

Proaktive Produkt- und Prozeßqualifikation in der Dampf- turbinenentwicklung

Die proaktive Qualifikation ist heute fester Bestandteil des Entwicklungsprozesses bei Dampfturbinen, die für den Einsatz in Dampf- und Kombikraftwerken bestimmt sind. Sie leistet mit Hilfe experimentell ermittelter «Zufalls»-Variablen, wie z. B. Wirkungsgrad der Fluten und Zuverlässigkeit der Beschauelungen, einen wertvollen Beitrag zu den für die Kunden wichtigen wirtschaftlichen «Zufalls»-Variablen des Kraftwerks, wie etwa die Eigenkapitalrendite. Zu den Bereichen, in denen die proaktive Produkt- und Prozeßqualifikation eine wichtige Rolle spielt, gehört exemplarisch auch die Entwicklung der Niederdruck-Fluten von Dampfturbinen.

Im Idealfall orientiert sich die Produktentwicklung auf dem Kraftwerkssektor streng an den Wünschen und Anforderungen der potentiellen Kunden. Bei dieser direkten Umsetzung der, bei ABB fest verankerten Customer Focus-Philosophie, spielen wirtschaftliche und ökologische Untersuchungen gleichermaßen eine wichtige Rolle [1]. Dabei wird die idealistisch-deterministische Betrachtungsweise zunehmend von einem realistisch-probabilistischen Ansatz abgelöst [2]. Diese Tendenz ist seit der Deregulierung der Strommärkte und der wirtschaftlichen Bewertung ökologischer Gesichtspunkte besonders deutlich geworden. Im Bereich der Kraftwerke gelten als wirtschaftliche Zufallsvariable – die als «umfassende» Meßgrößen dienen – die Eigenkapitalrendite (ROR), der Kapitalwert-Index (NPVI) und der Amortisationszeitraum (Y) [2]. Sie werden jeweils für die Zeitspanne von der Angebotsabgabe bis zum Nutzungsende berechnet. Wegen dieses langen Zeitraums gewährleistet nur der probabilistische Lösungsansatz brauchba-

re Ergebnisse, insbesondere im Hinblick auf die finanziellen Risiken.

Welche dieser drei wirtschaftlichen Zufallsvariablen für die Beurteilung am wichtigsten sind, hängt vom Standpunkt des jeweiligen Kunden ab. Die Eigenkapitalrendite ermöglicht zusätzlich einen Vergleich dieser Sachinvestition mit Finanzinvestitionen. Eine vollständige Beschreibung der zugehörigen Grundgesamtheiten wird durch die Stichproben-Mittelwerte, -Varianzen und -Umfänge sowie dem gewählten Vertrauensniveau ermöglicht.

Unter der Annahme, daß der Kunde die Eigenkapitalrendite, den Kapitalwert-Index

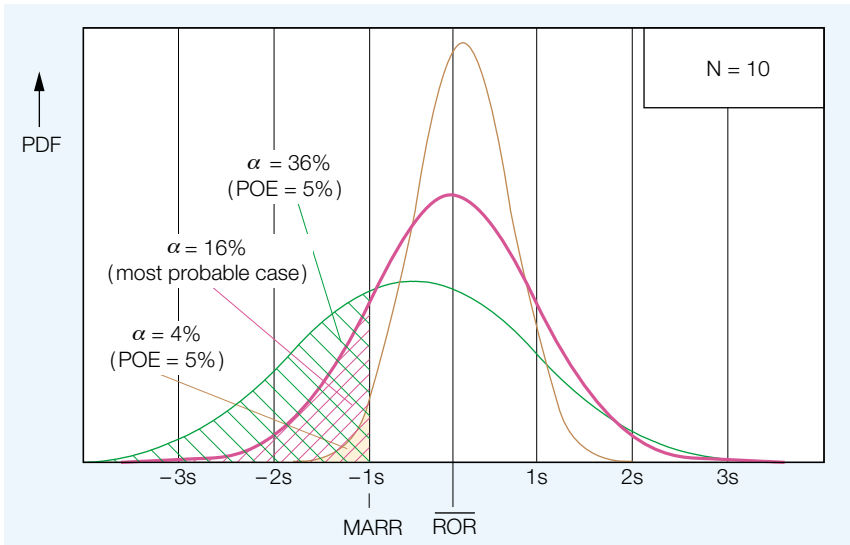
Franz Kreitmeier
Dr. Philippe Juvet
Peter Weiss
ABB Kraftwerke AG

oder den Amortisationszeitraum als «minimal attraktiven» Wert vorgibt, läßt sich mit Hilfe bekannter statistischer Verfahren die Wahrscheinlichkeit der Nichtkonformität aus den wirtschaftlichen Zufallsvariablen des Kraftwerks ermitteln. Da Stichproben-Mittelwert und -Varianz zufallsabhängig sind, kann die Wahrscheinlichkeit der Nichtkonformität nur durch den Modalwert (wahrscheinlichster Wert) und die Vertrauensgrenzen bei einem gewählten Vertrauensniveau angegeben werden. Dieser Sachverhalt ist in **1** am Beispiel der Eigenkapitalrendite dargestellt.

