

# Potenziale für erneuerbare Energien in der industriellen Wärmeerzeugung

Temperaturanforderungen limitieren Einsatz erneuerbarer Energien bei der Prozesswärmebereitstellung

Tobias Naegler, Sonja Simon, Martin Klein, Hans Christian Gils

*Die Entwicklung robuster Strategien zur Reduktion industrieller Treibhausgasemissionen setzt detaillierte Analysen des Prozesswärmebedarfs voraus. Für die Einbindung erneuerbarer Energien in die industrielle Wärmeerzeugung ist dabei die Unterscheidung verschiedener Temperaturniveaus insbesondere im Prozesswärmebereich entscheidend, da die meisten erneuerbaren Technologien Wärme nur bis zu einer gewissen Temperatur bereitstellen können.*

## Hintergrund

Die Reduktion der energiebedingten Treibhausgasemissionen ist ein zentrales Ziel europäischer Energiepolitik. Auch wenn das Hauptaugenmerk der politischen und wissenschaftlichen Diskussion derzeit eher bei der Integration erneuerbarer Quellen in den Stromsektor liegt, zeigt ein Blick auf aktuelle Statistiken jedoch schnell, dass dem Wärmesektor eine zentrale Rolle bei der Dekarbonisierung des Energiesystems zukommt: Im Jahr 2012 lag in den EU28-Mitgliedstaaten der Endenergieverbrauch an Brennstoffen für Wärmeerzeugung in Industrie, Haushalten und im Sektor GHD bei rund 21.600 PJ [1]. Dies macht 47% des gesamten Endenergieverbrauchs der EU28 aus. Der Industriesektor verbrauchte davon rund 7.900 PJ Endenergie, die größtenteils für die Erzeugung von Prozesswärme, aber auch für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser eingesetzt werden.

Industrielle Prozesswärme wird – je nach Prozess – auf höchst unterschiedlichen Temperaturniveaus benötigt. Während beispielsweise Trocknungsprozesse in der Papierherstellung meist mit Temperaturen unter 100°C auskommen, liegen Prozesstemperaturen bei der Glas- und Zementherstellung, in Schmelzöfen und in Hochöfen oftmals weit jenseits der 1000°C. Im Gegensatz dazu sind für die Raumwärme- und Warmwassererzeugung Temperaturen unter 100°C ausreichend. Die zentralen Herausforderungen für eine Dekarbonisierung des Industriesektors bestehen nun einerseits darin, durch Effizienzsteigerungen eine deutliche Senkung der Energieintensität industrieller Produktionsprozesse zu erreichen. Andererseits müssen in signifikantem Umfang erneuerbare Energiequellen insbesondere in die Prozesswärmeerzeugung integriert werden können, ohne Einbußen bei der Produktqualität, bei der Versorgungssicherheit oder bei der Wirtschaftlichkeit hinnehmen zu müssen. Da bei einer Reihe von Prozessen der Energieträger zusätzlich auch als chemischer Reaktant teilnimmt (zum Beispiel in Form von Koks als Reduktionsmittel im Hochofenprozess), ist in diesen Fällen zudem der Ersatz des fossilen Energieträgers durch Energieträger auf Biomassebasis (die nur in beschränktem Maße zur Verfügung steht) bzw. der langfristige Umstieg auf alternative Prozessschienen erforderlich.

Zur Erzeugung von Wärme aus erneuerbaren Quellen steht ein breites Spektrum an Technologien zur Verfügung. Dabei weisen die einzelnen Technologien technologie-spezifische Obergrenzen des erzielbaren Temperaturniveaus der Nutzwärme auf (Abbildung 1): Die Nutzung von Umweltwärme in Wärmepumpen ist derzeit auf ein Nutzwärmeniveau von unter 100°C limitiert. Hydrothermale Geothermie erreicht – geologisch bedingt - in Deutschland nur in wenigen Regionen Temperaturen bis zu 140°C; an

