



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 31.10.2014

A++++ Kühlschrank

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

V-ZUG Kühletechnik AG
Zelgstrasse 3
Postfach 500
CH-9320 Arbon
www.V-ZUG.ch

Autoren:

Dr. Jochen Ganz, Metall Zug AG, jochen.ganz@metallzug.ch
Stefan Stahl, QUO AG, stefan.stahl@quo.ch
Florian Furrer, QUO AG, florian.furrer@quo.ch
Andreas Kaiser, QUO AG, andreas.kaiser@quo.ch

| | |
|----------------------------|-------------------|
| BFE-Bereichsleiter: | Dr. Michael Moser |
| BFE-Programmleiter: | Roland Brüniger |
| BFE-Vertragsnummer: | SI/500901-01 |

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhalt

| | |
|------------------------------------------------|-----------|
| Inhalt | 3 |
| Zusammenfassung | 4 |
| Ausgangslage | 6 |
| Ziel der Arbeit | 6 |
| Nationale Zusammenarbeit | 6 |
| Grundlagen | 7 |
| Effizienzlabel A++++ | 7 |
| Analyse | 7 |
| Vorversuche | 9 |
| Konzeption | 11 |
| Variante 1: Evolution | 11 |
| Variante 2: Maximale Effizienz der Kältekreise | 12 |
| Variante 3: Maximaler Raum | 13 |
| Konzeptvergleich und Entscheid | 14 |
| Grobauslegung | 15 |
| Kältekreis | 15 |
| Isolation | 16 |
| Wärmetauscher/Luftverteilung | 16 |
| Funktionsmuster I | 17 |
| Funktionsmuster II | 24 |
| Fazit & Ausblick | 26 |
| Referenzen | 27 |

Zusammenfassung

„Best in class“-Kühlschränke erreichen aktuell das Energieeffizienzlabel A+++. Für die Einführung einer neuen Gerätekategorie mit dem Label A++++ wäre eine Effizienz-Steigerung resp. Verbrauchsreduktion von 50% notwendig. Dieses Projekt zeigt einen Weg auf, wie diese erreicht werden kann.

In der ersten Phase wurde die aktuelle Technologie grundlegend analysiert und basierend darauf Ideen und Ansätze erarbeitet. Die gesammelten Ansätze wurden bezüglich ihres Einflusses auf die Energie-Effizienz bewertet. Sie wurden danach zu Gesamtkonzepten kombiniert und für diese rechnerisch aufgezeigt, wie ein A++++-Kühlschrank realisiert werden kann. Daraus lässt sich schliessen, dass ca. die Hälfte der Einsparung mit einem effizienteren Kältekreis erreicht werden kann. Der Rest der Einsparung muss über eine verbesserte Isolationshülle gewonnen werden.

Anhand von Messungen mit Funktionsmustern sollten diese Berechnungen experimentell überprüft werden. Die Messungen haben gezeigt, dass die Auslegung des Kältekreises und der Wärmetauscher, aber auch weiterer Komponenten im Gehäuse die Realität gut abbildet. Die angestrebte, verbesserte Isolation konnte jedoch nicht umgesetzt werden. Hier sind Schwierigkeiten im Herstellungsprozess aufgetreten, die Ursachen dafür werden weiter untersucht.

Das Ziel, eine experimentelle Bestätigung der Energieeffizienz des Gesamtgerätes zu erreichen, wurde also nicht vollständig erreicht. Es wurde aber gezeigt, dass die Auslegung der einzelnen Komponenten die Realität gut abbildet und damit die Machbarkeit eines A++++-Kühlschranks auf Basis des aktuellen Konzeptes mit Kältetechnik im Sockel und der Kälteverteilung über Luft grundsätzlich bestätigt. Dies unter der Voraussetzung, dass die isolierende Hülle in bester Qualität gefertigt wird.

Abstract

“Best in class” refrigerators currently achieve energy efficiency ratings of A+++. For a newly introduced category of appliances with the A++++ rating, an efficiency increase by cutting power consumption by 50% is required. This project shows a path towards achieving this goal.

In the first phase, the current technology was thoroughly analyzed to identify ideas and approaches for further development. The collected approaches were evaluated for their impact on energy efficiency and then combined into overall concepts and mathematically demonstrated how a refrigerator with an A ++++ rating can be realized. It was concluded that about half of the savings can be achieved with a more efficient cooling circuit. The rest of the savings would be gained through an improved insulation cover.

These calculations were then put to the test on functional models. The data collected showed that the arrangement of the cooling circuit, the heat exchanger and other components in the housing reflected real-world conditions accurately. However, the intended, improved insulation could not be implemented due to difficulties encountered in the manufacturing process for reasons to be further investigated.

As a result, the goal of confirming the energy efficiency of the entire device experimentally was not fully achieved. The experiment did show, however, that the arrangement of the individual components was a good model of actual refrigerators, thus confirming the feasibility of an A++++ refrigerator based on the current concept of refrigeration technology through air-based cold distribution. This would depend, of course, on the insulating cover being of the highest quality.

Résumé

Les meilleures réfrigérateurs „Best in class“ atteignent actuellement le label d'efficacité A+++. Afin d'introduire une nouvelle catégorie d'appareil avec un label A++++, il serait nécessaire de réaliser une augmentation d'efficacité respectivement une réduction de la consommation de 50%.

Dans la première phase du projet, la technologie actuelle a été analysée fondamentalement afin d'élaborer de nouvelles idées et approches au problème. Celles-ci ont été évaluées en fonction de leur influence sur l'efficacité énergétique de l'appareil et ont ensuite été combinées afin de démontrer avec des méthodes numériques, de quelle manière un réfrigérateur A++++ peut être réalisé. On peut en déduire que la moitié de l'économie peut être atteinte avec un cycle de réfrigération plus efficace. Le reste de l'économie doit être réalisée au travers d'une coque d'isolation améliorée.

En se fondant sur les mesures pratiquées sur des modèles fonctionnels, les modèles numériques ont pu être vérifiés expérimentalement. Les mesures ont démontré, que le modèle théorique du cycle réfrigérant et l'échangeur de chaleur ainsi que d'autres composants de l'enveloppe représente bien la réalité. Il n'a par contre pas été possible d'implémenter l'isolation améliorée qui avait été prévue. Des difficultés ont été rencontrées dans les procédés de fabrication de celle-ci, les causes vont être examinées.

Le but de démontrer expérimentalement l'efficacité énergétique de l'appareil complet n'a pas été complètement atteint. Il a par contre été démontré que le modèle numérique des composants individuels correspond à la réalité. De par ce fait la faisabilité d'un réfrigérateur A++++ se basant sur le concept actuel de cycle réfrigérant dans le socle et d'une répartition du froid par l'air est confirmée. Ceci à condition que l'isolation soit fabriquée de la meilleure qualité possible.

Ausgangslage

„Kühlschränke verbrauchen in Europa, je nach Quelle, 14% - 20% der elektrischen Energie in Haushalten. Schon eine geringe Energieeinsparung der Kühlgeräte hat global gesehen einen signifikanten Einfluss auf die Umwelt. Die ca. 6 Millionen Kühlgeräte in der Schweiz verbrauchen etwa 2500 GWh/a. Zum Vergleich: das Kernkraftwerk Beznau-1 produziert 3000GWh/a. Man kann also sagen, dass ein kleiner Schweizer AKW lediglich für alle Kühlgeräte zuständig ist!“ (Siegrist, Stahl, 2010 [1])

Mit dem Projekt „A++Halbe-Kühlschrank“ hat QUO (ehemals awtec) 2009/10 im Auftrag des BFE gezeigt, wie man aus einem A++ durch Umsetzung des Standes der Technik einen A+++-Kühlschrank entwickeln kann. Das Projekt hat dazu geführt, dass verschiedene Hersteller auf den vorgezeichneten Weg eingeschwenkt sind, so dass A+++ heute in der Schweiz, unabhängig von der angewendeten Technologie, zum Standard gehört. Dies wiederum hat seitens des Gesetzgebers zu verschärften Vorschriften für Neugeräte geführt. Künftig dürfen in der Schweiz nur noch Geräte mit dem Gütesiegel A++ oder besser verkauft werden. Die im ersten Abschnitt beschriebene Situation verändert sich demnach aktuell rasant in Richtung effizientere Stromnutzung. Bis der Löwenanteil der Geräte die gesteigerten Effizienzaufgaben für Neugeräte erfüllt, wird es aber trotzdem noch Jahre dauern.

Ziel der Arbeit

Durch die geschickte Kombination verschiedenster Ansätze könnte bereits mit heutigem Stand der Technik ein weiterer Effizienzsprung möglich sein.

Das Ziel dieses Projektes ist anhand eines konkreten Funktionsmusters aufzuzeigen, wie eine weitere Effizienz-Steigerung resp. Energieverbrauchsreduktion um 50% im Vergleich mit den „best in class“-Kühlschränken (A++) möglich ist. Dies würde ein Gerät mit dem (noch nicht existierenden) Label A++++ erlauben.

