

# Sektorenkopplung am Beispiel eines Supermarktes

Oliver Ziegler, Ullrich Hesse, Christiane Thomas

Technische Universität Dresden/ Institut für Energietechnik/ Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, 01062 Dresden/Germany, Telefon: +49 351 463 32603, oliver.ziegler@tu-dresden.de, <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/kkt>

**Kurzfassung:** Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen stellen einen Grundpfeiler der Sektorenkopplung dar. Werden Wärme und Elektroenergie gleichzeitig und jahreszeitlich unabhängig zu großen Teilen genutzt, stellt dies für den Betreiber einen finanziellen Mehrwert gegenüber der getrennten, netzgestützten Elektroenergie- und Wärmeversorgung dar. Am Beispiel eines Supermarktes wird gezeigt, dass die bei der Elektroenergieerzeugung anfallende Wärmeenergie eines Blockheizkraftwerkes (BHKW) jahreszeitlich unabhängig genutzt werden kann und die jährlichen Vollbenutzungsstunden des BHKW deutlich erhöht werden können. Hierbei kommt die Schnittstellentechnologie der Resorptionskälteanlage zum Einsatz. Diese stellt eine Weiterentwicklung herkömmlicher Absorptionskälteanlagen dar. Durch die kompaktere Bauform und hin zu kleineren Kälteleistungen (<100 kW) skalierbaren Anlagen, eröffnet diese Technologie Anwendungsgebiete, die bisher unrentabel waren. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden die Vorteile vernetzter Energieerzeugungssysteme, Verbraucher und Speicher des Supermarktes unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten, bei gleichzeitiger Beachtung der Wirtschaftlichkeit, aufgezeigt. Dies erfolgt im Kontext länderspezifischer Unterschiede bezüglich der Energiepreise sowie der Emissionen bei der Elektroenergieerzeugung.

**Keywords:** Supermarkt, Sektorenkopplung, Resorptionskälteanlage, BHKW, Thermische Speicher

## 1 Einleitung

### 1.1 Sektorenkopplung in Supermärkten

Sektorenkopplung versteht sich im Wesentlichen als Ansatz zur Kombination unterschiedlicher Nutzenergieformen mit dem Ziel der Glättung von Lastprofilen, um nicht unnötig überdimensionierte Erzeugungsanlagen vorhalten zu müssen und deren Wirtschaftlichkeit sicherzustellen. Der Begriff Sektorenkopplung definiert dabei nicht die Größe der miteinander in Verbindung gebrachten Systeme. Die in den Sektoren verwendete Nutzenergie zur Zweckerfüllung beinhaltet dabei immer eine vorangehende Kette von Energieumwandlungen. Das zugrundeliegende Umwandlungsverfahren entscheidet über den Grad der Effizienz. Maß für diese Effizienz während der Umwandlung ist der Verlust an Exergie.

Nimmt man einen gewöhnlichen Supermarkt als Untersuchungsobjekt, lassen sich an dessen Bilanzgrenze Elektroenergie und Erdgas (als stoffgebundene innere Energie) als an den Markt angeschlossene Endenergieformen identifizieren. Aus diesen Endenergien können, durch

weitere im Supermarkt befindliche Energieumwandlungssysteme, die bereitzustellenden Nutzenergieformen Licht, Heizwärme, mechanische Arbeit und Nutzkälte abgeleitet werden.

Die Nutzenergieformen Licht und mechanische Arbeit werden ausschließlich von elektrisch betriebenen Endgeräten (z.B. Lüftungsanlagen) erzeugt, d.h. deren Antriebsenergie besteht vollständig aus Exergie. Das exergetische Potential der Wärmeenergie hingegen wird durch die Differenz der Temperatur der Wärmezufuhr zur Temperatur der Umgebung definiert. Je größer die Differenz desto größer der Aufwand zu dessen Bereitstellung. Heizwärme- bzw. Nutzkälte als thermische Nutzenergieform lassen sich hingegen auf unterschiedliche Weise technisch bereitstellen. So lässt sich Wärmeenergie zur Raumbeheizung zum Beispiel mittels elektrisch angetriebener Wärmepumpen, durch aus KWK-Kraftwerken ausgekoppelter Fernwärme oder durch die direkte Verbrennung fossiler Energieträger bereitstellen. Nutzkälte wird im Bereich von Kälteleistungen <100 kW vorwiegend auf Basis der Kompressionskälteerzeugung, also mittels Elektroenergie, bereitgestellt. Alternative Systeme stellen thermisch angetriebene Sorptionskälteanlagen dar, die niederexergetische Wärme (Abwärme auf niedrigem Temperaturniveau) als Antriebsenergie nutzen.