In **1** wird von 10 Stichprobenwerten und einem Vertrauensniveau von 90 % ausgegangen. Von der gesamten Population liegen höchstwahrscheinlich 16 % unter der Minimal Attraktiven Eigenkapitalrendite (MARR). Im ungünstigsten Fall kann dieser Wert, beim gewählten Vertrauensniveau, auf 36 % steigen (obere Vertrauensgrenze), und im günstigsten Fall auf 4 % sinken (untere Vertrauensgrenze). Selbst bei 50 Stichprobenwerten – aber ansonsten gleichen Bedingungen – würden die Vertrauensgrenzen noch bei 25 % bzw. 10 % liegen.

Dieses Beispiel zeigt, daß die Anzahl der Stichprobenwerte nur einen geringen Einfluß auf die Vertrauensgrenzen hat. Da Kraftwerke nicht in großen Mengen hergestellt werden, besteht die einzige Möglichkeit, die Wahrscheinlichkeit der Nichtkonformität nachhaltig zu senken, darin, die Varianz zu verringern. Wenn im obigen Beispiel die Stichproben-Varianz ungefähr viermal kleiner gemacht wird, liegen der Modalwert bei 2,5 %, und die Vertrauensgrenzen bei 15 % bzw. 0,2 %. Mit Hilfe des Kapitalwert-Indexes lassen sich die Werte ebenfalls in Bezug zur Investition setzen und somit auch monetär und speziell als finanzielles Risiko ausdrücken.

Ein aus der Sicht des Kunden überlegenes Produkt, d.h. ein Produkt mit der besten *Gesamtqualität*, übertrifft die Konkurrenzprodukte, wenn es bei der angegebenen MARR, für die Wahrscheinlichkeit der Nichtkonformität die niedrigsten Vertrauensgrenzen hat und dennoch die immer strengeren Umweltschutzvorschriften erfüllt.



Wahrscheinlichkeit der Nichtkonformität für MARR bei einem Kraftwerk (aus der Sicht des Kunden)

- ROR *Eigenkapitalrendite (ROR ist der Stichproben-Mittelwert)*
- PDF *Wahrscheinlichkeitsdichte*
- MARR *Minimal Attraktive Eigenkapitalrendite*
- N *Stichprobenumfang*
- POE *Überschreitungswahrscheinlichkeit*
- s *Standardabweichung der Stichprobe von ROR*
- α *Wahrscheinlichkeit der Nichtkonformität*

Analyse der Wahrscheinlichkeit der Nichtkonformität

Aufgrund der großen wirtschaftlichen Bedeutung der Wahrscheinlichkeit der Nichtkonformität für die Beurteilung von Kraftwerken, müssen die Eingangs-Zufallsvariablen, welche in die Monte-Carlo-Simulation zur Untersuchung von Eigenkapitalrendite, Kapitalwert-Index und Amortisationszeitraum eingehen, bekannt sein. Dies setzt im allgemeinen voraus, daß die Stichproben-Mittelwerte, -Varianzen und -Umfänge sowie das Vertrauensniveau der Grundgesamtheiten bekannt sind.

Bei Wärmekraftwerken ist zwischen den folgenden Eingangs-Zufallsvariablen zu unterscheiden:

- *marktspezifische Zufallsvariablen*, beispielsweise Fremdkapitalzins, Einkommenssteuersatz, Kapitalsteuer und Versicherung, Kapazitätsfaktor (zu Betriebszeiten), spezifische Brennstoff- und Reserveleistungskosten, spezifische Einnahmen, Grenzwerte für die Umweltbelastung (z.B. Schall- und Rauchgasemissionen);

