Titel: **Resorptionskälteanlagen zur Nutzung niederexergetischer Abwärmepotentiale**

Kontaktdaten: Dipl.-Ing. Oliver Ziegler

Technische Universität Dresden

Fakultät Maschinenwesen

Institut für Energietechnik

Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik

01062 Dresden

Tel.: +49 351 463 32603

Mobil.: +49 173 6164941

E-Mail: oliver.ziegler@tu-dresden.de

Resorptionskälteanlagen zur Nutzung niederexergetischer Abwärmepotentiale – Ein Beitrag zur Sektorenkopplung

Einordnung des Themas

Der führende Aspekt der sogenannten Energiewende ist die Abkehr von fossilen Energieträgern. Eine Substitution jeglicher fossilen Energieträger durch die Elektrifizierung aller industriellen, gewerblichen und privaten Bereiche einschließlich der Mobilität, ist unbestritten ein avantgardistischer Gedanke. Dieser geht mit einem notwendigen Um- und Zubau von Energieerzeugungsanlagen, der Energieverteilung sowie der sie verwendenden Systeme - also der gesamten Infrastruktur - einher. Dies benötigt finanzielle Investitionen, gesellschaftliche Akzeptanz aber vor allem Zeit. Zur fristgerechten Erreichung internationaler Klimaschutzziele sind dementsprechend auch mittelfristige Maßnahmen notwendig, die die vorhandene Infrastruktur weitestgehend nutzen können – die Rede ist von Übergangs- und *Schnittstellentechnologien*.

Im Verständnis der Allgemeinheit ist mit dem Begriff Energie zumeist die Elektroenergie gemeint. So ist es verständlich, dass im gesellschaftlichen Umfeld bei der Energiewende in erster Linie an regenerative Energien zur Elektroenergieerzeugung gedacht wird. Spricht man im jenem Umfeld hingegen von Wärme, setzt man diesen Begriff häufig nur mit dem Vorhandensein einer höheren Temperatur als der der Umgebung gleich. Die Vorstellung, diese Temperaturdifferenz als energetisches Potential anzusehen, sei diese höher oder auch niedriger als die Temperatur der Umgebung, erschließt sich meist nur denjenigen, die mit der Disziplin der Thermodynamik vertraut sind. Ist man sich dieses physikalischen Gesetzes und dem sich daraus ergebenden ökologischen und wirtschaftlichen Potential der Nutzung verfügbarer Wärmequellen bewusst, kann der Eindruck entstehen, dass die Energiewende intensiver um den Gedanken einer *Wärmewende* erweitert werden müsste.

Die Kältetechnik, als Teildisziplin der ingenieurmäßigen Anwendung der Thermodynamik, bedient sich im Bereich der *Sorptionskälteprozesse* am erwähnten Potential des Temperaturunterschiedes zur Umgebung. Hierbei wird ein energetisches Potential höherer in ein Potential niedrigerer Temperatur als der der Umgebung umgewandelt. Der Vorteil des Prozesses ist, dass dieser mit einem deutlich geringeren Anteil an Elektroenergie auskommt als dies bei der Kälteerzeugung nach dem Kompressions- bzw. Kaltdampf-Prozess der Fall ist.

Wärmeenergie Q, als hauptsächliche Antriebsenergie für Sorptionskälteanlagen, tritt unspektakulärer Weise überall zu Tage. Sei es als Solarwärme, Geothermie oder eben aus industriellen Prozessen. Zur industriellen Herstellung verschiedenster Güter wird häufig ein thermisches Potential benötigt. Bei notwendigen Temperaturen über der Umgebungstemperatur wird dies hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger und bei Temperaturen unterhalb der Umgebung durch den Einsatz elektrisch angetriebener Kälteanlagen gedeckt. Nicht selten finden sich Herstellungsprozesse, bei denen das eine wie das andere benötigt wird – Beispiele sind Molkereien, Brauereien und andere lebensmittelverarbeitenden Betriebe. Häufig wird dabei vor allem das Potential höherer Temperatur nicht vollständig genutzt und als *Abwärme* unter Verwendung zusätzlicher Elektroenergie aufwändig an die Umgebung abgegeben.

Man kann also festhalten, dass die Nichtnutzung industrieller Abwärme bereits einen wirtschaftlichen Nachteil bedeutet. Bei der Nutzung dieser Energieform – Abwärme – zur Bereitstellung einer anderen Energieform – Kälte – entstünde entsprechend ein doppelter Vorteil,

da hierdurch zusätzliche hochwertige Elektroenergie zur Bereitstellung ebendieser Kälte eingespart werden könnte (vgl. Abbildung 1).

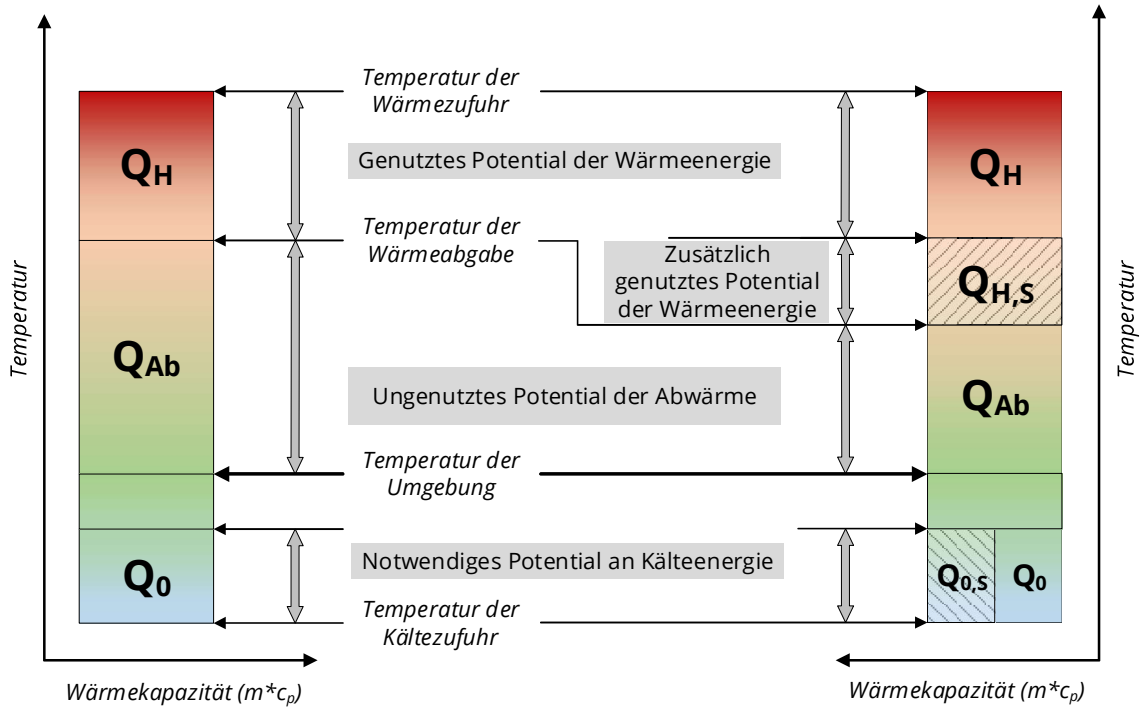


Abbildung 1: Wärmepotentiale in Bezug auf Temperatur und Wärmekapazität mit und ohne Nutzung durch eine Sorptionskälteanlage (Q_H...Heizwärme; Q_0...Abwärme; Q_0...Nutzkälte; $Q_{H,S}$...Antriebswärme der Sorptions-KA; $Q_{0,S}$...Nutzkälte der Sorptions-KA)

Dieser Aspekt lässt sich aber noch erweitern. Im Zuge der Dezentralisierung der Elektroenergieversorgung durch den Zubau von Solar- und Windkraftanlagen werden Insellösungen unter zusätzlicher Verwendung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen), mit dem Ziel der Erreichung einer energetisch bilanziellen Autarkie, immer attraktiver. Blockheizkraftwerke kleiner bis mittlerer Größe stellen bereits in vielen Bereichen der Industrie Prozesswärme und Elektroenergie gleichermaßen bereit, wohingegen sie in anderen bisher noch keine Anwendung fanden. Hintergrund ist, dass die durch sie erzeugte Wärme saisonal bedingt meist nicht vollständig genutzt und die Anlagen aus wirtschaftlichen Gründen abgeschaltet werden müssten. Würde man diese überschüssige Abwärme, die vor allem im gewerblichen Bereich vornehmlich nur zur Raumbeheizung und Warmwassererzeugung in den Wintermonaten eingesetzt wird, mittels einer Sorptionsanlage in Kälte umwandeln können, ergäbe sich dadurch ein entsprechender dritter Vorteil **–** die Laufzeitverlängerung der KWK-Anlagen.

Primärenergetisch betrachtet, ist diese *Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung* (KWKK) also überaus sinnvoll und wird bereits in größeren Industriebetrieben angewendet. Aber insbesondere Sorptionsanlagen mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak-Wasser, zur Erzeugung von Kälte im Bereich unter 0 °C, sind aufgrund ihres komplexen Aufbaus und den damit einhergehenden hohen spezifischen Investitionskosten, in Euro je Kilowatt installierter Kälteleistung, hauptsächlich im Bereich größerer Leistungen über 100 kW am Markt verfügbar. Für eine Vielzahl von Anwendungen im Bereich von kleinen und mittleren industriellen sowie gewerblichen Unternehmen ist eine wirtschaftlich sinnvolle Alternative zur Kopplung der bisher getrennten Sektoren Wärme, Kälte und Elektroenergie wünschenswert.

Ein neuartiges Anlagenkonzept auf Basis der von Altenkirch 1954 erstmals erwähnten Resorptionskälteanlage (RKA) könnte diese Alternative darstellen.

