

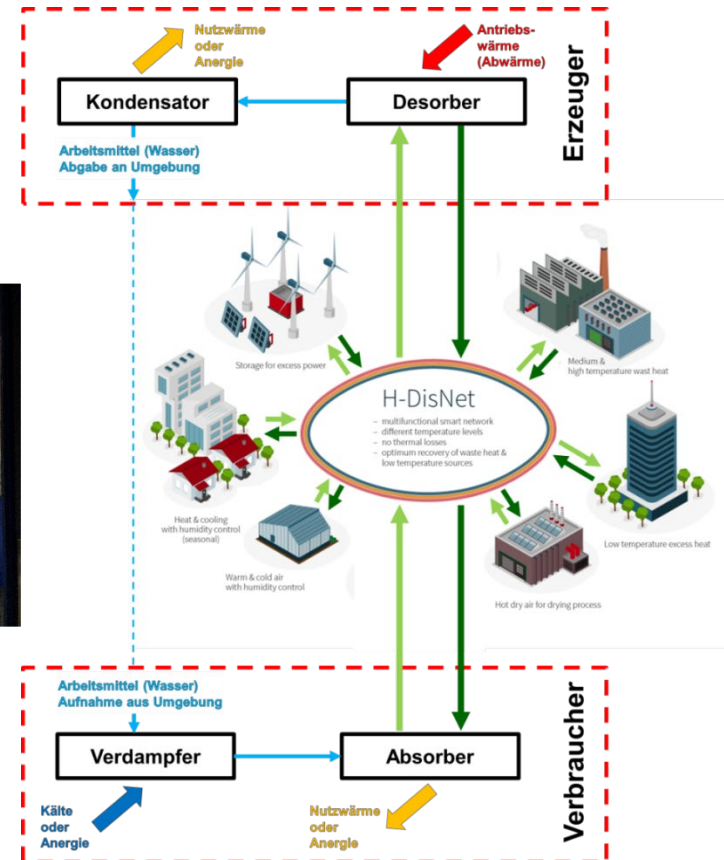
Thermochemische Netzwerke

Eine innovative Energieversorgungs- und Speicherlösung für
fluktuierende, regenerative Erzeugersysteme



Dr. Thomas Bergmann
www.iefe.zhaw.ch

Alpenforce-Energieforschungsgespräche
Disentis, 25. - 27. Januar 2023



Inhalt

- **Energie und Potential** - Warum es bei der Energieversorgung nicht vordergründig um Energie geht und wie die Qualität der Energie an die Bedürfnisse des Nutzers angepasst werden kann.
- **Thermochemisches Netzwerk** - Eine Wärmepumpe, deren Komponenten über weite Distanzen örtlich getrennt und zeitlich versetzt arbeiten.
- **Chemisches Potential von Elektrolytlösungen** - Wie Konzentrationsunterschiede von Salzlösungen zur Bereitstellung von Nutzenergie verwendet werden können.
- **Anwendungsbeispiele:**
 - Pflanztschklimateisierung im Gewächshaus
 - Raumklimateisierung
 - Trocknung von Kräutern

Energieerhaltungssatz

1841



Julius Robert Mayer

1847

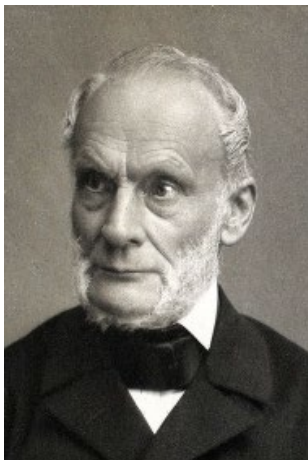


Hermann v. Helmholtz

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden
(1. Hauptsatz der Thermodynamik)

Die Qualität der Energie

1865



Rudolf Clausius

- Definition des Begriffes **Entropie** - eine wissenschaftliche Formulierung unserer Wahrnehmung von Zeit
- Die Änderung der Zustandsgrösse Entropie gibt an, in welcher zeitlichen Richtung Prozesse stattfinden können (2. Hauptsatz der Thermodynamik)
- Energieumwandlungs- und -transportprozesse streben immer ein natürliches Gleichgewicht an
- Entropie ist ein **Qualitätskriterium für Energie**

Um Energie zu bewegen (wandeln) bedarf es eines Ungleichgewichtes in der Natur - einem **Potentialunterschied**

Potentiale

... um mit Energie etwas anfangen zu können, bedarf es eines
"Potentialunterschiedes", d.h. eines "Ungleichgewichtes" in der Natur

- **elektrisches Potential** => Ladungsunterschied
- **thermisches Potential** => Temperaturunterschied
- **mechanisches Potential** => Druckunterschied
- **chemisches Potential** => Triebkraft für:



- das Ablaufen chemischer Reaktionen
- den Phasenwechsel (Änderung des Aggregatzustandes)
- Diffusion (Ausgleichsprozesse im Raum)

Wärmekraftwerk (Wärme-Kraft-Maschine)

Ein Thermischer Potentialunterschied ermöglicht die Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie



Heiss



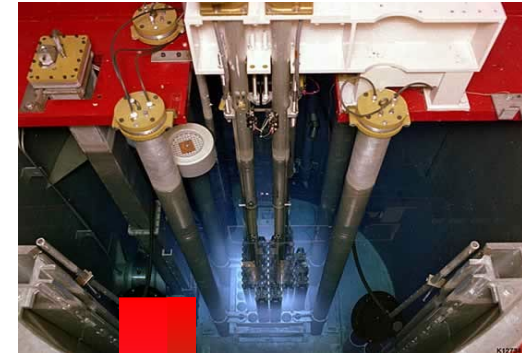
Wärme-
kraft-
Maschine



Strom



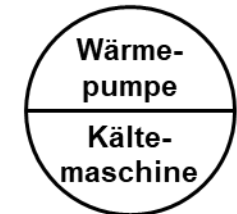
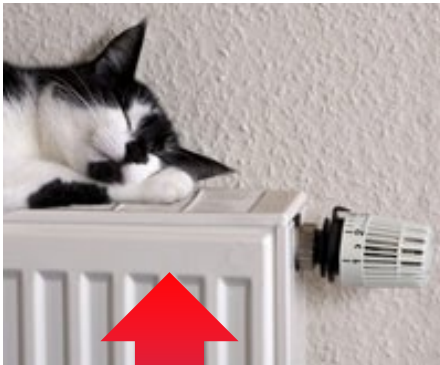
Kalt



Wärmepumpen

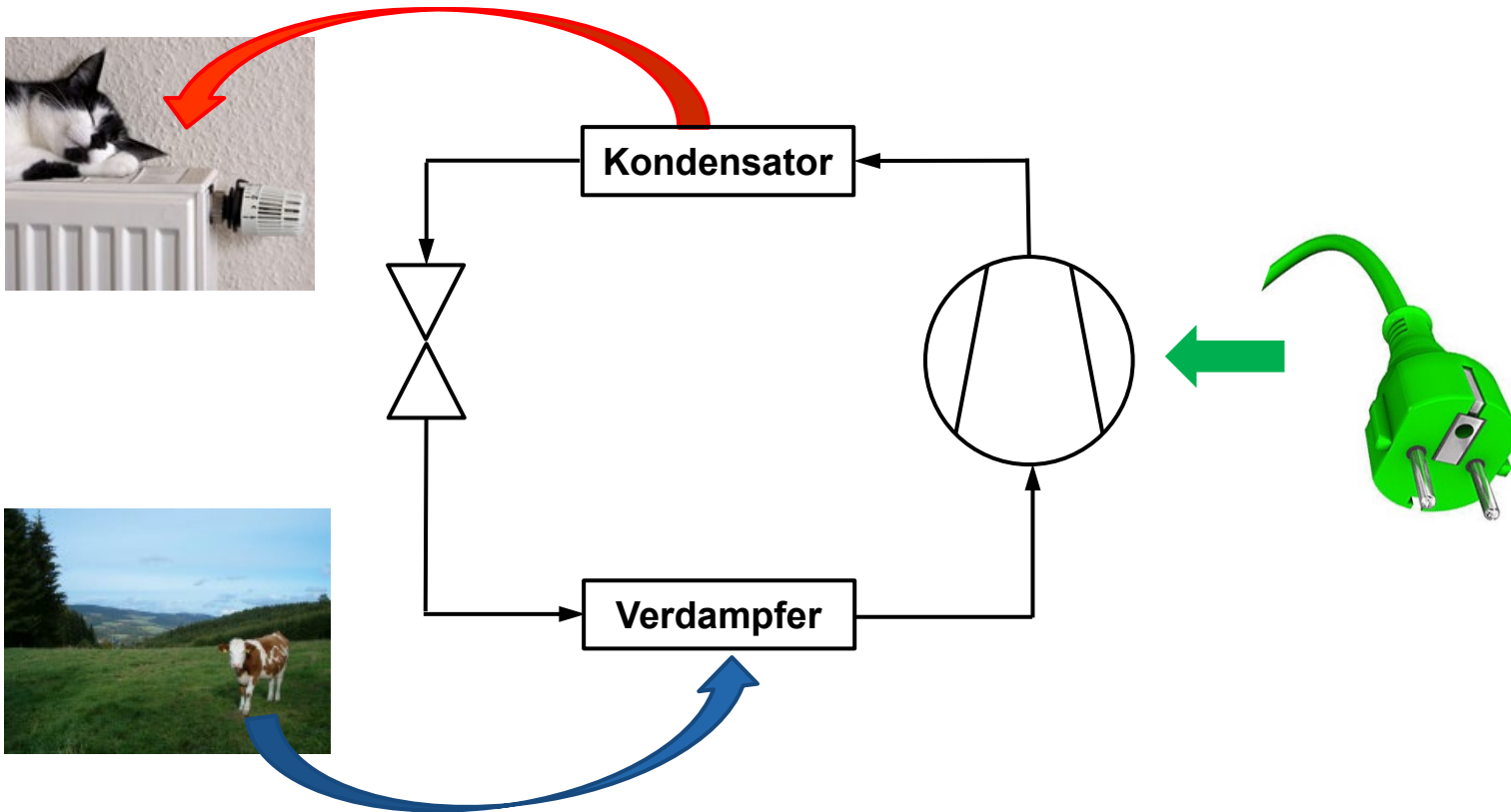
Wärmepumpe / Kältemaschine = Umkehrung eines Wärmekraftwerkes:

- Bewegung von Wärmeströmen entgegen ihrer natürlichen Richtung mit Hilfe einer mechanischen oder thermischen Antriebsleistung



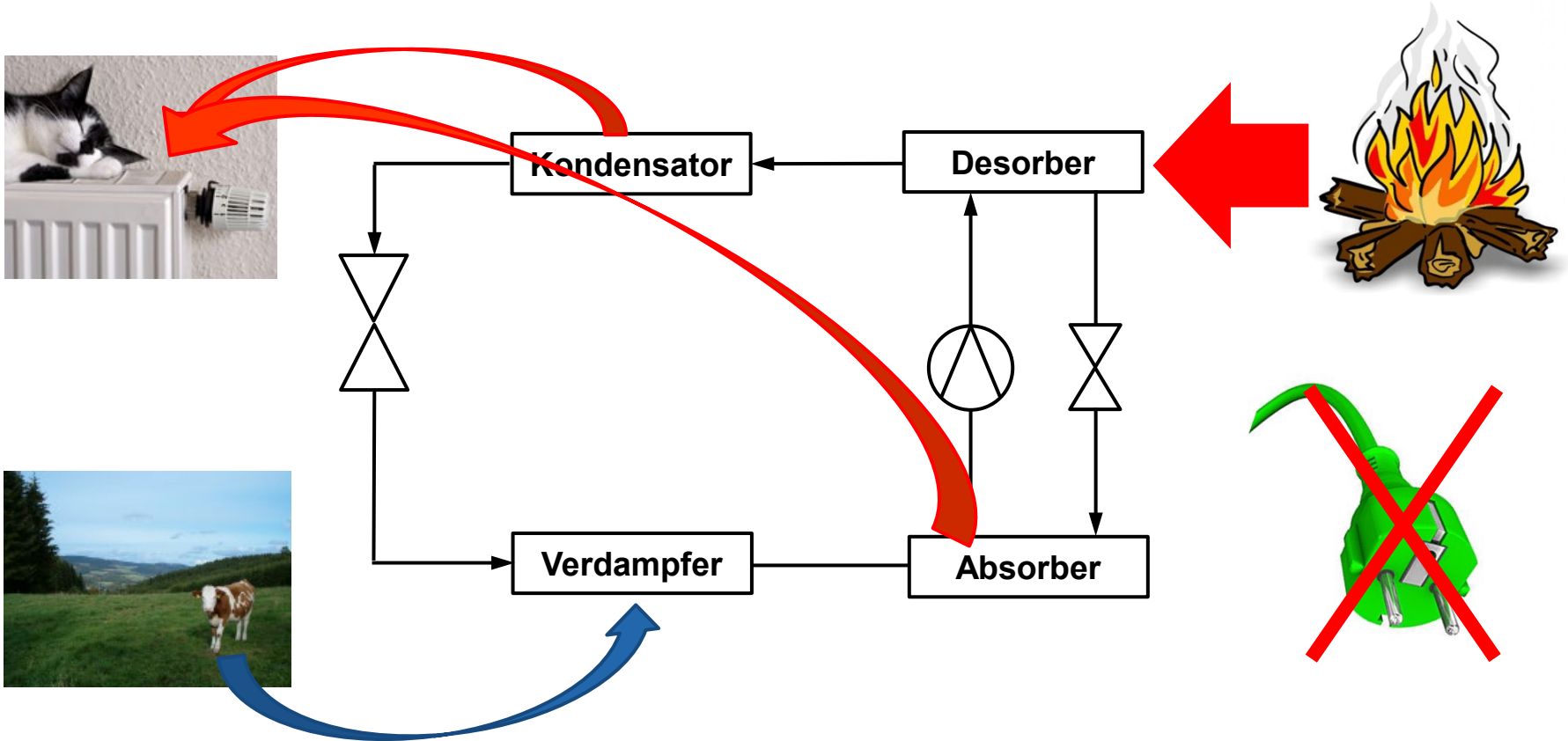
Wärmepumpen

Kompressionswärmepumpe => elektrische Antriebsleistung:



Wärmepumpen

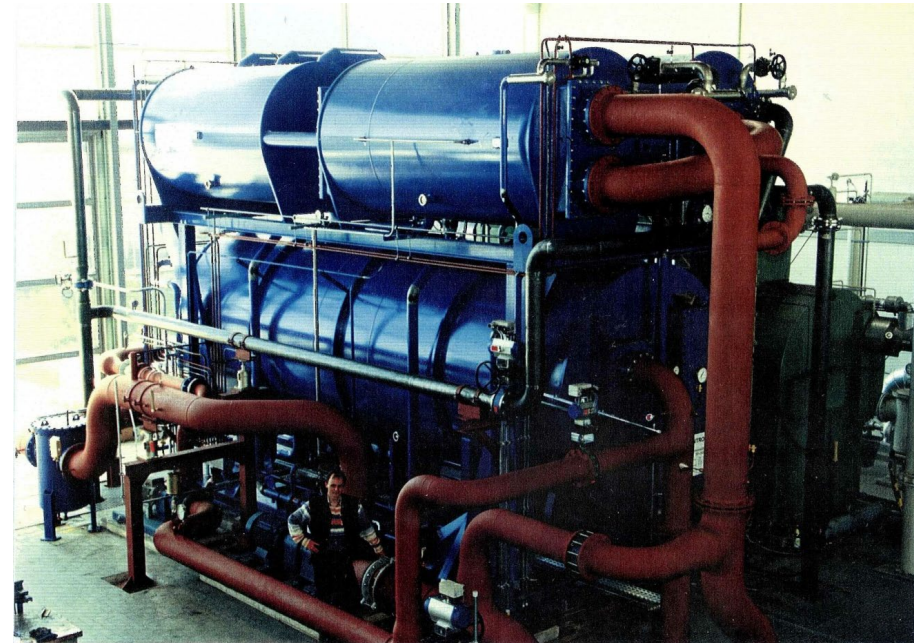
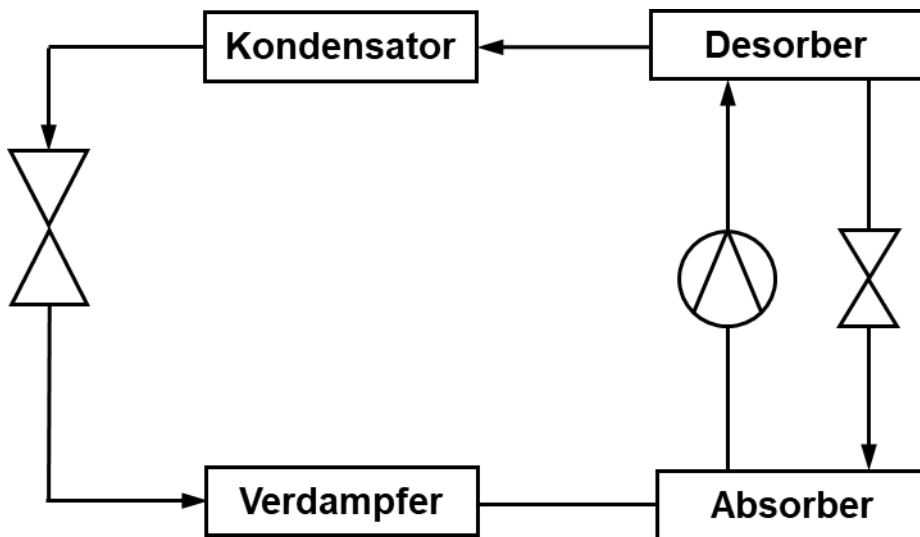
Absorptionswärmepumpe => thermische Antriebsleistung:



Wärmepumpen

Absorptionswärmepumpe / -kälteanlage als geschlossener Prozess:

- gesamter Prozess läuft in einer geschlossenen Anlage ab
- **Arbeitsmittel** (Absorbat): **Wasser**
- **Absorptionsmittel** (Absorbens): **hygroscopische** (wasseranziehende) **Salzlösung**

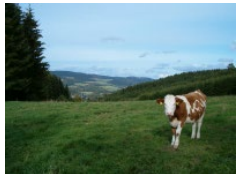


Absorptionskälteanlage Flughafen München

Thermochemische Netze

Auftrennung des Absorptionswärmepumpenprozesses:

=> zeitlich und örtlich variabler Nutzwärmegenerations- und Regenerationszyklus



Nutzwärme (niedrige Temperatur)
oder Abwärme

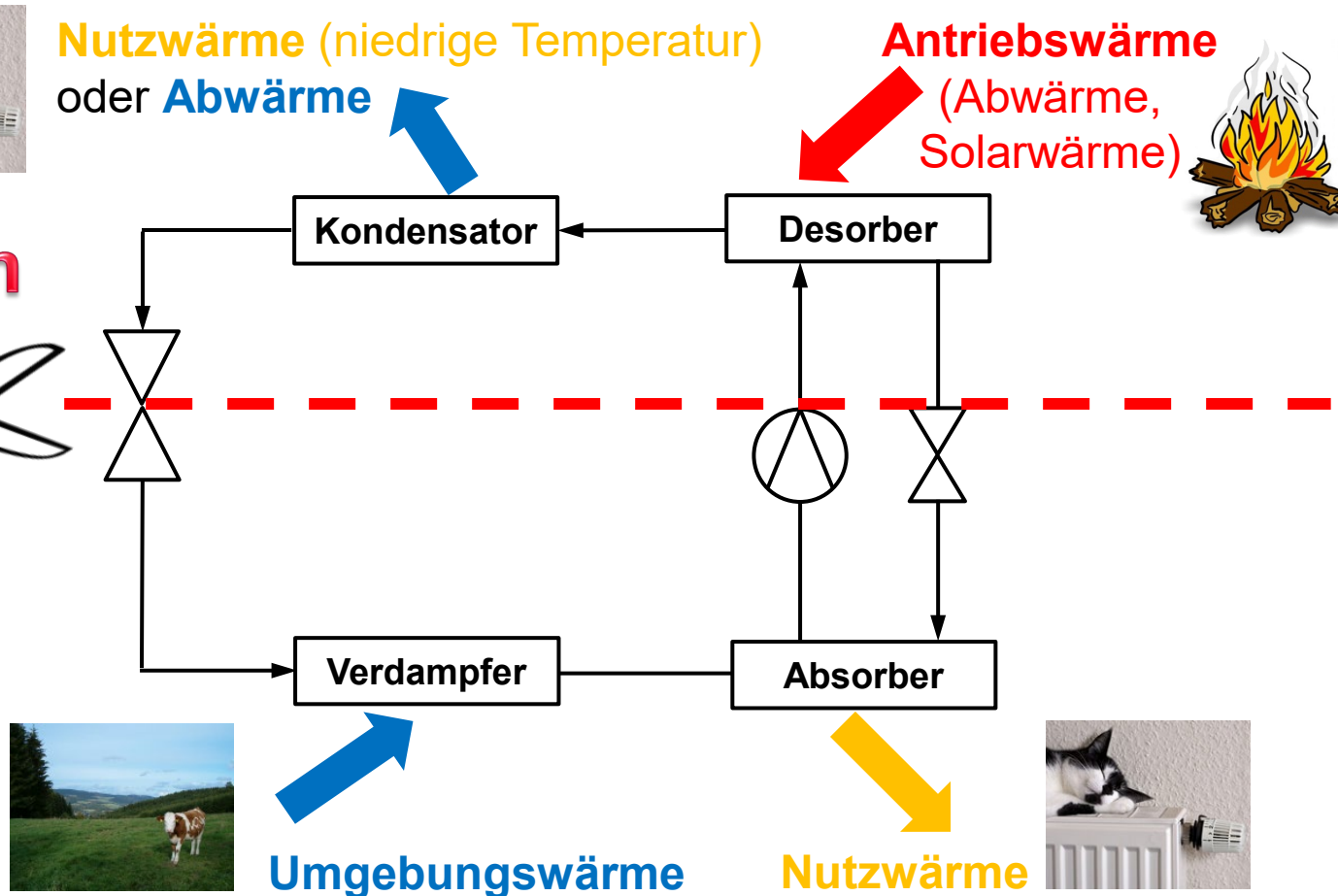
Antriebswärme
(Abwärme, Solarwärme)



