

Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes hochlegierter Werkstoffe im Kraftwerksbau

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von **Dipl.-Ing.**

Ralf Erich Berker

aus Lüdenscheid

Berichter: Prof. Dr.-Ing.habil. Ulrich Brill
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck

Tag der mündlichen Prüfung: 17. November 2014

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar



**Berichte aus dem
Institut für Eisenhüttenkunde**

Ralf Berker

**Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes
hochlegierter Werkstoffe im Kraftwerksbau**

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. W. Bleck
Prof. Dr.rer.nat. Dr.-Ing.e.h. W. Dahl
Prof. Dr.-Ing. H.W. Gudenau
Prof. Dr.-Ing. D. Senk

Band 3/2015

Shaker Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2014)

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3500-1

ISSN 0943-4631

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Eisenhüttenkunde während der Jahre 2010 bis 2014 auf Anregung von Herrn Prof. Dr.-Ing.habil. Ulrich Brill vom Haus der Technik als Außeninstitut der RWTH Aachen. Mit ihm gemeinsam wurden die ersten Ideen und das Gliederungskonzept der Dissertation entwickelt. Die Arbeit wurde bei der RWTH Aachen, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik eingereicht. Ich danke Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck für die freundliche Übernahme des Koreferats.

Die praktischen Inhalte der Arbeit wurden wesentlich von Herrn Dr. Ralf Mohrmann seitens der RWE Power AG unterstützt und gefördert. Bei den betriebswirtschaftlichen Inhalten lieferte außerdem Herr Axel Graf, ebenfalls RWE, hilfreiche Unterstützung.

Darüber hinaus gilt mein Dank den Partnern der Industrie, die ebenfalls Daten und fachliche Ratschläge beisteuerten, die zum Teil den durchgeführten Berechnungen zugrunde liegen. Stellvertretend für die Kraftwerkshersteller unterstützten mich die Herren Martin Becker, Ralf-Udo Husemann und Dr. Friedrich Klauke von Hitachi Power Europe (heute MHPSE) in Duisburg, seitens der Materialhersteller Frau Dr. Jutta Klöwer von Thyssen Krupp VDM (heute VDM Metals GmbH) in Werdohl und für die Komponentenhersteller stellvertretend Herr Rainer Wolff von Bilfinger Piping Technologies. Wertvolle Unterstützung in Telefonaten und persönlichen Gesprächen lieferte auch Herr Marcus Schneider vom E.ON Anlagenservice in Gelsenkirchen.

Für Tipps und Diskussionen bzgl. Format und Formatierung bedanke ich mich bei Frau Jutta Hartmann und Herrn Michael Finster. Ein besonderer Dank gilt nicht zuletzt meiner Frau und meiner Familie, die mit viel Toleranz und Verständnis die zeitlichen Restriktionen akzeptierten und mir ein großes Maß an Geduld entgegen brachten.

Kurzfassung

Die in den letzten Jahren stark forcierte Stromeinspeisung aus regenerativen Quellen in das deutsche Energienetz hat zu veränderten Anforderungen im Bereich konventioneller Kraftwerke geführt. Kohlekraftwerke, die für den Grundlastbetrieb ausgelegt wurden, müssen zukünftig häufiger an- und abgefahren werden. Hierbei wirken sich dickwandige Komponenten negativ auf die geforderte Flexibilität und die Lebensdauer des Bauteils aus.

Diese Veränderungen und deren Einfluss auf einen betriebswirtschaftlich sinnvollen Betrieb des Kraftwerks, sowie der betriebswirtschaftliche Nutzen für den Austausch solcher kritischen Komponenten werden in der vorliegenden Arbeit untersucht.

Zur beispielhaften Berechnung wird ein Frischdampfaustrittssammler mit hoher Wandstärke ausgewählt. Für unterschiedliche Werkstoffe erfolgen die Dimensionierung des Bauteils und die Berechnung der möglichen Fahrweise mit der daraus resultierenden Wirtschaftlichkeit im Betrieb. Die Untersuchungen werden durchgängig auf Basis bestehender EN-Regelwerke durchgeführt. Mit Sensitivitätsanalysen wird der Einfluss einzelner Berechnungsparameter auf die Wirtschaftlichkeit eines möglichen Komponententauschs überprüft.

Die Ergebnisse zeigen, dass es weniger die Material- und Herstellungskosten des Sammlers, als vielmehr die Anzahl der angenommenen Anfahrten eines Kraftwerks, der im Markt zu erzielende Strompreis und die Brennstoffkosten sind, die den Ausschlag für die Wirtschaftlichkeit geben. Bereits die Veränderung der Auslegungsvorgaben mit einer daraus resultierenden Wanddickenreduzierung führen, auch ohne die Verwendung eines anderen Werkstoffs, zu deutlichen Vorteilen in der Flexibilität und damit in der Wirtschaftlichkeit des Kraftwerksbetriebs.

Das Berechnungsmodell kann, bedingt durch die modulare Implementierung, leicht auf andere Bauteile adaptiert werden.

Abstract

Increasing electrical power production from renewable sources has led to changing demands in the field of conventional power plants in recent years in Germany. Coal-fired power plants that have been designed for Base load operation must withstand frequent start-up and shut-down cycles at present and in the future. Therefore, thick-walled components have a negative impact on the required flexibility and the life expectancy of these components.

The exchange (retrofit) of these components and the commercial impact on an economically optimized operation of the power plant, as well as the financial effect of the exchange of such critical components are investigated in this work.

As an example a thick-walled steam outlet header was selected. Different materials and different loading characteristics (number of warm and hot starts) including start-up gradients were taken as variables during the optimization process. The component design is based on EN standards. Economic results of the retrofit of critical components were investigated with sensitivity studies.

The results show, that material and manufacturing costs are less important compared to the loading characteristics (i.e. number of starts), the electricity price and the fuel costs. Even the change in the design specifications, with a resulting reduction in the wall thickness, leads to improved flexibility in the plant operation and an economic benefit, even without the use of different materials.

Due to the modular design of the implemented methods, this optimization can be easily adapted to other components.

Inhaltsverzeichnis

1	Inhalt und Ziel der Arbeit	1
2	Die technische Auswahl und Auslegung von Kraftwerkskomponenten	6
2.1	Historie und Zukunft der Druck- und Temperaturentwicklung im Kraftwerksbereich	6
2.2	Eigenschaften und Strukturen von Hochtemperaturwerkstoffen	13
2.2.1	<i>Hochtemperaturlegierungen auf Eisen-Basis, Ferrite, Martensite und Austenite</i>	<i>20</i>
2.2.2	<i>Hochtemperaturlegierungen auf Nickel-Basis</i>	<i>27</i>
2.2.3	<i>Coatings, weitere Superlegierungen und intermetallische Phasen.....</i>	<i>30</i>
2.3	Geeignete Werkstoffe für den Kraftwerksbau	31
2.4	Konstruktive Gestaltungsspielräume und -zwänge bei der Verwendung der Werkstoffe.....	34
2.5	Die europäische Normung als Basis zur Auslegung von Kraftwerkskomponenten.....	36
2.5.1	<i>Grundsätzliche Aussagen zur Normung.....</i>	<i>36</i>
2.5.2	<i>Zustandsüberwachung und Diagnostik im Zeitstandbereich</i>	<i>41</i>
2.5.3	<i>Dimensionierung von druckbeaufschlagten Rohrleitungsbauteilen</i>	<i>44</i>
2.5.4	<i>Auslegung von Sammlern für Wechselbeanspruchung nach Regelwerk</i>	<i>53</i>
2.6	Herstellung und Bearbeitung von Hochtemperaturwerkstoffen.....	68
3	Hochtemperaturwerkstoffe im flexiblen Kraftwerkseinsatz.....	75
3.1	Anforderungen an den zukünftigen Kraftwerksbetrieb	75
3.2	Auswahl geeigneter Kraftwerkskomponenten für die exemplarische Betrachtung	80
3.3	Auswahl geeigneter Werkstoffe unter Berücksichtigung der neuen Dynamikanforderungen.....	91
4	Betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen zu den Berechnungen	98
4.1	Auswahl eines geeigneten Bewertungsverfahrens	98
4.2	Die Investitionsrechnungsmethode.....	100
4.3	Die Kapitalwertmethode und der Kalkulationszinsfuß.....	101
4.4	Der Merit-Order-Effekt	104
5	Durchführung der Berechnungen, Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	106
5.1	Funktionsbeschreibung der einzelnen Exceltabellen	108
5.2	Berechnung der Wirtschaftlichkeit eines Sammleraustausches	121
5.3	Variation der Eingangsparameter für die ausgewählten Beispiele.....	124
6	Zusammenfassung und Empfehlungen	140
7	Anhang (Arbeitsblätter der Exceltabelle und VB-Makros)	144
8	Verzeichnisse.....	227
8.1	Tabellenverzeichnis	227
8.2	Abbildungsverzeichnis	228
8.3	Abkürzungsverzeichnis	230
9	Literaturverzeichnis	232

1 Inhalt und Ziel der Arbeit

Die Veränderungen in der weltweiten Energielandschaft, insbesondere auch in der Bundesrepublik Deutschland, sind gravierend. Maßgeblich dafür sind sowohl die Anstrengungen zur Verringerung von Kohlendioxidemissionen, als auch die starke öffentliche Förderung regenerativer Energien.

Mit dem "Zwei-Grad-Ziel" der Europäischen Union ist eine CO₂-Reduktion gegenüber dem Basisjahr 1990 von 20% bis 2020 angestrebt. Seitens der Bundesrepublik Deutschland wurde die Forderung zur EU-weiten Erhöhung auf 30% durch eine eigene Vorlage des Umweltbundesamtes mit einem "40%-Szenario" unterstützt, mit dem eine CO₂-Reduktion um 40% möglich sein soll.¹

Da in der Bundesrepublik Deutschland 2012 noch fast 50% des Strombedarfs aus Kohle produziert wird, (siehe Abbildung 1-1)² hat es, neben der Entwicklung der regenerativen Energien, vielschichtige Anstrengungen zur Verbesserung der Wirkungsgrade des vorhandenen Kohlekraftwerksparks gegeben. Diese Anstrengungen haben mit dem 2011 beschlossenen Kernenergieausstieg weiteren Auftrieb erhalten.

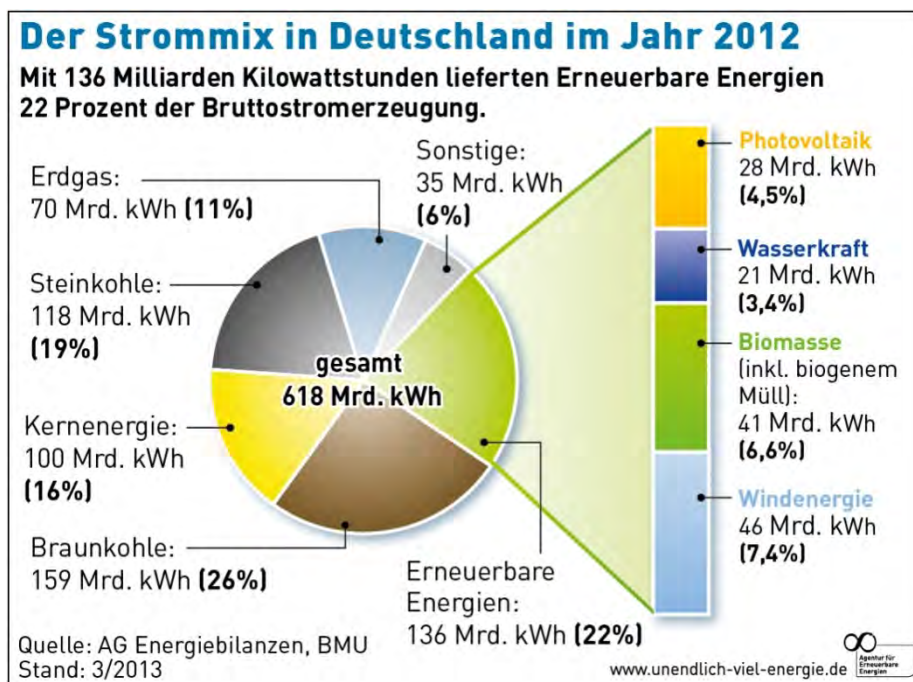


Abbildung 1-1: Übersicht des heutigen Primärenergieeinsatz zur Stromerzeugung in Deutschland

Ein wesentlicher Aspekt der Steigerung des Brutto-Brennstoffnutzungsgrads und damit einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes je produzierter kWh liegt für Kohlekraftwerke in der Erhöhung der Dampftemperatur und des Druckes. Die Höhe der CO₂-Emissionen lässt sich nach unterschiedlichen Berechnungen durch eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrads von heute 38% auf mögliche 50% bei einer Frischdampftemperatur von 700 °C und einem Druck von 350 bar um bis zu 25% reduzieren. Voraussetzung dafür sind aber neue Werkstoffe im Hochtemperaturbereich,

die den Anforderungen eines sicheren und langlebigen Kraftwerksbetriebs entsprechen. Auf der Basis wurde das "700 °C-Kraftwerk" in den letzten 10 Jahren vielfach diskutiert und unterschiedlichste Programme auf nationaler und auf europäischer Ebene zu dessen Erprobung gefördert und durchgeführt (siehe auch Abbildung 2-3). Die Ausrichtung dieser Programme lag in erster Linie in der Untersuchung unterschiedlicher Werkstoffe und deren Anwendbarkeit, insbesondere mit Blick auf deren Zeitstandverhalten und Verarbeitbarkeit.

Da die Frage nach dem wirtschaftlichen Nutzen des Einsatzes dieser Werkstoffe nur in wenigen Fällen Beachtung fand, entstand die Idee, die betriebswirtschaftlichen Vor- oder Nachteile im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu untersuchen.

Als weiterer Aspekt spielt der zukünftige Energiemix bei der Stromversorgung in Deutschland und Europa eine entscheidende Rolle. Durch das starke Wachstum im Bereich regenerativer Energien ist damit zu rechnen, dass selbst bei konservativen Annahmen (Szenario A) ab 2023 der gesamte Stromleistungsbedarf in Deutschland (60-80 GW), je nach Witterungsbedingungen, ausschließlich durch regenerative Energien gedeckt werden kann (siehe Abbildung 1-2)³.

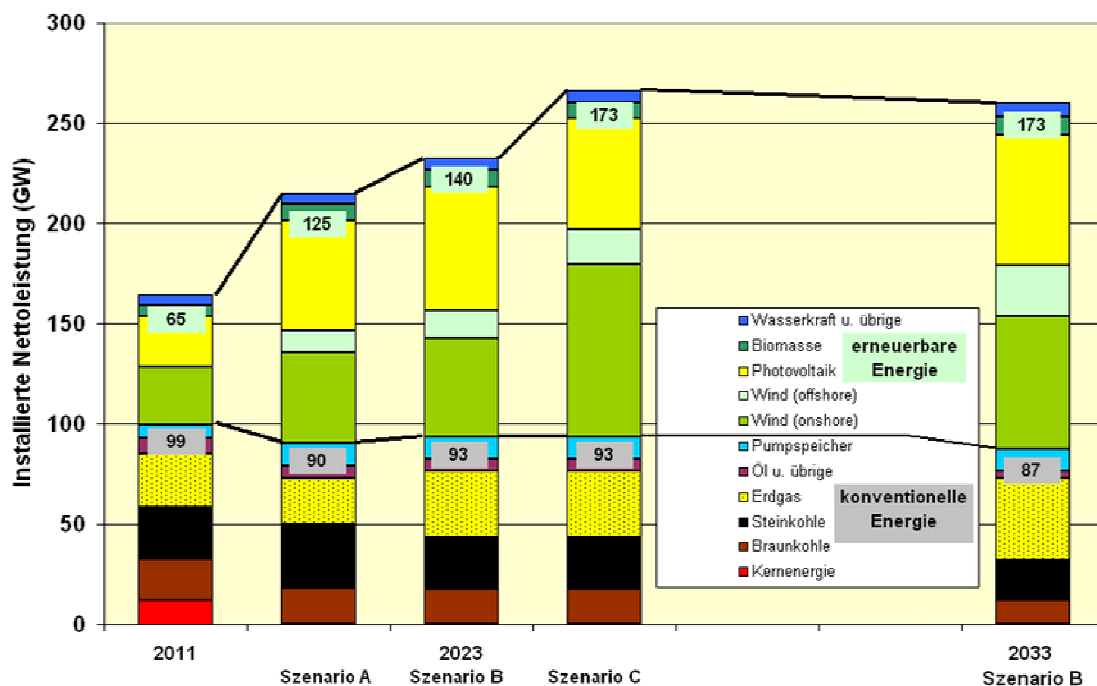


Abbildung 1-2: Kapazitäten zur Stromerzeugung in Deutschland 2011 im Netzentwicklungsplan 2013

Da die regenerativen Energien in der Einspeisung mit erster Priorität berücksichtigt werden (siehe Merit-Order Prinzip in Kapitel 4.4), folgt daraus für die Kohlekraftwerke, dass diese zunehmend aus der Rolle der Grundlastversorgung herauskommen und neben einer deutlich reduzierten Anzahl an Volllaststunden auch ein häufigeres An- und Abfahren als in der Vergangenheit erforderlich wird. Dadurch bedingt, werden alle Werkstoffe im Kohlekraftwerk einer zunehmenden Anzahl an Temperatur- und Druckzyklen und einem daraus resultierenden höheren Lebensdauerverbrauch

ausgesetzt sein. Dieser Umstand bedarf mit Blick auf die in jüngster Vergangenheit durchgeführten Langzeitversuche von Hochtemperaturwerkstoffen einer besonderen Analyse. Die heutigen Regelwerke zur zyklischen Belastung wurden bislang ebenfalls noch nicht für die kurzen Betriebsperioden verifiziert.

Auch die wirtschaftlichen Rahmenparameter im Bereich des Stromhandels haben sich stark verändert. Aus dem hohen Angebot an regenerativer Energie resultierend, verringern sich die Abnahmepreise insbesondere an den auf den kurzfristigen Handel ausgerichteten Strompreismärkten EPEX und EPEX Spot (Spotmarkt).

So führte z. B. am Sonntag, dem 17.6.2013, das Überangebot an im Markt verfügbarer Energie sogar zu einer negativen Preisbildung im Markt (siehe Abbildung 1-3)⁴. Das hatte zur Konsequenz, dass die Energieversorgungsunternehmen zur Abnahme Ihrer Leistung bis zu 200 € pro MWh bezahlen mussten. Aus dem resultierenden Überschuss entsteht der Zwang zur Bezahlung, nur damit der Strom durch einen Dritten abgenommen wird (negative Vergütung). Aufgrund der in Abbildung 1-2 skizzierten Entwicklung der installierten Leistung regenerativer Energieerzeuger und der fehlenden Bereitschaft oder Möglichkeit die thermischen Kraftwerke in ihrer Leistung zu senken, sind solche Entwicklungen zukünftig häufiger zu erwarten.

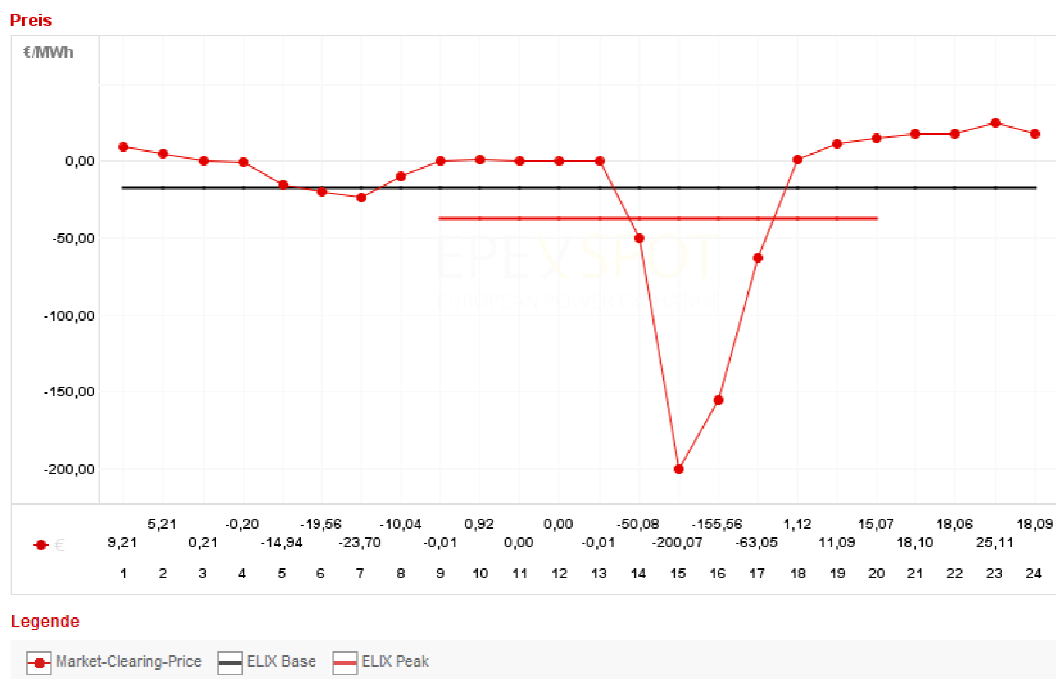


Abbildung 1-3: Strompreiskurve am 17.6.2013

Unter diesen neuen Rahmenparametern wurde das ursprüngliche Ziel der Arbeit, nämlich die Betrachtung, ob sich die Investitionen in besondere Werkstoffe unter den zuvor benannten Rahmenbedingungen der zukünftigen Energieerzeugung rechnen, noch einmal neu überdacht. Bereits kurz nach Aufnahme der Untersuchungen wurde seitens der beteiligten Partner ein

deutlicher Rückgang des Interesses am "700 °C-Kraftwerk" signalisiert. Die Begründung dafür lag zum einen in der politischen Unsicherheit bzgl. weiterer Reformen des Energieeinspeisegesetzes und in der offensichtlichen fehlenden Wirtschaftlichkeit für den Neubau eines Kohlekraftwerks mit neuen (in der Regel teureren) Werkstoffen und einer deutlich reduzierten Anzahl an Volllaststunden. Weitere Details hierzu werden in Kap. 2.1 erläutert.

Umso stärkeres Interesse wurde seitens der Partner nun an der wirtschaftlichen Untersuchung technischer Möglichkeiten zur Steigerung der Flexibilität bekundet. Daran orientiert, wurde der Fokus der Arbeit kurz nach Beginn ausschließlich auf diesen Schwerpunkt gelegt. Letztendlich sind aber die Ergebnisse der Untersuchung des Einsatzes dünnwandiger Komponenten auch auf den Kraftwerksneubau übertragbar.

Obwohl die genannten Anforderungen natürlich auch Auswirkungen auf die Organisation (wie z. B. eine breitere Personalqualifizierung oder flexiblere Arbeitszeitmodelle) haben, soll der Fokus hier auf bautechnischen Veränderungen liegen, die durch den Einsatz von Hochtemperaturwerkstoffen möglich sind.

Bei der Durchführung der Berechnungen erfolgt die Auslegung ausschließlich nach Regelwerk. Hierbei erfolgt zuerst die Auslegung der Wanddicke der betrachteten Komponenten, ausschließlich auf Basis der avisierten Lebensdauer (200.000, 150.000 oder 100.000 Stunden). Im zweiten Schritt erfolgt dann die Auswertung der Ermüdung (und damit des Lebensdauerverbrauchs) aufgrund der Anzahl an Starts, denen das Bauteil unterworfen wird.

Die Grundkriterien zum Werkstoffeinsatz im Kraftwerk können durch das nachfolgende Spannungsdreieck (siehe Abbildung 1-4)⁵ veranschaulicht werden.

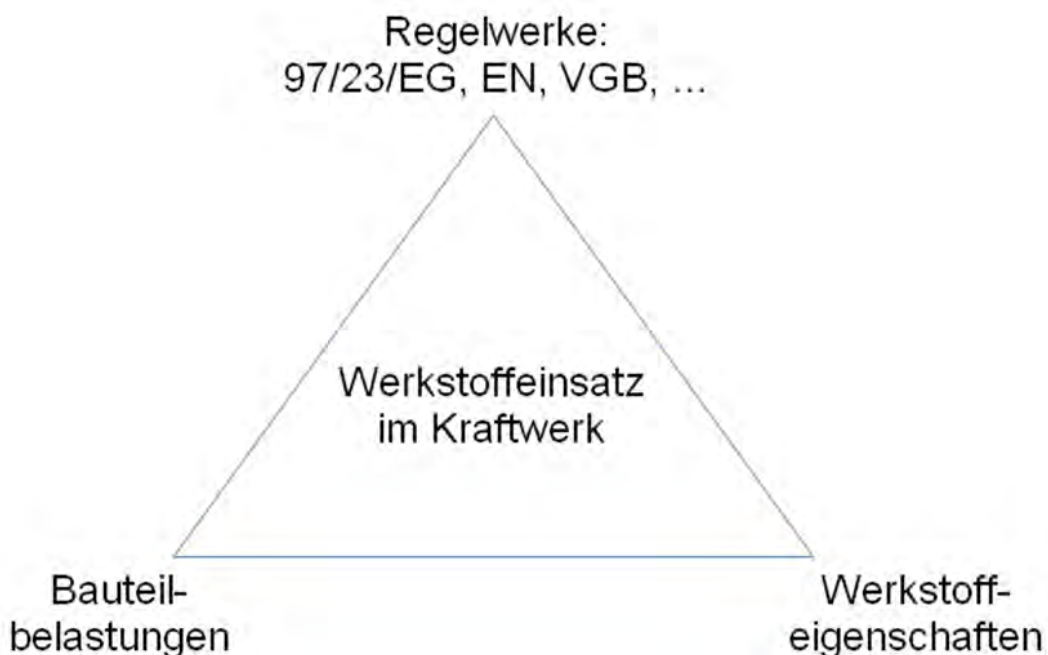


Abbildung 1-4: Werkstoffeinsatz im Kraftwerk

Während sich die Bauteilbelastungen aus den Betriebsparametern des Kraftwerks ergeben, sind die Werkstoffeigenschaften vorgegeben und dem Regelwerk oder den Werkstoffdatenblättern der Hersteller zu entnehmen. Die Regelwerke setzen damit die erforderlichen Rahmenparameter, welche Voraussetzungen der Werkstoff erfüllen muss, damit er unter den gegebenen Belastungen zugelassen ist. Welche Werkstoffe mit welcher Bauteildimensionierung heute im Kraftwerk eingesetzt werden, ergibt sich aus geübter Ingenieurspraxis, wobei die aus dem Betrieb resultierenden Bauteilspannungen mit den zulässigen Spannungen verglichen werden und unter Berücksichtigung von Sicherheitszuschlägen in die Formeln des Regelwerks einfließen. Die Verwendung anderer Berechnungsverfahren, wie z. B. der Finite-Elemente-Methode (FEM) bieten darüber hinaus gehende Möglichkeiten zur Bestimmung der zu erwartenden Bauteilspannungen (siehe auch Abbildung 3-14).

Diese Aufteilung findet sich sowohl in den Kapiteln dieser Arbeit als auch in der Struktur der Arbeitsblätter (Worksheets) in der Exceldatei zur Berechnung wieder. Das Schema wird im Kapitel 5 anhand des eingefügten Flussdiagramms (Abbildung 5-1) für die Excelberechnung beschrieben.

Die wesentliche Herausforderung zur Erstellung dieser Arbeit lag in dem interdisziplinären Zusammenspiel aus der Werkstoffkunde kommend, die Anforderungen der Energieerzeugung zu berücksichtigen und aus diesen Ergebnissen - unter Zuhilfenahme betriebswirtschaftlicher Methoden - die Wirtschaftlichkeit des Austauschs von Komponenten zu untersuchen.

2 Die technische Auswahl und Auslegung von Kraftwerkskomponenten

In diesem Kapitel erfolgt neben einem historischen Abriss zur Entwicklung von Dampfkraftwerken und deren Kesselsystemen eine tiefergehende Betrachtung der Hochtemperaturwerkstoffe. Diese soll verdeutlichen, welche Kriterien zur Auswahl geeigneter Werkstoffe im Kraftwerksbau zu Grunde gelegt werden.

Darüber hinaus erfolgt die Darstellung der Berechnungsvoraussetzungen durch das Regelwerk, im Wesentlichen auf Basis der EN 13480 und der EN 12952. Die beschriebenen Formeln sind bereits mit Blick auf die spezifischen Anforderungen eines Sammlers ausgewählt und werden dahingehend erläutert.

2.1 Historie und Zukunft der Druck- und Temperaturentwicklung im Kraftwerksbereich

Am 15. August 1885 wurde in Berlin das erste deutsche Kraftwerk mit 12 Dampfmaschinen in Betrieb genommen. Der Wirkungsgrad dieses Kraftwerks betrug gerade einmal 9%.⁶ Bereits Ende des 19. Jahrhunderts wurde als Mittel zur besseren Dampfausnutzung und zur Steigerung des Wirkungsgrades die "Überhitzung" in den Kraftwerken eingeführt. 1911 wurde in Kassel der erste Hochdruckkessel mit einem Druck von 60 bar und einer Dampftemperatur von bis zu 490 °C in Betrieb genommen. Bei dieser Anlage wurde bereits eine doppelte Zwischenüberhitzung verwendet.⁷ 1927 wurde eine Anlage mit 225 bar und einer Überhitzung auf 400 °C und einer Nachüberhitzung auf 450 °C gebaut. Die Zwischenüberhitzung diente stets nicht nur einer erneut nutzbaren Steigerung der Energie des Dampfes, sondern auch einer Reduktion des Nässegrades. In den 30er Jahren wurden mehrere Anlagen mit 125 bar und 500 °C Kesselaustrittstemperatur und Zwischenüberhitzung in Betrieb genommen.

In den USA waren 1949 mehrere Kessel mit bis zu 140 bar Druck und 565 °C Frischdampf-temperatur im Bau bzw. im Betrieb. Bereits 1962 wurde von Class über die unerwartet hohe Außenkorrosion von austenitischen Überhitzerrohren an mehreren Hochtemperaturkraftwerken der Chemieindustrie berichtet. 1955 ging man noch davon aus, dass die Warmfestigkeitseigenschaften wesentlich für den Einsatz eines Werkstoffs seien. Erst in den 50er Jahren wurde die Frage nach der Korrosion und Oxidation, insbesondere bei Kraftwerken, die häufig an- und abgefahren werden, gestellt.

In den 70er Jahren wurden in Westdeutschland 600 MW Braunkohleblöcke mit einem Wirkungsgrad von 35-36% gebaut. Im Sommer 2012 wurden im RWE Braunkohlekraftwerk Neurath zwei 1100 MW-Blöcke mit einem Wirkungsgrad von 43% (Angabe RWE) in Betrieb genommen. Die Erhöhung des Wirkungsgrades um fast 30% gegenüber älteren Kraftwerksblöcken konnte durch die Summe vieler Einzelmaßnahmen erreicht werden, die unter dem Gesamtkonzept BoA (Braunkohlekraftwerk mit optimierter Anlagentechnik) zusammengefasst werden. Die Entwicklung der Wirkungsgrade bei den unterschiedlichen Kraftwerksprozessen ist in dem nachfolgenden Schaubild (Abbildung 2-1)⁸ in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur abgebildet.

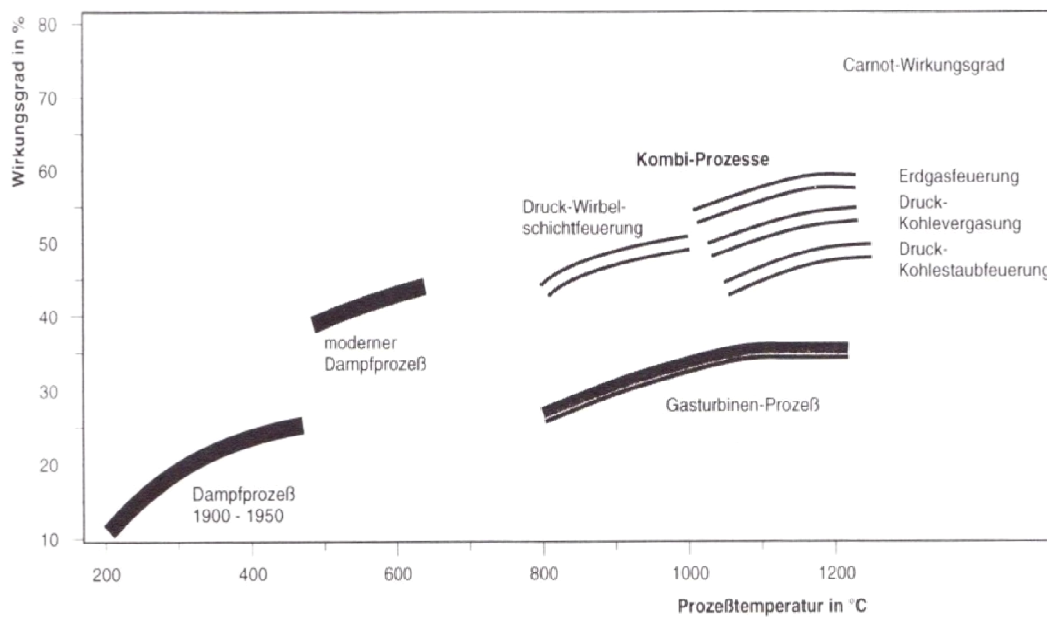


Abbildung 2-1: Wirkungsgrade verschiedener Kraftwerksprozesse

Nachfolgend ist in die schematische Darstellung eines Kohlekraftwerks und ein typischer Dampferzeuger mit seinen wesentlichen Komponenten dargestellt (Abbildung 2-2)⁹. Der Dampferzeuger oder auch allgemein Kessel besteht aus den Komponenten 17 bis 21 des Prinzipschaubildes.

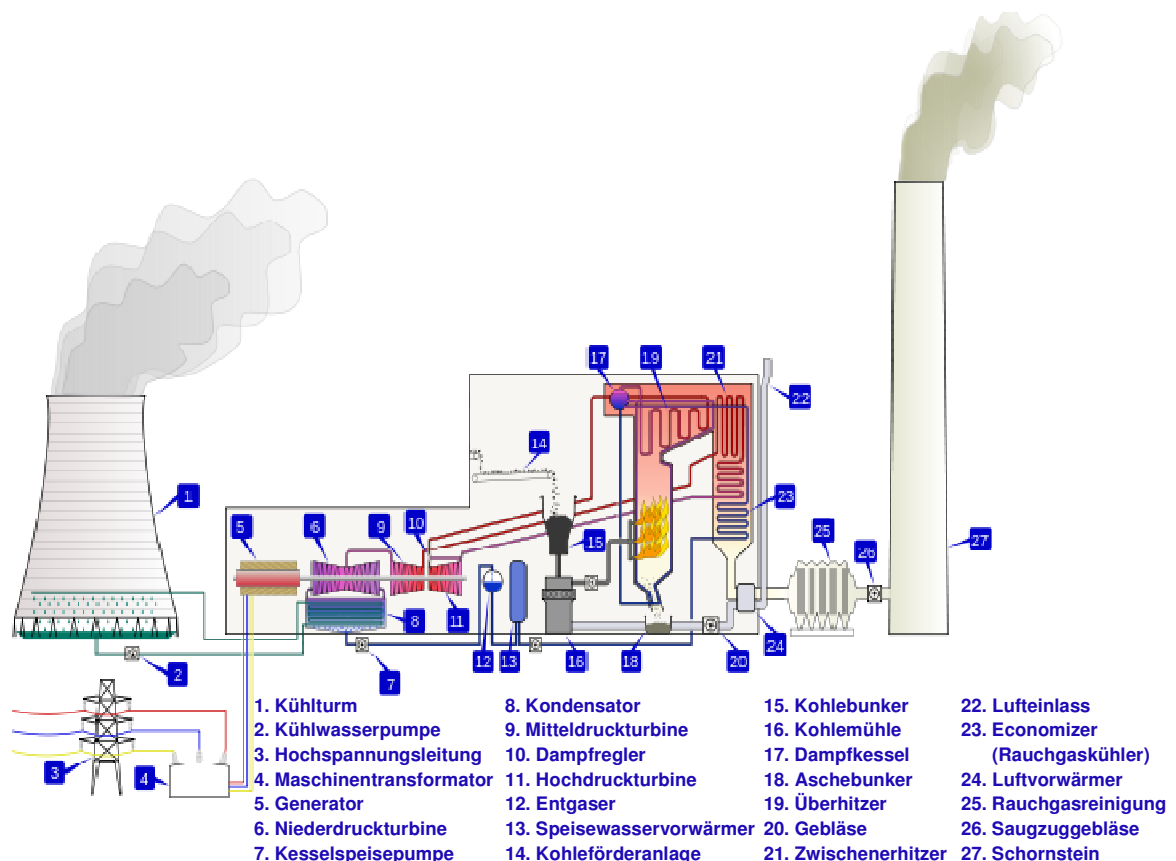


Abbildung 2-2: Prinzipschaubild eines Kohlekraftwerks

Der nächste Schritt zu einer signifikanten Steigerung des Wirkungsgrades kann nur in einer Erhöhung der Temperatur und des Dampfdruckes liegen. Die Erklärung hierfür liegt im Carnot-Prozess begründet¹⁰, nach dem für den thermischen Wirkungsgrad gilt:

$$\eta_{th,Carnot} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad \text{Gleichung 2-1}$$

Da T_{min} als Umgebungstemperatur weitestgehend festgelegt ist, resultiert zwingend die Notwendigkeit zur Vergrößerung von T_{max} , wobei die Temperaturangaben in Kelvin erfolgen. Das Ziel liegt in der Erreichung von Wirkungsgraden von mehr als 50%, wobei dafür sowohl der Gesamtprozess mit seinen Prozessparametern als auch die einzelnen Komponenten für diesen Betrieb optimiert werden müssen. Inwieweit das bzgl. der Komponenten in einem Temperaturbereich von bis zu 700 °C möglich ist, hängt insbesondere von der Leistungsfähigkeit der Werkstoffe aber auch von deren Verbindungs- und Dichttechniken ab.

Um in diesem Bereich Fortschritte zu erzielen, laufen zum großen Teil unabhängige Forschungsvorhaben in den USA, Japan und Europa. Die Ziele dieser Untersuchungen liegen in erster Linie in der Untersuchung der dafür notwendigen Anforderungen an die Werkstoffe, insbesondere mit Blick auf deren Korrosions- und Zeitstandverhalten. Die nachfolgende Abbildung bietet eine Übersicht der europäischen Entwicklungsprogramme (siehe Abbildung 2-3)¹¹.

Development of highly efficient Coal Power plants R&D-Projects in Europe

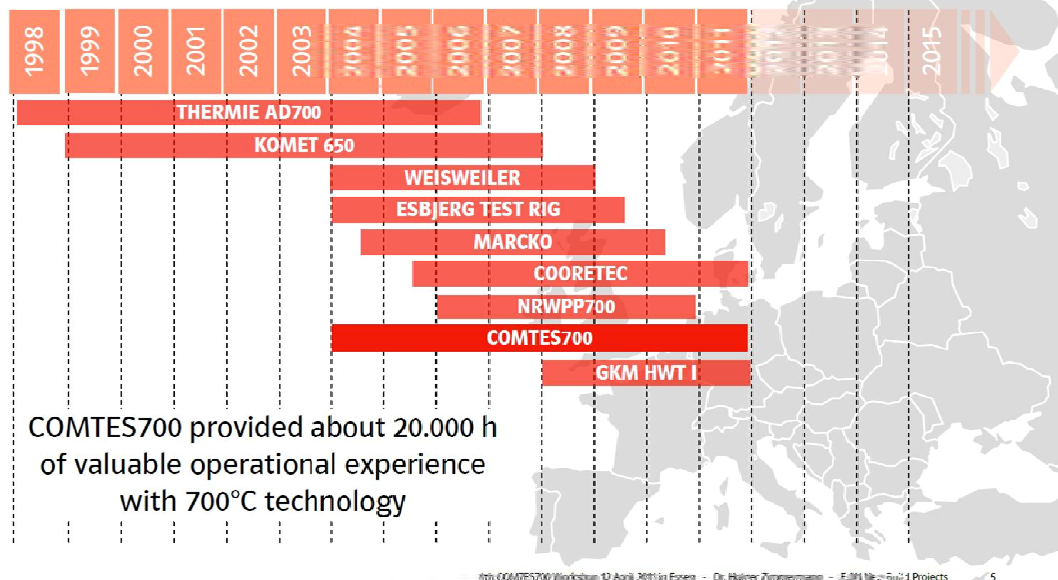


Abbildung 2-3: Übersicht europäischer Forschungsprogramme für 700°C-Kraftwerke

Bereits 1998 begann das Forschungsprojekt Thermie AD700 (Advanced 700 °C Power Plant), das seinerzeit durch das 4. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Gemeinschaft mitfinanziert wurde. Eines der wichtigsten Ergebnisse des Vorhabens war die Erkenntnis, dass die 700 °C-Technologie grundsätzlich wirtschaftlich umzusetzen ist.

Parallel dazu startete das Projekt KOMET 650 (**K**raftwerks-**O**ptionen: **M**aterial- und Messtechnik-**E**ntwicklung sowie deren **T**ests unter Betriebsbedingungen bei 650 °C) mit einer Testanlage, die im RWE-Kraftwerk Westfalen errichtet wurde. Die Ziele dieses Projektes lagen im Betrieb der Anlage, inklusive Reparatur und Wartung, bauteilmetallographischer Untersuchungen und der Erprobung und Untersuchung neuer Überhitzerrohrwerkstoffe und deren Schweißverbindungen.¹² Die Ergebnisse dieses Berichtes dienen unter anderem als Grundlage zur Auswahl der geeigneten Werkstoffe für die vorliegende Arbeit.

Im Anschluss daran wurden weitere Forschungsvorhaben durchgeführt. Dazu zählen die deutschen Vorhaben MARCKO DE2 und MARCKO 700 (Verbundprogramm MARCKO: **M**aterial-**R**ealisierung **CO**₂-armes **K**ohlekraftwerk). Dabei kommen im MARCKO 700 für Temperaturen oberhalb von ca. 535 °C aus Oxidationsgründen Werkstoffe aus dem MARCKO-DE2-Programm zum Einsatz.

Mit COMTES700 (**C**omponent **T**est Facility for a **700** °C Power Plant) wurde 2004 ein Vorhaben zur praktischen Erprobung von kritischen Kraftwerkskomponenten gestartet. Der Einbau der Komponenten erfolgte in einer eigens eingerichteten Testschleife des E.ON Kraftwerks Scholven in Gelsenkirchen. Zwar ist der größte Teil der Untersuchungen bereits abgeschlossen, die Ergebnisse aber noch nicht weitreichend publiziert. Die Koordination des Projektes läuft über die VGB PowerTech e.V.

Noch während der Laufzeit von COMTES700 wurde 2006 unter Leitung des VGB mit Unterstützung des Landes NRW das Projekt NRWPP700 (**N**RW **P**ower **P**lants **700**°C) gestartet. Hierbei handelt es sich um eine detaillierte Machbarkeitsstudie, die unter anderem auf Basis der aus COMTES700 gewonnenen Erkenntnisse die Wirtschaftlichkeit der 700 °C-Technologie untersuchen soll. Dabei sollen unter anderem auch aktuelle Rohstoffpreise berücksichtigt werden. Insbesondere dieser Aspekt ist allerdings nur sehr schwer einzubeziehen, da die Rohstoffpreise z. B. für Nickel höchst volatil sind. Wie der nachfolgenden Grafik (Abbildung 2-4)¹³ entnommen werden kann, schwankte der Preis in den letzten 10 Jahren von 10.000 USD bis zu 50.000 USD je Tonne.

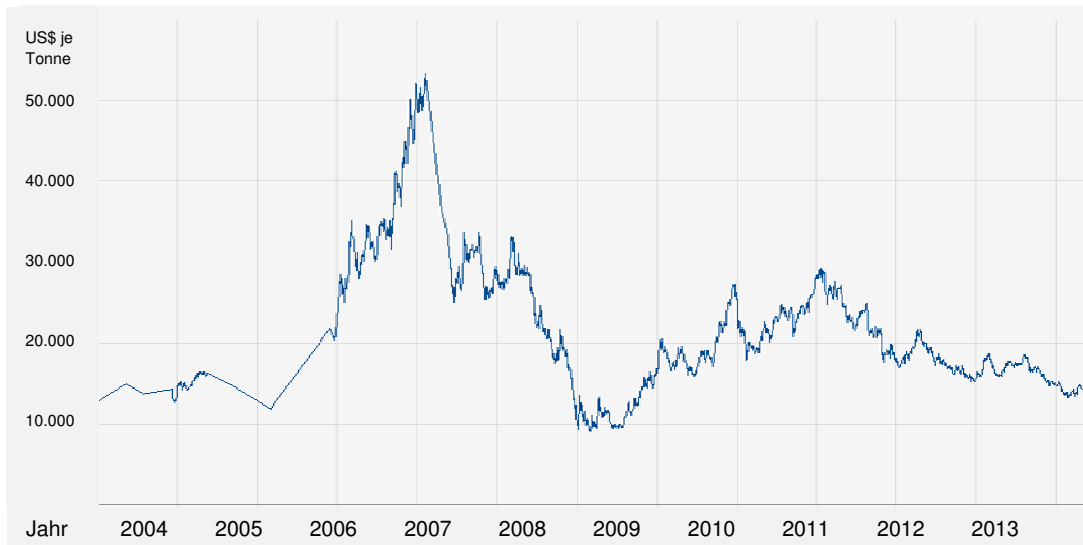


Abbildung 2-4: Preisentwicklung für Nickel von 2004 bis 2013

Da diese Preiskomponente auch Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Rahmen dieser Arbeit hat, ist der Materialpreis einer der Faktoren, die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersucht werden.

Während aus Forschungskreisen bereits Mutmaßungen zur Möglichkeit der Realisierung von Dampftemperaturen bis 800 °C zu hören sind, ist seitens der Industrie aktuell eine deutliche Zurückhaltung bzgl. der neuen Technik zu erkennen. Begründet liegt dies zum einen in der politischen und gesellschaftlichen Akzeptanz zum Bau neuer Kraftwerke, zum anderen aber auch in der fehlenden Wirtschaftlichkeit, wenn aufgrund des starken Zuwachses an regenerativen Energien für den Betrieb des Kraftwerks eine zukünftige Volllaststundenzahl von deutlich weniger als 4.000 Stunden zu erwarten ist.

Eine weitere Verstärkung erhielt die Diskussion in Richtung der erneuerbaren Energien durch das Nuklearunglück von Fukushima am 11. März 2011. Der daraus resultierende, am 30. Juni 2011 vom Deutschen Bundestag beschlossene, kurzfristige Kernenergieausstieg bis zum Jahr 2022 bedeutet einen noch darüber hinaus gehenden dringenden Untersuchungsbedarf zur Flexibilisierung der heute im Betrieb befindlichen Kohlekraftwerke.

Aus diesen Rahmenbedingungen und den bis Ende 2011 geführten Gesprächen mit unterschiedlichen Partnern aus der Industrie und den Forschungsbereichen, wurde der Entschluss gefasst, dass eine weitere Analyse der 700 °C-Technik im Rahmen dieser Arbeit nicht sinnvoll ist.

Der Untersuchung der Flexibilität von Komponenten dient auch eine im Auftrag der RWE 2012 durchgeführte unternehmensinterne Studie, die im Weiteren als "RWE Studie 2012" bezeichnet. Diese Studie untersucht insbesondere die Auswirkungen auf die Erschöpfung von Bauteilen bei einer Steigerung der Anzahl an Starts und Lastwechseln. Ausgewählt wurden hier dickwandige Bauteile für ein spezielles Kohlekraftwerk.

Die Studie wurde Mitte 2012 fertiggestellt und ist daher mit Ihren Ergebnissen in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt. Auf Grund der Nähe des Themas wird an unterschiedlichen Stellen mit einem entsprechenden Literaturverweis hierauf Bezug genommen.

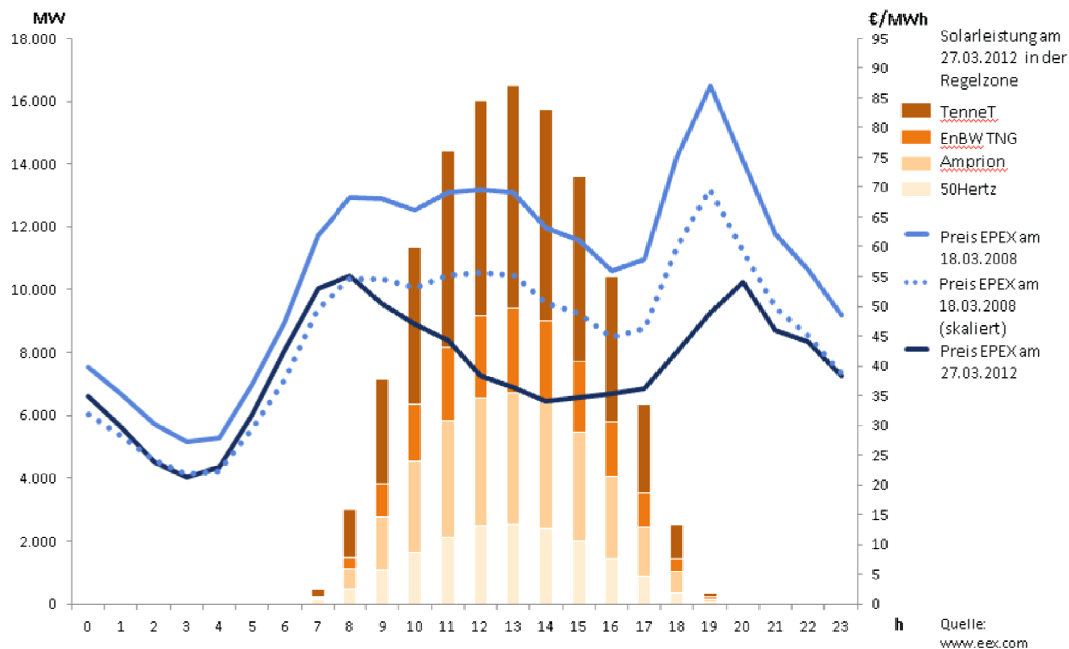


Abbildung 2-5: Lastverlauf 2010 mit Mittagsspitzenkappung

Für die Kohlekraftwerke spielen auch die bereits in Kapitel 1 beschriebenen Veränderungen in der zunehmenden Einspeisung regenerativer Energien eine maßgebliche Rolle. Betrachtet man den Lastverlauf eines Kohlekraftwerks in den Jahren bis 2000, so ist ein über den Tagesverlauf stark vergleichbares Profil über das ganze Jahr erkennbar. Dieses ist insbesondere durch eine hohe Leistungsnachfrage zur Mittagszeit gekennzeichnet. Gerade dieser "Mittagspeak" war in der Vergangenheit mit hohen Ergebnismargen im Spotmarkt verbunden. Das hat sich mittlerweile deutlich gewandelt und führt zu der in der Grafik (Abbildung 2-5)¹⁴ erkennbaren Preisreduktion durch die hohe Einspeisung der Photovoltaik zur Mittagszeit.

Gerade bei diesen Lastspitzen wurden in der Vergangenheit die Gaskraftwerke eingesetzt, deren Wirtschaftlichkeit durch die Energieversorger zunehmend in Frage gestellt wird. So wurden in der Sommerpause 2013 erstmalig präventiv die Gasblöcke B und C des Kraftwerks Emsland aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit konserviert.

Während also die Menge der insgesamt angeforderten elektrischen Leistung aus thermischen Kraftwerken abnimmt, nimmt die Anforderung an Regelenergie deutlich zu. So ist an wind-schwachen und sonnenarmen Tagen eine hohe thermische Kraftwerksleistung zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit erforderlich. Dieser "Rest" an elektrischer Leistung, den die konventionellen Kraftwerke liefern müssen, wird als Residuallast bezeichnet. Die nachfolgende Grafik (Abbildung 2-6)¹⁵ zeigt, dass von der installierten Windkraftleistung im Jahr 2011 nur ein deutlich geringerer Teil tatsächlich verfügbar war und eingespeist werden konnte.

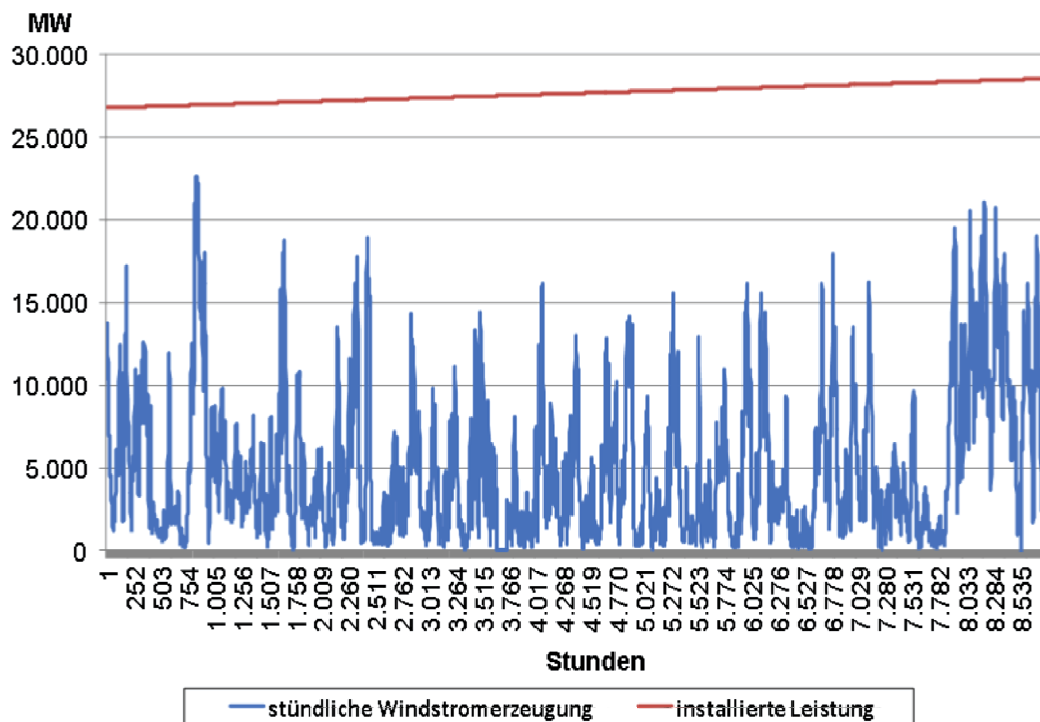
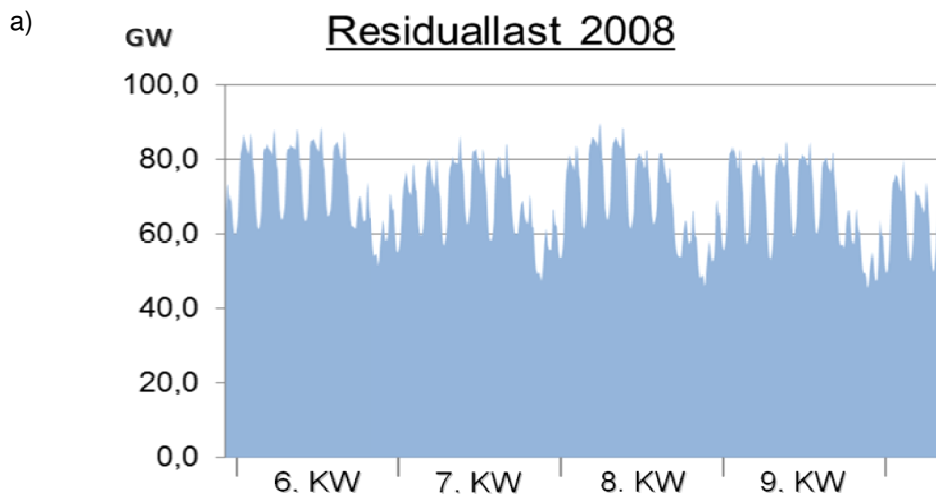


Abbildung 2-6: Installierte und tatsächliche Windkraftleistung 2011

Aus dem weiteren Zubau regenerativer Stromerzeuger resultiert zwar eine temporär höhere Leistungserbringung, die aber jederzeit bis auf Werte nahe Null abfallen kann und damit die Anforderung an eine zu erbringende Residuallast deutlich erhöht. Die nachfolgenden Grafiken (Abbildung 2-7)⁵ zeigen die im Jahr 2008 (a) angeforderte Residuallast im Vergleich zu einer Prognose für das Jahr 2050 (b) im gleichen Betrachtungszeitraum. Während die angeforderte Residuallast 2008 den Bereich zwischen 50 bis 80 GW abdecken musste, so deutet die Prognose für das Jahr 2050 auf eine Schwankungsbreite von 0 bis 70 GW hin.



b)

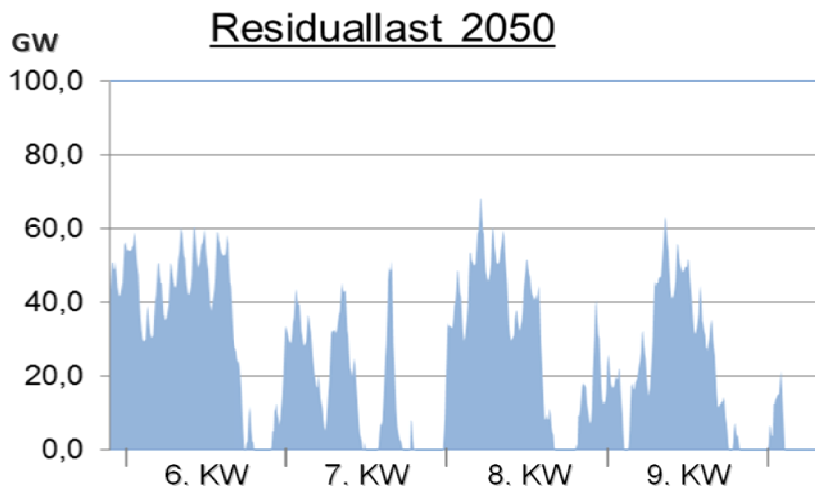


Abbildung 2-7: Vergleich der benötigten Residuallasten 2008 (a) und 2050 (b)

Damit zu den Zeitpunkten hoher Nachfrage und geringen Angebots die Kraftwerke schnell liefern können, ergeben sich Anforderungen an die Flexibilität, wie Sie bislang noch nicht von Bedeutung waren. Im Wesentlichen bedeutet das, dass das Kraftwerk eine deutlich höhere Anzahl Lastzyklen in seiner Lebensdauer fahren und damit die Auslegung der Komponenten dahingehend geprüft werden muss.

Aktuell prognostizierte Verläufe zur Bereitstellung und Abnahme elektrischer Energie, d.h. Last- und Erzeugungsprofile und daraus resultierend der Verlauf der Residuallast, führen zu der Erwartung, dass im Jahre 2020 in etwa die Hälfte der Residualenergiemenge von 2010 mit etwa doppelt bis dreimal so vielen Lastzyklen pro Tag geliefert werden muss. Dabei reduziert sich die zu liefernde Minimallast im Mittel auf rund ein Drittel, kann aber bis auf null absinken. Die notwendige gesicherte installierte Kraftwerksleistung der konventionellen Erzeugung liegt jedoch lediglich 10 bis 15% geringer als 2010. Lag der Fokus bislang darauf, die Effizienz des Kraftwerks im Maximallastbereich zu optimieren, ist das nun auch für den Teillastbereich bis hin zum Niedriglastbereich sinnvoll und erforderlich.¹⁶

Die Zeiten für den Mindeststillstand müssen minimiert und der Wirkungsgrad auch für den Minimallastbetrieb erhöht werden. Außerdem müssen die Anfahrtszeiten möglichst kurz, das heißt die Lastanfahrtrampen möglichst steil sein. Aus diesen Rahmenbedingungen ergeben sich sehr spezifische Anforderungen an die Werkstoffe, insbesondere der dickwandigen Komponenten. Diese sollen im Laufe der Arbeit ausführlich untersucht werden.

2.2 Eigenschaften und Strukturen von Hochtemperaturwerkstoffen

Der Begriff der Hochtemperaturwerkstoffe wird in der Literatur unterschiedlich definiert. Grundsätzlich ist die Beschreibung hoher Temperaturen natürlich relativ. In der Werkstoffkunde wird unter der Bezeichnung "Hochtemperaturwerkstoffe" eine bestimmte Gruppe von Werkstoffen zusammengefasst. Allen gemeinsam ist im technischen Sprachgebrauch die Verwendung bei hohen Temperaturen, wobei die angegebene Temperatur zwischen 500 und 800 °C schwankt und

der Chromgehalt bei den ferritischen Stählen in der Regel zwischen 8 und 12% liegt. Wesentlich für die Betrachtung der Werkstoffe im Hochtemperaturbereich ist, dass viele Werkstoffparameter, die unterhalb von $0,4 T_S$ (absolute Schmelztemperatur) vernachlässigbar sind, bei den hohen Temperaturen an Bedeutung gewinnen und deutlichen Einfluss auf die Lebensdauer der aus diesem Werkstoff gefertigten Komponenten haben.¹⁷ Ganz wesentlich ist hierbei die Betrachtung des Zeitstandverhaltens. Unter dem Zeitstandverhalten eines Werkstoffs wird das langsame Versagen oder auch Kriechen der betrachteten Probe oder Komponente verstanden. Ausschlaggebend für ein vorzeitiges Versagen des Bauteils ist das Kriechen von Metallen und Legierungen unter hohen Temperaturen. Diese Prozesse wurden und werden daher, unter anderem im Rahmen der in Kapitel 2.1 aufgeführten Forschungsprogramme, umfassend untersucht.

Die Hochtemperaturwerkstoffe lassen sich einteilen in Eisenbasis und Nickelbasis-Legierungen und weitere andersartige Legierungen. Hierbei insbesondere die Molybdän- und Wolfram-Legierungen (Refraktärmetalle), Tantal, Niob, Chrom und Platin-Legierungen und intermetallische Phasen wie Silizide und Aluminide. Desweiteren gibt es die keramischen Werkstoffe (oxidische und nicht oxidische, monolithische Keramiken (z. B. ZrO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC) und keramische Verbundwerkstoffe, Graphite und Verbundwerkstoffe wie MMC (metal matrix composites) und IMC (intermetallic matrix composites). Die intermetallischen Phasen bilden eine Art Zwischengruppe zwischen den Metallen und Keramiken.

Die Refraktärmetalle lassen sich jedoch nur pulvermetallurgisch herstellen und sind stark oxidationsanfällig. Dadurch bedingt sind sie sehr teuer und lassen sich nur in nahezu sauerstofffreier Atmosphäre einsetzen. Auch durch die fehlende Möglichkeit der Schweißbarkeit sind diese Metalle für die weiteren Betrachtungen nicht von Bedeutung.

Werden im Temperaturbereich unter 400 °C noch einfache Stähle wie der St35.8 eingesetzt, steigen mit einer erhöhten Frischdampf Temperatur und höherem Druck auch die Anforderungen an den Werkstoff. Die Entwicklung beschreibt hier den Weg von den ferritischen Stählen, wie dem 10CrMo9-10, über heute in vielen Hochtemperaturbereichen eingesetzte martensitische 9-12%ige Chromstähle wie dem X20CrMoV11-1 oder X22CrMoV12-1 und dem P91 (X10CrMoVNb9-1) oder dessen japanischer Weiterentwicklung dem P92 (X10CrWMoVNb9-2) und deren europäische Weiterentwicklung, dem E911. Der nächste Schritt bei Temperaturen oberhalb von 600 °C liegt dann bei den Nickelbasislegierungen, wie dem Alloy 617 (NiCr23Co12Mo) oder dem Alloy C263 (NiCo20Cr20MoTi).

Bei der Einführung neuer Stahlsorten spielen die Entwicklungszeiten eine wesentliche Rolle. Während Werkstoffe mit statischer Festigkeit und Zähigkeit für Anwendungen unterhalb der Kriechtemperatur ($T < 400\text{ °C}$) in 1-3 Jahren entwickelt werden können, werden für Hochtemperaturanwendungen deutlich längere Zeitabschnitte benötigt. Das liegt an den Mindestprüfzeiten der Proben mit 30.000 Stunden, deren Ergebnisse dann mit dem Faktor 3 auf die Ziellebensdauer von 100.000 Stunden extrapoliert werden können. Ergänzend ist die Übertragbarkeit der Eigenschaften

bei unterschiedlichen Schmelzen mit dem jeweiligen festgelegten Herstellungsprozess nachzuweisen. Unterschiedliche Untersuchungen haben ergeben, dass eine Extrapolation über Untersuchungsergebnisse, z. B. zum Zeitstandverhalten, maximal mit dem Faktor 3 extrapoliert werden sollten, da sonst eine zu hohe Unsicherheit in die Ergebnisse einfließt. In der nachfolgenden Tabelle 2-1 sind einige typische Werkstoffe aufgeführt, wie sie heute in den unterschiedlichsten Hochtemperaturanwendungen eingesetzt werden.

Handelsname	Werkstoffnummer	Kurzbezeichnung	Mittelwerte wesentlicher Bestandteile in Masse-%	Gefügestruktur
Einfacher Baustahl	1.0305	St 35.8	Nur geringe Anteile Mangan und Silizium	Ferritisch
Warmfester Kesselstahl	1.7380	10CrMo9-10	C:0,1/Cr:2,25/Mo:1,0	Bainitisch-Ferritisch
	1.7335	13CrMo4-5	C:0,13/Cr:1/Mo:0,5	Bainitisch- Ferritisch
	1.4922	X20CrMo V11-1	C:0,2/Cr:11/Mo:1/V:0,3	Martensitisch
	1.4923	X22CrMoV12-1	C:0,22/Cr:12/Mo:1/V:0,3	Ferritisch-Martensitisch
VM12	1.4915	X12CrCoWMoVNb 12-2-2	C:0,12/Cr:12/Co:2/W:2/Mo:1/V:0,5/Nb:0,5	Martensitisch
HCM 12		X11CrWMoMnV12-1-1	C:0,11/Cr:12/W:1/Mo:1/Mn:0,5/Si:0,25/V:0,25	Martensit. mit bis zu 30% Deltaferrit
HCM 12A		X15CrWCuMoMnV 12-2-1	C:0,15/Cr:12/W:2/Cu:1/Mn:0,5/Mo:0,5/Ni:0,5/Si:0,5	Martensitisch
P91/T91/F91	1.4903	X10CrMoVNb9-1	C:0,1/Cr:9/Mo:1	Martensitisch
P92/T92/F92	1.4901	X10CrWMoVNb9-2	C:0,1/Cr:9/W:1,8/Mo:0,5	Martensitisch
E911	1.4905	X11CrMoWVNb9-1-1	C:0,1/Cr:9/Mo:1/W:1/V:0,2/Nb:0,1	Martensitisch
T23	HCM2S		C:0,07/Cr:2,4/W:1,6	Bainitisch
T24	1.7378	7CrMoVTiB10-10	C:0,07/Cr:2,5/Mo:1,5	Bainitisch
Alloy 617	2.4663	NiCr23Co12Mo	Cr:23/Co:12/Mo:9/Ni:Rest	Austenitisch
Alloy 617B	2.4663	NiCr23Co12Mo	Cr:23/Co:12/Mo:9/B:0,003/Ni:Rest*	Austenitisch
Alloy C263	2.4650	NiCo20Cr20MoTi	Co:20/Cr:20/Mo:6/Ti:2/Ni:Rest	Austenitisch

* Wesentlich ist das Hinzufügen von 0,003 bis 0,006% Bor. Außerdem gelten engere Grenzen im Toleranzbereich für die anderen Legierungselemente.

Tabelle 2-1: Werkstoffbezeichnungen und Legierungselemente

Die Eigenschaften des Werkstoffs werden im Wesentlichen durch sein Gefüge vorgegeben. So ist die Zusammensetzung des Körpers durch zusammengefügte, in sich homogene Körper mit etwa konstanten Eigenschaften, den sogenannten Phasen, definiert. Es handelt sich hierbei um die Grobstruktur oder das Gefüge des Werkstoffs. Bei den Phasen selbst geben die Kristallgitter weitere Informationen über den jeweiligen Aufbau und beschreiben die Feinstruktur. Die Stoff-

eigenschaften sind damit abhängig von der Art der Teilchen und ihrer chemischen Bindung, dem Kristallgitter und der Art und dem Mischungsverhältnis der Phasen.¹⁸ Diese Eigenschaften wurden für Ihre Einsetzbarkeit in thermischen Kraftwerken im Rahmen der in Abbildung 2.1 genannten Forschungsprogramme auf ihre Praxistauglichkeit hin untersucht.

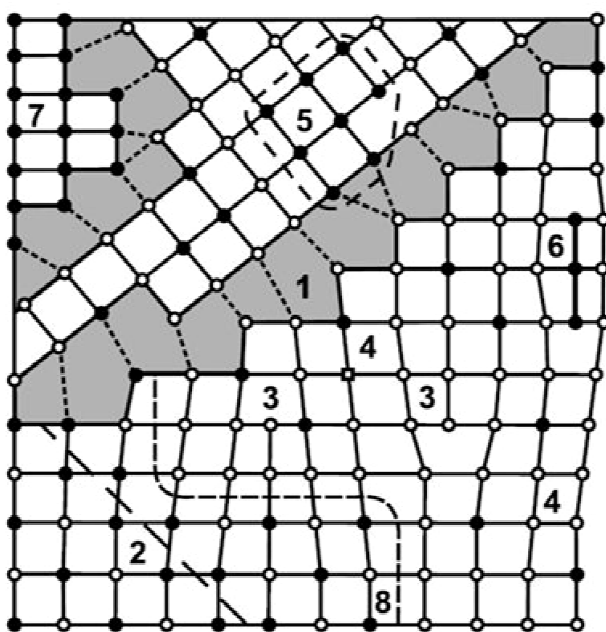
Der Chromgehalt bei den Stahllegierungen für den Hochtemperaturbereich liegt in der Regel zwischen 8 und 12%, wobei die 8% letztendlich nur für die Verwendung bei Turbinenschaufelmaterial gelten, welches ausschließlich mit einer zusätzlichen keramischen Beschichtung zum Einsatz kommt. Erst bei einem Chromgehalt von 12% bildet sich im Normalfall eine hinreichende Chromoxidschicht, die in der Lage ist, die Korrosion durchgängig zu verhindern. Oberhalb von $0,4 T_S$ (T_S ist die Schmelztemperatur) sind die mechanischen Eigenschaften zeitabhängige Größen. Es findet also ein fließender Übergang von zeitunabhängiger zu zeitabhängiger Festigkeit bzw. Verformung statt. Im Unterschied zu den tiefen Temperaturen bleiben die Versetzungen innerhalb der Strukturen nicht konstant, sondern unterliegen einer ständigen Veränderung, der so genannten Kriechverformung, die allgemein als Kriechen bezeichnet wird.

Die im Bereich tiefer Temperaturen grundlegenden Härtungsmechanismen (Versetzungshärtung, Feinkornhärtung, Mischkristallhärtung und Teilchenhärtung) sind bei hohen Temperaturen nur eingeschränkt wirksam¹⁹. In der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 2-2)¹⁹ ist die relative Festigkeitssteigerung in Abhängigkeit der mechanischen Ursache jeweils für den Bereich unterhalb und oberhalb von $0,4 T_S$ aufgeführt. Daraus ist erkennbar, dass z. B. die Versetzungshärtung bei hohen Temperaturen nicht zur Festigkeitssteigerung geeignet ist, weil sich die Versetzungsstruktur mit der Zeit erholt und damit die Festigkeit verloren geht. So gilt auch die für die Feinkornhärtung gleichzeitige Steigerung der Festigkeit und Duktilität nicht für den Hochtemperaturbereich, da hier ein grobkörnigeres Gefüge für eine höhere Festigkeit erforderlich ist. Die Mischkristallverfestigung wirkt bei den Hochtemperaturanwendungen ebenfalls geringer, wesentlich bestimmender ist die Teilchenhärtung.

Mechanismus → Temperaturbereich ↓	Versetzungs- härtung	Feinkornhärtung	Mischkristall- härtung	Teilchen- härtung
< ca. $0,4 T_S$; Kaltverformung	Stark	Mittel	Mittel bis stark	Mittel bis stark
> ca. $0,4 T_S$; Kriechen	Nur zeitlich begrenzte Festigkeitssteigerung; reduziert meist die Zeitbruchverformung und oft auch die Zeitstandfestigkeit; bewirkt evtl. Rekristallisation zu Feinkorn.	Festigkeitsabnahme bei feinerem Korn; Grobkorngefüge erforderlich.	Mittel	Mittel bis stark

Tabelle 2-2: Grundlegende Härtungsmechanismen

Das Kriechen hat seine Ursache im Klettern von Stufenversetzungen und schneller gleitenden Schraubenversetzungen im Kristallgitter. Das bedeutet, dass im Kristallgitter Atomplatzwechsel über bestehende Leerstellen hinweg stattfinden. Die Wahrscheinlichkeit der thermischen Aktivierung solcher Elementarvorgänge steigt mit zunehmender Temperatur und Zeit. Da für diese Vorgänge Unregelmäßigkeiten im Gefüge ausschlaggebend sind, kommt den Gitterfehlern in der Kristallstruktur bei den Festigkeitsmechanismen eine besondere Rolle zu. Man unterscheidet hierbei nach der Art die 0, 1, und 2-dimensionalen Gitterfehler. Für die Festigkeitssteigerung am besten geeignet sind die 3-dimensionalen Gitterfehler, zu denen z. B. die oben genannte Ausscheidungshärtung und die Teilchenhärtung zählt. Im nachfolgenden Bild (Abbildung 2-8)²⁰ sind die wesentlichen Elemente des Gittergefüges beschrieben.



Der dargestellte Stoff besteht aus mehreren Kristallarten, die wiederum verschiedene Arten von Gitterbaufehlern enthalten:

1. Korngrenze,
2. Antiphasengrenze,
3. Stufenversetzung,
4. Leerstelle,
5. kohärentes Teilchen,
6. teilkohärentes Teilchen,
7. nicht kohärentes Teilchen,
8. Grenze zwischen geordneter Phase und ungeordnetem Mischkristall.

Abbildung 2-8: Zweidimensionale schematische Darstellung eines Gefüges, z.B. eines Stahls

Der überwiegende Effekt der Teilchenhärtung basiert bei den Nickelbasislegierungen auf der γ' -Phase. Je höher der Anteil an γ' -bildenden Elementen, umso höher ist die Festigkeit des Werkstoffs. Deshalb führt ein erhöhter Chromgehalt zwar zu einer erhöhten Korrosionsbeständigkeit, aber zu keiner nennenswerten Erhöhung der Festigkeit. In den 50er und 60er Jahren wurde nur die intrinsische Schutzwirkung durch den hohen Chrom- oder Aluminiumgehalt des Werkstoffs genutzt. Der Wechsel vom Chrom zum Aluminium erfolgte, weil der thermische Ausdehnungskoeffizient des Aluminiumoxids der metallischen Matrix näher ist als der des Chromoxids. Außerdem bildet das Chrom ab einer Temperatur von ca. 1000 °C Abdampfungen, die sich dann in der Betriebsatmosphäre wiederfinden und an den Apparaturen und Anlagen niederschlagen und die Schutzschicht reduzieren. Das Aluminium besitzt eine höhere Duktilität, d.h. das Verformungsvermögen ist höher. Siliziumoxid bietet keine Alternative, da es bei starken Temperaturwechseln zum Abplatzen neigt. Außerdem senkt das Silizium die Liquidustemperatur ab und schränkt damit das Wärmebehandlungsfenster ein.²¹

Wolfram- und Molybdän-Legierungen besitzen zwar eine hohe mechanische Festigkeit, sind aber sehr teuer, und schwer zu verarbeiten. Außerdem verfügen Sie über eine nur unzureichende Korrosionsbeständigkeit in sauerstoffhaltigen Medien. Daher finden diese Werkstoffe zum Teil ihre Anwendung in der sauerstofffreien Weltraumatmosphäre, sind aber als Basislegierung für den Einsatz im Kraftwerk ungeeignet. Allerdings hat man durch gezieltes hinzulegen von geringen Wolframanteilen bei bewährten Stählen deutliche Vorteile erzielen können. So zeigt z. B. der E911, mit 1% Wolfram die nachfolgenden Eigenschaften:²²

- voll martensitisches Gefüge,
- verlässliche Zeitstandergebnisse bis 50.000 Stunden,
- wirtschaftliche Glühparameter,
- dem Grundwerkstoff ähnliche Zusatzwerkstoffe für das WIG- und Lichtbogenhandschweißen und eine
- akzeptable Kerbschlagzähigkeit des Schweißgutes.

Nachdem erste Frischdampfleitungen aus dem Werkstoff E911 in der Praxis eingesetzt wurden, erfolgte die Auswertung von Zeitstandversuchen, die erstmalig über einen längeren Zeitraum gelaufen sind. Da diese Ergebnisse eine deutlich geringere Zeitstandfestigkeit aufwiesen als ursprünglich vermutet, wird der E911 heute nicht mehr im Kraftwerksneubau eingesetzt.

Ein anderes Beispiel für den starken Einfluss von Wolfram ist der Werkstoff P92, der fast identisch mit dem P91 ist, jedoch eine geringe Zulegierung an Wolfram enthält und damit eine deutlich höhere Zeitstandfestigkeit bei gleichzeitig geringerem E-Modul und geringerer spezifischer Wärmekapazität aufweist. Diese Werkstoffe werden im Kraftwerksbereich häufig eingesetzt, wobei der P92 der bevorzugte Werkstoff ist. In den Berechnungen dieser Arbeit werden beide Werkstoffe zum Vergleich berücksichtigt.

Kohärente Ausscheidungen haben eine mit dem Ursprungsgitter vergleichbare Raumstruktur. D.h. bei kohärenten Ausscheidungen kann sich die Versetzung durch das Schneiden der Ausscheidung problemlos fortsetzen. Bei inkohärenten Ausscheidungen ist ein Überklettern oder Umgehen erforderlich. Es wird daher stets versucht, das Gefüge der Werkstoffe so einzustellen, dass die Teilchen umgangen und nicht geschnitten werden.

Die Qualität und die Einsetzbarkeit der Werkstoffe für unterschiedliche Anwendungsfälle hängen auch von den mechanischen Eigenschaften des Materials ab. Durch genormte Prüfverfahren werden in den jeweiligen Werkstoffdatenblättern die wesentlichen Eigenschaften dokumentiert:²³

- Elastizitätsmodul (E-Modul),
- Zugfestigkeit und Dehngrenzen (R_m , $R_{p0,2}$, $R_{p1,0}$),
- Verformungskennwerte (Streckgrenzenverhältnis, Bruchdehnung A und Brucheinschnürung Z),
- Zeit- und Dauerfestigkeit (σ_D) und
- Zeitstandfestigkeit ($R_{m/t/T}$).

Neben den stationären Kriechvorgängen sind für die Betrachtungen dieser Arbeit die Ermüdung des Materials durch wechselnde Belastungszustände (zyklisch/dynamisch) von besonderer Bedeutung.

Insbesondere die wechselnden Belastungszustände haben bei der ursprünglichen Auslegung der Wanddicke der Komponente einen wesentlichen Einfluss auf die Erschöpfung des Bauteils. Es erfolgt daher hierzu im Kapitel 2.5.4. eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise zur Bestimmung des aus der Wechselbeanspruchung resultierenden Lebensdauer verbrauchs.

Während das Regelwerk konkrete Vorgaben zum Umgang mit zyklischen Belastungen macht, sind die sogenannten Kriech-Ermüdungs-Wechselwirkungen, die durch Belastungsänderungen und Kriechvorgänge über einen längeren Zeitraum hervorgerufen werden, wenig untersucht. In dieser Arbeit erfolgt gemäß Regelwerk die Betrachtung beider Belastungsszenarien unabhängig voneinander, ohne auf mögliche Wechselwirkungen einzugehen. Im Anschluss erfolgt die Summation der Einzelwirkungen. Die EN 12952-4 beschreibt die Lebensdauererwartung von Komponenten, die einer Kriecherschöpfung unter ständigen Lastwechseln unterliegen. Hierzu werden die Schadensereignisse separat ermittelt und aufsummiert. Sollten hierzu neue Erkenntnisse gewonnen werden, so müssen diese in einer gesonderten Betrachtung mit ihrer möglichen Auswirkung auf die Erschöpfung der Komponenten berücksichtigt werden.

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Stähle beschrieben, die im Hochtemperaturbereich eingesetzt werden. Das markanteste Unterscheidungsmerkmal ist dabei die Gefügestruktur, die auf der Grundlage des reinen Eisens basiert, welches für eine praktikable Anwendung aber entsprechend modifiziert oder durch andere Stoffe substituiert werden muss. Die Modifikation erfolgt durch die Zugabe von Kohlenstoff als wichtigstem Bestandteil, der Gefügeveränderung durch Erwärmung und Abkühlung und der Zugabe weiterer Elemente mit unterschiedlichen Auswirkungen auf die Stabilität oder das Korrosionsverhalten. Die Erläuterung im Kapitel 2.2.1 erfolgt in einer Dreiteilung beginnend mit dem Eisen über die Martensite bis zu den Austeniten. Legierungen auf Nicht-Eisen-Basis werden im Kapitel 2.2.2 separat behandelt, da diesen Legierungen im modernen Kraftwerksbau eine besondere Rolle zukommt. Weitere Superlegierungen, Coatings und intermetallische Phasen werden nur kurz im Kapitel 2.2.3 der Vollständigkeit halber aufgeführt.

2.2.1 Hochtemperaturlegierungen auf Eisen-Basis, Ferrite, Martensite und Austenite

Entsprechend ihrer Wirkung auf den Kristallaufbau wird zwischen den ferritbildenden und den austenitbildenden Elementen unterschieden. Chrom, als das wesentliche Element der Legierungen, gehört zu Ferritbildnern. Molybdän und Silicium sind ebenfalls ferritbildend. Die Carbid- und Nitridbildner Titan, Niob, Vanadin und Wolfram wirken in zweifacher Weise stabilisierend auf den ferritischen Mischkristall, indem sie selbst ferritbildend wirken und durch die Bindung der starken Austenitbildner Kohlenstoff und Stickstoff für zusätzliche Stabilität des ferritischen Gitters sorgen.²⁴

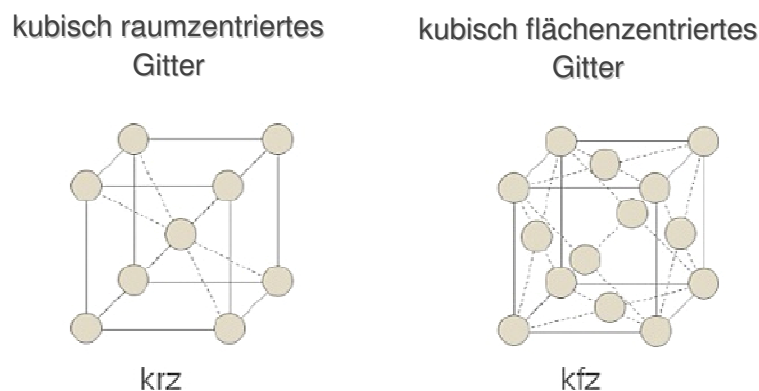


Abbildung 2-9: Kristallgitter

Den elementaren Grundwerkstoff bildet das Eisen in seiner Ausprägung als Ferrit, kubisch-raumzentriert oder als Austenit, kubisch-flächenzentriert (siehe Abbildung 2-9)²⁵.

Bei den Stählen lässt sich die nachfolgende Grundeinteilung vornehmen²⁴:

- Ferritische Stähle, die bei hohen Chromgehalten sogar 3 bis 4% Nickel ohne Gefügeveränderung lösen, wovon zur Verbesserung der Zähigkeit und der Passivierbarkeit bei den superferritischen Stählen Gebrauch gemacht wird;
- Martensitische Stähle mit höchstens 17% Chrom;
- Austenitische Stähle mit 17 bis 28% Chrom, deren Gefügestabilität auf Nickel und Stickstoff beruht;
- Austenitisch-ferritische Stähle mit 22 bis 27% Chrom und 4 bis 8% Nickel.

Der reine Ferrit (ohne Kohlenstoff) ist ein sehr weiches Material. Die Festigkeit ergibt sich durch die Kombination mit dem Kohlenstoff. Dadurch entsteht Eisencarbid, das aufgrund seiner hohen Härte auch als Zementit bezeichnet wird. Bei den Fe-Basislegierungen handelt es sich durchweg um Stähle mit weniger als 2% Kohlenstoff.²⁶ Der Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Kohlenstoffgehalt wird durch das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (siehe Abbildung 2-10)²⁷ beschrieben.

