

Elektrische Heißwasser- und Dampfproduktion

Bereitstellung von Heißwasser und Dampf mittels Elektro- und
Elektrodenkessel in industriellen Prozessen

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Autoren: Dipl.-Ing. Deyan Dimov (Österreichische Energieagentur)

Unter Mitwirkung von: Mag. DI Konstantin Kulterer (Österreichische Energieagentur);
Daniel Gosse, Peter Mörth (Firma Bosch Industriekessel GmbH); Dipl.-Ing. Christian
Schneider (Firma Schneider-Kessel Berlin GmbH); Achille Marrocco (Firma VAPEC AG);
Stefan Hofinger (Firma Richter Pharma AG)

Besonderer Dank an: Ing. Mag.(FH) Martin Lackner, MA (Tirol Kliniken); Firma Hall AG

Wien, 2025. Stand: 30. Januar 2025

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind
ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger
Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des BMK und der Autorin/des Autors
ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der
Autorin/des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte
keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an
eebetriebe@energyagency.at.

Inhalt

1 Motivation	5
2 Techno-ökonomische Aspekte	6
2.1 Elektrokessel	7
2.1.1 Definition	7
2.1.2 Technische Spezifikationen.....	9
2.1.3 Kosten	11
2.2 Elektrodenkessel.....	12
2.2.1 Definition	12
2.2.2 Technische Spezifikationen.....	15
2.2.3 Kosten	17
2.3 Übersicht der E-Kessel	18
3 Anwendungen	19
3.1 Lebensmittelverarbeitung	20
3.2 Brauereien	20
3.3 Medizinische Versorgung.....	20
3.4 Pharmaindustrie	21
3.5 Papierproduktion	21
4 Vorschriften und Normen	22
4.1 Inbetriebnahme	22
4.1.1 Druckgerätegesetz	22
4.1.2 Vorschrift zum automatisierten Betrieb von Dampfkesseln	22
4.1.3 Emissionsschutzgesetz für Kesselanlagen	23
4.1.4 Zusätzliche Anforderungen an Elektrodenkesseln	24
4.2 Kesselqualität.....	25
4.2.1 Sicherstellung des Betriebs von Großwasserraumkesseln	25
4.2.2 Sicherstellung der elektrischen Komponente.....	25
5 Design des elektrischen Heißwasser- oder Dampfsystems.....	26
5.1 Bedarfsanalyse.....	26
5.1.1 Messung.....	26
5.1.2 Berechnungsmethode.....	27
5.1.3 Hybrid-Dampflösungen.....	31
5.2 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	32
5.3 Effizienzmaßnahmen	33
5.3.1 Isolierung von Kesseloberfläche, Rohrleitungen und Armaturen	33

5.3.2	Regelung	34
5.3.3	Automatische Überwachung	34
5.3.4	Kesselwartung.....	34
5.4	Wirtschaftlichkeit.....	35
6	Referenzprojekte.....	37
	Über klimaaktiv	40
	Kontakt	40
	Tabellenverzeichnis.....	41
	Abbildungsverzeichnis.....	42
	Formelverzeichnis	43
	Literaturverzeichnis	44
	Nomenklatur	49
	Abkürzungen.....	51
	Anhang	52
	Anhang A: Wärmeverlusten an Rohren	52
	Anhang B: Druck-Temperatur-Diagramm	54
	Anhang C: Widerstandsbeiwert (Reibungsbeiwert).....	55
	Anhang D: Einzelwiderstände	57
	Anhang E: Richtwerte für Strömungsgeschwindigkeiten.....	58
	Anhang F: Stoffwerte für Wasser und Dampf nach IAPWS IF-97.....	60

1 Motivation

Die nachhaltige Transformation der industriellen Energieerzeugung ist heute von zentraler Bedeutung für Betriebe, die ihre CO₂-Emissionen reduzieren und langfristig auf umweltfreundliche Prozesse umstellen wollen. Im Industriesektor in Österreich wird mehr als die Hälfte der eingesetzten Energie für thermische Prozesse verwendet (Statistik Austria, 2024). Besonders im Bereich der Heißwasser- und Dampferzeugung bestehen Potenziale, den fossilen Energieverbrauch durch den Einsatz erneuerbarer Energien zu senken. Industriebetriebe, die für ihre Prozesse kontinuierlich Dampf oder Heißwasser benötigen, stehen vor der Herausforderung, diese Energie zuverlässig, wirtschaftlich und nachhaltig bereitzustellen. Um das Potenzial der zunehmenden Versorgung mit erneuerbarem Strom optimal zu nutzen, bieten Elektro- und Elektrodenkessel eine bewährte und verfügbare Technologie zur effizienten Wärmeerzeugung.

Der vorliegende Leitfaden erläutert den Einsatz von Elektro- und Elektrodenkesseln im betrieblichen Kontext. Neben technischen Aspekten wird auch auf die Wirtschaftlichkeit und mögliche Einsparpotenziale eingegangen, um den Betrieb bei der Entscheidung und Implementierung dieser Technologie zu unterstützen. Durch die Nutzung von erneuerbarem Strom zur Erzeugung von Prozesswärme können Betriebe ihre CO₂-Bilanz verbessern und einen Beitrag zur Erreichung der unternehmensinternen und gesetzlich vorgeschriebenen Klimaziele leisten.

Einen Überblick der möglichen Anwendungen von erneuerbaren Wärmesystemen in Betrieben finden Sie im Leitfaden: „Erneuerbare Wärmesysteme in Betrieben – Empfehlungen zum Einsatz in Produktions- und Dienstleistungsbetrieben“.

2 Techno-ökonomische Aspekte

E-Kessel (Elektro- und Elektrodenkessel) sind eine Schlüsseltechnologie, die den Umstieg zur erneuerbaren Wärme ermöglichen kann. Sie zeichnen sich durch ihre kompakte Bauweise aus, die im Vergleich zu konventionell beheizten Kesseln mit gleicher Leistung kleinere Abmessungen aufweist. Dadurch eignen sie sich ideal für die Installation in beengten Räumen. Zudem entfallen Brennstoffzuleitungen und Abgasleitungen sowie die Notwendigkeit von Abgasnachbehandlung und einer Brennstofflagerung. Bei Nutzung von Strom aus regenerativer Erzeugung entstehen somit keine direkten CO₂-Emissionen durch die Wärmeerzeuger. Ein weiterer Vorteil ist ihr geräuscharmer Betrieb, der sie ideal für den Einsatz in städtischen oder dicht bebauten Gebieten macht. Zusätzlich sind jedoch eine Leistungsversorgung und entsprechende Mittelspannungsschaltanlagen inklusive Transformatoren erforderlich.

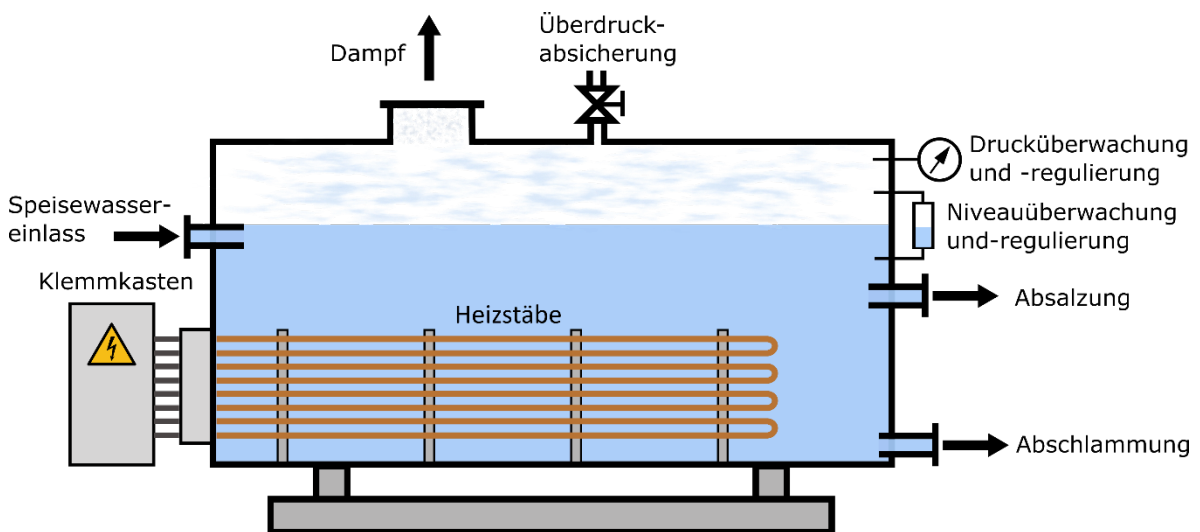
E-Kessel arbeiten im Kilowatt- sowie im Megawatt-Bereich und nutzen Strom zur Erzeugung von Heißwasser und Dampf für industrielle Zwecke. Sie werden typischerweise in Anwendungen mit Spitzenlasten sowie auch als Grundlastdeckung eingesetzt (Hindsgaul, Hulgaard, & Houbak, 2018). Bei gut isolierten Kesseln erfolgt die Umwandlung der elektrischen Energie zur thermischen Energie mit einem Wirkungsgrad von 95 % bis zu 99,6 % über den gesamten Leistungsbereich. Im Vergleich dazu erreichen konventionelle Industriekessel Wirkungsgrade von 70 bis 80 %. E-Kessel sind kommerziell verfügbar und können aus exergetischer Perspektive einen Beitrag zur optimalen Nutzung der erneuerbaren Stromerzeugung im Energiesystem leisten und unterstützen den weiteren Ausbau.

2.1 Elektrokessel

2.1.1 Definition

Die Funktionsweise von Elektrokesseln basiert auf dem Prinzip der elektrischen Widerstandsheizung. Wenn elektrischer Strom durch einen Heizleiter fließt, trifft er auf den Widerstand des Materials, was zur Erzeugung von Wärme führt. Diese Wärme wird direkt an das Wasser übertragen, das in den Kessel eingespeist wird. Somit erhitzt sich das Wasser und es entsteht Heißwasser oder Dampf, siehe Abbildung 1. Durch präzise Steuerung der elektrischen Leistung des Elektrokessels kann die Temperatur reguliert werden, um den Anforderungen der jeweiligen Anwendung zu entsprechen.

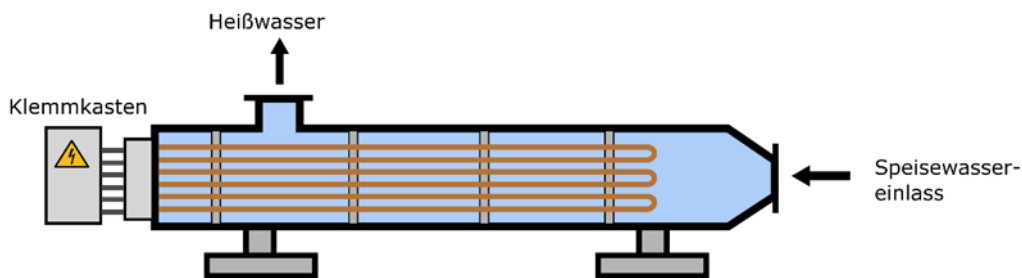
Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Elektrokessels zur Erzeugung von Dampf in horizontaler Bauweise



Quelle: Österreichische Energieagentur

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Heißwasser oder zur Weitererhitzung von Dampf stellt der Durchlauferhitzer¹ dar. Ähnlich wie im Elektrokessel werden zu Heizbündeln zusammengefasste Heizstäbe zur Wärmeerzeugung verwendet, siehe Abbildung 2. Das Wasser fließt direkt und bedarfsgerecht durch das Gerät und wird dabei erhitzt. Die Reaktionszeit und die Regelgüte bei der Heißwassererzeugung sind identisch mit dem Elektrokessel im warmen Zustand der Geräte, da in der Regel auf einen großen Wasserinhalt verzichtet wird. Der Durchlauferhitzer ermöglicht eine sofortige und kontinuierliche Bereitstellung von Heißwasser, was insbesondere in industriellen Anwendungen von Vorteil ist, wo eine präzise Temperaturregelung und schnelle Reaktionszeiten erforderlich sind. Durchlauferhitzer sind in der Lage, nicht nur Wasser, sondern auch andere Medien wie Thermoöl zu erhitzen.

Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Durchlauferhitzers zur Erzeugung von Heißwasser



Quelle: Österreichische Energieagentur

In der Praxis werden oft die Elektrokessel in Kombination mit verbrennungsbasierten Systemen eingesetzt – entweder in getrennten Anlagen oder in sogenannten Hybridkessel. Die Hybridkessel kombinieren ein elektrisches Heizelement und einen Brenner in einem Gerät, meist mit maximal 50 % elektrischer Heizleistung. Beide Energiequellen können in der Regel gleichzeitig oder auch einzeln betrieben werden. Bei dynamischer Verfügbarkeit, zum Beispiel bei einer Photovoltaikanlage, kann der zusätzlich verbaute Brenner im Kessel die Differenz zur Soll-Leistung erbringen und auch Spitzenlasten ausgleichen. In diesem

¹ Die Funktion des Durchlauferhitzers wird erläutert, jedoch wird diese Technologie in diesem Leitfaden nicht im Detail analysiert.

Fall sind die Priorisierung der Energiequellen des Kessels in der Steuerung und die Integration beider Energiequellen in die Sicherheitsmechanismen wichtig (Gosse, 2025).

Für die Integration elektrischer Heizbündel empfiehlt es sich generell, vor oder besser noch hinter dem Kessel ausreichend Platz vorzusehen. Im Fall von Wartungen oder vorgeschriebenen inneren Prüfungen kann das Bündel so problemlos aus- und eingebaut werden. Kleinere Heizstäbe können auch in vorhandene Kesselanlagen verbaut werden, jedoch ist die Leistung häufig deutlich kleiner als die Nennleistung des Brenners. Bei Neuanlagen kann die Geometrie auch für große Leistungen angepasst werden (Gosse, 2025).

2.1.2 Technische Spezifikationen

Elektrokessel in industriellen Anwendungen erreichen typischerweise eine Kapazität von ein paar kW_{th} bis 6 MW_{th}, bei Kaskadenlösungen auch höhere Leistungen. Die maximale Leistung wird hauptsächlich durch die Größe² des Kessels begrenzt, die sich aus wirtschaftlichen Überlegungen ergibt. Elektrokessel erfordern einen Niederspannungsanschluss am Netz und funktionieren typischerweise bei einer Spannung von 230 V, 400 V oder 690 V für industrielle Anwendungen. Elektrokessel können eine Dampfmenge von circa 300 bis 8.000 kg/h oder 1,4 bis 1,6 kg/h pro installierte Leistung in kW liefern (PACKMAN Industrial Group, 2024) (Schneider, 2024). Am Markt sind Elektrokessel mit maximalen Betriebsdrücken von 55 bar(ü) als Heißwasser- oder Dampferzeuger verfügbar (EEB ENERKO Energiewirtschaftliche Beratung GmbH, 2017).

Zur Verhinderung von Betriebsstörungen sind Elektrokessel mit verschiedenen Sicherheitsfunktionen ausgestattet. Dazu gehören beispielsweise Temperatur- und Druckmessung, Überdruckabsicherung, Niveauregulierungen, Absperrarmaturen, Entlüftung, Revisionsöffnungen, zusätzlicher Sicherheitstemperaturbegrenzer und Reserveelemente im Heizbündel sowie Schütze im Leistungsschrank. Die eingebauten Heizstäbe können individuell ersetzt werden, was die Wartung erleichtert und die Instandhaltungskosten senkt.

² Ein Beispiel: Bei einem Elektrokessel mit einer Leistung von 5 MW_{th} kann der Schaltschrank, einschließlich der Schaltanlage, eine Breite von bis zu 7 Metern erreichen. Aus diesem Grund werden die Schaltschränke und die Leistungsversorgung der Heizelemente bei größeren Kesseln so angeordnet, dass sie auf einem Podest über dem Kessel installiert werden. Dies ermöglicht auch möglichst kurze Kabelwege.

