

POTENTIALANALYSE DER NUTZUNG TRANSKRITISCHER CO₂-PROZESSE ZUR FERN- UND INDUSTRIEWÄRMEBEREITSTELLUNG IN NORDRHEIN-WESTFALEN

Nils PETERSEN¹ (*)

Dr.-Ing. Thomas POLKLAS

Tobias SIEKER (*)

Emmanuel JACQUEMOUD

Thomas BEXTEN

Mario RESTELLI

Prof. Dr.-Ing. Manfred WIRSUM

Dr.-Ing. Philipp JENNY

**Institut für Kraftwerkstechnik, Dampf-
und Gasturbinen,
RWTH Aachen University**

**MAN Energy Solutions SE /
MAN Energy Solutions Schweiz AG**

Kurzfassung:

Derzeit ist der Wärmesektor für mehr als die Hälfte des gesamten globalen Endenergiebedarfs verantwortlich, wobei aktuell nur ca. 10 % durch erneuerbare Energien bereitgestellt wird [1]. Der Großteil der Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung kann zukünftig jedoch durch die Verwendung regenerativen Stroms mittels Sektorenkopplung und Elektrifizierung erheblich eingespart werden [2]. In diesem Beitrag wird das Potential zur Integration eines transkritischen CO₂-Wärmepumpenprozesses zur Bereitstellung industrieller Wärme- und Kältebedarfe untersucht. Darüber hinaus wird die Möglichkeit zur Bereitstellung von Fernwärme berücksichtigt. Der transkritische CO₂-Prozess ist durch hohe Wärmeversorgungstemperaturen bis 180 °C, ökologische Unbedenklichkeit des Arbeitsmittels und eine gleitende Temperaturänderung auf der wärmeabgebenden Seite charakterisiert. Dies macht den Prozess insbesondere für die Bereitstellung von Heißwasser geeignet. Die Wärmequelle kann darüber hinaus zur Bereitstellung von Nutzkälte eingesetzt werden.

Zur Abschätzung des Anwendungspotentials wurden in einem „Top-Down“-Ansatz die Wärme- und Kältebedarfe verschiedener Industriebranchen, Subbranchen und deren charakteristische Prozesse recherchiert. Es zeigt sich, dass insbesondere Brauereien, Molkereien und Zuckerfabriken der Lebensmittelindustrie, die Kunststoffindustrie und Prozesse zur Papierverarbeitung den Großteil der benötigten Wärme und Kälte im relevanten Bereich der Wärmepumpe aufweisen. Je nach Randbedingungen des einzelnen Produktionsstandorts beträgt der Coefficient of Performance (COP) zwischen 2 (nur Bereitstellung von Heißwasser) und 8 (bei Nutzung von Hochtemperatur- und Niedertemperaturwärme sowie Kälte). Für eine abschließende Bewertung des Integrationspotentials müssen jedoch weitere, standort- und prozessspezifische Parameter und Randbedingungen, beispielsweise das Wärme- oder Kälteübertragungsmedium, die exakten Temperaturen sowie die Stromversorgung der Wärmepumpe, in die Betrachtung einbezogen werden.

¹ Zusatzinformationen des Korrespondenz-Autors: Anschrift: Mathieustraße 9, 52074 Aachen, Telefon: +49 241 80 26725, E-Mail: petersen@ikdg.rwth-aachen.de; Web: ikdg.rwth-aachen.de, (*): Nachwuchsautoren

Keywords: Hochtemperatur-Wärmepumpe, Sektorenkopplung, Prozesswärme, Dekarbonisierung

1 Einleitung und Vorstellung des MAN ES ETES System

Zur Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele ist neben einer Transformation der Stromerzeugungslandschaft auch eine Dekarbonisierung des Wärmesektors notwendig. Global gesehen ist der Wärmesektor für mehr als die Hälfte des gesamten Endenergiebedarfs verantwortlich, wovon lediglich ca. 10 % durch erneuerbare Energien bereitgestellt wird [1]. Durch die Elektrifizierung der Wärmeerzeugung mittels Power-to-Heat (PtH) Technologien können die Treibhausgasemissionen des Wärmesektors signifikant reduziert werden [2]. Neben der Bereitstellung von CO₂-freier Wärme können PtH-Technologien einen Beitrag zur netzdienlichen Integration volatiler regenerativer Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie leisten. Eine vielversprechende PtH-Technologie sind Wärmepumpen, die mit transkritischen CO₂-Prozessen betrieben werden. Die besondere Eigenschaft von CO₂ als Arbeitsfluid im Vergleich zu anderen Fluiden liegt in der Möglichkeit der Wärmebereitstellung bei Temperaturen von bis zu 180 °C bei gleichzeitiger ökologischer Unbedenklichkeit des Arbeitsmittels. Das obere Temperaturniveau ist somit geeignet Fernwärme oder industrielle Prozesswärme bereit zu stellen, die bisher vorwiegend durch den Einsatz fossiler Brennstoffe erzeugt wurde. Gegenüber der isothermen Wärmeübertragung, die Wärmepumpenprozesse mit alternativen Arbeitsfluiden (z. B. Ammoniak, H(C)FO, etc.) charakterisiert, ist die gleitende Temperaturänderung des überkritischen CO₂ für sensible Erwärmungsprozesse von z. B. Luft oder Wasser exergetisch vorteilhaft [3]. Darüber hinaus bietet das untere Temperaturniveau des Prozesses das Potential, Nutzkälte zu generieren [4]. Somit können transkritische CO₂-Prozesse zur effizienten Wärme- und Kältebereitstellung eingesetzt werden. Wird die erzeugte Wärme zwischengespeichert und der Wärmepumpenprozess um einen Wärmekraftmaschinenprozess ergänzt, kann die erzeugte Wärme bedarfsgerecht rückverstromt werden. Dieses integrierte System kann somit als elektrothermischer Energiespeicher (kurz: ETES) eingesetzt werden. Ein Beispiel für diese innovative Technologie stellt das ETES-System der Firma MAN Energy Solutions dar.