Regeneration



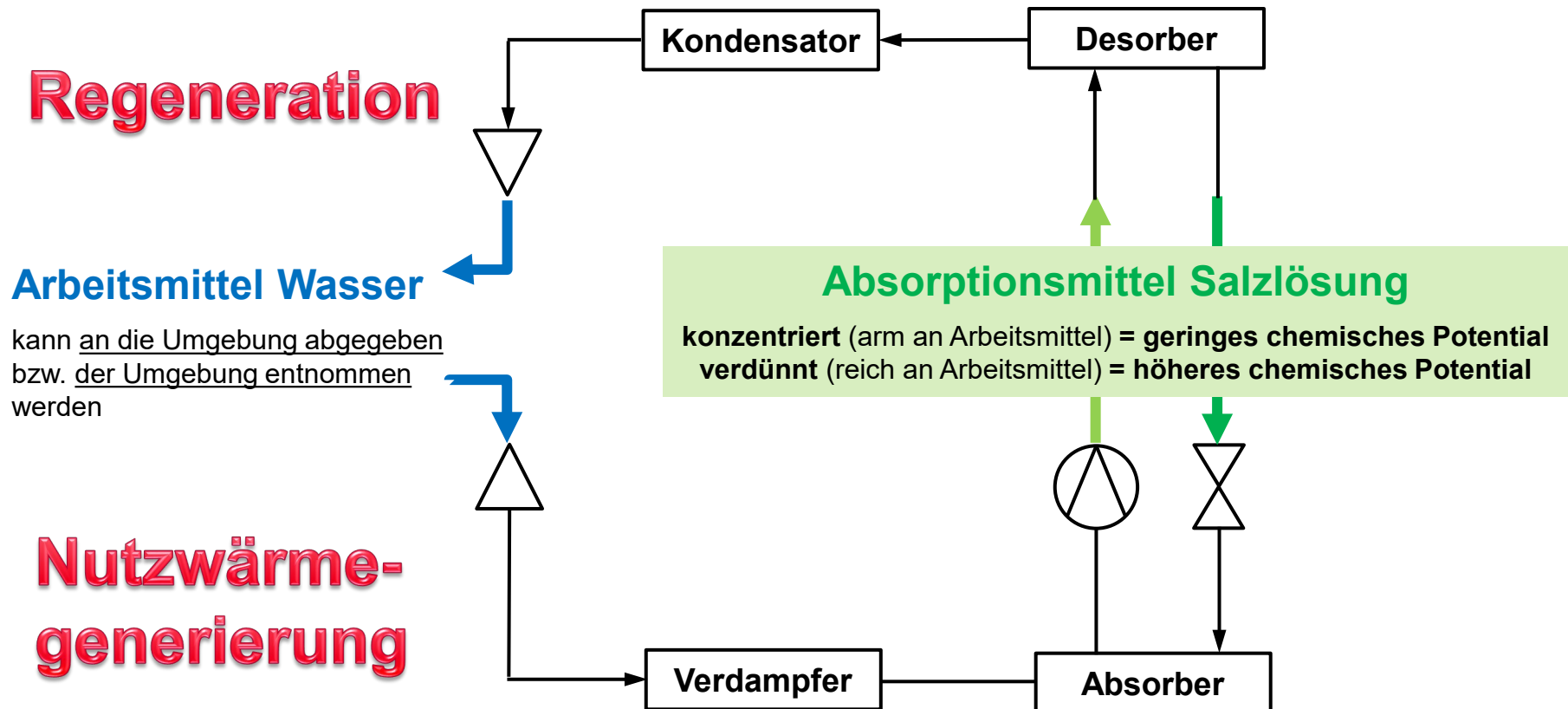
Nutzwärme-
generierung



Thermochemische Netze

Transport und Speicherung eines chemischen Potentials im Absorptionsmittel

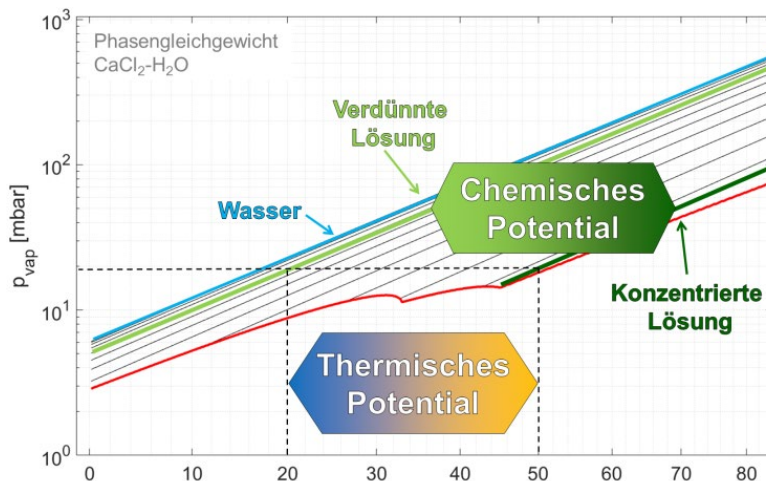
=> Vermögen, aus nicht nutzbarer Energie, wie Umgebungs- bzw. Abwärme, durch anheben (Heizen) oder absenken (Kühlen) des Temperaturniveaus, Nutzenergie zu generieren



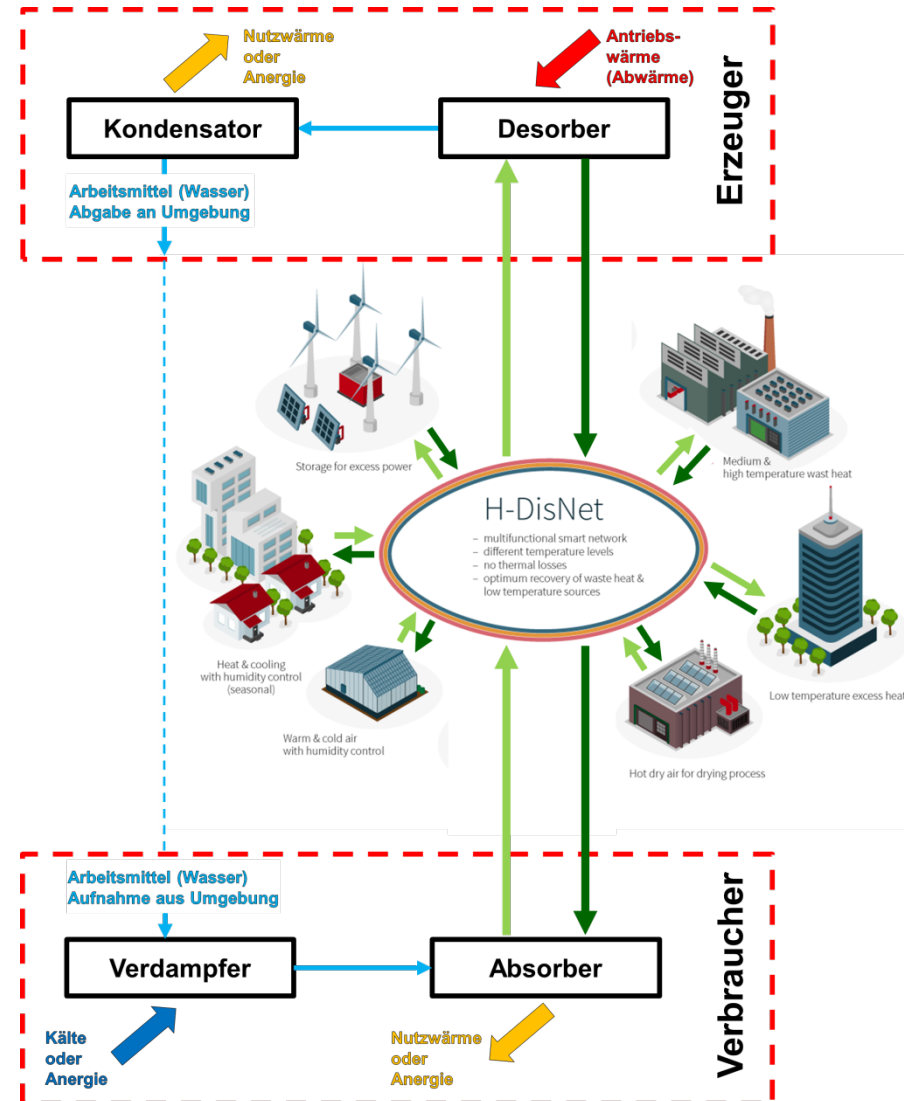
Thermochemisches Netzwerk

Transport von gespeichertem thermischen bzw. chemischen Potential in Form von konzentrierten Salzlösungen, mit dem am Ort des Wärmebedarfes Nutzwärme produziert werden kann

- hohe "Energiedichte"
- geringe Investitionskosten
- verlustlose Langzeitspeicherung

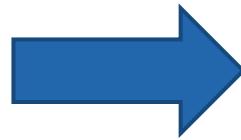


Veranschaulichung von thermischem und chemischem Potential im Dampfdruckdiagramm

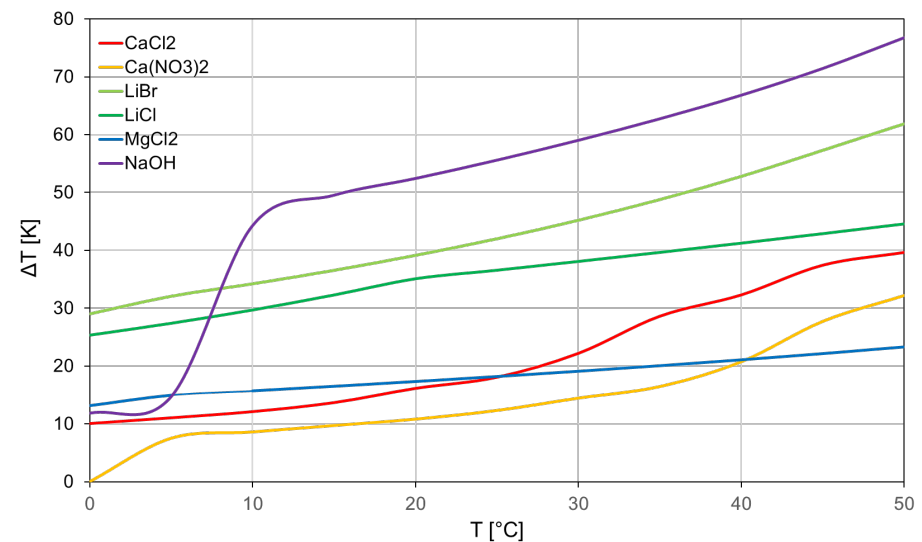
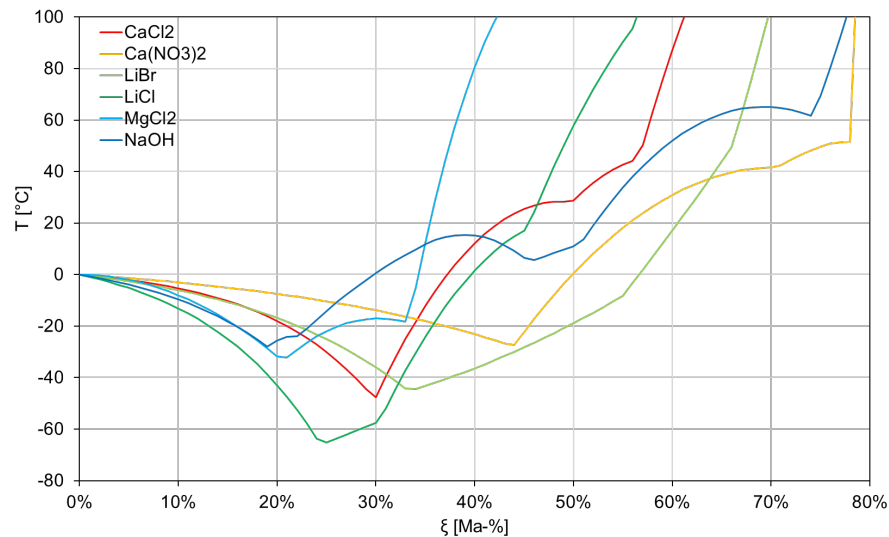


Potential von Elektrolyten

Löslichkeit der Elektrolyte
(max. Konzentration) ist
temperaturabhängig

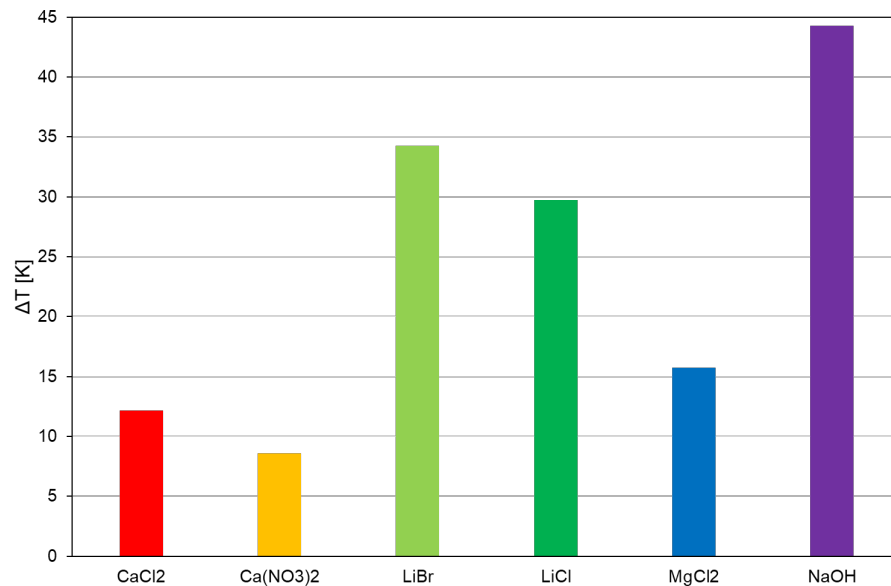


Erzielbarer Temperaturhub ist
von der Lager- und Transport-
temperatur abhängig



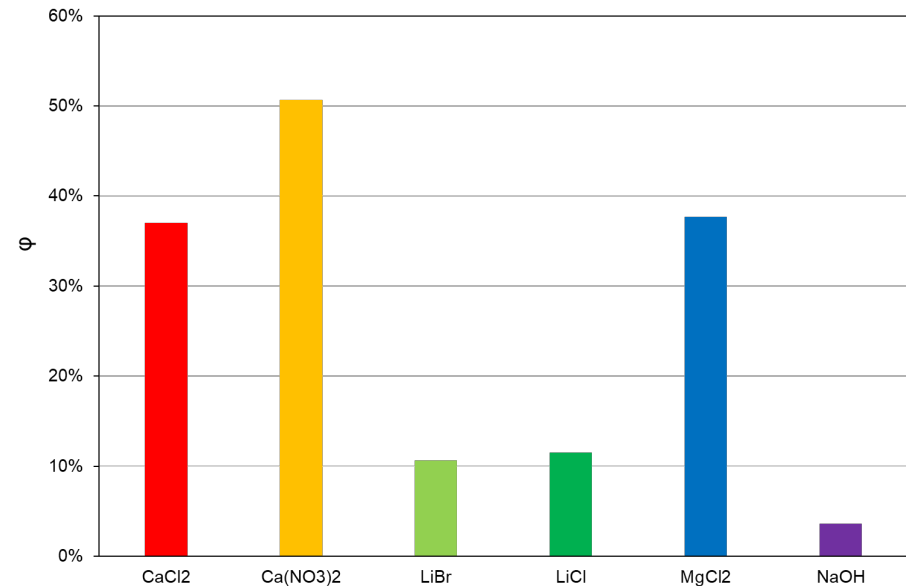
Potential von Elektrolyten

Erzielbarer Temperaturhub (Lagertemperatur: 10°C)



Erzielbare Luftentfeuchtung

(Lagertemperatur: 10°C, Lufttemperatur 25°C)



Potential von Elektrolyten

Exergie-Speicherkapazität

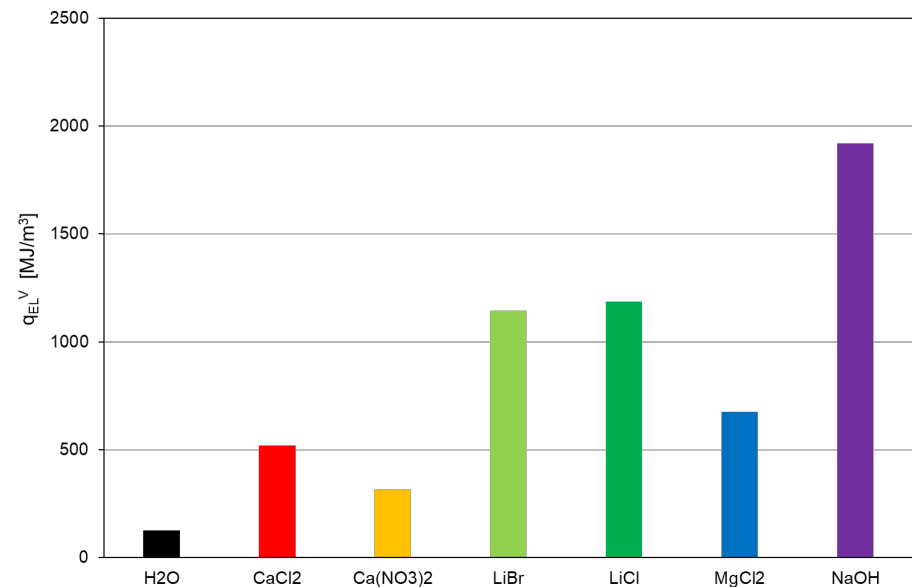
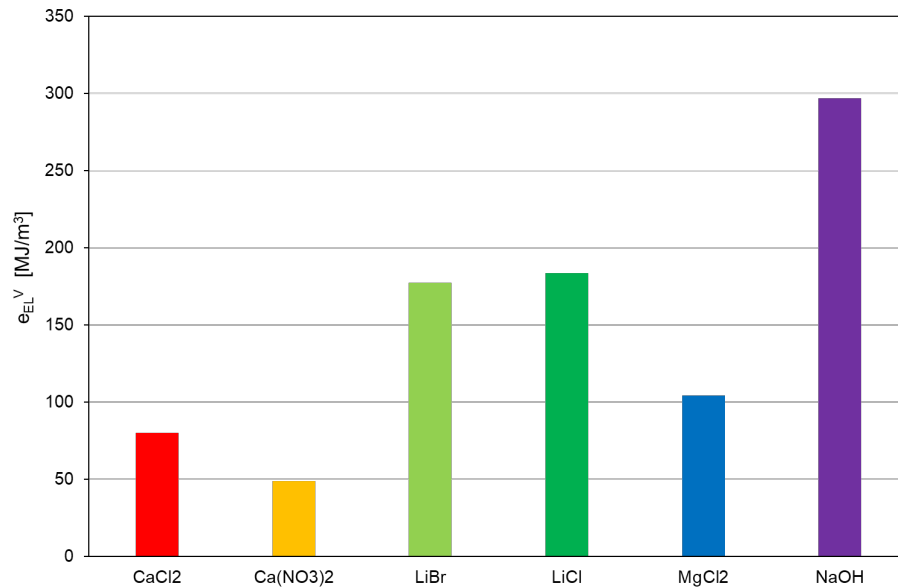
(bei 40°C, Umgebungstemperatur: 10°C)



