



Schlussbericht 31. Mai 2010

Modifizierter A⁺⁺-Standard-Kühlschrank mit 30% Verbrauchsreduktion

Effizienzsteigerung durch Verdichtermodifikation

Auftraggeber:

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

Kofinanzierung:

ewz Stromsparmfonds, CH-8050 Zürich

Auftragnehmer:

awtec AG für Technologie und Innovation
Leutschenbachstrasse 48
CH-8050 Zürich
www.awtec.ch

Autor:

Dr. Marco Siegrist, awtec AG für Technologie und Innovation, marco.siegrist@awtec.ch
Stefan Stahl, awtec AG für Technologie und Innovation, stefan.stahl@awtec.ch
Korreferat: Dr. Jochen Ganz, awtec AG für Technologie und Innovation,
jochen.ganz@awtec.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Roland Brüniger

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153747 / 102923

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Resumé	5
Abstract	6
1. Ausgangslage	7
1.1. Zielsetzungen	8
1.2. Gewählter Lösungsweg	8
2. Kompressorenhersteller	9
3. Versuchsaufbau	10
3.1. Kühltisch	10
3.2. Kompressoren	11
3.2.1. Serienkompressor Embraco EMX32CLC	11
3.2.2. Drehzahl geregelter Kompressor Embraco VCC3 VEM X5C	12
3.2.3. Vergleich der Kompressoren	13
3.2.4. Einbau	15
3.3. Befüllung	16
3.4. Temperaturmanagement	17
3.5. Mess- und Steuersystem	19
3.5.1. Hardware	20
3.5.2. Mess- und Steuerungssoftware	20
3.6. Gesamtsystem	22
4. Messungen	23
4.1. Verlauf der Messung	23
4.2. Versuche bei awtec	24
4.2.1. Normierte Energieeinsparung	26
4.2.2. Einfluss der Kompressordrehzahl auf den Energieverbrauch	27
4.2.3. Einfluss der Kompressorlaufzeit auf die Energieaufnahme	28
4.2.4. Einfluss der Füllmenge auf die Energieaufnahme	30
4.2.5. Grösste Energieeinsparung	31
4.3. Messung gemäss EN15502 in der Klimakammer	32
5. Schlussfolgerungen	33
6. Empfehlung für das weitere Vorgehen	34
Referenzen	35
Anhang	36

Zusammenfassung

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 3000 GWh/a. Man kann also sagen, dass ein kleines Schweizer AKW lediglich für alle Kühlgeräte zuständig ist!

Signifikanter globaler Einfluss

In diesem Projekt wurde gezeigt, dass durch einfache Modifikationen an einem handelsüblichen Kühlschrank der zurzeit besten Energieklasse A⁺⁺ bis zu 27% der elektrischen Energie eingespart werden kann. Der modifizierte Kühlschrank wurde im Direktvergleich gegen ein Seriengerät getestet.

27% weniger Verbrauch als A⁺⁺-Gerät

Handelsübliche Kühlschränke arbeiten mit einem Kompressor, der bei einer fixen Drehzahl läuft und über einen Thermostat ein- oder ausgeschaltet wird. Bei Raumtemperatur und stets geschlossenem Kühlschrank läuft der Kompressor zu etwa einem Viertel der Zeit. Diese Betriebsart ist ineffizient aufgrund der vielen Anlaufzyklen und den hohen Temperaturgradienten, die zwischen dem Kühlraum und dem Kältekreislauf entstehen.

Heute: Fixe Kompressor-Drehzahl

Der von uns modifizierte Kühlschrank wurde mit einem drehzahlgesteuerten Kompressor ausgestattet, der bei wesentlich tieferen Drehzahlen betrieben werden konnte und bis zu 90% der Zeit durchlief. Es konnte gezeigt werden, dass mehr Energie eingespart wird, je länger der Kompressor läuft. Der Kompressor wurde über einen externen Rechner gesteuert. Gleichzeitig wurden diverse Temperaturdaten aufgenommen.

Drehzahl-geregelter Kompressor

Für die Umsetzung in ein marktfähiges Produkt empfehlen wir, einen autonomen (ohne externe Steuerung) seriennahen Pilotkühlschrank zu entwickeln. Dabei muss die Wirtschaftlichkeit im Vordergrund stehen. Der Kunde ist nicht bereit, wesentlich mehr für einen energieeffizienteren Kühlschrank zu bezahlen, da die finanzielle Einsparung über die Lebensdauer des Gerätes (etwa 15 Jahre) lediglich ~CHF 100 beträgt.

Pilot-kühlschrank

Um den nächsten Schritt effizient zu gestalten ist es essentiell, in der nächsten Projektphase einen Kühlschrankhersteller als weiteren Partner zu haben. So kann gewährleistet werden, dass nicht am Markt vorbei entwickelt wird und die notwendigen technischen Informationen vorhanden sind. Ein Partner mit grossem Marktgewicht wäre wünschenswert, einerseits um mehr Druck auf die Kompressorhersteller zu machen, andererseits um bei der Markteinführung eine grosse Auswirkung zu ermöglichen.

Kühlschrank-Hersteller als zusätzlichen Projektpartner

Resumé

En Europe, 14% - 20% de l'énergie électrique consommée par les menages est utilisée pour les différents systèmes de refroidissement. Une petite réduction de la consommation de cette énergie aurait un effet important sur l'environnement. Les quelques 6 millions unités de refroidissement en Suisse consomment autour de 2500 GWh/a. En comparaison, Beznau-1 produit 3000 GWh/a. De façon conséquente, une plante nucléaire Suisse est nécessaire seulement pour le refroidissement.

Effet global important

Ce projet a montré que des modifications simples à un réfrigérateur commercial de la la meilleure classe énergétique (A++) réduisent sa consommation d'énergie électrique jusqu'à 27%. Le réfrigérateur modifié a été testé directement en comparaison avec un produit de série.

Consommation : 27% de moins que A++

Réfrigérateurs commerciaux fonctionnent à base d'un compresseur à vitesse fixe, ils sont réglé avec un thermostat. À conditions normales, le compresseur du réfrigérateur est en marche environ un quart du temps. Ce mode est inefficace en raison des nombreuses démarrages , des pertes internes et des gradients de température élevée entre le réfrigérateur et le circuit de refroidissement.

Aujourd'hui: vitesse de rotation fixe

Le réfrigérateur modifié a été équipé d'un compresseur à vitesse de rotation variable. Ce compresseur peut être utilisé à vitesses beaucoup plus basses, pour cette raison il est en marche jusqu'à 90% du temps. On a montré que plus le compresseur est en marche, moins d'énergie est consommée. Le compresseur est contrôlé par un ordinateur externe.

Compresseur à vitesse de rotation variable

Pour la prochaine étape, un prototype d'un produit commercialisable doit être construit, qui fonctionne sans le contrôle externe d'un ordinateur. Le sujet de coût-efficacité est très important. Le client privé n'est pas disposé à payer beaucoup plus pour un réfrigérateur efficace, car l'épargne financière pendant la durée de vie (environ 15 ans) est seulement ~CHF 100.

Prototype

Il est essentiel d'inclure un fabricant de réfrigérateurs comme partenaire pour cette prochaine étape, pour assurer la disponibilité des informations techniques et économiques nécessaires.

Fabricant de réfrigérateurs comme partenaire

Abstract

In Europe 14% - 20% of the electrical energy in homes is consumed by various food cooling units. A small reduction in their energy consumption would have a significant impact on the global environment. The 6 Million food cooling units in Switzerland consume about 2500 GWh/a. As a comparison: Beznau-1, a small nuclear power plant in northern Switzerland, produces 3000 GWh/a. It is fair to say that one Swiss nuclear power plant is needed just for cooling food!

Significant global impact

In this work we have shown, that up to 27% electrical energy can be saved by simple modification of a class A⁺⁺ refrigerator. The modified refrigerator was tested directly against the serial product.

27% less electricity consumption

Today's refrigerators run with a compressor at a fixed rotation speed, which is turned on and off by a thermostat. At room temperature and with closed doors the refrigerator runs about one fourth of the time. This mode of operation is inefficient because of the frequent start-up of the compressor, high internal losses due to the high flow rates and the large thermal gradient between the cooled volume and the cooling circuit.

Today: fixed rotation speed

The modified refrigerator was fitted with compressor with variable revolution speed. This compressor could be run at much lower speeds so that it ran up to 90% of the time. It was shown that less electricity was consumed the more the compressor ran. The compressor was controlled by a computer which at the same time collected various temperature data.

Compressor with variable revolution speed

For the next step, the development of a marketable product, a „close to series“ refrigerator shall be built, which runs without external control by a computer. The cost effectiveness is very important. The end customer is not willing to pay much more for a more energy efficient refrigerator because the financial saving over the lifetime of the appliance (about 15 years) is only ~CHF 100.

„close to series“ refrigerator

It is essential to have a refrigerator manufacturer as a partner for this next step in order to make sure that we are developing in the right direction and that the necessary technical information on the refrigerators is guaranteed. A key market player would be of great interest because he would be able to put more pressure on the compressor manufacturers and the introduction of this technology in the market would have a larger impact.

Refrigerator manufacturer as a partner

1. Ausgangslage

Kühlschränke verbrauchen je nach Quelle 14% - 20% der elektrischen Energie in Haushalten. Bei topten.ch [1] findet man folgende Aussage:

„Über 6 Millionen Kühl- und Gefriergeräte verbrauchen in der Schweiz rund 2,5 Milliarden Kilowattstunden Strom pro Jahr. Das entspricht etwa 4% des Gesamtstromverbrauchs. Werden Kühl- und Gefriergeräte altersbedingt oder wegen Defekten durch Neugeräte der Energieklasse A++ ersetzt, führt das zu erheblichen Stromeinsparungen. Kühl- und Gefriergeräte der Energieklasse A++ brauchen nur etwa halb so viel Strom wie Geräte der Energieklasse A.“

Die Auswechslung der Schweizer Kühlschränke (Wechsel von A zu A++) bewirkt demzufolge eine Einsparung von 1'250 GWh/a. Wird der Energieverbrauch des Kühlschranks nochmals halbiert so können weiter 600 GWh/a eingespart werden. Da Kühlschrank nur etwa alle 15 Jahren ausgewechselt werden, ist es sinnvoll, in einem Generationenwechsel ein möglichst hohes Einsparpotential zu realisieren.

Das Hauptaugenmerk bei der energetischen Verbesserung von Kühlschränken in den letzten Jahren lag auf der Isolation. Folgende Parameter begrenzen das Optimierungspotential:

- Das Verhältnis von Nutzinhalt zu Gesamtvolumen darf vernünftige Grenzen nicht unterschreiten
- Zugänglichkeit und Benutzerkomfort im Alltagsgebrauch
- Raumwarme Produkte, die heruntergekühlt werden müssen
- Kältekreislauf
- Herstellkosten/Realisierbarer Verkaufspreis

Analysiert man einen bestehenden Kühlschrank, so erkennt man schnell, dass bei den heute gängigen Kompressorkühlschränken das grösste Optimierungspotential beim Verdichter im Kältekreislauf liegt [2].

Global gibt es ganz wenige sehr grosse Kompressorhersteller (z.B. Danfoss, Embraco) und viel mehr Kühlschrankhersteller, die die Kompressoren alle bei den gleichen Quellen beziehen. Das bedeutet, dass in den Köpfen der Kühlschrankhersteller beim Kompressor keine Differenzierungsmöglichkeit besteht und somit stellt dies ein unattraktives Feld für Innovationen dar. Die Kompressorhersteller nehmen entsprechend den Markt aus ihrer Perspektive als extrem preissensitiv wahr. D.h. all ihre Anstrengungen haben den Fokus der Herstellkostensenkung – nur so können sie noch grössere Stückzahlen realisieren, was sich positiv auf die Kostenstruktur der Unternehmungen auswirkt.

Die Kühlschrankhersteller hingegen benötigen einerseits energieeffiziente Produkte, um die Gesetzgebung zu erfüllen und sich im Markt zu behaupten. Aber auch sie stehen unter einem grossen Preisdruck und sind in der Entwicklung auf Energieeinsparungen ohne grosse Mehrkosten fixiert. Die grosse Effizienzdifferenz zwischen der Energieklasse A und A++ ist für viele Endkunden nicht sofort ersichtlich.

Hoher Energieverbrauch

4% des Gesamtstromverbrauchs

A zu A++: Einsparung 1'250 GWh/a

Herausforderung

Optimierungspotential beim Verdichter

Wenige Kompressorhersteller

Kühlschrankhersteller unter Preisdruck

1.1. Zielsetzungen

Dieses Projekt leistet einen Beitrag, den oben beschriebenen gordischen Knoten zu durchschlagen. Mit dem Bau eines Demonstrationskühlschranks mit optimierter Verdichterseite wird gezeigt werden, wie viel Einsparungspotential in der Verwendung effizienter Kompressoren vorhanden ist. Die Modifikationen werden an einem herkömmlichen Kühlschrank der Energieklasse A++ vorgenommen.

Bau eines Demo-Kühlschranks

1.2. Gewählter Lösungsweg

Aus Informationen aus der Literatur [2] und der Erfahrung aus früheren Projekten bei awtec ist bekannt, dass der Einsatz eines durchlaufenden drehzahlgeregelten Verdichters gegenüber einem herkömmlichen Kompressor bei gleicher Motoreffizienz ein Energieeinsparpotential von mehr als 30% besitzt.

Ansatz: Drehzahlregelung

Herkömmliche Kühlschränke im Haushalt regeln die Temperatur durch Ein- und Ausschalten des Verdichters und laufen zu einem Viertel oder einem Drittel der Zeit bei voller Leistung. Durch das ständige Anfahren und den Betrieb bei voller Leistung erweist sich diese Betriebsweise als sehr ineffizient. Durch eine Drehzahlregelung kann der Verdichter während der ganzen Zeit mit einer reduzierten Drehzahl betrieben und das häufige Anfahren vermieden werden. Durch die tiefere Drehzahl können auch interne Verluste im Kältekreislauf verringert werden.

Kein Anfahren, tiefe Drehzahlen

Auch weitere Modifikationen wie effizientere Elektromotoren, Anpassung der Regelstrategie, etc. werden geprüft.

Weitere Optimierungsmaßnahmen Kompressoren im Markt vorhanden

Bei einer ersten Recherche hat sich gezeigt, dass auf dem Markt geeignete drehzahlgeregelte Kompressoren mit effizienten Antrieben (EC-Motor) und passenden Inverter verfügbar sind. Deshalb wurde auf eine Kompressor-Eigenentwicklung und grosse Umbauten verzichtet. So ist eine einfache und schnelle Möglichkeit der Umsetzung in ein Produkt gegeben.

2. Kompressorenhersteller

Um potentielle Projektpartner zu finden, wurde ein Überblick über Kompressorhersteller im Kühlbereich erstellt und die europäischen Hersteller wurden mit einer Anfrage um Unterstützung kontaktiert.

Herstellersuche

Danfoss, die noch keinen drehzahlgeregelten Kolbenkompressor anbieten, erklärte sich schnell bereit, bei der Umsetzung eines modifizierten Kompressors Unterstützung zu bieten.

Danfoss

Embraco, ein grosser Kompressorhersteller mit internationalen Produktionsstandorten, zeigte sich ebenfalls kooperativ. Embraco verfügt über eine drehzahlgeregelte Kompressorlinie (VCC3), welche über mehrere Stufen die Drehzahl regelt.

Embraco

Diese Kompressoren werden vereinzelt schon in Kühlschränken eingesetzt, jedoch nur im Hochpreissegment und bei grösseren Geräten (Food center).