Zusammenfassung der Arbeit

Eine Untersuchung von Pehnt et al. aus 2010 schätzt das technisch-wirtschaftliche Abwärmenutzungspotenzial (Temperaturniveau über 60 °C) in erster Näherung auf 18 % des Endenergieeinsatzes der deutschen Industrie. Aktuellen Studien bzw. Untersuchungen zu dezentralen Abwärmepotentialen im Bereich des Sektors Gewerbe-Handel-Dienstleistung (GHD) sind allerdings nur ungenügend vorhanden. Um die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Abwärmenutzung aufzuzeigen, ist also immer eine individuelle Bewertung der örtlichen Gegebenheiten notwendig. Zur Bewertung von Abwärmepotentialen bietet sich die *Exergiebetrachtung* an, da diese die Arbeitsfähigkeit von Energieströmen besser darstellen kann. Ausgehend von den Grundlagen nach Baehr und Kabelac beschäftigt sich insbesondere die Dissertation von Jentsch (2010) mit diesem Thema. Auf deren Basis wurde von ihm ein Konzept eines Exergieausweises entwickelt, ähnlich dem gesetzlich festgelegten Energieausweis für Gebäude. Die von Jentsch dargestellte Herangehensweise ist Grundlage der Beurteilung dezentraler Energieerzeugungsanlagen und Wärme-/ Kälteerzeugungsanlagen wie sie auch im Rahmen meiner Arbeit vorgenommen wird.

Ein Werkzeug zur Analyse von Systemverbünden und zur Darstellung der Ergebnisse bietet unter anderem auch die sogenannte *Pinch Analyse*. Sie ist ein in den 1990er Jahren entwickeltes Werkzeug zur Prozessintegration und wird vorrangig bei großen Industriebetrieben angewendet. Mittels einem von der Hochschule Luzern lizenziertem Software-Tool, lassen sich auf Grundlage einer umfangreichen Datenbasis Optimierungspotentiale im Bereich der Abwärmenutzung aufzeigen. Hierzu werden Temperatur-Enthalpiestrom-Diagramme erarbeitet – sogenannte *Composite Curves*. Auf Basis der Composite Curves und der minimalen Temperaturdifferenz ΔT_{min} können energetische Zielwerte für die Wärmerückgewinnung (WRG) und den Heiz- und Kühlbedarf von Prozessen abgeleitet werden. Mit diesen energetischen Zielwerten und ΔT_{min} kann eine Vorhersage der wirtschaftlichen Zielwerte (also Investitions- und Betriebskosten) erfolgen. Dies wiederum ermöglicht den Aufbau eines Wärmeübertragernetzwerkes und die Integration von Energiewandlern wie bspw. thermisch angetriebenen Kälteanlagen.

Weiterhin werden die im Rahmen der Promotion erfolgten Weiterentwicklungen der Technologie der *Resorptionskälteanlagen* (RKA) beschrieben. Basis der Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise bildet die erstmalige Darstellung der Technologie durch Altenkirch aus dem Jahre 1953. Darüber hinaus wird die Maschine erläutert und die Besonderheiten der Anlage herausgearbeitet, die die Basis der Weiterentwicklungen im Rahmen meiner Arbeit waren. Eine dieser Besonderheiten ist die *Rezirkulation der Lösung* (auch Mixstrom genannt), die für den kontinuierlichen Betrieb der RKA notwendig ist. Die Beschreibung erfolgt auf Basis der im Rahmen der Promotion bereits veröffentlichten Ergebnisse aus den Messungen mit einer Laboranlage sowie eines analytischen Lösungsansatzes unter Verwendung geeigneter Randbedingungen – zu diesen zählen z.B. die Leistung und die Temperaturdifferenz der Wärmezufuhr sowie die Einfüllkonzentration der Ammoniak-Wasser-Lösung der Anlage. Eine weitere Optimierung stellt die Entwicklung sogenannter Verteillanzen zur Fluidverteilung im Einlaufbereich der Blasenabsorber dar, welche mittels empirischer Forschung unter Zuhilfenahme eines Prüfstandes zur Phasenverteilung entwickelt wurden.

Aufbauend auf die analytische Berechnung des Mixstroms ist ein Modell der Resorptionsanlage entwickelt worden, welches unter Zuhilfenahme weiterer Randbedingungen ein iteratives Modell zur Auslegung von Resorptionsanlagen kleiner Leistung darstellt. Aufgrund eines zusätzlichen Freiheitsgrades im Vergleich zu herkömmlichen Absorptionskälteanlagen (AKA) lässt sich eine Berechnung nur mittels zusätzlicher Annahmen durchführen, die durch implementierte Prüfkriterien falsifiziert werden. Zur Darstellung des Modells werden einzeln ausgewählte Messpunktdaten den Berechnungsdaten gegenübergestellt und um einige Auslegungspunkte hypothetischer Anlagen erweitert.

Weiterhin beinhaltet die Arbeit eine Darstellung der *Resorptionskälteanlage im Systemverbund eines Supermarktes*. Unter anderem wird die Infrastruktur des Pilotmarktes dargestellt und wie die RKA sich in diesen einbettet.

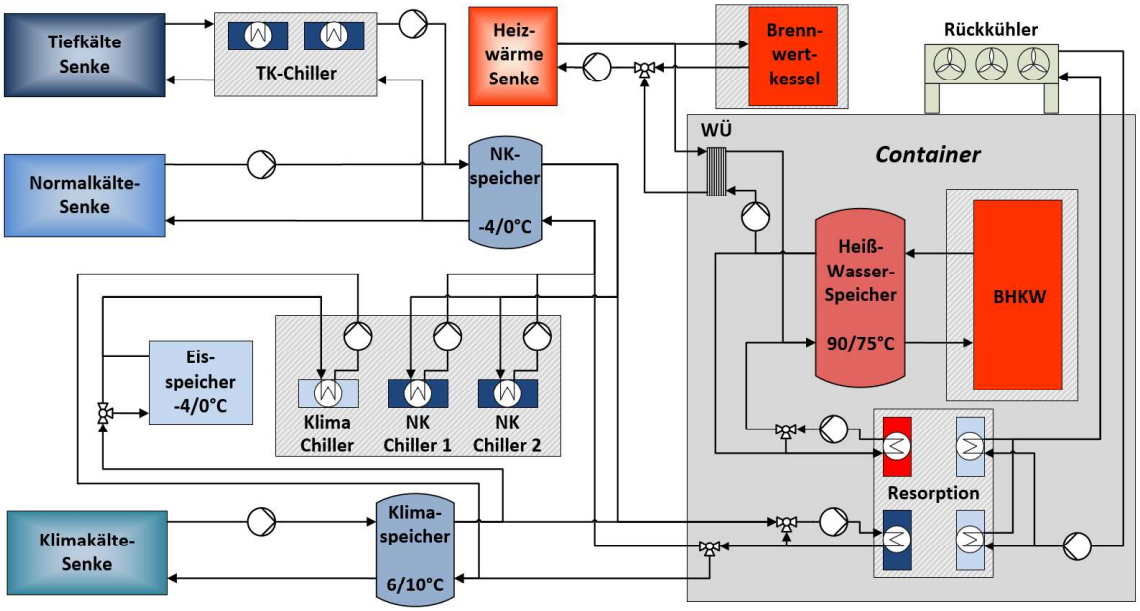


Abbildung 2: Schema der Nutzenergieversorgung im Pilotmarkt

Wichtiger Schwerpunkt im Rahmen der Promotion war die *Entwicklung einer Steuerung* für den Betrieb der RKA im Systemverbund. Es wird dementsprechend die Entwicklung eines Steuerungskonzeptes für die RKA und deren Einbindung in den Systemverbund beschreiben. Darüber hinaus wurde ein für den Industriestandard notwendiges Sicherheitskonzept entwickelt. Im Weiteren erfolgt eine eingehende Darstellung der *Prozeduren zum Betrieb einer Resorptionskälteanlage* als größte Herausforderung des Betriebs von Resorptionskälteanlagen.

Durch das Monitoring der RKA sowie des gesamten Systemverbunds lassen sich eingehende *Betriebserfahrungen* darstellen. So wird beispielweise der Einfluss der Randbedingungen (Wärmequelle, Speicherbeladung, Außentemperatur) aufgezeigt. Die erfassten Daten über einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren lassen neben der Darstellung von *Tages-, Wochen-, Monats-, Jahres-Lastprofile* und *Betriebskennfeldern* (vgl. Abbildung 3) auch eine *Nachhaltigkeits- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung* zu und (vgl. Abbildung 4).

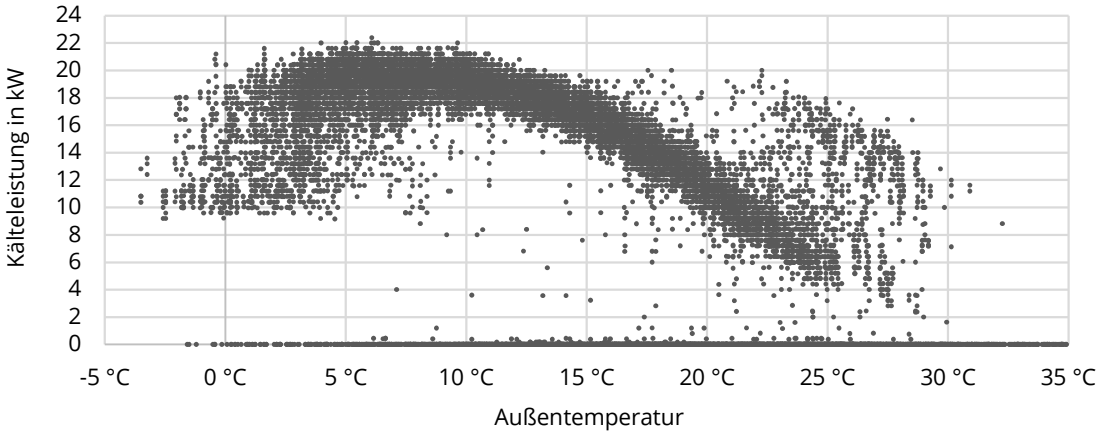


Abbildung 3: Betriebskennfeld – Kälteleistung der RKA in Abhängigkeit der Außentemperatur