Dank der sofortigen Energieumwandlung verfügt der Elektrokessel über eine kurze Anlaufzeit und kann im Vergleich zu konventionellen Kesseln die erforderliche Leistung innerhalb von Sekunden bereitstellen.³ Elektrokessel können deutlich schneller und dynamischer auf Laständerungen reagieren, da die brennerseitigen Vorlufzeiten entfallen. Somit können schnelle Schaltungen und Regelungen diese Kessel besonders gut bedienen. Der Kessel sollte dabei warmgehalten werden. Wenn sich die Verdampfung knapp unterhalb der Verdampfungskurve befindet, reicht bereits eine geringe Energiezufuhr aus, um Dampf zu erzeugen.

Für Elektrokessel besteht die Möglichkeit einer 100%igen Leistungsregelung. Jede gewünschte Leistung kann erreicht werden, indem einfache Schaltstufen genutzt werden. Eine Stufe wird über einen Thyristor geregelt, wodurch eine stufenweise Anpassung und ein sanfter Übergang zur nächsten Stufe ermöglicht werden (Schneider, 2024). Ein Elektrodampfkessel kann innerhalb von Sekunden von 0 auf 100 % seiner Leistung hochgefahren werden, was den Betrieb in der Netzregulierung ermöglicht oder den schnell schwankenden Betrieb in Verbindung mit PV-Anlagen ermöglicht.

Elektrokessel lassen sich auch in Containerbauweise realisieren. Im Vergleich zu konventionellen Kesselanlagen, die einen Erdgasanschluss, einen Schornstein oder einen Brennstofftank (zum Beispiel für Ölkessel) erfordern, benötigen Elektrokessel in Containern einen elektrischen Anschluss, einen Wasser- und Abwasseranschluss, Kondensatleitungen sowie eine Verbindungsleitung zum Dampfsystem. Zudem besteht in Wasserschutzgebieten keine Gefahr einer Gewässerverschmutzung. Die Containerbauweise entwickelt sich zunehmend von einer Notfalllösung zu einer Standardlösung. Sie bietet den Vorteil, dass der Kessel mobil an verschiedenen Standorten desselben Betriebes eingesetzt werden kann und somit mehr Flexibilität der Produktion je nach Betriebsbedingungen und -kosten gewährleistet wird (Schneider, 2024). Eine Sicherung von freien Leistungskapazitäten in Abstimmung mit dem Energieversorger ist notwendig.

Elektrokessel lassen sich aufgrund der gleichartigen Spezifikation der Wasserwerte ohne weitere Vorkehrungen in bestehende Dampf- oder Heißwasserkesselsysteme ergänzen. Externe Schnittstellen zur Ansteuerung der Kesselfolgesteuerung beziehungsweise

³ Der limitierende Faktor für die zulässige Anfahrsgeschwindigkeit ist in der Regel eine Vorgabe des Energieversorgers, um negative Rückwirkungen auf das elektrische Netz und andere elektrische Verbraucher zu vermeiden. Daher ist eine Klärung mit dem Energieversorger vorab sehr wichtig.

externe Lastvorgaben ermöglichen es den Betreibern, einen eigenen spezifischen Energiemix zu definieren. So können zum Beispiel Überschüsse aus PV-Anlagen genutzt werden. Darüber hinaus können Betreiber am Regelenergiemarkt teilnehmen oder den Verbrauch von am Day-Ahead Strommarkt erworbener Energie realisieren.

2.1.3 Kosten

Die Kosten für einen Elektrokessel zur Dampfproduktion variieren je nach Lieferumfang und erforderlicher Druckstufe. Es gilt das Prinzip der Economies of Scale: Je höher die thermische Leistung des Kessels ist, desto geringer sind die Investitionskosten pro kW thermischer Leistung. Nachfolgend werden Richtwerte für die Beschaffung und Lieferung eines Dampfkessels unter der Annahme eines bestehenden Dampfnetzes aufgeführt.

- Wärmeleistung 200 bis 500 kW_{th}: 100.000 bis 250.000 €
- Wärmeleistung 500 bis 1.000 kW_{th}: 250.000 bis 500.000 €
- Wärmeleistung 1.000 bis 6.000 kW_{th}: 500.000 bis 1.000.000 €

Bei speziellen Anwendungen für Kessel aus Edelstahl steigen die Kosten. Bei Durchlauferhitzern sind die Investitionskosten aufgrund des kleineren Behälters um etwa 10 % geringer (Schneider, 2024). Für genauere Kostenschätzungen sollten Angebote von spezialisierten Fachfirmen eingeholt werden.

Im Vergleich zu den Investitionskosten sind die jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten leistungsunabhängig. Eine Wartung, zusammen mit der zuständigen Überwachungsbehörde, dauert in der Regel drei bis fünf Tage. Die Richtwerte für die Wartungskosten (ohne behördliche Kosten) liegen zwischen 1.500 und 5.000 € pro Jahr. Im Vergleich zu konventionellen Dampfkesseln haben die Elektrodampfkessel niedrigere Kosten für Service und Reparatur. Zudem treten weniger Probleme mit fehlerhaften Schweißungen auf (SCHNEIDER-KESSEL GmbH, 2020). Stillstandszeiten werden reduziert, da Fehler an Heizelementen, Schützen oder Thyristor keine Betriebsunterbrechungen verursachen. Im Fall eines Fehlers kann der Kessel mit verminderter Leistung weiter betrieben werden. Die Heizelemente sind grundsätzlich sehr zuverlässig. Allerdings kann es bei Stillstand des Kessels und fehlender Konservierung zur Korrosion der Heizelemente kommen. Bei regelmäßiger Wartung und Einhaltung der geforderten Wasserqualität beträgt die Lebensdauer eines Elektrokessels etwa 20 Jahre.

2.2 Elektrodenkessel

2.2.1 Definition

Der Elektrodenkessel ist eine Art von Heißwasser- und Dampferzeuger, in dem der elektrische Strom direkt durch das Wasser geleitet wird. Im Gegensatz zu Elektrokesseln, die metallische Heizelemente nutzen, fungiert hier das Wasser selbst als Widerstand. Die Leitfähigkeit des Wassers bestimmt den elektrischen Widerstand und somit die erzeugte Wärmeenergie. Die Einhaltung der Leitfähigkeit innerhalb der vorgegebenen Grenzen ist hierbei von entscheidender Bedeutung, da Abweichungen zu einer unzureichenden Leistung oder Betriebsstörungen führen können.

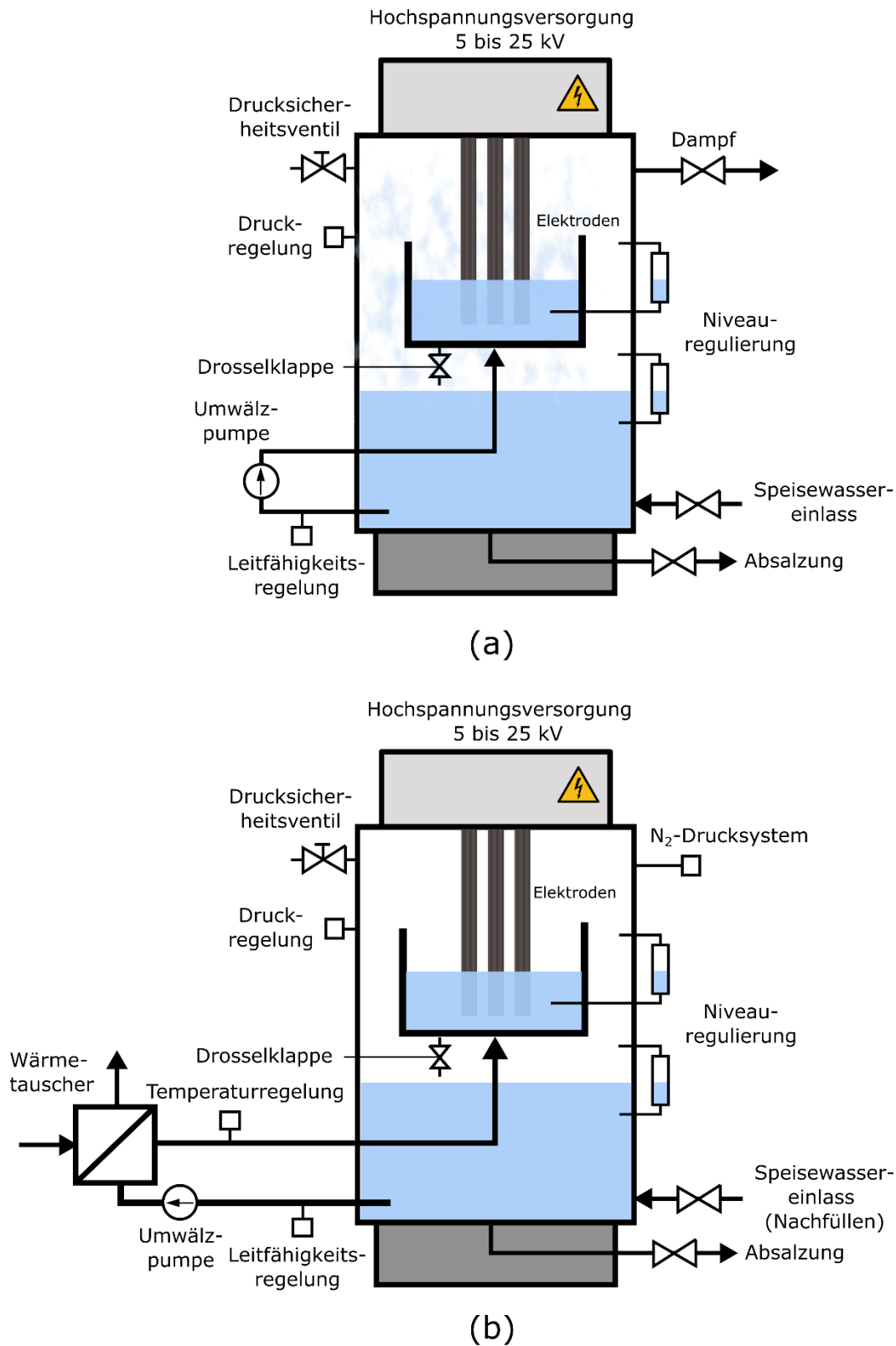
Elektrodenkessel lassen sich in zwei Kategorien einteilen:

- Tauch-Elektrodenkessel für Heißwasser- oder Dampferzeugung
- Wasserstrahl-Elektrodenkessel für Dampferzeugung

Beim Tauch-Elektrodenkessel wird das Wasser mittels eines Elektrodensystems erhitzt, das typischerweise aus dreiphasigen Elektroden und einer Neutralelektrode besteht (Hindsgaul, Hulgaard, & Houbak, 2018). Durch den ohmschen Widerstand des Wassers und den Stromfluss zwischen den Elektroden wird das Wasser verdampft. Eine fortlaufende Umwälzung des Kesselwassers gewährleistet die Wärmeabfuhr an den Elektroden und eine gleichmäßige Dampferzeugung. Zur Regelung der Leistung wird der Füllstand der oberen Kammer über dem Drosselventil geregelt und somit die Kesselleistung eingestellt, siehe Abbildung 3 (a).

Zur Erzeugung von Heißwasser wird das Kesselwasser in die obere Wanne gepumpt, in welche die Elektroden eintauchen, siehe Abbildung 3 (b). Sobald das Wasser die gewünschte Temperatur erreicht, fließt es durch eine Drosselklappe nach unten. Das erhitzte Wasser beziehungsweise Heißwasser wird aus dem Kessel zu einem Wärmetauscher weitergeleitet, der die entzogene Wärme an einen weiteren Produktionsprozess abgibt. Der Kessel ist dabei mit einem Stickstoffpolster beaufschlagt und fungiert somit zugleich als Expansionsgefäß für den Primärkreislauf. Bei Überschreitung des Temperatursollwertes wird die Kesselleistung automatisch reduziert. Die Kesselleistung wird über den Füllstand der oberen Wanne mithilfe der Drosselklappe geregelt (PARAT Halvorsen AS, 2024).

Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Tauch-Elektrodenkessels: (a) zur direkten Erzeugung von Dampf, (b) zur Erzeugung von Heißwasser mittels eines Wärmetauschers



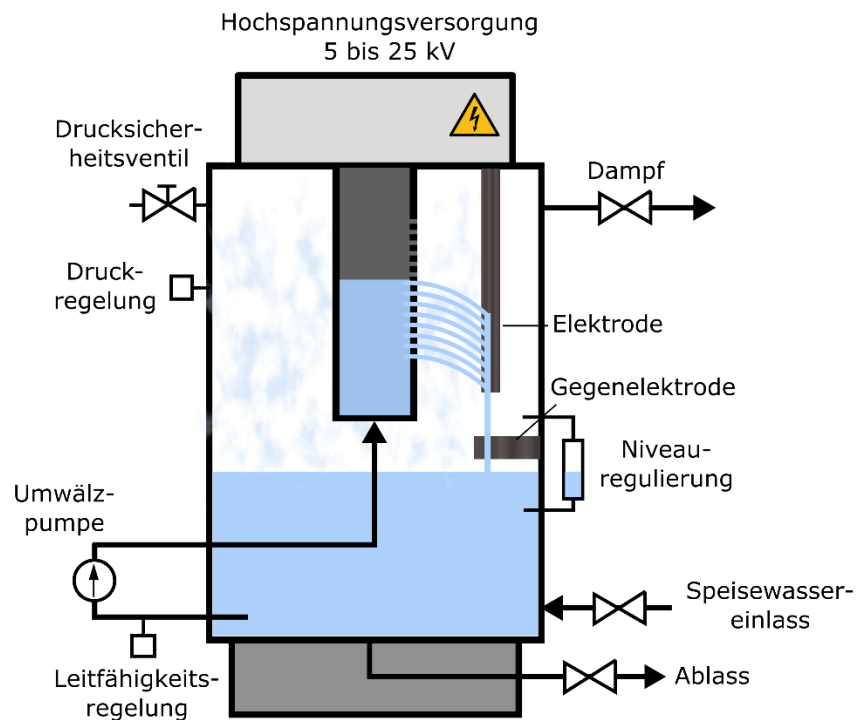
Quelle: Österreichische Energieagentur, in Anlehnung an PARAT Halvoren AS

Bei einer Variante des Tauch-Elektrodenkessels werden die Elektroden vollständig ins Wasser eingetaucht werden. In diesem Fall wird die Leistungsregelung durch ein Regulierrohr rund um die Elektrode vorgenommen. Im Kessel herrscht ein homogenes Wasserumfeld mit einheitlicher Sättigungstemperatur. Durch die Anpassung des Regulierrohres werden Kurzschlüsse aufgrund von Dichteunterschieden zwischen Wasser und Dampf vermieden. Eine integrierte Wasserpumpe spült die Elektroden, um die Explosion von Dampfblasen im Bereich der Elektroden sowie Entladungen (zum Beispiel durch Wasserstoffbildung) zu verhindern. Standardmäßig ist eine gleichzeitige Produktion von Heißwasser und Dampf bei Elektrodenkesseln nicht vorgesehen, aber in spezifischen Fällen technisch möglich (Marrocco, 2024).

Eine weitere Bauform stellt der Wasserstrahl-Elektrodenkessel dar, der ausschließlich der Dampferzeugung dient. Eine Umwälzpumpe fördert das Wasser durch den Kessel zu mehreren Düsen, wobei das Wasser direkt auf die stromdurchflossenen Elektroden gesprüht wird. Der Anteil an nicht verdampftem Wasser fließt nach unten und trifft eine Gegenelektrode. Somit wird eine zweite Stufe zur Dampferzeugung geschaffen, siehe Abbildung 4. Nur etwa 3 % des Wasserflusses werden in Dampf umgewandelt (Harfst, 2016). Die Wärme wird durch den elektrischen Widerstand des Wassers erzeugt.