Anwendung

Auch **ACC**, ein weiterer Kompressorenhersteller, verfügt über eine Kompressorlinie mit mehreren Drehzahlstufen und sehr gutem COP, die für unser Projekt geeignet wären. ACC hat aber auf mehrfache Anfragen von awtec nicht reagiert.

ACC

Wir haben uns für den weiteren Projektverlauf für Embraco als Entwicklungspartner entschieden. Es sollte so mit einfachen Mitteln möglich sein, einen bestehenden Kühlschrank mit einem entsprechend angepassten und ausgelegten drehzahlgeregelten Kompressor auszustatten.

Auswahl

Die Zusammenarbeit hat sich aufgrund der Distanzen, Sprach- und Kulturunterschiede (Entwicklung in Italien, Produktion/Lager in Brasilien) zum Teil schwierig gestaltet. Es bestand zwar ein guter Kontakt zum Key Account Manager für Europa, der viel ermöglicht hat, als untypischer Kunde mit Einzelbestellungen mussten wir aber sehr lange auf die Lieferung von Kompressoren und Steuerungen warten. Auch der Informationsfluss von Embraco zu uns war beschränkt: über wichtige Themen, die das Projekt vereinfachen und weiterbringen könnten, wie typische Kompressorkosten bei Grossbestellungen oder Möglichkeiten zur Kompressorsteuerung mit einem eigenen Inverter, durfte oder wollte man keine Auskunft geben.

**Zum Teil
schwierige
Zusammen-
arbeit**

3. Versuchsaufbau

3.1. Kühlschrank

Auf der Suche nach dem Schweizer Durchschnitts-A++-Kühlschrank, der für dieses Projekt eingesetzt werden soll, kamen wir mit Electrolux in Kontakt.

Ø-Kühlschrank

Electrolux zeigte sich sehr interessiert an diesem Projekt und erklärte sich bereit, die entsprechenden Einbaugeräte samt Möbel preisgünstig zur Verfügung zu stellen.

Electrolux

Das ausgewählte Kühlschrankmodell ist der Electrolux EK 244 11. Dabei handelt es sich um eines der meist verkauften A++-Geräte der Schweiz. Der Kühlschrank wird auch in der topten-Liste (www.topten.ch) geführt und empfohlen.

Modell



Abb. 1 Der für die Versuche verwendete Kühlschrank Electrolux EK 244 11

Das Kühlschrankmodell verfügt über einen Gesamt-Nutzhalt von 241 l, wovon der Kühlteil 215 l und das integrierte 4-Stern-Gefrierfach 26 l fasst. Der Norm-Energieverbrauch beträgt 173 kWh pro Jahr (siehe Anhang A1).

Daten Musterkühlschrank

Das Electrolux-Gerät wird bei Arbonia Forster in Arbon gefertigt und verfügt über einen Embraco-Kompressor vom Typ EMX32CLC.

Von Arbonia

3.2. Kompressoren

3.2.1. Serienkompressor Embraco EMX32CLC

Der serienmässig verbaute Embraco-Kompressor vom Typ EMX32CLC ist ein Kolbenkompressor mit einem Einphasen-Asynchronmotor. Ein Auszug aus seinem Datenblatt ist in Abb. 2 ersichtlich.

Einphasen-Asynchron-Motor

A - APPLICATION / LIMIT WORKING CONDITIONS			
1 Type	Hermetic reciprocating compressor		
2 Refrigerant	R-600a		
3 Nominal voltage and frequency	220-240 / 50	[V / Hz]	
4 Application type	Low Back Pressure		
4.1 Evaporating temperature range	-35°C to -10°C	(-31°F to 14°F)	
5 Motor type	RSCR		
6 Starting torque	LST - Low Starting Torque		
7 Expansion device	Capillary tube		
8 Compressor cooling	Operating voltage range		
		50 Hz	60 Hz
8.1 LBP (32°C Ambient temperature)	Static	198 to 254 V	-
8.2 LBP (43°C Ambient temperature)	Static	198 to 254 V	-
8.3 HBP (32°C Ambient temperature)	-	-	-
8.4 HBP (43°C Ambient temperature)	-	-	-
9 Maximum condensing pressures/temperature			
9.1 Operating (gauge)	7.7	[kgf/cm ²] (109 psig)	/ °C - °F
9.2 Peak (gauge)	9.8	[kgf/cm ²] (139 psig)	/ °C - °F
10 Maximum winding temperature	130	[°C]	
B - MECHANICAL DATA			
1 Commercial designation	[hp]		
2 Displacement	5.96	[cm ³] (0.364 cu.in)	
2.1 Bore	22.500		
2.2 Stroke	7.500		
3 Lubricant charge	180	[ml] (6.09 fl.oz)	
3.1 Lubricants approved			
3.2 Lubricants type/viscosity	ALQUILB / ISO5		
4 Weight(with oil charge)	7.8	[kg] (17.20 lb.)	
5 Nitrogen charge	-	[kgf/cm ²]	
C - ELETRICAL DATA			
1 Nominal Voltage/Frequency/Number of Phases	220-240 V 50 Hz 1 ~ (Single phase)		
2 Starting device type	TSD		
2.1 Starting device			
3 Start capacitor	-	[µF(VAC minimum)]	
4 Run capacitor	2.5(440)	[µF(VAC minimum)]	
5 Motor protection (external)	AE23AHNX		
6 Start winding resistance	34.75	[Ω at 25°C (77°F)] +/- 8%	
7 Run winding resistance	37.70	[Ω at 25°C (77°F)] +/- 8%	
8 LRA - Locked rotor amperage (50 Hz)	2.60	[A] - Measured according to UL 984	

Abb. 2 Auszug aus Datenblatt Embraco EMX32CLC (Vollst. In Anhang A2.1)

Die EMX-Linie von Embraco ist bereits eine energieoptimierte Kompressorserie (höhere Motoreffizienz, Startelektronik), die gegenüber der Standard-Serie EMY ca. 9% effizienter ist¹.

Energie-optimierte Serie

¹ Gemäss Email von J. Wiest, Embraco, 11.11.2009

3.2.2. Drehzahleregelter Kompressor Embraco VCC3 VEM X5C

Der neue drehzahleregelte Kompressor von Embraco, welcher für dieses Projekt eingebaut wurde, ist ein VCC3-Modell, Typ VEM X5C. Der 3-Phasen-EC-Motor wird mit 40-150Hz angesteuert, was einem Drehzahlbereich von 1200-4500 min⁻¹ entspricht. Ein Auszug aus seinem Datenblatt ist in Abb. 3 ersichtlich.

3-Phasen-EC-Motor

A - APPLICATION / LIMIT WORKING CONDITIONS			
1 Type	Hermetic reciprocating compressor		
2 Refrigerant	R-600a		
3 Nominal voltage and frequency	230 / 40-150	[V / Hz]	
4 Application type	Low Back Pressure		
4.1 Evaporating temperature range	-35°C to -10°C	(-31°F to 14°F)	
5 Motor type	BPM		
6 Starting torque	LST - Low Starting Torque		
7 Expansion device	Capillary tube		
8 Compressor cooling		Operating voltage range	
		50 Hz	60 Hz
8.1 LBP (32°C Ambient temperature)	Static	187 to 255 V	187 to 255 V
8.2 LBP (43°C Ambient temperature)	Static	187 to 255 V	187 to 255 V
8.3 HBP (32°C Ambient temperature)	-	-	-
8.4 HBP (43°C Ambient temperature)	-	-	-
9 Maximum condensing pressures/temperature			
9.1 Operating (gauge)	7.7	[kgf/cm ²] (109 psig)	/ °C - °F
9.2 Peak (gauge)	9.8	[kgf/cm ²] (139 psig)	/ °C - °F
10 Maximum winding temperature	130	[°C]	
B - MECHANICAL DATA			
1 Commercial designation	1/5	[hp]	
2 Displacement	5.19	[cm ³] (0.317 cu.in)	
2.1 Bore	21.000		
2.2 Stroke	7.500		
3 Lubricant charge	220	[ml] (7.44 fl.oz.)	
3.1 Lubricants approved			
3.2 Lubricants type/viscosity	ALQUILB / ISO5		
4 Weight(with oil charge)	7.59	[kg] (16.73 lb.)	
5 Nitrogen charge	-	[kgf/cm ²]	
C - ELETRICAL DATA			
1 Nominal Voltage/Frequency/Number of Phases	230 V 40-150 Hz 3 ~ (Three phase)		
2 Starting device type	Inverter		
2.1 Starting device	VCC32456XXXX		
3 Start capacitor	-	[µF(VAC minimum)]	
4 Run capacitor	-	[µF(VAC minimum)]	
5 Motor protection (external)	VCC32456XXXX		
6 Start winding resistance	16.07	[Ω at 25°C (77°F)] +/- 8%	
7 Run winding resistance	16.07	[Ω at 25°C (77°F)] +/- 8%	
8 LRA - Locked rotor amperage (40/150 Hz)	2.10/2.10	[A] - Measured according to UL 984	

Abb. 3 Auszug aus dem Embraco VCC3 VEM X5C Datenblatt (Vollständig in Anhang A2.2)

Der Kompressor wird mit einem Inverter angesteuert, der von Embraco mitgeliefert wird: hier gibt es zwei Varianten: eine Drop-In-Steuerung, die als Eingang nur das Thermostatsignal verwendet und in jeden Kühschrank ohne Anpassungen eingebaut werden kann, und eine Steuerung mit Drehzahlvorgabe, bei der mit dem Eingangssignal die Kompressordrehzahl eingestellt werden kann.

Inverter

Am Anfang des Projektes stand nur eine Drop-In-Steuerung zur Verfügung. Diese erkennt das Thermostatsignal und startet bei einer tiefen Drehzahl. Nun wird die vom Kompressor aufgenommene elektrische Leistung gemessen; ist diese über längere Zeit hoch, wird die Drehzahl eine Stufe erhöht, etc. Diese Steuerung funktioniert zwar

Drop-In-Steuerung

grundsätzlich in unserem Kühlschrank, aufgrund der tiefen benötigten Leistung war aber kein effizienter Betrieb möglich.

Auf Nachfragen bei Embraco konnte auch ein Inverter mit Drehzahlvorgabe bezogen werden. Mit dieser kann über ein Frequenzsignal von 40-150 Hz die Drehzahl des Kompressors vorgegeben werden. Der erste Inverter-Satz, der angeboten wurde, besitzt eine Minimaldrehzahl von 1600 Hz, später im Projekt erhielten wir auch Inverter, die den gesamten Drehzahlbereich des Motors von 1200 – 4500 Hz abdecken. Mit diesem Inverter wurden die Versuche mit der geringsten Energieaufnahme durchgeführt.

**Drehzahl-
vorgabe**

Es wurde auch versucht, den Kompressor mit einem Standard-Frequenzumrichter anzusteuern, um die Beschränkungen des Originalinverters zu überwinden; dies war aber mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Da von Embraco keine Informationen zur Ansteuerung erhalten werden konnten, mussten die Original-Inverter verwendet werden.

**Ansteuerung mit
eigenem FU
nicht möglich**



Abb. 4 Drehzahl geregelter Kompressor Embraco VCC3 VEM X5C mit Inverter

3.2.3. Vergleich der Kompressoren

Der VCC3 VEM X5C-Kompressor ist der kleinste verfügbare drehzahl-geregelte Kompressor von Embraco. Er ist ein wenig kleiner als der Serienkompressor (EMX32CLC). Er besitzt eine Bohrung von lediglich 21 mm anstatt 22.5 mm beim Serienkompressor bei identischem Hub von 7.5 mm. Der Originalkompressor fördert somit theoretisch ca. 15% mehr Kühlmittel pro Umdrehung als der drehzahl-geregelte Kompressor. Dieser Unterschied muss bei der Auswertung der Versuche entsprechend berücksichtigt werden.

**VCC kleiner als
EMX**

Aufgrund der höheren möglichen Drehzahl ist die Maximalleistung des VCC3 VEM X5C-Kompressors trotz 15% weniger Hubraum höher (100 W gegenüber 73 W)

**VCC: höhere
Maximalleistung**

Ein Vergleich der vom Hersteller angegebenen Leistungsdaten ist in Abb. 5 ersichtlich.

Leistungsdaten

Compressor Portfolio 2008/2009 - R600a									CECOMAF... W/W			
*COP/CAP Data to be confirmed by a official Product Spec. sheet.									CAP ¹ W	COP ¹ (W/W)	COP ¹ (W/W)	COP ¹ (W/W)
Serie	Sel	Model	Voltage	Index	Appl.	Mini / Midi	Refrigerant	art	W	w.o RC	wRC	with RC and TSD
EMY(S)	A	EMYS40CLC	220-240V/50Hz	actual	LBP	Mini	R600a		91	1,21	1,26	
EMX	A	EMX32CLC	220-240V/50Hz	actual	LBP	Mini	R600a		73		1,30	1,35

Model	Serie	Ref.	Testing Condition	1200 RPM		1600 RPM		2000 RPM		3000 RPM		4500 RPM	
				CAP [W] (at 1200 rpm)	COP [W/W] (at 1200 rpm)	CAP [W] (at 1600 rpm)	COP [W/W] (at 1600 rpm)	CAP [W] (at 2000 rpm)	COP [W/W] (at 2000 rpm)	CAP [W] (at 3000 rpm)	COP [W/W] (at 3000 rpm)	CAP [W] (at 4500 rpm)	COP [W/W] (at 4500 rpm)
VEMX5C	VEMX	R600a	Cecomaf	24	1,21	33	1,29	42	1,35	66	1,40	100	1,33

Abb. 5 Auszug der Leistungsdaten (Referenzkompressor EMX32CLC oben, drehzahl geregelter Kompressor VEMX5C unten) bei Verdampfungstemperatur: -25 °C, Kondensationstemperatur 55 °C (CECOMAF)

Der Referenzkompressor erreicht bei Normbedingungen² eine Effizienz (COP) von 1.35. Der drehzahl geregelte Kompressor erreicht bei den gleichen Bedingungen Werte zwischen 1.21 und 1.40 je nach Drehzahl.

Effizienz

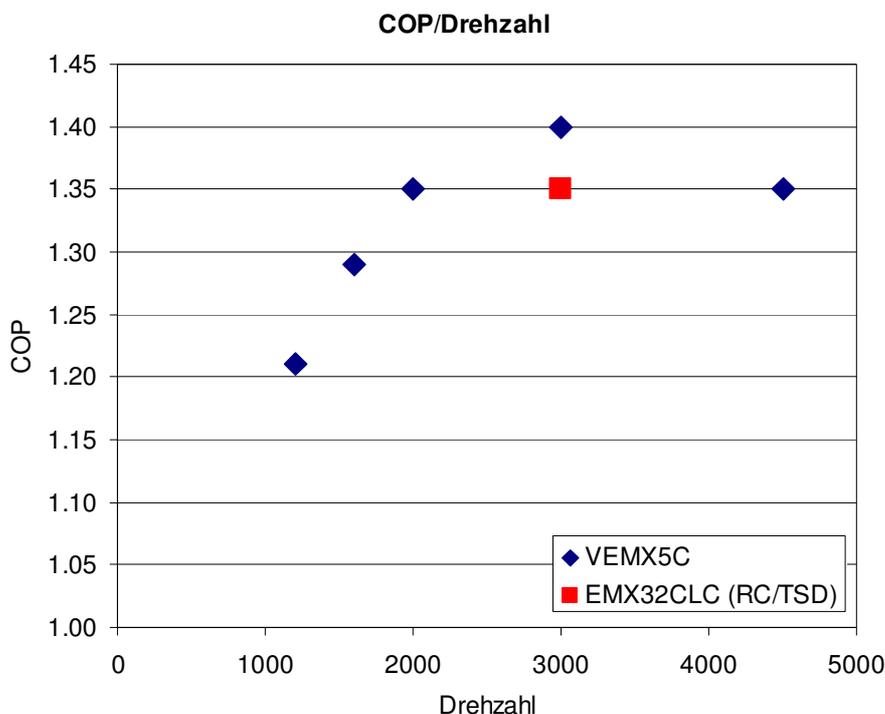


Abb. 6 COP von Referenz- (rot) und drehzahl geregelter (blau) Kompressor bei unterschiedlichen Drehzahlen

Abb. 6 zeigt, dass bei tiefen Drehzahlen (unter 2000 U/min) die Effizienz des drehzahl gesteuerten Kompressors tiefer liegt als die des Referenzkompressor bei Nenndrehzahl; bei der Mindestdrehzahl von 1200 U/min beträgt der COP 1.21, d.h. 90% der Referenzkompressor-COP bei Nenndrehzahl.

