

Wärme und Effizienz für die Industrie

1 Einleitung

Im Rahmen der Energiewende haben sich erneuerbare Energien zur Stromerzeugung in Deutschland bereits etabliert. Um jedoch das volle Potenzial der Reduktion von fossilen Energien und Treibhausgasen (THG) auszuschöpfen, muss aus der Energiewende auch eine Wärmewende werden. Der Energieeinsatz für die Wärmebereitstellung der Industrie betrug im Jahr 2012 etwa 535 TWh (22 % des Endenergiebedarfs Deutschlands), hauptsächlich bereitgestellt durch Erdgas (48 %) und Steinkohle (17%)¹. Damit wurden für die Wärmebereitstellung im Industriesektor rund 159 Mio. t CO_{2-äq} emittiert, was 17% der THG-Emissionen Deutschlands entspricht.

Aufgrund der Vielseitigkeit der einzelnen Branchen und Wärmeanwendungen im Industriesektor kann dieser Beitrag nur beispielhaft einzelne Komponenten für eine Wärmewende aufzeigen, die auch wiederum die Aktivitäten der einzelnen Autoren widerspiegeln. Ausgehend von einer nationalen Betrachtung und expliziten Modellierungsergebnissen für die energieintensive Industrie in NRW, werden einzelne Potenziale und Aktivitäten im Bereich der Wärmebereitstellung, -speicherung und -integration behandelt.

¹ Berechnet auf Basis *Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland – Jahre 1990–2012*, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) und *Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen 2008*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2012.

2 Abwärmepotenziale

Das IZES konnte für das verarbeitende Gewerbe ein theoretisches Abwärmepotenzial von 225 TWh pro Jahr nutzbarer Abwärme ermitteln.² Dies sind 36 % des gesamten Endenergieanteils des verarbeitenden Gewerbes. Auch könnten daraus theoretisch 37 TWh Strom mit Hilfe heutiger Abwärmetechnologien erzeugt werden. Aufgrund der Heterogenität der Branchen, verbunden mit den jeweiligen vielfältigen Produktionsprozessen, ist die Ermittlung eines belastbaren technischen Potenzials nicht möglich. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Abwärmeatlas“³ versucht man hier eine genauere Datengrundlage für vorhandene Abwärmepotenziale im verarbeitenden Gewerbe zu generieren. Effizienztechnologien zur Abwärmenutzung und Abwärmeverstromung stehen aktuell vor den Herausforderungen der Wirtschaftlichkeit. Ihre Investitionskosten sind im Vergleich zu klassischen Strom- und/oder Wärmeerzeugungsanlagen noch hoch. Gerade im verarbeitenden Gewerbe, wo nutzbare Abwärmepotenziale vorhanden sind, jedoch auch strenge Wirtschaftlichkeitskriterien herrschen, ist die Verbreitung von Effizienztechnologien noch nicht selbstverständlich. Die nachfolgende Übersicht (*Tabelle 1*) gliedert die Technologien nach Temperaturniveaus.

² Abwärmenutzung – Studie zur Fachkonferenz vom 4. März 2015; Auftraggeber: co2online & BMUB
Internet: <http://www.izes.de/deutsch/termine-veranstaltungen/2015/bmub-fachtagung-klimaschutz-durch-abwaermenutzung.html>
³ Das Forschungsprojekt „Abwärmeatlas“ wird unter der FKZ 03ET1208 von Seiten des Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik (Koordinator), dem Institut für Demoskopie Allensbach (IfD Allensbach) und der IZES gGmbH (Institut für ZukunftsEnergieSysteme) gemeinsam mit den beiden strategischen Partnern, dem Statistischen Bundesamt (DESTATIS) und Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e. V. (DIW Berlin), umgesetzt.



