschinen. Für die Berechnung dieses Diagramms wurde ein 1000W-Icebook als Grundlage genommen.

Die wichtigste qualitative Aussage von Abbildung 119 ist die, dass ein und dieselbe Absorptionskältemaschine unterschiedliche Kühltemperaturen erreicht, wenn man die Lösungskonzentration verändert. Das kann z. B. dann passieren, wenn eine Maschine ein ganz kleines Leck hat, über das sie langsam Ammoniak verliert. Paradoxe Weise würde diese Maschine dann umso kälter werden, je weniger Ammoniak sie noch hat. Diese Aussage ist jedoch nur dann paradox, wenn man vergisst, dass kälter nicht gleichbedeutend ist mit „stärkere Kühlung“. Tatsächlich wird bei schwächerer Ammoniaklösung die Kühlleistung kleiner, allerdings auf einem niedrigeren Temperaturniveau.

Abbildung 120 und Abbildung 121 dienen dazu, die richtige Lösungskonzentration zu wählen, wenn man schon weiß, welche Temperaturen für $T_{\text{kühl}}$ und $T_{\text{rück}}$ zu erwarten sind.

In diesem Zusammenhang beantwortet sich auch die Frage, wie man mit einer Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschine die gewünschte $T_{\text{kühl}}$ einstellt. Man kann eine solche Maschine nicht einfach ein- und ausschalten, wie man das bei Kompressionskältemaschinen tut. Durch die relativ langen Zeiten für Aufwärmen und Abkühlung wäre das sehr unwirtschaftlich. Andererseits kann man

eine Absorptionskältemaschine dazu bringen, bei konstanter Temperatur zu kühlen, wenn man $T_{\text{rück}}$ konstant hält. Das zeigt Abbildung 122.

Da bei dieser Maschine die Rückkühlung durch Wasser erfolgt (z. B. Brunnen, Grundwasser etc.), dessen Temperatur sich nur wenig ändert, kann in erster Näherung angenommen werden, dass auch die Kühltemperatur einigermaßen konstant bleiben wird. Für eine ganz genaue Einstellung der Kühltemperatur reguliert man die Rückkühltemperatur über eine Drosselung des Kühlwassers: Reduziert man den Wasserfluss, steigt die Wassertemperatur und damit auch $T_{\text{kühl}}$.