VCC: tiefere Effizienz bei tiefen Drehzahlen

² GECOMAV: Verdampfungstemperatur -25 °C, Kondensationstemperatur 55 °C

Um die Wirkungsgrade (elektrisch→mechanisch) der beiden Kompressormotoren zu vergleichen, wurde versucht, die elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit vom Drehmoment zu messen. Aufgrund der hochintegrierten Bauweise der Kompressoren konnte insbesondere beim Serienkompressor aber keine Ankopplung an den Prüfstand erreicht werden, die die Messung nicht wesentlich beeinflusste. Details zur Messung und Ergebnisse sind im Anhang A3 zu finden.

**Messung
Motoreffizienz
nicht möglich**

Laut Angabe von Embraco sind die Effizienzen der beiden Antriebssysteme sehr ähnlich³. Der Referenzkompressor besitzt einen stark optimierten Einphasen-Asynchronmotor, der direkt mit der Netzfrequenz angesteuert werden kann, während der hocheffiziente EC-Motor des VCC-Kompressors mit einem verlustbehafteten Inverter angesteuert wird. Der Unterschied in der Systemeffizienz wird also hauptsächlich durch die Effekte der tieferen Drehzahl erreicht.

**Ähnliche
Motoreffizienz**

3.2.4. Einbau

Im modifizierten Kühlschranks wurde der drehzahlgeregelte Kompressor Embraco VCC3 VEM X5C eingebaut. Um den Kompressor auswechseln zu können, wurden die Verbindungen mit Swagelok-Rohrverschraubungen ausgeführt. Aus Abb. 7 ist ersichtlich, dass der Kompressor durch ein Befüllsystem (Siehe Kap. 3.3) ergänzt wurde.

**Einbau
drehzahl-
geregelter
Kompressor**



Abb. 7: Drehzahlgeregelter Kompressor Embraco VCC3 VEM X5C mit Befüllsystem, eingebaut im modifizierten Kühlschrank

³ Gemäss Email von J. Wiest, Embraco, 16.10.2009

3.3. Befüllung

Um viele Versuche mit unterschiedlichen Füllmengen in möglichst kurzer Zeit fahren zu können, wurde ein Befüllsystem aufgebaut und fest in den Kühlkreislauf integriert (siehe Abb. 8).

Integriertes Befüllsystem

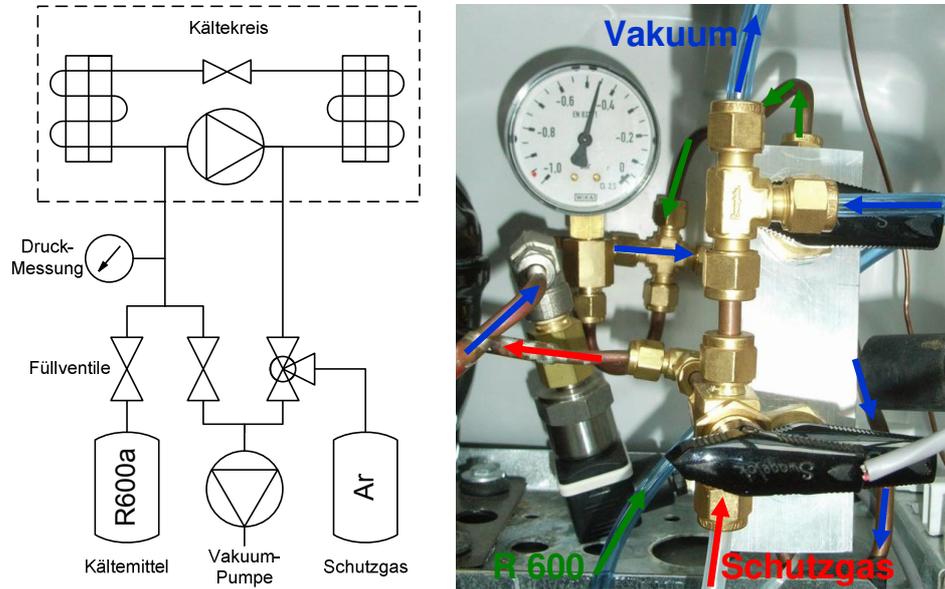


Abb. 8: Schema (links) und Umsetzung (rechts) des Befüllungssystems am modifizierten Kühlschranks, welches erlaubt, das Kühlmedium vollständig zu leeren und präzise neu zu befüllen

Um eine exakte Befüllung zu erhalten, muss zuerst der Kühlkreislauf vollständig geleert werden. Dies geschah durch Evakuierung des Kreislaufes (mindestens 30 min., Abb. 9 links) gefolgt von einer Spülung mit Schutzgas (mindestens 30 min., Abb. 9 Mitte). Der Kühlschrank wurde dabei auf Raumtemperatur gebracht, um zu verhindern, dass sich noch flüssiges Kühlmittel im Kreislauf befindet. Nach der Spülung wurde nochmals mindestens 30 min. evakuiert, bevor der Kältekreis mit dem Kühlmittel befüllt wurde (Abb. 9 rechts).

Befüllen mit Kühlmittel

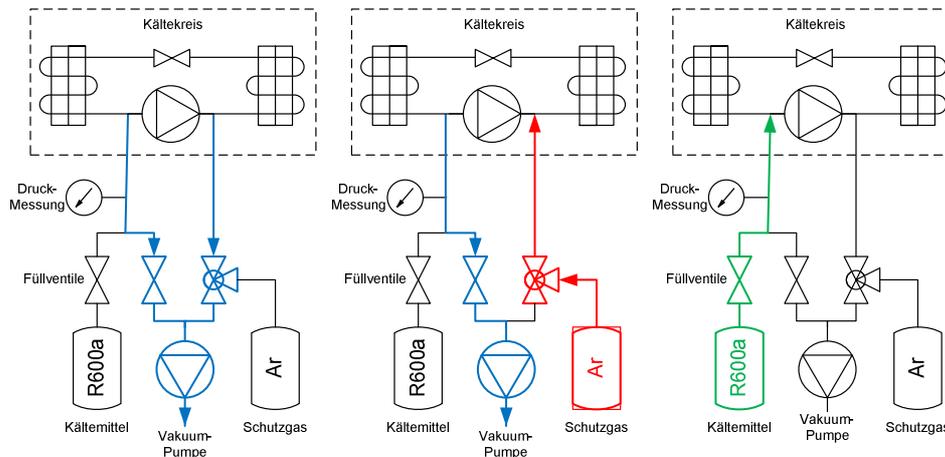


Abb. 9: Befüllvorgänge: Evakuieren (links), Spülen mit Schutzgas (Mitte) und Befüllen mit Kühlmittel (rechts)

Die Menge an Kühlmittel wurde bestimmt, indem die Gewichts­differenz der Kühlmittelflasche während dem Füllvorgang mit einer Präzisionswaage ermittelt wurde. Wir schätzen die Genauigkeit dieser Methode auf $\pm 1\text{g}$.

Genauigkeit $\pm 1\text{g}$

3.4. Temperaturmanagement

Da der Testkühlschrank sowohl für den Kühlschrank wie auch für das Gefrierfach nur einen Kühlkreislauf besitzt, führt eine Änderung der Kühlmittelmenge zu einer Verschiebung der Kühlleistung im Kühlschrank bzw. im Gefrierfach. Da das Kühlmittel zuerst durch den Verdampfer des Gefrierfachs und anschliessend durch den des Kühlfachs läuft, wird bei einer Reduktion der Gesamtkühlmittelmenge im Gefrierfach mehr Wärme aufgenommen. Analog dazu führt eine Erhöhung der Kühlmittelmenge zu einer Verschiebung zugunsten des Kühlfachs.

Einfluss der Kühlmittelmenge

Auch die Kompressordrehzahl hat einen Einfluss auf die Temperaturverteilung. Abb. 10 zeigt den Temperaturverlauf im Gefrierfach für zwei unterschiedliche Kompressordrehzahlen. Eine tiefere Drehzahl führt dazu, dass der Kompressor länger läuft; insbesondere wird die Phase, bei der die Temperatur im Gefrierfach tief ist, länger. Die Erwärmung nach dem Abschalten des Kompressors ist hingegen unabhängig von der Drehzahl.

Einfluss der Drehzahl

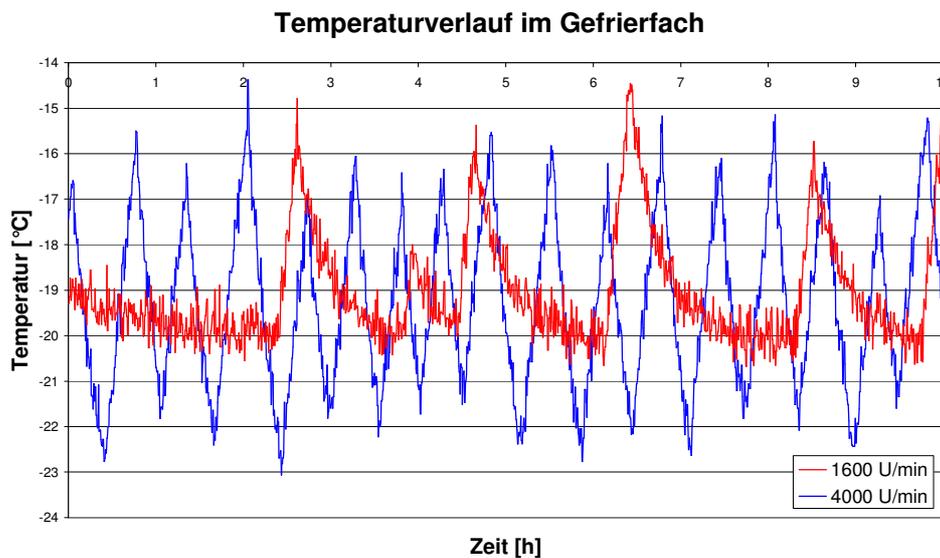


Abb. 10: Temperaturverlauf im Gefrierfach bei unterschiedlicher Kompressordrehzahl

Um aussagekräftige Resultate zu erhalten, müssen die Temperaturen sowohl im Kühlschrank als auch im Gefrierfach angeglichen werden. Ein Eingriff am Kühlkreislauf (Einstellbares Expansionsventil statt Kapillare) stand nicht zur Diskussion, da damit massiv in das Gesamtsystem eingegriffen würde (Isolation, etc.) und kein objektiver Vergleich mehr möglich wäre. Aus diesem Grund wurde ein Wärmeübergang vom Kühlschrank zum Gefrierfach durch Ausschnitte in der Gefrierfachtür ermöglicht. Der Wärmeaustausch wurde durch Schieber über den beiden Ausschnitten geregelt (siehe Abb. 11).

Veränderung für Temperaturausgleich

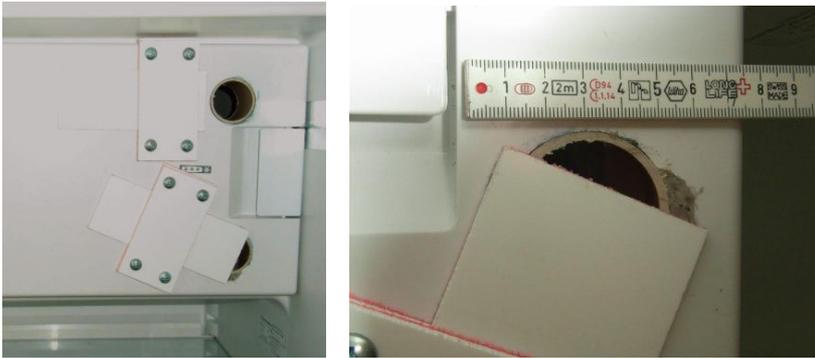


Abb. 11: Wärmeübergänge in der Gefrierschranktür, um einen Wärmeaustausch zum Kühlschranks zu ermöglichen

Tab. 1 gibt einen Überblick über den Einfluss der Kühlmittelmenge und die Korrekturmöglichkeit bei zu kaltem Gefrierfach.

Korrekturmöglichkeit

Kühlmittelmenge*	Temperatur Kühlfach (geregelt)	Temperatur Gefrierfach	Massnahme
38 g	5°	-18°	-
< 38 g	5°	< -18°	Wärmeaustausch (Iteration bis -18°C im GF erreicht wird)
> 38 g	5°	> -18°	keine

Tab. 1: Einfluss der Kühlmittelmenge auf Temperaturverteilung bei Regelung des Kühlfaches auf 5 °C (* diese Angabe gilt für Kompressor 2)

Da der Wärmeaustausch nur vom wärmeren Kühlfach ins kältere Gefrierfach möglich ist, konnte das Temperaturverhältnis mit den Schiebern nur in eine Richtung verschoben werden. Dies war aber für unsere Versuche mit tiefer Drehzahl ausreichend.

Für unsere Versuche ausreichend

Der Wärmeaustausch hat einen negativen Einfluss auf die Effizienz: dem Kühlschranks wird mehr Wärmeleistung im Gefrierfach auf dem tieferen Temperaturniveau entzogen, was entsprechend energieaufwendiger ist.

Negativ für Effizienz

Um den Luftaustausch auch in der Klimakammer anpassen zu können, wurde der untere Schieber mit einem Schrittmotor versehen, der über das Steuersystem angetrieben werden kann (Abb. 12).

Angetriebener Schieber

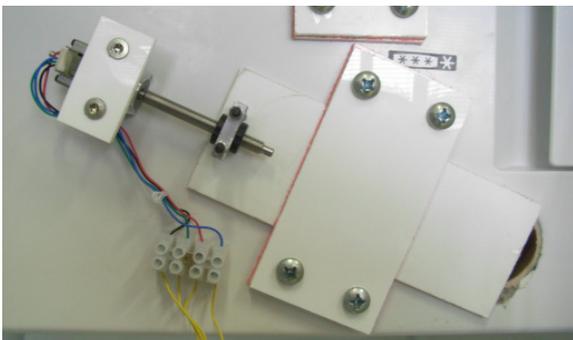


Abb. 12: Angetriebener Schieber zur Einstellung des Wärmeaustausches mittels Steuersoftware

3.5. Mess- und Steuersystem

Um die Effizienz der Kühlschränke zu messen und den modifizierten Kühlschrank zu steuern, wurde ein Mess- und Steuersystem aufgebaut (Abb. 13).



