



Technologien zur Dekarbonisierung
der Prozesswärme

Dampferzeugung

Faktenblatt

Mit Unterstützung der:



Niedersachsen
Allianz für Nachhaltigkeit

CO₂-arme Prozesswärme in der Dampferzeugung

Dampf wird in der Industrie für vielfältige energieintensive Anwendungen genutzt, um Wärme indirekt zu übertragen oder direkt mit einem Produkt zur Reaktion zu bringen. Derzeit wird die benötigte Wärme für die Dampferzeugung zu großen Teilen durch die Verbrennung von Erdgas als Energieträger bereitgestellt, was zu erheblichen CO₂-Emissionen führt. In diesem Beitrag wird vorgestellt, wie die industrielle Dampferzeugung ohne fossile Brennstoffe möglich ist.

Stand der Technik

Industriell wird Dampf in einem Dampferzeugungssystem zur Verfügung gestellt, das meist aus einem Kessel, Dampfleitungssystem, Speiswasserbehälter, einer Wasseraufbereitungsanlage und einer möglichen Abschlämmung besteht. In dem Kessel wird Wasser durch verschiedene Methoden erhitzt und in Dampf umgewandelt.

Je nach Bedarf und Anwendungsbereich sind in allen Leistungsgrößen unterschiedlich technisch ausgereifte Anlagenkonzepte verfügbar, welche die jeweils erforderlichen Mengen und Arten an Dampf erzeugen können.

Anwendungsfelder Dampf

Dampf wird in der Industrie vielfältig genutzt. Wichtige Anwendungsfelder sind die Papier- und Textilherstellung, die Lebensmittelindustrie, Raffinerien und die chemische Industrie, in denen Dampf zwischen 100 und 500 °C (Abbildung 1) benötigt wird.

In der Papierherstellung dient Dampf zum Erhitzen, zur Verdampfung von Wasser aus der Ablauge, zur Dispersion von Fasern aus Recyclingpapier sowie zum Trocknen von gestrichenem Papier. Die chemische Industrie nutzt Dampf sowohl stofflich (z. B. zur Dampfreformierung) als auch energetisch zur Wärmeübertragung in diversen Prozessen wie Pasteurisieren, Sterilisieren und für Crackingverfahren. In der Textilindustrie wird Dampf unter anderem beim Färben, Trocknen, Entschlichten und Bleichen benötigt. In der Lebensmittelindustrie, insbesondere in der Milch- und Fleischverarbeitung, kommt Dampf zum Pasteurisieren, Sterilisieren und Kochen zum Einsatz.

Bereitstellung von Dampf

Systeme zur Dampferzeugung variieren je nach Anwendungsgebiet in Bezug auf Dampfdruck und -temperatur. Meistens kommen Dampfkessel zum Einsatz, wobei diese in Großwasserraum- und Wasserrohrkessel unterteilt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Dampferzeugung besteht in der Nutzung einer Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage (KWK).

