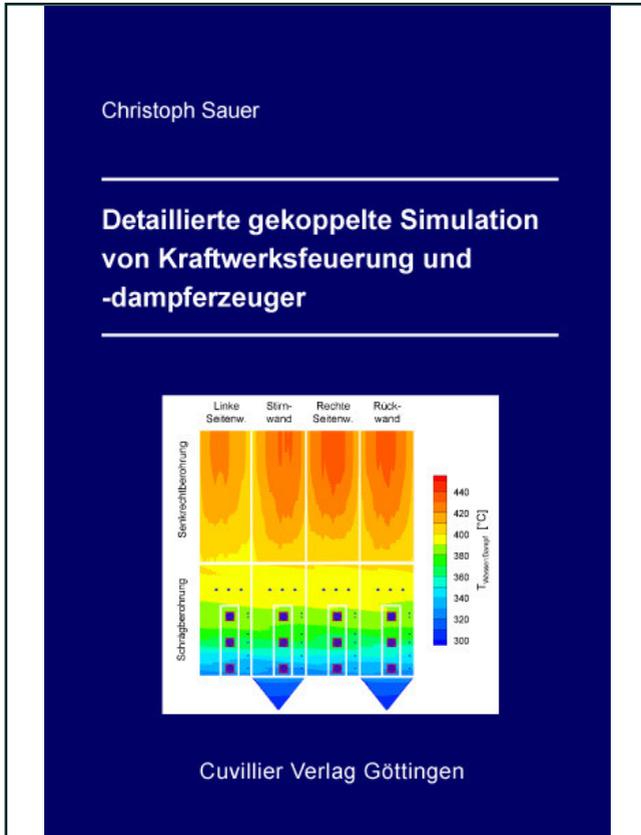




Christoph Sauer (Autor)
Detaillierte gekoppelte Simulation von Kraftwerksfeuerung und -dampferzeuger



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1842>

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Kohlebefeuerte Kraftwerksanlagen haben in den vergangenen Jahrzehnten vielfältige Entwicklungen und Verbesserungen erfahren.

In den 1960er und 70er Jahren wurden in den USA bereits überkritische Festdruck-Dampferzeuger mit Einheitenleistungen bis 1300 MW gebaut. Diese Anlagen waren aber nur für den Grundlastbetrieb ausgelegt. Ihre Weiterentwicklung wurde nicht weiter verfolgt.

Etwas später in den 70er und 80er Jahren wurden in Europa Zwangdurchlaufdampferzeuger mit ebenfalls bis 800 MW Einheitenleistung gebaut. Sie waren für Gleitdruck ausgelegt und wurden teilweise überkritisch betrieben. Neben Grundlast sind diese Dampferzeuger auch für Mittellast geeignet.

Seit Mitte der 80er wurden die Anstrengungen verstärkt, den Wirkungsgrad von Dampferkraftwerken durch Anhebung der Dampfparameter (Druck und Temperatur) zu erhöhen.

Dies führte im vergangenen Jahrzehnt zum sogenannten 600°C-Kraftwerk, wobei japanische Kraftwerksbauer dabei die Vorreiterrolle einnahmen. Mittlerweile sind aber auch in Deutschland über 10 GW solcher 600°C-Anlagen in Planung bzw. bereits im Bau. Diese Kraftwerksgeneration wird einen Wirkungsgrad von 45 - 46 %¹ für Steinkohle befeuerte Anlagen und einen Wirkungsgrad von 43 - 44 % für Braunkohle befeuerte Anlagen erreichen.

Insgesamt müssen innerhalb der nächsten 20 Jahre in Deutschland Kraftwerksanlagen entsprechend einer Kapazität in der Größenordnung von 40 GW durch Neubauten ersetzt werden. Zusätzliche Kapazitäten durch wachsenden Energiebedarf sind hier noch nicht mitgerechnet. In

¹Soweit nicht anders definiert, handelt es sich um den Nettowirkungsgrad bezogen auf den unteren Heizwert

der EU (inkl. Mitgliedsstaaten ab 01.05.2004) sind 60 % der installierten Kraftwerkskapazität älter als 25 Jahre [1].

Die Entwicklung ist mit Erreichen von 600°C Frischdampftemperatur keineswegs abgeschlossen. Bereits in den 1990er Jahren wurde ein europäisches Programm zur Entwicklung eines kohlegefeuerten 700°C Dampferzeugers mit einem geplanten Wirkungsgrad von über 50 % begonnen.

