

Erfahrungen aus dem Monitoring eines energieeffizienten Supermarkts

Nicolas Réhault^{1*}, Gesa Böhme¹

¹ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Abteilung Solares Bauen, Heidenhofstr. 2,
79110 Freiburg, Deutschland

nicolas.rehault@ise.fraunhofer.de

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Im Rahmen des EnOB-Programms vom BMWi wurde 2010 ein neues Energiekonzept für eine Filiale der Lebensmittelhandelskette ALDI SÜD erarbeitet und realisiert. Mit der Kombination zahlreicher Einzelmaßnahmen in den Bereichen Kälteerzeugung, Kühlmöbel, Gebäudehülle und Haustechnik wurde angestrebt, den Primärenergiebedarf um 29 Prozent gegenüber einer Standardfiliale zu senken. Im Kern des Konzepts steht ein geothermisch gestützter CO₂-Kälteverbund, der alle Energiedienstleistungen im Bereich Kälte und Wärme abdeckt. Bis Ende Juni 2013 wurde der Supermarkt einem intensiven wissenschaftlichen Monitoring unterzogen, das eine detaillierte Auswertung und Optimierung des Betriebs ermöglichte, sowie Ergebnisse über die Effizienz des Konzepts lieferte. In diesem Artikel beschreiben wir die Grundlagen des Energiekonzepts, die Ergebnisse aus dem intensiven Monitoring sowie die gewonnenen Erfahrungen für die Planung und die Betriebsführung energieeffizienter Supermärkte.

Stichwörter:

Supermarkt, CO₂-Kälteverbund, Monitoring

1. Hintergründe und Ziele

Supermärkte zählen zu den Gebäuden mit den größten Energieverbräuchen, bei spezifischen Primärenergieverbräuchen zwischen 500 und 1300 kWh/(m²a) [1], [2]. Andererseits setzt sich seit mehreren Jahren die LEH-Branche in Deutschland mit steigenden Energiepreisen, einem immer strengerem gesetzlichen Rahmen für den Bau und den Betrieb von Supermärkten und einem wachsenden Bedarf an tiefgekühlten Produkten auseinander. Neben der über die Jahre kontinuierlichen Verschärfung der Energieeinsparverordnung wird auch die „F-Gas Verordnung“ Anfang 2015 in Kraft treten, was strengere Auflagen für den Umgang mit fluorierten Treibhausgasen mit sich bringt und somit eine notwendige Anpassung der Kälteerzeugungssysteme [3], [4].

Daher haben die meisten großen Lebensmittelgroß- und Einzelhändler in den letzten Jahren Konzepte für energieeffiziente Kälteerzeugung, Abwärmenutzung und den Einsatz von natürlichen Kältemitteln in Pilotprojekten getestet [5], [6]. Bei einigen Projekten wurde zudem die Dämmung der Gebäudehülle verbessert, sowie vermehrt Tageslicht genutzt.

In diesem Artikel stellen wir das Konzept einer neuen Filiale der LEH-Kette ALDI SÜD, das im Rahmen eines EnOB-Projekts [7] entwickelt wurde, sowie die Ergebnisse eines zwischen September 2010 und Juni 2013 durchgeführten intensiven Monitorings vor. Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt auf die Kälteerzeugung. Mit diesem Projekt sollte die Energieeffizienz eines typischen Supermarkts der LEH-Kette auf freiem Gelände deutlich gesteigert werden. Dafür wurden Einzelmaßnahmen im Bereich Kälteerzeugung, Kühlmöbel, Gebäudehülle, Beleuchtung und Haustechnik kombiniert. Im Kern des Konzepts steht ein geothermisch gestützter CO₂-Kälteverbund, der mittels Abwärmenutzung alle Energiedienstleistungen in den Bereichen Wärme und Kälte abdeckt. Mit der Nutzung der Abwärme aus der Kälteerzeugung und des Erdreichs als Wärmequelle und -senke erübrigte sich der Einsatz eines zusätzlichen fossilen oder biogenen Energieträgers. Dadurch konnten die üblichen Versorgungsanlagen, wie ein Gaskessel zur Beheizung und ein Klimagerät zur Kühlung des Marktes, entfallen.

In der Planungsphase wurde ein Supermarktmodell mit dem Simulationsprogramm TRNSYS [8] erstellt, um den primärenergetischen Bedarf der neuen Filiale zu ermitteln und Energiereduktionsziele gegenüber einer Standardfiliale zu definieren. Die Verbrauchswerte der Standardfiliale wurden anhand von spezifischen Energiekennzahlen für die Gewerke Kälteerzeugung, Lüftung, Heizung, Klima und Beleuchtung aus statistischen Untersuchungen des energetischen Verbrauchs von ca. 300 Filialen der LEH-Kette, die im Jahr 2008 durchgeführt wurden, definiert. Mit der simulationsbasierten Untersuchung konnten die optimalen Parameter der unterschiedlichen Komponenten gefunden werden und die Ziele bezüglich der Primärenergieeinsparungen für unterschiedlichen festgelegt werden. Somit wurde angestrebt, den Primärenergiebedarf gegenüber einem Standardmarkt (Stand 2009) der LEH-Kette um 29% zu reduzieren. Die Energieverbräuche einer Standardfiliale und die Ziele für die einzelnen Komponenten der neuen Filiale sind in Abbildung 1 dargestellt.