Der Dampfstrom aus dem Wasserstrahl-Elektrodenkessel wird durch Regulierung der Fördermenge mittels der Umwälzpumpe nach den Düsen gesteuert. Ein Frequenzumrichter (FU) reguliert die Geschwindigkeit des Motors, der die Pumpe antreibt. Je höher die Durchflussmenge ist, desto mehr Wasser kommt in Kontakt mit den Elektroden, was zu einer höheren Dampferzeugung im Kessel führt. Die FU-Regelung reagiert auf das Druckniveau im Kessel, indem die Geschwindigkeit der Umwälzpumpe angepasst wird, um den Kessel-Solldruck zu halten. Wenn der Kesseldruck unter den Sollwert sinkt, erhöht der FU die Geschwindigkeit, um die Dampferzeugungsrate zu steigern, bis der Sollwert erreicht ist. Eine sekundäre Regelungsschleife verhindert, dass der Kessel mehr als die gewünschte Kilowattleistung aufnimmt, wenn der Dampfbedarf den Sollwert überschreitet. Eine dritte Regelungsschleife moduliert ein Regelventil, um die Dampfabgabe aus dem Kessel zu steuern.

Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Wasserstrahl-Elektrodenkessels zur Erzeugung von Dampf



Quelle: Österreichische Energieagentur, in Anlehnung an (Harfst, 2016)

2.2.2 Technische Spezifikationen

Die Kapazitäten von Elektrodenkesseln reichen von etwa 5 MW_{th} bis $90 \text{ MW}_{\text{th}}$ und sie können Dampf von bis zu 85 bar erzeugen (Hindsgaul, Hulgaard, & Houbak, 2018), (Marrocco, 2024). In den meisten Anwendungen sind die Elektrodenkessel in der Industrie ab $10 \text{ MW}_{\text{th}}$ aus wirtschaftlichen Gründen einzusetzen. Im Gegensatz zu Elektrokesseln werden Elektrodenkessel an ein Mittel- bis Hochspannungsnetz (5 bis 25 kV) angeschlossen (Hindsgaul, Hulgaard, & Houbak, 2018), wodurch der Bedarf an Transformatoren weitgehend vermieden wird. Die Nutzung von Leistungselektronik ermöglicht eine hochpräzise Steuerung. Die Dampfrate wird durch frequenzgeregelt Speisewasserpumpen gesteuert, die den Dampfausstoß kontinuierlich an den Bedarf des

Prozesses anpassen. Eine stufenlose Leistungsregelung⁴ im Verhältnis 100:1 ist möglich, wohingegen herkömmliche Gaskessel nur ein Verhältnis von bis zu 20:1 bieten.

Elektrodenkessel können sowohl für den Einphasen- als auch für den Dreiphasenbetrieb ausgelegt werden. Für Tauch-Elektrodenkessel bis etwa 20 MW_{th} werden drei Elektroden und ab etwa 20 MW_{th} sechs Elektroden eingesetzt, für Wasserstrahl-Elektrodenkessel können bis zu 18 Elektroden eingesetzt werden (Marrocco, 2024). Im Vergleich zu Verbrennungskesseln sind Elektrodenkessel kompakter, da sie nur etwa 20 % des Wassergehalts benötigen. Außerdem zeichnen sie sich durch ihre hohe Flexibilität und hohe Anstiegsraten aus, sodass die volle Dampfausbeute typischerweise in weniger als einer Minute erreicht werden kann (EECA, 2019).

Die Elektrodenkessel sind vollständig mit Steuerungen und Sicherheitsvorrichtungen ausgestattet. Die meisten Kessel verfügen über Steuerungen, die die Leitfähigkeit des Wassers innerhalb der vom Hersteller festgelegten Grenzwerte halten, indem sie das Wasser überwachen und bei Bedarf die vorgeschriebenen Chemikalien (zum Beispiel Natronlauge oder Phosphatlösungen) hinzufügen sowie den Kessel bei Bedarf abblasen (ACME Engineering Products, 2023). Wenn die Leitfähigkeit zu niedrig ist, kann die Kesselleistung nicht erreicht werden. Ist sie zu hoch, kann es zu Kurzschlüssen kommen (Marrocco, 2024). Typische Leitfähigkeitswerte betragen zwischen 35 und 65 µS (Hall AG Power-to-Heat, 2024). Die Wasseraufbereitung ist ebenfalls wichtig, denn eine fehlerhafte Aufbereitung kann die Leitfähigkeit beeinträchtigen und zu Dampfproblemen wie Schaumbildung führen (Marrocco, 2024). Durch die Bauweise wird neben Dampf auch Wasserstoff erzeugt und mit dem Dampf zusammen abgeführt. Aus diesem Grund ist bei einem geschlossenen Kondensatsystem sicherzustellen, dass der Wasserstoff sicher und ohne Explosionsgefahr abgeleitet wird. Im Elektrodenkessel zur Heißwassererzeugung wird Stickstoff verwendet, um eine inerte Atmosphäre zu schaffen und Korrosion zu verhindern. Da der Stickstoff mit keinen anderen Stoffen reagiert, wird eine sauerstofffreie Umgebung im Kessel geschaffen. Die Aufrechterhaltung dieser Umgebung trägt zur Verlängerung der Lebensdauer der Kesselkomponenten bei und verbessert die allgemeine Zuverlässigkeit und Effizienz des Kesselsystems.

⁴ Im Allgemeinen bietet ein höheres Regelverhältnis mehr Flexibilität und effizientere Betriebsabläufe, die sich im Laufe der Zeit in Kosteneinsparungen niederschlagen. Tauch-Elektrodenkessel für Heißwasser erreichen eine Leistungsrampe von etwa 100 kW/sec oder etwa 6 MW/min (Hall AG Power-to-Heat, 2024).

2.2.3 Kosten

Die Kosten für einen Elektrodenkessel für Dampferzeugung liegen bei einer Leistung von 10 bis 15 MW_{th} zwischen 1,5 und 2,5 Mio. € beziehungsweise die spezifischen Investitionskosten bei etwa 100 bis 250 €/kW_{th}. Dabei sind jedoch zusätzliche Kosten für die Wasseraufbereitung, für den Speisewasserbehälter und für die Mittelspannungsinfrastruktur wie Transformatoren, Mittelspannungsschalter und distanzabhängige Verkabelung nicht enthalten (Marrocco, 2024).

Die Wartungskosten sind bei einem Dampfkessel variabel. Im Durchschnitt sind alle drei bis sechs Jahre bestimmte Teile auszutauschen, was jährliche Kosten zwischen 15.000 und 25.000 € verursacht. In manchen Jahren fallen nur Inspektionskosten von etwa 5.000 € an, während in anderen Jahren aufgrund notwendiger Ersatzteile höhere Kosten entstehen. Bei Wasserstrahl-Elektrodenkesseln müssen die Elektrodeneinsätze und die Gegenelektrode etwa alle drei bis sechs Jahre ausgetauscht werden. Bei Tauch-Elektrodenkesseln sind die Elektroden länger haltbar, mit einer Lebensdauer von mindestens 15 Jahren, jedoch müssen hier gewisse Porzellanteile alle drei bis fünf Jahre ersetzt werden (Marrocco, 2024).

Die Betriebskosten variieren je nach Betriebsmodus des Kessels, also je nachdem, ob er aktiv Dampf erzeugt oder im Standby-Modus ist. Im Standby-Modus sollte der Elektrodenkessel zur Sicherung eines Ausfalls anderer Kessel warmgehalten werden, indem er mit einer internen Heizschlange geheizt wird, die aus dem Dampfnetz Dampf bezieht. Dies ermöglicht ein schnelles Anspringen des Kessels bei Bedarf. Die damit verbundenen Betriebskosten hängen von der Dampfabnahme⁵ ab. Im Betrieb bezieht der Elektrodenkessel Mittelspannungsstrom, zusätzliche Kosten entstehen durch den Betrieb von weiteren Aggregaten wie der Umwälzpumpe sowie durch Konditionierungsmaßnahmen (Marrocco, 2024).

Ein wichtiger Vorteil der Elektrodenkessel ist ihre Flexibilität, insbesondere in Kombination mit Gaskesseln, abhängig von der Preisentwicklung für Strom und Gas. Wenn der Kessel in ein Netzregelungskonzept eingebunden wird und von Netzbetreibern bevorzugt behandelt wird, könnte sich die Investition in einen Elektrodenkessel schneller amortisieren (Marrocco, 2024).

⁵ Als Beispiel werden bei einem 10 MW_{th}-Kessel bei 12 bar etwa 80 kg/h Dampf benötigt, um die Abwärmeverluste auszugleichen.

2.3 Übersicht der E-Kessel

Die nachfolgende Tabelle fasst die technischen und wirtschaftlichen Aspekte von E-Kesseln anhand ausgewählter Kriterien zusammen. Die angegebenen Werte wurden aus den Daten verschiedener Hersteller zusammengeführt und als Spannweite dargestellt. Die Werte beziehen sich auf einzelne Anlagen, wobei mit Kaskadenlösungen höhere thermische Leistungen realisierbar sind. Abweichungen sind je nach Hersteller möglich.

Tabelle 1: Vergleich der Technologien zur elektrischen Heißwasser- und Dampfproduktion anhand verschiedener Kriterien

Kriterien	Elektrokessel ⁶	Tauch-Elektrodenkessel	Wasserstrahl-Elektrodenkessel
Heißwassererzeugung [Ja/Nein]	Ja	Ja	Nein
Dampferzeugung [Ja/Nein]	Ja	Ja	Ja
Leistungsbereich [MW_{th}]	0,1–6	5–90	5–100
Spannungsanschluss [kV]	0,23–0,69	5–25	525
Dampfmenge [t/h]	0,3–9	8–135	8–150
Maximaler Betriebsdruck [bar(ü)]	55	80	28
Spezifische Investitionskosten [$€/kW_{th}$]	150–500	100–250	k. A.
Wartung und Instandhaltung [€ in Tsd./a]	1,5–5	15–25	k. A.

⁶ Bei Kaskadenlösungen sind höhere thermische Leistungen realisierbar, z.B. 3 x 5 MW_{th}

3 Anwendungen

Ein wichtiger Grund für den Einsatz von Elektro- oder Elektrodenkesseln ist für viele Betriebe der Wunsch nach Umstellung auf eine nachhaltige Energieversorgung. Bei gleichzeitiger Versorgung mit Ökostrom und/oder am Standort selbst erzeugtem Strom können die CO₂-Emissionen der Wärmeversorgung zu einem großen Teil vermieden werden. E-Kessel eignen sich gut für Anwendungen mit schwankenden Lasten und für Prozesse, bei denen eine schnelle Anpassung der Dampfleistung erforderlich ist.

E-Kessel sind am besten geeignet für:

- Prozesse mit Spitzenlasten
- variable Lasten, bei denen die schnelle Reaktion von E-Kesseln die Verluste minimiert
- Standorte, an denen die Dampflast von E-Kesseln auf die vorhandene Stromversorgungskapazität abgestimmt ist
- Prozesse, bei denen die hohen Dampfkosten, Verteilungsverluste und thermodynamischen Verluste eines älteren Dampfsystems ein dezentrales Elektrodampfsystem rechtfertigen
- Prozesse, bei denen die Einfachheit des Betriebs die Brennstoffkosten aufwiegt
- verteilte Dampflasten, bei denen dezentrale kleinere Dampfkessel den Bedarf decken und die Verluste im zentralen Dampfsystem vermeiden können

Somit lassen sich die E-Kessel in verschiedenen Industriebereichen einsetzen.

Beispielhafte Anwendungen⁷ sind:

- Lebensmittelverarbeitung
- Getränkeherstellung
- Brauereien
- Medizinische Versorgung
- Pharmaindustrie
- Papierindustrie
- Textilindustrie

⁷ Ein weiterer Sektor, in denen E-Kessel heutzutage die meiste Anwendung finden, sind Fernwärmeversorger. Dieser Aspekt wird im vorliegenden Leitfaden aber nicht näher behandelt.

3.1 Lebensmittelverarbeitung

Eine präzise Leistungsregelung von E-Kesseln an den Bedarf macht diese Technologie ideal für die Lebensmittelverarbeitung, wo eine genaue Temperaturregelung wichtig ist. Die Heizlasten von Lebensmittel-, Milch- und Fleischverarbeitungsbetrieben variieren erheblich je nach Art des Prozesses, ob der Betrieb kontinuierlich oder in Chargen produziert, und je nach Produkteigenschaften. Bei Chargenprozessen oder wechselnden Produkteigenschaften vermeidet das schnelle Anfahren (etwa fünf Minuten) von Elektrodenkesseln zur Dampferzeugung die Kosten für den Brennstoffverbrauch im Leerlauf und die Anfahrtkosten von Verbrennungskesseln. Somit können eine schnelle Laständerung und eine präzise Temperaturregelung gewährleistet werden, wodurch die Effizienz des Dampfsystems erhöht wird (EECA, 2019).

3.2 Brauereien

In Brauereien spielt Dampf eine entscheidende Rolle bei der Aufrechterhaltung eines hohen Hygienestandards, bei der Reinigung von Brauereigeräten und schwer zugänglichen Bereichen. Viele Brauereien verwenden beispielsweise Dampferzeuger, um die Würze zu kochen, was ein sehr energieintensiver Schritt im gesamten Brauprozess ist (Clayton, 2024a).

3.3 Medizinische Versorgung

Sterilisationsvorgänge in Krankenhäusern sind kritische Prozesse, die eine zuverlässige Dampfversorgung erfordern. Üblicherweise erfolgen diese durch eine zentrale Dampfversorgung. Mit der Umstellung auf effizientere Raum- und Wasserheizungssysteme werden Sterilisationsleistungen häufig durch verkleinerte Dampfsysteme oder elektrische Dampfgeneratoren erbracht. Für kleinere Dampfanforderungen, zum Beispiel in ambulanten Einrichtungen, bietet ein modularer elektrischer Dampferzeuger eine kompaktere Aufstellfläche und minimiert die Installationskosten. Diese Anlagen sind vollständig ausgerüstet und erfordern minimale Wartung und Überwachung (EECA, 2019).

3.4 Pharmaindustrie

Der pharmazeutische Sektor umfasst die Herstellung chemischer Syntheseprodukte wie pharmazeutische Produkte (Medikamente), oleochemische Produkte (Lebensmittel, Kosmetika) und Produkte im Zusammenhang mit der Herstellung von Polymeren (Gummi, Klebstoff, Farbe et cetera). In diesem Sektor sind sowohl kontinuierliche als auch Chargenbetriebe üblich. Insbesondere beim Chargenbetrieb können große Schwankungen in der Wärmelast auftreten, vom anfänglichen hohen Spitzenbedarf bis zur Temperaturerhaltung am Ende der Charge. Bei der Verwendung von Dampf führt dies zu großen Schwankungen des Dampfbedarfs, die durch reaktionsschnelle und flexible Dampferzeuger wie die E-Kessel abgedeckt werden können. Dampf wird auch für die Reinigung, Sterilisierung und Dehydrierung von Glasbehältern sowie für die Befeuchtung von Klimaanlage verwendet (Clayton, 2024c).

3.5 Papierproduktion

Heißes Wasser, Dampf und Elektrizität werden für die thermischen Aufschluss- und Behandlungsprozesse sowie für die Beheizung der Walzen zum Pressen, Transportieren und Trocknen der Papierrollen verwendet. Hersteller von Papier- und Wellpappe verwenden Walzen, die intern mit Dampf beheizt werden. Die Aufrechterhaltung einer gleichmäßigen Temperatur auf der Oberfläche der Walze ist für die Herstellung von Qualitätsprodukten unerlässlich (Clayton, 2024b).

4 Vorschriften und Normen

In diesem Kapitel werden die relevanten Vorschriften, Gesetze und Normen für die Inbetriebnahme von elektrischen Kesseln und die Sicherstellung der Kesselqualität beschrieben.

4.1 Inbetriebnahme

Im Vergleich zu herkömmlichen Kesseln bieten E-Kessel den Vorteil, dass für ihre Inbetriebnahme weniger Genehmigungen erforderlich sind, zum Beispiel das Emissionsschutzgesetz. Dennoch müssen bestimmte Vorschriften und Normen eingehalten werden, um den sicheren Betrieb der E-Kessel zu gewährleisten.