Nationale Zusammenarbeit

In dieses Projekt fliesst Know-How von verschiedenen Partnern und aus verschiedenen Quellen ein. Die beteiligten Firmen und Institutionen sind Schweiz bekannt als Experten im Bereich der Thermodynamik und/oder Kühltechnik.

- V-ZUG Kühltechnik AG (nachfolgend VZKT): Kältetechnik, Komponenten, Beschaffung, Produktion, Musterbau, Messtechnik
- V-ZUG AG: Markt, Beschaffung, Kältetechnik
- QUO AG (ehemals awtec AG, Innovations- und Entwicklungspartner): Thermodynamik, Simulation und Berechnungen, Design, Messtechnik, Musterbau
- NTB Hochschule für Technik Buchs (laufendes KTI-Projekt mit V-ZUG Kühltechnik): Kältekreise/Wärmepumpentechnik, Simulation

Grundlagen

Effizienzlabel A++++

Das Energieeffizienzlabel A++++ ist bisher nicht definiert [2],[3]. Wenn man die Abstufungen der heute definierten Energieeffizienzindizes (EEI) betrachtet, sieht man, dass bei gleicher Differenz wie bei A+/A++/A+++ der Energieverbrauch von A+++ zu A++++ halbiert wird.

| Effizienzklasse | EEI [-] | Differenz [-] |
|-----------------|---------|---------------|
| B | 75 | 20 |
| A | 55 | 20 |
| A+ | 44 | 11 |
| A++ | 33 | 11 |
| A+++ | 22 | 11 |

Tabelle 1: Energieeffizienzindizes der Energieeffizienzklassen [3]

In der Folge wird davon ausgegangen, dass ein A++++-Gerät mit der Hälfte des Energieverbrauchs eines A+++-Geräts auskommen muss.

Analyse

In einem Kreativworkshop wurden Ansätze für ein neues, effizientes Kühlschrankkonzept gesucht. Weiter wurden bestehende Ideen bei V-ZUG und V-ZUG Kühltechnik gesammelt und kombiniert. Die so gesammelten Ideen und Ansätze wurden konkretisiert und auf ihre Wirksamkeit und Umsetzbarkeit überprüft. Die wichtigsten Erkenntnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Die folgenden Ansätze haben sich für die Effizienzoptimierung als interessant erwiesen:

- Effizienz der Kälteerzeugung erhöhen
 - Kompressoreffizienz erhöhen
 - Temperaturhub reduzieren
- Kältebedarf reduzieren
 - Dämmwert verbessern
 - Oberfläche reduzieren
 - Temperaturgradient durch Isolation reduzieren

Erhöhung der Effizienz bei der Kälteerzeugung

Ein möglichst effizienter Kältekreis, der gleichzeitig eine hohe Maximalleistung besitzt (wichtig für das Gefriervermögen bei kombinierten Kühl- und Gefriergeräten), benötigt drehzahlvariable Kompressoren. Heutige Kolbenkompressoren besitzen eine sehr ausgereifte Technik [4], aktuelle Modelle erreichen einen Isentropenwirkungsgrad von 0.6-0.66 (Embraco VES [5]). Hier besteht nur wenig Steigungspotential [4].

Um mit einem Kältekreis eine hohe Effizienz zu erzielen, ist es notwendig, den Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmesenke möglichst klein zu halten. Dies lässt sich einfach am Carnot-Wirkungsgrad für Kältemaschinen (höchster möglicher Wirkungsgrad) zeigen:

Der Wirkungsgrad η berechnet sich aus dem Verhältnis der höchsten (T_h) und der niedrigsten (T_n)

Temperatur des Prozesses nach Gl. 1:

$$\eta_{C, \text{Kältemaschine}} = \frac{T_n}{T_h - T_n} \quad \text{Gl. 1}$$

Deswegen ist es für eine effiziente Kälteerzeugung unumgänglich, in Geräten mit stark unterschiedlichen Lagertemperaturen (z.B. in Kühl-Gefrier-Kombinationen) die Kälte je Fach auf unterschiedlichen Verdampfungstemperaturen zu erzeugen.

In einem aktuellen A+++-Kühlschrank von V-ZUG wird die Kälte im Normzustand (25°C) bei einer Kondensationstemperatur von 36°C und einer Verdampfungstemperatur von -28°C erzeugt. Wenn nun durch aktiv angeströmte Wärmetauscher und nach Fach getrennte Kältekreise die Temperaturdifferenz zwischen Fach und Kältemittel auf jeweils 7°C reduziert werden kann, lassen sich in den Fächern die folgenden Effizienzen (COP)¹ erzielen:

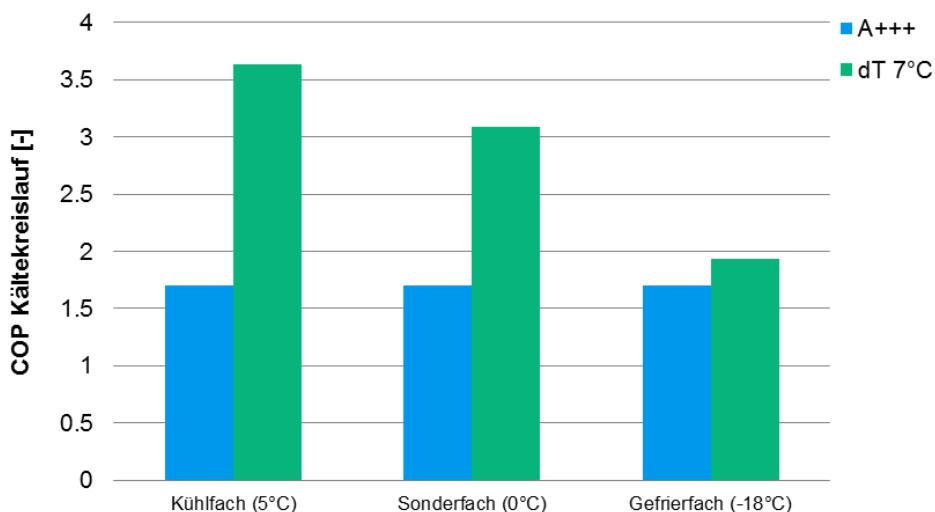


Abbildung 1: Vergleich von Kältekreis-COP zwischen aktuellem A+++-Modell und Kältekreis mit Temperaturdifferenz zwischen Fach und Kältemittel von 7°C

Diese Berechnung betrachtet nur den Kältekreis, der Energieverbrauch von Lüftern, Abtauung etc. ist nicht eingerechnet.

Kältebedarf reduzieren

Herkömmlicher PU-Isolationsschaum besitzt gemäss Herstellerangaben einen Dämmwert von 21 mW/mK. Vakuum-Isolationspaneele liegen bei 2.1-3.6 mW/mK. Durch den Einsatz von Vakuumpaneele lässt sich beispielsweise der Wärmedurchgang bei einer Wandstärke von 40 mm und Paneele mit 25 mm Durchmesser um etwa einen Faktor 4 reduzieren.

Wenn bei zukünftigen Produktentwicklungen vom bestehenden Kühlschrankdesign mit Kompressor-Nische (im untersten Fach) abgewichen werden kann, lässt sich das Verhältnis von Oberfläche pro Nutzvolumen und damit der Energieverbrauch pro Nutzvolumen steigern. Die folgende Tabelle zeigt den Vergleich eines bestehenden Kühlschranks mit optimierten Geometrien:

¹ COP: Coefficient of Performance, Nutzleistung / eingebrachte Leistung

Annahme für Berechnung: isentroper Kompressorwirkungsgrad 0.6, keine Unterkühlung/Überhitzung, Umgebung 25°C

| | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------|
| Innenmasse V-ZUG Cooltronic | 78 l/m ² | 100% |
| Idealisierter Quader mit gleichem Volumen und gleicher Grundfläche (ohne Kompressornische) | 94 l/m ² | 121% |
| Würfel mit gleichem Volumen | 103 l/m ² | 133% |
| Kugel mit gleichem Volumen | 128 l/m ² | 165% |

Tabelle 2: Vergleich Volumen pro Oberfläche für verschiedene Geometrien

Aufgrund der bestehenden Einbauverhältnisse ist das Potential dieser Optimierung des Oberflächen-Volumen-Verhältnis allerdings gering.