FZ Jülich
Dr. Alexander Otto
a.otto@fz-juelich.de
Dr. Thomas Grube
th.grube@fz-juelich.de

DBFZ
Dr. Andreas Ortwein
andreas.ortwein@dbfz.de

DLR
Dr. Stefan Zunft
stefan.zunft@dlr.de

Fraunhofer IBP
Jan Kaiser
jan.kaiser@ibp.fraunhofer.de
Dr. Michael Krause
michael.krause@ibp.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE
Prof. Dr. Werner Platzer
werner.platzer@ise.fraunhofer.de

ISFH
Elisabeth Schneider
schneider@isfh.de

IZES
Guillem Tänzler
taenzler@izes.de

Wuppertal Institut
Clemens Schneider
clemens.schneider@wupperinst.org

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

| Temperatur | Hochtemperaturbereich | Mitteltemperaturbereich | Niedertemperaturbereich |
|---------------------------|---------------------------|------------------------------|---|
| | > 350 °C | > 80 °C <= 350 °C | <= 80 °C |
| Beispiele für Anwendungen | Dampfturbine | ORC (Organic Rankine Cycle) | Wärmepumpen zur Abwärmenutzung |
| | Stirlingmotoren | Absorptionskälteanlage | Adsorptionskälteanlage |
| | | Fernwärme- und Nahwärmenetze | Heizungs- und Brauchwassernutzung |
| | Thermoelektrische Systeme | | Vorwärmung, Rücklauf-temperaturerhöhung |
| | Wärmespeichersysteme | | |

Tabelle 1
Technologien zur Wärmenutzung nach Temperaturniveaus
(Einteilung: IZES gGmbH)

3 Wärmebedarf und Energieeffizienzpotenziale am Beispiel der nordrhein-westfälischen Industrie

Im Rahmen des Beteiligungsprozesses zum Klimaschutzplan NRW wurden im bottom-up-Energiesystem- und Treibhausgasmodell WISEE der Energiebedarf sowie die energie- und prozessbedingten Treibhausgas-Emissionen der nordrhein-westfälischen Industrie ermittelt. Die Annahmen hierzu sind in der Dokumentation der Szenarien des Beteiligungsprozesses näher erläutert.⁴ Wie in *Abbildung 1* zu erkennen ist, wird der Wärmebedarf der nordrhein-westfälischen Industrie stark von der chemischen Industrie sowie der Eisen- und Stahlindustrie dominiert. Als ausgewählte Ergebnisse des Modells können folgende Punkte festgehalten werden:

- Absolute technische Effizienzpotenziale sind gering, da in konventionellen Prozessen sehr weit ausgeschöpft.
- THG-Emissionsreduktion um 28 % bzw. 45 % gegenüber 2010 wird erreicht durch Energieeffizienz und Energieträgershift hin zu Strom und Wasserstoff (ohne Industriekraftwerke).
- Weitere THG-Emissionsreduktion im Bereich der Industriekraftwerke

4 Zeiss, C.; Fishedick, M.; Espert, V. Zusammenfassung der Szenarioberechnungen des Beteiligungsprozesses zum Klimaschutzplan NRW (aktualisierte Fassung); Wuppertal Institut im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Düsseldorf & Wuppertal, Germany, 2014.

Unter diesen Bedingungen wird eine territoriale Minderung der THG in NRW um 80 % gegenüber 1990 auch im Gesamtsystem nicht erreicht. Um diese Minderungen zu erreichen bedarf es starker Anstrengung im Bereich F&E.