anderen Standorten in Europa (Italien, Island) liegen hydrothermaler Ressourcen bis 300°C vor. Mittels des aufwändigen HDR (Hot Dry Rock) Verfahrens kann weitgehend standortunabhängig Geothermie bei Temperaturen in ähnlicher Größenordnung erschlossen werden. Im Bereich Solarthermie erreichen Plattenabsorber Temperaturen bis zu 75°C, Vakuumröhrenkollektoren bis zu 200°C. Bei konzentrierender Solarthermie hängt die erzielbare Temperatur letztendlich wesentlich vom technischen Aufwand ab. Während prinzipiell Temperaturen über 500°C möglich sind, bleiben heutige kommerziell verfügbarer Systeme für Prozesswärme aus konzentrierender Solarthermie unter 300°C. Erneuerbare Brennstoffe auf Biomasse-Basis haben das Potential, den Hochtemperaturbereich zu erschließen: Mit fester Biomasse als Brennstoff sind Verbrennungstemperaturen ebenfalls bis ca. 500°C möglich; die Verbrennung von Bio-Methan (auf Erdgas-Qualität aufbereitetes Biogas), Wasserstoff (durch Elektrolyse) und synthetischem Methan (durch anschließende Methanisierung des Wasserstoffs) ermöglichen Temperaturen jenseits der 1000°C. Beruht die Stromversorgung (weitgehend) auf erneuerbaren Quellen, können die letztgenannten synthetischen Brennstoffe ebenfalls als erneuerbar bewertet werden. Letztendlich ist die Wärmeerzeugung unmittelbar aus Strom eine Option der Wärmeerzeugung, mit der ebenfalls Temperaturen über 1000°C realisiert werden können.

Die Einbindung fluktuierender erneuerbarer Wärmequellen – insbesondere der Solarthermie – in die Prozesswärmeerzeugung eine weitere technische Herausforderung dar, die z.B. durch die Entkopplung von (solarer) Wärmeerzeugung und Prozesswärmenutzung mittels thermischer Energiespeicher gemeistert werden kann. Wird die Prozesswärme unmittelbar aus Strom erzeugt, erlauben (Hochtemperatur-)Wärmespeicher zudem eine flexible, stromgeführte Fahrweise der Prozesswärmeerzeugung und tragen somit zur Integration von Wind- und PV-*Strom* in das Energiesystem bei.

Die Beschränkung der maximal erzielbaren Temperatur der „klassischen“ Quellen erneuerbarer Wärme lässt erahnen, wie essentiell die genaue Kenntnis des erforderlichen Temperaturniveaus der Prozesswärme ist, sollen realistische Strategien und Szenarien zur Integration erneuerbarer Energiequellen in den Prozesswärmesektor entwickelt werden. Ein Vergleich unterschiedlicher Abschätzungsmethoden für eine Wärmedifferenzierung in EU28 findet sich in Naegler et.al [2]. Im Folgenden wird die Abschätzung der industriellen Wärmebedarfe für die Länder der EU28 vorgestellt, welche nach vier Temperaturklassen entlang der technologischen Möglichkeiten der erneuerbaren Technologien differenziert.

### **Abschätzung auf Basis vorhandener statistischer Daten**

Die Berechnung der Anteile verschiedener Temperaturbereiche am Prozesswärmebedarf bedient sich in erster Linie vorhandener statistischer Daten aus Deutschland und den übrigen EU28-Mitgliedstaaten. Basis der Berechnungen ist sind Eurostat-Angaben zum Endenergieverbrauch - differenziert nach Industriezweigen - für die einzelnen EU28-Mitgliedstaaten für das Jahr 2012 [1]. Die Eurostat-Daten unterscheiden jedoch nicht zwischen verschiedenen Anwendungsbereichen der Endenergie (Prozesswärme, Raumwärme, Prozess- und Klimakälte, Informations- und Kommunikationstechnologien, Beleuchtung, ...) oder zwischen verschiedenen Temperatursegmenten im Prozesswärmesektor.

Zur Differenzierung nach *Anwendungsbereichen* wurden die Anwendungsbilanzen für die verschiedenen Industriezweige aus Deutschland herangezogen [3], die vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) ebenfalls für das Jahr 2012 publiziert wurden. Abbildung 2 fasst die entsprechenden Daten zusammen. Die Anwendungsbilanzen wiederum unterscheiden zwar zwischen Endenergieverbrauch für Prozesswärme, Raumwärme und Warmwasser (sowie anderen Anwendungsfeldern), differenzieren aber nicht weiter nach der nötigen Temperatur für Prozesswärmeanwendungen. Zur Differenzierung

nach *Temperatursegmenten* wurde daher zusätzlich [4] herangezogen. Diese Studie aus dem Jahr 2001 unterscheidet – nach Branchen differenziert - vier Temperaturbereiche für Prozesswärme: <100°C, 100-500°C, 500-1000°C und >1000°C (siehe auch Abbildung 3).