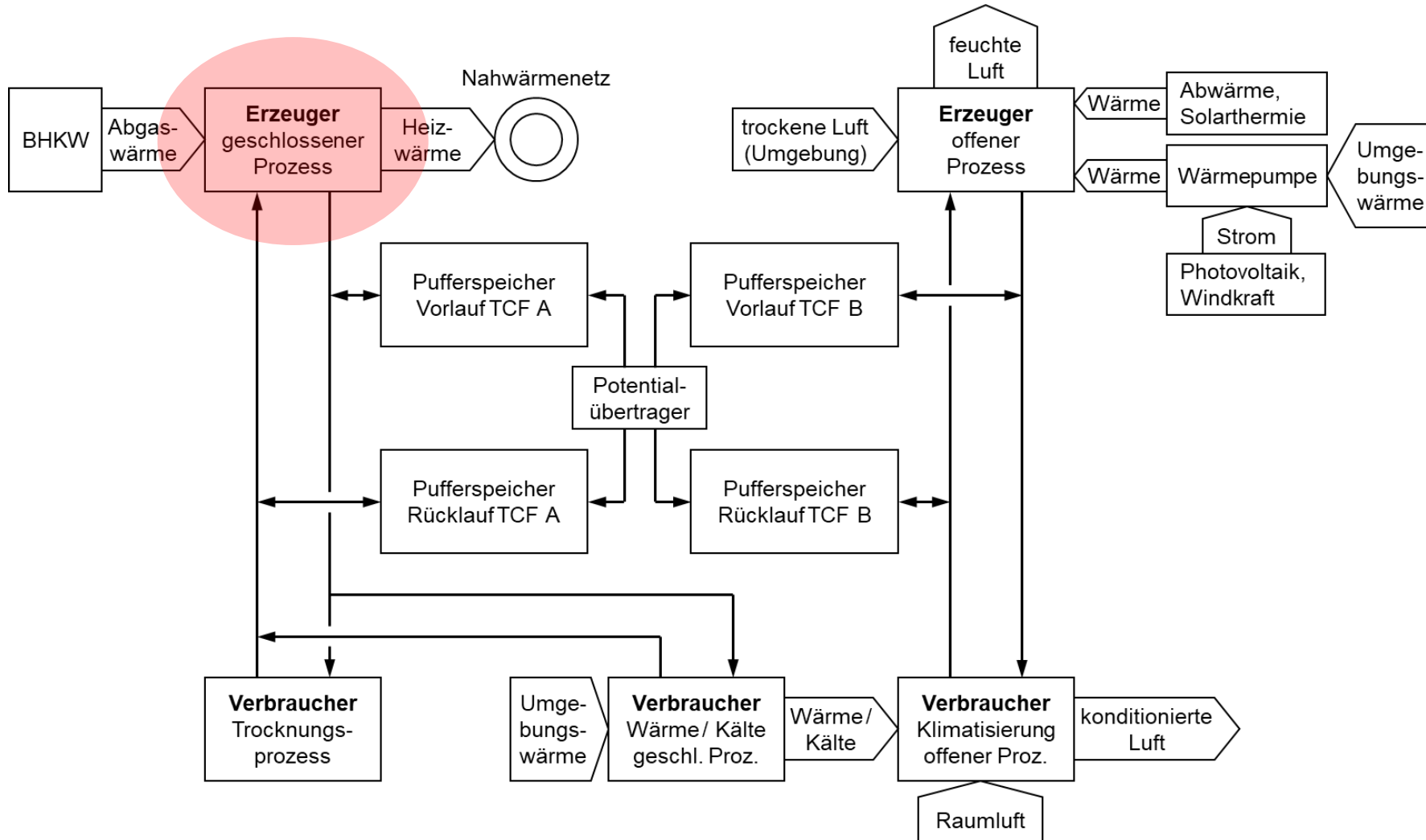
Energiespeicherdichte

Aus Umgebungswärme von 10°C erzeugbare
Heizwärme bei 40°C

Vergleich: Speicherkapazität von Wasser
(10°C / 40°C)

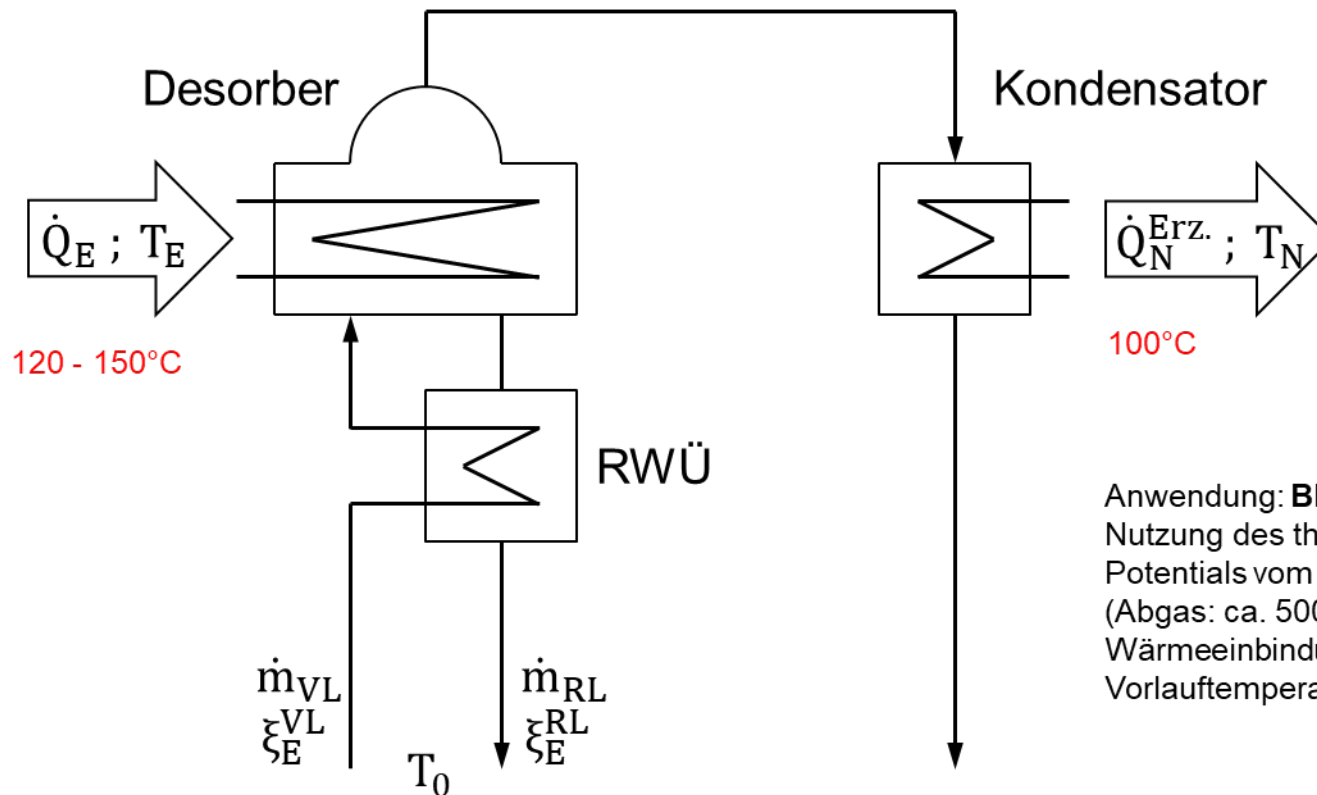


Thermochemisches Netzwerk (Beispiel)



Erzeuger (geschlossener Prozess)

$$p = p_0$$



Anwendung: **BHKW**
Nutzung des thermischen
Potentials vom Abgas
(Abgas: ca. 500°C,
Wärmeeinbindung:
Vorlauftemperatur 90°C)

Regeneration an HTBWT-Anlagen

Hochtemperatur-Brennwerttechnik an zwei
BHKW-Anlagen, Sporthochschule Köln:



FWL: 2 x 970 kW

**Wärmegewinn:
115 – 155 kW**

Oktober 2004

Hochtemperatur-Brennwerttechnik
am HKW Berlin-Buch:

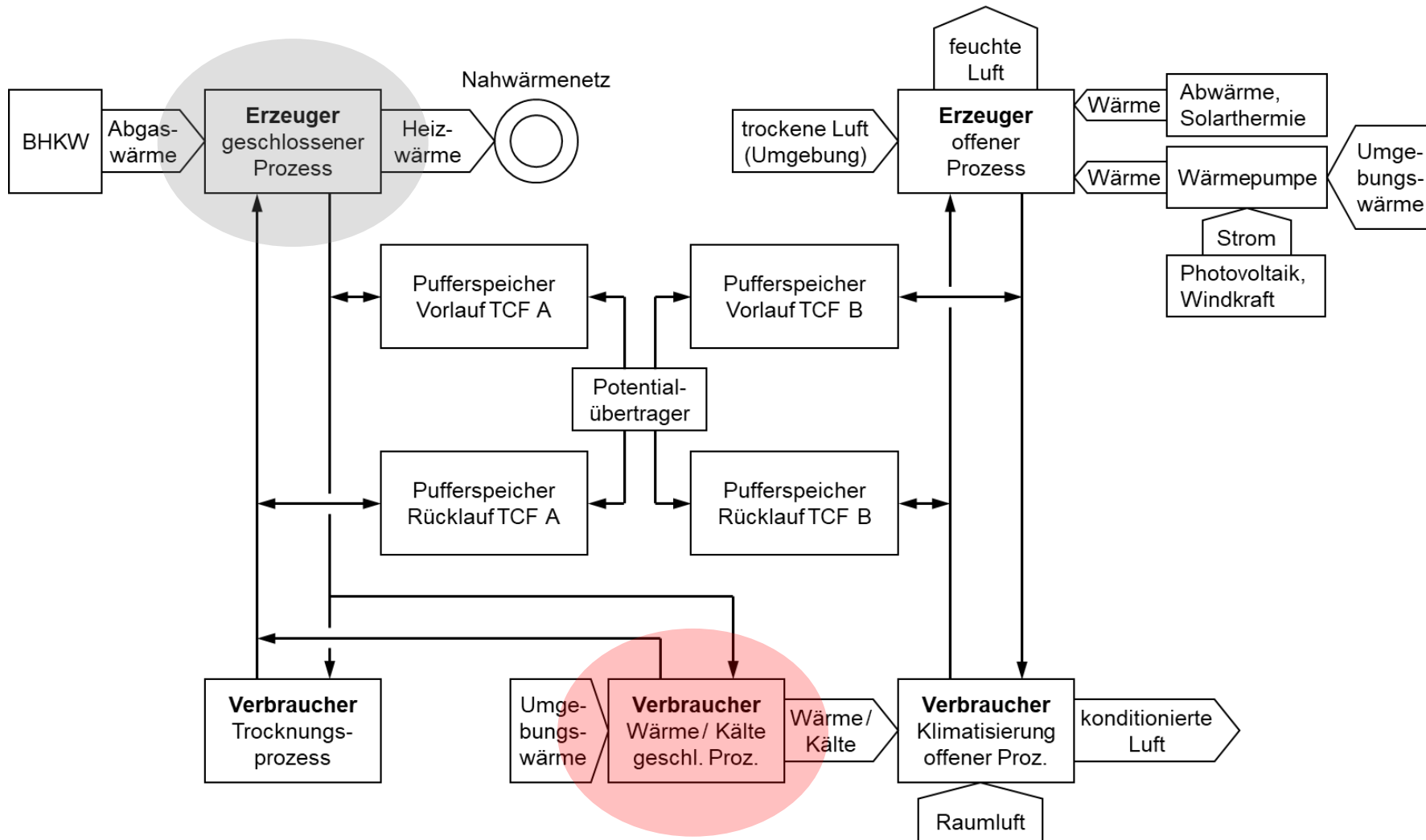


FWL: 4.4 MW

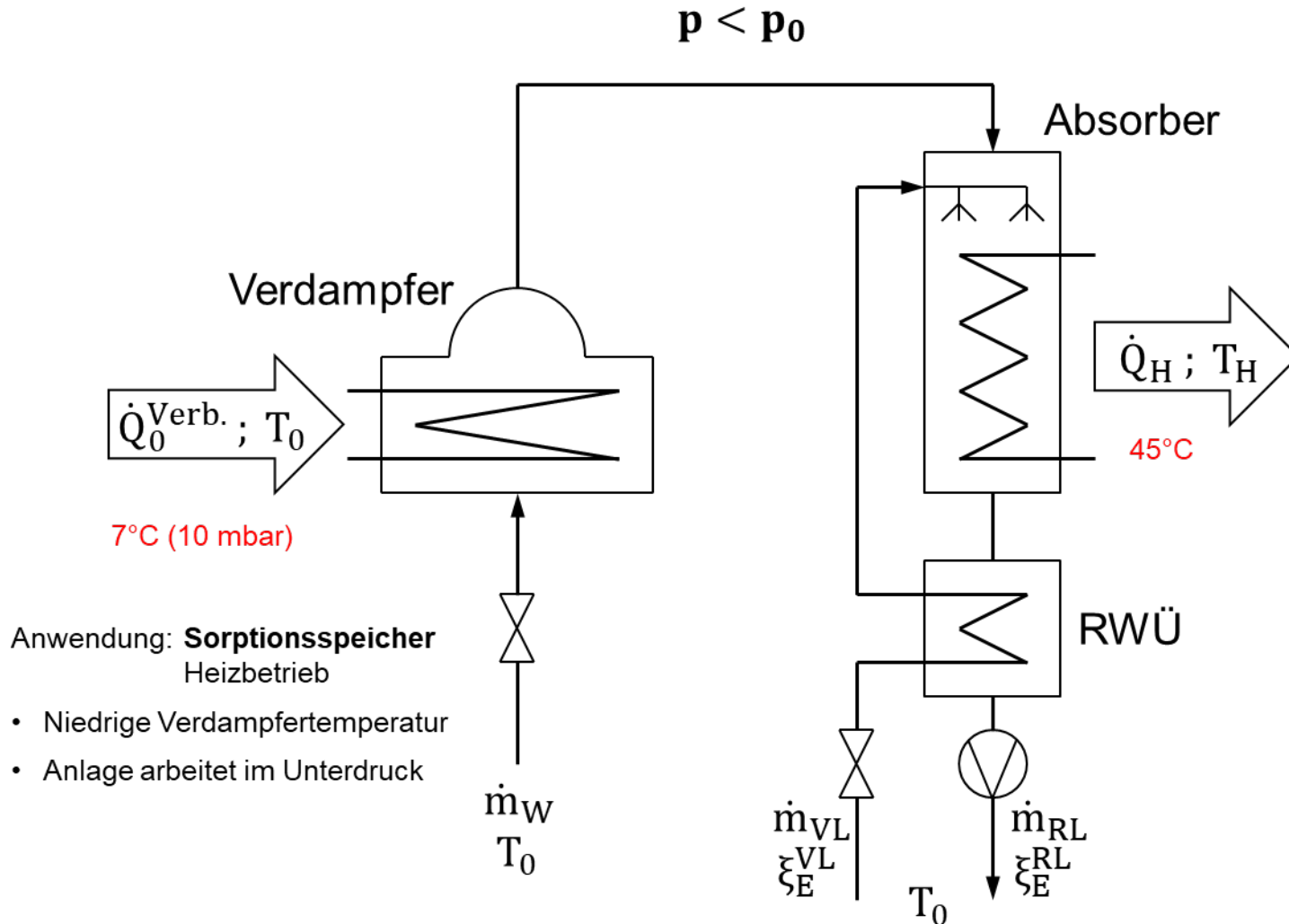
**Wärmegewinn:
310 - 480 kW**

Dezember 2006

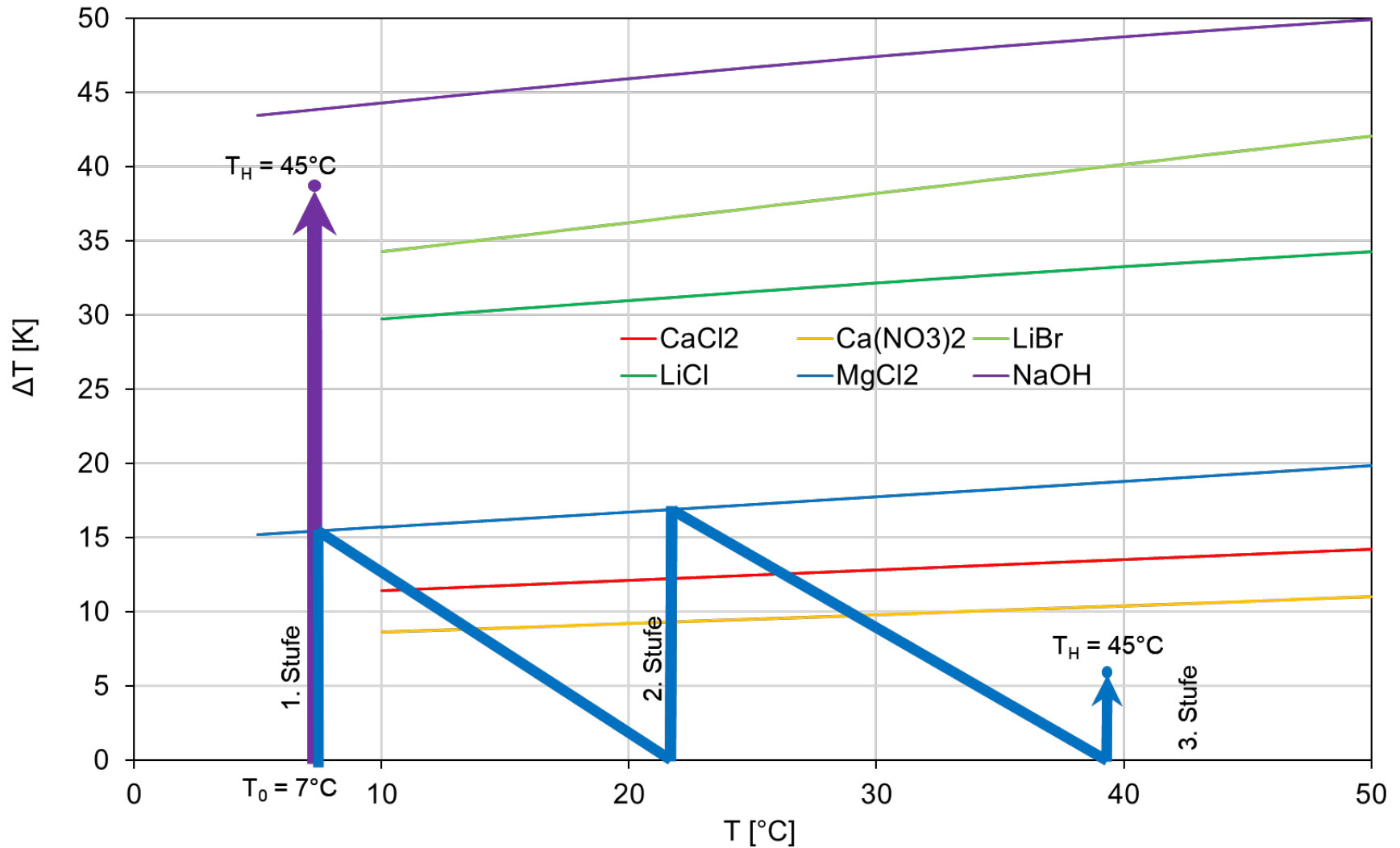
Thermochemisches Netzwerk (Beispiel)