4 Wärmebereitstellung für die Industrie

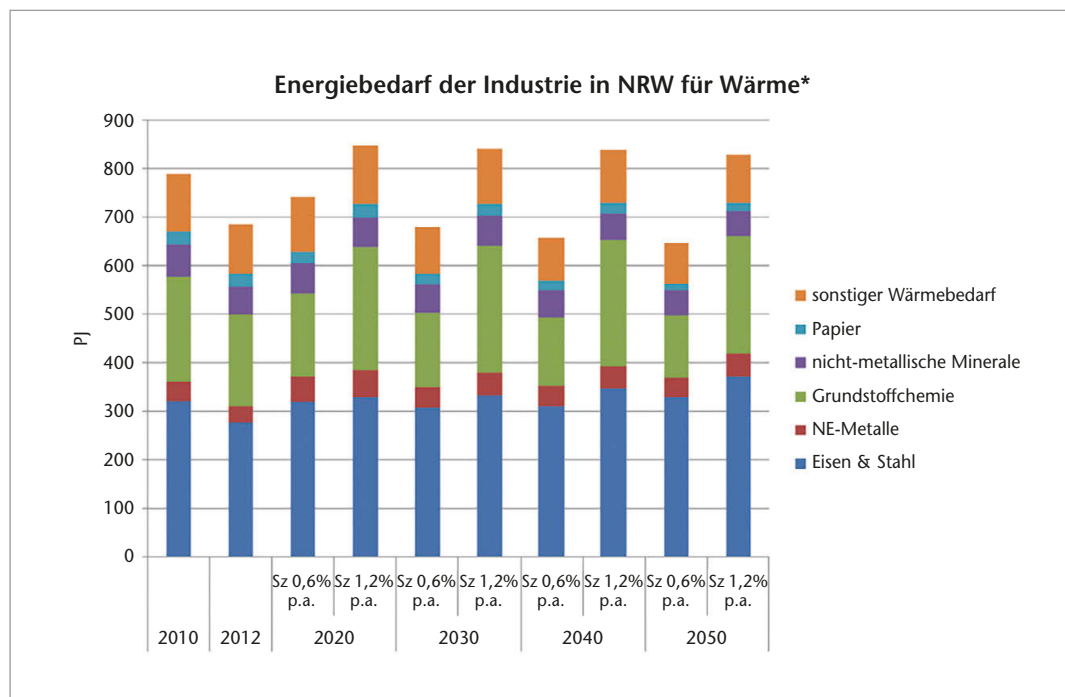
Im folgenden Abschnitt werden einige Beispiele für eine CO₂-arme beziehungsweise effiziente Bereitstellung von Wärme für die Industrie beschrieben.

4.1.1 Solarthermie

Wärmeverbrauch und Energiekosten in Industrie und gewerblichen Betrieben können substantiell durch die Kombination von Energieeffizienzmaßnahmen und Einbindung solarer Wärme reduziert werden. Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus, von 50 °C bis etwa 400 °C, wird in verschiedenen Prozessen wie z. B. Waschen, Trocknen, Sterilisieren, Destillieren, Bleichen usw. benötigt.

Ein großer Anteil des Wärmebedarfs der Industrie liegt bei Temperaturen, die auch mit solarthermischen Anlagen bedient werden können. In der Praxis haben Betriebe oft mehrere Wärmeverbraucher, die über ein Wärmeverteilnetz bedient werden. Dadurch ergibt sich eine Vielzahl von möglichen Integrationsstellen für die Solarwärme. Für die Wäschereibranche wurden diese im Projekt SoProW untersucht und für eine typische Modellwäscherei dargestellt. Die Bewertung dieser Varianten erfordert

Abbildung 1
Endenergiebedarf der Industrie in NRW für Wärme in den Beteiligungsprozess-Szenarien B und C mit einem Industriewachstum von 1,2 % bzw. 0,6 % p.a.
(Quelle: Wuppertal Institut)
*) Inkl. Bedarf an Reduktionsmitteln in der Stahlindustrie und Energie für die Aluminium-Schmelzflusselektrolyse



vom Planer eine Simulation mit unterschiedlichen technischen Konzepten unter Berücksichtigung von Bedarfsprofilen, Leistungsspitzen sowie Wärmerückgewinnungspotenzialen.

Während in Deutschland im wesentlichen Flach- und Vakuumröhrenkollektoren zur Verfügung stehen, sind für Exportmärkte mit höheren Anteilen direkter Solarstrahlung auch konzentrierende Kollektoren interessant. Innerhalb der IEA Task Group 49 (<http://task49.iea-shc.org/>) zu solarer Prozesswärme wurden Prüfmethode und Systemintegration insbesondere auch neuer Kollektortypen untersucht und weltweit gelungene Fallbeispiele dokumentiert. Die Task Group hat als Ziel ein Planungshandbuch für zukünftige Projektakteure, in das die bisherigen Erfahrungen einfließen.

4.1.2 SolStyro – Solar unterstützte Styropor-Herstellung mit hocheffizienten Flachkollektoren

Das Projekt SolStyro⁵ setzt sich zum Ziel, eine Demonstrationsanlage mit neuartigen hocheffizienten Flachkollektoren zur Unterstützung der Herstellung von expandiertem Polystyrolschaum (EPS) zu realisieren und zu bewerten. Inhaltlich umfasst das Projekt folgende Schwerpunkte:

- Weiterentwicklung eines hocheffizienten Flachkollektors für Prozesswärme

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit eines vom ISFH bereits entwickelten, hocheffizienten Flachkollektors mit spektral selektiver, doppelt verglaste Abdeckung werden das Format erweitert (von 2 auf 8 m²) und konstruktive Anpassungen (u. a. durch dünnere Verglasung) untersucht. Im Rahmen der Pilotanlage wird anschließend erstmalig das Verhalten des Kollektors im Feld getestet.