## **Hochtemperatur-Bereich jenseits 500°C dominiert den Wärmebedarf der Industrie**

Tabelle 1 zeigt Ergebnisse der Untersuchung für die EU28 und deren Mitgliedstaaten. Der Endenergieverbrauch der Industrie für Prozesswärme, Raumwärme und Warmwasser lag demnach im Jahr 2012 in Europa bei 8518 PJ. Davon wurden 86% (7353 PJ) für Prozesswärme aufgewendet. Den Abschätzungen zufolge kommen EU-weit nur 26% des industriellen Wärmebedarfs mit Temperaturen unterhalb 100°C aus, in einem Bereich also, in dem „klassische“ erneuerbare Technologien zur Wärmeerzeugung – nicht-konzentrierende Solarthermie, Wärmepumpen, Geothermie – ihre größten Potentiale haben. Weitere 21% fallen bei Temperaturen zwischen 100°C und 500°C an, und sind somit für eine Versorgung mit Biomasse-gefeuerter KWK prinzipiell erschließbar. Der überwiegende Teil von 54% des Endenergieverbrauchs für Wärme entsteht jedoch in Hochtemperatur-Prozessen über 500°C. Mehr als die Hälfte davon werden gar für die Erzeugung von Prozesstemperaturen jenseits der 1000°C eingesetzt. Innerhalb der fünf größten Industrienationen innerhalb der EU – Deutschland, Italien, Frankreich, Vereinigtes Königreich und Spanien – variiert diese Verteilung nur geringfügig (Abbildung 5) um wenige Prozentpunkte. Hier schon wird offensichtlich, dass synthetische Gase (Wasserstoff und Methan) und elektrischer Strom eine tragende Rolle spielen werden müssen, sollen die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Industriesektors deutlich gesenkt werden.

Der Vergleich einzelner Branchen zeigt, dass über 80% des Hochtemperatur-Prozesswärmebedarfs über 500°C in den Sektoren Eisen, Steine und Erden und chemischer Industrie anfallen. Das Segment Prozesswärme >1000°C wird europaweit von der Eisenerzeugung (etwa in Hochöfen) mit 48% des Verbrauchs sowie der Gewinnung und Verarbeitung von Steinen und Erden (beispielsweise Zementproduktion) mit weiteren 27% des Verbrauchs dominiert.

Im Bereich zwischen 500°C und 1000°C fallen 45% des Wärmebedarfs in der chemischen Industrie an. Aber auch in diesem Segment ist der Anteil des Sektors Steine und Erden und der Stahlproduktion mit jeweils ca. 20% sehr hoch.

Im Segment zwischen 100-500°C dominieren die Lebensmittelbranche, die Papierherstellung und die chemische Industrie, die zusammen über 40% des Wärmebedarfs ausmachen. Prozesswärme im Temperaturbereich unter 100°C trägt mit 12% zum Endenergieverbrauch der Industrie bei. Hier liegen die größten Verbräuche in den Branchen Ernährung und Tabak, in der chemischen Industrie und im Papiergewerbe. Prozesswärme der Branchen Textilindustrie, Holzverarbeitung liegt nahezu ausschließlich in diesem Temperatursegment.

Aus der Dominanz des Hochtemperatur-Segments im industriellen Prozesswärmebedarf sowie der beschränkten Potentiale vieler „klassischer“ Quellen für erneuerbarer Wärme ergibt sich schon hier die Folgerung, dass synthetische Brennstoffe auf Basis erneuerbaren Stroms oder erneuerbarer Strom selbst für eine klimafreundlichere Prozesswärmeversorgung langfristig eine tragende Rolle spielen müssen.

## **Unsichere Datenlage erschwert robuste Abschätzung**

Das oben vorgestellte methodische Vorgehen unterstellt, dass statistische Daten aus Deutschland zumindest prinzipiell auf die Industrien der EU-Mitgliedstaaten übertragbar sind.

Im Detail bedeutet dies, dass in erster Näherung Industriezweige in den verschiedenen EU-Mitgliedstaaten eine ähnliche Detailstruktur bzgl. Unter-Branchen aufweisen. Den Produktionsprozessen wird dabei eine hohe Ähnlichkeit hinsichtlich spezifischer Energieverbräuche, Graden an interner Wärmeintegration und Abwärmenutzung unterstellt. Darüber hinaus muss angenommen werden, dass Temperaturaufteilung aus [4] aus dem Jahr 2001 für die vorliegende Abschätzung für das Zieljahr 2012 nach wie vor geeignet sind. Zudem entsprechen die Definition der Industriezweige aus [1] nicht eins zu eins den entsprechenden Definitionen, die [3] und [4] zugrunde liegen.