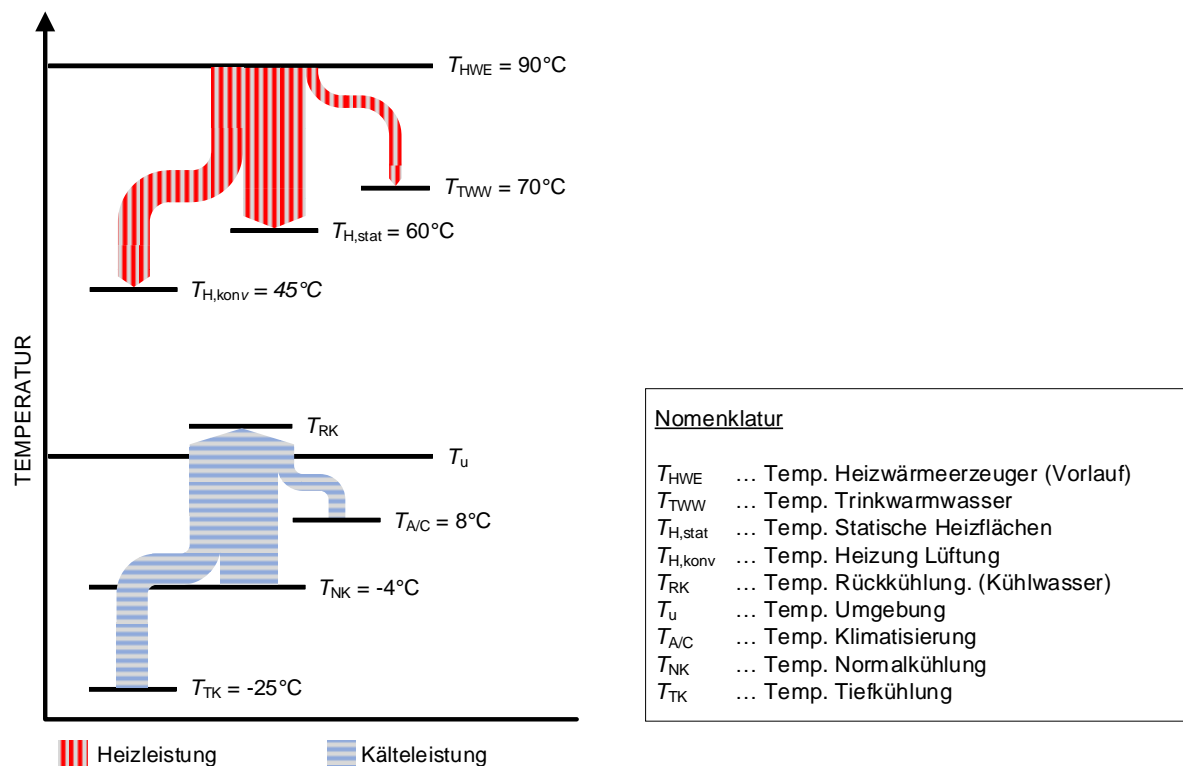


Abbildung 1: Typische Temperaturniveaus und qualitative Wärmeleistungsverteilung in Supermärkten [1]

In Supermärkten lassen sich Wärmeenergien hinsichtlich ihrer Temperatur identifizieren (siehe Abbildung 1). Energie zur Bereitstellung von Normal- und Tiefkälte, sowie von Wärme zur Trinkwarmwasserbereitung ist nahezu entkoppelt von jahreszeitlich bedingten Schwankungen der Umgebungstemperatur. Energie zur Bereitstellung von Klimakälte und zur Gebäudebeheizung unterliegt dagegen einer Abhängigkeit von der Außen- bzw. Umgebungstemperatur. So werden hauptsächlich in den Sommermonaten zusätzliche elektrische Energie zum Betrieb von Klimatisierungssystemen und im Winter fossile Energieträger zur Beheizung benötigt. Das Vorhalten entsprechender Versorgungssysteme

stellt dementsprechend eine Notwendigkeit dar, wengleich diese Aggregate den Großteil des Jahres in Teillast oder gar nicht betrieben werden. Hierdurch entstehen deutliche wirtschaftliche Diskrepanzen.

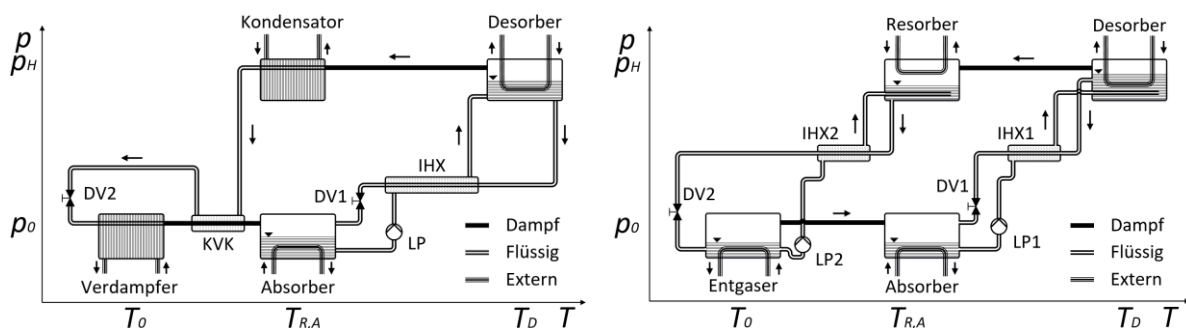
Folgt man, mit Blick auf die Sektorenkopplung, die Dezentralisierung der Elektroenergieversorgung und die Erreichung von Klimaschutzzielen, dem Ansatz der Internationalen Energie Agentur (IEA), stellt der Einsatz von Blockheizkraftwerken eine Alternative zum entkoppelten Endenergiebezug dar. So fordert die IEA in ihrem World Energy Outlook 2012: „Eine wesentliche Einschränkung beim Einsatz von KWK-Kraftwerken ist die Schwierigkeit der Wärmelieferung über große Distanzen. Aus diesem Grund müssen KWK-Anlagen in der Nähe des Verbrauchers platziert werden, was potenziell zu höheren Gesamtkosten führen kann.“ [2]

Im Rahmen eines vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Pilotprojektes konnte gezeigt werden, dass die Installation eines Blockheizkraftwerks in Kombination mit der Schnittstellentechnologie *Resorptionskälteanlage* sowie weiterer peripherer Systeme, wirtschaftliche Vorteile gegenüber einer entkoppelten Elektroenergie- und Wärmeversorgung hat.

## 1.2 Schnittstellentechnologie: Resorptionskälteanlage

Wann immer in örtlicher Nähe Wärmeströme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus zu- oder abgeführt werden müssen, ist eine sogenannte Pinch-Analyse von Vorteil. Diese ermöglicht es, ungenutzte thermische Potentiale und Handlungsspielräume aufzuzeigen. Beispielsweise spielen thermisch angetriebene Kälteanlagen bei der Verknüpfung von Kältebedarf und Abwärmepotential eine entscheidende Rolle. In Supermärkten tritt ein solches Potential genau dann auf, wenn die Elektroenergieversorgung mittels BHKW realisiert wird, aber die dabei gleichzeitig freiwerdende Wärme nicht oder nur teilweise für die Beheizung benötigt wird – also im Zeitraum Frühjahr bis Herbst. Die im Rahmen des Forschungsprojektes ResoField erstmals in diesem Umfeld eingesetzte Technologie der *Resorptionskälteanlage* (RKA) bildet eine solche Schnittstelle (vgl. Abbildung 2).

Der Unterschied zu einer herkömmlichen Absorptionskälteanlage besteht im Wesentlichen in einem zweiten Lösungskreislauf, in welchem anstatt eines Verdampfers und Kondensators ein weiterer Absorber (Resorber) und Desorber (Entgaser), sowie eine zweite Lösungspumpe installiert ist.



