

# Prozesswärme mit konzentrierender Solarthermie und Hochtemperatur-Wärmepumpen

Wie kann die Kombination der Technologien zu einer vollständigen Dekarbonisierung industrieller Wärmeversorgung bis 300 °C beitragen?



**DLR**  
Dr. Panagiotis Stathopoulos  
panagiotis.stathopoulos@dlr.de

Dirk Krüger  
dirk.krueger@dlr.de

**Fraunhofer ISE**  
Dr. Peter Nitz  
peter.nitz@ise.fraunhofer.de

**KIT**  
Prof. Dr. Robert Stieglitz  
robert.stieglitz@kit.edu

Die Industrie war 2020 der Sektor mit den zweitgrößten Treibhausemissionen nach dem Energiesektor und vor dem Verkehrssektor. [1] Die emittierten 178 Mio. Tonnen CO<sub>2eq</sub> entsprechen etwa den gesamten Emissionen der Schweiz und Österreichs. Gleichzeitig hatte die Industrie den zweitgrößten Endenergieverbrauch mit 657TWh. [2] Rund 510 Terawattstunden (TWh) davon sind der Bereitstellung von Industriewärme zuzurechnen. Diese Wärme wird auf unterschiedlichen Temperaturniveaus bereitgestellt – ungefähr 35% für Wärme unter 300°C. Der vorliegende Vortrag konzentriert sich auf drei Optionen zur Dekarbonisierung von Prozesswärme bei Temperaturen unter 300°C. Diese Optionen sind:

1. konzentrierende Solarthermie (CST: Concentrating Solar Thermal)
2. industrielle Wärmepumpen
3. Kombination beider Optionen

Der Vortrag analysiert das Thema mithilfe der drei folgenden Leitfragen:

- Kann CSP industrielle Standorte in Deutschland zuverlässig mit Wärme versorgen?
- Welchen Beitrag zur industriellen Dekarbonisierung können Wärmepumpen leisten?
- Wo liegen die größten technischen und ökonomischen Hürden beider Technologien und wie kann ihre Kombination einen weiteren Beitrag leisten?

**Kann CST industrielle Standorte in Deutschland zuverlässig mit Wärme versorgen?**

Produktionsanlagen müssen kontinuierlich und unabhängig von den Wetterbedingungen mit Wärme versorgt werden. Gleichzeitig sind sie so optimiert, dass sie möglichst wenig Platz benötigen. Das führt dazu, dass die benötigte Wärmeleistung und Wärmeenergie pro Standort im Vergleich zur verfügbaren solaren Lichteinstrahlung [3] hoch ist (► *Abbildung 1*).

Dazu kommt die zeitliche Variabilität der solaren Quelle. Aus diesen Gründen ist eine kontinuierliche und vollständige Wärmeversorgung eines Industriestandortes nur mit Solarthermie nicht realistisch. Trotzdem, ist es sehr sinnvoll, den Wärmebedarf soweit wie möglich durch Solarthermie kostengünstig und klimaneutral abzudecken. Solarwärme, insbesondere aus Parabolrinnenkollektoren, kann auch in Mitteleuropa bis ca. 400°C bereitgestellt werden. Wird Solarthermie mit entsprechenden Wärmespeichersystemen kombiniert, ist ein Kapazitätsfaktor/Deckungsgrad von über 30% realistisch. Wird Solarthermie mit anderen Wärmequellen (Geothermie, industrielle Abwärme) kombiniert, sind solare Deckungsgrade von 50% realistisch.

