

Industrielle Prozesswärme im Kontext eines treibhausgasneutralen Energiesystems



FZ Jülich
Felix Kullmann
f.kullmann@fz-juelich.de

DBFZ
Lilli Sophia Röder
lilli.sophia.roeder@dbfz.de

DLR
Dr. Peter Kutne
peter.kutne@dlr.de

Wuppertal Institut
Dr. Georg Holtz
georg.holtz@wupperinst.org

Clemens Schneider
clemens.schneider@wupperinst.org

ZAE Bayern
Andreas Krönauer
andreas.kroenauer@zae-bayern.de

Im Rahmen einer aktuellen Studie zur Transformation des Europäischen Energiesystems zur Klimaneutralität unter Berücksichtigung der Gaskrise entwickelte das Wuppertal Institut ein Szenario (EU27+UK) für die Transformation der europäischen Industrie inklusive Raffinerien und Kokereien, in dem die industriellen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 99% gegenüber 2018 gemindert werden. Der Endenergiebedarf der Industrie sinkt in diesem Szenario durch den Einsatz von Wärmepumpen, andere Energieeffizienzmaßnahmen sowie einen Rückgang der Produktion in Raffinerien bis 2040 deutlich und der Bedarf an fossilen Gasen kann zeitnah gemindert und bis 2045 auf nahezu Null gesenkt werden (► *Abbildung 1*).

Im Rahmen dieses Szenarios erfolgte auch eine detaillierte Abbildung der Entwicklung der Prozesswärmebereitstellung in Deutschland. Die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme (< 150 °C) erfolgt im Szenario größtenteils über Wärmepumpen und Fernwärme. Solar- und Geothermie spielen eine (kleinere) Rolle. Für die Dampfbereitstellung (150–500 °C) werden vielfach hybride Strom/H₂-Kessel eingesetzt, daneben Biomasse. In der Chemieindustrie spielen auch langfristig Reststoffe aus Steamcrackern eine wichtige Rolle.

Die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme erfolgt prozessspezifisch je nach den technischen Gegebenheiten der Prozesse (z. B. H₂ in den Direktreduktionsanlagen und Biomasse in den Walzwerken der Stahlindustrie, abfallbasierte Brennstoffe v. a. in den Klinkeröfen der Zementindustrie, Biomethan und Strom in der Glasindustrie, Strom für Primär- und Sekundäraluminium). Biogene Energieträger in Kombination mit CCS (BECCS) ermöglichen in der Stahlindustrie und in der mineralischen Industrie die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme und gleichzeitig negative Emissionen zur Kompensation von Restemissionen.

Auch am Forschungszentrum Jülich wird mithilfe von Energiesystemmodellen analysiert, wie Deutschland bis 2045 Treibhausneutralität erreichen kann. In einer aktuellen Studie zeigt sich, dass gerade im Industriesektor eine tiefgreifende Transformation stattfinden muss. Der derzeit überwiegend auf

fossilen Ressourcen basierende Energieverbrauch muss auf die zunehmende Verwendung von Wasserstoff, Bioenergie und erneuerbarem Strom umgestellt werden. Insbesondere Wasserstoff und der Einsatz von Biomasse spielen für die zukünftige Prozesswärmebereitstellung eine entscheidende Rolle. In der Stahlindustrie werden im Jahr 2045 ca. 86 TWh Wasserstoff in der Wasserstoff-Direktreduktion eingesetzt (► *Abbildung 2*).

Biomasse kommt als erneuerbarer Energieträger zukünftig ebenfalls eine entscheidende Rolle bei der treibhausgasneutralen Prozesswärmebereitstellung zu. Annähernd 200 TWh Biokohle aus torrefizierter holzartiger Biomasse werden im Jahr 2045 in Industrieöfen zur Prozesswärmeerzeugung eingesetzt.

Eine weitere Möglichkeit die zukünftige Prozesswärmeerzeugung umzustellen, bzw. den Bedarf zu senken, besteht in der Nutzung von Abwärmepotenzialen. Am ZAE Bayern sind dazu Analysen durchgeführt worden, um sowohl das gesicherte nationale Abwärmepotenzial in Deutschland abzuschätzen als auch dessen technische und wirtschaftliche Nutzung zu beschreiben. (► *Abbildung 3*)

Die Analysen kommen zu dem Schluss, dass zum einen das jährliche Abwärmepotenzial auf ca. 40 PJ/a begrenzt ist und zum anderen 95% der Abwärme aus lediglich 784 Betrieben stammt. Eine Nutzbarmachung ist daher sehr stark von den regionalen Gegebenheiten abhängig und nicht für jede Branche sinnvoll. Ohne die Möglichkeit Abwärme zu nutzen, kommt der Integration von erneuerbaren Energien in bestehende Industrieprozesse eine noch bedeutendere Rolle zu.