Es versteht sich von selbst, dass als Folge dieser Annahmen und Unsicherheiten die oben präsentierten Ergebnisse nur eine erste Näherung darstellen können, bis das Vorliegen länderspezifischer statistischer Daten eine solidere Abschätzung erlaubt. Die Entwicklung robuster Transformationsstrategien für die Industrien der EU-Mitgliedsstaaten kann jedoch nicht auf die Verfügbarkeit detaillierter statistischer Daten warten. Nichtsdestotrotz wäre es mittelfristig sinnvoll, ein vereinheitlichtes und detaillierteres statistisches Datengerüst zugrunde legen zu können, wie beispielsweise in [2] vorgeschlagen wird, wo auch eine detailliertere Diskussion der Methode und der Unsicherheiten präsentiert wird. Nichtsdestotrotz kann davon ausgegangen werden, dass die hier ermittelten Werte die Größenordnung der tatsächlichen Werte gut widerspiegeln und insofern für die Erstellung von Dekarbonisierungsstrategien des Industriesektors miteinbezogen werden können.

## **Fazit**

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass ein signifikanter Teil des Wärmebedarfs der Industrie in Europa im Hochtemperatur-Segment jenseits 500°C anfällt. Diese Temperaturbereiche sind für viele „klassische“ Technologien, die Wärme auf Basis erneuerbarer Energien bereitstellen, nicht zu erschließen. Darunter fallen insbesondere die (tiefe) Geothermie, nicht-konzentrierende Solarthermie sowie Wärmepumpen. Zwar können bei der Verbrennung von fester Biomasse und insbesondere von Biogas, das auf Erdgas-Qualität aufbereitet wurde („Bio-Methan“), auch Temperaturen im Hochtemperatur-Bereich erreicht werden. Die begrenzte Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse und vielfach diskutierte Nutzungskonkurrenzen limitieren jedoch den Einsatz von Brennstoffen auf Biomasse-Basis. Es ist daher davon auszugehen, dass für eine klimafreundliche Industrieproduktion Hochtemperatur-Prozesswärme neben Strom auch synthetische Gase (Wasserstoff, Methan) eine signifikante Rolle spielen müssen, die über Elektrolyse und ggf. Methanisierung aus Strom erzeugt werden, der dann überwiegend aus regenerativen Quellen stammen sollte. Die resultierende enge Kopplung des (Hochtemperatur)-Wärmesektors mit dem Stromsystem birgt dabei Risiken, aber auch Chancen bezüglich der Integration hoher Anteile erneuerbaren Stroms in die Gesamtenergieversorgung, die noch genauer zu untersuchen sind.

## ----- **Literaturangaben** -----

[1] EUROSTAT-Datenbank; <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>

[2] Naegler, T., Simon, S., Klein, M., Gils, H.-C., Quantification of the European industrial heat demand by branch and temperature level. Int. J. Energy Res. 2015; 39.

[3] ISI, Erstellung von Anwendungsbilanzen für das Jahr 2012 für das verarbeitende Gewerbe mit Aktualisierungen für die Jahre 2009-2011. 2012, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (FhG ISI), Karlsruhe.

[4] Wagner, H.-J. and H. Unger, *Validierung und kommunale Disaggregation des Expertensystems HERAKLES*, Endbericht 2002, Ruhr-Universität Bochum; hier zitiert nach: Krewitt, W., M. Nast, B. Eikmeier, J. Gabriel and W. Schulz (2006). Analyse des nationalen Potenzials für den Einsatz hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung; Stuttgart, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, bremer energie institut.

----- **Lebensläufe** -----

**Dr. Tobias Naegler**, Jahrgang 1968, studierte Physik an den Universitäten Heidelberg und Gießen. Promotion am LSCE (Saclay/Frankreich) und der Universität Heidelberg im Bereich Klimaforschung. Seit 2009 Projektleiter in der Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung (STB) des Instituts für Technische Thermodynamik des DLR in Stuttgart. Arbeitsschwerpunkte: Energiesystemmodellierung, Entwicklung und Bewertung von nationalen und internationalen Transformationsszenarien für das Energiesystem.

**Dr. Sonja Simon**, Jahrgang 1974, studierte Agrarwissenschaften an der Technischen Universität München und promovierte dort zum Dr. agr. zum Thema „nachhaltige Bioenergiepotenziale“. Seit 2006 Projektleiterin in der Abteilung STB des Instituts für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Stuttgart. Arbeitsschwerpunkte: internationale Energieszenarien, nachhaltige Bioenergiepotenziale.

**Dr.-Ing. Hans-Christian Gils**, Jahrgang 1983. Studium der Physik an den Universitäten Konstanz, Hamburg und Padua. Seit April 2010 Doktorand/wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische Thermodynamik. Im Jahr 2015 Promotion an der Universität Stuttgart zum Ausgleich fluktuierender erneuerbarer Energien durch Lastmanagement und Kopplung zwischen Strom- und Wärmesektor. Forschungsschwerpunkte: Energiesystemmodellierung Ermittlung und Untersuchung von Szenarien zukünftiger Energieversorgung.