Weiter kann der Temperaturgradient über die Oberfläche reduziert werden. Hier sind der kalte Verdampfer im Kühlschrank und der warme Verflüssiger ausserhalb des Kühlschranks die Ansatzpunkte:

- Reduktion Temperaturhub zwischen Verflüssiger und Verdampfer
- Reduktion der Fläche mit hoher Temperaturdifferenz: Kompakte Wärmetauscher mit hoher Energiedichte als Verdampfer und Verflüssiger verwenden
- Verdampfer im Fach und nicht in der Wand: Tiefere Wandtemperatur und besserer Wärmeübergang, aber weniger Nutzvolumen

Vorversuche

Experimente Kältekreis-Varianten

Bei V-ZUG Kühletechnik wird parallel zu diesem Projekt auch die aktuelle Produktlinie gepflegt und weiterentwickelt. Im Rahmen dieser Entwicklung wurden verschiedene Varianten für die Ausgestaltung des Kältekreises, der ausgewählten Komponenten und die Betriebsparameter getestet.

Die Resultate der Versuche bestätigen die Aussagen aus der Analyse.

Teststand

Um Komponenten des Kältekreises, deren Anordnung und die Auswirkung von unterschiedlichen Regelstrategien einfach zu überprüfen, wurde bei QUO ein modularer Teststand geplant und aufgebaut.

Die Maximalkonfiguration des Teststandes beinhaltet die folgenden Komponenten:

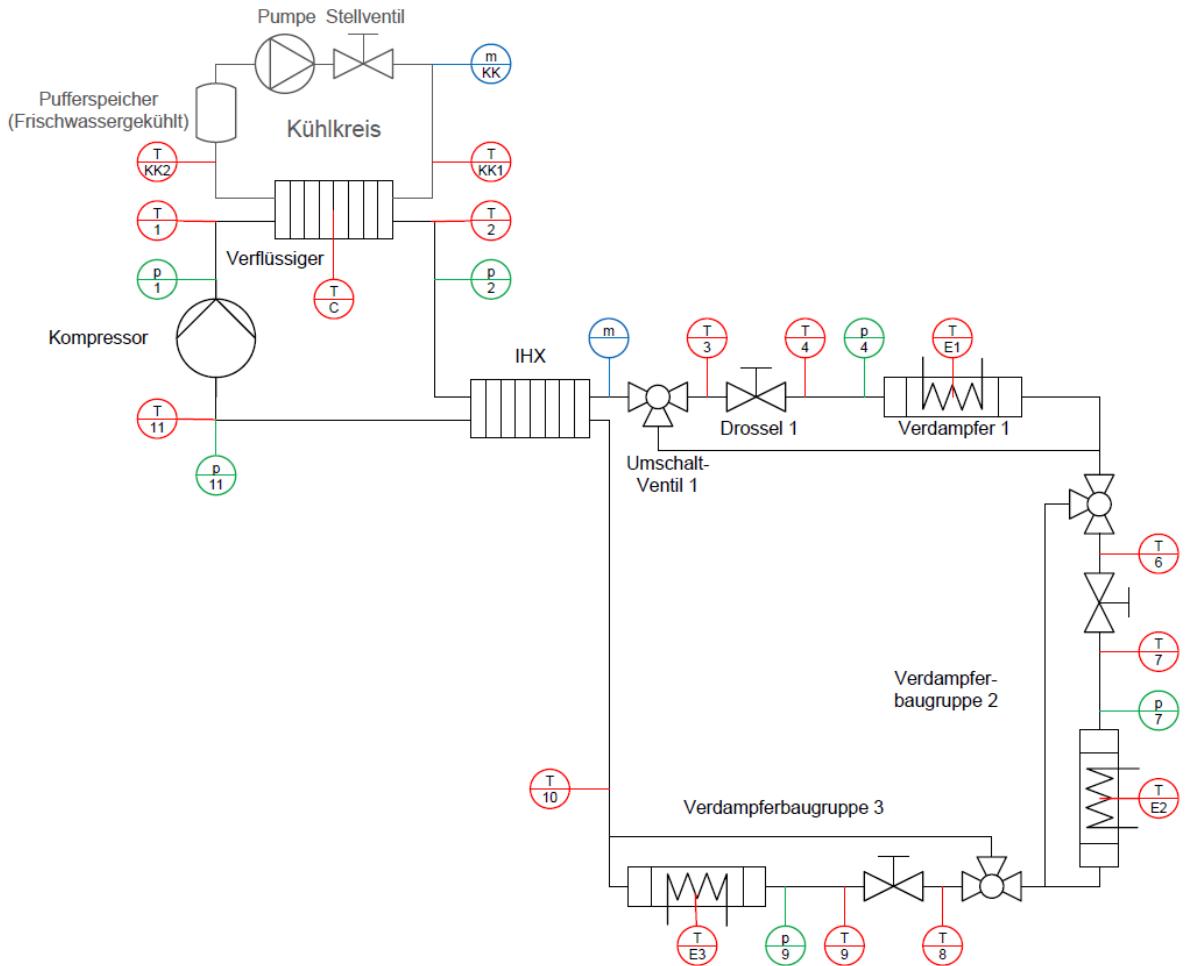


Abbildung 2: Schema Maximalkonfiguration Kältekreis

Mit einem im Vergleich zum obigen Schema reduzierten Aufbau wurden drehzahlvariable Kompressoren und ihr Einfluss auf den Kältekreis und die notwendige Kältemittelmenge überprüft. Weiter wurden die Kapillardimensionen für die Funktionsmuster damit experimentell bestimmt.

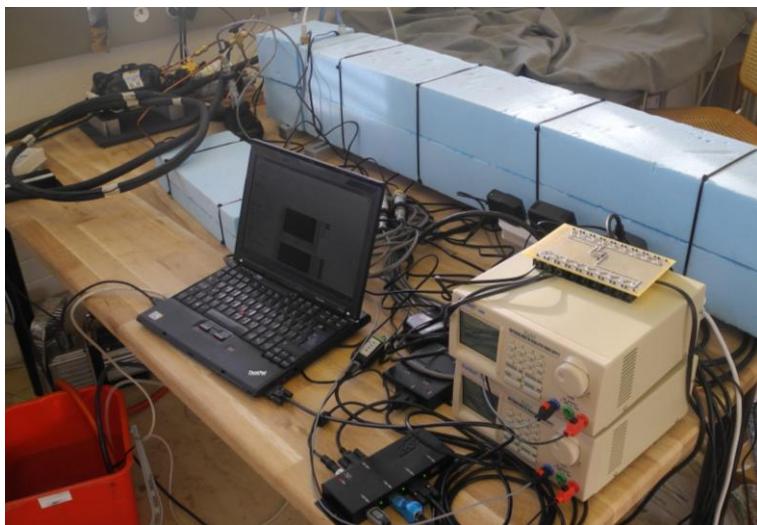


Abbildung 3: Aktueller Testaufbau

Konzeption

Die Analyse hat gezeigt, dass für das Erreichen von A++++ sinnvollerweise nicht nur ein Parameter, sondern das Gesamtsystem optimiert und verschiedenste Ansätze miteinander kombiniert werden müssen. Deswegen wurden verschiedene Gesamtkonzepte erarbeitet.

Variante 1: Evolution

Dieses Konzept ist die konsequente Weiterführung der bestehenden Top-in-Class-Produkte mit doppelter Rückwand für die Luftführung. Neu dazu kommen ein innenliegender Verdampfer und kleinstmögliche Temperaturspreizungen über die Verdampfer.

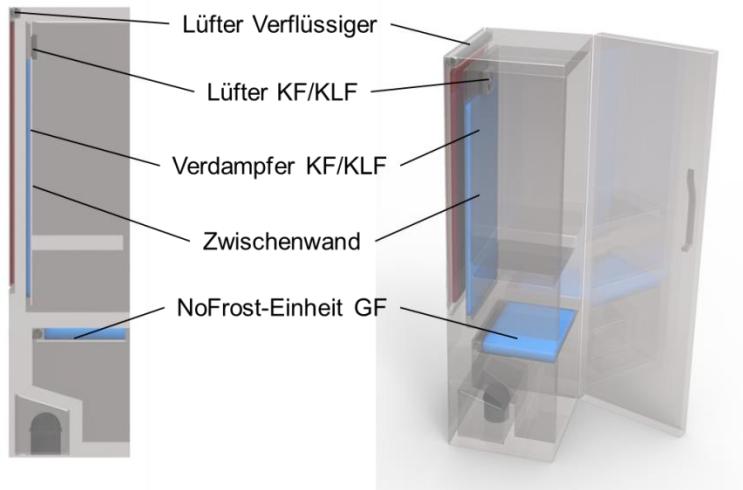


Abbildung 4: Visualisierung Konzept 1 „Evolution“

Die verschiedenen Temperaturzonen können durch die Luftrichtung des Lüfters in der Zwischenwand (doppelte Rückwand) angesteuert werden. Für mehr als drei Temperaturzonen könnten auch noch weitere Lüfter in der Zwischenwand oder zwischen den Fächern für direkten Luftaustausch vorgesehen werden.