4.1.1 Druckgerätegesetz

Das Druckgerätegesetz BGBl. I Nr. 161/2015 idgF regelt die Beschaffenheit von Druckgeräten und damit auch von Dampfkesseln sowie deren Inverkehrbringen (Konformitätsbewertung) und legt die einzelnen Verpflichtungen für die betroffenen Wirtschaftsakteure (unter anderem Hersteller, Händler, Betreiber) fest. In Dampfsystemen ist beispielsweise der Dampfkessel ein Druckgerät, aber auch andere Bauteile wie Dampfleitungen, Kondensatbehälter und Speicher können unter das Gesetz fallen. Für Unternehmen wichtig sind die enthaltenen Sicherheitsbestimmungen betreffend das Aufstellen, die Inbetriebnahme und die wiederkehrenden Untersuchungen von druckführenden Geräten. Die druckführenden Geräte werden nach einem zunehmenden Gefahrenpotenzial in Kategorien eingestuft und es wird zwischen niedrigem und hohem Gefahrenpotenzial unterschieden (Kulterer, Schirmer, Wallner, & Brandl, 2020).

4.1.2 Vorschrift zum automatisierten Betrieb von Dampfkesseln

Beim Betrieb von Dampfkesseln ohne ständige Beaufsichtigung beziehungsweise im automatisierten Betrieb ist eine regelmäßige Überprüfung des Sicherheitssystems durch einen Kesselwärter vor Ort erforderlich. Wenn ein durchgehender Betrieb über

72 Stunden⁸ ohne Funktionsprüfung erfolgt, schaltet sich der Dampfkessel automatisch ab (BGBl. II Nr. 147/2012), (Hofinger, 2024). Zudem müssen Betreiber für eine regelmäßige Wartung und eine halbjährliche Prüfung der Sicherheitseinrichtungen durch sachkundige Personen sorgen. Protokolle sind neun Jahre aufzubewahren.

Eine weitere Betriebsweise kann durch eine Fernüberwachung sichergestellt werden. Dabei hält der Dampfkesselwärter ständig an einem definierten Ort, der vom Aufstellungsort des Dampfkessels getrennt ist. Am Ort, von dem aus der Dampfkessel bedient wird, müssen Überwachungseinrichtungen vorhanden sein. Nach einer Sicherheitsabschaltung muss ein Kesselwärter vor Ort eine Kontrolle durchführen. Störmeldungen sind klar erkennbar anzuzeigen, und der Betreiber ist für die Wartung und Prüfung der Sicherheitseinrichtungen verantwortlich, die monatlich dokumentiert werden muss. Der Kesselwärter muss alle zwölf Stunden Kontrollgänge vor Ort durchführen und dabei Kessel und Ausrüstung prüfen. Die Wasserqualität ist mindestens alle drei Tage zu kontrollieren und ebenfalls im Betriebsbuch zu dokumentieren (BGBl. II Nr. 147/2012).

4.1.3 Emissionsschutzgesetz für Kesselanlagen

Der Betrieb einschließlich der Errichtung oder wesentlichen Änderung von Anlagen mit einer Brennstoffwärmeleistung von 50 kW oder mehr bedarf einer behördlichen Genehmigung. Ausgenommen von der Genehmigungspflicht sind jedoch E-Kessel. Das bedeutet, im Gegensatz zu konventionellen Verbrennungsanlagen unterliegen E-Kessel nicht den Anforderungen des Emissionsschutzgesetzes, was den Inbetriebnahmeprozess deutlich vereinfacht (WKO, 2018).

⁸ *Elektrokessel zur Dampfproduktion sind in bestimmten Fällen von dieser Regelung ausgeschlossen und eine Überprüfung in längeren Zeitperioden ist möglich, was den Betrieb erleichtert (Hofinger, 2024)*

4.1.4 Zusätzliche Anforderungen an Elektrodenkesseln

Elektrodenkessel unterliegen normativen Anforderungen, die eine sichere Nutzung gewährleisten. Ihre gewerberechtliche Zulassung setzt die Einhaltung relevanter elektrotechnischer Standards voraus, insbesondere:

EN IEC 61936-1

Diese Norm legt die Anforderungen an die Planung und Errichtung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV fest. Sie umfasst Aspekte wie Sicherheitsmaßnahmen und Anforderungen an die elektrotechnische Infrastruktur.

EN 50522

Diese Norm regelt die Planung, Errichtung und Prüfung von Erdungsanlagen in Starkstromnetzen. Durch eine korrekte Erdung werden elektrische Fehler, wie Erdschlüsse, vermieden.

ÖVE E 8101

Diese Norm legt Anforderungen für die Planung, Errichtung und Prüfung elektrischer Niederspannungsanlagen fest. Ihr Hauptziel ist der Schutz von Menschen, Nutztieren und Sachwerten vor Gefahren und Schäden, die durch den Betrieb solcher Anlagen entstehen können.

Die gewerberechtliche Bewilligung bestätigt, dass die Anlage den geltenden gesetzlichen und technischen Anforderungen entspricht. Neben den Normen umfasst dies auch die Berücksichtigung von Umweltschutzauflagen und Sicherheitsvorschriften. Durch die Erfüllung dieser Anforderungen wird ein sicherer Betrieb gewährleistet, der sowohl das Personal als auch die Umwelt schützt.

Für die Inbetriebnahme von E-Kesseln empfiehlt sich eine frühzeitige Abstimmung mit den zuständigen Behörden und Netzbetreibern, um Genehmigungen und technische Voraussetzungen zu klären. Die Standards gewährleisten eine verlässliche Integration in industrielle Prozesse.

4.2 Kesselqualität

Bei der Produktion eines E-Kessels liegt es in der Verantwortung des Herstellers, sicherzustellen, dass das produzierte Produkt den definierten Qualitätsnormen entspricht. Die folgenden Normen betreffen die E-Kessel selbst und gewährleisten deren sichere Funktionsweise.

4.2.1 Sicherstellung des Betriebs von Großwasserraumkesseln

Für die Gewährleistung der Qualität und der Sicherheit eines E-Kessels gilt die Europäische Norm EN 12953 für Großwasserraumkessel mit einem Inhalt von mehr als zwei Litern zur Erzeugung von Dampf und/oder Heißwasser bei einem zulässigen Druck von mehr als 0,5 bar und bei einer Temperatur über 110 °C. Diese Europäische Norm stellt sicher, dass die Gefahren, die mit dem Betrieb von Großwasserraumkesseln verbunden sind, auf ein Minimum verringert werden und dass ein ausreichender Schutz geboten wird, um den bei Inbetriebsetzung des Großwasserraumkessels noch vorhandenen Gefahren zu begegnen. Es liegt in der Verantwortung des Herstellers, besondere Maßnahmen zu berücksichtigen, um bei der Herstellung das erforderliche Sicherheitsniveau in Bezug auf die Sicherheit zu erreichen (EN 12953-1, 2012).

Diese europäische Norm stellt sicher, dass der Kessel ordnungsgemäß gebaut ist und in den Verkehr gebracht werden darf. Wenn der Hersteller diese Normen erfüllt, erhält das Produkt das CE-Kennzeichen. Dieses signalisiert, dass das Produkt den EU-weiten Anforderungen an Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz entspricht und vom Hersteller entsprechend geprüft wurde.

4.2.2 Sicherstellung der elektrischen Komponente

Zur Sicherstellung der elektrischen Komponenten des Elektrodenkessels gilt die Norm IEC 63936. Sie enthält Anforderungen an die Planung und Errichtung elektrischer Energieanlagen in Systemen mit Nennspannungen von mehr als 1 kV Wechselstrom und Nennfrequenzen bis einschließlich 60 Hz, um die Sicherheit und das ordnungsgemäße Funktionieren für den vorgesehenen Verwendungszweck zu gewährleisten (IEC 61936-1, 2023).

5 Design des elektrischen Heißwasser- oder Dampfsystems

In diesem Kapitel werden zentrale Schritte bei der Auswahl und Planung eines E-Kessels erläutert. Dazu gehören die Bedarfsanalyse, die Klärung der rechtlichen Rahmenbedingungen, Effizienzmaßnahmen sowie die Bewertung der Wirtschaftlichkeit.

5.1 Bedarfsanalyse

Für die erfolgreiche Auswahl des passenden Systems ist es entscheidend, den Bedarf an Dampf oder Heißwasser für die versorgten Prozesse sowie die notwendige Anschlussleistung zu ermitteln. Die Bedarfsanalyse kann entweder durch eine Messung von bestehenden Anlagen oder durch eine genauere Berechnung erfolgen.

5.1.1 Messung

Die Bedarfsermittlung kann grundlegend durch eine Messung des tatsächlichen Verbrauchs erfolgen. Im Fall eines bestehenden konventionellen Kessels (zum Beispiel Gaskessel) könnte der Brennstoffverbrauch in 15-minütigen Intervallen gemessen werden. Auf diese Weise lässt sich aus dem Verbrauch eine erste Abschätzung der benötigten Leistung ableiten und der Kessel dimensionieren. Darüber hinaus ist es wichtig zu berücksichtigen, dass in den Wintermonaten, wenn der Kessel zusätzlich für die Raumheizung genutzt wird, eine höhere Heizlast zu decken ist. Ebenso sollten jene Tageszeiten analysiert werden, in denen Spitzenlasten auftreten – häufig vor oder während der ersten Schicht, wenn Maschinen oder Anlagen hochfahren und vorgewärmt werden.

Für eine präzisere Messung weiterer Faktoren ist der Einsatz stationärer Messgeräte empfehlenswert. Für die Durchflussmessung können Verfahren wie Vortex-, Coriolis- oder Differenzdruck-Durchflussmessung sowie die hochpräzise thermische Durchflussmessung genutzt werden. Der Druck kann über Manometer oder thermische Drucktransmitter erfasst werden, und für die Temperaturmessung kommen Thermoelemente oder Widerstandsthermometer zum Einsatz. Auf diese Weise lassen sich Massenströme,

Druckniveaus und Temperaturen in bestehenden Heißwasser- oder Dampfkesseln bestimmen und die gewonnenen Daten für die Auslegung eines neuen E-Kessels verwenden.

Mehr Information zu den einzelnen Messegeräten ist im [Messleitfaden II zur Messtechnik](#) zu finden.

Anhand der gemessenen Parameter kann die Wärmeleistung ermittelt werden. Diese berechnet sich entweder über die Temperaturdifferenz zwischen Heißwasser und Speisewasser bei Heißwasserkesseln oder über die Enthalpiedifferenz zwischen Sattdampf und Speisewasser bei Dampfkesseln. Allerdings ist die Messmethode für einen Standort, an dem kein Heißwasser- oder Dampfkessel in Betrieb ist, nicht von Nutzen.

Ebenso spielen die zeitliche Verteilung und die Dauer der Wärmelasten eine Rolle. Es ist wichtig, von Beginn an zu klären, ob der Kessel für die Grundlast oder die Spitzenlast ausgelegt sein soll. Wenn Spitzenlasten nur gelegentlich auftreten, können diese durch den Einsatz von einem Heißwasser- oder Dampfspeicher kompensiert und eine Überdimensionierung des Kessels vermieden werden.

5.1.2 Berechnungsmethode

Mit der folgenden Berechnungsmethode kann der gesamte Dampfbedarf der Anlage ermittelt werden, wenn die Versorgung über ein gemeinsames Verteilernetz erfolgt. Dazu müssen alle Dampfverbraucher gemäß Formel 1 addiert werden. Der gesamte Dampfbedarf setzt sich zusammen aus der Dampfmenge für direkte und indirekte Verbraucher, dem Dampfbedarf zur Kompensation von Wärmeverlusten in den Rohrleitungen sowie dem Eigenbedarf der Kesselanlage. Bei direkten Dampfverbrauchern tritt der Dampf in Kontakt mit dem zu beheizenden Medium und wird gemeinsam mit dem Produkt abgeführt. Dieser Dampf muss durch Zusatzwasser aus der Wasseraufbereitungsanlage ersetzt werden. Indirekte Verbraucher umfassen alle Wärmetauscher. Für eine überschlägige Dimensionierung der indirekten Verbraucher und zur Berücksichtigung der Wärmeverluste in den Rohrleitungen kann die Wärmeleistung der Wärmetauscher und der Rohrleitungsverluste mit dem Faktor 1,8 multipliziert werden (Bosch Industriekessel GmbH, 2019). Zusätzlich sind die zu erwartenden Dampfverluste zu berücksichtigen. Für eine erste Abschätzung wird oft ein Zuschlag von 5 bis 15 % auf die erforderliche Dampfmenge empfohlen (Sattler & Schibel, 2011).

Die Bestimmung der Wärmeleistung der Wärmetauscher kann anhand ihrer Auslegungsdaten erfolgen. Die Wärmetauscher im Dampfnetz sind für eine bestimmte Leistung dimensioniert, sodass diese Werte direkt abgelesen werden können. Zur Berechnung der Wärmeverluste der Rohrleitungen kann das Diagramm in Anhang A herangezogen werden. Dort lassen sich die Wärmeverluste beziehungsweise die Wärmeleistung der Rohre ablesen. Dieser Wert wird anschließend mit der Rohrlänge multipliziert, um die gesamte Wärmeleistung der Leitungen zu ermitteln. Beide Kennzahlen werden schließlich in Formel 1 eingesetzt. Es kann in den meisten Fällen auch sinnvoll sein, einen Gleichzeitigkeitsfaktor für die Verbraucher anzunehmen. Dieser würde die erforderliche Dampfmenge wieder reduzieren sowie eine Überdimensionierung des Kessels vermeiden.

Formel 1: Berechnung der Dampfmenge

$$\begin{aligned}\dot{m}_{D,K} &= \dot{m}_{D,dV} + \dot{m}_{D,iV} + \dot{m}_{D,vR} + \dot{m}_{D,EB} \\ &= \dot{m}_{D,dV} + \dot{Q}_{WT} \cdot \frac{3600}{r} + \dot{Q}_{vR} \cdot \frac{3600}{r} + \dot{m}_{D,EB} \\ &\approx (\dot{m}_{D,dV} + (\dot{Q}_{WT} + \dot{Q}_{vR}) \cdot 1,8) \cdot (1,05 \dots 1,15)\end{aligned}$$

$\dot{m}_{D,K}$	[kg/h]	Gesamter Dampfbedarf der Kesselanlage
$\dot{m}_{D,dV}$	[kg/h]	Dampfbedarf der direkten Verbraucher
$\dot{m}_{D,iV}$	[kg/h]	Dampfbedarf der indirekte Verbraucher
$\dot{m}_{D,vR}$	[kg/h]	Dampfbedarf für den Ausgleich der Wärmeverluste in den Rohrleitungen
$\dot{m}_{D,EB}$	[kg/h]	Dampfbedarf der Kesselanlage (5 bis 15% Zuschlag)
\dot{Q}_{WT}	[kW]	Wärmeleistung der Wärmetauscher
\dot{Q}_{vR}	[kW]	Wärmeleistung der Rohrleitungsverluste
r	[kJ/kg]	Verdampfungsenthalpie beim jeweiligen Druck

Anschließend sollte der erforderliche Betriebsdruck ermittelt werden. Dieser berechnet sich aus dem höchsten benötigten Druck am jeweiligen Endverbraucher zuzüglich der bei der Verteilung entstehenden Druckverluste. Eine Abschätzung des maximalen benötigten Drucks kann anhand des Druck-Temperatur-Diagramms vorgenommen werden, siehe Anhang B.

Formel 2: Berechnung des Betriebsdrucks im Kessel

$$p_B = p_{max,V} + \Delta p_{Ges}$$

p_B	[bar]	Betriebsdruck
$p_{max,V}$	[bar]	Maximal benötigter Druck am Verbraucher
Δp_{Ges}	[bar]	Gesamtdruckverlust (Rohrleitungen, Armaturen, Pumpen, usw.)

Zur Ermittlung des gesamten Druckverlusts sind mehrere Komponenten zu analysieren, darunter Rohrleitungen, Armaturen, Pumpen und andere Bauteile. Die Berechnung von Widerstandsbeiwerten und Einzelwiderständen ist in Anhang C und Anhang D dargestellt. Für überschlägige Berechnungen kann als Schätzwert der Rohrreibungskoeffizient $\lambda_R \approx 0,02$ bis $0,04$ als hinreichend genau angesetzt werden. Die Richtwerte der Strömungsgeschwindigkeit in Dampf- oder Wasserleitungen sind im Anhang E zu finden.