Im Rahmen einer vom Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW) geförderten Durchführbarkeitsstudie wird die potentielle Nutzung eines solchen ETES-Systems zur Fernwärmebereitstellung und als Stromspeicherlösung derzeit technisch und ökonomisch für einen Standort im Großraum Aachen untersucht. Darüber hinaus wird das Anwendungspotential dieser Technologie in NRW analysiert. Im Rahmen des vorliegenden Manuskripts werden ausgewählte Zwischenergebnisse der Potentialstudie hinsichtlich der Integration der ETES-Wärmepumpentechnologie in vorhandene Fernwärmenetze sowie die vielfältige Industrielandschaft in NRW präsentiert. Die Ergebnisse geben Rückschlüsse über geeignete Branchen, deren wichtigste Prozesse, Wärme- und Kältebedarfe, die entsprechenden Temperaturniveaus und das benutzte Wärme- oder Kälteübertragungsmedium. Mit Hilfe dieser Informationen und der Kenntnis der technischen Randbedingungen des ETES-Systems kann das Potential hinsichtlich der Wärme- und Kältebereitstellung in NRW abgeleitet werden. Aufgrund der breiten Industrielandschaft in NRW ist eine Extrapolation auf weitere Industrieregionen möglich.

2 Methodik zur Bestimmung der industriellen Wärme- und Kältebedarfe, dazugehöriger Temperaturniveaus sowie Leistungs-Kennfelder

Die Recherche der Wärme- und Kältebedarfe verschiedener industrieller Prozesse und die dazugehörigen Versorgungstemperaturen folgt dem in Abbildung 1 visualisierten „Top-Down“-Ansatz.

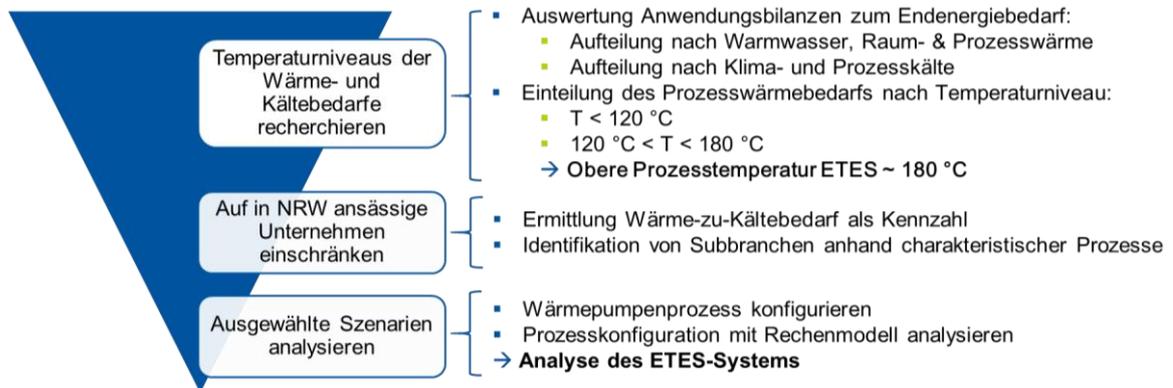


Abbildung 1: "Top-Down"-Ansatz der Potentialstudie

Um die industriellen Wärme- und Kältebedarfe abzuschätzen, können aus den Anwendungsbilanzen für Endenergiebedarfe die nach erbrachter Dienstleistung aufgeschlüsselten Endenergiebedarfe verschiedener Sektoren entnommen werden [5]. Als Formen der Endenergie werden beispielsweise Strom, Brennstoffe sowie Fernwärme betrachtet und jeweils nach bereitgestellter Dienstleistung (bzw. Nutzenergieform), beispielsweise Raumwärme, Prozesskälte oder Beleuchtung, aufgetragen. Eine detaillierte Auflistung der Endenergiebedarfe im Industriesektor nach Branchen ist in [6] gegeben. Da jedoch Endenergiebedarfe berücksichtigt werden, die lediglich nach ihrem Anwendungszweck kategorisiert sind, müssen für die Berechnung der tatsächlichen Bedarfe an Wärme und Kälte Annahmen für die Umwandlungsverluste von Endenergie in Nutzenergie getroffen werden. Im Rahmen der vorliegenden Analyse wurden folgende Annahmen getroffen:

- Umwandlung von Strom und Brennstoff in Wärme (Prozesswärme, Raumwärme, Warmwasser) verlustfrei mit einem Wirkungsgrad von 1
- Umwandlung von Strom in Klimakälte (ca. 0 °C) mit einem $EER^2 \sim 4,2$ [7]
- Umwandlung von Strom in Prozesskälte (ca. -25 °C) mit einem $EER \sim 1,4$ [7]

Zur Abschätzung der Eignung des ETES-Systems zur Bereitstellung der notwendigen Wärme und/oder Kälte für die jeweilige Industriebranche ist eine weitergehende Analyse der Temperaturniveaus, auf denen die verschiedenen Nutzenenergien bereitgestellt werden, notwendig. Die relativen Anteile des Prozesswärmebedarfs unter Berücksichtigung des benötigten Temperaturniveaus können aus [9] entnommen werden. In Kombination mit den Endenergiebedarfen lassen sich vielversprechende Branchen aus dem Industriesektor identifizieren. Diese weisen einen hohen Wärmebedarf bei

² Energy Efficiency Ratio: Verhältnis von Kälteleistung und zugeführter elektrischer Leistung

Temperaturen unterhalb von 180 °C und bestenfalls einen signifikanten Kältebedarf auf. Zur Bewertung wird für die verschiedenen Branchen das Wärme-zu-Kälte-Verhältnis γ_{WK} unter Berücksichtigung verschiedener Wärmeversorgungstemperaturen ausgewertet.

$$\gamma_{WK}(T) = \frac{\dot{Q}_W(T)}{\dot{Q}_K}$$

Je näher das Wärme-zu-Kälte-Verhältnis γ_{WK} einer Branche an dem durch den thermodynamischen Prozess des ETES-Systems definierten Wertebereich liegt, desto besser ist die ETES-Wärmepumpe zur gleichzeitigen Wärme- und Kältebereitstellung für Prozesse dieser Branche geeignet.