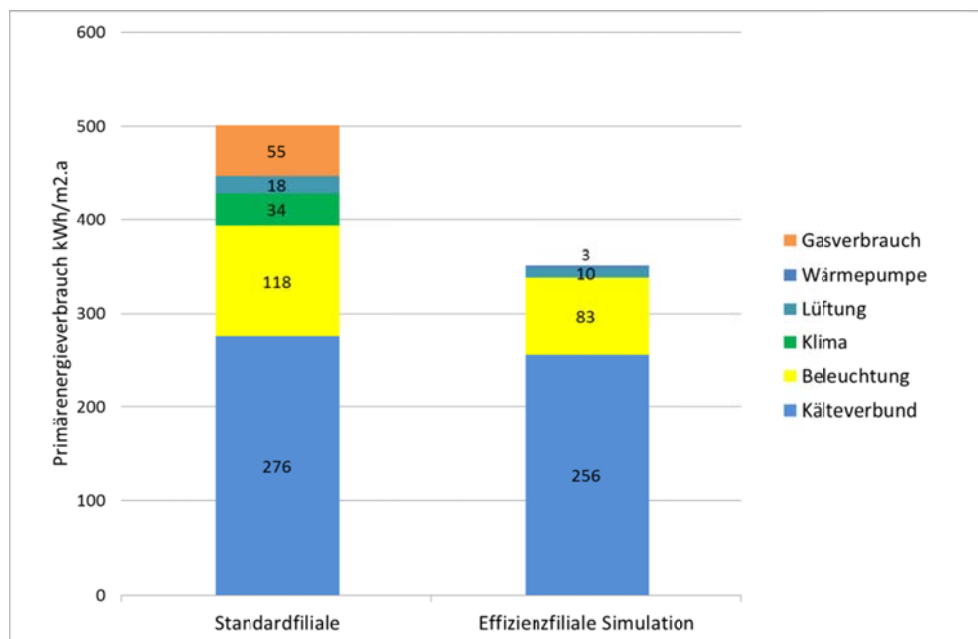


Abbildung 1 Gegenüberstellung des Primärenergieverbrauchs einer Standardfiliale und der neuen Filiale

2. Konzept

2.1. Energiekonzept

Der Primärenergieverbrauch von Filialen der betrachteten LEH-Kette wird in Deutschland vom Stromverbrauch für Gewerbekälte und Kunstlicht dominiert. Zusammen machen diese beiden Nutzungen über 75% des Endenergieverbrauchs aus [1]. Klimakälte und Raumheizung stellen in diesem Zusammenhang untergeordnete Größen dar. Aus diesen Gründen wurde der Schwerpunkt des neuen Konzepts auf energieeffiziente Kälteerzeugung mit Nutzung der Abwärme und auf Beleuchtung gesetzt. Die wesentlichen Komponenten des Energiekonzepts sind im Folgenden aufgelistet:

- Eine sehr gut gedämmte Gebäudehülle mit einer hohen Luftdichtheit.
- Die Nutzung von Strom als einzigem Energieträger.
- Der Einsatz eines neuen geothermiegestütztem transkritischen Kälteverbunds mit Kohlendioxid (CO₂) als natürlichem Kältemittel.
- Die zentrale Versorgung aller Kühlstellen für die Normal- (NK) und die Tiefkälte (TK).
- Die Temperaturregelung der Kühlmöbel erfolgt durch die Regelung des Kältemittelflusses mittels elektronischer Expansionsventile.
- Alle Kühlregale und Kühltruhen wurden mit LED-Leuchten ausgestattet. Durch den Einsatz von LEDs an Stelle von Leuchtstoffröhren wird eine Energieeinsparung von ca. 50% erwartet. Diese rührt zum einen aus der Einsparung durch die Beleuchtung selbst und zum anderen aus einer Reduzierung des zusätzlichen Wärmeeintrags in die Kühlmöbel. Zum Zeitpunkt der Planung dieses Projekts waren Leuchtstoffröhren bei der Beleuchtung von Kühl-/Gefriermöbeln und in Kühl-/Gefrierräumen Standard. Inzwischen hat sich die LED-Technologie als Stand der Technik im Bereich der Kühlmöbelbeleuchtung durchgesetzt.

- Aus Gründen des Merchandisings setzt die LEH-Kette auf offene Kühlregale, ohne Glastüren. Um den Wärmeaustausch zwischen Verkaufsraum und Kühlregalen zu begrenzen, wurde eine neuartige, automatisch gesteuerte, luftdichte Abdeckung für die Kühlregale von der Fa. Tebeg entwickelt und eingesetzt. Diese wird bei Schließung des Supermarkts automatisch heruntergefahren. Durch die Wärmedämmung im Inneren der Lamellen der Abdeckung und aufgrund einer hohen Luftdichtigkeit wird eine höhere Dämmwirkung als bei Glastüren erreicht.
- Im Laufe des Projekts wurde ein von der Fa. Wurm GmbH entwickeltes Regelverfahren „Frigotaktplus“ zur Optimierung der Verdampfungstemperaturen in Kühlstellen implementiert. Die Kühlstellentemperaturen werden stetig geregelt, um die Solltemperaturen mit möglichst hohen Verdampfungstemperaturen zu erreichen.
- Der Einsatz einer thermisch aktivierten Betonplatte als Wärmeübergabesystem.
- Der Einsatz einer Lüftungsanlage, die nur die notwendige minimale hygienische Luftmenge fördert.
- Die Nutzung von Tageslicht in Verbindung mit einer tageslichtabhängigen Kunstlichtregelung.

Die Energieversorgungsstruktur des Supermarkts wird in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