Als großer Bestandteil der Integration erneuerbarer Energien spielt die elektrische Erzeugung von Wärme (Prozess- und Raumwärme sowie Warmwasser) eine entscheidende Rolle. Eine Methodik zur Abschätzung über die guten Elektrifizierungsmöglichkeiten thermischer Prozesse wurde 2017 durch Gruber [3] vorgestellt. Die Methodik wurde bereits für einige Prozesse angewandt und ein hohes Potenzial in der Zement-, Zucker- und Papierindustrie festgestellt.

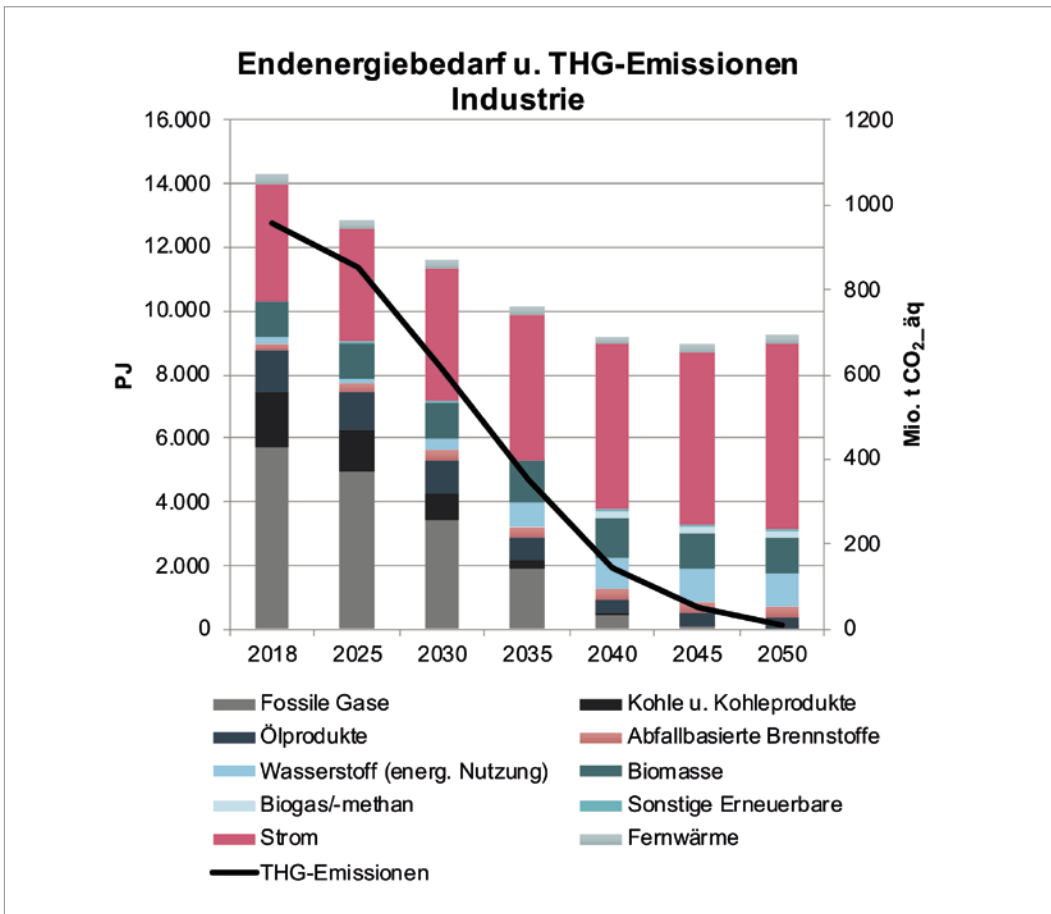


Abbildung 1
 Entwicklung des Endenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen bis 2050 in der EU
 (Quelle: Wuppertal Institut)

Das DBFZ forscht aktuell daran die Biokraftstoffproduktion noch umweltfreundlicher zu gestalten und somit die elektrische Erzeugung von Prozesswärme zu erproben. Das niedrige Temperaturniveau in vielen thermischen Biokraftstoff-Prozessen lässt auf eine gute Elektrifizierbarkeit schließen. Dadurch kann der wertvolle, produzierte Biokraftstoff für temperaturintensivere Zwecke genutzt werden und der interne Prozessenergiebedarf dennoch umweltfreundlich bereitgestellt werden (► *Abbildung 4*).