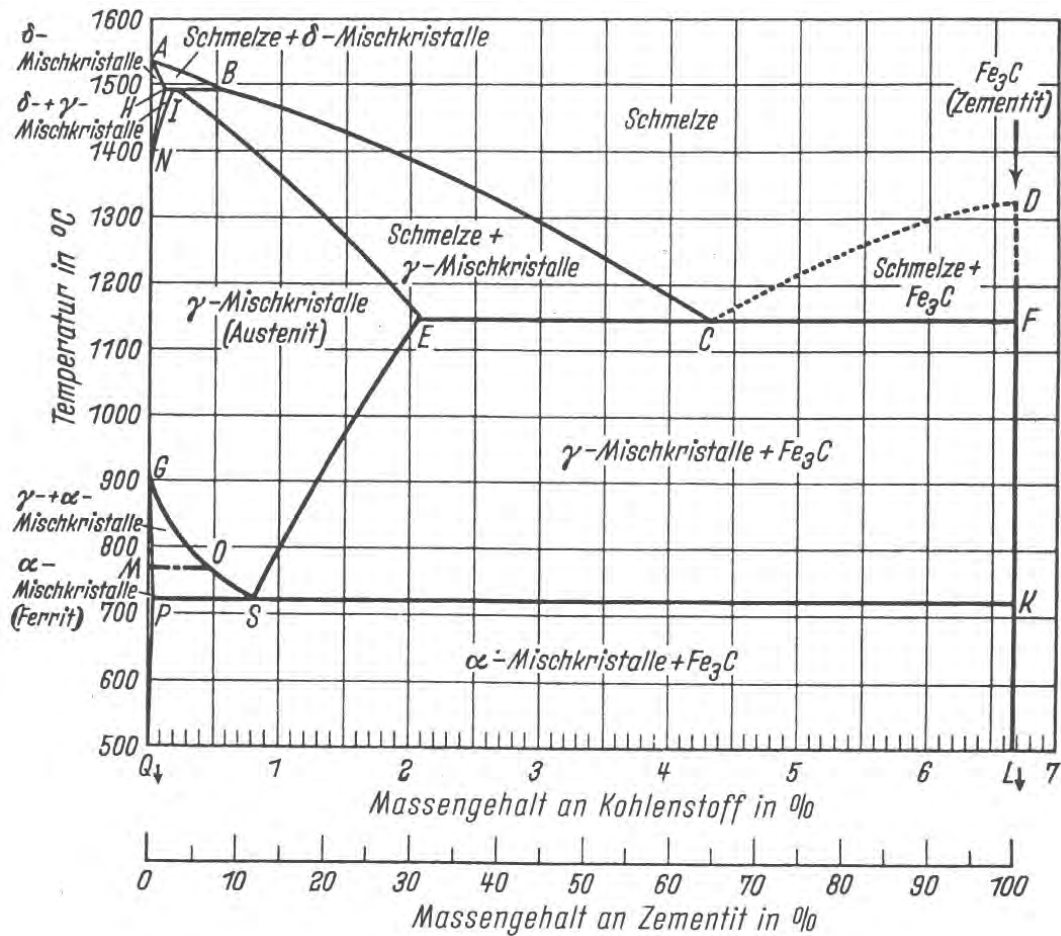


Abbildung 2-10: Zustandsschaubild Eisen-Eisencarbid

Bei den ferritischen Stählen wird durch die Zugabe ferritstabilisierender Elemente das Austenitgebiet des Eisens so stark eingeschränkt, dass praktisch keine Umwandlung mehr auftreten kann. Bei Wärmebehandlungen ist eine äußerst vorsichtige Vorgehensweise zu wählen, da in der ferritischen krz-Struktur des α -Eisens die Diffusion von gelösten Legierungs- und Begleitelementen um den Faktor 100 bis 1000 größer ist als im kfz-Gitter des γ -Eisens.²⁴

Die zeitlichen Parameter bei der Wärmebehandlung sind für die Entstehung weiterer Gitterstrukturen verantwortlich. Wenn z. B. eine sehr schnelle Abkühlung des Werkstoffs erfolgt, so werden einige Prozesse gegenüber einem langsamen Abkühlvorgang verhindert. Diese Veränderungen können mit Hilfe eines ZTU-Diagramms (Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm) beschrieben werden. Nachfolgend ist beispielhaft das Diagramm für den Stahl P92 dargestellt (siehe Abbildung 2-11)²⁸, der seine martensitische Struktur durch eine eben solche zeitlich-thermische Behandlung erhält.

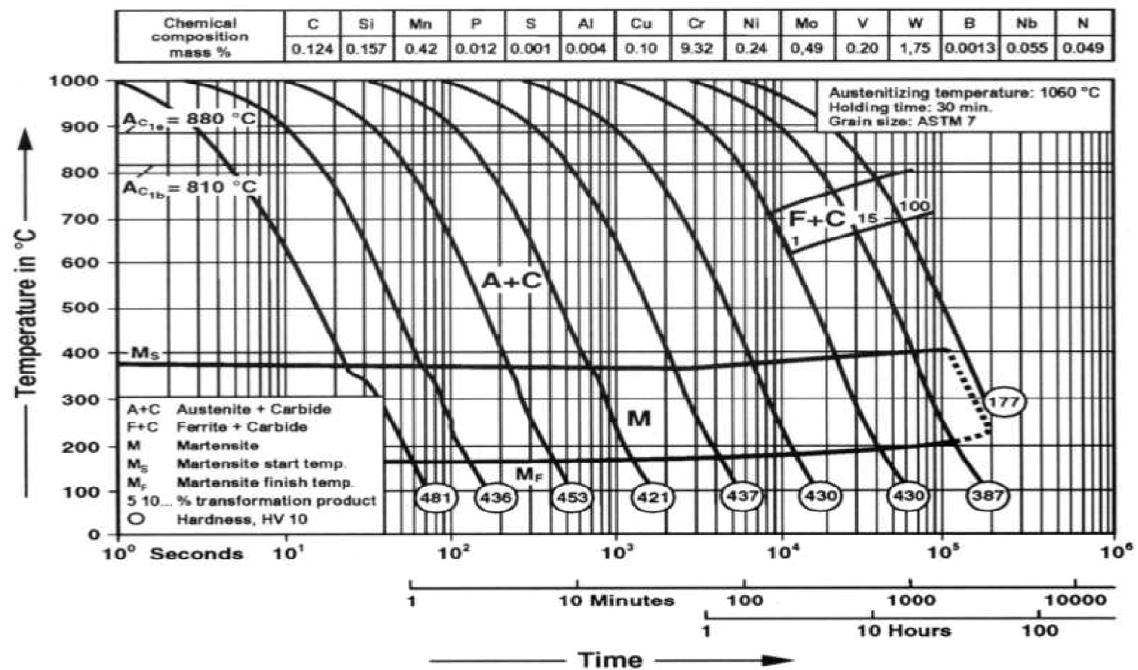


Abbildung 2-11: ZTU-Diagramm P92

Die Festigkeit der Stähle basiert im Wesentlichen auf den Karbiden, die sich vorwiegend an den Korngrenzen ausbilden. Solange die Karbidstrukturen fein verteilt sind, wirken Sie durch die resultierende Versetzungsverankerung stark härtend. Karbide können bei allen Eisen-Kohlenstoff-Legierungen während der Erstarrung, in Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung und der Abkühlungsgeschwindigkeit auftreten. Zur Veranschaulichung ist nachfolgend beispielhaft das Gefüge des hitzebeständigen Stahls GX40CrSi29 mit einem gut erkennbaren dichten Netzwerk von Cr-Karbiden auf den Korngrenzen abgebildet (siehe Abbildung 2-12)²⁶.

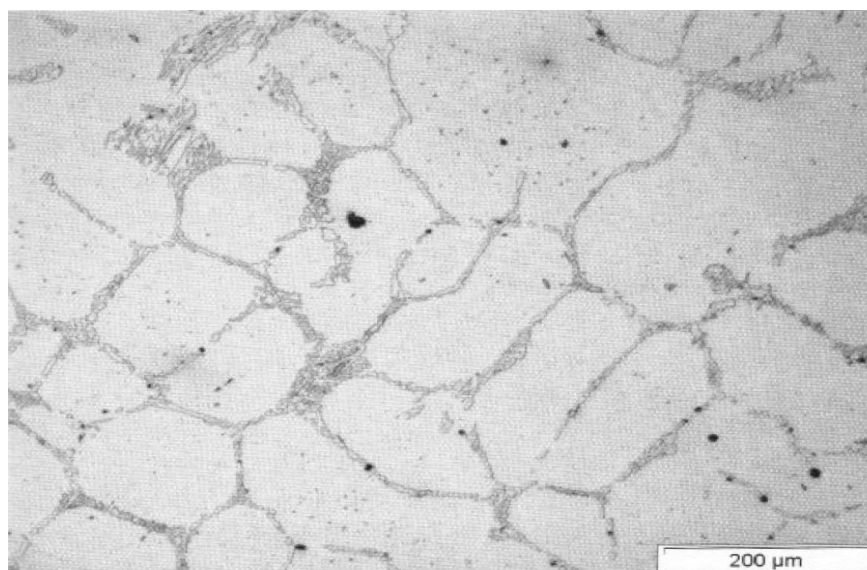


Abbildung 2-12: Gefüge des hitzebeständigen Stahls GX40CrSi29 mit einem dichten Netzwerk von Chromkarbiden auf den Korngrenzen

Die Hochtemperaturstähle lassen sich einteilen in hitzebeständige, warmfeste und hochwarmfeste Stähle. Darüber hinaus erfolgt eine weitere Klassifizierung auf Basis der Gefügestruktur in ferritische und austenitische, ferritisch/bainitische und martensitische Gefüge.

Bei den hitzebeständigen Stählen sind die ferritischen Legierungen in erster Linie auf eine hohe Korrosionsbeständigkeit ausgelegt. Diese Stähle zeichnen sich durch einen hohen Chrom-Gehalt aus, der zur Ausbildung einer dichten Cr_2O_3 -Deckschicht führt. Durch den hohen Chromanteil von bis zu 30 Ma.-% steigt insbesondere die Beständigkeit gegen Sulfidation, einem Korrosionsvorgang unter Beteiligung von Schwefel, der bei oxidationsbeständigen Werkstoffen um Größenordnungen schneller verläuft als die normale Oxidation.

Ferritische Stähle weisen außerdem eine ausgeprägte Streckgrenze auf, wobei sich die obere und die untere Streckgrenze aus dem Zugversuch ermitteln lassen. Dabei ist die obere Streckgrenze die Spannung, die zum Losreißen der Versetzungen nötig ist (entspricht der Aktivierung der Lüdersbänder). Zur Ausbreitung der Lüdersbänder reicht dabei eine geringe Spannung aus. Diese untere Streckgrenze wird auch als Mindeststreckgrenze bezeichnet.

Mit einer Anhebung der Temperatur auf mehr als 911 °C erfolgt die Umwandlung des α -Eisens in γ -Eisen bzw. bei 723 °C und einem Kohlenstoffgehalt von 0,8 Ma.-% die Umwandlung von Perlit in Austenit, wobei bei diesem Vorgang ein weiteres Kohlenstoffatom im Inneren aufgenommen wird. Ein schnelles Abkühlen verhindert die Lösung des Kohlenstoffatoms und es verbleibt der harte Martensit.

Sind die Umklappvorgänge im Metallgitter durch zusätzliche Diffusionsvorgänge beeinflusst, so sind verschiedene Umwandlungsmechanismen möglich. In Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt, den Legierungselementen und der Geschwindigkeit der Abkühlung können unterschiedliche bainitische Gefügestrukturen entstehen. Der Bainit besteht, wie auch der Perlit aus den Phasen Ferrit und Zementit. Die für die Bildung des Bainits notwendigen Temperaturen und Abkühlbedingungen liegen oberhalb derer für die Martensitbildung. Durch das Bainitisieren erhöht sich die Zähigkeit und Eigenspannungen können reduziert werden. Die Abhängigkeiten der Umwandlungen vom Kohlenstoffgehalt und von der Temperatur sind in Abbildung 2-10 dargestellt.

Die Entwicklung austenitischer rostbeständiger Stähle begann 1912 durch die Firma Krupp, die mit dem V2A und dem V4A zuerst einen austenitischen Stahl auf den Markt brachte. In den 30er Jahren wurden in Schweden und Frankreich rostbeständige ferritisch-austenitische Komponenten gefertigt und entsprechende Legierungen zum Patent angemeldet. Die Nickelverknappung Ende der 60er Jahre führte zu einer weiteren Entwicklung der nickelarmen Legierungen.²⁹ Die Entwicklung des Rohstoffpreises des Nickels wurde bereits in Abbildung 2-4 skizziert. Mit der Anforderung, unter anderem aus der chemischen Industrie im Kraftwerksbereich, höhere Temperaturen und Drücke zu erzielen, steigen auch die Anforderungen an die Werkstoffe. Die warmfesten Stähle mit ihrem ferritischen Grundgefüge reichen für viele Anwendungen oberhalb von 550 °C aufgrund ihrer unzureichenden Festigkeit und der mangelnden Korrosionsbeständigkeit

nicht mehr aus. Dem gegenüber sind die hochwarmfesten Stähle, wie z. B. hochlegierte martensitische CrMoV-Stähle, auch über 550 °C bis zu 600 °C sehr gut einsetzbar. Die bekanntesten Werkstoffe sind die 9-12% Chromstähle, wie der P91 und der X20CrMoV11-1. Mit den 10/11% Chromstählen dachte man das Ende der Entwicklung erreicht zu haben, bis aus den USA die 9%-Chromstähle kamen und einen neuen Entwicklungsschub ausgelöst haben. So gehört der P91 zu der Familie der 9%-Chromstähle und wurde in Amerika erfunden. Der E911 ist eine Weiterentwicklung dieses Werkstoffs mit ebenfalls 9% Chrom und der Zulegierung von 1% Wolfram, um die Festigkeit durch Mischkristallverfestigung weiter zu steigern. Kritisch bei den 9%-Chromstählen ist die geringere Zunderbeständigkeit in Dampf und Luft.³⁰ Für Stähle ist die martensitische Umwandlung eine häufig genutzte Möglichkeit der Eigenschaftsbeeinflussung. Wird die Hochtemperaturphase bei Raumtemperatur metastabil konserviert, kann sie spannungs- oder dehnungsinduziert in Martensit umwandeln.

Bei martensitischen Gefügen handelt es sich um metastabile und ferromagnetische Gefüge in Metallen, die durch eine kooperative Scherbewegung aus dem Ausgangsgefüge entstehen. Das Gefüge ist nach dem deutschen Metallurgen Adolf Martens benannt. Das martensitische Gefüge entsteht durch die Abkühlung aus einer Hochtemperaturphase unter die Gleichgewichtstemperatur zu einer Niedertemperaturphase. Beim Stahl sind dies die γ - und die α -Phase. Die Abkühlung muss so schnell erfolgen, dass Diffusionsvorgänge verhindert werden. Sie muss außerdem so weit unter die Gleichgewichtstemperatur erfolgen, dass die Phasenumwandlung erfolgen kann. Temperatur und Geschwindigkeit sind dabei stark von den Legierungselementen im Stahl abhängig und variieren deutlich. Die martensitischen Stähle sind umwandlungsfähige Stähle, bei denen der Austenitbereich erweitert und martensitisch umgewandelt wird. Die martensitischen Chromstähle verfügen damit über eine höhere Festigkeit und Härte, wobei diese aber stark von dem bei der Wärmebehandlung eingestellten Gefügezustand abhängig sind. Die martensitischen Vergütungsstähle werden bei 950 bis 1100 °C austenitisiert, abgeschreckt und dann oberhalb 600 °C angelassen. Die Besonderheit der nickelmartensitischen Stähle liegt in der Bildung von stabilem Austenit im Anlassbereich von 550 bis 620 °C, wodurch eine gute Zähigkeit erreicht werden kann.²⁴ Diese Stähle werden wegen ihres Chromanteils auch zu der Gruppe der 9-12%-Chromstähle gezählt. Bei diesen handelt es sich aufgrund des hohen Cr-Gehaltes um lufthärtende Martensitbildner, deren Martensitintervall zwischen etwa 300 und 100 °C liegt. Das martensitische Gitter mit seiner feinen Zellstruktur, innerhalb derer freie Versetzungen zu finden sind, entsteht durch das diffusionslose Umklappen des vorherigen kubisch-flächenzentrierten Gitters in ein tetragonal verzerres raumzentriertes Gitter. Die Dichte dieser Umwandlungsversetzungen entspricht der eines stark kaltverformten Metalls. Durch das Anlassen des Metalls wird die Struktur durch sich ausscheidende Karbide fixiert und bleibt relativ erholungsstabil. Die Karbide behindern im Anlassbereich die Rekristallisation des Materials trotz der hohen Versetzungsdichte.²⁶ Martensitische 9%-Chromstähle sind z. B. der P91 und der P92, die bereits an vielen Stellen im Kraftwerksbereich eingesetzt werden, und aufgrund der benannten Eigenschaften in die hier vorliegenden Untersuchungen mit aufgenommen wurden.

Die durch die Ausscheidung von $M_{23}C_6$ -Carbiden stabilisierte martensitische Struktur sorgt so z. B. bei dem Stahl X20CrMoV11-1 für eine hohe Zeitstandfestigkeit.³¹ Bei dem P91 (X10CrMoVNb9-1) kommt als noch zusätzliches festigkeitssteigerndes Element die Ausscheidungshärtung über feinverteilte V/Nb-Carbonitride vom Typ MX hinzu. Diese Ausscheidungen als zusätzliche Phase in Form von fein verteilten Partikeln wirken quasi als Hindernisse bei der Bewegung in dem ansonsten ideal aufgebauten Kristallgitter. Der P92 stellt eine Weiterentwicklung des P91 durch die Zulegierung von Wolfram dar. Hierdurch wird eine zusätzliche Festigkeitssteigerung durch die Erhöhung der Mischkristallhärtung realisiert. Das hinzu-legierte Wolfram muss dazu in der Matrix gelöst sein. Bei Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich z. B. bei dem Stahl NF 616 schon nach einer kurzzeitigen Auslagerung bei 600 °C Wolfram als Laves-Phase ausscheidet. Dennoch ist die Erhöhung der Zeitstandfestigkeit gegenüber dem klassischen P91 ohne Wolfram messbar.³²

Sollen Metalle bei Temperaturen oberhalb von 600 °C eingesetzt werden, so lassen sich nur noch austenitische Stähle einsetzen. Der Austenit ist kubisch-flächenzentriert und lässt sich damit auch auf andere kubisch-flächenzentrierte Mischkristalle übertragen, so z. B. auch die Nickel-Basis-Legierungen. Der Austenit hat im Ursprung eine nur geringe Festigkeit, die aber durch Kaltverformung stark verbessert werden kann. Damit das austenitische Gefüge im gesamten Arbeitstemperaturbereich erhalten bleibt, ist der Nickelanteil, der bis zu 35 Ma.-% betragen kann, ausreichend hoch zu wählen. Austenite sind z. B. γ -Mischkristalle von Eisen-Legierungen. Das Gefüge ist unter dem Mikroskop sehr gut an seinen typischen Zwillingskorngrenzen erkennbar (siehe Abbildung 2-13)³³.

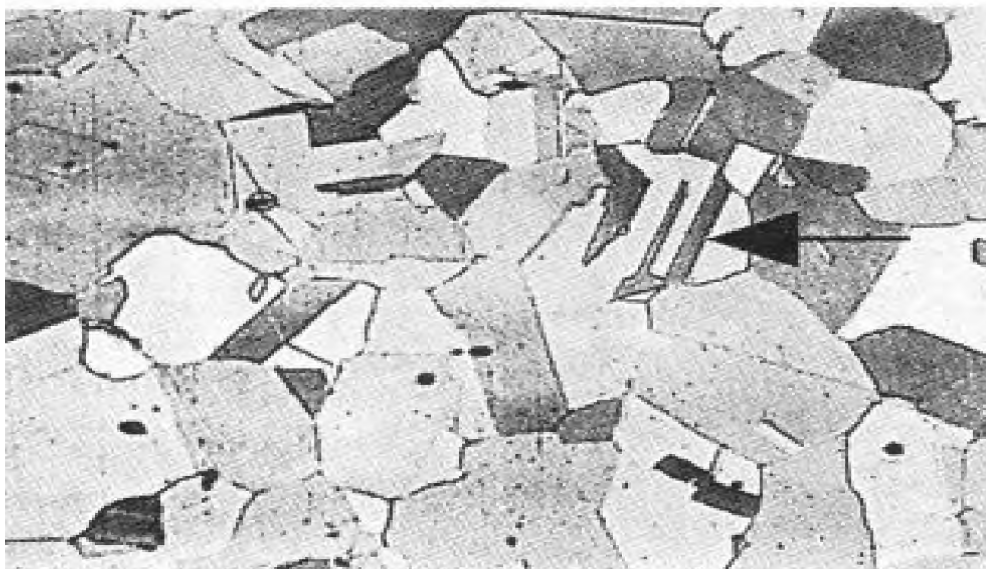


Abbildung 2-13: Mischkristallgefüge NiCu30Fe, Gefüge nach Warmumformung und Rekrystallisation, homogene Mischkristalle mit Zwillingsbildung (Pfeil ◀)

In einem austenitischen Gitter liegt eine deutlich geringere Diffusionsgeschwindigkeit als in kubisch-raumzentrierten Gitterstrukturen vor. Daraus folgt auch die höhere Kriechfestigkeit. Die theoretisch erreichbare Festigkeit des Werkstoffs reduziert sich jedoch durch produktionsbedingte

Verunreinigungen. Die austenitischen Stähle haben aufgrund Ihrer kubischen Flächenzentrierung einen höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten und eine geringere Temperaturleitfähigkeit als die ferritischen Stähle. Häufig nachteilig wirkt sich auch die niedrige Streckgrenze der austenitischen Werkstoffe bei niedrigen Temperaturen aus.

Austenitische hitzebeständige Stähle weisen eine deutlich höhere Warmfestigkeit auf. Sie können daher auch zu der Gruppe der hochwarmfesten Stähle gerechnet werden. Durch die austenitische Gefügestruktur, zeichnen sie sich außerdem durch eine geringere Versprödungsneigung aus. Austenitische Edelmessing gibt es seit 1912.

Oberhalb einer Temperatur von 911 °C liegt Eisen grundsätzlich als Austenit vor. Damit auch nach der Abkühlung das austenitische Gefüge erhalten bleibt, werden dem Stahl die typischen Austenitbildner, das sind die Elemente Nickel (Ni), Kobalt (Co), Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Mangan (Mn), hinzulegiert.

Die Festigkeitswerte der Austenite sind im Vergleich zu den anderen Stählen deutlich geringer. In Kombination mit einer hohen Zugfestigkeit ergibt sich durch das niedrige Streckgrenzenverhältnis und die hohen Bruchdehnungswerte eine deutlich erweiterte Anwendbarkeit dieser Werkstoffe. Eine wesentliche Festigkeitssteigerung kann durch die Erhöhung des Stickstoffgehalts erfolgen. Dieser verringert außerdem die Neigung zur Bildung von Sigma-Phase und Carbiden. Zusätzlich wirkt sich die Erhöhung positiv auf die Nasskorrosionsbeständigkeit aus. Bedingt durch die Löslichkeit im flüssigen Stahl und durch die erhöhte Ausscheidung von Chromnitrid sind der Erhöhung des Stickstoffanteils jedoch Grenzen gesetzt.²⁴

Bereits seit 1950 werden in den USA austenitische Stähle für den Einsatz in Kraftwerken verwendet. Bei dem Werkstoff X8CrNiNb16-13 wurde schon die Erkenntnis umgesetzt, dass von den Stabilisatoren Niob und Titan, welche die Anfälligkeit für interkristalline Korrosion deutlich reduzieren, das Niob bzgl. der Erhöhung der Zeitstandfestigkeit deutlich wirksamer ist. Für die weitere Verbesserung der Zeitstandfestigkeit wurde beim X8CrNiMoNb16-16 außerdem Molybdän hinzugefügt und gleichzeitig zur Verringerung der Versprödungsneigung der Nickelgehalt erhöht. Ein weiterer wesentlicher Sprung in der Erhöhung der Zeitstandfestigkeit konnte Anfang der 60er Jahre durch das Hinzulegieren geringster Mengen (0,01%) Bor erzielt werden. Dennoch blieben Probleme bestehen, die zum einen in der Carbidbildung liegen, hier ist insbesondere das chromreiche Carbid $M_{23}C_6$ verantwortlich für eine Chromverarmung, die zum Kornzerfall führen kann. Hierzu wird durch Niob und Titan der noch enthaltene Kohlenstoff in schwer löslichen Carbiden gebunden und damit dem Chrom zur Reaktion entzogen. Darüber hinaus neigen die Chromnickelstähle zur Bildung intermetallischer Phasen. Insbesondere durch die Zusatzstoffe Molybdän und/oder Niob entstehen neben der Sigma- auch die Laves- und Chi-Phase, welche die Zähigkeit negativ beeinflussen. Eine fast völlige Unterdrückung der Phasenbildung ist erst mit einem Nickelanteil > 30% zu erreichen.³⁴

Daher spielen in der praktischen Anwendung die rein austenitischen Stähle im Kraftwerksrohrleitungsbau nur eine untergeordnete Rolle und werden bei der Werkstoffauswahl nicht berücksichtigt.

Bei austenitisch-ferritischen Stählen liegt ein ausgewogenes Verhältnis von Austenit und Ferrit vor. Diese sogenannten Duplex-Stähle sollen hier ebenfalls nicht weiter betrachtet werden, da bei höheren Temperaturen verstärkt intermetallische Phasen auftreten und daher auch Duplexstähle im Kraftwerksbereich keine nennenswerten Einsatzfelder haben.

Von deutlich höherem Interesse sind die nachfolgend beschriebenen Nickel-Basis-Legierungen als in erster Linie mischkristall- und karbidverfestigte Werkstoffe.

2.2.2 Hochtemperaturlegierungen auf Nickel-Basis

Die Nickel-Basislegierungen stellen neben den Eisen- und Kobalt-Legierungen die dritte Gruppe warmfester Werkstoffe dar. Die Gitterstruktur ist wie bei den Austeniten bis zum Schmelzpunkt durchgehend kubisch-flächenzentriert. Werkstoffe mit hohem Nickelanteil (>32%) werden heute vorwiegend im Temperaturbereich zwischen 600 und 900 °C eingesetzt, da sie hier gefügestabil und sigmaphasenfrei sind.

Die zusätzlichen Legierungselemente Molybdän und Kobalt fördern die Mischkristallhärtung und bewirken damit eine höhere Festigkeit. Eine weitere Erhöhung der Mischkristallhärtung erfolgt durch das Chrom, welches zudem für den Korrosionsschutz maßgeblich ist.

Bereits in den 40er Jahren kamen polykristalline Nickel-Basislegierungen als Nickel-Chrom-Schmiedelegerungen unter dem Namen Nimonic 80 auf den Markt. Als weitere Legierungselemente wurden Aluminium und Titan verwendet, die dann im Nimonic 80A für die Ausscheidung der für die Hochtemperaturfähigkeit maßgeblich verantwortlichen γ' -Phase waren.³⁵ So bildeten sich bei höheren Titangehalten auch γ' -Ausscheidungen, die zu noch höheren Festigkeitswerten führten.³⁶ Der Anteil des Eisens wird in diesen Legierungen heute auf ein Minimum reduziert. Ni-Basis-Legierungen können sehr nah an ihrem Schmelzpunkt eingesetzt werden. Bei den Nickelbasislegierungen ist in der Regel ein geringerer Chromgehalt zur Korrosionsvermeidung notwendig, als z. B. bei den austenitischen Stählen.

Die nachfolgende Grafik (Abbildung 2-14)³⁷ zeigt die 100.000h - Zeitstandfestigkeit von martensitischen 9-12% Chromstählen, austenitischen Stählen und der Nickellegierung Inconel 740 im Vergleich, in Abhängigkeit von der Temperatur. Daraus ist deutlich erkennbar, dass praktisch nur die Nickelbasislegierungen der Anforderung einer 100.000h - Zeitstandfestigkeit von 100 N/mm² für den möglichen Einsatz, z. B. in einem 700 °C-Kraftwerk, in Frage kommen.

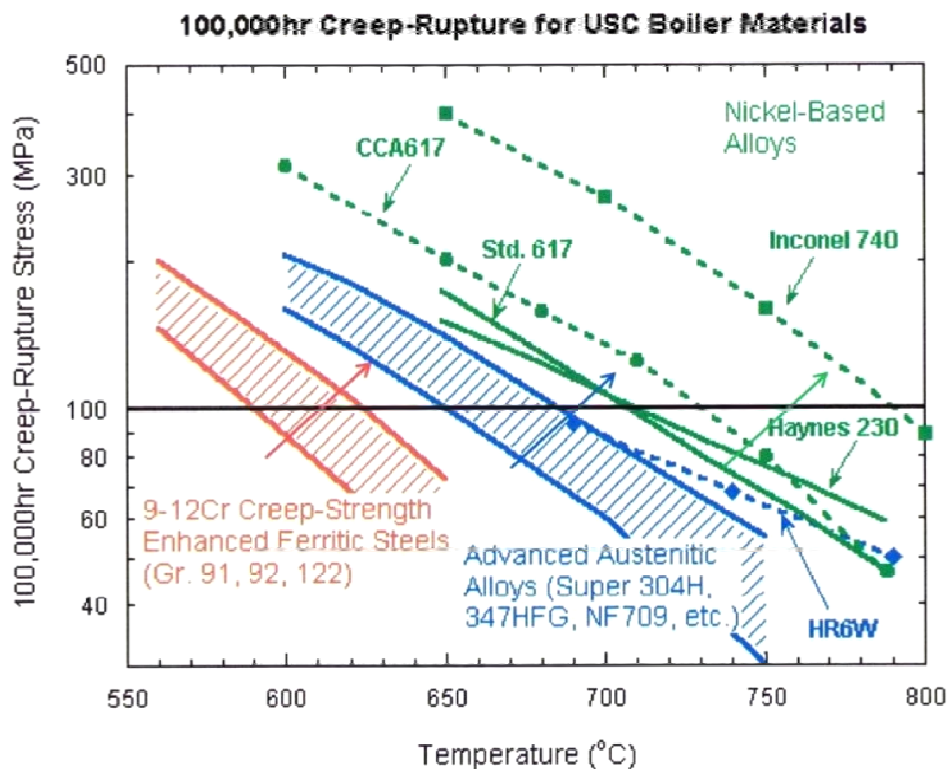


Abbildung 2-14: 100.000 h Zeitstandfestigkeit von 9-12% Chromstählen, Austeniten und Nickel-Basis-Legierungen

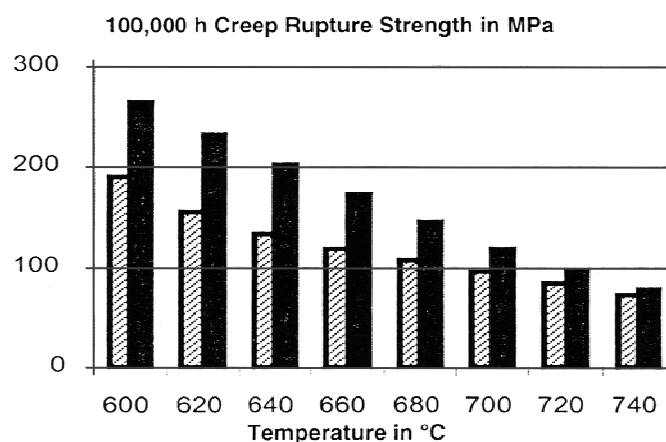
Mit dem Werkstoff "Tinidur" wurde 1939 von Krupp eine spezielle Sparlegierung entwickelt, um sich von der Abhängigkeit des Nickels zu lösen. Allerdings sind auch hier immer noch 30% Nickel erforderlich, um die festigkeitssteigernden γ' -Ausscheidungen zu erzielen. Zunehmend erkennbare Korrosionsprobleme wurden durch das Hinzulegieren von Chrom begegnet. Diese wurden immer wieder angepasst und in Kombination mit Aluminium auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmt. Bei den Legierungen der zweiten Generation wurde dann außerdem Rhenium hinzulegiert.

Zukünftige Weiterentwicklungen bei den Ni-Basis-Legierungen haben die nachfolgenden Ziele:

- Erhöhung der γ' -Gehalte;
- Minimierung der TCP (TCP = topologically closed packed)-Gehalte unter Beibehaltung der Wärmebehandlungsmöglichkeiten;
- Rhenium-freie bzw. -arme Legierungen (z. B. René N500), da Rhenium sehr selten und teuer ist. Dabei ist Rhenium einer der wenigen/der einzige Stoff, der festigkeitssteigernd ist, ohne das Korrosionsverhalten zu verschlechtern;
- Legierungen ohne SRZ (Secondary Reaction Zone) - Instabilitäten unter PtAl- und MCrAlY-Beschichtungen;
- Neue Legierungen, wie z. B. Ti-Aluminide oder CMCs (Ceramic Matrix Composites), also keramische Werkstoffe.

Zu den am besten untersuchten Nickel-Basislegierungen gehört der Alloy 617. Dieser Werkstoff wird bereits seit Jahrzehnten von den Herstellern im Druckbehälterbau eingesetzt und erfährt ständige Modifizierungen.

Der Alloy 617 als Nickelbasislegierung vom Typ NiCr22Co12Mo (Werkstoff Nr. 2.4663) wird sowohl im Turbinenbereich als auch im Dampfkesselbau für Temperaturen bis 720 °C eingesetzt. Es handelt sich um einen mischkristall- und carbidverfestigten Werkstoff, der oft im lösungsgeglühten Zustand eingesetzt wird. Charakteristisch sind seine hohe Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit sowie gute Kriecheigenschaften und die Beständigkeit gegen Aufkohlung bei Temperaturen bis 1100 °C³⁸. Beim Alloy 617 werden dem Basiswerkstoff Nickel die wesentlichen Legierungselemente Chrom, Molybdän und Kobalt hinzugefügt. Das Nickel bildet hierbei die den Werkstoff stabilisierende γ -Matrix. Die Heißkorrosions- und Oxidationsbeständigkeit und die Bildung der $M_{23}C_6$ -Carbide werden durch den 22%igen Chromanteil erreicht. Die hohe Warmfestigkeit durch die Mischkristallverfestigung erzielt man durch den Molybdängehalt von etwa 9% und den Kobaltgehalt von ca. 12%. Das Molybdän ist neben seiner hohen Stapelfehlerenergie auch verantwortlich für die zusätzlich verfestigenden M_6C -Carbide. Die Bildung geringer Mengen an γ' -Phasen wird durch die Elemente Aluminium und Titan begünstigt.³⁹ In den Forschungslaboren der ThyssenKrupp VDM (heute VDM Metals GmbH) ist speziell für den Hochtemperatureinsatz der bestehende Alloy 617 mit deutlich verbesserten Eigenschaften weiterentwickelt worden. So konnte beim Alloy 617B durch das gezielte Hinzulegieren von Bor (20 bis 50 ppm) und die Einstellung eng tolerierter Zusätze der bereits in der Legierung verwendeten festigkeitssteigernden Elemente Aluminium, Titan, Kobalt und Kohlenstoff eine zusätzliche Anhebung der Festigkeit um mehr als 20% erreicht werden. Diese Eigenschaftsverbesserung gilt insbesondere in dem für diese Arbeit relevanten Temperaturbereich zwischen 600 und 650 °C, bei dem moderne Kohlekraftwerke z.Z. betrieben werden. Die Verbesserung im Rahmen der 100.000 Stunden Zeitstandfestigkeit ist nachfolgend dargestellt (siehe Abbildung 2-15)⁴⁰.



100.000-hour creep rupture strength of Nicrofer 5520 Co - alloy 617 (hatched) compared to the nickel alloy variant Nicrofer 5520 CoB – alloy 617B (black).
Source: Separate expert's report by TÜV Rheinland on behalf of Hitachi Power Europe, Duisburg

Abbildung 2-15: 100.000 h Zeitstandfestigkeit des Alloy 617 und Alloy 617B

Damit die in Untersuchungen dokumentierten hohen Zeitstandfestigkeitswerte auch wirklich erreicht werden, sind die engen Toleranzen unbedingt einzuhalten. Auf Grund der verbesserten Eigenschaften in dem relevanten Temperaturbereich wird in den weitergehenden Untersuchungen und Berechnungen nur noch diese Variante betrachtet.

Der „Alloy 617 B occ“ (optimised chemical composition) - entspricht bei ThyssenKrupp VDM dem Nicrofer 5520 occ - zeichnet sich durch hohe Festigkeit und Verformbarkeit (Duktilität) bei gleichzeitig guter Schweißbarkeit aus. In den Kraftwerken der kommenden Generation könnte er in Rohren, Ventilen und Verbindungsteilen sowie als Blech verwendet werden. Seine besonderen Eigenschaften erhält der Alloy 617 B occ aus drei Gründen: Er wird im Vakuum er- und umgeschmolzen, wodurch eine hohe Reinheit erzielt wird. Dann enthält der Werkstoff eine minimale Menge des Elements Bor, dessen Gehalt genau definiert und optimal eingestellt werden muss. Zum Dritten werden die Gehalte an Molybdän und Kohlenstoff optimiert, um bei gleichbleibender Festigkeit die Schweißbarkeit zu verbessern. Die Eigenschaften dieses neuen Hochleistungs-Werkstoffs werden seit 2012 parallel zu weiteren Laboruntersuchungen in Versuchsanlagen erprobt.

2.2.3 Coatings, weitere Superlegierungen und intermetallische Phasen

Bereits in den frühen 70er Jahren begann man, mit Coatings, d.h. Beschichtungen vorhandener Materialien, zu arbeiten und konnte dadurch ganz neue Temperatur- und Korrosionsbeständigkeiten erreichen. So findet man auch heute noch in der ersten Stufe der Hochdruckturbine von Gasturbinen keramische Coatings, die auf die einkristallinen Schaufeln aufgetragen sind, da nur diese den hohen Gastemperaturen von mehr als 1000 °C über einen längeren Zeitraum standhalten.

Wesentlich für die Materialeigenschaften sind die Applikationsmethoden. Hier bedeutete die Entwicklung vom Plasmasprayverfahren zum EB-PVD-Verfahren (electron beam – physical-vapour-deposition, Gasphasenabscheideverfahren mit Elektronenstrahl-Verdampfungstechnik) höhere Dehnungstoleranzen im thermisch-zyklischen Bereich. Bei diesem Verfahren wird der Beschichtungsstoff direkt in den gasförmigen Zustand überführt und kondensiert unter Hochvakuum auf der Oberfläche des Bauteils. Ein Elektronenstrahl wird auf das feste Schichtmaterial gerichtet (target) und bei entstehenden 4000 °C werden selbst Wolfram oder keramische Materialien verdampft. Da Beschichtungen für die in dieser Arbeit betrachteten Komponenten keine Rolle spielen, soll nachfolgend der Fokus ausschließlich auf den metallischen Werkstoffen liegen.

Eine Problematik bei der Entwicklung weiterer "Superlegierungen", also komplexer Legierungskompositionen für den Hochtemperatureinsatz, liegt in der Auswahl der Legierungskomponenten. So sind Werkstoffe, wie z. B. Kobalt, Molybdän oder Niob auf Grund ihrer Eigenschaften festigkeitssteigernd, verschlechtern aber die Oxidationsbeständigkeit. Jeder Vorteil, der durch den Einsatz eines neuen Elements gewonnen wird, wird in der Regel durch einen Nachteil an anderer Stelle erkaufte. Dass der Begriff des "Erkaufens" durchaus wörtlich zu nehmen ist, zeigt sich am Beispiel Rhenium, welches in den Jahren 2006 bis 2009 auf einen Handelswert von zeitweilig

7.000 € je kg anstieg. Zum Vergleich schwankte der Preis für Nickel in den letzten 5 Jahren zwischen 7 und 25 € je kg (siehe Abbildung 2-4) und der Stahlpreis bewegt sich zwischen 200 und 500 € je Tonne.

In diesem Umfeld liegen für zukünftige Hochtemperaturanwendungen noch interessante Potenziale, was aber in der aktuellen Vorgehensweise für diese Arbeit keine Relevanz hat. Allerdings ist der Austausch von Werkstoffen durch das Einsetzen anderer Werkstoffdaten problemlos möglich. Damit können auch zu erwartende zukünftige Neuentwicklungen in die Wirtschaftlichkeitsberechnungen mit einfließen.

2.3 Geeignete Werkstoffe für den Kraftwerksbau

Die wesentlichen Kriterien zur Werkstoffauswahl werden durch die im Kraftwerk geltenden Rahmenbedingungen Druck und Temperatur gegeben. Diese haben unmittelbaren Einfluss auf das Material und die Geometrie der zu betrachtenden Komponenten, im Wesentlichen die Wanddicke. Natürlich spielt auch die Korrosionsbeständigkeit eine große Rolle. Hierbei ist das bzw. sind die einflussnehmenden Medien entscheidend. So müssen die rauchgasbeaufschlagten Rohrleitungen im Inneren des Kessels deutlich anderen Anforderungen genügen, als die z. B. außerhalb des Brennkessels liegenden Sammler. Auch die Rauchgaszusammensetzung kann höchst unterschiedlich sein. So ist in einer Müllverbrennungsanlage das Rauchgas deutlich aggressiver als in einem kohle- oder gasbefeuerten Kessel. Aus den Anforderungen an die jeweilige Kraftwerkskomponente formuliert das Regelwerk die Mindestanforderungen z. B. an die Berechnung der Wandstärken unter Berücksichtigung der auftretenden Spannungen und der Auslegungsdauer. Mit verfügbaren Werkstoffdatenblättern lassen sich dann für den jeweiligen Werkstoff die erforderlichen Baugrößen ermitteln oder es lässt sich prüfen, ob ein Werkstoff überhaupt die gemäß Regelwerk definierten Vorgaben erfüllt.

Im vorliegenden Fall werden die Frischdampfaustrittssammler betrachtet, die zwar dem Kessel zugeordnet werden, jedoch außerhalb des eigentlichen Feuerraums liegen, und in der Regel den höchsten Temperaturen und Drücken ausgesetzt sind. Das hat zur Folge, dass diese Bauteile zu denen mit den höchsten Wanddicken gehören. Die im Bauteil entstehenden Spannungen ergeben sich im Wesentlichen durch den Temperaturübergang des Mediums Dampf durch die Wand des Bauteils hin zur Isolation auf der Außenseite des Bauteils. Die Oxidationsbeständigkeit spielt bisher in diesem Zusammenhang nur eine untergeordnete Rolle, da davon auszugehen ist, dass sich ausschließlich das Medium Dampf im Inneren des Sammlers befindet.

Ebenfalls zur Auswahl entscheidend ist die Lebensdauererwartung, die an das Bauteil gestellt wird. In der Regel werden Kraftwerke heute für einen über mehrere Jahrzehnte andauernden Betrieb ausgelegt. Daraus ergibt sich die Anforderung an Untersuchungen über 100.000 oder sogar 200.000 Stunden, in denen der Werkstoff den Druck- und Temperaturbedingungen des Kraftwerksbetriebs ausgesetzt wird. Die aus diesen Beobachtungen resultierenden Zeitstandwerte bilden die Basis der aus dem Werkstoffdatenblatt abzulesenden Eignung des Werkstoffs für die

jeweilige Anwendung. Bei der Ermittlung der Wanddicke gemäß dem geltenden Regelwerk werden fehlende Langzeituntersuchungen durch vorgegebene Sicherheitsaufschläge kompensiert.

Während diese Langzeitauslegung für hohe Betriebszeiten in der Vergangenheit insbesondere für die Kohlekraftwerke wesentlich war, findet genau hier aktuell eine Veränderung der Anforderungen statt, auf die im Kapitel 3.1 noch einmal genauer eingegangen wird. Kohlekraftwerke wurden bisher für den sogenannten Grundlastbetrieb ausgelegt. Zukünftig ist aber davon auszugehen, dass auch die Kohlekraftwerke deutlich geringere Laufzeiten aufweisen werden, so dass ggf. auch eine Auslegung auf 100.000 Stunden ausreicht. Dafür werden jedoch deutlich mehr Lastzyklen über die Gesamtlebensdauer des Blockes gefahren, was dann wiederum für die eingesetzten Komponenten zu einem höheren Lebensdauerverbrauch führt. Dieser Umstand muss nun ebenfalls in der Werkstoffauswahl berücksichtigt werden.

Die nachfolgende Aufstellung (Tabelle 2-3)⁴¹ gibt eine Übersicht über die heute typischerweise in thermischen Kraftwerken eingesetzten Werkstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Einsatzort.

Einsatzort → Temperatur-Bereich ↓	Rohrleitungen außerhalb des Feuerraums	Überhitzerrohre innerhalb des Feuerraums	Austrittssammler
bis 440 °C	St 35.8 St 45.8 16Mo3	10CrMo9-10 16Mo3	
bis 550 °C	13CrMo4-5 10CrMo9-10	X20CrMoV11-1 X6CrNiMoN17-12-2 T23 und T24	13CrMo4-5 10CrMo9-10 X20CrMoV11-1
bis 600 °C	X20CrMoV11-1 X10CrMoVNb9-1 X10CrWMoVNb9-2	Super 304H DMV 310 N X6CrNiMoN17-12-2	X20CrMoV11-1 X10CrMoVNb9-1 X10CrWMoVNb9-2
bis 650 °C	X10CrWMoVNb 9-2	Alloy 617	X10CrWMoVNb9-2
über 650 °C		Alloy 617 Alloy C263	Alloy 617 Alloy C263

Tabelle 2-3: Typische im Kraftwerksbau eingesetzte Werkstoffe

In der Industrie nach wie vor weit verbreitete warmfeste Stähle für den Temperaturbereich 400 bis 500 °C sind der 13CrMo4-5 oder der 10CrMo9-10. Charakteristisch für diese Werkstoffe ist das ferritische Grundgefüge also eine kubisch-raumzentrierte Anordnung. Allerdings weisen nur die CrMo- oder CrMoV-Stähle aus der Gruppe der ferritischen Stähle eine ausreichende Zeitstandfestigkeit oberhalb von 500 °C auf. Entscheidend für diese Stähle ist deren Kriechfestigkeit, die aus der Mischkristallhärtung durch die Elemente Mo, Mn, V, Si und Cr resultiert. Bei Temperaturen oberhalb von 600 °C werden austenitische Stähle oder Nickelbasislegierungen eingesetzt.

Mitte der 90er Jahre lag die Grenze für im Kraftwerk zu realisierende Dampfdrücke zwischen 270 und 290 bar und Frischdampftemperaturen bis 585 °C. Der dafür eingesetzte Stahl war der P91, der auch heute noch in vielen Kraftwerken zu finden ist. Dieser martensitische Stahl, dessen Struktur im Kapitel 2.2.1 ausführlich erläutert wurde, findet heute bereits an vielen Stellen seine Verwendung als Ersatzwerkstoff für klassische ferritische Stähle. Er zeichnet sich durch deutlich bessere Festigkeits- und Zeitstandwerte aus und erlaubt bereits heute Komponenten im Austausch mit geringeren Wandstärken herzustellen.

Neben den hohen Zeitstandwerten, die insbesondere die Nickelbasis-Legierungen auszeichnen, spielt die Verarbeitbarkeit des Werkstoffs eine wesentliche Rolle, wenn es um den Einsatz im Kraftwerksbau geht. Das gilt umso mehr, wenn im Rahmen von Retrofitmaßnahmen vorhandene Komponenten ausgetauscht und durch neue Komponenten mit anderen Werkstoffen ersetzt werden sollen. Für den Alloy 617 liegt dazu umfangreiches Wissen aus dem Einsatz im Bereich des Reaktorbaus (Hochtemperaturreaktor) vor. Neben der rein praktischen Verarbeitbarkeit bestehen für diesen Werkstoff auch bessere Aussichten, eine fachgerechte Verarbeitung zu gewährleisten. Durch Einschränkung der Analyse und das Hinzulegieren von Bor (Alloy 617B) konnte eine weitere deutliche Verbesserung der Zeitstandwerte erzielt werden. Bei den durchgeführten Zeitstandversuchen wurden im Temperaturbereich von 600 bis 750 °C deutlich höhere Mittelwerte der 100.000 h Zeitstandfestigkeit als im bisherigen VdTÜV-Datenblatt ermittelt.⁴²

Die Zeitstandfestigkeit als wesentliches Auswahlkriterium für den geeigneten Werkstoff gilt nicht nur für die Anwendung im 700 °C-Kraftwerk. Der Schmelztemperaturbereich des Alloy 617 liegt zwischen 1330 °C und 1380 °C.³⁸ Die Grenztemperatur für den Bereich der Zeitstandbetrachtung ergibt sich durch den Faktor 0,4, woraus eine Grenztemperatur von 532 °C resultiert. Das bedeutet, dass bereits bei der Anwendung im heutigen Kraftwerk eine Zeitstandbetrachtung erfolgen muss. Allerdings sind die Werte für die Zeitstandfestigkeit bei 600 °C selbst bei 100.000h mit über 200 N/mm² weit oberhalb der Werte der klassischen Hochtemperaturwerkstoffe (z. B. des 10CrMo9-10 mit 35 N/mm²) und doppelt so hoch wie beim P91 oder P92. Bei allen zur Verwendung in Frage kommenden Werkstoffen ist die Betriebstemperatur maßgeblich dafür, ob die für die Berechnung der Mindestwanddicke zu ermittelnde zulässige Spannung aus der 0,2 % Dehn- bzw. Streckgrenze oder der Zugfestigkeit (also den zeitunabhängigen Größen) bestimmt wird. Oder ob die zeitabhängigen Größen, also die 1%-Zeitdehngrenze (d.h. die auf den Ausgangsquerschnitt bezogene Spannung, die nach der angegebenen Anzahl Stunden zu einer bleibenden Dehnung von 1% führt) oder die Zeitstandfestigkeit den zugehörigen Spannungsgrenzwert bestimmen. Der Übergangspunkt dieser beiden Kurven wird in der nachfolgenden Grafik (Abbildung 2-16)¹⁹ noch einmal veranschaulicht:

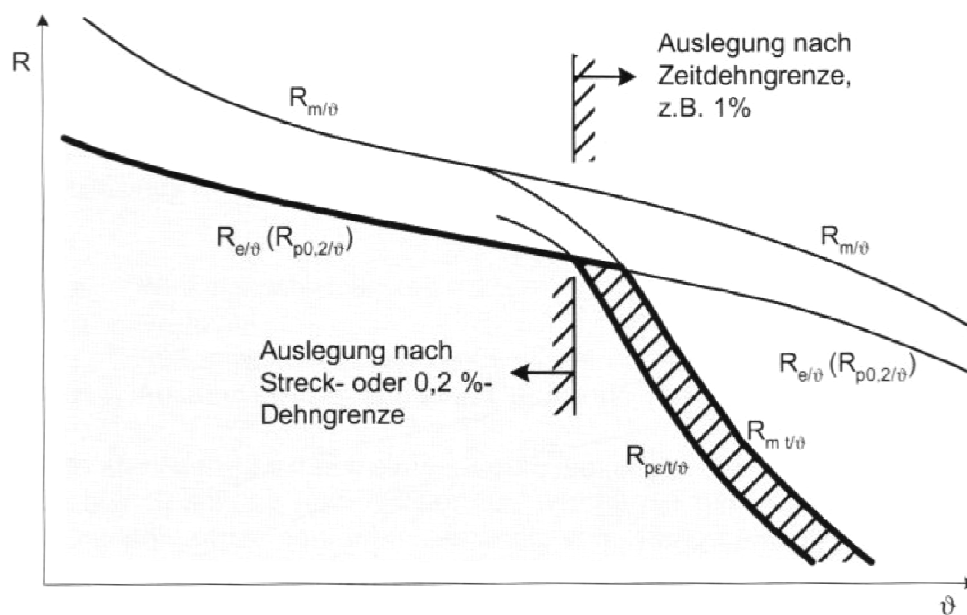


Abbildung 2-16: Schematisches Festigkeitsschaubild für tiefe und hohe Temperaturen

Bei der Auslegung der Komponenten in neuen Werkstoffen muss auch die jeweilige Art der Verbindung berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass z. B. bei dem Einsatz eines Sammlers mit einem austenitischen Werkstoff, eingefügt zwischen Rohre aus einem martensitischen Chromstahl, Mischverbindungen an den Schweißnähten entstehen. Bei diesen ist zu beachten, dass es unterschiedliche Kriechfestigkeiten in dem martensitischen Rohr, der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht des Rohres (siehe auch Abbildung 2-24), dem Nickelbasisschweißgut und dem austenitischen Grundwerkstoff des Sammlers gibt. Die Temperatúrausdehnungskoeffizienten sind ebenfalls unterschiedlich und es sind Kohlenstoffdiffusionsvorgänge vom martensitischen Werkstoff in den Austenit bzw. in das Nickelbasisschweißgut zu berücksichtigen. Für die Werkstoffkombination X10CrMoVNb9-1 - NiCr20Nb - X3CrNiMoN17-13 konnte der rechnerische Nachweis über Lebensdauern von 200.000 Stunden erbracht werden.⁴³ Auch Langzeituntersuchungen mit dem Alloy 617 und dem Incoloy 800H haben gezeigt, dass selbst nach jahrelangem Betrieb kaum signifikante Korrosionsbefunde vorlagen. Allerdings findet bei dem Alloy 617 eine deutliche Zunahme der Härte statt, die in der Gefügeänderung des Materials begründet liegt.⁴⁴

2.4 Konstruktive Gestaltungsspielräume und -zwänge bei der Verwendung der Werkstoffe

Bevor ein geeigneter Werkstoff ausgewählt werden kann, müssen die Betriebsbedingungen (Auslegung) des Kraftwerks und damit die für das jeweilige Bauteil zu erwartenden Belastungen mit den Größen Zeit, Druck und Temperatur genau definiert werden. Mit Hilfe des Regelwerks kann dann z. B. auf Basis der Auslegungsdauer (100.000, 150.000 oder 200.000 Stunden) die Wanddicke einer Komponente für einen bestimmten Werkstoff ermittelt werden. Diese Auslegungsdauer steht stellvertretend für die zu erwartende Lebensdauer der Komponente im Kraftwerk. Hier wurde in der Vergangenheit stets auf 200.000 Stunden ausgelegt, was einer Lebensdauer von etwa 40 Jahren entspricht. Das geschah unter der Annahme, dass die

Kohlekraftwerke (insbesondere die Braunkohlekraftwerke) als Grundlastkraftwerke die meiste Zeit im Nennlastbetrieb arbeiten. Die Lastzyklen, d.h. die Starts und Wechsel von Minimal- auf Maximallast spielten in der Vergangenheit nur eine untergeordnete Rolle. Die bereits in Kap. 2.1 beschriebenen Veränderungen im Kraftwerkseinsatz führen nun zu der Erwartung einer deutlich geringeren Gesamtbetriebszeit bei einer gleichzeitig stark ansteigenden Anzahl von An- und Abfahrten und damit Lastzyklen.

Im Kapitel 2.2 wurde bereits erläutert, warum einige Werkstoffe aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften, ihrer Schweißbarkeit oder ihrer Herstellungs- und Aushärtungsprozesse und der daraus resultierenden Weiterverarbeitbarkeit nicht oder nur mit Einschränkungen verwendet werden können. Mit den erhöhten Anforderungen an Druck und Temperatur können sich durch die Anwendung des Regelwerks neue Probleme ergeben. So ergab eine Dimensionierung der Frischdampfaustrittssammler für die BoA-Blöcke des Kraftwerks Neurath für 200.000 Stunden eine Mindestwanddicke von über 100 mm und wäre damit auf den vorhandenen Maschinen nicht herstellbar gewesen. Die Berechnungen auf Basis der Finite-Elemente-Methode ergaben eine deutlich geringere Wanddicke von 85 mm. Die Methodik und deren Ergebnisse wurden durch die zulässige Überwachungsstelle (ZÜS) geprüft und erhielten die Zulassung zum operativen Betrieb.

Für den Einbau der Komponente ist auch zu beachten, welche weiteren Werkstoffe in angrenzenden Komponenten verwendet werden. So sind Übergänge von ferritisch-martensitischen Werkstoffen zu austenitischen Werkstoffen immer mit besonderen Anforderungen, z. B. hinsichtlich der Fügeverfahren, verbunden (siehe auch Kap. 2.6).

Bestimmend für die letztendliche Verwendung der Werkstoffe sind die in den Werkstoffdatenblättern angegebenen Werkstoffeigenschaften. Hierzu sind unterschiedlichste Datenblätter der jeweiligen Werkstoffe im Umlauf. Neben den "offiziellen" Werkstoffdatenblättern des VdTÜV bietet fast jeder Hersteller auf seiner Internetseite Werkstoffdatenblätter zu den von ihm angebotenen Werkstoffen zum Download an. Insbesondere bei den neueren Materialien können die Daten zum Teil erheblich voneinander abweichen. Für die Auslegung der Komponenten können auch Ergebnisse neuerer Untersuchungen verwendet werden. So wurden z. B. im Rahmen der RWE Studie 2012⁴⁵, anstelle der Daten des VdTÜV-Datenblatts von 2002, die verbesserten Zeitstandfestigkeitswerte einer Bewertung des TÜV Rheinland aus dem Jahre 2003 verwendet. Fehlen Datenblätter solcher unabhängigen Institutionen, dann wird, wie wiederum im Falle der RWE Studie 2012 beim Alloy C263, auf die Herstellerdatenblätter zurückgegriffen, in diesem Fall auf das Datenblatt von Special Metals. Aufgrund der Unterschiede sind im Berechnungsteil alle Werkstoffdaten in der Tabelle mit Ihrer jeweiligen Quelle im Kommentarfeld hinterlegt. Sollten also neue Erkenntnisse bzgl. eines Werkstoffs gewonnen werden oder ein anderes Datenblatt zugrunde gelegt werden, so sind nur die Daten im Werkstoffdatenblatt anzupassen. Die Berechnungen können dann ohne weitere Veränderungen anderer Worksheets auf Basis der neuen Daten durchgeführt werden.

2.5 Die europäische Normung als Basis zur Auslegung von Kraftwerkskomponenten

In diesem Kapitel wird die normative Basis zu den durchgeführten Berechnungen erläutert. Beginnend mit einigen grundlegenden Betrachtungen zu den bestehenden Standards, nach denen sich Kraftwerks- und Komponentenhersteller zu richten haben, werden die für die Bauteildimensionierung relevanten Regelwerke und die daraus entnommenen Gleichungen erläutert.

2.5.1 Grundsätzliche Aussagen zur Normung

Die technische Normung ist nicht rechtsverbindlich, da die Gremien der privaten Regelsetzer nicht demokratisch legitimiert sind. Insofern bleibt bei der Beschaffung ein Ermessensspielraum, den die Betreiber und Hersteller selbst gestalten können.

Für den Bereich des Betriebs gelten die Arbeitsschutzrichtlinien, die als Mindestanforderungen die Basis bildeten und dementsprechend bei der nationalen Umsetzung in ihrem Umfang und ihren Anforderungen erweitert werden konnten. Diese Anforderungen wurden für Deutschland - unter anderem mit der Erstellung der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) und deren Inkrafttreten zum 1.1.2003 - umgesetzt. Die daraus resultierenden Änderungen im technischen Regelwerk (TRBS - Technische Regel für Betriebssicherheit) gehen mit einem neuen Ermessens- und Gestaltungsspielraum für den Anlagenbetreiber einher, und sollen die bewährten, bisher gültigen technischen Regeln (wie z. B. TRD, TRB, TRR) ersetzen.⁴⁶ Die betrieblichen Vorschriften der bisherigen Technischen Regeln behalten ihre Gültigkeit jedoch so lange, bis diese durch neue TRBS ersetzt werden. Viele der Inhalte dieser Regelwerke wurden in die Europäischen Normen mit übernommen. Daher wird für die nachfolgenden Betrachtungen der Sammler nicht mehr die alte TRD 203 (Fertigung, Prüfung und Herstellung für nahtlose Sammler und ähnliche Hohlkörper) verwendet, sondern die allgemein anerkannte EN 12952, auf deren Angaben die meisten Auslegungen heutiger Kraftwerk beruhen.

So findet die europäische Druckgeräterichtlinie 97/23/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. Mai 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Druckgeräte in Deutschland ihre Umsetzung in der 14. Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (14. GPSGV seit 3.10.2002 in Kraft). Die Entstehung des europäischen Regelwerks wird in der nachfolgenden Grafik (Abbildung 2-17)⁴⁷ noch einmal veranschaulicht. Die orangefarbenen Pfeile markieren die für diese Arbeit wesentlichen Regelwerke.

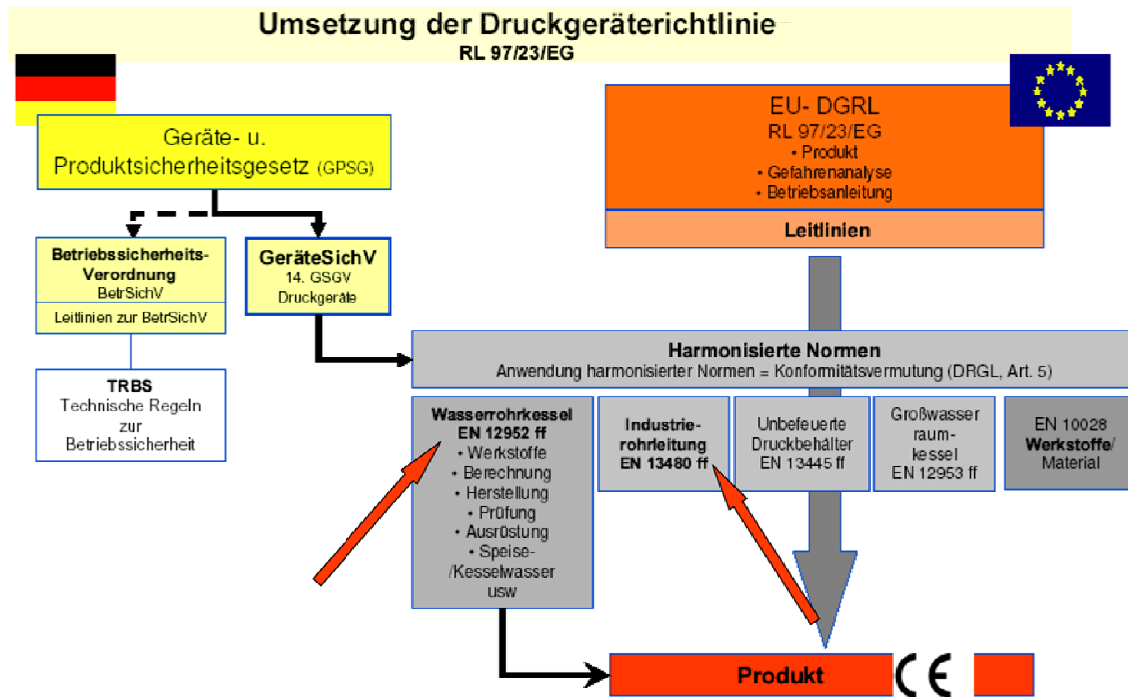


Abbildung 2-17: Umsetzung der Druckgeräterichtlinie in europäisches Regelwerk

Die Leitlinien zur Druckgeräterichtlinie sind unter Beteiligung der Mitgliedstaaten erarbeitet worden. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Mitgliedstaaten auch bereit sind, die Anwendung der Leitlinien erforderlichenfalls mit den Mitteln des Verwaltungsrechtes durchzusetzen. Bis zu den diesbezüglichen Entscheidungen des Europäischen Gerichtshofes sind die Leitlinien jedoch nicht rechtsverbindlich.

Diese Druckgeräterichtlinie bezieht sich auf das erstmalige in Verkehr bringen und die Inbetriebnahme der Produkte. Sie gilt nicht für einen Zusammenbau von Druckgeräten, der auf dem Gelände des Anwenders (Betreibers), beispielsweise in Industrieanlagen und unter seiner Verantwortung erfolgt. Die Definition einer Baugruppe in Artikel 1 Abs. 2.1.5 ist auf Baugruppen beschränkt, die von einem Hersteller zusammgebaut werden. Wenn Druckgeräte oder Baugruppen vom Betreiber zusammgebaut werden, wird der Begriff „Anlage“ verwendet, um Verwechslungen zu vermeiden. Im hier betrachteten Fall des Austauschs vorhandener Sammler erfolgt somit der Austausch einer Baugruppe (Sammler mit angeschweißten Nippeln) innerhalb einer bestehenden Anlage (Kessel).⁴⁸

Bei der Herstellung von Druckgeräten müssen Werkstoffe verwendet werden, die als sicher gelten. Bestehen hierfür keine harmonisierten Normen, so ist es zweckmäßig, die Merkmale von Werkstoffen festzulegen, die für eine wiederholte Verwendung bestimmt sind. Dies erfolgt in Form europäischer Werkstoffzulassungen, die von einer der speziell hierfür benannten Stellen erteilt werden. Bei Werkstoffen, die einer solchen Zulassung entsprechen, ist davon auszugehen, dass sie die grundlegenden Anforderungen dieser Richtlinie erfüllen.⁴⁹ Jedes Druckgerät muss vor dem Inverkehrbringen einer Konformitätsbewertung unterzogen werden.⁵⁰ Ausschlaggebend sind

hierbei das Produkt aus Volumen und Druck und die Gruppe der Fluide, für die das Druckgerät bestimmt ist.⁵¹ Zum Nachweis der Belastbarkeit des betreffenden Druckgerätes müssen die Berechnungstemperaturen angemessene Sicherheitsmargen aufweisen. Die zur Herstellung von Druckgeräten verwendeten Werkstoffe müssen, falls sie nicht ausgetauscht werden sollen, für die gesamte vorgesehene Lebensdauer geeignet sein. Die zulässige Elastizitätsgrenze und die zulässige allgemeine Membranspannung dürfen, speziell bei austenitischen Stählen, bestimmte Werte nicht übersteigen.⁵² Für in Serie gefertigte Druckbehälter gilt die vereinfachte Überwachung und Prüfung im Rahmen einer Musterzulassung.⁵³ Die hierzu geltenden Rahmenbedingungen werden ausführlich im Anhang A der EN 13445-5:2010-02 beschrieben.

Auf Basis der vom Betreiber ausgewählten Bausteine ist eine effektive Gestaltung der Prüfungen der Komponenten von Dampfkesselanlagen und Leitungen unter innerem Überdruck bei Ausnutzung des gesamten Ermessensspielraums einschließlich einer Prüffristverlängerung (vgl. VGB-Richtlinie R 104) möglich.⁵⁴ Zukünftig wird die Sachverständigenorganisation durch die zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS) ersetzt. Damit gewinnt die Kenntnis und Dokumentation des Anlagenzustandes für die Kraftwerksbetreiber eine größere Bedeutung als bisher.

Ergänzt werden die Normen durch die VGB-Richtlinien (Verband der Großkraftwerksbetreiber). Diese Richtlinien beschreiben die praktische Umsetzbarkeit der Normung bei gleichzeitiger Einbeziehung der Erfahrungen der Anlagenbauer und der Kraftwerksbetreiber im realen Betrieb der Anlagen.

Die bereits benannten Werkstoffe werden in der Norm systematisch festgelegten Werkstoffgruppen zugeordnet. Die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Gruppe wird über den Basiswerkstoff und die Legierungsanteile festgelegt. Die Definitionen der Druckgeräterichtlinien beziehen sich dann vielfach nicht auf einzelne Werkstoffe, sondern auf bestimmte Werkstoffgruppen. Diese Einteilung der EN 13445-2 ist auf den nachfolgenden Seiten (Tabelle 2-4, Teil 1 und 2)⁵⁵ als Abdruck aus dem Regelwerk abgebildet:

Metallische Werkstoffe für Druckgeräte — Systematische Einteilung und in Europäischen Normen enthaltene Stähle

A.1 Systematische Einteilung von metallischen Werkstoffen für Druckgeräte

Die Einteilung der Stähle in Gruppen ist in Tabelle A.1-1 enthalten. Die Zahlen der Gruppe 1 und 11 beziehen sich auf die Schmelzenanalyse der Werkstoffe. Die Zahlen in den Gruppen 4 bis 10 basieren auf dem Gehalt des Elementes, das in der Legierungsbezeichnung verwendet wird.

Tabelle A.1-1 — Systematische Einteilung von metallischen Werkstoffen für Druckgeräte nach CR ISO 15608:2000

Gruppe	Untergruppe	Stahlsorte
1		Stähle mit einer festgelegten Mindest-Streckgrenze $R_{eH} \leq 460 \text{ N/mm}^2$ ^a und folgenden Analysenwerten in %: C $\leq 0,25$ Si $\leq 0,60$ Mn $\leq 1,70$ Mo $\leq 0,70$ ^b S $\leq 0,045$ P $\leq 0,045$ Cu $\leq 0,40$ ^b Ni $\leq 0,5$ ^b Cr $\leq 0,3$ (0,4 für Gussstücke) ^b Nb $\leq 0,05$ V $\leq 0,12$ ^b Ti $\leq 0,05$
	1.1	Stähle mit einer festgelegten Mindest-Streckgrenze $R_{eH} \leq 275 \text{ N/mm}^2$
	1.2	Stähle mit einer festgelegten Mindest-Streckgrenze von $275 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 360 \text{ N/mm}^2$
	1.3	Normalgeglühte Feinkornstähle mit einer festgelegten Mindest-Streckgrenze von $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$
	1.4	Stähle mit verbesserter Korrosionsbeständigkeit gegen Luftsauerstoff, deren chemische Zusammensetzung die Anforderungen an die einzelnen unter 1 aufgeführten Elemente überschreiten darf
2		Thermomechanisch behandelte Feinkornstähle und Stahlgussorten mit einer festgelegten Mindest-Streckgrenze von $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$
	2.1	Thermomechanisch behandelte Feinkornstähle und Stahlgussorten mit einer festgelegten Mindest-Streckgrenze von $360 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 460 \text{ N/mm}^2$
	2.2	Thermomechanisch behandelte Feinkornstähle und Stahlgussorten mit einer festgelegten Mindest-Streckgrenze von $R_{eH} > 460 \text{ N/mm}^2$
3		Vergütete und ausscheidungsgehärtete Stähle, ausgenommen nichtrostende Stähle, mit einer festgelegten Mindest-Streckgrenze $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$
	3.1	Vergütete Stähle mit einer festgelegten Mindest-Streckgrenze von $360 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 690 \text{ N/mm}^2$
	3.2	Vergütete Stähle mit einer festgelegten Mindest-Streckgrenze von $R_{eH} > 690 \text{ N/mm}^2$
	3.3	Ausscheidungsgehärtete Stähle, ausgenommen nichtrostende Stähle

Tabelle 2-4 (Teil 1): Systematische Einteilung metallischer Werkstoffe für Druckgeräte

Gruppe	Untergruppe	Stahlsorte
4		Cr-Mo-(Ni)-Stähle mit niedrigem Vanadiumgehalt, mit $Mo \leq 0,7 \%$ und $V \leq 0,1 \%$
	4.1	Stähle mit $Cr \leq 0,3 \%$ und $Ni \leq 0,7 \%$
	4.2	Stähle mit $Cr \leq 0,7 \%$ und $Ni \leq 1,5 \%$
5		Cr-Mo-Stähle ohne Vanadium mit $C \leq 0,35 \%$ ^c
	5.1	Stähle mit $0,75 \% \leq Cr \leq 1,5 \%$ und $Mo \leq 0,7 \%$
	5.2	Stähle mit $1,5 \% < Cr \leq 3,5 \%$ und $0,7 < Mo \leq 1,2 \%$
	5.3	Stähle mit $3,5 \% < Cr \leq 7,0 \%$ und $0,4 < Mo \leq 0,7 \%$
	5.4	Stähle mit $7,0 \% < Cr \leq 10 \%$ und $0,7 < Mo \leq 1,2 \%$
6		Cr-Mo-(Ni)-Stähle mit hohem Vanadiumgehalt
	6.1	Stähle mit $0,3 \% \leq Cr \leq 0,75 \%$, $Mo \leq 0,7 \%$ und $V \leq 0,35 \%$
	6.2	Stähle mit $0,75 \% < Cr \leq 3,5 \%$, $0,7 \% < Mo \leq 1,2 \%$ und $V \leq 0,35 \%$
	6.3	Stähle mit $3,5 \% < Cr \leq 7,0 \%$, $Mo \leq 0,7 \%$ und $0,45 \% \leq V \leq 0,55 \%$
	6.4	Stähle mit $7,0 \% < Cr \leq 12,5 \%$, $0,7 \% < Mo \leq 1,2 \%$ und $V \leq 0,35 \%$
7		Ferritische, martensitische oder ausscheidungsgehärtete nichtrostende Stähle mit $C \leq 0,35 \%$ und $10,5 \% \leq Cr \leq 30 \%$
	7.1	Ferritische nichtrostende Stähle
	7.2	Martensitische nichtrostende Stähle
	7.3	Ausscheidungsgehärtete nichtrostende Stähle
8		Austenitische Stähle
	8.1	Austenitische nichtrostende Stähle mit $Cr \leq 19 \%$
	8.2	Austenitische nichtrostende Stähle mit $Cr > 19 \%$
	8.3	Austenitische nichtrostende Manganstähle mit $4 \% < Mn \leq 12 \%$
9		Nickellegierte Stähle mit $Ni \leq 10 \%$
	9.1	Nickellegierte Stähle mit $Ni \leq 3 \%$
	9.2	Nickellegierte Stähle mit $3,0 \% < Ni \leq 8 \%$
	9.3	Nickellegierte Stähle mit $8,0 \% < Ni \leq 10 \%$
10		Austenitisch-ferritische nichtrostende Stähle (Duplexstähle)
	10.1	Austenitisch-ferritische nichtrostende Stähle mit $Cr \leq 24 \%$
	10.2	Austenitisch-ferritische nichtrostende Stähle mit $Cr > 24 \%$
11		Stähle, die von der Gruppe 1 ^d erfasst werden, ausgenommen $0,25 \% < C \leq 0,5 \%$
	11.1	Stähle nach 11 mit $0,25 \% < C \leq 0,35 \%$
	11.2	Stähle nach 11 mit $0,35 \% < C \leq 0,5 \%$
ANMERKUNG Andere Werkstoffe als Stahl siehe Abschnitt 1.		
^a In Übereinstimmung mit der Festlegung in den Stahlnormen kann R_{eH} durch $R_{p0,2}$ bzw. $R_{p0,5}$ ersetzt werden. ^b Ein höherer Wert ist zulässig, wenn $Cr + Mo + Ni + Cu + V \leq 0,75 \%$. ^c „Ohne Vanadium“ heißt: dem Werkstoff nicht vorsätzlich beigefügt. ^d Ein höherer Wert ist zulässig, wenn $Cr + Mo + Ni + Cu + V \leq 1 \%$.		

Tabelle 2-4 (Teil 2): Systematische Einteilung metallischer Werkstoffe für Druckgeräte

Bei der Auswahl der Werkstoffe für die Berechnungen erfolgt eine Zuordnung der einzelnen Werkstoffe zu den jeweiligen Stahlgruppen.

Neben der Eingruppierung der Stahlsorten unterscheidet die Europäische Norm EN 12952-1 auch die Nutzer- und Herstellergruppen nach der folgenden Einteilung:

Käufer

Person oder Organisation, die eine fertig hergestellte Dampfkesselanlage oder Teile vom Hersteller kauft.

Hersteller

Person oder Organisation, die für die Auslegung, Fertigung, Prüfung und ggf. die Aufstellung von Druckgeräten und deren Übereinstimmung mit den Anforderungen dieser Norm verantwortlich ist, ungeachtet dessen, ob sie oder ein Unterauftragnehmer die Arbeiten ausführt.

Konstrukteur

Person oder Organisation, die im Auftrag des Herstellers die Konstruktion der Dampfkesselanlage durchführt. Der Konstrukteur legt die Form, die Abmessungen und die Wanddicke der Bauteile des Dampfkessels fest, wählt die Werkstoffe aus und beschreibt im Einzelnen die Verfahren der Herstellung und Prüfung.

Werkstofflieferant

Person oder Organisation, die nicht Werkstoffhersteller ist und die Werkstoffe oder Halbzeuge liefert, die für die Herstellung der Dampfkesselanlage oder ihrer Bauteile eingesetzt werden. Der Lieferant kann ein Händler oder direkt der Hersteller sein. Für die Konstruktion der Sammler wird der Werkstoff direkt vom Hersteller geliefert.

Werkstoffhersteller

Person oder Organisation, die Grundwerkstoffe für die Fertigung von Bauteilen der Dampfkesselanlage oder von genormten Fertigbauteilen herstellt.

Dieser Unterscheidung und der Verantwortung der Prozessbeteiligten folgend, wurden für diese Arbeit Partner aus jeder dieser Gruppen in die Bearbeitung und Zulieferung von Daten und Informationen mit eingebunden.

2.5.2 Zustandsüberwachung und Diagnostik im Zeitstandbereich

Die Komponenten eines Kraftwerks unterliegen je nach Druck, Temperatur und Betriebsweise einem Lebensdauerverbrauch, d. h. der Zustand ändert sich in Abhängigkeit von der Betriebsbeanspruchung über die Betriebszeit. Solange der eingesetzte Werkstoff im Temperaturbereich seiner Kurzzeitfestigkeit eingesetzt wird, ist eine solche Überwachung nicht erforderlich. Befindet er sich allerdings im Zeitstandbereich, gilt es, den Zustand während des Betriebs zu überwachen, damit Gefährdungen von Arbeitnehmern und Dritten durch ein Versagen von Komponenten vermieden werden. Unter dem Zustand wird die sich im Bauteil entwickelnde Schädigung verstanden, die zu einer Herabsetzung der Funktionsfähigkeit bis hin zum Versagen führt.

Unter dem Begriff Schädigung sind folgende Punkte zu verstehen:

- eine Änderung der Mikrostruktur, die im Zusammenhang mit der Herabsetzung der in der Auslegung verwendeten Werkstoffkennwerte einschließlich der Herabsetzung der Zähigkeit steht,
- die Ausbildung von Kriechporen, Mikrorissen und Rissen, die zur Änderung der lokalen Spannungssituation und damit zur Abweichung von der in der Auslegung angenommenen Beanspruchungssituation führt,
- Reaktionen des Werkstoffs mit der Umgebung (Korrosion, Oxidation), die zur örtlichen Schwächung (Wanddickenreduzierung, Rissbildungen) bzw. zur Abweichung von den in der Auslegung zugrunde gelegten Parametern (Temperatur, Gradienten) führt.

Unter Lebensdauerverbrauch wird – sofern keine zusätzlichen Erläuterungen gegeben werden – die lineare Akkumulation der rechnerischen Erschöpfung aus Kriechen und Ermüden verstanden. Diese ermöglicht den Vergleich mit der rechnerischen Lebensdauer der Auslegung. Die Zustandsüberwachung beinhaltet folgende Bausteine, die letztlich auch für eine Prüffristverlängerung maßgeblich sind:

- Auslegung und Berechnung,
- dokumentierte Qualität,
- Zustandsermittlung / Diagnostik im laufenden Betrieb,
- Zustandsermittlung / Diagnostik im Rahmen eines Stillstandes und
- Zustandsbewertung mit Maßnahmen u. a. zum Prüfkonzept.

Je genauer nun auf Basis dieser Bausteine sich der Zustand ermitteln lässt, desto präziser und effektiver lassen sich die Prüfumfänge und die Prüffristen für die wiederkehrenden Prüfungen planen.⁵⁶

Die Betriebszustände der in Abstimmung zwischen dem Betreiber der Anlage und der zuständigen Überwachungsstelle ausgewählten Komponenten sind in einer geeigneten Art und Weise durch die Erfassung geeigneter Betriebswerte zu speichern. Auf der Basis dieser Werte ist dann, je nach Art und Umfang der Datenerfassung, eine Aussage zu dem Lebensdauerverbrauch der jeweiligen Komponente im laufenden Betrieb möglich.

Folgende Belastungen und die damit verbundenen Schädigungsmechanismen werden in der nachfolgenden Übersicht (Tabelle 2-5)⁵⁶ beschrieben:

	Belastung / Schädigungsmechanismus	Mögliche Parameter
1	Statische Belastung / Kriechschädigung	Druck, Temperatur, Istabmessung, Werkstoffkennwerte
2	Instationäre Belastung / Ermüdung infolge Wechsellerschöpfung	Wandtemperaturdifferenz, Druck- und Temperaturgradienten, Istabmessung, Werkstoffkennwert, Anzahl Lastwechsel (Kalt-, Warm- und Heißstarts)
3	Zusatzkräfte aus der Betriebsweise (z. B. Temperaturschiefen, 2-Phasen-Strömung, Einspritzung, unzureichende Entwässerung)	Mediumtemperaturen, Oberflächenwandtemperaturen, Durchsätze und Temperaturen vom Einspritzwasser
4	Sonstige Zusatzkräfte (z. B. Lageänderungen, behinderte Wärmedehnung)	Kräfte an Festpunkten, Bewegungen von Hängern und Federn, Bewegungen der Kesselanlage
5	Medium / Oxidation, Erosion, Korrosion	Speisewasser, Brennstoffe

Tabelle 2-5: Belastungen und die mit der Belastung verbundenen Schädigungsmechanismen

Bei der Kriechschädigung in der statischen Belastung dominiert beim Übergangskriechen in der Werkstoffstruktur die Versetzungsbildung. Je mehr Versetzungen gebildet werden, desto geringer wird die Kriechgeschwindigkeit. An das Übergangskriechen schließt dann der Bereich des stationären Kriechens an, dieser wird "ingenieurmäßig" betrachtet. In diesem Bereich werden Versetzungen erzeugt und es werden welche vernichtet. Die Summe der Vorgänge befindet sich im Gleichgewicht. Beim tertiären Kriechen überwiegt die Entfestigung, d.h. es lösen sich dann die Versetzungen auf und die Versetzungsdichte nimmt mit der Zeit ab. Es kommt dann erst zur Porenbildung, diese verbinden sich zu Porenketten und diese führen letztendlich zur Rissbildung.

Die Erfassung des Kriechens und der Ermüdung (vergleiche Kapitel 2.3.1 und 2.4) ist ausführlich in der EN 12952, Teil 4, beschrieben. Diese Ermittlung ist umso genauer, je detaillierter die Temperatur- und Druckmesswerte erfasst und je genauer die Istabmessungen und die Istparameter der verwendeten Werkstoffe bekannt sind. Vorhandene Betriebsmessstellen können gemäß Regelwerk hierzu herangezogen werden, wenn deren Toleranzband für die Zustandsüberwachung der Anlage ausreichend ist (VGB-R506, Kap. 4.3.1, S.11).

In Anlehnung an die TRD beschreiben auch die VGB-Richtlinien die Vorgehensweisen zur Lebensdauerbestimmung bei Anlagen. Die EN 12952-4 ist vorzugsweise anzuwenden, wenn das entsprechende Druckgerät auch nach EN 12952 dimensioniert wurde. Bei der vorliegenden Arbeit basieren alle Berechnungen unmittelbar auf der Europäischen Norm, da diese allgemein anerkannt ist und die wesentlichen Merkmale des Regelwerks und der VGB Richtlinien enthält. Weitergehende Erläuterungen sind bei Interesse den VGB Richtlinien zu entnehmen.

Auf Basis dieser Daten erfolgt durch Experten des Betreibers und bei überwachungsbedürftigen Anlagen in Abstimmung mit der ZÜS eine Klassifizierung der zu prüfenden Komponenten nach Zustand und Risiko. Für die jeweilige Komponente werden dabei die jeweilige Zuverlässigkeit und Schadensanfälligkeit, das Gefährdungspotenzial und die Verfügbarkeitsrelevanz bewertet. Es gelten die nachfolgenden Definitionen:⁵⁶

- Unter **Zuverlässigkeit** wird die Sicherheit der Komponente gegen Versagen auf Basis von Betriebserfahrungen, Prozessbedingungen, Inspektionen, Berechnungen und Auslegungswerten verstanden. Bestimmend ist der Faktor, der die niedrigste Zuverlässigkeit zur Folge hat.
- Unter **Schadensanfälligkeit** wird die Eintrittswahrscheinlichkeit für das Versagen der Komponente auf Basis von angewandtem Regelwerk, Qualitätssicherungsmaßnahmen, Schadensstatistiken, Erkenntnissen zu Bauart und Werkstoffen verstanden.
- Unter **Gefährdung** werden die Auswirkungen auf Leben und Gesundheit von Menschen und der Umwelt im Versagensfall verstanden.
- Unter **Verfügbarkeit** werden die Auswirkungen des Ausfalls von Komponenten auf die Betriebsbereitschaft der Anlage verstanden.

2.5.3 Dimensionierung von druckbeaufschlagten Rohrleitungsbauteilen⁵⁷

Die Abschnitte 6 bis 11 der EN 13480-3 beschreiben die "Konstruktion nach Regeln" von Rohrleitungsbauteilen unterschiedlicher Geometrie für ruhende und wechselnde Beanspruchungen. Die Anforderungen der Abschnitte 6, 7, 8, 9 und 11 gelten für vorwiegend ruhende Beanspruchung. Es wird angenommen, dass es bei bis zu 1.000 Druckzyklen über die volle Schwankungsbreite nicht zu Ermüdungsschäden des betrachteten Rohrleitungsbauteils kommt.

Bei Bauteilen unter Wechselbeanspruchung (siehe Abschnitt 10 der EN 13480-3) ist gemäß Regelwerk die Geometrie des betrachteten Bauteils so zu wählen, dass Formen vermieden werden, bei denen hohe Spannungskonzentrationen entstehen. Ist eine größere Anzahl von Druckzyklen zu berücksichtigen, so gilt das im Kapitel 10.3 der EN 13480-3 beschriebene Bewertungsverfahren. Liegt eine Kombination aus erheblichen Temperaturgradienten über die gesamte Wanddicke und Druckschwankungen vor, so gilt das im Abschnitt 10.4 der Norm beschriebene Berechnungsverfahren. Hierauf basiert auch die Auswahl der Gleichungen im nächsten Kapitel. Mit Blick auf die prognostizierten Dynamikanforderungen werden alle Berechnungen in der Exceldatei auf dieser Basis und mit den entsprechenden Gleichungen durchgeführt.

Die wesentlichen bei der Dimensionierung von Rohrleitungen zu berücksichtigenden Lasten sind Druck und Temperatur. Im Einzelnen sind das:⁵⁷

- der Betriebsdruck (P_0), der unter dem max. zulässigen Druck (P_S) liegen muss,
- die Betriebstemperatur (T_0), die unter der max. zulässigen Temperatur (T_S) liegen muss,
- die Druck-Temperatur-Zustände. (Hierbei ist die zusammengehörige Kombination von Druck und Temperatur (P_0, T_0) zu betrachten, die die höchsten Belastungen im Rohrleitungssystem berücksichtigen, die in dem Rohrleitungssystem über längere Zeit vorherrschen können),
- der Berechnungsdruck (P_c), der für die festgelegten Druck- und Temperaturbedingungen ermittelt werden muss. Er darf nicht kleiner sein als der zugehörige Betriebsdruck (p_0). Die Bedingungen (P_0, T_0), die die größte Wanddicke ergeben, müssen unter Einhaltung folgender Mindestbedingungen berücksichtigt werden:
 - 1) $p_c = p_0 = P_S$, wenn die zugehörige Temperatur den Festlegungen der EN 13480-3 im Abschnitt 4.2.3.5 entspricht;
 - 2) T_c entspricht den Festlegungen von 4.2.3.5 für $T_0 = T_S$, wenn der zugehörige $p_c = p_0$ ist.
- die Berechnungstemperatur (T_c) als die maximale, unter normalen Betriebsbedingungen bei Berechnungsdruck (P_c) in der Mitte der Rohrleitungswanddicke zu erwartende Temperatur. Ihr Wert wird, wie nachstehend beschrieben, ermittelt. Bei der Temperaturfeldberechnung ist davon auszugehen, dass kein Wärmeverlust durch Windwirkung eintritt.