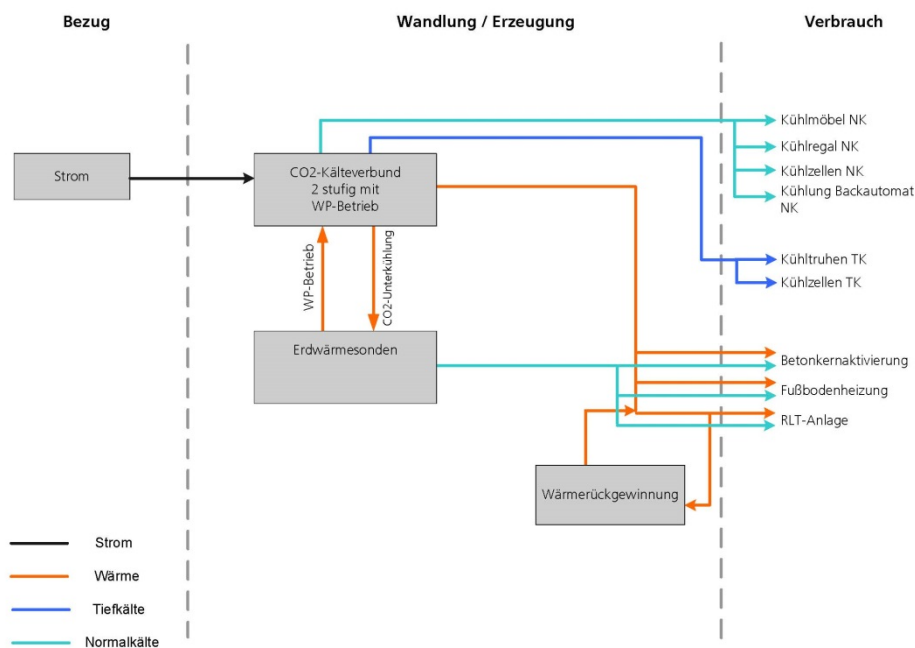


Abbildung 2 Energieflussschema im Supermarkt

2.2. Geothermisch gestützter Kälteverbund

Für die Kälteerzeugung wurde das natürliche Kältemittel Kohlendioxid (CO₂) ausgewählt. Kohlendioxid ist kostengünstig und verfügt über gute umwelttechnische und thermodynamische Eigenschaften. Ein Schwachpunkt von CO₂-Kälteanlagen ist, dass sie im Falle eines außenluftgekühlten Gaskühlers bei hohen Außentemperaturen deutliche Einbußen bei der Leistungszahl aufweisen. Die CO₂-Kälteanlage ist als zweistufige Anlage, als sogenanntes „Boostersystem“ realisiert. Sie versorgt alle Kühlstellen im Supermarkt. Die Verflüssigung, bzw. Kühlung des Kältemittels erfolgt hier nicht wie bei steckerfertigen Kühltruhen im Verkaufsraum, sondern im außenliegenden Gaskühler. Durch diese

Maßnahme wurde angestrebt, aufgrund der durchschnittlich tieferen Rückkühltemperaturen, die Gesamtenergieeffizienz der Kälteerzeugung zu steigern. Über eine Wärmerückgewinnung wird die Abwärme aus der Kälteerzeugung zu Heizzwecken genutzt. Zusätzlich ist die Kälteanlage mit einem Wärmepumpenkreislauf ausgestattet, der Wärme aus einem Erdsondenfeld entzieht, wenn die Abwärme aus der Kälteerzeugung nicht ausreichend ist.

Als Kältequelle ermöglicht hier das Erdsondenfeld das Kältemittel nach einer Gaskühlerstufe über einen Wasserkreislauf zusätzlich zu unterkühlen. Somit kann die Effizienz des Kälteprozesses, vor allem während des transkritischen Betriebs der Kälteanlage, gesteigert werden.

Abbildung 3 zeigt einen idealisierten einstufigen CO₂-Kreisprozess mit transkritischer Prozessführung im log(p),h Diagramm. Die Wärmeabgabe erfolgt oberhalb der kritischen Temperatur von 31,02 °C.

Oberhalb des kritischen Punkts findet zwischen den Punkten 2 und 3 keine isotherme Verflüssigung mehr statt, sondern eine Enthitzung mit Temperaturgleit des überkritischen Kältemittels. Durch zusätzliche Wärmeübertragung zwischen Kältemittel und Erdsondenanlage (Punkte 3 und 3'), wird die spezifische Enthalpiedifferenz erhöht und dadurch die Leistungszahl des Kreisprozesses verbessert. Durch die Nutzung des Erdreiches als zusätzliche Wärmesenke wurde eine Steigerung der Jahresarbeitszahl um bis zu 15 % erwartet.

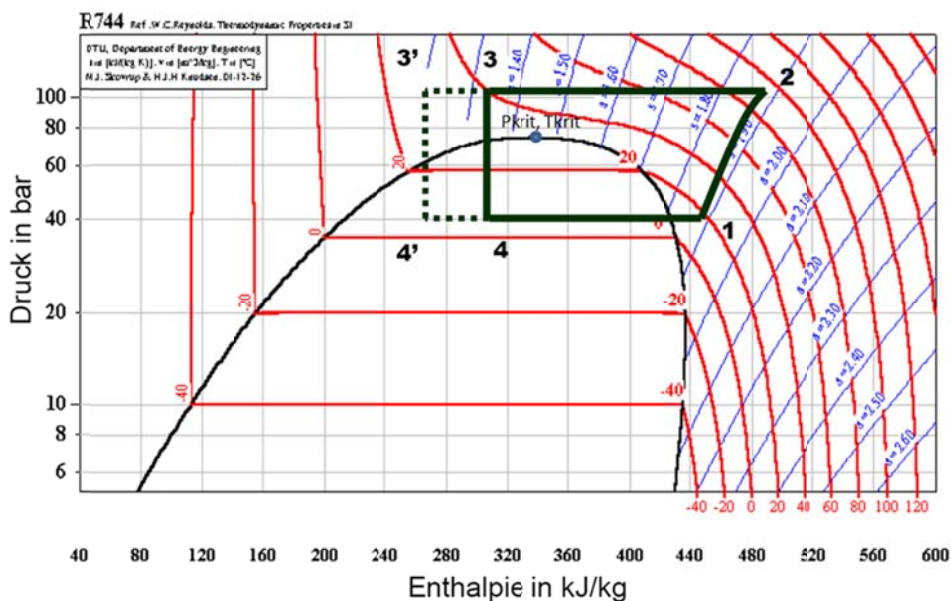


Abbildung 3 Log(p), h Diagramm: Kältemittelunterkühlung und Effizienzsteigerung im überkritischen Betrieb durch die Geothermieanlage [9]

2.3. Heizungs- und Lüftungskonzept

Die Abwärme aus dem CO₂-Kreislauf wird auf einem Temperaturniveau von 35 °C durch eine Betonkerntemperierung (BKT) genutzt. Mittels der BKT werden Transmissions- und Lüftungsverluste, aber vor allem der Wärmeabtransport durch die Kühleinrichtungen kompensiert. Ggf. kann die BKT aber auch für Kühlzwecke mit gekühltem Wasser aus dem Erdsondenfeld beaufschlagt werden. Da die Eingangsschleuse thermisch aktiviert wurde, wurde auf den Einsatz von Luftschleiern in diesem Bereich verzichtet.