LP...Lösungspumpe; DV...Expansionsorgan; IHX...Interner Wärmeübertrager; KVK...Kondensatvorkühler

Abbildung 2: Vergleich einer Absorptionkälteanlage ohne Rektifikation (links) und einer Resorptionskälteanlage (rechts) [3]

Zur Bereitstellung von Kälte im Bereich unter  $0^{\circ}\text{C}$  ist das Kältemittel Wasser und somit die Stoffpaarung Wasser-LiBr ungeeignet. Die Resorptionskälteanlage wird deshalb mit dem, in der Sorptionskältetechnik ebenso üblichen, Arbeitsstoffpaar Ammoniak-Wasser betrieben. Dies stellt einige Anforderungen an die Sicherheitstechnik.

Im Rahmen des o.g. Projektes wurde ein bestehender Supermarkt energetisch saniert und mit der beschriebenen Technologie ausgestattet. Dies umfasst die Installation eines BHKW (elektrische Nennleistung von  $P_{\text{BHKW}} = 48 \text{ kW}_{\text{el}}$  und Heizleistung von  $\dot{Q}_{\text{BHKW}} = 80 \text{ kW}_{\text{th}}$ ), eines Solekreislaufs mit angeschlossenen Tiefkälteanlagen, Propan-Chillern ( $3 \times \dot{Q}_{0,\text{PC}} = 25 \text{ kW}_{\text{th}}$ ) und einer Resorptionskälteanlage ( $\dot{Q}_{0,\text{RKA,max}} = 25 \text{ kW}_{\text{th}}$ ), die die Abwärme des BHKW zur Bereitstellung von Klima- und Normalkälte nutzt. Das aus der Nachrüstung resultierende Netzwerk ist in Abbildung 3 dargestellt.

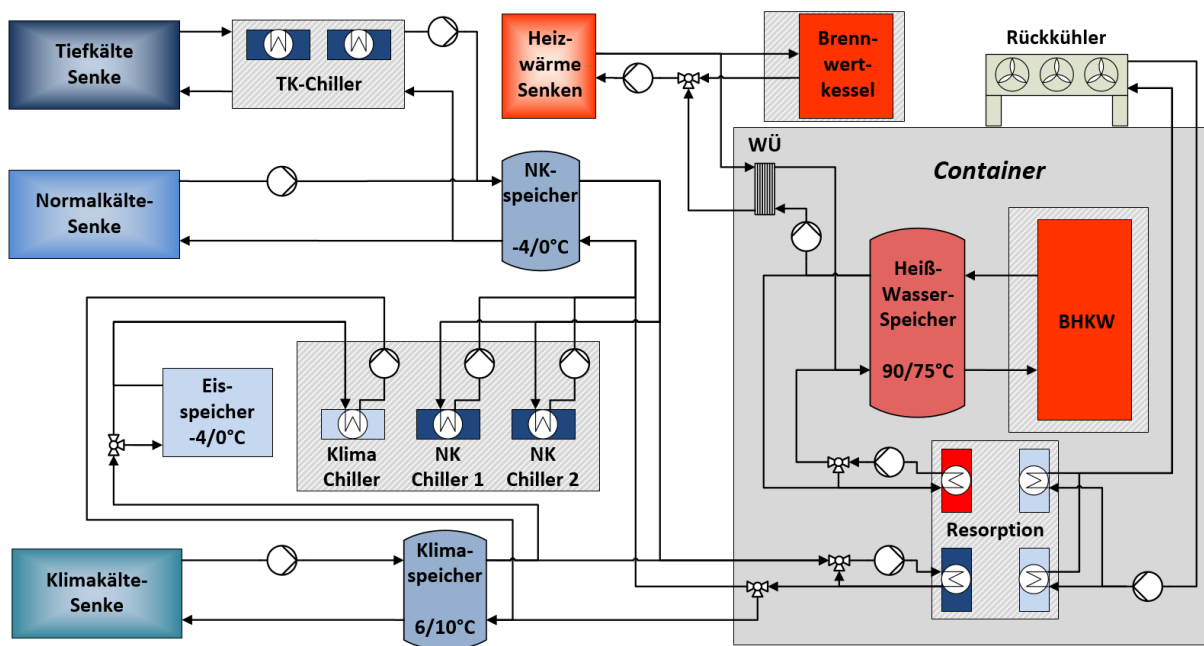


Abbildung 3: Nutzenergieversorgung (Wärme/Kälte) des betrachteten Supermarktes [1]

Eine besondere Anforderung war es, das System als kompakte Einheit im Außenbereich des Supermarktes zu installieren. Daher wurde die Implementierung des BHKW und des Resorptionssystems als Containerlösung realisiert. Zusätzlich wurden die Klima- und NK-Propan-Chiller in einem weiteren nahegelegenen Container installiert und das Resorptionssystem in das Sole-Rohrleitungsnetz (Wasser-Propylenglykol) dieser Chiller eingekoppelt. Es ist auch zu erkennen, dass zusätzlich zum Blockheizkraftwerk ein Brennwertkessel installiert ist. Diese bestehende Einheit wurde erhalten und dient nun als Ausfallredundanz für das BHKW zur Wärmeversorgung des Supermarktes. Ein besonderer Aspekt und Teilaufgabe des Projektes war die Installation eines Latentwärmespeichers (Eisspeicher) und die Untersuchung seines Einflusses auf die Lastspitzenglättung im Bereich der Klimakälteversorgung. Weiterhin sind verschiedene sensible Speicher (Warmwasser, Klima- und NK-Speicher) vorhanden, die für den Betrieb der Resorptionsanlage, aber auch für die zeitliche Entkopplung von thermischer Energielast und -erzeugung notwendig sind. Die Interaktion aller Einzelsysteme (Erzeuger, Verbraucher, Speicher) zieht jedoch einen hohen regelungstechnischen Aufwand nach sich, um die Potentiale unter wirtschaftlichen und nachhaltigen Gesichtspunkten bestmöglich auszuschöpfen.