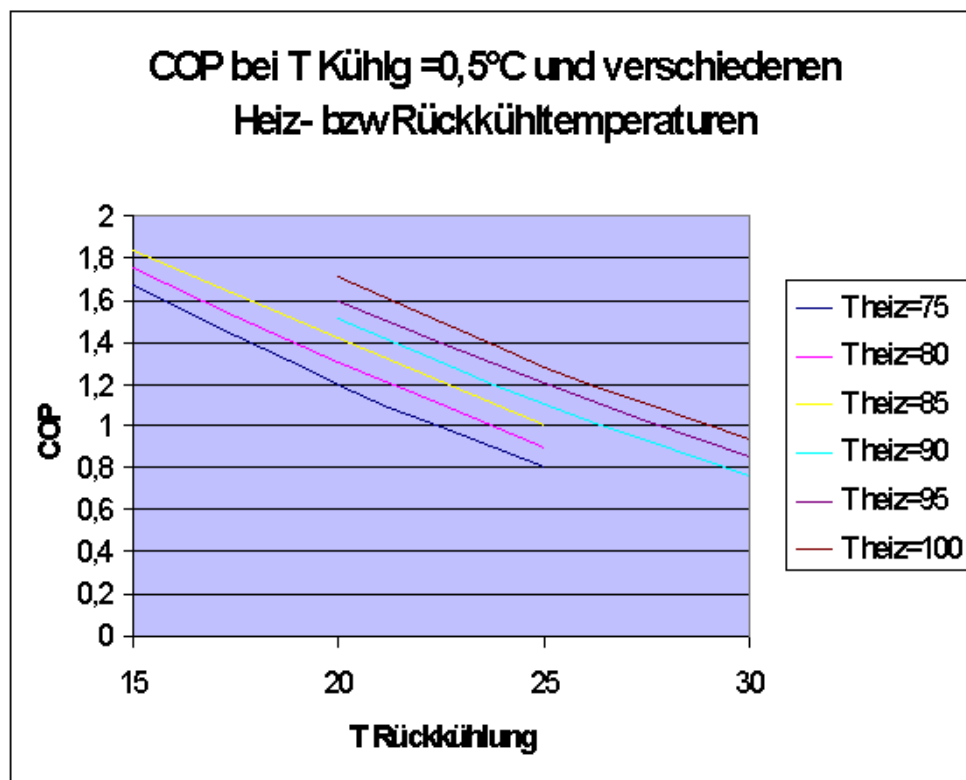


Abbildung 118: COP bei $T_{\text{Kühlung}} = 0,5^\circ\text{C}$ und verschiedenen Heiz- und Rückkühltemperaturen

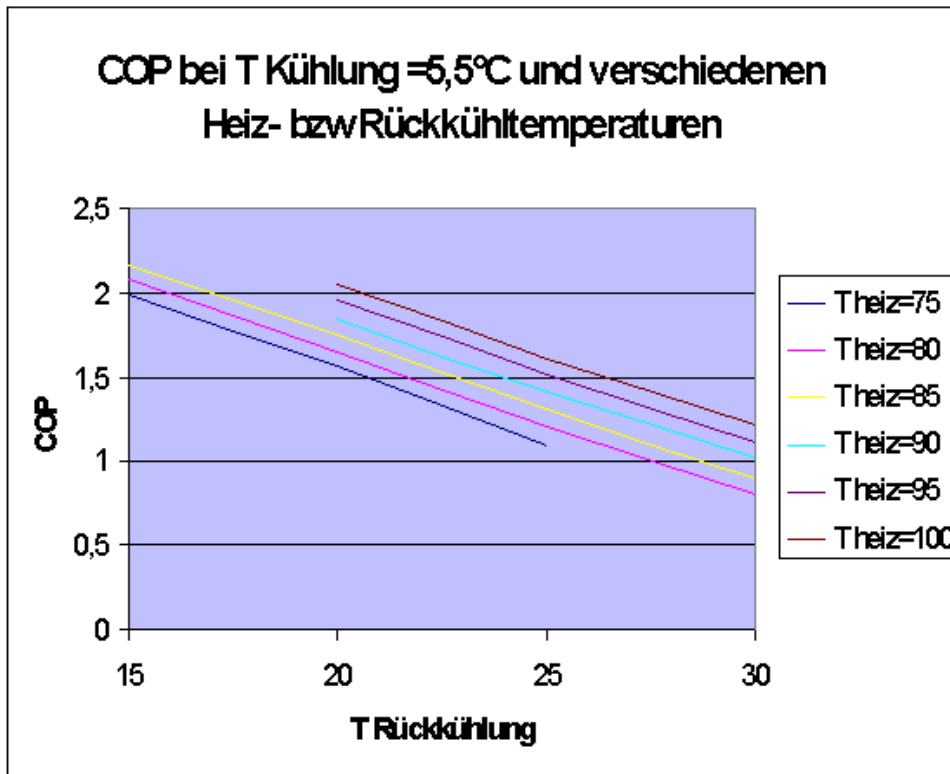


Abbildung 119: COP bei T Kühlung =5,5°C und verschiedenen Heiz- bzw. Rückkühltemperaturen