**Welchen Beitrag zur industriellen Dekarbonisierung können Wärmepumpen leisten?**

Industrielle Wärmepumpen können eine doppelte Rolle erfüllen:

Einerseits können sie den Primärenergiebedarf der Industrie durch die Aufwertung von Abwärme drastisch reduzieren. Für jede Einheit verbrauchten Strom (Primärenergie) erzeugen sie 2–3 Einheiten Wärme. Gleichzeitig elektrifizieren sie den Wärmebedarf und somit können Sie als „enabling technology“ zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung beitragen. Momentan sind industrielle Wärmepumpen für die Wärmebereitstellung bis ca. 140–150°C kommerziell verfügbar. IEA Annex 48 hat ca. 152 Anwendungsfälle europaweit dokumentiert [4]. Trotzdem bleibt das Potenzial von industriellen Wärmepumpen zur Versorgung von Wärme bis 250°C sehr hoch. Marina et.al [5] haben abgeschätzt, dass der Einsatz von Wärmepumpen zur Wärmebereitstellung bis 200°C eine kumulierte Heizleistung von 23,0GW in der EU28 erreichen könnte, bestehend aus 4174 Wärmepumpen, die 641 PJ/a Prozesswärmebedarf decken können. Ungefähr 50% dieser Wärmepumpen werden Heizleistungen < 10MW haben.

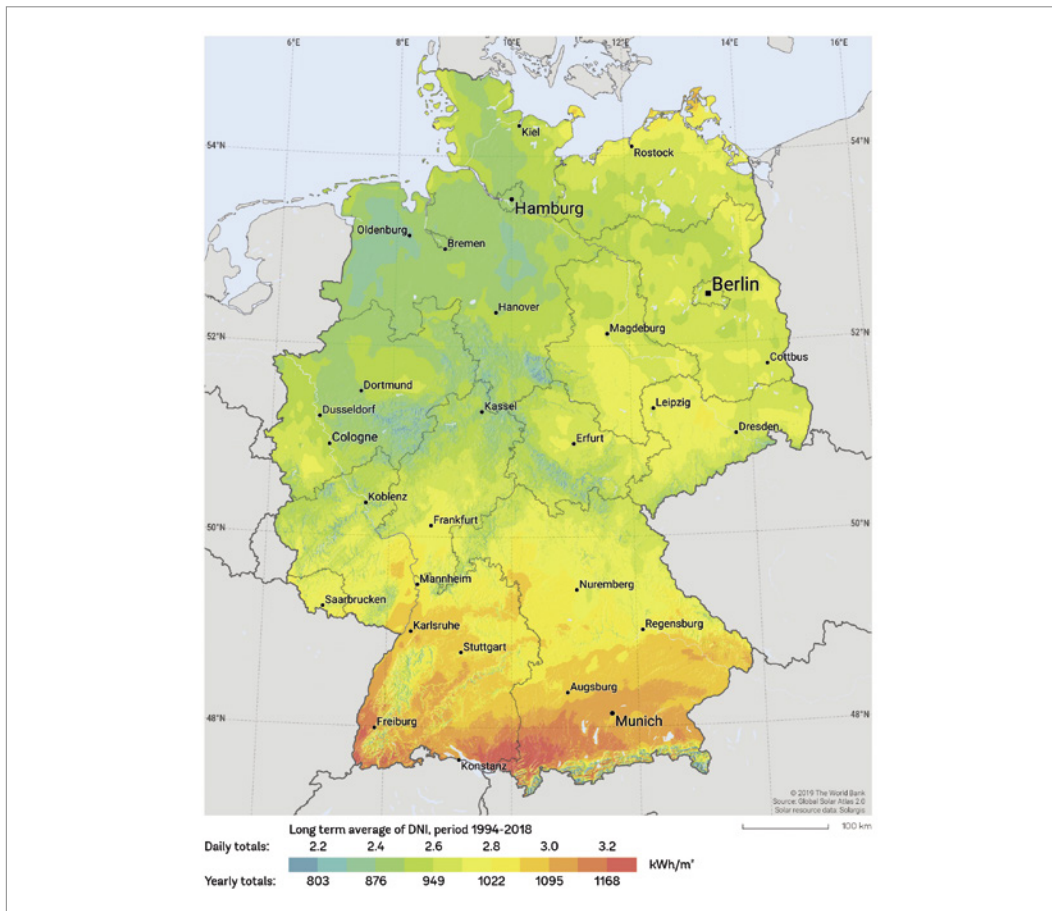


Abbildung 1

**Solareinstrahlung in Deutschland**

(Quelle: Solargis.com)

**Wo liegen die größten technischen und ökonomischen Hürden beider Technologien?**

Bis dato hat es keine der beiden Technologien geschafft fossile Primärenergieträgern in der Industrie zu ersetzen, was aber bei beiden Technologien unterschiedliche Gründe hat:

Im Fall von CST sind Investitionen in solche Systeme auch in Mitteleuropa sehr lukrativ. Abhängig vom Erdgaspreis können diese Investitionen in Parabolrinnenkollektoren in einem Zeitraum von 2–6 Jahren, amortisiert werden. Dazu ist ihr Beitrag zur Wärmeversorgung CO<sub>2</sub>-neutral.