Wesentliches Element bei der Dimensionierung der Sammler im Kraftwerk ist die auf Basis von Druck und Temperatur und in Abhängigkeit der Werkstoffkennwerten ermittelte Wandstärke für die jeweilige Auslegungsdauer. Abweichend von der Darstellung in der Norm wird in dieser Arbeit für die Temperatur durchgängig das große T als Symbol verwendet, damit keine Verwechslung mit der Zeit (t) erfolgt.

Die Norm⁵⁸ schreibt vor, dass es eine Mindestwanddicke in Abhängigkeit des Rohraußendurchmessers geben muss, der bei den vorliegenden Sammlerberechnungen aber in jedem Fall überschritten wird, so dass diese Untergrenze nicht zum Tragen kommt.

Die Mindestwanddicke ist demnach unter Berücksichtigung der Fertigungsverfahren für Rohre und Formstücke zu ermitteln. Korrosion kann im Rohrinnen oder außen oder gleichzeitig sowohl innen wie außen auftreten (der Begriff der Korrosion umfasst auch die Erosion). Der Wert des Korrosionszuschlags c_0 (der, falls keine Korrosion zu erwarten ist, auch Null sein kann) ist in jedem Falle vom Besteller anzugeben oder im Einvernehmen zwischen den beteiligten Parteien unter Berücksichtigung der Art, Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit usw. der mit den Wänden in Kontakt stehenden Produkte festzulegen. Sämtliche Wanddicken, der Korrosionszuschlag c_0 , die Toleranz c_1 und die Wanddickenabnahme c_2 sind nachfolgend dargestellt (Abbildung 2-18)⁵⁷.

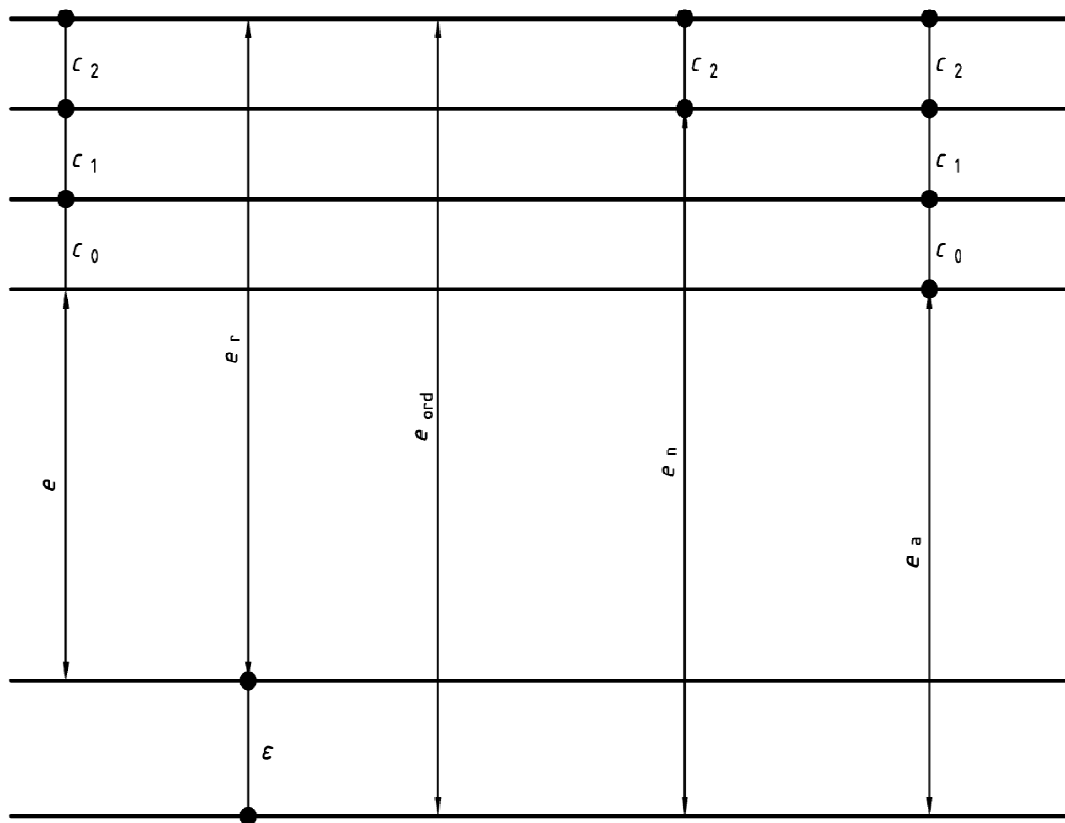


Abbildung 2-18: Zusammensetzung der Wanddicke gemäß Regelwerk

Dabei ist:

- c_0 der Korrosions- bzw. Erosionszuschlag,
- c_1 der Absolutwert der Minustoleranz der den zugehörigen Werkstoffnummern entnommen oder vom Hersteller der Rohrleitung angegeben wurde,
- c_2 der Zuschlag für mögliche Wanddickenabnahme bei der Fertigung (z. B. aufgrund von Biegen, Gewindeschneiden, Eindrehen usw.),
- e die mittels der zutreffenden Gleichungen dieser Norm ermittelte geforderte Mindestwanddicke ohne Zuschläge und Toleranzen, die dem Druck standhält,
- e_a die ermittelte Wanddicke eines Bauteils zur Verwendung für die Festigkeitsprüfung,
- e_n die Nennwanddicke (in Zeichnungen),
- e_{ord} die bestellte Wanddicke,
- e_r die geforderte Mindestwanddicke einschließlich Zuschlägen und Toleranzen und
- ϵ der Wanddickenzuschlag aufgrund der bestellten Wanddicke e_{ord} .

Die erforderliche Wanddicke ohne Zuschläge berechnet sich für einen vorgegebenen Außendurchmesser zu⁵⁸:

$$e_{cs} = \frac{P_c d_{os}}{(2f_s - P_c)v + 2P_c}$$

Gleichung 2-2

und bei vorgegebenem Innendurchmesser:

$$e_{cs} = \frac{P_c d_{is}}{(2f_s - P_c)v} \quad \text{Gleichung 2-3}$$

Dabei ist:

- e_{cs} die Wanddicke des Grundkörpers,
- v der Verschwächungsbeiwert,
- d_{os} der Außendurchmesser des Grundkörpers,
- d_{is} der Innendurchmesser des Grundkörpers,
- P_c der Berechnungsdruck des Bauteils und
- f_s der kleinste Wert der zulässigen Spannung des Grundkörpers.

Da in dieser Arbeit der Innendurchmesser resultierend aus der durch den Sammler zu transportierenden Dampfmenge festgelegt ist und sich der Außendurchmesser aus der Wandstärke für den jeweils betrachteten Werkstoff ergibt, wird bei den Berechnungen immer die Gleichung 2-3 angewendet, wobei die Gleichung 2-2 für den vorhandenen Außendurchmesser auch in den Worksheets hinterlegt ist und bei Bedarf verwendet werden könnte.

Aus Abbildung 2-18 folgernd, ergibt sich aus der Summe der rechnerischen Wanddicke und den jeweiligen Zuschlägen die erforderliche Mindestwanddicke zu:

$$e_s = e_{cs} + c_0 + c_1 + c_2 \quad \text{Gleichung 2-4}$$

Die zu dimensionierende Mantelwanddicke von Sammlern nach Abzug der Zuschläge ist wie folgt festgelegt:⁵⁸

$$e_{rs} = e_s - c_1 - c_2 \quad \text{Gleichung 2-5}$$

Dabei ist:

- e_{rs} die zu berechnende Mindestwanddicke nach Abzug der Zuschläge und Toleranzen,
- c_1 der Absolutwert der Minustoleranz, der den zugehörigen Werkstoffnormen entnommen oder vom Hersteller der Rohrleitung angegeben wurde und
- c_2 der Zuschlag für eine mögliche Wanddickenabnahme bei der Fertigung (z. B. auf Grund von Biegen, mit Aufdachung versehen, Eindellen, Gewindeschneiden, Eindrehen usw.).

Während die Berechnung der Belastungen unter Wechselbeanspruchung mit Hilfe der Dehngrenze und der Zugfestigkeit des Werkstoffs erfolgt, wird die Wanddicke ohne Berücksichtigung der Lastspiele alleine auf Basis der Zeitstandwerte des Werkstoffs für die geplante Lebensdauer des Bauteils ermittelt. Das sind in der Regel Zeiträume von 200.000, 150.000 oder 100.000 Stunden. Da es sich hierbei um die Betriebsstunden des Bauteils handelt, ist der Zeitraum den tatsächlichen Betriebsstunden des Bauteils und damit den Volllaststunden des Kraftwerks gegenüberzustellen. Werden, wie in der Vergangenheit geschehen, 7.500 Volllaststunden unterstellt, resultieren daraus

für die genannten Auslegungszeiten Gesamtlebensdauern in der Größenordnung von 26, 20 und 13 Jahren.

Mit den in Kapitel 3.1 beschriebenen Veränderungen im zukünftigen Kraftwerksbetrieb wird sich die Anzahl der Volllaststunden auch für Braunkohlekraftwerke wahrscheinlich deutlich reduzieren. Daraus folgernd kann eine Auslegung für 100.000 Stunden, und damit eine geringere Wanddickendimensionierung, bei 4.000 Volllaststunden ebenfalls einem Nutzungszeitraum von 25 Jahren entsprechen. Im Rahmen der Auswertung der Berechnungsergebnisse wird sich zeigen, dass dieser Umstand entscheidend für die Wirtschaftlichkeit von bereits heute eingesetzten Werkstoffen ist.

Die Bemessung der zulässigen Spannung f ergibt sich aus:⁵⁹

$$f = \frac{K}{S} \quad \text{Gleichung 2-6}$$

Dabei ist:

- f die zulässige Spannung des Bauteils bei überwiegend statischer Betrachtung,
- K der Festigkeitskennwert für die Auslegungsbedingungen und
- S der Sicherheitsbeiwert

Für den Festigkeitskennwert werden die verfügbaren Spannungskennwerte des jeweiligen Werkstoffes eingesetzt. Hierbei ist grundsätzlich der geringste der verfügbaren Werte zu verwenden und mit dem vorgeschriebenen Sicherheitsbeiwert abzuwerten. Aus den bekannten Spannungsgrenzen ergibt sich auch, ob Werte aus dem Zeitstandbereich verwendet werden müssen und damit die Notwendigkeit zu wiederkehrenden Prüfungen gegeben ist. Im Regelwerk werden in der EN 13480 die Bedingungen für die zeitunabhängigen zulässigen Spannungen angegeben. Da im hier betrachteten Hochtemperaturbereich die Werkstoffe in der Regel im Zeitstandbereich beansprucht werden, finden die Überprüfungen der EN 12952-3 Anwendung.

Die Auslegungsbedingungen gemäß Regelwerk⁵⁹ für Walz- und Schmiedestähle lauten:

$$f = \min \left(\frac{R_m}{2,4}; \frac{R_{eH T_C}}{1,5} \text{ und/oder } \frac{R_{p0,2 T_C}}{1,5}; \frac{R_{mt T_C}}{1,25} \right) \quad \text{Gleichung 2-7}$$

Dabei ist:

- R_m Zugfestigkeit bei Raumtemperatur,
- $R_{eH T_C}$ die obere Streckgrenze bei der Berechnungstemperatur T_C ,
- $R_{p0,2 T_C}$ der Mindestwert für die 0,2% Dehngrenze bei Berechnungstemperatur T_C ,
- $R_{mt T_C}$ die Zeitstandfestigkeit für die festgelegte Lebensdauer t bei der Berechnungstemperatur T_C

Bei den austenitischen Stählen ist zur Festlegung des Wertes der zulässigen Spannung die Höhe der Mindestbruchdehnung in Querrichtung maßgeblich. Es gilt demnach für die zulässige Spannung der niedrigste nach den folgenden Gleichungen ermittelte Wert:⁵⁹

Für $A < 30\%$:

$$f = \min\left(\frac{R_{p0,2 T_C}}{1,5}; \frac{R_{m T_C}}{1,25}\right) \quad \text{Gleichung 2-8}$$

Für $35\% \geq A \geq 30\%$:

$$f = \min\left(\frac{R_{m T_C}}{1,25}; \frac{R_{p1,0 T_C}}{1,5}\right) \quad \text{Gleichung 2-9}$$

Für $A > 35\%$:

$$f = \frac{R_{p1,0 T_C}}{1,2} \quad \text{Gleichung 2-10}$$

oder falls $R_{m T}$ vorliegt:

$$f = \min\left(\frac{R_{m T_C}}{3}; \frac{R_{m T_C}}{1,25}\right) \quad \text{Gleichung 2-11}$$

Dabei ist:

- A die Bruchdehnung in %, wobei gilt, dass die Bruchdehnung in alle Richtungen $\geq 14\%$ sein muss,⁶⁰
- $R_{m T_C}$ der Mindestwert für die Zugfestigkeit bei der Berechnungstemperatur T_C , wenn diese höher ist als die Raumtemperatur (in N/mm²),
- $R_{p0,2}$ der Mindestwert für die 0,2% Dehngrenze bei Raumtemperatur (in N/mm²),
- $R_{p1,0}$ der Mindestwert für die 1,0% Dehngrenze bei Raumtemperatur (in N/mm²) und
- $R_{p1,0 T_C}$ der Mindestwert für die 1,0% Dehngrenze bei Berechnungstemperatur T_C , wenn diese höher ist als die Raumtemperatur (in N/mm²)

Die Auslegungsbedingungen für ruhende Belastung ergeben sich aus der zulässigen Spannung im Zeitstandbereich f_{CR} analog zur Gleichung 2-6 mit:

$$f_{CR} = \frac{f}{SF_{CR}} \quad \text{Gleichung 2-12}$$

Dabei ist SF_{CR} ein zeitabhängiger Sicherheitsbeiwert, der aus der nachfolgenden Aufstellung (Tabelle 2-6)⁶¹ abgelesen werden kann.

Zeit t in Stunden	Sicherheitsbeiwert SF_{CR}
200.000	1,25
150.000	1,35
100.000	1,5

Tabelle 2-6: Sicherheitsbeiwerte zur Lebensdauerauslegung

Das bedeutet, dass in den Fällen, für die Versuchswerte über 200.000 Stunden vorliegen, diese verwendet werden können und der Sicherheitsbeiwert entsprechend kleiner angesetzt werden kann. Liegen für diese langen Zeiten keine Ergebnisse vor (was z. B. bei neuen Werkstoffen häufig der Fall ist), so kann auch mit Werten aus kürzeren Versuchen gerechnet werden, wenn der Sicherheitsbeiwert entsprechend der obigen Tabelle erhöht wird. Bei der Betrachtung der Ergebnisse wird diese Vorgabe bei der Berechnung der Wanddicken für den P91 dazu führen, dass aufgrund fehlender Zeitstandwerte für 150.000 Stunden, eine Dimensionierung mit 100.000-Werten und dem Sicherheitsbeiwert 1,35 zu ungünstigeren Werten führt, als die Dimensionierung auf Basis der vorhandenen 200.000-Stunden-Werte mit dem Sicherheitsbeiwert 1,25 (siehe Kap. 5.2, Basisauswertung)

Obwohl auf Grund der veränderten Anforderungen an Kohlekraftwerke zukünftig nur noch von einer geringeren Volllaststundenzahl auszugehen ist, erfolgt in dieser Arbeit die Bauteilauslegung für 100.000, 150.000 und 200.000 Stunden. Bei den Berechnungen, für die in den Werkstoffdatenblättern keine Angaben zu den Zeitstandwerten vorlagen, erfolgte eine Anpassung der vorhandenen Werte über diese Sicherheitsbeiwerte.

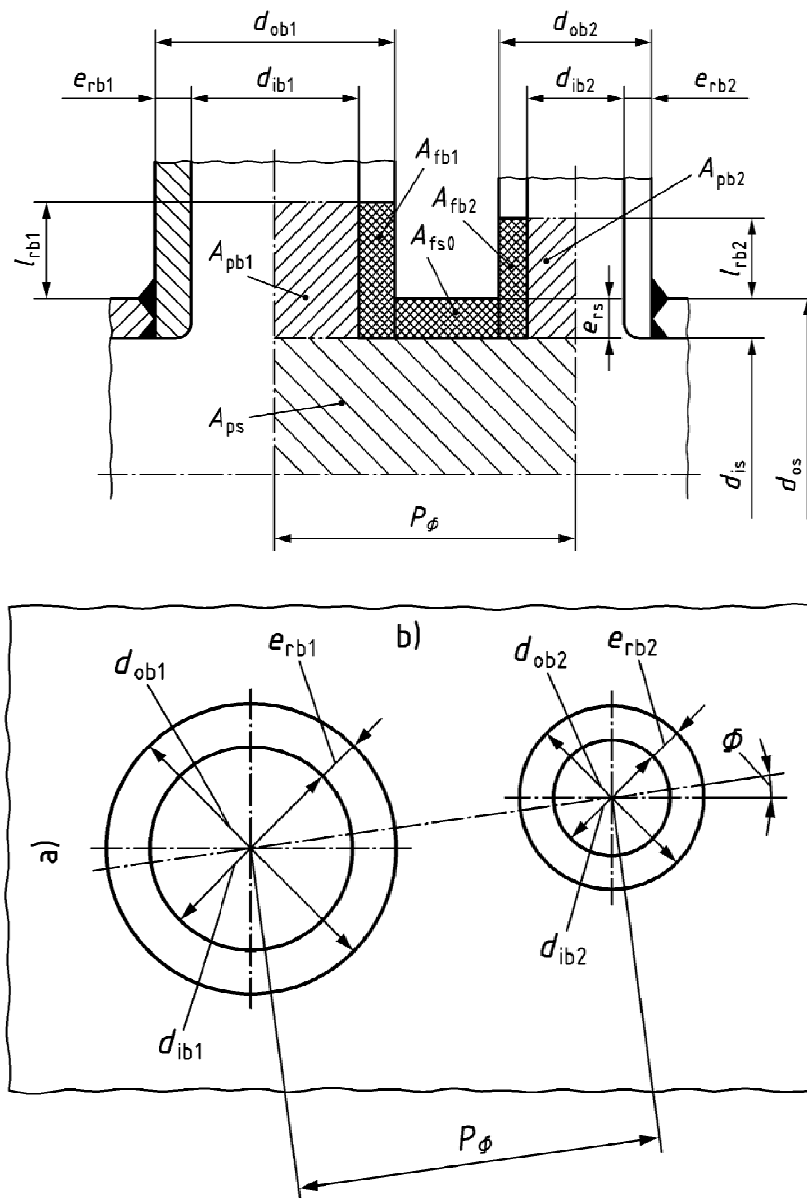
Zwar handelt es sich bei den durchgeführten Berechnungen zur Dimensionierung im Wesentlichen um die Berechnung eines Rohres, denn der Grundkörper ist nichts anderes, allerdings sind zusätzlich die Zu- bzw. Abgänge der Kesselrohre zu berücksichtigen. Diese Abgänge werden auch als Nippel bezeichnet und werden, nachdem der Grundkörper mit den entsprechenden Bohrungen versehen wurde, auf diesen aufgeschweißt.

Darauf basiert auch die Definition des Regelwerks zu einem Sammler:

Rohrförmige Teile mit einem Nennaußendurchmesser > 76,2 mm, in die drei oder mehr nicht axiale Rohre einmünden, sind als Sammler zu betrachten.⁵⁹

Die Anordnung dieser Nippel wird zum Teil durch die Kesselgeometrie und die Lage der zu- oder abführenden Rohre bestimmt, muss aber auch so gewählt werden, dass die Stabilität des Rohres möglichst wenig beeinflusst wird. Wenngleich an den Abzweigungen sogar eine Stabilitätserhöhung erfolgen kann, ist der Einfluss der Bohrungen grundsätzlich erst einmal negativ, d.h. sie bewirken eine Schwächung der ursprünglichen Rohrstabilität. Dieser Abschwächung wird in den Berechnungen durch den Verschwächungsbeiwert Rechnung getragen.

Die in den Gleichungen verwendeten geometrischen Größen finden sich in den nachfolgenden Skizzen (Abbildung 2-19)⁶² wieder:



a) Umfangsrichtung, b) Längsrichtung

Abbildung 2-19: Beanspruchungsschema für zylindrischen Mantel mit benachbarten Abzweigen, angeordnet unter einem Winkel zur Mantelachse

Beispielhaft ermittelt sich der Verschwächungsbeiwert für senkrechte Abzweige, bei denen der Werkstoff des Abzweiges eine kleinere zulässige Spannung hat, als der Grundkörper und für den Mittenabstand zweier Abzweige P_ϕ die nachfolgende Bedingung erfüllt ist:⁶²

$$P_\phi \geq \frac{\left(\frac{d_{ib1}}{2} + e_{rb1}\right)}{\sin \psi_1} + \frac{\left(\frac{d_{ib2}}{2} + e_{rb2}\right)}{\sin \psi_2} + 2\sqrt{(d_{is} + e_{rs})e_{rs}} \quad \text{Gleichung 2-13}$$

Bzw. für senkrecht angeordnete Abzweige mit gleichen Abmessungen:

$$P_\phi \geq \frac{d_{ib}}{2} + e_{rb} \left(1 + \frac{1}{1 + 2\sqrt{(d_{is} + e_{rs})e_{rs}}} \right) \quad \text{Gleichung 2-14}$$

Dann ergibt sich der Verschwächungsbeiwert aus:⁶²

$$v_b = \frac{d_{is} \left(A_{fs} + \frac{f_b}{f_s} A_{fb} \right)}{e_{rs} \left(2A_p + A_{fb} - \frac{f_b}{f_s} A_{fb} \right)} \leq 1 \quad \text{Gleichung 2-15}$$

Sind die zulässigen Spannungen des Grundkörpers mit denen der Abzweige identisch, (also bei Verwendung des identischen Werkstoffs) ergibt sich daraus die vereinfachte Gleichung zu:

$$v_b = \frac{d_{is} (A_{fs} + A_{fb})}{2e_{rs} A_p} \leq 1 \quad \text{Gleichung 2-16}$$

Dabei gilt:

- P_ϕ Mittenabstand benachbarter Ausschnitte, versetzt um den Winkel ϕ
- $\phi_{1,2}$ Neigungswinkel eines Abzweigs, bezogen auf die Achse des Grundkörpers
- $d_{ib1,2}$ Innendurchmesser des Abzweigs 1/2
- $e_{rb1,2}$ vorhandene Wanddicke des Abzweigs 1/2
- e_{rs} vorhandene Wanddicke des Grundkörpers
- v_b Verschwächungsbeiwert für einzelne Ausschnitte
- d_{is} Innendurchmesser des Grundkörpers
- A_{fs} vorhandene Querschnittsfläche des Grundkörpers
- A_{fb} vorhandene Querschnittsfläche eines Abzweigs
- A_p druckbelastete Fläche ohne Berücksichtigung der Zuschläge
- f_b kleinster Wert der zulässigen Spannung für den Werkstoff des Abzweigs
- f_s kleinster Wert der zulässigen Spannung für den Werkstoff des Grundkörpers

Bei den in dieser Arbeit betrachteten Sammlern ist die Voraussetzung nach 2.5-1 bzw. 2.5-2 in der Regel nicht gegeben, so dass sich in diesem Fall der Verschwächungsbeiwert für zwei Abzweige mit gleicher oder geringerer zulässiger Spannung errechnet zu:

$$v_m = \frac{d_{is}}{e_{rs}} \frac{A_{fs0} + \frac{f_{b1}}{f_s} A_{fb1} + \frac{f_{b2}}{f_s} A_{fb2}}{2A_{p0} \frac{1 + \cos^2 \phi}{2} + 2A_{fb1} + 2A_{p2} + A_{fb1} + A_{fb2} - \frac{f_{b1}}{f_s} A_{fb1} - \frac{f_{b2}}{f_s} A_{fb2}} \leq 1 \quad \text{Gleichung 2-17}$$

Da durch die Bohrungen eine grundsätzliche Verschwächung eintritt, ist der Verschwächungsbeiwert immer ein Wert kleiner 1. Dieser Wert ist als Vorgabe in das Berechnungstool mit einzugeben, weil die Ermittlung des Wertes wesentlich von der Herstellung und den Designanforderungen für den jeweiligen Kraftwerksblock abhängt.

In der weiteren Betrachtung wird lediglich die Abhängigkeit vom Mantelquerschnitt berücksichtigt, da diese auf Grund der zum Teil erheblichen Wanddickenänderungen einen erkennbaren Einfluss hat. Für tiefer gehende Details zur Berechnung sei an dieser Stelle auf die EN 12952-3:2001 im Kapitel 8 verwiesen.

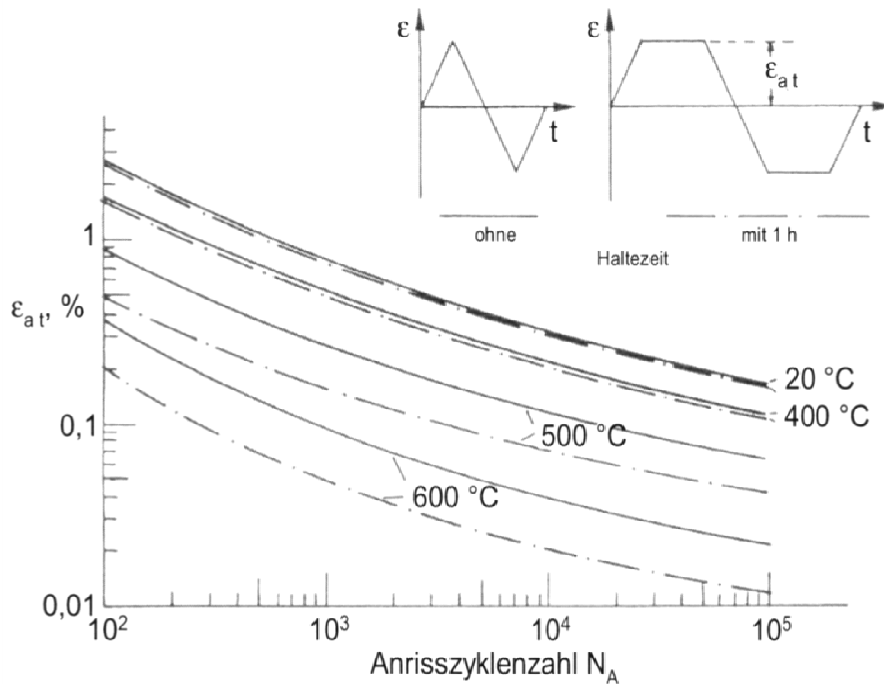
Bedingt durch die immer größeren Anlagen mit höheren Dampfmenngen und Dampfdrücken bei höheren Temperaturen, steigen die Anforderungen an die Herstellung der Sammler ständig. So wurde bei der Auslegung der Sammler für die 1100 MW BoA-Blöcke in Neurath für den in P92 ausgelegten Sammler mittels Regelwerk im Rahmen der RWE Studie 2012 eine erforderliche Wanddicke von 115 mm ermittelt. Dieses Ergebnis findet sich auch in den Berechnungen im Arbeitsblatt "*Wanddicke*" wieder.

Da es bei den Werkzeugen konstruktionsbedingte Probleme ab einer Wandstärke von 80 mm gibt, ist man hier den Weg der Finiten-Elemente-Berechnung gegangen, um darüber eine weniger konservative Auslegung zu erhalten. Danach sind die heute eingesetzten Sammler berechnet und konstruiert worden. In dieser Arbeit wurde ausschließlich der konservative Ansatz der Europäischen Norm betrachtet, d.h. es lassen sich im Nachgang ggf. zusätzliche Effekte in der Wanddickenreduktion über die FEM erzielen, die allerdings nach geltendem Regelwerk (EN 12952) nicht zulässig sind.

2.5.4 Auslegung von Sammlern für Wechselbeanspruchung nach Regelwerk⁶³

Wechselbeanspruchung durch Änderungen von Druck, Temperatur und äußeren Lasten kann bereits bei Belastungswerten, die unter den Auslegungsbedingungen für statische Belastung liegen, Schäden durch Ermüdungsrisse verursachen. Um diese für den Betrieb unter wechselnden Lasten notwendige Eigenschaft eines Werkstoffs zu prüfen wird ein Dauerschwingversuch nach dem Aufbau durchgeführt, mit dem August Wöhler bereits Ende des 19. Jh. Schwingfestigkeitsversuche durchgeführt hat. Die Ergebnisse dieser Versuche werden werkstoffspezifisch in den Wöhlerdiagrammen dargestellt. Ein solches Diagramm für den Stahl 10CrMo9-10 ist nachfolgend beispielhaft dargestellt (siehe Abbildung 2-20)⁶⁴.

Hieraus ist erkennbar, dass mit steigender Temperatur die Anrisszyklenzahlen bei gleicher Gesamtdehnungsamplitude deutlich sinken.



Die Zyklusformen und der Einbau der Haltezeiten im Dehn- und Stauchbereich sind aus den oberen Teilbildern zu entnehmen.

Abbildung 2-20: Wöhler-Schaubild des warmfesten ferritisch-bainitischen Stahls 10CrMo9-10 in Abhängigkeit von Temperatur und Haltezeit.

Wenn die in den Kapiteln 10.2, 10.3 und 10.4 der EN 13480-3 angegebenen Bedingungen nicht erfüllt werden, d.h. mehr als 1.000 Zyklen zu betrachten sind, so ist zusätzlich zur Auslegung für statische Belastung eine eingehende Ermüdungsanalyse entsprechend der EN 13480-3 Kapitel 12.4 durchzuführen.

Zwar bietet die EN 13445-3:2002 im Kapitel 17 auch eine vereinfachte Berechnungsmöglichkeit der Ermüdungslebensdauer, Voraussetzung für deren Einsetzbarkeit ist aber die ausschließliche Betrachtung von Druckschwankungen ohne Temperaturveränderungen.⁶⁵ Da diese aber im An- und Abfahrvorgang des Kraftwerks zwangsläufig auch vorliegen, kann die Berechnung nur nach Kapitel 18 bzw. nach der EN 12952-3:2012 erfolgen.

Die Anforderungen an Werkstoffe für druckbeaufschlagte Bauteile erfordern die Durchführung einer Ermüdungsanalyse.⁶⁶ Im Rahmen dieser Ermüdungsanalyse wird mit Sicherheitswerten gearbeitet, zu denen das Regelwerk klare Vorgaben macht und die im Rahmen der durchgeführten Berechnungen mögliche Anrisse vermeiden sollen.

Hierbei ist im Regelfall die Schwingbreite der Schwingungen zu berücksichtigen. Im Falle des An- und Abfahrens des Kraftwerks ist von der vollen Schwingbreite auszugehen.

Eine Ausnahme von der Analyse ist nur dann zulässig, wenn die Anzahl der Druckzyklen über die volle Schwingbreite 1000 nicht überschreitet.⁶³ Im vorliegenden Fall wird die Situation einer zunehmenden Dynamik im Kraftwerksbetrieb untersucht. Über den Lebensdauerzeitraum eines

Bauteils von 20 Jahren bedeutet diese Angabe eine Zyklenzahl von 50 Zyklen pro Jahr. Wie im Kapitel 3.1 erläutert wird, ist von einer deutlich höheren Anzahl Lastzyklen auszugehen. Es muss daher eine Ermüdungsanalyse erfolgen, was in den Berechnungen im Arbeitsblatt Lebensdauer auch erfolgt. Die Erläuterungen zur Vorgehensweise in der Exceltabelle finden sich in Kapitel 5.1. Bei der in dieser Arbeit vorgenommenen Lebensdauerberechnung wird eine lineare Schädigungsakkumulation vorausgesetzt. Das Prinzip der linearen Schädigungsakkumulation ist in der nachfolgenden Grafik (Abbildung 2-21)⁶⁷ veranschaulicht.

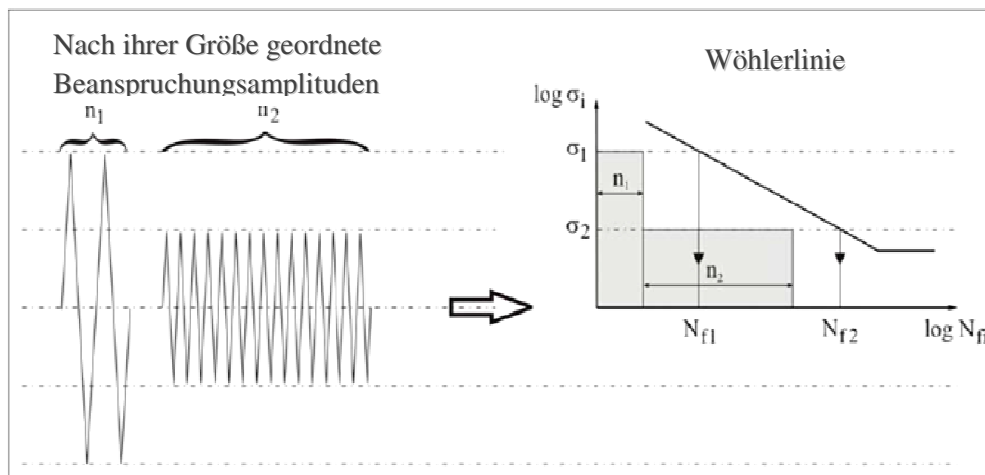


Abbildung 2-21: Schematische Darstellung der linearen Schädigungsakkumulation.

Grundgedanke der linearen Schadensakkumulation ist, dass sich die Beanspruchungen des Werkstoffs über seine Lebensdauer bis zum Erreichen der kritischen Schädigung aufaddieren.

Der dafür geltende formale Zusammenhang wird später anhand der Gleichung 2-25 erläutert.

Die Vorgehensweise zur genauen Analyse der in der Wand des Sammlers auftretenden Spannungen durch die vorherrschenden Temperaturdifferenzen findet sich in den nachfolgenden Gleichungen gemäß Regelwerk. Die Basis der Berechnungen bildet der nachfolgend veranschaulichte Wärmeübergang von einem Medium zu einem zweiten durch eine Wand (siehe Abbildung 2-22).¹⁷

Dieser Wärmeübergang vollzieht sich in drei Teilschritten.

1. Wärmeübergang vom Medium 1 an die Wandoberfläche.
2. Wärmeleitung durch die Wand.
3. Wärmeübergang von der Wandoberfläche an das Medium 2.

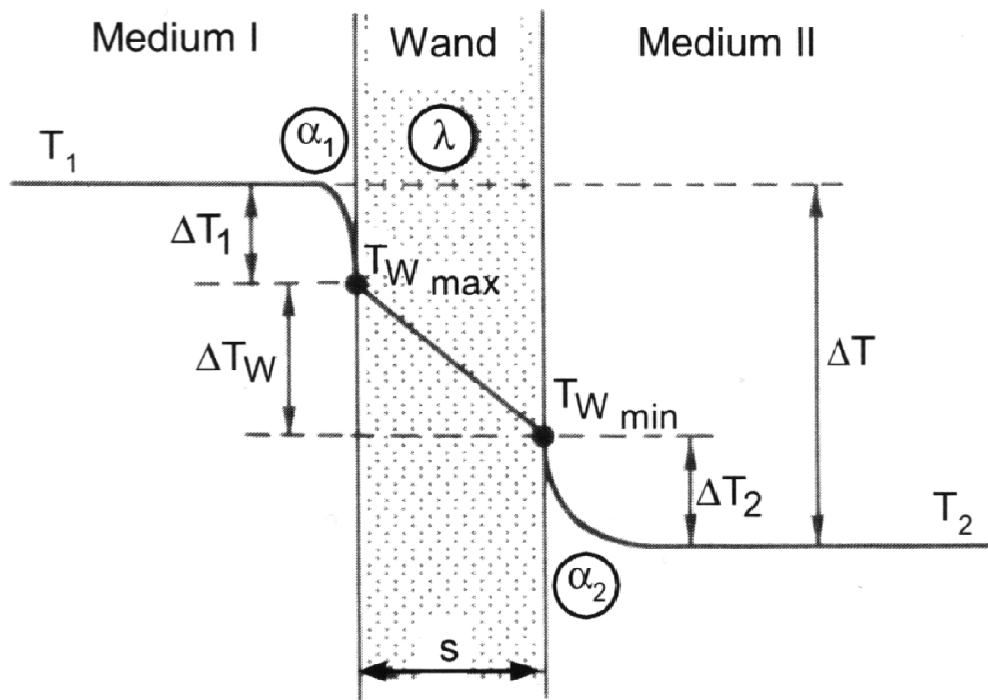


Abbildung 2-22: Wärmedurchgang durch eine Wand

Maßgeblich für den Wärmeübergang ist der Wärmeübergangskoeffizient α , der von mehreren Parametern abhängt. Das sind im Einzelnen:

1. die Art des Mediums,
2. die Strömungsgeschwindigkeit,
3. die Gleichmäßigkeit der Strömung und die
4. Oberflächenbeschaffenheit des Körpers.

Der daraus resultierende Wert wird in der EN 12952-3 und damit auch in den hier durchgeführten Berechnungen mit $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ für das Medium Dampf angegeben. Die Formelbezeichnung unterscheidet sich hierbei, da im Regelwerk der Buchstabe h für den Wärmeübergangskoeffizienten verwendet wird.

Zur Berechnung der entstehenden Spannungen verwendet die Norm den Spannungskonzentrationsfaktor α_m zur Berücksichtigung der Druckspannung und α_T zur Berücksichtigung der thermischen Spannungen. Die Berechnung des Spannungskonzentrationsfaktors α_m basiert auf der Geometrie des Sammlers mit den Einflussgrößen des Grundkörpers (Zylinderschale) und den darauf aufgesetzten Abzweigen (Nippeln).⁶⁶

$$\alpha_m = 2,2 + e^A \cdot \zeta^B$$

Gleichung 2-18

Für die Konstanten gelten die nachfolgenden Beziehungen:

$$\zeta = \frac{d_{mb}}{d_{ms}} \cdot \sqrt{\frac{d_{ms}}{2e_{ms}}} \quad \text{Gleichung 2-19}$$

$$A = -1,14 \cdot (e_{mb}/e_{ms})^2 - 0,89 \cdot (e_{mb}/e_{ms}) + 1,43 \quad \text{Gleichung 2-20}$$

$$B = 0,326 \cdot (e_{mb}/e_{ms})^2 - 0,59 \cdot (e_{mb}/e_{ms}) + 1,08 \quad \text{Gleichung 2-21}$$

Dabei gilt:

- d_{mb} mittlerer Durchmesser des Abzweigs
- d_{ms} mittlerer Durchmesser des Grundkörpers
- e_{ms} Wandstärke des Grundkörpers
- e_{mb} Wandstärke des Abzweigs

Dieser Spannungskonzentrationsfaktor ist auf die Vergleichsspannung in der Wandmitte bezogen, so dass zur Berechnung der zulässigen Umfangsspannung an der Innenfläche der Bohrungen der Spannungskonzentrationsfaktor in die nachfolgende Formel eingesetzt wird:⁶⁶

$$f_{tangP} = \alpha_m \cdot d_{ms}/(2e_{ms}) \cdot P \quad \text{Gleichung 2-22}$$

Wird dieser Formel zur Berechnung der reinen Tangentialspannung als Wärmespannung noch der wirksame Innendruck hinzuaddiert, ergibt sich die TRESKA Vergleichsspannung in der Form:

$$S_P = (\alpha_m \cdot d_{ms}/(2e_{ms}) + 1) \cdot P \quad \text{Gleichung 2-23}$$

Wobei zur Ermittlung des S_{P0} und S_{Pmax} der zulässige Betriebsdruck und damit gleichzeitig der maximal auftretende Druck und zur Bestimmung von S_{Pmin} der minimale Druck zum Startzeitpunkt des Lastwechsels und damit Null eingesetzt wird.

Bei der Analyse der Wechselbeanspruchung sind Größe und Frequenz aller festgelegten Wechselbeanspruchungen zu berücksichtigen, und es ist sicherzustellen, dass für jede Belastung die zulässige Lastspielzahl (N_i) der Rohrleitung höher ist als die erwartete Lastspielzahl (n_i) und die Erschöpfungszahl den Wert 1 nicht übersteigt.

$$\sum_{i=1}^m n_i / N_i \leq 1 \quad \text{Gleichung 2-24}$$

Dabei ist m die Anzahl der zyklischen Belastungsfälle.

In den Ermüdungsberechnungen sind die zyklischen Schwankungen n_i über das Spektrum der normalen Betriebsbedingungen, einschließlich der zu erwartenden Überschreitungen, zu berücksichtigen. In die Bewertungen gehen die tatsächlichen Bauteilwanddicken und Werkstoffeigenschaften bei den zu betrachtenden Temperaturen ein.

Hierbei ist im Regelfall auch die Schwingbreite der Schwingungen zu berücksichtigen. Im Falle des An- und Abfahrens des Kraftwerks ist jedoch von der vollen Schwingbreite auszugehen.

Die Anzahl äquivalenter Volllastspiele lässt sich aus der nachfolgenden Gleichung ermitteln:

$$N_{eq} = N_f + \sum_{i=1}^n \left\{ \left(\frac{\hat{p}_i - \check{p}_i}{P_c} \right)^{3,5} N_i \right\} \quad \text{Gleichung 2-25}$$

Dabei ist:

N_{eq} die Anzahl äquivalenter Druckzyklen über die volle Schwingbreite;

n die Anzahl der verschiedenen Druckbereiche ($\hat{p}_i - \check{p}_i$),

N_f die Anzahl der Druckzyklen mit der Schwingbreite $(\hat{p} - \check{p}) = p_c$,

N_i die Anzahl der unterschiedlichen Druckzyklen mit der Schwingbreite $(\hat{p}_i - \check{p}_i)$ kleiner p_c ,

\hat{p} der Höchstwert innerhalb eines Lastzyklus c ,

\check{p} der untere Wert innerhalb eines Lastzyklus c und

P_c der Berechnungsdruck (volle Schwingbreite).

Bei einer Lebensdauerbetrachtung über 200.000 Stunden (entsprechend 25 Jahren) ergibt sich bei 1.000 Schwingungen eine Zykluszeit von 3 Zyklen pro Monat. Mit Blick auf die zunehmende Flexibilisierung der Kohlekraftwerke, die heute bereits zum Teil täglich an- und abgefahren werden, wird daraus deutlich, dass auf die Analyse nicht verzichtet werden kann.

Kalkulatorische Sicherheitsbeiwerte sind in Ihrer Größe davon abhängig, ob ein Lebensdauerüberwachungssystem vorhanden ist.⁶¹

Die Ermittlung der zulässigen Lastspielzahl ergibt sich aus⁶⁸

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta P}{P_{max}} \cdot \eta \cdot f \quad \text{Gleichung 2-26}$$

oder⁶³

$$2\sigma_a^* = \frac{\eta}{F_d F_{t^*}} \cdot \frac{(\hat{p} - \check{p})}{P_r} \cdot f_{20} \quad \text{Gleichung 2-27}$$

Mit $2\sigma_a^*$ als die maßgebliche pseudoelastische Spannungsamplitude in N/mm².

Dabei ist:

- ΔP die Druckschwankungsbreite ($\hat{p} - \check{p}$), d.h. das Doppelte der Amplitude,
- P_{max} der maximale zulässige Druck des betrachteten Bauteils (außer bei nach innen gewölbten Böden),
- η der Spannungsfaktor, der den oberen Grenzwert der Spannungsfaktoren für eine bestimmte Bauteilgeometrie unter Bemessungsbedingungen angibt, der sich in der Praxis ergibt oder aus der Norm⁶³ ablesbar ist,
- P_r der Ersatzdruck, der als zulässiger Druck bei voller Ausnutzung der Auslegungsnennspannung f_{20} für ein Rohrleitungsbauteil aus den Gleichungen zur Berechnung der Abmessungen in den Abschnitten 6 bis 9 und 11 ermittelt, die nach p aufgelöst werden, ermittelt wird,
- f_{20} die Auslegungsspannung f (siehe Gl. 2.5-9 bis 2.5-12) bei 20 °C und
- F_d der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Wanddickeneinflusses für Wanddicken $e_{ord} > 25\text{mm}$ zu berechnen mit

$$F_d = \left(\frac{25}{e_{ord}} \right)^{0,25} \quad \text{Gleichung 2-28}$$

oder abzulesen aus der Norm⁶³, wobei F_d begrenzt ist auf 0,64 und e_{ord} für die bestellte Wanddicke inkl. aller Zuschläge steht.

Die zulässigen Spannungsschwingbreiten bei bekannter Lastwechselzahl errechnen sich aus dem Anhang B der EN 12952-3:2012.

Die Spannungsschwingbreite aus der Maximalzahl an Lastwechseln errechnet sich aus:

$$2f_{as} = 0,8R_m + (173.150 - 0,8R_m) \cdot N_A^{-0,547} \quad \text{Gleichung 2-29}$$

Dabei ist N_A die resultierende Maximalzahl an Lastspielen, wenn bei der geplanten Anzahl an Lastspielen N entsprechend den Vorgaben des Regelwerks⁶⁹ der Erschöpfungsgrad 0,4 nicht übersteigen darf. Folglich gilt:

$$N_A = \frac{N}{0,4} \quad \text{Gleichung 2-30}$$

Zur Bestimmung der Spannungsschwingbreite werden außerdem ein Spannungssicherheitsbeiwert von $S_s = 1,5$ und ein Lastspielsicherheitsbeiwert von $S_L = 10$ verwendet.

Unter Verwendung des Lastspielsicherheitsbeiwertes errechnet sich N_{AL} zu:

$$N_{AL} = N_A \cdot S_L \quad \text{Gleichung 2-31}$$

Die zulässige Spannungsschwingbreite bestimmt sich nun aus dem Minimum der Spannungen f_{as} und f_{aL} zu:

$$f_{a(T^*)}^* = \text{MIN} \left(\frac{2f_{as}}{S_s}; 2f_{aL} \right) \quad \text{Gleichung 2-32}$$

Hierbei berechnet sich $2f_{aL}$ ebenfalls aus Gleichung 2-29, wobei anstelle von N_A hier N_{AL} eingesetzt wird.

Gemäß den Vorgaben des Regelwerks ist bei einer Lastwechseltemperatur von $T^* \geq 100 \text{ °C}$ außerdem die temperaturbedingte Verminderung der materialspezifischen Ermüdungsbeständigkeit durch einen entsprechenden Korrekturwert zu berücksichtigen. Dieser wird in der EN 13480 mit F_{T^*} und in der EN 12952 mit C_{T^*} bezeichnet. In Anlehnung an die Beispielrechnung soll im Folgenden und in den Exceltabellen die Bezeichnung C_{T^*} verwendet werden.

Der Korrekturbeiwert oder Temperatureinflussfaktor für ferritische Werkstoffe ist definiert mit

$$C_{T^*} = 1,03 - 1,5 \cdot 10^{-4} T^* - 1,5 \cdot 10^{-6} T^{*2} \quad \text{Gleichung 2-33}$$

und für austenitische Werkstoffe mit

$$C_{T^*} = 1,043 - 4,3 \cdot 10^{-4} T^* \quad \text{Gleichung 2-34}$$

Dabei ergibt sich die für die Berechnung erforderliche maßgebende zyklische Temperatur für das betrachtete Lastspiel zu:

$$T^* = 0,75\hat{T} + 0,25\check{T} \quad \text{Gleichung 2-35}$$

Dabei ist:

\hat{T} die Werkstofftemperatur im Moment der höchsten Spannung und

\check{T} die Werkstofftemperatur im Moment der geringsten Spannung.

In Fällen, in denen eine Auslegung gegen Ermüdung durch eine Kombination aus Wärme- und Druckbeanspruchung erforderlich ist, kommt das in der EN 12953-3:2012-3 im Kapitel 13 beschriebene Verfahren zur Anwendung. Dieses Vorgehen wird im Weiteren ausführlich erläutert und findet sich formell in den Berechnungen des Excel-Worksheets *Gradient und Erschöpfung* wieder.

Eine Übersicht zur Wärmebehandlung austenitischer Stähle nach der Warmumformung für verschiedene Stahlsorten findet sich in der EN 13480-4. Darüber hinaus gibt es in der EN 12952-3 im Kapitel 5.5 eine Definition für Kesselbauteile unter zyklischer Belastung.

Die zyklische Belastung wird dann definiert, wenn der Kessel für mehr als 500 Kaltstarts ausgelegt ist.⁷⁰ Diese Bedingung ist, insbesondere mit Blick auf die neue Flexibilisierung, in jedem Fall als gegeben vorauszusetzen. Zwar wird sich tendenziell die Anzahl der Warm- und insbesondere Heißstarts vergrößern, diese dann aber deutlich über 500 (gilt für die gesamte Lebensdauer) liegen.

$$v_T = \left(550 \text{ N/mm}^2 - P_0 \left(\frac{\alpha_m \cdot d_m}{n_s \cdot e_{ms}} - 0,5 \right) \right) \frac{Z}{e_{ms}^2} \quad \text{Gleichung 2-36}$$

Dabei ist:

v_T die zulässige Temperaturänderungsgeschwindigkeit in K/s,

P_0 der maximale Betriebsdruck;

d_m der mittlere Durchmesser des Mantels;

e_{ms} die Mindestwanddicke;

$n_s = 2$ für Zylinderschalen bzw.

$n_s = 4$ für Kugelschalen;

$a_m = 4$ oder, falls Zweifel an der richtigen Dimensionierung bestehen, kann der genaue Wert auch aus der grafischen Darstellung der EN 12952-3:2012-03, Bild 13.4-5, S. 111 abgelesen werden. (Spannungskonzentrationsfaktoren für Zylinderschalen);

$Z = 2$ K mm⁴/(Ns) für ferritische Stähle bzw.

$Z = 1$ K mm⁴/(Ns) für austenitische und martensitische Stähle oder⁷⁰

$$Z = - \frac{0,5 D_{Th}}{\gamma_{cyl/sp} \alpha_T \beta_T E / (1 - \nu)} \quad \text{Gleichung 2-37}$$

Dabei ist:

E der Elastizitätsmodul,

ν die Querkontraktionszahl, die unabhängig von Werkstoff und Temperatur mit 0,3 angesetzt werden kann⁷¹ und

γ_{cyl} der Formfaktor für Zylinderschalen.

Dieser ist ablesbar aus der EN 12952-3:2012, Bild 13.4-6, S. 112 oder zu berechnen aus:⁶⁹

$$u_0 = \frac{d_0}{d_i} \quad \text{Gleichung 2-38}$$

und

$$\gamma_{cyl} = \frac{(u_0^2 - 1)(3u_0^2 - 1) - 4u_0^4 \ln u_0}{8(u_0^2 - 1)(u_0 - 1)^2} \quad \text{Gleichung 2-39}$$

D_{Th} ist die dazu gehörende Wärmeleitzahl mit⁷¹

$$D_{Th} = \frac{\lambda_T}{\rho_T c_{p,diff,T}} \quad \text{Gleichung 2-40}$$

Dabei ist:

λ_T die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit und

ρ_T die temperaturabhängige Dichte in einem Würfel mit⁷¹

$$\rho_T = \frac{\rho_{20}}{\left(1 + \beta_{20,T}(T - 20^\circ\text{C})\right)^3} \quad \text{Gleichung 2-41}$$

β_T der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient mit:⁷¹

$$\beta_{20,T} = \frac{1}{l_{20}} \cdot \frac{l_T - l_{20}}{T - 20^\circ\text{C}} \quad \text{Gleichung 2-42}$$

Dabei ist:

L_T die Länge des Probenkörpers bei der Temperatur T ,

l_{20} die Länge des Probenkörpers bei 20°C ,

$c_{p,diff,T}$ die differentielle Wärmekapazität⁷¹.

$$c_{p,diff,T} = c_{p,20,T} + \frac{\partial c_{p,20,T}}{\partial T}(T - 20^\circ\text{C}) \quad \text{Gleichung 2-43}$$

Aus den Datenblättern ablesbar sind für die verschiedenen Stahlgruppen bei gegebenen Temperaturen T :⁷¹

E_T der Elastizitätsmodul bei der Temperatur T ,

$\beta_{20,T}$ der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient von 20°C bis zur Temperatur T ,

λ_T die Wärmeleitfähigkeit bei der Temperatur T und

$c_{p,xxT}$ die Wärmekapazität des Stahls bei der Temperatur T .

Mit Hilfe dieser gewonnen Daten lassen sich nun die zulässige Lastspielzahl bzw. die bei einer vorgegebenen Lastspielzahl resultierende Bauteilermüdung und der zulässige Temperaturgradient für das Bauteil bestimmen. Maßgebend dafür sind die auf das Bauteil wirkenden Spannungen. Dabei ergibt sich stets die resultierende Spannung aus einer Addition der Druckspannung durch den Innendruck in der Komponente und der thermischen Spannungen aufgrund der Erwärmung bzw. Abkühlung der Bauteilwand.

Während die Kriechvorgänge im Werkstoff bereits durch die statischen Zeitstandwerte abgebildet werden und sich in der Dimensionierung der Wanddicke wiederfinden, wird die Ermüdung durch die dynamische Betrachtung der Spannungen bei den Starts und Lastspielen berechnet.

Hierbei erfolgt zur verbesserten Anschaulichkeit des dreiachsigen Spannungszustands (mit einer axialen, einer tangentialen und einer radialen Hauptnormalspannung im Ligament) die Berechnung der Vergleichsspannung mit Hilfe der Tresca'schen Schubspannungshypothese.¹⁹

$$\sigma_V^{(T)} = 2\tau_{max} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Gleichung 2-44}$$

Hierbei gilt:

$\sigma_V^{(T)}$ die Tresca Vergleichsspannung,

τ die Schubspannung und

$\sigma_{1,3}$ die Hauptnormalspannungen.

Die Ermittlung der maßgebenden Spannungsschwingbreite erfolgt in Abhängigkeit des Bereichs, in dem der Werkstoff beansprucht wird. Entscheidend für die Bestimmung des Belastungsbereiches ist die aus der kleinsten zulässigen und der maximal zulässigen Umfangsspannung resultierende Mittelspannung bzw. deren korrigierter Wert.⁷² Im Berechnungsbeispiel des Regelwerks erfolgt die Ermittlung der maßgebenden Spannungsschwingbreite zur Ermittlung der zulässigen Lebensdauer auf gleiche Weise, wie zur Bestimmung des zulässigen Temperaturgefälles. Diese Vorgehensweise entspricht nicht den Vorgaben des Regelwerks, so dass bei den in dieser Arbeit vorgenommenen Berechnungen die korrekte Methode in Abhängigkeit der gegebenen Mittelspannung erfolgt (siehe auch Tabelle 2-8). Der Mittelwert der Hauptspannungsdifferenzen errechnet sich zu:

$$f_v = \frac{1}{2}(f_1 + f_2) \quad \text{Gleichung 2-45}$$

Dabei ist:

f_v der Mittelwert der Hauptspannungsdifferenzen, mit welchem auch die Spannungsschwingbreite bestimmt wird.

$f_{1,2}$ der minimale und der maximale Wert der zulässigen Umfangsspannung.

Gemäß Regelwerk wird die Spannungsschwingbreite für den mehrachsigen Spannungszustand über den Mittelwert der Hauptspannungsdifferenzen ermittelt.⁷²

$$f_v = \frac{1}{2}(\hat{f} - \check{f}) \quad \text{Gleichung 2-46}$$

Hierbei ist:

f_v die Mittelspannung oder Referenzspannung und

$\hat{f} - \check{f}$ die Hauptspannungsdifferenz.

Zur Berücksichtigung des Einflusses der Oberflächengüte nach einer möglichen Bearbeitung und von Schweißnähten sind die Spannungsschwingbreite und die Mittelspannung zu erhöhen. Damit wird die hieraus resultierende Kerbwirkung formal in die Spannungsbetrachtung mit einbezogen.⁷²

$$f_v^* = f_v \cdot C_k \quad \text{Gleichung 2-47}$$

Dabei ist:

f_v^* die korrigierte Mittelspannung,

f_v die Mittelspannung und

C_k der Korrekturbeiwert.

Der Korrekturwert wird mit Hilfe von Ermüdungsversuchen bestimmt oder rechnerisch ermittelt.⁷²

Die Korrekturwerte zur Berücksichtigung der Kerbwirkung durch den Einfluss von Schweißnähten werden in die drei Nahtklassen 1 bis 3 eingeteilt. In der Praxis finden sich bei der Berechnung der Sammler unterschiedliche Vorgehensweisen. So wurde in der RWE Studie 2012 grundsätzlich mit einem $C_{k1} = 1$ gerechnet, mit der nachfolgenden Begründung:

*„Eine Abwertung der Schweißnaht Stutzen - Grundkörper bzw. Grundkörper - Grundkörper erfolgte nicht, vielmehr wurde davon ausgegangen, dass die Schweißnaht die gleichen festigkeitstechnischen Eigenschaften wie die verbundenen Werkstoffe besitzt.“
(RWE Studie 2012 3.8.2012, S. 10 von 241)*

In dieser Arbeit wird unterstellt, dass durchaus eine Kerbwirkung der Schweißverbindungen berücksichtigt werden muss und daher eine Beeinträchtigung entsprechend der Nahtklasse 1 mit einfließen sollte.

Im vorliegenden Fall wurde der Korrekturwert C_{k1} dem Regelwerk entsprechend ermittelt und nach den in (Tabelle 2-7)⁷² genannten Vorgaben bestimmt:

Zugfestigkeit R_m	Schweißverbindungen der Nahtklasse 1 (leichte Kerbwirkung)
MPa	C_{k1}
400	$1,5 \leq 0,19 \lg N_a + 0,62 \leq 1,8$
600	$1,7 \leq 0,40 \lg N_a + 0,20 \leq 2,7$
800	$1,8 \leq 0,56 \lg N_a + 0,12 \leq 3,4$
1000	$1,9 \leq 0,70 \lg N_a + 0,40 \leq 4,0$

Tabelle 2-7: Berechnung der Korrekturwerte für die Kerbwirkung

Die Berechnung erfolgt dabei derart, dass bei der für den Werkstoff spezifischen Zugfestigkeit die Anzahl der Lastwechsel eingegeben wird und die Gleichung innerhalb der vorgegebenen Bandbreite gelöst wird. Ist das Ergebnis über dem Maximal- oder unter dem Minimalwert, so wird der jeweilige Maximal- bzw. Minimalwert übernommen.

Da die Zugfestigkeiten der Werkstoffe in den praktischen Beispielen Zwischenwerte der vorgegebenen Werte sind, wurde auch in diesem Fall wieder eine Interpolation nach Larson-Miller durchgeführt. Die Berechnungen in dem eigenständigen Worksheet "*Ermittlung Ck1*" werden in Kap. 5 ausführlich erläutert.

Die Ermittlung der maßgebenden Spannungsschwingbreite wird durch die Unterscheidung in den elastischen, den teilplastischen und den vollplastischen Bereich abgebildet.

Diese Unterscheidung erfolgt mittels des Vergleichs der Mittelspannung oder der Spannungsschwingbreite mit der Streckgrenze $R_{p0,2T^*}$.⁷²

Der Werkstoff befindet sich noch im **elastischen Bereich**, wenn der Betrag der korrigierten Mittelspannung zzgl. der halben virtuellen Spannungsschwingbreite noch unterhalb der 0,2% Dehngrenze für die betrachtete Temperatur liegt, d.h.⁷²

$$|f_v^*| + f_{va}^* \leq R_{p0,2T^*} \quad \text{Gleichung 2-48}$$

Für diesen Bereich wird die Spannungsschwingbreite aus der nachfolgenden Gleichung ermittelt:

$$2f_a^* = \frac{2f_{va}^*}{(1 - (f_v^*/R_m)^2)} \quad \text{Gleichung 2-49}$$

Ist die Mittelspannung nicht bekannt, wie im Falle der Bestimmung des zulässigen Temperaturgefälles, so kann eine erste Abschätzung des elastischen Bereichs erfolgen durch:⁷³

$$2f_a^* \leq R_{p0,2T^*} \quad \text{Gleichung 2-50}$$

Für diesen Fall wird die virtuelle Spannungsschwingbreite der Spannungsschwingbreite gleich gesetzt:

$$2f_{va}^* = 2f_a^* \quad \text{Gleichung 2-51}$$

Der **teilplastische Bereich** liegt dann vor, wenn die Summe der Mittelspannung und der halben virtuellen Spannungsschwingbreite während eines Lastspiels die Streckgrenze übersteigt, aber die halbe virtuelle Spannungsschwingbreite noch kleiner als die Streckgrenze ist, d.h. wenn gilt:⁷²

$$|f_v^*| + f_{va}^* > R_{p0,2T^*} \geq f_{va}^* \quad \text{Gleichung 2-52}$$

Die Spannungsschwingbreite wird ebenfalls entsprechend Gleichung 2-46 berechnet, jedoch wird anstelle der Mittelspannung f_v die verminderte Mittelspannung f_{vR}^* verwendet. Diese errechnet sich aus:

$$f_{vR}^* = R_{p0,2T^*} - 2f_{va}^*/2 \quad \text{Gleichung 2-53}$$

f_{vR}^* steht in diesem Fall für die verminderte Mittelspannung.

Ist die Mittelspannung nicht bekannt, wie im Falle der Bestimmung des zulässigen Temperaturgefälles, so kann eine erste Abschätzung des teilplastischen Bereichs erfolgen durch:⁷³

$$R_{p0,2T^*} \leq 2f_a^* \leq 2 \cdot R_{p0,2T^*} \quad \text{Gleichung 2-54}$$

Die Bestimmung der virtuellen Spannungsschwingbreite erfolgt in diesem Fall durch die Umformung einer quadratischen Gleichung mit den Hilfsgrößen X und Y :

$$2f_{va}^* = 2R_{p0,2T^*} \cdot \left(X - Y + \sqrt{1 - 2XY + Y^2} \right) \quad \text{Gleichung 2-55}$$

mit den Hilfsvariablen:

$$Y = R_m / 2f_a^* \quad \text{Gleichung 2-56}$$

und

$$X = R_{p0,2T^*} / R_m \quad \text{Gleichung 2-57}$$

Der Werkstoff befindet sich dann im **vollplastischen Bereich**, wenn bei bekannter Mittelspannung die virtuelle Spannungsschwingbreite den zweifachen Wert der Streckgrenze übersteigt, d.h.:⁷²

$$2f_{va}^* > 2 \cdot R_{p0,2T^*} \quad \text{Gleichung 2-58}$$

Für diesen Fall wird die Mittelspannung als Null angenommen und die maßgebende Spannungsschwingbreite wie folgt berechnet:

$$2f_a^* = \frac{(2f_{va}^*)^2}{2R_{p0,2T^*}} \quad \text{Gleichung 2-59}$$

Bei nicht bekannter Mittelspannung gilt das Erreichen des vollplastischen Bereichs, wenn die maßgebende Spannungsschwingbreite größer als die doppelte Streckgrenze ist:⁷³

$$2f_a^* > 2 \cdot R_{p0,2T^*} \quad \text{Gleichung 2-60}$$

In diesem Fall bestimmt sich die virtuelle Spannungsschwingbreite wie folgt:

$$2f_{va}^* = \sqrt{2R_{p0,2T^*} \cdot 2f_a^*} \quad \text{Gleichung 2-61}$$

Für jede Berechnung, bei der die Mittelspannung nicht bekannt ist, erfolgt eine zweite Iteration, nachdem die Mittelspannung mit Hilfe der zuvor bestimmten virtuellen Spannungsschwingbreite ermittelt wurde. Im Regelwerk wird in der Beispielrechnung bei der Ermittlung der zulässigen Lastspielzahl zur Bestimmung des Bereichs nicht die Mittelspannung verwendet, was nicht den Vorgaben desselben Regelwerks im Abschnitt B6 (S. 141) entspricht. In der nachfolgenden Tabelle 2-8 sind die Abweichungen der in dieser Arbeit durchgeführten Überprüfungen von der Beispielrechnung im Regelwerk aufgeführt.

Verwendete Abfragen in der EN 12952-3:2011 in der Beispielrechnung zur Berechnung der zulässigen Lastspielzahl gemäß Tabelle C.1, S. 146	Hier verwendete Abfragen, entsprechend den Vorgaben der EN 12952-3:2011 gemäß Anhang B.6, S.141
Überprüfung des elastischen Bereichs:	
$2f_{va}^* \leq R_{p0,2T^*}$	$ f_v^* + f_{va}^* \leq R_{p0,2T^*}$
Überprüfung des teilplastischen Bereichs:	
$R_{p0,2T^*} \leq f_v^* \leq 2R_{p0,2T^*}$ oder $R_{p0,2T^*} \leq 2f_{va}^* \leq 2R_{p0,2T^*}$	$ f_v^* + f_{va}^* > R_{p0,2T^*} > f_{va}^*$
Überprüfung des vollplastischen Bereichs:	
$2f_{va}^* > R_{p0,2T^*}$	$2f_{va}^* > 2 \cdot R_{p0,2T^*}$

Tabelle 2-8: Abweichungen von der Beispielrechnung in der EN 12952-3

2.6 Herstellung und Bearbeitung von Hochtemperaturwerkstoffen

Neben den grundlegenden Eigenschaften des Werkstoffs, sind auch die Werkstoffkosten und die Möglichkeiten zur Herstellung und zur weiteren Verarbeitung entscheidend für die Auswahl eines Werkstoffs für einen konkreten Anwendungsfall.

Im Herstellungsprozess unterscheidet man hierbei im Wesentlichen zwischen den Knetlegierungen, die nach Ihrem Guss noch eine weitere Bearbeitung ermöglichen und den Gusslegierungen, die direkt aus der Schmelze in das Endprodukt gegossen werden.

Bei den Knetlegierungen liegt, bedingt durch die nachfolgenden Umformungsprozesse, eine Beschränkung in der Auswahl der Legierungen vor. Die Gießereitechnologie ermöglicht alternativ die Herstellung weiterer Legierungen.

Wesentlich für den Herstellungsprozess einer Legierung sind die Temperaturverläufe in der Schmelze und der nachfolgende Abkühlungsprozess. Hierzu sind die jeweiligen Solidus- und Liquidustemperaturen der einzelnen Elemente von wesentlicher Bedeutung. Die Grenzen und Bedeutungen dieser Temperaturbereiche lassen sich z. B. aus dem Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (Abbildung 2-10) ablesen. So liegt oberhalb der Liquidustemperatur eine Schmelze mit rein flüssiger Phase vor. Unterhalb der Solidustemperatur liegt die Substanz vollständig in fester Phase vor. Der Zwischenbereich wird durch das Schmelzintervall gekennzeichnet in dem feste und flüssige Phase nebeneinander existieren. Eine Besonderheit bilden die eutektischen Legierungen, bei denen der Übergang von der flüssigen zur festen Phase schlagartig stattfindet. Der eutektische Punkt des Eisens wird im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm durch den Punkt C gekennzeichnet.

Bedingt durch die zwangsläufig unterschiedlichen Löslichkeiten der Legierungselemente in der Schmelze kommt es im Herstellungsprozess immer zu Ungleichmäßigkeiten in der Verteilung, den sog. Seigerungen. Die Liquidustemperatur der Gesamtschmelze kann sich in Abhängigkeit von den Legierungselementen erhöhen oder verringern. Lediglich Kobalt verteilt sich als Legierungselement homogen. Wolfram, Rhenium, Ruthenium und Iridium reichern sich in den Dendriten an, bei Aluminium, Titan, Chrom, Molybdän, Tantal, Niob, Hafnium, Zirkonium und Yttrium erfolgt die Anreicherung interdendritisch und an den Korngrenzen. In beiden Fällen steigt der Seigerungsgrad, und das erstarrte Material besitzt eine geringere Solidustemperatur als im Gleichgewicht. Entsprechend müssen in der Regel Homogenisations-Glühbehandlungen durchgeführt werden, um das Legierungspotenzial durch den Ausgleich der Seigerungen bestmöglich auszuschöpfen.²⁶ Gelingt das nicht, bilden sich Sprödphasen mit einem erheblichen Verlust an Zeitstandfestigkeit für das Material.

Die Wärmebehandlung der warmfesten Stähle zielt vorwiegend auf die Ausbildung eines ferritisch-bainitischen Gefüges ab. Zusätzlich können auch Martensit und Restaustenitanteile auftreten; Letztere verschwinden beim Anlassen zugunsten weiteren Bainits.²⁶ Zur Wärmebehandlung sei beispielhaft auf das ZTU-Diagramm des P92 in der Abbildung 2-11 verwiesen.

Mit dem Einsatz neuer Stahlsorten ist es gleichzeitig erforderlich, neue Schweißzusatzwerkstoffe zu entwickeln bzw. die eng an die jeweils verwendeten Grundwerkstoffe angelegten Schweißzusatzwerkstoffe entsprechend zu untersuchen.⁷⁴ Die Entwicklung neuer Werkstoffe brachte aber immer auch neue Probleme in der Fügetechnik mit sich. Bereits um 1930, als die erste 700 bar Kohle-Hydrieranlage mit dem neu entwickelten Kruppstahl V2A-ED gebaut wurde, kam es zu Schwierigkeiten durch Warmrisse im Schweißgut.³⁴

Eine bis heute vorhaltende Frage ist immer wieder die Diskussion um die Notwendigkeit zur Wärmebehandlung nach oder auch vor dem Schweißen. Anfang der fünfziger Jahre gab es erstmalig eine grundsätzliche Regelung zur Frage der Wärmebehandlung von Stählen nach dem Schweißen. Bei der Herstellung austenitischer Rohre waren es insbesondere interkristalline Risse infolge der Aufkohlung und Warmrisse im Schweißgut und Risse in der WEZ, sowie auch Probleme durch Versprödung bei hohen Temperaturen, die für Schwierigkeiten in der Akzeptanz der neuen Werkstoffe gesorgt haben.

Für den Alloy 617B wird nach der Kaltumformung und dem Schweißen eine Stabilglühung bei 980 °C über 3 Stunden empfohlen, um Relaxationsrisse zu vermeiden.⁷⁵ Bei dem Stahl P91 (X10CrMoVNb9-1), der eine für viele Anwendungen ausreichende Zeitstandfestigkeit aufweist, ist nach dem Schweißen ebenfalls eine Wärmebehandlung erforderlich. Damit ist gewährleistet, dass Härtespitzen von mehr als 400 HV (Härteprüfung nach Vickers) in der WEZ (Wärmeeinflusszone) der Schweißnaht vermieden werden und im Schweißgut eine ausreichende Kerbschlagzähigkeit erzielt wird.³² Das nachfolgende Diagramm zeigt für verschiedene Legierungen den Einfluss der Abkühlzeit auf die Härte des Werkstoffs (Abbildung 2-23)⁷⁶.

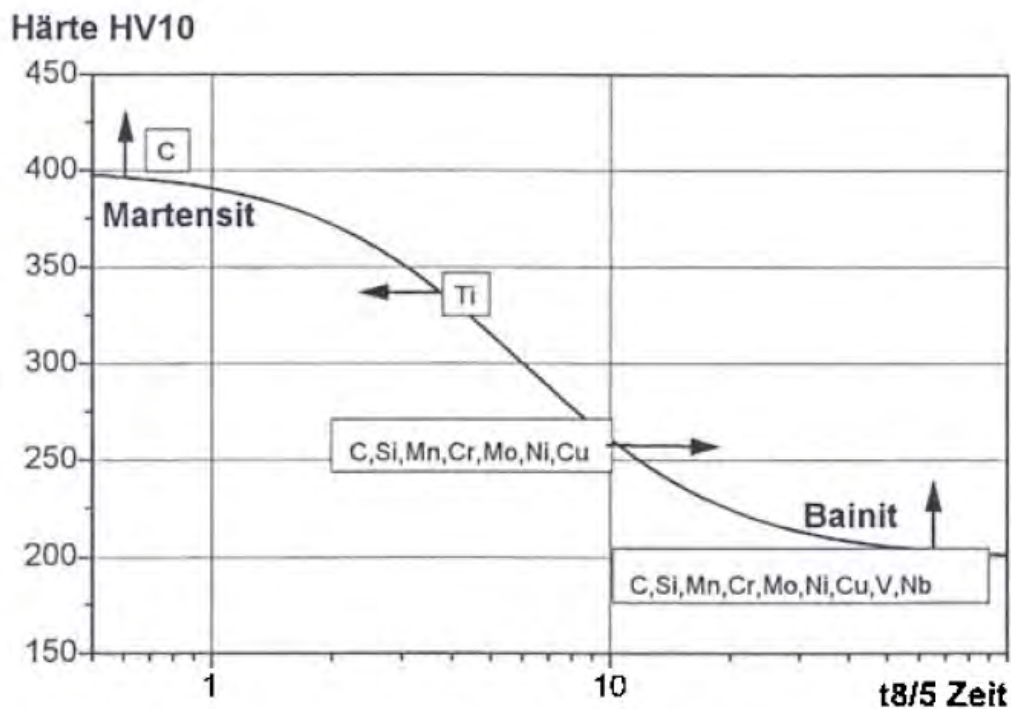


Abbildung 2-23: Einfluss der Legierungselemente und Abkühlzeit (in Sekunden) auf die Härte in der WEZ (schematische Darstellung)

Hierbei bezeichnet die $t_{8/5}$ -Zeit den Zeitraum, der bei der Abkühlung des Schweißgutes benötigt wird, damit das Schweißgut den Temperaturbereich von 800 bis 500 °C durchläuft. Es wird unterstellt, dass die wesentlichen Veränderungen innerhalb des Werkstoffs nach diesem Zeitraum abgeschlossen sind.⁷⁷

Bei allen Werkstoffen ist es von besonderer Bedeutung, dass die Hersteller der Schweißzusatzwerkstoffe die erforderlichen Zeitstandfestigkeiten ihrer Werkstoffe nachweisen können. Gleiches gilt für eine ausreichende Zähigkeit des Schweißgutes bei Raumtemperatur. Da das Zähigkeitsniveau bei den martensitischen Stählen aufgrund der Legierungszusätze und der Gefügestruktur im Grundwerkstoff deutlich geringer ist als bei den ferritischen oder bainitischen Werkstoffen, müssen Modifikationen gegenüber dem Grundwerkstoff vorgenommen werden. So wird z. B. für den P92 und den E911 im Schweißgut der Nickelgehalt erhöht und der Niobgehalt reduziert. Das Schweißen erfolgt im martensitischen Temperaturbereich zwischen 200 und 350 °C. Die Abkühlgeschwindigkeit muss so ausgelegt sein, dass die vollständige martensitische Umwandlung erzielt wird. Die Härte des Schweißgutes liegt schon vor der Wärmebehandlung (2 Stunden bei 720 °C) deutlich unterhalb der Härte des X20CrMoV11-1, so dass das Risiko interkristalliner Spannungsrisskorrosion und der Kaltrissbildung deutlich verringert ist. Eine weitere Steigerung der Zähigkeit kann durch das Schweißen dünner Lagen erzielt werden.⁷⁴

Das Risiko im Schweißprozess liegt in den nachfolgend genannten Arten von Defekten:⁷⁸

- Erstarrungsrisse,
- Wiederaufschmelzrisse,
- Heißrisse infolge eines Verformbarkeitsabfalls und
- Risse, die während der Wärmenachbehandlung auftreten.

Probleme beim Schweißen austenitischer Werkstoffe hat es zu Beginn kaum gegeben. Erst mit der Erhöhung der Wanddicken traten vermehrt Komplikationen in den WEZ stabilisierter Stähle bei hochbeanspruchten Schweißnähten auf. Diese sind zurückzuführen auf das Ausscheiden des vorhandenen Niob-Carbids, welches sich zuvor beim Schweißvorgang knapp unterhalb des Schmelzpunktes aufgelöst hat. In fein verteilter Form behindert dieses Carbid die plastische Verformung und führt zu interkristallinen Rissen. Verhindert werden kann das nur durch eine Glühung oberhalb von 900 °C. Außerdem zu vermeiden sind die eutektischen Phasen, die durch Verunreinigungen mit Schwefel, Phosphor oder Bor entstehen können. Deren niedrigerer Schmelzpunkt führt mit dem hohen Wärmeausdehnungsvermögen des Austenits beim Abkühlen zu Warm- oder Heißrisen. Durch moderne Schweißtechnologien (wie z. B. gepulsten Lasern) ist die Gefahr der Heißrisbildung bei niobhaltigem, vollaustenitischem Schweißgut wesentlich geringer geworden.³⁴ Auch die Verwendung von Schweißzusatzwerkstoffen führt zur Vermeidung von Heißrisen.⁷⁹ Dennoch sind Nickelbasislegierungen, wie auch die meisten anderen Werkstoffe mit kubisch flächenzentrierter Gitterstruktur, sehr anfällig für die Bildung von Heißrisen beim Schweißen. Hemsworth unterscheidet die zwei grundsätzlich verschiedenen Heißrisarten.⁸⁰

Der erste Typ beschreibt die im Wesentlichen die durch Seigerungen niedrigschmelzender Elemente auf den Korngrenzen hervorgerufenen interkristallinen Werkstofftrennungen während des Übergangs zwischen Solidus und Liquidus. Konkret handelt es sich hierbei um die oben bereits genannten Erstarrungsrisse und die Wiederaufschmelzrisse zwischen der Schmelzlinie und der WEZ des Grundwerkstoffes oder eines Mehrlagenschweißgutes.

Der zweite Typus beschreibt die Heißrisse, die international auch als Ductility Dip Cracks (DDC) bezeichnet werden. Die Ursache dafür liegt darin, dass während der Abkühlung ein Bereich geringer Duktilität durchlaufen wird.⁷⁸

Für Schweißarbeiten am Alloy 617 werden in der Regel artgleiche Schweißzusatzwerkstoffe eingesetzt. Wie bereits bei dem Grundwerkstoff, gibt es in der chemischen Zusammensetzung große Toleranzbreiten. Kritisch ist dabei, dass die Anforderungen der Normen aus der EN keine Mindestwerte für karbid- und γ' -bildende Elemente wie Titan und Aluminium vorgeben, obwohl diese wesentlichen Einfluss u.a. auf die Zeitstandfestigkeit haben. Es gibt zudem unterschiedliche Schweißverfahren, insbesondere bei Unterpulver-Schweißungen oder E-Hand-Schweißungen, bei denen mit einem deutlichen Abbrand dieser Stoffe gerechnet werden muss.⁸¹ Es empfiehlt sich daher die Verarbeitung der Schweißzusatzwerkstoffe unter Schutzgas (Argon oder Argon-Helium-, Argon Wasserstoff-Gemische), da der Abbrand von Legierungselementen hierbei unerheblich ist.

Aufgrund der sehr universellen Einsetzbarkeit von Stabelektroden und Drahtpulver-Kombinationen auf den Baustellen, sind diese Verfahren für die Verarbeitung des Alloy 617 eine zwingende Voraussetzung. Über eine entsprechende Schweißtechnik kann bei der Drahtpulverkombination auf den Abbrand Einfluss genommen werden. Der Abbrand der Legierungselemente kann außerdem durch ein entsprechendes Hüllenkonzept bei der Stabelektrode kompensiert werden. Auch ist darüber die Zulegierung von Legierungselementen möglich.⁸²

Für die im Einsatz erprobten bainitisch-ferritischen Stähle wie der 13CrMo4-5 oder der 10CrMo9-10 erfolgt die maximale Aufhärtung durch den in der Regel hohen Martensitanteil, der sich nach dem Abkühlen der dünnwandigen Schweißnähte einstellt. Dabei muss durch eine Begrenzung des C-Gehaltes die Martensithärte so weit verringert werden, dass maximale Härtewerte von 350 HV in der WEZ nicht überschritten werden.

Bei den martensitischen Chromstählen treten im Schweißzustand maximale Härtewerte zwischen 450 und 650 HV₁₀ auf.⁸³ Allerdings ist hier eine vergleichbare Reduzierung des C-Gehalts nicht oder nur eingeschränkt möglich, da ansonsten zweiphasige ferritisch-martensitische Gefüge auftreten.

Nachfolgend sind die zu beachtenden Gefügeveränderungen in den wärmebeeinflussten Zonen der Schweißnaht dargestellt (Abbildung 2-24⁸⁴):

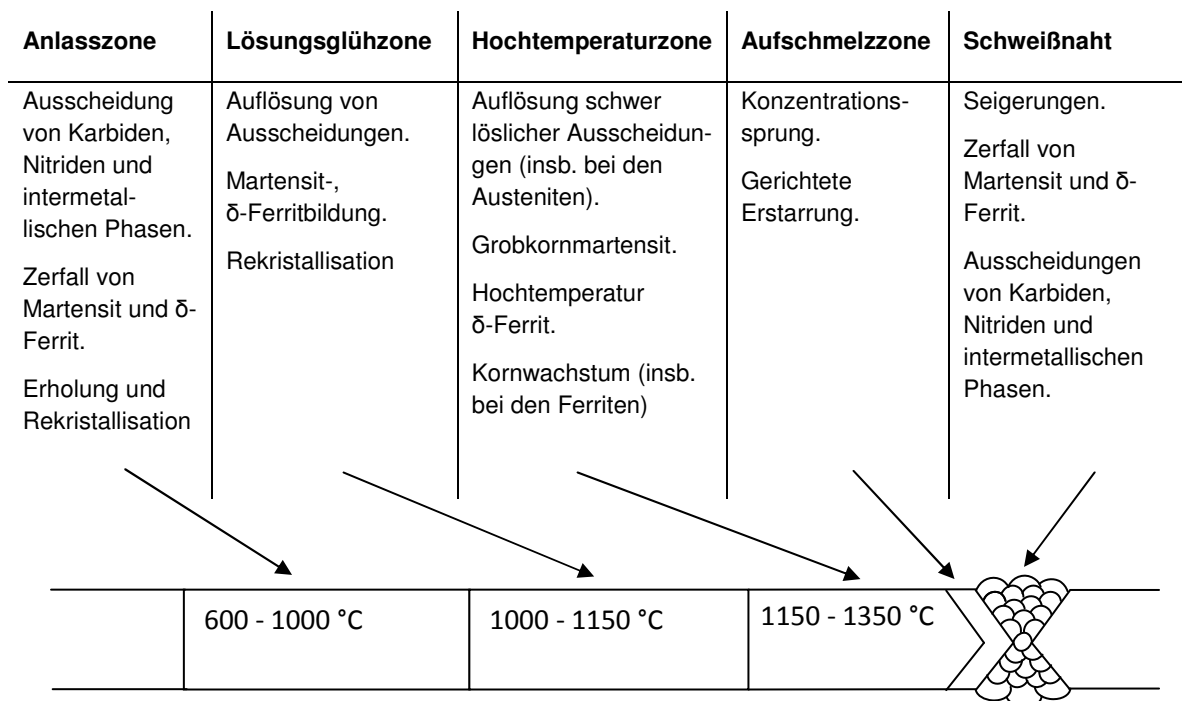


Abbildung 2-24: Gefügeveränderungen in der wärmebeeinflussten Zone einer Schweißnaht

Ein wesentlicher zu beachtender Punkt bei den Gefügeveränderungen im Schweißnahtbereich ist die Chromkarbidausscheidung. Insbesondere im Anlassbereich führt die Ausscheidung auf den Korngrenzen zu einer Chromverarmung im Korngrenzbereich und verursacht damit den Kornzerfall oder die interkristalline Korrosion. Da die Ausscheidungen unmittelbar vom Kohlenstoffgehalt abhängen, bedingt eine Reduktion des Kohlenstoffgehalts eine Verzögerung der Chromkarbidausscheidung und damit eine Reduktion der interkristallinen Korrosionsanfälligkeit. Alternativ kann auch durch eine Erhöhung der Gehalte an den Elementen Titan oder Niob, die eine höhere Affinität zu Kohlenstoff haben als Chrom, auf indirektem Wege die Bildung von Chromkarbiden vermieden werden. Ein weiteres Mittel ist der Zusatz von Stickstoff, durch den die Diffusion des Kohlenstoffs behindert und damit die Ausscheidung verzögert wird. Er führt außerdem zu einer Verzögerung der Chi-Phasen-Ausscheidung, so dass auch die dadurch geförderte interkristalline Korrosionsanfälligkeit verhindert werden kann. Eine Zunahme der Ausscheidungsgeschwindigkeit wird jedoch durch den Zusatz von Nickel erreicht, was bei den in dieser Arbeit betrachteten Nickelbasiswerkstoffen von besonderer Bedeutung ist. Dennoch spielen die Chromkarbide für den in diesem Fall geforderten Einsatz im Hochtemperaturbereich weniger eine Rolle als korrosionsfördernde, sondern vielmehr als Zeitstandfestigkeit erhöhende Phasen. Eine weitere Beständigkeit der CrNi-Stähle erfolgt durch den Zusatz von Molybdän.

Bei Versuchen zur Schweißbarkeit des E911 konnte festgestellt werden, dass der Werkstoff nach einer dreistündigen Wärmebehandlung bei 750 °C ein Zähigkeitsniveau von 50 Joule in der Mitte des Schweißgutes erreicht hatte. Außerdem konnte kein Absinken der in der WEZ festgestellten Härte unter die Härte des Grundwerkstoffs festgestellt werden. Die Zusammensetzung des Schweißwerkstoffs entsprach in den Tests der des Grundwerkstoffs mit der Ausnahme, dass der Mn- und Ni-Gehalt etwas höher und der N-Gehalt etwas niedriger war. Dadurch konnte eine gute Zähigkeit und Zeitstandfestigkeit dem Grundwerkstoff entsprechend erzielt werden.⁶

Aus den zuvor genannten Schwierigkeiten im Schweißprozess bzw. der möglichen nach dem Schweißvorgang resultierenden Schädigungen sind Wärmenachbehandlungen in den meisten Situationen obligatorisch. Liegen hohe Eigenspannungen im Werkstück, z. B. durch Kaltverformungen, vor und ist ein Lösungsglühn nicht möglich, so sollte eine Spannungsarmglühung bei geringen Temperaturen (500 °C bis 600 °C) erfolgen. Unter der Spannungsarm- oder Relaxationsglühung versteht man den Glühprozess, der zu einem Spannungsabbau durch den Übergang eines kristallinen Festkörpers in einen Gleichgewichtszustand unter Beibehaltung der Gitterstruktur führt.⁷⁸

Eine tiefere Beschreibung des Lösungsglühprozesses wird in der EN 10302 für unterschiedliche Werkstoffe beschrieben. In dieser Norm werden außerdem die erforderlichen Glühzeiten und Temperaturen für die verschiedenen Werkstoffe angegeben.