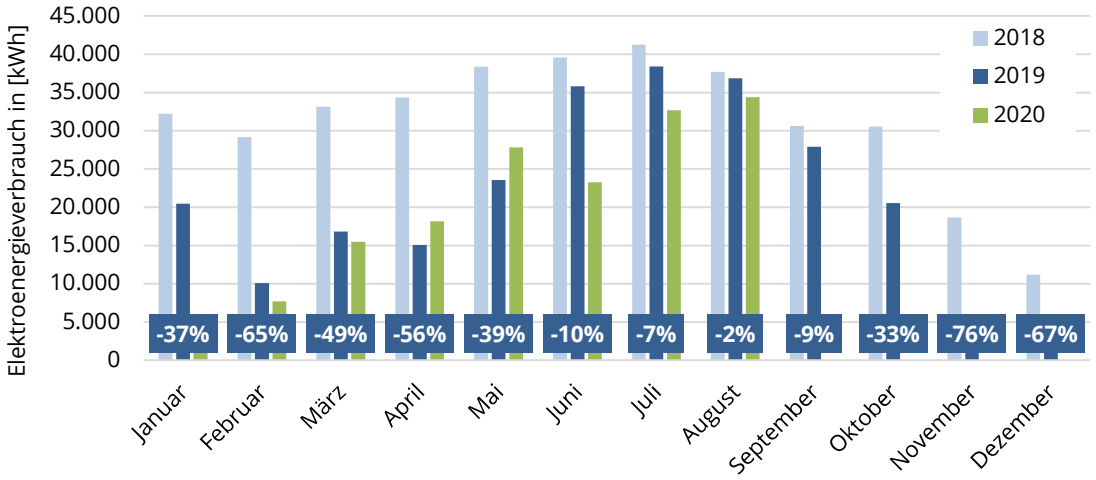


Abbildung 4: Elektroenergiebezug (Netzbezug) des Pilotmarktes im Mehrjahresvergleich und Vergleich der Einsparungen 2019 zu 2018

Insbesondere im Bereich der spezifischen Emissionen wird nach Art der Wärmebereitstellung die Erzeugungskette betrachtet. Hierzu dient der *Primärenergiefaktor*. Auf dessen Basis wird in Abhängigkeit der exergetischen Potentials des Einsatzortes das *Emissions-Reduktionspotential* und konkret am Beispiel der im Rahmen der Arbeit aufgebauten Pilotanlage am Standort Möglingen aufgezeigt. Gleiches wird für die Betriebskosten vorgenommen auf dessen Basis sich eine *Amortisationsrechnung* anschließt.

Abbildung 5: Resorptionskälteanlage im Container am Standort des Pilot-Supermarktes

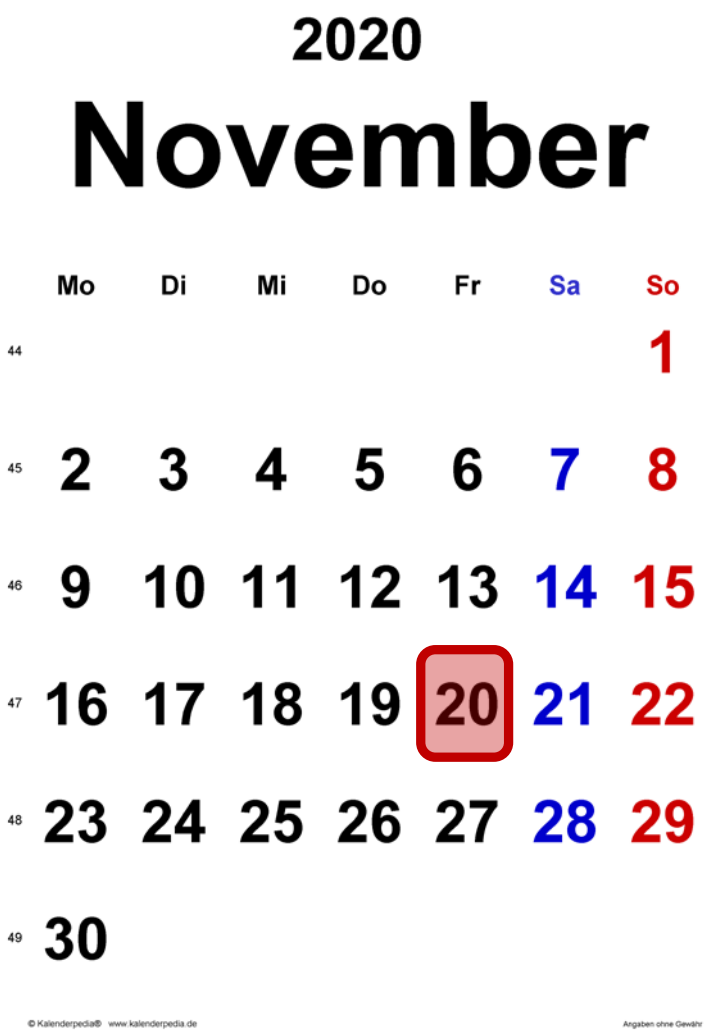
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

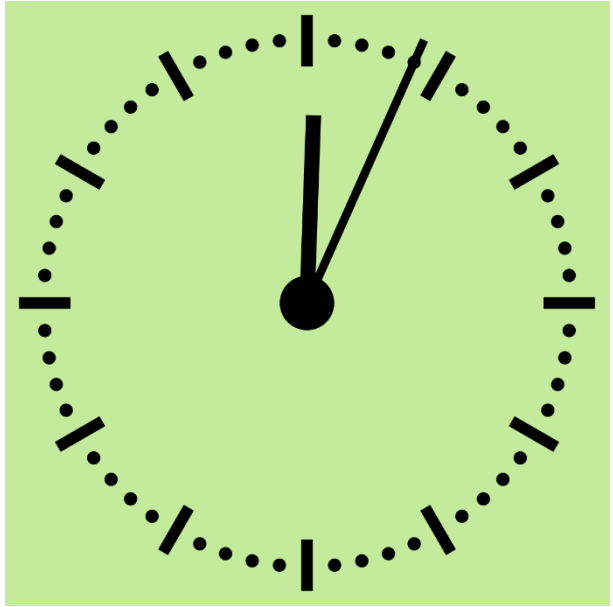
DRESDEN concept

Oliver Ziegler
Fakultät Maschinenwesen // Institut für Energietechnik
Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik

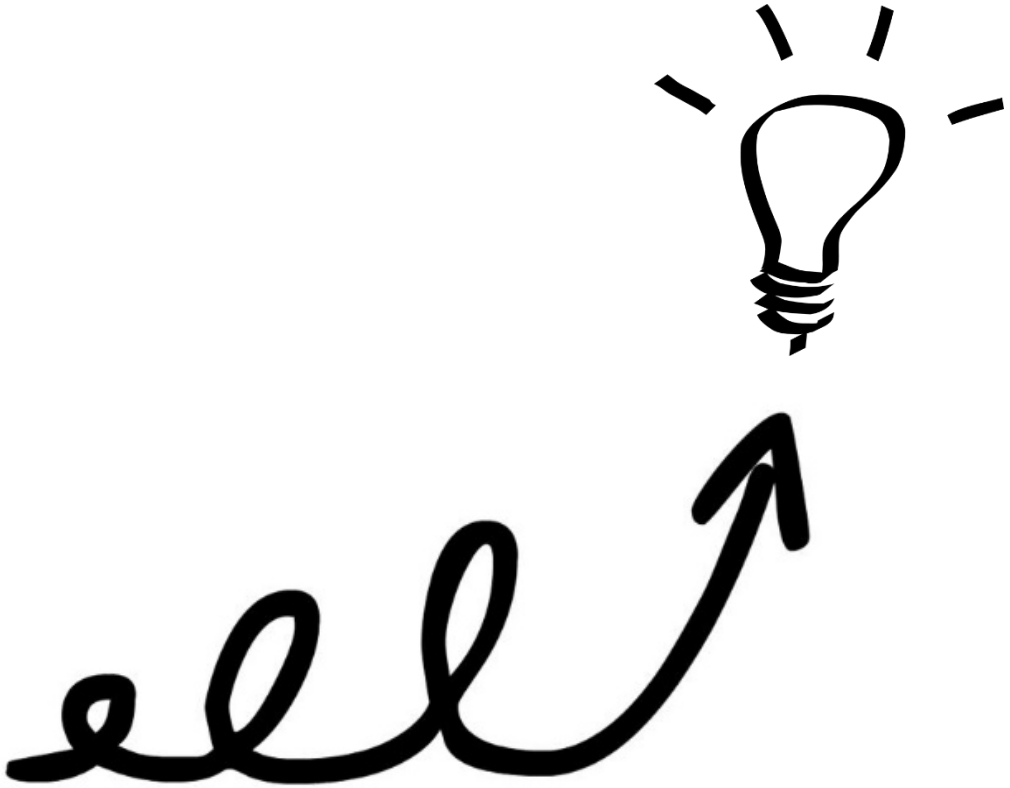
Resorptionskälteanlagen zur Nutzung niederexergetischer Abwärmepotentiale – Ein Beitrag zur Sektorenkopplung

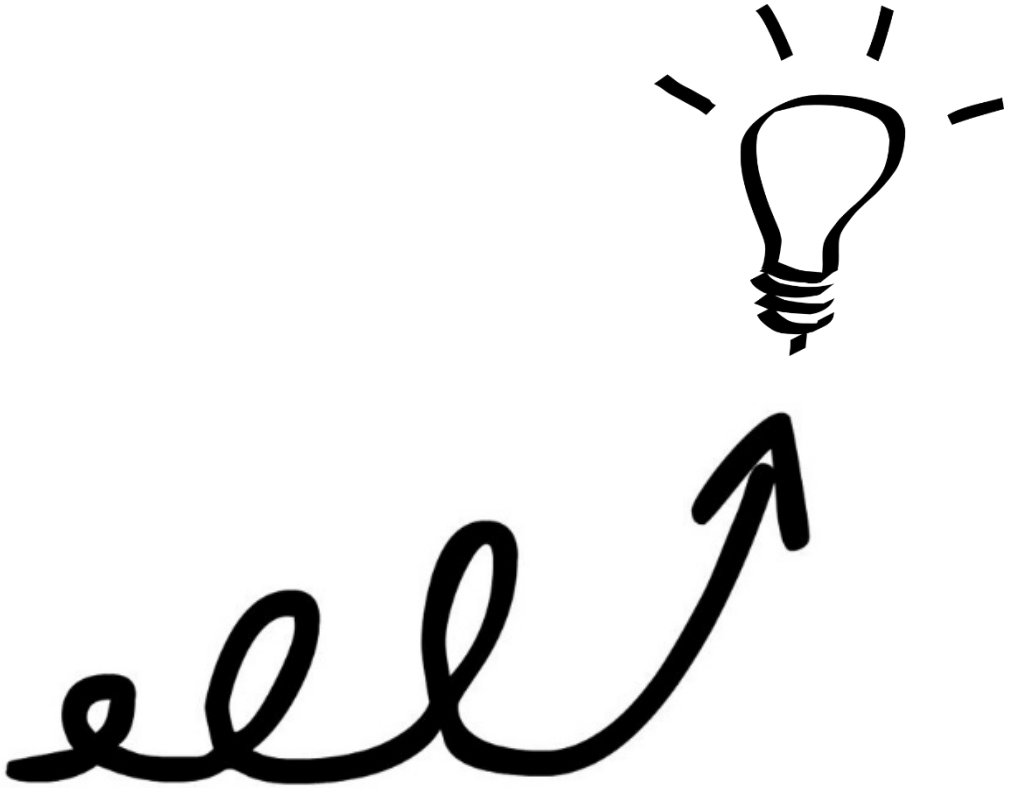
Energie Campus // 20.11.2020


2020
November
Mo Di Mi Do Fr Sa So
44 1
45 2 3 4 5 6 7 8
46 9 10 11 12 13 14 15
47 16 17 18 19 20 21 22
48 23 24 25 26 27 28 29
49 30
© Kalenderpedia® www.kalenderpedia.de
Angaben ohne Gewähr