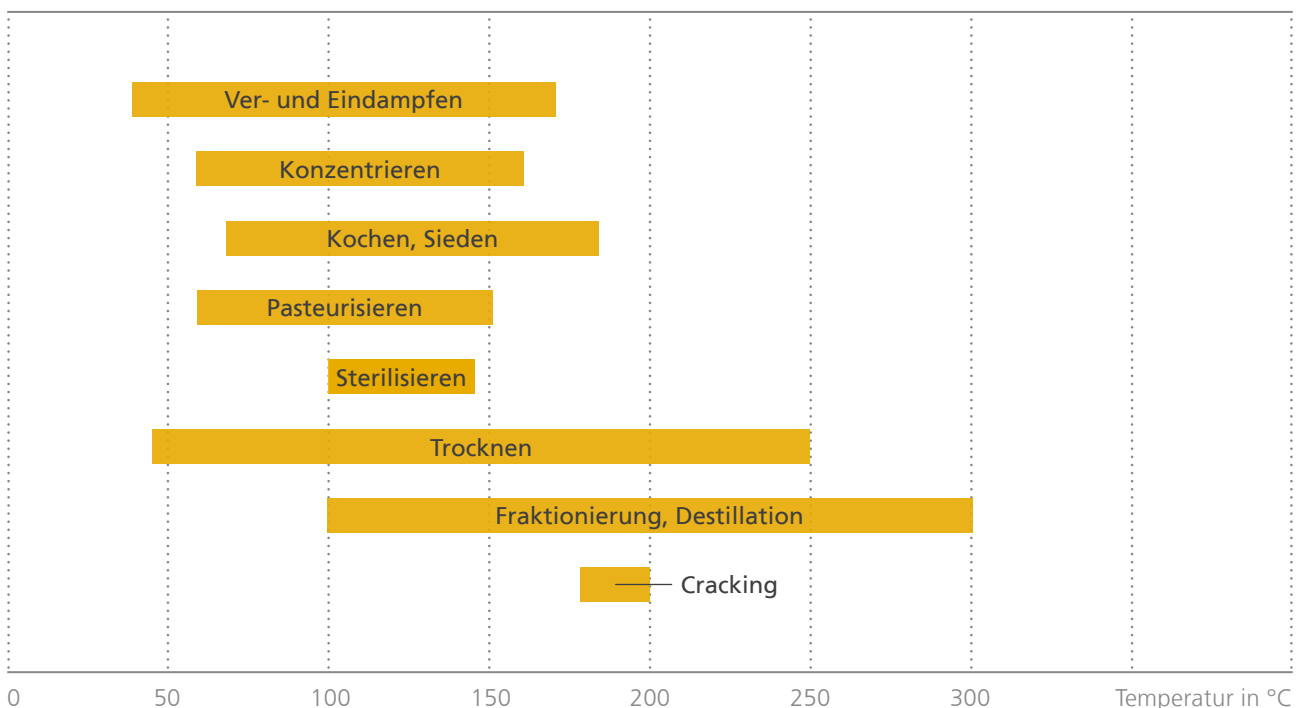


Abbildung 1 Beispiele der Dampfnutzungstemperaturen, eigene Darstellung (Fleiter et al., 2023)

Großwasserraumkessel

Das Herzstück dieser Anlage ist ein Kessel mit Feuerungsanlage (Abbildung 2), in der meist Erdgas und seltener Öl oder feste Brennstoffe verbrannt werden. Durch die Verbrennung entsteht ein heißes Rauchgas-Gemisch, das sogenannte Heißgas.

Großwasserraumkessel (meist als Flammrohr- oder Rauchrohr-Kessel ausgeführt) verwenden dieses Heißgas zur Erwärmung, Verdampfung und Überhitzung des Wassers. Dafür wird das Heißgas durch Rauchrohre geführt, die einen Wasserbehälter durchlaufen.

Großwasserraumkessel sind für geringe bis mittlere Dampfkapazitäten (0,35 bis 30 t/h) und Druckstufen (bis 30 bar) ausgelegt. Typische Dampfdrücke liegen zwischen 7 und 25 bar. Großwasserraumkessel werden von vielen Betrieben genutzt. Sie bieten Vorteile wie niedrige Kosten, eine kompakte Bauweise, einfache Wartung und hohe Effizienz, sind jedoch nicht für Hochdruckanwendungen geeignet.