Sollen Komponenten aus Nickellegierungen in einen vorhandenen Dampfkreislauf aus niedriglegierten Stählen eingefügt werden, entstehen sogenannte Mischverbindungen oder auch Schwarz-Weiß-Verbindungen, dabei beschreibt die "schwarze" die "unedlere" Seite, z. B. den Martensit, und die "weiße" die "edlere" Seite, z. B. die Nickelbasislegierung. In der Regel sollte das Schweißen mit überlegierten rostfreien Zusatzwerkstoffen erfolgen, die höher als der Grundwerkstoff legiert sind. Es werden zwei Methoden empfohlen, wobei entweder die ganze Naht mit einer Nickel-Basis-Legierung verschweißt wird oder die niedriglegierte Nahtseite mit einem überlegierten Werkstoff gepuffert und anschließend mit der Nickel-Basis-Legierung gefüllt wird. Für die in unserem Fall geforderten Hochtemperaturanwendungen werden in der Regel Schweißgüter verwendet, die bei einer entsprechenden Wärmebehandlung über eine gute Dehnfähigkeit verfügen und dadurch die Eigenspannungen in der Naht verringern. Außerdem sind diese Arten weniger anfällig für Versprödung.⁸⁵

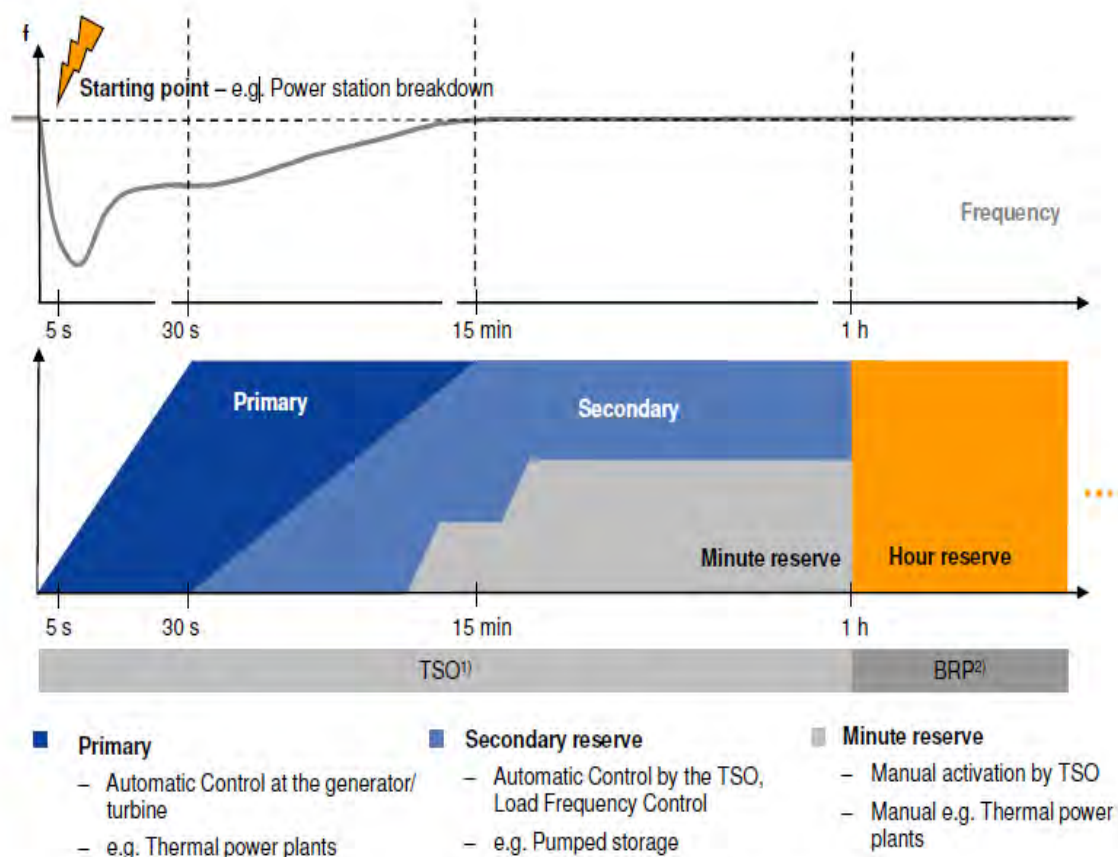
Bei der Betrachtung und Berechnung der Sammler wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Stutzen mit einer restspaltfreien Nippelschweißung mit einem Nippelschweißautomaten auf den Grundkörper aufgebracht werden. Es handelt sich bei diesem Verfahren um ein Standardverfahren für den Werkstoff P92, welches auch für die Verschweißung von Nickelbasiswerkstoffen verwendet wird. Sowohl die Stutzen-Grundkörper- als auch die Sammlerrundnähte sind voll durchgeschweißte Nähte. Diese Voraussetzung ist wesentlich für die Festlegung der Korrekturwerte für die Kerbwirkung, die sich in den Berechnungen in Form der Gleichung 2-47 wiederfinden.

Die beschriebenen technischen Herausforderungen beim Schweißen von Nickelbasislegierungen führen bei den Wirtschaftlichkeitsberechnungen dazu, dass für diese Werkstoffe ein erhöhter Kostenblock für die Installation und die Wartung und Instandhaltung kalkuliert wird.

3 Hochtemperaturwerkstoffe im flexiblen Kraftwerkseinsatz

3.1 Anforderungen an den zukünftigen Kraftwerksbetrieb

Die elektrische Energieversorgung ist ausgelegt auf einen ständigen Abgleich der geforderten und der zur Verfügung gestellten elektrischen Energie. Wesentlicher Treiber für die notwendigerweise bereitzustellende Leistung war in der Vergangenheit die Last im Netz. Daraus resultierte der sogenannte Lastfolgebetrieb, bei dem die Energieversorger ihre Erzeugung mittel- und langfristig dem aufgrund von Erfahrungen prognostizierten und kurzfristig dem realen Lastverlauf anpassen. Die Übereinstimmung der Eingangs- und Ausgangsgrößen ist von elementarer Bedeutung für den Netzbetrieb, da ein Ungleichgewicht sehr schnell zu einer Abweichung im Frequenzbereich führt und dieses zur Zwangsabschaltung des Gesamtnetzes führen kann. Bei den Regelmechanismen unterscheidet man zwischen der Primär-, Sekundär- und Tertiärregelung (auch Minutenreserve), deren Parameter durch den TransmissionCode 2003 definiert und nachfolgend (Abbildung 3-1)⁸⁶ dargestellt sind.



Quelle: VDI-Vortrag, Ritterbach, Then, November 2008

Abbildung 3-1: Schematische Übersicht der Regelenenergieleistung

Bei der Primärregelung muss innerhalb von maximal 30 Sekunden und für einen Zeitraum von minimal 15 Minuten eine ausreichende Kraftwerksleistung bereitgestellt oder vom Netz genommen werden, die einer Frequenzabweichung von $\pm 0,2$ Hz entgegen wirkt. Die hierfür qualifizierten Anlagen sind alle sehr schnell zu regelnde Kraftwerke. Das sind insbesondere natürlich die Pumpspeicherkraftwerke, die innerhalb kürzester Zeit positive oder auch negative Regelenergie liefern können. Auch Gaskraftwerke können insbesondere positive Regelenergie durch steile zulässige Lastgradienten sehr schnell im Netz verfügbar machen. Für die Bereitstellung der Primärregelleistung sind nach dem Solidaritätsprinzip alle im UCTE-Gebiet (Union for the Coordination of Transmission of Electricity) synchron verbundenen Übertragungsnetzbetreiber verantwortlich.

Für die Sekundärregelung gilt eine Bereitstellungszeit von maximal 5 Minuten, die Sekundärregelreserve dient der Frequenzstabilisierung und soll die Primärregelkapazitäten wieder freigeben. Die Laständerungsgeschwindigkeit liegt bei 2% der Nennlast pro Minute und muss ebenfalls für einen Mindestzeitraum von 15 Minuten erbracht werden. Hier sind ebenfalls in erster Linie die Gaskraftwerke gefordert, die, im Gegensatz zu den Pumpspeicherkraftwerken, auch über einen längeren Zeitraum einen Energiebeitrag zur Verfügung stellen können. Ebenfalls können Kohleblöcke, die nur mit Minimallast fahren, auf Vollast gefahren werden oder bei der Anforderung negativer Regelenergie auch in umgekehrter Richtung.

Die Minutenreserve setzt dann ein, wenn die Sekundärregelung nicht ausreicht und Reserven für einen längeren Zeitraum aktiviert werden müssen. Während die Primär- und Sekundärreserve weitestgehend automatisiert bereitgestellt wird, erfolgt die Bereitstellung von Minutenreserve nach fahrplanmäßiger und telefonischer Abstimmung des Netzbetreibers mit den Anbietern. Auch hier gilt es in erster Linie die Primär- und Sekundärreserven wieder frei zu geben. Die Regelzeit erstreckt sich über einen Zeitraum von 15 Minuten bis zu vier Stunden. Dieser Zeitraum ist so bemessen, dass Stein- oder Braunkohlekraftwerke angefahren werden können und die Lastdifferenz über einen längeren Zeitraum kompensieren können.

Klassischer Weise erfolgt die Primärregelreserve durch das automatisierte Hochfahren der "langsamen" Kraftwerke, d.h. insbesondere Braun- und Steinkohle, die auf einem niedrigen Lastniveau im Betrieb sind. Die Sekundärregelreserve erfolgt ebenfalls automatisiert durch die "schnellen" Kraftwerke, wie z. B. Pumpspeicherkraftwerke, die innerhalb kürzester Zeit Leistung abgeben oder im zweiten Fall auch aufnehmen können. Sollte es nun gelingen, die Kohlekraftwerke durch die höhere Flexibilisierung für die Lieferung von Sekundärregelreserve oder Minutenreserve technisch zu präqualifizieren, so würde das zu einem betriebswirtschaftlichen Zusatznutzen für die Energieversorger führen. Es hat hierzu bereits unternehmensinterne Berechnungen für Gaskraftwerke gegeben, die auf Basis eines Leistungspreises von 5.000 € pro MW Schnellstartleistung einen Jahresertrag von 300.000 € bei einer um 4 Minuten reduzierten Anfahrtszeit ermittelt haben. Die nachfolgende Grafik zeigt für heutige Kraftwerke typische Lastgradienten (Abbildung 3-2)⁸⁷.

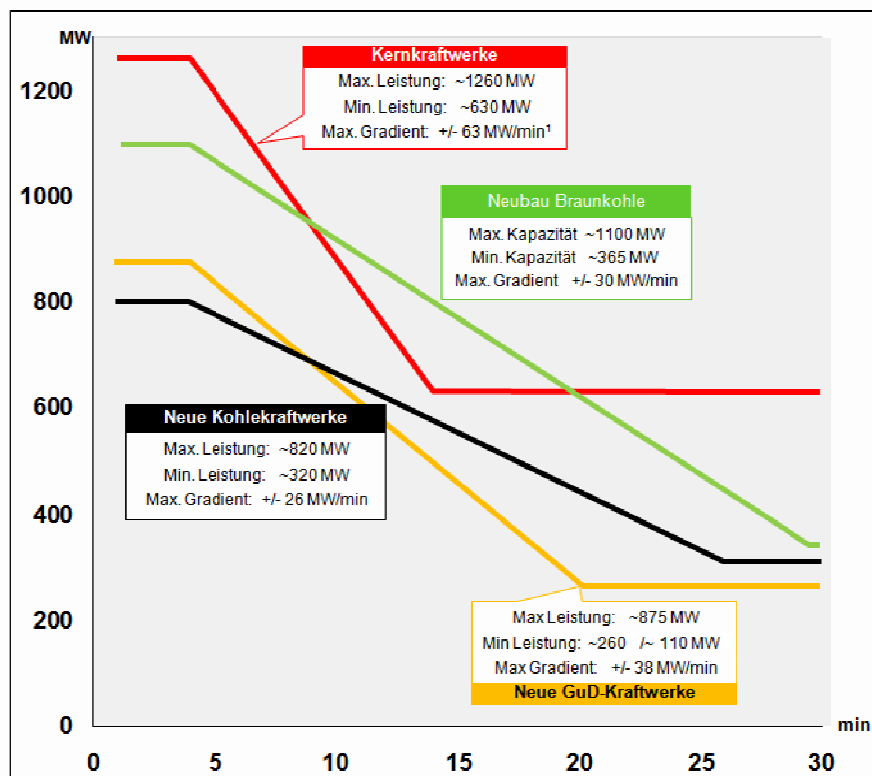


Abbildung 3-2: Typische Lastgradienten moderner Kraftwerke

In der Regel wird die Laständerungsgeschwindigkeit in Leistung pro Maximalleistung in % pro Minute oder in MW/Min angegeben. Für bestehende ältere Kraftwerke ergeben sich die ungefähren Werte aus der nachfolgenden Übersicht (Tabelle 3-1).¹⁶

Kraftwerksart	Steinkohle 1000 MW alt	Braunkohle 1000 MW alt	Neue BK/SK-Anlagen 1000 MW	GuD-Anlage 600 MW
Laständerung in MW/min.	30 MW/min	20 MW/min	70 MW/min	35 MW/min.
Laständerung in %/min.	3%/min	2%/min	7%/min	6%/min

Tabelle 3-1: Laständerungsgeschwindigkeiten allgemein

Wie bereits in Kapitel 2 erläutert, ergeben sich durch die Neuerungen im Bereich regenerativer Energien und auf Basis der politischen Entscheidungen zur Kernenergie neue Anforderungen an die Dynamik der heutigen thermischen Kraftwerke.

In Ergänzung zu dem am Anfang des Kapitels beschriebenen Lastfolgeprinzips erhält der Begriff der Residuallast eine immer größere Bedeutung. Während die Summe der durch die thermischen Kraftwerke zur Verfügung zu stellenden Leistung abnimmt, nimmt die Schwankungsbreite durch die hohe additive Einspeisung an Wind- und Solarenergie deutlich zu. Während bei Untersuchungen aus dem Jahr 2011 die Photovoltaik dazu beigetragen hat, dass im Sommer die Mittagsspitzen gekappt wurden und die thermischen Kraftwerke einen geringeren Leistungsanstieg zu verzeichnen hatten, ist für 2020 damit zu rechnen, dass bei einem weiteren prognostizierten

Ausbau der Photovoltaik um fast 100% der Effekt umgekehrt wird. D.h. durch die hohe Einspeisung zur Mittagszeit müssen die thermischen Kraftwerke in Ihrer Leistung reduziert werden.⁸⁸ Die Konsequenzen der zunehmenden Residuallast wurden unter dem Aspekt der zukünftigen Betriebsparameter thermischer Kraftwerke bereits im Kapitel 2.1 ausführlich beschrieben.

Aus den für das Jahr 2020 prognostizierten Werten ist erkennbar, dass die Leistungsänderungsgeschwindigkeit im Falle einer abfallenden hohen regenerativen Einspeisung bis zu knapp 4%/min. betragen kann, was immerhin dem vierfachen der aktuellen Vorgaben des Verbandes der Netzbetreiber im TransmissionCode⁸⁹ entspricht.

Die Berechnungen ergeben außerdem, dass der Anteil der Spitzenlast zukünftig auf Kosten der Grundlast steigen wird. Daraus ergibt sich für die heutigen Grundlastkraftwerke eine geringere Anzahl an Volllaststunden und die zwingende Notwendigkeit des häufigeren An- und Abfahrens oder der Einstellung eines geringeren Mindestlastbetriebs. Da die Kohlekraftwerke für einen solchen Betrieb nicht ausgelegt wurden, ist deren Eignung zu prüfen und ggf. Modernisierungen vorzunehmen. Die Alternative ist der Neubau schnellerer, z. B. gasbefuerter Kraftwerke.

Neben der reinen Laständerungsgeschwindigkeit ist es das häufige An- und Abfahren, das als zukünftige Anforderung prognostiziert werden kann. Wenn die Gesamtleistung regenerativer Energien im Jahr 2020 wirklich die zu erwartenden 120 GW erreicht, liegt die installierte Leistung deutlich über dem tatsächlichen Leistungsbedarf der Bundesrepublik Deutschland in Höhe von 70 bis 80 GW. Daraus resultiert die Erfordernis des sogenannten Zweischichtbetriebs, d.h. das zum Teil sogar mehrfache tägliche An- und Abfahren auch der Kohlekraftwerke. Während in den vergangenen Jahrzehnten kurze Bauzeiten, Brennstoffflexibilität und die Erhöhung des Wirkungsgrades des Kraftwerks im Vordergrund standen, werden nun dieser Zweischichtbetrieb, der Inselbetrieb, die Schwarzstartfähigkeit, Frequenzstützung und eine hohe Anfahr- und Betriebszuverlässigkeit im Fokus der Energieerzeuger stehen.⁹⁰

Durch RWE wurden für bestehende Kraftwerke die folgenden Startzeiten ermittelt (Tabelle 3-2).

	Max. Lastgradient in % der Nennlast pro Minute	Kaltstart Auszeit > 48h in Minuten	Warmstart Auszeit > 12h und < 48h in Minuten	Heißstart Auszeit < 12h in Minuten	Mögliche Minimallast in % der Nennlast
Steinkohle (alt)	2,5	260	140	100	40
Steinkohle (neu)	6	110	80	60	30
Braunkohle (alt)	2	450	350	260	60
Braunkohle (neu)	2,5	160	130	110	40
GuD Kombi (alt)	4	140	80	60	40
GuD Kombi (neu)	5	160	130	55	32
Pumpspeicher	50	2	-	-	-

Tabelle 3-2: Laständerungsgeschwindigkeiten und Startzeiten von RWE Kraftwerken

Gemeint ist hierbei die Startzeit vom Einschalten der Befeuerung bis zum Erreichen der Nennleistung. Diese Festlegung ist deshalb von Bedeutung, da der eigentliche Startvorgang einen wesentlich größeren Bereich umfasst, wie der nachfolgenden Grafik (Abbildung 3-3)⁹¹ zu entnehmen ist.

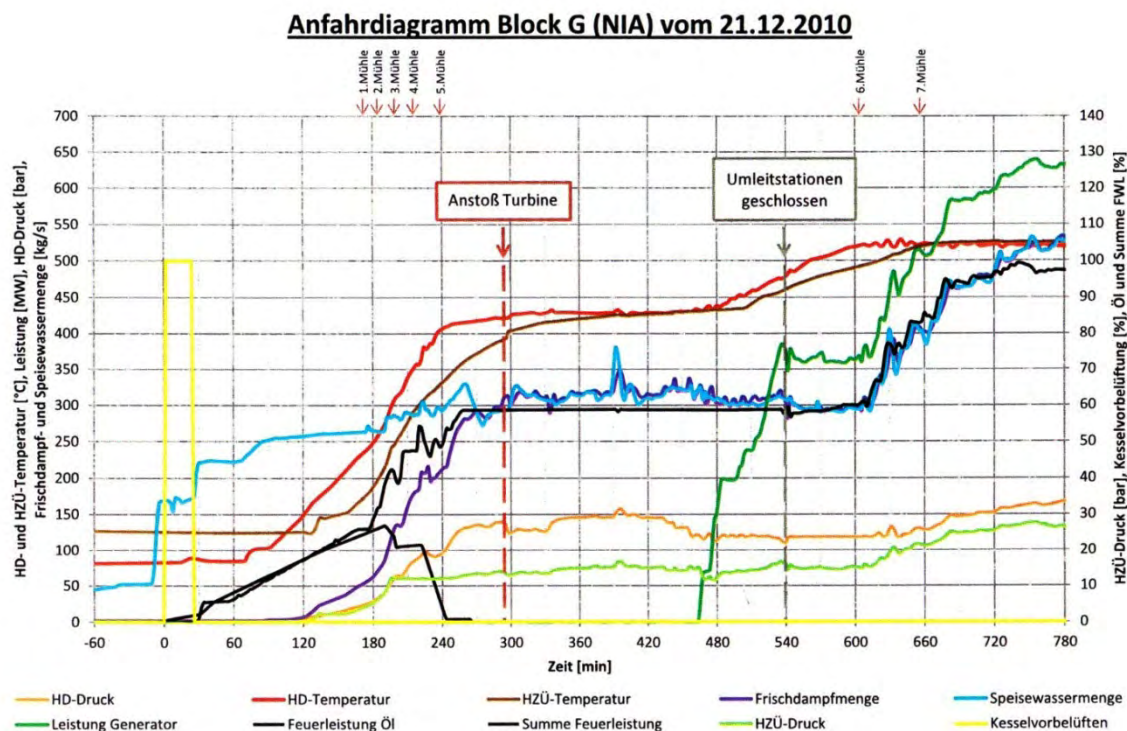


Abbildung 3-3: Anfahrtdiagramm vor regelungstechnischer Optimierung

Neben einer Anpassung der Komponentenwanddicke gibt es weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Flexibilität, die nicht Bestandteil dieser Arbeit sind, im Falle einer zu erhöhenden Dynamik bei einem Kraftwerksblock aber in jedem Fall auch berücksichtigt werden müssen. Diese sind im Einzelnen:

1. Erweiterung des Lastbereichs (geringere Minimallast)
2. Erhöhung der Laständerungsgeschwindigkeit
3. Fähigkeit zu häufigerem An- und Abfahren des Kraftwerksblockes
4. Niedrige Emissionen und hoher Wirkungsgrad im Teillastbereich

Hierzu gibt es seitens der Hersteller unterschiedliche Lösungsansätze, wie z. B. die indirekte/kombinierte Befeuerung mittels eines zwischen Mühlen und Brenner geschalteten Staubsilos oder der Einsatz eines DS-T-Brenners für Trockenbrennstoffe, der ein stabiles Minimalfeuer bei 10% ermöglicht und damit die Mindestlast deutlich absenkt. Der Einsatz eines solchen Brenners ist sowohl im Retrofit als auch im Neubau umsetzbar. Durch die Anpassung von Auslegungsparametern kann der Eigenbedarf der Anlage reduziert werden und durch Wanddickenreduzierungen eine Erhöhung der Dynamik erzielt werden. Auf diesen Punkt soll in den weiteren

Betrachtungen eingegangen werden, da die Verringerung der Wanddicke bei gleicher Auslegungsdauer den Einsatz höherwertiger Werkstoffe voraussetzt. Alternativ ist die mehrsträngige Auslegung der Anlage möglich. Seitens RWE wurden bereits eine Vielzahl von Maßnahmen auch im Bereich der Steuerungs- und Regelungstechnik umgesetzt, die zu höheren Lastgradienten geführt haben. Die Verkürzung der Anfahrzeit durch diese regelungstechnischen Eingriffe ist in der nachfolgenden Grafik (Abbildung 3-4)⁹² gegenüber der Anfahrt vor den Optimierungen (siehe Abbildung 3-3) zu erkennen. Während die Turbinenkopplung vor der Optimierung noch bei 300 Minuten erfolgte, konnte nach der Optimierung bereits nach ca. 220 Minuten die Turbine angekoppelt werden. Lässt man nun die Zeit der Kesselbelüftung noch außen vor, da hier keine thermische Optimierung erfolgen kann, so verkürzt sich die Zeit noch einmal um knapp 30 Minuten, bis die Brenner gestartet sind und der Anstieg der Temperatur erkennbar ist.

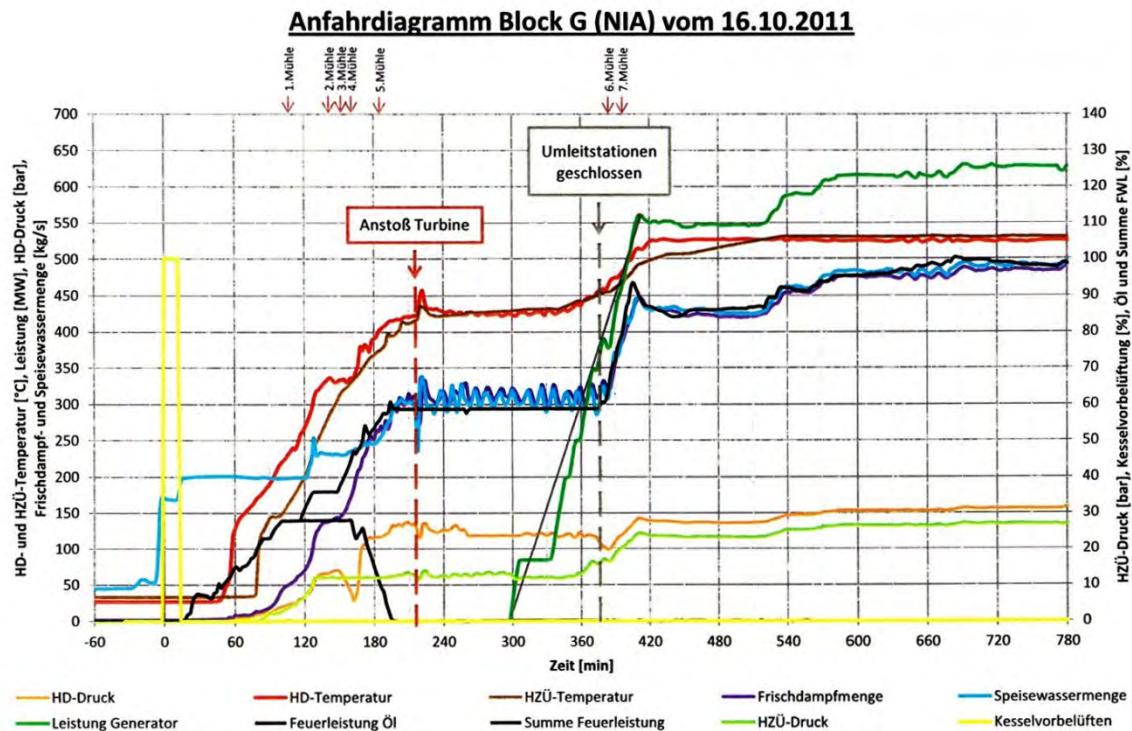


Abbildung 3-4: Anfahrtdiagramm nach regelungstechnischer Optimierung

3.2 Auswahl geeigneter Kraftwerkskomponenten für die exemplarische Betrachtung

Alle in dieser Arbeit betrachteten Vorgänge im Kraftwerk beziehen sich auf den nachfolgend schematisch dargestellten Wasser-Dampf-Kreislauf (siehe Abbildung 3-5)⁹³, in dem Temperaturen bis zu 650 °C vorherrschen. Aus der Schmelztemperatur der betrachteten Werkstoffe lässt sich individuell ableiten, ob bei Verwendung dieses Materials die Randparameter einer Hochtemperaturanwendung gelten, bei der das spezifische Zeitstandverhalten berücksichtigt werden muss.

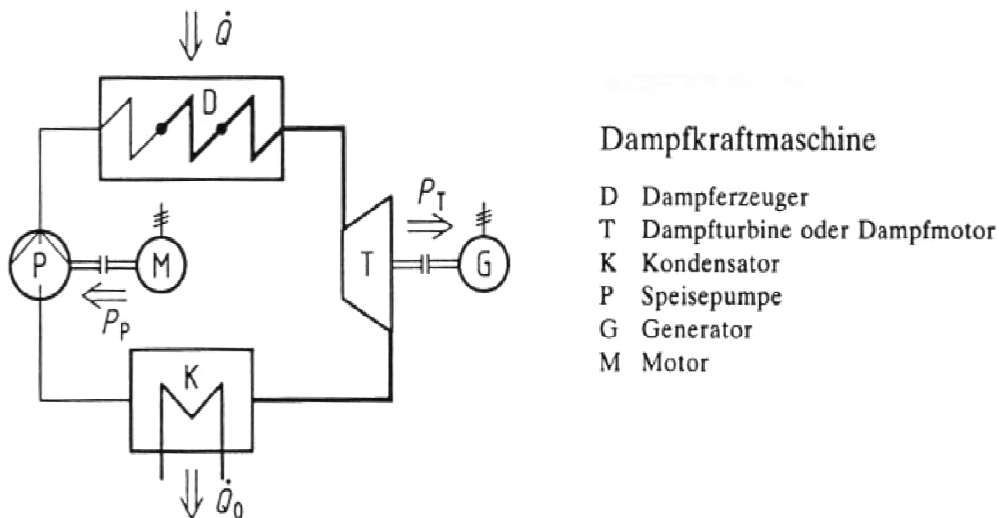


Abbildung 3-5: Prinzipschaubild einer Dampfkraftmaschine

Hierbei ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen dem Neubau eines 700°C-Kraftwerks oder dem partiellen Einsatz von Komponenten aus Hochtemperaturwerkstoffen.

Bei der Planung und Konzeption von Kraftwerken geht man von einer Nutzungsdauer von 30 – 40 Jahren aus, was einer Betriebszeit in Grundlast von 200 – 250.000 Stunden entspricht. Darin sind An- und Abfahrzyklen nicht berücksichtigt. Dafür müssten zusätzlich weitere 20 – 30 Betriebsstunden je Start angerechnet werden.⁹⁴

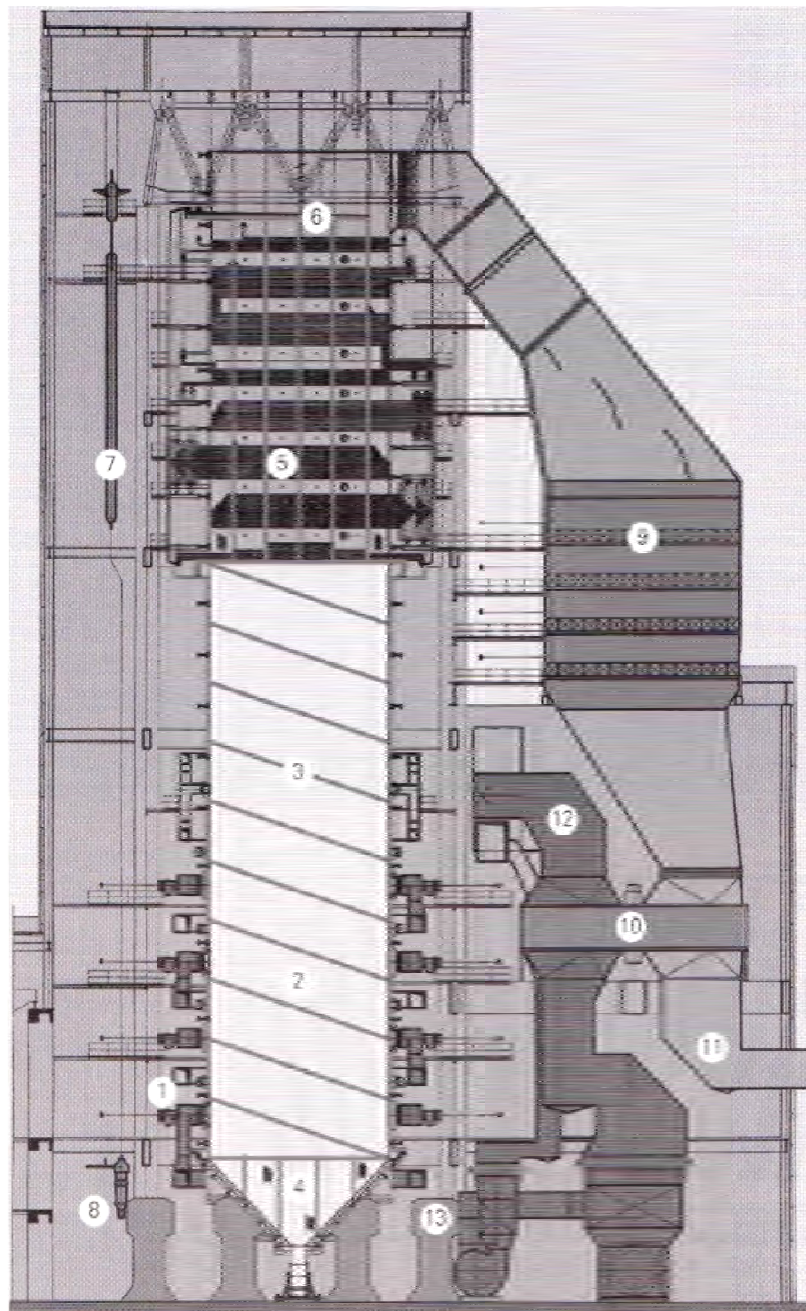
Die im Rahmen der bereits in Kapitel 2 angesprochenen Forschungsprogramme durchgeführten Untersuchungen zu den Werkstoffen für den Hochtemperatureinsatz in modernen Kraftwerken hatten fast immer auch die Realisierung eines möglichen 700°C-Kraftwerks im Fokus. Ziel dieser Überlegungen war stets, die im Rahmen der Einleitung angeführte Leistungs- bzw. Wirkungsgrad-erhöhung und die daraus resultierende höhere Wirtschaftlichkeit des Kraftwerks. Aufgrund der sehr hohen Komplexität dieses Vorhabens, wurde jedoch noch nie durchgängig ein gesamtes Kraftwerk berechnet sondern immer nur ausgewählte Komponenten, die mit erhöhtem Druck und Temperatur beaufschlagt wurden. So wurden im Rahmen der Studie KOMET 650 Rohrbögen mit Schweißnähten und Regelarmaturen wie Ventilspindeln oder Drosselorganen untersucht. In der Komponententestanlage des Kraftwerks Scholven wurden im Rahmen von COMTES700 Rohrleitungen und ebenfalls ein Testturbinenventil mit 705 °C heißem Dampf beaufschlagt und anschließend untersucht. Auch die im Rahmen des Coorettec-Programms durchgeführten Untersuchungen dienen der Analyse von Rohren und Rohrverbindungen.

Allen Untersuchungen lag das Ziel zu Grunde, den Wirkungsgrad des Kraftwerks zu steigern und den CO₂-Ausstoß zu verringern. Zwar wurden auch bei diesen Betrachtungen immer exemplarisch Komponenten und Rohrleitungen mit speziellen Funktionen im Dampfkreislauf ausgewählt, dennoch war stets klar, dass bei einer Erhöhung der Dampf- und Druckparameter des Gesamt-

prozesses letztendlich alle Komponenten und Regeleinheiten des Kraftwerks einer genauen Untersuchung unterzogen werden müssen.

Erst in der jüngsten Zeit erfolgte eine Änderung der Ansatzweise, die auch in den nachfolgenden Berechnungen verfolgt werden soll. Wenn Temperatur und Druck nicht erhöht werden, kann, unter gleichbleibenden Anforderungen an die Zeitstandfestigkeit, die Wanddicke kritischer Komponenten verringert und dadurch die Flexibilität des Kraftwerks verbessert werden. Der daraus resultierende wirtschaftliche Nutzen bedeutet ebenfalls eine Effizienzsteigerung durch erhöhten wirtschaftlichen Ertrag. Durch die Beibehaltung der grundlegenden Betriebsparameter ist in diesem Fall auch der gezielte Austausch einzelner, die Flexibilität begrenzender, Komponenten denkbar und damit die exemplarische Betrachtung von Einzelkomponenten sinnvoll und durchführbar.

Um den Weg zur Auswahl dieser Komponenten zu erläutern, ist nachfolgend das Funktionsschaubild eines Dampferzeugers skizziert (siehe Abbildung 3-6)⁹³. Hieraus ist erkennbar, dass der Wasserdampf-Kreislauf eines thermischen Kraftwerks verschiedenen Stufen unterliegt. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch den wirksamen Druck und die Temperatur. Daraus werden dann die Anforderungen an das verwendete Material abgeleitet. Die in dieser Arbeit exemplarisch betrachteten Frischdampfaustrittssammler befinden sich örtlich unmittelbar hinter den Konvektionsheizflächen (5).



Dampferzeuger für 1500 t/h Frischdampf von 545/562 °C bei 260 bar, Bauhöhe 100 m

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| 1 Brenner | 8 Umwälzpumpe |
| 2 Brennkammer | 9 DENOX-Anlage |
| 3 Verdampferrohre | 10 Luftvorwärmer |
| 4 Aschetrichter | 11 Rauchgas |
| 5 Konvektionsheizflächen | 12 Luftzufuhr |
| 6 Tragrohre | 13 Kohlemühlen |
| 7 Anfahrssystem | (Werkbild Siemens AG) |

Abbildung 3-6: Darstellung eines Dampferzeugers mit seinen wesentlichen Komponenten

Während für die Auslegung einer erhöhten Dampftemperatur und eines erhöhten Betriebsdruckes (z. B. 700° C-Kraftwerk) alle Komponenten von einer Neuauslegung betroffen sind, ist die Situation für eine zu verändernde Dynamik des Kraftwerks anders. Hierbei sind es zuerst die dickwandigen Komponenten, bei denen durch ein schnelles An- oder Abfahren des Kraftwerks die Wärmeausdehnung zwischen der Innen- und der Außenfaser des Bauteils zu Spannungen durch behinderte Wärmedehnungen führen. Die zusätzlich zu diesen Wärmespannungen überlagerten Beanspruchungen durch den Innendruck innerhalb des Bauteils führen zu einem erhöhten Lebensdauerverbrauch bei eben diesen Bauteilen.⁴¹

Dem höchsten Druck und der höchsten Temperatur müssen die Komponenten unmittelbar hinter dem Kessel standhalten. Das sind die Frischdampfleitungen, deren Armaturen, und der Austrittssammler. Auch Überhitzerrohre sind in besonderer Weise beansprucht.

Während bei den Versuchen zu den 700°C-Kraftwerken durch den Einsatz von Nickelbasislegierungen die Temperatur- und Druckerhöhung ermöglicht wurde, kann bei gleich bleibenden Randbedingungen, auf Grund der besseren Zeitstandfestigkeiten des Materials, die Wandstärke entsprechend reduziert werden.

In der RWE Studie 2012 wurden zur Betrachtung der Dynamik aus den drei Teilsystemen Verdampfer-/Umwälzsystem, Überhitzersystem und dem Zwischenüberhitzersystem die auf Grund ihrer Geometrie und der verfahrenstechnischen Belastung kritischsten Komponenten ausgewählt. Anders als bei den vorangegangenen Studien handelt es sich bei dieser Untersuchung um reine Berechnungsmodelle, d.h. die berechneten Komponenten sind – mit Ausnahme des tatsächlich verwendeten Werkstoffs - in der Form weder gebaut, noch unter realen Bedingungen getestet worden. In der nachfolgenden Abbildung 3-7 sind die Kesselbauteile noch einmal schematisch dargestellt⁴⁵.

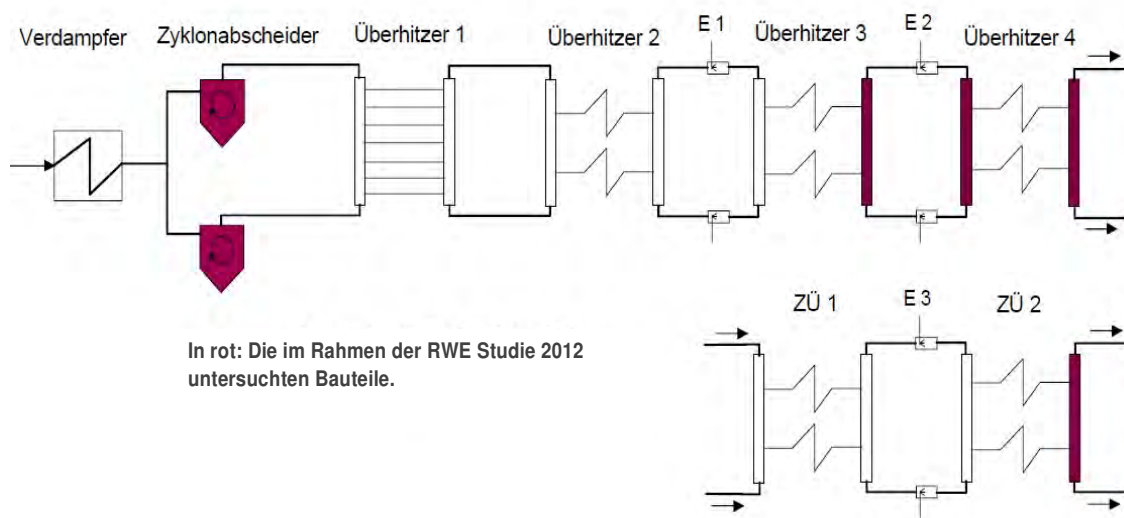


Abbildung 3-7: Schematische Darstellung der im Rahmen der RWE Studie 2012 untersuchten Kesselbauteile im Wasser-Dampf-Kreislauf

Im Einzelnen waren das der Zyklonabscheider, der Ü3-Sammler, der Ü4-Verteiler und -Sammler und der ZÜ2-Sammler. Dabei hat der Ü4-Sammler in der Werkstoffausführung P92 mit 115 mm für einen 1.100-MW-Block die größte Wanddicke. Die Untersuchungen zeigen für den Zyklonabscheider einige Besonderheiten. So ist der Einfluss der Anfahrzeit auf die rechnerische Lebensdauerermittlung deutlich geringer, dafür wirken sich die reinen Lastwechsel stärker aus. Das Verhalten der betrachteten Sammler ist vergleichbar, wobei der Ü4-Sammler den höchsten Anforderungen und dem höchsten Lebensdauerverbrauch ausgesetzt ist. Für die weitergehende Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wurde in der vorliegenden Arbeit daher auch nur der Ü4-Sammler mit unerschiedlichen Werkstoffvarianten betrachtet.

Ebenfalls relevant sind die im Dampfkreislauf eingesetzten Ventile, da diese aufgrund der enthaltenen beweglichen Teile nicht unter die Dampfkesselverordnung, sondern unter die Maschinenrichtlinie fallen. Da die Komplexität der Teile jedoch deutlich höher ist, die Kosten aber wesentlich geringer sind als bei den betrachteten Sammlern, werden die Ventile nicht betrachtet. Natürlich ist deren Auslegung spätestens dann einer Analyse zu unterziehen, wenn auf Basis einer festgestellten Wirtschaftlichkeit der Austausch des Sammlers erfolgt und die Anfahrparameter entsprechend verändert werden sollen.

Von den angesprochenen Komponenten ist der HD-Austrittssammler das Bauteil mit der höchsten Druck-Temperatur-Kombination und aufgrund seiner Größe für einen geplanten Austausch ein sehr teures Bauteil. Der Sammler ist Bestandteil eines Zwangsumlaufdampferzeugers und sitzt hinter der Umwälzpumpe vor der Drossel zum Steigrohr im Kessel.

Das Design eines Sammlers wird durch seinen Einsatzort, die ihn durchlaufende Dampfmenge und die Anzahl der zu- und abzuführenden Rohrleitungen bestimmt. Die Dampfmenge bestimmt den notwendigen Innendurchmesser und damit in Summe mit der Wanddicke den Gesamtdurchmesser des Sammlerrohres. Man unterscheidet zwischen dem Eintritts- und dem Austrittssammler. Der Eintrittssammler wird zum Teil auch als Verteiler bezeichnet und stellt die Seite dar, an welcher der Dampf auf die Rohre des Kessels verteilt wird. Im Kessel werden die Überhitzer hinter dem Verdampfer aufsteigend durchnummeriert und jedem Überhitzer ein Eintritts- und ein Austrittssammler zugeordnet. Da in den dazwischen liegenden Membranwänden die Überhitzung des Dampfes erfolgt, sind die Temperaturen im Austrittssammler stets höher als im Eintrittssammler. Der Druck ist dafür etwas geringer.

Die Komplexität des Sammlers entsteht durch die vielen anzuschweißenden Rohre. Damit die Montage auf der Baustelle möglichst einfach ist, werden bereits bei der Herstellung des Sammlers bis zu 200 Nippel auf das Rohr aufgesetzt. Hierbei gibt es die Möglichkeit des Aufschweißens oder Einwalzens. Für die von uns betrachteten martensitischen und austenitischen Werkstoffe wird in der Regel eine restspaltfreie Nippelschweißung mit einem Nippelschweißautomaten angewendet.

Der Dampfkreislauf des Kraftwerks ist so konstruiert, dass über einen Eintrittssammler das Medium auf die parallel verlaufenden Rohre einer Heizfläche im Dampferzeuger verteilt werden und am Ausgang diese Rohre wieder in einen Austrittssammler münden. Der Sammler ist damit ein zylindrisches Hochdruckgefäß mit bis zu 200 angeschweißten Stutzen, die sich über eine Länge von bis zu 16 m über das zylindrische Rohr verteilen. Diese Schweißverbindungen sind aus den nachfolgend aufgeführten Gründen sehr hoch beansprucht:⁹⁵

- großer Wanddickenunterschied zwischen dem zuführenden Rohr und dem Grundkörper des Sammlers,
- hohe thermische Beanspruchung der Materialien und der Schweißverbindungen,
- hohe Innendruckbelastungen,
- thermische Spreizungen der Einzelrohre und
- mechanische Wechselbeanspruchungen durch An- und Abfahrvorgänge.

Die Definition des Sammlers laut Regelwerk als „Rohrförmige Teile mit einem Nennaußendurchmesser $> 76,2$ mm, in die drei oder mehr nicht axiale Rohre einmünden“ wurde bereits in Kap. 2.5.3 aufgeführt.⁵⁹

Das nachfolgende Bild (Abbildung 3-8)⁹⁶ zeigt den ersten in einem Deutschen Kraftwerk eingesetzten P92-Sammler, der im Rahmen einer Reparaturmaßnahme 1997 durch die Firma Alstom im GKK Kiel eingebaut wurde.

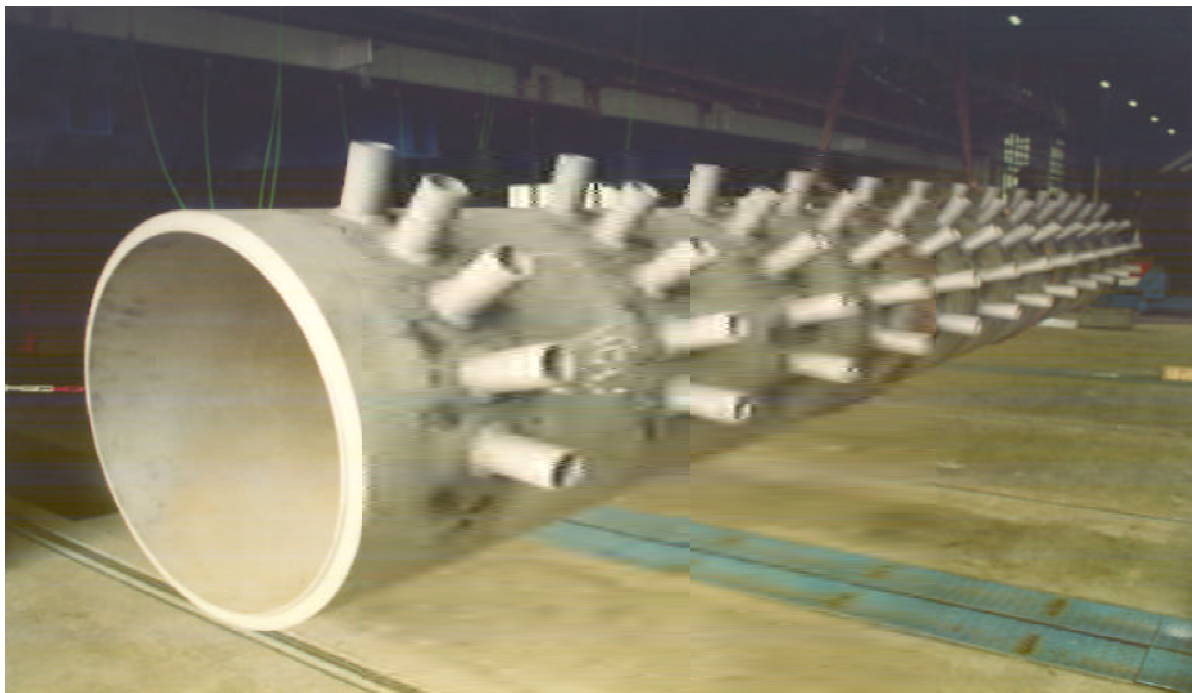


Abbildung 3-8: P92-Sammler (530 mm Durchmesser)

Bei diesem Kraftwerk wurden bereits 1995 im Rahmen einer Routineuntersuchung nach 150.000 Betriebsstunden und 3.000 An- und Abfahrvorgängen bei zwei ZÜ-Austrittssammlern ausgeprägte Lochkantenrisse an den Nippelbohrungen festgestellt. Aufgrund der Schwere der Schäden mussten beide Sammler kurzfristig ausgetauscht werden.⁹⁷

Im Zuge der Erneuerung wurden unterschiedliche Werkstoffvarianten sowohl für die Sammler, als auch für die Sammlerstutzen untersucht. Ein wesentlicher zu berücksichtigender Punkt war eine festgestellte Temperaturschiefelage von 18 K über die 16 m Länge des Sammlers. Untersucht wurden der bewährte bainitische Werkstoff 10CrMo9-10 und die beiden neueren ferritisch-martensitischen 9-12% Chromstähle P91 (X10CrMoVNb9-1) und P92 (X10CrWMoVNb9-2).

Die Entscheidung fiel zugunsten des wolframhaltigen P92 als Grundwerkstoff, an den die Sammlernippel aus 10CrMo9-10 mit P91-Schweißzusatz verschweißt wurden. Auslegungsbestimmend für die gewählte Wandstärke von 25 mm war damit das Schweißgut. Wäre die Auslegung auf Basis des P92 Grundwerkstoffs erfolgt, so hätte sich eine Sammlerwandstärke von kleiner 20 mm ergeben. Zum Vergleich hatte der vorherige Sammler aus 10CrMo9-10 eine Wanddicke von 44 mm! Da der Werkstoff P92 zu dem Zeitpunkt nach deutschem Regelwerk noch nicht zugelassen war, erfolgte die Abnahme im Rahmen eines Einzelgutachtens durch den TÜV Nord. Das nachfolgende Konstruktionschaubild zeigt einen FD-Austrittssammler Sammler älteren Datums, der mit deutlich geringeren Temperatur- und Druckparametern arbeitet und aus X20CrMoV11-1 mit einem Innendurchmesser von 355 mm und einer Wandstärke von 55 mm gebaut wurde. Die Herstellungszeichnung (siehe Abbildung 3-9) soll nicht im Detail gelesen werden können, kann aber einen Eindruck vermitteln, welche hohe Komplexität in der Konstruktion eines solchen Sammlers steckt.

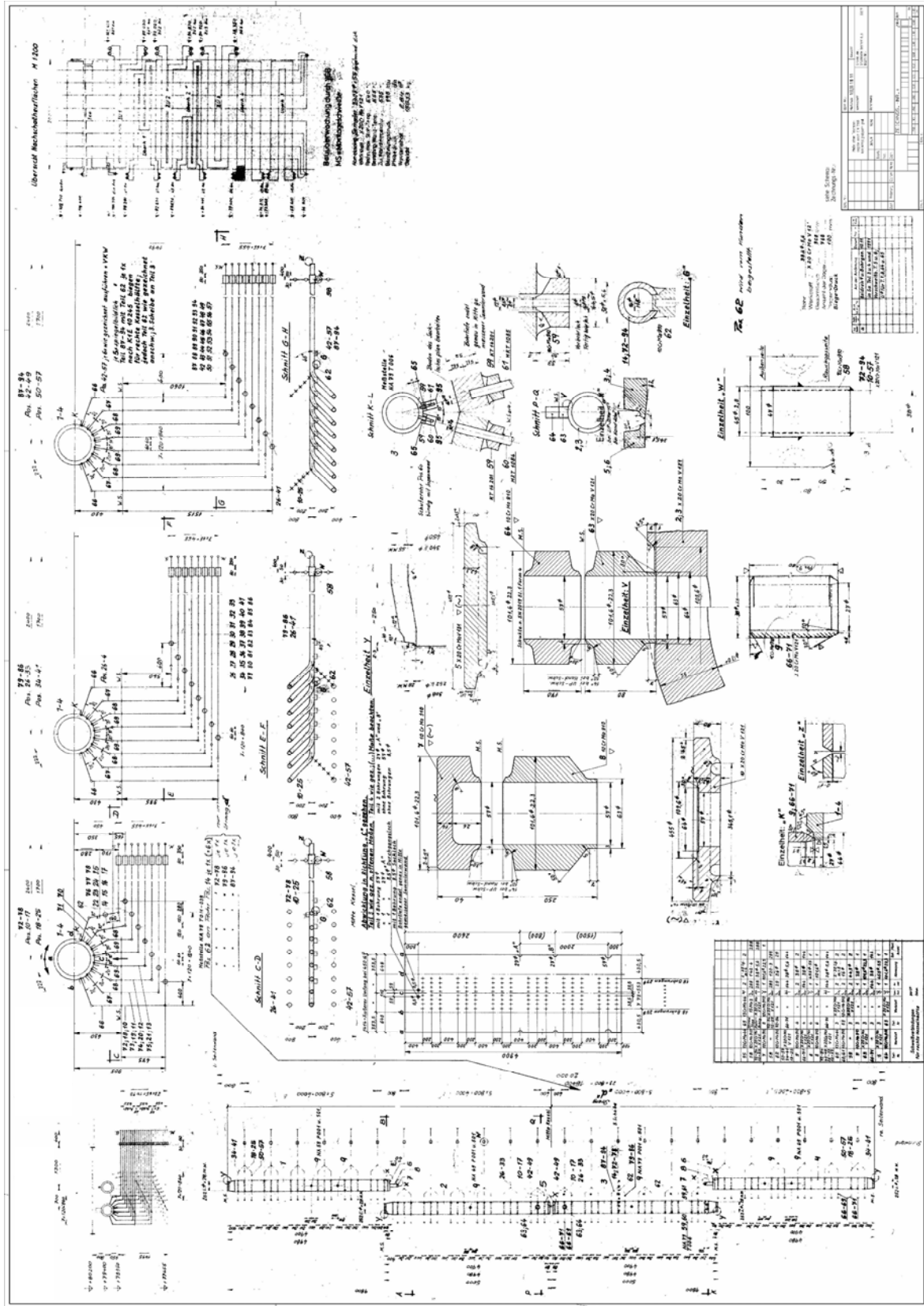


Abbildung 3-9: Herstellungsskizze eines HD-Austrittssammlers

Während bei den Endüberhitzer- oder Zwischenüberhitzerrohren bei der Materialauswahl auch die Hochtemperaturkorrosionsbeständigkeit gegenüber den Rauchgasen berücksichtigt werden muss, ist das bei dem Endüberhitzeraustrittssammler nicht erforderlich, da dieser sich außerhalb des Rauchgasstroms befindet.

Im Rahmen der RWE Studie 2012 wurden unterschiedliche Komponenten des Wasser-Dampf-Kreislaufs des Braunkohlekraftwerks Neurath bzgl. ihres Lebensdauer verbrauchs bei einer zunehmenden Dynamik des Kraftwerksbetriebs untersucht. Dazu erfolgte eine Berechnung der Wanddicken und der aus der Herstellung resultierenden Preise für die drei unterschiedlichen Werkstoffe P92, Alloy 617 und Alloy C263. Die Komponenten wurden für diese Werkstoffe rechnerisch mit unterschiedlichen Lastprofilen beaufschlagt und der daraus resultierende Lebensdauerverbrauch ermittelt. Die Berechnungen der zulässigen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten und der Wanddicke erfolgten analog zu dieser Arbeit gemäß Regelwerk. Außerdem wurde eine Abschätzung der Materialkosten vorgenommen, auf die zum Teil bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Wirtschaftlichkeitsberechnungen zurückgegriffen wurde.

Diese Studie verdeutlicht, dass nicht allein eine veränderte Dynamik im Sinne einer schnelleren Anfahrkurve für den Austausch eines Sammlers sprechen kann. Der Lebensdauerverbrauch wird auch dadurch vermehrt, dass mehr An- und Abfahrten durchgeführt werden müssen, als die, für die diese Komponenten ursprünglich ausgelegt waren. Die Berücksichtigung des erhöhten Lebensdauer verbrauchs in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung findet sich in den Berechnungen des zulässigen Anfahrgradienten bzw. dem Lebensdauerverbrauch auf Basis der prognostizierten An- und Abfahrten wieder.

Untersucht wurden in der Studie außerdem die drei Startarten, der Kalt-, Warm- und Heißstart. Die Startzeiten sind derart definiert, dass ein Wiederauffahren nach einem Stillstand von weniger als 12 Stunden als Heißstart und nach einem Stillstand von mehr als 48 Stunden von einem Kaltstart gesprochen wird. Zwischen 12 und 48 Stunden handelt es sich um einen Warmstart. Die Studie bestätigt die bereits aus vorherigen RWE-internen Untersuchungen gewonnene Erkenntnis, dass die Zeit für den Kaltstart wesentlich von anderen Komponenten als den dickwandigen Kesselbauteilen bestimmt wird. Hier sind es insbesondere die Kohlemühlen, die in Ihrem Anfahrprozess zeitbestimmend sind. Außerdem wird mit der steigenden Anzahl von Starts die Wahrscheinlichkeit eines Kaltstarts immer geringer. Daher reduziert sich die Betrachtung der Dynamik in dieser Arbeit auf die Heiß- und Warmstarts. Da bei diesen Vorgängen für die Betrachtung der thermischen Auswirkungen auf das Material außerdem nur der Teil interessant ist, in dem die wesentlichen Temperaturänderungen im Dampfkreislauf passieren, wird nur der Teil des Anfahrprozesses betrachtet, bis die Turbinenkopplungstemperatur erreicht ist (siehe auch Abbildung 3-3 und 3-4). Auch auf die Betrachtung des Abfahrtvorgangs kann verzichtet werden, da es sich hierbei um ein langsames Abkühlen handelt, bei dem kaum thermische Spannungen auftreten. Eine Beschleunigung dieses Prozesses könnte lediglich im Falle eines Schadens eine wirtschaftlich relevante Komponente sein, wenn durch das beschleunigte Abkühlen eher mit der

Untersuchung und Instandsetzung begonnen und danach schneller wieder angefahren werden könnte.

Da die Anzahl derartiger Vorgänge im Vergleich zu der prognostizierten Anzahl zukünftiger Anfahrten gering ist, wurde auf die Ermittlung der diesbezüglichen Wirtschaftlichkeit verzichtet.

Die Untersuchungen der Studie bestätigten die bereits im Vorfeld bestehende Vermutung, dass insbesondere die dickwandigen Komponenten (Ein- und Austrittssammler der letzten Überhitzer- und Zwischenüberhitzerstufen sowie der Zyklonabscheider) von einem erhöhten Lebensdauer-verbrauch betroffen sind. Besonders gravierend waren die Einschränkungen für den Überhitzer-austrittssammler der letzten Stufe, so dass dieses Bauteil für die nachfolgenden Betrachtungen herangezogen werden soll.⁴⁵

Auch andere Untersuchungen und Berechnungen haben gezeigt, dass die Verwendung der Nickelbasislegierung NiCr23Co12Mo (Alloy 617) anstelle des X10CrWMoVNb9-2 (P92) bei einem Hochdruck-Austrittssammler zu einer dünneren Wandstärke und unter Berücksichtigung der Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit zu deutlich verbesserten Temperaturänderungsgeschwindigkeiten führten.¹⁶

Die Veränderung der Last bedingt immer erst die Veränderung der generatorseitig zur Verfügung gestellten elektrischen Leistung. Diese wird hervorgerufen durch eine Absenkung oder ein Anheben der Frischdampfmenge, die der Dampfturbine zugeführt wird. Die Temperatur des Frischdampfs soll dabei weitestgehend konstant gehalten werden. Die Temperaturregelung erfolgt dabei über die Einspritzkühler, die im Dampfkreislauf zwischen den Austritts- und Eintrittssammlern angeordnet sind (siehe Abbildung 3-10)⁴¹.

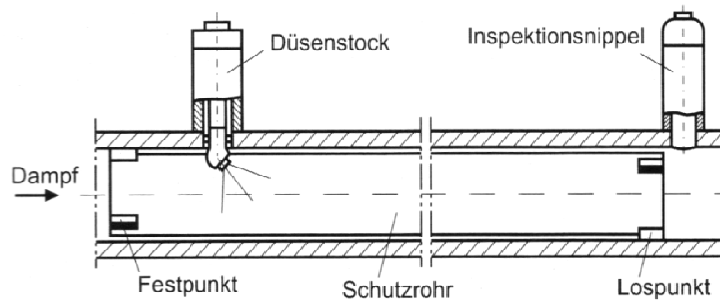


Abbildung 3-10: Längsschnitt durch einen Einspritzkühler im Dampfkreislauf

Die hierüber durchgeführten Temperaturregelungen führen auch zu einem Lebensdauerverbrauch, der wesentlich von der Temperaturregelgüte abhängt und im Rahmen der RWE Studie 2012 ebenfalls untersucht wurde. Da bereits hier gezeigt wurde, dass der Einfluss der Anfahrtsvorgänge z. B. für den P92 um bis zu einem Faktor 10 größere Auswirkungen auf den Lebensdauer-verbrauch hat⁴⁵, wurde auch bezüglich der Laständerungen auf eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verzichtet.

Der grundsätzliche Einfluss der Wanddicke von Bauteilen auf die Dynamik eines Kraftwerks ist nicht unumstritten. Es gibt Aussagen, nach denen keines der dickwandigen Bauteile für die heutige Betriebsweise der Kraftwerke dynamikbestimmend sei. Daher werden z. Z. bei den Bestrebungen zu einem flexibleren Kraftwerksbetrieb primär Veränderungen in der Prozess- und Automatisierungstechnik vorgenommen und bereits dadurch bessere Lastgradienten erreicht. Insbesondere für die Kaltstartphase konnten hier deutliche Verbesserungen erzielt werden.

Berechnungen der Kraftwerkskomponentenhersteller und der Kraftwerksbetreiber zeigen, dass die Anforderungen an das Material bei einer flexibleren Fahrweise des Kraftwerks zu unzulässig hohen Spannungen und damit zu einem deutlich erhöhten Lebensdauerverbrauch führen. Die auftretenden Spannungen sind im nachfolgenden Bild (Abbildung 3-11)⁴⁵ grafisch dargestellt. Die Membranspannung (magenta) resultiert dabei aus dem Innendruck des Sammlers und tritt über den gesamten Zyklus in Form einer Zugspannung auf. Die Temperaturspannung (schwarz) ist eine Spannung aus behinderter Wärmedehnung und stellt sich im Anfahrprozess als Druckspannung dar und im Abfahrprozess als Zugspannung. Die aus beiden Bestandteilen resultierende Gesamtspannung ist in grün dargestellt.

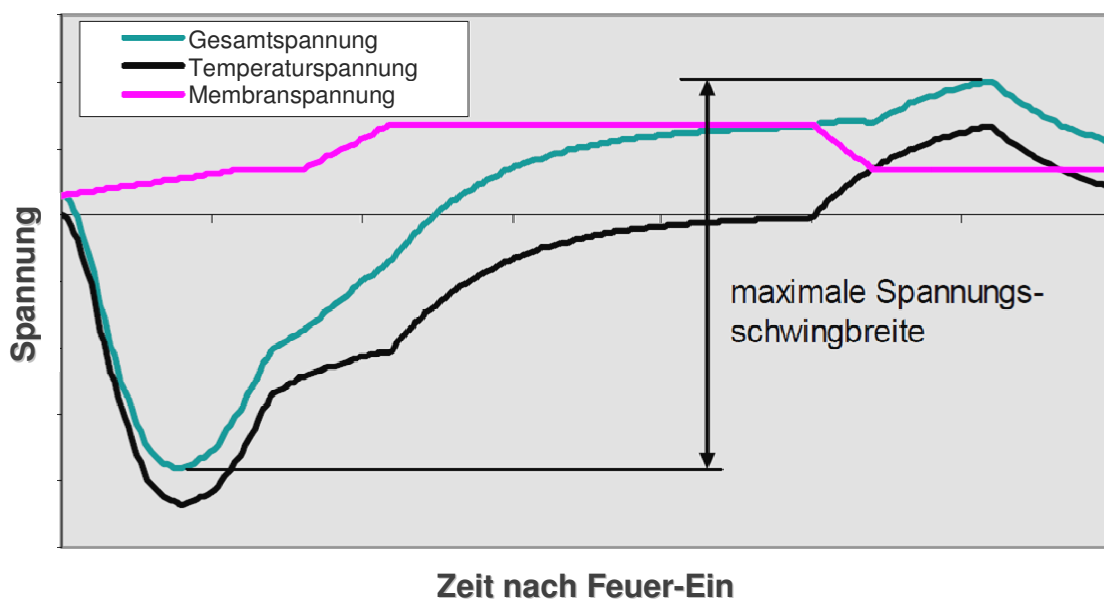


Abbildung 3-11: Qualitativ typischer Spannungsverlauf in einem Rohr während eines Anfahrzyklus

3.3 Auswahl geeigneter Werkstoffe unter Berücksichtigung der neuen Dynamikanforderungen

Im Kapitel 3.1 wurden bereits die zu erwartenden Veränderungen im Kraftwerksbetrieb und die daraus resultierenden Anforderungen an die Werkstoffe für die Bauteile im Dampfkreislauf beschrieben. Nun muss außerdem berücksichtigt werden, welche Auswirkungen die schnelleren und häufigeren Anfahrprozesse auf die Werkstoffe und damit auf die jeweiligen Komponenten haben. An erster Stelle steht hierbei der erhöhte Lebensdauerverbrauch.

Dieser lässt sich beim schnelleren Anfahren auf die erhöhte thermozyklische Beanspruchung der Werkstoffe zurückführen. Hierbei kommen unterschiedliche Schädigungsmechanismen zum Tragen.

Dies ist zum einen der Schwingbruch, auch Dauerbruch oder Ermüdungsbruch. Dieser entsteht unter mechanischen Beanspruchungen, deren Beträge oder Richtungen wechseln. Der Anriss beginnt in der Regel an einer Stelle lokaler Spannungskonzentration an der Oberfläche. Der Schwingungsriß verläuft normalerweise senkrecht zur Richtung der größten Zugspannung und damit meist weitgehend senkrecht zur Bauteiloberfläche. Die meisten Nickelbasislegierungen bilden dahingehend eine Ausnahme, dass bei ihnen das erste Stadium der Rissbildung entlang der ersten getrennten Körner mit einem 45 Grad geneigten Rissverlauf besonders ausgeprägt ist.⁹⁸

Dem Schwingbruch geht in der Regel eine Werkstoffermüdung, bedingt durch plastische Verformung, voraus. Hierbei reicht es aus, wenn nur an einigen Stellen plastische Verformungen auftreten, wie z. B. an den Korngrenzen, Einschlüssen oder anderen Werkstoffinhomogenitäten.⁹⁸ Diese Art der Ermüdung ist der Grund dafür, warum im Rahmen der durchzuführenden Berechnungen für die virtuelle maßgebende Spannungsschwingbreite geprüft wird, ob sich der Werkstoff bei den gegebenen Spannungen im elastischen, teilplastischen oder vollplastischen Bereich befindet.

Ein weiterer Schädigungsmechanismus ist die Spannungsrisskorrosion (SpRK).³³ Diese setzt das kritische Zusammenwirken der drei Parameter Werkstoff, Medium und eine mechanische Belastung (z. B. Zugspannungen, auch Eigenspannungen) voraus. Wesentliche Bedeutung hat dieser Schädigungsmechanismus bei chemisch aggressiven Medien. Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen findet das Medium seine Berücksichtigung durch die verwendeten Berechnungsformeln des Regelwerks. Da bei den betrachteten Frischdampfaustrittssammlern in der Regel ausschließlich das Medium Dampf vorausgesetzt werden kann, finden die dazu gehörenden Formeln des Regelwerks ihre Anwendung in den Berechnungstabellen.

Für die Weiterverarbeitung des Materials ist außerdem zu berücksichtigen, dass beim Schweißen oder Spannungsarmglühen der Werkstoffe Temperatureinträge von 350 bis 850 °C erfolgen. Dadurch können sich bevorzugt an den Korngrenzen Karbide ausscheiden und den Werkstoff anfällig für interkristalline Korrosion machen. Der Werkstoff liegt dann im sensibilisierten Zustand vor. Abhilfe kann geschaffen werden durch die Absenkung des Kohlenstoffgehalts und/oder das Legieren mit kohlenstoffabbindenden Elementen wie Titan, Niob oder Vanadium.⁹⁸ In den ausgewählten ferritisch-martensitischen Werkstoffen finden sich diese Elemente wieder.

Es erfolgt die Annahme, dass sich das Korrosionsverhalten bei gleichbleibenden Dampftemperaturen und Druckparametern in Abhängigkeit von der Wandstärke nicht verändert. Das heißt, es erfolgt zwar eine Beeinflussung der Spannungszustände durch die Wanddicke, das Korrosionsverhalten wird aber für identische Werkstoffe unabhängig von der gewählten Wanddicken als identisch angesetzt.

Bei der Betrachtung wechselnder Lastzyklen beim An- und Abfahren der Kraftwerke ist eine Überlagerung aus Zeitstandschäden und Dehnungswechsellermüdung zu beobachten. Die zeitabhängigen Verformungsvorgänge im Werkstoff bei konstant hohen Temperaturen werden durch das "Kriechen" ausgedrückt. Relevant für die Lebensdauer definierenden Vorgänge ist bei den hochwarmfesten Werkstoffen das sekundäre oder stationäre Kriechen. Die Überschreitung der Zeitstandfestigkeit ist in erster Linie an den Stellen hoher Beanspruchungen festzustellen. Die Dehnungswechsellermüdungen entstehen durch häufige Temperatur- und Druckwechsel, wie sie bei An- und Abfahrvorgängen des Kraftwerks vorkommen. Wird die Dehnungswechselfestigkeit überschritten, kommt es durch die Aufheiz- und Abkühlvorgänge zu hohen Zugspannungen zwischen der Rohraußen- und der Rohrinne wand, die sowohl innen als auch außen zur Rissbildung führen können. Nachfolgend ist die Spannungsverteilung beim Abkühlvorgang eines wärmebehandelten Werkstücks an seiner Außenseite (Rand) und im Inneren (Kern) skizziert (siehe Abbildung 3-12)⁶⁴.

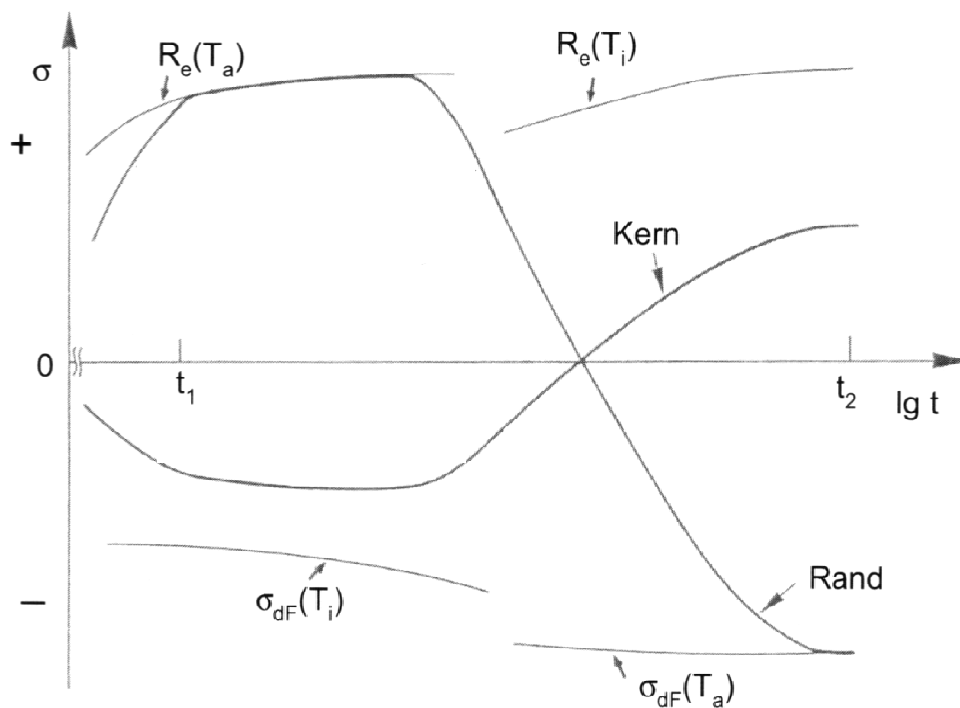


Abbildung 3-12: Spannungsverteilung am Rand und im Kern eines Werkstoffs.

Bei den Berechnungen dieser Arbeit wurde auf die Berücksichtigung der Kriech-Ermüdungs-Wechselwirkung verzichtet und stattdessen die lineare Schadensakkumulation gemäß Regelwerk verwendet (siehe auch Kapitel 2.5.4), da dieses aktuell für den Bau und die Inbetriebnahme von Kraftwerkskomponenten maßgeblich ist.

Ein zusätzliches Risiko bei den austenitischen Werkstoffen ist die verformungsinduzierte Martensitbildung. Diese ist ggf. für den betrachteten Fall der Zyklenerhöhung im Kraftwerksbetrieb zu einem späteren Zeitpunkt zu überprüfen, wenngleich das Phänomen primär unterhalb des Standardarbeitsbereichs im Dampferzeuger auftritt.

Im Kraftwerksbetrieb ist zu berücksichtigen, dass während des Anfahrprozesses Temperatur und Druck nicht zeitgleich auftreten. Im für das Bauteil optimalen Fall überlagern sich die Zug- und Druckspannung durch die thermische Spannung im Bauteil und die durch den Innendruck hervorgerufenen Spannungen. Es entstehen also durch die behinderte Wärmeausdehnung Spannungen innerhalb des Bauteils, die der Zugspannung durch den inneren Dampfdruck überlagert werden (siehe auch Abbildung 3-11).

Wie bereits die RWE Studie 2012 gezeigt hat, muss bei einer erhöhten Dynamisierung zwischen drei Fällen unterschieden werden.⁴⁵

1. Durch den weiteren Ausbau regenerativer Energien wird die Anzahl der An- und Abfahrten der Kohlekraftwerke ansteigen. Dieser Anstieg führt zu einer Reduktion der Lebenserwartung der betrachteten Komponente. In welchem Umfang die Anzahl der An- und Abfahrten steigen wird, ist zum heutigen Zeitpunkt noch nicht klar. Fest steht, dass der Anstieg kommt, so dass diesem Umstand in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Rechnung getragen werden muss.
2. Ein beschleunigtes Anfahren gibt dem Kraftwerksbetreiber die Möglichkeit, schneller auf Veränderungen im Markt zu reagieren. Es kann außerdem die "Time to market" und damit die Anfahrkosten reduzieren.
3. Um aufwendige Ab- und Anfahrvorgänge zu vermeiden, können stärkere Lastzyklen gefahren werden. Die Frage der Wirtschaftlichkeit muss hier für den Kraftwerkspark betrachtet werden. D. h. in der Fragestellung, ob es wirtschaftlicher ist, ein Kraftwerk komplett aus und nach kurzer Zeit wieder einzuschalten oder mehrere Kraftwerke auf einen Minimallastbetrieb zu drosseln. Hierbei ist immer die deutliche Verringerung des Wirkungsgrades zu berücksichtigen.

Insbesondere im ersten Fall führt die Verkürzung der Lebensdauer zwangsläufig zu höheren Wartungskosten, da häufigere Inspektionen zur Überprüfung des Zustands der Komponenten erforderlich werden. Diesem Umstand wird durch die Berücksichtigung einer jährlichen Wartungs- und Instandhaltungspauschale im Berechnungstool Rechnung getragen.

Neben diesen, bei der Werkstoffauswahl zu berücksichtigenden, grundsätzlichen Schädigungsmechanismen der Werkstoffe gibt auch das Regelwerk konkrete Vorgaben, die für die Auswahl des Werkstoffs von Bedeutung sind.

So schreibt die EN 12952-2 in den allgemeinen Anforderungen vor, dass „der Hersteller des Wasserrohrkessels den Werkstoff für die Herstellung des Wasserrohrkessels (einschließlich Schweißzusätze) so auswählen muss, dass, falls der gelieferte Werkstoff den in der Bestellung festgelegten Anforderungen entspricht und falls die Konstruktionsregeln EN 12952-3 sowie die Regelungen für die Herstellung, Inspektion und Prüfung der Kessel in EN 12952-5 und EN 12952-6 beachtet werden, die Kessel ohne Gefahr unter den Betriebsbedingungen (Drücke, Temperaturen,

Umgebungsbedingungen usw.) für die Lebensdauer, die in der Bestellung des Wasserrohrkessels vorgesehen ist, betrieben werden können.“⁹⁹

Dabei ist außerdem zu berücksichtigen, dass während des Betriebs innerhalb der Bedingungen nach der EN 12952-3 die ausgewählten Werkstoffe bei der Verwendung von Speise- und Kesselwasser durch eine Alterung oder chemischen Angriff keine wesentlichen Beeinträchtigungen erfahren. Insbesondere im vorliegenden Fall der Frischdampfaustrittssammler ist von einer solchen Beeinträchtigung im Regelbetrieb nicht auszugehen.

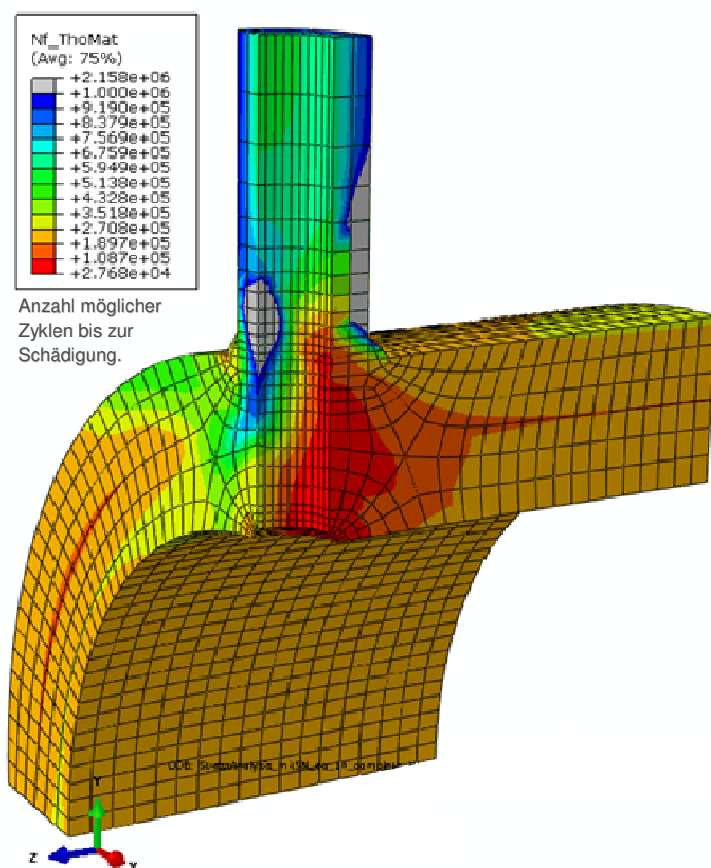
Bei der Auswahl der Werkstoffe für den Bau drucktragender Teile von Wasserrohrkesseln und an drucktragenden Wänden angeschweißten Teilen muss außerdem die Eignung des Werkstoffs im Hinblick auf die Verarbeitung berücksichtigt werden, z. B. im Hinblick auf Kalt- und Warmumformung, Schweißeignung und Aufweitung sowie mögliche durchzuführende Wärmebehandlungen. Das gilt umso mehr dann, wenn unterschiedliche Werkstoffe miteinander verbunden werden sollen.

Die Norm schreibt außerdem vor, welche chemische Zusammensetzung bzgl. der Massenanteile von ferritischen und austenitischen Stählen gegeben sein muss. Weiterhin wird das Verständnis der auch in diesen Berechnungen verwendeten Werkstoffeigenschaften, wie z. B. Streck- oder Dehngrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Zeitstandfestigkeit, erläutert.

Sollen bei einer Instandhaltungs- oder Reparaturmaßnahme einzelne Komponenten getauscht werden, so ist neben den Anforderungen an Druck und Temperaturverhalten immer auch die Komplexität des Schweißvorgangs mit zu berücksichtigen. Wird der Sammler im Rahmen eines Retrofits ausgetauscht, so kann die "kompliziertere" Schwarz-Weiß-Verbindung auf der Baustelle vermieden werden, indem der Materialwechsel bereits zwischen Sammler und Nippel erfolgt. In jedem Fall wird jedoch der Nippel unmittelbar am Sammler im Material des Grundwerkstoffs ausgeführt. Liegen die Rohrleitungen aus einem anderen Werkstoff vor, so wird in der Regel im Werk ein kurzes Rohrstück aus dem Rohrleitungswerkstoff auf den Nippel geschweißt und damit auf der Baustelle wiederum ein unkritischer Materialübergang gewährleistet. Auf die Vorgänge beim Schweißvorgang wurde bereits in Kapitel 2.6 ausführlich eingegangen. Nachfolgend ist die Fotografie (Abbildung 3-13)¹⁰⁰ geschweißter Nippel auf einem Sammler und der Konturplott (Abbildung 3-14)¹⁰¹ der Lebensdauerbeanspruchung eines solchen Nippels abgebildet. Die auf dem Bild dargestellten Sammler haben einen Außendurchmesser von 24 mm. Bei dem Konturplott ist die Skalierung derart, dass die Lebensdauer im roten Bereich bereits nach 27.680 Zyklen verbraucht ist. In den grauen Bereichen wären noch deutlich höhere Zyklenzahlen (bis zu 2.158.000) möglich. Diese Berechnung wurde mittels finiter Elemente durchgeführt, so dass bei einer Auslegung nach Regelwerk von einer noch deutlich geringeren zulässigen Zyklenzahl auszugehen ist.



Abbildung 3-13: Fotografie von geschweißten Sammlernippeln (je 24 mm Durchm.)



Lebensdauerbeanspruchung
bei einem Sammler aus P91
mit aufgeschweißtem Nippel.

Sammlerabmessungen:

$D_i = 255 \text{ mm}$

$W_d = 45 \text{ mm}$

$P = 295 \text{ bar}$

Bedingungen

„Warmstart und Abfahren“

$300 \text{ °C} \rightarrow 600 \text{ °C}$, 1 Stunde

$600 \text{ °C} \rightarrow 300 \text{ °C}$, 8 Stunden

Darstellung der

Lebensdauererwartung

Abbildung 3-14: Lebensdauerbeanspruchung eines geschweißten Sammlernippels

Auf Basis der zuvor genannten Anforderungen wurden nun, unter Berücksichtigung des Regelwerks und den Ergebnissen der in Abbildung 2-3 genannten Forschungsprogramme, aus den in der Kraftwerkspraxis erprobten Stählen und Legierungen die nachfolgenden Werkstoffe ausgewählt:

1. 10CrMo9-10 als einfacher bainitisch-ferritischer warmfester Kesselstahl,
2. X20CrMoV11-1, X10CrMoVNb9-1 und X10CrWMoVNb9-2 als martensitische Stähle und
3. NiCr23Co12Mo (Alloy 617) und NiCo20Cr20MoTi (Alloy C263) als Nickelbasislegierungen.

Bei den Berechnungen ist stets ein Werkstoff als Referenzwerkstoff auszuwählen, der in der Regel dem bereits verbauten Material entspricht. Auf Basis dieses Referenzwerkstoffs werden dann die Investitionsmehrkosten, die ein Wechsel auf ein höherwertiges Material mit sich bringt ermittelt. Dabei werden auch Mehrkosten für einen erhöhten Instandhaltungsaufwand oder Aufwände für Personalqualifizierungen mit eingepreist. Die genaue Höhe dieser Mehrkosten ist mit den jeweiligen Instandhaltungsabteilungen vor der Durchführung einer Berechnung zu vereinbaren.

Mit der Auswahl des Berechnungsbeispiels eines Sammlers, der bereits aus P92 hergestellt wurde, ergibt sich zwangsläufig für die „geringerwertigen“ Werkstoffe eine sehr ungünstige Wirtschaftlichkeit. Das gilt insbesondere für die Berechnung der Wanddicke des Sammlers, der mit den gegebenen Anforderungen an Druck und Temperatur unrealistische Dimensionen annehmen würde. Es ist daher auf die weitergehende Betrachtung dieser Werkstoffe im Rahmen der Berechnungen verzichtet worden.

4 Betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen zu den Berechnungen

4.1 Auswahl eines geeigneten Bewertungsverfahrens¹⁰²

Grundsätzlich gibt es unterschiedliche Verfahren, um eine Bewertung technischer Anlagen durchzuführen. Diese sollen nachfolgend auf Ihre Eignung zur Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse für den Austausch eines Überhitzeraustrittssammlers verglichen werden. Als Besonderheit gilt im hier betrachteten Fall, dass additiv zur Betrachtung des wirtschaftlichen Gutes oder der Anlage (Kraftwerk bzw. Kraftwerkskomponente) die Spezifika der aus dem Stromhandel zu erzielenden Erlöse zusammen kommen. Bei der Vermarktung elektrischer Energie wird häufig der Begriff der Arbitrage verwendet, der auch hier einfließen soll. Diese beschreibt die (nahezu) risikofreie Ausnutzung von komparativen Kostenvorteilen. Hierbei wird unterschieden zwischen der räumlichen und zeitlichen Arbitrage.

Die räumliche Arbitrage beschreibt den Kauf und Verkauf von gleichen Handelsprodukten an verschiedenen Handelsplätzen, wobei die voneinander abweichenden Kurse dieses Produktes zum (annähernd) gleichen Zeitpunkt an den beiden Handelsplätzen ausgenutzt werden. Bei der zeitlichen Arbitrage wird zu einem Zeitpunkt eine Position aufgebaut, die auf dem Wege eines Termingeschäfts zum gleichen Zeitpunkt veräußert wird. Auch hier besteht der Vorteil im Ausnutzen einer Preisdifferenz.