Abb. 13: Mess- und Steuersystem

Das Messsystem misst die folgenden Größen jeweils bei beiden Kühlschränken: **Messung**

- Temperaturen
 - Luft Kühlraum
 - Wand Kühlraum
 - Luft Gefrierfach innen
 - Wand Gefrierfach
 - Leitung Kompressor-Vorlauf
 - Leitung Kompressor-Nachlauf
 - Leitung Ende Verflüssiger
 - Raumtemperatur
 - Referenztemperatur (Eiswasser 0 °C)
- Elektrische Leistungsaufnahme

Es ist zu beachten, dass die Messungen ohne Kühlschrankinhalt erfolgten und im Kühl- bzw. Gefrierraum immer die Lufttemperatur gemessen wurde. Das entspricht zwar nicht der Messnorm ISO 15502, bei der die Temperatur im befüllten Zustand in Prüfpaketen gemessen wird. Damit konnten aber die Versuche wesentlich beschleunigt werden, da der Kühlschrank so weniger schneller auf Temperaturschwankungen reagiert. Da sich damit am Energieeintrag und -verlust des System nichts ändert, sondern lediglich die Wärmekapazität verringert wird, ist diese Veränderung zulässig.

**Kühlschrank
wurde leer
gemessen**

3.5.1. Hardware

Die Temperaturmessung basiert auf 16 Thermoelementen (Typ K), die von einem Messumformer (Transmetra LKM232) mit einer Relaisschaltung nacheinander ausgelesen werden. Pro Thermoelement wird während 2 s gemessen, d.h. alle 32 s ist ein Temperatursatz ausgelesen. Als Temperaturreferenz dient ein Wasserkühler mit Eiswasser von 0 °C.

**Serielle
Temperatur-
messung**

Die elektrische Leistungsaufnahme der Kühltürme wird mit zwei Socomec Diris A40 Multifunktionsmessgeräten gemessen.

**Messung der
elektrischen
Leistung
Datenerfassung**

Die Messdaten werden von einem USB-Datenerfassungsgerät (National Instruments NI-DAQ USB 6009) erfasst und an die Software weitergeleitet.

Für die Steuerung der Kompressordrehzahl wird ein 30-150-Hz-Signal benötigt, das von einem Siemens-Schnittstellenwandler (3RS170) generiert wird.

Steuersignal

Um den Luftaustausch-Schieber bedienen zu können, wurde eine Nanotec-Schrittmotorsteuerung (SMC-I32) integriert.

3.5.2. Mess- und Steuerungssoftware

Die Software basiert auf NI LabView und läuft auf einem herkömmlichen Windows-PC, der mit dem USB-Datenerfassungsgerät verbunden ist. Sie kann in einen Mess- und einen Steuerteil unterteilt werden:

**LabView-
Software**

Das Messsystem steuert die Relais für die Temperaturerfassung, liest die Messumformer für Temperatur und Leistung aus und schreibt die Messwerte zur späteren Auswertung in eine Datei.

Messsystem

Im Steuersystem sind unterschiedliche Regler für den Drehzahl-geregelten Kühlturm implementiert:

Steuersystem

- Temperaturregelung auf fixen Wert mit einstellbarer Hysterese und Drehzahl
- Temperaturregelung mit automatisch veränderbarer Temperatur zum autonomen Überprüfen von Parameterfeldern
- Folgeregelung, die den Temperaturverlauf des Referenzkühlstrahls (Ein-/Ausschaltemperatur) nachfährt
- Manuelle Steuerung

Um schnell einen Überblick zu gewinnen und die richtigen Parameter zu finden, werden aus den Messdaten diverse Zwischen- und Durchschnittswerte berechnet und visualisiert (siehe Abb. 14 und Abb.15).

**Aufnahme der
Messdaten**

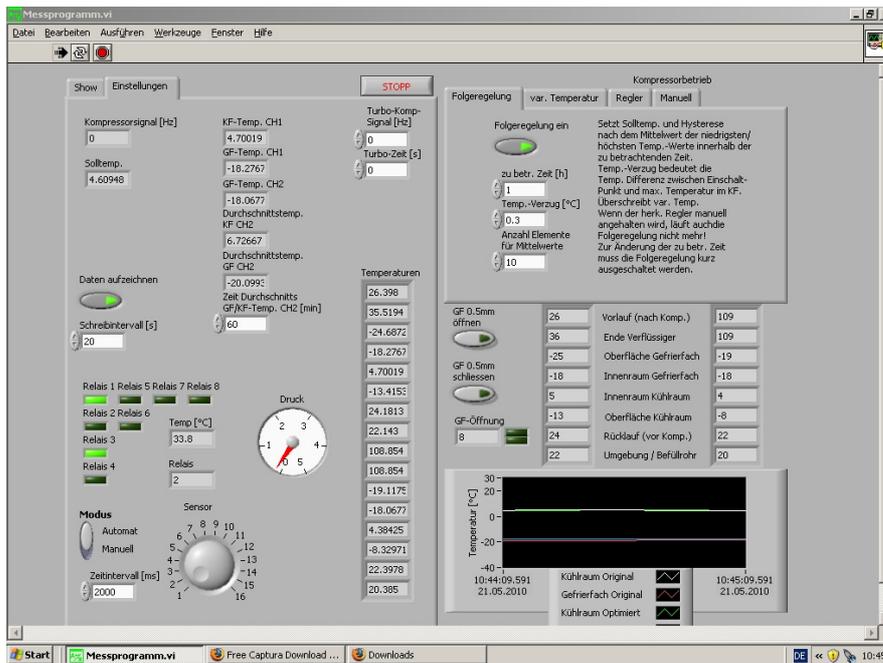


Abb. 14 Links: Aufnahme der Temperaturdaten und Darstellung der Durchschnittstemperaturen in den Kühlfächer und Gefrierfächer, Rechts: Kompressorbetrieb mit dem Folgeregler (der modifizierte Kühlschrank fährt die Kühlfachtemperatur des Referenzkühlschranks nach)

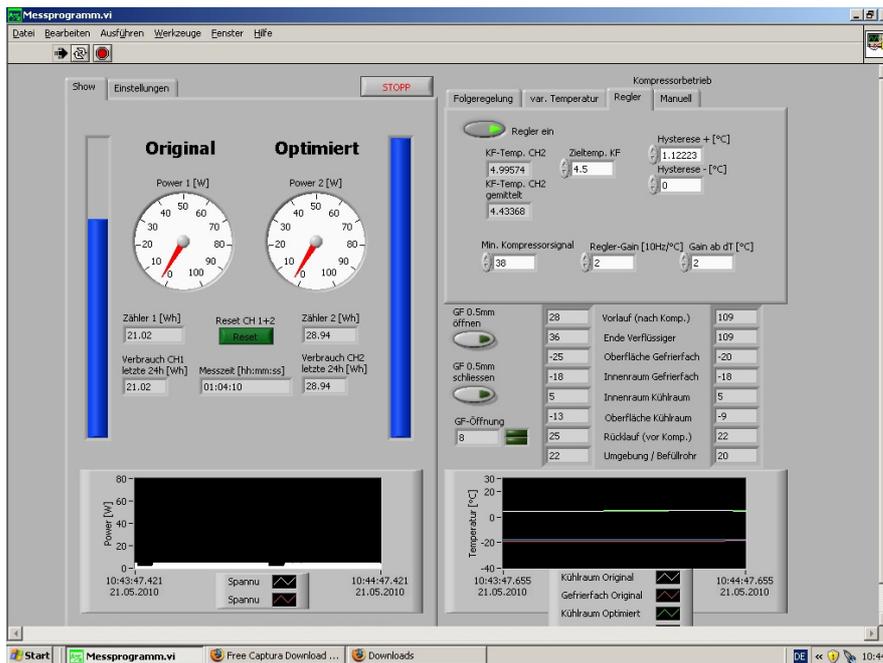


Abb. 15 Links: Darstellung des Stromverbrauchs beider Kühlgeräten, Rechts: Kompressorbetrieb mit Hysterese-Regler

3.6. Gesamtsystem

Um den Einfluss der am Kühlschrank vorgenommenen Modifikationen zu prüfen, wurde der modifizierte Kühlschrank stets im direkten Vergleich zu einem unveränderten Referenzkühlschrank getestet. Die beiden Kühlschränke wurden, wie in Abb. 16 ersichtlich, in einen passenden Schrank eingebaut und nebeneinander aufgestellt. Die Einbausituation entspricht in etwa derjenigen in einer herkömmlichen Küche.

**Im direkten
Vergleich zur
Referenz**



Abb. 16 Referenzkühlschrank (links) und modifizierter Kühlschrank (rechts) in das gleiche Möbel eingebaut, um identische äussere Bedingungen zu ermöglichen. Im Gehäuse oben befindet sich die Messelektronik

4. Messungen

4.1. Verlauf der Messung

Eine Messung wurde gestartet, nachdem sich der Kühlkreislauf des modifizierten Kühlschranks mit den neuen Parametern stabilisiert hatte. Bei einer Änderung der Kompressordrehzahl dauerte das wenige Stunden, bei der Änderung der Kühlmittelmenge etwa einen Tag.

Einpendeln

Während der Messung blieben die Kühlschranksüren stets geschlossen und äussere Einflüsse wie Sonneneinstrahlung wurden nach Möglichkeit verhindert.

Messung ohne Türöffnung

Um den Messablauf genauer zu erläutern, soll eine Übersicht der wichtigsten Messparameter während einer Messung angeschaut werden (siehe Abb. 17).

Messablauf

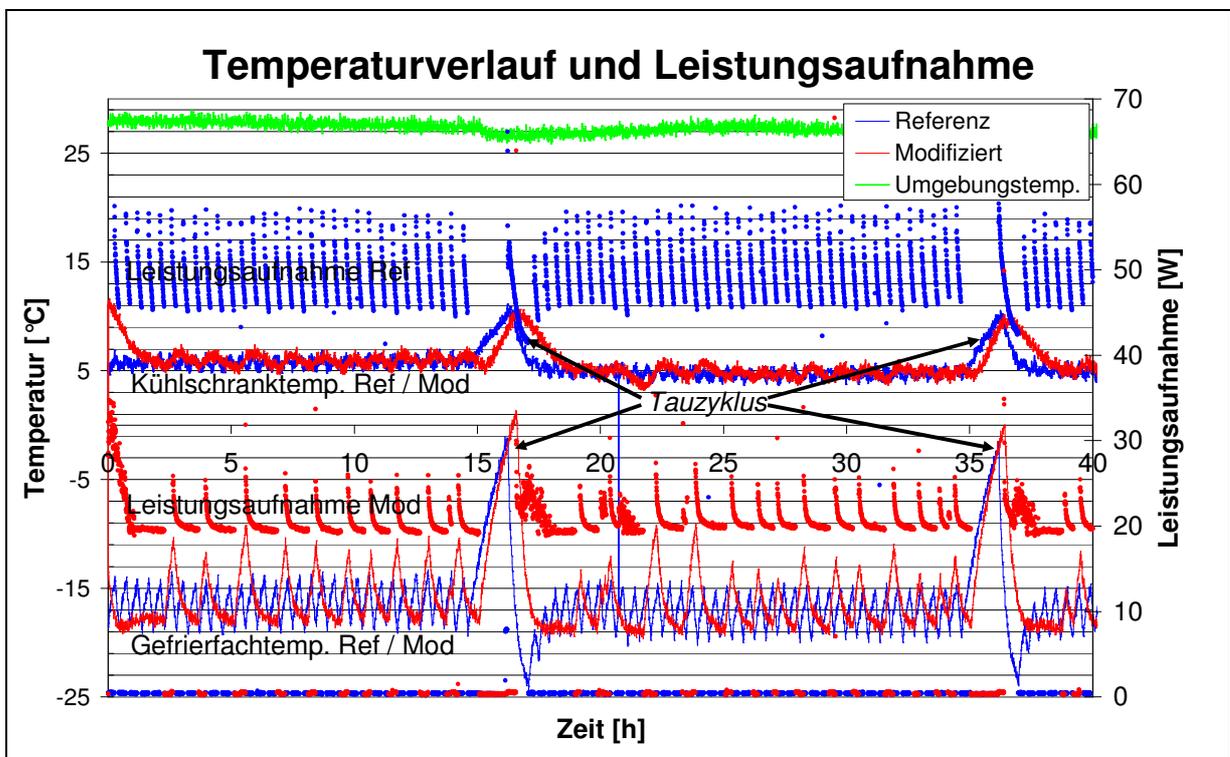


Abb. 17: Datenaufnahme eines Versuchs, bei dem der modifizierte Kühlschrank bei 1600 RPM mit 30 g Kühlmittel betrieben wurde

Der Referenzkühlschrank wurde auf 5°C eingestellt. Der Referenzkühlschrank hält die Temperatur, indem er den Kompressor mit einem Thermostat ein oder ausschaltet. Der Kompressor läuft dabei stets bei voller Leistung. Im Beispiel, welches in Abb. 17 gezeigt wird, fährt der modifizierte Kühlschrank die Kühlschranktemperatur des Referenzkühlschranks nach. Die Kompressordrehzahl des modifizierten Kühlschranks betrug 1600 U/min, die Referenz läuft bei etwa 3000 U/min. Die wesentlich geringere Kompressorleistung des modifizierten Kühlschranks führt dazu, dass der Kompressor länger läuft und die Temperaturzyklen länger werden. Es ist ersichtlich, dass die Gefrierfachtemperatur des modifizierten Kühlschranks etwas zu hoch ausfällt.

Erläuterung Datenaufnahme

Es ist zu beachten, dass der Referenzkühlschrank etwa alle 20 Stunden einen Abtauzyklus fährt. Dieser wurde entweder vom modifizierten Kühlschrank nachgefahren oder bei der Auswertung der Daten übersprungen.

**Referenz:
Abtauzyklus**

4.2. Versuche bei awtec

Bei den Versuchen wurden insbesondere folgende Parametern verändert:

**Zentrale
Versuchs-
parameter**

- Kältemittelmenge
- Kompressordrehzahl
- Kompressorsteuerungsparameter

Bei den ersten Versuchen lag der Fokus auf der Einstellung einer günstigen Kältemittelmenge und dem Verstehen des Einflusses der Drehzahl. Bei den späteren Versuchen wurde vor allem mit den Kompressorsteuerungsparametern experimentiert.

Tab. 2 gibt einen Überblick über alle durchgeführten Messungen. Bei Versuch 1 – Versuch 21 wurde der modifizierte Kühlschrank durch „Trial and Error“ durch Variation der Steuerparameter möglichst nahe an den Referenzkühlschrank angepasst. Ab Versuch 22 wurde der Temperaturverlauf des Referenzkühlschranks nachgefahren. Eine nähere Erklärung findet man in Abschnitt 3.5.2. Ab Versuch 51 wurde mit einer festen, vom Referenzkühlschrank unabhängigen Hysterese gefahren, die auf den Werten aus den nachgefahrenen Versuchen (22-50) basiert.