Variante 2: Maximale Effizienz der Kältekreise

Dieses Konzept ermöglicht durch mehrere unabhängige Kältekreise mit mehreren Kompressoren (idealerweise ein Kältekreis pro Temperaturzone) eine möglichst hohe Verdampfertemperatur resp. kleinstmögliche Temperaturspreizung und damit die grösstmögliche Kältekreis-Effizienz.

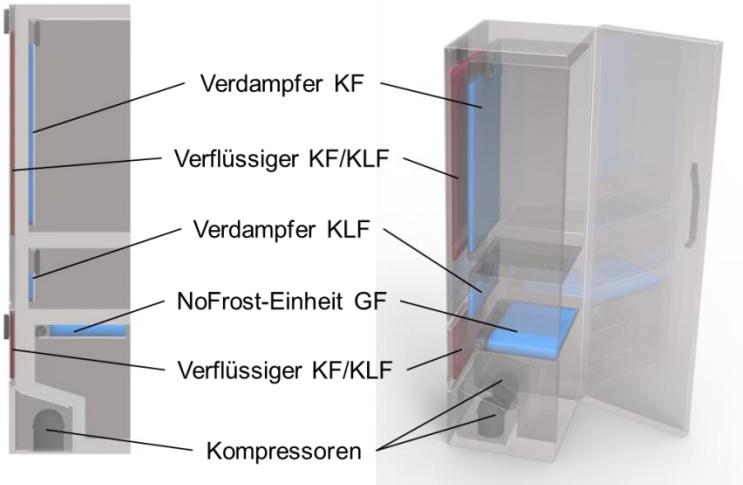


Abbildung 5: Visualisierung Konzept 2 „Maximale Effizienz der Kältekreise“

Die Temperaturzonen werden bei der dargestellten Maximalvariante jeweils mit einem einzelnen Kältekreis individuell gekühlt. Falls pro Kältekreis mehrere Zonen gekühlt werden sollen, würde der jeweilige Verdampfer durch Lüfter und Luftführungen in einer doppelten Rückwand aktiviert (siehe Konzept Evolution).

Variante 3: Maximaler Raum

Dieses Konzept maximiert das Nutzvolumen (innerhalb der gegebenen Norm-Nische), indem Verflüssiger und Verdampfer möglichst kompakt in einen Sockel integriert werden. Die Kälte wird dort zentral erzeugt und über gesteuerte Luftströmungen verteilt. Die Fächer werden nacheinander (seriell) mit Luft unterschiedlicher Temperatur effizient gekühlt. So kann die jeweilige Temperaturspreizung minimiert werden.

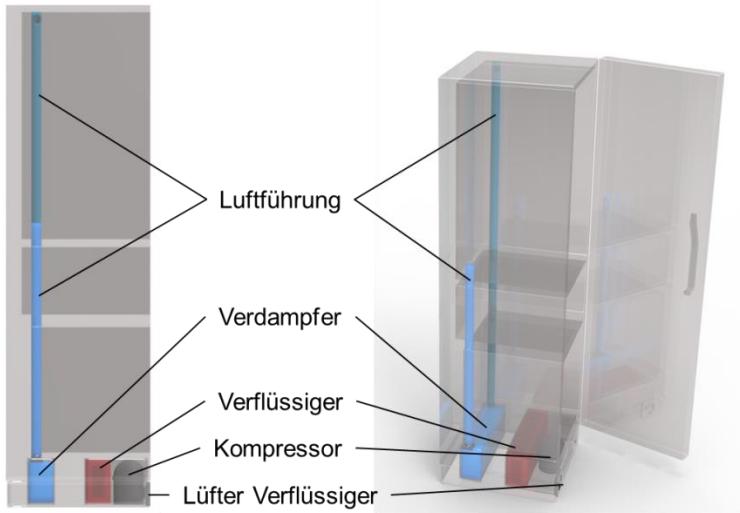


Abbildung 6: Visualisierung Konzept 3 „Maximaler Raum“

Neben dem vergrößerten Nutzvolumen und der Minimierung der Temperaturspreizung bietet dieses Konzept noch weitere Vorteile:

- Die serielle Bedienung der Fächer erlaubt die individuelle Regelung einzelner Temperaturzonen im Kühlschrank. So können im Kühlschrank für verschiedene Lebensmittel unterschiedliche Temperaturzonen geschaffen werden, wodurch deren Haltbarkeit verlängert werden kann.
- Die Kälteverteilung mittels Luft führt zu kondensatfreiem Innenraum. Der Kühlschrank muss somit nicht vom Benutzer abgetaut werden.

Konzeptvergleich und Entscheid

Um die Gesamtkonzepte zu bewerten, wurde das erreichbare Nutzvolumen für die Energieeffizienzklasse A++++ abgeschätzt. Dafür wurde ein Simulationsmodell für den Wärmeeintrag in einen Kühl schrank aufgebaut, die Konzepte darin abgebildet und die Wandstärken soweit angepasst, dass der berechnete Energieverbrauch unter dem Grenzwert für A++++ liegt.

Dabei zeigt sich, dass auch mit dem Ziel A++++, trotz dickerer Isolation, noch ein mit aktuellen Kühl schränken vergleichbares Nutzvolumen erreicht werden kann. Dafür müssen allerdings hochwertige und damit kostenintensive Komponenten, insbesondere dicke Vakuumisolationspaneele, eingesetzt werden.

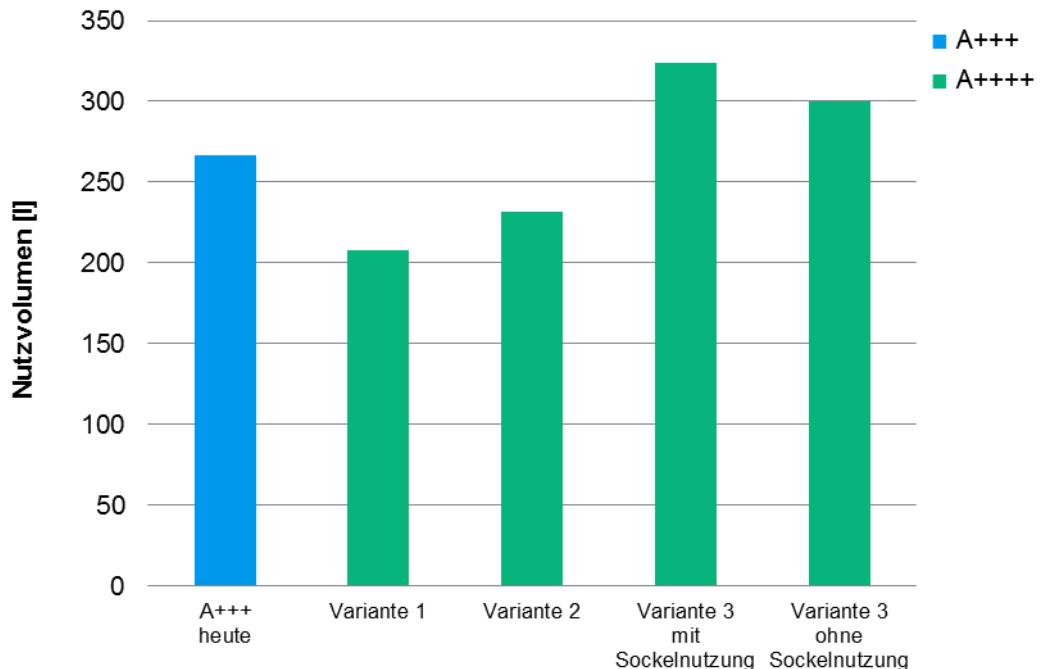


Abbildung 7: Abgeschätztes Nutzvolumen der Konzepte für A++++ im Vergleich zu aktuellem A+++-Modell

Aufgrund des hohen Nutzvolumens sowie der hohen Modularität der Variante 3 wurde entschieden, dieses weiter zu detaillieren und in Funktionsmuster umzusetzen. Die neuen Möglichkeiten der Regelung (individuelle Ansteuerung einzelner Temperaturzonen) sowie die Kondensatfreiheit waren die weiteren Argumente, welche zu diesem Konzeptentscheid beigetragen haben.

Grobauslegung

Für die Grobauslegung wird eine Kühl-Gefrier-Kombination (Kombi) betrachtet mit Normhöhe 14/6 plus 10 cm für den Sockel.

Ablauf

Abbildung 8 zeigt schematisch den Ablauf der Grobauslegung. Aufgrund der Leistungsanforderungen konnte der zu erwartende COP (Leistungsziffer) abgeschätzt und die Isolation und der Wärmetauscher ausgelegt werden. Dadurch waren die notwendigen Luftmengen berechenbar, womit wiederum die Luftwege ausgelegt werden konnten. Diese Auslegung wurde mit den angestrebten Sockeldimensionen verglichen und solange iteriert, bis eine funktionierende Gesamtauslegung vorlag.