**Martin Klein**, Jahrgang 1987, studierte Physik (B.Sc.) an der RWTH Aachen und der KTH Stockholm und Renewable Energy Management (M.Sc.) an der Universität Freiburg. Seit Oktober 2014 Doktorand in der Abteilung STB des Instituts für Technische Thermodynamik des DLR in Stuttgart. Forschungsschwerpunkte: agentenbasierte Modellierung, Systemintegration von hohen Anteilen erneuerbarer Energien in das Stromsystem durch Speicher und Laststeuerung, Einfluss von dezentralem Eigenverbrauch auf den Strommarkt.

----- Graphiken und Tabellen -----

Endenergieverbrauch für Wärme Industrie	RW/WW <100°C	PW <100°C	PW 100-500°C	PW 500-1000°C	PW >1000°C	Summe	RW/WW <100°C	PW <100°C	PW 100-500°C	PW 500-1000°C	PW >1000°C
	Absolutwerte in PJ/a						Anteile am Gesamtverbrauch				
Belgien	35	39	59	76	118	327	11%	12%	18%	23%	36%
Bulgarien	9	10	16	21	23	80	12%	13%	20%	26%	29%
Dänemark	13	13	18	10	15	69	19%	19%	26%	15%	21%
Deutschland	262	215	362	413	663	1915	14%	11%	19%	22%	35%
Estland	3.7	3.1	3.6	2.5	4.0	17	22%	18%	22%	15%	24%
Finnland	32	47	153	31	56	321	10%	15%	48%	10%	18%
Frankreich	119	107	164	157	296	842	14%	13%	19%	19%	35%
Griechenland	12	10	14	17	43	95	13%	10%	15%	17%	45%
Irland	12	9	11	12	24	67	17%	14%	16%	17%	35%
Italien	132	104	149	180	354	920	14%	11%	16%	20%	38%
Kroatien	5.6	5.3	7.5	6.5	9.9	35	16%	15%	22%	19%	29%
Lettland	6.1	6.0	3.3	2.9	6.5	25	24%	24%	13%	12%	26%
Litauen	4.5	5.9	6.8	7.4	6.0	31	15%	19%	22%	24%	20%
Luxemburg	2.1	1.4	1.7	4.0	10.1	19	11%	7%	9%	21%	52%
Malta	0.4	0.2	0.2	0.1	0.2	1	34%	18%	22%	11%	15%
Niederlande	43	60	94	122	118	437	10%	14%	22%	28%	27%
Österreich	40	35	63	46	101	285	14%	12%	22%	16%	35%
Polen	55	58	88	97	159	456	12%	13%	19%	21%	35%
Portugal	17	21	45	24	39	146	12%	15%	31%	17%	27%
Rumänien	28	25	31	53	78	215	13%	12%	14%	25%	36%
Schweden	37	46	153	32	76	343	11%	13%	44%	9%	22%
Slowakei	13	9	18	27	75	143	9%	6%	13%	19%	53%
Slowenien	5.7	3.9	7.1	6.6	13	37	16%	11%	19%	18%	36%
Spanien	82	74	123	141	229	648	13%	11%	19%	22%	35%
Tschechien	36	24	37	45	92	235	15%	10%	16%	19%	39%
Ungarn	10	9	14	17	30	80	13%	12%	18%	21%	37%
Vereinigtes Königreich	145	86	143	127	224	725	20%	12%	20%	17%	31%
Zypern	0.5	0.5	0.7	1.3	2.6	6	9%	9%	12%	23%	46%
<b>EU28</b>	<b>1161</b>	<b>1027</b>	<b>1785</b>	<b>1679</b>	<b>2865</b>	<b>8518</b>	<b>14%</b>	<b>12%</b>	<b>21%</b>	<b>20%</b>	<b>34%</b>

Tabelle 1: Endenergieverbrauch für Raumwärme (RW), Warmwasser (WW) und Prozesswärme (PW) des Industriesektors nach Temperaturbereichen in 2012 für EU28-Mitgliedstaaten