Es wird davon ausgegangen, dass auf dem Markt mit dem niedrigsten Preis ein Produkt gekauft wird (in diesem Falle Energie) und dasselbe Produkt auf dem Markt mit dem höchsten Preis verkauft wird. Dabei führt die Nutzung örtlicher oder internationaler (räumlicher) Kursunterschiede gleicher Werte, wie z. B. Wertpapiere, Devisen oder finanzieller Stromverträge, zu risikofreien Gewinnen. Arbitrage darf deshalb nicht mit Handel mit offenen Positionen verwechselt werden.¹⁰³

Für die betriebswirtschaftliche Bewertung einer Investition (z. B. in eine Anlage/Komponente einer Anlage) bieten sich unterschiedliche Verfahren an.

1. Investitionsrechnungsmethode
2. AfA (Absetzung für Abnutzung) und Anhaltewert
3. Anhaltewertermittlung durch Gutachten

Im Bereich der Informationstechnik können Bewertungen sehr komplex sein, weil innovative Produkte bereits nach wenigen Jahren oder sogar Monaten veraltet sind. Aus diesem Grund wurde 2010 der Abschreibungszeitraum der AfA für Computer von 5 auf 3 Jahre herabgesetzt. Damit wird ein PC, der nach drei Jahren noch voll funktionsfähig ist, auf den Buchwert Null gesetzt, da man davon ausgeht, dass er dann unter praktischen Gesichtspunkten nicht mehr zu gebrauchen ist.

Bei dem von uns betrachteten Kraftwerk verhält es sich genau umgekehrt. Die buchhalterische Abschreibung erfolgt laut AfA-Tabelle für Dampferzeugungsanlagen über einen Nutzungszeitraum von 15 Jahren. Das entspricht einer Lebensdauererwartung von 130.000 Stunden. Die Auslegung der Komponenten erfolgt aber häufig auf Basis einer prognostizierten Gesamtbetriebsdauer von

200.000 Stunden. Wenn man nun noch davon ausgeht, dass die Anlagen durch Stillstandszeiten seltener am Netz sind und dieser Aspekt in der steuerlichen Betrachtung keine Berücksichtigung findet, dann können Anlagen mit einem Buchwert Null durchaus noch einen betriebswirtschaftlichen Wert darstellen, mit dem der Betreiber einen operativen Gewinn erzielen kann. In solchen Fällen können Anlagen mit einem Anhaltewert oder Residualwert bewertet werden. Dieser wird im Einzelfall zwischen 20 und 30 % des Wertes einer vergleichbaren Neuanlage liegen. Um einen möglichst realistischen Wert zu erzielen, ist hierzu im Einzelfall ein individuelles Gutachten erforderlich, denn nur auf dessen Basis lässt sich der Zustand der Anlage im Vergleich zu einer Neuanlage bewerten.

Die AfA ist der einfachste Weg zur Zeitwertermittlung eines Investitionsgutes und kann in vielen Fällen eine gute Orientierung geben. Allerdings werden auch viele betriebswirtschaftliche Parameter aus Unternehmenssicht vernachlässigt, die sich geeigneter durch die Investitionsrechnungsmethode darstellen lassen. Der grundsätzliche Nachteil aller Bewertungsansätze liegt in der Vergangenheitsorientierung auf der einen und der Unsicherheit der Zukunftsprognosen auf der anderen Seite.

Bereits 1947 wurden von Kurt Rummel die wesentlichen Bestandteile einer zukunftsgerichteten Bewertung zusammengefasst:¹⁰⁴

1. Eine Anlage ist umso 'wertvoller', je höher der Aufwand für eine Ersatzanlage ist!
2. Eine Anlage ist umso weniger Wert, je mehr sie verschlissen ist!
3. Eine Anlage ist umso weniger Wert, je günstiger eine Ersatzanlage die Aufgabe erfüllen kann!

Daraus leitet Rummel eine einfache Gleichung ab, die nach wie vor wesentlicher Bestandteil jeder Investitionsgüterrechnung ist:

$$KD_{alt} + B_{alt} = KD_{neu} + B_{neu}$$

$$\Leftrightarrow KD_{alt} = KD_{neu} - (B_{alt} - B_{neu}) \quad \text{Gleichung 4-1}$$

Dabei ist:

KD_{alt} Kapitaldienst der alten, d.h. der zu bewertenden Anlage

KD_{neu} Kapitaldienst einer neuen, d.h. einer Vergleichsanlage

B_{alt} Betriebskosten der alten Anlage

B_{neu} Betriebskosten der neuen Anlage

In diesem Fall werden also die Kosten der alten mit denen einer Neuanlage verglichen. Die Preisersparnis der einen gegenüber der anderen Alternative beschreibt den Mehrwert der jeweiligen Anlage für das Unternehmen. Bei dieser Betrachtung stehen also die Differenzen in der Anschaffung und die Kosten des Betriebs im Vordergrund. Bei der Auswahl für eine dieser beiden

Alternativen handelt es sich nun um ein Optimierungsproblem, dessen betriebswirtschaftliches Instrument zur Lösung die Investitionsrechnung ist.

Bei zu tätigen Investitionen ist außerdem eine Unterscheidung in "Kann"- und "Muss"-Investitionen sinnvoll. Bei "Kann"-Investitionen läuft die Berechnung auf die Frage hinaus, ob eine Investition zum gegebenen Zeitpunkt sinnvoll ist. Bei der "Muss"-Investition stellt sich die Frage nicht, da z. B. der Ausfall der alten Komponente zur Investition zwingt. In diesem Fall ist zu prüfen, welche der sich anbietenden Investitionsvarianten die geeignetste ist. Im konkreten Fall dieser Arbeit sind beide Fälle denkbar. Insbesondere bei älteren Kraftwerksblöcken kommt es vor, dass vorhandene Sammler aus ferritischem Material ausgetauscht werden müssen, z. B. weil im Zuge von Inspektionsmaßnahmen Risse festgestellt wurden. In einem solchen Fall lässt sich der Austausch mit einem Sammler aus höherwertigem Material deutlich schneller rechnen, da die Kosten für den Austausch und den Stillstand der Anlage zwangsläufig anfallen und letztendlich fast nur der Materialpreis den Unterschied bestimmt. Auf die Berechnung einer solchen „Kann“-Investition wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da die Ausfallkosten für den Kraftwerksblock keine Wirtschaftlichkeit erwarten lassen. Anders sieht es wiederum aus, wenn das Kraftwerk aufgrund einer anderen Revisions- oder Instandhaltungstätigkeit ohnehin nicht am Netz ist. Dann ist ein Investitionsvergleich mit einem Referenzwert 0 bzgl. des Ertragsausfalls möglich.

Die vorangegangenen Erläuterungen machen deutlich, dass insbesondere die reine Betrachtung der Abschreibung in unserem Fall zu keinem akzeptablen Ergebnis führt. Es ist daher eine Investitionsrechnung durchzuführen, wie Sie auch in der VDI 6025¹⁰⁵ beschrieben wird.

4.2 Die Investitionsrechnungsmethode

Das Verfahren der Investitionsrechnung dient der Beurteilung unterschiedlicher Investitionsalternativen. Die Beurteilung erfolgt, indem die auf Basis der durch die Investition zu erwartenden Konsequenzen ermittelt und auf der Grundlage des Unternehmenszieles bewertet werden. Diese Konsequenzen sind in aller Regel die mit der Investition verbundene Erhöhung oder auch die Minderung des Geldvermögens. Dabei geht die Investitionsrechnung, im Gegensatz zur Gewinn- und Verlustrechnung, nur von den zahlungswirksamen Vorgängen, d.h. Einzahlungen und Auszahlungen, aus. Die betriebswirtschaftliche Differenzierung Einnahmen/Einzahlungen bzw. Ausgaben/Auszahlungen erfolgt hierbei nicht, da diese in der betrieblichen Praxis nicht von Bedeutung ist. Da die Einzahlungsseite in der Energiewirtschaft fremdbestimmt wird, ist daraus zwangsläufig auch die Möglichkeit der eigenen Einflussnahme auf die Auszahlungsseite beschränkt. Dennoch muss die Einzahlungsseite Berücksichtigung finden, da der erzielte Marktpreis je MWh durch den Spotmarkt extrem volatil ist und wesentlich über die Rentabilität einer Investition mitentscheidet.

In der Investitionsrechnung finden drei wesentliche Methoden Anwendung. Man unterscheidet zwischen statischen, simultanen und dynamischen Berechnungsverfahren. Die statischen Verfahren scheiden aus, da diese zeitliche Unterschiede beim Anfall von Einnahmen und Ausgaben nicht oder nur unzureichend berücksichtigen. Die simultane Investitionsplanung erlaubt

eine Berücksichtigung von Interdependenzen der unterschiedlichen Investitionen. Da im hier betrachteten Fall die Entscheidung getroffen werden muss, ob ein Austausch der Sammler erfolgt oder nicht, kann es zu keinen Abhängigkeiten der jeweiligen Investitionsentscheidung kommen, so dass die Anwendung dieses Verfahrens ebenfalls nicht sinnvoll ist. Die dynamischen Verfahren berücksichtigen die unterschiedlichen Zahlungszeitpunkte der Investition durch Auf- und Abzinsung (Diskontierung) und sind daher im vorliegenden Fall das geeignetste Instrument. Bei den dynamischen Verfahren erfolgt die Unterscheidung in die Kapitalwertmethode und die Annuitätenmethode¹⁰⁵. Dabei ist die Kapitalwertmethode die gebräuchlichste Form der Analyse mit dem Ziel der Endwertmaximierung, während die Annuitätenmethode eine Analyse der Einkommenswirkungen mit dem Ziel der Entnahmemaximierung darstellt.

Als Grundlage für den Vergleich zweier Investitionen mit diesen Verfahren gelten die vereinfachten Annahmen eines vollkommenen Kapitalmarktes¹⁰⁶, d.h.:

1. Alle Ziele sind monetär bewertbar.
2. Alle Annahmen sind sicher.
3. Es kann zu jedem Zeitpunkt eine unbegrenzte Menge an Krediten auf- und Geldanlagen vorgenommen werden.
4. Der Zinssatz für Kredit und Geldanlage ist gleich.

Damit berücksichtigen diese zukunftsorientierten Verfahren lediglich vorhandene Preispräferenzen, nicht jedoch die Unsicherheit in den Aussagen. Das ist insbesondere mit Blick auf die Materialpreise und den Strompreis von besonderer Bedeutung. Letztendlich gilt jede Berechnung nur für den Augenblick, in dem auch die vorgegebenen Parameter gelten. Durch die Freiheit der Festlegung der Parameter lassen sich aber unterschiedlichste Szenarien berechnen und Grenzwerte festlegen, bei denen eine Ersatzinvestition betriebswirtschaftlich sinnvoll sein kann.

Im Regelfall sollte der Betrachtungshorizont für den Zeitraum einer Investitionsrechnung länger sein als die Nutzungsdauer des Produktes. In jedem Fall sollte mindestens eine Reinvestitionsphase mit einbezogen werden, und die Reinvestitionsphase der am längsten nutzbaren Alternative sollte ebenfalls erfasst werden.

Da bei einem ausreichend groß gewählten Betrachtungszeitraum der Kapitalwert zum Betrachtungszeitpunkt vernachlässigbar klein wird, muss für diese Arbeit ein entsprechend sinnvolles Zeitintervall gefunden werden.¹⁰⁷ Das wird gewährleistet, indem in den Worksheets die Reinvestitionen für den berechneten Lebensdauerverbrauch berücksichtigt werden.

4.3 Die Kapitalwertmethode und der Kalkulationszinsfuß

Wesentlich für die Amortisation einer Investition und deren Berechnung ist der Kalkulations- oder Kapitalisierungszinsfuß. Dieser ist der Ausdruck für eine mögliche Alternativrendite, wenn das Geld an anderer Stelle angelegt würde. Er ist gleichzeitig der Ausdruck für die Wiederanlageverzinsung bei Einnahmeüberschüssen bzw. Kosten der Finanzierung zwischenzeitlicher Ausgabenüberschüsse und damit auch Ausdruck für die Finanzierungskosten des Investitionsprojektes. Mit dem

Kapitalisierungszinsfuß¹⁰⁵ werden die Ausgaben für Tilgungen und Zinsen berücksichtigt. Er dient dazu, die künftigen Unternehmenserfolge auf einen Bezugszeitpunkt abzuzinsen, so dass deren Summe den Ertragswert zum Investitionszeitpunkt abbildet.

Da erst ein die Inflationsrate übersteigender Nominalzins zu einer Realverzinsung führt, ist es möglich, die Preissteigerungsrate mit einzubeziehen, indem diese vom Kalkulationszins subtrahiert wird. Prozentuale Erlösanstiege für zukünftige Perioden können in gleicher Weise berücksichtigt werden, indem deren Wert dem Kapitalisierungszinsfuß hinzuaddiert wird. Für die in dieser Arbeit angestellten Berechnungen wird ein aktuell gültiger, unternehmensspezifischer Kapitalisierungszinsfuß eingesetzt.

Mit Hilfe der Kapitalwertmethode oder Diskontierungsmethode werden Unterschiede von in der Zukunft liegenden Ein- und Auszahlungen auf einen Bezugszeitpunkt berechnet. Dabei findet das Zeitmoment derart Berücksichtigung, dass Auszahlungen in weiter Zukunft eine geringere Belastung bzw. Einzahlungen in weiter Zukunft einen geringeren Wert darstellen als kurzfristige anstehende Zahlungsvorgänge. Die Bewertung erfolgt durch das Mittel der Abzinsung des zukünftigen Betrags mit dem Kapitalisierungszinsfuß auf den gegenwärtigen Bezugszeitpunkt. Hierbei wird die auf den festen Zeitpunkt t_0 abgezinste Zahlung als Barwert bezeichnet. Dieses Verfahren setzt voraus, dass die Differenzen der Investitionsbeträge zum kalkulatorischen Zinssatz angelegt werden können. Aus der Differenz der Summe der Barwerte aller Einzahlungen und der Summe der Barwerte aller Auszahlungen resultiert der Kapitalwert der geplanten Investition. Formal beschrieben durch:¹⁰⁶

$$K = \sum_{t=0}^n (E_t - A_t) \cdot (1 + i)^{-t} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

Dabei ist:

K = Kapitalwert

E_t = Einzahlungen am Ende der Periode t

A_t = Auszahlungen am Ende der Periode t

i = Kalkulationszinsfuß

t = Periode ($t = 0, 1, 2, 3, \dots, n$)

n = Nutzungsdauer des Investitionsprojektes

Mit Hilfe dieser Gleichung lässt sich der Kapitalwert als das zu erwartende Gesamtergebnis einer Investition ermitteln. Bei einem positiven Ergebnis errechnet sich der über die im Kalkulationszinsfuß angenommene Mindestverzinsung hinausgehende Ertrag. Bei einem negativen Ergebnis ist die Investition nicht empfehlenswert, da das Geld durch Anlage im freien Markt höhere Zinsen erzielen kann.

Grafisch lässt sich die Ermittlung des Kapitalwertes durch die Abbildung 4-1¹⁰⁸ beschreiben. Hierbei erfolgt durch den Kapitaleinsatz (in Höhe von 100.000 €) ein Kapitalrückfluss, der in

Abhängigkeit des Zeitpunkts seines Eintretens mit dem Kapitalisierungszinsfuß bewertet wird. Zusätzlich zu den erzielten Erträgen wird in diesem Beispiel im 5. Jahr noch der Liquiditätserlös berücksichtigt. Das Ergebnis der Berechnung ergibt in diesem Beispiel einen positiven Kapitalwert in Höhe von 13.583 €, der die Wirtschaftlichkeit der Investition aufzeigt.

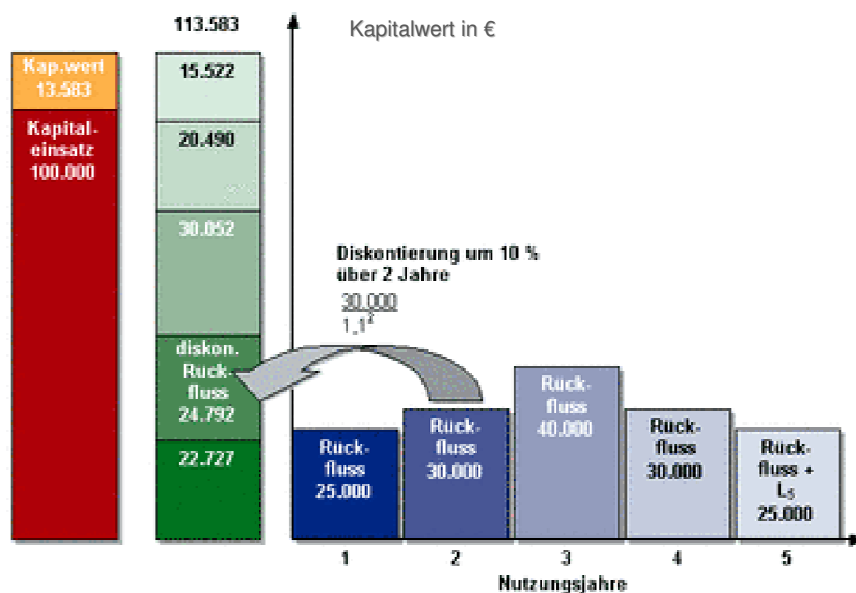


Abbildung 4-1: Kapitalwertmethode

In vorliegendem Fall werden jedoch nicht nur Einnahmen sondern auch Ausgaben betrachtet, mit denen in identischer Weise verfahren wird. Der aus der Summe der positiven Einnahmen und negativen Ausgaben ermittelte Kapitalwert wird auch diskontierter Cash Flow genannt, so dass diese Methode der DCF (Discounted-Cash-Flow) Methode gleichgesetzt werden kann. Eben dieses auch durch die VDI 6025 empfohlene Verfahren wird auch seitens RWE zur Ermittlung der Rentabilität von Investitionen im Kraftwerksbereich verwendet. Hierzu werden auf der Ausgaben-seite die nachfolgenden Kostengrößen verwendet:

1. Abschreibung der Investition (AfA)
2. Brennstoff (Braunkohle/Steinkohle/Gas/Öl)
3. CO₂-Emissionen (Zertifikate)
4. Personal- und Betriebsführung
5. Reparatur und Wartung
6. Versicherung und Verwaltung
7. Steuern

Auf der Einnahmeseite werden die zu erzielenden Stromerlöse betrachtet. Maßgeblich für die Berechnung wird der Verfügbarkeitsgewinn der Anlage zu Grunde gelegt, d.h. inwieweit erhöht sich die Anzahl der Betriebsstunden und dadurch die Stromerlöse, die nach der Investition durch das Kraftwerk erzielt werden können.

Es besteht außerdem die Option, jährliche Auszahlungssteigerungsraten (z. B. für Lohn, Brennstoff oder CO₂-Zertifikate) und jährliche Einzahlungssteigerungen (z. B. für Strompreisanpassungen) festzulegen und diese mit dem internen Kapitalisierungszinsfuß zu verrechnen.

4.4 Der Merit-Order-Effekt

Die Grundsatzentscheidung zum Bau eines neuen Kraftwerks wird neben der Notwendigkeit zum Austausch vorhandener Altanlagen und der damit verbundenen CO₂-Bilanz-Verbesserung wesentlich durch den Merit-Order-Effekt (MOE) beeinflusst. Die Merit Order definiert die Reihenfolge, in der die Kraftwerke zur Stromerzeugung zugeschaltet werden. Beginnend mit den Kraftwerken mit den geringsten Grenzkosten, in der Regel die regenerativen Erzeuger wie Wind, Photovoltaik und Wasserkraftanlagen, werden solange Kraftwerke mit höheren Grenzkosten zugeschaltet, bis die Lastanforderung im Markt gedeckt ist (siehe Abbildung 4-2)¹⁰⁹. Das zugeschaltete Kraftwerk mit den höchsten Grenzkosten definiert gleichzeitig den Marktpreis (Market Clearing Price).

Bei den Stromgestehungskosten ist außerdem zu berücksichtigen, dass der Wirkungsgrad im Teillastbetrieb vom Kraftwerkstyp abhängt. So steigen die Stromgestehungskosten für ein GuD-Kraftwerk im Teillastbetrieb stärker als für ein Steinkohlekraftwerk.¹¹⁰

Dieser Effekt führt zunehmend dazu, dass im Betrieb befindliche Kohlekraftwerke innerhalb kurzer Zeit aus dem Netz genommen oder zugeschaltet werden müssen. Der Effekt macht außerdem deutlich, dass der im Markt zu erzielende Strompreis hochgradig volatil ist. Für weitere Berechnungen sind daher zwangsläufig Erfahrungs- und Prognosewerte zu verwenden, die bei jeder neuen Berechnung nach den neuesten Erkenntnissen angepasst werden sollten. Zu beachten ist außerdem, dass der MOE nur die variablen Kosten des Kraftwerks berücksichtigt. Das bedeutet, dass die z. T. recht hohen Abschreibungen auf Anlagen in der Kostenbetrachtung unberücksichtigt bleiben.

Anders als im Lastfolgebetrieb der Vergangenheit ergibt sich dadurch auch die Notwendigkeit für die Kraftwerksbetreiber neben der positiven Regelernergie auch negative Regelernergie bereitzustellen. Die Regelernergie wird dazu verwendet, von der Prognose abweichende Nachfrage zu befriedigen oder von der Prognose abweichende Erzeugung regenerativer Energieerzeuger auszugleichen.

Damit ist der MOE maßgeblich dafür verantwortlich, dass sich eine immer stärkere Verlagerung in Richtung der regenerativen Energien ergeben wird und damit die Kohlekraftwerke immer häufiger vom Netz gehen müssen oder nur in Teillast betrieben werden.

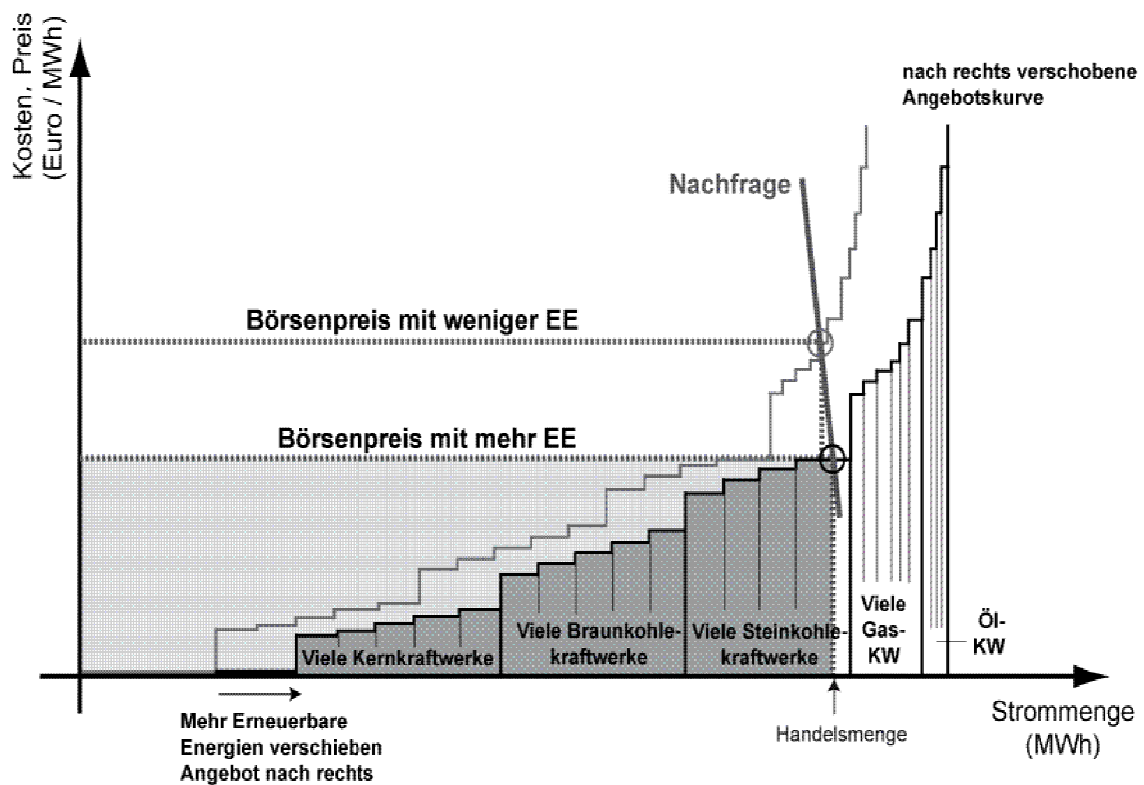


Abbildung 4-2: Merit Order

5 Durchführung der Berechnungen, Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Für die praktische Umsetzung und Rekonstruktion der Berechnungsergebnisse wurden real existierende Kraftwerksblöcke zur Berechnung ausgewählt und deren Betriebs- und Anlagenparameter als Eingangsgrößen verwendet. Wesentlich für die Blockauswahl waren die Kriterien der Datenverfügbarkeit, der vermuteten Wirtschaftlichkeit eines Austauschs unter den gegebenen Randbedingungen, der Brennstoffdifferenzierung (Braunkohle, Steinkohle und Gas) und einer Leistungsdifferenzierung (650 bis 1100 MW).

In der Praxis stellte sich die Berechnung für mehrere Blöcke als zu unübersichtlich dar, und es konnten lediglich für einen Kraftwerksblock die erforderlichen Betriebsparameter bereit gestellt werden. Die Arbeit beschränkt sich daher bei allen Berechnungen und Sensitivitätsanalysen auf einen Kraftwerksblock (Kraftwerksblock F des RWE Kraftwerks Neurath) und den daraus ausgewählten Frischdampfaustrittssammler (siehe auch Kapitel 3.2). Die Übernahme weiterer Betriebs- und Anlagenparameter für andere Kraftwerksblöcke ist bei entsprechender Verfügbarkeit der Daten möglich.

Die Excel-Tabelle "Wirtschaftlichkeitsberechnungen Hochtemperaturwerkstoffe" ist in die Arbeitsblätter/Worksheets (WS) 1 bis 11 unterteilt, die nachfolgend kurz beschrieben und in Kapitel 5.1 ausführlich erläutert werden. Zur besseren Erkennbarkeit sind die Namen der Worksheets und der VB-Makros kursiv dargestellt. Das Worksheet oder VB-Makro, welches in dem jeweiligen Absatz des Kapitels 5.1 erläutert wird, ist zu Beginn des Absatzes fett gedruckt.

1. *Parameterübersicht*
2. *Angebotspreise*
3. *Sensitivitätsparameter*
4. *Kraftwerkskennwerte*
5. *Werkstoffdaten*
6. *Wanddicke*
7. *Ermittlung ck1 (Kerbeinfluss an Schweißnähten)*
8. *Gradient und Erschöpfung mit dem integrierten Makro
Gradienten- und Erschöpfungsberechnung Neurath*
9. *Berechnungsparameter mit dem integrierten Makro
Berechnung Neurath ausführen*
10. *DCF Neurath*
11. *Ergebnisse*

Im WS *Parameterübersicht* (1) werden alle verwendeten Variablen, Formelzeichen und Berechnungsformeln tabellarisch aufgelistet. Die im Vorfeld zu hinterlegenden Eingangsdaten werden in die Excel WS *Angebotspreise* (2), *Kraftwerkskennwerte* (4) und *Werkstoffdaten* (5) eingetragen. Diese WS werden zur weitergehenden Differenzierung als „Datenblätter“ bezeichnet.

Auf diese Daten greifen die zur Berechnung verwendeten WS zu, so dass im Falle einer vorzunehmenden Änderung nur die Eingangsdaten geändert werden müssen, und diese dann

unmittelbar für die nachfolgenden Berechnungen verwendet werden. Diese WS werden auch als „Berechnungsblätter“ bezeichnet.

Mit dem WS *Wanddicke* (6) erfolgt im ersten Schritt die Berechnung der neuen Wanddicken des ausgewählten Frischdampfsammlers für die unterschiedlichen Werkstoffe und die verschiedenen Lebensdauerauslegungen für 100.000, 150.000 und 200.000 Stunden. Diese Berechnung erfolgt gemäß den Vorgaben der EN 13480-3:2002 und der EN 12952-3:2012 und mit Hilfe der in Kap. 2.5.3 erläuterten formalen Zusammenhänge.

Im WS *Ermittlung ck1* (7) werden die zu verwendenden Korrekturfaktoren für den Kerbeinfluss an Schweißnähten bestimmt.

Das WS *Gradient und Erschöpfung* (8) setzt auf diese Werte auf und bestimmt den maximal zulässigen Temperaturgradienten im Anfahrvorgang und den Lebensdauerverbrauch bei einer vorgegebenen Anzahl von Anfahrvorgängen. Die verwendeten Formeln und die Vorgehensweise dazu wurde im Kapitel 2.5.4 erläutert. Mit Aktivierung des VB-Makros *Gradienten- und Erschöpfungsberechnung* Neurath erfolgt die Berechnung der Gradienten und Lebensdauern für die unterschiedlichen Wanddickenauslegungen für Heiß- und Warmstarts und die Auslegungsdauern 100.000, 150.000 und 200.000 Stunden.

Mit dem WS *Berechnungsparameter* (9) lässt sich aus den Temperaturgradienten und dem ermittelten Lebensdauerverbrauch für jeden Werkstoff gegenüber dem Referenzwerkstoff eine Zeitersparnis im Anfahrvorgang ermitteln, die gleichbedeutend mit einer Einsparung von Brennstoff und CO₂-Zertifikaten in der Startphase ist. Die Lebensdauerreduktion wird durch erhöhte Aufwendungen in der Inspektion bzw. Anlagenerneuerung abgebildet. Alle zuvor ermittelten Größen werden in eine Form gebracht, so dass sie unmittelbar in das WS *DCF Neurath* (10) überführt werden können. Dort wird mittels der Kapitalwertmethode die Wirtschaftlichkeit der Investition auf Basis der veränderten Verfügbarkeit und der geänderten Kostenanteile berechnet. Mit Hilfe des VB-Makros *Berechnung Neurath ausführen* wird das WS *DCF Neurath* mit den Ergebnissen aus dem WS *Berechnungsparameter* mehrfach durchlaufen und die Ergebnisse zum berechneten Kapitalwert und der Höhe der zulässigen Investition in das WS *Berechnungsparameter* zurückgeschrieben.

Im WS *Ergebnisse* (11) werden die Berechnungsergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung zusammengefasst und die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen auf Basis der Daten aus dem WS *Sensitivitätsparameter* (3) abgelegt und grafisch dargestellt.

Für alle WS gilt, dass die Daten- oder Literaturquellen für jede Zelle im Kommentarfeld angegeben werden. Diese sind daher im Abdruck der Tabellen im Anhang nicht sichtbar.

Die für die Berechnungen notwendigen formalen Zusammenhänge wurden dem geltenden Regelwerk entnommen und sind in den vorangegangenen Kapiteln erläutert worden. Die genaue Beschreibung der Funktion der einzelnen WS erfolgt auf den nächsten Seiten.

5.1 Funktionsbeschreibung der einzelnen Exceltabellen

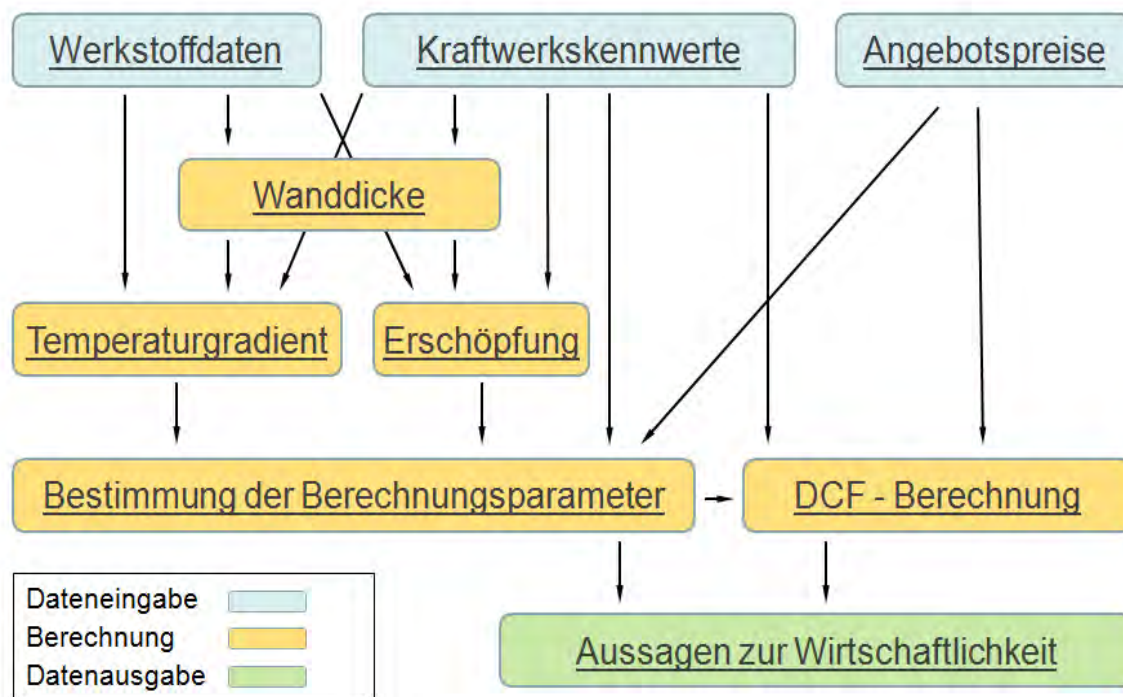


Abbildung 5-1: Flussdiagramm der Berechnung mittels der wesentlichen Worksheets

In dem WS **Parameterübersicht** sind alle in den Exceltabellen verwendeten Parameter mit Ihrer Bedeutung, dem zugehörigen Formelzeichen und der Einheit hinterlegt. Die Parameterübersicht ist mit keinem weiteren WS verknüpft, da sie ausschließlich der Erläuterung dient.

Das WS **Angebotspreise** enthält die Preise für die ausgewählten Sammler aus vorliegenden Angeboten oder ggf. aus Abschätzungen. Eine solche Abschätzung kann z. B. dadurch erfolgen, dass aus den Sammlerdaten und der Wanddickenberechnung das Gewicht ermittelt und mit Hilfe der angegebenen kg-Preise und dem Verhältnis von Werkstoff zu Herstellungsaufwand ein Gesamtpreis ermittelt wird. Die Quellen sind für den jeweiligen Preis benannt. Liegen mehrere Angebote vor, so wird der Mittelwert gebildet, der dann in das WS **Kraftwerkskennwerte** übernommen wird. Da die meisten Kesselerneuerungen als Gesamtpaket bei den Anbietern angefragt und von diesen angeboten werden, liegen kaum Angebote für einzelne Sammler vor. Es muss daher in vielen Fällen auf die Preisermittlung durch Gewicht und Materialpreis zurückgegriffen werden. Aus den vorliegenden Angeboten und den Gesprächen mit den Anbietern wurden prozentuale Werte für die Größen Schweißzusatzstoffe, Fertigungskosten, Prüfung und Abnahme sowie für die Entsorgung angesetzt, die durchaus noch Schwankungen unterliegen können. In jedem Fall sind für einen konkret geplanten Austausch die tatsächlichen Angebotswerte einzutragen und daraus die Wirtschaftlichkeit für einen Sammler aus einem höherwertigen Material abzuleiten. Dieser Umstand gilt umso mehr, als dass die Rohstoffpreise zum Teil eklatanten Preisschwankungen unterliegen (siehe Abbildung 2-4) und innovative Bearbeitungsverfahren zu Verschiebungen bei den Fertigungskosten führen können.

So ist bereits bei den konkreten Angeboten für die Erneuerung der Austrittssammler in den Kraftwerken Weißweiler und Niederaußem erkennbar, dass - je nach Anbieter - zwischen dem Preis für einen Sammler aus dem "klassischen" 10CrMo9-10 kaum ein Unterschied zum "modernen" P91 besteht.

Das WS **Sensitivitätsparameter** wurde eingefügt, als bei der Durchführung von Sensitivitätsanalysen festgestellt wurde, dass die Veränderung der Parameter im VB-Makro hätte fest hinterlegt werden müssen. Nun übernimmt das Makro die Werte aus dem WS Sensitivitätsanalyse, so dass jederzeit neue Analysen mit anderen Werten durchgeführt werden können.

In dem WS **Kraftwerkskennwerte** sollten ursprünglich unterschiedliche Kraftwerksdaten zur Berechnung hinterlegt werden. Aufgrund der zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen wurde darauf verzichtet und es finden sich ausschließlich die Daten des Kraftwerksblocks F des Braunkohlekraftwerks Neurath mit einem direkten Quellbezug für die hinterlegten Werte wieder.

Die Daten dieses WS sind unterteilt in die Abschnitte Kraftwerksdaten, Sammler, Bauteilabmessungen, Material- und Herstellungskosten (Referenzwerkstoff), Anfahrparameter (Kalt- Warm- und Heißstart) und Finanzierungsdaten, wobei es sich bei den Finanzierungsdaten um Unternehmensvorgaben handelt, die somit unabhängig vom ausgewählten Kraftwerksblock sind.

Die Werte, die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse variiert werden sind in dem WS leuchtend gelb hinterlegt.

Das WS **Werkstoffdaten** enthält die Kennwerte und Daten zu den ausgewählten Werkstoffen, wobei auf unterschiedlichste Quellen zurückgegriffen wurde. Zum Teil wurden die Werte dem ohnehin verwendeten Regelwerk entnommen. Insbesondere in der EN 10216 und 10302 sind für die betrachteten Werkstoffe die meisten physikalischen Kennwerte und einige Zeitstandwerte hinterlegt, die entsprechend in das WS übernommen wurden. Weitere Daten entstammen den Werkstoffdatenblättern der Hersteller. Auch in diesem WS sind die jeweiligen Quellen im Kommentarfeld der Zelle genannt.

Die Unterteilung der Daten erfolgt in die grundsätzlichen Angaben zum Werkstoff, werkstoff-spezifische Preise und die physikalischen Kennwerte und Festigkeitswerte im temperatur-unabhängigen Bereich. Den größten Abschnitt bilden die temperaturabhängigen Kennwerte. Hier sind sowohl die zeitabhängigen Festigkeitswerte als auch die physikalischen Kennwerte für unterschiedliche Temperaturen angegeben. Die Angaben entsprechen den genannten Temperaturwerten der Werkstoffdatenblätter. Die Berechnung der Daten für die Berechnungstemperaturen erfolgt auf Basis dieser Daten in den WS zur Berechnung der Wanddicken, zur Bestimmung von ck_1 und der Lebensdauer bzw. dem zulässigen Temperaturgradienten. Für zwischen diesen Temperaturen liegende Berechnungstemperaturen werden Interpolationsverfahren verwendet, auf die in der Erläuterung zu den jeweiligen Berechnungsblättern gesondert hingewiesen wird.

Die Berechnungen im WS **Wanddicke** erfolgt auf Basis der EN 13480 und der EN 12952-3:2012. Die verwendeten Formeln sind im Kapitel 2.5.3 ausführlich erläutert.

Das WS übernimmt die Geometriedaten (Innendurchmesser, Berechnungsdruck und Berechnungstemperatur) des Sammlers aus dem WS *Kraftwerkskennwerte*. Werden bereits in den Datenblättern definierte Werte der Übersichtlichkeit halber noch einmal aufgeführt, so sind diese Felder hellblau markiert. Grundsätzlich ist auch eine Berechnung der Wanddicke auf Basis eines gegebenen Außendurchmessers möglich. In diesem Fall sollen aber verschiedene, vom jeweiligen Werkstoff abhängige, Wanddicken ermittelt werden. Da der Innendurchmesser durch die zu befördernde Dampfmenge vorgegeben ist, und der Außendurchmesser dann aus der gewählten Wanddicke resultiert, wird in diesem Fall immer der Innendurchmesser als gegeben vorausgesetzt. Ist für den Referenzwerkstoff nur der Außendurchmesser gegeben, kann über die vorhandene Wanddicke der Innendurchmesser bestimmt und für die neu zu berechnenden Werkstoffe übernommen werden.

Die zulässigen Spannungen (Dehngrenzen und Zeitstandfestigkeiten) werden aus dem WS *Werkstoffdaten* übernommen.

Der Verschwächungsbeiwert muss für jeden Sammler und für jeden Werkstoff individuell vorgegeben werden. Der Ursprung dieses Wertes und die Berechnungsmethodik wird zwar ebenfalls in 2.5.3 erläutert, allerdings handelt es sich in der Realität um einen iterativen Prozess, da die Wanddicke und der Verschwächungsbeiwert unmittelbar voneinander abhängen. In der Industrie werden unterschiedliche Programme wie z. B. Probat oder FREDO verwendet, um bei fest definiertem Druck, Temperatur und Innendurchmesser die Parameter Wanddicke und Nippelabstand zu variieren und daraus eine möglichst optimale Kombination aus Wanddicke und Verschwächungsbeiwert zu erhalten. Auf diesen Prozess wird in den Beispielrechnungen verzichtet, und es wird für die verschiedenen Werkstoffe lediglich eine Veränderung der Wanddicke unterstellt. Ebenfalls werden die Anzahl und Größe der Nippel konstant gehalten. Gleiches gilt für die Zuschläge für Korrosion, Abnutzung und Wanddickenunterschreitung.

Der Sicherheitsbeiwert ergibt sich aus den Erläuterungen in 2.5.3 für die jeweils verwendeten Festigkeitskennwerte und ist gemäß Regelwerk vorgegeben.

Die ausgeführte Wanddicke orientiert sich neben dem Ergebnis der Berechnungen unter anderem an der Verfügbarkeit von Material. So ist es möglich, dass ein Anbieter eine höhere Wanddicke zu geringeren Kosten anbieten kann, weil gerade von diesem Rohrmaterial etwas vorrätig ist. Dieser Umstand findet bei den Berechnungen hier keine Berücksichtigung, so dass immer mit den rechnerisch ermittelten Wanddicken weitergerechnet wird. Grundsätzlich lässt das Regelwerk nur Abweichungen nach oben zu, woraus wiederum ersichtlich wird, dass der Aspekt der Dynamik in der Vergangenheit nicht angemessen berücksichtigt wurde.

Als Basis zur Wanddickenermittlung dient die zulässige Spannung für den jeweiligen Werkstoff und die Auslegungszeit, die mit 100.000, 150.000 und 200.000 Stunden angenommen wird. Da in den

Werkstoffdatenblättern oftmals nur in großen Temperatursprüngen Spannungswerte angegeben werden, ist für die realen Betriebstemperaturen des Kraftwerksblockes eine Interpolation erforderlich. Hierzu wurde das Verfahren der Interpolation nach Larson-Miller¹¹¹ verwendet.

In der formalen Umsetzung bedeutet dies, dass für die vorgegebenen Temperatursprünge die Larson-Miller-Parameter in der nachfolgenden Form bestimmt werden:

$$P = T * (C + \lg t_m) \quad \text{Gleichung 5-1}$$

Dabei gilt:

P Larson-Miller-Parameter

T Temperatur in K

t_m Lebensdauer in h

C konst. für alle σ mit $C = 20$

Im ersten Abschnitt der Exceltabelle werden die Kraftwerksdaten übernommen und die Sicherheitsbeiwerte definiert. Für die aus den Kraftwerksdaten gegebene Berechnungstemperatur werden die Hilfstemperaturen definiert, die jeweils oberhalb und unterhalb der Berechnungstemperatur liegen und für die im Werkstoffdatenblatt zeitabhängige Daten vorliegen. Der Übersichtlichkeit halber werden diese Daten noch einmal im zweiten Abschnitt des WS aufgeführt (Überführung der Werkstoffdaten für die relevanten Temperaturbereiche).

Die in der Exceltabelle hinterlegten Formeln berechnen (aus den für die eingrenzenden Temperaturen geltenden Spannungswerten und den zugehörigen Larson-Miller-Parametern) die zugehörige Geradengleichung und leiten daraus die fehlenden Spannungswerte ab. Die Larson-Miller-Parameter werden zuvor für die jeweiligen Temperaturhilfsgrößen (*Temperatur größer* und *Temperatur kleiner*) bestimmt. Daraus werden für die Bestimmung der Geradengleichung die Hilfsgrößen *Steigung* und *Schnittpunkt* berechnet.

$$\text{Steigung} = \frac{R_m T_{\text{klein}} - R_m T_{\text{groß}}}{LMP_{T,\text{klein}} - LMP_{T,\text{groß}}} \quad \text{Gleichung 5-2}$$

$$R_{m,\text{Schnitt}} = R_m T_{\text{klein}} - \text{Steigung} * LMP_{\text{klein}} \quad \text{Gleichung 5-3}$$

Der Larson-Miller-Parameter für die Berechnungstemperatur kann dann in die Geradengleichung eingesetzt und der neue Spannungswert über eine der Temperaturhilfsgrößen berechnet werden.

$$R_{m,Tc} = R_{m,\text{Schnitt}} - \text{Steigung} * LMP_{Tc} \quad \text{Gleichung 5-4}$$

Als Referenzgrößen werden die vorliegenden Messwerte zu den Temperaturen 200, 300, 400, 450, 500, 550, 600 und 650 °C verwendet. Die Hinzunahme der experimentellen Messwerte für 450, 550 und 650 °C erhöht die Genauigkeit der rechnerischen Interpolation.

Die Berechnungen werden für die unterschiedlichen Auslegungszeiten 100.000, 150.000 und 200.000 Stunden durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass bei längeren Auslegungszeiten und fehlenden experimentellen Werten der Sicherheitsbeiwert entsprechend angepasst wird. Dies erfolgt durch die in den Exceltabellen hinterlegten Verknüpfungen automatisiert. Das kann allerdings auch dazu führen, dass für gegebene 200.000 Stunden Zeitstandwerte ein besseres Ergebnis (also eine geringere Wanddicke) erzielt wird, als für 150.000 Stunden, wenn hierfür der 100.000 Stunden-Wert mit höherem Sicherheitsbeiwert verwendet wird.

Der Sicherheitswert für Abnutzung und Korrosion (c_2) wird gleich Null gesetzt, da der Sammler ausschließlich von Dampf durchströmt wird und daher nur von einer relativ geringen Korrosions- und Abnutzungsabnahme der Wandstärke auszugehen ist. Der Einfluss dieses Zuschlags auf die rechnerische Mindestwandstärke wird ebenfalls im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersucht.

Im WS **Gradient und Erschöpfung** erfolgt die Berechnung der zulässigen Anfahrgradienten und des Lebensdauerverbrauchs des Bauteils. Die Formeln entsprechen den Vorgaben des Regelwerks und dem Berechnungsbeispiel der EN 12952-3. Diese werden in Kapitel 2.5.4 ausführlich erläutert. Es erfolgt eine differenzierte Betrachtung des zulässigen Temperaturgefälles und des Lebensdauerverbrauchs des Bauteils. Das zulässige Temperaturgefälle wird nur für den Temperaturanstieg betrachtet, da die auf das Bauteil wirkenden Kräfte bei konstanter oder abfallender Temperatur vergleichsweise gering sind. Das gilt zumindest für den "natürlichen" Abkühlvorgang ohne Berücksichtigung der Einspritzkühlung. Die Ermittlung des Lebensdauerverbrauchs basiert auf der Berechnung der zulässigen Lastspiele und der daraus resultierenden Erschöpfung für das Bauteil. Hierbei folgt der Gesamtlebensdauerverbrauch einer Akkumulation der Einzelereignisse.

Die Option einer weitergehende Ertragssteigerung durch die Möglichkeit, schneller mit dem Kraftwerksblock "im Markt" zu sein und damit auf Preisschwankungen reagieren zu können, ist grundsätzlich denkbar, jedoch nicht garantiert, da bei ausreichend genauen Prognosen durch entsprechend früheres Anfahren der optimale Zeitpunkt zur Netzankopplung bestimmt werden kann. Kritisch in diesem Zusammenhang ist, ob bei der zunehmenden Fluktuation und der Verschiebung des Handels vom "Day Ahead" zum "Intraday" auf mittlere Sicht noch die heutige Prognosequalität bewahrt werden kann. Daher wird dieser Aspekt ebenfalls im Rahmen der Sensitivitätsanalyse mit untersucht.

Ein wesentliches Element dieses Berechnungsblattes ist das VB-Makro **Gradienten_und_Erschöpfungsberechnung_Neurath**, welches über die Schaltfläche Gradienten- und Erschöpfungsberechnung Neurath gestartet wird und zusätzlich zu den Worksheets im Anhang abgebildet ist. Das eigentliche Berechnungsblatt kann alle erforderlichen Berechnungen nur für ein Datenszenario durchführen. Damit aber alle berechneten Wanddicken

für die sechs Szenarien Warm- und Heißstart für jeweils 100.000, 150.000 und 200.000 Stunden berechnet werden, muss das WS mit den jeweiligen Eingangswerten befüllt und die Ergebnisse der Berechnungen übertragen werden. Die Szenarien sind in den jeweiligen Blöcken des Programms entsprechend beschriftet und werden jeweils sechs Mal durchlaufen, da jeder Werkstoff für seine spezifische Wanddicke berechnet werden muss.

Dass die Zähler der Szenarien einzeln definiert sind, hilft bei der Nachprüfbarkeit einzelner Szenarien. So kann eine ausschließliche Berechnung des 150.000 Stunden Warmstart-Szenarios sehr einfach durchgeführt werden, indem alle Zähler auf null und nur der Zähler *Z150W* auf 6 gesetzt wird. Ansonsten ist der zuletzt berechnete Wert immer derjenige, der für 200.000 Stunden Warmstart berechnet wurde.

In das Makro wurde eine Schleife integriert, die im Falle der Variation der Anfahrzeiten den resultierenden Lebensdauerverbrauch ermittelt (Auswertung 1). Die zweite Schleife dient der Kostenberechnung in Abhängigkeit von der Anfahrzeit (Auswertung 5), zu der das Makro als Subroutine aufgerufen wird. Beide Schleifen sind für die Standardberechnungen mit Kommentarmarkern versehen und damit inaktiv.

Als Basis der eigentlichen Berechnungen des WS dienen die Betriebsbedingungen des Kraftwerksblocks und die Druck- und Temperaturverhältnisse im betrachteten Bauteil. Außerdem werden die physikalischen Eigenschaften der jeweiligen Werkstoffe, die den unterschiedlichen Datenblättern entnommen wurden, in die Formeln übernommen. Diese werden, ebenso wie die zuvor berechneten Wanddicken, für die unterschiedlichen Auslegungszeiten im ersten Abschnitt noch einmal aufgeführt (hellblau hinterlegt), so dass im weiteren Verlauf des WS auch nur auf diese Zellen zugegriffen wird.

Im zweiten Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen dieses WS, also die Anfahrgradienten zu Beginn und zum Ende des Anfahrens und die Erschöpfung des Bauteils, in Abhängigkeit der Auslegung und des betrachteten Startvorgangs (Warm- bzw. Heißstart) übertragen. Damit sind die Berechnungsgrundlagen und die Ergebnisse, die dann für weitere Berechnungen verwendet werden, auf einen Blick erkennbar.

Die Ergebnisse werden durch die Ausführung eines Makros ermittelt, welches die für die sechs Fälle vorliegenden Daten nacheinander in die Formeln einspeist. Es handelt sich hierbei um die Berechnungsfälle:

- Warmstart mit Auslegung 100.000 Stunden
- Warmstart mit Auslegung 150.000 Stunden
- Warmstart mit Auslegung 200.000 Stunden
- Heißstart mit Auslegung 100.000 Stunden
- Heißstart mit Auslegung 150.000 Stunden
- Heißstart mit Auslegung 200.000 Stunden

Welcher der Fälle aktuell berechnet wird, ist im Worksheet den Zeilen 46 und 47 zu entnehmen, dort sind die jeweiligen Daten in entsprechenden Drop-Down-Menüs hinterlegt. Wie bereits in Kapitel drei erläutert, wurde der Kaltstart bei den Berechnungen nicht betrachtet.

Zur Ermittlung der Streckgrenze für die Referenztemperatur erfolgt auch in diesem Berechnungsblatt eine Interpolation nach Larson-Miller wie zuvor beschrieben.

Daran anschließend werden die für die Hilfstemperaturen benötigten physikalischen Werkstoffdaten aus dem Werkstoffdatenblatt übertragen und dargestellt.

Ebenso wie bei den Zeitstandwerten zur Wanddickenberechnung, müssen die zu den jeweiligen Betriebstemperaturen bzw. Referenztemperaturen zugehörigen physikalischen Größen durch Interpolation berechnet werden. Da jedoch für die Zwischengrößen 450 und 550 °C für keine der physikalischen Kennwerte Daten vorliegen, werden nur die Werte 200, 300, 400, 500 und 600 °C zur Interpolation verwendet. Außerdem wird in diesem Fall zur Berechnung eine Arrhenius-Funktion verwendet, die zur Beschreibung des Zusammenhangs der Größen E-Modul, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität und der Temperatur gut geeignet ist.¹⁷

$$k = A e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad \text{Gleichung 5-5}$$

Hierbei ist zu beachten, dass k stets stellvertretend für die zu interpolierende Größe steht, das Vorzeichen des Exponenten aber beim E-Modul nicht negativ ist, da der E-Modul mit steigender Temperatur geringer wird. Nach Umformung ergibt sich auch hier die Möglichkeit einer Geradendarstellung in der Form:

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad \text{Gleichung 5-6}$$

Erfolgt nun die Auftragung des $(\ln k)$ auf der Ordinate und $(1/T)$ auf der Abszisse, so lassen sich nach Bestimmung der Steigung (E_a/R) und des Schnittpunkts mit der y-Achse ($\ln A$), beliebige Zwischenwerte für weitere Temperaturen ermitteln. In den nachfolgenden Blöcken werden dann die Werte für den Wärmeausdehnungskoeffizienten, den E-Modul, die Dichte, die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität zur Referenztemperatur ermittelt. Die temperaturabhängige Dichte wird, soweit vorhanden, den Werkstoffdatenblättern entnommen oder ebenfalls interpoliert. Alternativ kann die Dichte über die Gleichung 2-41 bestimmt werden, wobei diese Angaben mit einer relativen Unschärfe versehen sind, da es sich hierbei um ein vereinfachtes Rechenmodell für einen Würfel handelt. Um genauere Ergebnisse zu erzielen, müssten die erforderlichen Werte durch Versuche bestimmt werden.

Im nächsten Abschnitt werden zur besseren Übersichtlichkeit alle interpolierten Werte als Ausgangswerte für die nachfolgenden Berechnungen noch einmal aufgeführt.

Die nachfolgend durchgeführten Berechnungen entsprechen den Vorgaben der EN 12952-3:2012-03 und wurden bereits im Kapitel 2.5.4. ausführlich erläutert. Zuerst erfolgt die Bestimmung der Wärmeleitzahl (siehe Gleichung 2-40) oder auch der Temperaturleitfähigkeit des Materials.⁷¹ Im nächsten Schritt werden aus den Geometriedaten des Sammlers und der Nippel die Berechnungsfaktoren für die Spannungskonzentrationsfaktoren für Zylinderschalen berechnet.⁶⁹

Da der Spannungskonzentrationsfaktor bei Wärmespannung von dem den Zylinder durchströmenden Medium abhängig ist, erfolgt die Berechnung von Hilfsgrößen unter Berücksichtigung des Mediums. Bei den in unserem Fall betrachteten Frischdampfsammlern kann eine ausschließliche Durchströmung mit Dampf vorausgesetzt werden, so dass auch nur dieser Fall in den Berechnungen berücksichtigt wird.⁶⁹ Sollte das Tool für andere Voraussetzungen verwendet werden, so ist der Wert aber berücksichtigt und kann entsprechend angepasst werden.

Als Letztes werden die Hilfsvariablen W (zur Bestimmung der durch die Temperaturdifferenzen hervorgerufenen Wärmespannungen) und V (zur Berechnung des zulässigen Temperaturgefälles) berechnet, die in den weiteren Berechnungen Verwendung finden.

Damit sind die wesentlichen Hilfsgrößen zum dynamischen Temperaturverhalten berechnet, und es erfolgt nun sowohl die Berechnung des zulässigen Temperaturgefälles (Anfahrgradient), als auch der durch die erhöhte Anzahl von Anfahrvorgängen oder höhere Anfahrgradienten resultierende Lebensdauerverbrauch des Bauteils in demselben WS.

Zur **Berechnung des zulässigen Temperaturgefälles** wird die Anzahl der Starts pro Jahr aus den Kraftwerkskennwerten über die insgesamt zugrundeliegende Auslegungsdauer ermittelt und in die Tabelle übertragen. Da gemäß Regelwerk der Erschöpfungsgrad bei nicht spezifizierter Ermüdungsbeanspruchung und einer Annahme von 2000 Kaltstarts den Wert 0,4 nicht übersteigen darf, wird die Anzahl der Lastspiele um diesen Sicherheitsfaktor ergänzt.⁶⁹

Zur Ermittlung der zulässigen Spannungsschwingbreite werden darüber hinaus ein Spannungssicherheitsbeiwert von 1,5 und ein Lastspielsicherheitsbeiwert von 10 eingerechnet. Das Regelwerk bezieht sich hierbei auf die PD 6539, "Guide to methods for the assessment of the influence of crack growth on the significance of defects in components operating at high temperatures".⁷² Außerdem muss ein materialspezifischer Korrekturwert zur Berechnung der maßgebenden Spannungsschwingbreite in Abhängigkeit davon, ob es sich um einen ferritischen oder austenitischen Werkstoff handelt, mit eingebracht werden. Auch hierzu wurden die formalen Zusammenhänge in Kapitel 2.5.4 erläutert.

Nun erfolgt die Bestimmung der (virtuellen) maßgebenden Spannungsschwingbreite, wobei diese in der Unterscheidung vorgenommen wird, ob der Werkstoff im elastischen, teilplastischen oder vollplastischen Bereich betrieben wird. Diese Unterscheidung wird durch den Vergleich der korrigierten Spannungsschwingbreite und der korrigierten Mittelspannung mit der Streckgrenze des Werkstoffes vorgenommen.⁷² Die ausführliche Erläuterung der verwendeten Formeln erfolgte ebenfalls im Kapitel 2.5.4. Als Besonderheit ist zu beachten, dass zur Bereichsbestimmung bei der

Berechnung des zulässigen Temperaturgefälles die Mittelspannung nicht bekannt ist. Es erfolgt daher eine Einschätzung durch den ausschließlichen Vergleich der korrigierten Spannungsschwingbreite mit der Streckgrenze. Nach der Berechnung der Mittelspannung wird eine iterative Kontrollrechnung unter Verwendung der Mittelspannung durchgeführt. Da die Werte bereits im ersten Iterationsschritt eine hohe Annäherung aufzeigen, wurde auf weitere Iterationsschritte verzichtet.

Im nächsten Abschnitt werden die Kerbfaktoren festgelegt, wobei im Falle des Sammlers bei den Schweißstellen Grundkörper-Stützen und Grundkörper-Grundkörper von den gleichen festigkeitstechnischen Eigenschaften wie bei den verbundenen Werkstoffen ausgegangen wird. Bei der Schweißnaht Stützen-Grundkörper wird außerdem von einer restspaltfreien Nippelschweißung ausgegangen, bei der mittels eines Nippelschweißautomaten die Naht voll durchgeschweißt ist.⁴⁵ Es handelt sich laut Regelwerk dabei um eine Schweißverbindung mit leichter Kerbwirkung, also der Nahtklasse K1, woraus der Korrekturfaktor in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit und der Anzahl Lastspiele nach Regelwerk bestimmt werden kann.⁷² An dieser Stelle wurde eine deutliche Abweichung zur vorliegenden RWE Studie 2012 festgestellt. Dort wurde mit $ck_1 = 1$ gerechnet.⁴⁵ Warum derart verfahren wurde, ist nicht nachvollziehbar, so dass in der vorliegenden Arbeit der ck -Wert nach Regelwerk für die Nahtklasse K1 (leichte Kerbwirkung) berechnet wird.

Das erfolgt im separaten WS **Ermittlung ck_1** . Im Regelwerk werden die Grenzwerte nur für die Zugfestigkeiten bei 400, 600, 800 und 1000 N/mm² angegeben. Um also die Korrekturfaktoren für die Zugfestigkeiten der gegebenen Werkstoffe bestimmen zu können, werden diese Werte ebenfalls logarithmisch interpoliert. Das hierbei verwendete Verfahren über die Geradengleichung wurde bereits zuvor erläutert.

Das hat insbesondere für den Werkstoff Alloy C263 gravierende Auswirkungen, da aufgrund der hohen Zugfestigkeit ein Korrekturfaktor von 2,4 den Werkstoff für das Kraftwerk Neurath als nicht geeignet erscheinen lässt. Hierauf wird in der Interpretation der Ergebnisse noch näher eingegangen.

Die Berechnung der durch den Innendruck verursachten Spannungen an der Innenseite der Bohrung erfolgt nach Regelwerk über die Tresca-Vergleichsspannung, mit deren Hilfe die Hauptspannungsdifferenz als der doppelte Wert der Schubspannung angenommen und unter Einbeziehung des Spannungskonzentrationsfaktors für Zylinderschalen berechnet wird.⁶⁹

Wie bereits erwähnt, wird bei der Betrachtung der Sammler vorausgesetzt, dass lediglich das Medium Dampf vorliegt, so dass die Differenzierung zur Bestimmung der zulässigen Umfangsspannungen nur der Vollständigkeit halber mit aufgenommen wurde.

Als Ergebnis der Berechnungen wird der maximal zulässige Gradient zu Beginn und zum Ende des Anfahrens berechnet. Diese Ergebnisse werden im oberen Ergebnisteil des WS eingetragen.

Die Berechnung der **Erschöpfung** (auch Lebensdauerverbrauch) erfolgt im gleichen WS daran anschließend, da in großem Umfang auf gleiche Berechnungsparameter zurückgegriffen wird. Voraussetzung zur Ermittlung des Lebensdauerverbrauchs ist die Festlegung einer angenommenen Lastwechselbedingung. In der vorliegenden Arbeit wird der Lastwechsel mit dem einzelnen Startvorgang des Kraftwerksblockes gleich gesetzt. Lastwechsel im Bereich von minimaler zu maximaler Last werden nicht berücksichtigt, da hierbei die im Frischdampfsammler auftretenden Temperaturdifferenzen vergleichsweise gering sind. Zu deren Auswirkungen sei auf die RWE Studie 2012 verwiesen.⁴⁵

Eingabeparameter zur Durchführung der Berechnungen ist eine vorgegebene Anfahrzeit. Diese wird, analog zur Vorgehensweise in der RWE Studie 2012, im Rahmen der Sensitivitätsanalyse variiert und die Auswirkungen auf den Lebensdauerverbrauch aufgezeigt.

Die Berücksichtigung der die Lebensdauer reduzierenden Spannungsverteilung auf die An- und Abfahrvorgänge wird durch die Festlegung des g_s -Faktors sichergestellt. Dieser ist gleich Null, wenn die gesamte Wärmespannungsschwingbreite für die durch den Temperaturanstieg bei niedrigem Druck verursachte Wärmespannung verwendet wird. Der g_s -Faktor wäre 0,5, wenn sich die Wärmespannungsschwingbreite zu gleichen Teilen auf den An- und Abfahrvorgang verteilen würde.⁶⁹ In dieser Arbeit ist ein Wert von null angesetzt, da bei den betrachteten Startvorgängen von einer nahezu 100%-igen Wärmespannungsausnutzung ausgegangen werden kann, d.h. dass zu keinem Zeitpunkt eine Spannungsüberhöhung durch Wärmespannung gegenüber dem stationären Ausgangszustand auftritt. In den hinterlegten Formeln wird jedoch mit der Variablen g_s gerechnet, so dass der Wert für zukünftige Betrachtungen auch auf einen Wert ungleich Null angepasst werden kann.

Es werden im Anschluss daran erneut die zulässigen Spannungen bestimmt und daraus die (virtuellen) maßgebenden Spannungsschwingbreiten abgeleitet. Mit der bereits zuvor verwendeten Anzahl an Lastspielen resultiert daraus die anteilige Erschöpfung durch die dynamische Belastung des Bauteils (in diesem Fall des Sammlers).

Das WS **Berechnungsparameter** ist dafür verantwortlich, die gewonnenen Ergebnisse aus den Lastberechnungen der Sammler mit den unterschiedlichen Wanddicken in betriebswirtschaftliche Kenngrößen umzusetzen.

Da in dem WS *DCF Neurath* zur besseren Übersichtlichkeit ausschließlich Verweise auf dieses WS erfolgen, werden hier alle Daten aus den Datenblättern *Kraftwerkskennwerte* und *Werkstoffdaten* sowie aus den Berechnungsblättern *Wanddicke* und *Gradient und Erschöpfung* übernommen (hellviolett) und zusammengefasst. Um zu verdeutlichen, mit welchen Eingangs- (hellblau) und Ausgangsparametern (hellrot und hellgrün) gearbeitet wird, sind diese zu Beginn des WS für die drei Auslegungsgrößen und für Warm- und Heißstart farblich gekennzeichnet aufgeführt.

Auch in diesem Berechnungsblatt ist, ebenso wie im WS *DCF Neurath* immer nur die Berechnung eines Szenarios möglich. Daher wird auch hier wieder ein VB Makro zur Datenübernahme

eingesetzt. Das Makro ***DateneübertragungNeurath***, wird über die Schaltfläche *Berechnung Neurath ausführen* gestartet.

Dieses Makro ist in der Struktur ähnlich aufgebaut, wie das Makro *Gradienten und Erschöpfungsberechnung Neurath*. Auch hier ist für jedes Szenario ein Zähler definiert, so dass eine Berechnung einzelner Szenarien durch Anpassung des Zählerwertes in dem jeweiligen Berechnungsblatt nachvollzogen werden kann.

Allerdings werden durch dieses Makro zwei Übertragungen durchgeführt. Zuerst werden die szenariospezifischen Wanddicken und Anfahrbedingungen, sowie die Gradienten und die Erschöpfung in das Berechnungsblatt überführt (Daten in hellblau) und daraus für jedes Szenario der kalendarische Nutzungszeitraum, die Anfahrkostendifferenz und der Verfügbarkeitsgewinn im WS Berechnungsparameter ermittelt (Ergebnisse in hellrot). Diese werden dann in einem zweiten Schritt dem WS *DCF Neurath* zugeführt und für jedes Szenario der ermittelte Kapitalwert und die Höhe der zulässigen Investition berechnet. Diese Werte werden dann zurück in das WS Berechnungsparameter geschrieben (hellgrün).

Auch in diesem Makro sind wieder Blöcke zur Durchführung der jeweiligen Sensitivitätsanalysen hinterlegt (Auswertung 2 bis 5). Wird einer dieser Blöcke durch entfernen der Kommentarmarken aktiviert, so werden alle Szenarien für den im WS *Sensitivitätsanalyse* hinterlegten Wert durchgeführt und das Ergebnis in das WS *Ergebnisse* geschrieben. Dieser Prozess wird neun Mal durchlaufen, so dass für jedes Sensitivitätsmodell neun unterschiedliche Werte hinterlegt werden können. Dabei greift das Makro immer auf die zuvor berechneten Werte für die Gradienten und Lebensdauerverbrauch zu. Lediglich die Berechnung der Kosten, die für einen Sammler bei reduzierten Anfahrzeiten entstehen (siehe Auswertung 5), bildet hierbei eine Ausnahme. Da für diese Berechnung durch die Reduktion der Anfahrzeiten neue Lebensdauerverbräuche entstehen, muss für diese Analyse mit jedem neuen Sensitivitätsanalysewert auch das Makro *Gradienten_und_Erschöpfungsberechnung_Neurath* als Subroutine aufgerufen werden. Daher ist für diesen besonderen Fall auch im Makro *Gradienten_und_Erschöpfungsberechnung_Neurath* die Dimensionierung des Zählers N zu entfernen, und die für den Subroutinenaufruf benötigten Zeilen sind zu aktivieren.

Im ersten Abschnitt des Berechnungsblattes (hellviolett) werden die wanddickenunabhängigen Kosten für den Ein- und Ausbau des Sammlers aufgeführt. Eine wesentliche Größe bildet hierbei im Rahmen der Stillstandskosten der Ertragsausfall. Erste Berechnungen haben gezeigt, dass die Höhe des Ertragsausfalls so beträchtlich ist, dass ein mehrwöchiger Stillstand ausschließlich zum Austausch des Sammlers nicht wirtschaftlich sein kann. Daher wird auf die Berechnung der Wirtschaftlichkeit dieser "Kann"-Investition verzichtet (Werte in hellgrau) und grundsätzlich auf Basis einer "Muss"-Investition gerechnet (Erläuterung siehe Kap. 4.1). Damit entfällt die Einbeziehung der Stillstandskosten (siehe auch Kapitel 4.2). Neben den Einmalkosten werden auch laufende Kosten für den Betrieb des Sammlers berücksichtigt, die sich ggf. für einen Sammler

aus einer Nickelbasislegierung von denen eines ferritisch-martensitischen Sammlers unterscheiden.

Bei den Herstellungskosten werden zwei alternative Preisfindungen gewählt. Zum einen können direkt Angebotspreise aus dem Datenblatt *Angebotspreise* übernommen werden und in die Berechnung einfließen. Stehen diese nicht zur Verfügung, wird alternativ über das Gewicht und den Werkstoffpreis, sowie über Angaben der Hersteller zu materialspezifischen Bearbeitungspreisen ein ungefährender Preis ermittelt. Dieser kann jederzeit wieder durch einen Angebotspreis ersetzt werden.

Mit der aus den Lastwechseln berechneten Erschöpfung kann die tatsächliche Lebenserwartung des Sammlers nach Auslegung und dynamischer Belastung ermittelt werden. Es ergibt sich daraus ein kalendarischer Nutzungszeitraum, der ebenfalls in das *WS DCF Neurath* mit einfließt.

Es erfolgt dann die Ermittlung der Anfahrtkosten als Differenzwert gegenüber den Kosten aus dem aktuell eingebauten Sammler, d.h. unter der Annahme, dass dieser durch einen gleichartigen Sammler ersetzt würde. Mit jeder Minute schnelleren Anfahrens reduzieren sich die Kosten für den Brennstoff, die CO₂-Kosten und den Stromeigenbedarf und es verkürzt sich der Zeitraum, bis zu dem das Kraftwerk mit seiner Nennlast im Netz Energie bereitstellen kann. Der sich daraus ergebende Mehrwert wird in eine jährliche Steigerung der Verfügbarkeit umgerechnet und fließt als solche ebenfalls in das *WS DCF Neurath* ein. Die Verbesserung der Verfügbarkeit ist umstritten, da mit einer Verbesserung der Wetterprognosen bei langsameren Gradienten das Kraftwerk einfach früher anfahren könnte. Allerdings ist dem die Veränderung der Marktanforderungen entgegenzuhalten, die zu Beginn dieses Kapitels beschrieben wurde. Daher wird der Wert mit einem Gewichtungsfaktor versehen, der für die durchgeführten Berechnungen auf 50% gesetzt wurde.

Durch die Erstellung der Ausgabeparameter für das DCF-Tool wird erreicht, dass aus dem *WS DCF Neurath* ausschließlich auf das *WS Berechnungsparameter* zugegriffen wird.

Das *WS DCF Neurath* ist ein im Hause der RWE geschriebenes betriebswirtschaftliches Exceltool, mit dem die Zulässigkeit einer Investition in eine Anlage abgeschätzt werden kann. Es werden dazu die fixen und variablen Einnahmen und Ausgaben aufsummiert und über die DCF-Methode auf einen Kapitalwert abgezinst. Das verwendete betriebswirtschaftliche Verfahren zur dynamischen Investitionsrechnung wird im Kapitel 4.3 ausführlich erläutert.

Das Bewertungstool wurde ursprünglich für Investitionen in Steinkohleanlagen geschrieben, kann aber durch die Eingaben der brennstofftypischen Charakteristiken ebenso für Braunkohle- oder Gaskraftwerke verwendet werden. Neben den kraftwerksspezifischen Daten zur Leistung und dem Wirkungsgrad werden betriebswirtschaftliche Daten, wie z. B. der Abschreibungszeitraum, Steuersatz und der Kapitalisierungszinsfuß (zu erzielende Mindestrendite) aus dem *WS Kraftwerksparameter* über das *WS Berechnungsparameter* zur Verfügung gestellt.

Im ersten Schritt berechnet das Tool aus dem Verfügbarkeitsgewinn den Kapitalwert, d.h. den Wert, der mit der Anlagenoptimierung zum aktuellen Zeitpunkt über den Betriebszeitraum abgezinst erzielt werden kann. Durch den Start des Makros "Ermittlung zulässiges Invest" wird dieser Kapitalwert auf den steuerlichen Abschreibungszeitraum mit Hilfe des Kapitalisierungszinsfuß in eine daraus resultierende zulässige Investition zum aktuellen Zeitpunkt umgerechnet. Die Funktion dieses Makros wurde in das VB Makro *Gradienten_und_Erschöpfungsberechnung_Neurath* integriert.

In dem WS **Ergebnisse** werden alle Ergebnisse der vorangegangenen Berechnungen zusammengefasst. Hier erfolgen auch die Sensitivitätsanalysen mit der Variation einzelner Parameter. Außerdem werden die Tabellen in Kurven zusammengefasst und dargestellt. Die Grafiken werden nachfolgend abgebildet und kommentiert.

Im Anhang (Kapitel 7) sind alle Worksheets und VB-Makros abgedruckt.

5.2 Berechnung der Wirtschaftlichkeit eines Sammleraustausches

Das entwickelte Modell wurde angewandt für den Austausch eines Sammlers mit einer bestehenden Auslegung von 200.000 Stunden aus dem Werkstoff P92. Die ersten Berechnungen ergaben die in Tabelle 5-1 dargestellten und anschließend erläuterten Ergebnisse.

Auslegung 200.000 Stunden		10CrMo9-10	X20CrMo V11-1	P91	P92	A617	C263
Wanddicke des Sammlers	mm	5.948	336	127	112	46	20
Anfahrgradient für den Warmstart	K/Min.	0,0002	0,2246	2,1175	4,6255	8,2177	-11,1947
Anfahrgradient für den Heißstart	K/Min.	0,0000	0,1359	1,2675	4,3299	13,7657	45,0863
Gesamtkosten Sammlertausch	T€	251.812	3.577	1.963	1.334	2.162	1.810
Referenzkosten Sammlertausch mit gleichem Material	T€	1.334	1.334	1.334	1.334	1.334	1.334
Differenzkosten Sammler aus anderem Material	T€	250.478	2.244	629	0	829	476
Ergebnis aus der Ermittlung des zulässigen Invest (Warmstarts)	T€	-69.274.437	-66.823	-3.876	0	1.763	5.856
Ergebnis aus der Ermittlung des zulässigen Invest (Heißstarts)	T€	-66.720.618	-24.715	-1.316	0	953	1.280
Wirtschaftlichkeit der Investition	T€	-136.245.533	-93.782	-5.821	0	1.887	6.659
Auslegung 150.000 Stunden		10CrMo9-10	X20CrMo V11-1	P91	P92	A617	C263
Wanddicke des Sammlers	mm	1.624	259	130	98	44	19
Anfahrgradient für den Warmstart	K/Min.	0,0057	0,5047	2,6057	6,0278	8,3224	-17,1286
Anfahrgradient für den Heißstart	K/Min.	0,0009	0,4576	2,5098	5,6927	14,3784	44,6861
Gesamtkosten Sammlertausch	T€	22.234	2.869	1.980	1.283	2.139	1.799
Referenzkosten Sammlertausch mit gleichem Material	T€	1.283	1.283	1.283	1.334	1.283	1.283
Differenzkosten Sammler aus anderem Material	T€	20.951	1.585	696	-50	855	516
Ergebnis aus der Ermittlung des zulässigen Invest (Warmstarts)	T€	-3.466.000	-35.752	-4.762	1.575	817	4.280
Ergebnis aus der Ermittlung des zulässigen Invest (Heißstarts)	T€	-3.397.191	-13.191	-1.637	577	616	921
Wirtschaftlichkeit der Investition	T€	-6.884.143	-50.529	-7.095	2.202	578	4.685
Auslegung 100.000 Stunden		10CrMo9-10	X20CrMo V11-1	P91	P92	A617	C263
Wanddicke des Sammlers	mm	1.140	232	120	89	44	19
Anfahrgradient für den Warmstart	K/Min.	0,0129	0,6450	3,0921	7,2304	8,3232	-21,1621
Anfahrgradient für den Heißstart	K/Min.	0,0043	0,5859	2,9927	6,8808	14,3849	44,2528
Gesamtkosten Sammlertausch	T€	12.236	2.655	1.922	1.253	2.138	1.793
Referenzkosten Sammlertausch mit gleichem Material	T€	1.253	1.253	1.253	1.334	1.253	1.253
Differenzkosten Sammler aus anderem Material	T€	10.983	1.402	669	-81	885	540
Ergebnis aus der Ermittlung des zulässigen Invest (Warmstarts)	T€	-1.499.711	-25.883	-2.080	2.439	282	3.529
Ergebnis aus der Ermittlung des zulässigen Invest (Heißstarts)	T€	-1.487.512	-9.542	-667	894	420	723
Wirtschaftlichkeit der Investition	T€	-2.998.206	-36.827	-3.416	3.413	-183	3.712

Tabelle 5-1: Basisauswertung der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Annahmen zur Basisauswertung:

Warmstarts pro Jahr:	15
Heißstarts pro Jahr:	10
Startzeit heiß	60 Minuten
Startzeit warm	100 Minuten
Betriebsmehrkosten für Ni-Basis pro Jahr:	10.000 €
Spez. Brennstoffkosten je MWh, thermisch:	8 €
Technische Umsetzbarkeit der Anfahrkostenreduktion:	50%

Der P92 ist in seiner jeweiligen Auslegung Referenzbauteil.

Der Anfahrgradient ist an dem ungünstigsten Wert zu Beginn des Anfahrens ausgerichtet.

Aufbau der Ergebnistabelle der Basisauswertung:

Die Tabelle 5-1 ist in drei Abschnitte unterteilt. Die Zeilen dieser Abschnitte sind identisch, es handelt sich jeweils um Berechnungen zu den unterschiedlichen Auslegungsdauern 100.000, 150.000 und 200.000 Stunden. In den Spalten finden sich die gewählten Werkstoffe, für welche die Berechnungen durchgeführt werden. In der ersten Zeile erfolgt die Ermittlung der Wanddicke des Sammlers aus dem gewählten Werkstoff nach Regelwerk. In der zweiten und dritten Zeile finden sich die aus der ermittelten Wandstärke resultierenden Anfahrgradienten für den Warm- und Heißstart. In der vierten Zeile stehen die aus den Materialkosten und Aufschlägen ermittelten Gesamtkosten, die für den Austausch dieses Sammlers kalkuliert werden müssen. Daran anschließend werden die Kosten des Sammlers aus dem Referenzwerkstoff aufgeführt, da mit dieser Basis die Differenzkosten in der nächsten Zeile ermittelt werden. Mit den Austauschkosten und den Gewinnen (Alloy 617 und Alloy C263) bzw. Verlusten (10CrMo9-10, X20CrMoV11-1 und P91) durch die verkürzte/verlängerte Anfahrzeit ergibt sich für die Summe aus Warm- und Heißstarts die Wirtschaftlichkeit des Austauschs in der letzten Zeile des jeweiligen Abschnitts.

Eine Besonderheit gilt für den Werkstoff P92, der in seiner Auslegung für 200.000 Stunden als Referenzwerkstoff gilt. Im ersten Abschnitt sind die Referenzkosten identisch mit den Kosten für den Austausch eines Sammlers aus dem gleichen Werkstoff mit der gleichen Wandstärke. Damit sind die Differenzkosten gleich Null. Da die Anfahrzeiten ebenfalls identisch sind, ergibt sich bei einem Austausch kein betriebswirtschaftlicher Mehrwert und die Wirtschaftlichkeit der Investition ist im Ergebnis gleich Null. Diese Aussage ist nicht bezogen auf den grundsätzlichen Nutzen des Austauschs sondern ist immer als Differenzbetrachtung zur bestehenden Komponente zu verstehen. Die anderen Werkstoffe werden in ihrer Wirtschaftlichkeit mit dem P92 in seiner Auslegung für 200.000 Stunden verglichen. Im zweiten und dritten Berechnungsabschnitt gelten für die geringere Auslegungsdauer andere Berechnungsvorschriften und damit geringere Wandstärken. Die aufgrund des geringeren Materialeinsatzes niedrigeren Herstellungskosten und der betriebswirtschaftliche Nutzen, durch den deutlich schnelleren Gradienten, führen zu einer wesentlich höheren Wirtschaftlichkeit. Um das darstellen zu können, wurde für den P92 in der

Auslegung für 100.000 und 150.000 Stunden der P92 in seiner Auslegung für 200.000 Stunden als Referenzbauteil ausgewählt. Die Sammler aus den anderen Werkstoffen wurden dann mit dem P92 in seiner jeweiligen Auslegung verglichen.

Die Annahme zu den Betriebsmehrkosten in Höhe von 10.000€ p.a. für den Einsatz von Nickellegierungen unterstellt einen erhöhten Aufwand für Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen (z.B. Mitarbeiterausbildung oder Schweißen von Schwarz-Weiß-Verbindungen). Die technische Umsetzbarkeit der Anfahrkostenreduktion berücksichtigt die Tatsache, dass die mathematisch bestimmten Reduktionswerte in der Praxis ggf. nicht komplett umsetzbar sind.

Ergebnisse der ersten Berechnungen und deren Interpretation:

1. Der P92 ist mit einer Auslegung für 200.000 Stunden Referenzwerkstoff. Dass die berechnete Wanddicke (112 mm) nicht mit der tatsächlichen Wanddicke (94 mm) übereinstimmt, liegt darin begründet, dass dieser Sammler in der Praxis bereits nach der Finite-Elemente-Methode berechnet wurde, während die hier durchgeführte Kalkulation nach Regelwerk erfolgte. Daraus lässt sich schließen, dass die vorliegenden Ergebnisse zu den Wanddicken eher als konservativ einzustufen sind und ggf. weiteres Potenzial bzgl. der Wanddickenreduzierung enthalten.

2. Für den Alloy C263 führen die Berechnungen für den Warmstart zu negativen Gradienten beim Anfahren. Der Grund dafür liegt in der Berechnung der Kerbfaktoren. Diese führen bei dem zu überwindenden Temperaturaufbau bei einem Anfangsdruck von 0 bar zu einer Mittelspannung, deren doppelter Wert höher ist als die maximal zulässige Umfangsspannung. Die Meinungen bzgl. des Einsetzens der Kerbfaktoren gehen deutlich auseinander, so wurden in der RWE Studie 2012 alle Faktoren gleich 1 gesetzt. Damit weitere Vergleiche auch für den Alloy C263 durchgeführt werden können, wird der Korrekturwert für die nachfolgenden Berechnungen manuell auf den Wert 2 angepasst. Er liegt damit unterhalb der für hohe Lastwechselzahlen berechneten Werte, aber immer noch oberhalb des zuvor berechneten unteren Grenzwertes.

3. Die Ermittlung der Wanddicke ergibt für den P91 für 150.000 Stunden einen größeren Wert als für 200.000 Stunden. Die Begründung hierfür liegt in den Vorgaben des Regelwerks. Da für den P91 keine Zeitstandwerte für 150.000 Stunden vorliegen, schreibt das Regelwerk die Verwendung der 100.000 Stunden-Werte mit einem erhöhten Sicherheitsbeiwert (1,35 anstelle von 1,25) vor. Die Verwendung der Werte mit diesem Sicherheitsbeiwert führt zu höheren Werten als die 200.000 Stunden-Werte mit dem Faktor 1,25. In der Praxis würde sinnvoll mit den 200.000-Stunden-Werten gearbeitet.

4. Die Wanddicke des Alloy 617 ist für alle Auslegungen nahezu identisch. Die Begründung findet sich darin, dass sich der Alloy 617 bei der Berechnungstemperatur von 615°C für 100.000 Stunden noch nicht im Zeitstandbereich befindet. Da die Werte für 615°C nicht vorliegen, werden diese mit den Werten für 600 und für 650°C nach Larsson Miller interpoliert. Da das Material ab ca. 630°C im Zeitstandbereich liegt, werden also für die 650°C-Werte Zeitstandwerte angenommen. Damit ergibt sich der leichte Anstieg in den Werten, der aber nur geringen Einfluss auf die Endergebnisse hat

(siehe Auswertung zur Veränderung der Wanddicken). Der Alloy C263 kommt etwas früher in den Zeitstandbereich, befindet sich aber bei 600°C Berechnungstemperatur auch im Grenzbereich.

5. Die Wanddicken für den 10CrMo9-10 und den X20CrMoV11-1 befinden sich in einer unrealistischen Größenordnung. Der Grund liegt darin, dass diese Werkstoffe nicht für die geforderten Belastungen geeignet sind. Daraus resultieren auch die unrealistisch niedrigen Anfahrgradienten und negativen Wirtschaftlichkeitsaussagen. Auf die Auswertung dieser Werkstoffe wird daher in den weiteren Analysen verzichtet.

6. Bei der Auslegung für 100.000 Stunden liegt die Wirtschaftlichkeit des Alloy 617 gegenüber dem P92 im Grenzbereich der Wirtschaftlichkeit. Die Ursache dafür liegt in der nur geringfügigen Verbesserung der Verfügbarkeit und den niedrigen Einsparungen beim Startvorgang. Diese reichen noch so eben aus, um die eingangs erläuterten Betriebsmehrkosten zu kompensieren. Insbesondere für den Warmstart liegt der Anfahrgradient des A617 (ungünstigster Wert zu Beginn des Anfahrens verwendet) aufgrund seiner geringeren Temperaturleitfähigkeit nur wenig oberhalb des Wertes für den P92.

7. Die Kosten für den Sammlertausch in Alloy C263 liegen deutlich unter denen des Alloy 617. Der Grund liegt in der nochmals um mehr als die Hälfte reduzierten Wanddicke und der daraus resultierenden Materialmenge. Der geringe Mehrpreis für das Material wiegt das bei weitem nicht auf. Da außerdem die Herstellungskosten prozentual auf den Materialpreis gerechnet werden, ist die Gesamtsumme geringer. Aus der kurzen Anfahrzeit folgt die wesentlich höhere Wirtschaftlichkeit für den Alloy C263 (auch für den festgelegten ck1-Wert). Damit wird insbesondere für diesen Werkstoff die Notwendigkeit einer Kalkulation im Rahmen eines realen Angebots deutlich.