- Integration solarthermisch erzeugter Prozesswärme in den Produktionsprozess von EPS

Nach einer detaillierten Analyse des Produktionsprozesses werden mit Hilfe von Simulationsstudien Lösungen für eine energetisch und wirtschaftlich optimierte Integration der Solaranlage erarbeitet. Dabei werden auch potenzielle Energieeffizienzmaßnahmen berücksichtigt. Das entwickelte Anlagenkonzept wird im weiteren Projektverlauf baulich umgesetzt sowie in einer einjährigen Monitoringphase optimiert.

Eine solarthermische Bereitstellung von 10 % des Primärenergiebedarfs (1,5 GWh_{th}) der EPS-Herstellung, bei Temperaturen von 45 °C bis 110 °C führt zu einer Energieeinsparung von 150 MWh_{th}/a. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 15.000 m³/a an Erdgas und somit von 30 t CO₂-Emissionen pro Jahr.

4.2 Biomasse

Im Jahr 2012 wurden etwa 6 % des Wärmebedarfs (entspricht 122 PJ) der Industrie durch Biomasse bereitgestellt.⁶ Damit wurden insgesamt 12,5 % der gesamten im Jahr 2012 energetisch genutzten Biomasse in Höhe von 970 PJ in Industrieanlagen verbrannt. Die derzeit noch zur Verfügung stehenden technischen Potenziale, unter Berücksichtigung regulatorischer oder gesellschaftlicher Beschränkungen, liegen bei etwa 448 PJ. Ausgehend von diesem Potenzial kann theoretisch, ohne Berücksichtigung von technischen Beschränkungen oder sonstigen Effekten, ein Teil der derzeit verwendeten fossilen Brennstoffe bzw. des verwendeten Stromes zur Wärmeerzeugung in der Industrie durch Biomasse substituiert werden.

Der stärkste Effekt zur Reduktion von CO₂-Emissionen in Höhe von 50 Mio. t pro Jahr wird dann erreicht, wenn die Energieträger Kohle und Strom durch das vorhandene Biomassepotenzial ersetzt werden. Wobei dieser Wert als theoretische Obergrenze zu verstehen ist, da beispielsweise die CO₂-Emissionen der Biomasseversorgungskette nicht berücksichtigt werden.

Generell ergeben sich für die Nutzung von Biomasse in der industriellen Erzeugung von Prozesswärme und Strom verschiedene Perspektiven und Forschungsansätze. Dazu gehören unter anderem:

- Verfügbarkeit zur Vermeidung von Stillständen
- Kombinationsmöglichkeiten mit anderen erneuerbaren Energien z. B. zur Temperaturerhöhung und Leistungsausgleich von solarthermischen Anlagen
- Kaskadennutzung von Biomasse

Diese und weitere komplexen Fragestellungen können am besten im Rahmen ganzheitlicher Forschungsansätze bearbeitet werden. Ein Beispiel dafür ist das Spitzencluster „BioEconomy“, in dem die gesamte Nutzungskette von der Holzbereitstellung bis zur energetischen Nutzung der Reststoffe in verschiedenen Forschungsvorhaben untersucht wird.

4.3 Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Bei der KWK werden Strom und Wärme in einer Anlage gleichzeitig gewonnen und genutzt. Dabei werden Wirkungsgrade von über 90 % erreicht, wodurch eine Senkung des Primärenergieeinsatzes und somit auch der Emissionen gegenüber der

⁵ gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (AZ: 32455).