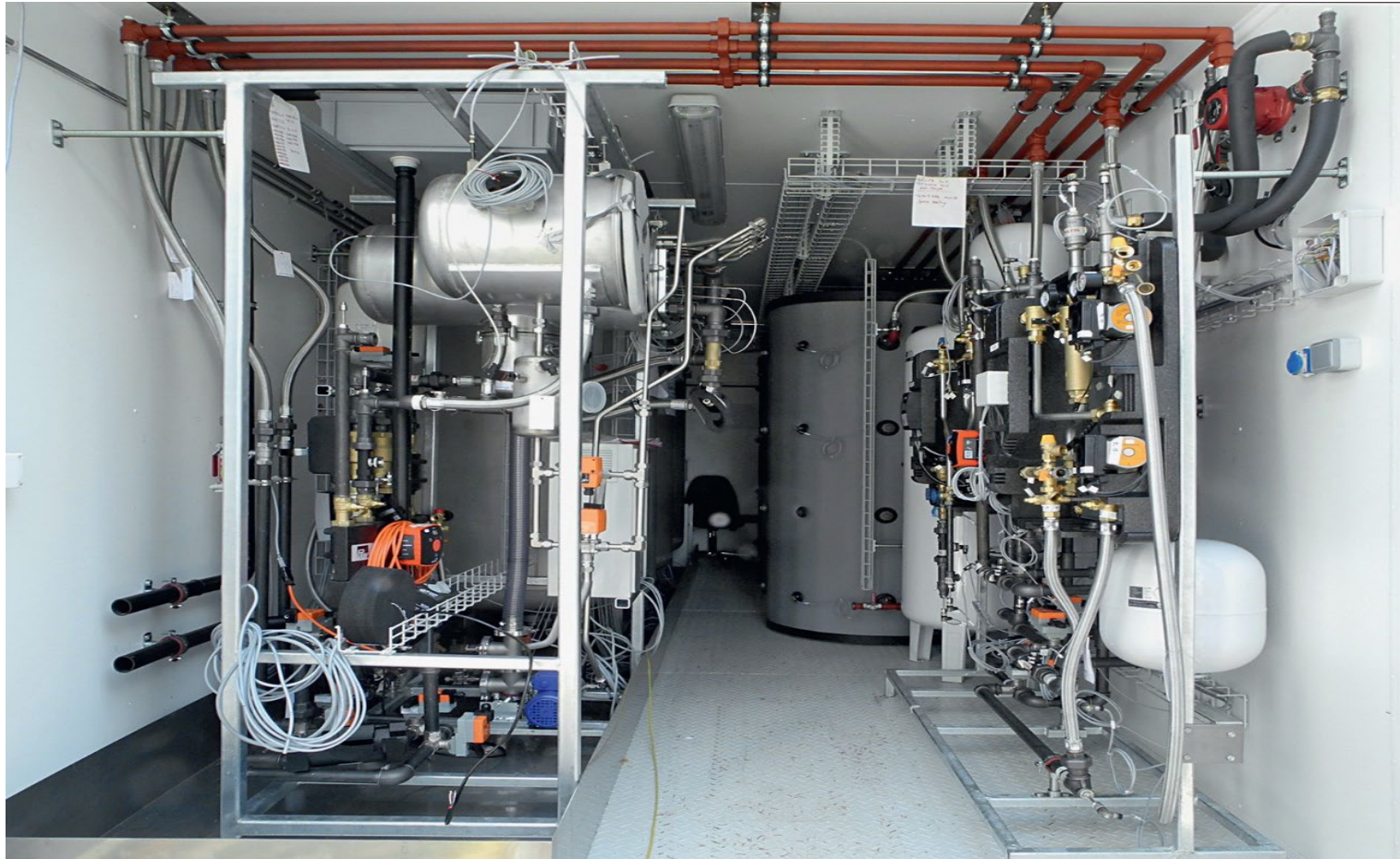
Verbraucher: Heizen (geschl. Prozess)



Heizen

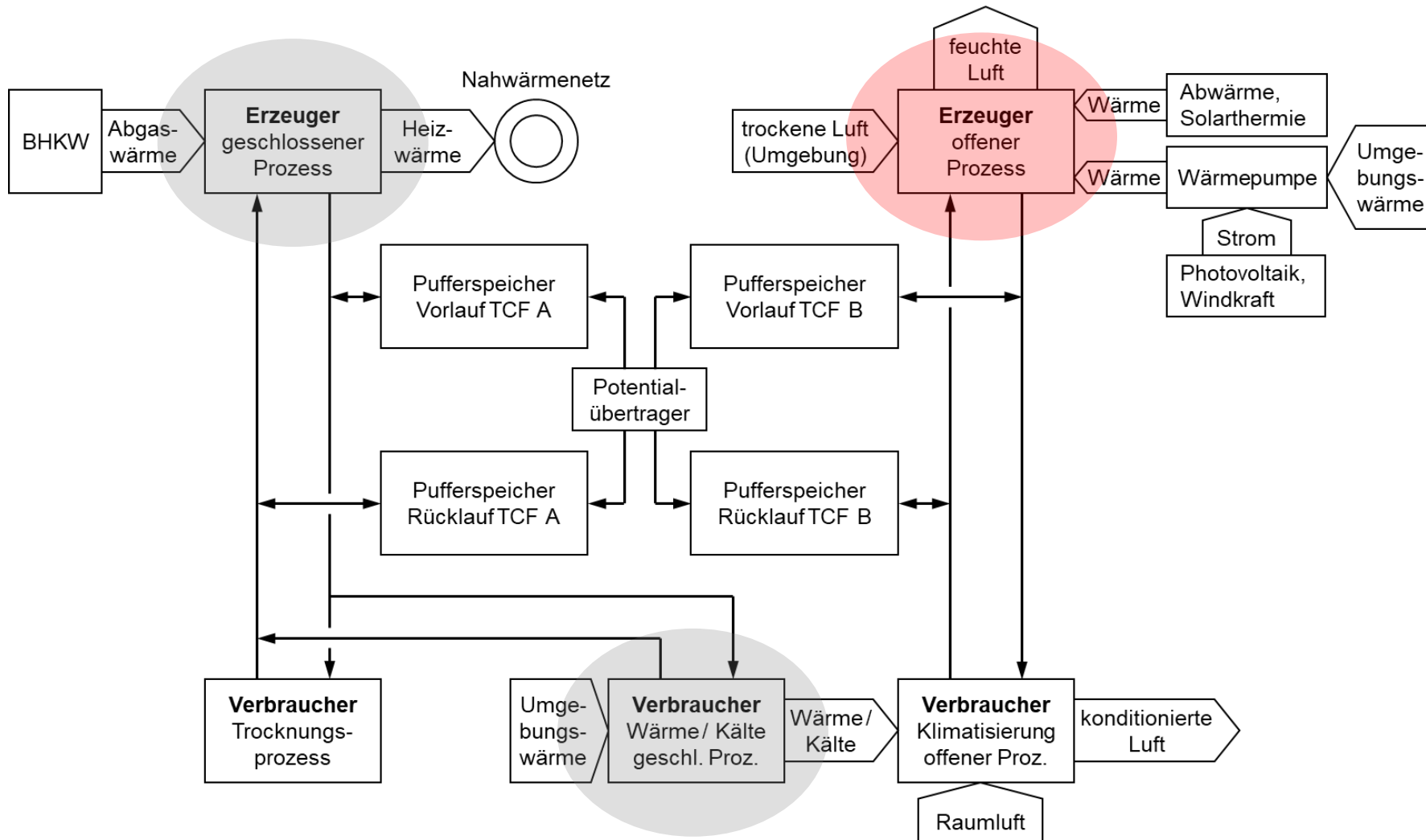


Natronlaugespeicher - EMPA

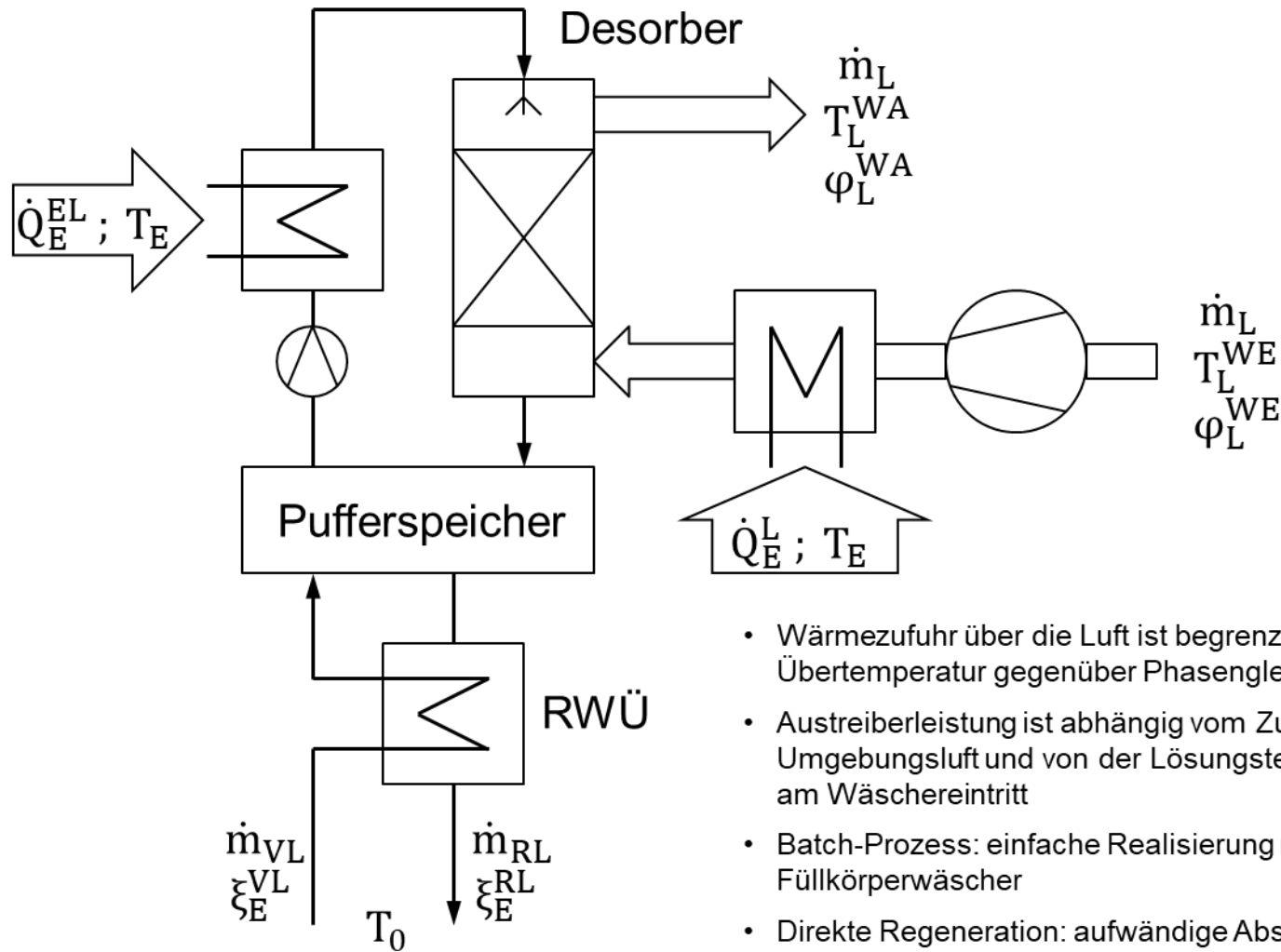


<https://www.empa.ch/de/web/s604/naoh-heat-storage>

Thermochemisches Netzwerk (Beispiel)

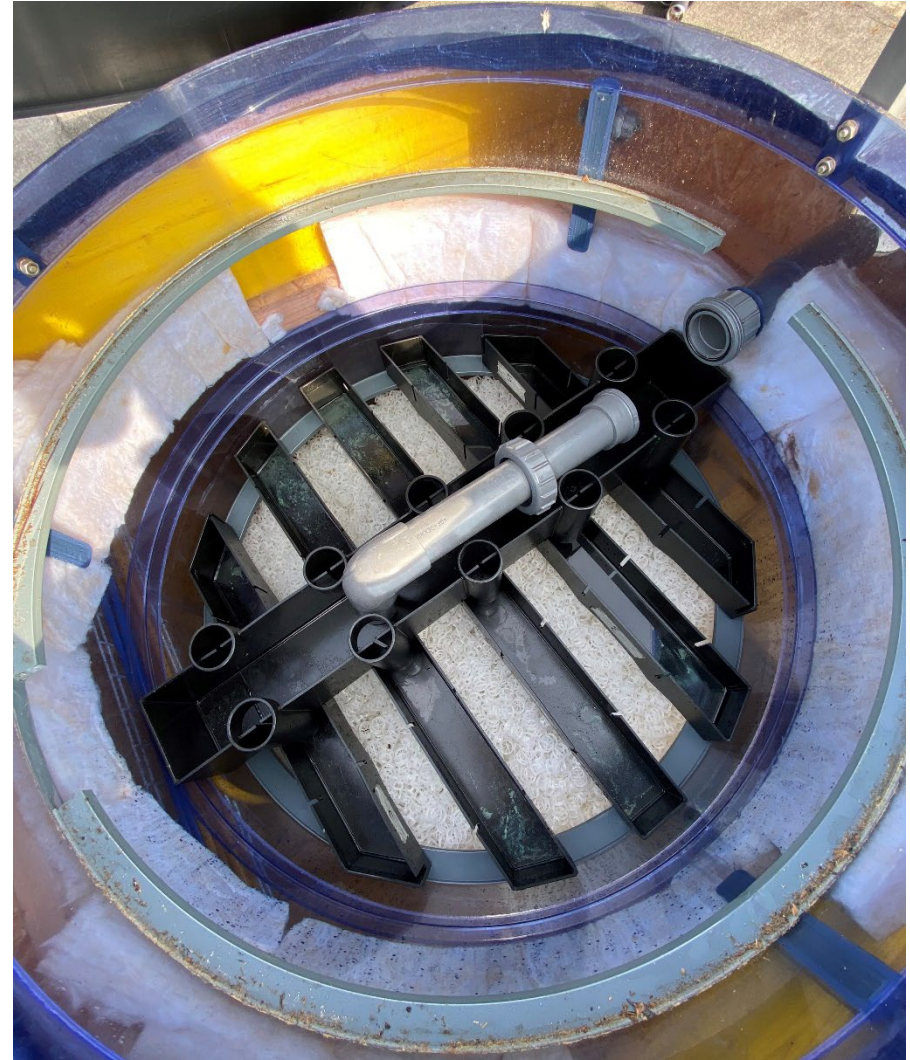


Erzeuger (offener Prozess)

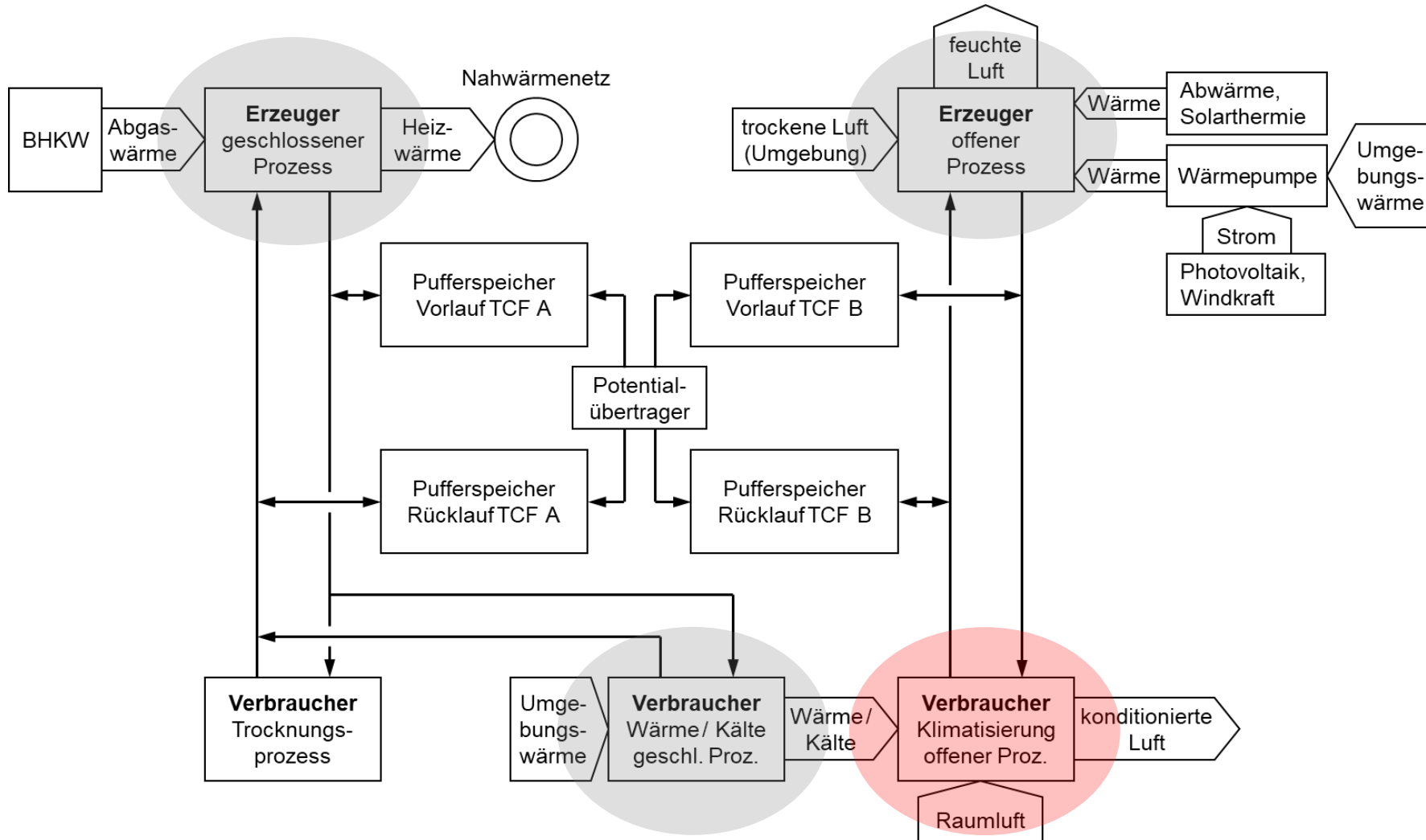


- Wärmezufuhr über die Luft ist begrenzt (hohe Übertemperatur gegenüber Phasengleichgewicht)
- Austreiberleistung ist abhängig vom Zustand der Umgebungsluft und von der Lösungstemperatur am Wäschereintritt
- Batch-Prozess: einfache Realisierung mit Füllkörperwäscher
- Direkte Regeneration: aufwändige Absorberkonstruktion mit grosser Entgasungsbreite ($\xi_A - \xi_E$)