Die vielversprechenden Branchen (z. B. *Lebensmittel und Tabak*) werden in einem weiteren Schritt anhand charakteristischer Prozesse (z. B. *Säuberung, Pasteurisieren, etc.*) und Wertschöpfungen einzelner Subbranchen (z. B. *Brauereien, Molkereien, etc.*) weiter untersucht. Neben der Zuordnung charakteristischer Prozesse und deren Temperaturniveaus der Wärme- und Kältebedarfe wird ebenfalls das Wärme- oder Kälteübertragungsmedium berücksichtigt, welches typischerweise für den Industrieprozess verwendet wird. Darüber hinaus werden die anteiligen Wärmebedarfe der einzelnen Prozesse am Energiebedarf eines typischen industriellen Wertschöpfungsprozesses anhand branchenüblicher Kennzahlen ausgewertet. Aus dem Abgleich der notwendigen Versorgungstemperaturen und anteiligen Energiebedarfe mit den maximalen Vorlauftemperaturen der ETES-Wärmepumpe kann das theoretische Potential zur Versorgung des jeweiligen Industrieprozesses abgeleitet werden.

Neben der Analyse des allgemeinen Integrationspotentials in verschiedene Industrieprozesse wird die Industrielandschaft in NRW anhand der größten Vertreter der geeigneten Industriebranchen untersucht. Durch Kombination öffentlich zugänglicher Kennzahlen der jeweiligen Produktionsstätte oder eines ermittelten branchenüblichen Werts (z. B. Liter Bier pro Wärmeeintrag) und der am Standort produzierten Menge kann der Energiebedarf des jeweiligen Standortes abgeschätzt werden. Da die Leistungsklasse der ETES-Wärmepumpe 2,5 MW_{el} nicht unterschreiten sollte, sind nur hinreichend große Produktionsstandorte für die Nutzung eines ETES-Systems geeignet. Die Industriestandorte werden in einer Karte zusammenfassend dargestellt, bei der die Größe der Standortmarkierung der Größe des Wärme- oder Wärme- und Kältebedarfs entspricht.

Zur Bestimmung des thermodynamischen Potentials des ETES-Systems, wird der Coefficient of Performance (COP) der ETES-Wärmepumpe für verschiedene technische Randbedingungen ausgewertet. Als Werkzeug dient dabei ein stationäres Prozessmodell [8]. Mithilfe des Prozessmodells kann die thermodynamische Leistungsfähigkeit des Systems im nominellen Betriebspunkt für verschiedene Konfigurationen und äußere Randbedingungen berechnet werden. Durch eine Variation der für die Effizienz der Wärmepumpe entscheidenden Randbedingungen und Parameter, insbesondere Vorlauf- und Rücklauftemperaturen des Wärmesenkenmediums, Rücklauftemperaturen des Wärmequellenmediums und Pinch-Temperaturen in den Wärmeübertragern, werden der maximal mögliche COP und der dazugehörige obere Prozessdruck dargestellt. Anhand der resultierenden Kennfelder kann die Leistungsfähigkeit des ETES-Systems abgeschätzt werden.

3 Ergebnisse

Für die Auswertung des Potentials der ETES-Wärmepumpentechnologie im Raum NRW werden im Folgenden die Ergebnisse des „Top-Down“-Ansatzes vorgestellt.

Abbildung 2 präsentiert die Ergebnisse der Kopplung von Endenergiebedarfen, Anwendungsbilanzen und den entsprechenden Temperaturniveaus für die verschiedenen Industriebranchen in Deutschland.

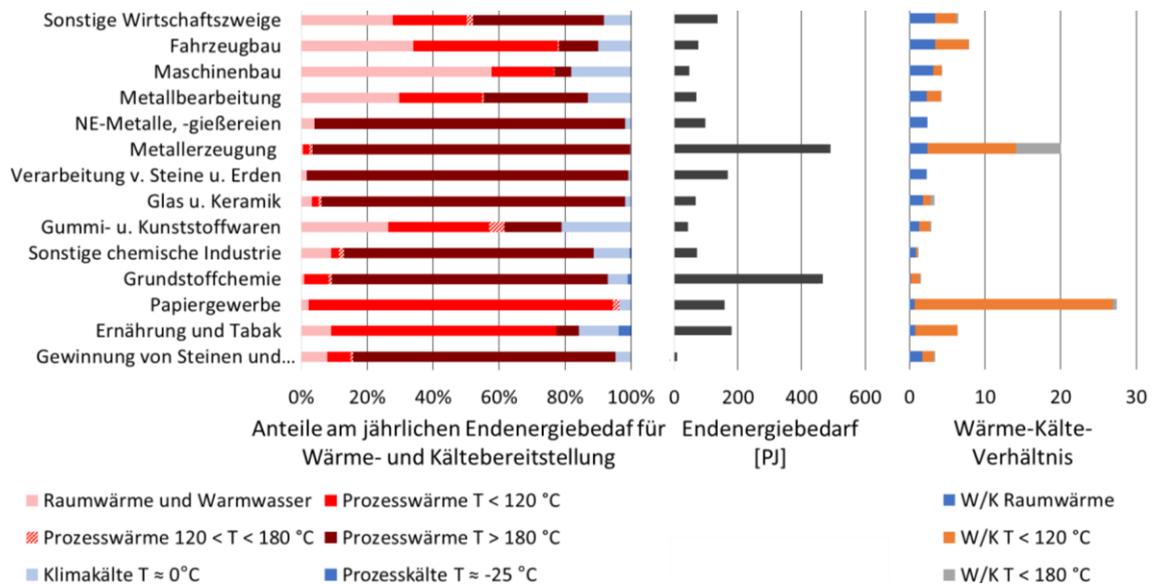


Abbildung 2: Relative Wärme- und Kältebedarfe, Temperaturniveaus (links), Endenergiebedarf (mitte) und Wärme-Kälte-Verhältnisse (rechts) verschiedener Industriebranchen in Deutschland

Aufgrund der technischen Randbedingungen der ETES-Wärmepumpe kann eine Versorgung von Wärmebedarfen theoretisch bis 180 °C, ökonomisch sinnvoll bis 150 °C sowie die Versorgung mit Klimakälte (~ 0 °C) dargestellt werden. Unter Berücksichtigung dieser Spezifikationen lässt sich das theoretische Potential der zu versorgenden Wärme- und Kältebedarfe der Industriebranchen durch eine ETES-Wärmepumpe abschätzen. Dieses Potential summiert sich deutschlandweit auf 603,7 PJ/a Wärme ($T < 180$ °C) und 114,3 PJ/a Kälte ($T \geq 0$ °C). Hierbei sind die Branchen mit einem hohen Wärmeanteil unterhalb von 180 °C, bzw. 150 °C besonders gut geeignet. Dazu zählen *Fahrzeugbau*, *Maschinenbau*, *Metallbearbeitung*, *Gummi- und Kunststoffwaren*, *Papiergewerbe* und *Ernährung und Tabak*. Diese Branchen bieten ein theoretisches Potential von 452 PJ/a Wärme (ca. 75 % der Gesamtwärme) und 61,6 PJ/a Kälte (ca. 54 % der Gesamtkälte).