⁶ Datenbasis: Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEB): Erstellung von Anwendungsbilanzen für das Jahr 2012 für das verarbeitende Gewerbe mit Aktualisierungen für das Jahr 2009–2011, Karlsruhe 2013.

getrennten Erzeugung von Wärme und Strom ermöglicht wird. KWK-Anlagen stellen gewöhnlich Wärme bis 300 °C bereit. Im Jahr 2013 wurden in der Industrie 28,9 TWh Strom und 84,8 TWh Wärme (40 % der Wärme bis 300 °C) über KWK bereitgestellt und somit etwa 12 Mio. t CO₂ gegenüber der ungekoppelten Strom- und Wärmeumwandlung eingespart.⁷ Am weitesten verbreitet ist die KWK in Branchen, die sowohl einen hohen Strom- als auch Wärmebedarf aufweisen, wie beispielsweise in der Grundstoffchemie, Zellstoff- und Papierindustrie. Nach einer Studie⁸ im Auftrag des BMWi besteht für das Jahr 2050 das Potenzial, dass 45 bis 59 TWh Strom und 111 bis 132 TWh Wärme durch KWK bereitgestellt werden. Je nachdem, welche Annahmen für 2050 für die Emissionsfaktoren des deutschen Strom- und Wärmemixes angenommen werden, könnten etwa 3 bis 20 Mio. t an CO₂ gegenüber der ungekoppelten Umwandlung eingespart werden.

5 Wärmespeicherung

Wärmespeicher dienen dazu, Abwärme von Wärmequellen aufzunehmen und bei Bedarf an Wärmesenken abzugeben. Dadurch kann Abwärme effektiver und zeitunabhängig genutzt und der Einsatz von Primärenergie und die daraus resultierenden THG-Emission verringert werden. Im interessanten Temperaturbereich ab 100 °C liegt die untere Grenze für Abwärmeaufkommen in Abgasströmen der Industrie – die nach dem Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) erfasst werden – je nach Berechnungsmethode und Quelle bei 127 bis 500 PJ. Im Folgenden werden zwei Beispiele für den Einsatz eines stationären und eines mobilen Wärmespeichers aufgeführt:

5.1 Stationäre Wärmespeicher

Oft fällt Abwärme aus Industrieprozessen nicht kontinuierlich an, da viele Prozesse chargenweise betrieben werden. Aus diesem Grund können stationäre Wärmespeicher in der Industrie zur energieeffizienteren Produktion von Produkten eingesetzt werden. Diese nehmen die diskontinuierlich anfallende Abwärme aus dem energieintensiven Prozess auf und stellen sie einer geeigneten Wärmesenke zur Verfügung.

Im Rahmen einer Studie zur Nutzung der Abwärme aus dem Ofenabgas eines Elektrolichtbogenofens wurde ein Referenzkonzept mit Hilfe eines 2-Tank-

Speichers erstellt. Da der Recyclingprozess von Stahlschrott ein sehr energieintensiver Prozess ist, entstehen enorme Abwärmemengen, die bislang ungenutzt blieben. Ungefähr 18 % der im Prozess eingesetzten Energie geht über das Rauchgas des Elektrolichtbogenofens verloren. Mit Hilfe eines Wärmeübertragers wird diese Energie zu einem Großteil auf eine sensible Flüssigsalzschnmelze übertragen, welche gleichzeitig auch als Speichermedium dient. Durch die hohen Abgastemperaturen kann die Salzschnmelze auf eine Temperatur von bis zu 400 °C aufgeheizt und so eine mittlere thermische Leistung von ca. 10 MW zurückgewonnen werden. Da im untersuchten Stahlwerk keine Wärmesenken zur Verfügung standen, wurde aus dem Speicher ein kontinuierlicher Rückverstromungsprozess mit einer elektrischen Leistung von 2,9 MW versorgt.

5.2 Mobile Wärmespeicher

Mobile Speicher können Abwärmepotenziale erschließen, die mit leitungsgebundenen Transportsystemen nicht kosteneffizient zu erschließen sind. Technische und ökonomische Betrachtungen lieferten vielversprechende Ergebnisse um mit einem mobilen Speicher konkurrenzfähige Wärmegestehungskosten im Vergleich zu fossilen Energieträgern zu erreichen. Dies konnte am Beispiel einer Demonstrationsanlage mit einem offenen Sorptionsprozess eines 14 t-Zeolith-Speichers, der über ein Jahr betrieben wurde, gezeigt werden. Als Abwärmequelle diente Anzapfdampf aus einer Turbine in einer Müllverbrennungsanlage und als Wärmeabnehmer ein industrieller Trocknungsprozess. Es konnten pro Transportzyklus Gaseinsparungen von 3,7 MWh und CO₂-Einsparungen von 400 kg erreicht werden. Die Wärmegestehungskosten lagen bei 150 EUR/MWh für die Demonstrationsanlage, wobei die Kosten für geeignete Anwendungen und bei einer Kleinserienproduktion der Speicher auf 73 EUR/MWh reduziert werden können.