Die Lüftungsanlage dient lediglich zur Gewährleistung des erforderlichen hygienischen Mindestluftwechsels und fördert einen Nennluftvolumenstrom von 4600 m³/h. Die Drehzahlen der Zu- und Abluftventilatoren werden in Abhängigkeit der Raumluftqualität mittels eines CO₂-Fühlers geregelt. Bezogen auf das Verkaufsraumvolumen wird somit ein maximaler Luftwechsel von ca. 0,75 h⁻¹ erzeugt. Hierdurch konnten die Lüftungsanlage und das Kanalnetz auf ca. ein Drittel der Größe einer in Supermärkten der LEH-Kette üblichen Anlage, die auch zur thermischen Raumluftkonditionierung eingesetzt wird, verkleinert werden.

2.4. Tageslichtkonzept

In einem Supermarkt darf die Qualität der Waren durch eine übermäßige direkte Lichtstrahlung nicht beeinträchtigt werden. Um dieser speziellen Anforderung gerecht zu werden, musste das Tageslichtsystem eigens entwickelt werden. Eine Selektion des einfallenden Lichts wird durch Microrasterelemente im Scheibenzwischenraum der dreifach verglasten Oberlichter ermöglicht. Durch die Anordnung von speziell geformten Quer- und Längslamellen werden die Innenräume nur mit diffusem Tageslicht versorgt. Die direkte Sonnenstrahlung aus Süden wird dagegen reflektiert, um Raumüberhitzung und Blendungen zu vermeiden. Das Kunstlichtniveau der Allgemeinbeleuchtung wird in Abhängigkeit der Tageslichtintensität geregelt, mit dem Ziel, eine Energieeinsparung von 29 % gegenüber dem Stromverbrauch einer Standardfiliale für die Innenbeleuchtung zu erreichen.

3. Ergebnisse

3.1. Primärenergievergleich

Wie in Abbildung 4 ersichtlich konnte das gesamte Energiereduktionsziel von -29% während des Monitoringszeitraums nicht erreicht, sondern mit -23% nur angenähert werden. Gründe dafür werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Der Primärenergieverbrauch für die Kälteerzeugung, die Heizung und die Klimatisierung mit dem geothermisch gestützten Kälteverbund konnte jedoch um ca. 20% gegenüber eine Standardlösung mit Kälteverbund, Gaskessel und Klimaanlage reduziert werden. Dank der Tageslichtnutzung konnte der Energieverbrauch der Beleuchtungsanlagen um 25% gesenkt werden. Mit Hilfe des neuen Lüftungskonzepts konnte der Energieverbrauch der Lüftungsanlagen in 2012 um 67 % gegenüber einer Standardlösung reduziert werden. Der Mehrverbrauch der Lüftungsanlage in 2013 ist auf einen Fehlbetrieb zurückzuführen.

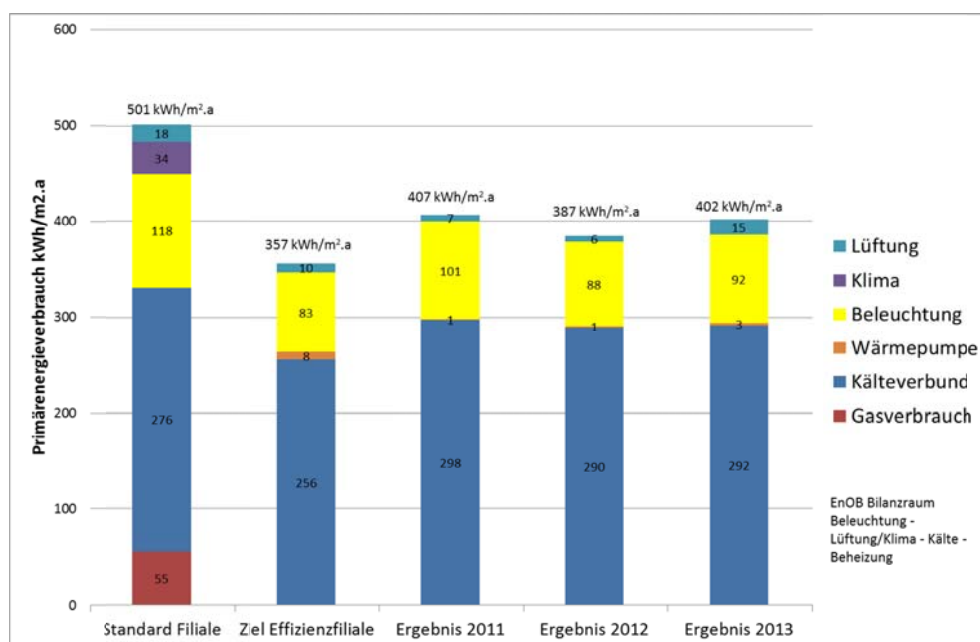


Abbildung 4 spezifischer Primärenergieverbrauch der unterschiedlichen Verbraucher im Supermarkt – Vergleich der Referenz- und Zielwerte mit Ergebnissen aus dem Monitoring

3.2. Kälteverbund

Ziel für den geothermisch gestützten Kälteverbund war es, eine Minderung des primärenergetischen Verbrauchs für die Kälte-, Wärme- und Klimakälteerzeugung um 28%, von 365 kWh/(m²_{NGF}.a) auf 264 kWh/(m²_{NGF}.a), gegenüber einer Standardfiliale zu erreichen. Ein primärenergetischer Verbrauch von 295 kWh/(m²_{NGF}.a) wurde erzielt. Somit wurde der Zielwert von 264 kWh/(m²_{NGF}.a) während der Projektlaufzeit nicht erreicht. Jedoch konnten ca. 20% Primärenergieeinsparungen gegenüber einer Standardlösung mit Kälteanlage, Gaskessel und Klimaanlage verzeichnet werden.

Im Rahmen dieses Projekts realisierte der Kälteanlagenhersteller seine erste transkritische CO₂-Kälteanlage. Bei der Implementierung von neuen Regelkonzepten wurde eine konservative Herangehensweise verfolgt, um die Hauptfunktionen der Anlage in jeder Situation sicherzustellen. Der Anlagenbetrieb wurde durch sukzessive Änderungen der Regelungsparameter und Umbauten im Laufe des Monitorings optimiert. Während des intensiven Monitorings erfüllte der Kälteverbund die Kälteversorgung der unterschiedlichen Kühlstellen. Die Beheizung des Supermarkts mit Abwärme konnte ebenfalls realisiert werden, jedoch konnte die Wärmepumpe den Heizbetrieb bei niedrigen Temperaturen aufgrund einer wiederkommenden technischen Störung nicht unterstützen.