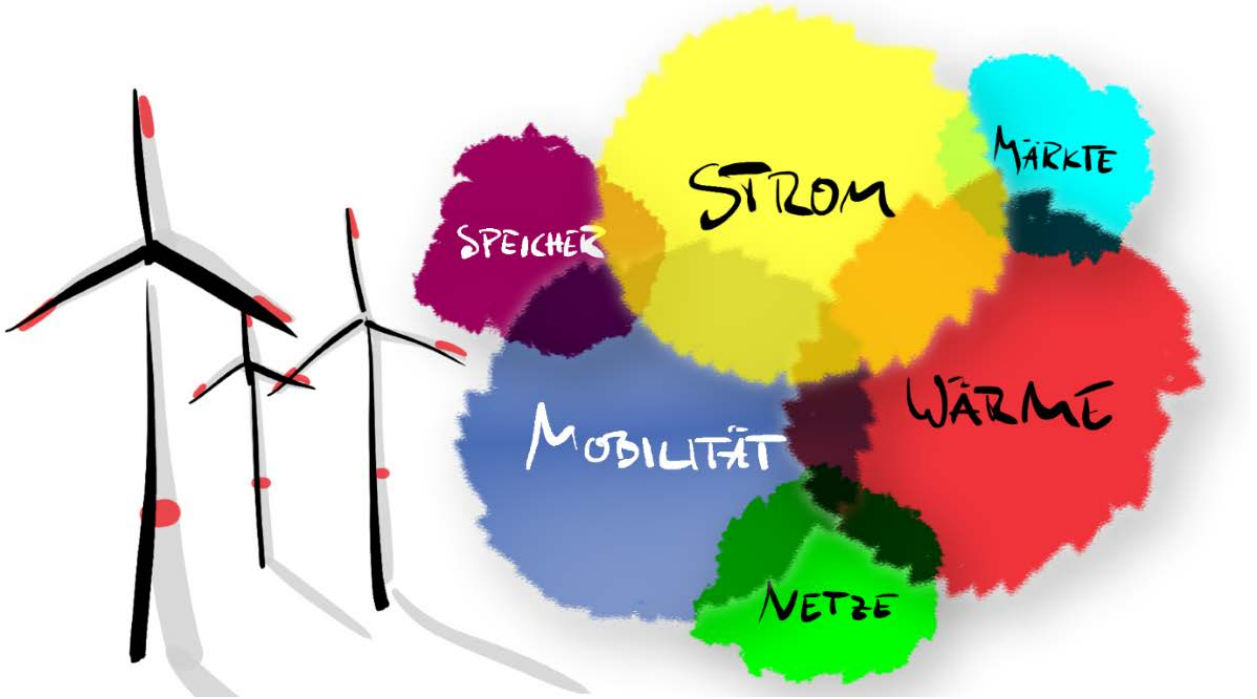


START

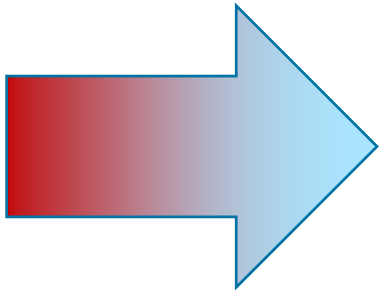




Sektorenkopplung

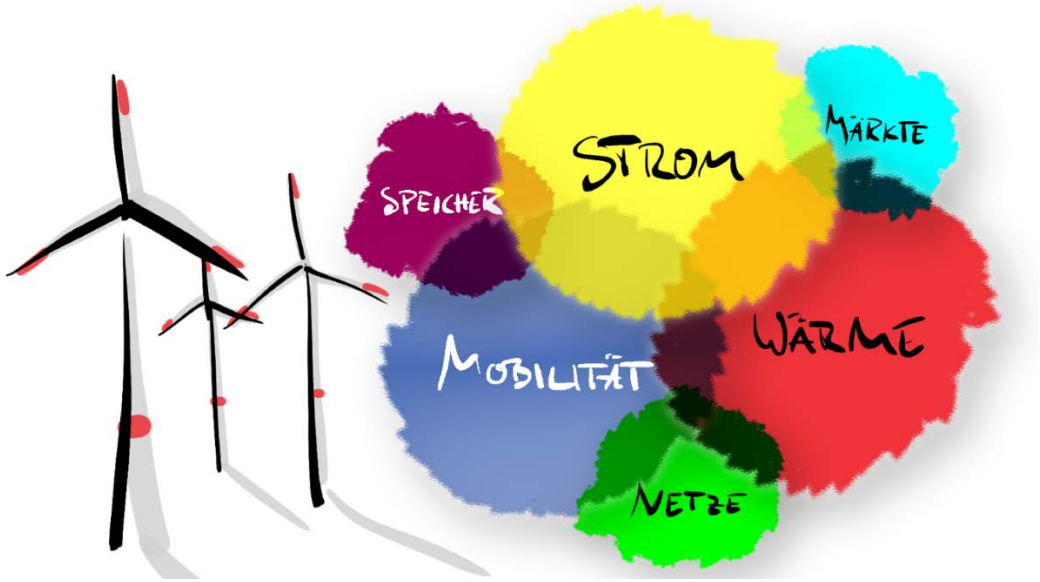


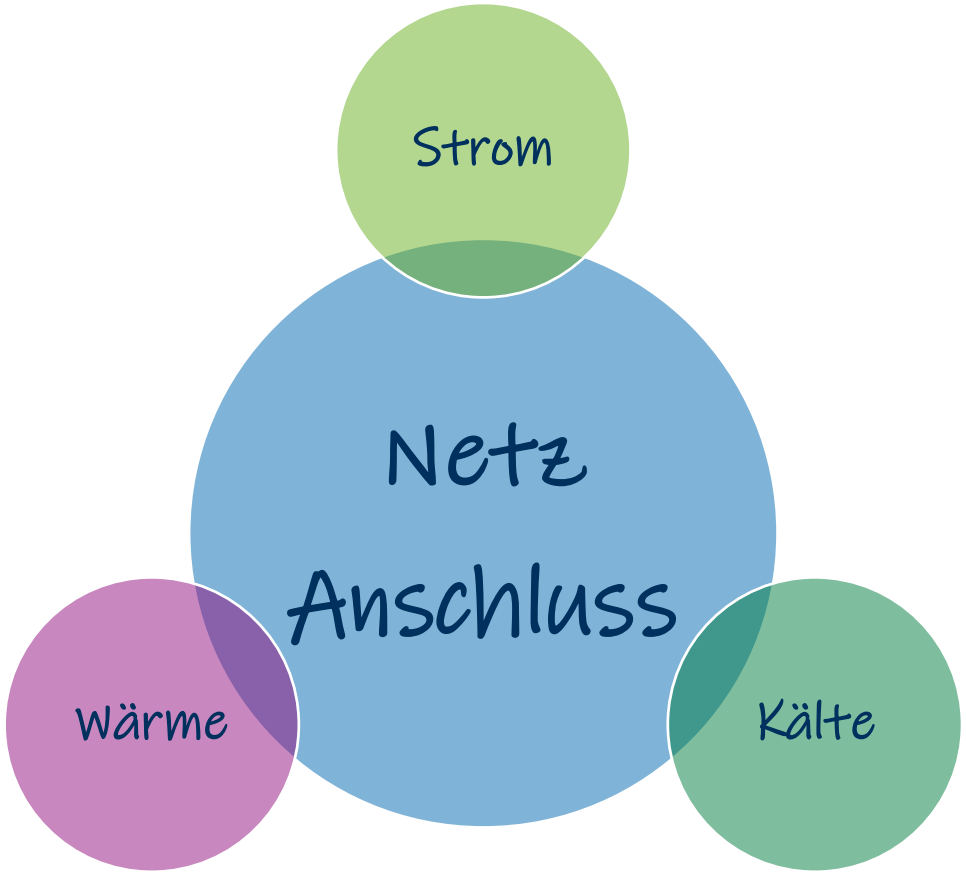
Abwärme

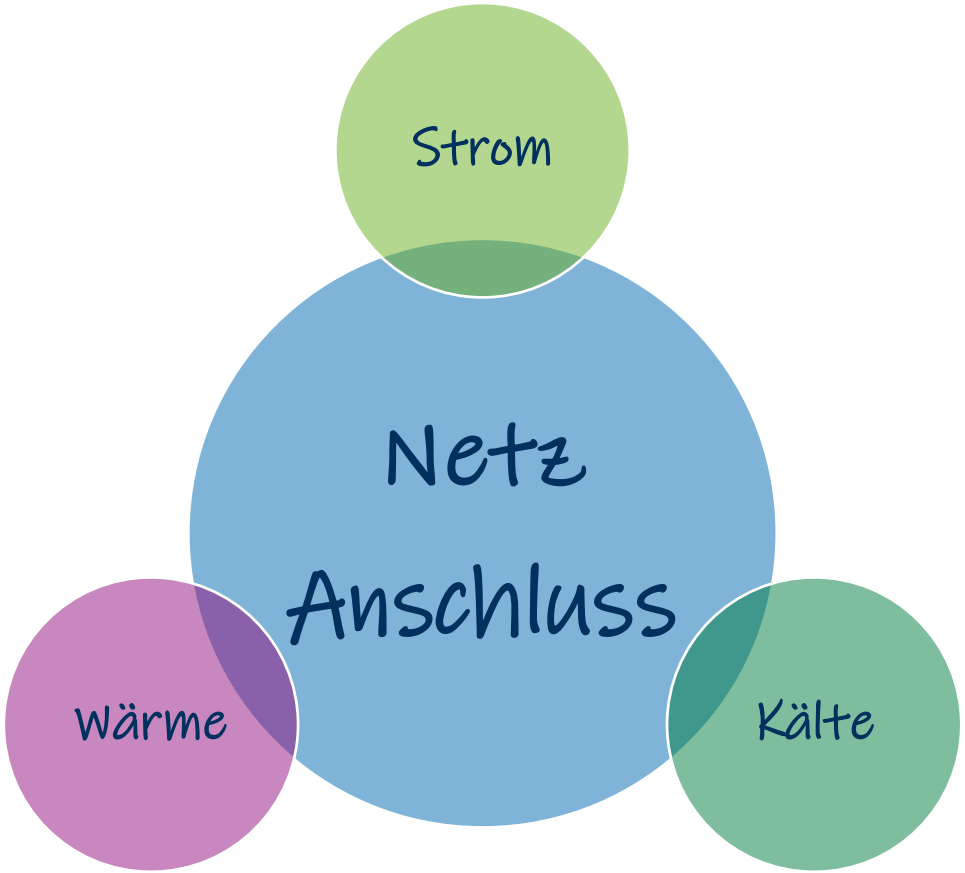


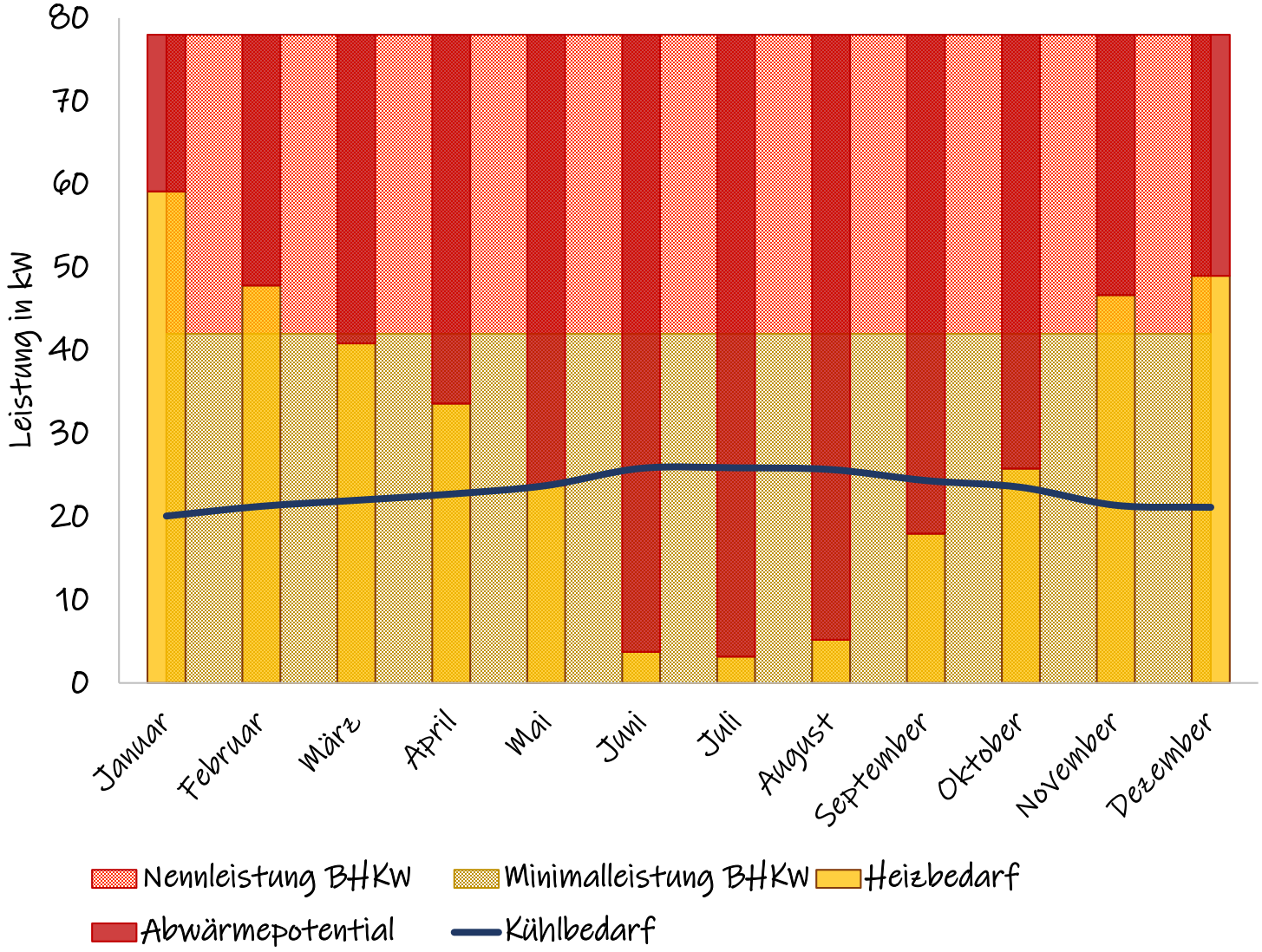
Kälte

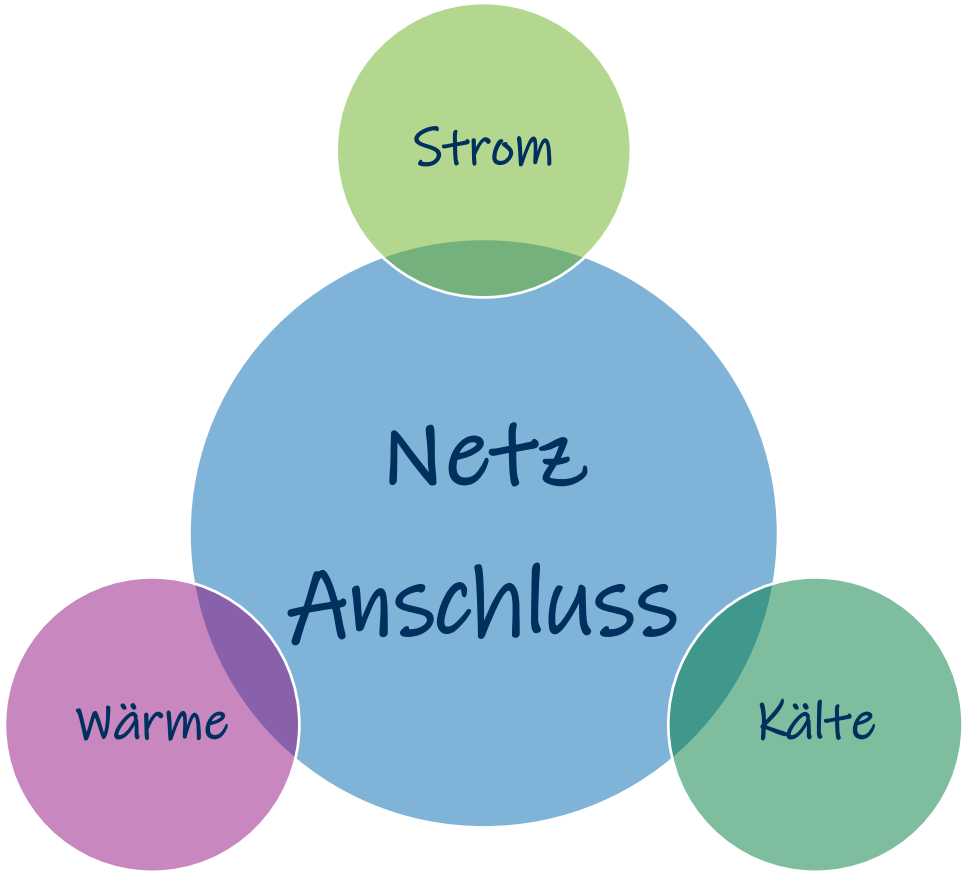
Sektorenkopplung