Formel 3: Berechnung des entstehenden Druckverlusts

$$\Delta p_{Ges} = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot \left(\lambda_R \cdot \frac{L}{d_i} + \sum \zeta_E \right) \cdot \frac{1}{10^5}$$

Δp_{Ges}	[bar]	Gesamtdruckverlust (Rohrleitungen, Armaturen, Pumpen, usw.)
ρ	[kg/m ³]	Wasser- oder Dampfdichte
v	[m/s]	gewählte Strömungsgeschwindigkeit
λ_R	[-]	Widerstandsbeiwert (Reibungsbeiwert) ($\lambda_R \approx 0,02$ bis $0,04$)
L	[m]	Rohrleitungslänge
d_i	[m]	Rohrinnendurchmesser
ζ_E	[-]	Einzelwiderstände

Im nächsten Schritt wird die thermische Leistung berechnet, die der Dampfkessel am Auslegungspunkt erzeugen soll. Dabei können die Enthalpien in Abhängigkeit vom jeweiligen Druckniveau den Wasser-Dampf-Tabellen entnommen werden, siehe Anhang F. Die Berechnung erfolgt folgendermaßen:

Formel 4: Berechnung der Wärmeleistung des Dampfkessels

$$\dot{Q}_D = \dot{m}_{D,K} \cdot (h''_{p_B} - h'_{Spw})$$

\dot{Q}_D	[kW]	Wärmeleistung des Kessels
$\dot{m}_{D,K}$	[kg/s]	Gesamter Dampfbedarf der Kesselanlage
h'_{Spw}	[kJ/kg]	Enthalpie des Speisewassers
h''_{p_B}	[kJ/kg]	Enthalpie des Sattedampfs beim Betriebsdruck

Schließlich kann die erforderliche elektrische Leistung berechnet werden. Hierfür ist der Wirkungsgrad der Umwandlung elektrischer Energie in thermische Energie zu berücksichtigen, der in der Regel bei etwa 95 bis 99 % liegt.

Formel 5: Berechnung der elektrischen Anschlussleistung des Dampfkessels

$$P_{el} = \frac{\dot{Q}_D}{\eta_{el}}$$

P_{el}	[kW]	Elektrische Leistung
\dot{Q}_D	[kW]	Wärmeleistung des Kessels
η_{el}	[-]	Wirkungsgrad

Bei industriellen Prozessen, die mehrere heiße und kalte Wärmeströme umfassen, lässt sich der Wärmefluss durch Optimierungstechniken wie die Pinch-Analyse weiter verbessern.

5.1.3 Hybrid-Dampflösungen

Die Wahl der passenden Dampfversorgungslösung hängt von der Verfügbarkeit elektrischer Leistung und den Anforderungen an die Betriebsweise ab. Für Hybrid-Dampflösungen (getrennte Anlagen oder Hybrid-Dampfkessel) stehen drei unterschiedliche Varianten zur Verfügung (Gosse, 2025), für die Auslegung siehe nachfolgende Tabelle.

Tabelle 2: Varianten der Auslegung von Hybrid-Dampflösungen

Variante	A	B	C
Elektrische Leistung	Nicht ständig verfügbar	Nicht ständig verfügbar	Immer verfügbar
Nennleistung	Zu 100 % mit dem Brenner oder mit dem elektrischen Heizbündel	Zu 100 % mit dem Brenner oder im Hybridbetrieb	100 % Hybridbetrieb
Auslegung	Brenner 100 %, elektrisches Heizbündel 100 %	Brenner 100 %, Brenner und elektrisches Heizbündel 100 %	Brenner und elektrisches Heizbündel 100 %
Bedeutung	Hybridlösung nicht wirtschaftlich, getrennte Dampfkessel empfohlen	Zusätzliche Schutzvorrichtungen notwendig	Zusätzliche Schutzvorrichtungen nicht notwendig

Variante A

Die elektrische Leistung steht nicht ständig zur Verfügung, zum Beispiel volatile PV-Eigenerzeugung. Die Nennleistung kann entweder vollständig mit dem Brenner oder vollständig mit einem elektrischen Heizbündel bereitgestellt werden. Zum Beispiel müssten bei einer Nennleistung von 7.500 kg/h sowohl der Brenner als auch das Heizbündel jeweils diese Leistung erbringen können. Diese Lösung ist wirtschaftlich nicht optimal, da ein überdimensionierter Kesselkörper erforderlich ist. In solchen Fällen wird empfohlen, separate Dampfkessel für die verschiedenen Energiequellen einzusetzen.

Variante B

Die elektrische Leistung steht nicht ständig zur Verfügung. Die Nennleistung kann entweder vollständig mit dem Brenner oder im Hybridbetrieb durch eine Kombination aus Brenner und elektrischem Heizbündel erreicht werden. Beispielsweise könnte bei einer Nennleistung von 7.500 kg/h der Brenner die gesamte Leistung liefern, während im Hybridbetrieb eine Aufteilung von 4.500 kg/h durch den Brenner und 3.000 kg/h elektrisch möglich wäre. Allerdings sind zusätzliche Schutzvorrichtungen notwendig, da die maximale Dampfleistung von Brenner und Heizbündel zusammen die zulässige Kesselauslastung überschreiten könnte.

Variante C

Die elektrische Leistung ist dauerhaft verfügbar. Hier setzt sich die Nennleistung aus der Leistung des Brenners und des elektrischen Heizbündels zusammen. Der Kessel wird entsprechend aufgeteilt, sodass ein Anteil der Nennleistung durch den Brenner und der verbleibende Anteil durch das Heizbündel bereitgestellt wird. Bei einer Nennleistung von 7.500 kg/h könnten beispielsweise 5.000 kg/h durch den Brenner und 2.500 kg/h durch das Heizbündel gedeckt werden. Zusätzliche Schutzvorrichtungen sind hier nicht erforderlich, da die kombinierte Leistung innerhalb der zulässigen Auslastung bleibt.

5.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Kesselanlagen sind meistens überwachungspflichtige Anlagen und unterliegen diversen rechtlichen Rahmenbedingungen, welche bei der Herstellung der Komponenten, der Planung und dem Bau sowie dem Betrieb der Anlage beachtet und eingehalten werden müssen. Folgende Anforderungen kommen dabei von allen Ebenen der Gesetzgebung (und Überwachung) (Bosch Industriekessel GmbH, 2019):

- Europäische Richtlinien und Verordnungen, zum Beispiel die Druckgeräterichtlinie, die Maschinenrichtlinie, die Niederspannungsrichtlinie, die Richtlinie für Hochspannungsanlagen, die Explosionsschutzrichtlinie et cetera
- Nationale Gesetze und Verordnungen, zum Beispiel die Betriebssicherheitsverordnung, Emissions- und Immissionsgesetze, Arbeitsschutzgesetz et cetera
- Regionale und lokale Vorschriften, zum Beispiel Baurecht, Brandschutz et cetera

5.3 Effizienzmaßnahmen

Für die Erreichung des optimalen Effizienzgrades des Systems sollen sämtliche Möglichkeiten zur Minimierung von Verlusten identifiziert und bewertet werden. Zunächst ist festzulegen, ob Heißwasser oder Dampf das geeignetere Heizmedium für das jeweilige Produkt oder den Prozess darstellt. Dabei sollte untersucht werden, ob eine dezentrale Wärmeversorgung im Vergleich zu einer zentralen Versorgung mit einem Kessel die Anforderungen besser erfüllt.

Auch wenn die Umwandlung elektrischer Energie in thermische Energie nahezu verlustfrei erfolgt, entstehen im Kessel oder in den Leitungen selbst dennoch Verluste. Diese können jedoch durch Effizienzmaßnahmen reduziert werden:

5.3.1 Isolierung von Kesseloberfläche, Rohrleitungen und Armaturen

Wärmeverluste entstehen durch Leitungs- und Strahlungsverluste aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Kessel, Leitungen und Armaturen im Vergleich zur Umgebungstemperatur. Die Höhe dieser Wärmeverluste hängt von der Größe der Oberfläche, der Mediums- und Umgebungstemperatur sowie der Qualität der Isolierung ab. Durch eine erhöhte Isolierstärke lässt sich die Oberflächentemperatur des Kessels senken, was zu einer Reduktion des Wärmeverlustes führt. Eine Verdopplung der Isolierstärke halbiert jedoch nicht die Oberflächenverluste. Je nach verwendeter Isolierstärke kann eine Reduktion der Wärmeverluste um bis zu 40 bis 50 % erzielt werden. Die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme ist zu berücksichtigen, da eine erhöhte Isolierstärke mit zusätzlichen Kosten verbunden ist. Zudem sollte auf potenzielle Wärmebrücken wie Stützen, Kesselstühle oder Bühnenkonsolen geachtet werden, die durch die Isolierung durchdringen und einen zusätzlichen Wärmeverlust verursachen können. Nicht zuletzt entstehen durch die Rohrleitungen weitere Verluste. Die durchgehende Isolierung von Rohrleitungen ist meist verpflichtend vorgeschrieben (Bosch Industriekessel GmbH, 2019).

Weitere Maßnahmen finden Sie im Leitfaden zur „Technischen Isolierung“.

5.3.2 Regelung

Ein großes Einsparpotenzial liegt auch in der Optimierung und Anpassung der Regelung von Dampfkesselanlagen an den tatsächlichen Betrieb. Diese Optimierung ist immer sinnvoll, da sich der Auslegungszustand und die tatsächlichen Betriebsanforderungen von Kesselanlagen unterscheiden. Zur energetischen Optimierung im Betrieb ist es daher sinnvoll, den tatsächlich benötigten mittleren Betriebsüberdruck zu ermitteln und an der Kesselsteuerung einzustellen. Durch die Absenkung des Betriebsüberdrucks sinkt die Temperatur im Kessel und den Dampfleitungen, wodurch die Strahlungs- und Leitungsverluste reduziert werden. Eine Absenkung des mittleren Betriebsüberdrucks von 8 bar (175 °C Sattdampf Temperatur) auf 6 bar (165 °C Sattdampf Temperatur) hat zur Folge, dass die Wärmeverluste durch Leitung und Strahlung bereits um 7 % reduziert werden (Bosch Industriekessel GmbH, 2019).

5.3.3 Automatische Überwachung

Durch die automatische Überwachung und Visualisierung wichtiger Betriebsparameter einer Kesselanlage können Fehler schneller entdeckt und Optimierungspotenzial leichter identifiziert werden. Beispielsweise können folgende Werte überwacht und ausgewertet werden: mittlerer Betriebsüberdruck, Niveau, Pumpenstarts, Pumpenlaufzeit, Leitfähigkeit und Absalzrate, Wasserwerte et cetera (Bosch Industriekessel GmbH, 2019).

5.3.4 Kesselwartung

Es wird empfohlen, die Anlagen viertel- oder mindestens halbjährlich zu warten und neu einzustellen. Der Betreiber profitiert durch folgende verbesserte Eigenschaften seiner Anlage: gleichbleibend hohe Energieeffizienz, Langlebigkeit und hohe Ausfallsicherheit (Bosch Industriekessel GmbH, 2019).

Weitere Effizienzmaßnahmen im Bereich von Dampfsystemen finden Sie im „Auditleitfaden zur Optimierung von Dampfsystemen“.

5.4 Wirtschaftlichkeit

Beim Design eines elektrischen Heißwasser- oder Dampfkessels spielt die Wirtschaftlichkeit eine zentrale Rolle. Über die gesamte Lebensdauer eines E-Kessels entfallen schätzungsweise rund 90 % der Gesamtkosten auf den elektrischen Energieverbrauch, während die verbleibenden 10 % auf Investitions- und Wartungskosten entfallen (Zuberi, Hasanbeigi, & Morrow, 2022). Um die Kosten eines E-Kessels mit denen eines konventionellen Kessels zu vergleichen, ist vor allem ein Vergleich der Stromkosten mit den Kosten für herkömmliche Brennstoffe notwendig. Angesichts der aktuellen Strompreise liegen die Betriebskosten elektrisch betriebener Systeme häufig höher als die von Systemen, die auf konventionellen Brennstoffen basieren. Daher sollten zusätzliche Maßnahmen in Betracht gezogen werden, um die Betriebskosten zu senken und das System wirtschaftlicher zu gestalten.

Ein Ansatz ist die Nutzung einer bestehenden Photovoltaikanlage (PV) für die Stromversorgung eines Elektrokessels, um die Eigennutzungsquote zu erhöhen und den Bedarf an Netzstrom zu verringern. Durch eine Verwendung von Heißwasser- oder Dampfspeichern können überschüssige Strommengen kurzfristig in Wärme umgewandelt und gespeichert werden, ohne dass eine zeitliche Anpassung der Produktionsprozesse erforderlich ist.

Für E-Kessel besteht zudem die Möglichkeit, am Regelenergiemarkt⁹ (Sekundärregelung) teilzunehmen, wenn sie gemeinsam mit anderen Aggregaten eine gesamte elektrische Leistung von mindestens 1 MW erreichen. Hierfür ist ein Rahmenvertrag mit dem Netzbetreiber erforderlich, der nach einem erfolgreichen Präqualifikationsprozess abgeschlossen werden kann. Zur Teilnahme an der Sekundärreserve ist es notwendig, dass die gesamte angebotene Leistung eines Teilnehmers innerhalb von fünf Minuten vollständig aktiviert werden kann. Hier lassen sich Einsparungen bei den Betriebskosten erzielen, indem der Kessel während Phasen hoher Netzstromverfügbarkeit – zum Beispiel bei Überkapazitäten aus PV-Anlagen, insbesondere mittags im Sommer, oder aus Windkraftanlagen – Energie aufnimmt und dabei für die Netzstabilität sorgt. Der

⁹ Die Nutzung von Regelenergie ist ein beliebtes Konzept für Nah- und Fernwärmeversorger, die eine Power-to-Heat-Anlage beziehungsweise einen E-Kessel in Betrieb haben. Somit können Stromüberschüsse aus volatilen erneuerbaren Energieträgern in Form von Wärme gespeichert werden.

Netzbetreiber kann für die Abnahme von Strom während dieser Zeiten Vergütungen an den Betrieb zahlen, was die Betriebskosten erheblich reduzieren kann.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Art und Weise, wie der Betrieb seine elektrische Energie beschafft. Betriebe haben einen konstanten Grundbedarf an Strom, um den täglichen Betrieb aufrechtzuerhalten. Der Großteil dieser Energie wird oft über den Futures-Markt beschafft, auf dem die Strompreise stabil sind und langfristig abgesichert werden können. Zusätzlich kann der Betrieb jedoch auch Energie am Day-Ahead-Markt¹⁰ und am Intraday-Markt einkaufen, wo die Preise zwar volatil, aber oft günstiger oder sogar negativ sind. Diese flexible Kombination aus unterschiedlichen Beschaffungsmärkten kann die Betriebskosten senken, da kurzfristige Preisschwankungen optimal genutzt werden können (Lagendijk, 2023).

Des Weiteren sollten Überlegungen zur CO₂-Besteuerung berücksichtigt werden. Ab 2025 beträgt der CO₂-Preis 55 €/t CO₂. Das bedeutet, dass bei der Nutzung von etwa 5 MWh Erdgas circa 1 Tonne CO₂ emittiert wird. In einigen Ländern, etwa in Schweden, liegt die CO₂-Bepreisung bereits bei bis zu 120 €/t CO₂. Seit der Einführung der CO₂-Bepreisung in Österreich ist der Preis jährlich um etwa 10 € gestiegen, und weitere gesetzliche Anpassungen könnten zu weiteren Erhöhungen führen. Bei der Nutzung von Ökostrom fällt hingegen keine CO₂-Steuer an. Insgesamt ist daher eine vorausschauende wirtschaftliche Bewertung sinnvoll, da die CO₂-Bepreisung zukünftig weiter steigen könnte.