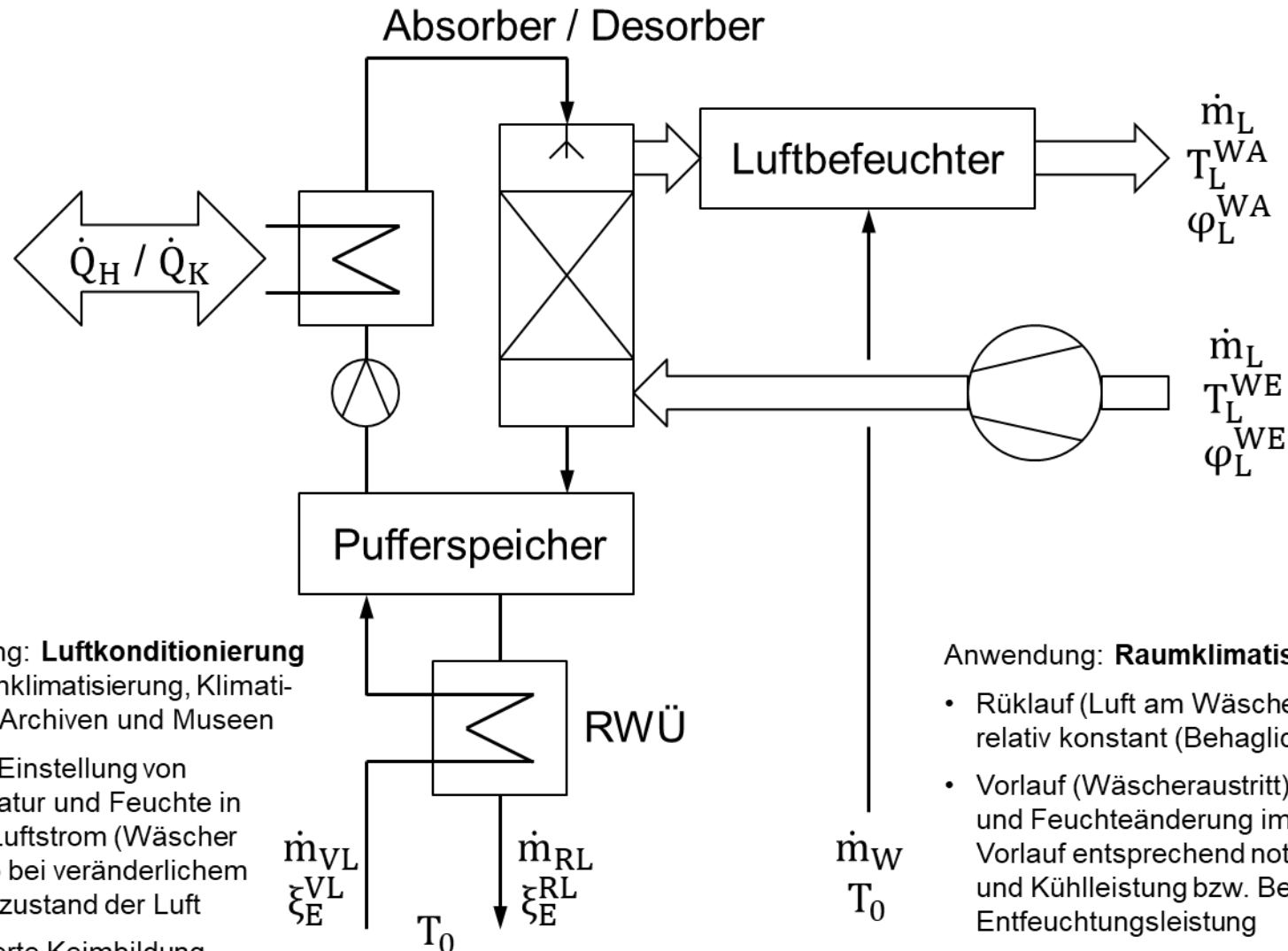
Regeneration Gewächshausklimatisierung



Thermochemisches Netzwerk (Beispiel)



Klimatisierung (offener Prozess)



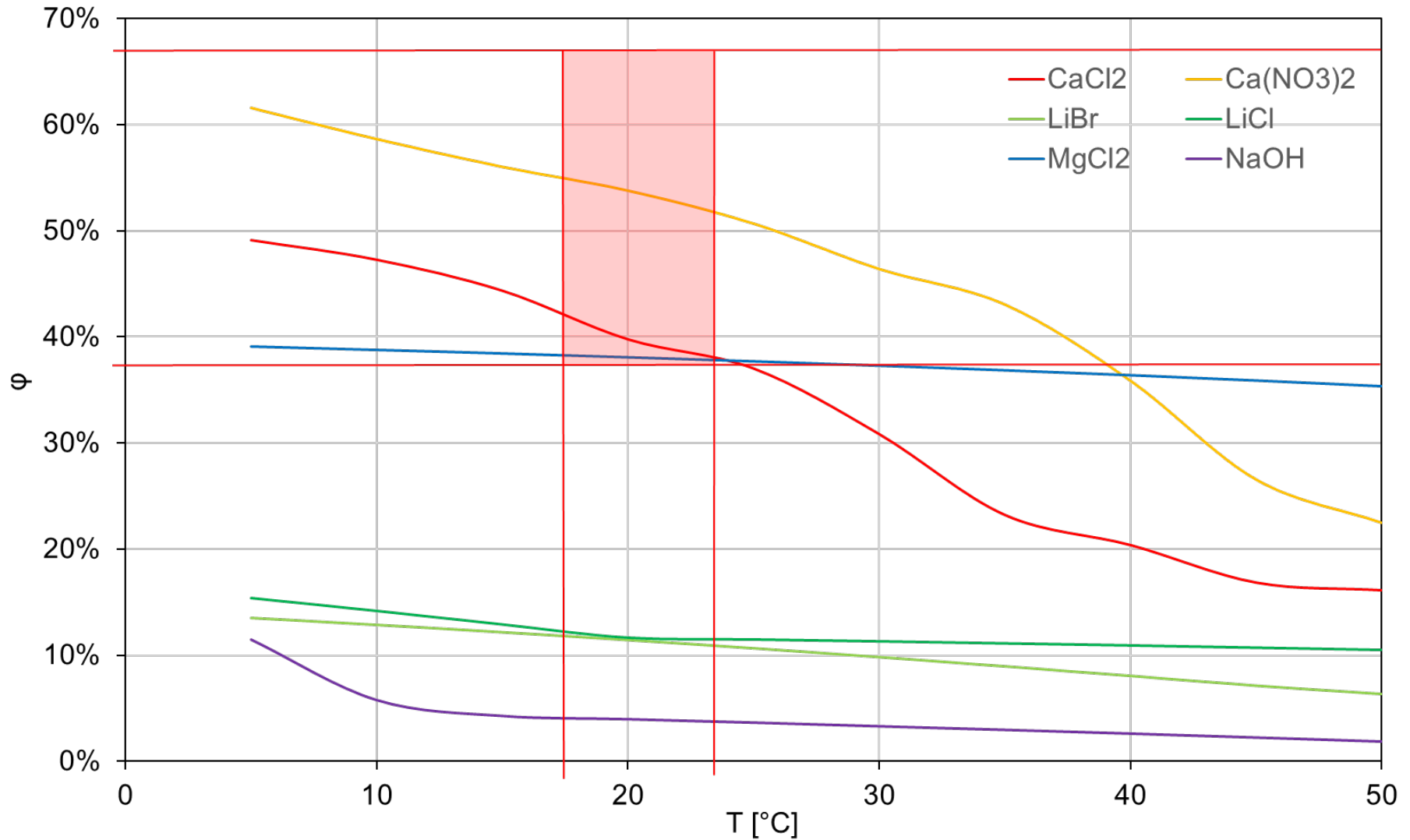
Anwendung: **Luftkonditionierung**
Pflanztschklimateisierung, Klimatisierung in Archiven und Museen

- Exakte Einstellung von Temperatur und Feuchte in einem Luftstrom (Wäscher Austritt) bei veränderlichem Eintrittszustand der Luft
- Reduzierte Keimbildung

Anwendung: **Raumklimatisierung**

- Rücklauf (Luft am Wäschereintritt) ist relativ konstant (Behaglichkeitsbereich)
- Vorlauf (Wäscheraustritt): Temperatur- und Feuchteänderung im Vergleich zum Vorlauf entsprechend notwendiger Heiz- und Kühlleistung bzw. Be- oder Entfeuchtungsleistung

Klimatisieren



H2020 Projekt H-DisNet (2016 - 2019)

Katholieke Universiteit Leuven (Belgien)

- Projektkoordinator
- Netzwerksimulation



TU Berlin (Deutschland)

- Entwicklung von Absorptionsanlagen



Watergy GmbH (Deutschland)

- Prototyp Gebäudeklimatisierung
- Stackholderanalyse



ZHAW (Schweiz)

- Prototyp Erzeugung und Verbraucher
- Öffentlichkeitsarbeit



University Newcastle (England)

- Fallstudien zu Anwendungsfällen
- Prototyp Netzwerk im Labormassstab



Aurubis (Deutschland)

- Businesscase



Thermaflex (Niederlande)

- Netzwerkanalyse



Accelopment (Schweiz)

- Markteinführungsstrategie
- Organisation



Prototyp Watergy / TU-Berlin



Watergy-Wäscher



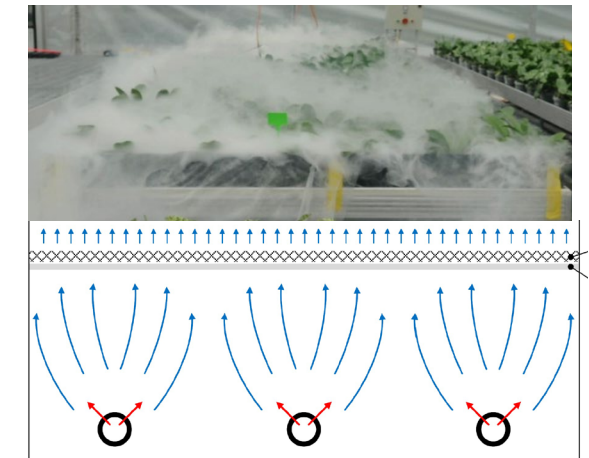
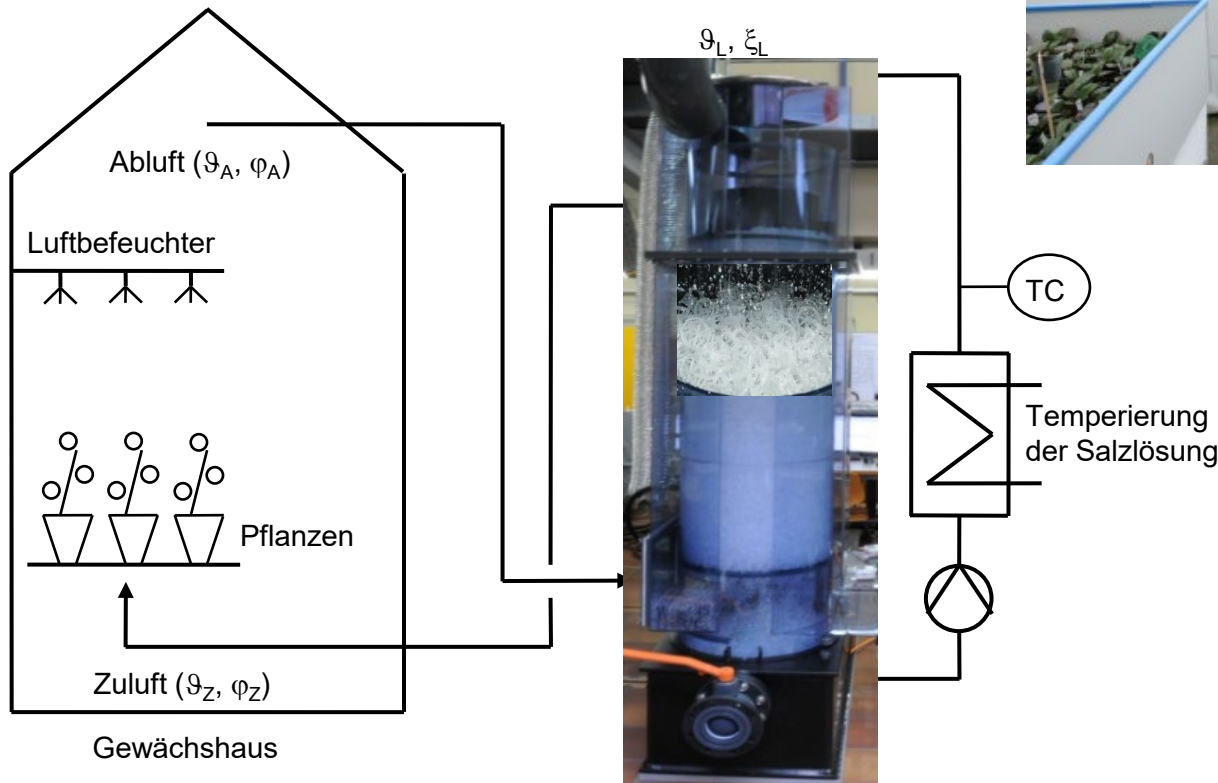
Prototyp ZHAW



Prototyp
Newcastle



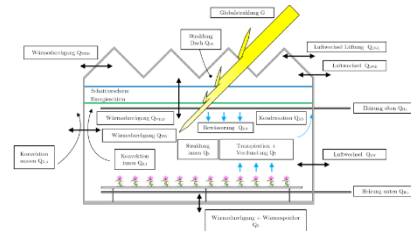
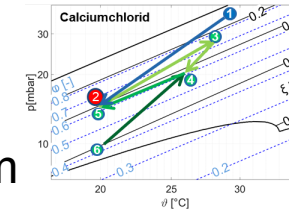
Pflanztschklomatisierung in einem Gewächshaus (H-DisNet)



Pflanztschklimateisierung in einem Gewächshaus (H-DisNet)

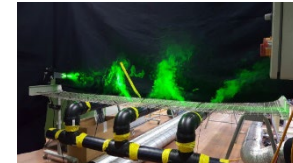
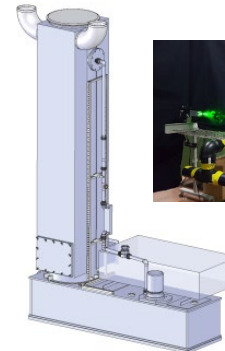
1. Grundlagenuntersuchungen zur theoretischen Prozessberechnung und -optimierung

- Untersuchungen zur Energie- und Stoffbilanz am Gewächshaus
- Stoffdatenbank für verschiedene Arbeitsstoffe



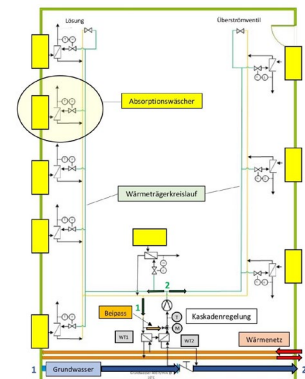
2. Voruntersuchungen

- Luftverteilung am Pflanztsch
- Konstruktion und Optimierung der Wäscher



3. Aufbau der Demonstrationsanlage (600 m² Gewächshaus, 9 Luftkonditionierungsanlagen für je ca.50 m² Pflanztsch)

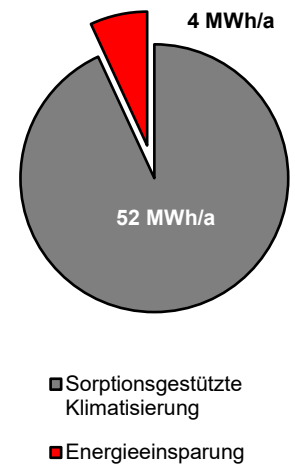
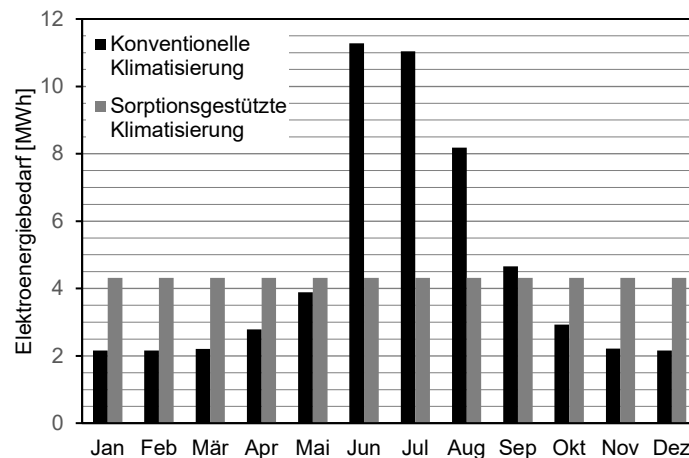
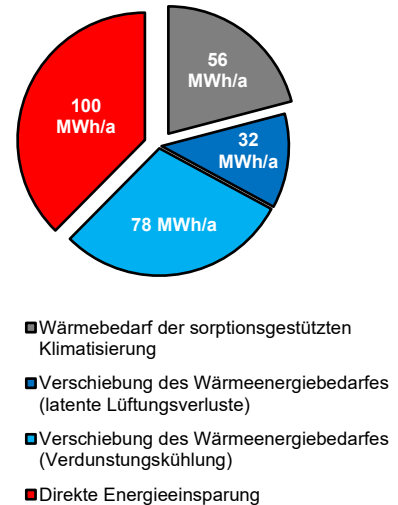
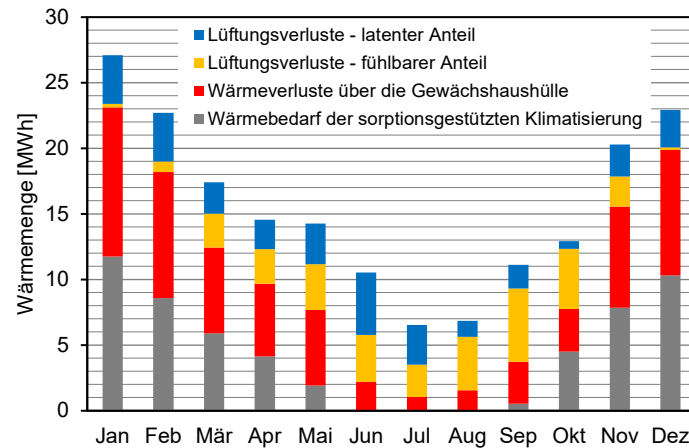
- Luftabsaugung
- Heiz- und Kühlkreislauf
- Luftverteilung / Einhausung der Pflanztsche
- Installation der Luftwäscher



Pflanztschklomatisierung in einem Gewächshaus (H-DisNet)

Ergebnisse:

- Reduzierung des Heizwärmebedarfes um ca. 53% durch Absenkung der Lufttemperatur im Gewächshaus (begrenzt durch die Taupunkttemperatur an der Oberfläche der Gewächshaushülle)
- Reduzierung der Raumlufturnwälzung => Verringerung des konvektiven Wärmetransportes an der Innenseite der Gewächshausumhausung um ca. 50 %
- Sorptionsgest. Verdunstungskühlung => Reduzierung des Strombedarfes (Luftumwälzung / Kältemaschinen) um ca. 7%