Hier sind vor allem folgende Gründe für den limitierten Einsatz zu benennen: Einerseits ist die Energiedichte dieser Quelle sehr gering. Aus diesem Grund wird viel Aufstellfläche benötigt, die oft nicht vorhanden ist. Darüber hinaus variiert die Wärmeerzeugung von CST-Systemen sowohl im Tagesablauf als auch saisonal. Das führt dazu, dass sie entweder durch den Einsatz eines fossilen Brennstoffs oder durch die Installation von Mitteltemperaturspeichern unterstützt werden müssen. Vor allem ist die Technologie aber wenig bekannt und wurde bis vor kurzem

noch als nicht geeignet für den mitteleuropäischen Raum angesehen. Zudem beherrschen Planungsbüros die Planung dieser Technologie und die entsprechend kaum bekannten Planungstools meist noch nicht. Es gibt kaum kommerzielle Projekte, erste Referenzanlagen werden für Deutschland für 2023 erwartet.

Der Einsatz auch der kommerziell verfügbaren industriellen Wärmepumpen wurde bis dato primär durch die sehr hohen Strompreise im Vergleich zu den Erdgaspreisen verhindert. Dazu ist die Integration von solchen Systemen in existierenden Produktionsprozessen sehr aufwändig und kostspielig. Diese zwei Faktoren haben ebenfalls dazu geführt, dass kaum Technologien für höhere Liefertemperaturen entwickelt wurden. Ein weiterer Begrenzungsfaktor für den Einsatz von industriellen Wärmepumpen ist die begrenzte Verfügbarkeit von nutzbarer Abwärme. Sehr häufig fällt diese Abwärme in unterschiedlichen Teilprozessen an. Dazu ist die entsprechende Abwärmtemperatur zu tief und dadurch der Temperaturhub der Wärmepumpe zu hoch. Das führt zu tiefen Leistungszahlen und schlechterer Wirtschaftlichkeit der Ingestion (► *Abbildung 3*).

Abbildung 2  
**Parabolrinnenkollektor,  
 Oostende**  
 (Foto: Solarlite)