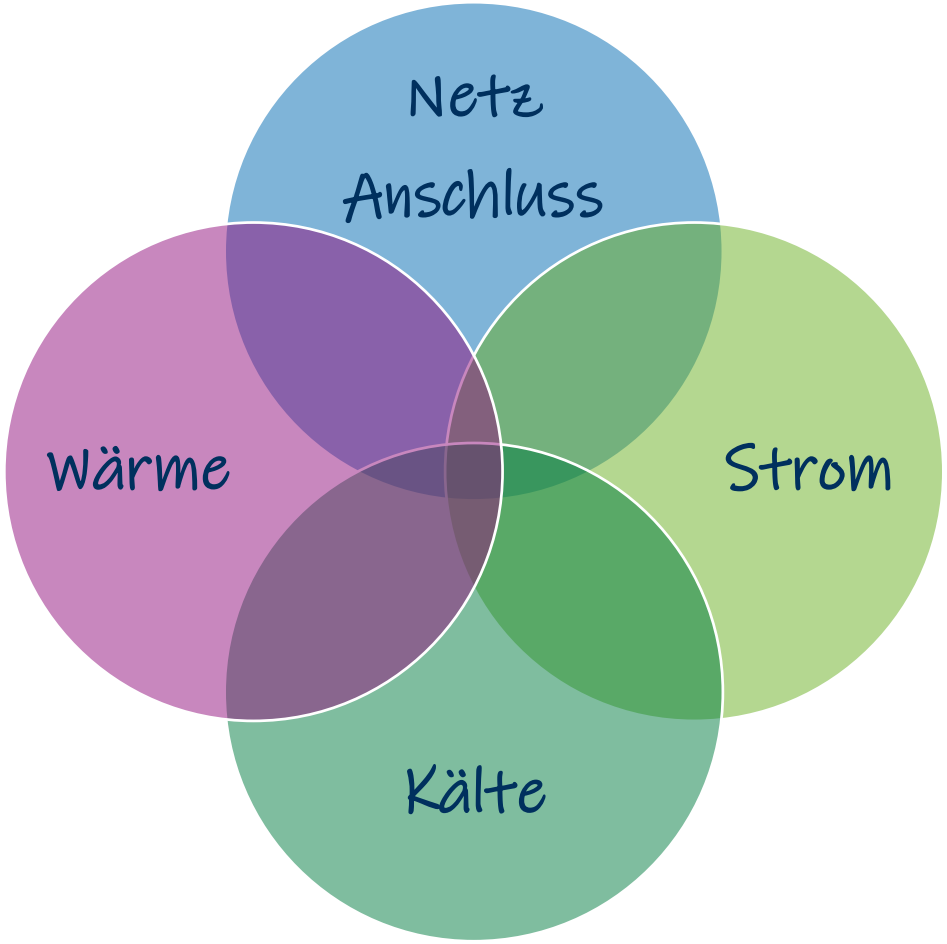


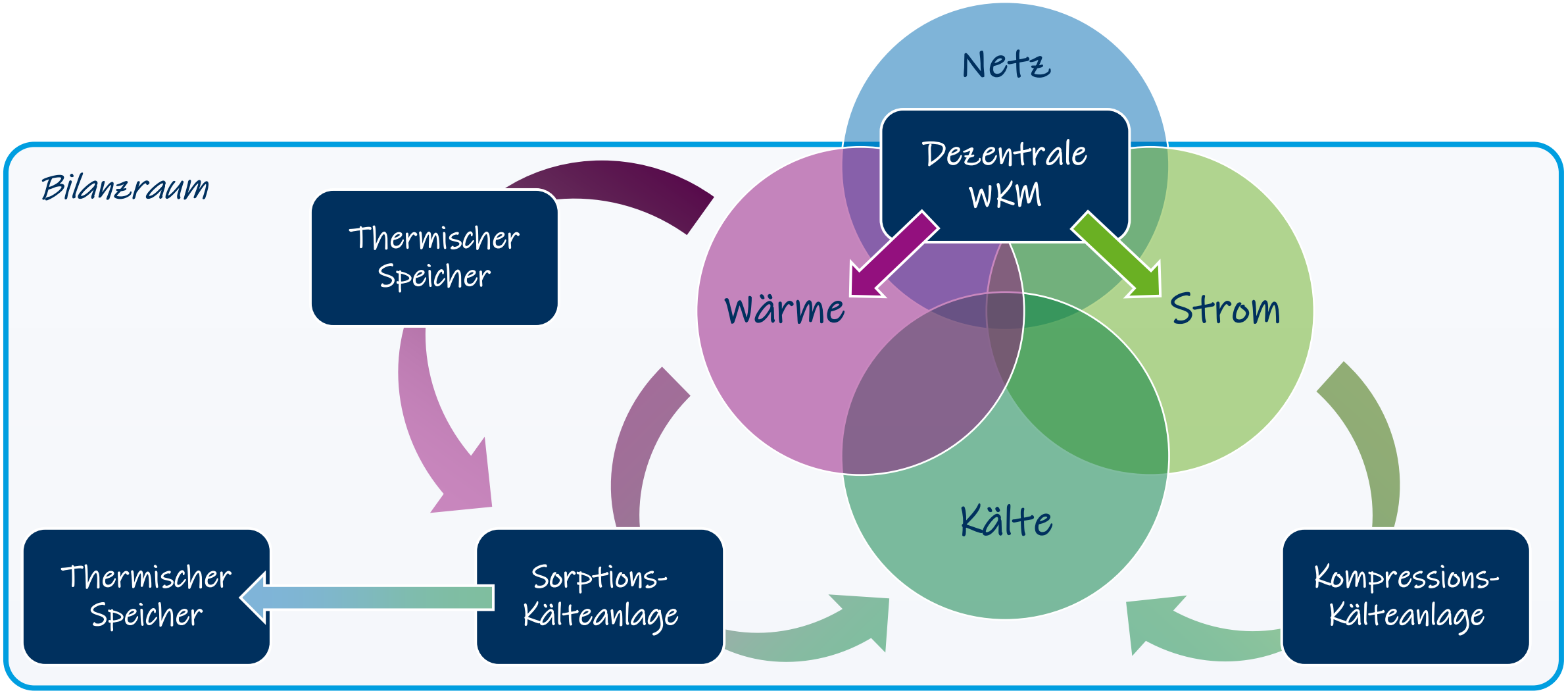


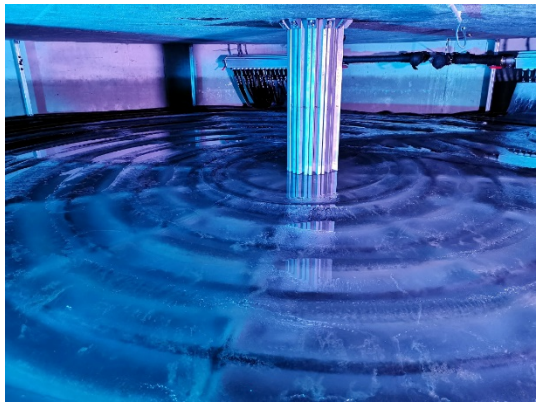

Strom
Netz
Anschluss
Wärme
Kälte

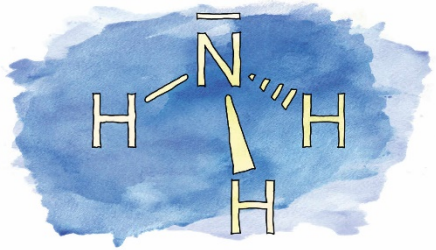

Leistung in kW
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Januar
Februar
März
April
Mai
Juni
Juli
August
September
Oktober
November
Dezember
Nennleistung BHKW