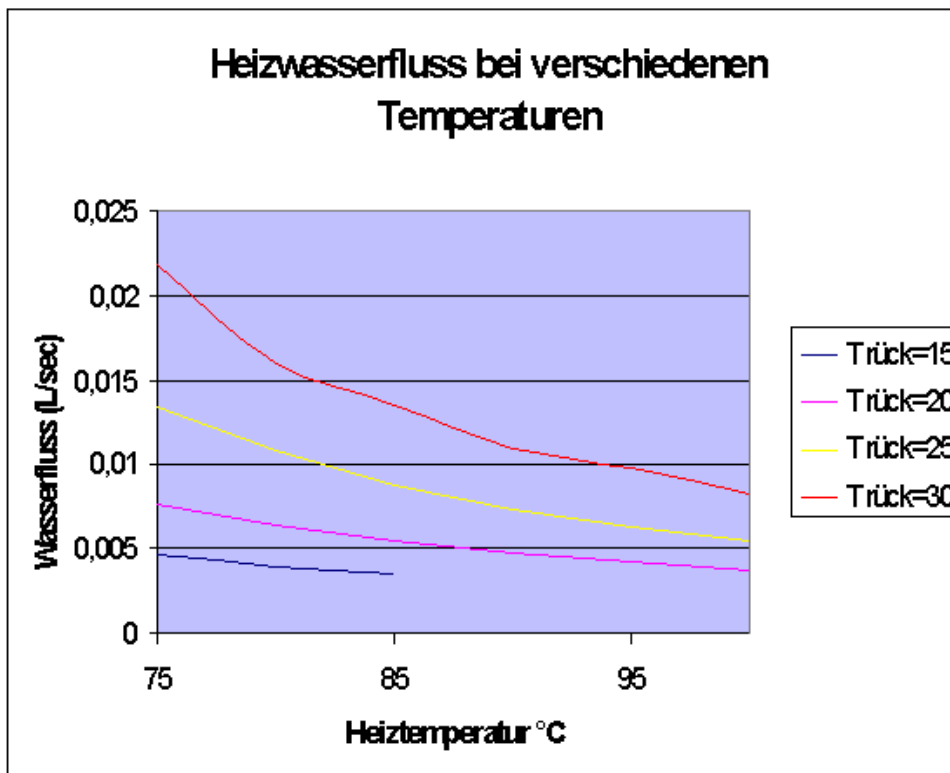


Abbildung 120: Heizwasserfluss bei verschiedenen Temperaturen

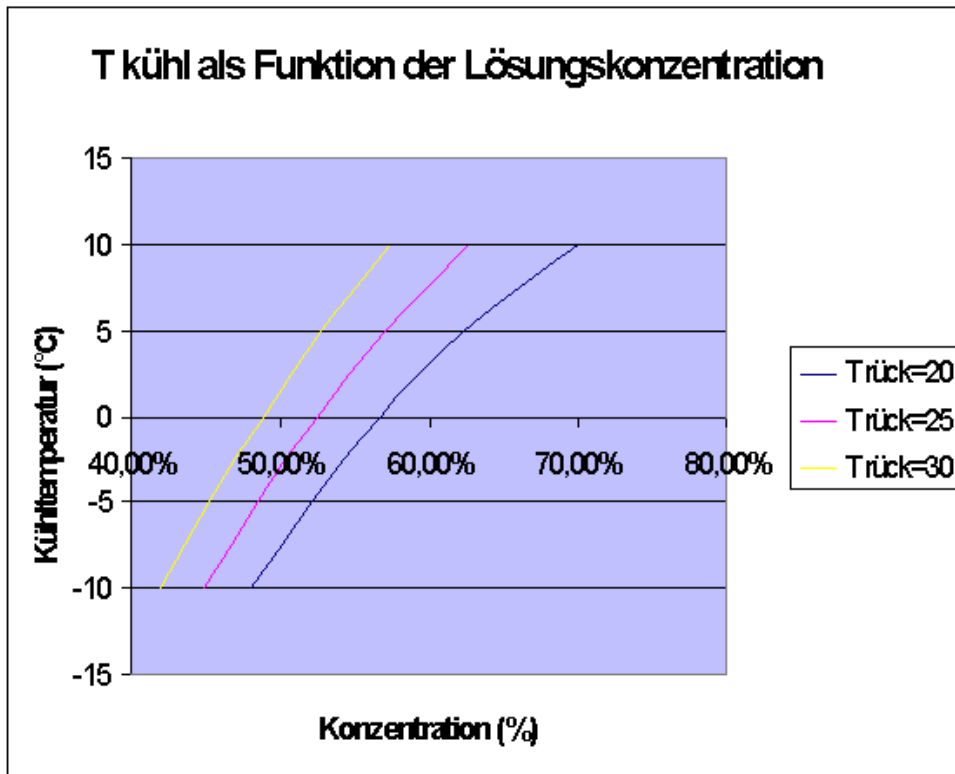


Abbildung 121: T kühl als Funktion der Lösungskonzentration

