

Industrielles Power-to-Heat Potenzial

Anna GRUBER¹, Franziska BIEDERMANN¹, Serafin VON ROON

FfE Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, D-80995 München, +49 89 158 121-62, agruber@ffe.de, www.ffegmbh.de

Kurzfassung:

Eine stärkere Elektrifizierung im Wärmebereich kann einen Beitrag zur Erreichung der ambitionierten Klimaschutzziele leisten. Da die Wärmeerzeugung in der Industrie aktuell überwiegend Brennstoff basiert ist, wird das Potenzial zur elektrischen Wärmeerzeugung (Power-to-Heat) in diesem Sektor untersucht. Zunächst werden die relevanten Prozesse je Branche und Temperaturniveau identifiziert und analysiert. Anschließend erfolgt eine Bewertung der Verfahren hinsichtlich deren Elektrifizierungspotenzials. Es wird ausgewiesen, welcher Anteil des Endenergieverbrauchs zur industriellen Wärmeerzeugung durch Strom gedeckt werden kann. Zudem werden die heutigen elektrothermischen Verfahren bezüglich ihrer Eignung für eine flexiblere Fahrweise untersucht. Beide Möglichkeiten können letztendlich zu einer besseren Integration der Erneuerbaren Energien beitragen.

Keywords: Power-to-Heat, P2H, Prozesswärme, Raumwärme, industrielle Wärmeerzeugung, Wärmepumpe, elektrischer Heizstab, Elektrokessel, Elektrodenkessel, elektrothermische Verfahren, Flexibilität, Demand Side Management

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Bis zum Jahr 2050 sollen in Deutschland 80 % der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 eingespart werden [1]. Durch verschiedene Maßnahmen kann der Raumwärmebedarf vor allem im Haushaltssektor deutlich gesenkt werden. Im Jahr 2050 wird der größte Anteil konventioneller Brennstoffe für industrielle Prozesse aufgewendet werden, da dieser Bedarf über die Jahre nur leicht abnimmt, wie verschiedene Studien zeigen [2]. Gleichzeitig wird der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromproduktion weiter wachsen [3]. Um das Emissionsziel einhalten zu können, muss der industrielle Wärmebedarf zukünftig teilweise durch Strom gedeckt werden. Welche industriellen Prozesse sich im produzierenden Gewerbe für Power-to-Heat eignen und wie hoch die damit verbundenen Potenziale sind, ist Gegenstand dieser Veröffentlichung. Des Weiteren wird geprüft, inwiefern elektrothermische Verfahren flexibilisierbar sind. Beide Möglichkeiten können letztendlich zu einer besseren Integration der Erneuerbaren Energien beitragen.

¹ Jungautor

2 Endenergieverbrauch zur industriellen Wärmeerzeugung

Wärme spielt in der Industrie eine bedeutende Rolle. So wurden 2012 über 70 % in der in der Industrie verbrauchten Endenergie zur Wärmeerzeugung genutzt. Mit fast zwei Dritteln wurde der Großteil dieser Energie für die Prozesswärmebereitstellung aufgewendet, die Raumwärme spielte mit knapp 10 % eine eher untergeordnete Rolle (vgl. Abbildung 1).

Endenergieverbrauch nach Sektoren und Anwendungsarten in Deutschland 2012

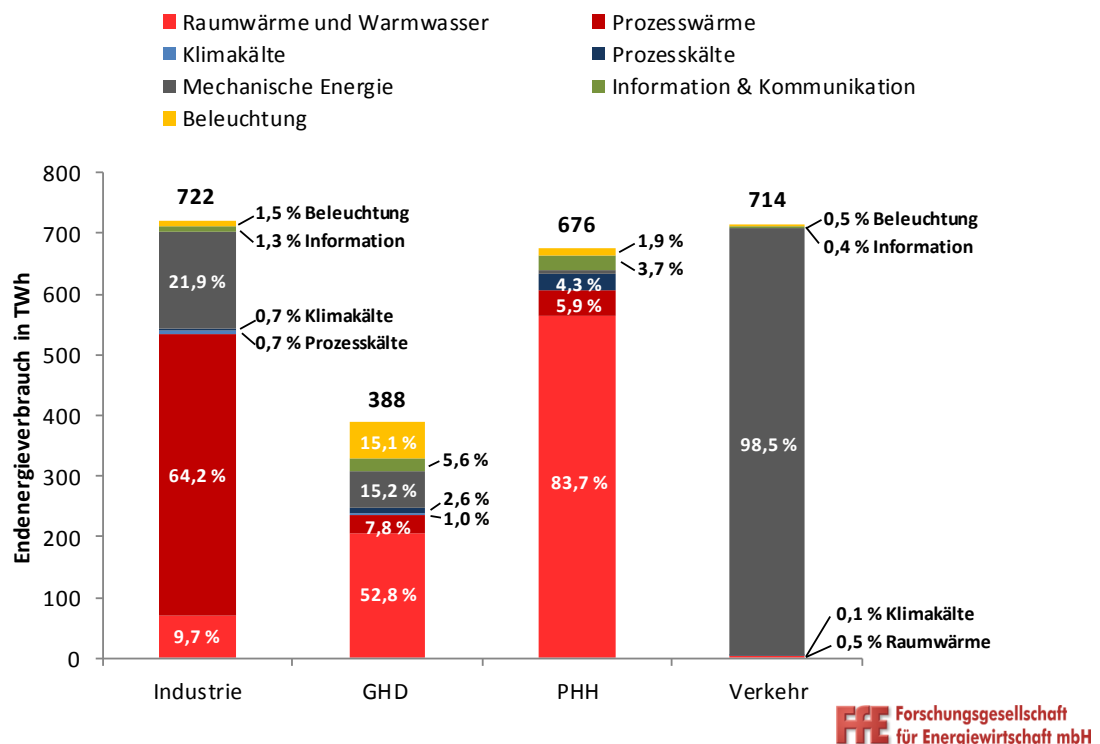


Abbildung 1: Endenergieverbrauch nach Sektoren und Anwendungsarten in Deutschland 2012 (eigene Darstellung nach [5])

In den Daten der AG Energiebilanzen wird nicht nach der Art des Energieträgers unterschieden. Somit ist nicht bekannt, ob die Wärme mittels Strom oder Brennstoff zur Verfügung gestellt wird. Abbildung 2 zeigt dagegen nur den Stromverbrauch nach Sektoren und Anwendungsarten. Daraus wird ersichtlich, dass Strom zur Erzeugung von Raumwärme in der Industrie mit knapp 1 % so gut wie keine Rolle spielt. Knapp 18 % des Stroms bzw. 41 TWh wurden im Jahr 2012 für die Erzeugung von Prozesswärme benötigt.

Stromverbrauch nach Sektoren und Anwendungsarten in Deutschland 2012

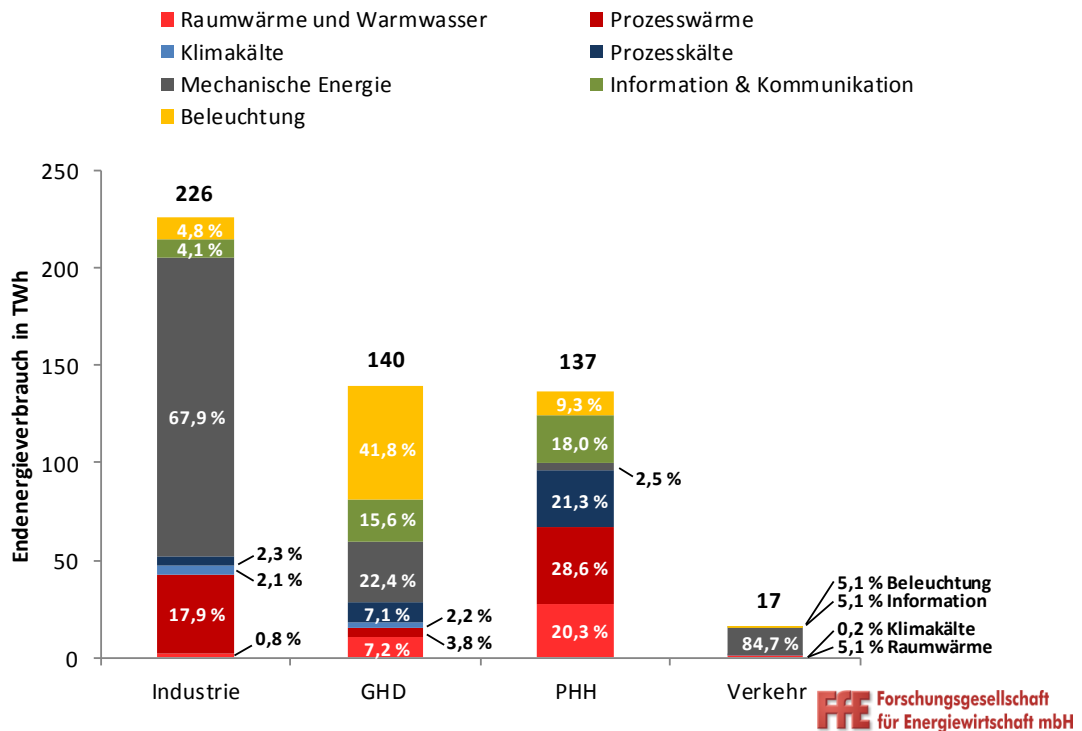


Abbildung 2: Stromverbrauch nach Sektoren und Anwendungsarten in Deutschland 2012 (eigene Darstellung nach [5])