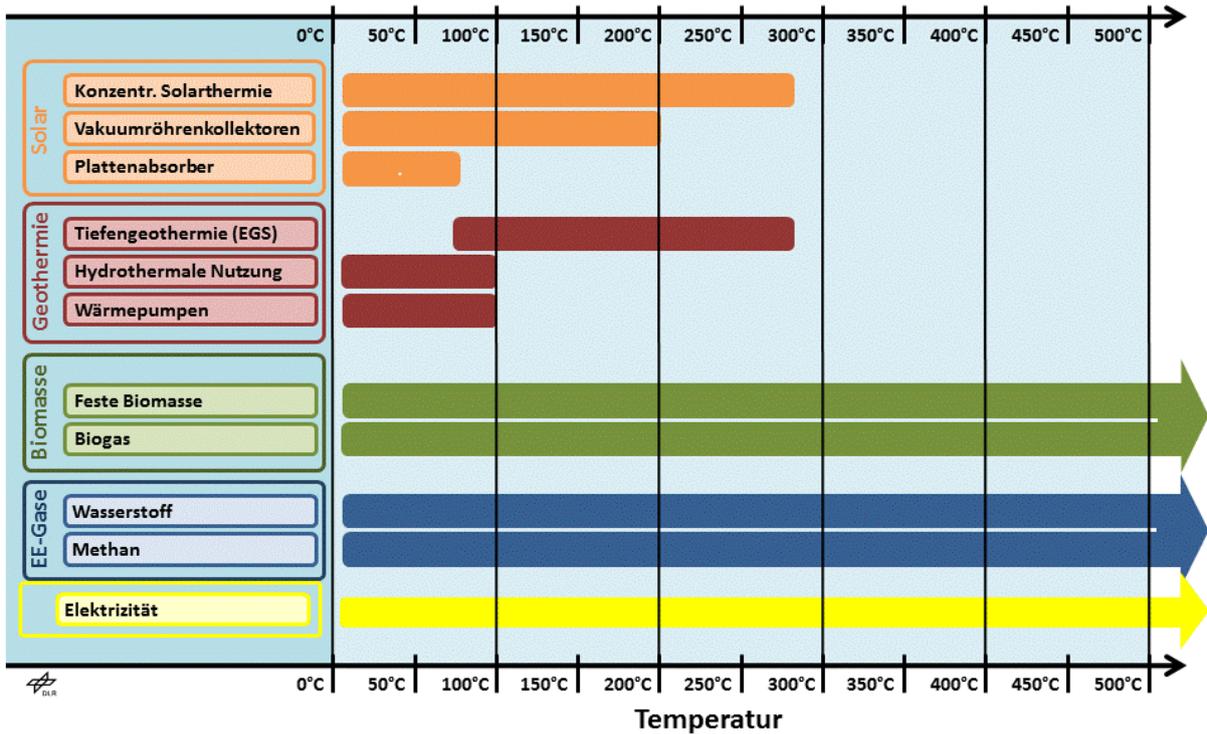


Bild 1: Mit erneuerbaren Wärmequellen erzielbare Temperaturen

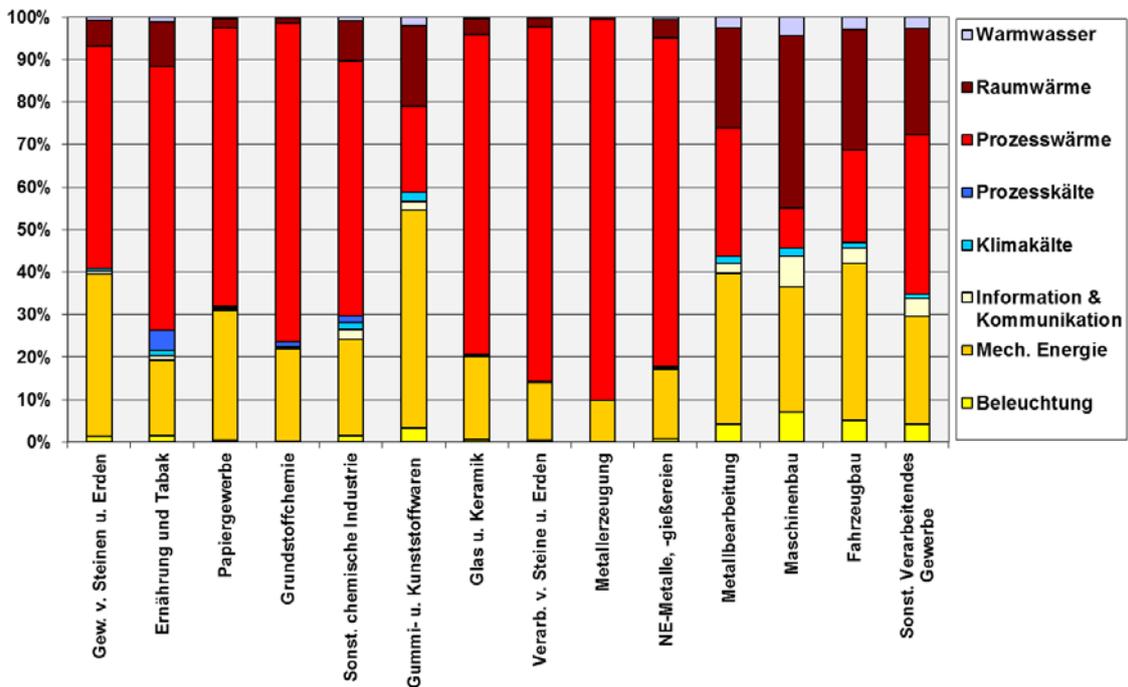


Bild 2: Anteile verschiedener Anwendungsbereiche am Endenergieverbrauch verschiedener Industriezweige für Deutschland im Jahr 2012, Quelle: eigene Darstellung nach [3]