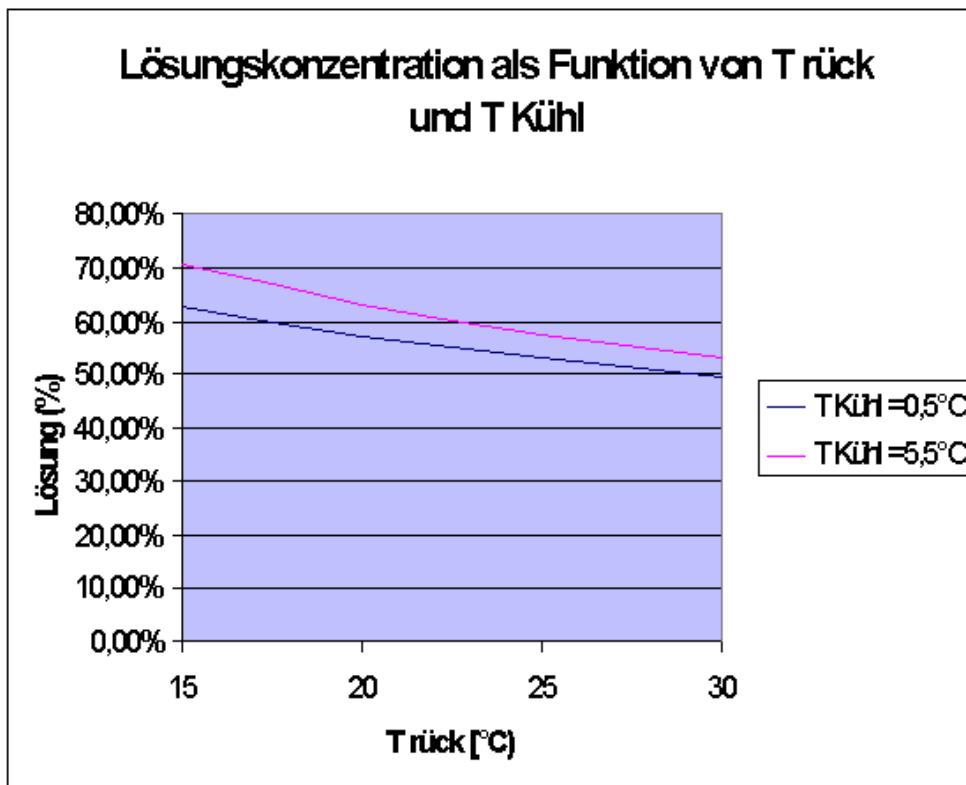


Abbildung 122: Lösungskonzentration als Funktion von T rück und T kühl

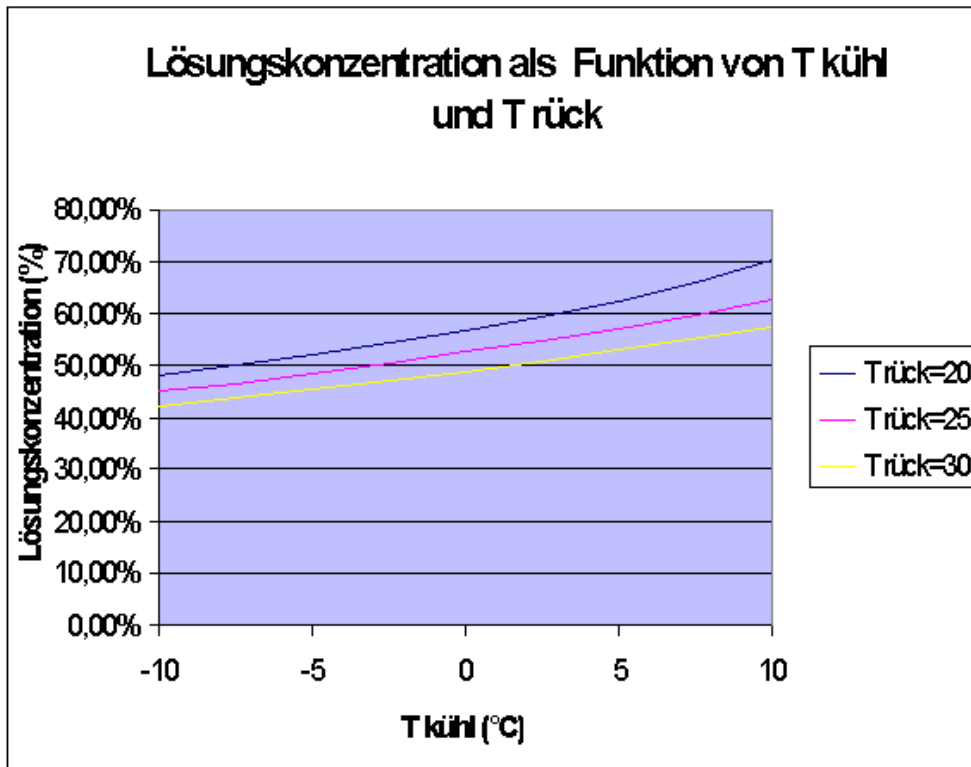