**Wie kann die Kombination von CST und HTWP einen weiteren Beitrag leisten?**

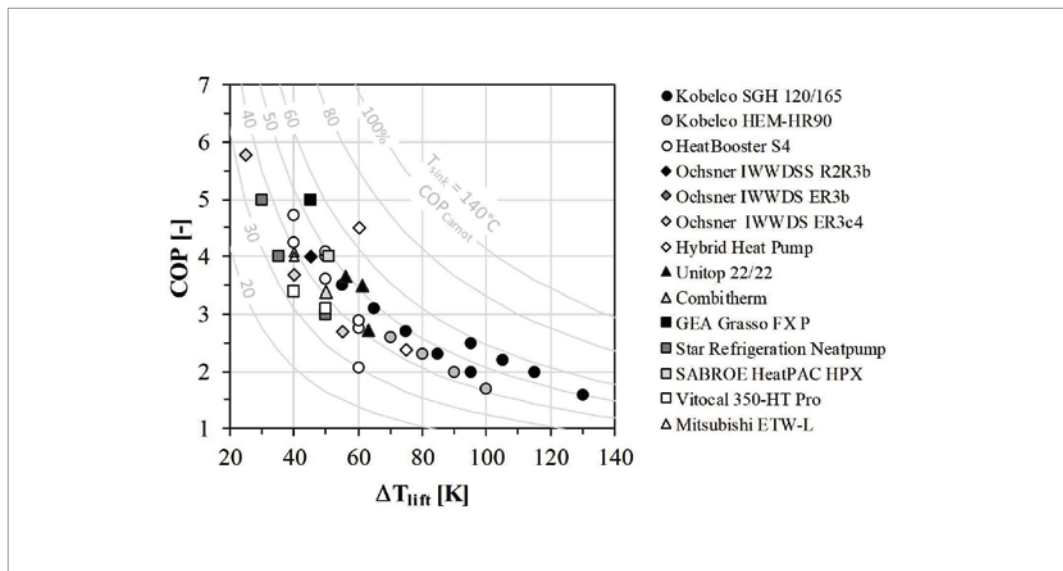
Abgesehen von den aktuellen Entwicklungen im Gas- und Strommarkt, ist eine Dekarbonisierung der industriellen Wärmeversorgung auf dem Weg zur Klimaneutralität unabdingbar. Nach den aktuellen Entscheidungen der Bundesregierung in Deutschland, wird der CO<sub>2</sub>-Preis als das Hauptinstrument gesehen, um Preissignale zu Gunsten von CO<sub>2</sub>-neutralen Energieträgern zu erzeugen und das Preisverhältnis zwischen Strom und Gas (bzw. fossilen Primärenergieträgern) zu beeinflussen. Es ist also absehbar, dass dieses Verhältnis früher oder später günstiger für den Einsatz von Wärmepumpen wird. Das ist bereits seit vielen Jahren der Fall in skandinavischen Ländern. Das wird nur eine Hürde zum Einsatz von Wärmepumpen bzw. CST beheben.

Die immer weitere Verbreitung beider Technologien wird ebenfalls die Entwicklung der benötigten Infrastruktur (Fachpersonal zur Wartung und Installation usw.) und die noch am Anfang stehende Kostensenkung fördern.

Parallel zu diesen Entwicklungen wird die Industrie nach und nach Energieeinsparungsmaßnahmen durchführen, die häufig zu weniger Abwärme und tieferen Abwärmemetemperaturen führen. Das wird den Einsatz von industriellen Wärmepumpen für Senktemperaturen über 150°C weiterhin erschweren, da die entsprechenden möglichen Leistungszahlen niedriger werden.

Es ist also sinnvoll, über Kaskadensysteme nachzudenken, die Abwärme erst einmal durch Solarwärme aufwerten. Solange die Solarwärme die benötigte Temperatur liefern kann, und den übergeordneten

Abbildung 3  
**Leistungszahl  
 kommerzieller  
 industrieller WP  
 mit einer  
 Senktemperatur  
 von 140°C als  
 eine Funktion des  
 Temperaturhubes**  
 (Quelle: [6])



Industrieprozess versorgen kann, ist CST das einzige System im Betrieb. Ist die Sonneneinstrahlung geringer, wird die Abwärme zuerst durch Solarwärme auf ein mittleres Temperaturniveau gehoben (z. B. 120°C) und dort gespeichert. Eine Wärmepumpe kann Wärme aus diesem Speicher nachfolgend auf das benötigte Temperaturniveau heben. Benutzt die Wärmepumpe erneuerbaren Strom, kann dieses System eine vollständige und zuverlässige Dekarbonisierung der Wärmeversorgung des entsprechenden Prozesses erreichen. Somit kann man einerseits die begrenzte Verfügbarkeit der Solarwärme durch eine entsprechende Überdimensionierung des Speichers und des CST adressieren und durch die Wärmepumpe begrenzen (die WP hat eine hohe Leistungszahl). Gleichzeitig kann man eine solche tiefe Dekarbonisierung auch für Industrieprozesse liefern, die wenig Abwärme bei tiefen bis moderaten Temperaturen haben.

## Referenzen

- [1] <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Industrie/treibhausgasemissionen-deutschland-nach-sektoren.html>
- [2] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraeger-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren>
- [3] <https://solargis.com/>
- [4] <https://waermepumpe-izw.de/karte-europa>
- [5] <https://publications.tno.nl/publication/34637767/MueE3v/marina-2021-estimation.pdf>
- [6] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218305759>