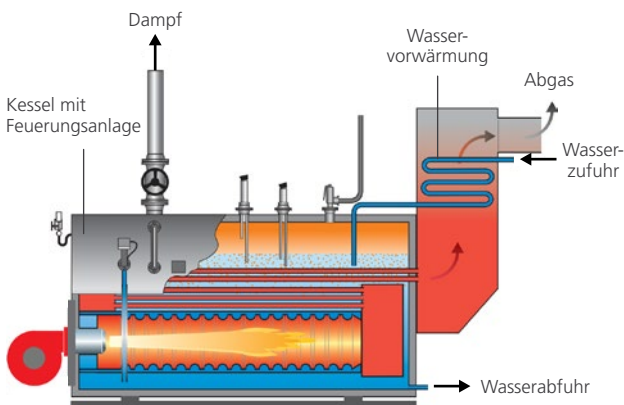


Abbildung 2 Schematische Darstellung Dampfkessel

Wasserrohrkessel

Wasserrohrkessel spielen vor allem in Sonderanwendungen und bei hohen Druckstufen und Temperaturen eine zentrale Rolle in der Prozesstechnik. Bei Wasserrohrkesseln befindet sich das Wasser in Rohren. Diese werden von einem Heißgas umströmt und sind für hohe Druckstufen bis 300 bar und Dampfleistungen von 200 bis 300 t/h ausgelegt. Wasserrohrkessel sind jedoch kostenintensiver und größer als Großwasserraumkessel.

Kraft-Wärme-Kopplung

Eine Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage (Abbildung 3) kombiniert die Erzeugung von mechanischer oder elektrischer Energie und nutzbarer Wärme. Dies kann durch verschiedene Techniken realisiert werden, wie beispielsweise Verbrennungsmotoren und Gas- oder Dampfturbinen.

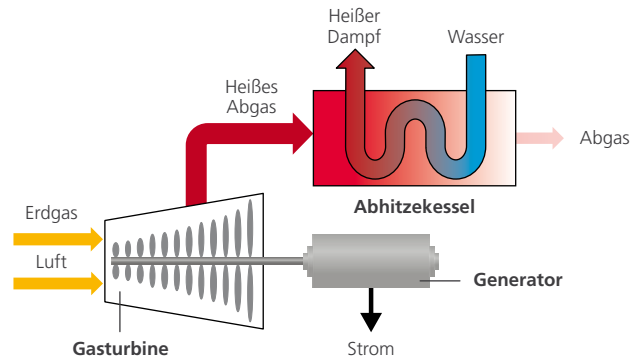


Abbildung 3 Prinzip einer KWK-Anlage

Nach der Erzeugung mechanischer/elektrischer Energie wird die Abwärme dieses Prozesses durch Wärmetauscher geleitet, um Wasser zu erhitzen und Dampf zu erzeugen. Aufgrund des gleichzeitigen Bedarfs an Strom und Wärme und der hohen Volllaststunden sind KWK-Anlagen weit verbreitet.

Technologien zur Dekarbonisierung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Dampferzeugung zu dekarbonisieren. Welche Technik genutzt wird, hängt stark von der Endanwendung und den spezifischen Anforderungen an Druck, Temperatur und Dampfzustand ab.

Energieeffizienzmaßnahmen

Eine kurzfristige Möglichkeit zur Verringerung der CO₂-Emissionen ist die Steigerung der Energieeffizienz von Bestandsanlagen durch gezielte Modernisierungs- und Optimierungsmaßnahmen. Mit sorgfältiger Wartung sind Dampferzeugungsanlagen sehr langlebig (etwa 20 bis 30 Jahre). Insbesondere ist eine Analyse des Anlagenbetriebs essenziell, um herauszufinden, an welchen Stellen Energieeffizienzmaßnahmen möglich und sinnvoll sind. Hierfür ist die Installation von Messstellen von hoher Relevanz, um den Prozess überwachen und steuern zu können.

Empfehlenswert ist das Monitoring der Temperatur (insbesondere die Abgastemperatur beim Austritt), des Drucks und des Durchflusses sowie die regelmäßige Überprüfung der Messgenauigkeit. Sobald Potenziale zur Effizienzsteigerung identifiziert wurden, können gezielt Maßnahmen durchgeführt werden. Typisch ist hierbei die Einführung eines Energiemanagementsystems sowie der Einsatz eines Verbrennungskontrollsystems zur Reduzierung des Luftüberschusses.

Darüber hinaus können die Installation von Frequenzumrichtern zur besseren Steuerung des Wasserflusses oder die Wärmerückgewinnung aus „Nebenanlagen“ weitere sinnvolle Maßnahmen darstellen. Diese verringern den CO₂-Ausstoß und senken die Betriebskosten durch einen reduzierten Brennstoffbedarf.