Abbildung 123: Lösungskonzentration als Funktion von T_{kühl} und T_{rück}

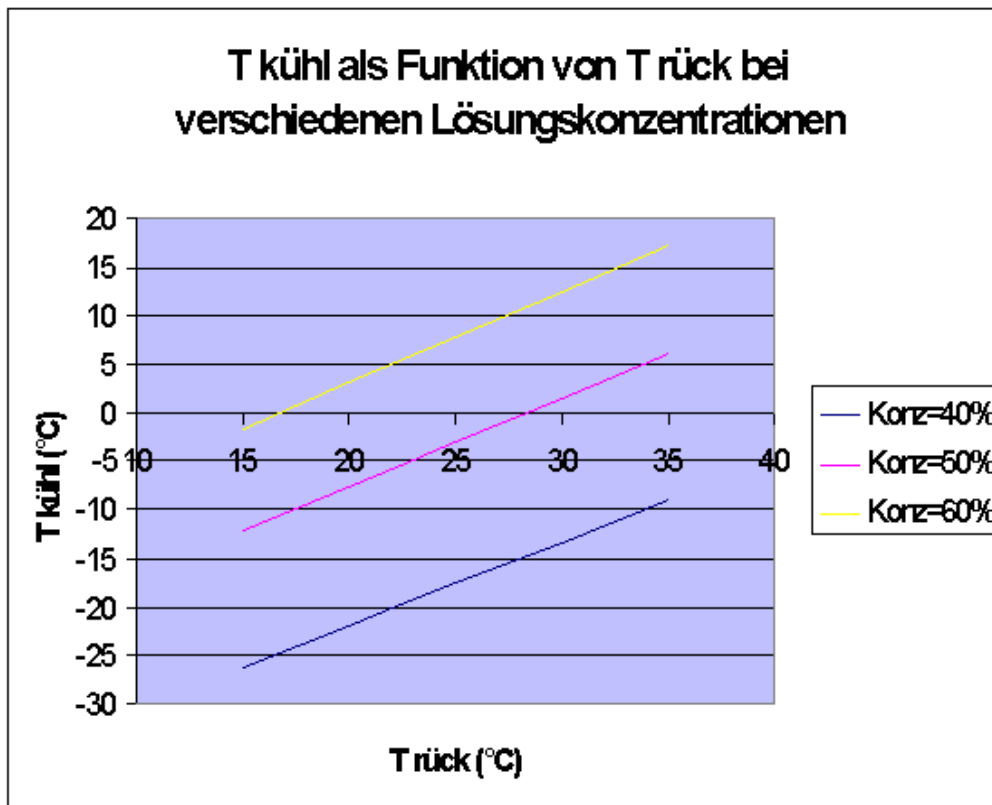


Abbildung 124: T_{kühl} als Funktion von T_{rück} bei verschiedenen Lösungskonzentrationen