Eine besonders effiziente Integrationsmöglichkeit bieten vor allem diejenigen Branchen, die ebenfalls einen hohen Kältebedarf im relevanten Temperaturbereich vorweisen. Aus der Thermodynamik des Wärmepumpenprozesses ergibt sich ein optimales Verhältnis der bereitzustellenden Wärme-zu-Kälte γ_{WK} je nach betrachtetem Temperaturbereich auf der Seite der Wärmesenke von ca. 0,5 bis 2. Die Bewertung der Industriebranchen nach dem Wärme-zu-Kälte-Verhältnis ist in Abbildung 2 rechts dargestellt. Es fällt auf, dass für die ausschließliche Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser das Wärme-zu-Kälte-Verhältnis nahe 1 ist. Allerdings ist die Frage nach dem Temperaturniveau der Warmwasserversorgung kritisch zu bewerten. Falls dieses zu niedrig liegt, ist die alleinige Versorgung durch eine ETES-Wärmepumpe thermodynamisch ggf. nicht sinnvoll. Die

Warmwasserversorgung kann aber als „Add-On“ bei der Versorgung des Prozesswärmebedarfs im Bereich $T_{VL} \leq 120 \text{ °C}$ berücksichtigt werden. Somit können insbesondere die Branchen *Fahrzeugbau*, *Maschinenbau*, *Metallbearbeitung*, *Gummi- und Kunststoffwaren* und *Ernährung und Tabak* als thermodynamisch besonders geeignet identifiziert werden. Diese Branchen bieten ein theoretisches Potential von 56 PJ/a Kälte (ca. 49 % der Gesamtkälte). Aufgrund der vielfältigen Produktionsprozesse innerhalb der Industriebranchen *Maschinenbau*, *Metallbearbeitung* und *Gummi- und Kunststoffwaren* werden diese im Folgenden nicht weiter betrachtet. Obwohl das *Papiergewerbe* keine großen Kältemengen benötigt, liegt ein großer Anteil der Wärme im passenden Temperaturbereich zur Versorgung durch die ETES-Wärmepumpe vor. Deshalb wird diese Industriebranche auch weiterhin berücksichtigt.

Die vielversprechendsten Branchen werden in Subbranchen eingeteilt und die charakteristischen Prozesse nach dem notwendigen Temperaturniveau, dem Wärme- oder Kälteüberträgermedium und dem Anteil am Gesamtenergiebedarf eines typischen Produktionsstandorts untersucht. Hierbei sind für die weitere Auswertung des Anwendungspotentials zwei Einschränkungen zu berücksichtigen: Die untere Leistungsgrenze der ETES-Wärmepumpe ist mit $2,5 \text{ MW}_{el}$ festgesetzt. Darüber hinaus ist nicht jede Subbranche durch einheitliche Prozesse definiert, so dass beispielsweise in der *Zuckerindustrie* je nach Produkt unterschiedliche maximale Wärmeversorgungstemperaturen notwendig sind. Die beiden Einschränkungen führen zu einer Fokussierung auf die Subbranchen *Molkerei*, *Brauerei*, *Zuckerherstellung* aus den Industriezweigen *Ernährung und Tabak* sowie das *Papiergewerbe*. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt.