- *kundenspezifische Zufallsvariablen*, beispielsweise Eigenkapitalquote, Eigenkapitalverzinsung, Nutzungsdauer, Reserveleistungsverhältnis (ist von der Größe und Zuverlässigkeit des eigenen Stromversorgungsnetzes abhängig), geplanter Servicefaktor, Anzahl Starts pro Jahr;
 - *herstellerspezifische Zufallsvariablen*, beispielsweise die spezifischen Investitionskosten zum Zeitpunkt des Vertragsabschlusses, die Zeit für Bau und Inbetriebnahme, Wärmeverbrauch, störungs- und wartungsbedingter sowie geplanter Nichtverfügbarkeitsfaktor mit den jeweiligen spezifischen Kosten sowie die spezifischen Betriebskosten.
- Bei der dritten Gruppe der Zufallsvariablen ist es wichtig, zwischen störungsbedingter, wartungsbedingter und geplanter Stillsetzung zu unterscheiden, da die Art der Stillsetzung wegen der spezifischen Reserveleistungskosten sehr unterschiedliche wirtschaftliche Auswirkungen hat.

Proaktive versus reaktive Qualifikation

Es kann davon ausgegangen werden, daß die führenden Hersteller von Kraftwerken bzw. Lieferanten von Kraftwerkskomponenten im Rahmen eines kontinuierlichen Qualifikationsprozesses sowohl den Erwartungswert als auch die Varianz jeder «ihrer» Zufallsvariablen näherungsweise kennen. Darüber hinaus sind auch die angestrebten Zielwerte und die Wahrscheinlichkeit der Nichtkonformität von großer Bedeutung. Der Hersteller bzw. Lieferant erhält damit einen wichtigen Feedback im kontinuierlichen Verbesserungsprozeß, der ja ebenfalls nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten geführt werden muß.

1

Ein Qualifikationsprozeß läßt definitionsgemäß nur Tatsachenbeweise zu. Er ist reaktiv, sollte aber – bei besonders sensiblen Zufallsvariablen – auch ein proaktives Vorgehen gestatten. Die Alternative hierzu ist der Verifikationsprozeß, der durch theoretische oder numerische Beweisführungen gekennzeichnet ist.

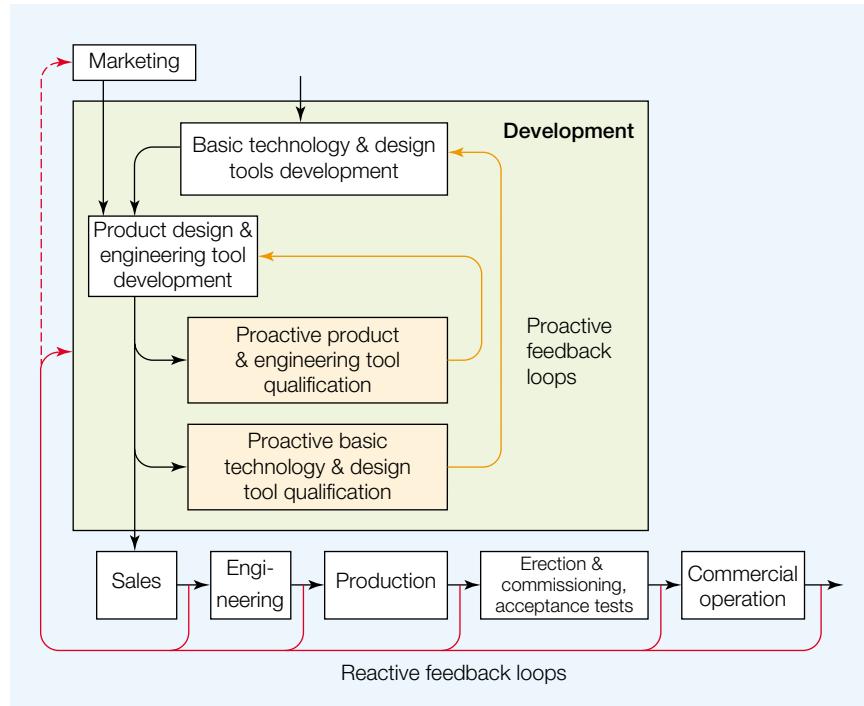
Reaktive Qualifikation

Bei der reaktiven Qualifikation erhält der Hersteller oder Lieferant seine Zufallsvariablen durch die statistische Auswertung der Erfahrungen, die während der Auftragsabwicklung, insbesondere zwischen der Produktionsphase und der Nutzungsphase, gesammelt wurden. Der größte Teil der relevanten Informationen ergibt sich aus Mängelberichten und den reaktiven Feedback Loops 2.