Der Stromverbrauch des NK-Verbunds konnte während der Projektlaufzeit aufgrund folgender Maßnahmen reduziert werden:

- Die Tag- und Nacht-Sollwerte der Verdampfungstemperaturen in den Kühlmöbeln wurden angehoben.
- Ein Heißgasentwässer, der die Heißgaswärme aus den TK-Verdichtern an die Außenluft abgibt, wurde zwischen den TK- und den NK-Stufen eingebaut. Dabei wird die Wärme, die in die NK-Stufe eingebracht wird, um ca. 10% reduziert und somit auch die Arbeit, die von den NK-Verdichtern aufgewendet werden muss, um die Abwärme aus der TK-Stufe abzuführen.

Hierdurch stellt sich eine kontrollierte Heißgastemperatur der TK-Stufe ein, wodurch der Saugdruck der NK-Stufe angehoben werden kann.

- Der Sollwert für die Klimatisierung des Backraums wurde von 25 °C auf 27 °C angehoben.

Weiterhin wurden folgende Schwachstellen und Optimierungspotentiale im Rahmen des Monitorings identifiziert, die bei der Entwicklung einer neuen Anlage berücksichtigt wurden:

- Mit einer gemessenen mittleren Stromaufnahme von ca. 13 kW stellt der Backautomat einen wichtigen Stromverbraucher dar. Die Verdampfer des Backraums sind mit den NK-Verdichtern verbunden und werden mit einer Verdampfungstemperatur von -10° C betrieben. Es ergibt sich eine große Temperaturdifferenz zwischen Verdampferoberfläche und Raumluft, die thermodynamisch ungünstig ist, und zu einer Minderung der Energieeffizienz der gesamten Anlage führte. Diese Schwachstelle wurde im Rahmen des Projekts vom Anlagenhersteller identifiziert und durch die Schaltung des Backraums auf eine höhere Verdampfungsstufe korrigiert.
- Während des Monitoringzeitraums wurde der Druck im subkritischen Betrieb auf einen konstanten Wert geregelt, was eine suboptimale Regelstrategie darstellte. Nach Abschluss des Monitorings wurde im Juli 2013 eine neue Regelungsstrategie implementiert, bei der der Druck im subkritischen Betrieb in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur geregelt wurde.

Die Korrelation zwischen Stromverbrauch des NK-Verbunds und Außenlufttemperatur ist in Abbildung 5 eindeutig erkennbar: Über ca. 11°C steigt die tagesmittlere Leistung des NK-Verbunds annähernd linear zum Tagesmittel der Außenlufttemperatur, aufgrund der öfter vorkommenden transkritischen Betriebsweise. Zwischen Werktagen und Sonn- und Feiertagen sinkt der Tagesmittelwert der Leistungsaufnahme vom Kälteverbund durchschnittlich um ca. 45%, aufgrund des Einsatzes der Energiesparrollen und der Anhebung der Verdampfungstemperaturen außerhalb der Öffnungszeiten.

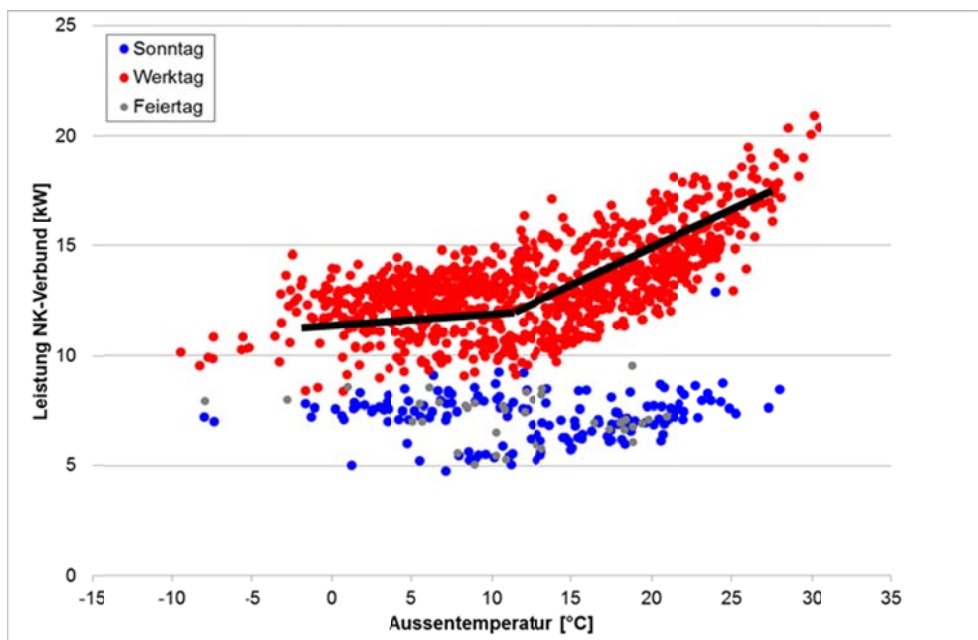


Abbildung 5 Tagesmittel der elektrischen Leistungsaufnahme des NK-Verbunds in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur

In Abbildung 6 sind die Anteile der Betriebsstunden im sub-, bzw. transkritischen Betrieb der Kälteanlage, der Monatsmittelwert der Außenlufttemperatur und die Verteilung der

DKV-Tagung 2014, Düsseldorf, Erfahrungen aus dem Monitoring
eines energieeffizienten Supermarkts

Außenlufttemperatur unter und über 20 °C aufgetragen. Je geringer die Anzahl der transkritischen Betriebsstunden ist, desto höher ist die Energieeffizienz der gesamten Kälteanlage. Aus dieser Grafik ist ersichtlich, dass die Anlage während der Übergangszeit zwischen Winter und Sommer, vor allem in 2011 und 2012, seltener transkritisch betrieben wurde. Dies hat zwei Gründe: Zum einen kann die Anlage bei Außentemperaturen unter 20 °C subkritisch betrieben werden. Zum anderen sinkt der Wärmebedarf des Supermarkts bei milden Temperaturen und es ist nicht notwendig, die Anlage transkritisch zu fahren, um zusätzliche Abwärme zu erzeugen.