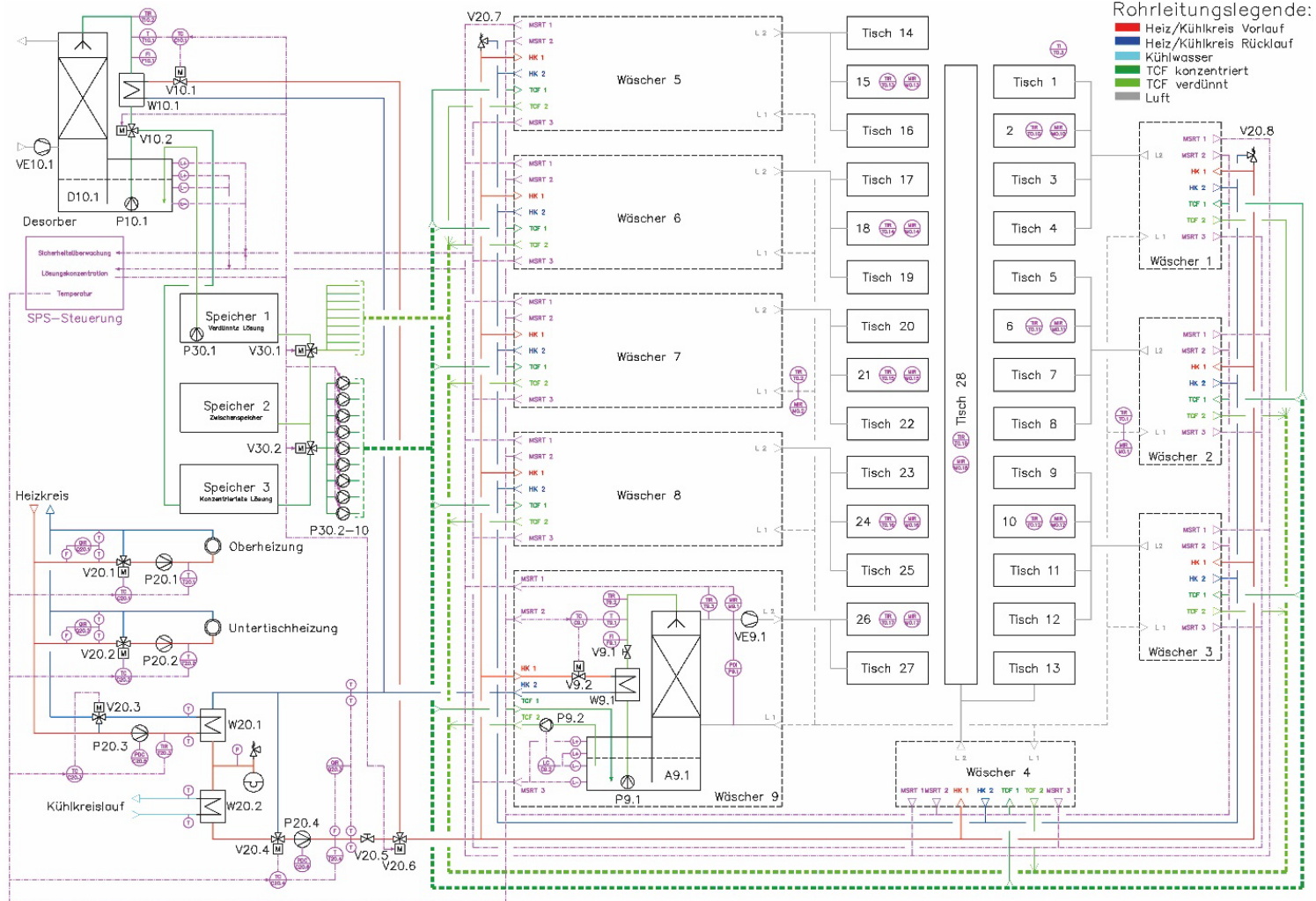
Watt d'Or 2020 - Energietechnologie



BFE-Pilotprojekt

Sorptive Gewächshausklimatisierung mit Thermochemischem Speicher

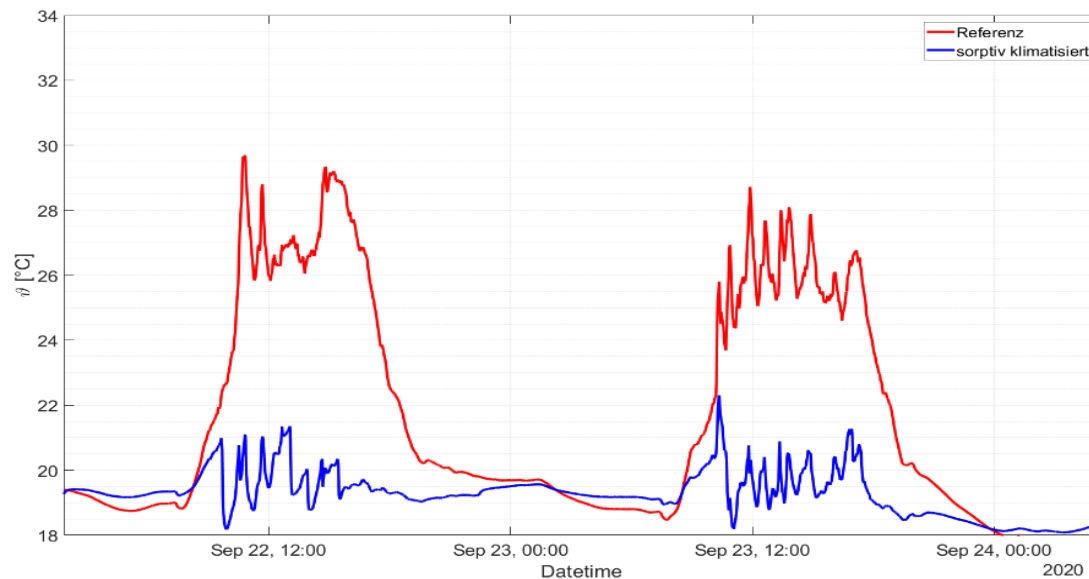
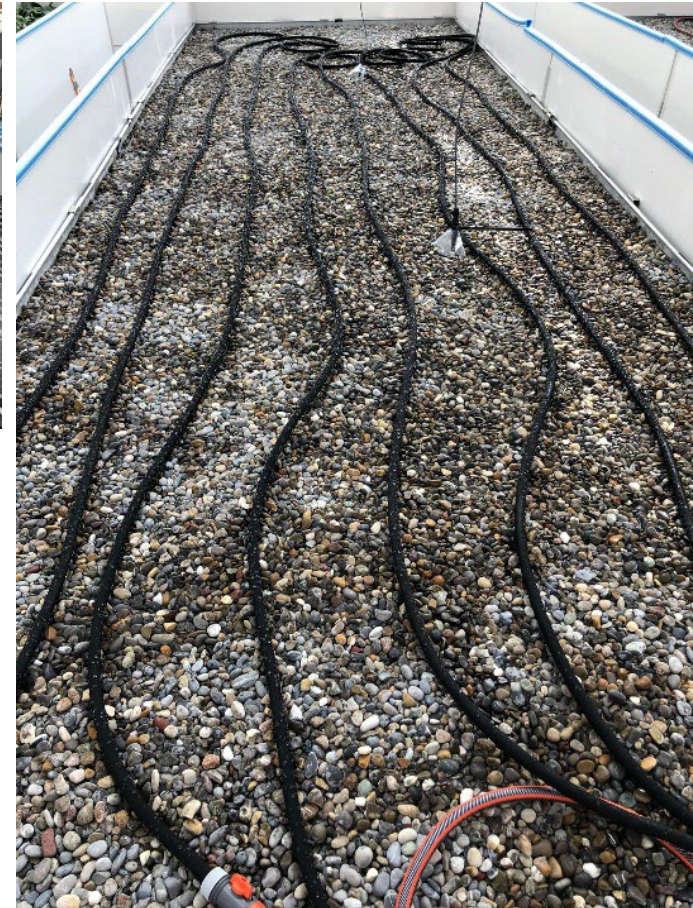
Vollautomatisierung der Anlage / Regeneration mit Heizwärme



BFE-Pilotprojekt

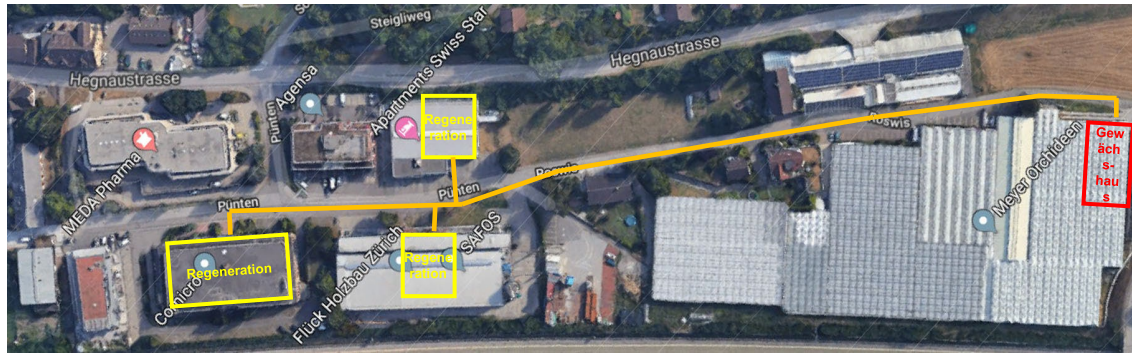
Sorptive Gewächshausklimatisierung mit Thermochemischem Speicher

Verdunstungskühlung im Pflanzbereich



Nächster Schritt: Thermochemisches Netzwerk mit Regeneration

Realisierung eines leitungsgebundenen Netzwerkes durch Einbindung von Abwärmequellen und Solarthermie im nahegelegenen Gewerbegebiet



Arbeitsmedium: MgCl_2 24/34%

Energiemenge: 110 MWh/a

Fördervolumen: 750 m³/a

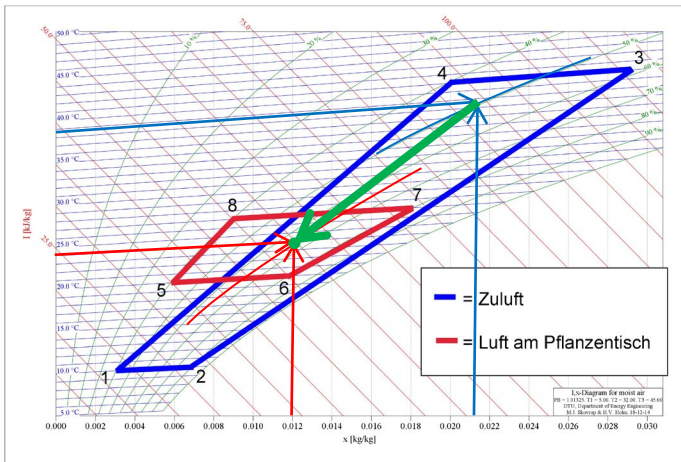
Speicherbedarf: 210 m³

Ergebnisse einer ersten Recherche und Potentialabschätzung:

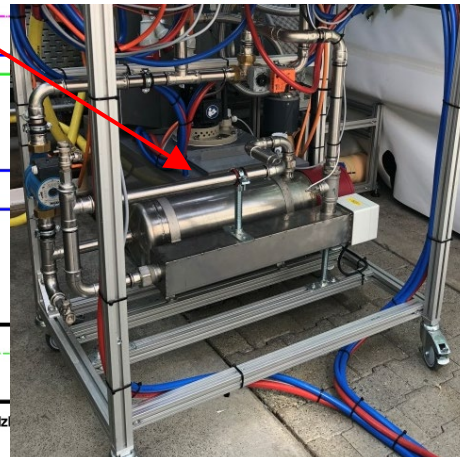
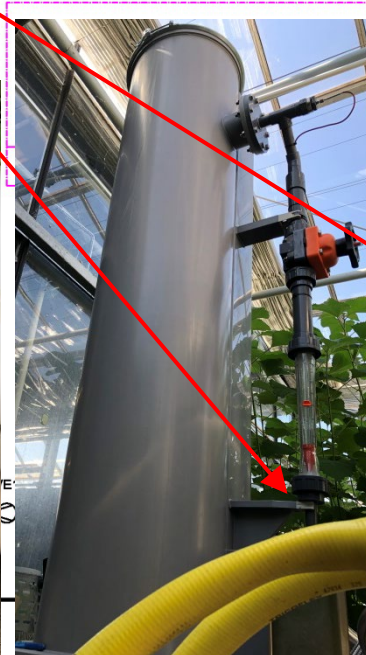
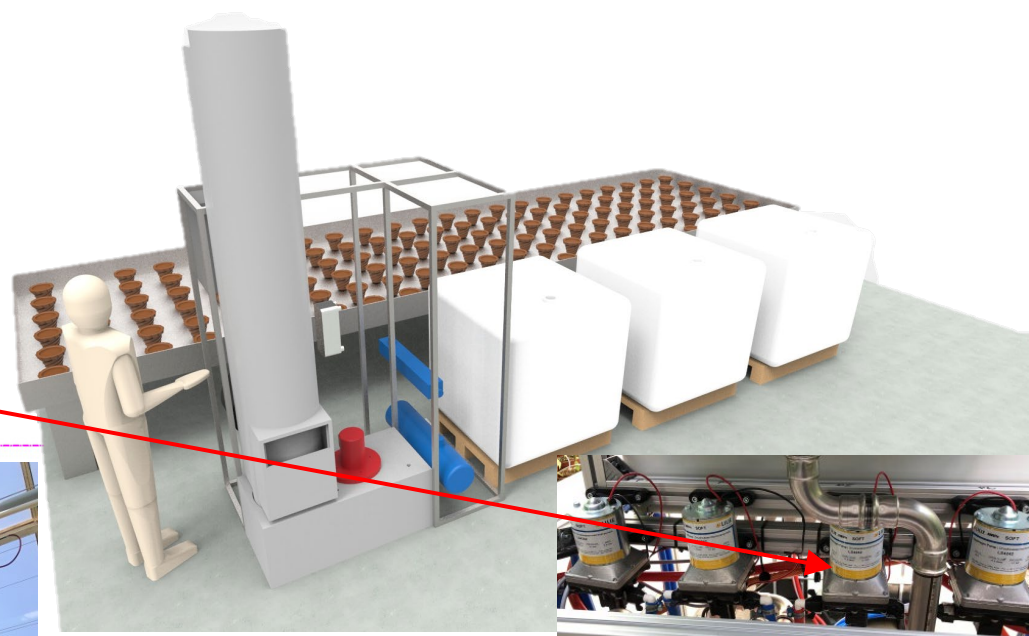
- Die im Sommer ungenutzte Abwärme eines BHKW (ca. 40 kW) könnte den Wärmebedarf für die Regeneration nahezu vollständig decken.
- Flächenbedarf für eine solarthermische Regeneration: ca. 350 m²
- Im Vergleich zu einem Fernwärmenetz liegt die Energiedichte um einen Faktor 10 höher und der Transportaufwand lässt sich auf ca. 1% reduzieren. => ermöglicht eine Energieautarke Förderung, die nur durch direkt erzeugten PV-Strom angetrieben wird

Pflanztschklimateisierung im Kulturlabor (seit Anfang 2019 in Betrieb)

- Vollautomatisierte Pflanztschklimateisierung für ein Kulturlabor am Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen (IUNR) der ZHAW in Wädenswil
- Untersuchungen zum Pflanzenwachstum unter idealer Luftqualität (Temperatur und Feuchte)



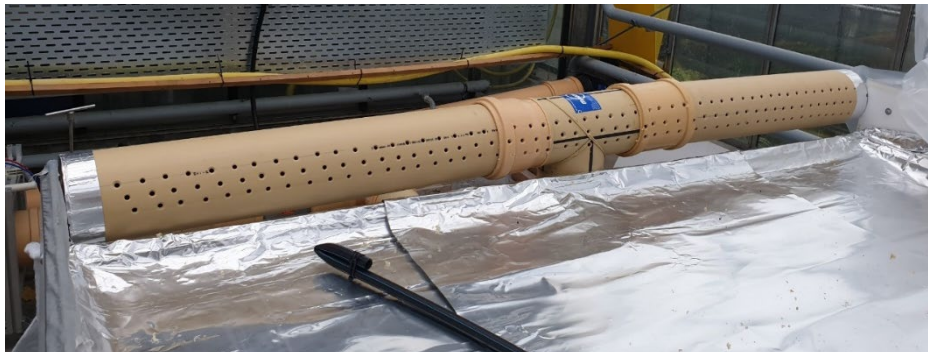
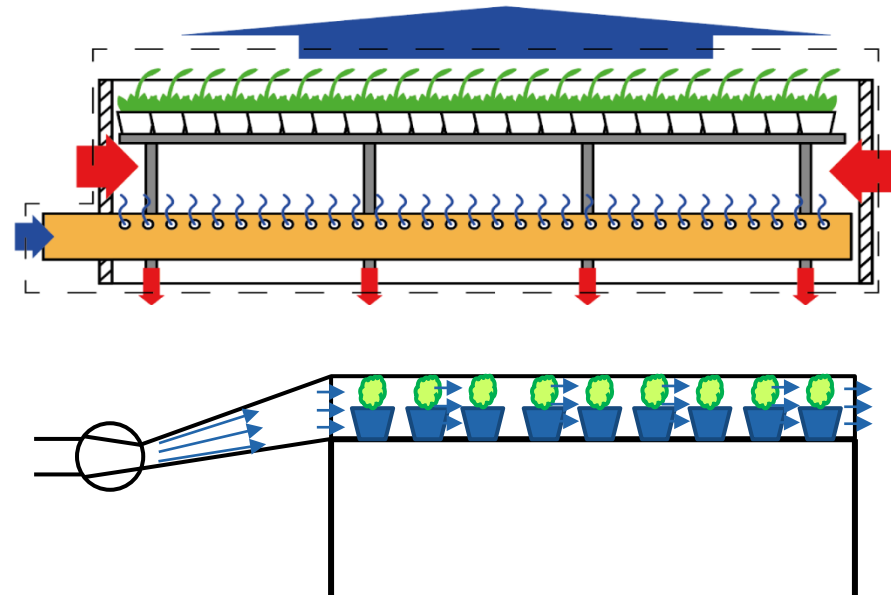
Automatische Pflanztschklimateisierung



Pflanztischklimatisierung

Untersuchung verschiedener Pflanztischkonstruktionen

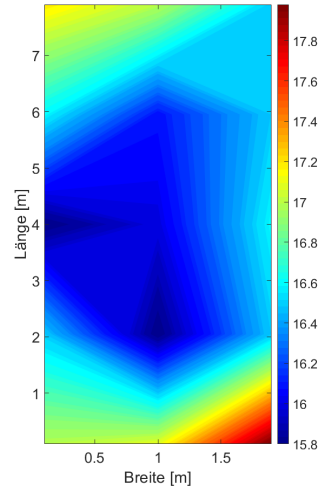
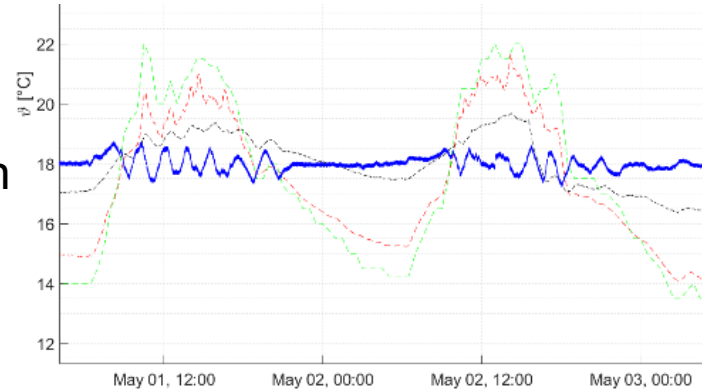
- Lufteinblasung unterhalb des Pflanztisches, gleichmässige Luftverteilung durch Einblasung über gelochte Rohre und eine Kiesschüttung
- Belüftung von Ebbe-Flut-Tischen über einen abgedeckten Kanal
- Luftverteilung auf den Pflanztischen durch poröse Schläuche



Pflanztschklimateisierung

Resultate:

- kein Lösungsaustag
- keine Korrosionsprobleme
- gleichmässige Luftverteilung auf den Pflanztschen ist machbar (Δ 2-3 K)
- grosse Temperaturänderung zwischen Luftaustritt am Wäscher und Pflanzenbereich
- Kiesschüttung wird durch Sonneneinstrahlung stark aufgeheizt => Kiesbefeuchtung
- eingeschränkter Schädlingsbefall



gute Kopfbildung



gute Kopfbildung



Kopfsalat
Salanova Chalmers RZ

Erkenntnis:

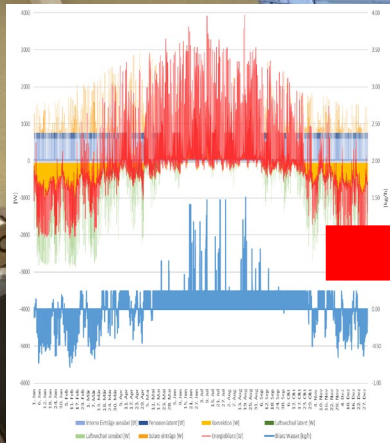
Die Luftkonditionierung sollte so nahe wie möglich am Pflanzenbereich erfolgen.