Wird die industrielle Wärmeerzeugung nach Art des eingesetzten Energieträgers differenziert, so wird ersichtlich, dass Wärme hauptsächlich durch die Verbrennung von fossilen Gasen bereitgestellt wird. Im Raumwärmebereich wurden dadurch 2012 etwa 58 % gedeckt, bei der Prozesswärme waren es ca. 47% (vgl. Abbildung 3). Im Vergleich dazu wurde nur ein geringer Anteil an Strom zur Wärmeerzeugung genutzt (für die Raumwärme waren es 2,5 %, im Prozesswärmebereich etwa 9 %).

Wärmeanwendungen der Industrie nach Energieträgern in Deutschland 2012

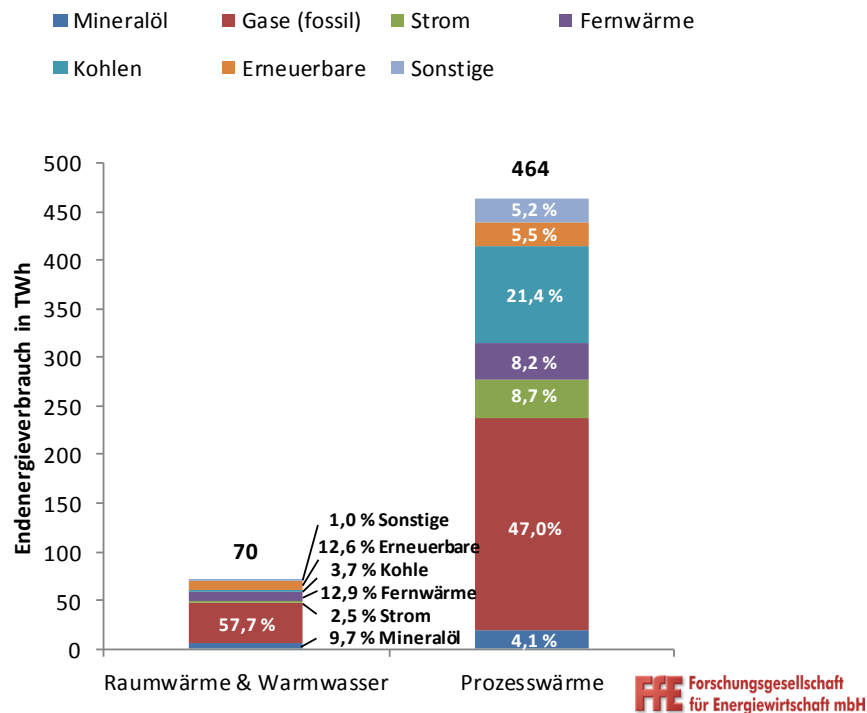


Abbildung 3: Industrielle Raum- und Prozesswärmeerzeugung nach Energieträgern in Deutschland 2012 (eigene Darstellung nach [5])

Insgesamt wurden in Deutschland im Jahr 2012 knapp 534 TWh Endenergie für die industrielle Wärmeerzeugung aufgewendet [5]. Unter der Annahme, dass die gesamte Wärme auch mittels Strom bereitgestellt werden könnte, ergibt sich ein theoretisches mittleres Elektrifizierungspotenzial von ca. 61 GW in Deutschland. Dieses Potenzial wird jedoch durch verschiedene Einflussfaktoren reduziert, wie nachfolgend beschrieben wird.

3 Kategorisierung der industriellen Wärmeerzeugung

Im ersten Schritt werden alle zur industriellen Wärmeerzeugung eingesetzten Verfahren identifiziert und kategorisiert. Neben brennstoffbasierten werden auch elektrothermische Verfahren zur Wärmeerzeugung genutzt (vgl. Abbildung 4). Zudem wird für die weitere Betrachtung differenziert nach Raum- und Prozesswärme.

Wärmeerzeugung in der Industrie			
Elektrothermische Verfahren		Brennstoffbasierte Verfahren	
Raumwärme • Kaum vorhanden	Prozesswärme • Widerstandserwärmung (direkt/indirekt) • Induktive Erwärmung • Elektrolyse • Lichtbogen	Raumwärme • Heißwasser/Dampf • Direktbefeuerung	Prozesswärme • Heißwasser/Dampf • Direktbefeuerung

Abbildung 4: Verfahren zur industriellen Wärmeerzeugung nach Anwendungsarten

3.1 Elektrothermische Verfahren

Für die Prozesswärmeerzeugung werden nach [6, 7] unterschiedliche Technologien eingesetzt: Die elektrothermische Widerstandserwärmung dient zur Erhitzung unterschiedlicherer Produkte, die erzielbare Temperatur kann über 3.000 °C liegen. Es wird zwischen direkter und indirekter Widerstandserwärmung unterschieden. Bei der direkten Widerstandserwärmung erfolgt die Umwandlung der elektrischen Energie in Wärmeenergie im Werkstück selbst. Um das Werkstück mittels indirekter Widerstandserwärmung zu erhitzen, werden z.B. Heizdrähte oder Flüssigkeitsbäder genutzt. In der Praxis wird die direkte Widerstandserwärmung unter anderem für die Nachbehandlung von metallischen Werkstücken, die Herstellung von Graphitelektroden oder das Erwärmen bei der Glasschmelze angewandt. Auch der Elektrodenkessel, in welchem Heißwasser oder Dampf erzeugt werden kann, zählt zur Gruppe der direkten Widerstandserwärmung. Die indirekte Widerstandserwärmung kommt beispielsweise bei alle Arten von Strahlungs- und Umluftöfen zum Einsatz, wie sie z.B. in der Lebensmittelbranche oder für zahlreiche andere Trocknungsprozesse eingesetzt werden. Aber auch elektrochemische Reaktionen in Galvanikbecken, der Elektrokessel zur Heißwasser- oder Dampferzeugung, das Heizschwert zur Heißwassererzeugung oder Infrarotstrahler fallen unter diese Kategorie.

Ein weiteres elektrothermisches Verfahren zur Prozesswärmeerzeugung ist die induktive Erwärmung. Dieses ist im Prinzip mit der direkten Widerstandserwärmung vergleichbar. Durch ein magnetisches Feld wird in einem Werkstück ein Strom induziert, welcher zur Erwärmung führt. Das Induktionsverfahren wird unter anderem zur Nachbehandlung von Metallen, z.B. für das Härten oder Glühen von Werkstücken, eingesetzt. Induktionstiegelöfen oder Induktionsrinnenöfen werden zum Aufschmelzen von Metallen eingesetzt.

Die Elektrolyse wird unter anderem zur Herstellung von Aluminium oder Chlor genutzt. Bei diesem stromintensiven Prozess wird durch den elektrischen Strom eine Redoxreaktion erzwungen.

Ebenfalls ein elektrothermisches Verfahren ist die Lichtbogen-Technik, welche z.B. zur Elektrostahlproduktion verwendet wird. Dabei bildet sich zwischen den Elektroden und dem Einsatzgut ein Lichtbogen. Die Übertragung der Wärme (bis zu 3.500 °C) auf das Einsatzgut erfolgt hauptsächlich über Strahlung.

Neben diesen gibt es noch weitere elektrothermische Verfahren, welche aber aufgrund ihres teilweise sehr prozessspezifischen Einsatzes oder ihrer geringen Verbreitung nicht weiter betrachtet werden. Darunter fallen die dielektrische Erwärmung, der Plasma-, der Elektronen- und der Laserstrahl.

Derzeit spielt Strom für die Bereitstellung von Raumwärme in der Industrie eine untergeordnete Rolle, so dass dieser Bereich für die weitere Betrachtung vernachlässigt wird.

3.2 Brennstoffbasierte Verfahren

Brennstoffbasierte Verfahren werden klassischerweise zur Wärmebereitstellung eingesetzt. Prinzipiell gibt es zwei Varianten: Die indirekte Wärmeerzeugung, bei welcher mittels Kessel heißes Wasser oder Dampf erzeugt wird und die Direktbefuerung mit Brennstoff. Beide

Systeme werden sowohl für die Raumwärme- als auch die Prozesswärmeerzeugung genutzt.

Die Raumwärmebereitstellung erfolgt überwiegend durch Erzeugung von Heißwasser (max. 120 °C) oder Dampf (max. 240 °C) und die anschließende Verteilung über ein Wassersystem. Seltener werden beispielsweise direktbefeuerte Gas-Dunkelstrahler oder Deckenlufferhitzer zur Raumheizung eingesetzt.

Im Temperaturbereich bis ca. 240 °C wird Prozesswärme oft indirekt über Dampf- oder Heißwassersysteme erzeugt, dies ist beispielsweise in der Lebensmittelindustrie stark verbreitet. Direktbefuerung kommt u.a. für Trocknungsprozesse oder bei höheren Temperaturniveaus zum Einsatz.

4 Methodische Vorgehensweise

Die bereits beschriebenen Verfahren werden im Folgenden hinsichtlich ihres Flexibilisierungspotenzials bzw. der Möglichkeit der Elektrifizierung untersucht.

4.1 Elektrothermische Verfahren

Ein Teil der industriellen Prozesswärme wird bereits elektrisch erzeugt. Diese elektrothermischen Verfahren werden auf deren Möglichkeit zur Flexibilisierung (Demand Side Management) geprüft. Dazu werden die relevanten Prozesse identifiziert und anhand verschiedener Kriterien bestimmt, inwiefern diese für eine Flexibilisierung geeignet sind. Als wesentliche Faktoren werden Produktqualität und Produktionsmenge definiert. Hat die Flexibilisierung Einfluss auf einen dieser beiden Faktoren, ist der Prozess nicht für eine flexible Fahrweise geeignet. Dabei wird unterstellt, dass bei einer Anzahl von weniger als 50 Abrufen pro Jahr (maximal zwei Stunden pro Abruf) noch keine Reduzierung der jährlichen Produktionsmenge erfolgt. Für ausgewählte Prozesse wird anschließend das Flexibilitätspotenzial ausgewiesen.

4.2 Brennstoffbasierte Verfahren

Für die vorhandenen brennstoffbasierten Verfahren wird differenziert nach Raum- und Prozesswärme. Für beide Anwendungsarten wird geprüft, inwiefern die jeweiligen Prozesse elektrifiziert werden können. Im ersten Schritt wird das technische Potenzial ermittelt. Dieses gibt Auskunft darüber, ob für dieses Verfahren generell statt Brennstoff auch Strom verwendet werden kann. Im zweiten Schritt wird berücksichtigt, in welchem Umfang die Elektrifizierung tatsächlich in der Praxis stattfinden kann.

4.2.1 Brennstoffbasierte Prozesswärmeerzeugung

Die Methodik zur Ermittlung des Elektrifizierungspotenzials ist in Abbildung 5 dargestellt. Zunächst erfolgt eine Identifikation und Analyse der relevanten brennstoffbasierten Prozesse je Branche und Temperaturniveau. Grundlage hierfür bilden der Endenergieverbrauch nach Branchen und Anwendungsarten nach AG Energiebilanzen [5] und der industrielle Prozesswärmebedarf nach Temperaturniveau und Branchen nach Kessler [8], nach Energieatlas Baden-Württemberg [9] sowie nach diversen Branchenleitfäden [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19].

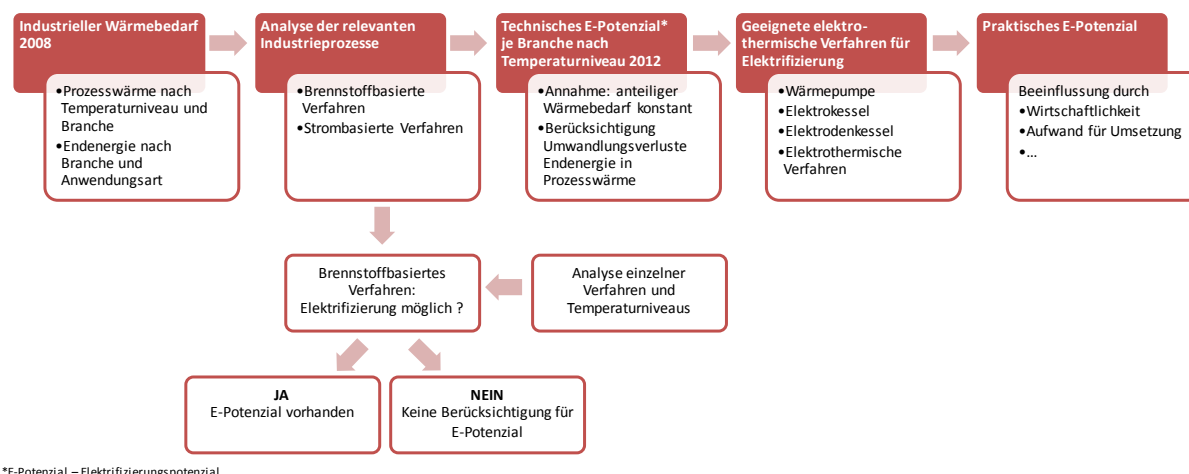


Abbildung 5: Methodik zur Ermittlung des Elektrifizierungspotenzials brennstoffbasierter Prozesswärmeerzeugung

Im nächsten Schritt werden die brennstoffbasierten Verfahren je Branche und Temperaturniveau auf deren Eignung bezüglich der Elektrifizierung untersucht sowie das technische Potenzial bestimmt. Da sich die Eingangsdaten auf unterschiedliche Jahre beziehen, wird unter Zugrundelegung eines konstant bleibenden anteiligen Wärmebedarfs je Temperaturniveau und Branche eine Hochrechnung auf das Jahr 2012 durchgeführt. Zudem wird der unterschiedlich hohe Wirkungsgrad von brennstoff- und strombasierten Verfahren bei der Energieumwandlung berücksichtigt. Aufgrund des höheren Wirkungsgrads elektrothermischer Verfahren ist davon auszugehen, dass sich allein aufgrund dieser Tatsache der Endenergieverbrauch für die Wärmebereitstellung durch eine Elektrifizierung verringern wird.

Zugleich werden die für eine Energieträgersubstitution geeigneten elektrothermischen Verfahren für die jeweiligen Prozesse und Temperaturniveaus bestimmt. Das praktische Potenzial beinhaltet verschiedene Einflüsse, welche reduzierend auf das technische Elektrifizierungspotenzial wirken. Beispielsweise sind Prozesse, welche im Verfahren den Brennstoff gleichzeitig als Rohstoff nutzen, nicht für eine Elektrifizierung geeignet. Ist ein Ersatz der gesamten Produktionsanlage für die elektrische Wärmeerzeugung erforderlich, wird dieses Verfahren ebenfalls nicht berücksichtigt.

Aufbauend auf dem Elektrifizierungspotenzial, welches als Energiemenge ausgegeben wird, wird die mittlere, an einem typischen Werktag auftretende, zusätzliche elektrische Last ausgewiesen (vgl. Abbildung 6). Normierte Brennstofflastgänge sowie –dauerlinien der FfE dienen als Eingangsgrößen für die Bestimmung des werktäglichen Brennstoffverbrauchs. Da in den Betrieben unterschiedliche Schichtmodelle Anwendung finden, wird für die Bestimmung der mittleren thermischen Leistung lediglich der Zeitraum zwischen 6 und 22 Uhr werktags betrachtet. Der Energieverbrauch an Werktagen errechnet sich durch Aufsummierung der höchsten Lasten in 3.840 Stunden (entspricht 240 Arbeitstagen à 16 Stunden). Es wird in diesem Zusammenhang davon ausgegangen, dass die höchste Wärmelast werktags anfällt, da zu diesen Zeiten sowohl Bedarf an Raum- als auch an Prozesswärme herrscht. Zu Zeiten, in welchen eine geringere oder keine Produktion stattfindet, ist davon auszugehen, dass trotz geringerer Abwärme aus den Prozessen meist eine geringere Wärmelast vorhanden ist.

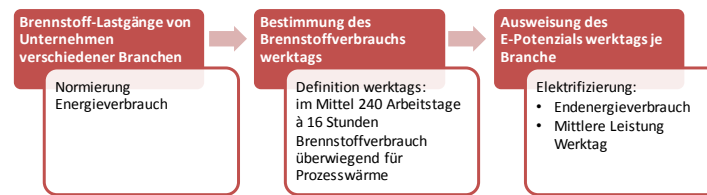


Abbildung 6: Methodik zur Bestimmung der mittleren thermischen Leistung (Prozesswärme) eines Werktags

Die mittlere Leistung für die Prozesswärmeerzeugung an einem Werktag errechnet sich somit aus:

$$\emptyset P_{th,PW} = \frac{E_{th,PW,werktags}}{t_{werktags}}$$

Mit:

$\emptyset P$ – mittlere Leistung in GW

th – thermisch

PW – Prozesswärme

E – Endenergie in GWh/a

werktags – Montag bis Freitag, 6 bis 22 Uhr

t – Stunden des Jahres in h/a

Die ausgewiesene mittlere Leistung für einen typischen Werktag wird anschließend sowohl für das technische als auch das praktische Potenzial angegeben.

4.2.2 Brennstoffbasierte Raumwärmeerzeugung

Der Bereich der Raumwärmeerzeugung wird ebenfalls einer Analyse hinsichtlich der Temperaturniveaus und Branchen unterzogen. Anschließend erfolgt wiederum eine Einschätzung der Verfahren hinsichtlich deren Möglichkeit zur Elektrifizierung. Für die Potenzialbestimmung und die Ausweisung des Endenergieverbrauchs für die Elektrifizierung werden auch hier die unterschiedlichen Wirkungsgrade bei der Energieumwandlung berücksichtigt. Die für die elektrische Raumwärmeerzeugung geeigneten Verfahren sind zum einen Wärmepumpen, zum anderen Elektroheizkessel sowie elektrische Heizstäbe. Elektrodenkessel können zwar prinzipiell ebenfalls genutzt werden, diese werden jedoch meist nur dort eingesetzt, wo primär Prozesswärme in Form von Dampf benötigt wird. Wird die Raumwärme zukünftig durch Wärmepumpen bereitgestellt, muss der COP², welcher hier im Mittel mit 3 angesetzt wird, berücksichtigt werden. Dadurch ergibt sich ein deutlich geringerer Endenergieverbrauch (vgl. Abbildung 7).

² COP – Coefficient of Performance bzw. Verhältnis von eingesetzter elektrischer Leistung zu erzeugter thermischer Leistung



Abbildung 7: Methodik zur Ermittlung des Elektrifizierungspotenzials brennstoffbasierter Raumwärmeezeugung

5 Bestimmung des Flexibilisierungs- und Elektrifizierungspotenzials

Die Flexibilisierungs- und Elektrifizierungspotenziale zur Wärmeezeugung werden in den folgenden Abschnitten differenziert nach Verfahren und Anwendungsart ausgewiesen.

5.1 Elektrothermische Verfahren

Die elektrothermischen Verfahren werden, wie bereits erwähnt, hinsichtlich ihrer Möglichkeit zur Flexibilisierung untersucht und – sofern möglich – deren Flexibilisierungspotenzial ausgewiesen.

5.1.1 Elektrische Prozesswärmeezeugung

Im Bereich der Prozesswärmeezeugung gibt es bereits verschiedene Verfahren, welche rein elektrisch betrieben werden bzw. aus verfahrenstechnischen Gründen betrieben werden müssen. Im Rahmen einer anderen Veröffentlichung der FfE wurden bereits die stromintensiven Prozesse hinsichtlich ihrer Flexibilisierung untersucht [20]. Für folgende Verfahren konnten bereits Flexibilisierungspotenziale in Deutschland und Österreich ausgewiesen werden:

Tabelle 1: Ausgewiesene positive Lastflexibilisierungspotenziale stromintensiver Prozesse [20]

	Potenzial in Deutschland	Potenzial in Österreich	
Aluminiumelektrolyse	270	-	MW
Chloreelektrolyse	590	10	MW
Elektrolichtbogenofen	718	33	MW

Die hier ausgewiesenen Potenziale beziehen sich auf die flexibilisierbare Leistung, welche durch eine Lastverschiebung (Lastreduktion) industrieller Verbraucher zur Verfügung gestellt werden kann, ohne dass es zu Produktionsausfällen kommt. Elektrolysezellen bei der Primäraluminiumherstellung sowie Lichtbogenöfen bei der Elektrostahlproduktion können aufgrund einer hohen Anzahl an jährlichen Betriebsstunden nur positives Potenzial durch eine kurzzeitige Leistungsreduktion zur Verfügung stellen. Die Elektrolysezellen bei der Chlorherstellung weisen dagegen zusätzlich negatives Potenzial auf, da die Anlagen zur Chlorproduktion meist nicht zu 100 % ausgelastet sind. Jedoch ist das positive Potenzial durch Abschalten oder Reduktion der Zellenleistung als größer zu betrachten.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zusätzlich weitere elektrothermische Verfahren betrachtet und auf deren Flexibilität hin untersucht. Tabelle 2 zeigt die untersuchten Technologien sowie deren Eignung hinsichtlich einer flexibleren Betriebsweise. Die Einteilung der Verfahren wurde auch im Rahmen verschiedener Expertenrunden diskutiert.

Tabelle 2: Elektrothermische Verfahren nach [6, 7, 8] und deren Eignung hinsichtlich Flexibilisierung

Verfahren	Art der Erwärmung	Anlage	Betrieb	Flexibilisierung (technisch) möglich	Beeinflussung Produktqualität	Beeinflussung Produktionsmenge	hoher organisatorischer Aufwand	praktisch geeignet für Flexibilisierung
Widerstandserwärmung	direkt	konduktive Erwärmungsanlagen (Standanlagen)	diskontinuierlich	✓		✓		✗
		konduktive Erwärmungsanlagen (Durchlaufanlagen)	kontinuierlich	✓		✓		✗
		Widerstandsschweißanlage	diskontinuierlich					✗
		Elektroschlackeschmelzverfahren	diskontinuierlich		(✓)			✗
		Siliziumcarbid-Ofen	diskontinuierlich	✓	✓			✗
		Graphitierungsöfen	diskontinuierlich	✓	✓			✗
		Elektroglasschmelzöfen - vollelektrisch beheizte Glasschmelze	diskontinuierlich	✓				✓
		Elektroglasschmelzöfen - el.	kontinuierlich	✓				✓
		Zusatzbeheizung von Glasschmelzen	kontinuierlich	✓				✓
		Elektrodensalzbadöfen	kontinuierlich	✓	✓			✗
	Elektrodenkessel	diskontinuierlich	✓				✓	
	indirekt	Strahlungsöfen, Heißluft-/Umluftöfen	kontinuierlich / diskontinuierlich	✓	✓	(✓)		✗
		Widerstandsöfen	kontinuierlich / diskontinuierlich	✓		✓		✗
		Walzentrockner	kontinuierlich	✓		✓		✗
		Elektrokessel	diskontinuierlich	✓				✓
		Heizschwert	diskontinuierlich	✓				✓
		Galvanik	diskontinuierlich	✓	✓	✓		✗
		Infrarotstrahler (Prozesswärme)	diskontinuierlich	✓	✓	✓		✗
		Infrarotstrahler (Raumwärme)	diskontinuierlich	✓				✓
		Elektrolyse	Aluminiumelektrolyse	kontinuierlich	✓			
Chlorelektrolyse			kontinuierlich	✓				✓
induktive Erwärmung	induktives Glühen (mobile Geräte)	diskontinuierlich	✓	✓			✗	
	induktives Härten	diskontinuierlich	✓	✓			✗	
	induktives Löten	diskontinuierlich					✗	
	induktives Schweißen	diskontinuierlich					✗	
	Induktives Schmelzen (Tiegelöfen)	diskontinuierlich	✓				✓	
	Induktives Schmelzen (Rinnenöfen)	kontinuierlich	✓		✓		✗	
dielektrische Erwärmung	Hochfrequenz-Trocknung	kontinuierlich / diskontinuierlich	✓	✓			✗	
	Mikrowellentrocknung	kontinuierlich / diskontinuierlich	✓	✓			✗	
Lichtbogen-erwärmung	Lichtbogenöfen	diskontinuierlich	✓				✓	
Plasma-strahlererwärmung	Plasmaschmelzöfen	diskontinuierlich	✓	✓			✗	
	Plasmaschneiden	diskontinuierlich					✗	
Elektronen-strahlererwärmung	Elektronenstrahlkanone	diskontinuierlich	✓	✓	✓		✗	
Laserstrahl-erwärmung	Laser	diskontinuierlich					✗	

Demnach eignen sich folgende Anlagen bzw. Verfahren für eine flexiblere Fahrweise:

- Elektroglasschmelzöfen
- Infrarotstrahler für die Raumwärmeerzeugung
- induktives Schmelzen (Tiegelöfen)
- Elektrokessel
- Elektrische Heizstäbe
- Elektrodenkessel

Bei diesen Verfahren entsteht durch kurzzeitige Unterbrechung der Stromversorgung keine Beeinflussung der Produktqualität bzw. der Produktionsmenge. Der Aufwand für die Implementierung der Flexibilität ist im Vergleich zu anderen Anlagen als gering einzustufen.

Das technische Potenzial dieser Verfahren kann jedoch durch verschiedene Faktoren, wie beispielsweise Mindestproduktionsmenge oder Auslastungsgrad der Anlage reduziert werden und sollte im Einzelfall geprüft werden.

5.1.2 Elektrische Raumwärmeerzeugung

Wie bereits beschrieben, spielt die strombasierte Raumwärmeerzeugung eine untergeordnete Rolle. Im Jahr 2012 wurden insgesamt jeweils knapp eine TWh Strom für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser aufgewendet [5]. Aufgrund dieser geringen Verbräuche wird die Flexibilisierung von Raumwärme nicht weiter betrachtet.

5.2 Brennstoffbasierte Verfahren

Während die elektrothermischen Verfahren hinsichtlich ihrer Möglichkeit zur Flexibilisierung untersucht werden, wird im Bereich der brennstoffbasierten Verfahren geprüft, inwiefern ein Energieträgerwechsel auf Strom bzw. eine Elektrifizierung stattfinden kann.

Prinzipiell besteht die Möglichkeit, die vorhandene Wärmeerzeugung entweder komplett zu substituieren oder lediglich eine hybride Wärmeversorgung aufzubauen. Das ausgewiesene Elektrifizierungspotenzial gilt für ein Hybridsystem, in welchem das Umschalten zwischen zwei Energieträgern möglich ist. Im monovalenten System (z.B. rein elektrische oder brennstoffbasierte Wärmeerzeugung) besteht ein generelles Flexibilitätspotenzial, welches auf den meist vorhandenen Wärmespeicher und das Wärmenetz selbst zurückzuführen ist. Eine Erhöhung der Flexibilität erfolgt durch den Umstieg auf ein elektrisches System nicht.

5.2.1 Brennstoffbasierte Prozesswärmeerzeugung

Im ersten Schritt erfolgen eine Analyse der in den einzelnen Branchen eingesetzten Verfahren sowie deren benötigte Temperaturniveaus. Tabelle 3 beinhaltet einen Auszug an industriellen Prozessen je Branche, der Prozesswärmebedarf nach Branche und Temperaturniveau ist in Abbildung 8 dargestellt. Diese Kenntnisse werden im nächsten Schritt dafür genutzt, um zu prüfen, ob die verschiedenen Prozesse grundsätzlich für eine Elektrifizierung geeignet sind.

Tabelle 3: Auszug an industriellen Prozessen nach Branche (eigene Darstellung nach [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19])

Branche	Auszug an Prozessen	Branche	Auszug an Prozessen
Textil	Waschen	Metallerzeugung	Urformen / Gießen
	Trocknen		Sintern
	Färben		Roheisenerzeugung
	Fixieren	Druck	Trocknen
	Veredelung		Thermische Nachverbrennung
Holz	Kochen / Dämpfen	Lebensmittel	Trenn- und Zerteilungsprozesse
	Trocknung		Erwärmen und Erhitzen
	Pressen		Trocknungsprozesse
Fahrzeugbau	Trocknen		Homogenisierung
	Beschichten		Thermische Konservierung
	Stoffeigenschaftsänderung	Papier	Aufbereitung
Kunststoffverarbeitung	Vorbehandlung (z.B. Trocknung)		Pressen
	Plastifizieren		Trocknen
	Umformen		Veredelung
	Reinigen	Schmelzen	
Metallverarbeitung	Nachbehandlung (z.B. Trockner)	Glas&Keramik	Glühen
	Umformen / Schmieden		Granulieren
	Trennen		Trocknen
	Fügen	Steine und Erden	Brennen
	Beschichten		Trocknen
	Stoffeigenschaftsänderung		Brennen

Im Temperaturbereich bis 120 °C wird auch zur Prozesswärmeerzeugung häufig Heißwasser oder Dampf eingesetzt. Beispielsweise finden in der Lebensmittelbranche Erwärmungs- und Erhitzungsprozesse oder Trocknungsprozesse im Fahrzeugbau auf diesen Temperaturniveaus statt. Bei höheren Temperaturniveaus (ab ca. 240 °C) wird die Wärmeerzeugung überwiegend mittels Direktbefuerung oder durch elektrothermische Verfahren realisiert. Die Anwendungsbereiche sind sehr vielfältig: vom Härten von Stahl (ca. 730 °C) über das Brennen von Ziegeln (ca. 1.100 °C) oder das Plastifizieren von Kunststoff (ca. 200 °C) wird Wärme auf verschiedenen Temperaturniveaus in unterschiedlichsten Anlagen benötigt.

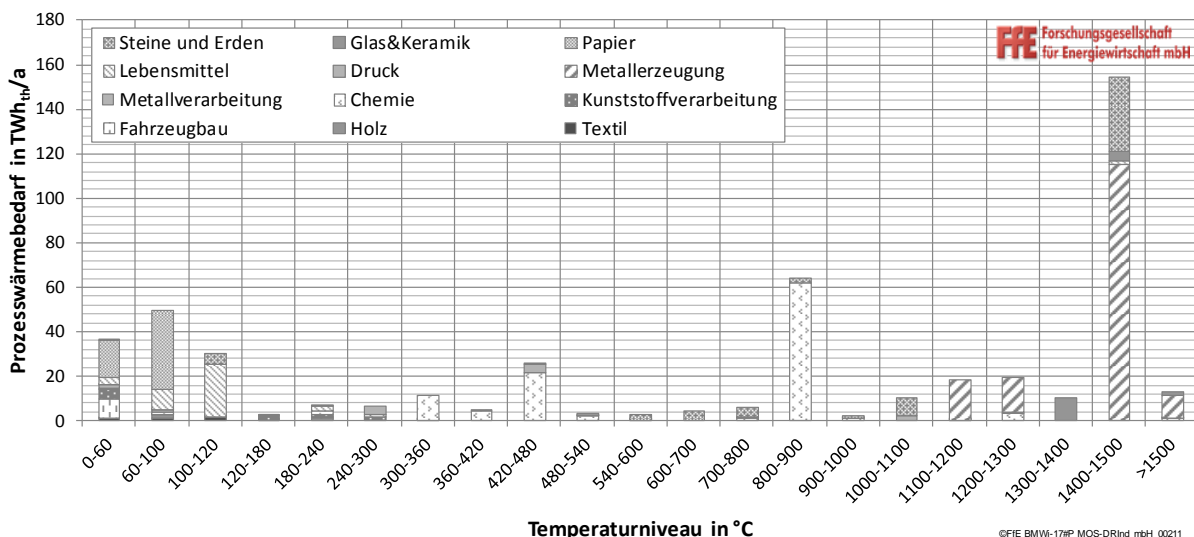


Abbildung 8: Prozesswärmebedarf nach Branche und Temperaturniveau (eigene Darstellung nach [8])

Nach eingehender Analyse der Prozesse und Diskussion in Expertenrunden können aus technischer Sicht alle Verfahren mit Prozesswärmebedarf auf eine rein elektrische Erzeugung der Wärme umgestellt werden. Allerdings wirken verschiedene Einflussfaktoren reduzierend auf das Potenzial, welche im Nachgang berücksichtigt werden.

Zunächst wird das technische Potenzial der Elektrifizierung ermittelt. Der gesamte Prozesswärmebedarf beträgt für das Jahr 2008 nach [8] etwa 470 TWh/a. Es wird für die weitere Betrachtung unterstellt, dass der anteilige Prozesswärmeverbrauch je Branche und Temperaturniveau annähernd konstant bleibt. Im Vergleich dazu liegt der Endenergieverbrauch (Strom und Brennstoffe) für die Prozesswärmeerzeugung im Jahr 2012 bei ca. 460 TWh/a [5]. Dieser Verbrauch wird wiederum anteilig den verschiedenen Branchen und Temperaturniveaus zugeordnet. Subtrahiert man von diesem Betrag den Stromverbrauch sowie den Einsatz von Erneuerbaren für die Erzeugung von Prozesswärme (40 und 25 TWh in 2012), ergibt sich ein verbleibendes Elektrifizierungspotenzial von ca. 400 TWh. Für die Umrechnung der restlichen Endenergie in Prozesswärme wird ein mittlerer Wirkungsgrad von 87 % über die verbleibenden Technologien zur Wärmeerzeugung verwendet. Aufgrund der Wirkungsgradsteigerung (Umwandlung von Strom in Prozesswärme wird mit 100 % Wirkungsgrad bewertet) durch die Elektrifizierung reduziert sich das Potenzial auf ca. 350 TWh/a.

Dieses kann aus technischer Sicht durch die in Abbildung 9 dargestellten strombasierten Verfahren in Abhängigkeit des gewünschten Temperaturniveaus bereitgestellt werden.

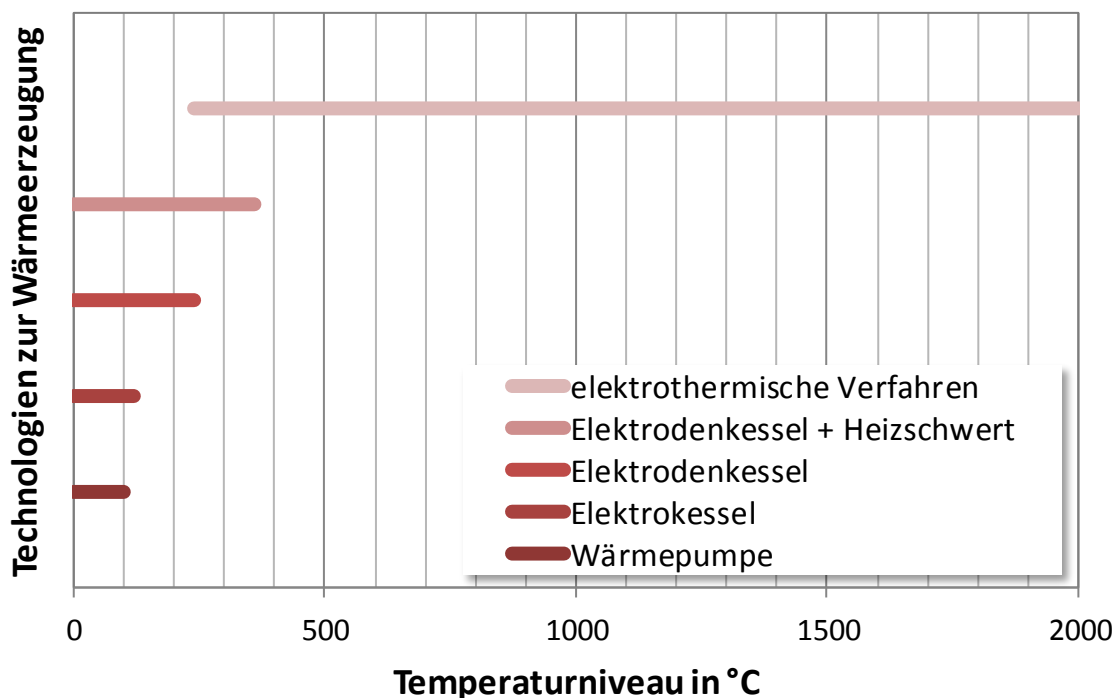


Abbildung 9: Geeignete Technologien zur Wärmeerzeugung nach Temperaturniveau

Tabelle 4 zeigt verschiedene elektrothermische Verfahren, welche als Alternative zu den aktuell brennstoffbasierten Verfahren zum Einsatz kommen könnten. Diese gelten überwiegend für höhere Temperaturniveaus (ab 100 bis 300 °C).

Tabelle 4: Mögliche elektrothermische Verfahren nach [6, 7, 8] als Alternative zu den brennstoffbasierten Verfahren

Verfahren	mögliches elektrothermisches Verfahren
Härten / Vergüten	induktive Erwärmung
Trocknen	Widerstandserwärmung indirekt (Konvektion)
Spritzguß (Kunststoff)	Widerstandserwärmung indirekt (Konvektion / Wärmestrahlung)
Metalle auf Warmformgebungstemperatur bringen	Widerstandserwärmung indirekt (Konvektion / Wärmestrahlung)
Walzentrockner (Textil, Gummi/Kunststoff)	Widerstandserwärmung indirekt (Wärmeleitung)
Trocknen	IR Strahler
Trocknen	Widerstandserwärmung indirekt (Wärmestrahlung) IR Ofen
Schweißen, Löten, Schmelzen	induktive Erwärmung
Trocknen	Dielektrische Erwärmung (HF oder Mikrowellentrocknung)
Schmelzen, Erwärmen	Plasmastrahlerwärmung
Schmelzen, Vergüten, Schweißen	Elektronenstrahlerwärmung
Erwärmen für Warmumformung von Metallen	Widerstandserwärmung direkt
Schweißen	Widerstandserwärmung direkt
Glas schmelzen	Widerstandserwärmung direkt
Härten / Vergüten	Widerstandserwärmung direkt (Elektrosalzbadofen)

Folgende Einflüsse wirken jedoch reduzierend auf das Potenzial:

- Brennstoff wird als Rohstoff für die Reaktion benötigt, wie es beispielsweise bei der Koksherstellung (Redoxreaktion) der Fall ist. Dieser Prozess kann nicht durch Strom substituiert werden.
- Die Elektrifizierung einzelner Verfahren ist mit einem Umstieg auf ein anderes, strombasiertes Verfahren verbunden und hätte einen Anlagenneubau zur Folge. Beispielsweise ist hier die Rohstahlerzeugung im Hochofen zu nennen. Stahl mit gleicher Qualität wie im Hochofen kann prinzipiell auch im Lichtbogenofen erzeugt werden. Allerdings ist die Vorschaltung einer Direktreduktionsanlage zur Eisenschwammerzeugung notwendig. Zudem wäre ein Anlagenneubau mit sehr hohen Investitionen verbunden. Das führt jedoch dazu, dass diese Prozesse in der Praxis kein Elektrifizierungspotenzial aufweisen.

Für die Bestimmung des praktischen Elektrifizierungspotenzials werden somit folgende Prozesse nicht berücksichtigt:

- Koksherstellung
- Stahlerzeugung im Hochofen
- Primärkupferherstellung
- Glaserzeugung
- Einzelne Prozesse der Grundstoffchemie wie Methan- und Ammoniakproduktion

Somit ergibt sich ein verbleibendes Elektrifizierungspotenzial von ca. 180 TWh/a (vgl. Abbildung 10). Der gesamte Endenergieverbrauch für die Prozesswärmeerzeugung reduziert sich somit um 6 bzw. 13 %. Bezogen auf den Gesamtstromverbrauch von etwa 520 TWh nach [4] in 2012 wäre das eine Erhöhung um 35 %.

Die mittlere Leistung der Elektrifizierung beträgt an einem Werktag unter Anwendung der oben beschriebenen Methodik insgesamt etwa 29 GW. Somit könnte sich durch die

Elektrifizierung die mittlere Last, die nach [21] im Jahr 2012 bei etwa 53 GW lag, um diesen Betrag erhöhen.

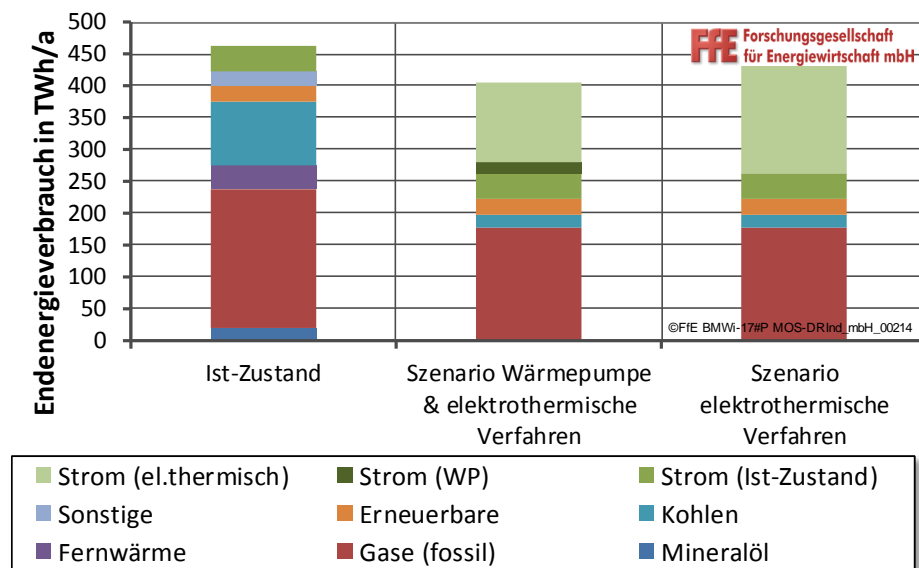


Abbildung 10: Endenergieverbrauch zur Prozesswärmeerzeugung im Ist-Zustand und durch Elektrifizierung

5.2.2 Brennstoffbasierte Raumwärme- und Warmwassererzeugung

Die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung erfolgt, wie bereits beschrieben, überwiegend durch den Einsatz von Brennstoffen. Die Verteilung wird üblicherweise durch Heißwasser- oder Dampfsysteme realisiert, wie auch die Erfahrungen aus den Lernenden Energieeffizienz-Netzwerken der FfE [22] zeigen. Die Erzeugung von Heißwasser oder Dampf kann generell auch elektrisch erfolgen. Auch direktbefeuerte Systeme zur Raumwärmeerzeugung können durch elektrisch betriebene substituiert werden. Somit kann im Raumwärmebereich eine vollständige Umstellung auf strombasierte Verfahren erfolgen. Lediglich der Anteil der Erneuerbaren wird nicht für die Elektrifizierung berücksichtigt. Der Endenergieverbrauch für die Raumwärmeerzeugung (inkl. Warmwasser) betrug im Jahr 2012 knapp 70 TWh, etwa 9 TWh entfielen davon auf die Erneuerbaren [5].

Tabelle 5: Industrielle Raumwärmeerzeugung nach Energieträgern (eigene Darstellung nach [5])

	Mineralöl	Gase (fossil)	Strom	Fernwärme	Kohlen	Erneuerbare	Sonstige	Gesamt	Einheit
Raumwärme	6,8	40,4	1,7	9,0	2,6	8,8	0,7	69,9	TWh/a

Unter Berücksichtigung der verschiedenen hohen Wirkungsgrade bei der Energieumwandlung ergibt sich ein industrieller Raumwärmeverbrauch abzüglich der Erneuerbaren von ca. 53 TWh für 2012, welcher dem Stromverbrauch der Elektrokessel (100 % Wirkungsgrad) entspricht.

Neben Wärmepumpen zur Heißwassererzeugung (Temperaturniveau bis ca. 100 °C) können auch Elektrokessel (Temperaturniveau bis ca. 160 °C) oder Elektrodenkessel (Temperaturniveau bis 240 °C) zur Heißwasser- oder Dampferzeugung zum Einsatz kommen. Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Raumwärmeversorgung ein maximales Temperaturniveau von 100 °C aufweist. Somit könnte die gesamte Wärmeerzeugung auch durch Wärmepumpen gedeckt werden. Bei einem mittleren COP von

3 liegt der Stromverbrauch zur Raumwärmeerzeugung mittels Wärmepumpen demnach nur noch bei etwa 18 TWh/a (vgl. Abbildung 11).

Die mittlere Last der Raumwärmeerzeugung ergibt sich durch Division der Energiemenge durch die Betriebszeit der Raumwärmeversorgung, welche nach [23] überschlägig mit 3.500 h/a angesetzt wird, und beträgt im Mittel knapp 15 GW (Elektrokessel). Wird auch hier die Versorgung mittels Wärmepumpen realisiert, reduziert sich die mittlere Last auf etwa 5 GW.

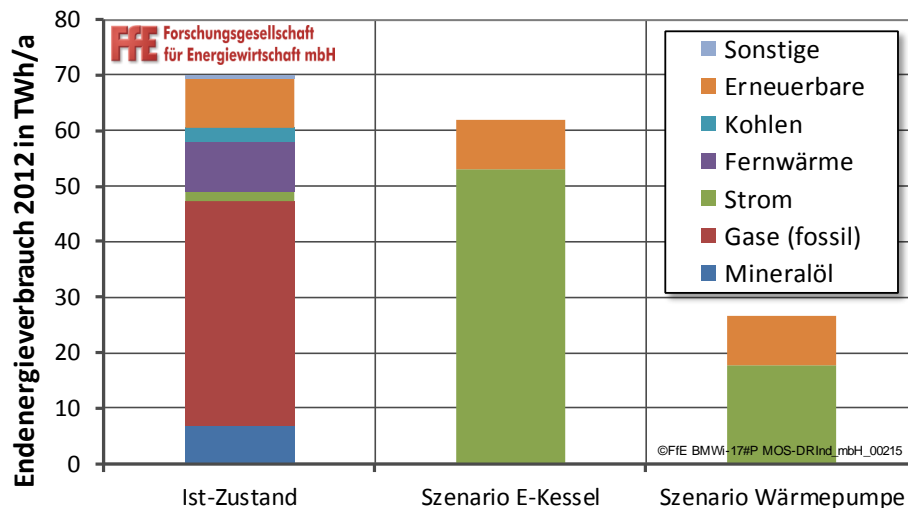


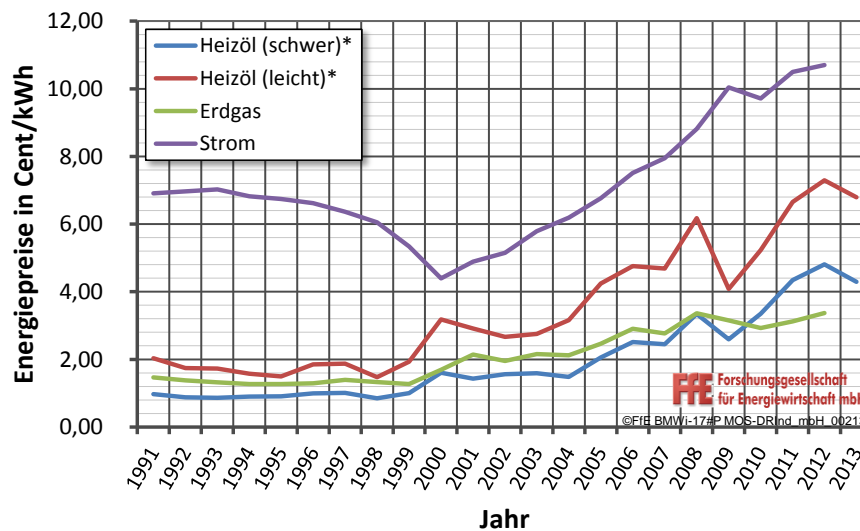
Abbildung 11: Endenergieverbrauch zur Raumwärme- und Warmwassererzeugung im Ist-Zustand und durch Elektrifizierung

6 Zeitnahe Umsetzung in die Praxis

Wie bereits erwähnt, beeinflussen verschiedene Faktoren das praktische Elektrifizierungspotenzial. Allerdings kann vor allem im Temperaturbereich bis 240 °C eine relativ einfache Installation von elektrischen Wärmeerzeugern erfolgen. Beispielsweise ist hier die Integration von Elektro- oder Elektrodenkesseln sowie elektrischen Heizstäben zu nennen. Die spezifischen Investitionen für Elektrodenkessel belaufen sich nach [24] auf 125 bis 350 €/kWh und sind im Vergleich zu anderen Wärmeerzeugungsarten verhältnismäßig günstig. Elektrokessel sowie elektrische Heizstäbe sind sehr einfach aufgebaut und leicht integrierbare Steuerungen. Eine Einbindung dieser Wärmeerzeuger kann in den meisten Fällen mit nur geringem Aufwand realisiert werden. Für die Integration in ein bestehendes Heizsystem müssen neben dem elektrischen Wärmeerzeuger lediglich Rohrleitungen, diverse Armaturen sowie eine Pumpe einkalkuliert werden. Darüber hinaus entsteht Personalaufwand für die hydraulische Einbindung sowie die Aufschaltung auf die zentrale Steuerung. Teilweise wird auch ein zusätzlicher Wärmespeicher im Zuge des Umbaus installiert.

Negativ wirkt sich jedoch die Entwicklung der Energiepreise aus. In Abbildung 12 ist diese für die Industrie seit 1991 aufgetragen. Die Entwicklung zeigt, dass die Nettopreise für Strom mittlerweile über 7 Cent/kWh höher liegen als für Erdgas. Bei einem Vergleich mit den Heizölpreisen ist diese Differenz etwas geringer, jedoch ist der meistverwendete Brennstoff

aufgrund der Wirtschaftlichkeit Erdgas. Dies führt auch dazu, dass der Energieträger Strom trotz eines Wirkungsgrades bei elektrischen Heizgeräten von nahezu 100 % zu teuer ist, um diese Variante der Beheizung wirtschaftlich darzustellen. Hinsichtlich der Betriebskosten sind demnach brennstoffbasierte Verfahren deutlich wirtschaftlicher als elektrothermische. Die strombasierte Wärmeerzeugung könnte zukünftig im Falle deutlich geringerer Strompreise aufgrund der zunehmenden Einspeisung aus Erneuerbaren aus wirtschaftlicher Sicht interessant werden, wenn gleichzeitig der Preis für Brennstoffe weiter ansteigt. Aus derzeitiger Sicht ist das wirtschaftliche Potenzial als gering einzustufen.



*Preise für Heizöl beziehen sich auf den Heizwert

Abbildung 12: Übersicht der Verbraucherpreise für Energie in der Industrie (ohne MWSt) (eigene Darstellung nach 4)

7 Zusammenfassung und Ausblick

Aus technischer Sicht besteht für die industrielle Wärmeerzeugung ein bedeutendes Elektrifizierungspotenzial. Allerdings wirken verschiedene Einflussfaktoren stark mindernd auf das technische Potenzial. Größere Einflüsse sind zum einen Verfahrensumstiege, welche einen Neubau von Anlagen erfordern, zum anderen die derzeitige Situation der Energiepreise bzw. die deutlich höheren Kosten für Strom im Vergleich zu Erdgas. Einfach realisierbar und implementierbar bei gleichzeitig geringen Investitionen sind zusätzliche Elektro- oder Elektrodenkessel für die Bereitstellung von Dampf oder Heißwasser.

Einige elektrothermische Prozesse weisen Flexibilitätspotenzial auf, welches bereits heute teilweise von Unternehmen vermarktet wird. Einzelne bisher nicht flexibilisierte elektrothermische Prozesse, wie beispielsweise Power-to-Chemistry³ werden derzeit auf deren Flexibilität hin geprüft und können zukünftig ebenfalls einen Beitrag leisten. Zudem wird aktuell bei Trimet ein Versuch mit Aluminiumelektrolysezellen durchgeführt, bei welchem das Flexibilitätspotenzial erhöht wird und auch die Bereitstellung von negativer Leistung untersucht wird.

³ Evonik Industries prüft derzeit, ob deren Lichtbogenöfen durch Einsatz eines Rohproduktspeichers für eine Bereitstellung von Flexibilität geeignet sind [25].

Generell kann das Elektrifizierungspotenzial erhöht werden, wenn sich die aktuelle Situation hin zu günstigeren Strompreisen ändert oder Produktionsverfahren überdacht oder neu entwickelt werden.

Literatur

- [1] Energiekonzept - für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung in:
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf.
Berlin: BMU, 2010
- [2] Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotentiale, Hemmnisse und Instrumente in: ISI Schriftenreihe "Innovationspotentiale".
Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2013
- [3] Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; Lutz, Christian: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose - Projekt Nr. 57/12 - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2014.
- [4] Energiedaten: Gesamtausgabe. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2014
- [5] Ziesing, Dr. Hans-Joachim; Rohde, Dr. Clemens: Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012. Berlin: AG Energiebilanzen e.V., 2013
- [6] Conrad, H.; Mühlbauer, A.; Thomas, R.: Elektrothermische Verfahrenstechnik. Essen: Vulkan-Verlag, 1993
- [7] Rudolph, M.; Schaefer, H.: Elektrothermische Verfahren - Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1989
- [8] Blesl, Markus; Kessler, Alois: Energieeffizienz in der Industrie in: Springer Verlag. Berlin Heidelberg: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Forschung und Innovation, Karlsruhe, 2013.
- [9] Blesl, M.; Kempe, S.; Ohl, M.; Fahl, U.; König, A.; Jenssen, T.; Eltrop, L.: Wärmeetlas Baden-Württemberg - Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, 2008
- [10] Griepentrog, H.: Effiziente Energienutzung in der Metallindustrie - Energiekostensenkung Schritt für Schritt. Düsseldorf: Geschäftsstelle der Landesinitiative Zukunftsenergien NRW, 2003
- [11] Griepentrog, H.: Rationelle Energienutzung in der Textilindustrie. Düsseldorf: Geschäftsstelle der Landesinitiative Zukunftsenergien NRW, 2001
- [12] Griepentrog, H.: Rationelle Energienutzung in der Kunststoff verarbeitenden Industrie. Düsseldorf: Geschäftsstelle der Landesinitiative Zukunftsenergien NRW, 2002
- [13] Griepentrog, H.: Rationelle Energienutzung in der Ernährungsindustrie. Düsseldorf: Geschäftsstelle der Landesinitiative Zukunftsenergien NRW, 2000
- [14] EnviroTex GmbH: CO₂ -Minderungspotentiale durch rationelle Energienutzung in der Textilveredelungsindustrie. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2000

- [15] CO₂-Minderung durch rationelle Energienutzung in der Kunststoff-verarbeitenden Industrie. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2002
- [16] Klima schützen - Kosten senken - Energie sparen bei der Lackierung. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2006
- [17] CO₂-Minderung durch rationelle Energienutzung in der Maschinenbauindustrie. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2002
- [18] Wolfram, S.; Zitzmann, K.; Pröbstle, G.; Kapischke, J.: Effiziente Energieverwendung in der Industrie - Teilprojekt Metallschmelzbetriebe - Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetrieben. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2005
- [19] Klimaschutz durch effiziente Energieverwendung in der Papierindustrie - Nutzung von Niedertemperaturabwärme. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2003
- [20] Gruber, Anna; Biedermann, Franziska; von Roon, Serafin: Regionale Lastmanagement-Potenziale stromintensiver Prozesse in: Paper und Vortrag beim 13. Symposium Energieinnovation in Graz. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2014
- [21] Production, Consumption, Exchange Package in: <https://www.entsoe.eu/db-query/country-packages/production-consumption-exchange-package/>. Brüssel: ENTSO-E, 2014 (laufende Aktualisierung)
- [22] Lernende Energieeffizienz-Netzwerke (LEEN): München-Oberbayern, Südbayern, Vorarlberg I und II, Chiemgau-Rupertiwinkel, Bayerngas, Verbund - laufende Projekte. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2014
- [23] Hofer, R.: Analyse der Potentiale industrieller Kraft-Wärme-Kopplung. München: Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), TU München, 1994
- [24] Gerhardt, Norman; Müller, Thorsten; Schulz, Wolfgang et al.: Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien. Berlin: Agora Energiewende, 2014
- [25] Markowz, G.: Strom speichern im industriellen Maßstab in: Innovationskongress. Berlin: EVONIK Industries, 2014