Eine Parameteranpassung hinsichtlich der Energiekosten (Strom und Erdgas) sowie der Emissionsfaktoren der Elektroenergiebereitstellung im europäischen Kontext, bildet die Basis der im Weiteren beschriebenen Wirtschaftlichkeits- und CO<sub>2</sub>-Emissionsbetrachtung.

## 2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### 2.1 Datenbasis

Um die wirtschaftlich interessanten Fragen nach den laufenden Betriebskosten und der Amortisationsdauer beantworten zu können, ist eine ausreichende Datenbasis erforderlich. Ein umfassendes Monitoring des gesamten Supermarktes über einen repräsentativen Zeitraum erlaubt die Darstellung von Verbrauchsdaten. Abbildung 4 zeigt beispielhaft den elektrischen Energieverbrauch des Supermarktes über einen Zeitraum von einem Monat als Summe der vom BHKW erzeugten und der aus dem Netz bezogenen elektrischen Energie. Zusätzlich wird die vom BHKW erzeugte und nicht vom Supermarkt verbrauchte Energie in das Netz eingespeist. Insbesondere an Sonntagen, an denen der Markt geschlossen ist, wird dies deutlich.

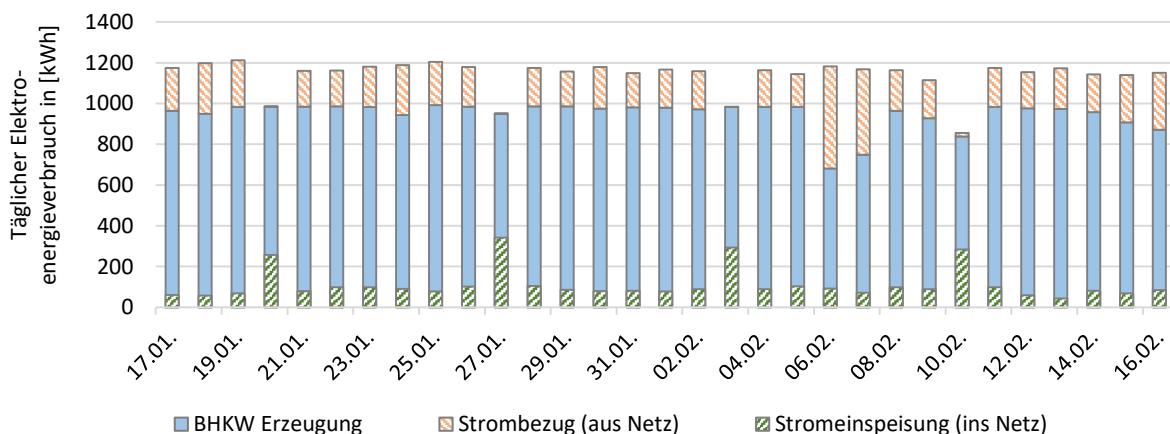


Abbildung 4: Tägliche Elektroenergieerzeugung (BHKW), Bezug und Netzeinspeisung über einen Monat (Winterperiode 2019) im untersuchten Supermarkt

Das Blockheizkraftwerk wird nicht strom- sondern wärmegeführt betrieben. Es ist also nur dann aktiv, wenn der von ihm zu versorgende Heißwasserspeicher eine bestimmte Grenztemperatur nicht überschreitet. Bei unzureichendem Verbrauch von Wärmeenergie durch das Heizungsnetz oder die RKA erhöht sich die Temperatur im Speicher und das BHKW schaltet sich ab. Es ist daher interessant zu beobachten, wie die vom BHKW bereitgestellte Wärme in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur auf die Verbraucher verteilt wird (vgl. Abbildung 5). Es ist deutlich zu erkennen, dass der notwendige Wärmebedarf des Supermarktes mit sinkenden Umgebungstemperaturen steigt und die verfügbare Wärme für die Resorptionsanlage abnimmt. Würde die Resorptionsanlage einen kontinuierlichen Wärmestrom beanspruchen, würde der Heißwasserspeicher abkühlen und die notwendige Temperatur für die Gebäudeheizung nicht mehr erreicht werden. Es ist daher notwendig, die Resorptionsanlage vor allem in den Wintermonaten bei sehr niedrigen Umgebungstemperaturen in Teillast zu betreiben.

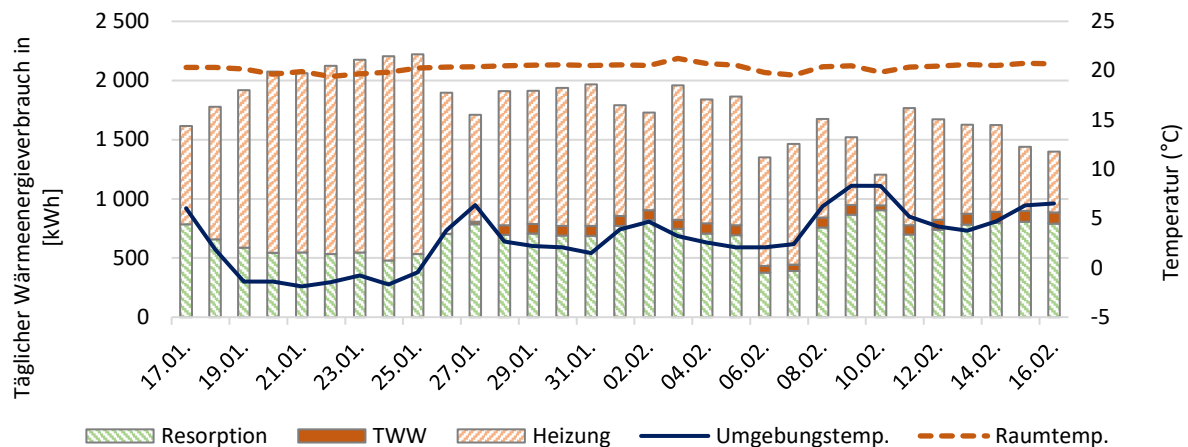


Abbildung 5: Verteilung der Wärme im untersuchten Supermarkt über einen Monat (Winterperiode 2019)

Auf Basis der Messdaten können die jährlichen Mengen und prozentualen Anteile der einzelnen Verbraucher von elektrischer Energie, wie in Tabelle 1 dargestellt, zusammengefasst werden. Besondere Bedeutung hat dabei die Verteilung des Stromverbrauchs für die Bereitstellung von Kälte. Grund hierfür ist, dass das Resorptionssystem die Last der Normalkühlung und Klimatisierung teilweise abdeckt, während die Verbrauchswerte für Beleuchtung, Tiefkühlung (TK) und Sonstiges konstant bleiben. Aufgrund des installierten Sole-Systems zur Kälteverteilung wird eine beträchtliche Menge an elektrischer Energie für die Erzeugung von Pumpenenergie verwendet. Dieser Anteil kann auch durch den Betrieb des Resorptionssystems reduziert werden, da die Solepumpen der Normalkühlanlagen während des Betriebs des Resorptionssystems im Teillastbetrieb betrieben werden können.