Elektrische Kessel

Eine Möglichkeit zur Dekarbonisierung der Dampferzeugung ist die Nutzung von elektrischen Kesseln, die entweder als Elektrokessel oder als Elektrodenkessel ausgeführt sind.

Elektrokessel nutzen Strom, um im Wasser befindliche Widerstandsleiter zu erhitzen und über diese die Wärme an das Wasser zu übertragen. Die Leistung dieser Kessel liegt üblicherweise zwischen circa 10 kW und 15 MW.

Beim Elektrodenkessel wird Wasser direkt elektrisch erhitzt. Hierfür befinden sich in einem Druckkessel Elektroden in einem Wasserbad, die das Wasser erhitzen (Abbildung 4). Der entstehende Dampf steigt zum oberen Teil des Druckbehälters und wird dort geregelt abgelassen. Größe und Leistung der Elektrodenkessel variieren zwischen 100 kW und 60 MW (Tabelle 1).

Bei beiden Kesselarten sind Temperaturen bis 350 °C und – bei einem Einsatz von elektrischen Überhitzern – bis 500 °C möglich. Elektrische Kessel sind mit einem Wirkungsgrad von bis zu 99 % sehr effizient. Elektrodenkessel sind tendenziell kleiner und günstiger und Elektrodenkessel größer und teurer. Aufgrund der

höheren Leistung und der damit verbundenen hohen Relevanz für industrielle Prozesse wird im Folgenden tiefer auf den Elektrodenkessel eingegangen.

Marktübersicht

Elektrodenkessel sind bereits weit entwickelt und etabliert. Auch für hohe Temperaturen von über 300 °C und Druckstufen von bis zu 85 bar gibt es marktreife Techniken. Die Kessel finden allerdings heute hauptsächlich in Form von Zusatzkesseln im konventionell erdgasbefeuerten Dampferzeuger Anwendung. Hierbei werden sie als Schnellstartkessel zur Optimierung des Lastmanagements eingesetzt. Elektrodenkessel werden ebenfalls von einigen Stadtwerken zur Bereitstellung von Fernwärme genutzt. Ein Beispiel ist der Standort Hannover-Herrenhausen, an dem ein Elektrodenkessel mit einer Leistung von 20 MW Wärme entweder direkt in das Fernwärmenetz einspeist oder temporär speichert.

Eigenschaften	Details
Temperaturbereich	100–350 °C
Druckbereich	Max 85 bar
Dampfkapazität	Max 90 t/h
Energieträger	Strom
Wirkungsgrad	Bis zu 99 %
Anschlussleistung	100 kW – 60 MW
Betriebsdauer	Als Zusatz zum Gaskessel: >500 h/Jahr Ersatz des Gaskessels: >8.000 h/Jahr
Lebensdauer	20–30 Jahre
Investitionskosten Neubau	Ca. 150–350 €/kW