5.3 Variation der Eingangsparameter für die ausgewählten Beispiele

Nachfolgend wird der Einfluss unterschiedlicher Größen auf die Ergebnisse zum Lebensdauerverbrauch, der Wirtschaftlichkeit und den Gesamtkosten untersucht. Dabei werden in allen Auswertungen die Ergebnisse für den 10CrMo9-10 und den X20CrMoV11-1 nicht abgebildet, da aus diesen Materialien kein Sammler mit den gegebenen Anforderungen hergestellt werden kann.

Die Ergebnistabellen sind jeweils in drei Abschnitte aufgeteilt, wobei die Berechnungen in jedem Abschnitt identisch sind. Die Ergebnisse unterscheiden sich nur durch die - der jeweiligen Auslegungsdauer (1. Spalte) entsprechend - angepassten Wandstärken des Sammlers. Diese sind identisch mit den Ergebnissen der Basisauswertung (Tabelle 5-1) und sind nur in der Auswertung 1 (Tabelle 5-2) der Übersichtlichkeit halber noch einmal (in grau hinterlegt) in der Zeile unter dem betrachteten Werkstoff dargestellt.

In den Spalten drei bis sechs sind jeweils die vier ausgewählten Werkstoffe aufgeführt. Die Ergebnisse für die Stähle 10CrMo9-10 und X20CrMoV11-1 sind aus den in Kapitel 5.2 genannten Gründen nicht mehr enthalten. Die Angaben zu der Anzahl der Warm- und Heißstarts, sowie der Vollaststunden beziehen sich immer auf ein Jahr.

Auswertung 1:

Einfluss der Anfahrzeit auf den Lebensdauerverbrauch des Bauteils in % (weiße Felder)					
Auslegung 200.000 Stunden	Reduktion der Anfahrzeit in ↓ Minuten	P91	P92	A617	C263
	Wanddicke in mm →	127,18	112,46	45,85	20,02
	0	457,15	75,52	18,98	30,63
	-2	498,77	83,20	19,65	30,75
	-4	545,78	91,89	20,37	30,87
	-6	599,14	101,78	21,16	31,00
	-8	660,04	113,09	22,00	31,14
	-10	729,93	126,10	22,92	31,28
	-12	810,66	141,15	23,92	31,43
	-14	904,58	158,69	25,02	31,59
	-16	1.014,69	179,28	26,22	31,76
	-18	1.144,92	203,65	27,56	31,94
	-20	1.300,44	232,77	29,04	32,13
Auslegung 150.000 Stunden	Reduktion der Anfahrzeit in ↓ Minuten	P91	P92	A617	C263
	Wanddicke in mm →	130,22	98,27	44,32	19,29
	0	543,97	27,12	19,86	35,68
	-2	593,57	30,08	20,50	35,80
	-4	649,61	33,44	21,20	35,92
	-6	713,25	37,26	21,94	36,05
	-8	785,89	41,62	22,74	36,19
	-10	869,31	46,65	23,61	36,33
	-12	965,71	52,46	24,56	36,49
	-14	1.077,90	59,22	25,59	36,65
	-16	1.209,51	67,15	26,73	36,83
	-18	1.365,24	76,52	27,98	37,05
	-20	1.551,32	87,70	29,36	37,27
Auslegung 100.000 Stunden	Reduktion der Anfahrzeit in ↓ Minuten	P91	P92	A617	C263
	Wanddicke in mm →	119,70	89,26	44,30	18,85
	0	294,03	16,08	19,87	39,12
	-2	320,72	16,95	20,52	39,26
	-4	350,84	17,91	21,21	39,40
	-6	384,98	19,11	21,95	39,55
	-8	423,91	20,79	22,75	39,71
	-10	468,54	23,43	23,62	39,88
	-12	520,03	26,47	24,57	40,06
	-14	579,85	30,02	25,60	40,25
	-16	649,89	34,18	26,73	40,46
	-18	732,61	39,08	27,98	40,67
	-20	831,24	44,93	29,37	40,91

Tabelle 5-2: Einfluss der Anfahrzeit auf den Lebensdauerverbrauch

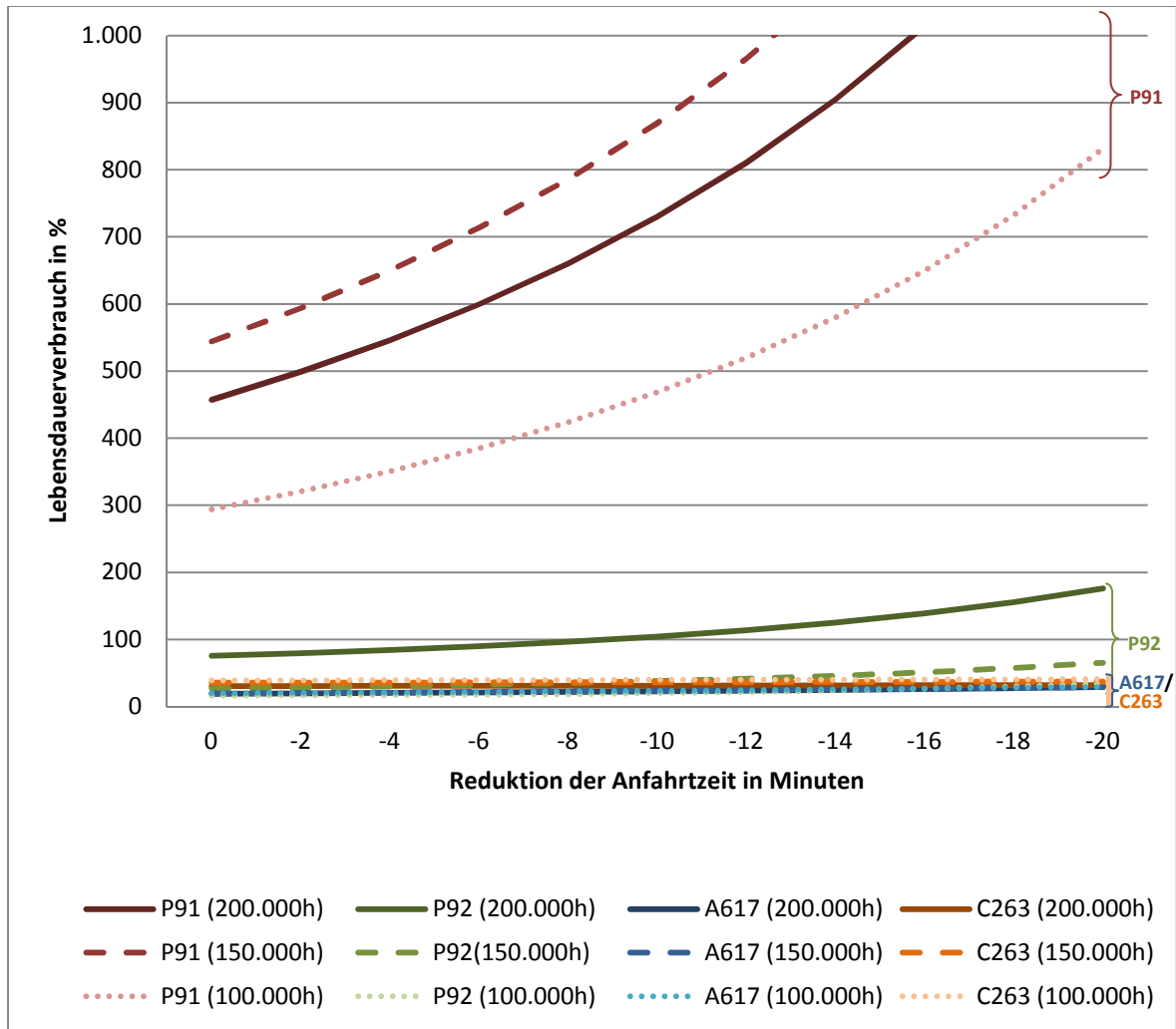


Abbildung 5-2: Einfluss der Anfahrzeit auf den Lebensdauerverbrauch

Annahmen zur Auswertung 1

Kerbfaktor Korrekturwert Alloy C263:	2
Betriebsmehrkosten für Ni-Basis pro Jahr:	10.000€
Strompreis base case mid price:	36 €/MWh
Spez. Brennstoffkosten je MWh, thermisch:	8,00€
Technische Umsetzbarkeit der Anfahrkostenreduktion:	50%
Anteil des eingerechneten Verfügbarkeitsgewinns:	50%
Kraftwerksausnutzungsgrad (variiert):	7.600 Vlh (Volllaststunden pro Jahr)
Warmstarts pro Jahr:	15
Startzeit warm (variiert):	100 bis 80 Minuten
Heißstarts pro Jahr:	10
Startzeit heiß (variiert):	60 bis 40 Minuten

Aufbau der Ergebnistabelle der Auswertung 1:

In der zweiten Spalte der Tabelle 5-2 ist die Anzahl der Minuten genannt, um welche die vorgegebene Anfahrtszeit (100 Minuten Warmstart bzw. 60 Minuten Heißstart) reduziert wird. Das bedeutet, dass in den drei Zeilen mit der Angabe „-4 Minuten“ der Lebensdauerverbrauch für den Frischdampfsammler mit einer Belastung von 15 Warmstarts mit 96 Minuten Anfahrtszeit und 10 Heißstarts mit jeweils 56 Minuten Anfahrtszeit berechnet wurden.

Die Ergebnisse aus Tabelle 5-2 werden durch die Darstellung der Kurven in Abbildung 5-2 grafisch veranschaulicht.

Beobachtungen aus den Ergebnissen der Auswertung 1:

1. Es fällt auf, dass der Alloy C263 mit abnehmender Wanddicke einen höheren Lebensdauerverbrauch hat. Das liegt darin begründet, dass mit korrekt angesetzttem Kerbfaktor der Werkstoff nicht verwendbar wäre. Die mit dem manuell angepassten Kerbfaktor korrigierte Spannungsschwingbreite liegt nur geringfügig über der ermittelten Tresca Vergleichsspannung. D.h., der Werkstoff befindet sich im Grenzbereich seiner Zulässigkeit.
2. Der heute eingesetzte Sammler aus P92, mit einer rechnerischen Wanddicke von 112 mm bei der Auslegung für 200.000 Stunden, würde selbst bei der gering gewählten Anzahl von Anfahrten für Warm- und Heißstarts bereits bei einer Reduktion der Anfahrzeit um 6 Minuten 100% seiner Lebensdauer verbrauchen. Allerdings bietet bereits die Auslegung für 100.000 Stunden mit einer rechnerischen Wandstärke von 89 mm Reserven für eine Anfahrzeitenreduktion und deutliche Verbesserungen gegenüber der Auslegungsdauer von 200.000 Stunden. Der P91 ist für diesen Anwendungszweck ebenso wenig geeignet, wie der 10CrMo9-10 und der X20CrMoV11-1, die aufgrund ihrer unrealistischen Werte nicht mit abgebildet wurden.
3. Wie bereits in der Auswertung zuvor, ergeben sich für den P91 in seiner Auslegung für 150.000 Stunden ungünstigere Werte als bei 200.000 Stunden, was auf die dickere Wandstärke durch den Sicherheitsbeiwert des Regelwerks zurückzuführen ist.

Auswertung 2:

Wirtschaftlichkeit des Austausches bei veränderter Anzahl Warm- und Heißstarts pro Jahr (in T€)							
	Warm-starts	Heiß-starts	Vlh	P91	P92	A617	C263
Auslegung 200.000 Stunden	15	10	7600	-5.821	0	1.887	3.734
	20	20	6800	-8.429	0	3.522	6.114
	30	40	6000	-13.644	0	6.791	10.872
	45	70	5200	-21.468	0	11.695	18.011
	65	110	4400	-31.899	0	18.234	27.529
	90	160	3600	-44.938	0	26.407	39.426
	65	220	2800	-46.374	0	29.493	42.858
	45	290	2000	-50.417	0	34.214	48.670
	30	370	1200	-57.069	0	40.570	56.861
	20	460	400	-66.328	0	48.560	67.432
Auslegung 150.000 Stunden	Warm-starts	Heiß-starts	Vlh	P91	P92	A617	C263
	15	10	7600	-7.095	2.202	578	1.975
	20	20	6800	-10.318	3.304	1.559	3.544
	30	40	6000	-16.766	5.508	3.523	6.683
	45	70	5200	-26.437	8.813	6.469	11.390
	65	110	4400	-39.332	13.221	10.396	17.667
	90	160	3600	-55.451	18.731	15.306	25.513
	65	220	2800	-57.334	19.568	17.944	29.084
	45	290	2000	-62.441	21.507	21.564	34.225
	30	370	1200	-70.771	24.548	26.166	40.935
20	460	400	-82.326	28.691	31.750	49.214	
Auslegung 100.000 Stunden	Warm-starts	Heiß-starts	Vlh	P91	P92	A617	C263
	15	10	7600	-3.416	3.413	-183	762
	20	20	6800	-4.776	5.119	424	1.804
	30	40	6000	-7.497	8.532	1.639	3.889
	45	70	5200	-11.579	13.652	3.462	7.017
	65	110	4400	-17.021	20.477	5.893	11.187
	90	160	3600	-23.823	29.010	8.931	16.400
	65	220	2800	-24.360	30.307	11.285	20.457
	45	290	2000	-26.258	33.310	14.247	25.556
	30	370	1200	-29.516	38.020	17.816	31.699
20	460	400	-34.135	44.436	21.994	38.883	

Tabelle 5-3: Variation der Anzahl Warm- und Heißstarts

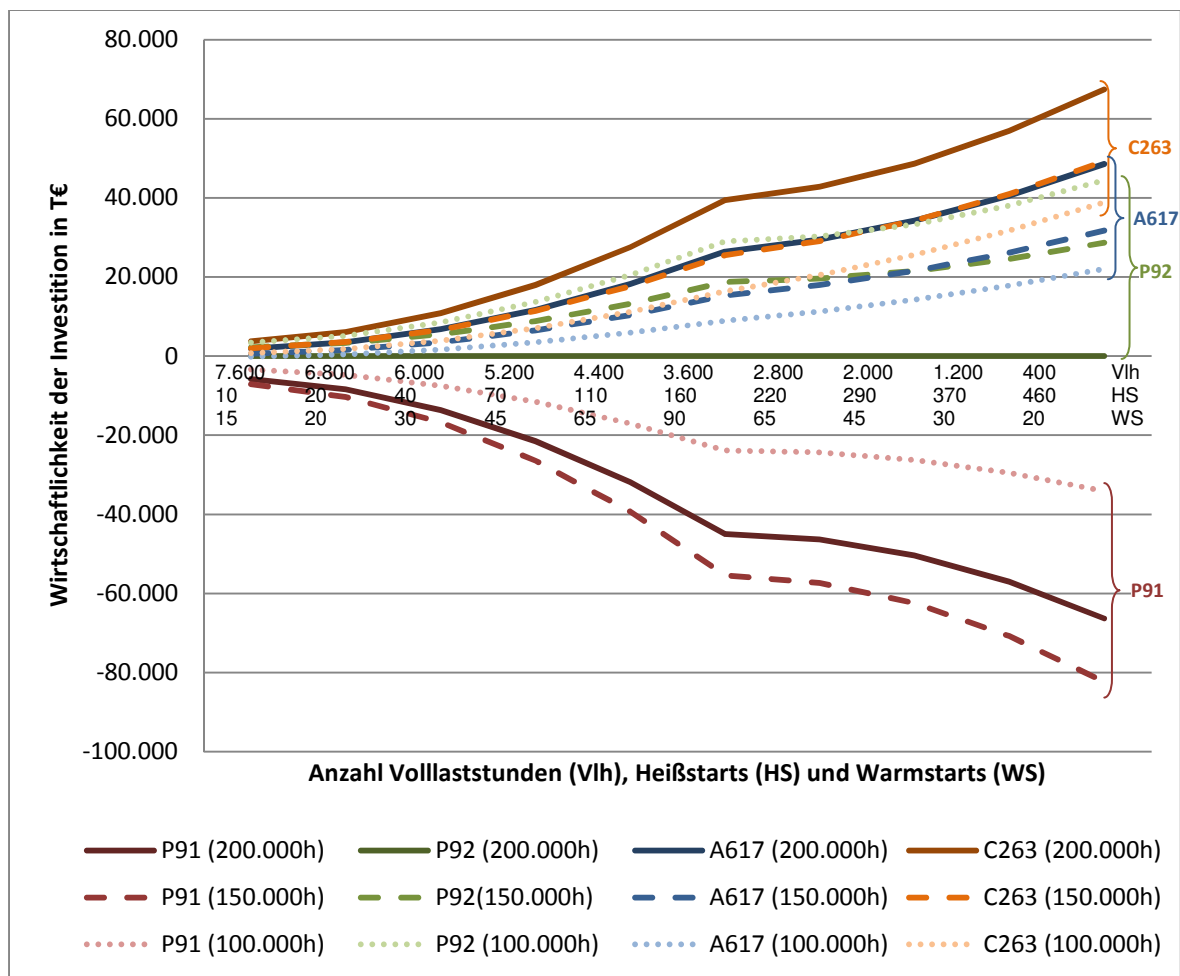


Abbildung 5-3: Einfluss veränderter Startanzahl auf die Wirtschaftlichkeit

Annahmen zur Auswertung 2:

Kerbfaktor Korrekturwert Alloy C263:	2
Betriebsmehrkosten für Ni-Basis pro Jahr:	10.000€
Strompreis base case mid price:	36 €/MWh
Spez. Brennstoffkosten je MWh, thermisch:	8,00€
Technische Umsetzbarkeit der Anfahrkostenreduktion:	50%
Anteil des eingerechneten Verfügbarkeitsgewinns:	50%
Kraftwerksausnutzungsgrad (variiert):	7.600 - 400 Vlh (Volllaststunden pro Jahr)
Warmstarts pro Jahr (variiert):	15 bis 90
Startzeit warm:	100 Minuten
Heißstarts pro Jahr (variiert):	10 bis 460
Startzeit heiß:	60 Minuten

Aufbau der Ergebnistabelle der Auswertung 2:

Für die Auswertung 2 wurden in Tabelle 5-3 drei voneinander abhängige Parameter variiert. Die Prognosen zu den zukünftigen Einsatzszenarien sagen eine zunehmende Anzahl an Starts für thermische Kraftwerke voraus. Damit ist ein Anstieg der Warm- und Heißstarts bei gleichzeitiger Reduktion der Volllaststunden verbunden, da die Kraftwerke zwangsläufig mehr Stillstandszeiten als bisher haben. Weil die Definition eines Warmstarts eine Mindeststillstandszeit von 12 Stunden voraussetzt, bedeutet der zunehmende Anstieg an Heißstarts, dass die Anzahl der Warmstarts zwangsläufig geringer wird. Diesen Tatsachen entspricht die Veränderung der Werte in den Spalten zwei (Warmstarts), drei (Heißstarts) und vier (Volllaststunden). Die Anzahl der Heißstarts wird im Rahmen dieser Sensitivitätsanalyse zunehmend größer gewählt, die Anzahl der Volllaststunden verringert. Die Anzahl der Warmstarts steigt bis zu einer Anzahl von 160 Heißstarts an und wird danach wieder verringert.

Die Ergebnisse aus Tabelle 5-3 werden durch die Darstellung der Kurven in Abbildung 5-3 grafisch veranschaulicht.

Beobachtungen aus den Ergebnissen der Auswertung 2:

1. Für den P91, X20CrMoV11-1 und 10CrMo9-10 liegt zu keinem Zeitpunkt die Möglichkeit eines wirtschaftlichen Einsatzes vor.
2. Selbst bei der Annahme, dass nur 50% der rechnerisch ermittelten Anfahrzeitverkürzung technisch umgesetzt werden kann und die erhöhte Verfügbarkeit ebenfalls nur zu 50% im realen Kraftwerksbetrieb umgesetzt wird, ist mit der Erhöhung der Anzahl an Starts sehr schnell die Wirtschaftlichkeit eines Austauschs nachweisbar.
3. Auch in diesen Ergebnissen zeigt sich, dass der Austausch gegen einen dünnwandigen P92-Sammler von Beginn an eine wirtschaftliche Alternative darstellt. Bei der Auslegung für 100.000 Stunden ist es sogar so, dass der Einsatz eines A617-Sammlers betriebswirtschaftlich unvorteilhafter ist, als der Austausch gegen einen dünnwandigen P92-Sammler.
4. Der Knick im Verlauf der Kurven in Abbildung 5-3 entsteht an der Stelle, bei der die Anzahl der Warmstarts, wie im Aufbau der Ergebnistabelle erläutert, wieder zurückgefahren wird. Hieran wird deutlich, dass der Warmstart mit seiner größeren Druck- und Temperaturdifferenz einen höheren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit besitzt, als der Heißstart mit seiner geringeren Druck- und Temperaturdifferenz.

Auswertung 3

Wirtschaftlichkeit des Austausches bei veränderten Brennstoffkosten						Auswertung 3b		
	€/MWh, thermisch	Angaben in T€						
	Brennstoff- kosten	P91	P92	A617	C263	P92	A617	C263
Auslegung 200.000 Stunden	0,00	-2.633	0	133	1.062	0	5.810	9.326
	1,00	-3.031	0	352	1.396	0	7.159	11.304
	2,00	-3.430	0	571	1.730	0	8.507	13.282
	3,00	-3.828	0	791	2.064	0	9.856	15.260
	4,00	-4.227	0	1.010	2.398	0	11.205	17.238
	5,00	-4.625	0	1.229	2.732	0	12.553	19.216
	6,00	-5.024	0	1.449	3.066	0	13.902	21.194
	7,00	-5.422	0	1.668	3.400	0	15.250	23.171
	8,00	-5.821	0	1.887	3.734	0	16.599	25.149
	9,00	-6.219	0	2.107	4.068	0	17.948	27.127
Auslegung 150.000 Stunden	Brennstoff- kosten	P91	P92	A617	C263	P92	A617	C263
	0,00	-3.165	565	-389	359	2.936	3.022	5.809
	1,00	-3.657	769	-268	561	4.084	3.821	7.095
	2,00	-4.148	974	-147	763	5.232	4.620	8.381
	3,00	-4.639	1.179	-26	965	6.379	5.419	9.667
	4,00	-5.130	1.383	94	1.167	7.527	6.218	10.953
	5,00	-5.621	1.588	215	1.369	8.675	7.017	12.239
	6,00	-6.112	1.793	336	1.571	9.823	7.816	13.525
	7,00	-6.602	1.997	457	1.773	10.971	8.615	14.811
	8,00	-7.095	2.202	578	1.975	12.119	9.415	16.098
9,00	-7.586	2.407	698	2.177	13.267	10.214	17.384	
Auslegung 100.000 Stunden	Brennstoff- kosten	P91	P92	A617	C263	P92	A617	C263
	0,00	-1.729	877	-701	-124	4.549	1.410	3.497
	1,00	-1.940	1.194	-636	-13	6.327	1.894	4.328
	2,00	-2.151	1.511	-571	97	8.105	2.378	5.159
	3,00	-2.362	1.828	-507	208	9.882	2.863	5.990
	4,00	-2.572	2.145	-442	319	11.660	3.347	6.821
	5,00	-2.783	2.462	-378	430	13.438	3.832	7.652
	6,00	-2.994	2.779	-313	540	15.215	4.316	8.483
	7,00	-3.205	3.096	-248	651	16.993	4.801	9.314
	8,00	-3.416	3.413	-183	762	18.771	5.285	10.144
9,00	-3.627	3.730	-119	872	20.549	5.770	10.975	

Tabelle 5-4: Variation der Brennstoffkosten

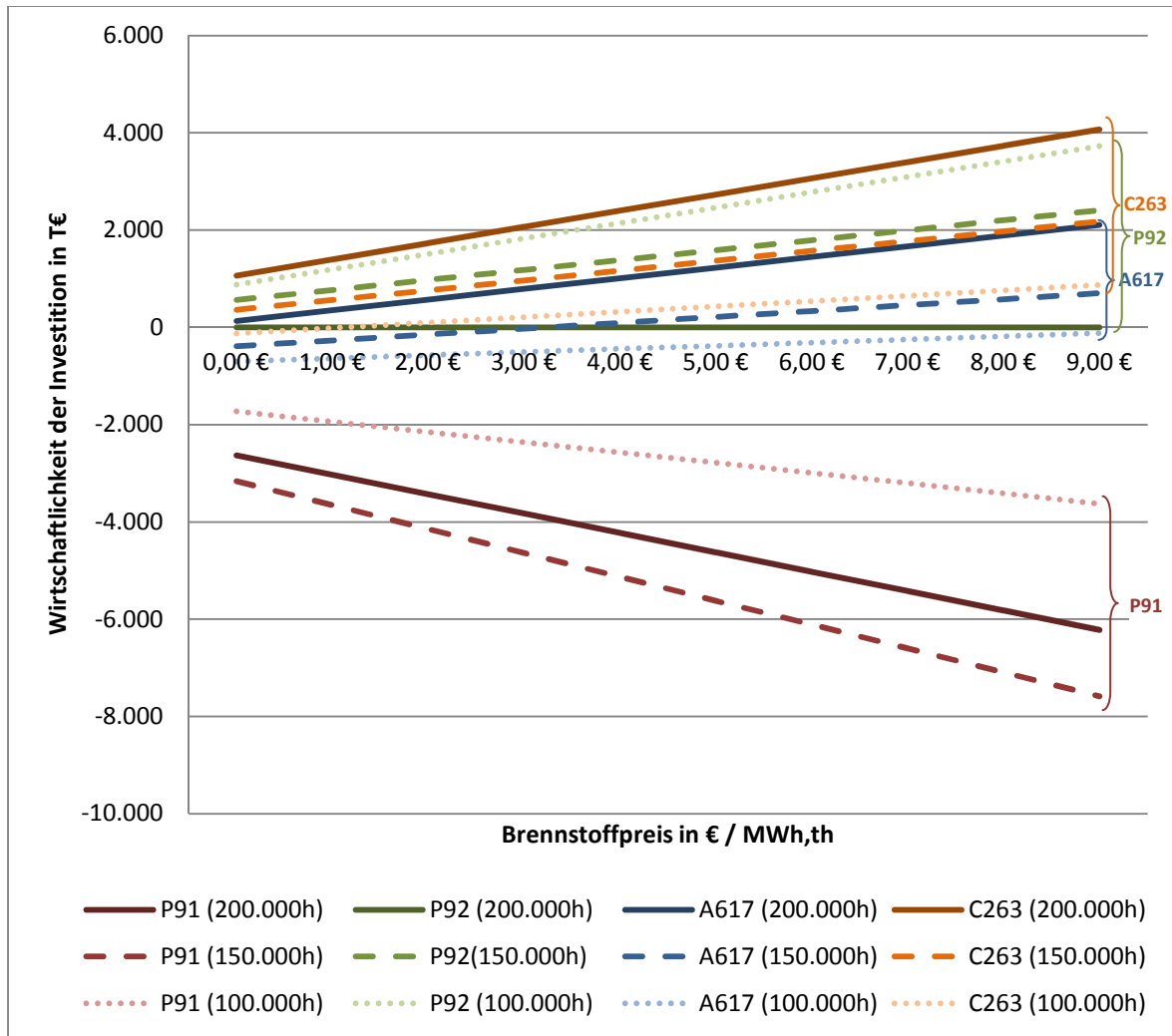


Abbildung 5-4: Einfluss der Brennstoffkosten auf die Wirtschaftlichkeit

Annahmen zur Auswertung 3:

Kerbfaktor Korrekturwert Alloy C263:	2
Betriebsmehrkosten für Ni-Basis pro Jahr:	10.000€
Strompreis base case mid price:	36 €/MWh
Spez. Brennstoffkosten je MWh,thermisch (variiert):	0 bis 9,00€
Technische Umsetzbarkeit der Anfahrkostenreduktion:	50%
Anteil des eingerechneten Verfügbarkeitsgewinns:	50%
Kraftwerksausnutzungsgrad:	7.600 Vlh (5.200 Vlh bei Auswertung 3b)
Warmstarts pro Jahr:	15 (60 Starts bei Auswertung 3b)
Startzeit warm:	100 Minuten
Heißstarts pro Jahr:	10 (100 Starts bei Auswertung 3b)
Startzeit heiß:	60 Minuten

Aufbau der Ergebnistabelle der Auswertung 3:

Bei dieser Auswertung wurden in Tabelle 5-4 die Brennstoffkosten von 0 bis 9 € variiert (2. Spalte). Grundlage ist wieder das Standardszenario mit 7.600 Volllaststunden, 15 Warm- und 10 Heißstarts pro Jahr. In den Spalten drei bis sechs ist die Wirtschaftlichkeit eines Austauschs bei den jeweiligen Brennstoffkosten und im Vergleich zum ursprünglichen Sammler aus P92 dargestellt.

In einer zweiten Rechnung (3b) wurde die Anzahl der Volllaststunden auf 5.200 reduziert, die Warmstarts auf 60 und die Heißstarts auf 100 erhöht. Diese Werte entsprechen in etwa dem Szenario, wie es in den nächsten Jahren erwartet werden kann. Für diese Berechnung wurden nur die Werte (in der Tabelle in hellblau markiert) angefügt. Auf eine Darstellung der negativen Wirtschaftlichkeit des P91 und die zusätzliche grafische Auswertung wurde in diesem Skriptum verzichtet. Der Kurvenverlauf ist qualitativ gleich, jedoch mit einem deutlich größeren Anstieg.

Die Ergebnisse aus Tabelle 5-4 werden durch die Darstellung der Kurven in Abbildung 5-4 grafisch veranschaulicht.

Beobachtungen aus den Ergebnissen der Auswertung 3:

1. Für den P91, X20CrMoV11-1 und 10CrMo9-10 liegt zu keinem Zeitpunkt die Möglichkeit eines wirtschaftlichen Einsatzes vor.
2. Selbst wenn die Brennstoffkosten unberücksichtigt blieben, also gleich Null gesetzt würden, wird durch die Erhöhung der Verfügbarkeit bei einer Wanddickenreduktion ein betriebswirtschaftlicher Mehrwert erzielt. Dieser ist sowohl bei den Nickelbasislegierungen in der Auslegung für 200.000 Stunden als auch beim P92 in einer Auslegung für 150.000 oder 100.000 Stunden erkennbar.
3. Bei einer Auslegung für 100.000 Stunden ist der P92 gegenüber dem Alloy 617 betriebswirtschaftlich im Vorteil. Das gilt umso mehr, je geringer die Brennstoffkosten angelegt werden. Der Grund dafür liegt in der Annahme der zuvor erläuterten jährlichen Mehrkosten für den Betrieb der Nickelbasislegierungen. Der geringe Mehrwert der gestiegenen Verfügbarkeit kann diese Mehrkosten über den Betriebszeitraum nicht kompensieren.
4. Die Erhöhung der Anzahl Starts bringt einen entsprechenden Mehrwert in der Verfügbarkeit der Anlage mit sich. Daraus resultiert unmittelbar die Wirtschaftlichkeit der Investition, sowohl für den P92, als auch für die Nickelbasislegierungen.

Auswertung 4

Wirtschaftlichkeit des Austausches bei verändertem Strompreis (in T€)					
	Strompreis (€/MWh)	P91	P92	A617	C263
Auslegung 200.000 Stunden	0,00 €	-2.211	0	-99	709
	5,00 €	-2.713	0	177	1.129
	10,00 €	-3.214	0	453	1.549
	15,00 €	-3.715	0	729	1.970
	20,00 €	-4.217	0	1.005	2.390
	25,00 €	-4.718	0	1.280	2.810
	30,00 €	-5.219	0	1.556	3.230
	35,00 €	-5.721	0	1.832	3.650
	40,00 €	-6.222	0	2.108	4.070
	45,00 €	-6.723	0	2.384	4.490
Auslegung 150.000 Stunden	0,00 €	-2.647	1.275	-516	146
	5,00 €	-3.264	1.404	-364	400
	10,00 €	-3.882	1.533	-212	654
	15,00 €	-4.500	1.661	-60	908
	20,00 €	-5.118	1.790	91	1.162
	25,00 €	-5.735	1.919	243	1.416
	30,00 €	-6.353	2.048	395	1.670
	35,00 €	-6.971	2.176	547	1.924
	40,00 €	-7.589	2.305	699	2.178
	45,00 €	-8.207	2.434	851	2.432
Auslegung 100.000 Stunden	0,00 €	-1.506	1.978	-769	-241
	5,00 €	-1.771	2.177	-688	-102
	10,00 €	-2.037	2.376	-606	38
	15,00 €	-2.302	2.576	-525	177
	20,00 €	-2.567	2.775	-444	316
	25,00 €	-2.832	2.974	-362	455
	30,00 €	-3.098	3.174	-281	595
	35,00 €	-3.363	3.373	-200	734
	40,00 €	-3.628	3.572	-118	873
	45,00 €	-3.893	3.772	-37	1.012

Tabelle 5-5: Variation des Strompreises

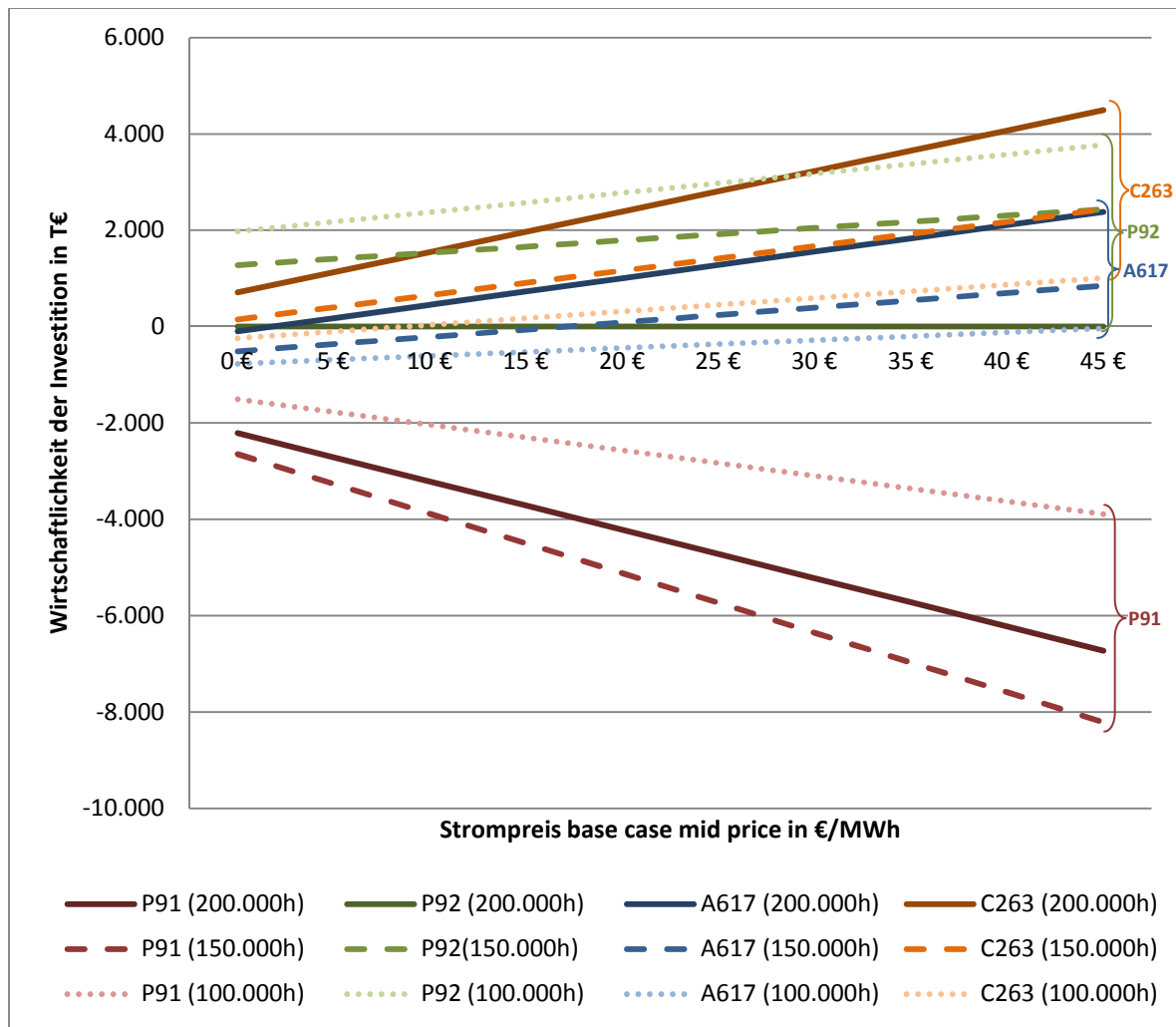


Abbildung 5-5: Einfluss des Strompreises auf die Wirtschaftlichkeit

Annahmen zur Auswertung 4:

Kerbfaktor Korrekturwert Alloy C263:	2
Betriebsmehrkosten für Ni-Basis pro Jahr:	10.000€
Strompreis base case mid price (variiert):	0 bis 45 €/MWh
Spez. Brennstoffkosten je MWh, thermisch:	8,00€
Technische Umsetzbarkeit der Anfahrkostenreduktion:	50%
Anteil des eingerechneten Verfügbarkeitsgewinns:	50%
Kraftwerksausnutzungsgrad:	7.600 Vlh
Warmstarts pro Jahr:	15
Startzeit warm:	100 Minuten
Heißstarts pro Jahr:	10
Startzeit heiß:	60 Minuten

Aufbau der Ergebnistabelle der Auswertung 4:

Bei dieser Auswertung wurde in Tabelle 5-5 der Strompreis von 0 bis 45 €/MWh (siehe Spalte 2) variiert. Der im Markt zu erzielende Strompreis ist neben der Einsparung an Brennstoffkosten der wesentliche Wirtschaftlichkeitsfaktor für die Rechtfertigung der Investition in einen neuen Sammler. Gleichzeitig gehört der Strompreis zu den am schwierigsten vorhersehbaren Größen. Daher ist seine Varianz von besonderer Bedeutung und muss vor dem Hintergrund eines konkreten Austauschs mit allen gegebenen Kraftwerks- und Sammlerparametern als Sensitivitätsbetrachtung unbedingt durchgeführt werden. In den Spalten drei bis sechs ist die Wirtschaftlichkeit der Investition im Vergleich zum Referenzwerkstoff dargestellt.

Die Ergebnisse aus Tabelle 5-5 werden durch die Darstellung der Kurven in Abbildung 5-5 grafisch veranschaulicht.

Beobachtungen aus den Ergebnissen der Auswertung 4:

1. Auch hier liegt für die Stähle P91, X20CrMoV11-1 und 10CrMo9-10 zu keinem Zeitpunkt die Möglichkeit eines betriebswirtschaftlich sinnvollen Einsatzes vor.
2. Wie bereits bei der Auswertung der Variation der Brennstoffkosten, gilt auch in diesem Fall, dass der Wegfall des Ertrags durch den Stromverkauf (Wert gleich Null) nicht zu einer fehlenden Wirtschaftlichkeit führt. In diesem Fall ist es die Einsparungen bei den Brennstoffkosten, die bei Verwendung eines dünnwandigeren Sammlers und dem damit verbundenen Gradientenanstieg sehr schnell die wirtschaftliche Rechtfertigung eines Austauschs liefert.
3. Besonders prägnant ist der schnelle Anstieg zu hohen Wirtschaftlichkeitswerten beim Alloy C263. Wie schon bei den vorangegangenen Analysen, ist es der sehr hohe rechnerische Gradient, der bei diesem Werkstoff zu den hohen Erträgen führt. Dabei muss erneut die Frage nach der Verwendbarkeit des Alloy C263 mit Blick auf die Kerbschlagfestigkeit gestellt werden. Zudem ist für den jeweils betrachteten Kraftwerksblock zu prüfen, inwieweit sich die rechnerische Erhöhung des Gradienten in der Praxis umsetzen lässt.

Auswertung 5

Einfluss der Anfahrzeit auf die Kosten für Brennstoff und Verschleiß (in T€)					
Auslegung 200.000 Stunden	Reduktion der Anfahrzeit in Minuten	P91	P92	A617	C263
	0	52.877	8.381	2.157	1.902
	-2	57.414	8.168	1.057	711
	-4	62.813	8.106	-32	-481
	-6	69.245	8.225	-1.111	-1.671
	-8	76.924	8.561	-2.177	-2.861
	-10	86.120	9.162	-3.228	-4.051
	-12	97.179	10.087	-4.262	-5.240
	-14	110.542	11.413	-5.277	-6.428
	-16	126.789	13.240	-6.267	-7.615
-18	146.681	15.699	-7.229	-8.802	
Auslegung 150.000 Stunden	Reduktion der Anfahrzeit in Minuten	P91	P92	A617	C263
	0	62.968	3.190	2.261	2.205
	-2	68.608	2.381	1.157	1.013
	-4	75.279	1.632	62	-178
	-6	83.186	954	-1.022	-1.369
	-8	92.585	361	-2.095	-2.559
	-10	103.801	-129	-3.155	-3.748
	-12	117.247	-493	-4.199	-4.937
	-14	133.456	-701	-5.224	-6.125
	-16	153.122	-717	-6.228	-7.310
-18	177.161	-489	-7.206	-8.490	
Auslegung 100.000 Stunden	Reduktion der Anfahrzeit in Minuten	P91	P92	A617	C263
	0	33.934	1.686	2.262	2.425
	-2	36.407	684	1.158	1.237
	-4	39.428	-287	64	49
	-6	43.105	-1.213	-1.021	-1.137
	-8	47.572	-2.087	-2.094	-2.324
	-10	52.999	-2.906	-3.154	-3.509
	-12	59.603	-3.658	-4.198	-4.693
	-14	67.663	-4.328	-5.223	-5.875
	-16	77.541	-4.896	-6.227	-7.057
-18	89.712	-5.337	-7.205	-8.237	

Tabelle 5-6: Reduktion der Anfahrzeit und Auswirkung auf die Betriebskosten

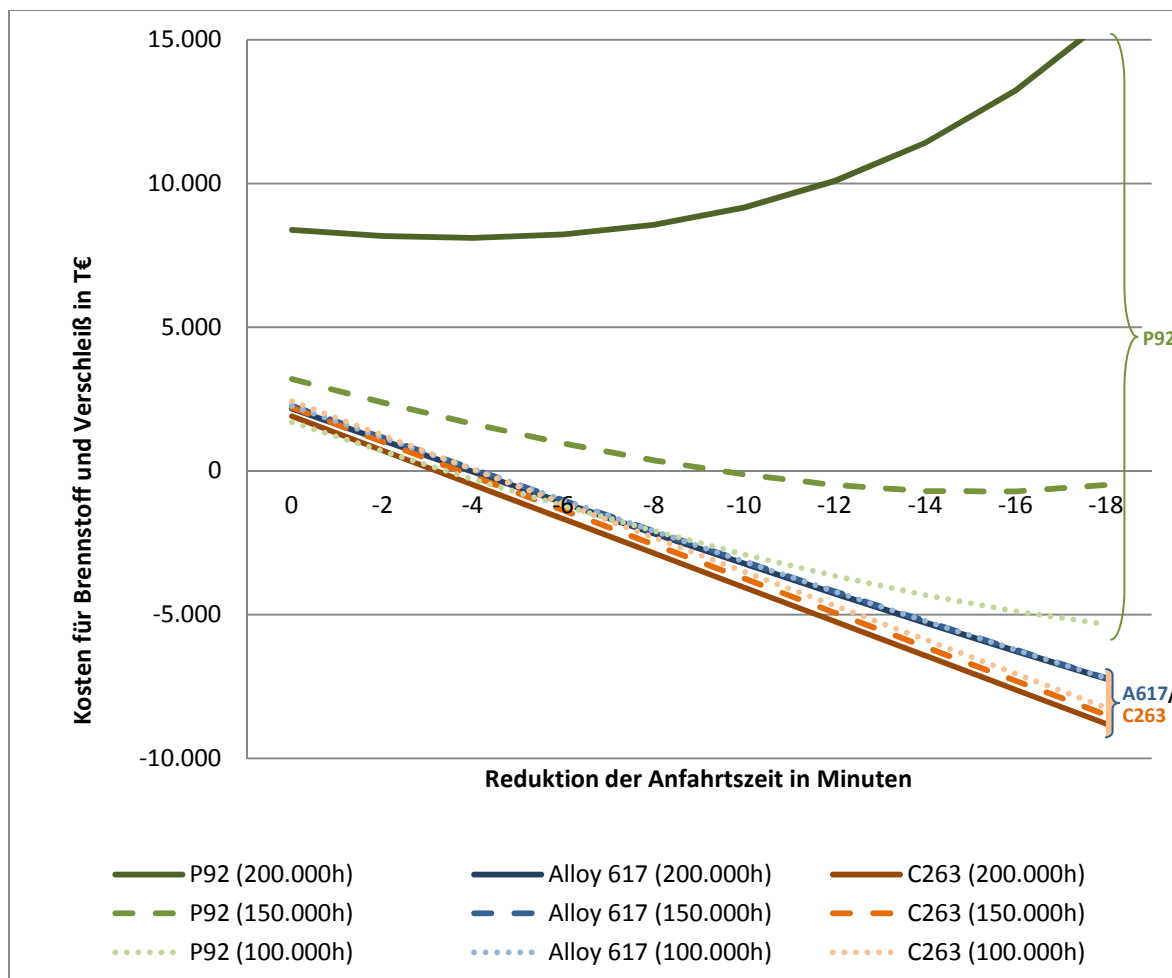


Abbildung 5-6: Einfluss der Anfahrzeit auf die Kosten für Brennstoff und Verschleiß

Annahmen zur Auswertung 5:

Kerbfaktor Korrekturwert Alloy C263:	2
Betriebsmehrkosten für Ni-Basis pro Jahr:	10.000€
Strompreis base case mid price:	36 €/MWh
Spez. Brennstoffkosten je MWh, thermisch:	8,00€
Technische Umsetzbarkeit der Anfahrkostenreduktion:	50%
Anteil des eingerechneten Verfügbarkeitsgewinns:	50%
Kraftwerksausnutzungsgrad:	7.600 Vlh
Warmstarts pro Jahr:	40
Startzeit warm (variiert):	100 bis 82 Minuten
Heißstarts pro Jahr:	100
Startzeit heiß (variiert):	60 bis 42 Minuten

Aufbau der Ergebnistabelle der Auswertung 5:

Bei dieser Auswertung wird in Tabelle 5-6 beschrieben, wie sich die Reduktion der Anfahrtszeiten (Spalte 2) auf die Betriebskosten des Kraftwerksblockes mit der Investition in einen neuen Sammler im Kraftwerksbetrieb auswirkt. Dazu wurde zum Einen der Gewinn durch die verkürzte Startzeit und die damit einhergehende Reduktion des Brennstoffs berücksichtigt und zum anderen die Kosten für den frühzeitigen Tausch des Sammlers gegeneinander gerechnet. In den Spalten drei bis sechs werden in diesem Fall die Kosten für den Einbau und Betrieb des jeweiligen Sammlers dargestellt. Die Werte des P91 (Spalte 3) sind grau hinterlegt, da diese nicht in der Grafik (Abbildung 5-6) dargestellt werden. Die Größe der Werte hätte bei dem zu wählenden Maßstab zu einer zu hohen Verzerrung der übrigen Werte geführt. Die zu tätigen Ersatzinvestitionen für einen neuen Sammler wurden über den Gesamtzeitraum mit dem vorgegebenen Kapitalisierungszinsfuß abgezinst.

Die Ergebnisse aus Tabelle 5-6 werden durch die Darstellung der Kurven in Abbildung 5-6 grafisch veranschaulicht.

Beobachtungen aus den Ergebnissen der Auswertung 5 (siehe Abbildung 5-6):

Bei dieser Auswertung sollte aufgezeigt werden, wie sich die Reduktion der Anfahrzeiten auf die Gesamtbetriebskosten des Sammlers im Kraftwerksbetrieb auswirkt. Dazu wurde auf der einen Seite der Gewinn durch die verkürzte Startzeit und die damit einhergehende Reduktion des Brennstoffs berücksichtigt und auf der anderen Seite die Kosten für den frühzeitigen Tausch des Sammlers gegeneinander gerechnet. Die Ersatzinvestitionen wurden dabei über den Gesamtzeitraum mit dem vorgegebenen Kapitalisierungszinsfuß abgezinst.

1. Auch hier ist für den P91, X20CrMoV11-1 und 10CrMo9-10 zu keinem Zeitpunkt die Möglichkeit eines wirtschaftlichen Einsatzes gegeben. Die Kosten für den Sammler aus P91 laufen bei dieser Auswertung so hoch, dass die Werte nicht in die Grafik übernommen wurden. Der Maßstab hätte sonst so groß gewählt werden müssen, dass der Effekt bei den anderen Werkstoffen nicht mehr erkennbar gewesen wäre.

2. Die Anzahl der Warm- und Heißstarts wurde gegenüber dem Basisszenario soweit erhöht, dass der gegenläufige Effekt von Brennstoffkosteneinsparung und Ersatzinvestitionskosten beim P92 gut erkennbar ist. Bei einer geringen Anfahrtszeitreduktion wirken sich die Brennstoffkosteneinsparungen vorteilhaft auf die Kosten aus, d.h. sie werden geringer. Mit einer weitergehenden Reduktion steigen aber die Aufwendungen für die Ersatzinvestitionen so weit an, dass dieser Vorteil bei einer Anfahrtszeitreduktion von 18 Minuten weit überkompensiert wird.

3. Bei nicht reduzierter Anfahrzeit entsprechen die Kosten in etwa den Kosten für den Gesamtsammlertausch unter Berücksichtigung des Lebensdauerverbrauchs. Bei der Berechnung wird unabhängig vom Lebensdauerverbrauch immer mindestens eine Investition zugrunde gelegt.

6 Zusammenfassung und Empfehlungen

Das Ziel der Arbeit lag in der Untersuchung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von hochlegierten Werkstoffen im Kraftwerksbau, wobei der Schwerpunkt in der Erstellung eines Berechnungsmodells lag, mit dem unter Flexibilitätsaspekten die Wirtschaftlichkeit des Austauschs einer zu definierenden Kraftwerkskomponente für unterschiedliche Werkstoffe in einem bestehenden Kraftwerk ermittelt werden kann.

Ausschlaggebend für die Überlegungen war, dass die Anforderungen der Energieversorgung in Deutschland in den letzten Jahren einen radikalen Wandel erfahren haben. Der massive Anstieg der regenerativen Energieerzeugung hat zu einem stark veränderten Lastverhalten im Netz geführt. Die thermischen Kraftwerke werden zukünftig dafür benötigt, um die sogenannte Residuallast, also die Differenz zwischen der angeforderten und der durch die regenerativen Erzeuger bereitgestellten Last, innerhalb zum Teil kürzester Anforderungszeiträume zur Verfügung zu stellen. Damit verringert sich die Anzahl der Gesamtbetriebsdauer (Volllaststunden) eines Kraftwerks über das Jahr und es steigt die Anzahl der erforderlichen An- und Abfahrten.

Mit der Betrachtung des Dampfkreislaufs eines Kohlekraftwerks wurde der Überhitzeraustrittssammler (auch Frischdampfaustrittssammler) als geeignete Komponente zur Untersuchung ausgewählt. Diese Sammler sind durch Ihre hohe Druck- und Temperaturbelastung bei einer Auslegung für 200.000 Stunden dickwandig dimensioniert und aufgrund ihrer Größe nur mit relativ hohem Aufwand zu ersetzen.

Die Werkstoffauswahl erfolgte auf Basis der Vorgaben des Regelwerks und der Erfahrungen, die bereits mit diesen Werkstoffen im Kraftwerksbau gemacht werden konnten. Dabei sind die Stähle 10CrMo9-10 und X20CrMoV11-1 in den letzten Jahrzehnten in vielen Kraftwerken als Sammlerwerkstoff verbaut worden. Die beiden martensitischen Stähle P91 und P92 sind vor wenigen Jahren erstmalig für den Sammlerbau verwendet worden. So wurde im RWE Kraftwerk Neurath, welches in den Berechnungen auch exemplarisch betrachtet wird, der P92 für den Frischdampf-austrittssammler verwendet. Die beiden ausgewählten Nickelbasislegierungen, Alloy 617 und Alloy C263, wurden in unterschiedlichen Forschungsprojekten eingesetzt, allerdings ist bislang noch kein Sammler für den kommerziellen Einsatz aus einem solchen Werkstoff hergestellt worden. Da sich aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften mit diesen Legierungen aber besonders dünnwandige Komponenten herstellen lassen, wurden sie in die Untersuchungen mit einbezogen.

Alle Berechnungen zur Dimensionierung und Belastung des Sammlers erfolgten auf Basis der Vorgaben des Regelwerks. Die ersten Betrachtungen wurden noch auf Basis der EN 12952-3:2000 durchgeführt, mit der Neuauflage Anfang 2012 wurden die Berechnungen auf Grundlage des neuen Regelwerks (EN 12952-3:2011) noch einmal überarbeitet.

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass der Austausch eines Sammlers, in Abhängigkeit der vorgegebenen Parameter, betriebswirtschaftlich sinnvoll sein kann. Dabei gibt es Variablen (z. B. Auslegungsdauer, Anzahl der Anfahrten, Anfahrtszeit, Brennstoffkosten, Strompreis), welche einen signifikanten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben. Diese Größen wurden in der vorliegenden Arbeit untersucht, und die Spannen der Kosten bzw. des betriebswirtschaftlichen Mehrwerts einer möglichen Investition zeigen auf, dass die Bandbreite außerordentlich hoch ist. So zeigt z. B. die Abhängigkeit von den Brennstoffkosten für eine erhöhte Anzahl an Warm- und Heißstarts für den Austausch des Sammlers in P92 in der Auslegung für 100.000 Stunden anstelle von 200.000 Stunden einen erheblichen betriebswirtschaftlichen Mehrwert auf. Der Einsatz des Alloy 617 würde diesen Mehrwert noch weiter erhöhen.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass der Einsatz dünnwandiger Komponenten sowohl für ein beschleunigtes Anfahren des Kraftwerks als auch bei einer erhöhten Anzahl an Starts zum Teil deutliche betriebswirtschaftliche Vorteile mit sich bringt. Allerdings ist auch erkennbar, dass nicht zwingend der Einsatz von Nickelbasislegierungen erforderlich ist. Dieser rechnet sich insbesondere dann, wenn an einer Auslegung für 200.000 Stunden festgehalten werden sollte. Mit Blick auf die anstehenden Veränderungen ist aber gerade das sehr unwahrscheinlich. Wenn also die Anzahl an Starts zunimmt und die Volllaststunden reduziert werden, wird für eine veranschlagte Betriebsdauer von 20 Jahren die Auslegung auf 150.000 oder sogar auf 100.000 Stunden ausreichen.

Das Berechnungstool wurde in Microsoft Excel 2007 geschrieben und um frei programmierte Visual-Basic-Makros ergänzt. Der Aufbau des Tools ist derart, dass alle für eine Berechnung erforderlichen Parameter in entsprechenden Arbeitsblättern (Worksheets) hinterlegt werden können. Die eigentlichen Berechnungen finden in eigenen themenspezifischen Worksheets statt.

Alle Ergebnisse basieren auf der Annahme, dass die rechnerisch ermittelten höheren Anfahrgradienten zu 50% umgesetzt werden können. Bei einem konkret anstehenden Komponententausch ist im Vorfeld zu prüfen, welche Komponente nach dem Frischdampfaustrittssammler die nächste dynamikbegrenzende Komponente im Dampfkreislauf ist. Dieser Prozess muss für eine definierte Anzahl an Komponenten durchgeführt werden, um daraus die Wirtschaftlichkeit des Austauschs der einen oder mehrerer Komponenten zu rechtfertigen und einen realistischen Gradientenanstieg kalkulieren zu können.

Die wesentliche Unsicherheit ist die tatsächlich zu erwartende Anzahl an Starts im zukünftigen Kraftwerksbetrieb. Bleibt die Anzahl der Warm- und Heißstarts konstant, so lässt sich ein Austausch nur über den Verfügbarkeitsgewinn der schnelleren Anfahrt nicht darstellen. Erhöht sich die Anzahl der notwendigen Starts aufgrund der zunehmenden volatilen Einspeisung regenerativer Stromerzeuger allerdings, so macht die Auswertung 5 deutlich, dass der erhöhte Lebensdauerverbrauch der dickwandigen Komponenten einen schnellstmöglichen Austausch nicht nur betriebswirtschaftlich sinnvoll, sondern auch betriebstechnisch notwendig macht.

Das Ziel sollte nun darin liegen, für den nächsten in einem Kraftwerk konkret anstehenden Sammlertausch, mit der Hinterlegung der gültigen Kraftwerksdaten, erneut Berechnungen durchzuführen. Dabei können die vorhandenen Auswertungswege beschränkt werden, es ist aber auch möglich, noch eine Vielzahl anderer Sensitivitätsanalysen für unterschiedliche Parameter durchzuführen.

Insbesondere bei älteren Kraftwerken, in denen noch Sammler aus den Stählen 10CrMo9-10 oder X20CrMoV11-1 eingebaut sind, kann der Einbau dünnwandiger Sammler aus den martensitischen Stählen P91 oder P92 durch eine schnellere Anfahrcharakteristik und einen geringeren Verschleiß einen deutlichen betriebswirtschaftlichen Mehrwert darstellen.

Bei den zukünftigen Anforderungen des Energiemarktes ist davon auszugehen, dass viele thermische Kraftwerke durch die Regeln der Merit-Order deutlich häufiger vom Netz gehen und wieder neu angefahren werden müssen. Diese Kraftwerke werden über die Anzahl der Volllaststunden in den Grenzbereich ihrer Wirtschaftlichkeit gelangen und aufgrund des zunehmenden Lebensdauer verbrauchs vor die Frage der Wirtschaftlichkeit des Austauschs von Komponenten gestellt werden.

Die in dieser Arbeit erstellte Methodik bietet die Grundlage für zukünftige Investitionsentscheidungen bei Retrofitmaßnahmen in bestehenden Kraftwerken. Mit den jeweils gültigen Kraftwerksparametern, Werkstoffdaten und Anfahrbedingungen kann eine kraftwerksspezifische Wirtschaftlichkeitsanalyse für den Austausch einer kritischen Komponente vorgenommen werden.

7 Anhang (Arbeitsblätter der Exceltabelle und VB-Makros)

WS1: Parameterübersicht, Nennung aller in den Worksheets verwendeten Berechnungsparameter. Der grüne Balken nennt das zugehörige Worksheet, worunter alle dort verwendeten Formelzeichen und ggf. Formeln zur Berechnung aufgeführt sind.

Kraftwerksdaten	Formelzeichen	Einheit	Formel
Kraftwerk Nennleistung, netto	P,Nenn	MW	
Brennstoff	BS		
elektrischer Wirkungsgrad, netto	eta,el,netto	%	
Kraftwerk Ausnutzungsgrad	KWA	Vlh/a	
Brennstoffspez. CO2-Emission Steinkohle	CO2-E	tCO2/tSKE	
CO2-Zertifikatezukauf	CO2,Zuk	%	
spez. Brennstoffkosten je MWh,thermisch	BK,MWh	€/MWhth	
spez. Brennstoffkosten je Tonne	BK,t	€/t	
Steigerung der Brennstoffkosten p.a.	BK,Steig	%	
Brennstoffkosten je Stunde (Nennleistungsbetrieb)	BK,Std	€/h	
Brennstoffkosten je Minute	BK,Min	€/Min.	
Brennstoffverbrauch je Stunde	BV,Std	t/Std.	
Brennstoffverbrauch je MWh	BV,MWh	t/MWh	
Heizwert	HW	kJ/kg	
elektrischer Eigenbedarf	EB,el	in % der Nennleistung	
kalkulatorischer Preis für Eigenbedarf	K,EB	€/MWh	
sonstige variable Kosten pro MWh elektrische Arbeit	K,var,MWh	€/MWh	
Stillstandkosten ohne Ertragsausfall je Stunde	K,St	€/Std.	
Sammler			
Werkstoffbezeichnung des Original-Werkstoffs	WB,Original		
Berechnungsdruck (10 bar=1N/mm2)	Pc	N/mm ²	

Berechnungstemperatur	Tc	°C	
Zeitpunkt der IBN des neuen Sammlers	ZP, IBN		
Bauteilabmessungen (Referenzwerkstoff)			
Außendurchmesser (Trommel)	dos	mm	
Innendurchmesser (Trommel)	dis	mm	
mittl. Wanddicke der Trommel	ems	mm	
mittl. Durchmesser der Trommel	dms	mm	
Außendurchmesser des Abzweigs	dob	mm	
mittl. Wanddicke des Abzweigs	emb	mm	
mittl. Durchmesser des Abzweigs	dmb	mm	
Verschwächungsbeiwert	ny	1	
Baulänge	L,S	mm	
Gewicht des Grundkörpers	m,S	kg	
Nippelanzahl	Anz,N		
Nippel Außendurchmesser	dob,N	mm	
Nippel Wandstärke	emb,N	mm	
Nippel Länge	L,N	mm	
Nippel Werkstoff	WS,N		
Nippel Gewicht	m,N	kg	
Anteil des umsetzbaren Verfügbarkeitsgewinns	AnteilVG	%	
Gesamtgewicht mit Referenzwerkstoff	m,SN	kg	
Material und Herstellungskosten (Referenzwerkstoff)	MK,HK,Ref	€	
Materialkosten des Sammlers	MK,Sam	€	
Materialkosten der Nippel	MK,N	€	
Materialkosten Schweißzusatzstoffe	MK,SZ	€	
Fertigungsaufwand in Stunden	FA,Std	Std.	
Stundensatz	Std,Satz	€/Std.	

Fertigungskosten absolut	HK,abs	€	
Gesamtkosten laut Angebot	GK,Ang	€	
Wartungs- und Instandhaltungskosten p.a.(Referenzsammler)	K,WIH	€/Jahr	
Kosten für wiederkehrende Prüfung p.a.	K,WP	€/Jahr	
Lohnkosten für Aus- und Einbau	MK,Mon	€	
Materialkosten Aus- und Einbau	MK,Aus	€	
Abtransport und Entsorgung	K,AE	€	
Kosten für Inbetriebnahme	K,IBN	€	
Anfahrparameter			
Kaltstart			
Anzahl der Kaltstarts pro Jahr	KS,pa		
Starttemperatur	Tmin,KS	°C	
Endtemperatur	Tmax,KS	°C	
Anfangsdruck	Pmin,KS	N/mm ²	
Betriebsdruck	Pmax,KS	N/mm ²	
Zeit bis Turbinenbedingungen	t,start,KS	Min	
Im Leitsystem hinterlegter Temperaturgradient	TG,KS	K/Min	
Anfahrkosten	AK,KS	€/Anfahrt	
Warmstart (12 bis 48 Stunden)			
Anzahl der Warmstarts pro Jahr	WS,pa		
Starttemperatur	Tmin,WS	°C	
Endtemperatur	Tmax,WS	°C	
Anfangsdruck	Pmin,WS	N/mm ²	
Betriebsdruck	Pmax,WS	N/mm ²	
Zeit bis Turbinenbedingungen	t,start,WS	Min	
Im Leitsystem hinterlegter Temperaturgradient	TG,WS	K/Min	
Anfahrkosten	AK,WS	€/Anfahrt	
Heißstart			

Anzahl der Heißstarts pro Jahr	HS,pa		
Starttemperatur	Tmin,HS	°C	
Endtemperatur	Tmax,HS	°C	
Anfangsdruck	Pmin,HS	N/mm ²	
Betriebsdruck	Pmax,HS	N/mm ²	
Zeit bis Turbinenbedingungen	t,start,HS	Min	
Im Leitsystem hinterlegter Temperaturgradient	TG,HS	K/Min	
Anfahrtskosten	AK,HS	€/Anfahrt	
Berechnungszeitraum ab Inbetriebnahme	BZ,IBN	Jahre	
Finanzierungsdaten			
Zahlungsreihe vor Inbetriebnahme			
-3 Jahre vor IBN	IBN,-3	%	
-2 Jahre vor IBN	IBN,-2	%	
-1 Jahr vor IBN	IBN,-1	%	
im Jahr der IBN	IBN,0	%	
AfA Dauer (mittlere)	AfA,Dauer	Jahre	
AfA linear	AfA,linear	%	
Mindestrendite	Rt	%	
Pauschaler Steuersatz	Steuer, pausch	%	
Inflation ggü. Vorjahr	Pi	%	
Lohnsteigerung ggü. Vorjahr	LSt	%	
(Annahmen konstant über den Betrachtungszeitraum)			
Preissteigerungen Investitionsgüter gegenüber Vorjahr	PSt	%	
CO2-Zertifikatepreis 2012	CO2,Preis	€/tCO2	
Steigerung CO2-Preis	CO2,St	%	

Strompreis, base case, mid price	StP,mid	€/MWh	
Steigerung Strompreis	StP,St	%	
Werkstoffdaten	Formelzeichen	Einheit	Formel
Werkstoffnr.	WS,Nr		
Kurzbezeichnung DIN 17175	WS,DIN		
Kurzbezeichnung EN 10216-2	WS,EN		
Mittelwerte wesentlicher Bestandteile in Gew.-%	WS,Best	%	
Gefügestruktur	GS		
Stahlgruppe nach EN 13480-2:2002, S. 13/14	SG,DIN		
Preise			
Rohmaterial (Nickel)	Preis,RM	€/kg	
Streuung im Werkstoffrohpreis (+/- X %)	Preis,var	%	
Preis als Halbzeug	Preis,HZ	€/kg	
Fertigungsaufwand ant. am Gesamtpreis	FA,Ant	%	
Mehraufwand an Wartung und IH	MA,WIH	%	
Einsparung Wiederkehrende Prüfung	Preis,WkP	€	
Physikalische Kennwerte			
Streckgrenze (40-60 mm Wandstärke)			
0,2% Dehngrenze bei Raumt.	Rp0,2	N/mm ²	
Zugfestigkeit bei Raumt.	Rm	N/mm ²	
Bruchdehnung	A	%	
Querkontraktionszahl	ny	1	
spezifisches Gewicht	m,Spez	N/m ³	
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	betaL	1/K	
E-Modul bei 20°C	E,20	N/mm ²	
Dichte bei 20 °C	roh,20	kg/m ³	
Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C	lambda,20	W/m*K	
spez. Wärmekapazität bei 20 °C	cp, 20	J/kgK	

Temperaturspezifische Werkstoffdaten bei der Berechnungstemperatur Tc			
0,2%-Dehngrenze	Rp,Tc	N/mm ²	
1%-Zeitdehngrenze	Rp,1,0	N/mm ²	
Zugfestigkeit	Rm,C	N/mm ²	
1%-Zeitdehngrenze 100.000h	Rp1,0,Tc	N/mm ²	
Zeitstandfestigkeit 100.000h	Rm,Tc	N/mm ²	
Zeitstandfestigkeit 150.000h	Rm,Tc	N/mm ²	
Zeitstandfestigkeit 200.000h	Rm,Tc	N/mm ²	
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei Tc	betaL,Tc	1/K	
E-Modul bei Tc	E,Tc	N/mm ²	
Dichte bei Tc	roh,Tc	kg/m ³	
Wärmeleitfähigkeit bei Tc	lambda,Tc	W/(m*K)	
spezifische Wärmekap. bei Tc	cp,Tc	J/(kg*K)	
differentielle Wärmekap. bei Tc	cp,diff,Tc	J/(kg*K)	
Wanddickenberechnung			
Außendurchmesser	dos	mm	
Innendurchmesser	dis	mm	
Berechnungsdruck	Pc	N/mm ²	
Berechnungstemperatur	tc	°C	
zulässige Spannung bei tc	K		
Sicherheitsbeiwert	S	1	
Verschwächungsbeiwert	ny	1	
Zuschlag für Korrosion und Abnutzung	c1	mm	
Zuschlag Wanddickenunterschreitung	c2	%	
zulässige Spannung bei Tc, abgewertet mit Sicherheitsbeiwert	fs	N/mm ²	fs = K/S
erforderliche rechnerische Wanddicke (Außendurchmesser)	ecs	mm	ecs = (pc*dos)/((2*fs-pc)*v+2*pc)

erforderliche rechnerische Wanddicke (Innendurchmesser)	ecs	mm	$ecs = (pc \cdot dis) / ((2 \cdot fs - pc)v)$
erforderliche Wanddicke des Grundkörpers	e's	mm	$e's = ecs + c1 + c2 = ecs \cdot (1 - K)$ für $c1 = 0$
Ausgeführte Wanddicke (Mindestwand)	es	mm	gewählte Wanddicke
Ermittlung Ck1	Formelzeichen	Einheit	Formel
Bestimmung des unteren Grenzwerts für Ck1			
Logarithmus des zugehörigen unteren Grenzwertes der kleineren Tabellengröße	$\ln(UG, Rm, \text{klein})$	1	
Logarithmus des zugehörigen unteren Grenzwertes der oberen Tabellengröße	$\ln(UG, Rm, \text{groß})$	1	
Hilfsgröße Steigung	UG, Steigung	1	$(\ln(UG, Rm, \text{groß}) - \ln(UG, Rm, \text{klein})) / (Rm, \text{groß} - Rm, \text{klein})$
Hilfsgröße Schnittpunkt UG	UG, Schnitt	1	$\ln(UG, Rm, \text{klein}) - \text{Steigung} \cdot UG, \text{klein}$
Logarithmus des zu berechnenden unteren Grenzwertes	$\ln(UG, Rm^*)$	1	
Unterer Grenzwert des Korrekturfaktors	UG, Rm^*		
Bestimmung des Faktors F für Ck1			
Logarithmus des zugehörigen Faktors der kleineren Tabellengröße	$\ln(F, Rm, \text{klein})$	1	
Logarithmus des zugehörigen Faktors der oberen Tabellengröße	$\ln(F, Rm, \text{groß})$	1	
Hilfsgröße Steigung	F, Steigung	1	$(\ln(F, Rm, \text{groß}) - \ln(F, Rm, \text{klein})) / (Rm, \text{groß} - Rm, \text{klein})$
Hilfsgröße Schnittpunkt F	F, Schnitt	1	$\ln(F, Rm, \text{klein}) - \text{Steigung} \cdot F, Rm, \text{klein}$
Logarithmus des zu berechnenden Faktors	$\ln(F, Rm^*)$	1	
Faktor der werkstoffspezifischen Zugfestigkeit	F, Rm^*		
Bestimmung des Korrekturwerts K für Ck1			
Logarithmus des zugehörigen Korrekturwertes der kleineren Tabellengröße	$\ln(K, Rm, \text{klein})$	1	
Logarithmus des zugehörigen Korrekturwertes der oberen Tabellengröße	$\ln(K, Rm, \text{groß})$	1	
Hilfsgröße Steigung	K, Steigung	1	$(\ln(K, Rm, \text{groß}) - \ln(K, Rm, \text{klein})) / (Rm, \text{groß} - Rm, \text{klein})$

Hilfsgröße Schnittpunkt K	K,Schnitt	1	$\ln(K,Rm, klein) - \text{Steigung} * K, Rm, klein$
Logarithmus des zu berechnenden Korrekturwertes	$\ln(K, Rm^*)$	1	
Korrekturwert der werkstoffspezifischen Zugfestigkeit	K, Rm*		
Bestimmung des oberen Grenzwertes OG für Ck1			
Logarithmus des oberen Grenzwertes der kleineren Tabellengröße	$\ln(OG, Rm, klein)$	1	
Logarithmus des oberen Grenzwertes der oberen Tabellengröße	$\ln(OG, Rm, groß)$	1	
Hilfsgröße Steigung	OG,Steigung	1	$(\ln(OG, Rm, groß) - \ln(OG, Rm, klein)) / (Rm, groß - Rm, klein)$
Hilfsgröße Schnittpunkt OG	OG,Schnitt	1	$\ln(OG, Rm, klein) - \text{Steigung} * OG, Rm, klein$
Logarithmus des zu berechnenden oberen Grenzwertes	$\ln(OG, Rm^*)$	1	
oberer Grenzwert des Korrekturfaktors	OG, Rm*		
Gradient und Erschöpfung	Formelzeichen	Einheit	Formel
Referenztemperatur (HS und WS)	T*	°C	$T^* = 0,75t_{max} + 0,25t_{min}$
Streckgrenze (0,2%-Dehngrenze) für T*			
Hilfsgröße Temperatur kleiner	Tklein	°C	
zugehörige kleinste Spannung	Rp,Tklein	N/mm ²	
Larson-Miller für Temp. kleiner	LMP(Tklein)	°C	$T_{klein} * (C + lg tm)$
Hilfsgröße Temperatur größer	Tgroß	°C	
zugehörige kleinste Spannung	Rp,Tgroß	N/mm ²	
Larson-Miller für Temp. größer	LMP(Tgroß)	°C	$T_{groß} * (C + lg tm)$
Hilfsgröße Steigung	Rp,Steigung	1	
Hilfsgröße Schnittpunkt Rm	Rp,Schnitt	N/mm ²	
Larson-Miller für T*	LMP(T*)	°C	$T^* * (C + lg tm)$
0,2%-Dehngrenze für T*	Rp,T*	N/mm ²	
Überführung der physikalischen Werkstoffdaten für die relevanten Temperaturbereiche der Referenztemperatur			
Inverse Temperatur kleiner	1000/Tklein	1/K	
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei T*	beta, Tklein	1/K	
E-Modul bei T*	E, Tklein	N/mm ²	

Dichte bei T*	roh,Tklein	kg/m ³	
Wärmeleitfähigkeit	lambda,Tklein	W/m*K	
spezifische Wärmekap. bei T*	cp,Tklein	J/(kg*K)	
differentielle Wärmekapazität	cp,diff, Tklein	J/(kg*K)	
Inverse Temperatur größer	1000/Tgroß	1/K	
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei T*	beta, Tgroß	1/K	
E-Modul bei T*	E,Tgroß	N/mm ²	
Dichte bei T*	roh,Tgroß	kg / m ³	
Wärmeleitfähigkeit	lambda,Tgroß	W/m*K	
spezifische Wärmekap. bei T*	cp,Tgroß	J/(kg*K)	
differentielle Wärmekapazität	cp,diff, Tgroß	J/(kg*K)	
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bis T*			
Logarithmus des zugehörigen Wärmeausdehnungskoeff.	ln(beta,Tklein)	1/K	
Logarithmus des zugehörigen Wärmeausdehnungskoeff.	ln(beta,Tgroß)	1/K	
Hilfsgröße Steigung	beta,Steigung	1	$(\ln(\beta_{T_{\text{klein}}}) - \ln(\beta_{T_{\text{groß}}})) / ((1/T_{\text{klein}}) - (1/T_{\text{groß}}))$
Hilfsgröße Schnittpunkt Wärmeausdehnungskoeffizient	beta,Schnitt	1/K	$\ln(\beta_{T_{\text{klein}}}) - \text{Steigung} * 1000/T_{\text{klein}}$
Logarithmus des zu berechnenden Wärmeausdehnungskoeff.	ln(beta,T*)	1/K	
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	beta,T*	1/K	
Elastizitätsmodul für T*			
Logarithmus des zugehörigen E-Moduls	ln(E,Tklein)	N/mm ²	
Logarithmus des zugehörigen E-Moduls	ln(E,Tgroß)	N/mm ²	
Hilfsgröße Steigung	E,Steigung	1	$(\ln(\beta_{T_{\text{klein}}}) - \ln(\beta_{T_{\text{groß}}})) / ((1/T_{\text{klein}}) - (1/T_{\text{groß}}))$
Hilfsgröße Schnittpunkt Elastizitätsmodul	E,Schnitt	N/mm ²	$\ln(\beta_{T_{\text{klein}}}) - \text{Steigung} * 1000/T_{\text{klein}}$
Logarithmus des zu berechnenden E-Moduls	ln(E,T*)	N/mm ²	
E-Modul für Tc	E,T*	N/mm ²	
Dichte für T*			
Logarithmus der zugehörigen Dichte	ln(roh,Tklein)	kg/m ³	

Logarithmus der zugehörigen Dichte	$\ln(\rho_{\text{roh}}, T_{\text{groß}})$	kg/m ³	
Hilfsgröße Steigung Dichte	$\rho_{\text{roh}}, \text{Steigung}$	1	$(\ln(\beta_{\text{Tklein}}) - \ln(\beta_{\text{Tgroß}})) / ((1/T_{\text{klein}}) - (1/T_{\text{groß}}))$
Hilfsgröße Schnittpunkt Dichte	$\rho_{\text{roh}}, \text{Schnitt}$	kg/m ³	$\ln(\beta_{\text{Tklein}}) - \text{Steigung} * 1000/T_{\text{klein}}$
Logarithmus der zu berechnenden Dichte	$\ln(\rho_{\text{roh}}, T^*)$	kg/m ³	
Dichte für T*	ρ_{roh}, T^*	kg/m ³	
Berechnung der Dichte mittels β_{Tc}	$\rho_{\text{roh}}, T^*, \beta_{\text{Tc}}$	kg/m ³	$\rho_{\text{roh}}, T^*, \beta_{\text{Tc}} = \rho_{\text{roh}, 20} / (1 + \beta_{\text{Tc}}(T^* - 20^\circ\text{C})) \exp 3$
Wärmeleitfähigkeit für T*			
Logarithmus der zugehörigen Wärmeleitfähigkeit	$\ln(\lambda_{\text{Tklein}})$	W/m*K	
Logarithmus der zugehörigen Wärmeleitfähigkeit	$\ln(\lambda_{\text{Tgroß}})$	W/m*K	
Hilfsgröße Steigung	$\lambda_{\text{T}}, \text{Steigung}$	1	$(\ln(\lambda_{\text{Tklein}}) - \ln(\lambda_{\text{Tgroß}})) / ((1/T_{\text{klein}}) - (1/T_{\text{groß}}))$
Hilfsgröße Schnittpunkt λ_{T}	$\lambda_{\text{T}}, \text{Schnitt}$	W/m*K	$\ln(\lambda_{\text{Tklein}}) - \text{Steigung} * (1000/T_{\text{klein}})$
Logarithmus der zu berechnenden Wärmeleitfähigkeit	$\ln(\lambda_{\text{T}}, T^*)$	W/m*K	
Wärmeleitfähigkeit für T*	λ_{T}, T^*	W/m*K	
spezifische Wärmekapazität für T*			
Logarithmus der zugehörigen Wärmekapazität	$\ln(c_{\text{p}}, T_{\text{klein}})$	J/(kg*K)	
Logarithmus der zugehörigen Wärmekapazität	$\ln(c_{\text{p}}, T_{\text{groß}})$	J/(kg*K)	
Hilfsgröße Steigung	$c_{\text{p}}, \text{Steigung}$	1	$(\ln(c_{\text{p}}, T_{\text{klein}}) - \ln(c_{\text{p}}, T_{\text{groß}})) / ((1/T_{\text{klein}}) - (1/T_{\text{groß}}))$
Hilfsgröße Schnittpunkt R_{m}	$c_{\text{p}}, \text{Schnitt}$	J/(kg*K)	$\ln(c_{\text{p}}, T_{\text{klein}}) - \text{Steigung} * 1000/T_{\text{klein}}$
Logarithmus der zu berechnenden Wärmekapazität	$\ln(c_{\text{p}}, T^*)$	J/(kg*K)	
Wärmekapazität für T*	c_{p}, T^*	J/(kg*K)	
spezifische Wärmekap. bei T*	c_{p}, T^*	J/kgK	
mittlere Wärmekapazität von 20°C bis zur Temperatur T*	$c_{\text{p}}, 20, T^*$	J/kgK	
differentielle Wärmekapazität	$c_{\text{p}}, \text{diff}, T^*$	J/kgK	$c_{\text{p}}, \text{diff}, t = c_{\text{p}}, 20, t + (\Delta c_{\text{p}}, 20, t / \Delta t) * (t - 20^\circ\text{C})$
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient von 20°C bis zur Temperatur T*	$\beta_{\text{T}}, 20, t$	1/K	
Dichte bei T*	ρ_{roh}, T^*	kg/m ³	$\rho_{\text{roh}}, T^* = \rho_{\text{roh}, 20} / (1 + \beta_{\text{T}}, 20, T^*(T^* - 20^\circ\text{C})) \exp 3$
temperaturabh. Wärmeleitfähigkeit bei T*	λ_{T}, T^*	W/mK	
Temperaturleitfähigkeit (Wärmeleitzahl) bei T*	Dth errechnet	mm ² /s	$D_{\text{th}} = \lambda_{\text{T}}, T^* / ((\rho_{\text{roh}}, T^*) * (c_{\text{p}}, \text{diff}, T^*))$

Faktoren:			
emb/ems		1	emb/ems
Zeta	zeta	1	$zeta = dmb/dms * \text{SQRT}(dms/2/ems)$
Berechnungskonstante A	A	1	$A = -1,14*(emb/ems)^2 - 0,89*(emb/ems) + 1,43$
Berechnungskonstante B	B	1	$B = 0,326*(emb/ems)^2 - 0,59*(emb/ems) + 1,08$
Spannungskonzentrationsfaktor für Zylinderschalen aus der Bauteilgeometrie folgend	alpha m	1	$alpha\ m = 2,2 + \text{EXP } A * \text{Zeta Potenz } B$
Wärmeübergangskoeffizient für Wasser / Dampf	h	W/m²K	
Berechnungskonstante	z	1	dmb/dms
Spannungskonzentrationsfaktor infolge von thermischer Erwärmung	alpha t	1	$alpha\ t = ([2 - ((h+2700) / (h+1700))^z + (h / (h+1700)) (exp(-7z)-1)]^2 + 0,81(z^2))^{\text{SQRT}2}$
u0	u0	1	$dos/(dms-ems)$
Hilfsgröße für gamma	$(u0 - 1)^{\text{hoch}2}$		$(u0 - 1)^2$
	$(u0)^{\text{hoch}2} - 1$		$(u0)^2 - 1$
	$3(u0)^{\text{hoch}2} - 1$		$3(u0)^2 - 1$
	$4(u0)^{\text{hoch}4} * \ln u0$		$4(u0)^4 * \ln u0$
Formfaktor für Zylinderschalen	gamma	1	$gamma = ((u0^{\text{exp}2} - 1) * (3u0^{\text{exp}2} - 1) - 4(u0^{\text{exp}4}) * \ln(u0)) / 8 * (u0^{\text{exp}2} - 1) * (u0-1)^{\text{exp}2}$
Berechnung der Hilfsvariablen W zur Bestimmung der Wärmespannungen, die durch die Temperaturdifferenz hervorgerufen werden	W	N/mm²/K	$W = alpha\ t * beta\ L1 * Et / (1 - ny)$
Konstante V zur Berechnung des zulässigen Temperaturgefälle ny(t) in den Zeilen 212, 214, 216, 218 und 226	V	1/s	$V = Dth / (gamma * ems\ \text{exp}2)$
Berechnung des zulässigen Temperaturgefälles			
Anzahl der Lastwechsel über den Lebenszeitraum	N	1	
Resultierende Maximalzahl an Lastwechseln	Na	1	$Na = N/0,4$
Spannungsschwingbreite	2fas	N/mm²	$2fas = 0,8\ Rm + (173150 - 0,8\ Rm)Na^{-0,547}$
Spannungssicherheitsbeiwert (zur Berechnung der Spannungsschwingbreite in Zeile 86 und Zeile 166)	Ss	1	

Lasstspielsicherheitsbeiwert	SL	1	
	NaL	1	NAL = Na * SL
Spannungsschwingbreite	2faL	N/mm ²	2faL = 0,8 Rm + (173150 - 0,8 Rm)NaL ^{-0,547}
<i>Die zulässige Schwingungsbreite ist gleich dem Minimum der Spannungen 2faS / Ss und 2faL</i>			
zulässige Spannungsschwingbreite:	f*at*	N/mm ²	f*at* <=min(2fas/Ss und sfaL)
Korrekturbeiwert	CtF (Ferrit)	1	Ct* = 1,03 - (1,5x10exp-4)T* - (1,5x10exp-6)T*exp2
	CtA (Austenit)	1	Ct*A = 1,043 - (4,3x10exp-4)T*
Maßgebende Spannungsschwingbreite	2f*a	N/mm ²	2f*a = 2f*at* x Ct*
Bestimmung der (virtuellen) maßgebenden Spannungsschwingbreite im elastischen, teilplastischen und vollplastischen Bereich (ohne Mittelspannung)			
Prüfung elastischer Bereich: Wenn die maßgebende Spannungsschwingbreite kleiner als die Streckgrenze ist, dann	2f*va	N/mm ²	WENN 2f*a < Re(T*) DANN 2f*va = 2f*a
Prüfung teilplastischer Bereich: Wenn die maßgebende Spannungsschwingbreite größer als die Streckgrenze und kleiner als die doppelte Streckgrenze ist, dann	2f*va	N/mm ²	WENN Re(T*) <= 2f*a <= 2Re(T*) DANN 2f*va = 2Rm(X-Y+SQRT(1-2YX+Y^2))
mit den Hilfsvariablen X und Y:	Y		Y = Rm / 2f*a
	X		X = Re(T*) / Rm
Prüfung vollplastischer Bereich: Wenn die maßgebende Spannungsschwingbreite größer als die doppelte Streckgrenze ist, dann	2f*va	N/mm ²	WENN 2f*a > 2Re(T*) DANN 2f*va = SQRT (2Re(T*) x 2f*a
Korrigierte Spannungsschwingbreite	2f*va	N/mm ²	Der aus den Bedingungen ermittelte Wert
Kerbfaktoren, falls zutreffend:			
	Ck1	1	Berechnung über das WS Ermittlung Ck1
	Ck2	1	
	Ck3	1	
	Ck	1	Ck = Ck0 x Ck1 x Ck2 x Ck3
Mit Kerbfaktoren korrigierte Spannungsschwingbreite	delta fv	N/mm ²	delta fv = 2f*va / Ck
Spannungsanalyse für die Ermüdungsberechnung (Tresca Vergleichsspg. zzgl. des wirksamen Innendruckes)			
Umfangsspannung bei Betriebsdruck	Sp,0	N/mm ²	Sp,0 = (alpham x dms/2/ems+1) x p0
Minimal zulässige Umfangsspannung	Sp,min	N/mm ²	Sp,min = (alpham x dms/2/ems+1) x pmin
Maximal zulässige Umfangsspannung	Sp,max	N/mm ²	Sp,max = (alpham x dms/2/ems+1) x pmax