Im Rahmen der COORETEC-Initiative [2] geht man davon aus, dass durch die Weiterentwicklung der Strömungsmechanik, Thermodynamik, Werkstofftechnik und Kohletrocknungstechnologien eine Wirkungsgradsteigerung auf ca. 51 % möglich ist.

Die Anhebung der Frischdampftemperatur führt zu einer Steigerung des Wirkungsgrades von 0,011 %-Punkten pro Kelvin [3], [4]. Dem entspricht eine Wirkungsgradsteigerung von ca. 1 %-Punkt bei einer gleichzeitigen Anhebung von Frisch- und Zwischendampftemperatur um 50 K [5], [6]. Die Erhöhung des Betriebsdrucks bewirkt bei Großdampferzeugern eine Wirkungsgradsteigerung von 0,005 %-Punkten pro bar [7], [4].

Eine Anhebung der Dampfparameter setzt naturgemäß die Anwendung neuer, teurerer Werkstoffe voraus, die auch bei den höheren Dampfzuständen noch die notwendigen Eigenschaften besitzen.

Gleichzeitig haben neue Anlagen auch größere Einheitenleistungen. Bei den derzeit in Deutschland im Bau befindlichen Anlagen wird eine Einheitenleistung von 1100 MW realisiert. Die dazu erforderlichen größeren Kesselquerschnitte bewirken größere Temperatur- und Geschwindigkeitsdifferenzen auf der Rauchgasseite am Feuerraumende. Die Heizflächenwerkstoffe sind also örtlich unterschiedlich stark belastet.

Die Untersuchung und Bewertung der örtlichen Heizflächenbelastung erfolgt sinnvollerweise durch Abbildung der Realität mit mathematischen Modellen und deren Anwendung in Computersimulationen.

Der Stand der Technik in der Kraftwerkssimulation ist bisher die getrennte Betrachtung, Berechnung oder Simulation von entweder der Kraftwerksfeuerung oder des Dampferzeugers. Da diese beiden Systeme in der Realität jedoch aufs engste miteinander verknüpft sind und in beide Richtungen wechselwirken, sind an der Schnittstelle sinnvolle Randbedingungen für die Berechnung zwingend erforderlich.

Zugleich war es, bedingt durch die begrenzte Rechnerkapazität und durch den Fokus auf die Feuerungstechnik und das Emissionsverhalten der eingesetzten Brennerkonzepte, bis vor kurzem üblich, das Berechnungsgebiet für eine CFD (Computational Fluid Dynamics)-Simulation auf den Feuerraum zu begrenzen (siehe Abbildung 1.1).

Ebenso wurden in der Dampferzeugersimulation weniger detaillierte Auslegungsrechnungen ge-

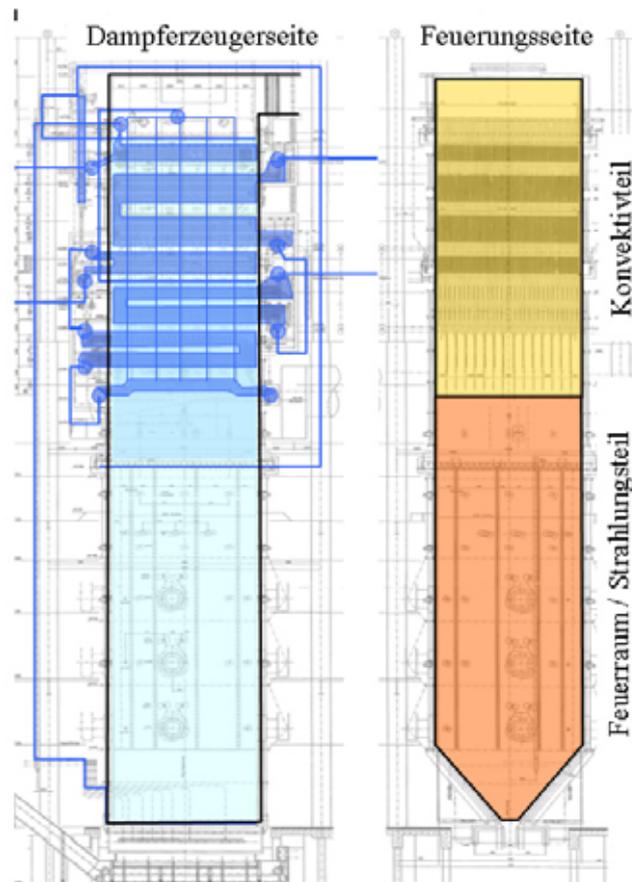


Abbildung 1.1: Schema der Teilsysteme bisheriger Kraftwerkssimulation anhand eines Großkraftwerks

macht und der Strömungsweg des Arbeitsstoffs (AS) Wasser/Dampf meist nur mit einem einzigen repräsentativen Rohr abgebildet.