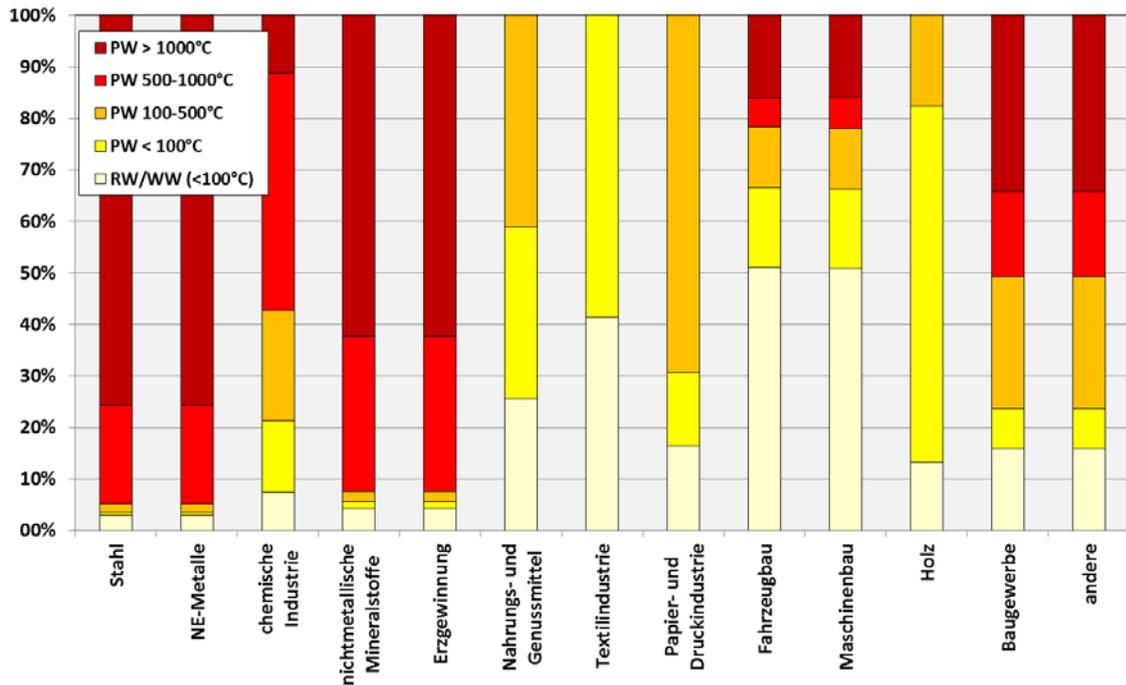


Bild 3: Anteile am Endenergieverbrauch für Wärme für Raumwärme/Warmwasser (RW/WW) und Prozesswärme (PW) in verschiedenen Temperaturbereichen; Quelle: eigene Darstellung nach [4]