Spannungsschwingbreite	delta Sp	N/mm ²	delta Sp = Sp,max - Sp,min
Beiwert gs (0<=gs<=1)	gs	1	
unterer Grenzwert der Umfangsspannung	S1	N/mm ²	S1 = Sp,min + (delta Sp - delta fv) x (1 - gs)
oberer Grenzwert der Umfangsspannung	S2	N/mm ²	S2 = S1 + delta fv
kleinste zulässige Umfangsspannung an der Innenfläche einer Bohrung:	f1	N/mm ²	f1 = S1
maximal zulässige Umfangsspannung an der Innenfläche einer Bohrung:	f2	N/mm ²	f2 = S2
Berechnung der Mittelspannung	fv	N/mm ²	fv = (f1+f2)/2
Erneute Überprüfung des elastischen Bereichs			
Um Kerbfaktoren korrigierte Mittelspannung	f*v		f*v = fv x Ck
Bestimmung der maßgebenden Spannungsschwingbreite im elastischen, teilplastischen und vollplastischen Bereich			
Prüfung elastischer Bereich: Wenn die maßgebende Spannungsschwingbreite kleiner als die Streckgrenze ist	2f*a	N/mm ²	WENN fv* + f*va < Re(t*) DANN 2f*a = 2f*va / (1-(fv*/RM)^2)
Prüfung teilplastischer Bereich f*v: Wenn die maßgebende Spannungsschwingbreite größer als die Streckgrenze und kleiner als die doppelte Streckgrenze ist	2f*a	N/mm ²	WENN fv* + f*va > Re(t*) UND f*va <= Re(t*) DANN 2f*a = 2f*va / ((1-f*vR/RM)^2)
verminderte Mittelspannung	f*vR	N/mm ²	Re(t*) - 2f*va/2
Prüfung vollplastischer Bereich: WENN die korrigierte Spannungsschwingbreite größer als die Streckgrenze ist	2f*a	N/mm ²	WENN 2f*va > 2Re(t*) DANN 2f*a = (2f*va)^2 / (2Re(t*))
Ergebnis der erneuten Bereichsüberprüfung:	2f*a	N/mm ²	
Werte der ersten Ermittlung des 2f*a aus Zeile 214			
Betriebsbedingungen:			
Temperatur zu Beginn des Anfahrens	dt1	K	dt1 = (f1 - Sp,min) / W
Gradient zu Beginn des Anfahrens	ny t1	K/s	ny t1 = dt1 x V
Temperatur zum Ende des Anfahrens	dt1'	K	dt1' = (f1 - Sp,max) / W
Gradient zum Ende des Anfahrens	ny t1'	K/s	ny t1' = dt1' x V
Temperatur zu Beginn des Abfahrens	dt2	K	dt2 = (f2 - Sp,max) / W
Gradient zu Beginn des Abfahrens	ny t2	K/s	ny t2 = dt2 x V
Temperatur zum Ende des Abfahrens	dt2'	K	dt2' = (f2 - Sp,min) / W

Gradient zum Ende des Abfahrens	ny t2'	K/s	ny t2' = dt2' x V
Berechnung der zulässigen Lastspielzahl			
Tatsächlicher IST-Gradient:	vT1ist	K/s	
Tatsächliche Temperaturdifferenz zu Beginn des Anfahrens	dt1ist	K	
Ermittelter maximaler Temperaturgradient für die maximale Erschöpfung bis 0,4	dt1max	K	
Maximale Temperaturdifferenz zu Beginn des Anfahrens	vT1max	K/s	vt1 = dt1 x V
kleinste zulässige Umfangsspgnung an der Innenfläche einer Bohrung:	f1	N/mm ²	f1 = Sp,min + St,min
maximal zulässige Umfangsspgnung an der Innenfläche einer Bohrung:	f2	N/mm ²	f2 = Sp,max
Mittelspannung	fv	N/mm ²	fv = (f1 + f2) / 2
Schwingungsbreite der Referenzspannung	delta fv	N/mm ²	delta fv = f2 - f1
Um Kerbfaktoren korrigierte Mittelspannung	f*v	N/mm ²	f*v = fv x Ck
korrigierte Spannungsschwingbreite	2f*va	N/mm ²	2f*va = delta fv x Ck
Bestimmung der maßgebenden Spannungsschwingbreite im elastischen, teilplastischen und vollplastischen Bereich			
Prüfung elastischer Bereich: Wenn die maßgebende Spannungsschwingbreite kleiner als die Streckgrenze ist	2f*a	N/mm ²	WENN fv* + f*va < Re(t*) DANN 2f*a = 2f*va / (1-(fv*/RM)^2)
Prüfung teilplastischer Bereich f*v: Wenn die maßgebende Spannungsschwingbreite größer als die Streckgrenze und kleiner als die doppelte Streckgrenze ist	2f*a	N/mm ²	WENN fv* + f*va > Re(t*) UND f*va <= Re(t*) DANN 2f*a = 2f*va / ((1-f*vR/RM)^2)
verminderte Mittelspannung	f*vR		Re(t*) - 2f*va/2
Prüfung vollplastischer Bereich: WENN die korrigierte Spannungsschwingbreite größer als die Streckgrenze ist	2f*a	N/mm ²	WENN 2f*va > 2Re(t*) DANN 2f*a = (2f*va)^2 / (2Re(t*))
Ergebnis der Bereichsüberprüfung:	2f*a	N/mm ²	
maßgebende Spannungsschwingbreite bei der Referenztemperatur	2f*a(t*)	N/mm ²	2f*a(t*) = 2f*a/Ct*
Spannungsschwingbreite für die theoretische Lastwechselzahl	2fas	N/mm ²	2fas = 2f*a(t*) x Ss
theoretische Lastwechselzahl unter Berücksichtigung des Spannungssicherheitsbeiwerts	Nas	1	Nas = ((2fas - 0,8Rm) / (173150 - 0,8Rm))^(1/-0,547)
Spannungsschwingbreite	2faL	N/mm ²	2faL = 2f*a(t*)
theoretische Lastwechselzahl unter Berücksichtigung des	NAL	1	NAL = ((2faL - 0,8Rm) / (173150 - 0,8Rm))^(1/-0,547)

Lastspielsicherheitsbeiwerts			
Anzahl der Lastspiele bis zur beginnenden Rissbildung		1	$N = \text{MIN}(NAs, NAL/SL)$
Erschöpfung/Lebensdauerverbrauch	LV	%	$\text{Erschöpfung} = n/N$
Berechnungsparameter	Formelzeichen	Einheit	Formel
Kosten Sammler Ein- und Ausbau (einmalig)			
Lohnkosten für Aus- und Einbau	LK,AE	€	
Materialkosten Arbeitsmaterial	MK,AE	€	
Abtransport und Entsorgung	AuE	€	
Kosten für den Aus- und Einbau	K,AE	€	$(LK,AE+MK,AE+TK,Ein)$ oder Wert
Kosten für Veränderungen an den angeschlossenen Rohrleitungen	K,Rohre	€	
Kosten für die Inbetriebnahme	K,IBN	€	
Summe Ein- und Ausbau und IBN	K,Summe	€	
Referenzkosten Ein- und Ausbau	K,Ref	€	
Differenzkosten Ein- und Ausbau(einmalig)	K,Diff,AE	T€/Jahr	
Kosten Sammlerbetrieb (jährlich)			
Wartung und Instandhaltung	K,W,IH	€/Jahr	
Wiederkehrende Prüfung, mittlere Kosten pro Jahr	K,WP	€/Jahr	
Summe Betriebskosten	K,BK	€/Jahr	
Referenzkosten Betrieb	K,BK,Ref	€/Jahr	
Differenzkosten Betrieb	K,BK,Diff	€/Jahr	
Mehrkosten durch erhöhten Lebensdauerverbrauch	MK,LV	€/Jahr	
Differenzkosten IH, Wartung und Betrieb (jährlich)	K,Diff	T€/Jahr	
Material und Herstellungskosten (wanddickenabhängig)			
Außendurchmesser	dos	mm	$dis+2*es$
Materialvolumen des Sammlers	V	m ³	$PI*(l/1000)*((dos/2/1000)^2-(dis/2/1000)^2)$
Gesamtgewicht des Sammlers, berechnet	m,kalk	kg	$V*roh,20$
Materialkosten des Sammlers, berechnet	MK,S,kalk	€	$m*P,HZ$

Herstellungskosten absolut	HK,abs	T€	
Gesamtkosten errechnet	GK,kalk	T€	MK,S + HK,abs + GK,Nippel
Gesamtkosten laut vorliegendem Angebot	GK,Ang	T€	Angebotspreise
Gesamtkosten Sammler errechnet mit Anpassungsfaktor und Montage	GK,Sammler	T€	(GK,rechn * AF,Ang) + K,Summe
Gesamtkosten Referenzwerkstoff	GK,Ref	T€	
Gesamtkosten Differenz	GK,Diff	T€	GK,Sammler - GK,Ref
Anpassungsfaktor zur Angleichung der errechneten zu den Angebotskosten	AF,Ang	1	
Nutzungszeitraum ab Inbetriebnahme	NZ,IBN	Jahre	
Erschöpfung / Lebensdauerverbrauch		%	
Erschöpfung Referenzwert		%	
Effektiver Betriebszeitraum des Sammlers nach Auslegung	tB,Ausl.	Jahre	tm / KWA
Betriebszeitraum mit veränderten Erschöpfungsdaten	tB,Ersch.		t,Ausl.*(1-Ersch/100)
Kalendarischer Nutzungszeitraum (ins DCF)	t,Nu	Jahre	tB,Ersch.*(8760/KWA)
Mehrkosten durch erhöhten Lebensdauerverbrauch			
Anfahrtgradienten			
Beginn des Anfahrens	nyAn,Beginn	K/Min.	ny t1 * 60
Ende des Anfahrens	nyAn,Ende	K/Min.	ny t1' * 60
ungünstigerer Anfahrtdgradient	nyAn	K/Min.	
Sonderberechnung für den Referenzwerkstoff:			durch Einfügen der festen Referenzwerte für 200.000 Stunden Warm- oder Heißstart
Anfahrzeit	t,An	Min.	(Tmax-Tmin)/ny,An
Anfahrzeit Referenz	t,An,Ref	Min.	
Anfahrzeit Differenz	t,An,Diff	Min.	t,An - t,An,Diff
Anteil der technischen Umsetzbarkeit der Zeitersparnis	Anteil t,Diff	%	
Anfahrtskosten je Anfahrt	ANK,Anf	€ / Anfahrt	t,An*(EB,Min*K,EB/100+BV,Min*BK,sp)
Anfahrtskosten Referenzwert	ANK,Ref	€ / Anfahrt	
Anfahrtskosten über/unter Referenzwert	ANK,Diff	€ / Anfahrt	ANK,Min - ANK,Ref
Anfahrtskostendifferenz über Anzahl Anfahrvorgänge pro	ANK,pa	T€	ANK,delta*N

Jahr			
Anfahrtskosten je Minute	ANK,Min	€	
Zeitgewinn in Nennlast	t+,nenn	Std./Jahr	N*T,An,Diff/60
Verfügbarkeitsgewinn p.a (100%)	VG	%	t+,Nenn/t,Nu/8760
Anteiliger Verfügbarkeitsgewinn	Vgant	%	VG*AnteilVG
Material und Herstellungskosten (wanddickenunabhängig)			
Nippel			
Materialvolumen aller Nippel	V, Nippel	m ³	$PI*(l/1000)*((dos/2/1000)^2-(dis/2/1000)^2)$
Gesamtgewicht aller Nippel	m, Nippel	kg	V*roh,20
Materialkosten der Nippel	MK,Nippel	€	m*P,HZ
Fertigungsaufwand in Stunden	FA,Std,Nippel	Std.	
Herstellungskosten absolut	HK,Nippel,abs	€	
Gesamtkosten errechnet	GK,Nippel,kalk	€	
Gesamtkosten laut Angebot	GK,Nippel,Ang	€	
Gesamtkosten Nippel	GK,Nippel	€	
Erstellung der Ausgabeparameter für das DCF-Tool			
Technische und betriebliche Daten			
Verfügbarkeitsgewinn	VG	%	
Zeitraum ab IBN	t,Nu	Jahre	
Hilfstabelle Sammlerkosten Referenzvergleich			
Gesamtkosten Sammlertausch berechnet (200.000h)	GK,kalk,200	T€	
Gesamtkosten Sammlertausch berechnet (150.000h)	GK,kalk,150	T€	
Gesamtkosten Sammlertausch berechnet (100.000h)	GK,kalk,100	T€	
Gesamtkosten Referenzwerkstoff 200.000	GK,Ref,200	T€	
Gesamtkosten Referenzwerkstoff 150.000	GK,Ref,150	T€	
Gesamtkosten Referenzwerkstoff 100.000	GK,Ref,100	T€	
Gesamtkosten Differenz 200.000	GK,Diff,200	T€	
Gesamtkosten Differenz 150.000	GK,Diff,150	T€	

Gesamtkosten Differenz 100.000	GK,Diff,100	T€	
Kosten je Minute über die Anzahl Warmstarts p.a.	K,Min,WS,pa	T€	
Kosten je Minute über die Anzahl Heißstarts p.a.	K,Min,HS,pa	T€	
Korrekturfaktor für erzielbaren Minutenertrag	KF,Min	%	
Hilfstabelle Einsparungen über Anfahrvorgänge			
Hilfsgrößen 200.000			
Lebensdauerverbrauch Warmstarts	LV,WS	%	
Lebensdauerverbrauch Heißstarts	LV,HS	%	
Nutzungsdauer unter veränderten Erschöpfungsbedingungen	ND,neu	Jahre	
Zusatzkosten aus neuem Nutzungszeitraum	K,ND,neu	€	
Ertrag je Minute über die Gesamtnutzungsdauer	E,Min,ND,neu	€	
DCF			
Kapitalwert	KW	Mio. €	
zulässiges Invest	ZI	Mio. €	

WS2: Angebotspreise

Die Angebotspreise, auf deren Basis die Berechnungen durchgeführt wurden, unterliegen dem Firmengeheimnis und werden daher an dieser Stelle nicht abgedruckt.

Da für den berechneten Sammler keine Angebotspreise für alle betrachteten Werkstoffe vorlagen, wurde auf Basis bekannter Materialpreise und vergleichbaren Angeboten ein Durchschnittspreis ermittelt und auf dieser Basis die Kalkulationen durchgeführt. Für den Fall einer erneuten Berechnung bei einem konkreten Sammler in einem bestehenden Kraftwerksblock müssen valide Angebote der Komponentenhersteller für diesen Sammler angefragt werden.

WS3: Sensitivitätsparameter, Eingabe der veränderbaren Parameter zur Sensitivitätsanalyse

Sensitivitätsparameter						
Auswertung 1:						
Einfluss der Anfahrzeit auf den Lebensdauerverbrauch des Bauteils						
	Anfahrzeitreduktion für Heiß und Warmstarts					
	Eingabewert	gewählter Wert für Analyse				
	0	0				
	-2	-2				
	-4	-4				
	-6	-6				
	-8	-8				
	-10	-10				
	-12	-12				
	-14	-14				
	-16	-16				
	-18	-18				
	-20	-20				
Auswertung 2:						
Wirtschaftlichkeit des Austausches bei veränderter Anzahl Warm- und Heißstarts						
	Warmstarts		Heißstarts		Volllaststunden	
	Eingabewert	gewählter Wert für Analyse	Eingabewert	gewählter Wert für Analyse	Eingabewert	gewählter Wert für Analyse
	15	15	10	10	7.600	7.600
	20	20	20	20	6.800	6.800
	30	30	40	40	6.000	6.000
	45	45	70	70	5.200	5.200
	65	65	110	110	4.400	4.400
	90	90	160	160	3.600	3.600
	65	65	220	220	2.800	2.800
	45	45	290	290	2.000	2.000

	30	30	370	370	1.200	1.200
	20	20	460	460	400	400
Auswertung 3:						
Wirtschaftlichkeit des Austausches bei veränderten Brennstoffkosten						
	Warmstarts					
	Eingabewert	gewählter Wert für Analyse				
	0	0				
	1	1				
	2	2				
	3	3				
	4	4				
	5	5				
	6	6				
	7	7				
	8	8				
	9	9				
Auswertung 4:						
Wirtschaftlichkeit des Austausches bei verändertem Strompreis						
	Warmstarts					
	Eingabewert	gewählter Wert für Analyse				
	0	0				
	5	5				
	10	10				
	15	15				
	20	20				
	25	25				
	30	30				
	35	35				
	40	40				

	45	45			
Auswertung 5:					
Kosten in Abhängigkeit der Anfahrtszeit					
	Anfahrtszeitreduktion für Heiß- und Warmstarts				
	Eingabewert	gewählter Wert für Analyse			
	0	0			
	-2	-2			
	-4	-4			
	-6	-6			
	-8	-8			
	-10	-10			
	-12	-12			
	-14	-14			
	-16	-16			
	-18	-18			

WS4: Kraftwerkskennwerte, Eingabe der Kraftwerksdaten zur Berechnung

Anmerkungen zu den Kraftwerkskennwerten:

Zu Beginn der Arbeit war der unmittelbare Vergleich der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Kraftwerksblöcke geplant. Mit der Programmierung der Berechnungstabellen wurde klar, dass dieses Vorgehen den gesetzten zeitlichen Rahmen deutlich übersteigen würde. Außerdem konnten, bis auf den ausgewählten Kraftwerksblock Neurath, die zur Berechnung erforderlichen Daten nicht ermittelt werden. Aus diesem Grund sind die hinteren Spalten nicht belegt. Alle gelb markierten Felder werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse dieser Arbeit variiert.

Die Datenquelle für den Ü4-Sammler in Neurath ist in der entsprechenden Spalte als Kürzel angegeben und wird nachfolgend erklärt:

- *1 <http://www.rwe.com/web/cms/de/12068/rwe-power-ag/standorte/braunkohle/kw-neurath-boa-2-3/>
- *2 Annahme
- *3 http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/geu_dateien/FB4-Internetseiten/CO2-Emissionen%20der%20Stromerzeugung_01.pdf
- *4 Kohle ist nicht gleich Kohle, D. Riedel, Gesamtverband Steinkohle, Essen, PdN-ChiS 1/58, Jg. 2009
- *5 Angaben durch RWE und Hitachi Power Europe
- *6 Mittelwerte aus Angaben von Kraftwerks- und Komponentenherstellern, angepasst auf das vorhandene Bauteil.
- *7 <http://www.urbs.de/afa/change.htm?afa10.htm>
- *8 Mittelwert der Inflationswerte in Deutschland 2011 und 2012 (statistisches Bundesamt)
- *9 <http://www.boerse.de/chart-tool/Co2-Emissionsrechte/XC000A0C4KJ2> Mittelwert 2012 bis 2014
- *10 <http://www.eex.com/de/marktdaten/strom/terminmarkt/phelix-options#!/2014/02/17..> Niedrigster Preis 2013

Kraftwerks- und Sammlerkennwerte						
Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Kraftwerk Neurath Block F/G, 1050 MW, Ü4-Sammler	Datenquelle (Erläuterung s.o.)		
Kraftwerksdaten						
KW Nennleistung, netto	P,Nenn	MW	1050	*1		
Brennstoff	BK,SK,Gas		Braunkohle	*1		
el. Netto Wirkungsgrad	ny	%	43,00	*1		
KW Ausnutzungsgrad	KWA	Vlh/a	7.600	*2		
Brennstoffspez. CO2-Emission SK	CO2-E	tCO2 / tSKEth	3,3	*3		
CO2-Zertifikatezukauf	CO2,Zuk	%	100%	*2		
spez. Brennstoffkosten je MWh,th	BK,sp	€ / MWhth	8,00	*2		
spez. Brennstoffkosten je Tonne	BK,t		20,00	*2		
Steigerung p.a.		%	2,00	*2		
Brennstoffkosten je Stunde (Nennleistungsbetrieb)	BK,MWh	€ / h				
Brennstoffverbrauch je Stunde	BV,Std	t / Std.	800,00	*1		
Brennstoffverbrauch je MWh	BV,MWh	t / MWh				
Heizwert (Rohbraunkohle)	HW,BK	kJ / kg	8.000	*4		
elektrischer Eigenbedarf	EB,%	% von der Nennleistung	10,00	*2		
kalkulatorischer Preis für Eigenbedarf	K,EB	€ / MWh	37,00	*2		
sonstige variable Kosten pro MWh el. Arbeit	K,var	€ / MWh	1,00	*2		
Stillstandkosten ohne Ertragsausfall je Std.	K,St	€ / Std.	unbekannt			
Sammler						
Werkstoffbezeichnung des Original-Werkstoffs			X10CrWMoVNb9-2	*5		
Berechnungsdruck (10bar=1N/mm2)	Pc	N/mm ²	29,5	*5		
Berechnungstemperatur	Tc	°C	615	*5		
Zeitpunkt der IBN des neuen Sammlers	t,IBN		2015	*2		
Bauteilabmessungen (Referenzwerkstoff)						
Innendurchmesser (Trommel)	dis	mm	255	*5		

mittl. Wanddicke der Trommel	ems	mm	94	*5	
mittl. Durchmesser der Trommel	dms	mm	349	*5	
Außendurchmesser des Abzweigs	dob	mm	47	*5	
mittl. Wanddicke des Abzweigs	emb	mm	12	*5	
mittl. Durchmesser des Abzweigs	dmb	mm	35	*5	
Verschwächungsbeiwert	ny	1	0,8		
Baulänge	l,S	mm	27.840	*5	
Gewicht des Grundkörpers	m,S	kg	26.782	*5	
Nippelanzahl			1.404	*5	
Nippel Außendurchmesser	n,N	mm	47	*5	
Nippel Wandstärke	emb	mm	12	*5	
Nippel Länge	l,N	mm	120		
Nippel Werkstoff	WS,N		P92 / A617	*5	
Nippel Gewicht	m,N	Kg	2.668	*5	
Gesamtgewicht mit Referenzwerkstoff	m,ges	Kg			
Material und Herstellungskosten (Referenzwerkstoff)					
Materialkosten des Sammlers	MK,Sam	€	200.000	*6	
Materialkosten der Nippel	MK,N	€	100.000	*6	
Materialkosten Schweißzusatzstoffe	MK,SZ	€	70.000	*6	
Fertigungsaufwand in Stunden	FA,Std	Std.	10.000	*6	
Stundensatz	Std,Satz	€ / Std.	65,00	*6	
Fertigungskosten absolut	HK,abs	€	600.000	*6	
Gesamtkosten aus Angeboten	GK,Ang	€	1.000.000	*6	
Wartungs- und Instandhaltungskosten p.a.(Referenzsammler)	RWK	€ / Jahr	10.000	*2	
Kosten für wiederkehrende Prüfung p.a.	K,WP	€ / Jahr	5.000	*2	

Lohnkosten für Aus- und Einbau	LK,AE	€	5.000	*6	
Materialkosten Arbeitsmaterial	MK,AM	€	5.000	*6	
Abtransport und Entsorgung	K,Ents	€	5.000	*6	
Kosten für Inbetriebnahme	K,IBN	€	20.000	*2	
Anfahrparameter					
Kaltstart					
Anzahl der Kaltstarts pro Jahr	LW,kalt				
Starttemperatur	Tmin,kalt	°C			
Endtemperatur	Tmax,kalt	°C			
Anfangsdruck	Pmin,kalt	N/mm ²			
Betriebsdruck	Pmax,kalt	N/mm ²			
Zeit bis Turbinenbedingungen	t start,kalt	Min			
Im Leitsystem hinterlegter Temperaturgradient	TG,LS,kalt	K/Min			
Brennstoffkosten je Minute	BK,Min,kalt	€			
Anfahrkosten	AK,kalt	€			
Warmstart (12 bis 48 Stunden)					
Anzahl der Warmstarts pro Jahr	LW,warm		15	*2	
Starttemperatur	Tmin,warm	°C	120	*5	
Endtemperatur	Tmax,warm	°C	600	*5	
Anfangsdruck	Pmin,warm	N/mm ²	0	*5	
Betriebsdruck	Pmax,warm	N/mm ²	28	*5	
Zeit bis Turbinenbedingungen	t start,warm	Min	100	*2	
Im Leitsystem hinterlegter Temperaturgradient	TG,LS,warm	K/Min			
Brennstoffkosten je Minute	BK,Min,warm	€/Min			
Anfahrkosten	AK,warm	€			
Heißstart					
Anzahl der Heißstarts pro Jahr	LW,heiß		10	*2	
Starttemperatur	Tmin,heiß	°C	360	*5	

Endtemperatur	T _{max,heiß}	°C	600	*5	
Anfangsdruck	P _{min,heiß}	N/mm ²	6	*5	
Betriebsdruck	P _{max,heiß}	N/mm ²	28	*5	
Zeit bis Turbinenbedingungen	t _{start,heiß}	Min	80	*5	
Im Leitsystem hinterlegter Temperaturgradient	TG,LS,heiß	K/Min			
Brennstoffkosten je Minute	BK,Min,heiß	€/Min			
Anfahrkosten	AK,heiß	€			
Finanzierungsdaten					
Zahlungsreihe vor Inbetriebnahme					
-3 Jahre vor IBN		%	0	*2	
-2 Jahre vor IBN		%	0	*2	
-1 Jahr vor IBN		%	60	*2	
im Jahr der IBN		%	40	*2	
AfA Dauer (mittlere)		Jahre	15	*7	
AfA linear		%	100	*2	
Mindestrendite		%p.a.	8,00	*2	
Pauschaler Steuersatz		%p.a.	30,00	*2	
Inflation ggü. Vorjahr		%p.a.	0,00	*2	
Lohnsteigerung ggü. Vorjahr		%p.a.	2	*2	
(Annahmen konstant über den Betrachtungszeitraum)					
Preissteigerungen Investitionsgüter gegenüber Vorjahr		%p.a.	2,00	*8	
CO2-Zertifikatspreis 2012		€/tCO ₂	4,50	*9	
Steigerung CO2-Preis		%	2	*2	
Strompreis, base case, mid price		€/MWh	36,00	*10	
Steigerung Strompreis		%	1	*2	

WS5: Werkstoffdaten, Bereitstellung der Werkstoffdaten (Quelle: Herstellerdatenblätter und EN)

Werkstoffdaten									
Handelsname	Berechnungs-temperatur	Formel-zeichen	Einheit	warmfester Kesselstahl	X20CrMoV11-1	P91/T91/F91	P92/T92/F92	Alloy 617 mod/B/occ	Alloy C263
Werkstoffnr.				1.7380	1.4922	1.4903	1.4901	2.4663	2.4650
Kurzbezeichnung DIN 17175				10CrMo910	X20CrMoV12-1	X10CrMoVNb9-1	X10CrWMoVNb9-2	NiCr23Co12Mo	NiCo20Cr20MoTi
Kurzbezeichnung EN 10216-2				10CrMo9-10	X20CrMoV11-1	X10CrMoVNb9-1			
Mittelwerte wesentlicher Bestandteile in Gew.-%				C:0,1/Cr:2,25 Mo:1,0	C:0,2/Cr:12 Mo:1/V:0,3	C:0,1/Cr:9/Mo:1 /V:0,2/Nb:0,1 Mn:0,5	C:0,1/Cr:9 W:1,8/Mo:0,5 Mn:0,5/V:0,2	Cr:23/Co:12/ Mo:9/Ni:Rest zzgl. 20-50 ppm Bor	Co:20/Cr:20 Mo:6/Ni:Rest
Gefügestruktur				ferritisch	martensitisch	martensitisch	martensitisch	austenitisch	austenitisch
Stahlgruppe nach EN 13480-2:2002, S. 13/14				5.2	6.4	6.4	6.4	8.2	8.2
Preise									
Rohmaterial (Nickel)			€/kg					13,00	13,00
Streuung Werkstoffrohpreis (+/-X%)								50,00	50,00
Preis als Halbzeug	P,HZ		€/kg	5,00	8,00	8,00	8,00	31,00	34,00
Fertigungsaufwand ant. am Gesamtpreis			%	40%	40%	40%	40%	40%	40%
Mehraufwand an Wartung und IH			%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
Einsparung Wiederkehrende Prüfung									
Physikalische Kennwerte									
Streckgrenze (40-60mm Wandstärke)				270,00	490,00	450,00	kA	kA	kA
0,2% Dehngrenze bei Raumt.		Rp0,2	N/mm ²	219,00	500,00	450,00	440,00	300	635
Zugfestigkeit bei Raumt.		Rm	N/mm ²	480,00	690,00	620,00	700,00	700	970
Bruchdehnung		A	%	21,00	17,00	19,00	19,00	35	30

Querkontraktionszahl		ny	-						
spezifisches Gewicht									
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient		betaL	1/K	1,20E-05	1,04E-05	1,06E-05	1,06E-05	1,20E-05	1,10E-05
E-Modul bei 20°C			N/mm ²	2,10E+05	2,18E+05	2,10E+05	1,91E+05	1,96E+05	2,22E+05
Dichte bei 20 °C		roh,20	kg/m ³	7.760,00	7.700,00	7.760,00	7.760,00	8.390,00	8.400,00
Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C		lambda	W/m*K	33,00	23,30	26,00	26,00	12,80	11,70
spez. Wärmekapazität bei 20 °C		cp, 20	J/kg K	622,00	448,00	430,00	420,00	485,00	426,00
Temperaturbereich				bis 590 °C	bis 650 °C	kA	bis 625 °C	bis 750 °C	kA
Temperaturspezifische Werkstoffdaten bei der Berechnungstemperatur tC									
0,2%-Dehngrenze	200 °C	Rp,Tc	N/mm ²	219,00	430,00	380,00	405,00	230,00	490,00
1%-Zeitdehngrenze		Rp,1,0	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	260,00	kA
Zugfestigkeit		Rm,C	N/mm ²	kA	kA	kA	537,00	620,00	kA
1%-Zeitdehngrenze 100.000h		Rp1,0,Tc	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA
Zeitstandfestigkeit 100.000h		Rm,Tc	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA
Zeitstandfestigkeit 150.000h		Rm,Tc	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA
Zeitstandfestigkeit 200.000h		Rm,Tc	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei Tc		betaL,Tc	1/K	1,30E-05	1,12E-05	kA	1,11E-05	1,26E-05	1,19E-05
E-Modul bei Tc		E,Tc	N/mm ²	2,02E+05	2,06E+05	2,07E+05	2,07E+05	2,03E+05	2,12E+05
Dichte bei Tc		roh,Tc	kg / m ³	7.790,00	7.750,00	7.760,00	7.760,00	8.340,00	8.400,00
Wärmeleitfähigkeit bei Tc		lambda,Tc	W/m*K	38,00	24,30	28,00	28,00	14,90	14,70
spezifische Wärmekap. bei Tc		cp,Tc	J/(kg*K)	520,00	523,00	540,00	460,00	494,00	472,00
differentielle Wärmekap. bei Tc	cp,diff,Tc		kA	kA	kA	kA	kA	kA	
0,2%-Dehngrenze	300 °C	Rp,Tc	N/mm ²	208,00	390,00	360,00	392,00	220,00	480,00
1%-Zeitdehngrenze		Rp,1,0	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	250,00	kA

Zugfestigkeit		R _{m,C}	N/mm ²	kA	kA	kA	509,00	600,00	kA	
1%-Zeitdehngrenze 100.000h		R _{p1,0,Tc}	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA	
Zeitstandfestigkeit 100.000h		R _{m,Tc}	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA	
Zeitstandfestigkeit 150.000h		R _{m,Tc}	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA	
Zeitstandfestigkeit 200.000h		R _{m,Tc}	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA	
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei T _c		beta _{L,Tc}	1/K	1,30E-05	1,16E-05	1,17E-05	1,14E-05	1,31E-05	1,25E-05	
E-Modul bei T _c		E _{Tc}	N/mm ²	1,95E+05	1,98E+05	1,99E+05	2,00E+05	1,96E+05	2,06E+05	
Dichte bei T _c		roh _{Tc}	kg / m ³	7.760,00	7.750,00	7.760,00	7.760,00	8.310,00	8.400,00	
Wärmeleitfähigkeit bei T _c		lambda _{c,Tc}	W/m*K	38,00	25,00	28,00	28,00	16,70	16,30	
spezifische Wärmekap. bei T _c		cp _{Tc}	J/(kg*K)	560,00	565,00	580,00	480,00	511,00	497,00	
differentielle Wärmekap. bei T _c		cp,diff,Tc		kA	kA	kA	kA	kA	kA	
0,2%-Dehngrenze		400 °C	R _{p,Tc}	N/mm ²	148,00	360,00	340,00	372,00	210,00	480,00
1%-Zeitdehngrenze			R _{p,1,0}	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	240,00	kA
Zugfestigkeit	R _{m,C}		N/mm ²	kA	kA	kA	482,00	570,00	kA	
1%-Zeitdehngrenze 100.000h	R _{p1,0,Tc}		N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA	
Zeitstandfestigkeit 100.000h	R _{m,Tc}		N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA	
Zeitstandfestigkeit 150.000h	R _{m,Tc}		N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA	
Zeitstandfestigkeit 200.000h	R _{m,Tc}		N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA	
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei T _c	beta _{L,Tc}		1/K	1,40E-05	1,19E-05	1,20E-05	1,17E-05	1,36E-05	1,31E-05	
E-Modul bei T _c	E _{Tc}		N/mm ²	1,87E+05	1,89E+05	1,90E+05	1,91E+05	1,89E+05	1,99E+05	
Dichte bei T _c	roh _{Tc}		kg / m ³	7.720,00	7.750,00	7.760,00	7.760,00	8.270,00	8.400,00	
Wärmeleitfähigkeit bei T _c	lambda _{c,Tc}		W/m*K	37,00	25,60	29,00	29,00	18,70	18,00	
spezifische Wärmekap. bei T _c	cp _{Tc}		J/(kg*K)	610,00	620,00	620,00	510,00	528,00	523,00	
differentielle Wärmekap. bei T _c	cp,diff,Tc			kA	kA	kA	kA	kA	kA	
0,2%-Dehngrenze	450 °C	R _{p,Tc}	N/mm ²	144,00	330,00	320,00	360,00	205,00	480,00	
1%-Zeitdehngrenze		R _{p,1,0}	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA	
Zugfestigkeit		R _{m,C}	N/mm ²	kA	kA	kA	457,00	kA	kA	

1%-Zeitdehngrenze 100.000h		Rp1,0,Tc	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA
Zeitstandfestigkeit 100.000h		Rm,Tc	N/mm ²	229,00	kA	kA	372,00	kA	kA
Zeitstandfestigkeit 150.000h		Rm,Tc	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA
Zeitstandfestigkeit 200.000h		Rm,Tc	N/mm ²	204,00	kA	kA	kA	kA	kA
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei Tc		betaL,Tc	1/K	kA	kA	kA	kA	kA	kA
E-Modul bei Tc		E,Tc	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA
Dichte bei Tc		roh,Tc	kg / m ³	kA	7.750,00	7.760,00	7.760,00	kA	8.400,00
Wärmeleitfähigkeit bei Tc		lambda,Tc	W/m*K	kA	kA	kA	kA	kA	kA
spezifische Wärmekap. bei Tc		cp,Tc	J/(kg*K)	kA	kA	kA	530,00	kA	kA
differentielle Wärmekap. bei Tc		cp,diff,Tc		kA	kA	kA	kA	kA	kA
0,2%-Dehngrenze		500 °C	Rp,Tc	N/mm ²	143,00	290,00	300,00	340,00	200,00
1%-Zeitdehngrenze	Rp,1,0		N/mm ²	kA	kA	kA	kA	225,00	kA
Zugfestigkeit	Rm,C		N/mm ²	kA	kA	kA	436,00	540,00	kA
1%-Zeitdehngrenze 100.000h	Rp1,0,Tc		N/mm ²	kA	190,00	213,00	kA	kA	543,00
Zeitstandfestigkeit 100.000h	Rm,Tc		N/mm ²	141,00	235,00	253,00	270,00	kA	775,00
Zeitstandfestigkeit 150.000h	Rm,Tc		N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA
Zeitstandfestigkeit 200.000h	Rm,Tc		N/mm ²	124,00	215,00	246,00	kA	kA	kA
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei Tc	betaL,Tc		1/K	1,40E-05	1,21E-05	1,23E-05	1,20E-05	1,38E-05	1,37E-05
E-Modul bei Tc	E,Tc		N/mm ²	1,77E+05	1,79E+05	1,81E+05	1,82E+05	1,82E+05	1,92E+05
Dichte bei Tc	roh,Tc		kg / m ³	7.690,00	7.750,00	7.760,00	7.760,00	8.230,00	8.400,00
Wärmeleitfähigkeit bei Tc	lambda,Tc		W/m*K	35,00	25,60	30,00	30,00	20,70	19,70
spezifische Wärmekap. bei Tc	cp,Tc		J/(kg*K)	680,00	703,00	690,00	580,00	544,00	548,00
differentielle Wärmekap. bei Tc	cp,diff,Tc			kA	kA	kA	kA	kA	kA
0,2%-Dehngrenze	550 °C		Rp,Tc	N/mm ²	kA	250,00	270,00	300,00	195,00
1%-Zeitdehngrenze		Rp,1,0	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA
Zugfestigkeit		Rm,C	N/mm ²	kA	kA	kA	436,00	kA	kA
1%-Zeitdehngrenze 100.000h		Rp1,0,Tc	N/mm ²	kA	98,00	132,00	kA	kA	kA

Zeitstandfestigkeit 100.000h		Rm,Tc	N/mm ²	70,00	128,00	162,00	187,00	kA	kA	
Zeitstandfestigkeit 150.000h		Rm,Tc	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA	
Zeitstandfestigkeit 200.000h		Rm,Tc	N/mm ²	57,00	111,00	154,00	kA	kA	kA	
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei Tc		betaL,Tc	1/K	kA	kA	kA	1,22E-05	kA	kA	
E-Modul bei Tc		E,Tc	N/mm ²	kA	kA	kA	1,76E+05	kA	kA	
Dichte bei Tc		roh,Tc	kg / m ³	kA	7.750,00	7.760,00	7.760,00	kA	8.400,00	
Wärmeleitfähigkeit bei Tc		lambda,Tc	W/m*K	kA	kA	kA	kA	kA	kA	
spezifische Wärmekap. bei Tc		cp,Tc	J/(kg*K)	kA	kA	kA	600,00	kA	kA	
differentielle Wärmekap. bei Tc		cp,diff,Tc		kA	kA	kA	kA	kA	kA	
0,2%-Dehngrenze		600 °C	Rp,Tc	N/mm ²	kA	kA	215,00	248,00	190,00	470,00
1%-Zeitdehngrenze	Rp,1,0		N/mm ²	kA	kA	kA	kA	210,00	kA	
Zugfestigkeit	Rm,C		N/mm ²	kA	kA	kA	328,00	510,00	kA	
1%-Zeitdehngrenze 100.000h	Rp1,0,Tc		N/mm ²	kA	43,00	77,00	kA	kA	440,00	
Zeitstandfestigkeit 100.000h	Rm,Tc		N/mm ²	35,00	59,00	90,00	113,00	265,00	465,00	
Zeitstandfestigkeit 150.000h	Rm,Tc		N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA	
Zeitstandfestigkeit 200.000h	Rm,Tc		N/mm ²	28,00	48,00	86,00	kA	kA	kA	
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei Tc	betaL,Tc		1/K	1,40E-05	1,23E-05	1,26E-05	1,23E-05	1,40E-05	1,42E-05	
E-Modul bei Tc	E,Tc		N/mm ²	1,67E+05	1,66E+05	1,68E+05	1,70E+05	1,74E+05	1,84E+05	
Dichte bei Tc	roh,Tc		kg / m ³	7.650,00	7.750,00	7.760,00	7.760,00	8.190,00	8.400,00	
Wärmeleitfähigkeit bei Tc	lambda,Tc		W/m*K	33,00	26,20	30,00	28,00	23,50	21,40	
spezifische Wärmekap. bei Tc	cp,Tc		J/(kg*K)	760,00	804,00	780,00	630,00	584,00	573,00	
differentielle Wärmekap. bei Tc	cp,diff,Tc			kA	kA	kA	kA	kA	kA	
0,2%-Dehngrenze	650 °C		Rp,Tc	N/mm ²	kA	kA	kA	177,00	188,00	470,00
1%-Zeitdehngrenze			Rp,1,0	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	208,00	kA
Zugfestigkeit			Rm,C	N/mm ²	kA	kA	kA	273,00	480,00	kA
1%-Zeitdehngrenze 100.000h			Rp1,0,Tc	N/mm ²	kA	17,00	kA	kA	kA	330,00
Zeitstandfestigkeit 100.000h		Rm,Tc	N/mm ²	kA	23,00	44,00	56,00	187,00	370,00	

Zeitstandfestigkeit 150.000h		Rm,Tc	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	kA	kA
Zeitstandfestigkeit 200.000h		Rm,Tc	N/mm ²	kA	18,00	42,00	kA	kA	kA
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei Tc		betaL,Tc	1/K	kA	kA	kA	1,25E-05	kA	kA
E-Modul bei Tc		E,Tc	N/mm ²	kA	kA	kA	1,64E+05	kA	kA
Dichte bei Tc		roh,Tc	kg / m ³	kA	7.750,00	7.760,00	7.760,00	kA	8.400,00
Wärmeleitfähigkeit bei Tc		lambda,Tc	W/m*K	kA	kA	kA	kA	kA	kA
spezifische Wärmekap. bei Tc		cp,Tc	J/(kg*K)	kA	kA	kA	640,00	kA	kA
differentielle Wärmekap. bei Tc		cp,diff,Tc		kA	kA	kA	kA	kA	kA

WS6: Wanddicke, Berechnung der Wanddicke

Wanddickenberechnung für einen Sammler nach EN 12952-3											
Kraftwerksblock				Neurath, 1100 MW, Ü4-Sammler							
Material				10CrMo9-10	X20CrMoV11-1	P91	P92	A617	A263		
Parameter Name	Formelzeichen	Einheit	Formel								
Innendurchmesser	dis	mm		255,00	255,00	255,00	255,00	255,00	255,00		
Berechnungsdruck	Pc	N/mm ²		29,50	29,50	29,50	29,50	29,50	29,50		
Berechnungstemperatur	Tc	°C		615,00	615,00	615,00	615,00	615,00	615,00		
Verschwächungsbeiwert	vm	1		0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80		
Zuschlag für Korosion und Abnutzung	c1	mm		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Zuschlag Wanddickenunterschreitung	c2	%		15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00		
Sicherheitsbeiwert S gemäß EN 12952-3 und EN 13480-3											
für Zugfestigkeit bei A _≥ 35%			3								
für 1% Dehngrenze bei A _≥ 35%			1,2								
für Rm bei 20°C			2,4								
für R _{p0,2} tC			1,5								
für Rm T t _{c a,b}			1,25								
für Auslegung 200.000h mit 100.000h Werten:			1,5								
für Auslegung 200.000h mit 150.000h Werten:			1,35								
für Auslegung 150.000h mit 100.000h Werten:			1,35								
Überführung der Werkstoffdaten für die relevanten Temperaturbereiche:											
Hilfsgröße Temperatur kleiner				Tklein							
0,2%-Dehngrenze				R _{p,tC}	N/mm ²	kA	kA	215,00	248,00	190,00	470,00
1%-Zeitdehngrenze				R _{p,1,0}	N/mm ²	kA	kA	kA	kA	210,00	kA

Zugfestigkeit	R _{m,C}	N/mm ²		kA	kA	kA	328,00	510,00	kA
1%-Zeitdehngrenze 100.000h	R _{p1,0,tC}	N/mm ²		kA	43,00	77,00	kA	kA	440,00
Zeitstandfestigkeit 100.000h	R _{m,tC}	N/mm ²		35,00	59,00	90,00	113,00	265,00	465,00
Zeitstandfestigkeit 150.000h	R _{m,tC}	N/mm ²		kA	kA	kA	kA	kA	kA
Zeitstandfestigkeit 200.000h	R _{m,tC}	N/mm ²		28,00	48,00	86,00	kA	kA	kA
Hilfsgröße Temperatur größer	T _{groß}			650,00	650,00	650,00	650,00	650,00	650,00
0,2%-Dehngrenze	R _{p,tC}	N/mm ²		kA	kA	kA	177,00	188,00	470,00
1%-Zeitdehngrenze	R _{p,1,0}	N/mm ²		kA	kA	kA	kA	208,00	kA
Zugfestigkeit	R _{m,C}	N/mm ²		kA	kA	kA	273,00	480,00	kA
1%-Zeitdehngrenze 100.000h	R _{p1,0,tC}	N/mm ²		kA	17,00	kA	kA	kA	330,00
Zeitstandfestigkeit 100.000h	R _{m,tC}	N/mm ²		kA	23,00	44,00	56,00	187,00	370,00
Zeitstandfestigkeit 150.000h	R _{m,tC}	N/mm ²		kA	kA	kA	kA	kA	kA
Zeitstandfestigkeit 200.000h	R _{m,tC}	N/mm ²		kA	18,00	42,00	kA	kA	kA
Konstante C des Larson-Miller-Parameters:			20						
Auslegung in Stunden:	t_m		100.000						
Hilfsgröße Temperatur kleiner	T _{klein}			600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00
zugehörige kleinste Spannung	R _{m,Tklein}		$f_k = \min(R_{pTC}/S ; R_{m,TC}/S ; R_{m,C})$	28,00	47,20	72,00	90,40	140,00	313,33
Larson-Miller für Temp. kleiner	LMP(T _{klein})		$T_{klein} * (C + \lg t_m)$	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00
Hilfsgröße Temperatur größer	T _{groß}			650,00	650,00	650,00	650,00	650,00	650,00
zugehörige kleinste Spannung	R _{m,Tgroß}			0,00	18,40	35,20	44,80	138,67	296,00
Larson-Miller für Temp. größer	LMP(T _{groß})		$T_{groß} * (C + \lg t_m)$	16.250,00	16.250,00	16.250,00	16.250,00	16.250,00	16.250,00
Hilfsgröße Steigung	Steigung		$(R_{m,Tklein} - R_{m,Tgroß}) / (LMP(Tklein) - LMP(Tgroß))$	-0,02	-0,02	-0,03	-0,04	0,00	-0,01
Hilfsgröße Schnittpunkt R _m	R _{m,Schnitt}		$R_{m,Tklein} - \text{Steigung} * LMP(Tklein)$	364,00	392,80	513,60	637,60	156,00	521,33
Larson-Miller für t _c	LMP(T _c)		$T_c * (C + \lg t_m)$	15.375,00	15.375,00	15.375,00	15.375,00	15.375,00	15.375,00
zulässige Spannung bei t _c	R _{m,Tc}	N/mm ²		19,60	38,56	60,96	76,72	139,60	308,13
Sicherheitsbeiwert	S	1		1,25	1,25	1,25	1,25	1,50	1,25
zulässige Spannung bei t _c , abgewertet mit Sicherheitsbeiwert	f _s		$f_s = K/S$	19,60	38,56	60,96	76,72	139,60	308,13

zugehörige kleinste Spannung	Rm,Tgroß			0,00	14,40	33,60	37,33	124,67	246,67
Larson-Miller für Temp. größer	LMP(Tgroß)		Tgroß*(C+lg tm)	16.250,00	16.250,00	16.250,00	16.250,00	16.250,00	16.250,00
Hilfsgröße Steigung	Steigung		(Rm,Tklein - Rm,Tgroß) / (LMP(Tklein)-LMP(Tgroß))	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03	-0,01	-0,05
Hilfsgröße Schnittpunkt Rm	Rm,Schnitt		Rm,Tklein - Steigung*LMP(Tklein)	291,20	326,40	491,20	531,33	324,00	1.070,00
Larson-Miller für Berechnungstemperatur	LMP(Tc)		Tc*(C+lg tm)	15.375,00	15.375,00	15.375,00	15.375,00	15.375,00	15.375,00
zulässige Spannung bei Tc	Rm,Tc	N/mm ²		15,68	31,20	58,24	63,93	135,40	291,00
Sicherheitsbeiwert	S	1		1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
zulässige Spannung bei tc, abgewertet mit Sicherheitsbeiwert	fs		fs = K/S	15,68	31,20	58,24	63,93	135,40	291,00
erforderliche rechnerische Wanddicke (Innendurchmesser)	ecs		ecs = (pc*dis)/((2*fs-pc)v)	5.055,44	285,81	108,11	95,59	38,97	17,02
erforderliche Wanddicke des Grundkörpers	e's		e's = ecs+c1+c2 = ecs*(1-K) für c1 = 0	5.947,58	336,25	127,18	112,46	45,85	20,02
Ausgeführte Wanddicke (Mindestwand)	es		gewählte Wanddicke				115,00	45,00	20,00
Exporttabelle Wanddicken									
100.000 h Auslegung				1.140,46	232,31	119,70	89,26	44,30	18,85
150.000 h Auslegung				1.627,72	258,92	130,22	98,27	44,32	19,29
200.000 h Auslegung				5.947,58	336,25	127,18	112,46	45,85	20,02

WS7:Ermittlung Ck1, Berechnung der Korrekturbeiwerte

Hilfstabelle zur Berechnung der Korrekturbeiwerte Ck1 auf Basis der Tabelle B.5 EN 12952-3:2012-03									
Zugfestigkeit Rm	UG (unterer Grenzwert)		F (Faktor)	lg Na		K(Korrektur)		OG (oberer Grenzwert)	
400	1,5	<=	0,19	lg Na	+	0,62	<=	1,8	
600	1,7	<=	0,40	lg Na	+	0,20	<=	2,7	
800	1,8	<=	0,56	lg Na	+	0,12	<=	3,4	
1000	1,9	<=	0,70	lg Na	+	0,40	<=	4,0	
Werkstoffe				10CrMo9-10	X20CrMo V11-1	P91	P92	A617	C263
Übernahme der Zugfestigkeiten aus den Werkstoffkennwerten				480,00	690,00	620,00	700,00	700,00	970,00
Parameter Name	Formelzeichen	Einheit	Formel						
Bestimmung des unteren Grenzwerts für Ck1									
Logarithmus des zugehörigen unteren Grenzwertes der kleineren Tabellengröße	ln(UG,Rm,klein)			0,4055	0,5306	0,5306	0,5306	0,5306	0,5878
Logarithmus des zugehörigen unteren Grenzwertes der oberen Tabellengröße	ln(UG,Rm,groß)			0,5306	0,5878	0,5878	0,5878	0,5878	0,6419
Hilfsgröße Steigung	UG,Steigung		$(\ln(UG,Rm,groß) - \ln(UG,Rm,klein)) / (Rm,groß - Rm,klein)$	0,0006	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
Hilfsgröße Schnittpunkt Rm	UG,Schnitt		$\ln(UG,Rm,klein) - Steigung * UG,klein$	0,1551	0,3592	0,3592	0,3592	0,3592	0,3715
Logarithmus des zu berechnenden unteren Grenzwertes	ln(UG,Rm*)			0,4555	0,5563	0,5363	0,5592	0,5592	0,6337
Unterer Grenzwert des Korrekturfaktors	UG, Rm*			1,5770	1,7443	1,7097	1,7493	1,7493	1,8847
Bestimmung des Faktors F für Ck1									
Logarithmus des zugehörigen Faktors der kleineren Tabellengröße	ln(F,Rm,klein)			-1,6607	-0,9163	-0,9163	-0,9163	-0,9163	-0,5798

Logarithmus des zugehörigen Faktors der oberen Tabellengröße	$\ln(F, R_m, \text{groß})$		-0,9163	-0,5798	-0,5798	-0,5798	-0,5798	-0,3567
Hilfsgröße Steigung	F, Steigung	$(\ln(F, R_m, \text{groß}) - \ln(F, R_m, \text{klein})) / (R_m, \text{groß} - R_m, \text{klein})$	0,0037	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0011
Hilfsgröße Schnittpunkt R_m	F, Schnitt	$\ln(F, R_m, \text{klein}) - \text{Steigung} * F, R_m, \text{klein}$	-3,1496	-1,9257	-1,9257	-1,9257	-1,9257	-1,4724
Logarithmus des zu berechnenden Faktors	$\ln(F, R_m^*)$		-1,3630	-0,7649	-0,8826	-0,7481	-0,7481	-0,3901
Faktor der werkstoffspezifischen Zugfestigkeit	F, R_m^*		0,2559	0,4654	0,4137	0,4733	0,4733	0,6770
Bestimmung des Korrekturwerts K für Ck1								
Logarithmus des zugehörigen Korrekturwertes der kleineren Tabellengröße	$\ln(K, R_m, \text{klein})$		-0,4780	-1,6094	-1,6094	-1,6094	-1,6094	-2,1203
Logarithmus des zugehörigen Korrekturwertes der oberen Tabellengröße	$\ln(K, R_m, \text{groß})$		-1,6094	-2,1203	-2,1203	-2,1203	-2,1203	-0,9163
Hilfsgröße Steigung	K, Steigung	$(\ln(K, R_m, \text{groß}) - \ln(K, R_m, \text{klein})) / (R_m, \text{groß} - R_m, \text{klein})$	-0,0057	-0,0026	-0,0026	-0,0026	-0,0026	0,0060
Hilfsgröße Schnittpunkt R_m	K, Schnitt	$\ln(K, R_m, \text{klein}) - \text{Steigung} * K, R_m, \text{klein}$	1,7848	-0,0770	-0,0770	-0,0770	-0,0770	-6,9362
Logarithmus des zu berechnenden Korrekturwertes	$\ln(K, R_m^*)$		-0,9306	-1,8393	-1,6605	-1,8649	-1,8649	-1,0969
Korrekturwert der werkstoffspezifischen Zugfestigkeit	K, R_m^*		0,3943	0,1589	0,1900	0,1549	0,1549	0,3339
Bestimmung des oberen Grenzwertes OG für Ck1								
Logarithmus des oberen Grenzwertes der kleineren Tabellengröße	$\ln(OG, R_m, \text{klein})$		0,5878	0,9933	0,9933	0,9933	0,9933	1,2238
Logarithmus des oberen Grenzwertes der oberen Tabellengröße	$\ln(OG, R_m, \text{groß})$		0,9933	1,2238	1,2238	1,2238	1,2238	1,3863
Hilfsgröße Steigung	OG, Steigung	$(\ln(OG, R_m, \text{groß}) - \ln(OG, R_m, \text{klein})) / (R_m, \text{groß} - R_m, \text{klein})$	0,0020	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012	0,0008
Hilfsgröße Schnittpunkt R_m	OG, Schnitt	$\ln(OG, R_m, \text{klein}) - \text{Steigung} * OG, R_m, \text{klein}$	-0,2231	0,3017	0,3017	0,3017	0,3017	0,5737
Logarithmus des zu berechnenden oberen Grenzwertes	$\ln(OG, R_m^*)$		0,7500	1,0970	1,0163	1,1085	1,1085	1,3619
oberer Grenzwert des Korrekturfaktors	OG, R_m^*		2,1169	2,9951	2,7630	3,0299	3,0299	3,9037

WS8: Gradient und Erschöpfung, Ermittlung der Anfahrgradienten und des Lebensdauerverbrauchs.

Berechnung der Lebensdauer und des zulässigen Temperaturgefälles									
Kraftwerksblock									
RWE Studie 2012, Neurath 1100 MW, Ü4-Sammler									
Material									
Parameter Name									
Formelzeichen									
Einheit									
Formel									
Betriebsdruck	Pc	N/mm ²		29,50	29,50	29,50	29,50	29,50	29,50
Berechnungstemperatur	Tc	°C		615,00	615,00	615,00	615,00	615,00	615,00
Importtabelle veränderlicher Daten									
Wanddicke 100.000h				1.140,46	232,31	119,70	89,26	44,30	18,85
Wanddicke 150.000h				1.627,72	258,92	130,22	98,27	44,32	19,29
Wanddicke 200.000h				5.947,58	336,25	127,18	112,46	45,85	20,02
Anzahl Warmstarts pro Jahr	WSpa			15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
minimale Temperatur Warmstart	TminWS	°C		120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
minimaler Druck Warmstart	PminWS	N/mm ²		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anfahrzeit bis Turbinenbedingungen (Referenzwerkstoff)				100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Anzahl Heißstarts	HSpa			10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
minimale Temperatur Heißstart	TminHS	°C		360,00	360,00	360,00	360,00	360,00	360,00
minimaler Druck Heißstart	PminHS	N/mm ²		6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Anfahrzeit bis Turbinenbedingungen (Referenzwerkstoff)		Min		60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
Gradienten- und Erschöpfungsberechnung Neurath									

min. Druck unter Wechselbeanspruchung	Pmin	N/mm ²		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max. Druck unter Wechselbeanspruchung	Pmax	N/mm ²		28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
Zeit bis Turbinenbedingungen	t start	Min		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Temperaturgradient im Leitsystem	TG,LS	K/Min							
Anzahl der Lastwechsel pro Jahr	LW,pa	1		15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Anzahl der Lastwechsel über 24 Jahre	LW,ges	1	LW,pa*24*	360,00	360,00	360,00	360,00	360,00	360,00
Bauteilabmessungen:									
Außendurchmesser der Trommel	dos	mm	dis + 2*ems	3.510,45	772,84	515,44	451,54	343,64	293,57
Innendurchmesser der Trommel	dis			255,00	255,00	255,00	255,00	255,00	255,00
mittl. Wanddicke der Trommel	ems	mm		1.627,72	258,92	130,22	98,27	44,32	19,29
mittl. Durchmesser der Trommel	dms	mm		1.882,72	513,92	385,22	353,27	299,32	274,29
Außendurchmesser des Abzweigs	dob	mm		47,00	47,00	47,00	47,00	47,00	47,00
mittl. Wanddicke des Abzweigs	emb	mm		12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
mittl. Durchmesser des Abzweigs	dmb	mm		35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
Die Kraftwerks- und Sammlerdaten werden dem Arbeitsblatt "Kraftwerkskennwerte" entnommen.									
Die Werkstoffdaten für die Betriebs- bzw. Berechnungstemperatur werden dem Arbeitsblatt "Wanddicke" entnommen									
Referenztemperatur (Warmstart)	T*	°C	$T^* = 0,75t_{max} + 0,25t_{min}$	480,00	480,00	480,00	480,00	480,00	480,00
Larson-Miller-Konstante aus "Wanddicke"		C =	20						
Streckgrenze (0,2%-Dehngrenze) für T*									
Hilfsgröße Temperatur kleiner	Tklein			450,00	450,00	450,00	450,00	450,00	450,00
zugehörige kleinste Spannung	Rp,Tklein			144,00	330,00	320,00	360,00	205,00	480,00
Larson-Miller für Temp. Kleiner	LMP(Tklein)		$T_{klein}*(C+lg t_m)$	11.385,46	11.385,46	11.385,46	11.385,46	11.385,46	11.385,46
Hilfsgröße Temperatur größer	Tgroß			500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
zugehörige kleinste Spannung	Rp,Tgroß			143,00	290,00	300,00	340,00	200,00	480,00
Larson-Miller für Temp. Größer	LMP(Tgroß)		$T_{groß}*(C+lg t_m)$	12.650,51	12.650,51	12.650,51	12.650,51	12.650,51	12.650,51
Hilfsgröße Steigung	Rp,Steigung			-0,0008	-0,0316	-0,0158	-0,0158	-0,0040	0,0000
Hilfsgröße Schnittpunkt Rm	Rp,Schnitt			153,00	690,00	500,00	540,00	250,00	480,00

Larson-Miller für T*	LMP(T*)		T*x(C+lg tm)	12.144,49	12.144,49	12.144,49	12.144,49	12.144,49	12.144,49
0,2%-Dehngrenze für T*	Rp,T*	N/mm ²		143,40	306,00	308,00	348,00	202,00	480,00
Überführung der physikalischen Werkstoffdaten für die relevanten Temperaturbereiche der Referenztemperatur									
Hilfsgröße Temperatur kleiner	Tklein			400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Inverse Temperatur kleiner	1000/Tklein			2,5000	2,5000	2,5000	2,5000	2,5000	2,5000
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei T*	beta, Tklein	1/K		1,40E-05	1,19E-05	1,20E-05	1,17E-05	1,36E-05	1,31E-05
E-Modul bei T*	E,Tklein	N/mm ²		1,87E+05	1,89E+05	1,90E+05	1,91E+05	1,89E+05	1,99E+05
Dichte bei T*	roh,Tklein	kg/m ³		7.720,00	7.750,00	7.760,00	7.760,00	8.270,00	8.400,00
Wärmeleitfähigkeit	lambda,Tklein	W/m*K		37,00	25,60	29,00	29,00	18,70	18,00
spezifische Wärmekap. bei T*	cp,Tklein	J/(kg*K)		610,00	620,00	620,00	510,00	528,00	523,00
differentielle Wärmekapazität	cp,diff,Tklein			kA	kA	kA	kA	kA	kA
Hilfsgröße Temperatur größer	Tgroß			500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
Inverse Temperatur größer	1000/Tgroß			2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei T*	beta, Tgroß	1/K		1,40E-05	1,21E-05	1,23E-05	1,20E-05	1,38E-05	1,37E-05
E-Modul bei T*	E,Tgroß	N/mm ²		1,77E+05	1,79E+05	1,81E+05	1,82E+05	1,82E+05	1,92E+05
Dichte bei T*	roh,Tgroß	kg/m ³		7.690,00	7.750,00	7.760,00	7.760,00	8.230,00	8.400,00
Wärmeleitfähigkeit	lambda,Tgroß	W/m*K		35,00	25,60	30,00	30,00	20,70	19,70
spezifische Wärmekap. bei T*	cp,Tgroß	J/(kg*K)		680,00	703,00	690,00	580,00	544,00	548,00
differentielle Wärmekapazität	cp,diff,Tgroß			kA	kA	kA	kA	kA	kA
Interpolation der Zwischenwerte mittels der Arrheniusgleichung									
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bis T*									
Logarithmus des zugehörigen Wärmeausdehnungskoeff.	ln(beta,Tklein)			-11,1765	-11,3390	-11,3306	-11,3559	-11,2054	-11,2429
Logarithmus des zugehörigen Wärmeausdehnungskoeff.	ln(beta,Tgroß)			-11,1765	-11,3223	-11,3059	-11,3306	-11,1908	-11,2018
Hilfsgröße Steigung	beta,Steigung		$\frac{\ln(\beta_{T_{\text{klein}}}) - \ln(\beta_{T_{\text{groß}}})}{\left(\frac{1}{T_{\text{klein}}} - \frac{1}{T_{\text{groß}}}\right)}$	0,0000	-0,0333	-0,0494	-0,0506	-0,0292	-0,0823

Hilfsgröße Schnittpunkt Rm	beta,Schnitt		$\ln(\beta, T_{\text{klein}}) - \text{Steigung} \cdot 1000 / T_{\text{klein}}$	-11,1765	-11,2556	-11,2071	-11,2293	-11,1324	-11,0373
Logarithmus des zu berechnenden Wärmeausdehnungskoeff.	$\ln(\beta, T^*)$			-11,1765	-11,3251	-11,3100	-11,3348	-11,1933	-11,2086
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	β, T^*			1,40E-05	1,21E-05	1,22E-05	1,19E-05	1,38E-05	1,36E-05
Elastizitätsmodul für T*									
Logarithmus des zugehörigen E-Moduls	$\ln(E, T_{\text{klein}})$			12,1389	12,1495	12,1548	12,1600	12,1495	12,2011
Logarithmus des zugehörigen E-Moduls	$\ln(E, T_{\text{groß}})$			12,0839	12,0951	12,1063	12,1118	12,1118	12,1653
Hilfsgröße Steigung	E,Steigung		$(\ln(\beta, T_{\text{klein}}) - \ln(\beta, T_{\text{groß}})) / ((1/T_{\text{klein}}) - (1/T_{\text{groß}}))$	0,1099	0,1087	0,0971	0,0965	0,0755	0,0716
Hilfsgröße Schnittpunkt Rm	E,Schnitt		$\ln(\beta, T_{\text{klein}}) - \text{Steigung} \cdot 1000 / T_{\text{klein}}$	11,8641	11,8777	11,9121	11,9187	11,9608	12,0220
Logarithmus des zu berechnenden E-Moduls	$\ln(E, T^*)$			12,0931	12,1042	12,1143	12,1198	12,1181	12,1712
E-Modul für Tc	E, T*			1,79E+05	1,81E+05	1,82E+05	1,83E+05	1,83E+05	1,93E+05
Dichte für T*									
Logarithmus der zugehörigen Dichte	$\ln(\rho, T_{\text{klein}})$			8,9516	8,9554	8,9567	8,9567	9,0204	9,0360
Logarithmus der zugehörigen Dichte	$\ln(\rho, T_{\text{groß}})$			8,9477	8,9554	8,9567	8,9567	9,0155	9,0360
Hilfsgröße Steigung Dichte	$\rho, \text{Steigung}$		$(\ln(\beta, T_{\text{klein}}) - \ln(\beta, T_{\text{groß}})) / ((1/T_{\text{klein}}) - (1/T_{\text{groß}}))$	0,0078	0,0000	0,0000	0,0000	0,0097	0,0000
Hilfsgröße Schnittpunkt Dichte	$\rho, \text{Schnitt}$		$\ln(\beta, T_{\text{klein}}) - \text{Steigung} \cdot 1000 / T_{\text{klein}}$	8,9321	8,9554	8,9567	8,9567	8,9961	9,0360
Logarithmus der zu berechnenden Dichte	$\ln(\rho, T^*)$			8,9483	8,9554	8,9567	8,9567	9,0163	9,0360
Dichte für T*	ρ, T^*			7.694,99	7.750,00	7.760,00	7.760,00	8.236,65	8.400,00
Berechnung der Dichte mittels beta, Tc			$\rho, T = \rho, 20 / (1 + \beta, T^* (T^* - 20^\circ\text{C})) \exp 3$	7.611,99	7.573,19	7.630,29	7.633,43	8.232,61	8.244,79
Wärmeleitfähigkeit für T*									
Logarithmus der zugehörigen Wärmeleitfähigkeit	$\ln(\lambda, T_{\text{klein}})$			3,6109	3,2426	3,3673	3,3673	2,9285	2,8904

Logarithmus der zugehörigen Wärmeleitfähigkeit	$\ln(\lambda, T_{\text{groß}})$			3,5553	3,2426	3,4012	3,4012	3,0301	2,9806
Hilfsgröße Steigung	$\lambda, \text{Steigung}$		$(\ln(\lambda, T_{\text{klein}}) - \ln(\lambda, T_{\text{groß}})) / ((1/T_{\text{klein}}) - (1/T_{\text{groß}}))$	0,1111	0,0000	-0,0678	-0,0678	-0,2032	-0,1805
Hilfsgröße Schnittpunkt λ	$\lambda, \text{Schnitt}$		$\ln(\lambda, T_{\text{klein}}) - \text{Steigung} \cdot (1000/T_{\text{klein}})$	3,3331	3,2426	3,5368	3,5368	3,4366	3,3416
Logarithmus der zu berechnenden Wärmeleitfähigkeit	$\ln(\lambda, T^*)$			3,5646	3,2426	3,3955	3,3955	3,0132	2,9656
Wärmeleitfähigkeit für T^*	λ, T^*			35,33	25,60	29,83	29,83	20,35	19,41
spezifische Wärmekapazität für T^*									
Logarithmus der zugehörigen Wärmekapazität	$\ln(c_p, T_{\text{klein}})$			6,4135	6,4297	6,4297	6,2344	6,2691	6,2596
Logarithmus der zugehörigen Wärmekapazität	$\ln(c_p, T_{\text{groß}})$			6,5221	6,5554	6,5367	6,3630	6,2989	6,3063
Hilfsgröße Steigung	$c_p, \text{Steigung}$		$(\ln(c_p, T_{\text{klein}}) - \ln(c_p, T_{\text{groß}})) / ((1/T_{\text{klein}}) - (1/T_{\text{groß}}))$	-0,2173	-0,2513	-0,2139	-0,2572	-0,0597	-0,0934
Hilfsgröße Schnittpunkt R_m	$c_p, \text{Schnitt}$		$\ln(c_p, T_{\text{klein}}) - \text{Steigung} \cdot 1000/T_{\text{klein}}$	6,9566	7,0579	6,9646	6,8775	6,4184	6,4931
Logarithmus der zu berechnenden Wärmekapazität	$\ln(c_p, T^*)$			6,5040	6,5344	6,5189	6,3416	6,2940	6,2985
Wärmekapazität für T^*	c_p, T^*			667,80	688,43	677,81	567,70	541,30	543,75
Werkstoffeigenschaften (aus Werkstoffdaten interpoliert)									
Werkstoff Ferrit/Martensit (1) oder Austenit (2)				1	1	1	1	0	0
Zugfestigkeit bei Raumtemperatur	R_m	N/mm ²		480,00	690,00	620,00	700,00	700,00	970,00
Streckgrenze (0,2%-Dehngrenze) bei T^*	$Re(T^*)$	N/mm ²		143,40	306,00	308,00	348,00	202,00	480,00
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei T^*	β_{L}	1/K		1,40E-05	1,21E-05	1,22E-05	1,19E-05	1,38E-05	1,36E-05
Elastizitäts-Modul bei T^*	E	N/mm ²		1,79E+05	1,81E+05	1,82E+05	1,83E+05	1,83E+05	1,93E+05
Querkontraktionszahl	ν_y			0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
zur Berechnung Dth									
Wärmekapazität bei 20°C	$c_p, 20$	J/kgK		0,00	448,00	430,00	420,00	485,00	426,00

spezifische Wärmekap. bei T*	cp,T*	J/kgK		520	688,43	677,81	567,70	541,30	543,75
mittlere Wärmekapazität von 20°C bis zur Temperatur T*	cp,20,T*	J/kgK		667,80	688,43	677,81	567,70	541,30	543,75
differentielle Wärmekapazität	cp,diff,T*	J/kgK	$cp,diff,t = cp,20,t + (\Delta cp,20,t / \Delta t) \cdot (t-20^\circ\text{C})$	533	688,43	677,81	567,70	541,30	543,75
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient von 20°C bis zur Temperatur T*	beta 20,t	1/K		1,40E-05	1,21E-05	1,22E-05	1,19E-05	1,38E-05	1,36E-05
Dichte bei T*	roh,T*	kg/m³	$roh,T^* = roh,20 / (1 + beta_{20,T^*} \cdot (T^* - 20^\circ\text{C})) \cdot \exp(3)$	7.611,99	7.573,19	7.630,29	7.633,43	8.232,61	8.244,79
temperaturabh. Wärmeleitfähigkeit bei T*	lambda,T*	W/mK		35,33	25,60	29,83	29,83	20,35	19,41
Temperaturleitfähigkeit (Wärmeleitzahl) bei t*	Dth aus EN 12952	mm²/s		10,19	10,19	10,19	10,19	10,19	10,19
Temperaturleitfähigkeit (Wärmeleitzahl) bei T*	Dth errechnet	mm²/s	$Dth = \lambda_{T^*} / ((\rho_{T^*}) \cdot (c_{p,diff,T^*}))$	6,949387634	4,910204624	5,76793423	6,8838171	4,56709574	4,32866123
Faktoren:									
emb/ems			emb/ems	0,01	0,05	0,09	0,12	0,27	0,62
Zeta	zeta		$zeta = dmb/dms \cdot \sqrt{dms/2/ems}$	0,01	0,07	0,11	0,13	0,21	0,34
Berechnungskonstante A	A		$A = -1,14 \cdot (emb/ems)^2 - 0,89 \cdot (emb/ems) + 1,43$	1,42	1,39	1,34	1,30	1,11	0,43
Berechnungskonstante B	B		$B = 0,326 \cdot (emb/ems)^2 - 0,59 \cdot (emb/ems) + 1,08$	1,08	1,05	1,03	1,01	0,94	0,84
Spannungskonzentrationsfaktor für Zylinderschalen aus der Bauteilgeometrie folgend	alpha m		$alpha\ m = 2,2 + \exp(A \cdot Zeta \cdot B)$	2,24	2,44	2,60	2,68	2,91	2,83
Der Spannungskonzentrationsfaktor bei Wärmespannung alpha t für Zylinderschalen ist abhängig vom Medium (Wasser oder Dampf)									
Wasser / Dampf									
Wärmeübergangskoeffizient für Wasser / Dampf	h	W/m²K		1000	1000	1000	1000	1000	1000
Berechnungskonstante	z		dmb/dms	0,02	0,07	0,09	0,10	0,12	0,13
Spannungskonzentrationsfaktor infolge von thermischer Erwärmung	alpha t		$alpha\ t = \left(\frac{2 - ((h+2700) / (h+1700))z + (h / (h+1700)) (\exp(-7z)-1)}{0,81(z^2)} \right)^2 \cdot \sqrt{2}$	1,93	1,77	1,70	1,68	1,64	1,61
u0	u0		dos/(dms-ems)	13,77	3,03	2,02	1,77	1,35	1,15

Hilfsgröße für gamma	$(u0 - 1)^2$		$(u0 - 1)^2$	162,98	4,12	1,04	0,59	0,12	0,02
	$(u0)^2 - 1$		$(u0)^2 - 1$	188,52	8,19	3,09	2,14	0,82	0,33
	$3(u0)^2 - 1$		$3(u0)^2 - 1$	567,55	26,56	11,26	8,41	4,45	2,98
	$4(u0)^4 \cdot \ln u0$		$4(u0)^4 \cdot \ln u0$	376.722,87	374,22	46,99	22,47	3,94	0,99
Formfaktor für Zylinderschalen	gamma		$\text{gamma} = \frac{(u0 \exp^2 - 1) \cdot (3u0 \exp^2 - 1) - 4(u0 \exp^4) \cdot \ln(u0)}{8 \cdot (u0 \exp^2 - 1) \cdot (u0 - 1) \exp^2}$	-1,10	-0,58	-0,48	-0,45	-0,39	-0,36
Berechnung der Hilfsvariablen W zur Bestimmung der Wärmespannungen, die durch die Temperaturdifferenz hervorgerufen werden	W	MPa/K	$W = \alpha t \cdot \beta L1 \cdot Et / (1 - \nu y)$	6,89	5,50	5,44	5,27	5,89	6,02
Konstante V zur Berechnung des zulässigen Temperaturgefälle $\nu y(t)$ in den Zeilen 212, 214, 216, 218 und 226	V	1/s	$V = Dth / (\text{gamma} \cdot \text{ems} \exp^2)$	-2,39E-06	-1,26E-04	-7,15E-04	-1,60E-03	-6,00E-03	-3,25E-02
Berechnung des zulässigen Temperaturgefälles (S.132)									
Anzahl der Lastwechsel über den Lebenszeitraum	N			360	360	360	360	360	360
Annahme: Bei nicht spezifizierter Ermüdungsbeanspruchung und einer Annahme von 2000 Kaltstarts darf der Erschöpfungsgrad den Wert 0,4 nicht übersteigen. (S. 85)									
Resultierende Maximalzahl an Lastwechseln	Na		$Na = N/0,4$	900	900	900	900	900	900
Spannungsschwingbreite	2fas	MPa	$2fas = 0,8 Rm + (173150 - 0,8 Rm) Na^{-0,547}$	4566,997698	4730,930095	4676,28596	4738,7364	4738,7364	4949,50662
Spannungssicherheitsbeiwert (zur Berechnung der Spannungsschwingbreite in Zeile 86 und Zeile 166)	Ss			1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Lastspielsicherheitsbeiwert	SL			10	10	10	10	10	10
	Nal		$NAL = Na \cdot SL$	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
Spannungsschwingbreite	2faL	MPa	$2faL = 0,8 Rm + (173150 - 0,8 Rm) NaL^{-0,547}$	1.571,10	1.737,95	1.682,33	1.745,89	1.745,89	1.960,41

Die zulässige Schwingungsbreite ist gleich dem Minimum der Spannungen $2f_aS / S_s$ und $2f_aL$									
zulässige Spannungsschwingbreite:	f^*at^*	MPa	$f^*at^* \leq \min(2f_aS/S_s \text{ und } 2f_aL)$	1.571,10	1.737,95	1.682,33	1.745,89	1.745,89	1.960,41
Korrekturbeiwert	CtF (Ferrit)		$Ct^* = 1,03 - (1,5 \times 10^{-4})T^* - (1,5 \times 10^{-6})T^{*2}$	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
	CtA (Austenit)		$Ct^*A = 1,043 - (4,3 \times 10^{-4})T^*$	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
Maßgebende Spannungsschwingbreite	$2f^*a$	MPa	$2f^*a = 2f^*at^* \times Ct^*$	962,14	1.064,32	1.030,26	1.069,18	1.460,61	1.640,08
Bestimmung der (virtuellen) maßgebenden Spannungsschwingbreite im elastischen, teilplastischen und vollplastischen Bereich ohne Kenntnis der Mittelspannung									
Prüfung elastischer Bereich: Wenn die maßgebende Spannungsschwingbreite kleiner als die Streckgrenze ist, dann	$2f^*va$	MPa	WENN $2f^*a < Re(T^*)$ DANN $2f^*va = 2f^*a$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Prüfung teilplastischer Bereich: Wenn die maßgebende Spannungsschwingbreite größer als die Streckgrenze und kleiner als die doppelte Streckgrenze ist, dann	$2f^*va$	MPa	WENN $Re(T^*) \leq 2f^*a \leq 2Re(T^*)$ DANN $2f^*va = 2Rm(X+Y+SQRT(1-2YX+Y^2))$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
mit den Hilfsvariablen X und Y:	Y		$Y = Rm / 2f^*a$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	X		$X = Re(T^*) / Rm$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Prüfung vollplastischer Bereich: Wenn die maßgebende Spannungsschwingbreite größer als die doppelte Streckgrenze ist, dann	$2f^*va$	MPa	WENN $2f^*a > 2Re(T^*)$ DANN $2f^*va = SQRT(2Re(T^*) \times 2f^*a)$	525,30	807,07	796,64	862,64	768,17	1.254,78
Korrigierte Spannungsschwingbreite	$2f^*va$	MPa	Der aus den Bedingungen ermittelte Wert	525,30	807,07	796,64	862,64	768,17	1.254,78
Kerbfaktoren, falls zutreffend:									
Ck1 errechnet sich aus der Zugfestigkeit bei Raumtemperatur und der zu erwartenden Anzahl der Lastspiele bis zur Rissbildung N_a									
Bestimmung des Zwischenwertes aus Tab. B.5 für N_a und die der jeweiligen Zugfestigkeit zugehörigen Werte			Faktor*lg(N_a)+Korrekturwert	1,1503	1,5338	1,4122	1,5531	1,5531	2,3338

Vergleich des Zwischenwertes mit dem oberen und unteren Grenzwert	Ck1			1,5770	1,7443	1,7097	1,7493	1,7493	2,3338
	Ck0			1	1	1	1	1	1
	Ck2			1	1	1	1	1	1
	Ck3			1	1	1	1	1	1
	Ck		$Ck = Ck0 \times Ck1 \times Ck2 \times Ck3$	1,5770	1,7443	1,7097	1,7493	1,7493	2,0000
Mit Kerbfaktoren korrigierte Spannungsschwingbreite	delta fv	MPa	$\text{delta fv} = 2f^*v_a / Ck$	333,10	462,69	465,94	493,14	439,13	627,39
Spannungsanalyse für die Ermüdungsberechnung (Tresca Vergleichsspg. zzgl. des wirksamen Innendrucks)									
	Sp,0	MPa	$Sp,0 = (\text{alpham} \times \text{dms}/2/\text{ems}+1) \times p0$	64,31	95,67	135,50	162,73	302,89	590,53
	Sp,min	MPa	$Sp,\text{min} = (\text{alpham} \times \text{dms}/2/\text{ems}+1) \times p\text{min}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sp,max	MPa	$Sp,\text{max} = (\text{alpham} \times \text{dms}/2/\text{ems}+1) \times p\text{max}$	64,31	95,67	135,50	162,73	302,89	590,53
	delta Sp	MPa	$\text{delta Sp} = Sp,\text{max} - Sp,\text{min}$	64,31	95,67	135,50	162,73	302,89	590,53
Beiwert gs ($0 \leq gs \leq 1$)	gs			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
unterer Grenzwert der Umfangsspannung	S1	MPa	$S1 = Sp,\text{min} + (\text{delta Sp} - \text{delta fv}) \times (1 - gs)$	-268,79	-367,03	-330,44	-330,41	-136,25	-36,86
oberer Grenzwert der Umfangsspannung	S2	MPa	$S2 = S1 + \text{delta fv}$	64,31	95,67	135,50	162,73	302,89	590,53
FALL (austenitische Werkstoffe in Kontakt mit Wasser oder Dampf oder andere Werkstoffe nur in Kontakt mit Dampf)									
kleinste zulässige Umfangsspannung an der Innenfläche einer Bohrung:	f1		$f1 = S1$	-268,79	-367,03	-330,44	-330,41	-136,25	-36,86
maximal zulässige Umfangsspannung an der Innenfläche einer Bohrung:	f2		$f2 = S2$	64,31	95,67	135,50	162,73	302,89	590,53
Berechnung der Mittelspannung	fv	MPa	$fv = (f1+f2)/2$	-102,24	-135,68	-97,47	-83,84	83,32	276,83
Erneute Überprüfung des elastischen Bereichs									
Um Kerbfaktoren korrigierte Mittelspannung	f*v		$f^*v = fv \times Ck$	-161,23	-236,67	-166,64	-146,66	145,75	553,67

Bestimmung der maßgebenden Spannungsschwingbreite im elastischen, teilplastischen und vollplastischen Bereich?									
Prüfung elastischer Bereich: Wenn die maßgebende Spannungsschwingbreite kleiner als die Streckgrenze ist, dann	2f*a	MPa	WENN fv* + f*va < Re(t*) DANN 2f*a = 2f*va / (1 - (fv*/RM)^2)	0	0	0	0	0	0
Prüfung teilplastischer Bereich f*v: Wenn die maßgebende Spannungsschwingbreite größer als die Streckgrenze und kleiner als die doppelte Streckgrenze ist, dann	2f*a	MPa	WENN fv* + f*va > Re(t*) UND f*va <= Re(t*) DANN 2f*a = 2f*va / ((1 - f*vR/RM)^2)	0	0	0	0	0	0
verminderte Mittelspannung	f*vR		Re(t*) - 2f*va/2	0	0	0	0	0	0
Prüfung vollplastischer Bereich: WENN die korrigierte Spannungsschwingbreite größer als die Streckgrenze ist, DANN errechnet sich die maßgebende Spannungsschwingbreite:	2f*a	MPa	WENN 2f*va > 2Re(t*) DANN 2f*a = (2f*va)^2 / (2Re(t*))	461.802.930	63.943	2.628	797	1.102	1.527
Ergebnis der Bereichsüberprüfung:	2f*a	MPa		461.802.930	63.943	2.628	797	1.102	1.527
Korrekturfaktor Ferrit/Austenit	Ct*			0,6124	0,6124	0,6124	0,6124	0,8366	0,8366
maßgebende Spannungsschwingbreite bei der Referenztemperatur	2f*a(t*)	MPa	2f*a(t*) = 2f*a/Ct*	754.087.083	104.413	4.292	1.302	1.317	1.825
Spannungsschwingbreite für die theoretische Lastwechselzahl	2fas	MPa	2fas = 2f*a(t*) x Ss	1.131.130.625	156.620	6.438	1.953	1.976	2.738
theoretische Lastwechselzahl unter Berücksichtigung des Spannungssicherheitsbeiwerts	Nas		Nas = ((2fas - 0,8Rm) / (173150 - 0,8Rm))^(1/-0,547)	0	1	473	6.707	6.506	3.578
Spannungsschwingbreite	2faL	MPa	2faL = 2f*a(t*)	754.087.083	104.413	4.292	1.302	1.317	1.825
theoretische Lastwechselzahl unter Berücksichtigung des Lastspielsicherheitsbeiwerts	NAL		NAL = ((2faL - 0,8Rm) / (173150 - 0,8Rm))^(1/-0,547)	0	3	1.074	21.216	20.424	11.235
Anzahl der Lastspiele bis zur beginnenden Rissbildung			N = MIN (NAs, NAL/SL)	0	0	107	2.122	2.042	1.124
Anzahl der Lastwechsel (N=Nas=2000/0,4)	N			360	360	360	360	360	360
Erschöpfung:	Ersch.		Erschöpfung = n/N	16.244.780.202	1.422,479545	3,35330911	0,1696804	0,17626253	0,32041646

VB-Makro: Gradienten_und_Erschöpfungsberechnung_Neurath

Sub Gradienten_und_Erschöpfungsberechnung_Neurath()

Dim N As Integer 'Für die Auswertung Nr. 5 ist die Dimensionierung von N zu entfernen und oben (N) als Übergabeparameter zu definieren

Dim I As Integer

Dim Z100H As Integer ' Zähler für die Übertragung der Werte 100.000 Stunden Heißstart

Dim Z150H As Integer ' Zähler für die Übertragung der Werte 150.000 Stunden Heißstart

Dim Z200H As Integer ' Zähler für die Übertragung der Werte 200.000 Stunden Heißstart

Dim Z100W As Integer ' Zähler für die Übertragung der Werte 100.000 Stunden Warmstart

Dim Z150W As Integer ' Zähler für die Übertragung der Werte 150.000 Stunden Warmstart

Dim Z200W As Integer ' Zähler für die Übertragung der Werte 200.000 Stunden Warmstart

Z100H = 6

Z150H = 6

Z200H = 6

Z100W = 6

Z150W = 6

Z200W = 6

'For N = 0 To 10 'Schleife dient der Variation der Anfahrzeiten

'Auswertung 1

'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(92, 5) = 100 + (Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(7 + N, 2))

'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(103, 5) = 60 + (Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(7 + N, 2))

'Anweisung für den Aufruf als Subroutine für die Kostenermittlung in Abhängigkeit von der Afahrzeit