In 2013 stiegen die transkritischen Betriebsstunden aufgrund kälterer Außenlufttemperaturen und der bereits erläuterten behobenen Fehlfunktion der Wärmepumpenschaltung. Die höchsten Anzahlen an transkritischen Betriebsstunden werden während der Sommermonate und in kalten Wintermonaten aufgezeichnet. Im Sommer sind die Optimierungsmöglichkeiten des transkritischen Betriebs begrenzt. Aufgrund des Einsatzes des Erdsondenfelds haben modellbasierte Untersuchungen gezeigt, dass es energetisch sinnvoller ist, den Druck im transkritischen Betrieb auf einem konstanten Wert direkt oberhalb des kritischen Punkts einzuregeln, als, wie bei herkömmlichen transkritischen Anlagen, den Hochdruck in Abhängigkeit der Gaskühler-Austrittstemperatur zu regeln.

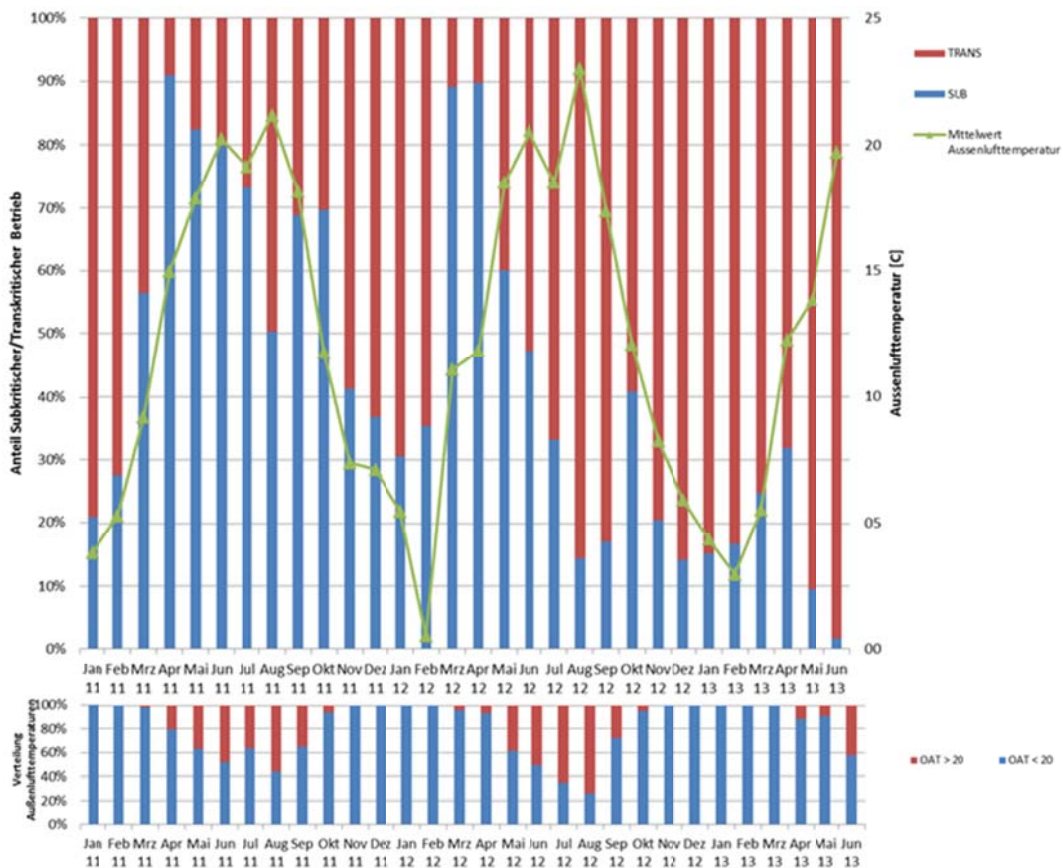


Abbildung 6 Anteil der Stunden im sub- (SUB) bzw. transkritischen (TRANS) Betrieb

4. Heizung und hydraulische Kreise

4.1. Abwärmenutzung

Die Bilanzierung der Wärmemengen der drei Wärmesenken der Rückkühlstrecke zeigen, dass ca. 20% der Wärme aus der Kälteerzeugung zu Heizzwecken genutzt wurden, 69% wurde über den Gaskühler an die Umgebung abgeführt und die restlichen 11% in das Erdsondenfeld eingespeist. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Verläufe der Verteilung der Abwärme in den Wärmesenken Wärmerückgewinnung, Gaskühler und Erdsondenfeld für 2012.

Während der Wintermonate wurde über 50% Abwärme zurückgewonnen und in den Heizkreisen gefördert. Von ca. Mitte Juni bis Oktober wurde keine Wärme für die Heizung benutzt, sondern diese wurde über den Gaskühler und das Erdsondenfeld abgeführt.