Allerdings werden sich erfahrungsgemäß bei den verschiedenen Zufallsvariablen beträchtliche Varianzen ergeben, selbst nach Korrektur der bekannten systematischen Abweichungen bei den Komponenten und ihren Betriebsbedingungen sowie der systematischen Meßabweichungen. Für die großen Varianzen, die sich aus zufälligen und unbekannt systematischen Abweichungen zusammensetzen, gibt es viele Gründe: Unterschiede in der Betriebsgeometrie, den Materialeigenschaften und den Betriebsbedingungen des Kraftwerkes sowie in den Prüfverfahren, -mitteln und -personen.

Die IEC 953-2 läßt beispielsweise bei den Betriebsbedingungen relativ große Schwankungen zu: Frischdampfdruck und -temperatur 2,5% bzw. 7,5 K; Kondensatordruck 12,5%; Anzapfmassenstrom 5%; Drehzahl 1%. Unter diesen Bedingungen können Leistung und Frischdampfstrom um 3% schwanken. Für den Wärmeverbrauch von Kraftwerken mit Entnahme-Kondensationsturbinen gelten als Vertrauensgrenzen 0,9% bis 1,2%; für den thermodynamischen Wirkungsgrad der Turbine (entspricht einem isentropischen Wirkungsgrad) werden sogar Werte von 1,3 bis 2% angegeben.

Hinzu kommt, daß jeweils nur eine kleine Anzahl von Kraftwerken des gleichen Typs pro Zeiteinheit hergestellt wird, was besonders während der Markteinführung zu großen Vertrauensbereichen führt und eine systematische, schnelle Analyse und mögliche Verbesserung des Produktes und

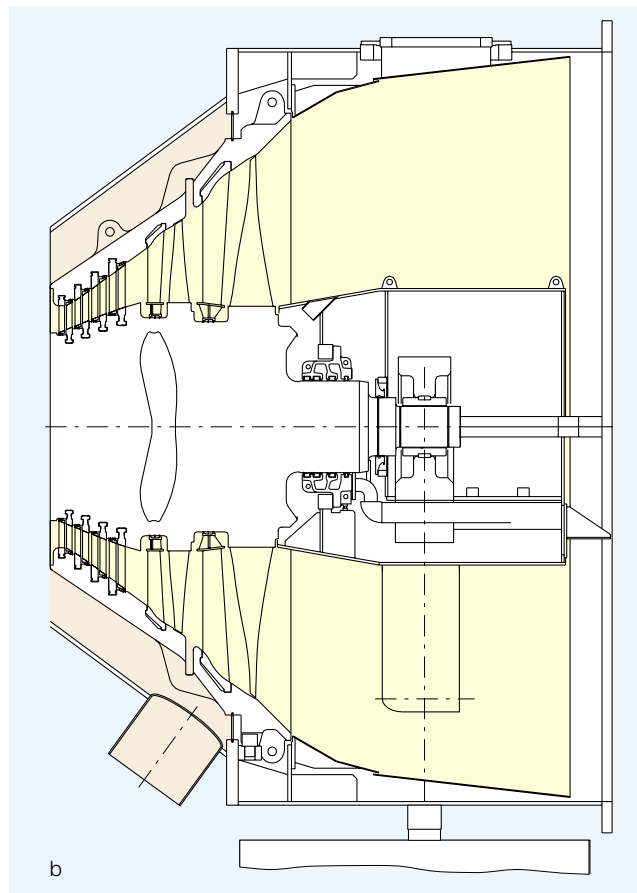
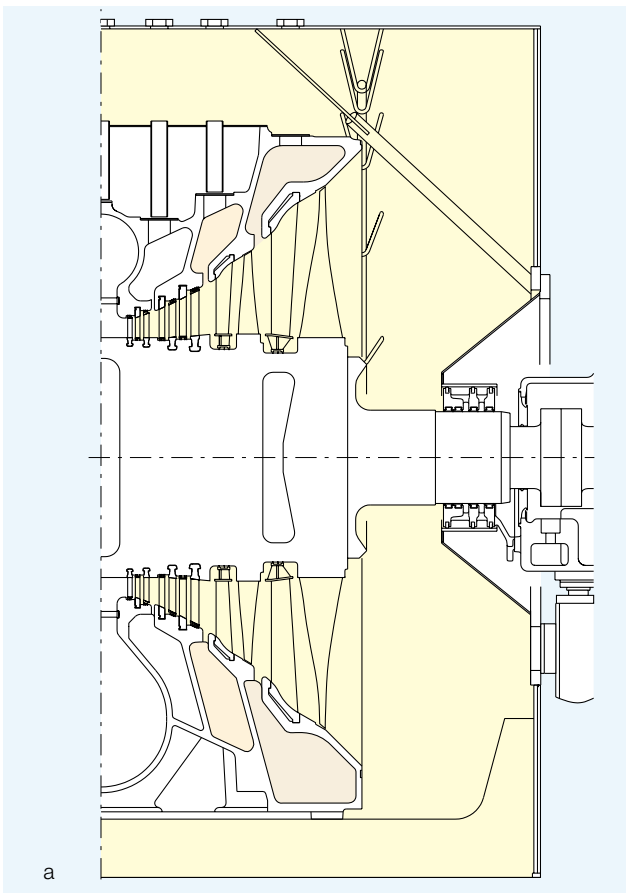


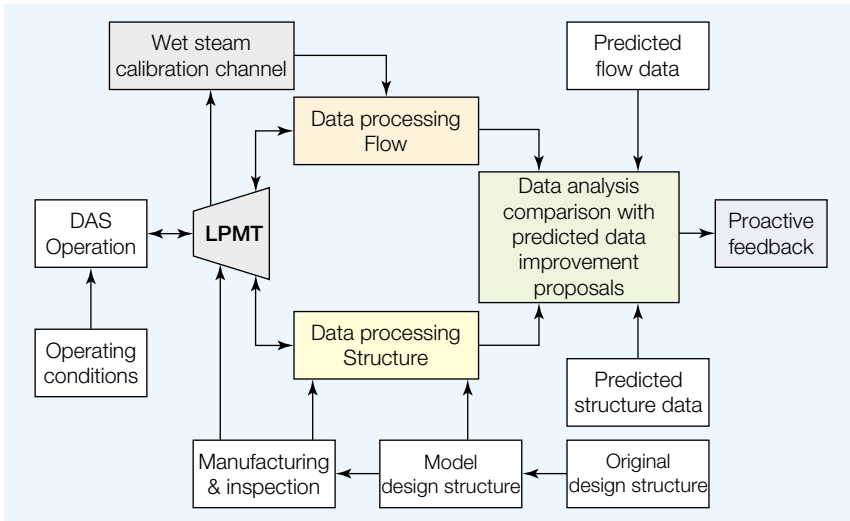
Geschäftsprozeß bei Dampfkraftwerken

2

Teil einer zweiflutigen ND-Turbine (ND41) mit axial/radialem Austritt (a) und einer einflutigen ND-Turbine (ND41) mit axial/axialem Austritt (b)

3





Proaktiver Qualifikationsprozeß für ND-Fluten

4

LPMT ND-Versuchsturbine

DAS Datenerfassungssystem

der zugehörigen Prozesse äußerst schwierig macht.

Eine weitere Unterteilung der Zufallsvariablen (z. B. des Wärmeverbrauchs) in die Wirkungsgrade der HD-, MD- und ND-Turbine ist wegen geringer meßtechnischer Diskretisierung sowie meist fehlender direkter Messung der physikalischen Flüsse (z. B. mechanische und thermische Leistung) nur mit großen Varianzen möglich. Die Verhältnisse werden sogar noch schwieriger, wenn auch die Fluten in ihre Komponenten, nämlich Eintritt, Beschauflung, Austritt und Anzapfungen unterteilt werden sollen.

Somit stehen auch keine experimentellen Ergebnisse mit nur geringer Varianz zur Verfügung, die beispielsweise für die lokale Dissipationsleistung und deshalb für die Qualifikation des Produktes, der Basistechnologie sowie der Design- oder Engineering-Tools herangezogen werden könnten. Eine aktive Entwicklungsführung wird dadurch außerordentlich erschwert wenn nicht sogar verunmöglicht.

Proaktive Qualifikation

Im Gegensatz zur reaktiven Qualifikation setzt die proaktive Qualifikation bereits in der Entwicklung an, also lange vor dem kommerziellen Betrieb. In der Regel endet diese Phase des «Concurrent Engineering»,

bevor die neukonstruierten Komponenten erstmals das Werk verlassen 2.

Anders als die reaktive Qualifikation, die einen immer größer werdenden Stichprobenumfang von Kraftwerkskomponenten umfaßt, liegen der proaktiven Qualifikation nur einzelne, repräsentative und genau bekannte Stichprobenwerte zugrunde. Dabei werden die systematischen und zufälligen Meßabweichungen rigoros soweit reduziert, daß sich annähernd die wahren Werte der jeweiligen Meßgrößen ergeben. Durch Vergleich dieser Werte mit den individuellen Zufallsvariablen aus der reaktiven Qualifikation werden die zugehörigen Vertrauensbereiche erheblich reduziert, weil die Ergebnisse mit kleiner Varianz dominieren.