=> Vorteil der sorptionsgestützten Klimatisierung nutzen! (Lufttransport minimieren und stattdessen temperierte Salzlösung zu den Problemzonen führen)

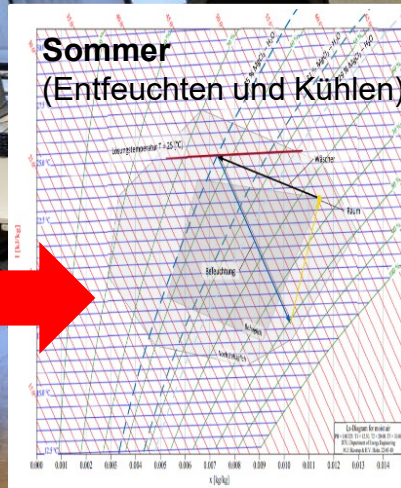
Sorptionsgestützte Raumklimatisierung

Versuchsbetrieb im Büro der Arbeitsgruppe Thermische Speicher am IEFE

Analyse von Wetterdaten

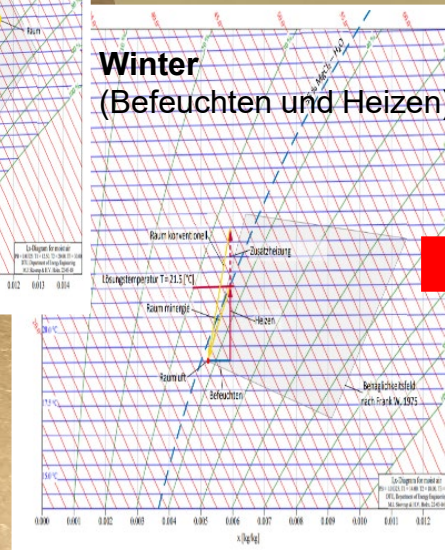


Sommer (Entfeuchten und Kühlen)

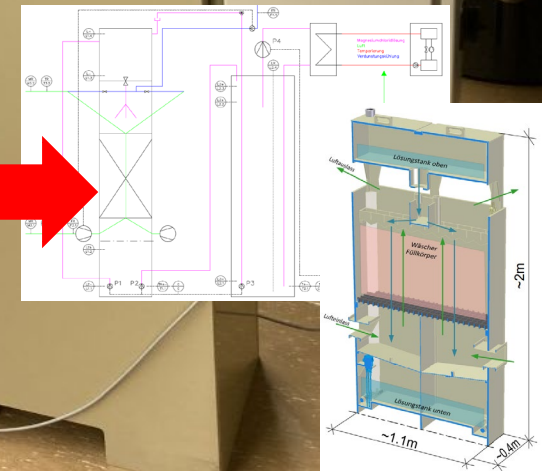


Entwicklung von Klimatisierungsstrategien

Winter (Befeuchten und Heizen)

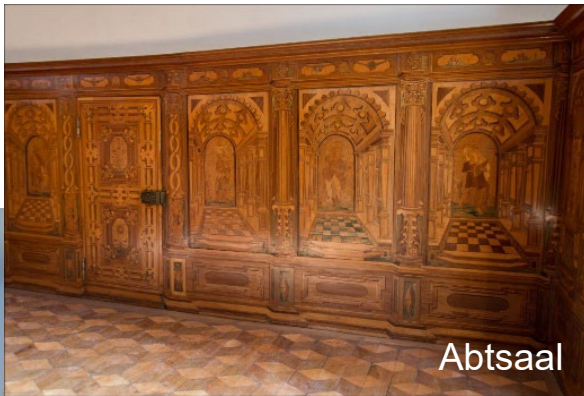


- Konstruktion eines Klimatisiergerätes
- Einbindung in eine Versorgungsperipherie



Klimatisierung von Museen und historischen Gebäuden

Klimatisierung historischer Räume (Abtsaal, Sakristei...) auf der Klosterinsel Rheinau (Kooperation mit Museumsverein und Hochbauamt Kanton Zürich)



Abtsaal

Versuchsbetrieb
in der Sakristei

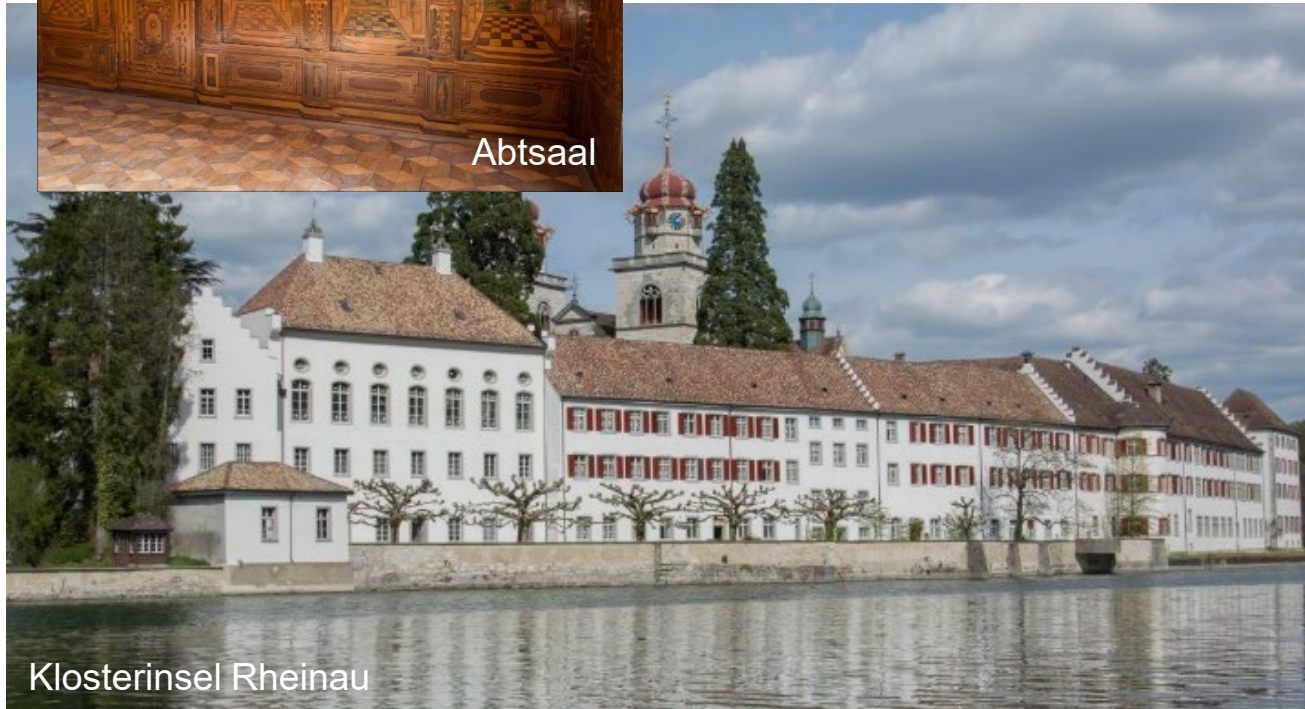


Andelfinger Zeitung Samstag, 2. Mai 2020:

Verein Insel Museum:

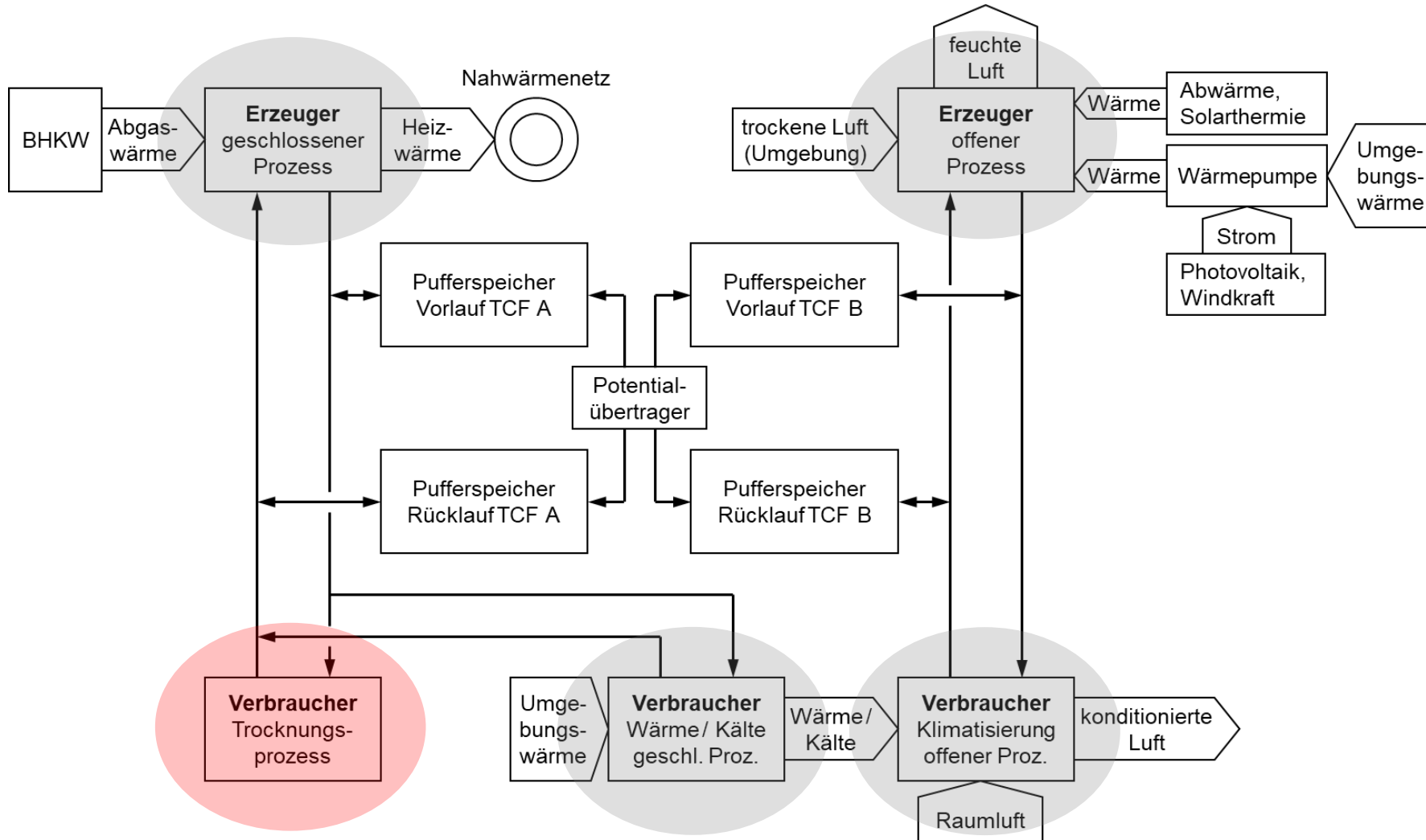
«Riesiger Schritt» Richtung Realisierung

Aktuell ist für den Herbst zudem ein Projekt mit der School of Engineering und in Zusammenarbeit mit dem Hochbauamt des Kantons Zürich geplant. Dabei geht es um «thermochemische Energienetzwerke». Solche sollen den zukünftigen Energieverbrauch von Museen schonen und damit möglichst geringe CO₂-Emissionen bewirken. Das geplante Museum soll nicht nur museologisch top und inklusiv gestaltet, sondern auch nachhaltig sein, betont Daniel Grob in seiner Mitteilung.



Klosterinsel Rheinau

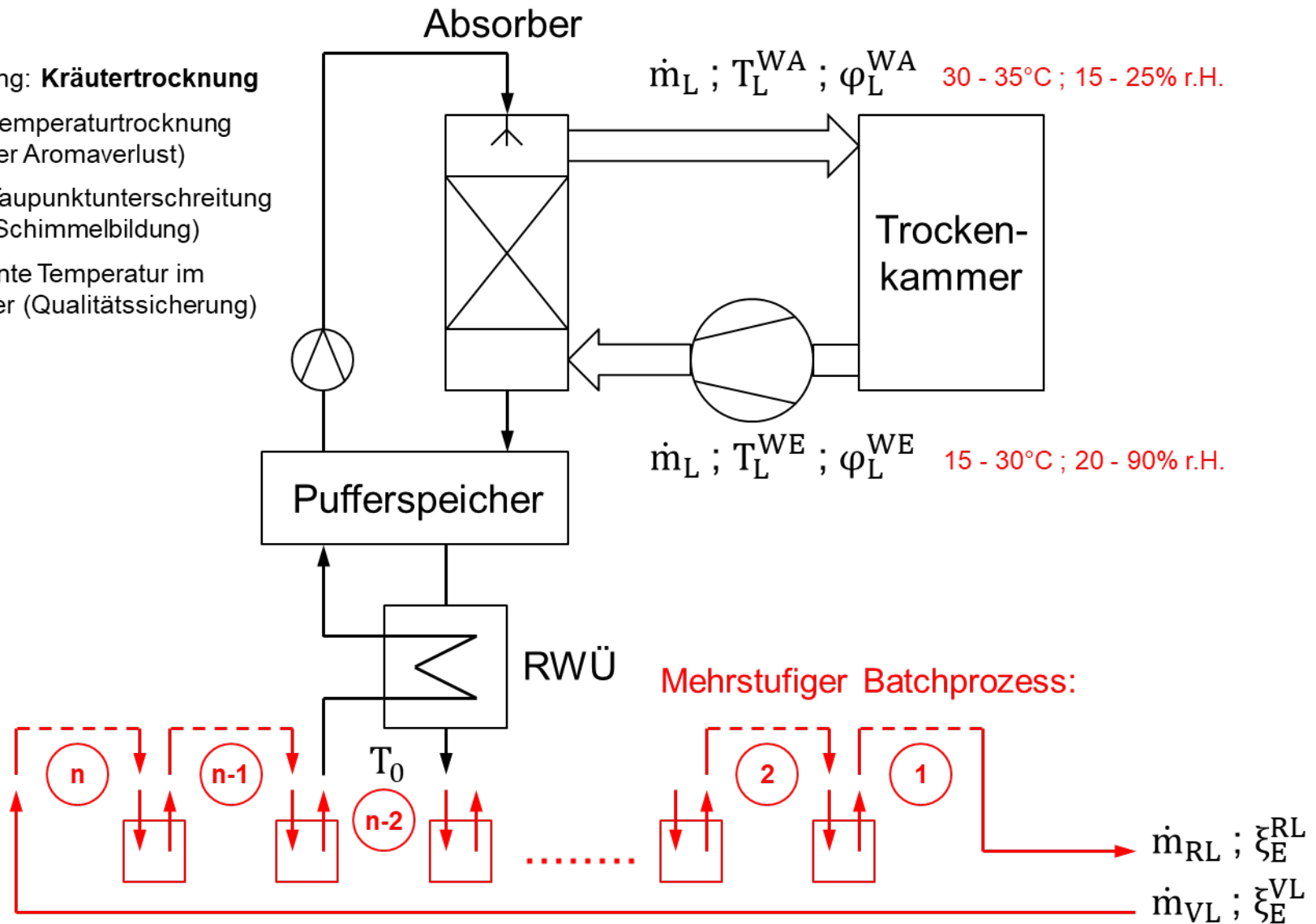
Thermochemisches Netzwerk (Beispiel)



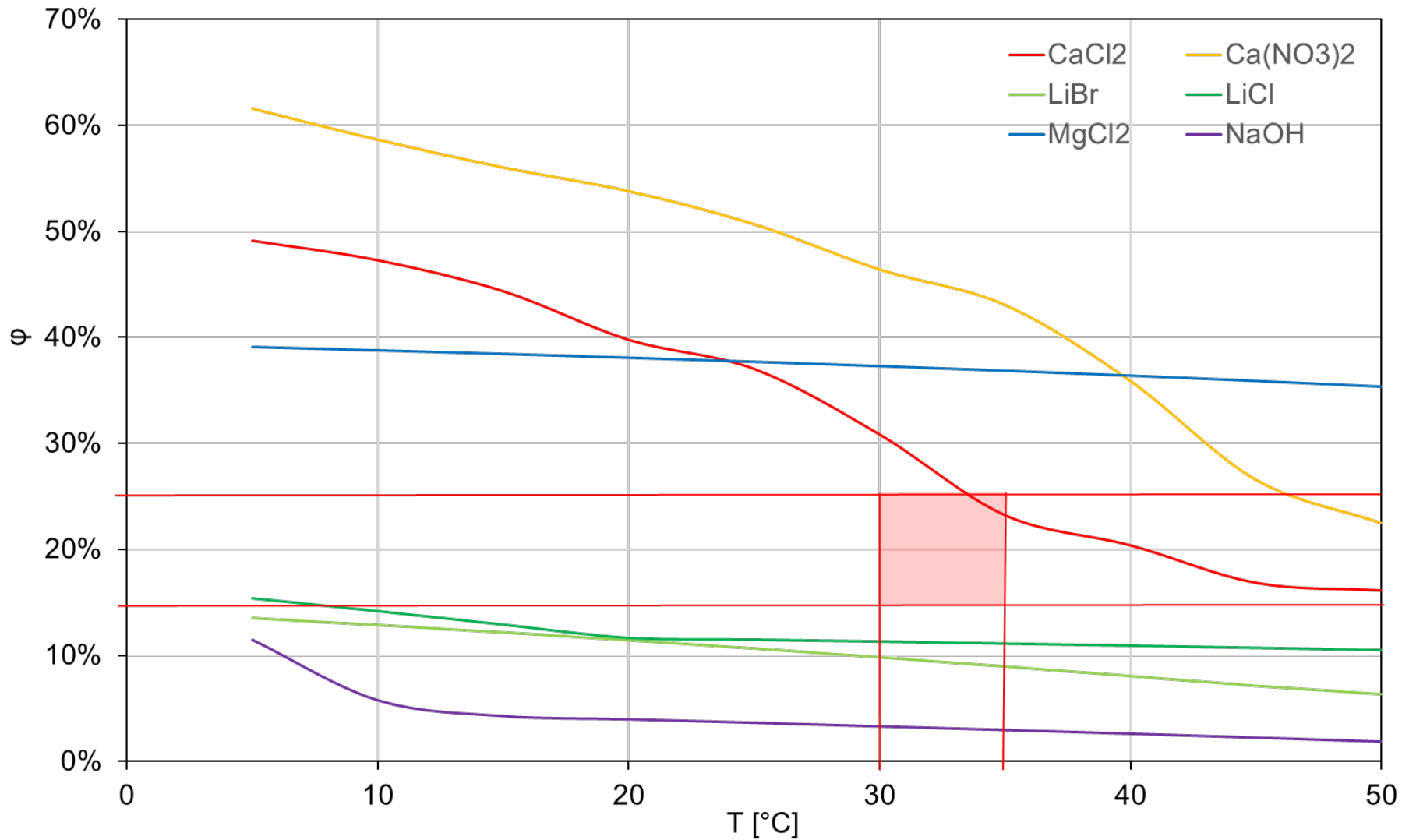
Trocknung (offener Prozess)

Anwendung: **Kräutertrocknung**

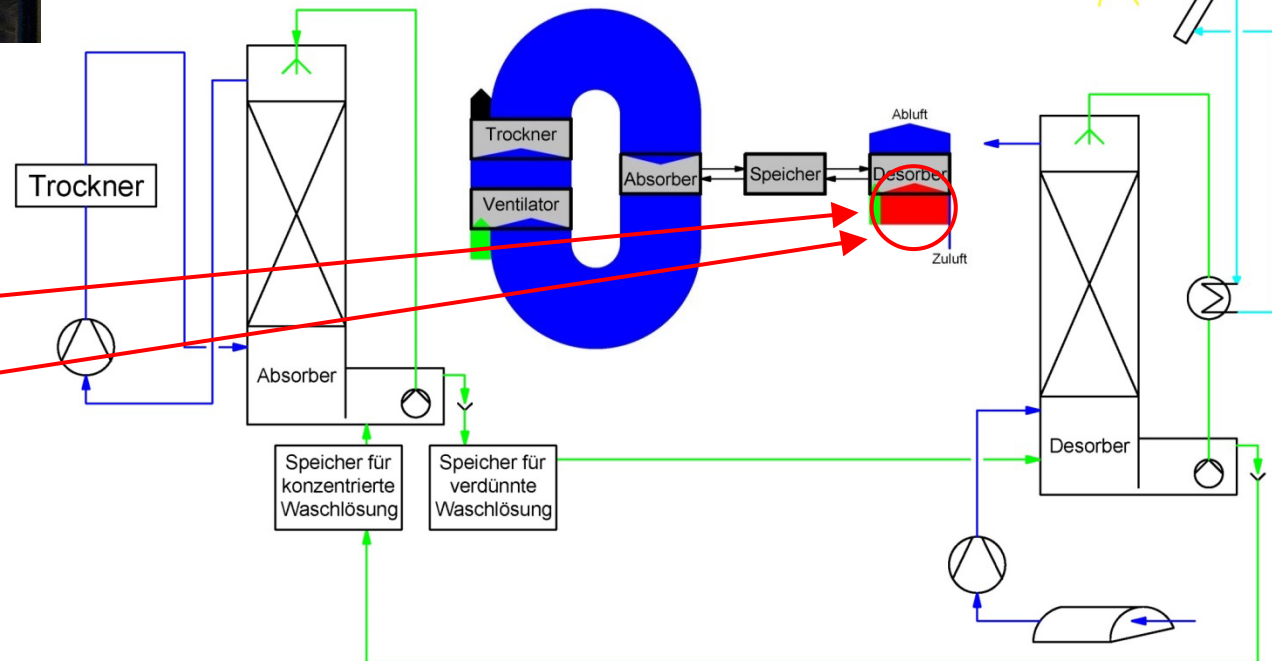
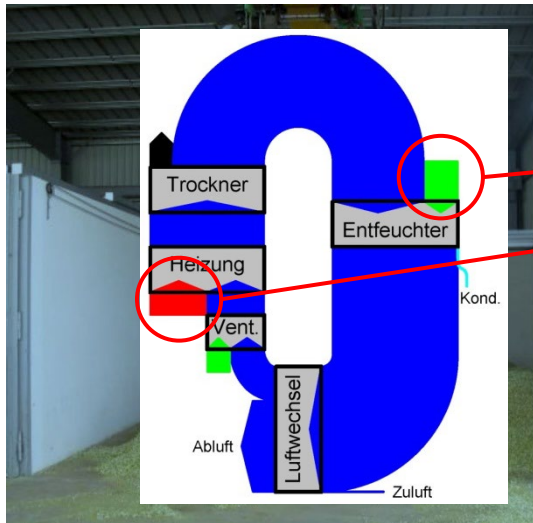
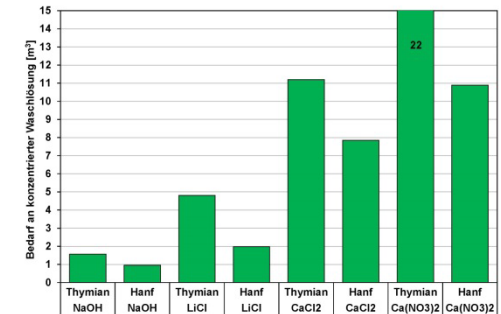
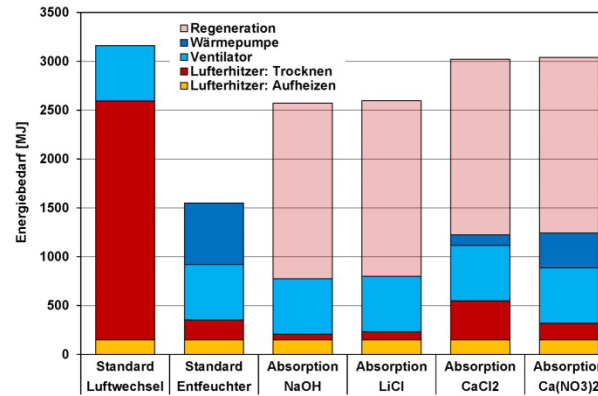
- Niedertemperaturtrocknung (geringer Aromaverlust)
- Keine Taupunktunterschreitung (keine Schimmelbildung)
- Konstante Temperatur im Trockner (Qualitätssicherung)