Die European Biogas Association (EBA) plant 5.000 neue Biomethanerzeugungsanlagen bis 2030 und will zusätzlich so viele existierende Biogasanlagen wie möglich auf Biomethanerzeugung aufwerten. Das bedeutet, dass der Wärmebedarf hier noch enorm steigen wird, da die existierenden Biogasanlagen, welche aktuell Strom mit BHKWs erzeugen (und die Abwärme daraus nutzen können), nun auf CO₂-Abtrennung und Biomethanerzeugung umrüsten werden.

Auffällig war bei der Untersuchung des Wärmebedarfs von Biokraftstoffen, dass vor allem für die anaerobe Vergärung in der Biomethanproduktion sehr viel Wärme benötigt wird. Zwar ist das Temperaturniveau niedrig, aber es müssen große Mengen Biomasse mit hohem Feuchtegehalt erhitzt werden, um verhältnismäßig "wenig" Biomethan zu erzeugen. Diese hohen Wärmemengen sind besonders interessant für Elektrifizierung da man mit Wärmepumpen einfach die benötigten Temperaturen (ca. 40 °C) erzeugen kann.

Dies betrifft nicht die ca. 10.000 Biogasanlagen in Deutschland, da diese meist ein Blockheizkraftwerk (BHKW) vor Ort haben und dessen Abwärme nutzen können, um den Fermenter zu beheizen.

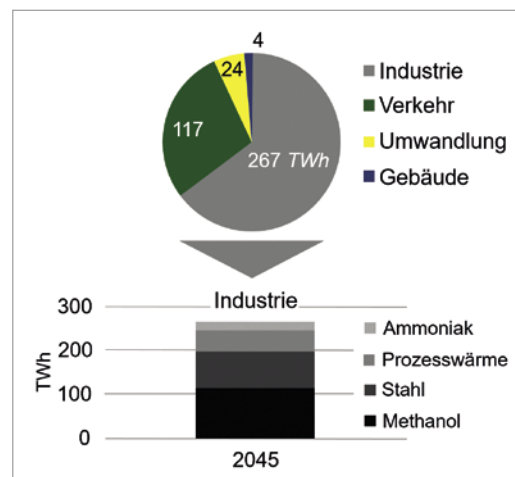
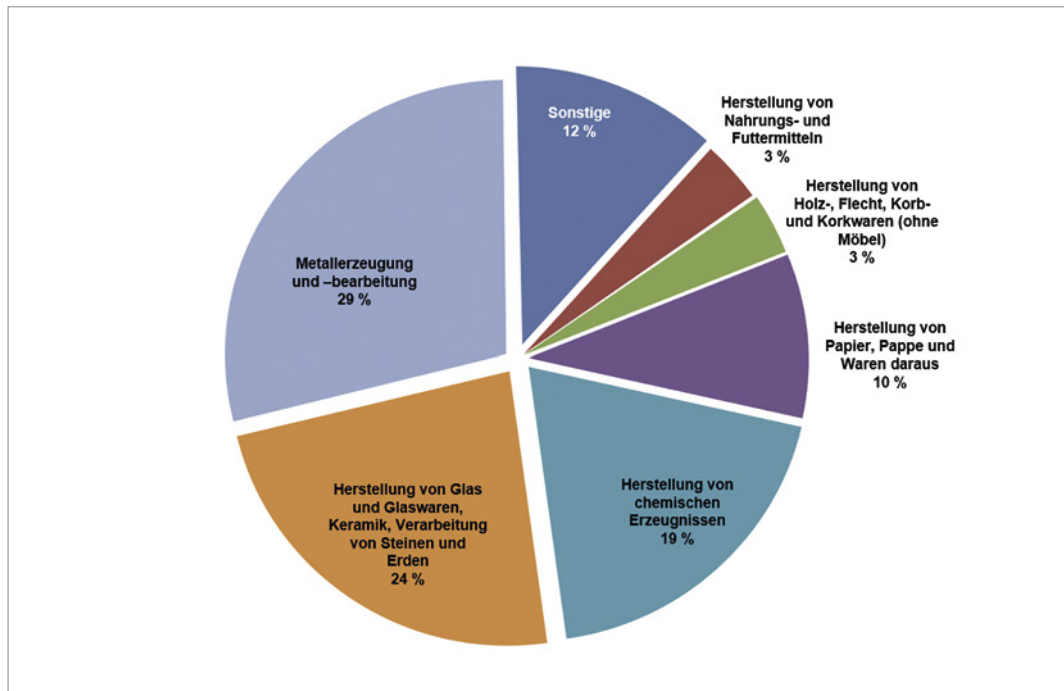