Eine gekoppelte Simulation des Gesamtsystems aus Dampferzeuger- und Feuerungsseite inklusive Konvektivteil ermöglicht die ganzheitliche Berechnung des Kraftwerkskessels bzw. Dampferzeugers zwischen Brennstoffzufuhr und Dampfturbine. Durch die detaillierte Modellierung der parallelen Heizflächenrohre sind Aussagen bezüglich der örtlichen Wärmeübertragung bzw. Heizflächenbelastung und über den Dampfdurchsatz und -temperaturverlauf in jedem einzelnen Rohr möglich.

1.2 Zielsetzung und Schwerpunkte der Arbeit

Aus der im vorigen Abschnitt geschilderten Sachlage ergeben sich vielfältige, umfangreiche Aufgabenstellungen für die örtlich detaillierte Abbildung der Prozesse in der Kraftwerkstechnik mittels Simulation. Grundlage für viele dieser Aufgaben ist die Kenntnis und das Verständnis für die Vorgänge im Dampferzeuger und die Fähigkeit zu deren möglichst genauen Beschreibung. Um die komplexen Vorgänge im Dampferzeuger verstehen und zielgerichtet optimieren zu können, ist es erforderlich, die wichtigen Phänomene mit Hilfe mathematischer Modelle beschreiben zu können.

Die Zielsetzung dieser Arbeit entsteht aus der Motivation, den Dampferzeuger eines Kraftwerksblocks möglichst optimal auszunutzen. Da die zur Validierung der in dieser Arbeit neu geschaffenen und zusammengestellten Simulationsmodelle erforderlichen Messwerte und verfügbaren Erfahrungen nur für bestehende Feuerungskonzepte und Dampferzeugerschaltungen vorhanden sind, beschränkt sich die vorliegende Arbeit auf die Untersuchung konventioneller Großkraftwerksblöcke. Neuere und künftige Technologien würden den Umfang sprengen und sind daher auch nicht Gegenstand der Betrachtungen.



Abbildung 1.2: Motivation der detaillierten gekoppelten Simulation

Abbildung 1.2 skizziert, wie durch verbesserte Ausnutzung des eingesetzten Werkstoffs der Wirkungsgrad eines Kraftwerksblocks gesteigert werden kann. Bisherige (Un)sicherheitszuschläge könnten bei sichergestellter gleichmäßigerer Heizflächenbelastung reduziert werden. Die mittlere Heizflächenbelastung könnte näher an der maximal zulässigen liegen, da die Spreizung zwischen

maximaler und minimaler Belastung kleiner würde. Damit wären höhere Dampfparameter und ein höherer Wirkungsgrad des Dampferzeugungsprozesses möglich².

Die Vorteile der gekoppelten Simulation wurden u.a. bereits im Verbundforschungsprojekt KOMET650 "Kraftwerksoptionen: Messtechnik-Entwicklung bei Temperaturen bis 650°C" erkannt [8] und im Teilprojekt "Optimierung der Betriebsweise von modernen CO₂-armen Kohlekraftwerken durch detaillierte gekoppelte Prozeßsimulation" die modelltechnischen Grundlagen geschaffen.

Die gekoppelte Simulation umfasst Feuerungsseite und Dampferzeuger, wobei nicht nur der Feuerraum, sondern auch der Konvektivteil auf der Rauchgasseite mit einer CFD-Simulation untersucht wird. Dadurch wird automatisch auch eine geschlossene Energiebilanz im zugrunde liegenden Gesamtsystem erforderlich und eine rauchgasseitige Energiebilanz bis hin zum Kesselende möglich. Die Randbedingungen Wärmestromdichte und Temperatur an der Schnitt-/Kopplungsstelle *Rohrwand* sind Bestandteil des jeweils anderen Teilsystems und werden während der Simulation automatisch wechselseitig übergeben.