**Steuerung der
Temperatur**

Bezeichnung	Füllmenge [g]	Umdrehungen [RPM]	Schieber unten	Schieber oben	Aussen-temperatur	T-Gefrier Ref	T-Kühl Ref	T-Gefrier Mod	T-Kühl Mod	dT Kühl (Mod-Ref)	dT Gefrier (Mod-Ref)	dT tot	Leistungsauf- Ref (Q20h) [W]	Leistungsauf- ON Ref [%]	ON Mod Einsparung [%]	ON Mod Einsparung On Ref	Normierte Einsparung	Grad Kühl Ref	Grad Kühl Mod	Grad Gefrier Ref	Grad Gefrier Mod		
																						Ref	Mod
Kompressor 1																							
V1_34_52	34	1600	7mm	offen	29,7	-17,6	5,2	-19,0	6,0	0,8	-1,3	0,5	23,5	45,6	89,3	15,8	2,0	18,4					
V2_34_76	34	2400	6mm	offen	29,7	-17,7	5,2	-18,7	5,9	0,7	-1,0	0,3	23,5	45,9	86,3	11,4	1,4	12,8					
V3_34_104	34	3200	6mm	offen	29,6	-17,8	5,2	-19,4	5,7	0,5	-1,7	-1,2	23,7	46,4	85,6	0,8	1,2	6,5					
V4_34_130	34	4000	7mm	offen	29,9	-17,8	5,1	-19,3	5,7	0,6	-1,5	-0,9	23,9	47,0	85,1	-5,1	1,1	-1,0					
V7_42_104	42	3200	Originaltür	Originaltür	31,0	-17,0	6,4	-16,5	4,7	-1,7	0,4	-1,3	23,4	43,9	80,9	50,7	1,2	-4,4					
V8_42_52	42	1600	Originaltür	Originaltür	31,6	-17,3	6,2	-16,5	4,1	-2,1	1,8	-0,2	24,6	46,1	80,9	8,5	1,9	9,6					
V9_42_76	42	2400	Originaltür	Originaltür	28,9	-16,2	7,4	-15,0	5,0	-2,4	1,2	-1,2	19,4	37,1	79,3	52,1	0,8	1,4	6,7				
V10_42_104	42	3200	Originaltür	Originaltür	28,7	-15,8	7,5	-13,6	5,9	-1,6	2,2	0,6	17,7	37,2	77,7	46,2	9,5	1,2	6,6				
V11_30_52	30	1600	12mm	offen	24,1	-16,9	4,7	-18,9	4,6	-1,0	-1,0	-1,1	15,2	28,4	60,8	16,1	2,1	21,5	8,0	4,8	2,3	3,3	
V12_30_52	32	1600	7mm	offen	22,6	-16,6	5,3	-18,4	5,1	-0,1	0,3	0,1	14,3	28,2	51,1	50,9	22,6	1,8	21,9	7,3	5,4	2,3	2,9
V31_32_52	34	1600	9mm	offen	24,1	-16,6	5,4	-19,4	5,3	-0,1	-0,9	-1,0	14,4	27,9	56,6	12,5	2,0	17,2	7,5	4,9	2,3	3,1	
Kompressor 2 mit Folgeregelung																							
V22_32_52	32	1600	7mm	offen	21,9	-19,0	6,1	-19,1	6,0	-0,1	0,0	-0,1	14,0	26,2	65,7	-4,4	2,5	-3,9	6,7	1,9	2,5	3,3	
V33_32_52	32	1600	10mm	offen	22,4	-18,3	5,8	-20,4	5,8	0,0	-2,1	-2,1	13,0	25,6	63,7	-10,5	2,5	-0,5	6,3	1,9	2,4	3,5	
V34_32_52	32	1600	10mm	offen	22,9	-18,4	5,7	-20,9	5,7	0,0	-2,5	-2,4	13,6	27,1	65,9	-11,3	2,4	0,2	6,6	3,3	2,5	3,0	
V35_36_52	36	1600	geschlossen	geschlossen	23,5	-18,6	5,5	-18,3	5,4	-0,2	0,1	0,1	14,3	28,1	65,8	17,1	1,9	16,5	7,1	6,1	2,5	2,6	
V36_36_52	36	1600	geschlossen	geschlossen	23,4	-18,4	5,7	-18,7	5,5	-0,2	-1,4	-1,5	13,7	27,0	65,2	12,0	2,0	19,2	6,8	5,5	2,4	2,5	
V37_38_52	38	1600	geschlossen	geschlossen	23,2	-18,4	5,6	-18,1	5,4	-0,2	0,3	0,1	14,1	27,6	65,2	11,3	1,8	19,6	7,0	6,4	2,4	2,4	
V38_40_52	40	1600	Originaltür	Originaltür	23,0	-18,5	5,5	-18,5	5,2	-0,2	2,1	1,8	13,7	27,1	64,8	22,4	1,7	13,7	6,9	7,1	2,4	2,2	
V39_46_52	46	1600	Originaltür	Originaltür	23,2	-18,6	5,4	-18,3	5,2	-0,2	3,3	3,0	14,1	27,9	41,4	24,2	1,5	9,8	7,0	8,3	2,4	-0,2	
Kompressor 3 mit Folgeregelung																							
V41_34_52	34	1600	14mm	offen	23,3	-18,3	5,6	-17,9	5,4	-0,2	0,4	0,2	14,2	28,1	54,4	13,0	1,9	12,0	7,0	3,3	2,4	3,1	
V42_38_52	38	1600	geschlossen	geschlossen	23,1	-18,5	5,7	-17,8	5,5	-0,1	0,7	0,6	13,9	27,7	49,9	15,9	1,8	13,2	6,9	6,1	2,3	2,1	
V43_36_52	36	1600	7mm	offen	23,0	-18,2	5,8	-19,0	5,6	-0,1	-0,8	-0,9	13,2	26,1	54,3	9,5	2,1	14,0	6,5	4,7	2,4	2,7	
V44_32_52	32	1600	16mm	offen	22,9	-18,1	5,8	-19,4	5,7	-0,1	-1,2	-1,3	13,3	26,4	57,2	10,6	2,2	16,9	6,5	0,6	2,4	3,4	
V45_30_52	30	1600	offen	offen	22,8	-18,4	5,7	-19,6	5,7	0,0	-1,1	-1,1	13,7	27,2	56,6	12,0	2,1	17,3	6,7	0,5	2,4	3,7	
V46_28_52	28	1600	geschlossen	geschlossen	22,9	-18,4	5,7	-17,5	5,6	-0,1	0,8	0,7	13,4	26,5	57,3	12,3	2,2	8,7	6,5	-0,9	2,3	3,6	
V47_42_52	42	1600	geschlossen	geschlossen	23,5	-18,5	5,4	-18,8	5,2	-0,2	1,7	1,5	14,4	28,3	47,9	13,3	1,7	12,3	7,4	7,2	2,4	2,0	
Kompressor 3 mit Folgeregelung und neuer Elektronik für tiefe Drehzahlen																							
V63_32_42	32	1200	offen	offen	22,9	-17,7	6,1	-17,7	6,2	0,1	0,0	0,1	12,8	25,2	64,0	21,6	2,5	21,2	6,0	2,2	2,3	3,1	
V64_36_42	36	1300	geschlossen	geschlossen	22,6	-17,9	6,0	-17,1	6,0	0,0	0,8	0,8	13,2	26,0	59,2	26,3	2,3	20,8	6,1	5,5	2,4	1,9	
V65_34_38 (H)	34	1200	offen	offen	22,4	-17,9	6,0	-16,0	5,9	-0,1	2,0	1,9	13,5	25,1	54,4	34,6	2,2	25,6	6,2	4,2	2,4	3,1	
V66_34_38	34	1300	offen	offen	22,9	-17,9	6,0	-16,0	5,9	-0,1	-0,2	-0,3	12,6	25,7	66,7	23,5	2,7	27,0	5,9	2,4	2,4	2,9	
V67_34_42	34	1300	offen	offen	22,9	-18,2	5,8	-18,4	5,8	0,0	-0,2	-0,1	13,2	26,0	66,4	23,4	2,6	24,0	6,3	2,7	2,3	3,0	
V68_34_115	34	1300	offen	offen	23,0	-18,3	5,7	-17,5	5,4	-0,4	0,8	0,4	13,5	26,6	35,0	-7,9	1,3	-9,8	6,4	4,0	2,3	3,2	
Kompressor 3 gefahren mit Hysterese bei 1200 RPM																							
V61_34_drohn	34	H	offen	offen	23,8	-18,7	5,4	-20,7	5,2	-0,1	-2,0	-2,1	14,2	27,8	75,3	-1,6	2,7	8,5	7,1	3,6	2,4	3,3	
V62_34_drohn	34	H	offen	offen	23,9	-18,7	5,4	-20,6	5,9	0,6	-1,8	-1,3	14,4	28,0	72,2	1,7	2,6	7,8	7,2	3,0	2,4	3,3	
V63_34_38 h	34	H	offen	offen	24,5	-18,9	5,3	-21,0	6,4	1,1	-2,1	-1,0	14,8	28,9	85,2	18,9	2,9	23,5	7,6	3,2	2,4	3,2	
V65_34_38 h	34	H-0,25/0,25	offen	offen	24,4	-19,1	5,2	-20,6	4,7	-1,6	-2,1	-2,1	14,8	29,1	85,7	15,9	2,9	25,8	7,6	2,7	2,4	3,6	
V66_34_38 h	34	H-0,25/0,25	offen	offen	23,7	-18,7	5,5	-20,5	4,6	-0,9	-1,8	-2,8	14,0	27,6	73,3	10,5	2,7	23,6	6,9	2,5	2,4	3,6	
V67_34_38 h	34	H4.5...-0,25/0,25	offen	offen	24,4	-18,8	5,3	-20,7	4,8	-1,1	-2,1	-2,1	14,9	29,0	88,0	10,7	3,0	24,7	7,5	0,6	2,4	4,1	
V68_34_38 h	34	H4.5...-0,25/0,25	offen	offen	24,2	-18,8	5,4	-20,0	4,8	-0,6	-1,2	-1,7	14,5	28,4	83,3	14,9	2,9	23,2	8,3	2,4	2,4	4,1	
V70_35_38 h	35	H4.5...-0,35/0,35	offen	offen	23,6	-18,7	5,5	-18,6	4,8	-0,8	0,0	-0,7	13,8	27,3	76,3	20,5	2,8	23,9	11,0	3,6	2,4	3,3	

Tab. 2 Übersicht über alle durchgeführten Messungen, bei denen die Summe der Temperaturabweichungen im Kühlfach und Gefrierfach weniger als 3°C betragen.

Der erste Block (gelb) zeigt die gewählten Parameter, der zweite Block (lachsrosa) die aufgenommenen Temperaturdaten und deren Verrechnung, der dritte Block (orange) die aufgenommenen Leistungsdaten und deren Verrechnung und der vierte Block (rot) die Temperaturgradienten zwischen den vom Kühlkreislauf gekühlten Wänden und den Fächern.

Überblick über alle Versuche

Es wurde angestrebt, die Temperaturen im Kühlschrank und Gefrierfach des modifizierten Kühlschranks möglichst nah an den Referenzkühlschrank anzugleichen (siehe Abschnitte 3.4 und 3.5.2). Wie gut das gelungen ist, wird aus der Tab. 2 ersichtlich. Für die folgenden Auswertungen wurden nur Messungen verwendet, bei denen die Summe der Temperaturabweichung im Kühlschrank und im Gefrierfach weniger als 3°C beträgt. Es wurde entschieden, die summierte Abweichung von Kühlschrank und Gefrierfach als zentrale Angabe zu nehmen, da diese am ehesten eine Aussage macht über die Kühlleistung.

Messungen mit grosser Temperaturabweichung nicht berücksichtigt

4.2.1. Normierte Energieeinsparung

Abb. 18 zeigt die Energieeinsparung des modifizierten Kühlschranks gegenüber der Referenz für Messungen, die alle mit 42 g Füllmenge und bei 2400 RPM durchgeführt wurden. Sie unterscheiden sich lediglich durch die Temperaturabweichung zum Referenzkühlschrank. Die Energieaufnahme ist gegen die summierte Temperaturabweichung aufgetragen. Geht man von einem linearen Verhalten aus, führt eine Reduktion der summierten Temperatur um 1°C gegenüber des Referenzkühlschranks zu einer Reduktion der Leistungsaufnahme um fast 5% (gegenüber der Referenz).

Einfluss der Temperaturabweichung

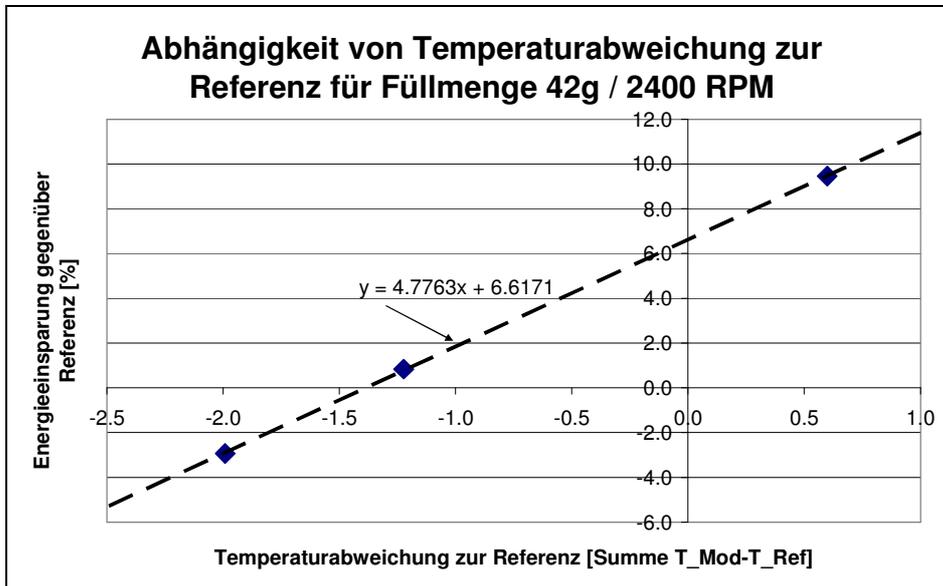


Abb. 18 Abhängigkeit der Energieeinsparung von der Temperaturabweichung zum Referenzkühlschrank

In den folgenden Darstellungen wird oftmals die normierte Energieeinsparung dargestellt, diese wurde folgendermassen berechnet.

Normierte Energieeinsparung

$$Energieeinsparung_{normiert} = Energieeinsparung_{gemessen} - 4.77 \cdot (\Delta T_{Kühlschrank} + \Delta T_{Gefrierfach})$$

4.2.2. Einfluss der Kompressordrehzahl auf den Energieverbrauch

Mit dem drehzahlvariablen Kompressor Embraco VCC3 VEM X5C wurde der Einfluss der Kompressordrehzahl auf die Leistungsaufnahme untersucht. Zu diesem Zweck wurden Messungen durchgeführt bei dem der Kühlschrank bei gegebener Füllmenge (34g) auf einer vorgegebenen Drehzahl lief und zur Regelung nur ein oder ausgeschaltet wurde. Abb. 19 zeigt die normierte Energieeinsparung in Abhängigkeit von der vorgegebenen Kompressordrehzahl für eine Füllmenge von 34g.

**Einfluss
Kompressor-
drehzahl**

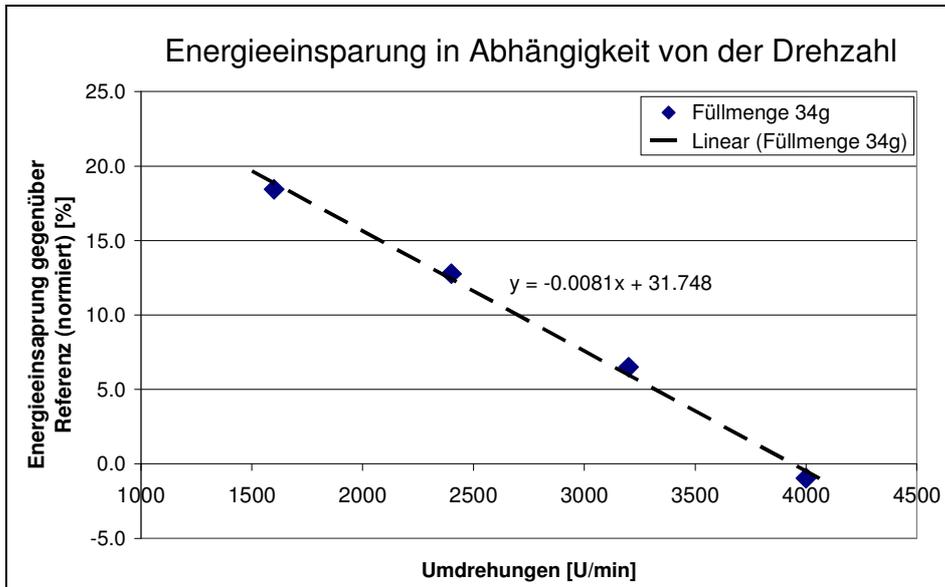


Abb. 19: Normierte Energieeinsparung des Modifizierten Kühlschranks bei einer Füllmenge von 34g bei unterschiedlichen Kompressordrehzahlen

Es ist ersichtlich, dass die Energieeinsparung gegenüber dem Referenzkühlschrank mit abnehmender Kompressordrehzahl etwa linear zunimmt. Bei 4000 U/min ist die Energieaufnahme der beiden Kühlschränke vergleichbar. Wird aber die Drehzahl des modifizierten Kühlschranks auf 1600 U/min begrenzt erreicht der modifizierte Kühlschrank eine Energieeinsparung von knapp 20% gegenüber der Referenz. Abb. 20 zeigt das Bild für eine Kühlmittelfüllmenge von 42 g.