Nicht zuletzt können Betriebe, die am Emissionshandelssystem teilnehmen, wie die Stahl-, Zement-, Glas-, Ziegel- und Papierindustrie, durch den Einsatz eines E-Kessels wirtschaftliche Vorteile erzielen, insbesondere wenn sie ihre zulässigen Emissionen bereits überschreiten und zusätzliche Emissionszertifikate zukaufen müssen. Bei der Nutzung von Ökostrom verbessert sich die CO₂-Bilanz des Betriebs durch die Reduktion von Emissionen. Dadurch sinkt der Bedarf an kostenintensiven Emissionszertifikaten, deren Preise in den letzten Jahren deutlich gestiegen sind.

¹⁰ Auf dem Day-Ahead-Markt wird Energie einen Tag im Voraus gehandelt, während der Intraday-Markt stündliche Anpassungen im Strombedarf ermöglicht, was eine hohe Flexibilität bietet.

6 Referenzprojekte

In diesem Kapitel werden verschiedene Beispiele aus realisierten Industrieprojekten in der nachfolgenden Tabelle 3 vorgestellt. Die Tabelle listet Anwendungen von Elektro- und Elektrodenkesseln sowie Durchlauferhitzern auf und enthält Informationen zu den jeweiligen Prozessen, Wärmeträgern, thermischen Leistungen, Anschlussleistungen und Druckniveaus.

Tabelle 3: Beispiele mit realisierten industriellen Projekten mit Elektro- und Elektrodenkesseln für Heißwasser- oder Dampfproduktion

Industrie / Prozess	Wärmeanlage	Wärmeträger	Leistung [MWth]	Massenstrom [t/h]	Druck [bar]	Anschlussleistung [kV]	Quelle
Pharma / Tierarzneimittelproduktion	Elektrokessel	Dampf	0,5	0,7	10	-	(Bosch Industriekessel GmbH, 2025)
Lebensmittel / Produktion von Chips	Elektrokessel	Dampf	3,6	5	10	-	(Bosch Industriekessel GmbH, 2023)
Lebensmittel / Fischfabrik	Elektrokessel	Dampf	2,6	4		-	(Bosch Industriekessel GmbH, 2022)
Chemie / Kunststoff herstellen	Elektrokessel	Dampf	0,9	1,35	28	-	*
Pharma / Prozessdampf und Heizung	Elektrokessel	Dampf	0,65	1	12	-	(SCHNEIDER-KESSEL GmbH, 2024a)
Papier / Papierproduktion	Elektrokessel	Dampf	4	6,1	7	-	*
Krankenhaus / Hygienische Anwendungen	Elektrokessel	Dampf	2 x 0,15	-	-	0,4	(ECOTHERM Austria GmbH, 2004)
Lebensmittel / Getränke herstellen	Elektrokessel	Dampf	1,1	1,6	16	-	(Georg Hagelschuer GmbH, 2024)

Industrie / Prozess	Wärmeanlage	Wärmeträger	Leistung [MWth]	Massenstrom [t/h]	Druck [bar]	Anschlussleistung [kW]	Quelle
Papier / Verpackungs-herstellung	Elektrokessel	Dampf	3,5	-	-	-	(PARAT Halvorsen AS, 2021)
Pharma / Biotechnologie-prozesse	Elektrokessel	Dampf	1,2	-	10	0,4	(PARAT Halvorsen AS, 2023)
Pharma / Biopharma-prozesse	Elektrokessel	Dampf	2,2	-	-	0,69	(PARAT Halvorsen AS, 2023)
Lebensmittel / Getränke herstellen	Elektrokessel	Dampf	5	-	10	0,4	(PARAT Halvorsen AS, 2023)
Galvanik / Tauchbecken beheizen	Durchlauf-erhitzer	Warmwasser	2 x 0,5	-	-	-	(SCHNEIDER-KESSEL GmbH, 2024b)
Lebensmittel / Bier brauen	Elektrodenkessel	Dampf	15	-	-	15	(VAPEC AG, 2013)
Lebensmittel / Gemüse verarbeiten	Elektrodenkessel	Dampf	25	-	-	20	(VAPEC AG, 2006)
Chemie	Elektrodenkessel	Dampf	5 x 27	40	-	25	(VAPEC AG, 2014)
Lebensmittel / Milch verarbeiten	Elektrodenkessel	Heißwasser	8	-	-	-	*
Lebensmittel / Gewächshäuser beheizen	Elektrodenkessel	Heißwasser	10	-	6,5	10	(PARAT Halvorsen AS, 2022)
Metall / Aluminium-Raffinerie	Elektrodenkessel	Dampf	25	40	53	22	(PARAT Halvorsen AS, 2022)
Papier / Papierproduktion	Elektrodenkessel	Dampf	50-60	-	18-28	10-20	(PARAT Halvorsen AS, 2023)
Rezyklieren	Elektrodenkessel	Dampf	37	-	-	-	*

*Anmerkung: Beispiele ohne Quellenangabe wurden in Übereinstimmung mit den Kesselherstellern nicht aufgeführt, da die bereitgestellten Daten aus Datenschutzgründen nicht veröffentlicht werden dürfen.

Auf dem Markt gibt es mehrere Hersteller von E-Kesseln, die innovative Lösungen für verschiedene industrielle Anwendungen anbieten. Im Folgenden werden einige der führenden Hersteller aufgelistet, die sich durch ihre Produktqualität auszeichnen. Die meisten Kesselbaufirmen, die auf Verbrennungskessel spezialisiert sind, bieten auch Anlagen zur elektrischen Heißwasser- oder Dampferzeugung an.

Elektrokessel:

- Bosch Industriekessel GmbH
- SCHNEIDER-KESSEL GmbH
- ECOTHERM Austria GmbH
- Viessmann Group GmbH & Co. KG
- Danstoker A/S
- Clayton Industries
- ELWA Elektro-Wärme GmbH & Co. KG
- et cetera

Elektrodenkessel:

- VAPEC AG
- PARAT Halvorsen AS
- Vapor Power International
- Cleaver-Brooks
- Acme Engineering Prod. Ltd.
- Zander & Ingestrom AB
- BVA Elektrokessel GmbH
- et cetera

Über klimaaktiv

klima**aktiv** ist die Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Seit 2004 bietet sie in den Themenschwerpunkten „Bauen und Sanieren“, „Energiesparen“, „Erneuerbare Energie“ und „Mobilität“ ein umfassendes, ständig wachsendes Spektrum an Information, Beratung sowie Weiterbildung und setzt Standards, die international Vorbildcharakter haben.

klima**aktiv** zeigt, dass jede Tat zählt: Jede und jeder in Kommunen, Unternehmen, Vereinen und Haushalten kann einen aktiven Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten. Damit trägt die Initiative zur Umsetzung des nationalen Energie- und Klimaplanes (NEKP) für Österreich bei. Näheres unter klimaaktiv.at

Das klima**aktiv**-Programm Betriebe setzt gezielt Impulse zur Erhöhung der Energieeffizienz in österreichischen Produktions- und Gewerbebetrieben und unterstützt diese auf ihrem Weg in Richtung Klimaneutralität. Informationen, Angebote und Good-Practice-Beispiele von umgesetzten Maßnahmen finden Sie unter klimaaktiv.at/effizienz.

Kontakt

Strategische Gesamtsteuerung klima**aktiv**

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Sektion Klima und Energie

Abteilung VI/12 - Dialog zu Energiewende und Klimaschutz

Stubenbastei 5, 1010 Wien

Programmmanagement klima**aktiv** Betriebe

Österreichische Energieagentur

Petra Lackner

eebetriebe@energyagency.at

klimaaktiv.at/effizienz

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Technologien zur elektrischen Heißwasser- und Dampfproduktion anhand verschiedener Kriterien.....	18
Tabelle 2: Varianten der Auslegung von Hybrid-Dampflösungen.....	31
Tabelle 3: Beispiele mit realisierten industriellen Projekten mit Elektro- und Elektrodenkesseln für Heißwasser- oder Dampfproduktion	37
Tabelle 4: Beispiele für Wandrauheiten.....	56
Tabelle 5: Richtwerte für Strömungsgeschwindigkeiten in Dampfleitungen	58
Tabelle 6: Richtwerte für Strömungsgeschwindigkeiten in Wasserleitungen	59
Tabelle 7: Wasser-Dampf-Tabelle	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Elektrokessels zur Erzeugung von Dampf in horizontaler Bauweise.....	7
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Durchlauferhitzers zur Erzeugung von Heißwasser	8
Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Tauch-Elektrodenkessels: (a) zur direkten Erzeugung von Dampf, (b) zur Erzeugung von Heißwasser mittels eines Wärmetauschers	13
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Wasserstrahl-Elektrodenkessels zur Erzeugung von Dampf	15
Abbildung 5: Wärmeverluste in Rohrleitungen für isolierte und unisolierte Rohre in Abhängigkeit vom Rohraußendurchmesser und der Mediumtemperatur	53
Abbildung 6: Siedelinie von reinem Wasser im Druck-Temperatur-Diagramm	54
Abbildung 7: Rohrreibungszahl in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl und der Wandrauheit k	55
Abbildung 8: Einzelwiderstände (Widerstandszahlen) für Rohrleitungen, Normaldurchgangsventile, T-Stücke, Spezialventile, Wellrohrausgleicher, 90°-Bögen, Absperrschieber in Abhängigkeit von der Nennweite DN	57

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der Dampfmenge.....	28
Formel 2: Berechnung des Betriebsdrucks im Kessel	29
Formel 3: Berechnung des entstehenden Druckverlusts.....	29
Formel 4: Berechnung der Wärmeleistung des Dampfkessels	30
Formel 5: Berechnung der elektrischen Anschlussleistung des Dampfkessels.....	30
Formel 6: Berechnung der Reynolds-Zahl	56

Literaturverzeichnis

ACME Engineering Products. (2023). Immersed Electrode High Voltage Steam Boiler. Abgerufen am 20.11.2023 von acmeprod.com/files/ugd/f9ebb0_1cb32ccf51af412b94daca6604da4c2c.pdf.

BGBl. II Nr. 147/2012. (kein Datum). Gesamte Rechtsvorschrift für Automatisierter Betrieb von Dampfkesseln, Fassung vom 20.11.2024. Abgerufen von ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20007817.

Bosch Industriekessel GmbH. (2019). Planungshandbuch für Dampfkesselanlagen. Abgerufen am 20.11.2024 von bosch-industrial.com/de/media/country_pool/service/technical_guides/steamboiler.pdf.

Bosch Industriekessel GmbH. (2022). Climate-neutral steam supply in Iceland with a Bosch electric steam boiler. Abgerufen am 17.01.2025 von bosch-industrial.com/global/media/country_pool/solutions/references/pdfs/rb049_en.pdf.

Bosch Industriekessel GmbH. (2023). Bosch supports global player with Net Zero vision: PepsiCo operates hybrid boiler system with green electricity. Abgerufen am 17.01.2025 von bosch-industrial.com/global/media/country_pool/solutions/references/pdfs/rb051_en.pdf.

Bosch Industriekessel GmbH. (2025). Liste mit Elektrokesseln bei Referenzprojekten. (in Abstimmung mit der Firma zur Verfügung gestellt).

Clayton. (2024a). Dampferzeugung für Brauereien. Abgerufen am 20. 11. 2024 von claytonsteam.com/de-DE/industry/beereries.

Clayton. (2024b). Dampferzeugung in der Papierindustrie. Abgerufen am 20.11.2024 von claytonsteam.com/de-DE/industry/paper-industry.

Clayton. (2024c). Dampferzeugung in der Pharmaindustrie. Abgerufen am 20.11.2024 von claytonsteam.com/de-DE/industry/pharmaceutical-industry.

ECOTHERM Austria GmbH. (2004). Al Salam International Hospital. Abgerufen am 28.10.2024 von ecotherm.com/de/referenzen/al-salam-international-hospital/.

EEB ENERKO Energiewirtschaftliche Beratung GmbH. (2017). Potenziale der Sektorkopplung und Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien im Wärmebereich in Sachsen-Anhalt - Endbericht. Abgerufen am 20.11.2024 von enerko.de/wp-content/uploads/2017/12/Endbericht_PtH_web.pdf.

EECA. (2019). Electrode and Electric Resistance Steam Generators and Hot Water Heaters for low carbon process heating. (Energy Efficiency and Conservation Authority, Hrsg.) Abgerufen am 20.11.2024 von genless.govt.nz/assets/Business-Resources/Electrode-electric-resistance-steam-generators-hot-water-heaters-for-low-carbon-process-heating.pdf.

EN 12953-1. (2012). Großwasserraumkessel - Teil 1: Allgemeines. Abgerufen am 20.11.2024 von austrian-standards.at/de/shop/onorm-en-12953-1-2012-04-15~p1930728.

Georg Hagelschuer GmbH. (2024). Elektro-Dampfkesselanlage im mobilen Kesselhaus. Abgerufen am 28.10.2024 von dampfkessel.com/referenzen/elisa/.

Gosse, D. (2025). Hybride Kessel: Dynamischer Betrieb mit Strom und/oder Brennstoff. (in Abstimmung mit der Firma zur Verfügung gestellt).

Hall AG Power-to-Heat. (21.11.2024). Besichtigung einer Power-to-Heat Anlage in Hall AG. Hall in Tirol.

Harfst, W. (06.06.2016). Electrode Boilers. (Water Technology Report, Hrsg.) Abgerufen am 20.11.2024 von watertechnologyreport.wordpress.com/2016/06/06/electrode-boilers/.

Hindsgaul, C., Hulgaard, T., & Houbak, N. (2018). Biomass and Waste section in Technology Data. In *Technology Data for Energy Plants for Electricity and District heating generation*. Danish Environmental Agency.

Hofinger, S. (15.10.2024). Erfahrungen mit Elektrokessel während der Planung- und Errichtungsphase in der Pharmaindustrie. (D. Dimov, Interviewer).

IEC 61936-1. (2023). Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV AC und 1,5 kV DC -- Teil 1: *Wechselstrom*. Abgerufen am 20.11.2024 von [austrian-standards.at/de/shop/ove-en-iec-61936-1-2023-03-01~p2653671](https://standards.at/de/shop/ove-en-iec-61936-1-2023-03-01~p2653671).

Kulterer, K., Schirmer, M., Wallner, M., & Brandl, G. (2020). Auditleitfaden zur Optimierung von Dampfsystemen. (Österreichische Energieagentur, Hrsg.) Abgerufen am 20.11.2024 von klimaaktiv.at/dam/jcr:9aa19fb1-e530-49b5-80a9-7ef76c13a587/Dampfleitfaden_V2_barrierefrei.pdf.

Legendijk, J. S. (23.01.2023). An Exploration of the Company Perspective on the Adoption of Industrial Electric Boilers: A Multi-case Study on the Hampering Electrification of the Dutch Industrial Heat Demand in Relation to the Congestion Issues on the Electricity Grid. Master thesis - Eindhoven University of Technology.

Marrocco, A. (26.08.2024). Praktische Erfahrungen mit Elektrodenkesseln in betrieblichen Anwendungen. (D. Dimov, Interviewer).

PACKMAN Industrial Group. (2024). Electrical Steam Boiler. Abgerufen am 20.11.2024 von packmangroup.com/wp-content/uploads/2023/12/Packman-Electrical-Steam-Boiler.pdf.

PARAT Halvorsen AS. (2021). Jackon Alta orders Complete Electrical Steam System from PARAT. Abgerufen am 28.10.2024 von parat.no/de/nachrichten/jackon-alta-orders-complete-electrical-steam-system-from-parat/.

PARAT Halvorsen AS. (2022). 25MW High-Pressure Electrode Steam Boiler to Aughinish Alumina in Ireland. Abgerufen am 28.10.2024 von parat.no/en/news/25mw-high-pressure-electrode-steam-boiler-to-aughinish-alumina-in-ireland/.

PARAT Halvorsen AS. (2022). Alfred Pedersen & Søn orders 10MW Electrode Hot Water Boiler. Abgerufen am 28.10.2024 von parat.no/news/alfred-pedersen-son-orders-10mw-electrode-hot-water-boiler/.