Trocknen

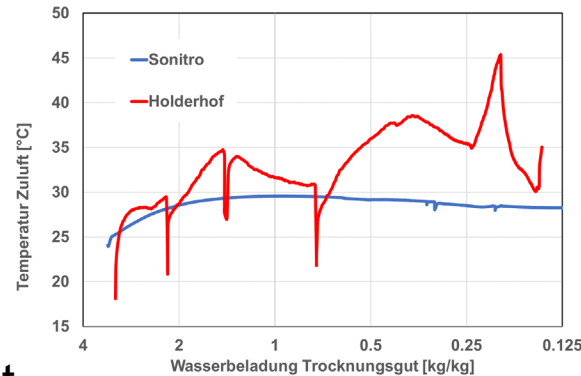


Sorptive Niedertemperaturtrocknung



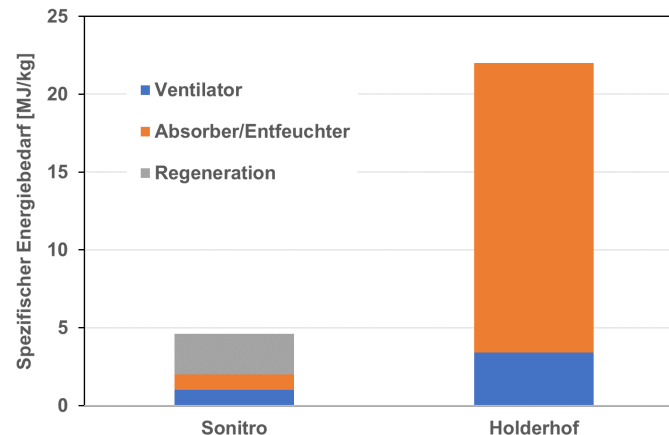
Sorptive Niedertemperaturtrocknung

- Trocknungsversuche mit NaOH-Lauge als Absorptionsmittel und Brennnessel sowie Pfefferminze als Trocknungsgut
- Stabilere und niedrigere Trocknungstemperatur
Verbesserung der Produktqualität
- Keine Beeinträchtigung von Farbe, Geruch und Geschmack
- **Energieeinsparpotential > 75%**
- Entstehung von Natriumkarbonat durch das Kohlendioxid in der Luft ist technisch beherrschbar (Abtrennung von ausfallendem Salz)

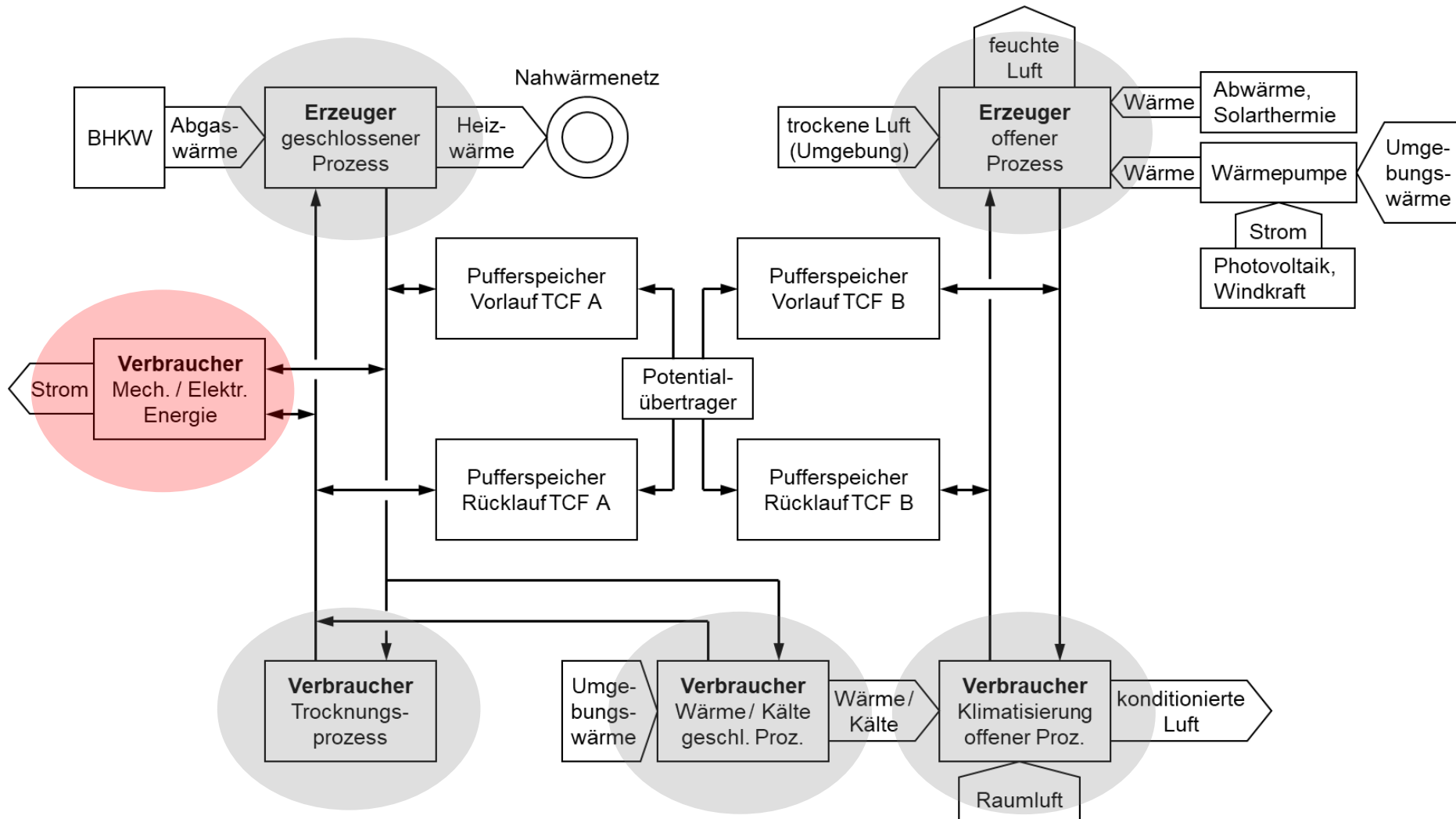


Durch die Aromaanalytik GC-O & GC-FID konnte erstmals auf molekularer Ebene bestätigt werden, dass die SONITRO-Trocknung in einem Trocknungsgut resultiert, welches mehr «Frische» aufweist, als das konventionell getrocknete Material - bedingt durch:

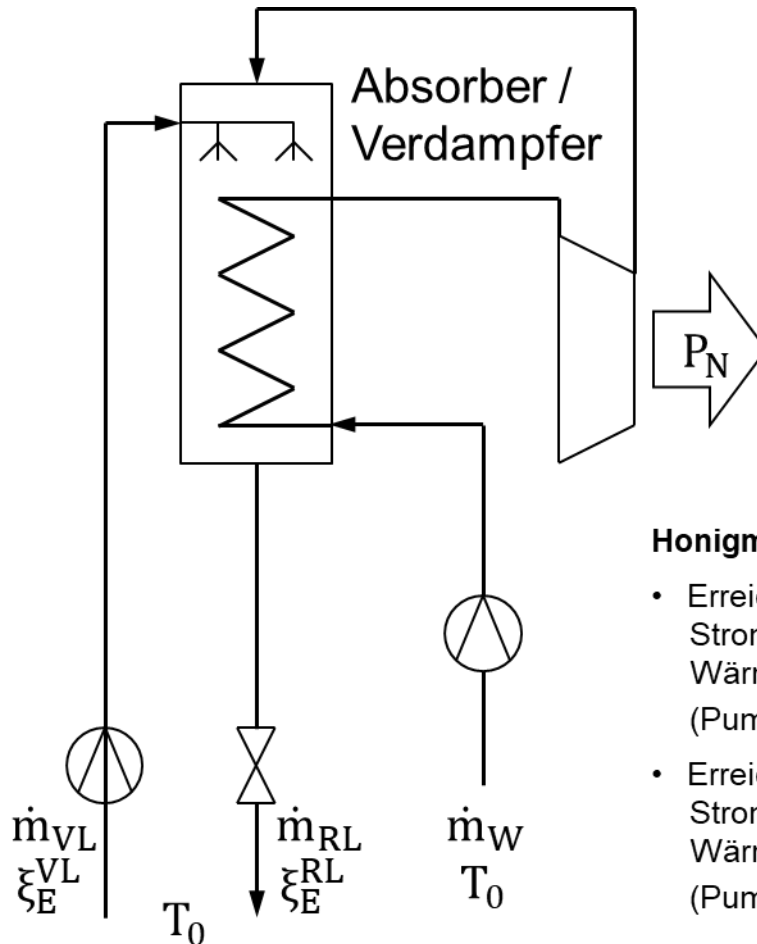
- höhere Konzentrationen an Terpenen Myrcen & 1,8-Cineol
- tiefere Konzentrationen an flüchtigen Säuren
- tiefere Intensitäten an thermisch generierten Verbindungen 2- und 3-Methylbutanal*, Diacetyl* & p-Kresol*



Thermochemisches Netzwerk (Beispiel)



Erzeugung mechanischer Energie



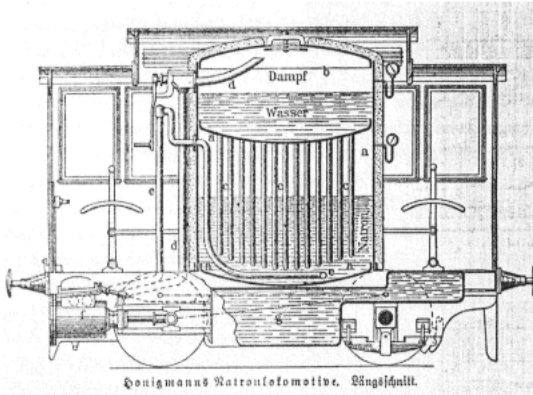
Honigmann-Prozess

- Erreichbare Energiedichte:
Strom=>Strom: 5 Wh/kg
Wärme=>Wärme: 120 - 960 Wh/kg
(Pumpspeicherkraftwerk: 0.3-1.4 Wh/kg)
- Erreichbarer Wirkungsgrad:
Strom=>Strom: 50 - 70%
Wärme=>Wärme: 80 - 100 %
(Pumpspeicherkraftwerk: 70-82 %)

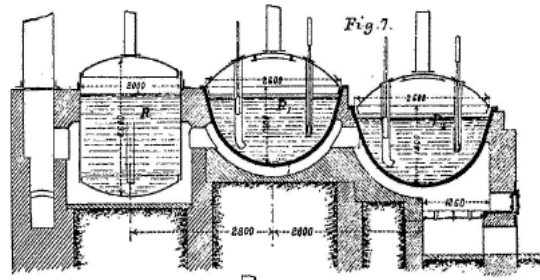
M. Sterner, I. Stadler: *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014

Erzeugung mechanischer Energie

➤ 19. Jh.: Natronlokomotive (Honigmann-Prozess)



(a) Natron-Lokomotive (Bild aus Mähr (2003))



(b) Eindampfstation (Bild aus Unbekannt (1885d))

Dissertationsschrift Anna Jahnke, Betreuung: Prof. Dr. Felix Ziegler, TU-Berlin 2019



Wikipedia

➤ Untersuchungen an der TU-Berlin



Dissertationsschrift Anna Jahnke
Betreuung: Prof. Dr. Felix Ziegler
TU-Berlin 2019

H2020 Projekt TheGreefa (10/2020 - 9/2023)



School of
Engineering

IEFE Institut für Energiesysteme
und Fluid-Engineering

TheGreefa (Thermochemical Fluids in Greenhouse Farming)

➤ 11 Partner aus 7 Ländern Europas und Afrika:

- **ZHAW** (Schweiz)
- **TU Berlin** (Deutschland)
- **Watergy** GmbH (Deutschland)
- **Institut National de Recherches en Génie Rural** (Tunesien)
- **Sfera società agricola s.r.l.** (Italien)
- **Hyperborea S.r.l.** (Italien)
- **Meyer Orchideen AG** (Schweiz)
- **Strane Innovation** (Frankreich)
- **Iznab Spółka z ograniczoną odpowiedzialnością** (Polen)
- **UAL - Universidad de Almería** (Spanien)
- **Moragues And Scade Abogados S.a.** (Spanien)



➤ Koordinator: ZHAW

➤ Gesamtumfang / Subvention: 4.6 / 4.0 Mio. Euro

H2020 Projekt TheGreefa (10/2020 - 9/2023)

TheGreefa (Thermochemical Fluids in Greenhouse Farming)

➤ **Demonstration der Technologie in verschiedenen Anwendungsfällen**

- Feuchtigkeits- und Temperaturregelung in verschiedenen Klimaregionen (Schweiz, Tunesien)
- Optimierung der Luftzirkulation im Gewächshaus
- Wasserrückgewinnung aus der Luftfeuchtigkeit, Wiederverwendung zur Bewässerung
- Sorptive Niedertemperaturtrocknung
- Saisonale Speicherung und Regeneration mit solarthermischer Energie im Labormassstab

➤ **Modellierung und Simulation des gesamten Systems**

- Modellierung des Gesamtsystems (Regeneration durch Nutzung erneuerbarer Energien oder Abwärme)
- Untersuchung von Steuerungsstrategien durch eine generische Simulationsumgebung
- Speichersimulation und -optimierung
- Validierung der Modelle anhand der Betriebsdaten von Prototypanlagen

➤ **Bewertung der wirtschaftlichen und ökologischen Potentiale**

- Lebenszyklusanalyse, soziale Bewertung
- Entwicklung optimaler Konfigurationen durch die Betrachtung von Fallstudien

➤ **Entwicklung von Strategien für eine breite Umsetzung der Technologie**

- Entwicklung wirtschaftlicher, ökologischer und gesellschaftlicher Strategien für die Etablierung der Technologie, Entwicklung von Geschäftsmodellen

Ausblick

Chancen

- Über 40% des Gesamtenergiebedarfes der Schweiz könnte durch den Einsatz der verlustlosen Speichernetzwerke im Niedertemperaturbereich ausschliesslich durch regenerative Energiequellen und Abwärmenutzung abgedeckt werden.
- Wirtschaftswachstum durch Knowhow auf einem neuen Technologiefeld

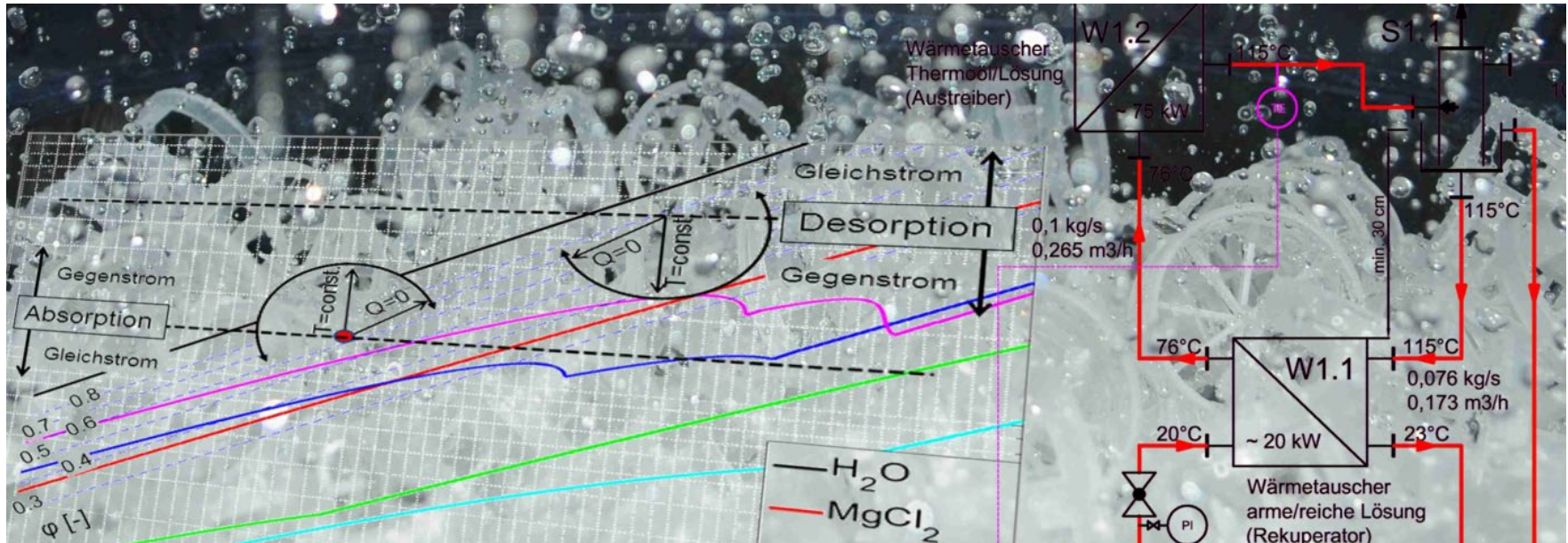
Hemmnisse

- Sorptionsprozesse sind aus einer (leider noch weit verbreiteten) rein energetischen Betrachtungsweise schwer verständlich
- Es gibt keine geschulten Fachkräfte für die Planung, Installation und Wartung. (Die neue Branche Absorptionstechnik müsste sich zwischen HLK-Technik und Chemietechnik ansiedeln.)
- Es gibt kein Regelwerk (Normen, Genehmigungsrichtlinien..).
- Es gibt keine Geschäftsmodelle (für den Handel mit chemischen Potentialen anstatt Energie).

Es gibt viel zu gewinnen, aber auch viel zu tun.

**Machen auch Sie mit bei der Entwicklung zukunftsweisender
Anwendungen für Thermochemische Netzwerke!**

Kontakt



Für weitere Informationen:

Dr.-Ing. Thomas Bergmann
Dozent für thermische Speichersysteme

ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
IEFE Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering
Technikumstrasse 9, Postfach
CH-8401 Winterthur
Tel.: +41 (0)58 934 47 05

thomas.bergmann@zhaw.ch

<https://www.zhaw.ch/de/engineering/institute-zentren/iefe/energiespeicher-und-netze/thermische-speicher/>