Abbildung 2
 Industrieller Wasserstoffbedarf in Deutschland in 2045
 (Quelle: FZJ [1])

Abbildung 3
**Sektorale Aufteilung
 des deutschen
 Abwärmepotenzials
 in 2016**
 (Quelle: ZAE Bayern [2])

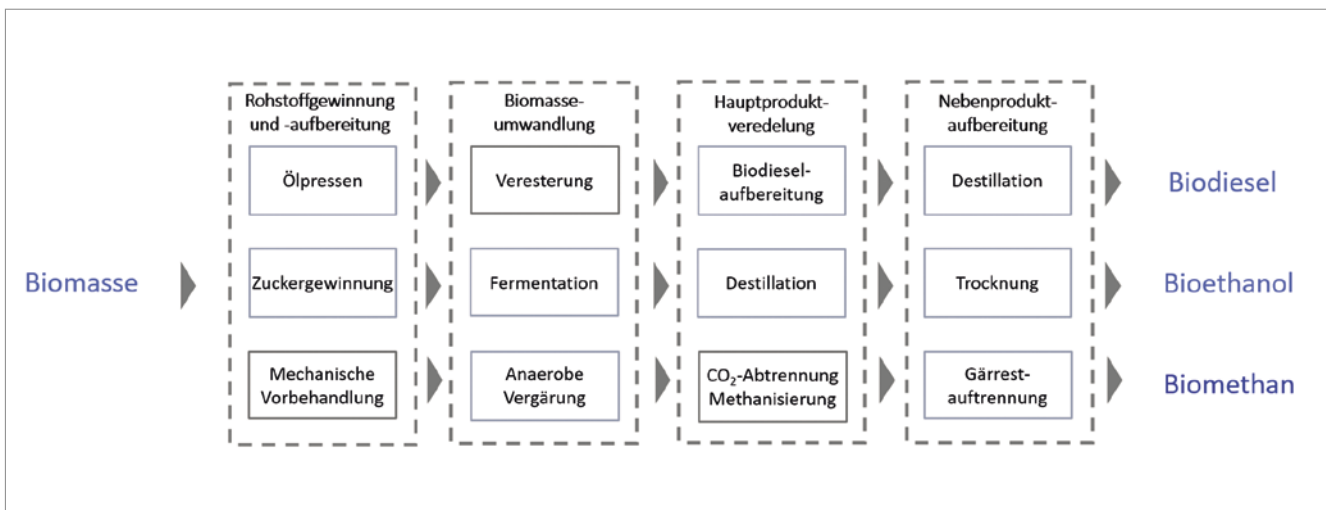


Neben der Integration von Strom aus regenerativen Quellen ist auch, wie in den anfangs beschriebenen Energieszenarien, die Integration von erneuerbaren Energieträgern in bereits existierende Industrieprozesse notwendig. Industriebrenner zur Prozesswärmeerzeugung nutzen heute elektrische Gebläse, um die Luft dem Brenner zuzuführen. Dies führt zu einem erheblichen Strombedarf. Durch die Kopplung einer Mikrogasturbine mit einem Abgasbrenner übernimmt eine mit erneuerbaren Brennstoffen betriebene Gasturbine die Rolle des Gebläses, wodurch der Strombedarf entfällt, zusätzlicher Strom effizient erzeugt wird und die Abwärme direkt genutzt werden kann. Das Abgas der Gasturbine hat einen so hohen Restsauerstoffgehalt, dass es in einem weiteren Brenner für die Prozesswärmeerzeugung

genutzt werden kann. Die erhöhte Abgastemperatur am Eintritt des Abgasbrenners reduziert die Abgasemissionen und erhöht erheblich die Brennstoffflexibilität des Gesamtsystems. Dadurch können an dieser Stelle neben Wasserstoff und Biogas flexibel auch Restgase und Schwachgase eingesetzt werden.