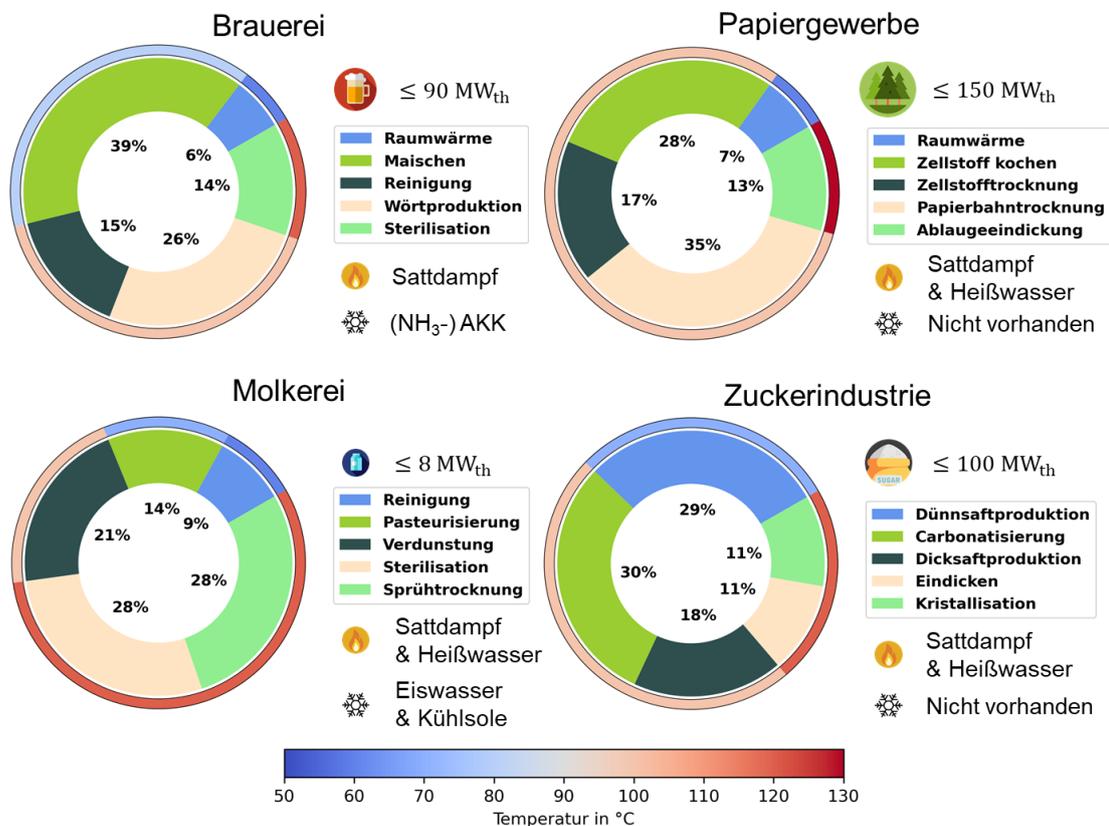


Abbildung 3: Relative Wärme- und Kältebedarfe, Temperaturniveaus, Leistungsklassen, Wärme- und Kälteüberträgermedium von charakteristischen Prozessen vielversprechender Industriesubbranchen

Aus Abbildung 3 wird deutlich, dass ein Großteil des Wärmebedarfs (nahezu 100 %³) der vier betrachteten Industriesubbranchen innerhalb des relevanten Temperaturbereichs der ETES-Wärmepumpe liegt. Auch die Größenordnung einzelner Produktionsstandorte im Raum NRW birgt die Möglichkeit, die ETES-Wärmepumpe im effizienten Multi-MW Maßstab zu implementieren. Die wichtigste Frage, die bei einem konkreten Anwendungsfall jedoch beantwortet werden muss, ist, inwieweit das Wärmeträgermedium Sattdampf, welches in Industrieprozessen häufig eingesetzt wird, durch Heißwasser ersetzt werden kann. Da der exergetische Vorteil der gleitenden Temperaturänderung an ein sensibles Wärmeträgermedium bei einem isothermen Verdampfungsprozess verloren geht, ist das ETES-System zur Dampfproduktion nicht geeignet. Die Frage nach der Austauschbarkeit des Wärmeträgermediums kann jedoch mithilfe der vorhandenen Literatur nicht hinreichend beantwortet werden und bedarf standortspezifische Informationen, die im Rahmen dieser Analyse nicht vorliegen.

Darüber hinaus muss erwähnt werden, dass die dargestellten Subbranchen und Prozesse bestenfalls einen Querschnitt darstellen und nicht als Abbild eines Produktionsstandorts missverstanden werden sollen. Zur Klärung, in welche Prozesse ein ETES-System integriert werden kann, müssen im Einzelfall weitere standortspezifische Merkmale geprüft werden.

In einem weiteren Analyseschritt wurden diejenigen Industriesubbranchen in NRW recherchiert, die den Wärme- und Kälteanforderungen sowie passenden Temperaturniveaus und der Leistungsklasse des ETES-Systems genügen. Darüber hinaus wurden Fernwärmenetze und zusätzliche Kälteabnehmer wie große Krankenhäuser, Einkaufszentren und Datenzentren im Raum NRW recherchiert. Die Ergebnisse dieser Recherche sind in einer interaktiven Karte dokumentiert, die in Abbildung 4 dargestellt ist.

Die Größen der einzelnen Symbole relativ zueinander skalieren mit der Größenordnung des Wärme- und Kältebedarfs, der mithilfe der charakteristischen Kennzahlen der einzelnen Industriesubbranchen berechnet worden ist.

³ Charakteristische Prozesse innerhalb der vielversprechenden Industriesubbranchen, die eine sehr hohe Temperatur benötigen (z. B. Kalksteinbrand in der Zuckerindustrie bei ~ 1100 °C [10]), aber nur einen geringen Anteil am Gesamtwärmebedarf einnehmen, wurden in Abbildung 3 vernachlässigt.

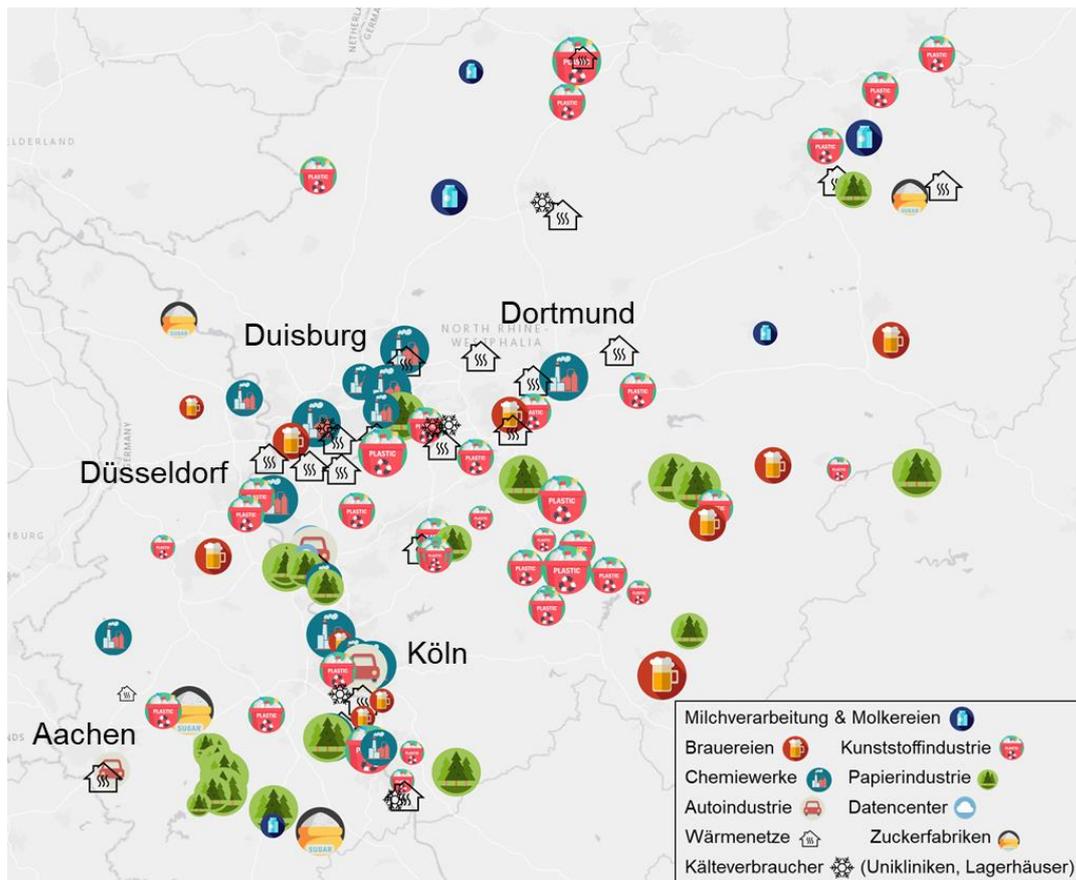


Abbildung 4: Potentielle Industriesubbranchen-Standorte in NRW, die potentiell mit einer ETES-Wärmepumpe versorgt werden könnten