PARAT Halvorsen AS. (2023). 1200kW Low Voltage Electrical Steam Boiler to Aker BioMarine. Abgerufen am 28.10.2024 von parat.no/de/nachrichten/1200kw-low-voltage-electrical-steam-boiler-to-aker-biomarine/.

PARAT Halvorsen AS. (2023). Coca-Cola to install 5MW Electrical Steam Boilers in Dongen. Abgerufen am 28.10.2024 von [parat.no/en/news/coca-cola-to-install-5mw-electrical-steam-boilers-in-dongen/#:~:text=The%20plant%20expects%20to%20upgrade,electrical%20steam%20boilers%20by%20PARAT.](https://www.parat.no/en/news/coca-cola-to-install-5mw-electrical-steam-boilers-in-dongen/#:~:text=The%20plant%20expects%20to%20upgrade,electrical%20steam%20boilers%20by%20PARAT.)

PARAT Halvorsen AS. (2023). Takeda Pharmaceuticals just installed an IEL Electrical Steam Boiler. Abgerufen am 28.10.2024 von [parat.no/news/takeda-pharmaceuticals-just-installed-an-iel-electrical-steam-boiler/](https://www.parat.no/news/takeda-pharmaceuticals-just-installed-an-iel-electrical-steam-boiler/).

PARAT Halvorsen AS. (2023). UPM invest in eight large POWER to HEAT systems. Abgerufen am 28.10.2024 von [parat.no/nl/nieuws/upm-invest-in-eight-large-power-to-heat-systems/#:~:text=The%20multi%2Dinternational%20company%20will,Boilers%20from%20PARAT%20Halvorsen%20AS.](https://www.parat.no/nl/nieuws/upm-invest-in-eight-large-power-to-heat-systems/#:~:text=The%20multi%2Dinternational%20company%20will,Boilers%20from%20PARAT%20Halvorsen%20AS.)

PARAT Halvorsen AS. (2024). PARAT IEH - Hochspannungs-Elektrodenkessel für Dampf- und Heißwasser. Abgerufen am 20.11.2024 von [parat.no/de/produkte/industry/parat-ieh-hochspannung-elektrodenkessel/](https://www.parat.no/de/produkte/industry/parat-ieh-hochspannung-elektrodenkessel/).

Sattler, G., & Schibel, T. (2011). Planungshandbuch Dampfkessel. (Viessmann Werke, Hrsg.) Abgerufen am 20.11.2024 von [viessmann.de/content/dam/public-brands/master/knowledge/technology-and-systems/industrial-boilers/ph-dampfkessel.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/p_h-dampfkessel.pdf](https://www.viessmann.de/content/dam/public-brands/master/knowledge/technology-and-systems/industrial-boilers/ph-dampfkessel.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/p_h-dampfkessel.pdf).

Schneider, C. (28.08.2024). Elektrifizierung der Heißwasser- und Dampferzeugung. (D. Dimov, Interviewer).

SCHNEIDER-KESSEL GmbH. (2020). Dampf- und Heißwassererzeuger - Technisches Datenblatt.

SCHNEIDER-KESSEL GmbH. (2024a). Pharmaindustrie, Schweiz - Installation eines elektrischen Dampferzeugers zur Prozessdampferzeugung. Abgerufen am 28.10.2024 von [schneider-kessel.de/wp-content/uploads/2020/10/Referenz-Seite-HDO-E-MD-1175-1_de.pdf](https://www.schneider-kessel.de/wp-content/uploads/2020/10/Referenz-Seite-HDO-E-MD-1175-1_de.pdf).

SCHNEIDER-KESSEL GmbH. (2024b). Galvanikindustrie, Golfregion - Elektrischer Warmwasserhitzers Typ HWO-E Modul 500. Abgerufen am 28.10.2024 von schneider-kessel.de/wp-content/uploads/2020/10/Referenz-Seite-HWO-E-Modul-MD-1178-1_de.pdf.

Statistik Austria. (2024). Nutzenergieanalyse. Abgerufen am 13.01.2025 von statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/nutzenergieanalyse

VAPEC AG. (2006). Instandstellung und Wiederinbetriebnahme der Kesselanlage bei Bonduelle. Abgerufen am 28.10.2024 von vapec.ch/referenzen/elektrodenkessel/elektrokessel/bonduelle-25-mw-20-kv/chash/1e5849fc0061a11cb3ec313e1a847267/.

VAPEC AG. (2013). Instandstellung und Modernisierung einer 15-MW-Dampfkesselanlage im Kongo. Abgerufen am 28.10.2024 von vapec.ch/referenzen/elektrodenkessel/elektrokessel/bralima-15-mw-15-kv/chash/b75713c08698f8c1962a8ff6d68ae2b9/.

VAPEC AG. (2014). Lieferung von fünf 27-MW-Dampfkesseln für chemische Prozesse. Abgerufen am 28.10.2024 von vapec.ch/referenzen/elektrodenkessel/elektrokessel/malaysia-5-x-27-mw-25-kv-dampfkessel/chash/c4fe42952bf4c417817ed9a793572395/.

WKO. (2018). Emissionsschutzgesetz für Kesselanlagen 2013. Abgerufen am 20.11.2024 von wko.at/betriebsanlagen/emissionsschutzgesetz-kesselanlagen.

Zuberi, M. J., Hasanbeigi, A., & Morrow, W. R. (2022). Electrification of Boilers in U.S. Manufacturing. (Lawrence Berkley National Laboratory, & Global Efficiency Intelligence, Hrsg.) Abgerufen am 20.11.2024 von static1.squarespace.com/static/5877e86f9de4bb8bce72105c/t/62fb89dfb827c92c3340eed9/1660652049933/Boiler+Electrification-final+Rev2.pdf.

Nomenklatur

Lateinbuchstaben

Zeichen	Einheit	Benennung
c	[J/kgK]	Spezifische Wärmekapazität
d	[m]	Durchmesser
f_{ISO}	[-]	Einsparfaktor durch Isolierung
k	[mm]	Wandrauheit
L	[m]	Länge
\dot{m}	[kg/h]	Massenstrom
P	[W]	Leistung
p	[bar]	Druck
Q	[kWh]	Energiebedarf
q	[kWh/m ³]	Spezifischer Energiebedarf pro Kubikmeter
\dot{Q}	[kW]	Wärmeleistung
r	[kJ/kg]	Verdampfungsenthalpie
Re	[-]	Reynolds-Zahl
Δp	[bar]	Druckdifferenz (Verlust)

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Benennung
ζ_E	[-]	Einzelwiderstand
η_d	[Pa s]	Dynamische Viskosität
λ_R	[-]	Widerstandsbeiwert
η	[-]	Wirkungsgrad
ρ	[kg/m ³]	Dichte

Indizes

Zeichen	Benennung
B	Betrieb
D	Dampf / Dampfbedarf
dV	Direkte Verbraucher
EB	Energiebedarf des Kessels
el	elektrisch
Ges	Gesamt
i	Innen
iV	Indirekte Verbraucher
K	Kesselanlage
max	Maximal
Spw	Speisewasser
V	Verbraucher
vR	Wärmeverluste in Rohrleitungen
WT	Wärmetauscher

Abkürzungen

a	Annum (Jahr)
bar(ü)	Überdruck (über den atmosphärischen Druck)
DN	Nennweite
E-Kessel	Elektro- und Elektrodenkessel
EU	Europäische Union
FU	Frequenzumrichter / Frequenzregelung
k. A.	Keine Angabe
kg/h	Kilogramm pro Stunde
kV	Kilovolt
kWh	Kilowattstunde
kW _{th}	Thermische Leistung in Kilowatt
MW _{th}	Thermische Leistung in Megawatt
N ₂	Stickstoff
PV	Photovoltaik
Re	Reynolds-Zahl
t	Tonne
V	Volt
μS	MicroSiemens

Anhang

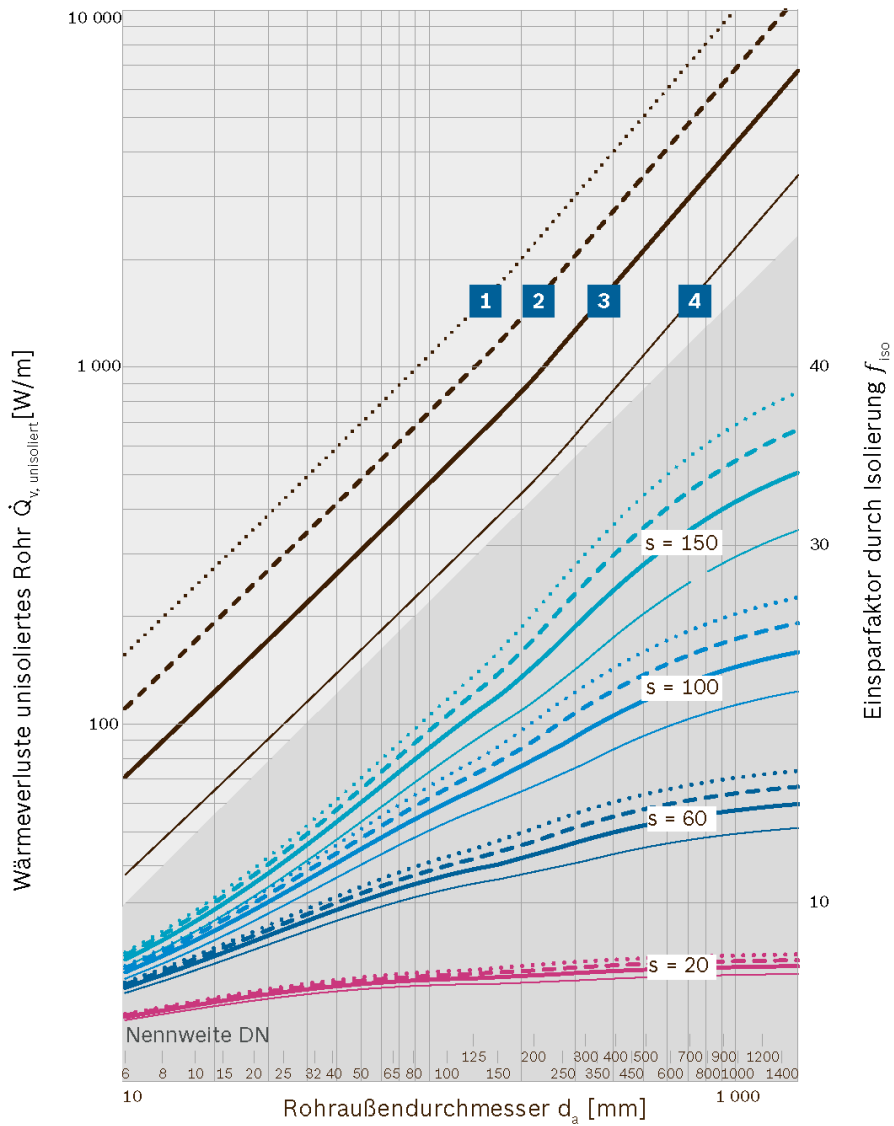
Anhang A: Wärmeverluste an Rohren

Mit dem folgenden Diagramm können die Wärmeverluste in den Rohrleitungen bestimmt werden. Es stellt die Abhängigkeit zwischen dem Rohraußendurchmesser, den Wärmeverlusten und dem Einsparfaktor dar.

Für die Ablesung der Wärmeverluste bei einem unisolierten Rohr wird von der x-Achse (Rohraußendurchmesser oder Nennweite) eine horizontale Linie bis zu den Linien 1, 2, 3 oder 4 gezogen, je nach Mediumstemperatur. Der Schnittpunkt zeigt den Wärmeverlust pro Meter Rohr, der auf der linken y-Achse abgelesen werden kann.

Bei einem isolierten Rohr gilt die gleiche x-Achse beziehungsweise der Rohraußendurchmesser oder die Nennweite. Der Schnittpunkt wird anhand der entsprechenden Isolierstärke (farbige Linien für unterschiedliche Stärken) ermittelt. Dieser Schnittpunkt zeigt den Einsparfaktor durch die Isolierung auf der rechten y-Achse an. Um den Wärmeverlust für ein isoliertes Rohr zu berechnen, teilt man den zuvor ermittelten Wärmeverlust des unisolierten Rohrs durch den Einsparfaktor der Isolierung. Zwischenwerte für andere Mediumstemperaturen oder Isolierstärken können durch Interpolation zwischen den Linien ermittelt werden.

Abbildung 5: Wärmeverluste in Rohrleitungen für isolierte und unisolierte Rohre in Abhängigkeit vom Rohraußendurchmesser und der Mediumstemperatur



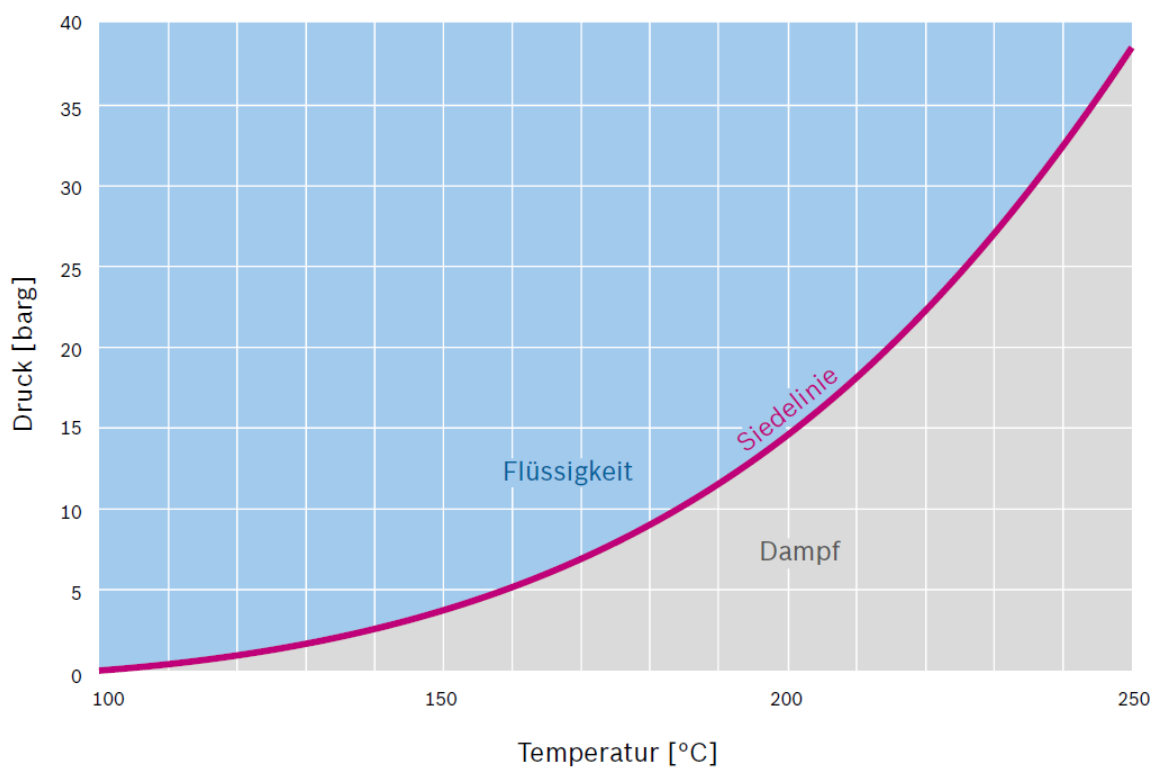
- | | |
|---|----------------------------|
| 1 Mediumtemperatur: 250 °C (·····) | Isolierstärke $s = 150$ mm |
| 2 Mediumtemperatur: 200 °C (- - - -) | Isolierstärke $s = 100$ mm |
| 3 Mediumtemperatur: 150 °C (— — —) | Isolierstärke $s = 60$ mm |
| 4 Mediumtemperatur: 100 °C (— — —) | Isolierstärke $s = 20$ mm |

Quelle: (Bosch Industriekessel GmbH, 2019)

Anhang B: Druck-Temperatur-Diagramm

Anhand des folgenden Diagramms kann das maximale Druckniveau bei den Verbrauchern bestimmt werden. Der Phasenübergang von Wasser zu Sattdampf erfolgt isotherm, also bei konstanter Temperatur. Über die Kopplung des Siededrucks mit der Temperatur (siehe Siedelinie im Druck-Temperatur-Diagramm) lässt sich das erforderliche Druckniveau der Verbraucher bei gegebener Aufheiztemperatur ermitteln (Quelle: 2024, Bosch, PHB).