**Weniger
Verbrauch bei
tiefer Drehzahl**

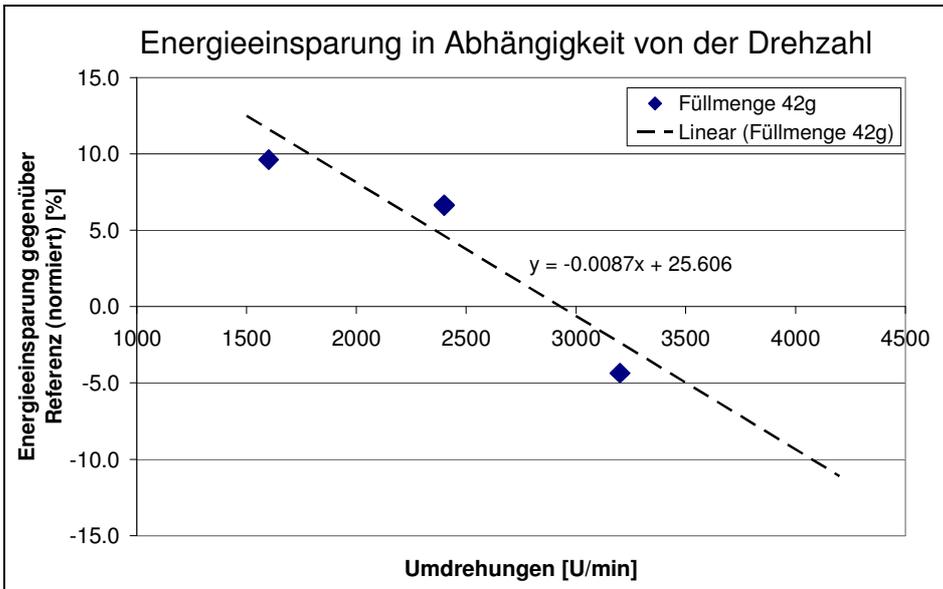


Abb. 20 Normierte Energieeinsparung des Modifizierten Kühlschranks bei einer Füllmenge von 42g bei unterschiedlichen Kompressordrehzahlen

Auch bei einer Füllmenge von 42g ist ersichtlich, dass eine Reduktion der Kompressordrehzahl zu einer signifikanten Leistungssteigerung führt. Nimmt man wieder lineares Verhalten an (was im Fall von 42 g Füllmenge nicht annähernd so gut passt wie bei 34 g Füllmenge) findet man eine ähnliche Steigung, d.h. einen ähnlichen Einfluss der Drehzahl.

Kühlkreislauf

4.2.3. Einfluss der Kompressorlaufzeit auf die Energieaufnahme

Je tiefer die gewählte Drehzahl, desto länger läuft der Kompressor während den Kühlzyklen. Abb. 21 zeigt die normierte Energieeinsparung in Abhängigkeit der relativen Kompressorlaufzeit für eine Füllmenge von 34g.

Weniger Verbrauch bei tiefer Drehzahl

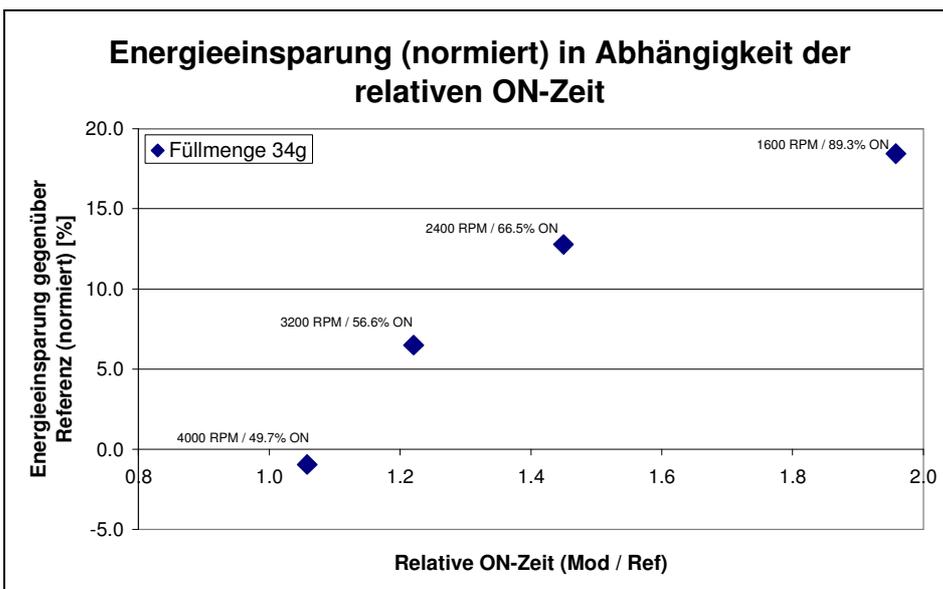


Abb. 21 Energieeinsparung gegenüber dem Referenzkühlschrank in Abhängigkeit der relativen ON-Zeit bei einer Füllmenge von 34g

Je mehr der Kompressor läuft, desto grösser die Energieeinsparung. Bei der grössten Energieeinsparung die bei 1600 U/min erreicht wird, läuft der Kompressor fast 90% der Zeit oder knapp doppelt so lange wie bei der Referenz. Abb. 22 zeigt das gleiche Bild für eine Kühlmittelfüllmenge von 42 g.

Tiefe Drehzahl
→ **längere Laufzeit**

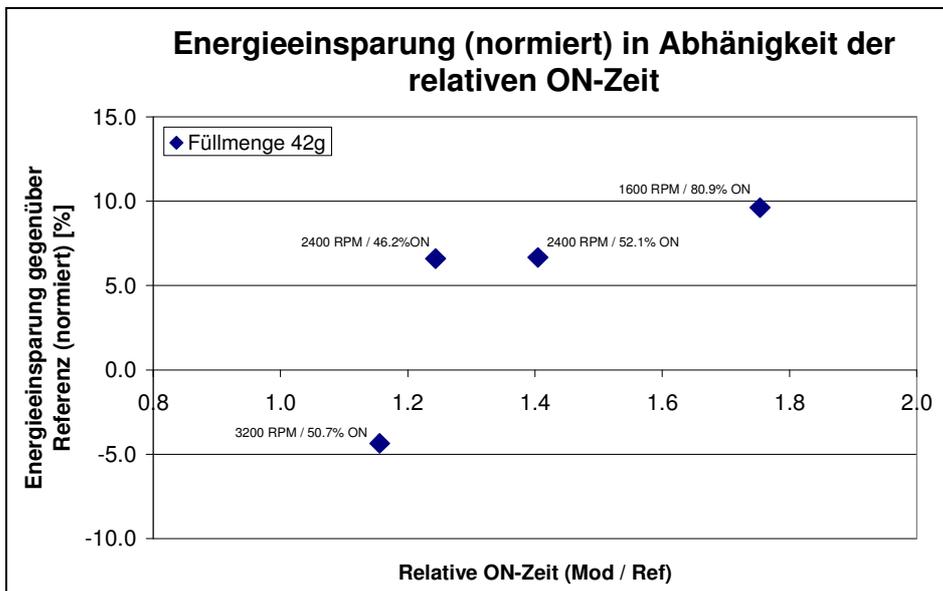


Abb. 22 Energieeinsparung gegenüber dem Referenzkühlschrank in Abhängigkeit der relativen ON-Zeit bei einer Füllmenge von 42g

Auch hier gilt; Je länger der Kompressor läuft, desto geringer ist die Energieaufnahme.

Abb. 23 zeigt die absolute Leistungsaufnahme des modifizierten Kühlschranks in Abhängigkeit von der prozentualen ON-Zeit bei einer Füllmenge von 34g. Die Bedingungen im Labor waren sehr warm (fast 30 °C), aber konstant. Die ON-Zeit des Referenzkühlschranks schwankt lediglich zwischen 45.6% und 47.0%. Es wird ersichtlich, dass eine Erhöhung der ON-Zeit von 50% auf knapp 100% zu einer Einsparung von 5 W führt, was etwa 20% entspricht. Ein grosses Energiesparpotential ist also insbesondere vorhanden, wenn der Kühlschrank wenig läuft, z.B. im Standbetrieb bei tiefer Umgebungstemperatur.

längere Laufzeit
→ **weniger Verbrauch**

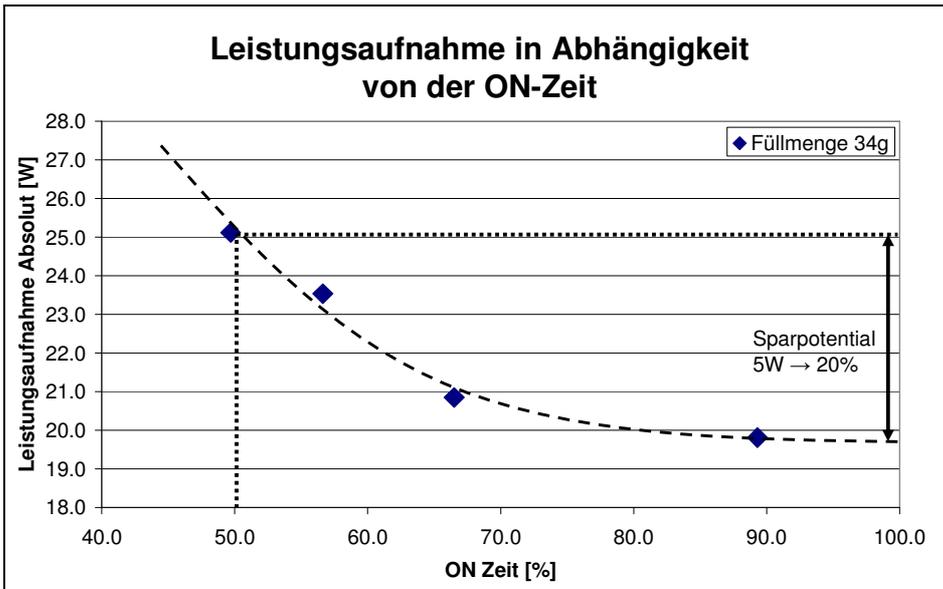


Abb. 23 Absolute Leistungsaufnahme in Abhängigkeit von der ON-Zeit für eine Füllmenge von 34g. Dient als Abschätzung für die potentielle Energieeinsparung.

4.2.4. Einfluss der Füllmenge auf die Energieaufnahme

In Abschnitt 4.2.2 wurde gezeigt, dass die grösste Leistungseinsparung bei der tiefstmöglichen Drehzahl erreicht wird. Um die optimale Kühlmittelfüllmenge zu ermitteln, wurden bei dieser Drehzahl Versuche mit unterschiedlichen Füllmengen gefahren. Die Füllmenge wurde von 29 g bis auf 42 g variiert. Die Resultate sind in Abb. 24 dargestellt.

Variation der Füllmenge

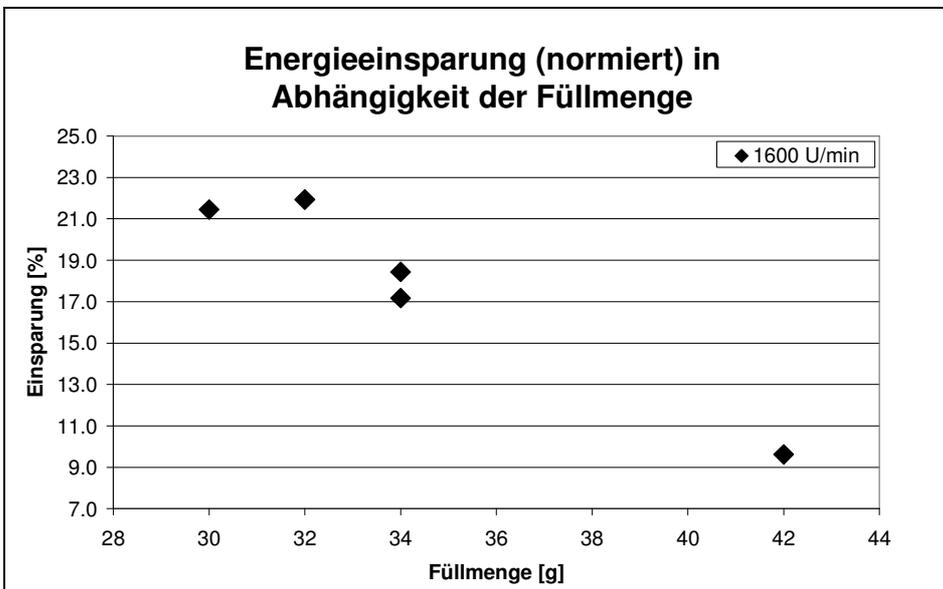


Abb. 24 Normierte Energieeinsparung in bei konstanter Drehzahl (1600 U/min) für unterschiedliche Füllmengen (Kompressor 1)

Unterhalb von 29 g (in Abb. 24 nicht ersichtlich) nimmt die Effizienz schnell ab. Eine Füllmenge über dem Optimum fällt hingegen weniger stark ins Gewicht; bei 42 g ist immer noch eine Einsparung vorhanden.

Einfluss der Veränderung der Füllmenge

Die grösste Energieeinsparung wurde (für den Kompressor 1) bei einer Füllmenge von 32 g gemessen. Dieser Wert passt mit der vom Hersteller vorgeschriebenen Füllmenge von 33 g gut überein, es ist allerdings zu beachten, dass der Kühlkreislauf des modifizierten Kühlschranks etwas länger ist durch das in Abb. 8. gezeigte Einfüllsystem.

32g Füllmenge optimal für Kompressor 1

Die optimale Kühlmittelmenge war bei den drei eingesetzten Kompressoren des gleichen Typs erstaunlicherweise leicht unterschiedlich. Für Kompressor 1 schien 32 g optimal (siehe Abb. 24), für Kompressor 2 36 g und für Kompressor 3 34 g. Wir gehen davon aus, dass unterschiedliche Ölfüllmengen des Kompressors und Ölabinlagerungen im Kältekreis diese Unterschiede hervorrufen.

Optimale Füllmenge variiert

Eine Veränderung der Kühlmittelmenge zu geringerer Füllmenge bedingt einen Temperatursausgleich zwischen Gefrierfach und Kühlfach (siehe Abschnitt 3.4). Es ist schwierig abzuschätzen, wie gross der direkte Einfluss des Temperatursausgleichs auf den Verbrauch des Kühlgerätes ist. Eine genauere Betrachtung der Temperaturgradienten zwischen der kalten Wand und dem jeweiligen Kühlfach weist darauf hin, dass sich der Wärmeentzug verändert (siehe Tab. 3).