Die proaktive Qualifikation umfaßt auch nicht alle herstellerepezifischen Zufallsvariablen. Sie konzentriert sich vorwiegend auf die Beiträge der Fluten zu den folgenden wichtigsten wirtschaftlichen und herstellerepezifischen Zufallsvariablen:

- *Spezifische Investitionskosten* anhand von strömungsmechanischen Untersuchungen zur Ermittlung der mechanischen Leistungen
- *Wärmeverbrauch* anhand von strömungsmechanischen Untersuchungen zur Ermittlung der Wirkungsgrade
- *Störungsbedingter Nichtverfügbarkeitsfaktor* anhand von strukturmechani-

schen Untersuchungen zur Ermittlung der Zuverlässigkeit der Beschauflungen

Dabei ist nur eine Kurzzeitanalyse der die Lebensdauer verkürzenden Phänomene und eine anschließende Hochrechnung möglich. So ermöglichen beispielsweise Schauflerschwingungsmessungen eine Prognose über die Zuverlässigkeit der Beschauflungen.

Die besondere Stärke der proaktiven Qualifikation liegt somit im schnellen, proaktiven Feedback von hochwertigen experimentellen Daten. Diese Daten werden in der Regel für einzelne Fluten unter Laborbedingungen ermittelt und zeichnen sich durch äußerst geringe systematische Abweichungen und Varianzen aus. Die Messungen werden unter genau bekannten geometrischen und betrieblichen Randbedingungen durchgeführt. Einen besonderen Stellenwert hat dabei die Wechselwirkung zwischen Strömung und Struktur sowie zwischen den einzelnen Strömungskomponenten. Andere wichtige Faktoren sind der Einsatz ausgereifter Prüfverfahren und -einrichtungen und die Tatsache, daß die Prüfungen jeweils von denselben Mitarbeitern durchgeführt werden.

Die proaktive Qualifikation eines Produktes stützt sich somit auf eine einzelne Ausführung. Das gleiche gilt auch für die Basistechnologie sowie die Design- und Engineering-Tools. Nachfolgend wird die proaktive Qualifikation am Beispiel einer ND-Flut für große Dampfturbinen erläutert.

Realisierung eines proaktiven Qualifikationsprozesses an ND-Fluten

Heutige Generation von ND-Fluten

Geometrie

Bei großen Entnahme-Kondensationsturbinen sind 1 bis 3 zweiflutige ND-Turbinen üblich. Die Entwicklung der heutigen Generation solcher Turbinen ist bereits in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben worden (z. B. [3]).

3a zeigt eine elementare Flut mit einer Hälfte der Eintrittsspirale sowie der radial/axial-Stufe, drei axialen Frontstufen mit zylindrischer Nabe, zwei Endstufen (L-1 und L-0), dem Axial/Radial-Diffusor sowie dem Abdampfgehäuse. Ferner sind die Anzapfungen A1 bis A3 dargestellt (nummeriert gegen die Strömungsrichtung). Die bis zu 6 Fluten sind mit Ausnahme der Drehrichtung (in Strömungsrichtung gesehen), der Geometrie der Schaufellabyrinth und des Schaufelspitzenspiels (L-1, L-0) gleich.

Bei den in Betrieb befindlichen Flottenführern dieser ND-Fluten – dem ND41 für den 50-Hz-Markt und dem ND34 für den 60-Hz-Markt – beträgt die Endschaufellänge 1050 mm bzw. 880 mm. ND-Fluten der beschriebenen Art wurden auch für Retrofit-Projekte eingesetzt [4].

Bei kleinen Entnahme-Kondensations-turbinen und in Kombikraftwerken mit kleinen Abdampf-Volumenströmen kommen auch einflutige ND-Turbinen zum Einsatz [5]. Hier beginnt die Flut mit einem Überströmkanal, axialen Frontstufen (z. B. [4]) mit konischer Nabe, zwei Endstufen (wie bei den zweiflutigen Turbinen), einem Axial/Radial-Diffusor (oder wahlweise axial/axial-Diffusor) sowie dem Abdampfgehäuse.

3b zeigt eine einflutige ND-Turbine mit Axial/Axial-Diffusor und nur einer Anzapfung, wie sie bei Kombikraftwerken vorkommen.

Beide Typen von ND-Turbinen werden durch Veränderung der Geometrie der Frontstufen und gegebenenfalls der radial/axiale Stufe an den geforderten Eintritts-Massenstrom und -Druck angepaßt.