Auffällig ist die Vielfältigkeit des Industriestandortes NRW, die sich vor allem rund um das Ruhrgebiet in Form von verschiedensten Industriebranchen und weitreichenden Fernwärmenetzen zeigt. Das Fernwärmepotential der recherchierten 22 Fernwärmenetze summiert sich zu 10220 GWh/a mit nominellen Wärmeleistungen zwischen 8 bis über 1100 MW. Darüber hinaus bietet der prospektiv steigende Bedarf an Datenzentren die Möglichkeit, vor allem in unmittelbarer Nähe zu Ballungszentren (mit entsprechendem Wärmebedarf) eine effiziente Nutzung der Klimakälte der ETES-Wärmepumpe zu realisieren. Schon jetzt beträgt der Energiebedarf für Server und Rechenzentren in Deutschland ca. 14000 GWh/a, wovon ca. 16 % (ca. 2270 GWh/a) in Form von Kühlung und Klimakälte (Stand 2018) anfallen [11].

Um die Potentialanalyse der Integration einer ETES-Wärmepumpe aus thermodynamischer Sicht abzuschließen, wurde mithilfe eines stationären Prozessmodells eine Parameterstudie für verschiedene betriebliche Randbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 5 dargestellt. Hierbei muss erwähnt werden, dass Abbildung 5 die thermodynamische Leistungsfähigkeit unter Berücksichtigung von Turbomaschinen-, Druck- und Wärmeübertragungsverlusten darstellt, in Realität aber weitere Verluste (z. B. durch Pumpen, Motor, etc.) auftreten.

Die beiden Konfigurationen stellen dabei die thermodynamisch sinnvollsten Varianten für die jeweiligen Rücklauftemperaturen der Wärmesenke dar. Für Vorlauftemperaturen bis zu 180 °C müsste für beide Konfigurationen ein zweiter Wärmeübertrager für die Wärmesenke berücksichtigt werden.

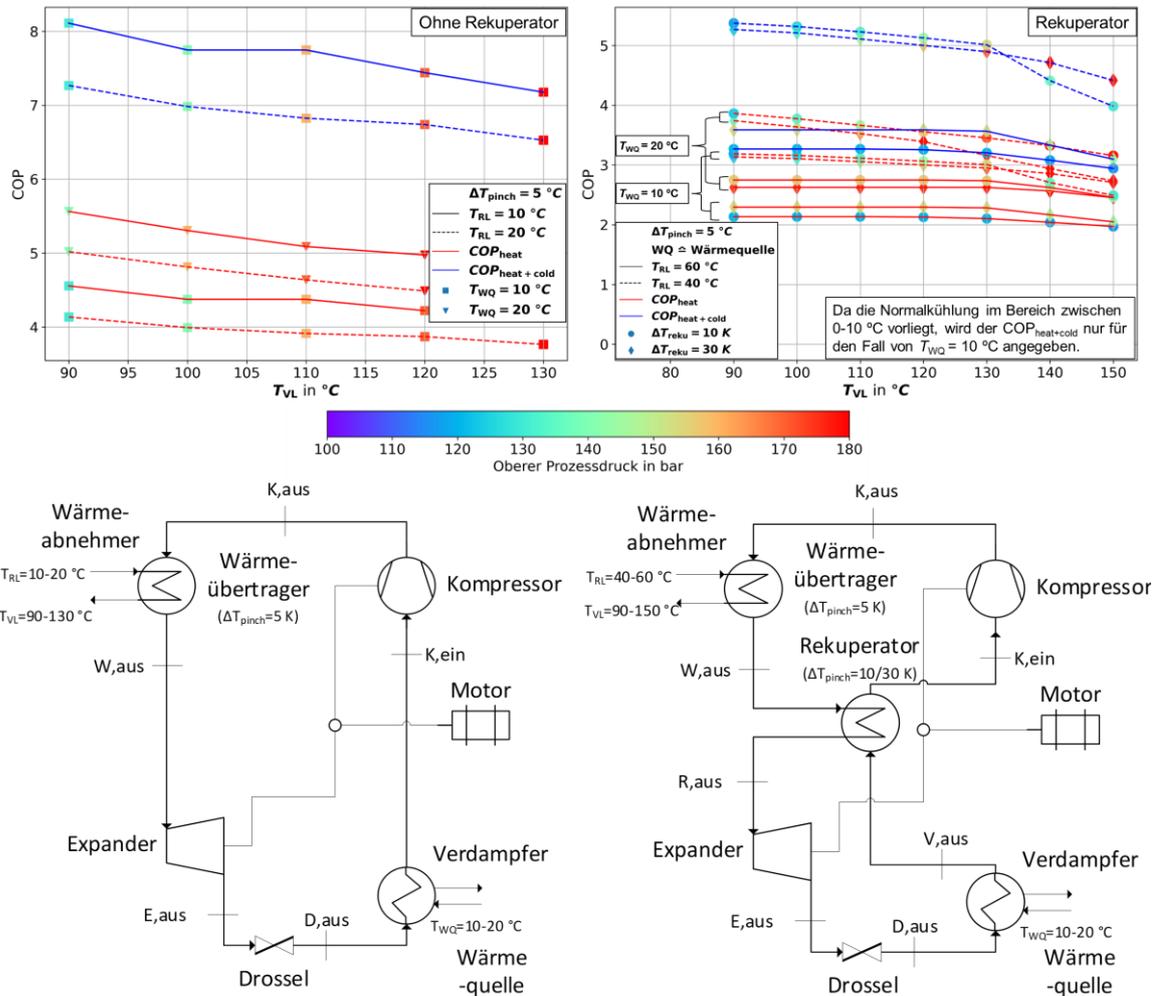


Abbildung 5: Kennfelder für ETES-Wärmepumpe ohne Rekuperator (links) und mit Rekuperator (rechts)