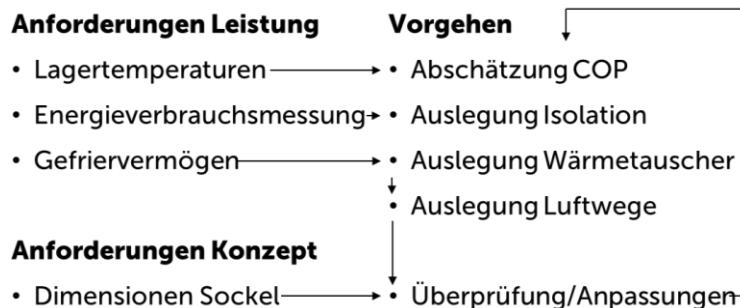


Abbildung 8: Ablauf der iterativen Auslegung

Kältekreis

Aufgrund der Lagertemperaturen in den Fächern und der ersten rechnerischen Abschätzungen zu den Konzepten in der Grobkonzeptphase, wurden Luft- und Kältemitteltemperaturen festgelegt und mit den daraus errechneten Kompressoreffizienzen der zu erwartende COP des Kältekreis errechnet.

Neben den Anforderungen des Norm-Energieeffizienz-Messung (Kategorie ST) sind noch weitere Auslegungspunkte wesentlich (z.B. Tropenanforderungen, Gefriervermögen, etc.), auf diese wird hier aber nicht vertieft eingegangen.

| Fach | Verdampfungs-temperatur | Verflüssigungs-temperatur | COP pro Fach | COP gesamt |
|---------------|-------------------------|---------------------------|--------------|------------|
| Kühlfach | -2°C | 32°C | 3.63 | |
| Kaltlagerfach | -7°C | 32°C | 3.09 | 2.60 |
| Tiefkühlfach | -23°C | 32°C | 1.93 | |

Tabelle 3: Erwarteter COP des Kältekreises nach der Grobauslegung

Der Gesamt-COP über alle Fächer wurde anhand der untenstehenden Isolations-Berechnung abgeschätzt.

Im Vergleich zum heutigen A+++-Kombi-Gerät (COP 1.7) liegt der berechnete COP von 2.60 um rund 50% höher. Die restlichen 50% der notwendigen Energieeinsparung für A+++ plus die Kompensation des Zusatzverbrauchs der Lüfter müssen also mit verbesserter Isolation, tieferer Temperaturdifferenz über die Aussenhülle und höherem Nutzvolumen durch Nutzung des Sockelvolumens erreicht werden.

Die zur Erreichung der Temperaturen notwendigen Kapillardimensionen wurden auf dem Teststand experimentell bestimmt.

Isolation

Die Nischengrösse, die Lagertemperaturen, die Anforderungen aus der Energieverbrauchsmessung und der erwartete COP dienten als Basis für die Isolationsauslegung.

Während der Auslegung hat sich gezeigt, dass die im Kapitel „Konzeption“ zur Abschätzung benutzte Berechnung einen wesentlichen Aspekt nicht berücksichtigt hat: das Volumen der für den Wärmetransport notwendige Luftführung wurde nicht mit eingerechnet. Deswegen ergibt sich in der Folge ein tieferes Nutzvolumen als im Konzeptvergleich. Auch sonst wurde das Berechnungsmodell für die Grobauslegung wesentlich verfeinert.

Die Isolationsdicken wurden iteriert, bis für das resultierende Nutzvolumen der durch die Norm vorgegebene Energieverbrauch rechnerisch erreicht wurde.

| | Dicke PU-Schaum | Dicke Vakuum-Panel | Nutz- volumen | thermischer Verbrauch | elektrischer Verbrauch |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|--------------------------|---------------------------|
| Kühlfach | 25 mm | 25 mm | 165 | 8.1 W _{th} | 2.2 W _{el} |
| Kaltlagerfach | 10 mm | 25 mm | 61 | 3.1 W _{th} | 1.0 W _{el} |
| Tiefkühlfach | 10 mm | 25 mm | 60 | 8.7 W _{th} | 4.5 W _{el} |
| Total | 286 | | | 19.9 W,th | 7.8 W_{el} |
| <i>Verbrauch Lüfter</i> | | | | | |
| <i>Verbrauch Steuerung</i> | | | | | |
| Gesamtverbrauch | | | | | |
| <i>Max. Verbrauch A++++</i> | | | | | |

Tabelle 4: Berechnete Werte für Isolations-Wandstärke, Nutzvolumen und Energieverbrauch

Es ist zu beachten, dass im Hinblick auf Produktionskosten in allen Fächern die gleichen Vakuum-Paneele eingesetzt werden. Wenn das Tiefkühlfach mit dickeren Paneelen ausgerüstet würde, wäre der Gesamt-COP höher aufgrund des geringeren Anteils an mit grosser Temperaturspreizung erzeugter Kälte.

Wärmetauscher/Luftverteilung

Anhand der Auslegung von Kältekreis und Isolation und des geforderten Gefriervermögens wurden die Verdampfer- und Verflüssigerwärmetauscher ausgelegt. Aufgrund der resultierenden Luftmenge wurde über eine analytische Druckverlustrechnung die notwendige Grösse der Luftwege vom Sockel in die einzelnen Zonen berechnet und geprüft, ob der notwendigen Volumenstrom beim gegebenen Volumenstrom durch Lüfter in geeigneter Grösse und Leistung gefördert werden kann.

Funktionsmuster I

Ziel

Aufgrund der vielen Neuerungen zum aktuellen Standard wurde beschlossen, ein möglichst modulares, anpassbares Funktionsmuster zu bauen, damit möglichst viele unterschiedliche Ansätze getestet werden können.

Mit den Funktionsmustertests sollten in erster Linie die Auslegungsberechnungen überprüft, die Leistungsfähigkeit von Komponenten wie Kältekreis, Lüfter, Zonierungsaktoren, etc. verifiziert und Regelkonzepte erarbeitet werden. Um die Tests zu vereinfachen und die Resultate direkt mit den bestehenden Geräten vergleichen zu können, wurden die Wandstärken auf A+++ ausgelegt.

Die notwendige Leistung, um das mindestens geforderte Gefriervermögen von 12 kg zu erreichen, liegt bei ca. 54 W und damit über der Kälteleistung im Normfall. Deswegen wird für ein A++++-System ein ähnlich dimensionierter Kältekreis verwendet wie für ein A+++-System und die Resultate mit der A+++-Isolation können auf A++++ übertragen werden.

Konstruktion/Aufbau

Varianten

Neben der Kühl-Gefrier-Kombination wurden auch ein Kühlschrank (Cooler) und ein Gefrierschrank (Freezer) als Funktionsmuster aufgebaut. Cooler und Freezer sind als Kombination in der Side-by-Side-Aufstellung konzipiert.

Kältetechnik-Modul

Das Kältetechnik-Modul mit allen Komponenten des Kältemittelkreislaufs inkl. der Lüfter zur Aktivierung der Wärmetauscher wurde auf Basis des QUO-Entwurfs (Grobauslegung) durch VZKT auskonstruiert und gebaut.



Abbildung 9: Kältetechnik-Modul Kombi-Kühlschrank von VZKT

Gehäuse

Die Gehäuse der Funktionsmuster wurden aus PU-Schaum-Plattenmaterial aufgebaut und innen mit PMMA-Platten versehen. Auf den Einsatz von Vakuumpaneelen wurde aufgrund der einfacheren Umsetzbarkeit verzichtet. Die Isolation wurde dementsprechend dicker gestaltet. Auf die Aussenseite wurde eine Kunststofffolie als Dampfsperre geklebt.