Minimalleistung BHKW
Heizbedarf
Abwärmepotential
Kühlbedarf

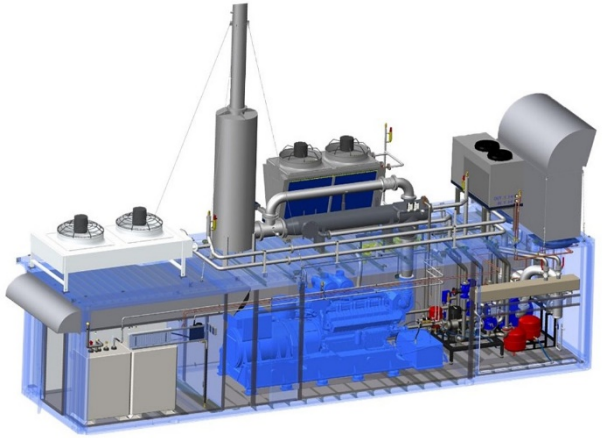

Strom
Netz
Anschluss
Wärme
Kälte


Netz
Anschluss
Wärme
Strom
Kälte

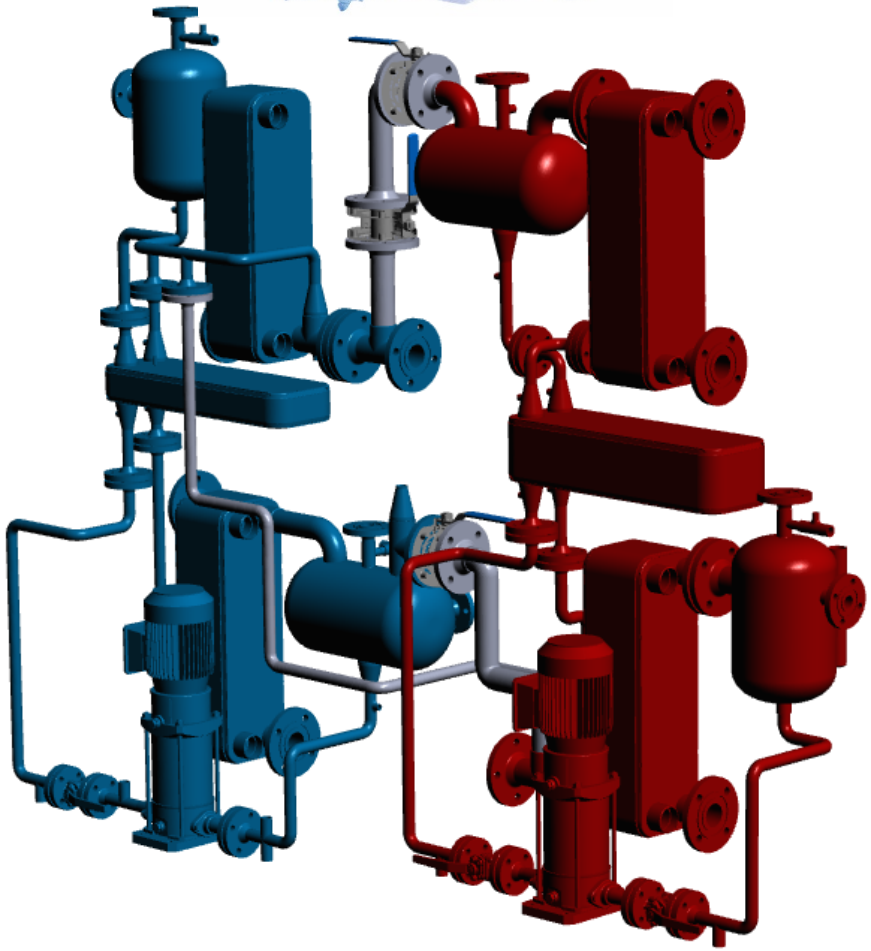

Netz
Dezentrale WKM
Bilanzraum
Thermischer Speicher
Wärme
Strom
Kälte
Thermischer Speicher
Sorptions-Kälteanlage
Kompressions-Kälteanlage