Betriebsbedingungen

Die Eintrittszustände bei Dampfkraftwerken liegen im Regelfall im Bereich von 4 bis 6 bar und 150 bis 320 °C; der Kondensatordruck liegt zwischen 30 und 120 mbar, und die einzelnen Anzapfmassenströme liegen im Bereich von 3 bis 7 % der Eintrittsmassenströme. Bei den großen Turbinen ND41 und ND34 ist die Drehzahl auf 50 s⁻¹ bzw. 60 s⁻¹ festgelegt.

Struktur

Die strömungsführende Geometrie ändert sich wegen der Wechselwirkung Strömungsstruktur zwischen Montage und Betrieb. So kann beispielsweise die axiale Differenzdehnung in einer 6. Flut im Stillstand mehr als 10 mm betragen.

Strömung

Der Beitrag der ND-Fluten an der gesamten Dampfturbinenleistung beträgt in herkömmlichen Kraftwerken mit Zwischenüberhitzung ungefähr 35 % und ohne Zwischenüberhitzung (z. B. bei Kombikraftwerken) ungefähr 45 %. Die maximale Leistung einer Flut kann 130 MW erreichen,

während der Massenstrom am Eintritt bis zu 210 kg/s betragen kann.

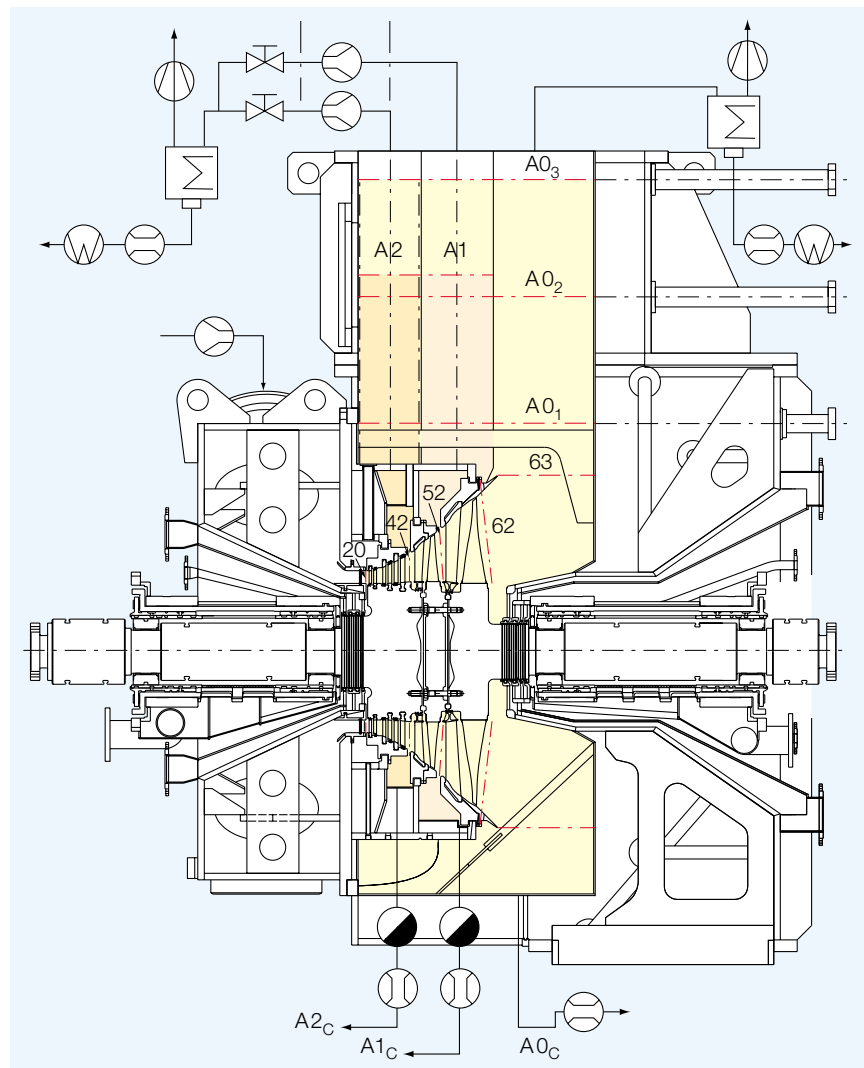
ND-Fluten liegen am Ende der Expansion, was dazu führt, daß 2/3 der Dissipationsleistung als Exergieverlustfluß und damit als Leistungsverlust abgeschrieben werden müssen. Bedingt durch die unterschiedliche Betriebsgeometrie der ND-Fluten, besonders im Bereich der Schaufel-spalte, werden die einzelnen Fluten (z. B. in einer sechsflutigen Turbine) unterschiedliche Strömungsfelder aufweisen.