Abbildung 6: Siedelinie von reinem Wasser im Druck-Temperatur-Diagramm

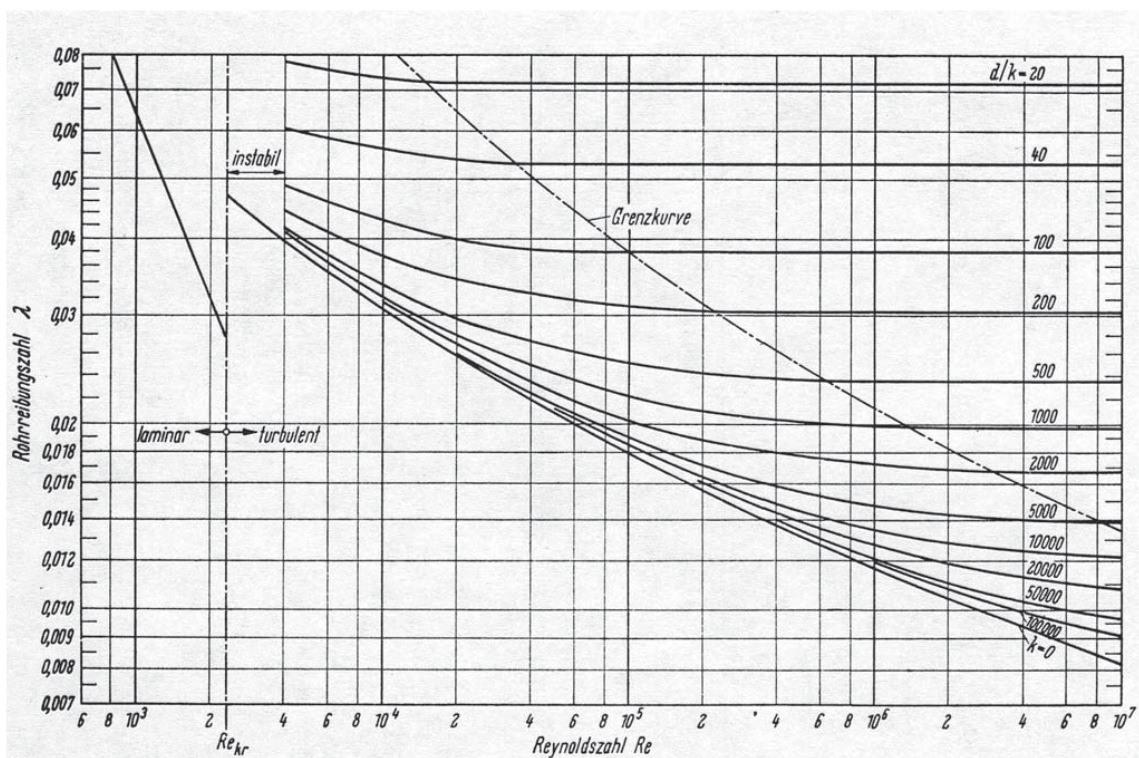


Quelle: (Bosch Industriekessel GmbH, 2019)

Anhang C: Widerstandsbeiwert (Reibungsbeiwert)

Im folgenden Diagramm lässt sich der Widerstandsbeiwert (Reibungsbeiwert, im Diagramm: Rohrreibungszahl) in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl und dem Verhältnis von Innendurchmesser zu Wandrauheit (d/k) bestimmen. Wenn diese beide Werte mithilfe von Formel 6 und den Angaben aus Tabelle 4 ermittelt wurden, kann eine horizontale Linie von der x-Achse bis zur entsprechenden Linie des Verhältnisses (d/k) gezogen werden. Der Schnittpunkt stellt die Rohrreibungszahl dar, die auf der y-Achse abgelesen werden kann.

Abbildung 7: Rohrreibungszahl in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl und der Wandrauheit k



Quelle: (Sattler & Schibel, 2011)

Anhand der folgenden Formel kann die Reynolds-Zahl berechnet werden. Die Werte für die dynamische Viskosität können Tabelle 7 entnommen werden.

Formel 6: Berechnung der Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_i}{\eta_d}$$

Re	[-]	Reynolds-Zahl
ρ	[kg/m ³]	Wasser- oder Dampfdichte
v	[m/s]	gewählte Strömungsgeschwindigkeit
d_i	[m]	Rohrinnendurchmesser
η_d	[Pa·s]	dynamische Viskosität

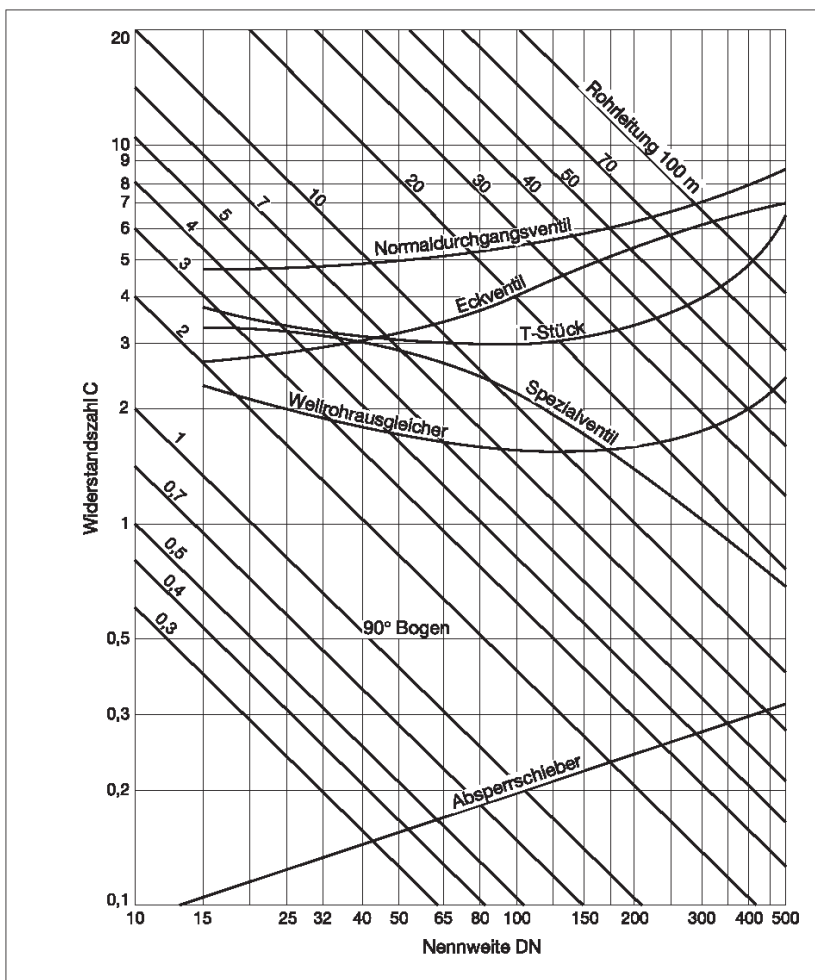
Tabelle 4: Beispiele für Wandrauheiten

Rohrmaterial	Wandrauheit k [mm]
Stahlrohre (neu)	0,04 bis 0,1
Stahlrohre (angerostet)	0,4 bis 0,6
Gusseisen (neu)	0,5 bis 1,0
Gusseisen (angerostet)	1,0 bis 1,5
Beton (glatt)	0,3 bis 0,8
Beton (roh)	1,0 bis 3,0
Blechkanäle (gefalzt)	0,15
PVC-/PE-Rohre	0,007

Anhang D: Einzelwiderstände

Anhand des folgenden Diagramms lassen sich die Einzelwiderstände (Widerstandszahlen) verschiedener Armaturen wie Eckventile, T-Stücke, 90°-Bögen et cetera in Abhängigkeit von der Rohrnennweite (DN) ermitteln. Für die Ablesung der Werte wird eine horizontale Linie von der x-Achse (DN) nach oben gezogen. Der Schnittpunkt mit der jeweiligen Armatur stellt den Einzelwiderstand (Widerstandszahl) dar, der auf der y-Achse abzulesen ist. Die Einzelwiderstände werden mit der jeweiligen Anzahl der Armaturen multipliziert, aufsummiert und anschließend in die Gleichung zur Berechnung des gesamten Druckverlusts eingesetzt.

Abbildung 8: Einzelwiderstände (Widerstandszahlen) für Rohrleitungen, Normaldurchgangsventile, T-Stücke, Spezialventile, Wellrohrausgleicher, 90°-Bögen, Absperrschieber in Abhängigkeit von der Nennweite DN



Quelle: (Sattler & Schibel, 2011)

Anhang E: Richtwerte für Strömungsgeschwindigkeiten

In den folgenden zwei Tabellen sind die Richtwerte für die Strömungsgeschwindigkeiten in Dampf- und Wasserleitungen zu finden.

Tabelle 5: Richtwerte für Strömungsgeschwindigkeiten in Dampfleitungen

Dampfleitung ¹¹	Druckbereich (bar(ü))	Durchflussgeschwindigkeit (m/s)
Nassdampf	≤ 10	10 bis 20
Sattdampf	≤ 1	10 bis 15
Sattdampf	> 1 bis ≤ 5	15 bis 25
Sattdampf	> 5 bis ≤ 10	25 bis 35
Sattdampf	> 10 bis ≤ 40	35 bis 40
Sattdampf	> 40 bis ≤ 100	40 bis ≤ 60
Sicherheitsventil-Ausblaseleitungen und Anfahrleitungen (auch Entlüftungsleitung Mischkühler)	gegen atmosphärischen Druck	≤ 70
Brüden- und Abdampfleitungen, Entspannungsdampf in Kondensatleitungen (offenes System)	gegen atmosphärischen Druck	10 bis 25
Ferndampfleitungen	< 40	≤ 20

Quelle: (Sattler & Schibel, 2011)

¹¹ Überhitzter Dampf: wie unter Sattdampf, jedoch mit Wahl der jeweils „höheren“ Geschwindigkeit

Tabelle 6: Richtwerte für Strömungsgeschwindigkeiten in Wasserleitungen

Wasserleitungen:	Druckbereich (bar(ü))	Durchflussgeschwindigkeit (m/s)
Kondensatleitungen	Saugleitung	≥ 0,5 bis ≤ 1
Kondensatleitungen	Druckleitung	≥ 1 bis ≤ 3
Speisewasserleitungen	Saugleitung	≥ 0,5 bis ≤ 1
Speisewasserleitungen	Druckleitung	≥ 2 bis ≤ 3,5
Kessellauge- und Abschlammleitung (ohne Entspannungsdampf)	keine Angabe	≥ 1 bis ≤ 2
Kessellauge- und Abschlammleitung (mit Entspannungsdampf)	≤ 1	10 bis 15
Kessellauge- und Abschlammleitung (mit Entspannungsdampf)	> 1 bis ≤ 5	15 bis 20
Trink- und Brauchwasserleitungen	keine Angabe	≥ 1 bis ≤ 2
Kühlwasser	Saugleitung	≥ 0,5 bis ≤ 1,5
Kühlwasser	Druckleitung	≥ 1,0 bis ≤ 3,5

Quelle: (Sattler & Schibel, 2011)

Anhang F: Stoffwerte für Wasser und Dampf nach IAPWS IF-97

Anhand der folgenden Tabelle lassen sich die Enthalpiewerte und die Siedetemperaturen des Wassers beim jeweiligen Druckniveau ablesen.

Tabelle 7: Wasser-Dampf-Tabelle

Überdruck [bar(ü)]	Absolut- druck [bar(a)]	Siede- tempera- tur [°C]	Enthalpie- Wasser [kJ/kg]	Enthalpie- Sattdampf [kJ/kg]	Verdampfungs- enthalpie [kJ/kg]	Dynamische Viskosität Wasser [μPas]	Dynamische Viskosität Dampf [μPas]
0,0	1,0	99,6	417,4	2.674,9	2.257,5	282,9	12,26
0,1	1,1	102,3	428,8	2.679,2	2.250,4	275,1	12,35
0,2	1,2	104,8	439,3	2.683,1	2.243,8	268,2	12,43
0,3	1,3	107,1	449,1	2.686,6	2.237,5	262,0	12,51
0,4	1,4	109,3	458,4	2.690,0	2.231,6	256,4	12,59
0,5	1,5	111,4	467,1	2.693,1	2.226,0	251,4	12,66
0,6	1,6	113,3	475,3	2.696,0	2.220,7	246,8	12,73
0,7	1,7	115,1	483,2	2.698,8	2.215,6	242,5	12,79
0,8	1,8	116,9	490,7	2.701,4	2.210,7	238,6	12,85
0,9	1,9	118,6	497,8	2.703,9	2.206,1	235,0	12,91
1,0	2,0	120,2	504,7	2.706,2	2.201,6	231,6	12,96
1,5	2,5	127,4	535,4	2.716,5	2.181,2	217,5	13,21
2,0	3,0	133,5	561,5	2.724,9	2.163,4	206,8	13,42
2,5	3,5	138,9	584,3	2.732,0	2.147,7	198,3	13,61
3,0	4,0	143,6	604,7	2.738,1	2.133,3	191,2	13,77
3,5	4,5	147,9	623,2	2.743,4	2.120,2	185,2	13,92
4,0	5,0	151,8	640,2	2.748,1	2.107,9	180,1	14,05
4,5	5,5	155,5	655,9	2.752,3	2.096,5	175,5	14,18
5,0	6,0	158,8	670,5	2.756,1	2.085,6	171,6	14,30
6,0	7,0	165,0	697,1	2.762,7	2.065,6	164,7	14,51

Überdruck [bar(ü)]	Absolut- druck [bar(a)]	Siede- tempera- tur [°C]	Enthalpie- Wasser [kJ/kg]	Enthalpie- Sattdampf [kJ/kg]	Verdampfungs- enthalpie [kJ/kg]	Dynamische Viskosität Wasser [μPas]	Dynamische Viskosität Dampf [μPas]
7,0	8,0	170,4	721,0	2.768,3	2.047,3	159,1	14,70
8,0	9,0	175,4	742,7	2.773,0	2.030,3	154,3	14,87
9,0	10,0	179,9	762,7	2.777,1	2.014,4	150,2	15,02
10,0	11,0	184,1	781,2	2.780,7	1.999,5	146,6	15,17
11,0	12,0	188,0	798,5	2.783,8	1.985,3	143,4	15,30
12,0	13,0	191,6	814,8	2.786,5	1.971,7	140,5	15,43
13,0	14,0	195,0	830,1	2.788,9	1.958,8	137,9	15,54
14,0	15,0	198,3	844,7	2.791,0	1.946,3	135,5	15,66
15,0	16,0	201,4	858,6	2.792,9	1.934,3	133,3	15,76
16,0	17,0	204,3	871,9	2.794,5	1.922,6	131,3	15,86
17,0	18,0	207,1	884,6	2.796,0	1.911,4	129,5	15,96
18,0	19,0	209,8	896,8	2.797,3	1.900,4	127,7	16,05
19,0	20,0	212,4	908,6	2.798,4	1.889,8	126,1	16,14
20,0	21,0	214,9	920,0	2.799,4	1.879,4	124,6	16,23
21,0	22,0	217,3	931,0	2.800,2	1.869,2	123,1	16,31
22,0	23,0	219,6	941,6	2.800,9	1.859,3	121,8	16,40
23,0	24,0	221,8	952,0	2.801,5	1.849,6	120,5	16,47
24,0	25,0	224,0	962,0	2.802,0	1.840,1	119,3	16,55
25,0	26,0	226,1	971,7	2.802,5	1.830,7	118,1	16,62
26,0	27,0	228,1	981,2	2.802,8	1.821,5	117,0	16,70

Quelle: (Bosch Industriekessel GmbH, 2019)

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

+43 (0) 800 21 53 59

servicebuero@bmk.gv.at

bmk.gv.at