'Auswertung 5

'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(92, 5) = 100 + (Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(72 + N, 2))

'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(103, 5) = 60 + (Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(72 + N, 2))

'Berechnung der Daten (100.000 Stunden Heißstart)

For I = 1 To Z100H

Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(46, I + 11) = 100000 'Auslegungszeitraum

Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(47, I + 11) = ("Heißstart") 'Starttyp

Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(48, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(17, I + 11) 'Minimaltemperatur beim Start

Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(50, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(18, I + 11) 'Minimaldruck beim Start

Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(52, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(19, I + 11) 'Zeit bis Turbinenbedingung

Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(54, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(16, I + 11) 'Anzahl Heißstarts

Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(60, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(9, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers

'Rückführung der Ergebnisse

```
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(42, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(269, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(43, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(271, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(44, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(325, I + 11) 'Erschöpfung  
Next I
```

'Berechnung der Daten (150.000 Stunden Heißstart)

```
For I = 1 To Z150H
```

```
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(46, I + 11) = 150000 'Auslegungszeitraum  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(47, I + 11) = ("Heißstart") 'Starttyp  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(48, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(17, I + 11) 'Minimaltemperatur beim Start  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(50, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(18, I + 11) 'Minimaldruck beim Start  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(52, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(19, I + 11) 'Zeit bis Turbinenbedingung  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(54, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(16, I + 11) 'Anzahl Heißstarts  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(60, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(10, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers  
'Rückführung der Ergebnisse  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(38, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(269, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(39, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(271, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(40, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(325, I + 11) 'Erschöpfung  
Next I
```

'Berechnung der Daten (200.000 Stunden Heißstart)

```
For I = 1 To Z200H
```

```
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(46, I + 11) = 200000 'Auslegungszeitraum  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(47, I + 11) = ("Heißstart") 'Starttyp  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(48, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(17, I + 11) 'Minimaltemperatur beim Start  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(50, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(18, I + 11) 'Minimaldruck beim Start  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(52, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(19, I + 11) 'Zeit bis Turbinenbedingung  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(54, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(16, I + 11) 'Anzahl Heißstarts  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(60, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(11, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers  
'Rückführung der Ergebnisse  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(34, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(269, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(35, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(271, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(36, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(325, I + 11) 'Erschöpfung  
Next I
```

'Berechnung der Daten (100.000 Stunden Warmstart)

```
For I = 1 To Z100W
```

```
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(46, I + 11) = 100000 'Auslegungszeitraum  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(47, I + 11) = ("Warmstart") 'Starttyp  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(48, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(13, I + 11) 'Minimaltemperatur beim Start  
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(50, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(14, I + 11) 'Minimaldruck beim Start
```

```
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(52, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(15, I + 11) 'Zeit bis Turbinenbedingung
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(54, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(12, I + 11) 'Anzahl Warmstarts
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(60, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(9, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers
'Rückführung der Ergebnisse
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(30, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(269, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(31, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(271, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(32, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(325, I + 11) 'Erschöpfung
Next I
```

'Berechnung der Daten (150.000 Stunden Warmstart)

```
For I = 1 To Z150W
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(46, I + 11) = 150000 'Auslegungszeitraum
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(47, I + 11) = ("Warmstart") 'Starttyp
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(48, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(13, I + 11) 'Minimaltemperatur beim Start
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(50, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(14, I + 11) 'Minimaldruck beim Start
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(52, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(15, I + 11) 'Zeit bis Turbinenbedingung
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(54, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(12, I + 11) 'Anzahl Warmstarts
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(60, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(10, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers
'Rückführung der Ergebnisse
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(26, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(269, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(27, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(271, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(28, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(325, I + 11) 'Erschöpfung
Next I
```

'Berechnung der Daten (200.000 Stunden Warmstart)

```
For I = 1 To Z200W
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(46, I + 11) = 200000 'Auslegungszeitraum
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(47, I + 11) = ("Warmstart") 'Starttyp
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(48, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(13, I + 11) 'Minimaltemperatur beim Start
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(50, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(14, I + 11) 'Minimaldruck beim Start
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(52, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(15, I + 11) 'Zeit bis Turbinenbedingung
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(54, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(12, I + 11) 'Anzahl Warmstarts
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(60, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(11, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers
'Rückführung der Ergebnisse
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(22, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(269, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(23, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(271, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens
Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(24, I + 11) = Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(325, I + 11) 'Erschöpfung
Next I
```



```
'For I = 1 To 6 'Übertrag der Ergebnisse der Schleife zu den reduzierten Anfahrzeiten
'Übertragung der Reduktion der Anfahrzeit in Minuten
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(153 + N, I + 3) = (Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(7 + N, 2))
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(166 + N, I + 3) = (Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(7 + N, 2))
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(179 + N, I + 3) = (Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(7 + N, 2))
'Übertragung der Summe des Lebensdauer verbrauchs aus Heiß- und Warmstarts
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(153 + N, I + 11) = (Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(24, I + 11)
+ Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(36, I + 11)) * 100
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(166 + N, I + 11) = (Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(28, I + 11)
+ Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(40, I + 11)) * 100
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(179 + N, I + 11) = (Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(32, I + 11)
+ Worksheets("Gradient und Erschöpfung").Cells(44, I + 11)) * 100
'Next I
'Next N
End Sub
```

WS 9: Berechnungsparameter, Ermittlung und Vorbereitung aller für die Wirtschaftlichkeitsberechnung erforderlichen Größen

Berechnung des Verfügbarkeitsgewinns aus dem Anfahrgradienten und dem Lebensdauerverbrauch									
Kraftwerksblock				KW Neurath, 1100 MW, Ü4-Sammler					
Material				10CrMo9-10	X20CrMo V11-1	P91	P92	A617	C263
Parameter Name	Formelzeichen	Einheit	Formel / Quelle						
Betriebsdruck	pc	N/mm ²		29,50	29,50	29,50	29,50	29,50	29,50
Berechnungstemperatur	Tc	°C		615,00	615,00	615,00	615,00	615,00	615,00
Importtabelle veränderlicher Daten									
Wanddicke 100.000h				1.140,46	232,31	119,70	89,26	44,30	18,85
Wanddicke 150.000h				1.627,72	258,92	130,22	98,27	44,32	19,29
Wanddicke 200.000h				5.947,58	336,25	127,18	112,46	45,85	20,02
Anzahl Warmstarts pro Jahr	WSpa			40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
minimale Temperatur Warmstart	TminWS	°C		120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
minimaler Druck Warmstart	PminWS	N/mm ²		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anfahrzeit bis Turbinenbedingungen (Referenzwerkstoff)				100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Anzahl Heißstarts	HSpa			100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
minimale Temperatur Heißstart	TminHS	°C		360,00	360,00	360,00	360,00	360,00	360,00
minimaler Druck Heißstart	PminHS	N/mm ²		6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Anfahrzeit bis Turbinenbedingungen (Referenzwerkstoff)				80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
Import der Ergebnisse 200 warm									
Gradient zu Beginn des Anfahrens	ny t1	K/Min.	ny t1 = dt1 x V*60	0,0002	0,2246	2,1175	3,5972	4,3457	-9,5855
Gradient zum Ende des Anfahrens	ny t1'	K/Min.	ny t1' = dt1' x V*60	0,0003	0,2886	3,2620	5,5929	21,0605	162,7087
Erschöpfung:	Ersch.		Erschöpfung = n/N	2.598*10 ⁹	35.553,5399	7,5291	1,2451	0,4595	0,7318

Import der Ergebnisse 150 warm									
Gradient zu Beginn des Anfahrens	ny t1	K/Min.	$ny\ t1 = dt1 \times V \cdot 60$	0,0044	0,4071	2,0213	4,6306	4,1566	-15,3888
Gradient zum Ende des Anfahrens	ny t1'	K/Min.	$ny\ t1' = dt1' \times V \cdot 60$	0,0057	0,5386	3,0898	7,5994	22,6580	175,9133
Erschöpfung:	Ersch.		Erschöpfung = n/N	$43 \cdot 10^9$	3.793,2788	8,9422	0,4616	0,4794	0,8544
Import der Ergebnisse 100 warm									
Gradient zu Beginn des Anfahrens	ny t1	K/Min.	$ny\ t1 = dt1 \times V \cdot 60$	0,0101	0,5187	2,3830	5,4947	4,1543	-19,3383
Gradient zum Ende des Anfahrens	ny t1'	K/Min.	$ny\ t1' = dt1' \times V \cdot 60$	0,0134	0,6968	3,7492	9,4413	22,6754	184,4041
Erschöpfung:	Ersch.		Erschöpfung = n/N	$2 \cdot 10^9$	1.521,7736	4,8693	0,2583	0,4796	0,9353
Import der Ergebnisse 200 heiß									
Gradient zu Beginn des Anfahrens	ny t1	K/Min.	$ny\ t1 = dt1 \times V \cdot 60$	0,0000	0,1359	1,2675	1,7673	3,3616	9,4080
Gradient zum Ende des Anfahrens	ny t1'	K/Min.	$ny\ t1' = dt1' \times V \cdot 60$	0,0001	0,1844	2,1334	3,2475	17,2636	148,5752
Erschöpfung:	Ersch.		Erschöpfung = n/N	$112.161 \cdot 10^9$	$138.793.764$	19,4097	5,0389	0,5378	0,3190
Import der Ergebnisse 150 heiß									
Gradient zu Beginn des Anfahrens	ny t1	K/Min.	$ny\ t1 = dt1 \times V \cdot 60$	0,0009	0,2445	1,2123	2,2107	3,1851	6,1123
Gradient zum Ende des Anfahrens	ny t1'	K/Min.	$ny\ t1' = dt1' \times V \cdot 60$	0,0019	0,3442	2,0207	4,4127	18,5731	160,6328
Erschöpfung:	Ersch.		Erschöpfung = n/N	$1.869 \cdot 10^9$	14.763,8962	23,1380	1,9300	0,5661	0,3635
Import der Ergebnisse 100 heiß									
Gradient zu Beginn des Anfahrens	ny t1	K/Min.	$ny\ t1 = dt1 \times V \cdot 60$	0,0020	0,3102	1,4183	2,5549	3,1830	3,8171
Gradient zum Ende des Anfahrens	ny t1'	K/Min.	$ny\ t1' = dt1' \times V \cdot 60$	0,0044	0,4453	2,4520	5,4821	18,5873	168,3860
Erschöpfung:	Ersch.		Erschöpfung = n/N	$85 \cdot 10^9$	5.912,9814	12,4188	1,0061	0,5664	0,4045
Berechnung Neurath ausführen									
Export der Ergebnisse 200 warm									
Kalendarischer Nutzungszeitraum (ins DCF)	t,Nu	Jahre	aus Zeile 157	0,0000	0,0004	2,0650	11,9098	41,9342	37,5864
Anfahrkostendifferenz über Anzahl Anfahrvorgänge pro Jahr	ANK,Diff/Jahr	T€	aus Zeile 182	14.120.517	13.239	801	0	-150	-1.195
Verfügbarkeitsgewinn pro Jahr	VG	%	aus Zeile 191	-9511,0000	-8,9172	-0,5396	0,0000	0,1008	0,8049
Differenzkosten IH, Wartung und Betrieb (ins DCF)	K,Diff,Betrieb	T€	aus Zeile 125	$51.362 \cdot 10^{12}$	9.907.485	1.021	78	5	5
Rückgabe berechneter Kapitalwert (aus DCF)		Mio.€		-49089,1546	-47,3523	-2,7464	0,0000	1,2566	2,0533
Rückgabe zulässiges Invest (aus DCF)		Mio.€		-81314,2308	-78,4373	-4,5493	0,0000	2,0814	3,4013

Export der Ergebnisse 150 warm									
Kalendarischer Nutzungszeitraum (ins DCF)	t,Nu	Jahre	aus Zeile 157	0,00	0,00	1,74	31,07	41,59	33,85
Anfahrkostendifferenz über Anzahl Anfahrvorgänge pro Jahr	ANK,Diff/Jahr	T€	aus Zeile 182	709.292	7.109	977	-388	77	-878
Verfügbarkeitsgewinn pro Jahr angepasst (ins DCF)	VG	% / 100	aus Zeile 191	-636,9995	-6,3848	-0,8779	0,1741	-0,0691	0,7886
Differenzkosten IH, Wartung und Betrieb (ins DCF)	K,Diff,Betrieb	T€	aus Zeile 125	75*10 ¹²	841.939	1.239	0	5	5
Rückgabe berechneter Kapitalwert (aus DCF)		Mio.€		-2456,0724	-25,3344	-3,3742	1,0530	0,5862	1,0868
Rückgabe zulässiges Invest (aus DCF)		Mio.€		-4068,3861	-41,9655	-5,5892	1,7443	0,9711	1,8003
Export der Ergebnisse 100 warm									
Kalendarischer Nutzungszeitraum (ins DCF)	t,Nu	Jahre	aus Zeile 157	0,00	0,01	3,20	45,25	41,58	31,39
Anfahrkostendifferenz über Anzahl Anfahrvorgänge pro Jahr	ANK,Diff/Jahr	T€	aus Zeile 182	307.658	5.157	443	-600	184	-730
Verfügbarkeitsgewinn pro Jahr (ins DCF)	VG	%	aus Zeile 191	-414,4511	-6,9477	-0,5964	0,4042	-0,2472	0,9840
Differenzkosten IH, Wartung und Betrieb (ins DCF)	K,Diff,Betrieb	T€	aus Zeile 125	2*10 ¹²	311.246	618	0	5	5
Rückgabe berechneter Kapitalwert (aus DCF)		Mio.€		-1062,7228	-18,3409	-1,4737	1,6308	0,2071	0,3823
Rückgabe zulässiges Invest (aus DCF)		Mio.€		-1760,3579	-30,3810	-2,4412	2,7013	0,3431	0,6333
Export der Ergebnisse 200 heiß									
Kalendarischer Nutzungszeitraum (ins DCF)	t,Nu	Jahre	aus Zeile 157	0,00	0,00	0,46	1,75	29,40	50,33
Anfahrkostendifferenz über Anzahl Anfahrvorgänge pro Jahr	ANK,Diff/Jahr	T€	aus Zeile 182	81.390.458	26.975	1.315	0	-1.048	-1.795
Verfügbarkeitsgewinn pro Jahr (ins DCF)	VG	%	aus Zeile 191	54.821,2671	-18,1691	-0,8858	0,0000	0,7062	1,2093
Differenzkosten IH, Wartung und Betrieb (ins DCF)	K,Diff,Betrieb	T€	aus Zeile 125	3.954.283* 10 ¹²	68.681.063	4.814	827	8	5
Rückgabe berechneter Kapitalwert (aus DCF)		Mio.€		-47279,4705	-17,5138	-0,9325	0,0000	0,6829	0,9451
Rückgabe zulässiges Invest (aus DCF)		Mio.€		-78316,5610	-29,0109	-1,5446	0,0000	1,1311	1,5655
Export der Ergebnisse 150 heiß									
Kalendarischer Nutzungszeitraum (ins DCF)	t,Nu	Jahre	aus Zeile 157	0,00	0,00	0,39	4,49	29,42	48,84
Anfahrkostendifferenz über Anzahl Anfahrvorgänge pro Jahr	ANK,Diff/Jahr	T€	aus Zeile 182	4.285.494	14.453	1.693	-887	-541	-1.128
Verfügbarkeitsgewinn pro Jahr (ins DCF)	VG	%	aus Zeile 191	-3.848,7097	-12,9799	-1,5209	0,3981	0,4856	1,0132
Differenzkosten IH, Wartung und Betrieb (ins DCF)	K,Diff,Betrieb	T€	aus Zeile 125	5.819*10 ¹²	5.795.343	5.814	281	8	5
Rückgabe berechneter Kapitalwert (aus DCF)		Mio.€		-2407,3131	-9,3476	-1,1597	0,3858	0,4437	0,6930

Kosten Sammlerbetrieb (jährlich)									
Wartung und Instandhaltung		€/ Jahr		10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Wiederkehrende Prüfung, mittlere Kosten pro Jahr		€/ Jahr		5.000	5.000	5.000	5.000	10.000	10.000
Summe Betriebskosten		€/ Jahr		15.000	15.000	15.000	15.000	20.000	20.000
Referenzkosten Betrieb		€/ Jahr		15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
Differenzkosten Betrieb		€/ Jahr		0	0	0	0	5.000	5.000
Mehrkosten durch erhöhten Lebensdauerverbrauch		€/ Jahr		$38 \cdot 10^{18}$	8.060.441.667	884.044	94.807	0	0
Differenzkosten IH, Wartung und Betrieb (jährlich)		T€ / Jahr	ins DCF	$38 \cdot 10^{15}$	8.060.442	884	95	5	5
Auslegungszeit									
	Taus	h		200.000	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000
Warmstart / Heißstart									
				Warmstart	Warmstart	Warmstart	Warmstart	Warmstart	Warmstart
Anzahl der Lastwechsel pro Jahr									
	N			40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Material und Herstellungskosten (wanddickenabhängig)									
Wanddicke	es	mm	Wanddicke	5.947,58	336,25	127,18	112,46	45,85	20,02
Außendurchmesser	dos	mm	dis+2*es	12.150,16	927,49	509,37	479,92	346,69	295,05
Innendurchmesser	dis	mm	Kraftwerkskennwerte	255,00	255,00	255,00	255,00	255,00	255,00
Länge des Sammlers	l	mm	Kraftwerkskennwerte	27.840,00	27.840,00	27.840,00	27.840,00	27.840,00	27.840,00
Materialvolumen des Sammlers	V	m³	$\pi \cdot (l/1000) \cdot ((dos/2/1000)^2 - (dis/2/1000)^2)$	3.226,50	17,39	4,25	3,61	1,21	0,48
Gesamtgewicht des Sammlers	m	kg	V*roh,20	25.037.651	133.886	32.990	28.047	10.120	4.045,65
Materialkosten des Sammlers	MK,S	€	m*P,HZ	125.188.255	1.071.089	263.923	224.382	313.748	137.551,94
Fertigungsaufwand in Stunden	FA,Std	Std.	einsetzen	10.000	10.000	10.000	9.720	10.000	10.000
Stundensatz	Std,Satz	€/ Std.	Angebotspreise	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00
Herstellungskosten anteilig am Gesamtpreis	HK,ant	%	Werkstoffdaten	40%	40%	40%	40%	40%	40%
Herstellungskosten absolut	HK,abs	T€		650.000	650.000	650.000	631.800	650.000	650.000
Gesamtkosten errechnet	GK,rechn	T€	MK,S + HK,abs + GK,Nippel	125.967.359	1.850.192	1.043.026	985.285	1.092.852	916.655

Gesamtkosten laut vorliegendem Angebot	GK,Ang	T€	Angebotspreise	0		0	1.187.461	1.930.830	1.566.514
Gesamtkosten Sammler errechnet mit Anpassungsfaktor und Montage	GK,Sammler	T€	(GK,rechn * AF,Ang) + K,Summe	189.086.038	2.910.288	1.699.539	1.612.928	1.874.278	1.609.982
Gesamtkosten Referenzwerkstoff	GK,Ref	T€		1.612.927	1.612.927	1.612.927	1.612.927	1.612.927	1.612.927
Gesamtkosten Differenz	GK,Diff	T€	GK,Sammler - GK,Ref	187.473.110	1.297.360	86.612	0	261.350	-2.945
Anpassungsfaktor zur Angleichung der errechneten zu den Angebotskosten	AF,Ang			1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Nutzungszeitraum ab Inbetriebnahme									
Erschöpfung / Lebensdauerverbrauch				5.367*10 ¹²	72.886,19	14,69	2,55	0,62	0,76
Erschöpfung Referenzwert				2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55
Effektiver Betriebszeitraum des Sammlers nach Auslegung	tB,Ausl.	Jahre	tm / KWA	26,32	26,32	26,32	26,32	26,32	26,32
Betriebszeitraum mit veränderten Erschöpfungsdaten	tB,Ersch.		t,Ausl.*(1-Ersch/100)	0,00	0,00	1,79	10,33	36,38	32,61
Kalendarischer Nutzungszeitraum (ins DCF)	t,Nu	Jahre	tB,Ersch.*(8760/KWA)	0,0000	0,0004	2,0650	11,9098	41,9342	37,5864
Mehrkosten durch erhöhten Lebensdauerverbrauch			Ersch *	1.014*10 ¹⁸	212*10 ⁹	23.264.320	2.494.931	0	0
Anfahrtgradienten									
Beginn des Anfahrens	nyAn,Beginn	K/Min.	ny t1 * 60	0,00	0,22	2,12	3,60	4,35	-9,59
Ende des Anfahrens	nyAn,Ende	K/Min.	ny t1' * 60	0,00	0,29	3,26	5,59	21,06	162,71
Starttemperatur	Tmin,warm	°C	Kraftwerkskennwerte	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
Endtemperatur	Tmax,warm	°C	Kraftwerkskennwerte	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00
ungünstigerer Anfahrtsgradient	nyAn	K/Min.		0,00	0,22	2,12	3,60	4,35	-9,59
mittlerer Anfahrtsgradient	nyAn,mittl	K/Min.	(nyAn,Beginn + nyAn,Ende)/2	0,00	0,26	2,69	4,60	12,70	76,56
Sonderberechnung für den Referenzwerkstoff:			durch Einfügen der festen Referenzwerte für 200 th Warm- oder Heißstart						

Anfahrzeit	t,An	Min.	$(T_{max}-T_{min})/n_{y,An}$	2.168.611	2.136,78	226,68	133,44	110,45	-50,08
Anfahrzeit Referenz	t,An,Ref	Min.		133,44	133,44	133,44	133,44	133,44	133,44
Anfahrzeit Differenz	t,An,Diff	Min.	t,An - t,An,Diff	2.168.478	2.003,34	93,24	0,00	-22,98	-183,51
Anteil der technischen Umsetzbarkeit der Zeitersparnis	Anteil t,Diff	%		50%	50%	50%	50%	50%	50%
Anfahrkosten je Anfahrt	ANK,Anf	€ / Anfahrt	$t,An*(EB,Min*K,EB/100 + BV,Min*BK,sp)$	706.059.608	695.695,18	73.802,32	43.444,21	35.961,77	-16.303,77
Anfahrkosten Referenzwert	ANK,Ref	€ / Anfahrt		43.444,21	43.444,21	43.444,21	43.444,21	43.444,21	43.444,21
Anfahrkosten über/unter Referenzwert	ANK,Diff	€ / Anfahrt	ANK,Min - ANK,Ref	353.008.081	326.125,48	15.179,05	0,00	-3.741,22	-29.873,99
Anfahrkostendifferenz über Anzahl Anfahrvorgänge pro Jahr	ANK,pa	T€	ANK,delta*N	14.120.323	13.045	607	0	-150	-1.195
Anfahrkosten je Minute	ANK,Min	€		325,58	325,58	325,58	325,58	325,58	325,58
Anfahrkosten je Minute über Anzahl Anfahrvorgänge				13.023,26	13.023,26	13.023,26	13.023,26	13.023,26	13.023,26
"Merker" für Referenzanfahrzeit 200.000h							133,44		
"Merker" für ReferenzAnfahrkosten 200.000h							43.444,21		
Zeitgewinn in Nennlast	t+,nenn	Std./Jahr	$N*T,An,Diff/60$	-1.445.652	-1.336	-62	0	15	122
Verfügbarkeitsgewinn p.a (100%)	VG	%	$t+,Nenn/t,Nu/8760$	19.021,7388	-17,5732	-0,8179	0,0000	0,2016	1,6098
Anteiliger Verfügbarkeitsgewinn	Vg,ant	%	VG*AnteilVG	-9510,8694	-8,7866	-0,4090	0,0000	0,1008	0,8049
Material und Herstellungskosten (wanddickenunabhängig)									
Nippel									
Wanddicke	es, Nippel	mm	Kraftwerkskennwerte	12	12	12	12	12	12
Außendurchmesser	dos, Nippel	mm	Kraftwerkskennwerte	47	47	47	47	47	47
Innendurchmesser	es, Nippel	mm	Kraftwerkskennwerte	23	23	23	23	23	23
Länge	l, Nippel		Kraftwerkskennwerte	120	120	120	120	120	120
Anzahl	n, Nippel		Kraftwerkskennwerte	1.404	1.404	1.404	1.404	1.404	1.404
Materialvolumen aller Nippel	V, Nippel	m³	$PI*(l/1000)*((dos/2/1000)^2-(dis/2/1000)^2)$	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Gesamtgewicht aller Nippel	m, Nippel	kg	$V*roh,20$	1.725	1.712	1.725	1.725	1.865	1.867

Materialkosten der Nippel	MK,Nippel	€	m*P,HZ	53.477	53.064	53.477	53.477	57.819	57.888
Fertigungsaufwand in Stunden	FA,Std,Nippel	Std.							
Stundensatz	Std,Satz	€ / Std.	Angebotspreise	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Herstellungskosten anteilig am Gesamtpreis	HK,ant	%	Werkstoffdaten	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Herstellungskosten absolut	HK,abs	€					0,00	0,00	0,00
Gesamtkosten errechnet	GK,rechn	€		53.477	53.064	53.477	53.477	57.819	57.888
Gesamtkosten laut Angebot	GK,Ang	€	Angebotspreise zu ergänzen	129.103	129.103	129.103	129.103	129.103	129.103
Gesamtkosten Nippel	GK,Nippel	€		129.103	129.103	129.103	129.103	129.103	129.103
Erstellung der Ausgabeparameter für das DCF-Tool									
Technische und betriebliche Daten									
elektrische Netto-Leistung	P,el.	MW el,net	Kraftwerkskennwerte	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050
betriebl. elektr. Netto-Wirkungsgrad	eta,el.netto	%	Kraftwerkskennwerte	43%	43%	43%	43%	43%	43%
Ausnutzung	KWA	Vlh/a	Kraftwerkskennwerte	7.600	7.600	7.600	7.600	7.600	7.600
CO2-Zertifikatezukauf	CO2,Zuk	%	Kraftwerkskennwerte	100%	100%	100%	100%	100%	100%
brennstoffspez. CO2-Emission	CO2,Em	tCO2 / t SKE	Kraftwerkskennwerte	3,34	3,34	3,34	3,34	3,34	3,34
Verfügbarkeitsgewinn	VG	%	Z. 55	-1902173%	-1757,32%	-81,79%	0,00%	20,16%	160,98%
sonstige variable Kosten		€ / MWh el. net	Kraftwerkskennwerte	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Zeitraum ab IBN	t,Nu	Jahre	Z. 21	0,00	0,00	2,07	11,91	41,93	37,59
Zeitpunkt der Inbetriebnahme				2015	2015	2015	2015	2015	2015
Berechnungszeitraum ab Inbetriebnahme		Jahre		0	0	0	0	5	5
Finanzierungsdaten									
Zahlungsreihe vor Inbetriebnahme									
-3 Jahre vor IBN		%	Kraftwerkskennwerte	0%	0%	0%	0%	0%	0%
-2 Jahre vor IBN		%	Kraftwerkskennwerte	0%	0%	0%	0%	0%	0%
-1 Jahr vor IBN		%	Kraftwerkskennwerte	60%	60%	60%	60%	60%	60%
im Jahr der IBN		%	Kraftwerkskennwerte	40%	40%	40%	40%	40%	40%
AfA Dauer (mittlere)		Jahre	Kraftwerkskennwerte	15	15	15	15	15	15
AfA linear		%	Kraftwerkskennwerte	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Mindestrendite		%	Kraftwerkskennwerte	8%	8%	8%	8%	8%	8%

VB-Makro: Dateneübertragung_Neurath, Datentransfer der Berechnungsparameter und des DCF-Tools

Sub DateneübertragungNeurath()

Dim N As Integer

Dim I As Integer

Dim Z100H As Integer ' Zähler für die Übertragung der Werte 100.000 Stunden Heißstart

Dim Z150H As Integer ' Zähler für die Übertragung der Werte 150.000 Stunden Heißstart

Dim Z200H As Integer ' Zähler für die Übertragung der Werte 200.000 Stunden Heißstart

Dim Z100W As Integer ' Zähler für die Übertragung der Werte 100.000 Stunden Warmstart

Dim Z150W As Integer ' Zähler für die Übertragung der Werte 150.000 Stunden Warmstart

Dim Z200W As Integer ' Zähler für die Übertragung der Werte 200.000 Stunden Warmstart

Dim Z100H_DCF As Integer ' Zähler für die DCF-Berechnung der Werte 100.000 Stunden Heißstart

Dim Z150H_DCF As Integer ' Zähler für die DCF-Berechnung der Werte 150.000 Stunden Heißstart

Dim Z200H_DCF As Integer ' Zähler für die DCF-Berechnung der Werte 200.000 Stunden Heißstart

Dim Z100W_DCF As Integer ' Zähler für die DCF-Berechnung der Werte 100.000 Stunden Warmstart

Dim Z150W_DCF As Integer ' Zähler für die DCF-Berechnung der Werte 150.000 Stunden Warmstart

Dim Z200W_DCF As Integer ' Zähler für die DCF-Berechnung der Werte 200.000 Stunden Warmstart

Z100H = 6

Z150H = 6

Z200H = 6

Z100W = 6

Z150W = 6

Z200W = 6

Z100H_DCF = 6

Z150H_DCF = 6

Z200H_DCF = 6

Z100W_DCF = 6

Z150W_DCF = 6

Z200W_DCF = 6

'For N = 0 To 9

'Auswertung Nr. 5

'Berechnung der Kosten bei um die "Sensitivitätsparameter" Z. 72 bis 82 reduzierten Anfahrzeiten

'Call Gradienten_und_Erschöpfungsberechnung_Neurath(N)

'For N = 0 To 9

'Auswertung Nr. 4

'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(130, 5) = Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(56 + N, 2) 'Variation des Strompreises

'For N = 0 To 9

'Auswertung Nr. 3

'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(12, 5) = Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(40 + N, 2) 'Brennstoffkosten

'For N = 0 To 9

'Auswertung Nr. 2

'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(87, 5) = Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(24 + N, 2) 'Auswahl der Anzahl Warmstarts

'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(98, 5) = Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(24 + N, 4) 'Auswahl der Anzahl Heißstarts

'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(9, 5) = Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(24 + N, 6) 'Auswahl der Anzahl Volllaststunden

For I = 1 To Z200H 'Einmalige Berechnung der 200.000-Stunden-Werte, um diese für den Referenzwerkstoff als Referenzgröße zu verwenden

'Übertragung der Werte für 200.000 Stunden Heißstart in den Berechnungsteil des Arbeitsblattes "Berechnungsparameter"

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(129, I + 11) = 200000 'Auslegungszeitraum

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(130, I + 11) = ("Heißstart") 'Starttyp

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(153, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(37, I + 11) 'Erschöpfung

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(160, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(35, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(161, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(36, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(165, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(17, I + 11) 'Starttemperatur Heißstart

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(132, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(16, I + 11) 'Anzahl Heißstarts

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(135, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(11, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers

Next I

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(188, 15) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(173, 15) 'Merker für Referenzanfahrzeit 200.000h

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(189, 15) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(179, 15) 'Merker für Referenzanfahrkosten 200.000h

For I = 1 To Z100H

'Übertragung der Werte für 100.000 Stunden Heißstart in den Berechnungsteil des Arbeitsblattes "Berechnungsparameter"

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(129, I + 11) = 100000 'Auslegungszeitraum

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(130, I + 11) = ("Heißstart") 'Starttyp

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) = (Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Range("E9") * 0.5) 'Angleichung Volllaststunden

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(153, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(45, I + 11) 'Erschöpfung

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(160, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(43, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(161, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(44, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(165, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(17, I + 11) 'Starttemperatur

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(132, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(16, I + 11) 'Anzahl Heißstarts

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(135, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(9, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(174, 15) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(172, 15) - Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(188, 15)

'Berechnung neue Anfahrzeit

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(181, 15) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(179, 15) - Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(189, 15)

'Berechnung neue Anfahrkosten

'Rückführung der Ergebnisse für das DCF Tool

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(85, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(157, I + 11) 'Tatsächlicher Nutzungszeitraum

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(86, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(182, I + 11) 'Anfahrkostendifferenz über alle Anfahrvorgänge

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(87, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(192, I + 11) 'Verfügbarkeitsgewinn

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(88, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(125, I + 11) 'Differenzkosten IBN, Umbau und Betrieb

'Übertrag der errechneten Sammlergesamtkosten in die Zeilen 256 bis 258 (für Warm- und Heißstart identisch)

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(258, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(148, I + 11) 'Gesamtkosten Sammler errechnet

'Übertrag der Anfahrkosten durch Anfahrvorgänge in die Hilfstabelle

'Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(266, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(184, I + 11) 'Anfahrkosten je Minute über Anzahl Anfahrvorgänge

Next I

For I = 1 To Z150H

'Übertragung der Werte für 150.000 Stunden Heißstart in den Berechnungsteil des Arbeitsblattes "Berechnungsparameter"

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(129, I + 11) = 150000 'Auslegungszeitraum

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(130, I + 11) = ("Heißstart") 'Starttyp

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) = (Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Range("E9") * 0.75) 'Angleichung Volllaststunden

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(153, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(41, I + 11) 'Erschöpfung

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(160, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(39, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(161, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(40, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(165, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(17, I + 11) 'Starttemperatur Heißstart

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(132, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(16, I + 11) 'Anzahl Heißstarts

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(135, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(10, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(174, 15) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(172, 15) - Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(188, 15)

'Berechnung neue Anfahrzeit

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(181, 15) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(179, 15) - Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(189, 15)

'Berechnung neue Anfahrkosten

'Rückführung der Ergebnisse für das DCF Tool

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(78, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(157, I + 11) 'Tatsächlicher Nutzungszeitraum

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(79, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(182, I + 11) 'Anfahrkostendifferenz über alle Anfahrvorgänge

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(80, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(192, I + 11) 'Verfügbarkeitsgewinn

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(81, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(125, I + 11) 'Differenzkosten IBN, Umbau und Betrieb

'Übertrag der errechneten Sammlergesamtkosten in die Zeilen 256 bis 258(für Warm- und Heißstart identisch)

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(257, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(148, I + 11) 'Gesamtkosten Sammler errechnet
Next I

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(174, 15) = 0 'Referenzzeit zurück setzen

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(181, 15) = 0 'Referenzkosten zurück setzen

For I = 1 To Z200H

'Übertragung der Werte für 200.000 Stunden Heißstart in den Berechnungsteil des Arbeitsblattes "Berechnungsparameter"

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(129, I + 11) = 200000 'Auslegungszeitraum

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(130, I + 11) = ("Heißstart") 'Starttyp

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) = (Worksheets("Kraftwerkswerte").Range("E9") * 1) 'Angleichung Volllaststunden

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(153, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(37, I + 11) 'Erschöpfung

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(160, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(35, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(161, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(36, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(165, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(17, I + 11) 'Starttemperatur Heißstart

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(132, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(16, I + 11) 'Anzahl Heißstarts

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(135, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(11, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers

'Rückführung der Ergebnisse für das DCF Tool

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(71, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(157, I + 11) 'Tatsächlicher Nutzungszeitraum

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(72, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(182, I + 11) 'Anfahrkostendifferenz über alle Anfahrvorgänge

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(73, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(192, I + 11) 'Verfügbarkeitsgewinn

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(74, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(125, I + 11) 'Differenzkosten IBN, Umbau und Betrieb

'Übertrag der errechneten Sammlergesamtkosten in die Zeilen 256 bis 258(für Warm- und Heißstart identisch)

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(256, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(148, I + 11) 'Gesamtkosten Sammler errechnet
Next I

For I = 1 To 6 'Einmalige Berechnung der 200.000-Stunden-Werte, um diese für den Referenzwerkstoff als Referenzgröße zu verwenden

'Übertragung der Werte für 200.000 Stunden Warmstart in den Berechnungsteil des Arbeitsblattes "Berechnungsparameter"

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(129, I + 11) = 200000 'Auslegungszeitraum

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(130, I + 11) = ("Warmstart") 'Starttyp

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(153, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(25, I + 11) 'Erschöpfung

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(160, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(23, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(161, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(24, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(165, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(13, I + 11) 'Starttemperatur Warmstart

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(132, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(12, I + 11) 'Anzahl Warmstarts

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(135, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(11, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers

Next I

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(188, 15) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(173, 15) 'Merker für Referenzanfahrzeit 200.000h
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(189, 15) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(179, 15) 'Merker für Referenzanfahrkosten 200.000h

For I = 1 To Z100W

'Übertragung der Werte für 100.000 Stunden Warmstart in den Berechnungsteil des Arbeitsblattes "Berechnungsparameter"

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(129, I + 11) = 100000 'Auslegungszeitraum
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(130, I + 11) = ("Warmstart") 'Starttyp
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) = (Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Range("E9") * 0.5) 'Angleichung Volllaststunden
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(153, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(33, I + 11) 'Erschöpfung
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(160, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(31, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(161, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(32, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(165, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(13, I + 11) 'Starttemperatur Warmstart
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(132, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(12, I + 11) 'Anzahl Warmstarts
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(135, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(9, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(174, 15) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(172, 15) - Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(188, 15)

'Berechnung neue Anfahrzeit

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(181, 15) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(179, 15) - Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(189, 15)

'Berechnung neue Anfahrkosten

'Rückführung der Ergebnisse für das DCF Tool

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(64, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(157, I + 11) 'Tatsächlicher Nutzungszeitraum
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(65, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(182, I + 11) 'Anfahrkostendifferenz über alle Anfahrvorgänge
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(66, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(192, I + 11) 'Verfügbarkeitsgewinn
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(67, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(125, I + 11) 'Differenzkosten IBN, Umbau und Betrieb

'Übertrag der Anfahrkosten durch Anfahrvorgänge in die Hilfstabelle

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(265, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(184, I + 11) 'Anfahrkosten je Minute über Anzahl Anfahrvorgänge

Next I

For I = 1 To Z150W

'Übertragung der Werte für 150.000 Stunden Warmstart in den Berechnungsteil des Arbeitsblattes "Berechnungsparameter"

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(129, I + 11) = 150000 'Auslegungszeitraum
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(130, I + 11) = ("Warmstart") 'Starttyp
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) = (Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Range("E9") * 0.75) 'Angleichung Volllaststunden
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(153, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(29, I + 11) 'Erschöpfung
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(160, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(27, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(161, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(28, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(165, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(13, I + 11) 'Starttemperatur Warmstart
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(132, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(12, I + 11) 'Anzahl Warmstarts
 Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(135, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(10, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(174, 15) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(172, 15) - Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(188, 15)

'Berechnung neue Anfahrzeit

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(181, 15) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(179, 15) - Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(189, 15)

'Berechnung neue Anfahrkosten

'Rückführung der Ergebnisse für das DCF Tool

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(57, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(157, I + 11) 'Tatsächlicher Nutzungszeitraum

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(58, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(182, I + 11) 'Anfahrkostendifferenz über alle Anfahrvorgänge

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(59, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(192, I + 11) 'Verfügbarkeitsgewinn

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(60, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(125, I + 11) 'Differenzkosten IBN, Umbau und Betrieb

Next I

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(174, 15) = 0 'Referenzzeit zurück setzen

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(181, 15) = 0 'Referenzkosten zurück setzen

For I = 1 To Z200W

'Übertragung der Werte für 200.000 Stunden Warmstart in den Berechnungsteil des Arbeitsblattes "Berechnungsparameter"

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(129, I + 11) = 200000 'Auslegungszeitraum

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(130, I + 11) = ("Warmstart") 'Starttyp

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) = (Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Range("E9") * 1) 'Angleichung Volllaststunden

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(153, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(25, I + 11) 'Erschöpfung

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(160, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(23, I + 11) 'Gradient zu Beginn des Anfahrens

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(161, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(24, I + 11) 'Gradient zum Ende des Anfahrens

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(165, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(13, I + 11) 'Starttemperatur Warmstart

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(132, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(12, I + 11) 'Anzahl Warmstarts

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(135, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(11, I + 11) 'Wanddicke des Sammlers

'Rückführung der Ergebnisse für das DCF Tool

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(50, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(157, I + 11) 'Tatsächlicher Nutzungszeitraum

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(51, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(182, I + 11) 'Anfahrkostendifferenz über alle Anfahrvorgänge

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(52, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(192, I + 11) 'Verfügbarkeitsgewinn

Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(53, I + 11) = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(125, I + 11) 'Differenzkosten IBN, Umbau und Betrieb

Next I

'Berechnung der DCF-Werte für 100.000 Stunden Heißstart

For I = 1 To Z100H_DCF

Worksheets("DCF Neurath").Select

'Nullsetzen der variablen Eingangsgrößen

Worksheets("DCF Neurath").Range("D8") = 0

Worksheets("DCF Neurath").Range("F39") = 0

```

Worksheets("DCF Neurath").Range("F40") = 0
'Berechnung der zulässigen Investition nach dem Nullsetzen
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
'Worksheets("DCF Neurath").Range("K12").Select
'Berechnung des Kapitalwertes im DCF
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) = (Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Range("E9") * 0.5) 'Angleichung Volllaststunden
Worksheets("DCF Neurath").Range("D6") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) 'Volllaststunden angepasst
Worksheets("DCF Neurath").Range("D8") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(87, I + 11) 'Verfügbarkeitsgewinn
Worksheets("DCF Neurath").Range("F39") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(88, I + 11) 'Differenzkosten IH und Rep.
Worksheets("DCF Neurath").Range("F40") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(86, I + 11) 'Einsparung Anfahrvorgänge
Worksheets("DCF Neurath").Range("F40") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(86, I + 11) 'Einsparung Anfahrvorgänge
'Rückführung des Kapitalwertes aus dem DCF-Tool
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(89, I + 11) = Worksheets("DCF Neurath").Range("K22") 'Kapitalwert
'Berechnung der zulässigen Investition aus dem errechneten Kapitalwert
Worksheets("DCF Neurath").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
'Rückführung des Ergebnisses für die zulässige Investition
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(90, I + 11) = Worksheets("DCF Neurath").Range("F24") 'zulässige Investition
Next I
Worksheets("Berechnungsparameter").Select

'Berechnung der DCF-Werte für 150.000 Stunden Heißstart
For I = 1 To Z150H_DCF
Worksheets("DCF Neurath").Select
'Nullsetzen der variablen Eingangsgrößen
Worksheets("DCF Neurath").Range("D8") = 0
Worksheets("DCF Neurath").Range("F39") = 0
Worksheets("DCF Neurath").Range("F40") = 0
'Berechnung der zulässigen Investition nach dem Nullsetzen
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
'Worksheets("DCF Neurath").Range("K12").Select
'Berechnung des Kapitalwertes im DCF
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) = (Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Range("E9") * 0.75) 'Angleichung Volllaststunden
Worksheets("DCF Neurath").Range("D6") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) 'Volllaststunden angepasst
Worksheets("DCF Neurath").Range("D8") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(80, I + 11) 'Verfügbarkeitsgewinn
Worksheets("DCF Neurath").Range("F39") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(81, I + 11) 'Differenzkosten IH und Rep.

```

```
Worksheets("DCF Neurath").Range("F40") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(79, I + 11) 'Einsparung Anfahrvorgänge
'Rückführung des Kapitalwertes aus dem DCF-Tool
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(82, I + 11) = Worksheets("DCF Neurath").Range("K22") 'Kapitalwert
'Berechnung der zulässigen Investition aus dem errechneten Kapitalwert
Worksheets("DCF Neurath").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
'Worksheets("DCF Neurath").Range("K12").Select
'Rückführung des Ergebnisses für die zulässige Investition
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(83, I + 11) = Worksheets("DCF Neurath").Range("F24") 'zulässige Investition
Next I
Worksheets("Berechnungsparameter").Select
```

'Berechnung der DCF-Werte für 200.000 Stunden Heißstart

```
For I = 1 To Z200H_DCF
Worksheets("DCF Neurath").Select
'Nullsetzen der variablen Eingangsgrößen
Worksheets("DCF Neurath").Range("D8") = 0
Worksheets("DCF Neurath").Range("F39") = 0
Worksheets("DCF Neurath").Range("F40") = 0
'Berechnung der zulässigen Investition nach dem Nullsetzen
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
'Berechnung des Kapitalwertes im DCF
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) = (Worksheets("Kraftwerkswerte").Range("E9") * 1) 'Angleichung Volllaststunden
Worksheets("DCF Neurath").Range("D6") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) 'Volllaststunden angepasst
Worksheets("DCF Neurath").Range("D8") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(73, I + 11) 'Verfügbarkeitsgewinn
Worksheets("DCF Neurath").Range("F39") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(74, I + 11) 'Differenzkosten IH und Rep.
Worksheets("DCF Neurath").Range("F40") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(72, I + 11) 'Einsparung Anfahrvorgänge
'Rückführung des Kapitalwertes aus dem DCF-Tool
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(75, I + 11) = Worksheets("DCF Neurath").Range("K22") 'Kapitalwert
'Berechnung der zulässigen Investition aus dem errechneten Kapitalwert
Worksheets("DCF Neurath").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
'Worksheets("DCF Neurath").Range("K12").Select
'Rückführung des Ergebnisses für die zulässige Investition
```

```
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(76, I + 11) = Worksheets("DCF Neurath").Range("F24") 'zulässige Investition
Next I
Worksheets("Berechnungsparameter").Select
```

'Berechnung der DCF-Werte für 100.000 Stunden Warmstart

```
For I = 1 To Z100W_DCF
Worksheets("DCF Neurath").Select
'Nullsetzen der variablen Eingangsgrößen
Worksheets("DCF Neurath").Range("D8") = 0
Worksheets("DCF Neurath").Range("F39") = 0
Worksheets("DCF Neurath").Range("F40") = 0
'Berechnung der zulässigen Investition nach dem Nullsetzen
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
'Berechnung des Kapitalwertes im DCF
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) = (Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Range("E9") * 0.5) 'Angleichung Volllaststunden
Worksheets("DCF Neurath").Range("D6") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) 'Volllaststunden angepasst
Worksheets("DCF Neurath").Range("D8") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(66, I + 11) 'Verfügbarkeitsgewinn
Worksheets("DCF Neurath").Range("F39") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(67, I + 11) 'Differenzkosten IH und Rep.
Worksheets("DCF Neurath").Range("F40") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(65, I + 11) 'Einsparung Anfahrvorgänge
'Rückführung des Kapitalwertes aus dem DCF-Tool
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(68, I + 11) = Worksheets("DCF Neurath").Range("K22") 'Kapitalwert
'Berechnung der zulässigen Investition aus dem errechneten Kapitalwert
Worksheets("DCF Neurath").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
'Worksheets("DCF Neurath").Range("K12").Select
'Rückführung des Ergebnisses für die zulässige Investition
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(69, I + 11) = Worksheets("DCF Neurath").Range("F24") 'zulässige Investition
Next I
Worksheets("Berechnungsparameter").Select
```

'Berechnung der DCF-Werte für 150.000 Stunden Warmstart

```
For I = 1 To Z150W_DCF
Worksheets("DCF Neurath").Select
'Nullsetzen der variablen Eingangsgrößen
Worksheets("DCF Neurath").Range("D8") = 0
Worksheets("DCF Neurath").Range("F39") = 0
Worksheets("DCF Neurath").Range("F40") = 0
```

'Berechnung der zulässigen Investition nach dem Nullsetzen

```
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
Worksheets("DCF Neurath").Range("K12").Select
```

'Berechnung des Kapitalwertes im DCF

```
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) = (Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Range("E9") * 0.75) 'Angleichung Volllaststunden
Worksheets("DCF Neurath").Range("D6") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) 'Volllaststunden angepasst
Worksheets("DCF Neurath").Range("D8") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(59, I + 11) 'Verfügbarkeitsgewinn
Worksheets("DCF Neurath").Range("F39") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(60, I + 11) 'Differenzkosten IH und Rep.
Worksheets("DCF Neurath").Range("F40") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(58, I + 11) 'Einsparung Anfahrvorgänge
```

'Rückführung des Kapitalwertes aus dem DCF-Tool

```
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(61, I + 11) = Worksheets("DCF Neurath").Range("K22") 'Kapitalwert
```

'Berechnung der zulässigen Investition aus dem errechneten Kapitalwert

```
Worksheets("DCF Neurath").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
```

'Rückführung des Ergebnisses für die zulässige Investition

```
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(62, I + 11) = Worksheets("DCF Neurath").Range("F24") 'zulässige Investition
```

Next I

```
Worksheets("Berechnungsparameter").Select
```

'Berechnung der DCF-Werte für 200.000 Stunden Warmstart

```
For I = 1 To Z200W_DCF
```

```
Worksheets("DCF Neurath").Select
```

'Nullsetzen der variablen Eingangsgrößen

```
Worksheets("DCF Neurath").Range("D8") = 0
Worksheets("DCF Neurath").Range("F39") = 0
Worksheets("DCF Neurath").Range("F40") = 0
```

'Berechnung der zulässigen Investition nach dem Nullsetzen

```
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
```

'Worksheets("DCF Neurath").Range("K12").Select

'Berechnung des Kapitalwertes im DCF

```
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) = (Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Range("E9") * 1) 'Angleichung Volllaststunden
Worksheets("DCF Neurath").Range("D6") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(218, I + 11) 'Volllaststunden angepasst
Worksheets("DCF Neurath").Range("D8") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(52, I + 11) 'Verfügbarkeitsgewinn
Worksheets("DCF Neurath").Range("F39") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(53, I + 11) 'Differenzkosten IH und Rep.
Worksheets("DCF Neurath").Range("F40") = Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(51, I + 11) 'Einsparung Anfahrvorgänge
```

'Rückführung des Kapitalwertes aus dem DCF-Tool

```
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(54, I + 11) = Worksheets("DCF Neurath").Range("K22") 'Kapitalwert
'Berechnung der zulässigen Investition aus dem errechneten Kapitalwert
Worksheets("DCF Neurath").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").Select
Worksheets("DCF Neurath").Range("F107").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Worksheets("DCF Neurath").Range("F24")
'Worksheets("DCF Neurath").Range("K12").Select
'Rückführung des Ergebnisses für die zulässige Investition
Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(55, I + 11) = Worksheets("DCF Neurath").Range("F24") 'zulässige Investition
Next I
Worksheets("Berechnungsparameter").Select

'Schleife zur Übertragung der Daten aus der Abhängigkeit der Anzahl Starts und Volllaststunden
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(211 + N, 2) = Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(87, 5) ' Eintragung der Anzahl Warmstarts
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(211 + N, 3) = Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(98, 5) ' Eintragung der Anzahl Heißstarts
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(211 + N, 4) = Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(9, 5) ' Eintragung der Volllaststunden
'For I = 1 To 6
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(211 + N, I + 11) = Worksheets("Ergebnisse").Cells(19, I + 11) ' Übertragung der Daten für 200.000h
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(222 + N, I + 11) = Worksheets("Ergebnisse").Cells(27, I + 11) ' Übertragung der Daten für 150.000h
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(233 + N, I + 11) = Worksheets("Ergebnisse").Cells(35, I + 11) ' Übertragung der Daten für 100.000h
'Next I

'Schleife zur Übertragung der Daten aus der Abhängigkeit Brennstoffkosten
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(261 + N, 4) = Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(12, 5) ' Eintragung der Brennstoffkosten
'For I = 1 To 6
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(261 + N, I + 11) = Worksheets("Ergebnisse").Cells(19, I + 11) ' Übertragung der Daten für 200.000h
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(272 + N, I + 11) = Worksheets("Ergebnisse").Cells(27, I + 11) ' Übertragung der Daten für 150.000h
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(283 + N, I + 11) = Worksheets("Ergebnisse").Cells(35, I + 11) ' Übertragung der Daten für 100.000h
'Next I

'Schleife zur Übertragung der Daten aus der Abhängigkeit Strompreis
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(318 + N, 4) = Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(130, 5) ' Eintragung des Strompreises
'For I = 1 To 6
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(318 + N, I + 11) = Worksheets("Ergebnisse").Cells(19, I + 11) ' Übertragung der Daten für 200.000h
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(329 + N, I + 11) = Worksheets("Ergebnisse").Cells(27, I + 11) ' Übertragung der Daten für 150.000h
'Worksheets("Ergebnisse").Cells(340 + N, I + 11) = Worksheets("Ergebnisse").Cells(35, I + 11) ' Übertragung der Daten für 100.000h
'Next I

'Schleife zur Übertragung der Daten zur Abhängigkeit der Kosten von der Anfahrzeit
Worksheets("Ergebnisse").Cells(376 + N, 4) = Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(72 + N, 2) ' Eintragung der Anfahrzeitreduktion
```

```
'For I = 1 To 6
```

```
  'Worksheets("Ergebnisse").Cells(376 + N, I + 11) = (Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(275, I + 11)) + (Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(72 + N, 2) *  
(Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(276, I + 11))) ' Übertragung der Daten für 200.000h
```

```
  'Worksheets("Ergebnisse").Cells(387 + N, I + 11) = (Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(282, I + 11)) + (Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(72 + N, 2) *  
(Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(283, I + 11))) ' Übertragung der Daten für 150.000h
```

```
  'Worksheets("Ergebnisse").Cells(398 + N, I + 11) = (Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(289, I + 11)) + (Worksheets("Sensitivitätsparameter").Cells(72 + N, 2) *  
(Worksheets("Berechnungsparameter").Cells(290, I + 11))) ' Übertragung der Daten für 100.000h
```

```
'Next I
```

```
Next N
```

```
'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(87, 5) = 15 'Einfügen des Ausgangswertes für die Anzahl Warmstarts
```

```
'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(98, 5) = 10 'Einfügen des Ausgangswertes für die Anzahl Heißstarts
```

```
'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(9, 5) = 8000 'Einfügen des Ausgangswertes für die Anzahl Volllaststunden
```

```
'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(12, 5) = 8 'Einfügen des Ausgangswertes für die Brennstoffkosten
```

```
'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(130, 5) = 36 'Einfügen des Ausgangswertes für den Strompreis
```

```
'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(92, 5) = 100 'Einfügen des Ausgangswertes für die Startzeit für den Warmstart
```

```
'Worksheets("Kraftwerkskennwerte").Cells(103, 5) = 60 'Einfügen des Ausgangswertes für die Startzeit für den Heißstart
```

```
End Sub
```


WS10: DCF Neurath, Ermittlung des Kapitalwertes und der zulässigen Investition mittels Discounted Cash Flow

Zulässige Investitionen auf Grund einer erhöhten Verfügbarkeit eines Kraftwerksblockes				TPF-CT, 28.07.11										
TECHNISCHE u. BETRIEBLICHE DATEN														
		SK-Block		CO₂										
elektr. Netto-Leistung		1.050	MW el,net	CO ₂ -Zertifikatzukauf wg. höherem BK-Einsatz: 100% (jedes Jahr über gesamte Laufzeit)										
betriebl. elektr. Netto-Wirkungsgrad		43,0%												
Ausnutzung	87%	7.600	Vlh/a	brennstoffspezifische CO ₂ -Emission SK										
				3,34 t CO ₂ / t SKE										
				0,410 t CO ₂ / MWh _{el}										
Verfügbarkeitsgewinn		0,12	%-Punkt	1,083 kg CO ₂ /kg SK										
0,12037265253876%-Punkt Verfügbarkeitsgew		10,5	h/a von 8760 h/a	spezif. Blockemission										
bezogen auf die Ausnutzung		9,1	Vlh/a	0,954 t CO ₂ /MWh _{el,net}										
adäquate Strommehrerzeugung		9.606	MWh/a	Brennstoffeinsatz										
				1 MWh _{el,net} entspricht 2,3256 MWh _{th,H₂}										
				0,8813 t SK / MWh _{el,net}										
Sonst. var. Kosten (Pr.st. IBN-a)		1,0	€ pro MWh el net											
				5					IBN (1.1.)					
STROM-MEHRERZEUGUNG														
				Jahr	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
jährliche Stromzusatzmenge		9.606	MWh el / a		0	0	0	0	9.606	9.606	9.606	9.606	9.606	9.606
Zeitraum ab IBN		10,00	Jahre											
Zeitraum ab IBN													39	40
Zeitraum ab IBN													2053	2054
Zeitraum ab IBN													0	0
Zeitpunkt der Inbetriebnahme (1.1.)	Jahr	2015												
INVESTITIONEN														
Preisstand (1.1.)	Jahr	2013												
Summe	Mio.€	3,4												
inkl. Berücksichtigung Inflation entspr. EEO		3,5	Mio. € (nominal, entsprechend u.g. Zahlungsreihe)											
Zahlungsreihe	-3 Jahre vor IBN	0%	2012											
	-2 Jahre vor IBN	0%	2013											
	-1 Jahr vor IBN	60%	2014											
	im Jahr der Inbetriebnahme (IBN)	40%	2015											
AfA Dauer (mittlere)	Jahre	15												
AfA linear		100%												

Kapitalwert	-0,31	Mio. I	F107
wenn Zelle unten rot markiert ist: Berechnen!			
Ermittlung zulässiges Invest			

spezifische Brennstoffkosten Braunkohle		
Jahr	2039	2040
spezifisch	17,1	17,4
Heizwert	9.500	9.500
	2,6389	2,6389

JÄHRLICHE KOSTEN (durch o.g. Zusatzinvest)													
Preisstand		1.1. 2012											
Instandhaltung, Wartung und Betrieb Mehrkosten	T€/a	5	100,0%	vom Invest									
Einsparungen bei schnelleren Startvorgängen	T€/a	-179											
Reparatur + Wartung fix (wg. Zusatzinvest)	T€/a	0	0,0%	vom Invest									
Versicherung, Verwaltung (wg. Zusatzinvest)	T€/a	0	0,0%	vom Invest									
Summe jährliche Kosten	T€/a	-174											
SONSTIGES													
Mindestrendite	%	8,0%											
Pauschaler Steuersatz	%	30%											
Inflation*	% ggü. Vorjahr	0,00%	Auswirkung auf alle betrachteten Größen										
Lohnsteigerung*	% ggü. Vorjahr	2,25%											
*: Annahme: konstant über Betrachtungszeitraum													
		Jahr	2013	bis	2015								
Preissteigerung Investitionsgüter (EEO) **	% ggü. Vorjahr		2,00%	Auswirkung nur auf die Investitionskosten									
**: Capital goods index (PPI)													
			Jahr	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2050	2051
CO2-Zertifikatspreis			€/t CO2		20,30	20,60	20,91	4,50	4,57	4,64	4,71	7,92	8,04
	Steigerung % y-o-y CO2	2%											
Electricity D	Base case	Price, Mid	[EUR/MWh]		70,70	71,41	72,12	36,00	36,36	36,72	37,09	52,54	53,07
	Steigerung % y-o-y Strompreis	1%											
spezifische Brennstoffkosten			€/t					10,00	10,20	10,40	10,61	16,08	16,08

WS11: Ergebnisse, Zusammenfassung der Ergebnisse und deren grafische Darstellung

Auf einen Abdruck dieses Worksheets wurde verzichtet, da die Einzelergebnisse in den Auswertungen in Kap. 5.3 bereits dargestellt wurden.

8 Verzeichnisse

8.1 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 2-1: Werkstoffbezeichnungen und Legierungselemente</i>	15
<i>Tabelle 2-2: Grundlegende Härtungsmechanismen</i>	16
<i>Tabelle 2-3: Typische im Kraftwerksbau eingesetzte Werkstoffe</i>	32
<i>Tabelle 2-4 (Teil 1 und 2): Systematische Einteilung metallischer Werkstoffe für Druckgeräte</i>	39, 40
<i>Tabelle 2-5: Belastungen und die mit der Belastung verbundenen Schädigungsmechanismen</i>	43
<i>Tabelle 2-6: Sicherheitsbeiwerte zur Lebensdauerlegung</i>	49
<i>Tabelle 2-7: Berechnung der Korrekturwerte für die Kerbwirkung</i>	64
<i>Tabelle 2-8: Abweichungen von der Beispielrechnung in der EN 12952-3</i>	67
<i>Tabelle 3-1: Laständerungsgeschwindigkeiten allgemein</i>	77
<i>Tabelle 3-2: Laständerungsgeschwindigkeiten und Startzeiten von RWE Kraftwerken</i>	78
<i>Tabelle 5-1: Basisauswertung der Wirtschaftlichkeitsberechnung</i>	121
<i>Tabelle 5-2: Einfluss der Anfahrzeit auf den Lebensdauerverbrauch</i>	125
<i>Tabelle 5-3: Variation der Anzahl Warm- und Heißstarts</i>	128
<i>Tabelle 5-4: Variation der Brennstoffkosten</i>	131
<i>Tabelle 5-5: Variation des Strompreises</i>	134
<i>Tabelle 5-6: Reduktion der Anfahrzeit und Auswirkung auf die Betriebskosten</i>	137

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Übersicht des heutigen Primärenergieeinsatz zur Stromerzeugung in Deutschland.....	1
Abbildung 1-2: Kapazitäten zur Stromerzeugung in Deutschland 2011 im Netzentwicklungsplan 2013.....	2
Abbildung 1-3: Strompreiskurve am 17.6.2013.....	3
Abbildung 1-4: Werkstoffeinsatz im Kraftwerk.....	4
Abbildung 2-1: Wirkungsgrade verschiedener Kraftwerksprozesse.....	7
Abbildung 2-2: Prinzipschaubild eines Kohlekraftwerks.....	7
Abbildung 2-3: Übersicht europäischer Forschungsprogramme für 700°C-Kraftwerke.....	8
Abbildung 2-4: Preisentwicklung für Nickel von 2004 bis 2013.....	10
Abbildung 2-5: Lastverlauf 2010 mit Mittagsspitzenkappung.....	11
Abbildung 2-6: Installierte und tatsächliche Windkraftleistung 2011.....	12
Abbildung 2-7: Vergleich der benötigten Residuallasten 2008 und 2050.....	13
Abbildung 2-8: Zweidimensionale schematische Darstellung eines Gefüges, z.B. eines Stahls.....	17
Abbildung 2-9: Kristallgitter.....	20
Abbildung 2-10: Zustandsschaubild Eisen-Eisencarbid.....	21
Abbildung 2-11: ZTU-Diagramm P92.....	22
Abbildung 2-12: Gefüge des hitzebeständigen Stahls GX40CrSi29 mit einem dichten Netzwerk von Chromkarbiden auf den Korngrenzen.....	22
Abbildung 2-13: Mischkristallgefüge NiCu30Fe, Gefüge nach Warmumformung und Rekristallisation, homogene Mischkristalle mit Zwillingbildung (Pfeil ◀).....	25
Abbildung 2-14: 100.000 h Zeitstandfestigkeit von 9-12% Chromstählen, Austeniten und Nickel-Basis-Legierungen.....	28
Abbildung 2-15: 100.000 h Zeitstandfestigkeit des Alloy 617 und Alloy 617B.....	29
Abbildung 2-16: Schematisches Festigkeitsschaubild für tiefe und hohe Temperaturen.....	34
Abbildung 2-17: Umsetzung der Druckgeräterichtlinie in europäisches Regelwerk.....	37
Abbildung 2-18: Zusammensetzung der Wanddicke gemäß Regelwerk.....	46
Abbildung 2-19: Beanspruchungsschema für zylindrischen Mantel mit benachbarten Abzweigen, angeordnet unter einem Winkel zur Mantelachse.....	51
Abbildung 2-20: Wöhler-Schaubild des warmfesten ferritisch-bainitischen Stahls 10CrMo9-10 in Abhängigkeit von Temperatur und Haltezeit.....	54
Abbildung 2-21: Schematische Darstellung der linearen Schädigungsakkumulation.....	55
Abbildung 2-22: Wärmedurchgang durch eine Wand.....	56
Abbildung 2-23: Einfluss der Legierungselemente und Abkühlzeit (in Sekunden) auf die Härte in der WEZ (schematische Darstellung).....	70
Abbildung 2-24: Gefügeveränderungen in der wärmebeeinflussten Zone einer Schweißnaht.....	72
Abbildung 3-1: Schematische Übersicht der Regelenergieleistung.....	75
Abbildung 3-2: Typische Lastgradienten moderner Kraftwerke.....	77
Abbildung 3-3: Anfahrtdiagramm vor regelungstechnischer Optimierung.....	79
Abbildung 3-4: Anfahrtdiagramm nach regelungstechnischer Optimierung.....	80
Abbildung 3-5: Prinzipschaubild einer Dampfkraftmaschine.....	81
Abbildung 3-6: Darstellung eines Dampferzeugers mit seinen wesentlichen Komponenten.....	83
Abbildung 3-7: Schematische Darstellung der im Rahmen der RWE Studie 2012 untersuchten Kesselbauteile im Wasser-Dampf-Kreislauf.....	84

<i>Abbildung 3-8: P92-Sammler (530 mm Durchmesser).....</i>	<i>86</i>
<i>Abbildung 3-9: Herstellungsskizze eines HD-Austrittsammlers</i>	<i>88</i>
<i>Abbildung 3-10: Längsschnitt durch einen Einspritzkühler im Dampfkreislauf.....</i>	<i>90</i>
<i>Abbildung 3-11: Qualitativ typischer Spannungsverlauf in einem Rohr während eines Anfahrzyklus</i>	<i>91</i>
<i>Abbildung 3-12: Spannungsverteilung am Rand und im Kern eines Werkstoffs.</i>	<i>93</i>
<i>Abbildung 3-13: Fotografie von geschweißten Sammlernippeln (je 24 mm Durchm.).....</i>	<i>96</i>
<i>Abbildung 3-14: Lebensdauerbeanspruchung eines geschweißten Sammlernippels.....</i>	<i>96</i>
<i>Abbildung 4-1: Kapitalwertmethode</i>	<i>103</i>
<i>Abbildung 4-2: Merit Order</i>	<i>105</i>
<i>Abbildung 5-1: Flussdiagramm der Berechnung mittels der wesentlichen Worksheets.....</i>	<i>108</i>
<i>Abbildung 5-2: Einfluss der Anfahrzeit auf den Lebensdauerverbrauch.....</i>	<i>126</i>
<i>Abbildung 5-3: Einfluss veränderter Startanzahl auf die Wirtschaftlichkeit.....</i>	<i>129</i>
<i>Abbildung 5-4: Einfluss der Brennstoffkosten auf die Wirtschaftlichkeit.....</i>	<i>132</i>
<i>Abbildung 5-5: Einfluss des Strompreises auf die Wirtschaftlichkeit.....</i>	<i>135</i>
<i>Abbildung 5-6: Einfluss der Anfahrzeit auf die Kosten für Brennstoff und Verschleiß</i>	<i>138</i>

8.3 Abkürzungsverzeichnis

A617	Werkstoff Alloy 617
AfA	Absetzung für Abnutzung
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BK	Braunkohle
BoA	Braunkohlekraftwerk mit optimierter Anlagentechnik
BRP	Balancing Responsible Party
CMC	Ceramic Matrix Composite
Ck	Korrekturfaktoren (1 bis 4)
DCF	Discounted Cash-Flow (Kapitalwertmethode)
DDC	Ductility Dip Cracks
EB-PVD	Electron Beam – Physical-Vapour-Deposition
EPEX	Unternehmen, das zu 50% der EEX AG (European Energy Exchange) und zu 50% der französischen Powernext SA gehört.
GPSGV	Geräte- und Produktsicherheitsgesetz
GuD-KW	Gas- und Dampf-Kraftwerk
HCF	High Cycle Fatigue (Ermüdung bei hoher Lastspielzahl, z. B. Vibration)
HV 10	Härteprüfung nach Vickers mit 10 Kilopond
KEA	Kumulierter Energieaufwand
Kfz	kubisch-flächenzentriert
Krz	kubisch-raumzentriert
KW	Kraftwerk
LCF	Low Cycle Fatigue (Ermüdung bei geringer Lastspielzahl)
MAG	Metall-Aktivgasschweißen
MIG	Metall-Inertgasschweißen
MOE	Merrit-Order-Effekt
MSG	Metall-Schutzgasschweißen
Occ	Optimized chemical composition
ODS	Oxide Dispersion Strengthened
ROI	Return on Invest
Sammler	Kurzform für einen Frischdampfaustrittssammler
SK	Steinkohle

SpRK	Spannungsrisskorrosion
SRZ	Secondary Reaction Zone
TCO	Total Cost of Ownership
TCP	Topologically closed packed
TMF	Thermo-mechanical fatigue (Thermomechanische Ermüdung)
TRBS	Technische Regel für Betriebssicherheit
TRD	Technische Regeln für Dampfkessel
TSO	Transmission System Operator
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UCTE	Union for the Coordination of Transmission of Electricity
Ün	Überhitzer Nr. n
VB	Visual Basic, Programmiersprache zur Makroprogrammierung in Excel
Vlh	Volllaststunden
WEZ	Wärmeeinflusszone (einer Schweißnaht)
WIG	Wolfram-Inertgasschweißen
WS	Worksheet, Arbeitsblatt in Excel
ZÜS	Zugelassene Überwachungsstelle

9 Literaturverzeichnis

- ¹ Pressemeldung Nr. 26/2007 des Umweltbundesamtes "Wirksamer Umweltschutz kostet weniger als UN-Fachleute bisher annahmen", Dessau, 5.5.2007
- ² www.unendlich-viel-energie.de, Seitenaufruf vom 7.9.2013
- ³ 50Hertz Transmission, Amprion, TenneT TSO, TransnetBW: Netzentwicklungsplan 2013, erster Entwurf, S. 36, Internetpräsentation der 4 deutschen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB), aufgerufen 30. Juni 2013
- ⁴ <http://www.epexspot.com/de/>, Seitenaufruf vom 17.6.2013
- ⁵ Mohrmann, R., Lebensdauersimulation für flexible Kraftwerke, *Unternehmenspräsentation* vom 10.10.2013
- ⁶ Kautz, H., Das neuzeitliche Kohlekraftwerk, expert verlag, Renningen 1997
- ⁷ Kautz, H. R., Hochtemperaturkorrosion von Heizflächen, insbesondere Überhitzer- und Zwischenüberhitzerflächen, VDI Berichte Nr. 1027, 1992
- ⁸ Kautz, H., Das neuzeitliche Kohlekraftwerk, expert verlag, Renningen 1997, Kap.1
- ⁹ http://www.hs-weingarten.de/~modet/referate/Referat_Energietechnik.pdf Seitenaufruf vom 7.12.2012
- ¹⁰ Langeheinecke, K., Jany, P., Sapper, E., Thermodynamik für Ingenieure, Vieweg Verlag, 5. Aufl. 2004
- ¹¹ Zimmermann, H., COMTES700 - View of an European Power Company, E.ON New Build & Technology, 4th COMTES Workshop, Essen, 12. April 2011
- ¹² Schlussbericht zum Forschungsvorhaben KOMET 650, VGB Power Tech, Essen, Stand 26.5.2008
- ¹³ <http://www.finanzen.net/rohstoffe/nickelpreis> Seitenaufruf vom 20.9.2013
- ¹⁴ www.eex.com, Seitenaufruf vom 4.12.2012
- ¹⁵ Molfese, S., VDI-Kongress Einsatzflexibilität VDI Wissensforum Bremen, 22.-23. Mai 2011
- ¹⁶ Jeschke, R., Schreier, W., Flexibilität für konventionelle fossile Kraftwerke, BWK Special, Energieversorgung, Bd. 63 (2011) Nr. 11
- ¹⁷ Bürgel, R., Maier, H.-J., Niendorf, T., Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik, Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2011, 4. Auflage, Kap.1
- ¹⁸ Weißbach, W. Werkstoffkunde, Vieweg Verlag, Wiesbaden 2007, 16. Aufl., Kap.1
- ¹⁹ Bürgel, R., Maier, H.-J., Niendorf, T., Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik, Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2011, 4. Auflage, Kap.3
- ²⁰ Hornbogen, E., Skrotzki, B., Mikro- und Nanoskopie der Werkstoffe, Springer Verlag, Heidelberg, 2009
- ²¹ Brill, U., Vorlesung Hochtemperaturwerkstoffe, Aachen, 8.6.2011
- ²² Kautz, H., Das neuzeitliche Kohlekraftwerk, expert verlag, Renningen 1997, Kap.4
- ²³ Oehmigen, H.-G., Werkstoffeinsatz in modern fossil befeuerten Kraftwerken, Foliensatz zum HDT Seminar, Essen, Oktober 2011
- ²⁴ Steinbeck, G., Cyris, P.H.; Heimann, W., Weßling, W., Stand und Entwicklungstendenzen auf dem Gebiet der nichtrostenden Stähle, VDI Berichte, 6. Jahrestagung Schadensanalyse, Würzburg, 22.-23.9.1994
- ²⁵ <http://www.hansa-gymnasium-mint.org/koooperationsprojekte/arcelormittal/projekttag-2/kristallgitter.html>, Seitenaufruf vom 22.11.2013
- ²⁶ Bürgel, R., Maier, H.-J., Niendorf, T., Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik, Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2011, 4. Auflage, Kap.6
- ²⁷ Horstmann, D. Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff, Verlag Stahleisen, 5. Auflage 1985
- ²⁸ Heuser, H., Böhler Welding, Präsentation beim Cluster-Forum Schweißtechnik im Kraftwerksbau, SLV München, 20. Oktober 2009
- ²⁹ Pohl, M., Einsatzprofile und Versagensmechanismen nichtrostender ferritisch-austenitischer Duplex-Stähle, VDI Berichte, 6. Jahrestagung Schadensanalyse, Würzburg 22.-23.9.1994
- ³⁰ Husemann, R.U., Neue Werkstoffe im Kessel- und Rohrleitungsbau, 6. Tagung Schadensanalyse, Würzburg, 22.-23.9.1994
- ³¹ Eggeler, G., The effect of long-term creep on particle coarsening in tempered martensite ferritic steels, Acta metall 37 (1989), pp 3225-3234
- ³² Bendick, W., Haarmann, H., Wellnitz, G., Zschau, M., Properties and development state of new high-temperature steels for power plant tubing and piping in comparison, 3R international, 33 Heft 8, August 1994
- ³³ Weißbach, W. Werkstoffkunde, Vieweg Verlag, Wiesbaden 2007, 16. Aufl., Kap.2

-
- ³⁴ Schneemann, K., Schädigungen an austenitischen Stählen im Kraftwerk, VDI Berichte, 6. Jahrestagung Schadensanalyse, Würzburg 22.-23.9.1994
- ³⁵ Göbenli, G., Werkstoffwissenschaftliche Untersuchungen zum ein- und mehrachsigen Kriechverhalten der Nickelbasissuperlegierungen CMSX-4 und LEK 94 oberhalb 1000 °C, Dissertation der Fakultät für Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2005
- ³⁶ Thoma, A., Scholz, A., Berger, C., Mechanische Langzeiteigenschaften von Nickelbasis-Legierungen zur Anwendung in 700 °C-Dampfturbinen, TU Darmstadt, 26. Vortragsveranstaltung FVW/FVHT am 28.11.2003
- ³⁷ Folgarait, P., The role of advanced materials and performance-driven design criteria in the development of the EU Energy Industry, Energy day 31.3.2010, www.c-s-m.it, Seitenaufruf am 20.8.2013
- ³⁸ Werkstoffdatenblatt Nr. 4119, Nicrofer 5520Co – alloy 617, ThyssenKrupp VDM, Januar 2005
- ³⁹ Maile, K., Klenk, A., Speicher, M., Rissempfindlichkeit von Alloy 617 für Rohrleitungen, 31. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe in Düsseldorf am 28.11.2008
- ⁴⁰ Klöwer, J., Heubner, U., Nickel alloys and high-alloyed special stainless steels, Properties - Manufacturing - Applications, expert Verlag, Renningen, 2009, 4th completely revised edition, p. 121
- ⁴¹ Strauß, K., Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, 6. Auflage, Kap.7
- ⁴² Klenk, A., Helmrich, A., Husemann, R.-U., Qualifizierung einer Nickelbasislegierung für Sammler und Rohrleitungen, im Rahmen des FDBR Forschungsvorhabens Rohrleitungen in Kraftwerken und chemischen Anlagen, 2006, S.145-156
- ⁴³ Husemann, R.-U., Werkstoffauswahl für moderne Großkraftwerke unter Berücksichtigung der Martensit-Austenit-Schweißverbindungen, VDI Berichte Nr. 1300, 1996, S.183-212.
- ⁴⁴ Meier, H., Hochtemperaturkorrosion von Heizflächen, insbesondere Überhitzer- und Zwischenüberhitzerflächen, VDI Berichte Nr. 1027, 1992, S.7
- ⁴⁵ Persönliche Mitteilung: Mohrmann, R., Schwendig, F., Wolff, J., RWE Studie FlexCom600, 16.7.2012
- ⁴⁶ Richtlinie zur Zustandsüberwachung und Prüfung der Komponenten von Dampfkesselanlagen und Wasser oder Dampf führenden Hochdruckleitungen, VGB-R 506, VGB PowerTech e.V., 1. Ausgabe 2009, Vorwort
- ⁴⁷ Husemann, R.U., Babcock-Hitachi Europe GmbH, Präsentation zum Coorettec Workshop in Leipzig, 10.-11. März 2005
- ⁴⁸ Leitlinien zur Druckgeräterichtlinie, 14.GSGV vom 15. November 2000, Az.: 45-5551.23-14 zuletzt geändert am 03. Dezember 2001, Az.: 45-5551.23-14, S. 33
- ⁴⁹ Richtlinie 97/23/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. Mai 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Druckgeräte. Grund 18 und Artikel 11
- ⁵⁰ Richtlinie 97/23/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. Mai 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Druckgeräte. Artikel 10
- ⁵¹ Richtlinie 97/23/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. Mai 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Druckgeräte. Anhang II
- ⁵² Richtlinie 97/23/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. Mai 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Druckgeräte. Anhang I, Kap.2, 4 und 7
- ⁵³ EN 13445-5:2009-07, Anhang A
- ⁵⁴ Richtlinie zur Zustandsüberwachung und Prüfung der Komponenten von Dampfkesselanlagen und Wasser oder Dampf führenden Hochdruckleitungen, VGB-R 506, VGB PowerTech e.V., 1. Ausgabe 2009, Kap.4
- ⁵⁵ EN 13445-2:2002-05, A.1
- ⁵⁶ Richtlinie zur Zustandsüberwachung und Prüfung der Komponenten von Dampfkesselanlagen und Wasser oder Dampf führenden Hochdruckleitungen, VGB-R 506, VGB PowerTech e.V., 1. Ausgabe 2009, Kap.3
- ⁵⁷ EN 13480-3:2002-05, Kap.4
- ⁵⁸ EN 12952-3:2012-03, Kap.7
- ⁵⁹ EN 12952-3:2012-03, Kap.6
- ⁶⁰ EN 13445-2:2002-05, Kap.4
- ⁶¹ EN 13480-3:2002-05, Kap.5
- ⁶² EN 12952-3:2012-03, Kap.8
- ⁶³ EN 13480-3:2002-05, Kap.10
- ⁶⁴ Bürgel, R., Maier, H.-J., Niendorf, T., Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik, Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2011, 4. Auflage, Kap.4
- ⁶⁵ EN 13445-3:2002-05, Kap.17
- ⁶⁶ EN 12952-3:2012-03, Kap.12

-
- ⁶⁷ Buxbaum, O., Betriebsfestigkeit - sichere und wirtschaftliche Bemessung schwinggefährdeter Bauteile, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 1992, 2. Auflage
- ⁶⁸ EN 13445-3:2002-05, Kap.18
- ⁶⁹ EN 12952-3:2012-03, Kap.13
- ⁷⁰ EN 12952-3:2012-03, Kap.5
- ⁷¹ EN 12952-3:2012-03, Anhang D
- ⁷² EN 12952-3:2012-03, Anhang B
- ⁷³ EN 12952-3:2012-03, Anhang C
- ⁷⁴ Groß, V., Heuser, H., Jochum, C., Neuartige Schweißzusätze für bainitische und martensitische Stähle, Juli 2005
- ⁷⁵ Heubner, U., Klöwer, J., Nickelwerkstoffe und hochlegierte Sonderedelstähle, Eigenschaften – Verarbeitung – Anwendungen, expert Verlag, 4. Auflage, 2009
- ⁷⁶ Hanus, F. Härte in der WEZ - Wirkung der chemischen Zusammensetzung des Stahls, der Schweißverbindungen und des Spannungsarmglühens, Dillinger Hütte, Dillingen, 5.4.2005
- ⁷⁷ Uwer, D., Degenkolbe, J., Temperaturzyklen beim Lichtbogenschweißen - Einfluß des Wärmebehandlungszustandes und der chemischen Zusammensetzung von Stählen auf die Abkühlzeit. Schweißen und Schneiden, Jahrgang 27 (1975), Heft 8, S.303-306
- ⁷⁸ Arjakine, N., Piegert, S., Slyvinsky, O., Ni-Basis Superlegierungen im Turbomaschinenbau und deren Besonderheiten bei der schweißtechnischen Bearbeitung, Vortrag im 14. Sommerkurs Werkstoffe und Fügen, Magdeburg, 23.-24.9.2011
- ⁷⁹ Vermeidung von Heißrissen beim Schweißen, Laser Zentrum Hannover e.V., Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover. Hannover, Mai 2007
- ⁸⁰ Arjakine, N., Bruck, G., Grüger, B., Seeger, D., Advanced Weld Repair of Gas Turbine Hot Section Components, Conference "ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air", Berlin, June 9-13, 2008
- ⁸¹ Klenk, A., Heinemann, J., Helmrich, A., Husemann, R., Applicability of Ni-Based Welding Consumables for Boiler Tubes and Piping in the Temperature Range up to 720°C. 4th Int. Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants. Hilton Head Island, 2004
- ⁸² Klenk, A., Qualifizierung von Nickelbasiswerkstoffen für Sammler und Rohrleitungen, Rohrleitungen in Kraftwerken und chemischen Anlagen, 2006, S.145-156
- ⁸³ Kalwa, G., Schnabel, E., Umwandlungsverhalten und Wärmebehandlung der martensitischen Stähle mit 9 bis 12% Chrom, VGB Konferenz "Werkstoffe und Schweißtechnik im Kraftwerk" Essen, 1. und 2. März 1989
- ⁸⁴ Bäumel, A., Mögliche Gefügeveränderungen beim Schweißen im Nahtbereich von austenitischen sowie ferritisch-austenitischen Chrom-Nickel-Stählen und deren Auswirkung auf das Korrosionsverhalten, VDI Berichte, 6. Jahrestagung Schadensanalyse, Würzburg 22. und 23. September 1994
- ⁸⁵ ESAB GmbH, Das Schweißen von Werkzeugstählen und Stählen für Hochtemperaturanwendungen, Handbuch für das Reparatur- und Instandhaltungsschweißen, Solingen, 2008, S.18-24
- ⁸⁶ Ritterbach, VDI-Vortrag, Düsseldorf, November 2008
- ⁸⁷ Graf, A., Unternehmenspräsentation RWE, Essen, 2012
- ⁸⁸ Schubauer, C., Bewertung von Kohlekraftwerke und Verbesserung ihrer Dynamik in Hinblick auf die zukünftigen Anforderungen, VDI Wissensforum, 23. Mai 2012
- ⁸⁹ TransmissionCode 2007, Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, Version 1.1, Verband der Netzbetreiber VDN e.V. beim VDEW, August 2007, S.25/90
- ⁹⁰ Balling, L., Schmid, E., Tomschi, U., Flexiblen Kraftwerken gehört die Zukunft, Energy 2.0-Kompendium 2011, S.136-139
- ⁹¹ RWE Anfahrtdiagramm des Kraftwerks Niederaußern vor regelungstechnischer Optimierung, 2010
- ⁹² RWE Anfahrtdiagramm des Kraftwerks Niederaußern nach regelungstechnischer Optimierung, 2011
- ⁹³ Langeheinecke, K., Jany, P., Sapper, E., Thermodynamik für Ingenieure, Vieweg Verlag, 5. Aufl. 2004
- ⁹⁴ Pazur, S., Typische Ursachenkollektive für Schäden an Dampfturbinen und deren Verhütung, VDI Berichte Nr. 1027, München, 1992, S.138
- ⁹⁵ Koppe, W., Leckdetektion von Sammlern an Dampferzeugern, Beiträge zum 6. Kolloquium Schallemission, Zittau, 22.-24. April 1986
- ⁹⁶ Schweißzusätze für den Kraftwerksbau, Böhler Welding Group, Imagebroschüre der Böhler Schweißtechnik GmbH, Hamm, BTSGD015D, 2011

-
- ⁹⁷ Zabelt, K., Böhme, A., Helmrich, A., Wachter, O., Erste Sammler aus P92 im Gemeinschaftskraftwerk Kiel, Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe in Düsseldorf am 28.11.1997, S.33-S.41.
- ⁹⁸ Lange, G., Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle, John Wiley--VCH, 5. Aufl. 2001
- ⁹⁹ EN 12952-2:2001, Kap.3
- ¹⁰⁰ RWE Kraftwerk Emsland, Fotografie des HD-Austrittssammlers im Rahmen einer Revision
- ¹⁰¹ Mohrmann, R., Vortrag zur Lebensdauersimulation für flexible Kraftwerke, Dresden 10.10.2013
- ¹⁰² Berker, R., Technisch-betriebswirtschaftliche Bewertung elektrischer Anlagen am Beispiel des Verteilertransformators 110/10 kV, Diplomarbeit Nr. 294, Ruhr-Universität Bochum, 1996
- ¹⁰³ Lück, W., Lexikon der Betriebswirtschaft, Die Wirtschaft, verlag moderne industrie, 1990
- ¹⁰⁴ Rummel, K., Die kalkulatorische Bewertung von Anlagen, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1947
- ¹⁰⁵ VDI Richtlinie 6025, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf, November 2012
- ¹⁰⁶ Wöhe, G., Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Verlag Franz Vahlen, München, 18. Auflage, 1993, Abschnitt 5
- ¹⁰⁷ Suding, P.H., Problemadäquate Investitionsrechnung bei energietechnischen Investitionen, VDI Berichte Nr. 684, S.57-79
- ¹⁰⁸ Warnecke, H. J. et al.: Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure, München, Wien 1996, 3. Aufl., S.92
- ¹⁰⁹ http://www.sfv.de/artikel/solarstrom_vermindert_atomgewinne_und_senkt_strompreis.htm
Seitenaufruf am 2.12.2013
- ¹¹⁰ Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Arbeitsbericht: Stromerzeugungskosten im Vergleich, Stuttgart, Februar 2008
- ¹¹¹ F. R. Larson, James Miller: A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses. In: Trans. ASME. Vol. 74, S.765ff.