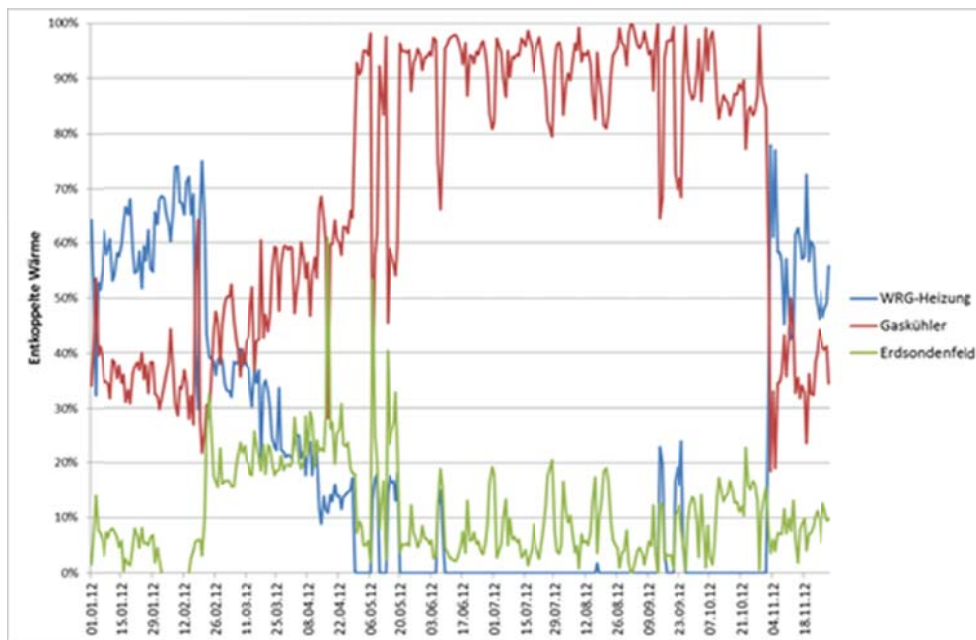


Abbildung 7 Abwärmenutzung 2012

4.1. Geothermiekreislauf

Wärme wurde ganzjährig dem Erdsondenfeld zugeführt, ohne dass während des gleichen Zeitraums ein entsprechender Wärmeentzug stattfand. Die Energiebilanz zwischen abgeführter Wärme in das Erdsondenfeld, und entzogener Wärme aus dem Erdsondenfeld konnte daher nicht ausgeglichen werden. Die mittlere thermische Leistung des Erdsondenfelds bei Wärmezufuhr in das Erdreich betrug 7.8 W/lfm und 9.2 W/lfm in 2011 bzw. 2012. Diese Werte liegen weit unter der Planungswerten und werden durch die geringe Differenz zwischen Wasser- und Erdreichtemperaturen während des Teillastbetriebs des Kälteverbands verursacht. Bei Volllastzuständen im Sommer wurde eine maximale spezifische Leistung bei Wärmezufuhr in das Erdsondenfeld von 38 W/lfm gemessen. Die Jahresarbeitszahlen des Geothermiekreislaufs betragen 8.8 in 2011 und 5.2 in 2012 und sind akzeptabel [8]. Unter Berücksichtigung der Stromaufnahme der Geothermiepumpe, trug das Erdsondenfeld zu einer Effizienzsteigerung der Kälteanlage um ca. 6 % bei. Dieses Ergebnis liegt unterhalb des vom Anlagenhersteller erwarteten Zielwerts von 15 % und ist auf die Überdimensionierung der Geothermiepumpe zurückzuführen.

Eine Analyse der Hydraulik des Primärkreises zeigte, dass ein großes Potential zur Steigerung der Effizienz bei der Pumpenauslegung lag. Weiterer Optimierungsbedarf wurde bei der Gestaltung der Rohrnetze, der Anzahl der Einbauten, der Rohrabmessungen, des hydraulischen Abgleichs, der Planung und der Betriebsführung identifiziert.

5. Übernahme und Optimierung des Konzepts

Aufbauend auf dem hier beschriebenen Konzept wurde eine weitere Filiale der LEH-Kette in Hügelsheim gebaut und im September 2012 eröffnet. Mehrere Bausteine aus dem Konzept der hier betrachteten Filiale wurden in das Energiekonzept übernommen. Anhand der Erkenntnisse aus dem vorliegenden Projekt wurde eine neue Generation des geothermiegestützten Kälteverbands entwickelt und umgesetzt, die in vielerlei Hinsicht optimiert wurde:

- Neue, kleinere CO₂-Verdichter wurden ausgewählt.
- Die Klimatisierung des Backraums erfolgt auf einer höheren Verdampfungsstufe.
- Steckerfertige Kühltruhen mit Propan werden an Stelle der Remote-Kühltruhen verwendet.
- Das Erdsondenfeld besteht aus 5, an Stelle von 6 Sonden.
- Die Geothermiepumpe wurde kleiner dimensioniert.

Die Konzepte für die Lüftungs- und Wärmeübergabesysteme mit BKT wurden ebenfalls übernommen. Bei der Beleuchtung wurde auf das tageslichtabhängige Beleuchtungskonzept verzichtet. Die installierte Kälteleistung entspricht in etwa der Kälteleistung der hier untersuchten Filiale. Die Nettogrundfläche des Supermarkts beträgt ca. 1590 m² und ist somit 5% kleiner als die Fläche der Rastatter Filiale.

Auswertungen aus den Energiemessungen von September 2012 bis Dezember 2013 zeigen, dass die Kälteerzeugungsanlagen der neuen Filiale (Kälteverbund + steckerfertige Kühltruhen) 12% weniger Strom verbrauchten als die der Rastatter Filiale.

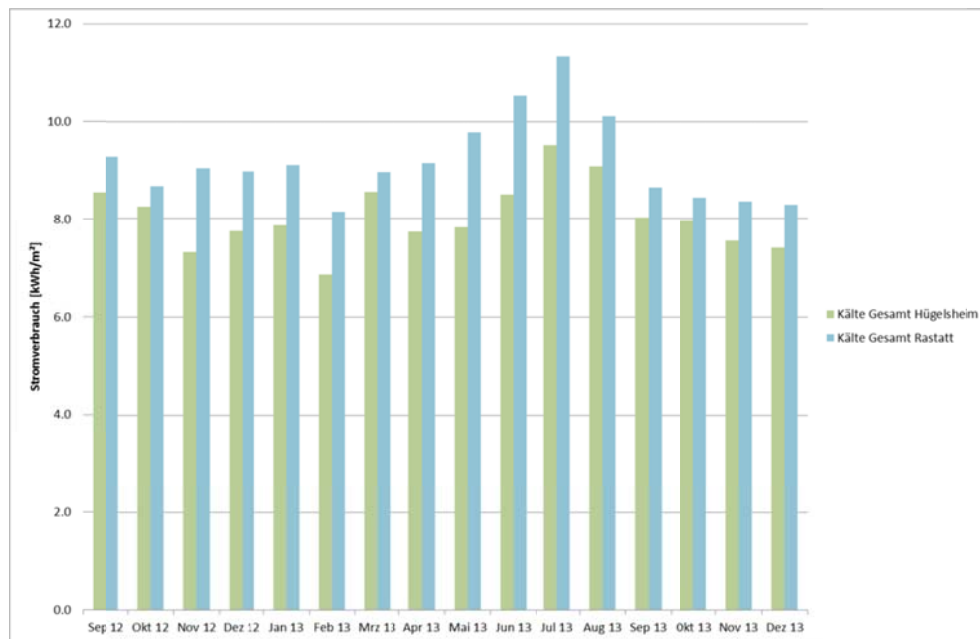


Abbildung 8 Vergleich spezifischer Stromverbrauch Kälteerzeugung Hügelsheim/Rastatt