Die dargestellten Rücklauftemperaturen (10-20 & 40-60 °C) der Wärmesenken bilden hierbei einen offenen (z. B. Brauereien [13] oder Papiergewerbe [14]) und einen geschlossenen (z. B. Zuckerfabrik [13] Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.) Wasserkreislauf ab. Weiterhin wurden zwischen der alleinigen Nutzung der Wärme und der kombinierten Nutzung von Wärme und Kälte unterschieden. Der maximale COP liegt in Abhängigkeit der Randbedingungen für die Rekuperator-Konfiguration zwischen 2 bis 4 bei ausschließlicher Nutzung von Wärme und über 5 bei der Nutzung von Wärme und Kälte. Für die Konfiguration ohne Rekuperator ergeben sich in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur COPs zwischen 2 bis 5,5 bei ausschließlicher Nutzung von Wärme und über 8 bei der Nutzung von Wärme und Kälte. Die Abnahme des COPs mit steigendem Temperaturhub, also dem Anheben der geforderten Vorlauftemperatur bei sonst gleichbleibenden Parametern, insbesondere bei gleicher Wärmequellentemperatur, ist gut erkennbar.

Mithilfe der Kennfelder kann nun für die jeweilige Industriebranche, bzw. die charakteristischen Prozesse der Industriesubbranchen der COP für die ausschließliche Wärme- oder die gekoppelte Wärme- und Kälteversorgung ausgewiesen werden. Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Emissionsfaktoren des Strombezugs und unter Berücksichtigung von Konkurrenztechnologien kann das CO_2 -

Emissionsminderungspotential für die Integration einer ETES-Wärmepumpe ebenfalls individuell abgeschätzt werden.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Analyse der Temperaturniveaus und Energiebedarfe von Industriebranchen zeigt, dass sich neben der Bereitstellung von Fernwärme insbesondere die Autoindustrie, Chemiewerke, Kunststoffindustrie, Papierindustrie und die Lebensmittelbranche für den Einsatz eines ETES-Systems eignen.

Dies ist darin begründet, dass die Wärme- und Kältebedarfe im richtigen Temperaturbereich und in hinreichend großer Menge vorliegen. Des Weiteren liegen in diesen Industriebranchen häufig sensible Aufheizvorgänge eines Wärmeträgermediums (z. B. von Wasser oder Luft) vor, die aufgrund des gleitenden Temperaturübergangs auf der wärmeabgebenden Seite des ETES-Systems exergetisch besonders günstig bereitgestellt werden können. Da die Wärmepumpe prozessbedingt Wärme und Kälte in den gleichen Größenordnungen bereitstellt und in jeder betrachteten Industriebranche der Bedarf an Wärme größer ist als der Bedarf an Kälte, sollte das System generell für den Kältebedarf ausgelegt werden, sofern Wärme und Kälte gleichzeitig bereitgestellt werden sollen.

Als vielversprechendster Anwendungsfall kann die Lebensmittelbranche identifiziert werden, in der circa 90 % der Gesamtwärme bei Temperaturen unterhalb von 120 °C auftreten sowie ein verhältnismäßig kleines Wärme-zu-Kälte-Verhältnis von ungefähr 6 vorliegt. Darüber hinaus bietet die Papierindustrie die Möglichkeit, 96 % (Wärme \leq 180 °C) bzw. 98 % (Wärme \leq 180 °C) des Gesamtwärmebedarfs durch ein ETES-System bereitzustellen.

Die Integrationsmöglichkeit des ETES-Systems hängt stark von der örtlichen Ausführung des bestehenden Wärmeversorgungssystems ab. In vielen Fällen werden bisher kostengünstige Gaskessel für die Dampfproduktion genutzt. Wenn solche Systeme vorliegen, kann das ETES-System nicht ohne Anpassungen in die bestehende Infrastruktur integriert werden, da sich eine Dampferzeugung durch das ETES-System nicht anbietet. Sollte jedoch eine Heißwasserschleife genutzt werden, stellt das ETES-System eine gute Möglichkeit dar, bestehende Wärminfrastruktur durch eine klimaneutrale Lösung zu ersetzen.

Die Leistungsfähigkeit des ETES-Systems hängt wie die Integrationsmöglichkeit stark von den örtlichen Randbedingungen ab und liegt im Bereich zwischen 2 (nur Heißwasser) und 8 (bei Nutzung von Hochtemperatur- und Niedertemperaturwärme sowie Kälte).

Zusammenfassend zeigt die Analyse, dass in NRW aufgrund der vielfältigen Industrielandschaft ein großes Integrationspotential für ETES-Systeme vorliegt. Es wird jedoch auch deutlich, dass dieses Potential sich in Bezug auf den COP aufgrund von standortspezifischen Randbedingungen stark unterscheiden kann. Deshalb können die vorgestellten Ergebnisse nur als theoretisches Potential angesehen werden. Eine umfassende Aussage über individuelle Potentiale kann nur mithilfe von detaillierten Informationen eines Produktionsstandortes getroffen werden.

Neben den beschriebenen technischen Restriktionen sind auch die energiewirtschaftlichen Randbedingungen bei der Potentialbewertung von ETES-Systemen zu beachten. Die in [8] veröffentlichte Analyse der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Deutschland zeigt, dass diese stark von der jeweiligen Versorgungssituation und der damit einhergehenden Höhe der Steuern, Abgaben und Umlagen des Strombezugs beeinflusst werden. Stromerzeugungsanlagen, die eine Förderung über das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) oder das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG) erhalten, können in der Regel nicht für die Eigenversorgung verwendet werden, ohne die jeweilige Förderung zu verlieren. Eine Eigenversorgungskonstellation des Wärmepumpenprozesses mittels EEG- oder KWKG-Anlagen, die aus der Förderung gefallen sind (sogenannte Post-EEG- und Post-KWKG-Anlagen), stellt deshalb derzeit die kostengünstigste Variante dar. In diesem Fall entfallen Netzentgelte und es ist nur eine verminderte oder gar keine EEG-Umlage auf den Strombezug zu entrichten. Als Alternative dazu bietet die bilanzielle Kopplung einer ETES-Wärmepumpe mit einer lokalen KWK-Anlage größer 10 MW_{el} die Möglichkeit, den sogenannten KWK-Bonus für innovative Wärme für den von der KWK-Anlage ins Netz eingespeisten Strom zu erhalten. Dieser Bonus kann einen attraktiven Hebel für die Wirtschaftlichkeit von Großwärmepumpen insbesondere bei ungünstiger Stromversorgungssituation durch Netzbezug darstellen.