Damit soll es künftig möglich sein, Schief lagen und örtliche Belastungsspitzen realitätsnah und zuverlässig abbilden zu können und daraus die Werkstoffbelastung einzelner Rohre aufgrund Innendruck und Temperatur berechnen zu können und somit Hinweise für eine verbesserte Auslegung oder Prozessführung mit Hilfe der Simulationen geben zu können.

Durch die detaillierte Kopplung ist man erstmals in der Lage, vor allem auch die Wechselwirkungen von Feuerung und Dampferzeuger nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ zu untersuchen. Darüber hinaus ermöglicht die Kopplung die Berechnung der Entwicklung der Emissionen und des Ausbrands im Konvektivteil.

Gleichzeitig mit höheren Dampfparametern und Wirkungsgraden stieg bisher die durchschnittliche Einheitengröße von Kraftwerksneubauten. Höhere Blockleistungen gehen einher mit größeren Abmessungen des Dampferzeugers und seiner Heizflächen.

Größere Kraftwerkskessel sind messtechnisch schwerer zugänglich und feuerungsseitige Schief lagen (= Beheizungsschief lagen durch über den Kesselquerschnitt inhomogen verteilte Temperatur, Strahlung, Geschwindigkeit oder Verschmutzung) sind im Betrieb schwerer erfassbar. Die

²Könnte man aufgrund reduzierter Belastungsspitzen durch optimierte Auslegung oder angepassten Betrieb die mittlere Frischdampf temperatur in den parallelen Rohren der Überhitzer um 10 K anheben (d.h. Reduktion des Sicherheitszuschlags von 50 K auf 40 K), so ermöglichte dies einen Wirkungsgradgewinn von ca. 0,11 %-Punkten, was verglichen mit dem Aufwand, den Wirkungsgrad durch andere Entwicklungen bzw. den Einsatz neuer Werkstoffe anzuheben, einen Vorteil bei gleichzeitig geringen Zusatzkosten darstellen würde.

Anforderungen an die Auslegung und die Regelungstechnik steigen, um dennoch einen sicheren und zuverlässigen Betrieb garantieren zu können.

Abbildung 1.3 zeigt die Rauchgastemperatur- und -geschwindigkeitsverteilung über dem Kesselquerschnitt am Feuerraumende, d.h. am Eintritt in die Konvektivheizflächen. Die Unterschie-

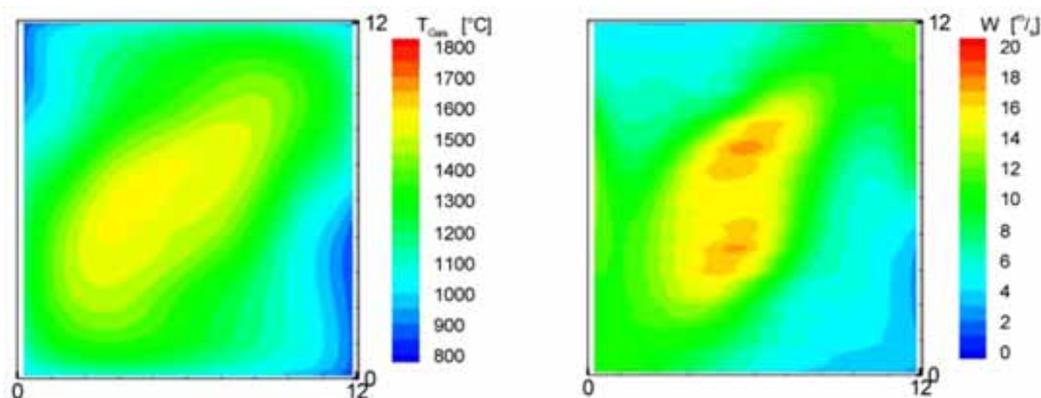


Abbildung 1.3: Temperatur-(links) und Vertikalgeschwindigkeitsprofil (rechts) über dem Kesselquerschnitt am Feuerraumende

de zwischen der Kesselmitte und den Randbereichen sind deutlich erkennbar. Die Rauchgasströmung tritt mit diesen örtlichen Unterschieden in die Konvektivheizflächen ein, deren Rohre eine entsprechend unterschiedliche Beheizung erfahren. Die Dampfdurchsätze und -temperaturen in den parallelen Heizflächenrohren stellen sich entsprechend ebenfalls unterschiedlich ein.