6 Bewertungsmethodik für Industriegebäude

Universelle Gewerke übergreifende Planungstools sind eine Grundvoraussetzung für die Erstellung und den Betrieb von energie- und emissionsoptimierten Produktionsstätten. Der bedeutende Aspekt ist hier die Berücksichtigung der Interaktion von Produktionsprozessen, der Gebäudeinfrastruktur und der Gebäudegestaltung bei der Planung neuer Produktionsgebäude. Durch die Koppelung thermischer Simulationsmodelle mit prozesstechnischen Berechnungsmethoden kann der Einfluss von Pro-

⁷ Berechnet auf Basis: AGEB, Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2014, 2015

⁸ Endbericht zum Projekt IC4-42/13, Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung, B

duktionsmaschinen auf den Gesamtenergiebedarf von Produktionsgebäuden bewertet werden, sodass bereits im Planungsprozess die Gebäudehülle und die Gebäudetechnik besser auf die Belange der Produktionsprozesse abgestimmt werden kann. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelt derzeit in Zusammenarbeit mit weiteren Fraunhofer-Instituten ein solches Planungstool, in welchem prozessrelevante Parameter in die energetische Gesamtbilanz implementiert werden. Die Steigerung der Energieeffizienz von Produktionsgebäuden durch eine umfassende Planungsmethodik kann damit einen wichtigen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende leisten.

Auch wenn in diesem Beitrag nur eine kurze Übersicht über einzelne Möglichkeiten für eine nachhaltige und effiziente Wärmeversorgung der Industrie aufgezeigt werden konnte, zeichnet sich jedoch ab, dass in Zukunft nur die Kombination einer Vielzahl an Technologien und der Einsatz verschiedenster Ressourcen – so individuell wie die Industrie selbst – zum Ziel führen kann.

7 Zusammenfassung

Der Wärmebedarf der Industrie in Höhe von 534 TWh (Jahr 2012) wird hauptsächlich durch die Energieträger Erdgas und Kohle gedeckt. Dabei wurden rund 159 Mio. t CO₂ emittiert, was 48 % des Industriesektors (inkl. Strom und Prozessemissionen) entspricht.

Bei einer rein theoretischen Betrachtung geht derzeit knapp die Hälfte der eingesetzten Energie zur Wärmeerzeugung als Abwärme verloren, die bei vollständiger Nutzung bis zu 60 Mio. oder bei Verstromung bis zu 22 Mio. t CO₂ einsparen könnte. Um dieses Potenzial zu nutzen, bedarf es aber noch in vielen Fällen der Aufklärung der Akteure über ihre eigenen Abwärmepotenziale sowie die Anpassung der Rahmenbedingungen (z. B. KWKG, EnEG, EEWärmeG) für die Schaffung von Anreizen und Wirtschaftlichkeit. Auch bedarf es generell noch viel F&E, wie am Beispiel der energieintensiven Industrie in NRW gezeigt werden konnte, um aus heutiger Sicht die Klimaziele der Bundesregierung bis 2050 zu erreichen. Vor allem sind Lösungen zu finden, damit der Standort Deutschland für die energie- und emissionsintensive Industrie nicht an Attraktivität verliert. Die Wärmebereitstellung über Solarthermie sowie der verstärkte Einsatz von Biomasse und KWK sind dabei gute Beispiele, wie die Wärmebereitstellung für die Industrie in Zukunft effizient und umweltfreundlich gestaltet werden kann. Auch Wärmespeicher, die sowohl zeit- als auch ortsunabhängig agieren, werden in Zukunft dazu beitragen können, besser Abwärme zu nutzen. Ebenso können Wärmespeicher fluktuierende Wärme z. B. aus Solarthermie speichern und zu gegebenen Zeitpunkten freigeben. Auch emissionsoptimierte Produktionsstätten, die gezielt die Abwärme aus Prozessen an geeigneter Stelle nutzen, weisen Wege für einen verantwortungsbewussten Umgang mit Rohstoffen auf.