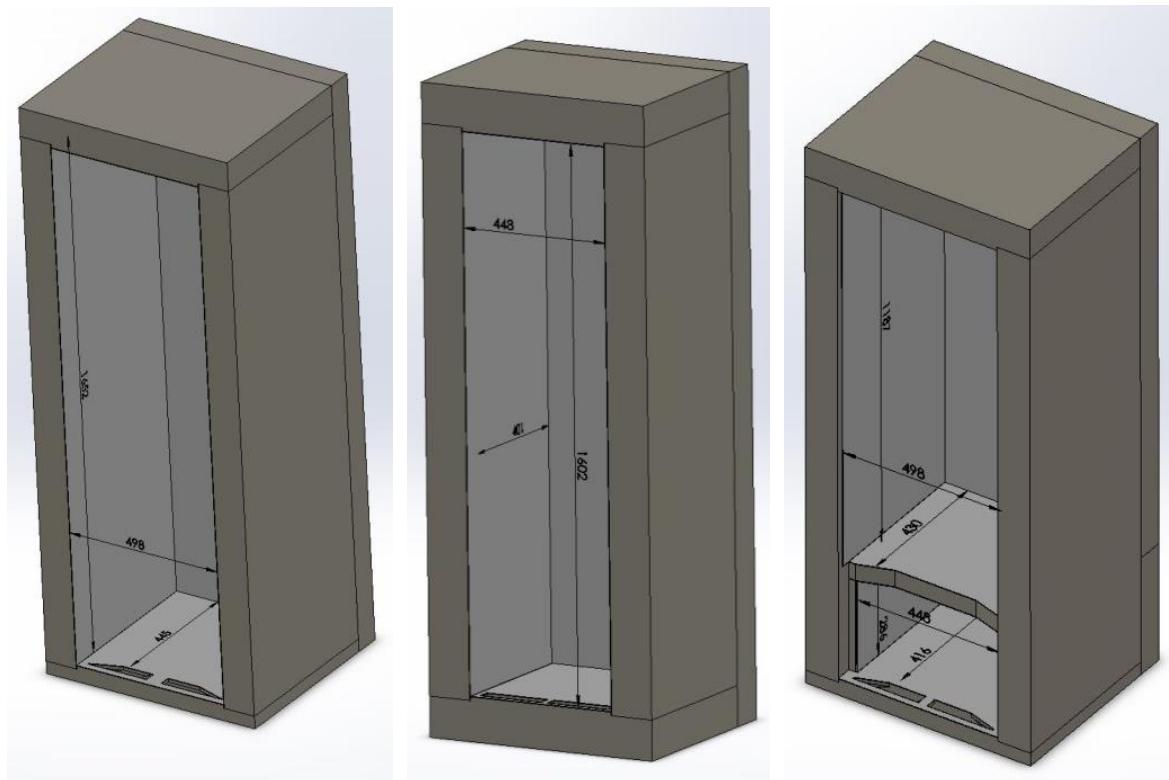


Abbildung 10: Gehäuse und Innenmasse von Cooler, Freezer und Kombi-Funktionsmuster (v.l.n.r.).



Abbildung 11: Aussenhülle des Coolers (links), Innenausbau des Freezers (mitte und rechts)

Elektronik, Steuerung und Sensorik

Jedes Funktionsmuster wurde durch eigene Mess- und Steuerelektronikkomponenten gesteuert, so dass gleichzeitig Versuche mit den verschiedenen Funktionsmustern bei QUO und VZKT möglich waren.

Software

Basis der Steuerung ist eine Steuerungssoftware mit LabVIEW, welche auf einem herkömmlichen Windows-Laptop läuft. Sie übernimmt die Ansteuerung der Kältetechnik und der Schieberaktoren,

wertet die Sensorik aus und zeichnet die Daten auf.

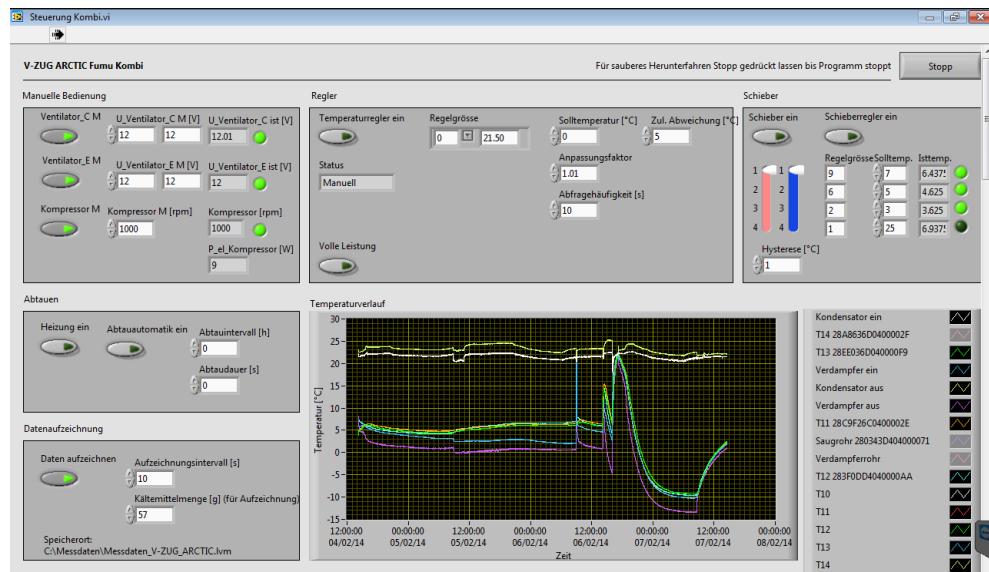


Abbildung 12: Benutzeroberfläche der Steuerungssoftware der Funktionsmuster.

Im Laufe der Testphase wurde die Software kontinuierlich erweitert und auf die Erfordernisse der jeweiligen Funktionsmuster-Variante angepasst.

Testläufe

Mit den Funktionsmustern wurden umfangreiche Test durchgeführt. In der Folge wird auf die Resultate der Überprüfung der Komponenten des neuen Kühlsystems und deren Auslegung gelegt.

Isolation

Die Isolation wurde mit einer Wärmebildkamera auf Lecks überprüft. Auf den Oberflächen (durchgehende Platten) sind nur kleine Temperaturunterschiede vorhanden. Durch die abgeklebten Fugen zwischen den Isolationsspalten sind diese Bereiche im Wärmebild nur schwach zu erkennen (Abbildung 13). d.h. die Fugen sind praktisch frei von Leckagen. Sogar nicht abgeklebte Isolationsspalten sind dicht, sofern sie gut aufeinander liegen. Der Vergleich mit Abbildung 14 zeigt hingegen klar, dass Spalten mit Leckage sichtbar sind.

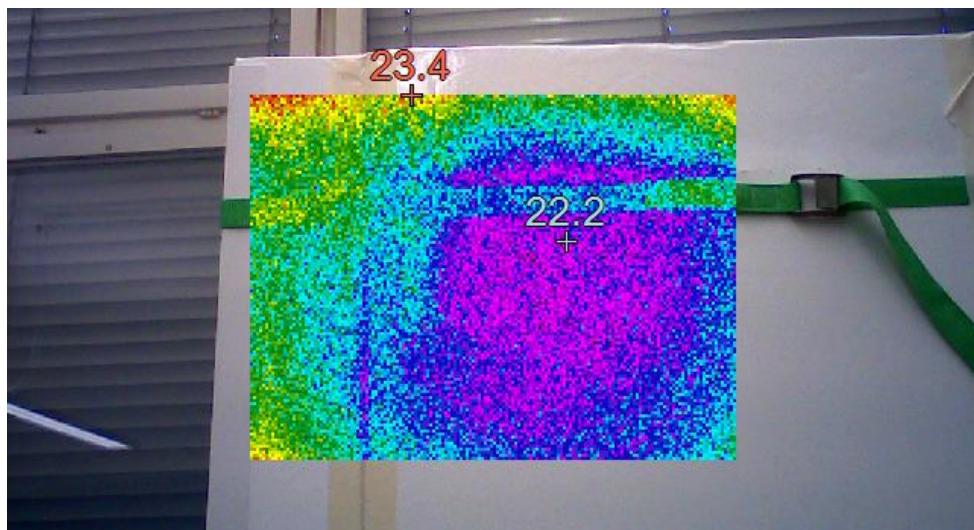


Abbildung 13: Wärmebildkamera-Aufnahme eines abgeklebten Spalts beim Freezer.

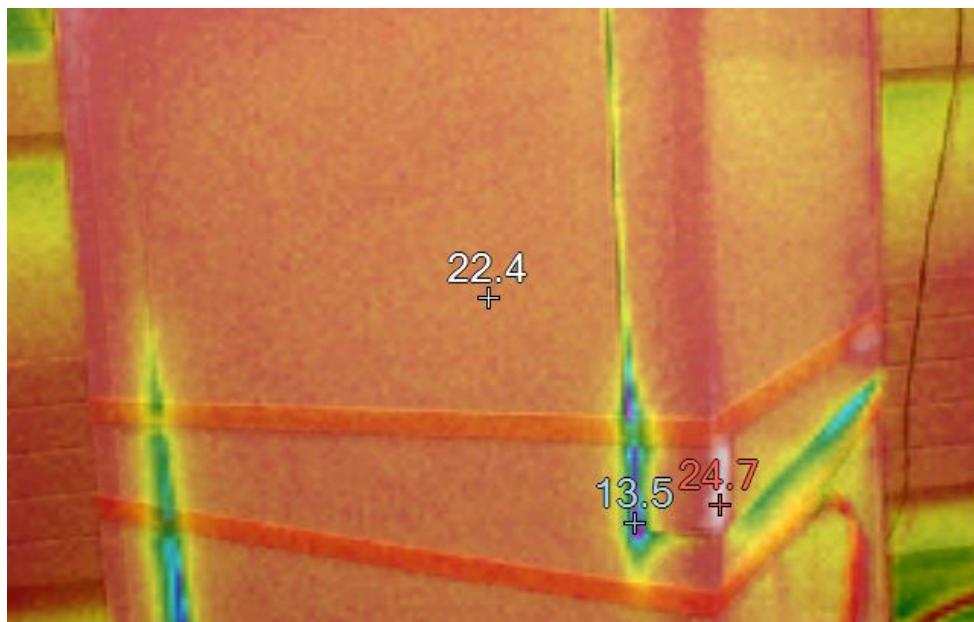


Abbildung 14: Wärmebildkamera-Aufnahme von nicht abgeklebten Spalten mit Leckage (Kombi-Modell).