Tabelle 1: Jahresverbrauch in MWh und prozentuale Verteilung der elektrischen Energie im untersuchten Supermarkt mit und ohne BHKW und Resorptionssystem

	Beleuchtung	Tiefkühlung	Tiefkühl-lager	Normal-kühlung	Klimati-sierung	Resorp-tion	Sole-Pumpen	Sonstiges	Total
Netzstrom +	14,0	94,5	7,5	117,0	3,4	0,0	122,1	5,8	364,3
Brennwert-kessel	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
	3,8%	25,9%	2,1%	32,1%	0,9%	0,0%	33,5%	1,6%	100,0%
BHKW +	14,0	94,5	7,5	58,5	0,7	18,6	108,1	5,8	307,6
Resorptions-kälteanlage	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
	4,6%	30,7%	2,4%	19,0%	0,2%	6,0%	35,1%	1,9%	100,0%

Um einen Vergleich zwischen der ursprünglichen (Brennwertkessel und Netzstrom) und der neuen Konfiguration (BHKW und Resorptionskälteanlage) durchzuführen, wurden die Messwerte mehrerer repräsentativer Wochen auf den Zeitraum eines ganzen Jahres extrapoliert. Dies war notwendig, da das BHKW, unter anderem aufgrund von Betriebsstörungen, nicht während der gesamten Messperiode im Dauerbetrieb war und die ursprünglich installierten Systeme somit ihre Aufgabe nicht nur als zusätzliche, sondern auch als redundante Systeme erfüllten.

## 2.2 Endenergiekosten

Für eine Wirtschaftlichkeitsanalyse ist es notwendig, die Endenergiekosten des Supermarktes zu kennen. Abbildung 6 zeigt die durchschnittlichen Strom- und Erdgaskosten pro kWh für Industriekunden in ausgewählten Ländern der Europäischen Union im ersten Halbjahr 2019.

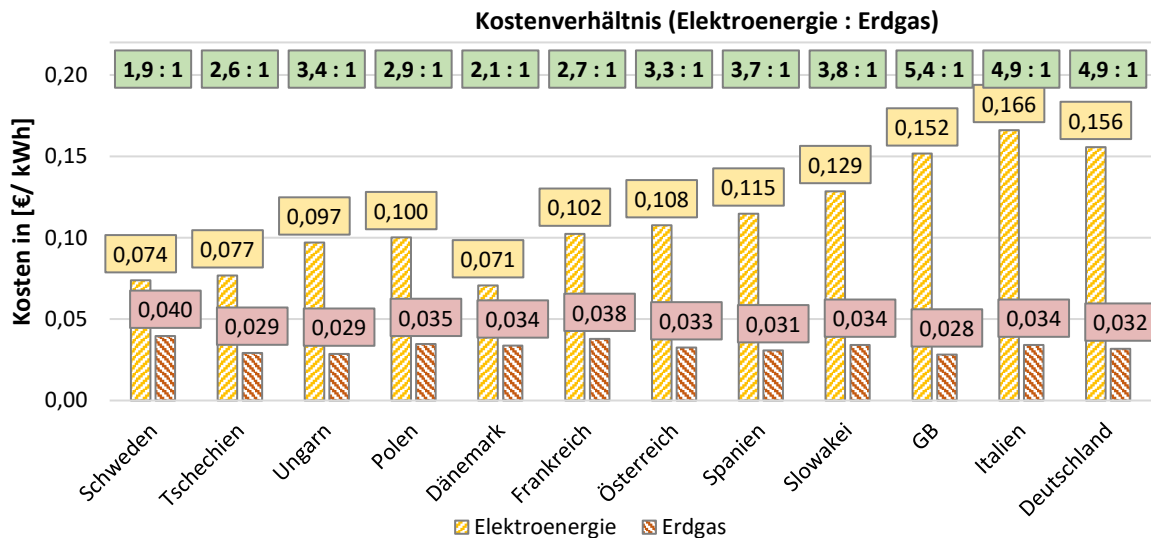


Abbildung 6: Strom- und Erdgaspreise für Industriekunden in europäischen Ländern (ohne Mehrwertsteuer und andere erstattungsfähige Steuern und Abgaben), 2019 [4],[5]

Es zeigt sich, dass die Preise für Elektroenergie stark voneinander abweichen, während der Preis für Erdgas nahezu gleich ist. Zu beachten ist, dass die Werte ohne Mehrwertsteuer und andere erstattungsfähige Steuern und Abgaben angegeben sind, jedoch nationale Zusatzabgaben wie z.B. die EEG-Umlage (Deutschland) enthalten sind. Dies führt zu erheblichen Preisunterschieden zwischen den Ländern. Entscheidend für die Rentabilität eines BHKWs ist das Verhältnis von Erdgas- zu Strompreis, das im oberen Teil von Abbildung 6 grün hervorgehoben ist. Damit wird bereits vor der Berechnung der jährlichen Betriebskosten (Abschnitt 2.3) deutlich, dass das in diesem Paper vorgeschlagene Systemkonzept aus wirtschaftlicher Sicht nicht für alle Staaten geeignet ist.