6. Fazit

Mit diesem Projekt konnte der jährliche Primärenergieverbrauch des 2010 errichteten Supermarktes gegenüber dem Verbrauch einer Standard-Filiale der LEH-Kette um 23% reduziert werden. Das Ziel einer Reduktion um 29% konnte annähernd erreicht werden. Die Diskrepanz zwischen Ziel- und Messwerten des Energieverbrauchs lässt sich hauptsächlich auf den Kälteverbund zurückführen. Einerseits konnte die Effizienz des Kälteprozesses durch die Kopplung mit der Geothermieanlage um nur 6% gesteigert werden, an Stelle der geplanten 15%. Ursache hierfür ist vor allem die Auslegung des hydraulischen Kreislaufs. Andererseits hat die hier beschriebene Anlage einen Prototyp-Charakter. Sie war die erste transkritische CO₂-Kälteanlage mit Booster-Schaltung, die der Kälteanlagenhersteller entwickelt und gebaut hat. Zum einen war es notwendig, das Know-How mit dem Betrieb und der Regelung einer solchen Anlage aufzubauen, zum anderen wurden verschiedene bauliche und regelungstechnische Optimierungspotentiale, die Energieeinsparungen ermöglichen, im Laufe eines intensiven Monitorings identifiziert, und in sukzessiven Schritten, allerdings teilweise erst gegen Ende der Projektlaufzeit implementiert. Zum Beispiel wurde eine außenlufttemperaturabhängige Hochdruckregelung für die subkritische Betriebsweise der Anlage erst im Juli 2013 vollständig und erfolgreich implementiert. Verschiedene bauliche Optimierungsmöglichkeiten der Anlage wurden während des Monitorings vom Kälteanlagenhersteller erkannt und sind in die Entwicklung und die Herstellung einer neuen Version des Kälteverbunds eingeflossen. Als wichtigste bauliche Veränderungen sind die Schaltung der Backraum-Verdampfer auf eine höhere Verdampfungsstufe, der Einsatz von kleineren transkritischen Verdichtern, die Nutzung von energetisch optimierten steckerfertigen Tiefkühltruhen mit Propan als Kältemittel und die hydraulische Optimierung der Geothermieanlage zu nennen. Dieser neue Kälteverbund wurde im Herbst 2012 in einer weiteren Filiale der LEH-Kette installiert und in Betrieb genommen. Auswertungen aus dem Jahr 2013 zeigen, dass der Energieverbrauch für die Kälte- und Wärmeerzeugung mit dieser Anlage um weitere 12% gegenüber der betrachteten Filiale gesenkt werden konnte. Diese neue Entwicklung zeigt, dass das gesetzte Energiereduktionsziel mit einer Anlage der hier beschriebenen Art erreichbar ist.

Der positive Effekt der isolierenden Nachttrollos konnte im Rahmen des Projekts validiert werden. Mit dieser Maßnahme konnte der Stromaufverbrauch für die Kühlregale zwischen Werktagen und Sonn- und Feiertagen während der Schließzeiten durchschnittlich um ca. 45% reduziert werden.

Die neuen Heizungs- und Belüftungskonzepte konnten im Rahmen dieses Projekts erfolgreich eingesetzt und validiert werden. Mit der thermisch aktivierten Betonplatte konnte die Wärme energieeffizient an den Supermarkt übergeben werden. Auf den Bau eines Türluftschleiers im Eingangsbereich konnte verzichtet werden.

Mit der in Abhängigkeit der Kohlendioxidkonzentration in der Raumluft geregelten Lüftungsanlage konnte den Energieverbrauch um 2/3 gegenüber einer Standardlösung reduziert werden.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Projektes ALDI SÜD 2010, welches im Rahmen des Förderprogramms EnOB vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter der Zuwendungsnummer 0327894-A gefördert wurde.

Literaturverzeichnis

- [1] F. ISE, „Benchmarking ALDI SÜD, (nicht veröffentlichter Projektbericht),“ 2008.
- [2] J. Arias, "Energy Usage in Supermarkets - Modelling and Field Measurements," Stockholm, 2005.
- [3] Bundesrat, *Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung*, Bundesgesetzblatt, 2013.
- [4] E. Union, *Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des europäischen Parlaments und des Rates über fluorierte Treibhausgase*, Brüssel, 2014.
- [5] T. W. KG, „Tengelmann Klimamarkt,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.tengelmann-klimamarkt.de/>. [Zugriff am 17 11 2014].
- [6] REWE-Zentral-Aktiengesellschaft, „REWE Green Building,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.rewe-group.com/nachhaltigkeit/saeulen/energie-klima-und-umwelt/energieeffizienz/green-building/>. [Zugriff am 17 11 2014].
- [7] EnOB, „www.enob.info,“ [Online]. [Zugriff am 11 2014].
- [8] U. o. W. Madison, „A TRaNsient SYstems Simulation Program,“ [Online]. Available: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html>. [Zugriff am 17 11 2014].
- [9] M. Kauffeld, „CO₂ als Kältemittel in Klimasystemen und Wasserkühlern,“ *CCI*, 2004.
- [10] D. Kalz, „Heating and cooling concepts employing environmental energy and thermo-active building systems for low energy buildings,“ Fraunhofer, Freiburg, 2009.
- [11] K. EHI Retail Institute, „Umsatzanteile der Lebensmittelgeschäfte nach Betriebsformen (2007-2012)“.