Ein Problem mit Leckage besteht allerdings beim Übergang zwischen Kältetechnik-Modul und Gehäuse: an den Stellen, an welchen die Kabel unter der Dichtmatte durchgeführt werden, sieht die Wärmebildkamera (Abbildung 15) Temperaturen unter 0°C; ein klares Anzeichen für Leckage. Die Dichtmatte

selbst bildet auf der gesamten Breite eine Wärmebrücke.

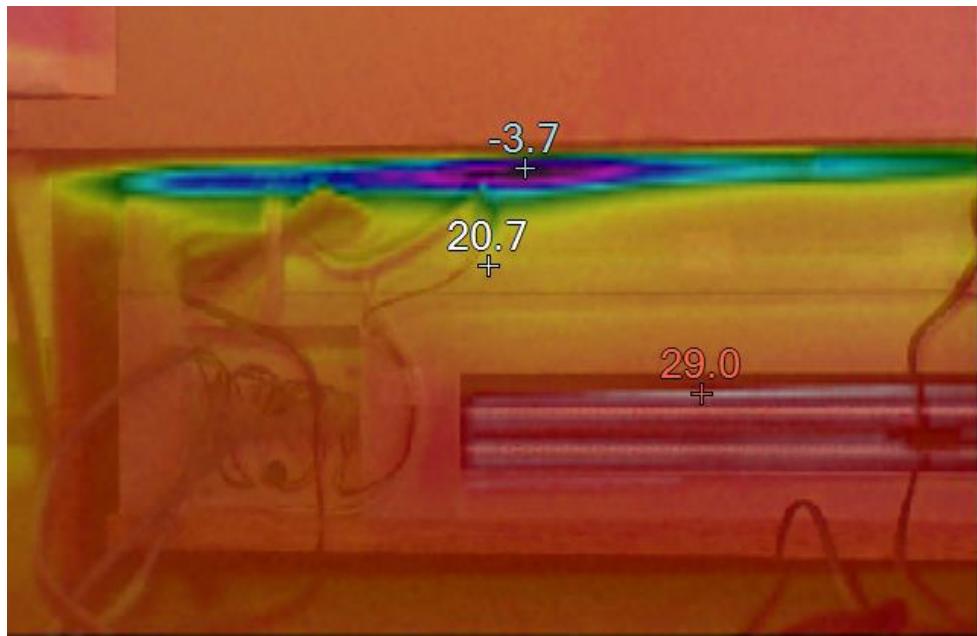


Abbildung 15: Leckage und Wärmebrücke beim Übergang zwischen Kältetechnik-Modul und Gehäuse.

Weiter wurde die Isolationsgüte des Freezers abgeschätzt. Dabei hat sich gezeigt, dass der Wärmeeintrag durch die Isolation je nach Messung 50-80% über dem zuvor berechneten Auslegungs-Wert liegt. Aufgrund der vorhandenen Messwerte wird davon ausgegangen, dass Leckagen und Wärmebrücken für den schlechten Wert verantwortlich sind.

Luftführung

Zur Überprüfung der Luftführungsauslegung wurde die Druckdifferenz über die Innenraumlüfter bei verschiedenen Betriebspunkten gemessen. Es hat sich dabei gezeigt, dass der Gesamtdruckverlust im System um ca. 30% höher ist als bei der Auslegung berechnet. Dies ist hauptsächlich auf das Kältetechnik-Modul und den Übergang zwischen Kältetechnik und Gehäuse zurückzuführen, denn die anhand der Messdaten abgeschätzten Druckverluste in der Rückwand liegen leicht unter den berechneten Werten.

Auch die Förderleistung der Lüfter wurde grob experimentell überprüft. Dabei hat sich gezeigt, dass die Luftleistung im geforderten Druckbereich den Datenblattwerten entspricht. Dies ist in Abbildung 16 gezeigt.

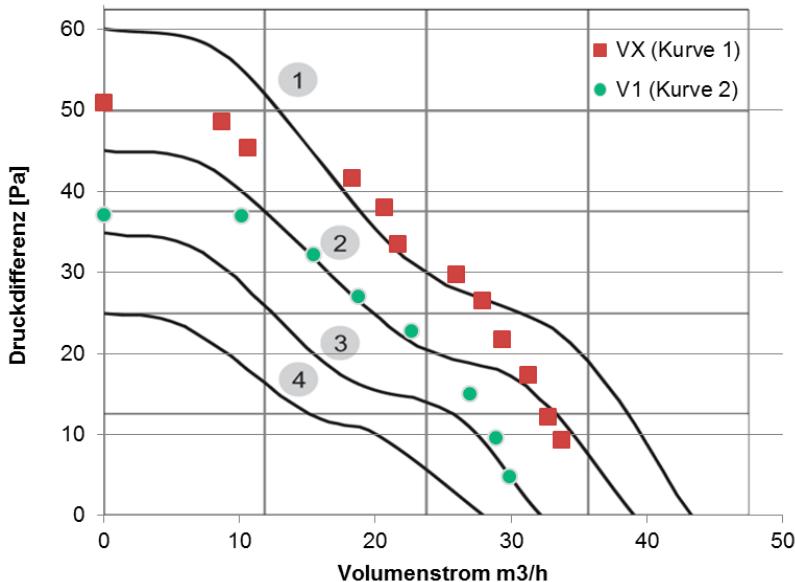


Abbildung 16: Lüfterkennlinie für die verbauten Lüfter (schwarze durchgezogene Linie) und Messwerte (rote und grüne Markierungen). Die Messung wurde für die Beiden Lüfter VX und V1 durchgeführt, wobei die Kennlinie 1 zum Lüfter VX gehört und die Kennlinie 2 zum Lüfter V1.

Wärmetauscher/Kältetechnik

Anhand von Messungen am Verdampfer des Freezer-Funktionsmusters wurde die Wärmetauscherauslegung überprüft. Dafür wurde eine möglichst stabile Messung ausgewählt und mit den Auslegerechnungstools ein exakt den Versuchsparametern entsprechendes Kühlssystem berechnet. Die Resultate wurden mit den gemessenen Daten verglichen.

Die aus den Messdaten extrahierten Leistungswerte für den Verdampfer sind um 7% höher als in der Auslegung vorausgesagt – die Auslegung ist also konservativ.

| | | |
|------------------------------|-----|---------|
| Temperatur Luft | ein | -17.7°C |
| | aus | -21.0°C |
| Verdampfungstemperatur | | -27.7°C |
| Kälteleistung Experiment | | 60.0 W |
| Kälteleistung Auslegungstool | | 56.0 W |
| Differenz | | 7% |

Tabelle 5: Überprüfung Wärmetauscherauslegung anhand Experiment

Energieverbrauch

Der Freezer wurde bei VZKT in der Klimakammer in einem normnahen Test bei 25°C geprüft. Dabei sind mehrere Messungen durchgeführt worden. Bei den angestrebten Kompressor- und Lüfter-Einstellungen konnte aufgrund des höheren Druckverlustes nicht die notwendige Temperaturhomogenität im Gerät erreicht werden. Zur besseren Durchmischung wurde deshalb die Lüfterdrehzahl auf das Maximum eingestellt. Auf diese Betriebsweise lag der Energieverbrauch ca. 30% über dem A+++-Standard. Wenn die Resultate mit den geplanten Lüfter-Einstellungen auf Normbedingungen hochgerechnet werden, so kommt der Energieverbrauch auf 15% über dem A+++-Standard zu liegen.

Bei allen Effizienzmessungen ist zu berücksichtigen, dass die Isolationshülle um 50-80% mehr Wärmedurchgang zulässt, die Lüfter im Funktionsmuster einen höheren Luftwiderstand überwinden müs-

sen als angenommen und deswegen wesentlich mehr elektrische Leistung aufnehmen.

Fazit Funktionsmuster I

Die Versuche mit den ersten Funktionsmustern haben gezeigt, dass die Auslegung des Kältekreises und den Wärmetauschern, aber auch der Luftführung im Gehäuse die Realität gut abbilden. Die Übergänge zwischen Kältetechnik-Modul und Gehäuse und die Geometrie innerhalb des Kältetechnik-Moduls wurde aber zu wenig detailliert betrachtet.

Aufgrund der Leckagen und Wärmebrücken in der Isolation kann über die Gehäuse-Auslegung aufgrund der ersten Versuche noch nichts ausgesagt werden. Für eine Bestätigung der Machbarkeit eines A+----Kühlschranks mit dem angestrebten Konzept ist dies aber notwendig. Dafür wurde das im folgenden Kapitel beschriebene Funktionsmuster II aufgebaut.