## 2.3 Jährliche Betriebskosten

Die jährlichen Betriebskosten ergeben sich aus der direkten Multiplikation der Energieverbrauchsdaten aus Tabelle 1 mit den länderspezifischen Kosten für Erdgas und Elektroenergie. Es ist dabei zu erwähnen, dass der Anteil an vom Netz bezogener Elektroenergie für die Kombination BHKW + Resorptionsanlage signifikant geringer ist als ohne. Dem entgegenstehend ist der Anteil an bezogenem Erdgas für dies Kombination deutlich erhöht. Neben den in Tabelle 1 dargestellten Energieverbrauchsdaten und den in Abbildung 6 dargestellten effektiven Energiekosten sind auch die Wirkungsgrade der einzelnen Systeme für die Berechnung der Betriebskosten relevant. Der thermische Wirkungsgrad des Brennwertkessels beträgt  $\eta_{th,BK} = 0,95$ . Der elektrische Wirkungsgrad des BHKW wird mit  $\eta_{el,BHKW} = 0,38$  und der thermische Wirkungsgrad mit  $\eta_{th,BHKW} = 0,55$  angegeben. Trotz des deutlich niedrigeren thermischen Wirkungsgrades wird die gesamte thermische Energie, die der Supermarkt für Heizung und Warmwasserversorgung benötigt, durch das BHKW abgedeckt und liefert darüber hinaus die Antriebswärme für die

Resorptionskälteanlage in Abhängigkeit von der Heizlast. In Abbildung 7 sind die jährlichen Energiekosten für Strom und Erdgas für das Standardsystem (blau) und das System mit BHKW + Resorptionsanlage (orange) für die vorgenannten europäischen Länder dargestellt. Zusätzlich sind die grün hervorgehobenen jährlichen Betriebskosteneinsparungen in Prozent dargestellt. Es wird deutlich, dass es eine signifikante Korrelation zwischen dem Preisverhältnis (Erdgas zu elektrischer Energie) und den jährlichen Kosteneinsparungen gibt. Aufgrund des hohen effektiven Energiepreisverhältnisses in Ländern wie Deutschland, Italien und Großbritannien kann fast oder sogar mehr als die Hälfte der jährlichen Kosten eingespart werden.

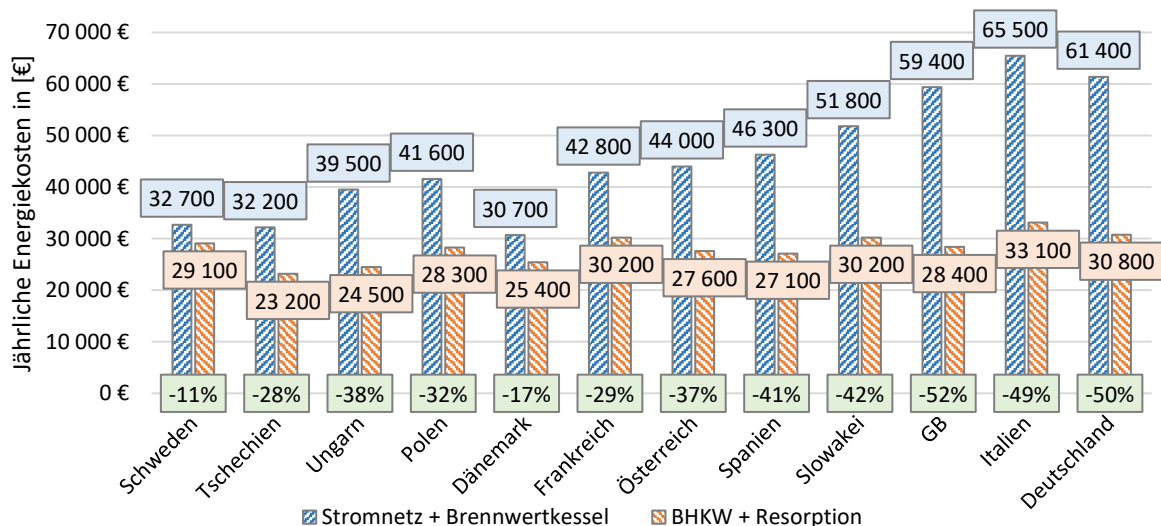


Abbildung 7: Jährliche Energiekosten mit und ohne BHKW + Resorptionsanlage

### 3 Amortisation

Neben der Berücksichtigung der Betriebskosten sind auch die notwendigen Investitionskosten für die Installation eines solchen Systemkonzeptes entscheidend. Tabelle 2 zeigt die hauptsächlichsten Kostenpunkte, basierend auf den Investitionskosten des Pilotprojekts in Deutschland. Insbesondere die Kosten für die Resorptionskälteanlage sind hypothetisch, da sich dieses System derzeit noch im Entwicklungsstadium TRL 8 befindet und bisher kein frei am Markt verfügbares Produkt darstellt.

Tabelle 2: Investitionskosten des gekoppelten Systems aus BHKW und Resorptionsanlage

BHKW	Resorptions- kälteanlage	Container, Rückkühler, Speicher, etc.	Sonstiges	Engineering	Gesamt
60.000 €	25.000 €	50.000 €	15.000 €	50.000 €	200.000 €

Abbildung 8 zeigt die Amortisationsdauer auf der Grundlage dieser Investitionskosten. Aufgrund der sehr geringen Betriebskosteneinsparungen für den Betrieb in Schweden und Dänemark würde sich das System hier erst nach mehr als 25 Jahren amortisieren, was keine realistische Investition darstellt. Betrachtet man die zuvor genannten Länder Deutschland, Italien und Großbritannien, stellt das System eine Alternative zu den bestehenden



Lösungskonzepten dar, da die Lebensdauer von etwa 10-15 Jahren länger ist als die Amortisationsdauer des Systems.