Tabelle 1 Kenndaten zum Elektrodenkessel

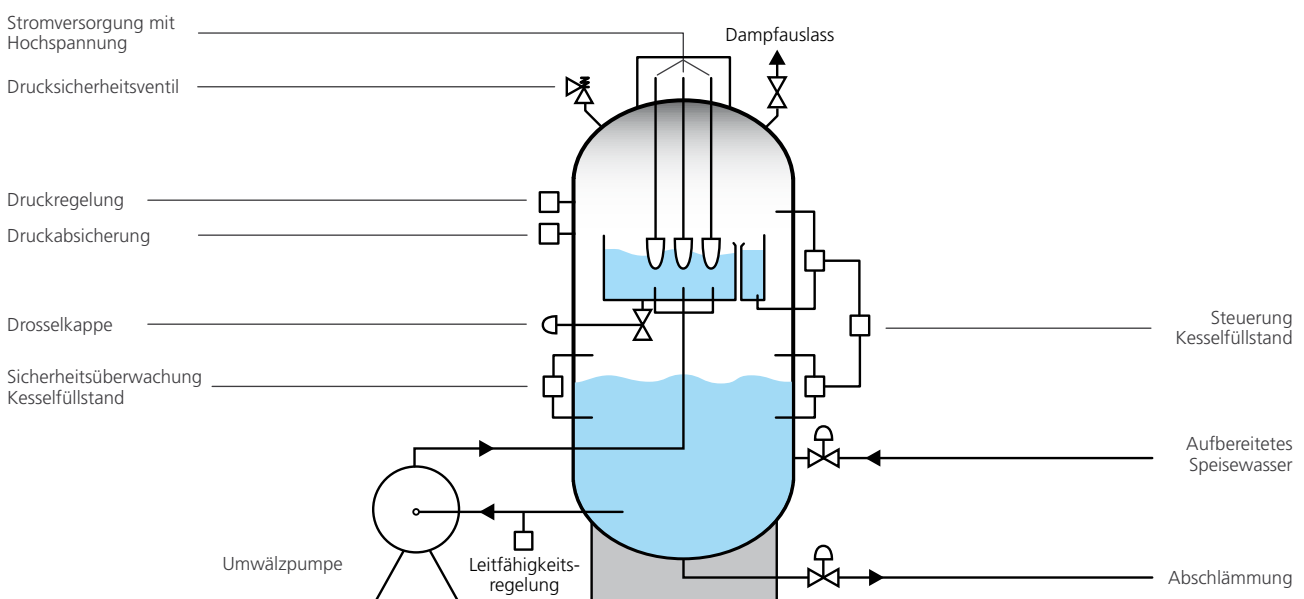


Abbildung 4 Darstellung eines Elektrodenkessels

Forschungsaktivitäten

Die Forschung zielt darauf ab, eine dynamische Anwendung des Elektrodenkessels zu ermöglichen. Weitere Bestrebungen sind die Senkung der Anlagenkosten und die Weiterentwicklung der eingesetzten Materialien. Ebenfalls wird an Materialien für den Einsatz bei hohen Druckstufen (90 bar) und Temperaturen ($> 300\text{ °C}$) gearbeitet.

Einsatzpotenzial und -grenzen

Elektrodenkessel sind insbesondere aufgrund ihrer schnellen Startfähigkeit und Dynamik bei Lastwechseln von Vorteil bei der Nutzung von Überschussstrom aus erneuerbaren Energien. Sie können innerhalb kürzester Zeit (circa 30 Sekunden) ihre maximale Leistung abrufen und eignen sich damit auch zur Bereitstellung von Regelleistung im Stromnetz. Somit können sie zukünftig netzdienlich betrieben werden.

Moderne Hochdruck-Elektroden-Dampfkessel können auch bei hohen Temperaturen und Druckstufen eingesetzt werden (Tabelle 1). Der Ersatz eines Erdgaskessels durch einen Elektrodenkessel ist technisch möglich. Begrenzend für den Einsatz sind die Betriebskosten, die im hohen Maße von den Strompreisen abhängen. Zusätzlich erfordert der Bau eines Elektrodenkessels gegebenenfalls einen Ausbau des Stromanschlusses am Standort.

Hochtemperaturwärmepumpen

Wärmepumpen nutzen niederentperierte Wärmeströme und heben diese unter Zuführung von Strom an, sodass ein nutzbarer Wärmestrom für einen Prozess bereitgestellt wird (Abbildung 5). So kann Umweltwärme in industrielle Prozesse eingebunden oder Abwärme in den Prozess zurückgeführt werden. Durch die Verwendung sonst ungenutzter Wärmemengen ist der Nutzen (Nutzwärme) größer als der

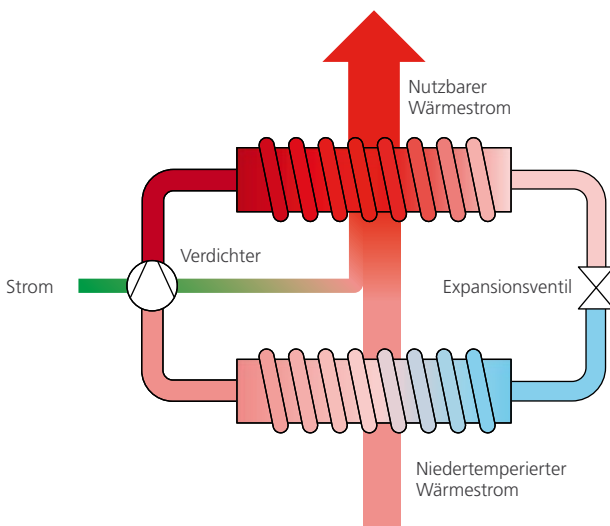


Abbildung 5 Prinzip einer Wärmepumpe

Aufwand (Stromzuführung). Im Ergebnis ist die „Effizienz“, die sogenannte Arbeitszahl, der Wärmepumpe größer 1,0 und erreicht in der Praxis oftmals Werte um 2,5. Zur Dampferzeugung können elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpen mit geschlossenem Kältemittelkreislauf genutzt werden. Diese erreichen aktuell eine maximale Nutztemperatur von circa 165 °C (Tabelle 2).

Marktübersicht

Das Marktpotenzial für den Einsatz von Wärmepumpen in Deutschland ist hoch; sie sind jedoch bisher wenig verbreitet. Prozesse, die eine Temperatur von bis zu 100 °C benötigen, können schon heute mit Wärmepumpen abgedeckt werden. Das Leistungsspektrum der auf dem Markt verfügbaren Wärmepumpen liegt zwischen 20 kW und 20 MW. Auch Hochtemperaturwärmepumpen mit Temperaturen über 100 °C sind bereits verfügbar und einsatzfähig.

Die International Energy Agency (IEA) hat eine Übersicht von Hochtemperaturwärmepumpen und ihren technischen Möglichkeiten bereitgestellt. Diese sind jedoch nicht explizit für die Erzeugung von Dampf ausgelegt, sondern allgemein für die Wärmeerzeugung.

Eigenschaften	Details
Temperaturbereich	90–165 °C
Druckbereich	Max 80 bar
Dampfkapazität	Max 1 t/h
Energieträger	Strom
Wirkungsgrad/COP	1,0–2,5
Anschlussleistung	20 kW–20 MW
Betriebsdauer	7.000 bis $> 8.000\text{ h/Jahr}$
Lebensdauer	20–25 Jahre
Investitionskosten Neubau	Ca. 400–800 €/kW

Tabelle 2 Kenndaten zu Hochtemperaturwärmepumpen

Forschungsaktivitäten

Die Wärmepumpenforschung hat sich von Haushaltsanwendungen hin zu Industrie- und Großwärmepumpen verlagert. Aktuelle Projekte konzentrieren sich auf die Entwicklung von Hochtemperaturwärmepumpen, die aus Abwärme Dampf erzeugen, um industrielle Prozesse nachhaltiger und effizienter zu gestalten. Hierfür werden bereits Prototypen und Pilotanlagen in verschiedenen Industriezweigen getestet.

Einsatzpotenzial und -grenzen

Die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe hängt stark von dem Kostenverhältnis von Strom zu Erdgas und der Bepreisung von CO_2 ab.

Die maximale Nutztemperatur wird im Hochtemperaturbereich durch das eingesetzte Kältemittel bestimmt, das gleichzeitig ein niedriges Treibhaus- und Ozonabbaupotenzial aufweisen sollte. Ein Hemmnis sind die geringen Erfahrungswerte bei der Integration von Hochtemperaturwärmepumpen in industrielle Prozesse sowie die nötigen Kapazitäten für die Planung und Projektierung solcher Anlagen.

Wasserstoffbefeuerter Kessel

Wasserstoff bietet sich als Ersatzbrennstoff für die Dampferzeugung in Dampfkesselanlagen an. Für eine Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff können grundsätzlich die gleichen konventionellen Kessel verwendet werden (Tabelle 3). Die Steuerung und Ausrüstung des Kessels mit Brenner inklusive Gasversorgung muss jedoch in der Regel erneuert werden.

Marktübersicht

Aktuell gibt es bereits Kessel, bei denen ein Einsatz von bis zu 100 % Wasserstoff durch eine einfache Umrüstung möglich ist. Der begrenzende Faktor ist hierbei die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff, weshalb in den nächsten Jahren kein signifikanter Anstieg für den Einsatz von wasserstoffbefeuerter Kesseln erwartet wird. Weiterhin gibt es vereinzelt eingesetzte wasserstoffbefeuerte Industriekessel in Industriezweigen mit internen Wasserstoffflüssen wie in der Chemieindustrie.

Eigenschaften	Details	
	Großwasserraum	Wasserrohr
Temperaturbereich	100–300 °C	600 °C
Druckbereich	Max 30 bar	Max 300 bar
Dampfkapazität	Max 30 t/h	200–300 t/h
Energieträger	Wasserstoff	
Wirkungsgrad	92–97 %	
Anschlussleistung	100 kW–50 MW	
Betriebsdauer	7.000 bis >8.000 h/Jahr	
Lebensdauer	20–25 Jahre	
Investitionskosten Umrüstung Brenner	Ca. 80 €/kW	

Tabelle 3 Kenndaten wasserstoffbefeuerter Kessel

Forschungsaktivitäten

Allgemein sind wasserstoffbefeuerte Industriekessel entwickelt, getestet und verfügbar. Technische Herausforderungen und weiterer Forschungsbedarf entstehen durch die hohe Flammgeschwindigkeit von Wasserstoff, die mögliche Rückzündungen verursachen kann.

Einsatzpotenzial und -grenzen

Beim Einsatz von wasserstoffbefeuerter Kessel entstehen Kosten durch das Umrüsten des Brenners und der Anpassung der Brennstoffversorgung. Da der Einsatz von Wasserstoffbrennern die Stickstoffoxid-Emissionen (NO_x-Emissionen) erhöht, sind zusätzliche emissionsreduzierende Maßnahmen erforderlich. Außerdem sind die Anschaffungskosten für einen Wasserstoffbrenner etwa doppelt so hoch wie für einen Erdgasbrenner. Darüber hinaus sind sowohl die Verfügbarkeit als auch die Preisentwicklung von grünem Wasserstoff derzeit schwer abschätzbar.

Hybride Systeme

Hybride Systeme kombinieren zwei oder mehr unterschiedliche Techniken (z. B. Elektrodenkessel, Verbrennungstechnik) oder Energieträger (z. B. Strom, Wasserstoff, Erdgas), um Dampf zu erzeugen. Bestehende fossile Systeme zur Dampferzeugung können dabei vollständig durch ein hybrides System „ersetzt“ als auch durch Teilsysteme „ergänzt“ werden. Vorteil der „Ergänzung“ ist, dass Betriebserfahrungen gesammelt werden können und gleichzeitig der Weiterbetrieb des alten Dampferzeugungssystems sichergestellt ist. Weitere Vorteile hybrider Systeme sind, dass sie flexibel auf Schwankungen in der Verfügbarkeit und den Kosten von Energieträgern sowie den Bedarf an Dampf reagieren können und somit eine zuverlässige Bedarfsdeckung gewährleisten.

Marktübersicht

Der Markt für hybride Systeme zur Dampferzeugung ist derzeit noch klein und Lösungen sind wenig verbreitet. Der zuvor erläuterte Elektrodenkessel als Zusatz zu konventionellen Erdgaskesseln findet bereits Anwendung. Einige erdgasbefeuerte Dampfkessel sind ebenfalls H₂-ready und können hybrid eingesetzt werden. Weiterhin gibt es andere innovative Ansätze als Leuchtturmprojekte wie beispielsweise ein Projekt in Finnland, in dem Photovoltaik und Solarthermie in Kombination mit einem Sandspeicher zur Wärmespeicherung genutzt werden (Sand Battery Project).

Eine weitere Möglichkeit ist die Hybridisierung von KWK-Anlagen. Erneuerbare Brennstoffe und hybride Systeme sind hierbei die Ausnahme. Ein Beispiel für ein hybrides System ist der Bau einer KWK-Anlage in Lachendorf (Landkreis Celle) auf Basis von regenerativen Brennstoffen des Papierproduzenten Drewsen Spezialpapiere. Die geplante Anlage kann sowohl Getreidestroh als auch Holzhackschnitzel (bis zu 60 %) als Brennstoff nutzen und produziert mit einer Feuerungswärmeleistung von 55 MW circa 55 Tonnen Dampf pro Stunde und bis zu 12,5 MW Strom.

Forschungsaktivitäten

Die Forschung konzentriert sich auf die Kombination verschiedener erneuerbarer Energiequellen und die Integration von Techniken in bestehende Systeme. Der Fokus liegt hierbei auf der Entwicklung und Optimierung von Steuerungssystemen, z. B. für die Einbindung in Energiemanagementsysteme, die den Betrieb mit unterschiedlichen Energieträgern ermöglichen.

Fazit und Handlungsempfehlung

Die Dekarbonisierung der Dampferzeugung erfordert einen systematischen und mehrstufigen Ansatz. Energieeffizienzmaßnahmen wie z. B. die Einführung eines Energiemanagementsystems, der Einsatz eines Verbrennungskontrollsystems oder die Reduzierung des Luftüberschusses sollten dabei stets der erste Schritt sein, um die bestehenden Anlagen zu optimieren und den Brennstoffverbrauch zu minimieren. Ferner kann die Energierückführung aus Nebenprozessen zielführend sein.

Die Elektrifizierung bietet sich besonders dort an, wo grüner Strom verfügbar und die notwendige Infrastruktur vorhanden ist. Hierbei kann der Einsatz von Wärmepumpen sowohl in Form einer Integration in ein bestehendes System oder für den Ersatz des bestehenden (fossilbasierten) Dampferzeugers sinnvoll sein. Die hohe Effizienz von Wärmepumpen im Vergleich zu konventionellen Systemen bietet das Potenzial, die Betriebskosten und die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Bei sämtlichen elektrischen Verfahren und Effizienzmaßnahmen ist davon auszugehen, dass mit steigender Verfügbarkeit an erneuerbaren Energien eine vollständige Dekarbonisierung der Dampferzeugung möglich ist.

Für Unternehmen mit mehreren Dampferzeugungsanlagen ist eine koordinierte Transformation erforderlich, die den Ausbau der notwendigen Infrastruktur sowie die Verfügbarkeit und Preisentwicklung der verschiedenen Energieträger berücksichtigt. Hierbei sollte eine mögliche Flexibilisierung der Anlage betrachtet und dies als strategische Entscheidung angesehen werden, um die Resilienz zu erhöhen. Hybride Systeme können den Umstieg erleichtern.

Allgemein ist die Kenntnis der technischen Möglichkeiten und der eigenen Standortbedingungen (wie vorhandene und zukünftige Infrastruktur, Netzanschlüsse) entscheidend. Hierzu sollten frühzeitig Gespräche mit den relevanten Akteuren wie Energieversorgern, Netzbetreibern und Kommunen (im Rahmen der Kommunalen Wärmeplanung) angestoßen und gemeinsam Pläne erarbeitet werden.

Bildnachweis:

Titelfoto: Andrei Merkulov (AdobeStock)

Abbildung 2: Dampfkessel, Viessmann Climate Solutions SE

Abbildung 4: Elektrodenkessel, PARAT Halvorsen AS

Herausgeber:

Klimaschutz- und Energieagentur
Niedersachsen GmbH
Osterstraße 60 | 30159 Hannover

Erstellung in Zusammenarbeit mit:

RWTH Aachen University
Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB)
Kopernikusstraße 10 | 52074 Aachen

Gefördert durch:



Niedersächsisches Ministerium
für Umwelt, Energie und Klimaschutz