Nicht nur die Integration von erneuerbaren Energieträgern, sondern auch die Integration von fluktuierenden Wärmeströmen spielt für das zukünftige treibhausgasneutrale Energiesystem eine entscheidende Rolle. Die Nutzung von zeitlich und im Temperaturniveau fluktuierenden Hochtemperaturwärmequellen (konzentrierte Solarthermie, Prozessabwärme) wird dadurch geschmälert, dass industrielle Prozesse typischerweise eine dauerhaft zur

Abbildung 4
**Hauptschritte der
 Biokraftstoffproduktion**
 (Quelle: DBFZ)



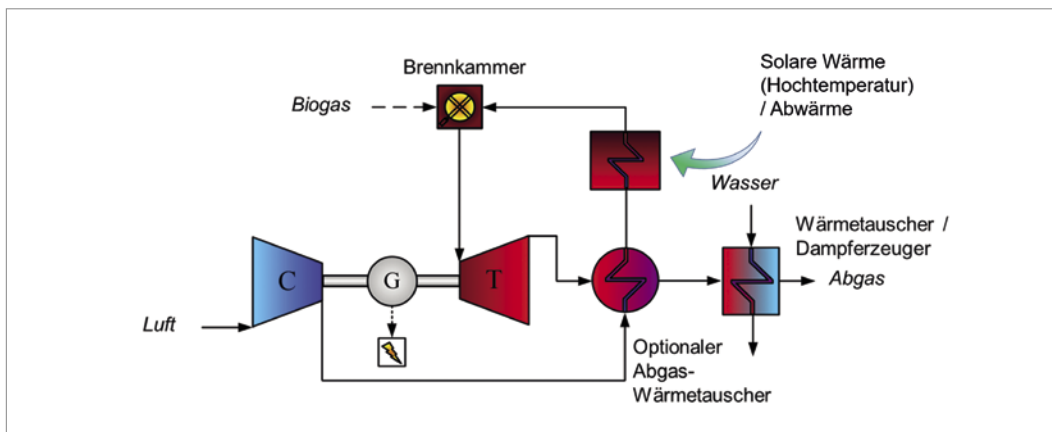


Abbildung 5

Integration von fluktuierenden Wärmequellen in Gasturbinenkreislauf

(Quelle: DLR)

Verfügung stehende Wärmemenge auf einem konstanten Temperaturniveau benötigen. Die Integration dieser Wärmequellen in einen Gasturbinenkreislauf ermöglicht die maximale Nutzung dieser Energiequellen, bei gleichzeitiger Gewährleistung der Verfügbarkeit. Die erneuerbare Wärme wird dazu genutzt, die Luft nach dem Kompressor der Gasturbine von ca. 300 °C an aufzuheizen. Es kommen also Wärmequellen in Frage, die oberhalb dieses Temperaturniveaus liegen (► *Abbildung 5*).

Der darüber hinaus notwendige Wärmebedarf wird durch die Verbrennung von regenerativem Brennstoff in der Brennkammer erzeugt. Dabei reduziert die zugeführte Wärme die notwendige Brennstoffmenge und kann so optimal genutzt werden. Aktueller Gegenstand der Forschung ist unter anderem die Brennkammer der Gasturbine, die unter sehr unterschiedlichen Bedingungen zuverlässig und schadstoffarm funktionieren muss. Weiterhin werden Wärmetauscher-Konzepte für unterschiedliche Wärmequellen entwickelt.

Literatur

- [1] Stolten et al. (2022) Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045. Forschungszentrum Jülich, Reihe Energie & Umwelt Band 577, ISBN 978-3-95806-627-4
- [2] Sarah Brückner (2016) Industrielle Abwärme in Deutschland – Bestimmung von gesichertem Aufkommen und technischer bzw. wirtschaftlicher Nutzbarkeit. Dissertation. Technische Universität München
- [3] Anna-Maria Gruber (2017) Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien. Dissertation. Technische Universität München.