Mit Blick auf die zukünftigen Entwicklungen der Energiewirtschaft in Deutschland und Europa hinsichtlich CO₂-Bepreisung, Kosten für fossile Brennstoffe und Umlagenbefreiungen für emissionsfreie Technologien, die netzdienlich betrieben werden können, wird das ETES-System als Wärmeversorgungstechnologie darüber hinaus im Vergleich zu fossilen Erzeugungstechnologien zunehmend bessergestellt werden.

5 Referenzen

- [1] REN21. RENEWABLES 2021. GLOBAL STATUS REPORT. URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf. Zugegriffen: 18.01.2022.
- [2] Silvia Madeddu, Falko Ueckerdt, Michaja Pehl, Jürgen Peterseim, Michael Lord, Karthik Ajith Kumarn et al. The CO₂ reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat). In *Environmental Research Letters* 15 (12), p. 124004. 2020. DOI: 10.1088/1748-9326/abbd02.
- [3] Rajib Rony, Huojun Yang, Sumathy Krishnan, Jongchul Song. Recent Advances in Transcritical CO₂ (R744) Heat Pump System: A Review. In: *Energies* 12 (2019), 3, 457.
- [4] Luis Sanz Garcia, Emmanuel Jacquemoud, Philipp Jenny. THERMO-ECONOMIC HEAT EXCHANGER OPTIMIZATION FOR ELECTRO-THERMAL ENERGY STORAGE BASED ON TRANSCRITICAL CO₂ CYCLES. In: 3rd European supercritical CO₂ Conference (2019), 353-362.
- [5] AG Energiebilanzen e.V. Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. 2018.
- [6] Fraunhofer ISI. Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für die Sektoren Industrie und GHD. 2021.
- [7] Reftec. Leistungszahlen für Kälte-, Klima- und Wärmepumpensysteme. URL: <http://www.reftec.ch/downloads/Leistungszahlen.pdf> - Zugegriffen: 25.01.2022.
- [8] Nils Petersen, Tobias Sieker, Thomas Bexten, Manfred Wirsum, Thomas Polklas, Emmanuel Jacquemoud, Mario Restelli und Philipp Jenny. Nutzung transkritischer CO₂-Prozesse für Wärmepumpen und elektro-thermische Energiespeicher. In: *Kraftwerkstechnik 2021 – Sektorenkopplung*, 1388-1403. ISBN: 978-3-949169-02-1.

- [9] Britta Kleinertz, Anna Gruber, Frank Veitengruber, Michael Kolb, Serafin von Roon. Flexibility potential of industrial thermal networks through hybridization. 2019.
- [10] Sarah Gühl, Marcel Schwarz und Matthias Schimmel. Energiewende in der Industrie – Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor – Branchensteckbrief der Nahrungsmittelindustrie. 2019.
- [11] Alexandra Pehlken, Ralph Hintemann, Fernando Penaherrera, Volkan Gizli, Karsten Hurrelmann, Simon Hinterholzer, Kerstin Kuchta, Arina Kosheleva, Hans Kaiser, Fridtjof Chwoyka, Gerald Kielmann, Hans Jürgen Wilde, Steffen Leukroth, Dirk Frerichs, und Anton Daumlechner. Total Energy Management for Professional Data Center – Ganzheitliches Energiemanagement in professionellen Rechenzentren. Abschlussbericht Verbundprojekt TEMPRO. 2019.
- [12] Saur Energy International. Dairy Industry Exemplary to Exploit Solar Process Heat. URL: <https://www.saurenergy.com/solar-energy-articles/dairy-industry-exemplary-to-exploit-solar-process-heat> – Zugriffen: 08.02.2022.
- [13] Michael Ohl. Analyse der Einsatzpotenziale von Wärmeerzeugungstechniken in industriellen Anwendungen. Dissertation. 2016.
- [14] Wasser im Papierprozess.... Papier + Technik (10.06.2010). URL: <https://www.papierundtechnik.de/papiertechnik/wasser-im-papierprozess/> – Zugriffen: 08.02.2022.

6 Anhang

Tab. 1: Quellenangabe der Wärme- und Kältebedarfe und Temperaturniveaus verschiedener Industrieprozesse

Branche	Subbranche	Prozess	Temperatur [°C]	Anteil am Energiebedarf [%]
Lebensmittel	Molkerei / Milchverarbeitung [12]	Pasteurisierung	70	14
		Sterilisation	120	28
		Sprühtrocknung	120	28
		Verdampfung	100	21
		Reinigung	60	9
	Brauerei [13]	Würzebereitung	100	25,6
		Maischen	78	39,1
		Sterilisation AA	120	13,6
		Reinigung	80-120	15,3
		Raumwärme	60	6,4
	Zuckerfabrik [13]	Dünnsafterzeugung	70	29
		Dicksafterzeugung	100	30
		Eindicken	120	11
		Kristallisation	120	11
		Carbonatation	100	18

Branche	Subbranche	Prozess	Temperatur [°C]	Anteil am Energiebedarf [%]
Papier	Faserstoffherstellung [13]	Zellstoff kochen	100	28
		Ablaugeeindickung	130	13
		Zellstofftrocknung	100	17
		Papierbahntrocknung	100	35
		Raumwärme	60	7
	Blattbildung / Papiermaschine			
Maschinenbau	Automobilmontagewerk [13]	Lacktrocknung	200	16
		Lackieren	90	5
		Entfetten Metallteile	60	17
		Trocknen Metallteile	70	18
		Raumwärme	60	43