Einfluss Temperaturausgleich

Bezeichnung	Füllmenge [g]	Umdrehungen [RPM]	Schieber unten	Schieber oben	Normierte Einsparung	Grad Kühl Ref	Grad Kühl Mod	Grad Gefrier Ref	Grad Gefrier Mod
V27_30_52	30	1600	12mm	offen	21.5	8.0	4.8	2.3	3.3
V30_32_52	32	1600	7mm	offen	21.9	7.3	5.4	2.3	2.9
V53_32_42	32	1300	offen	~15mm	21.2	6.0	2.2	2.3	3.1
V55_34_38 (neu)	34	1200	offen	~16mm	25.6	6.2	1.2	2.4	3.1
V56_34_38	34	1200	offen	12mm	27.0	5.9	2.4	2.4	2.9
V57_34_42	34	1300	offen	12mm	24.0	6.3	2.7	2.3	3.0
V63_34_38_h	34	H	offen	12mm	23.5	7.6	3.2	2.4	3.2
V65_34_38_h	34	H -0.25/0.25	offen	15mm	25.8	7.6	2.7	2.4	3.6
V66_34_38_h	34	H -0.25/0.25	offen	15mm	23.6	6.9	2.5	2.4	3.6
V67_34_38_h	34	H 4.5...-0.25/0.25	offen	17mm	24.7	7.5	0.8	2.4	4.1
					Mittelwert	6.9	2.8	2.4	3.3

Tab. 3 Auszug aus Tab. 2

Eine Betrachtung von Versuchen mit grosser Energieeinsparung, bei denen jeweils ein signifikanter Wärmeaustausch stattfand, ergibt, dass der Temperaturgradient im Kühlfach signifikant kleiner, im Gefrierfach hingegen etwas grösser ist als bei dem Referenzkühlschrank. Man darf also davon ausgehen, dass mehr Wärme im Gefrierfach und weniger im Kühlfach entzogen wird.

Betrachtung Temperaturgradienten

4.2.5. Grösste Energieeinsparung

Um eine noch grössere Einsparung zu ermöglichen, wurde eine neue Steuerelektronik eingebaut, welche es erlaubte die Kompressordrehzahl von 1600 RPM auf 1200 RPM zu senken. Die grösste Energieeinsparung wurde bei Versuch 56 erzielt, Der modifizierte Kühlschrank verbrauchte normiert 27% (effektiv 25.5%) weniger Strom als der Referenzkühlschrank. Dabei lief der modifizierte Kühlschrank 69% der Zeit und der Referenzkühlschrank lediglich 26% der Zeit (Faktor 2.7).

Maximal gemessene Einsparung bei 1200 RPM: 27%

Es soll noch betont werden, dass die Einsparung von 27% zustande kam, obwohl die Kompressorsteuerung des modifizierten Kühlschranks einen Stromverbrauch von etwa 1.2 W hat, verglichen zu 0.2 W beim Referenzkühlschrank. Hier sehen wir noch ein gewisses Einsparpotential.

Verbrauch der Steuerung

Längere Einschaltzeiten durch tiefere Drehzahlen waren aufgrund der Beschränkung der Minimaldrehzahl nicht möglich.

4.3. Messung gemäss EN15502 in der Klimakammer

Der modifizierte Kühlschrank wurde in der Klimakammer am Messinstitut der Uni Karlsruhe getestet. Dabei wurde er von awtec via Internet gesteuert. Für die Messungen in der Klimakammer musste natürlich auf die Folgeregelung verzichtet werden, da der Referenzkühlschrank in Zürich blieb. Es wurde eine Hysterese um eine vorgegebene Kühlfachtemperatur gefahren, welche zu einem ähnlichen Zyklus führte wie die Folgeregelung.

Klimakammer

Leider können wir die für die Zuteilung der Gütesiegel gültige Messnorm mit unserem Kühlschrank nicht erfüllen. Der Grund dafür ist, dass gemäss Norm, die wärmste Stelle im Gefrierfach -18°C nicht überschreiten darf. Bei unserm Kühlschrank ist die "wärmste Stelle" natürlich dort, wo wir den Luftaustausch haben zwischen Kühlfach und Gefrierfach (zur Erinnerung: dieser Wärmeaustausch ist notwendig, da der bei tiefen Drehzahl fast durchlaufende Kompressor zu einer starken Verschiebung im Kältekreislauf führt).

Norm konnte nicht erfüllt werden

Es wurde trotzdem eine Messung durchgeführt, wobei einfach keine Thermoelemente in der unmittelbarer Nähe von den Lüftungslöcher platziert wurden. Um das Kühlfach in die Region von 5°C zu bringen mussten wir den Kühlschrank (nach unseren Thermoelementen) auf 1.5°C einstellen. Um diese Temperatur überhaupt zu erreichen, musste der Kompressor mit einer Drehzahl von 1850 RPM betreiben werden.

Messung trotzdem durchgeführt

	Messung 1	Messung 2
Innentemperaturen Kühlteil	3,9 / 5,6 / 4,7 $^{\circ}\text{C}$	3,9 / 5,6 / 4,8 $^{\circ}\text{C}$
Durchschnitttemperatur Kühlteil	4,7 $^{\circ}\text{C}$	4,7 $^{\circ}\text{C}$
Innentemperatur Gefrierfach	-21,2 $^{\circ}\text{C}$	-20,7 $^{\circ}\text{C}$
Energieaufnahme	0,46 kWh/24h (bei 24,7 $^{\circ}\text{C}$ RT, nicht auf 25,0 $^{\circ}\text{C}$ hochgerechnet)	0,47 kWh/24h (korr. auf 25,0 $^{\circ}\text{C}$ Umgebungstemp. nach EN 153)
rel. Einschaltdauer		87%

Tab. 4 Messresultate aus der Klimakammer

Die gemessene Energieaufnahme von 0.47 kWh/24h entspricht einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme von 19.5 W, was wesentlich mehr ist, als wir bei ähnlichen Raumtemperaturen gemessen haben.

Hoher Verbrauch in der Klimakammer

Der Originalkühlschrank verbraucht offiziell 0.48 kWh/24h. Da der Referenzkühlschrank aber nicht ausgemessen wurde, ist ein Vergleich der Werte nicht sehr aussagekräftig.

Leider sagt die Messung aus der Klimakammer sehr wenig aus. Was wir lernen, ist dass mit unserem Kunstgriff (Wärmeaustausch zwischen Gefrierfach und Kühlfach) die Messnorm nicht erfüllt werden kann. Um die Norm zu erfüllen ist es notwendig, in den Kältekreisraum einzugreifen.

Messung in Klimakammer sagt wenig aus

5. Schlussfolgerungen

Die hier präsentierten Ergebnisse haben gezeigt, dass der Einsatz eines drehzahlgeregelten Kompressors den Stromverbrauch erheblich senkt gegenüber einem herkömmlichen Kompressor. Die grösste Einsparung gegenüber einem herkömmlichen Kühlschrank wird erzielt, wenn die Drehzahl so tief ist, dass der Kompressor fast dauernd oder dauernd läuft.

**Erheblich
geringerer
Stromverbrauch**

Die höhere Effizienz ist auf folgende Faktoren zurückzuführen:

**Grund für hohe
Effizienz**

- Weniger (energieintensive) Anlaufzyklen
- Kleinere Verluste im Kältekreis durch tiefere Drehzahl/Geschwindigkeit
- Kleinerer und konstanteren Temperaturgradient zwischen gekühlter Wand und dem gekühltem Raum
- Kleinere Temperaturdifferenz Verdichteroberfläche zu Umgebung

Dem stehen höhere Verluste durch die tiefere Verdichtereffizienz bei tiefen Drehzahlen und Verluste im Inverter gegenüber.

Im direkten Vergleich verbrauchte der modifizierte Kühlschrank bei einer Drehzahl von 1200 RPM bis zu 27% weniger Strom als der Referenzkühlschrank mit einer Kompressordrehzahl von etwa 3000 RPM. Diese Stromeinsparung bedeutet für den Konsumenten über die Kühlschranklebensdauer (etwa 15 Jahre) eine Einsparung von lediglich etwa CHF 100.- Der Beitrag an die Umwelt ist durch die grosse Anzahl Kühlschränke im Einsatz aber signifikant.

**Bis 27%
Einsparung**

Der „Homo Ökonomikus“ ist also lediglich bereit, etwa CHF 100 mehr zu bezahlen für den effizienteren Kühlschrank. Wenn man davon ausgeht, dass die Herstellkosten einen Sechstel des Verkaufspreises ausmachen, dürfen die Mehrkosten in der Herstellung lediglich CHF 17 betragen. Wir gehen davon aus, dass die Mehrkosten für einen drehzahlgesteuerten Kompressor selbst bei sehr grossen Stückzahlen mit der passenden Elektronik Mehrkosten von mindestens CHF 40 verursachen würden. Wir müssen allerdings betonen, dass wir kaum Angaben zu Kosten von den Kompressorherstellern erhalten haben.

**Wirtschaft-
lichkeit**

Weitere positive Nebeneffekte des drehzahlgeregelten Kompressors sind die wesentlich geringere Lärmemission im Normalbetrieb und die für schnelle Kühlung zur Verfügung stehende Extraleistung bei hoher Drehzahl.

**Positive
Nebeneffekte**

Leider konnte die für die Zuteilung der Gütesiegel gültige Messnorm mit unserem Kühlschrank nicht erfüllt werden. Um die Norm zu erfüllen ist ein Eingriff in den Kühlkreislauf notwendig.

**Eingriff in
Kühlkreislauf
notwendig um
Messnorm zu
erfüllen**

6. Empfehlung für das weitere Vorgehen

Nun ist bewiesen, dass man mit dem Ansatz „drehzahlgesteuerter Kompressor“ wirklich signifikant Strom einsparen kann. Im nächsten Schritt muss aufgezeigt werden, dass dies auch wirtschaftlich gemacht werden kann.

Wirtschaftlichkeit

Wir empfehlen, als nächsten Schritt der Umsetzung einen seriennahen Pilotkühlschrank zu bauen der autonom funktioniert (ohne externe Steuerung durch einen Computer) und bei dem anstelle des Wärmeaustauschs zwischen Kühl- und Gefrierfach ein Eingriff in den Kühlkreislauf vorgenommen wird, damit der Pilotkühlschrank die Messnorm für das A⁺⁺⁺-Energie label erfüllt.

Pilotkühlschrank

Um den nächsten Schritt effizient zu gestalten braucht es einen Kühlschrankhersteller als Partner. Nur so kann einen optimalen Informationsaustausch gewährleistet werden. Es spielt keine Rolle, ob der Partner Kühlschrank selber herstellt oder herstellen lässt. Es ist allerdings zentral, dass es sich um ein Marktschergewicht handelt, insbesondere auch um genügend Gewicht zu haben um Informationen von den Kompressorherstellern zu erhalten.

Kühlschrankhersteller als Partner

Ausgehend von einem A⁺⁺-Serienkühlschrank empfehlen wir folgendes Vorgehen (der genaue Typ spielt grundsätzlich keine Rolle und kann auf einen aktuellen oder potentiellen Projektpartner (Kühlschrankhersteller) abgestimmt werden).

Vorgehen

- Suche nach einem zusätzlichen Projektpartner (Hersteller)
- Einbau eines drehzahlgesteuerten Kompressors
- Entwicklung und Programmierung einer eigenständigen „Drop-In“-Steuerung basierend auf einem Thermoelement im Kühlfach
- Eingriff in den Kühlkreislauf: Einbau einer Drossel zwischen dem Gefrierfachkreislauf und dem Kühlfachkreislauf, um die Temperaturverteilung auf die optimale Kühlmittelmenge anzupassen.
- Ermittlung der genauen Mehrkosten in der Herstellung.
- Ermittlung des Verbrauchs in der Klimakammer nach offizieller Messnorm
- Ermittlung des Verbrauchs im „realen Gebrauch“ (mit Türöffnungen, Zugaben von warmen Speisen usw.) im Verhältnis zum Serienkühlschrank. Fällt die Energieeinsparung hier noch grösser aus (was wir erwarten) könnten diese Ergebnisse werbewirksam veröffentlicht werden.
- Unterstützung eines Herstellers bei der Aufnahme der Produktion und der Markteinführung

Referenzen

- [1] *Bush, E. und Josephy, B.* (2007) „Hintergrundinformationen: Mehr Stromeffizienz mit A++ Kühl- und Gefriergeräten“, topten.ch/energie schweiz, <http://www.topten.ch/uploads/images/download-files/HintergrundinformationenA++.pdf>
- [2] *Philipp, J.* (2000) „Optimierung von Haushaltskühlgeräten mittels numerischer Modellierung“, Dissertation der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, Forschungsberichte des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins Nr. 65, Dezember 2000

Anhang

A1. Datenblatt Kühlschrank Electrolux EK 244



EK 244

 Green Spirit **best in class**



Einbau-Kühlschrank, 1 Türe

Ausstattung

- Temperaturregelung elektronisch
- Digitale Temperaturanzeige
- Schnellkühlung
- Helle, optimale Ausleuchtung des Innenraumes dank 4 seitlich versenkten LED-Lichtstrahler
- 4 Glasplatten, davon 1 teilbar
- 1 Gemüseschublade gross
- 5 Türfächer, universell verstellbar, davon 1 Butter-/Käsefach
- Flaschenhalterung (auch für 2-Liter Flaschen)

Bruttopreis

EK 244 11 LI WE	CHF 2'360.00
Scharniere links, weiss	
EK 244 11 RE WE	CHF 2'360.00
Scharniere rechts, wechselbar, weiss	

Technische Daten

Energieeffizienzklasse	A++
Energieverbrauch in 24 h/100 l (kWh)	0.197
Nutzzinhalte Gesamt (l)	241
Nutzzinhalte Kühlteil (l)	215
Nutzzinhalte Gefrierraum (l)	26
Gefrierraum - Sternkennzeichen	4
Geräte-Höhe (mm)	1268
Geräte-Breite (mm)	548
Geräte-Tiefe (mm)	575
Einbau Höhe (mm)	1270
Einbau Breite (mm)	550
Einbau Tiefe (mm)	605
Gewicht Brutto	51.5
Gewicht Netto	48

Modellwechsel und Preisänderungen vorbehalten. Preisangaben inkl. MwSt exkl. vRG. Lieferung an Wiederverkauf.