Das Funktionsmuster besitzt noch viel Optimierungspotential zur Effizienzsteigerung:

- Dichtes Gehäuse ohne Wärmebrücken
- Optimierung der Luftwege in Kältetechnik-Modul und Gehäuse
- Verbesserte Luftverteilung im Kühlraum zur Einsparung von Luftfördervolumen
- Miniaturisierung des Kältetechnik-Moduls zum Erreichen von mehr Nutzvolumen

Ein dichteres, besser isolierendes Gehäuse kann durch einen seriennäheren Aufbau mit tiefgezogenem Behälter, geschäumter Isolation und einer herkömmlichen Kühlschranktür erreicht werden. Weiter ist eine feste Positionierung und saubere Abdichtung des Überganges zwischen Kältetechnik-Modul und Gehäuse notwendig.

Um den Druckverlust in der Luftführung zu reduzieren, muss hauptsächlich der Übergang zwischen Kältetechnik und Gehäuse optimiert werden: genauer positionierte Übergänge ohne sprunghafte Verengungen und Aufweitungen und eine möglichst kontinuierliche Querschnittsfläche müssen erreicht werden. Zusätzlich zu den experimentellen Aktivitäten wird die Luftführung im Rahmen eines parallel laufenden Projekts mittels Simulations-Software am NTB Buchs rechnerisch optimiert.

Das Kältetechnik-Modul kann aufgrund der Erkenntnisse aus den Versuchen vereinfacht und teilweise mit kompakteren Komponenten ausgerüstet werden. Weiter liegt in einer rechnergestützten Optimierung der Isolation noch viel Potential.

Funktionsmuster II

Ziel

Während der Versuche mit dem ersten Funktionsmuster wurde erkannt, dass die aus Platten aufgebauten Gehäuse aufgrund von Lecks und Wärmebrücken keine Aussage über die Energieeffizienz des Konzeptes ermöglichen. Deswegen wurde ein neues, seriennäheres Gehäuse konstruiert und aufgebaut, das mit den bestehenden Kältetechnik-Modulen verwendet werden kann.

Konstruktion/Aufbau

Das Gehäuse besteht aus einem einteiligen Innenbehälter, einer Stahlblech-Aussenhülle und ist mit eingeschäumten Vakuum-Paneelen ausgerüstet. Die Luftführung aus dem Funktionsmuster I wurde übernommen.



Abbildung 17: Seriennaheres Funktionsmuster für die exaktere Bestimmung des Energieverbrauches

Das Kältetechnik-Modul wurde mit einem zusätzlichen Aussengehäuse fix positioniert, die Kabeldurchführungen und der Übergang zwischen Kältetechnik-Modul und Gehäuse abgedichtet.



Abbildung 18: Gehäuse für Kältetechnik-Modul

Testläufe

Das zweite Funktionsmuster konnte die Resultat-Lücken der ersten Version nur teilweise schliessen: obwohl das Gehäuse und der Übergang zwischen Kältetechnik-Modul und Gehäuse optimiert wurden, konnten die Betriebszustände des ersten Funktionsmusters nicht reproduziert werden.

Der Kältekreis entspricht auch in der zweiten Testreihe der Auslegung sehr gut. Auslegungsdrücke und -temperaturen im Kältemittel werden erreicht, die Messresultate zeigen, dass die Kälteleistung auch tatsächlich an die Luft abgegeben wird.

In den Kühlfächern können die für die Erfüllung der Norm notwendigen Temperaturen jedoch bei Weitem nicht erreicht werden: Bei identischen Parametern wie im ersten Funktionsmuster wird die Luft statt auf -18°C nur auf etwa -10°C abgekühlt. Da der Kältekreis die geforderte Leistung bringt, muss das Problem nach dem Ausschlussprinzip in der Isolation des Gehäuses liegen.

Ursachenforschung

Beim Einschäumen des Innenbehälters sind Schwierigkeiten aufgetreten – beim ersten Versuch wurden eingelegte Vakuum-Paneele beschädigt. Diese wurden allerdings ausgetauscht und neu eingeschäumt. Gemäss optischer Kontrolle war das Gehäuse anschliessend gut verarbeitet.

Da sich die Geometrie des Übergangs zwischen Kältetechnik-Modul und Gehäuse im Vergleich zum ersten Funktionsmuster geändert hat, wurden diese zuerst überprüft. Um Einflüsse zu verhindern, wurde das neue an das erste Funktionsmuster angeglichen. Diese Massnahme hatte allerdings keinen wesentlichen Einfluss auf die Messungen.

Die in der Auslegung verwendeten Wärmeleitwerte der Materialien (PU-Schaum und Vakuum-Isolationspaneele) wurden im Lauf des Projektes in separaten Tests experimentell überprüft und bestätigt.

Aufgrund der genannten Überprüfungen ist davon auszugehen, dass von aussen nicht erkennbare Lecks, Wärmebrücken, mangelhaft ausgeschäumte Bereiche und/oder defekte Vakuum-Isolationspaneele den unerwartet hohen Kühlbedarf hervorrufen.

Mittels lokalen Temperaturmessungen wurden undichte Stellen gesucht. Auch diese Suche war nicht erfolgreich. Aufgrund der Integralbauweise und der Stahl-Aussenwände ist die weitere Überprüfung der Isolation schwierig und kaum zerstörungsfrei möglich. Deswegen werden aktuell trotz der ungenügenden Isolationswerte noch weitere Versuche zur Luftführung durchgeführt, um noch möglichst viele brauchbare Informationen aus dem Funktionsmuster herauszuholen.

Anschliessend an die laufenden Versuche soll das Funktionsmuster demontiert werden, um die Ursachen des hohen Kältebedarfes zweifelsfrei zu finden und Rückschlüsse für den Herstellungsprozess und ggf. die Auslegung ziehen zu können.

Fazit Funktionsmuster II

Das Ziel, eine experimentelle Bestätigung der Isolationsauslegung und der Energieeffizienz des Gesamtgerätes, konnte mit dem zweiten Funktionsmuster leider nicht erreicht werden. Welche Konsequenzen dies für die Weiterentwicklung bedeutet, kann erst nach Abschluss der Ursachenforschung bestimmt werden.

Die Leistungsfähigkeit der Sockel-Komponenten wurde auch im zweiten Funktionsmuster bestätigt.

Fazit & Ausblick

Die Experimente mit den Funktionsmustern haben gezeigt, dass die Auslegung der einzelnen Komponenten die Realität gut abbildet und damit die Machbarkeit eines A++++-Kühlschranks auf Basis des aktuellen Konzeptes mit Kältetechnik im Sockel und der Kälteverteilung über Luft bestätigt. Es fehlt jedoch der experimentelle Nachweis. Untersuchungen des zweiten Funktionsmusters werden zeigen, welche Anpassungen an der Geometrie und/oder am Herstellungsprozess notwendig sind, um ein genügend gut isolierendes Gehäuse herzustellen, damit A++++ erreicht werden kann.

Neben den in diesem Bericht beschriebenen Resultaten wurden mit den Funktionsmustertests auch Informationen über den Betrieb und die Regelung eines solchen Gerätes erarbeitet.

In der Folge wird bei V-ZUG Kühletechnik mit Unterstützung durch QUO die Konstruktion des Kältetechnik-Moduls komplett überarbeitet und mittels FEM analysiert und miniaturisiert. Weiter soll das Luftführungssystem optimiert und die Geometrien auf die Produktionsmöglichkeiten angepasst werden.

Parallel dazu müssen der Einsatz des Konzeptes im Sortiment von V-ZUG definiert und daraus die zusätzlichen Anforderungen an das Kühlssystem, Steuerung/Regelung, Innenraumgestaltung etc. definiert werden.

Referenzen

- [1] *Siegrist, Marco, Stahl, Stefan*: (2010) „Modifizierter A++-Standard-Kühlschrank mit 30% Verbrauchsreduktion“ <http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/20716.pdf>
- [2] *IEC* (2013) „Haushalt-Kühl-/Gefriergeräte - Eigenschaften und Prüfverfahren“, IEC-Norm 62552:2013
- [3] *EU* (2010) „Delegierte Verordnung (EU) Nr. 1060/2010 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Kennzeichnung von Haushaltskühlgeräten in Bezug auf den Energieverbrauch“, 28. September 2010
- [4] *Possamai, Fabricio C. and Todescat, Marcio L.* (2004) „A Review of Household Compressor Energy Performance“ International Compressor Engineering Conference. Paper 1711, <http://docs.lib.psu.edu/icec/1711>
- [5] *Embraco* Kompressordatenblätter CECOMAF
VEM C7C: 513906030, 27. September 2011
VES D7C: 513907007, 10, Juli 2012
weitere Daten von <http://www.embraco.com>