Der Einsatz eines validierten Programms zur detaillierten gekoppelten Simulation ermöglicht hier bereits in der Auslegungsphase Aussagen zu Schief lagen und Ungleichverteilungen, auch in später messtechnisch nicht zugänglichen Bereichen.

Vor dem Hintergrund des enormen Ersatzbedarfs an Kraftwerksleistung und dem Zwang zum kostengünstigen Kraftwerksbetrieb soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Sicherstellung und Bewertung einer optimalen Auslegung und Betriebsführung bei höchsten Wirkungsgraden leisten. Dies geschieht durch die Bereitstellung des Werkzeugs der **detaillierten gekoppelten Kraftwerkssimulation** zur ganzheitlichen Untersuchung des Systems Feuerung/Dampferzeuger.

1.3 Gliederung der Arbeit

Im nächsten Kapitel wird der Kenntnisstand auf den Gebieten der Feuerungstechnik und Dampferzeugertechnik hinsichtlich Prozessführung, Messung und insbesondere Simulation beschrieben. In einer Literaturübersicht werden Erfahrungen, Messwerte, mathematische Modelle und Simulationsprogramme im Zusammenhang mit der Zielsetzung dieser Arbeit zur detaillierteren Beschreibung von Feuerraum und Dampferzeugerkreislauf vorgestellt und diskutiert.

Den Schwerpunkt der Arbeit bilden die am IVD entwickelten, gepflegten und umfassend validierten Programme AIOLOS und DYNAMIK. Es wird dargelegt, weshalb diese Programme im Rahmen der vorliegenden Arbeit benutzt wurden und in welchem Umfang und in welchen Bereichen Erweiterungen erforderlich waren, um die dargelegte Aufgabenstellung zu bearbeiten und die Fragestellungen beantworten zu können.

In Kapitel 3 werden die den zuvor ausgewählten Programmen zugrunde liegenden theoretischen Grundlagen zur Modellbildung und Berechnung von turbulenten reaktiven Strömungen mittels CFD-Simulationen einerseits und des stationären und dynamischen Verhaltens des Dampferzeugerkreislaufs andererseits vorgestellt.

Darauf aufbauend werden in Kapitel 4 die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen wichtigsten neuen Teilmodelle beiderseits der Schnitt-/Kopplungsstelle "*Rohrwand*" erläutert. Diese Teilmodelle umfassen Feuerungs- bzw. CFD-seitig den konvektiven und Strahlungswärmeübergang, die rauchgasseitigen Beläge und den Druckverlust bei der Durchströmung von Rohrbündeln als Modellvorstellung von "*porösen Zellen*". Wasser/Dampf- bzw. DYNAMIK-seitig wird in diesem Kapitel die Modellierung von parallelen Rohren innerhalb der Heizflächen, die Schaltungsmöglichkeiten von Verteilern und Sammlern vor bzw. hinter den Heizflächenrohren und von parallelen, überkreuzten Dampfsträngen über mehrere Heizflächen hinweg beschrieben.

Die detaillierte Abbildung der Heizflächengeometrie, die wechselseitig örtliche Zuordnung von Segmenten der Heizflächenrohre und den Finite-Volumen-Zellen der Feuerungsseite des Dampferzeugers, sowie der Algorithmus zur Kopplung der beiden Systeme Feuerung und Dampferzeuger wird in Kapitel 5 beschrieben.

In Kapitel 6 wird anhand von zwei Großkraftwerksblöcken das Gesamtsystem zur detaillierten gekoppelten Simulation untersucht. Anhand der gekoppelten Simulationen von Neurath-E

wird vor allem die Validierung des Modells der porösen Zellen diskutiert. Die vielfältigen Ergebnisse der Simulationen von Altbach/Deizisau-HKW2 werden umfassend präsentiert und diskutiert. Der Fokus liegt hierbei auf der Validierung der Modelle zur Beschreibung der Wasser/Dampfseite.

Der Zusammenfassung der Arbeit und ihrer Ergebnisse in Kapitel 7 folgt ein Ausblick, in dem weitere Verbesserungen und künftige Anwendungen der detaillierten gekoppelten Simulation aufgezeigt werden.