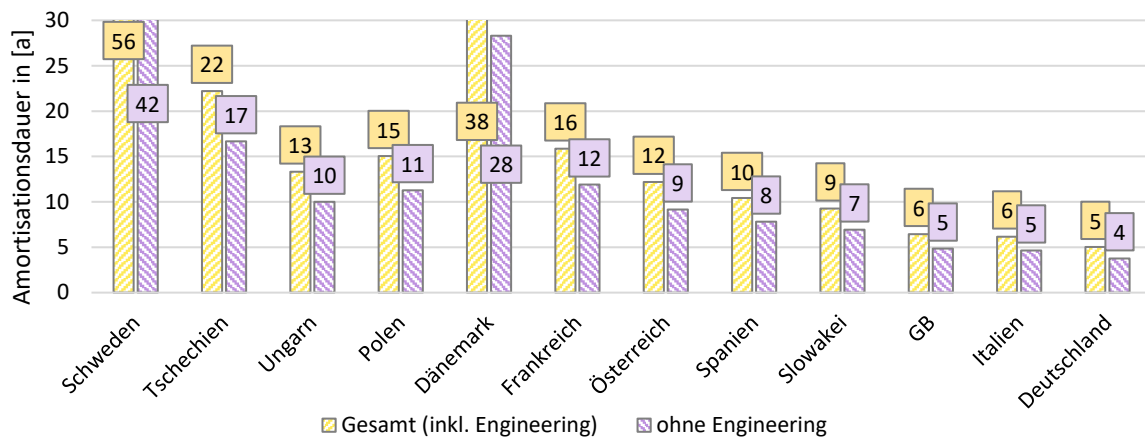


Abbildung 8: Amortisationsdauer des Systems aus BHKW + Resorptionsanlage mit und ohne Engineering-Kosten

Betrachtet man die Werte in Tabelle 2 wird deutlich, dass die Projektierung der Anlage und das Schnittstellenmanagement (Engineering) ca. 25% der Gesamtinvestition ausmachen. Daher wurde im Rahmen der Untersuchungen des Gesamtsystems die Idee eines modularen Designs entwickelt. Hierdurch soll das Systemkonzept hinsichtlich der Elektroenergieerzeugung ( $P_{\text{BHKW}}$ ) sowie der Heiz- und Kühlleistungen ( $\dot{Q}_{\text{BHKW}}$  und  $\dot{Q}_{0,\text{RKA,max}}$ ) für die spezifischen Anforderungen des Kunden skalierbar sein. Dadurch können die Engineering-Kosten deutlich reduziert, die Amortisationszeiten verkürzt und darüber hinaus neue Märkte erschlossen werden.

## 4 CO<sub>2</sub>-Emissionen

### 4.1 CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren

Neben wirtschaftlichen Überlegungen sind auch die Umweltauswirkungen von entscheidender Bedeutung. Hierfür bietet sich die Methode der Ermittlung des TEWI-Wertes (Total Equivalent Warming Impact) an. Mit diesem kann der Treibhauseffekt eines Kälteerzeugungssystems über dessen gesamte Lebensdauer abgebildet werden. In diesem Zusammenhang sind vor allem auch die eingesetzten Arbeitsstoffe entscheidend. Da die Resorptionsanlage mit Ammoniak-Wasser betrieben wird, deren GWP und ODP null ist, würde sich dies zusätzlich positiv auf die Bilanz niederschlagen. Im Rahmen dieser Veröffentlichung soll vorerst nur der indirekte Anteil im Gesamtsystems Supermarkt für einen Jahreszeitraum betrachtet werden. Also das zur Energieerzeugung durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen in die Atmosphäre emittierte CO<sub>2</sub>. In diesem Zusammenhang ist in erster Linie die Menge der in der Kette der Elektroenergieerzeugung verwendeten fossilen Brennstoffe zu berücksichtigen. Wie bei den Erdgas- und Strompreisen finden sich auch Statistiken über die CO<sub>2</sub>-Äquivalente der Stromerzeugung, wie in Abbildung 9 dargestellt. Abhängig von der Haupterzeugungsart der elektrischen Energie, ist die Bilanz in den europäischen Staaten sehr unterschiedlich. Länder wie Schweden oder Frankreich, in denen die Elektrizität hauptsächlich aus erneuerbaren Quellen oder in Kernkraftwerken erzeugt wird, haben einen deutlich niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor als Länder wie Deutschland, die Tschechische Republik oder Polen, in denen

ein großer Teil der Elektrizität in fossil befeuerten Dampfkraftwerken erzeugt wird. Zur Bereitstellung von elektrischer und thermischer Energie mittels eines Blockheizkraftwerks wird vorrangig Erdgas eingesetzt. Aufgrund seines hohen spezifischen Heizwertes bei niedrigstem Kohlenstoffgehalt aller fossilen Energieträger hat Erdgas, das hauptsächlich aus Methan ( $\text{CH}_4$ ) besteht, einen niedrigen Emissionsfaktor von nur  $\epsilon_{\text{CH}_4} = 202 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{th}}$ , der jedoch deutlich höher ist als der von regenerativen Quellen wie Windkraft- oder Photovoltaikanlagen.

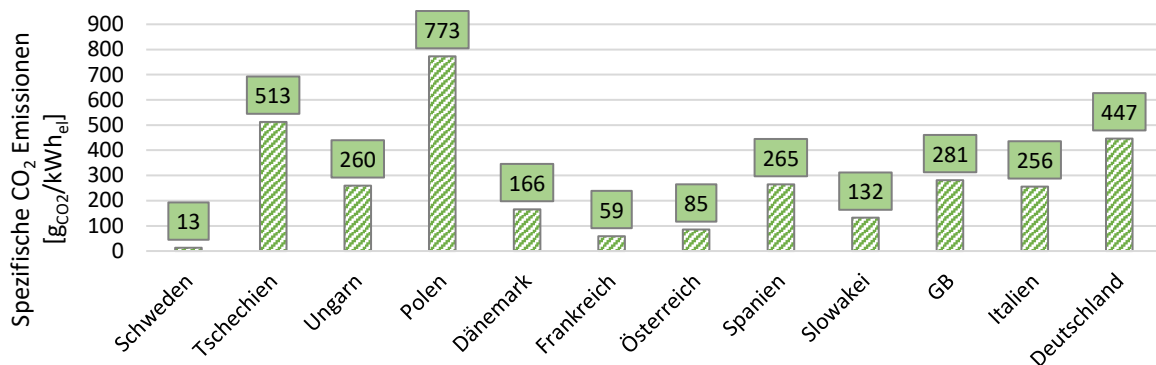


Abbildung 9: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen der Elektroenergieerzeugung in europäischen Ländern [6]

#### 4.2 Jährliche CO<sub>2</sub>-Emissionen des gekoppelten Systems

Die spezifischen jährlichen Emissionswerte der beiden Systemkonfigurationen (mit und ohne BHKW + Resorptionsanlage) lassen sich mit den Verbrauchswerten aus Tabelle 1 und den in Abbildung 9 dargestellten Emissionswerten der Elektroenergieerzeugung berechnen. Sind die Emissionswerte mit BHKW + Resorptionsanlage geringer, sind die prozentualen Einsparungen in grün hinterlegt, liegen sie höher, in orange.

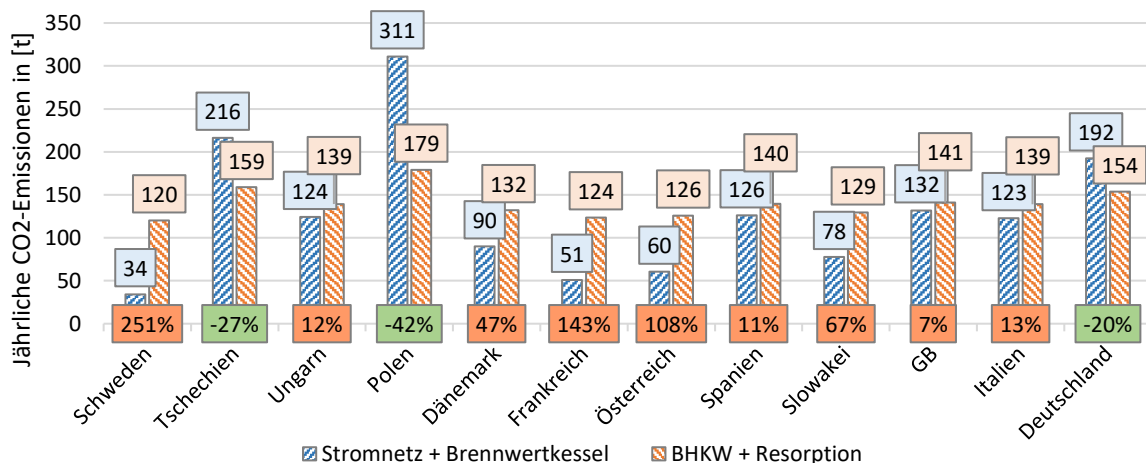


Abbildung 10: Jährliche CO<sub>2</sub>-Emissionen mit und ohne BHKW + Resorptionssystem

Abbildung 10 zeigt, dass die Jahresemissionswerte mit der Systemlösung BHKW + Resorptionssystem in den Ländern mit einem Schwellenwert von  $< 315 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{el}}$  über denen der Ausgangskonfiguration liegen. Sie stellen daher keine nachhaltige Alternative dar. Schlüsselfaktoren zur Verbesserung des Systems und zur Senkung dieses Schwellenwertes sind die prozentuale Abdeckung der Kältelast durch die Resorptionskälteanlage und der elektrische Wirkungsgrad der BHKW-Einheit.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen eines Pilotprojekts wurde ein Supermarkt energetisch saniert, um mittels eines neu installierten Blockheizkraftwerks die Versorgung mit Elektroenergie und Heizenergie sicherzustellen. Insbesondere in den Übergangs- und Sommermonaten von März bis November wird allerdings nur eine geringe Menge an Wärmeenergie für die Beheizung und Warmwasserversorgung benötigt. Um die bei der Kraft-Wärme-Kopplung erzeugte Wärme nicht an die Umwelt abzuführen bzw. das BHKW ganz abzuschalten, wurde zusätzlich eine thermisch angetriebene Resorptionskälteanlage installiert. Dieses System nutzt die bisher ungenutzte Abwärme des BHKWs auf niedrigem Temperaturniveau, um Kälteleistung für die Normalkühlung und die Klimatisierung des Supermarktes bereitzustellen. Dabei wird zusätzlich der Stromverbrauch der konventionellen Kompressionskälteanlagen reduziert, was einen weiteren Vorteil darstellt. Das Monitoring des Supermarktes und die darauf basierenden Berechnungen zeigen, dass ein erheblicher Betrag von bis zu 52 % der jährlichen Betriebskosten eingespart werden kann. Auf der Grundlage dieser Werte konnte eine Amortisationsrechnung erstellt werden, die die Wirtschaftlichkeit der Technologie beweist. Im europäischen Vergleich ist eine teilweise geringere Rentabilität zu beobachten, da die Preise für Elektroenergie stark differieren und dadurch zu ungünstigen Gas-/Stromkostenverhältnissen führen, die sich in den erzielbaren jährlichen Einsparungen niederschlagen. Im Allgemeinen lassen sich durch das Forschungsprojekt die Vorteile eines systemübergreifenden Ansatzes bei der Gestaltung von Energieversorgungssystemen und die Vorteile einer Sektorenkopplung selbst bei kleinen Systemverbänden aufzeigen.

Zukünftig können Technologien wie Power-to-Gas, die überschüssige regenerativ erzeugte elektrische Energie z.B. in synthetisch erzeugten Wasserstoff oder Methan umwandeln, den wirtschaftlichen und klimafreundlichen Betrieb einer dezentralen verbrennungsbasierten elektrischen Energieerzeugung (z.B. BHKW) unter Nutzung der bestehenden Erdgasinfrastruktur ermöglichen und bilden somit eine gute Perspektive für das vorgestellte Konzept.

## Danksagung

Die präsentierten Ergebnisse wurden im Rahmen des vom Deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projektes ResoField erzielt (FKZ: 03ET1338A). Die Autoren bedanken sich beim BMWi für die finanzielle Unterstützung.

## Referenzen

- [1] Ziegler O; Hesse U; Thomas C; Increased efficiency of combined heat and power plants by utilizing waste heat for resorption chillers and their combination with hydrocarbon chillers; 37th UIT Heat Transfer Conference, Padova, Italy, 24-26 June 2019
- [2] International Energy Agency 2012 World Energy Outlook 2012 (Paris OECD/IEA) pp 351-356.
- [3] Altenkirch E. Absorptionskältemaschinen. VEB Verlag Technik Berlin; 1954, pp 56-73
- [4] Eurostat. Gas prices for non-household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards). 2019
- [5] Eurostat. Electricity prices for non-household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards).2019
- [6] Koffi B, Cerutti A, Duerr M, Iancu A, Kona A, Janssens-Maenhout G. Covenant of Mayors for Climate and Energy: Default emission factors for local emission inventories– Version 2017, EUR 28718 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-71479-5, doi:10.2760/290197, JRC107518.