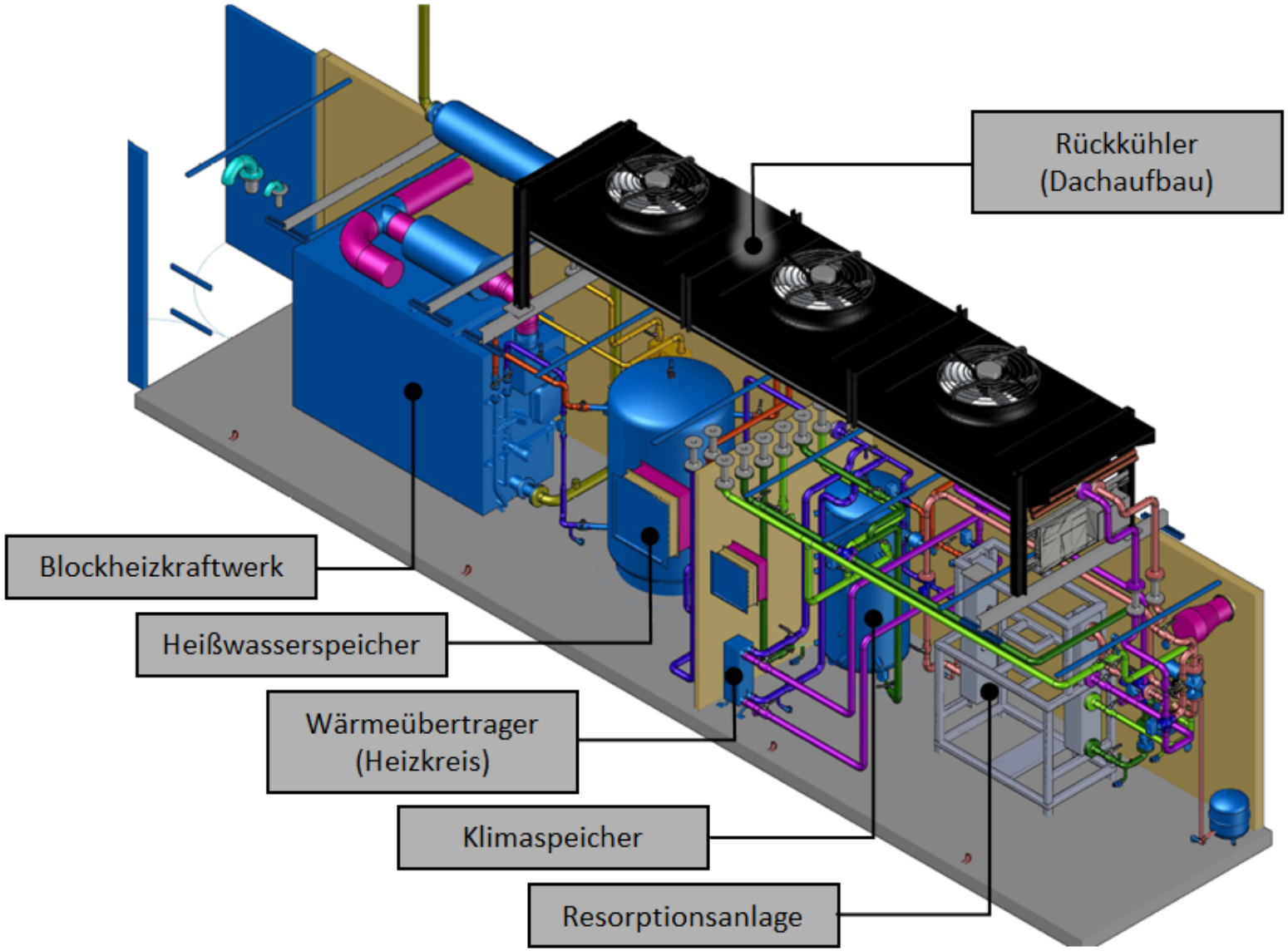




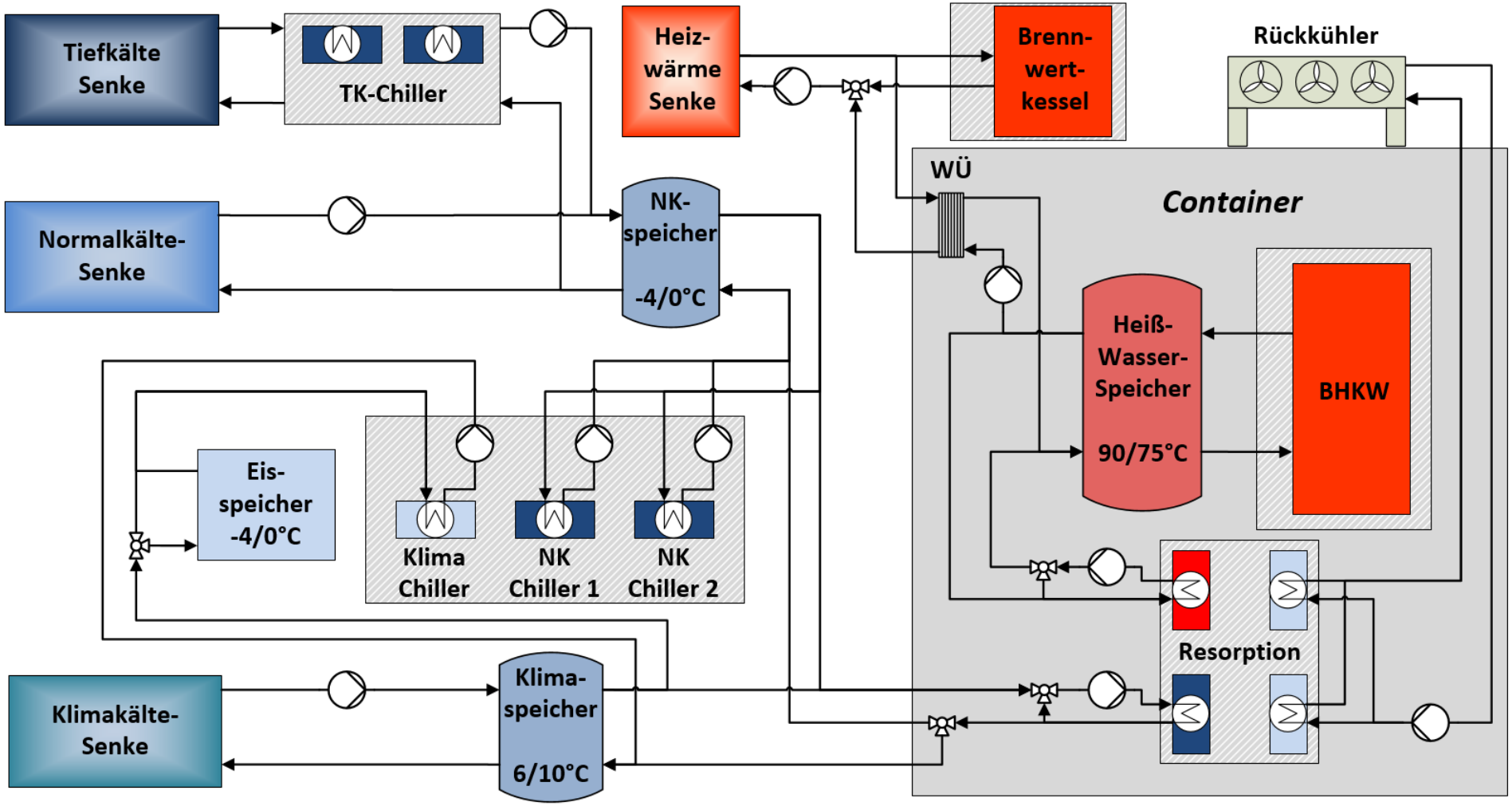


Resorptions-Kälteanlage

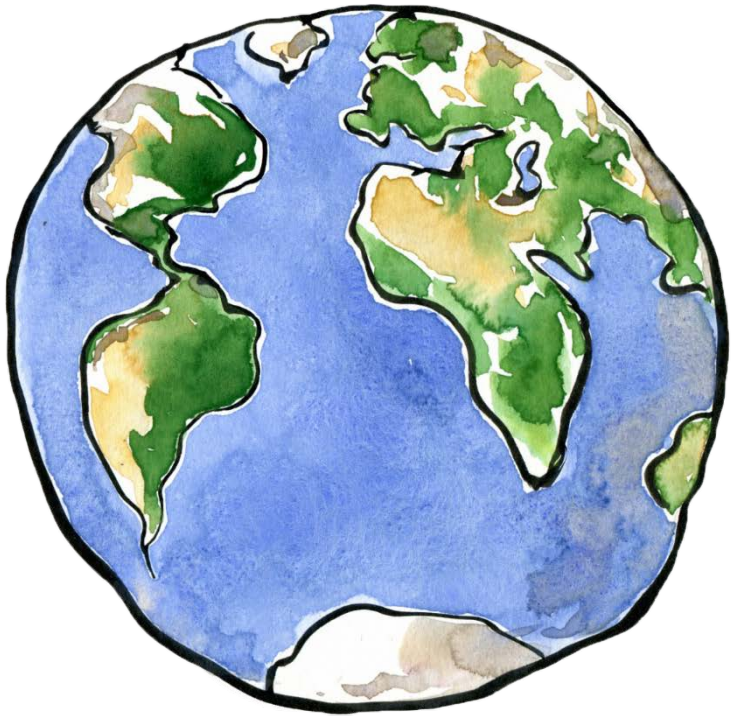



Rückkühler
(Dachaufbau)
Blockheizkraftwerk
Heißwasserspeicher
Wärmeübertrager
(Heizkreis)
Klimaspeicher
Resorptionsanlage