Quelle: www.electrolux.ch

A2. Kompressoren-Datenblätter

A2.1. Embraco EMX32CLC (Referenzkühlschrank)

		COMPRESSOR TECHNICAL DATA	
COMPRESSOR DEFINITION			
Designation	EM X32CLC		
Nominal Voltage/Frequency	220-240 V 50 Hz		
Engineering number	513309510		
A - APPLICATION / LIMIT WORKING CONDITIONS			
1 Type	Hermetic reciprocating compressor		
2 Refrigerant	R-600a		
3 Nominal voltage and frequency	220-240 / 50	[V / Hz]	
4 Application type	Low Back Pressure		
4.1 Evaporating temperature range	-35°C to -10°C	(-31°F to 14°F)	
5 Motor type	RSCR		
6 Starting torque	LST - Low Starting Torque		
7 Expansion device	Capillary Tube		
8 Compressor cooling		Operating voltage range	
		50 Hz	60 Hz
8.1 LBP (32°C ambient temperature)	Static	187 to 255 V	-
8.2 LBP (43°C ambient temperature)	Static	187 to 255 V	-
8.3 HBP (32°C ambient temperature)	-	-	-
8.4 HBP (43°C ambient temperature)	-	-	-
9 Maximum condensing pressures/temperature			
9.1 Operating (gauge)	7.7	[kgf/cm ²] (109 psig)	/ °C - °F
9.2 Peak (gauge)	9.8	[kgf/cm ²] (139 psig)	/ °C - °F
10 Maximum winding temperature	130	[°C]	
B - MECHANICAL DATA			
1 Commercial designation		[hp]	
2 Displacement	5.96	[cm ³] (0.364 cu.in)	
2.1 Bore	16.000		
2.2 Stroke	7.500		
3 Lubricant charge (supplied)	180	[ml] (6.09 fl.oz.)	
3.1 Lubricants approved			
3.2 Lubricants type/viscosity	MINERAL / ISO5		
4 Weight(with oil charge)	7.88	[kg] (17.37 lb.)	
5 Nitrogen charge	-	[kgf/cm ²]	
C - ELETRICAL DATA			
1 Nominal Voltage/Frequency/Number of Phases	220-240 V 50 Hz 1 ~ (Single Phase)		
2 Starting device type	TSD		
2.1 Starting device			
3 Start capacitor	-	[µF(VAC minimum)]	
4 Run capacitor	2(380)/2.5(380)	[µF(VAC minimum)]	
5 Motor protection (external)	4TM 110NFBYY-73		
6 Start winding resistance	34.75	[Ω at 25°C (77°F)] +/- 8%	
7 Run winding resistance	37.70	[Ω at 25°C (77°F)] +/- 8%	
8 LRA - Locked Rotor Amperage (50 Hz)	2.60	[A] - measured according to UL 984	
9 FLA - Full Load Amperage LMBP (50 Hz)	0.40	[A] - measured according to UL 984	
10 FLA - Full Load Amperage HBP (50 Hz)	-	[A] - measured according to UL 984	
11 Approval boards certification	CCC - VDE		
UPDATE: 20JUL2006		513309510	

D - PERFORMANCE - CHECK POINT DATA

TEST CONDITIONS: @220V50Hz			CECOMAFLBP Static		Evaporating Temperature (Condensing Temperature		-25°C (-13°F) 55°C (131°F)	
Cooling Capacity +/- 5%			Power Consumption +/- 5%	Current Consumption +/- 5%	Gas Flow Rate +/- 5%	EFFICIENCY RATE +/- 7%		
[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]
250	63	73	54	0.25	0.95	4.60	1.16	1.35

E - PERFORMANCE - CURVES

TEST CONDITIONS: @220V50Hz		CECOMAF Static				(Condensing Temperature 45°C (+113°F))				
Evaporating Temperature		Cooling Capacity +/- 5%			Power Consumption +/- 5%	Current Consumption +/- 5%	Gas Flow Rate +/- 5%	EFFICIENCY RATE +/- 7%		
°C	(°F)	[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]
-35	(-31)	163	41	48	38	0.18	0.57	4.26	1.07	1.25
-30	(-22)	221	56	65	45	0.21	0.77	4.94	1.24	1.45
-25	(-13)	291	73	85	52	0.24	1.01	5.64	1.42	1.65
-20	(- 4)	376	95	110	59	0.27	1.31	6.42	1.62	1.88
-15	(+ 5)	479	121	140	65	0.30	1.67	7.32	1.84	2.14
-10	(+14)	606	153	177	72	0.33	2.12	8.37	2.11	2.45

TEST CONDITIONS: @220V50Hz		CECOMAF Static				(Condensing Temperature 55°C (+131°F))				
Evaporating Temperature		Cooling Capacity +/- 5%			Power Consumption +/- 5%	Current Consumption +/- 5%	Gas Flow Rate +/- 5%	EFFICIENCY RATE +/- 7%		
°C	(°F)	[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]
-35	(-31)	125	32	37	37	0.18	0.48	3.39	0.86	0.99
-30	(-22)	184	46	54	45	0.21	0.70	4.03	1.01	1.18
-25	(-13)	249	63	73	54	0.25	0.95	4.62	1.16	1.35
-20	(- 4)	326	82	96	62	0.28	1.25	5.21	1.31	1.53
-15	(+ 5)	417	105	122	71	0.32	1.60	5.85	1.47	1.71
-10	(+14)	527	133	155	80	0.36	2.02	6.58	1.66	1.93

TEST CONDITIONS: @220V50Hz		CECOMAF Static				(Condensing Temperature 65°C (+149°F))				
Evaporating Temperature		Cooling Capacity +/- 5%			Power Consumption +/- 5%	Current Consumption +/- 5%	Gas Flow Rate +/- 5%	EFFICIENCY RATE +/- 7%		
°C	(°F)	[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]
-35	(-31)	94	24	28	36	0.17	0.40	2.60	0.65	0.76
-30	(-22)	152	38	44	46	0.21	0.64	3.26	0.82	0.95
-25	(-13)	213	54	62	56	0.25	0.90	3.81	0.96	1.12
-20	(- 4)	281	71	82	66	0.30	1.19	4.29	1.08	1.26
-15	(+ 5)	360	91	105	76	0.35	1.53	4.75	1.20	1.39
-10	(+14)	453	114	133	87	0.40	1.93	5.23	1.32	1.53

F - EXTERNAL CHARACTERISTICS

1 Base Plate	European Standard EUEM		
2 Tray Holder	Yes		
3 Connectors			
3.1 SUCTION	6.1 +0.10/+0.00	[mm]	(0.240" +0.004"/+0.000")
3.1.1 Material	Copper		
3.1.2 Shape	Slanted 42° up + 45° to Back		
3.2 DISCHARGE	4.9 +0.10/-0.05	[mm]	(0.193" +0.004"/-0.002")
3.2.1 Material	Copper		
3.2.2 Shape	Slanted parallel BP+24°to Back		
3.3 PROCESS	6.1 +0.10/+0.00	[mm]	(0.240" +0.004"/+0.000")
3.3.1 Material	Copper		
3.3.2 Shape	Slanted 45° up + 45° to Back		
3.4 Oilcooler(Copper)	No	[mm]	
3.5 Connector sealing	Rubber Plugs		

A2.2. Embraco VEMX5C (Drehzahl geregelter Kompressor)

		COMPRESSOR TECHNICAL DATA	
COMPRESSOR DEFINITION			
Designation	VEM X5C		
Nominal Voltage/Frequency	230 V 40-150 Hz		
Engineering Number	513903001		
A - APPLICATION / LIMIT WORKING CONDITIONS			
1 Type	Hermetic reciprocating compressor		
2 Refrigerant	R-600a		
3 Nominal voltage and frequency	230 / 40-150	[V / Hz]	
4 Application type	Low Back Pressure		
4.1 Evaporating temperature range	-35°C to -10°C	(-31°F to 14°F)	
5 Motor type	BPM		
6 Starting torque	LST - Low Starting Torque		
7 Expansion device	Capillary tube		
8 Compressor cooling		Operating voltage range	
		50 Hz	60 Hz
8.1 LBP (32°C Ambient temperature)	Static	187 to 255 V	187 to 255 V
8.2 LBP (43°C Ambient temperature)	Static	187 to 255 V	187 to 255 V
8.3 HBP (32°C Ambient temperature)	-	-	-
8.4 HBP (43°C Ambient temperature)	-	-	-
9 Maximum condensing pressures/temperature			
9.1 Operating (gauge)	7.7	[kgf/cm ²] (109 psig)	/ °C - °F
9.2 Peak (gauge)	9.8	[kgf/cm ²] (139 psig)	/ °C - °F
10 Maximum winding temperature	130	[°C]	
B - MECHANICAL DATA			
1 Commercial designation	1/5	[hp]	
2 Displacement	5.19	[cm ³] (0.317 cu.in)	
2.1 Bore	21.000		
2.2 Stroke	7.500		
3 Lubricant charge	220	[ml] (7.44 fl.oz.)	
3.1 Lubricants approved			
3.2 Lubricants type/viscosity	ALQUILB / ISO5		
4 Weight(with oil charge)	7.59	[kg] (16.73 lb.)	
5 Nitrogen charge	-	[kgf/cm ²]	
C - ELETRICAL DATA			
1 Nominal Voltage/Frequency/Number of Phases	230 V 40-150 Hz 3 ~ (Three phase)		
2 Starting device type	Inverter		
2.1 Starting device	VCC32456XXXX		
3 Start capacitor	-	[µF(VAC minimum)]	
4 Run capacitor	-	[µF(VAC minimum)]	
5 Motor protection (external)	VCC32456XXXXX		
6 Start winding resistance	16.07	[Ω at 25°C (77°F)] +/- 8%	
7 Run winding resistance	16.07	[Ω at 25°C (77°F)] +/- 8%	
8 LRA - Locked rotor amperage (40/150 Hz)	2.10/2.10	[A] - Measured according to UL 984	
9 FLA - Full load amperage L/MBP (40/150 Hz)	2.10/2.10	[A] - Measured according to UL 984	
10 FLA - Full Load Amperage HBP (40/150 Hz)	-	[A] - Measured according to UL 984	
11 Approval boards certification	VDE		
UPDATE: 23OCT2008		513903001	

D - PERFORMANCE - CHECK POINT DATA

TEST CONDITIONS: @220V1200RPM			CECOMAFLBP Static		Evaporating temperature (Condensing temperature	-25°C (-13°F) 55°C (131°F)		
Cooling capacity +/- 5%			Power consumption +/- 5%	Current consumption +/- 5%	Gas flow rate +/- 5%	EFFICIENCY RATE +/- 7%		
[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]
81	20	24	20	0.17	0.31	4.13	1.04	1.21

TEST CONDITIONS: @220V1600RPM			CECOMAFLBP Static		Evaporating temperature (Condensing temperature	-25°C (-13°F) 55°C (131°F)		
Cooling capacity +/- 5%			Power consumption +/- 5%	Current consumption +/- 5%	Gas flow rate +/- 5%	EFFICIENCY RATE +/- 7%		
[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]
111	28	33	25	0.21	0.42	4.39	1.11	1.29

TEST CONDITIONS: @220V2000RPM			CECOMAFLBP Static		Evaporating temperature (Condensing temperature	-25°C (-13°F) 55°C (131°F)		
Cooling capacity +/- 5%			Power consumption +/- 5%	Current consumption +/- 5%	Gas flow rate +/- 5%	EFFICIENCY RATE +/- 7%		
[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]
144	36	42	31	0.25	0.55	4.60	1.16	1.35

TEST CONDITIONS: @220V3000RPM			CECOMAFLBP Static		Evaporating temperature (Condensing temperature	-25°C (-13°F) 55°C (131°F)		
Cooling capacity +/- 5%			Power consumption +/- 5%	Current consumption +/- 5%	Gas flow rate +/- 5%	EFFICIENCY RATE +/- 7%		
[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]
225	57	66	47	0.37	0.86	4.78	1.20	1.40

TEST CONDITIONS: @220V4500RPM			CECOMAFLBP Static		Evaporating temperature (Condensing temperature	-25°C (-13°F) 55°C (131°F)		
Cooling capacity +/- 5%			Power consumption +/- 5%	Current consumption +/- 5%	Gas flow rate +/- 5%	EFFICIENCY RATE +/- 7%		
[Btu/h]	[kcal/h]	[W]	[W]	[A]	[kg/h]	[Btu/Wh]	[kcal/Wh]	[W/W]
343	86	101	75	0.57	1.31	4.56	1.15	1.34

E - PERFORMANCE - CURVES

F - EXTERNAL CHARACTERISTICS

1 Base plate	European Standard		
2 Tray holder	Yes		
3 Connectors			
3.1 SUCTION	6.1 +0.10/+0.00	[mm]	(0.240" +0.004"/+0.000")
3.1.1 Material	Copper		
3.1.2 Shape	Slanted 12° out + 79° up		
3.2 DISCHARGE	4.94 +0.08/-0.08	[mm]	(0.194" +0.003"/-0.003")
3.2.1 Material	Copper		
3.2.2 Shape	Slanted parallel BP+24° to Back		
3.3 PROCESS	6.1 +0.10/+0.00	[mm]	(0.240" +0.004"/+0.000")
3.3.1 Material	Copper		
3.3.2 Shape	Slanted 42° up + 45° to Back		
3.4 Oil cooler (Copper)	No	[mm]	
3.5 Connector sealing	Rubber Plugs		

DEVELOPMENT

A3. Messung Motoreffizienz

Um die Wirkungsgrade (elektrisch→mechanisch) der beiden Kompressormotoren zu vergleichen, wurde versucht, die elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit vom Drehmoment zu messen. Aufgrund der hochintegrierten Bauweise der Kompressoren konnte insbesondere beim Serienkompressor aber keine Ankopplung an den Prüfstand erreicht werden, die die Messung nicht wesentlich beeinflusste.

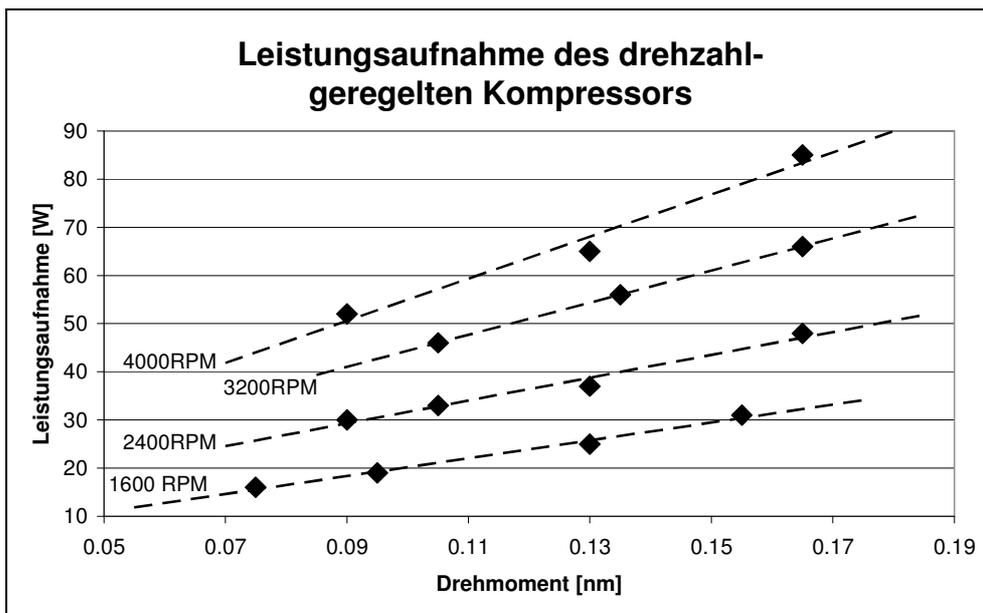


Abb. 25 Leistungsaufnahme des drehzahlgeregelter Kompressors Embraco VCC3 VEM X5C in Abhängigkeit von dem Drehmoment und der Drehzahl

Die aus den Leistungsmessungen errechneten Wirkungsgrade sind in Tab. 5 dargestellt.

**Leistungs-
messung**

Drehzahl [U/min]	Wirkungsgrad [%]
1600	83.5
2340	80.5
3190	80.1
3900	77.2

Tab. 5 Errechnete Wirkungsgrade des drehzahlgeregelter Kompressors Embraco VCC3 VEM X5C in Abhängigkeit von dem angelegtem Drehmoment und der Drehzahl

Wie erwartet nimmt der Wirkungsgrad zu höheren Drehzahl leicht ab. Der absolute Wirkungsgrad scheint uns etwas tief. Es ist aber durchaus denkbar, dass unsere Drehmomentübertragung durch flexible Hohlwelle zu einem markanten Verlust geführt hat.

Wirkungsgrad