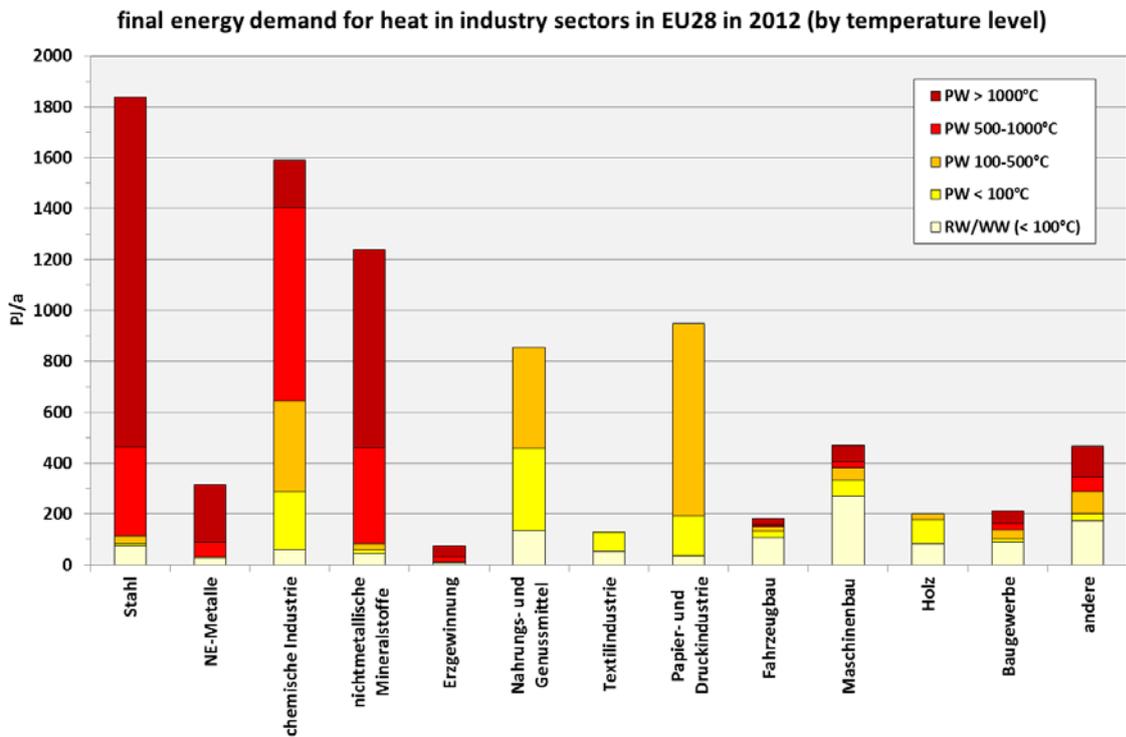


Bild 4: Endenergieverbrauch für Raumwärme/Warmwasser (RW/WW) und Prozesswärme (PW) nach Temperaturbereichen und Branchen in der EU28 für 2012

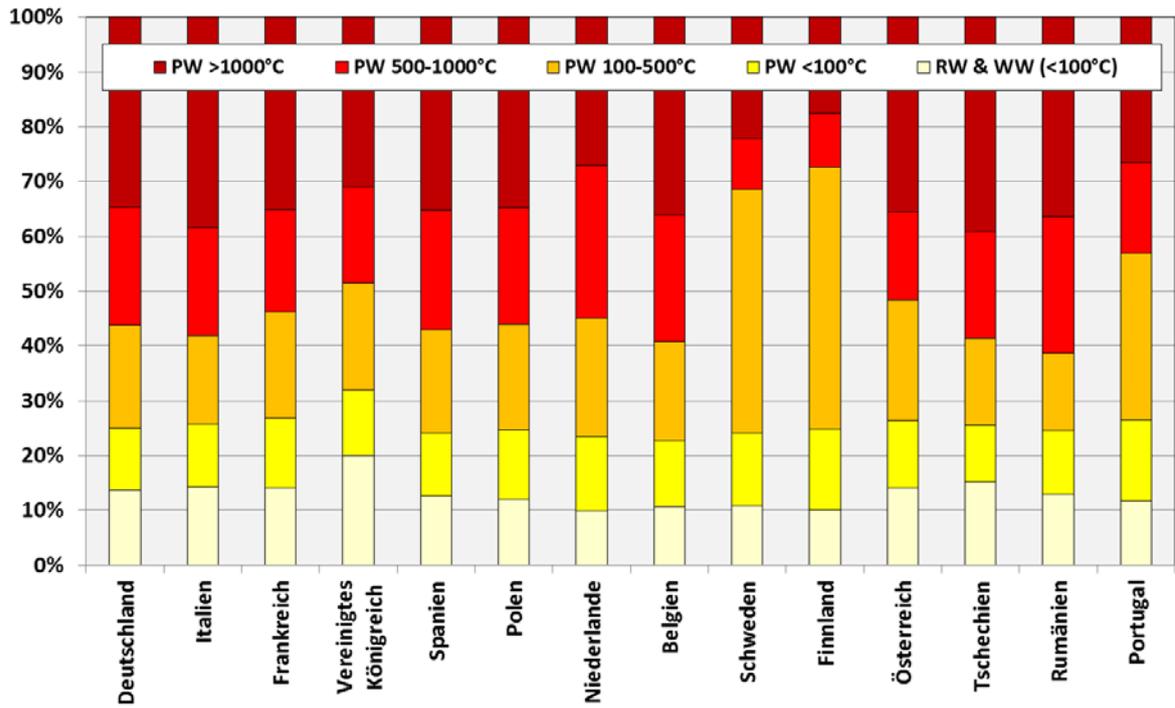


Bild5: Anteile verschiedener Temperaturbereiche am industriellen Wärmebedarf der 14 größten Volkswirtschaften der EU28 (PW: Prozesswärme, RW & WW: Raumwärme & Warmwasser)