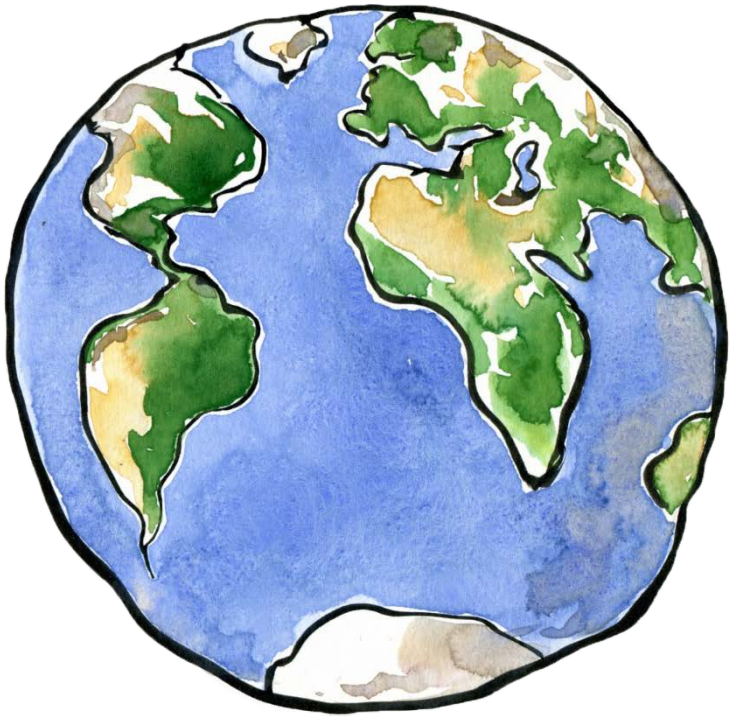
Kälte- & Wärmenetz eines Supermarktes

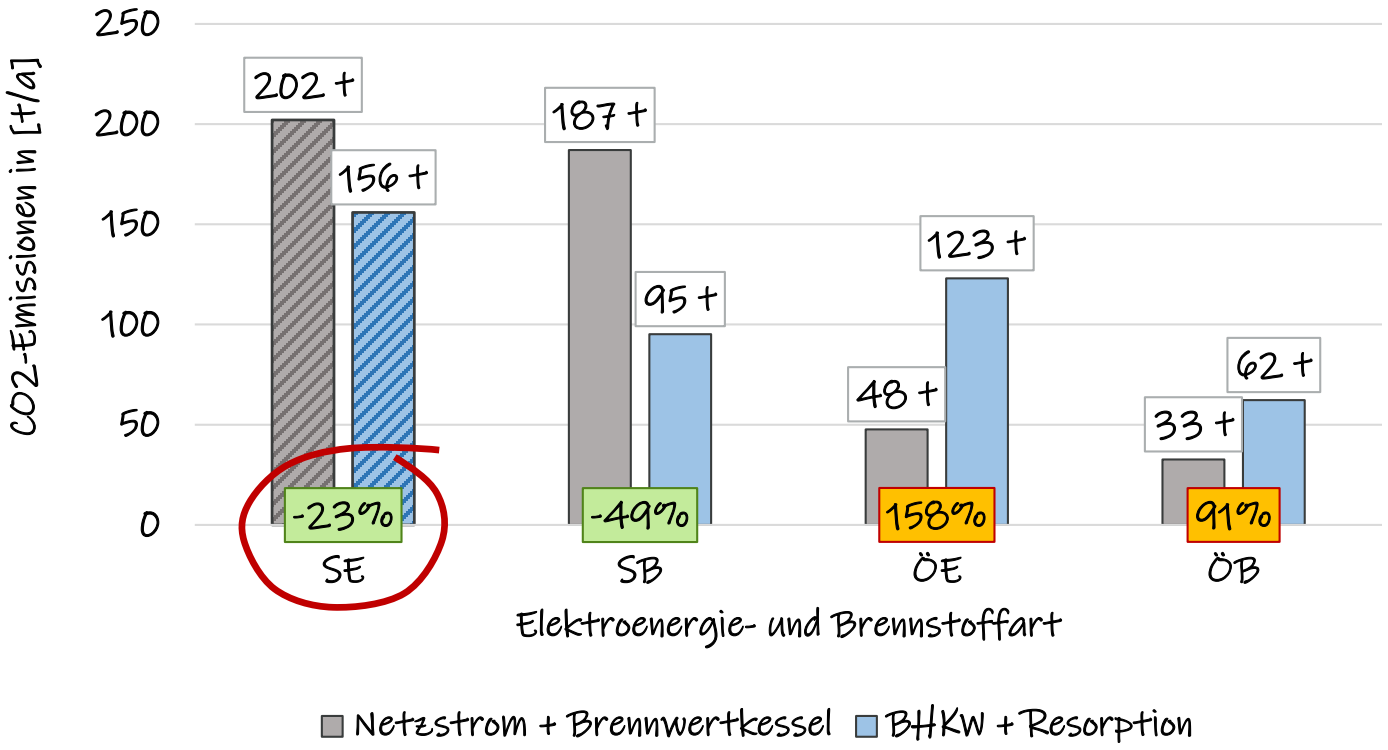


CO_2-Reduktion



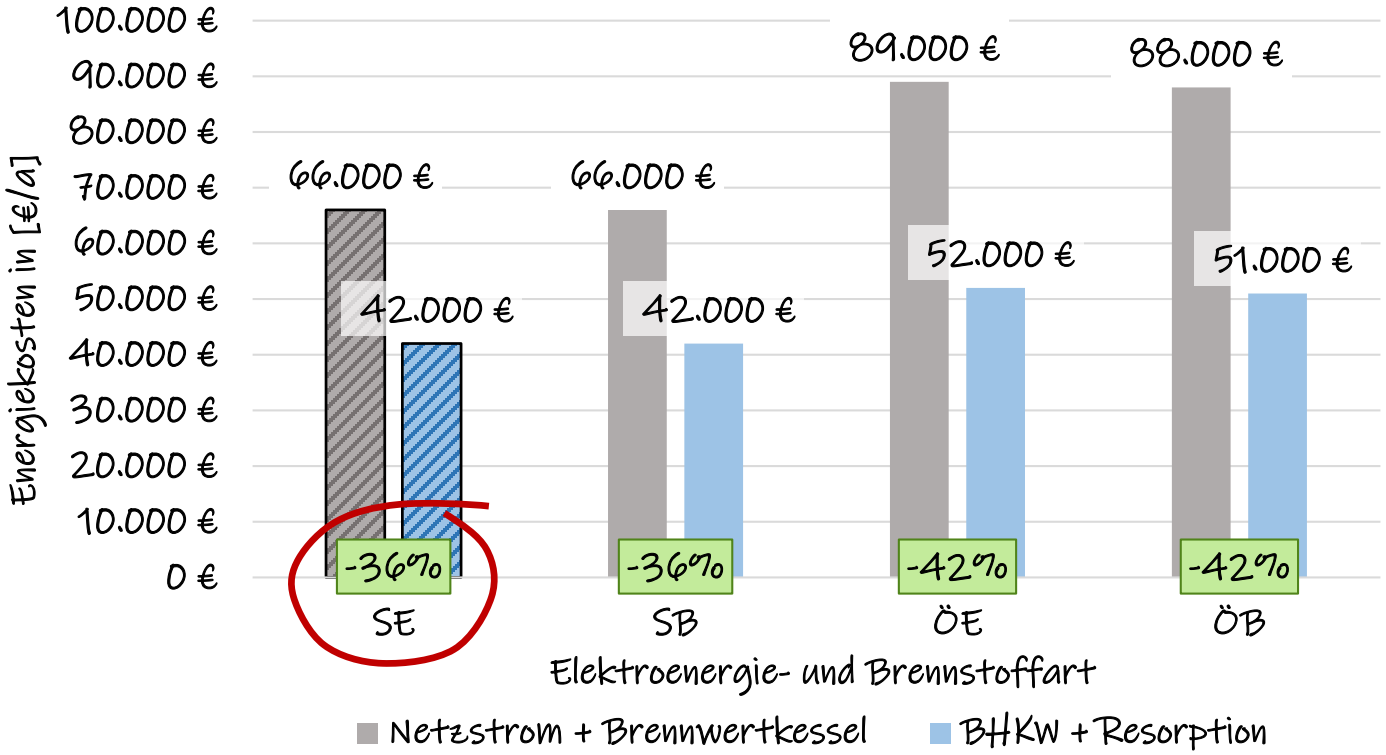
CO_2-Reduktion



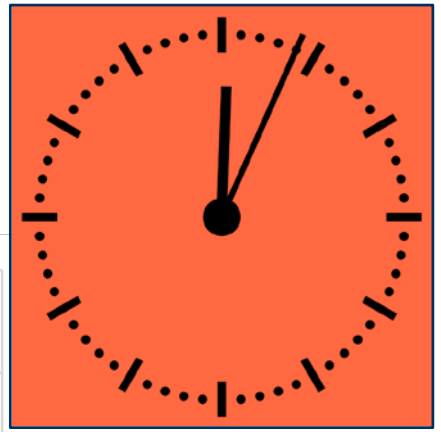


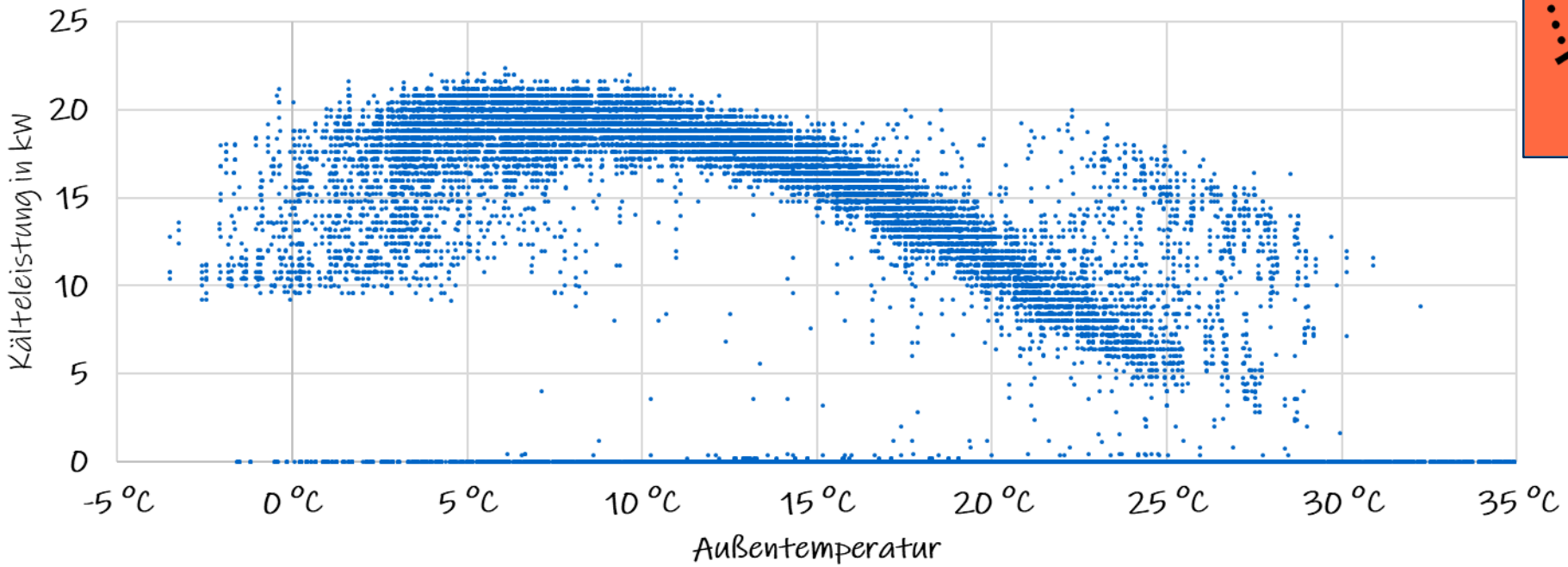
Betriebs- & Investkosten

Betriebs- & Investkosten



Betriebskennfeld der Resorptionskälteanlage





Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit