



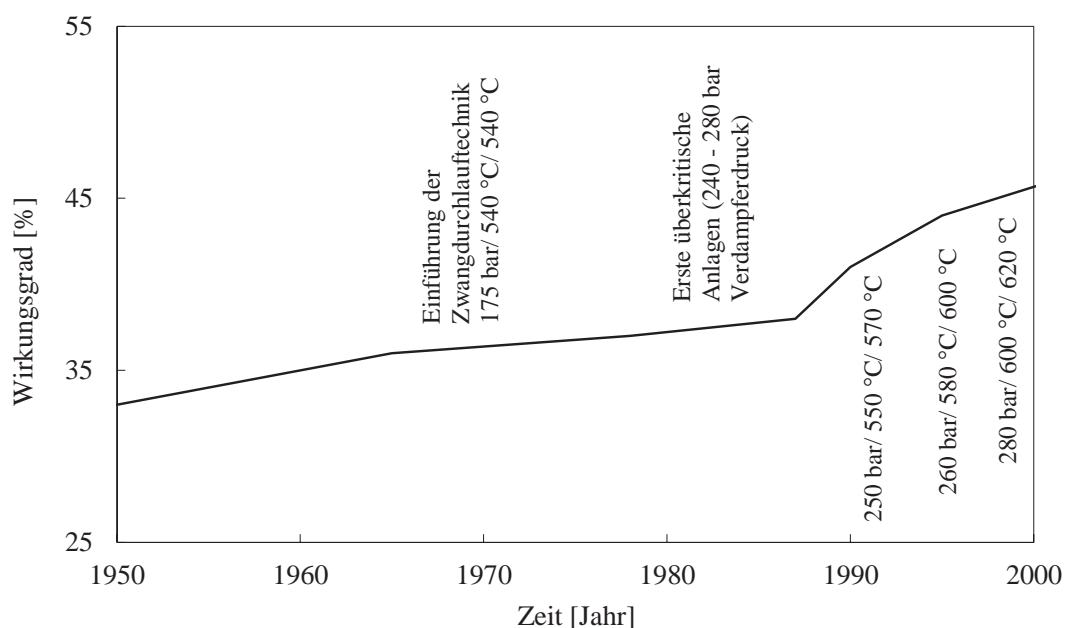
# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

In Deutschland fielen in den vergangenen Jahren politische Entscheidungen, die den zukünftigen Anlagenbestand an Kraftwerken nachhaltig prägen werden. Die Bundesregierung hat im Jahr 2011 beschlossen, die Laufzeit aller deutschen Kernkraftwerke stufenweise und schließlich im Jahr 2022 zu beenden [11]. Der Ersatz der Kraftwerksleistung aufgrund der Stilllegung von Kernkraftwerken und die Abschaltung älterer, unwirtschaftlicher Kraftwerke verlangen für den Grund- und Mittellasteinsatz wettbewerbsfähige Kraftwerke mit hohen Wirkungsgraden. Zudem wird durch die eingeleitete Energiewende der Ausbau der erneuerbaren Energien wesentlich vorangetrieben. Die zukünftig verstärkte volatile Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie erfordert beim Einsatz fossiler Erzeugungseinheiten möglichst flexible Kraftwerke mit hohen Laständerungsgeschwindigkeiten und kurzen An- und Abfahrzeiten. Die genannten Hintergründe werden nachfolgend näher erläutert.

### i) Wettbewerbsfähige Kraftwerke mit hohen Wirkungsgraden

Der konventionelle Kraftwerkspark in Deutschland besteht derzeit zu ca. 50 % aus Kraftwerken, die älter als 25 Jahre sind [62]. Darunter befinden sich Anlagen, die bereits kurz vor Ende ihrer technischen Lebensdauer stehen. Das Betriebsende dieser Dampferzeuger kann je nach wirtschaftlichem Aufwand mit entsprechenden Instandhaltungsmaßnahmen verschoben werden. Zudem kann die Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit dieser Anlagen mit Wirkungsgrad steigernden Umbaumaßnahmen, wie z. B. Optimierung der Mahl- und Feuerungsanlagen oder Neubeschauelung der Dampfturbine, verbessert werden [62].



**Bild 1.1: Wirkungsgradentwicklung von steinkohlegefeuerten Dampfkraftwerken [15]**



Nach Schätzung der Vereinigung der Großkesselbesitzer (VGB) sind nach den momentanen politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit mit Strom bis ins Jahr 2020 zusätzlich ca. 40 GW an neuer konventioneller Kraftwerksleistung in Deutschland zu installieren. Der beschlossene Kernenergieausstieg sowie der Ersatz ineffizienter Kraftwerksblöcke erfordert nach Ansicht von Energieexperten den Bau neuer konventioneller Kraftwerke mit hohen Wirkungsgraden, um die Treibhausgasemissionen möglichst gering zu halten.

In Bild 1.1 ist die Wirkungsgradentwicklung von Steinkohlekraftwerken mit den dazugehörigen Dampfparametern seit den 1950er Jahren dargestellt. Die neuesten, hocheffizienten Dampferzeuger besitzen mit den heutzutage verfügbaren Werkstoffen bei Dampftemperaturen von 600 bis 620 °C und Drücken von 280 bar Wirkungsgrade von bis zu 47 % bei Steinkohlekraftwerken und bis zu 43 % bei Braunkohlekraftwerken [72].

Zur weiteren Erhöhung des Wirkungsgrades auf über 50 % ist die Steigerung der Dampfparameter auf Dampftemperaturen von 700 bis 720 °C und Drücke von 350 bar erforderlich. Nach bisherigen Kenntnissen können bei diesen Dampfparametern nur neue, auf Nickel basierte Werkstoffe eingesetzt werden [15]. Diese Werkstoffe zeigen neben einer höheren Kriechfestigkeit auch eine höhere Beständigkeit gegenüber Korrosion und Oxidation [36]. In [4] und [72] werden die neuesten Werkstoffentwicklungen für Hochleistungskraftwerke aufgezeigt. Die seit 1985 erfolgten Entwicklungen der Kraftwerkstechnologien und Werkstoffe sind in [13] beschrieben.

## **ii) Flexible Kraftwerke mit hohen Laständerungsgeschwindigkeiten**

Seit der Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) im Jahr 2000 stieg der Anteil der regenerativen Energien am gesamten Bruttostromverbrauch in Deutschland stetig an und lag nach Auskunft des Umweltbundesamtes im Jahr 2010 bereits bei 16,8 % [80]. Das im Jahr 2008 novellierte EEG beinhaltet das von der Bundesregierung formulierte Ziel, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromproduktion bis ins Jahr 2020 auf mindestens 30 % und danach weiter zu erhöhen [10]. Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wie Wind und Sonne ist volatil und gilt dadurch als nicht gesicherte Erzeugungskapazitäten.

Das beschriebene regulatorische Umfeld und die dadurch veränderten Rahmenbedingungen im Energiesektor beeinflussen den Kraftwerksbetrieb konventioneller Anlagen. Kohlebefeuerte Kraftwerksblöcke, die für den Grund- oder unteren Mittellastbereich ausgelegt sind, werden aufgrund der volatilen und vorrangigen Einspeisung der erneuerbaren Energien zukünftig vermehrt im oberen Mittel- oder sogar Spitzenlastbereich eingesetzt [44]. Zudem erhöht sich der Einsatz der Kraftwerke im Teillastbetrieb, was zu einer Verschlechterung der Brennstoffausnutzung, höheren Kosten und schlechterer Umweltbilanz führt.



Die Auswirkungen auf die bestehenden und zukünftigen Kraftwerksanlagen werden sich in einer steigenden Flexibilisierung beispielsweise durch Steigerung der Laständerungsgeschwindigkeiten und verkürzten An- und Abfahrzeiten zeigen. Dies führt zu vermehrten An- und Abfahrten sowie häufigen Laständerungen der Dampferzeuger. Insbesondere die dickwandigen Dampferzeugerbauteile erfahren dadurch zunehmende Werkstoffbeanspruchungen, die die Bauteillebensdauer verkürzen.

Bei der Auslegung von Dampferzeugeranlagen wird je nach Betriebsweise meist von einer Lebensdauer von ca. 45 Jahren ausgegangen. Ein vorzeitiger Austausch von dickwandigen Bauteilen würde hohe Kosten durch die Herstellung des Bauteils sowie durch die erforderliche Stillstandszeit des Kraftwerks verursachen. Zudem hat ein dickwandiges Bauteil herstellungsbedingt lange Lieferzeiten. Dies erfordert eine langfristige Planung und geeignete Überwachungsmethoden zur Lebensdauerbewertung der dickwandigen Bauteile [67], [71].

## 1.2 Problemstellung

Wie einleitend beschrieben, spielen die Werkstoffe der Dampferzeugerbauteile für hohe Kraftwerkswirkungsgrade und den zukünftig steigenden flexiblen Kraftwerkseinsatz eine zentrale Rolle. Deshalb werden nachfolgend die möglichen Werkstoffbeanspruchungen der Dampferzeugerbauteile genannt und abschließend Annahmen bei der Auslegung der Dampferzeugerbauteile dargestellt.

Dampferzeugerbauteile wie Membranwände, Überhitzerrohre und Sammler sind zahlreichen Beanspruchungen ausgesetzt. Die möglichen funktionsbedingten Bauteilbeanspruchungen können nach [16] in Volumen- und Oberflächenbeanspruchungen unterteilt werden.

Bauteilbeanspruchungen, die zu Verformungen des Bauteil-Volumens führen, werden als Volumenbeanspruchung bezeichnet. Dazu zählen einerseits mechanische Beanspruchungen wie Zug oder Druck, Schub, Biegung, Torsion und hydrostatischer Druck und andererseits thermisch induzierte Spannungen.

Oberflächenbeanspruchungen sind Beanspruchungen, die auf die Oberfläche von Werkstoffen einwirken. Für Dampferzeugerbauteile wesentliche Beispiele hierfür sind zum einen Beanspruchungen wie Korrosion und zum anderen Strömungsbeanspruchungen wie Kavitation und Erosion.

Die Heizflächenrohre sind auf der Rauchgasseite mit heißen Rauchgasen beaufschlagt, deren Temperatur aufgrund des Wärmedurchgangs Wandtemperaturen verursachen, die 30 bis 40 °C höher als die jeweilige lokale Temperatur des Arbeitsstoffs sind. Zudem erfahren die beheizten Heizflächenrohre Wanddickenverringerungen als Folge von Abzehrungen durch



Hochtemperaturkorrosion oder Erosion. Die Ausbildung einer Oxidationsschicht auf der Arbeitsstoffseite (Wasser bzw. Dampf) führt bei beheizten Rohren über den zusätzlichen Wärmedurchgangswiderstand zu einer Erhöhung der Rohrwandtemperatur. Diese komplexen Zusammenhänge wirken sich örtlich unterschiedlich auf die Lebensdauer aus, so dass ein frühzeitiges Versagen auftreten kann [86].

Höhere Kraftwerkswirkungsgrade können mit steigenden Dampfparametern erzielt werden, dazu muss jedoch die Werkstoffauswahl und Dimensionierung der druckführenden Bauteile angepasst werden [15]. Steigen die Betriebsdrücke, dann steigt auch die Wanddicke der Bauteile, wie Sammler und Rohrleitungen [72]. Die Wanddicke, die Wärmeleitung im Bauteil und die arbeitsstoffseitige Temperaturänderungsgeschwindigkeit sind für die Temperaturdifferenzen in der Bauteilwand und dementsprechend für die Wärmespannungen entscheidend. Diese Wärmespannungen führen zu einem Lebensdauerverbrauch und begrenzen die Betriebsflexibilität.

Bei der Auslegung von Dampferzeugerbauteilen wird von einer gleichmäßigen Temperaturverteilung innerhalb bestimmter Baugruppen ausgegangen. Ein örtliches Versagenspotenzial innerhalb der Baugruppen aufgrund einer sich lokal ausbildenden Temperaturabweichung kann nicht direkt berücksichtigt werden, da der Detaillierungsgrad der Berechnungen hierfür bisher nicht ausreichend ist. Dem wird mit entsprechenden Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung von Dampferzeugerbauteilen entgegengetreten. Ferner muss das Risiko eines örtlichen Versagens durch angepasste aufwändige Inspektionen minimiert werden. Für die Festlegung der Inspektionsintervalle werden generell Erfahrungswerte bzw. Erschöpfungsanalysen zugrunde gelegt, die allerdings die örtlichen Verhältnisse nicht immer ausreichend berücksichtigen können. Diese örtlichen Verhältnisse ergeben sich aus den lokalen Temperatur- und Spannungsverhältnissen bzw. ihrem zeitlichen Verlauf.

Generell erfordert die Entwicklung neuer Werkstoffe auch bei den Auslegungsmethoden eine kontinuierliche Optimierung hinsichtlich Ausschöpfung der Werkstoffbeanspruchung oder der maximalen Laständerungsgeschwindigkeiten. Simulationsprogramme können hierbei helfen, das Betriebsverhalten detailliert vorherzusagen und die Potenziale hinsichtlich Wirkungsgrad-erhöhung und Laständerungsgeschwindigkeit aufzuzeigen.



### 1.3 Forschungsbedarf und Zielsetzung

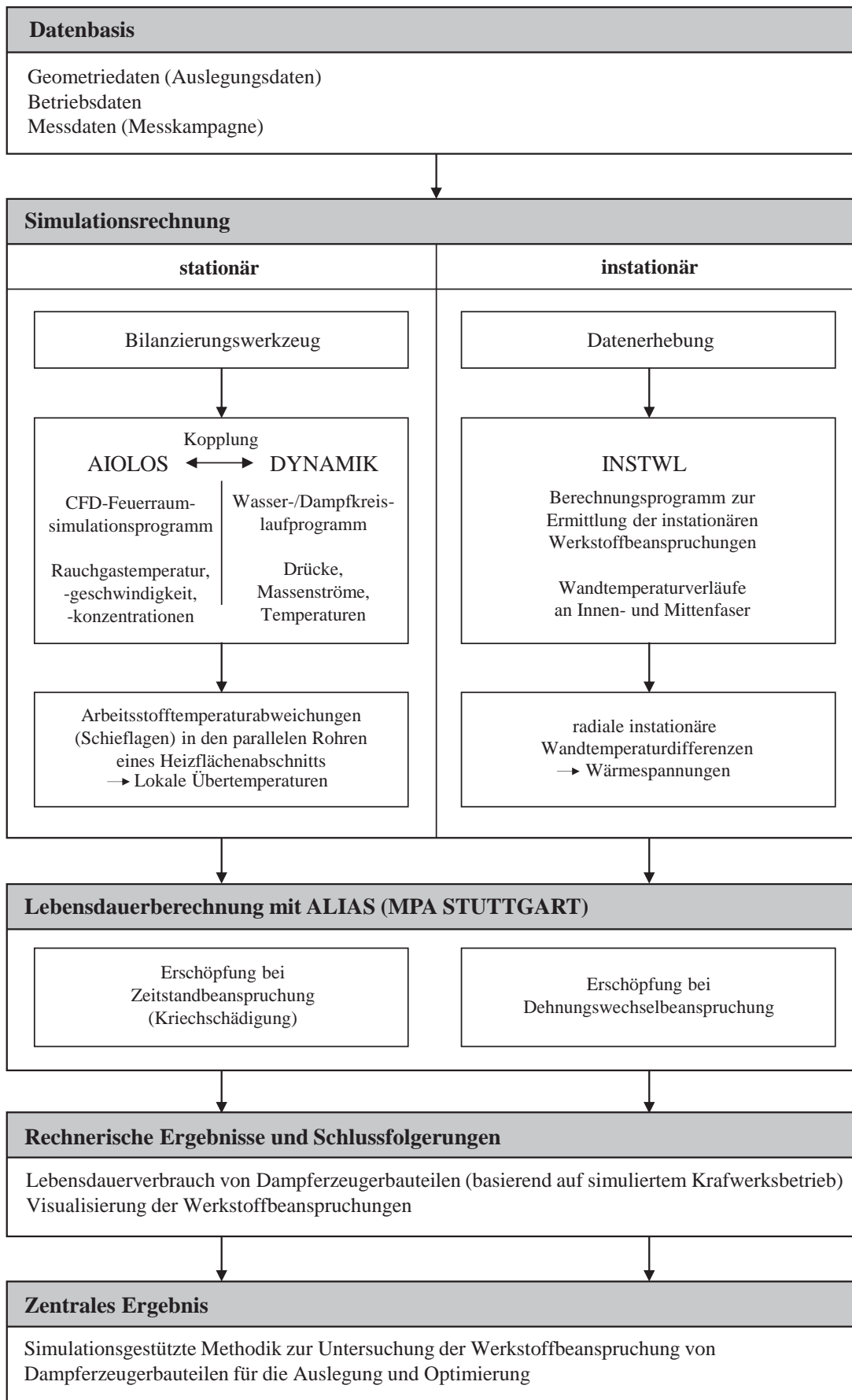
Zur Berechnung der Betriebsvorgänge und zur Auslegung von Dampferzeugern werden Simulationsprogramme eingesetzt. Die Simulation eines Dampferzeugers umfasst die Themengebiete Feuerung und Rauchgasseite, Wasser-/Dampfkreislauf sowie Werkstoffbeanspruchung. Für jeden Bereich gibt es spezielle Simulationsprogramme, die je nach Fragestellung detaillierte Antworten geben.

Der Forschungsbedarf besteht in der gesamtheitlichen Betrachtung der Betriebsvorgänge in Dampferzeugern und hat das Ziel, die komplexen Zusammenhänge zwischen Feuerung und Rauchgasseite, Wasser-/Dampfkreislauf und Werkstoffbeanspruchung aufzuzeigen. Mit der in dieser Arbeit entwickelten und in Bild 1.2 dargestellten Methodik kann eine Aussage über die Werkstofferschöpfung bei Zeitstand- sowie Dehnungswechselbeanspruchung getroffen werden.

Die simulationsgestützte Methodik kann zur Auslegung und Optimierung von Dampferzeugern eingesetzt werden. Durch die mit einem hohen Detaillierungsgrad durchgeführten Simulationen und durch die Kopplung verschiedener Simulationsprogramme können Werkstoffbeanspruchungen festgestellt sowie Gegenmaßnahmen zur Vergleichmäßigung der Bauteilbeanspruchungen und damit zur Erhöhung der Lebensdauer mit dieser Methodik abgeleitet werden. Dadurch könnten Potenziale zur Wirkungsgradsteigerung ausgeschöpft werden. Dies ermöglicht geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen der im Betrieb befindlichen Kraftwerke.

Die in dieser Arbeit weiterentwickelten bzw. erstellten Programme, die die Grundlage der erarbeiteten Methodik darstellen, werden detailliert mit Messwerten validiert. Mit den beiden in Bild 1.2 aufgezeigten Pfaden soll verdeutlicht werden, dass die stationären Simulationen (Zeitstandbeanspruchung) und instationären Berechnungen (Dehnungswechselbeanspruchung) zu unterscheiden sind, wobei beide Simulationspfade die Geometrie-, Betriebs- und Messdaten als Datenbasis und Randbedingungen verbinden.

Bei der stationären Simulation der Feuerung und Rauchgasseite sowie Wasser-/Dampfseite werden die am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart entwickelten Simulationsprogramme AIOLOS und DYNAMIK miteinander nach [60] gekoppelt. Die Schnittstelle der Kopplung der beiden Programme ist die Rohrwand [60]. Die entscheidenden Parameter für die Kopplung sind die Rohrwandtemperaturen und die aufgeprägten Wärmestromdichten. Die für die stationäre Simulation wichtigen Randbedingungen wie Geometrie-, Mess- und Betriebsdaten werden mit Hilfe eines in dieser Arbeit entwickelten Bilanzierungswerkzeugs auf Konsistenz überprüft.



**Bild 1.2: Anwendung der Simulations- und Berechnungsprogramme**



Für die Berechnung der instationären Temperaturverteilungen in dickwandigen Dampferzeugerbauteilen wurde das Berechnungsprogramm INSTWL entwickelt, das auf Basis der Sammlergeometriedaten, Werkstoffkenngrößen und des Zeitverlaufs arbeitsstoffseitiger Messwerte (Temperatur, Massenstrom und Druck) den radialen Temperaturverlauf in der Bauteilwand und daraus die Werkstoffspannungen nach dem Regelwerk TRD 301, Anlage 1 [76] berechnen kann.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Berechnung des Lebensdauerverbrauchs von Dampferzeugerbauteilen. Deshalb werden mit den berechneten Wandtemperaturen aus den stationären Simulationen (Zeitstandbeanspruchung) und den instationären Berechnungen (Dehnungswechselbeanspruchung) die Werkstoffbeanspruchungen mit dem bei der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA) entwickelten Simulationsprogramm ALIAS (Advanced Life Assessment System) berechnet. Die notwendigen Schnittstellen wurden einerseits für die Berechnung der Erschöpfung bei Zeitstandbeanspruchung für AIOLOS, DYNAMIK und ALIAS und andererseits für die Berechnung der Erschöpfung durch Dehnungswechselbeanspruchung zwischen INSTWL und ALIAS geschaffen.

Mit Hilfe umfangreicher Messungen sollen die Berechnungsergebnisse validiert und Aussagen über den realen Dampferzeugerbetrieb getroffen werden.

Nachfolgend werden die wesentlichen Neuerungen dieser Arbeit dargestellt und kurz erläutert. Dies sind bei der stationären Simulationsrechnung (Zeitstandbeanspruchung) die Erhöhung des Detaillierungsgrades der Simulationsrechnungen, die Modellerweiterungen und der Genauigkeitsgewinn durch eine Messkampagne. Für die instationären Berechnungen (Dehnungswechselbeanspruchung) wurde ein Berechnungsprogramm erstellt.

### **i) Erhöhung des Detaillierungs- und Genauigkeitsgrades (stationär)**

Die vorliegenden und bereits am IFK der Universität Stuttgart bestehenden Simulationsprogramme für die Berechnung der Feuerung und Rauchgasseite im Dampferzeuger (AIOLOS) und des Wasser-/Dampfkreislaufs (DYNAMIK) erfordern zur detaillierten Betrachtung der Erschöpfung bei Zeitstandbeanspruchung eine entsprechende örtliche Auflösung (siehe Kapitel 4.2.1). Der Detaillierungsgrad der Heizflächenrohrberechnung beschränkte sich bei den Simulationsrechnungen nach [60] auf die Heizflächenrohre innerhalb des mit Rauchgas durchströmten Kessels. Die Heizflächenrohre der Überhitzer und Zwischenüberhitzer verlaufen jedoch auch außerhalb des rauchgasbeaufschlagten Gebiets im unbeheizten Zwischenraum, dem sogenannten Totraum. In dieser Arbeit wurde die gesamte detaillierte Heizflächengeometrie von Verteiler bis Sammler im rauchgasbeaufschlagten, d. h. beheizten, und im nicht rauchgasbeaufschlagten, d. h. unbeheizten Bereich betrachtet, da die individuellen Rohrverläufe einen Einfluss auf die Druckverluste und somit auf die



Massenstromverteilung haben, wodurch wiederum die Arbeitsstoff- (Wasser bzw. Dampf) und Wandtemperaturverläufe und letztlich die Werkstoffbeanspruchungen der einzelnen Rohre beeinflusst werden.

Die in dieser Arbeit zur Erhöhung des Detaillierungs- und Genauigkeitsgrades der Simulationsrechnung behandelten Aspekte lauten:

- Abbildung der tatsächlichen Verläufe jedes einzelnen Heizflächenrohres und
- erweiterte Berücksichtigung der innerhalb und außerhalb des Gebietes der Rauchgasbeaufschlagung liegenden beheizten und unbeheizten Rohre der Heizflächen.

## **ii) Modellerweiterungen (stationär)**

Bei der stationären gekoppelten Simulation der Feuerung und Rauchgasseite mit AIOLOS und der Wasser-/Dampfseite mit DYNAMIK (siehe Kapitel 3) erfolgten in dieser Arbeit nachstehende Modellerweiterungen:

- Erweiterung der im Wasser-/Dampfkreislaufprogramm (DYNAMIK) vorliegenden Druckverlustberechnung mit der Berücksichtigung von Krümmern, Sammlerverengungen und Drosselblenden nach [22] und [81] (siehe Kapitel 3.2.1),
- Optimierung der Programmmodule im Wasser-/Dampfkreislaufprogramm DYNAMIK hinsichtlich Anwendbarkeit und Berücksichtigung komplexer Heizflächenverschaltungen und einer hohen Anzahl an Heizflächenrohren (siehe Kapitel 4.2.1),
- Implementierung eines Iterationsverfahrens in AIOLOS zur schnelleren Konvergenz der Simulationsergebnisse durch Anpassung der Wärmeübergangswiderstände bzw. Verschmutzungsfaktoren an den Heizflächen zur Lösung der stationären Enthalpiebilanzen (siehe Kapitel 4.2.2) sowie
- Erstellung einer Schnittstelle der IFK-Simulationsprogramme AIOLOS und DYNAMIK zum MPA-Lebensdauerberechnungsprogramm ALIAS.

## **iii) Genauigkeitsergebnis durch Messkampagne (stationär)**

Zur Validierung der detaillierten Simulationsergebnisse sind Betriebs- und Messdaten erforderlich. Die nachfolgenden Punkte wurden in dieser Arbeit zur Erhöhung der Anzahl an Validierungsdaten durchgeführt:

- Mit Hilfe von Netzmessungen wurden detaillierte Daten über die Zustände auf der Rauchgasseite des Dampferzeugers erhalten und Schief lagen aufgezeigt (siehe Kapitel 4.1.2). Rauchgasseitige Schief lagen haben Auswirkungen auf die Wasser-/Dampfseite und somit auf die Werkstoffbeanspruchungen der Heizflächenrohre.





- Während der Messkampagne wurden Kohleproben an jedem Zuteiler des Dampferzeugers gezogen, um mit Hilfe von Kohleanalysen Aussagen über die Kohlequalität an sich und über unterschiedliche Kohlequalitäten zu erhalten. Die Kohlezusammensetzung ist vor allem eine wichtige Eingangsgröße für die Simulationsrechnungen (siehe Kapitel 5.3). Unterschiedliche Brennstoffqualitäten können durch das individuelle Zünd- und Abbrandverhalten Auswirkungen auf den Verbrennungsablauf, die Wärmeentwicklung und letztlich auf die Werkstoffbeanspruchung haben (siehe Kapitel 5.2.1).
- Betriebsmessungen aus dem Dampferzeuger werden als Randbedingungen für die stationäre Simulation verwendet, die mit einem Bilanzierungswerkzeug überprüft werden. Hinterlegt sind Energie- und Massenbilanzierungen des Brennstoffs bzw. Rauchgases und Arbeitsstoffs.

#### **iv) Programmerstellung (instationär)**

Zur Berechnung der instationären Temperaturverteilungen in dickwandigen Bauteilen war nachfolgender Bearbeitungsaufwand erforderlich:

- Auswahl einer Berechnungsmethodik zur Ermittlung der instationären Temperaturdifferenzen in dickwandigen Bauteilen [85],
- Erstellung des Simulationsprogramms INSTWL zur Berechnung der instationären Temperaturverteilungen in dickwandigen Bauteilen nach [33], [79] (siehe Kapitel 3.3.2) und mechanischen Lochrandspannungen sowie Lochrand-Wärmespannungen nach dem Regelwerk TRD 301, Anlage 1 [76],
- Implementierung der Berechnung der temperaturabhängigen Wärmeleitkoeffizienten in Abhängigkeit des Bauteilwerkstoffs nach [22] und [81], wobei für die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen die Werkstoffkennwerte über den jeweiligen Betrachtungszeitraum bei der maßgebenden Zyklustemperatur nach [76] konstant gehalten wurden, sowie
- Erstellung einer Schnittstelle des IFK-Simulationsprogramms INSTWL zum Lebensdauerberechnungsprogramm ALIAS der MPA Universität Stuttgart.

## **1.4 Gliederung der Arbeit**

Nach einem einleitenden Kapitel wird in dieser Arbeit im zweiten Kapitel der Stand der Wissenschaft und Technik dargestellt. Aufgezeigt werden Simulationsprogramme, die für die Analyse der Werkstoffbeanspruchung eingesetzt werden.

Im dritten Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der in dieser Arbeit nach Bild 1.2 eingesetzten Simulationsprogramme vorgestellt und wird auf weiterführende Literatur



verwiesen. Die weiterentwickelten und neu erstellten Simulationsprogramme werden bei der stationären Simulation für die Betrachtung der Zeitstandbeanspruchung und bei der instationären Berechnung für die Bewertung der Dehnungswechselbeanspruchung in dickwandigen Dampferzeugerbauteilen erklärt.

Das vierte Kapitel beschreibt die Vorgehensweise bei den Simulationsrechnungen. Zunächst erfolgt die Betriebs- und Messdatenerfassung. Dabei werden die Randbedingungen mit dem in dieser Arbeit entwickelten Bilanzierungswerkzeug überprüft. Danach werden die Diskretisierung und die Simulationsrechnungen durchgeführt.

Im fünften Kapitel werden nach der Vorstellung des betrachteten Dampferzeugers die Ergebnisse der Betriebsdatenerfassung detailliert hinsichtlich Temperaturschiefen an den Endstufenheizflächen beschrieben, um zunächst die unterschiedlichen Werkstoffbeanspruchungen und deren möglichen Ursachen aufzuzeigen. Die Ergebnisse der rauchgasseitigen CFD-Simulation des Dampferzeugers (AIOLOS) und der Wasser-/Dampfkreislaufsimulation (DYNAMIK) werden detailliert analysiert und mit Messwerten, die im Rahmen einer Messkampagne im Dampferzeuger gewonnen wurden, verglichen. Das Simulationsprogramm INSTWL zur Berechnung der instationären Werkstoffbeanspruchung wird eingesetzt, um anhand eines Kaltstarts den Verlauf der mechanischen Lochrandspannung, der Lochrand-Wärmespannung und der Gesamt-Lochrandspannung in dickwandigen Bauteilen zu berechnen.

Im sechsten Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse und wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst. Zudem wird ein Ausblick auf die zukünftig möglichen Weiterentwicklungen von Simulationsprogrammen im Dampferzeugerbereich gegeben.