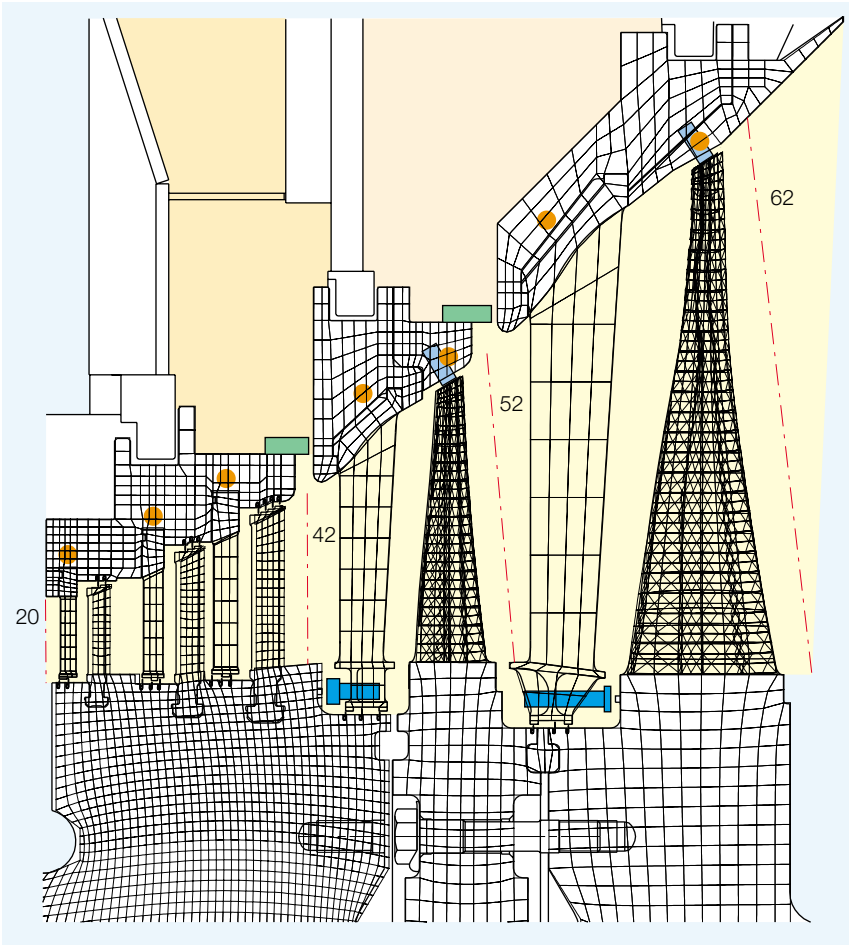
Bei den vorkommenden Eintrittsbedingungen wird die Sättigungslinie in den Stufen L-4 bis L-1 überschritten. Die dadurch auftretenden Relaxationseffekte sind be-

ND-Modellflut mit Kontrollflächen (CS) in der ND-Versuchsturbine (ND41)

5

CS 20, 42, 52, 62	Beschaufelung	CS A1, A2	Anzapfungen
CS 63, A0 ₁ , A0 ₂ , A0 ₃	Diffusor und Austritt	CS A0 _C , A1 _C , A2 _C	Grobwasseraustritt





Beschaufelung für die ND-Modellflut mit Kontrollflächen (ND41). Das Rechnetz ist für Betriebsbedingungen dargestellt.

6

- Temperatur
- Abstände Schaufelträger
- Abstände Rotor/Stator
- Spiel und Schaufelschwingungen, Schaufelentwindung (L-0)

sonders schwierig zu beherrschen und führen zu großen Varianzen bei der Prognose der Dissipationsleistung.

Konzept eines proaktiven Qualifikationsprozesses für ND-Turbinen

Wie bereits ausgeführt, erlauben die üblichen Abnahmemessungen hinreichend zuverlässige Prognosen über die Charakteristiken eines Kraftwerkes. Aber bereits die Bestimmung der Charakteristiken einer aus HD-, MD- und ND-Fluten bestehenden Turbine ist mit großen Varianzen behaftet. Und diese nehmen weiter zu, wenn die Charakteristiken der einzelnen Fluten ermittelt

werden sollen. Es ist klar, daß eine ausführliche Untersuchung der Charakteristiken der Komponenten der einzelnen Fluten zu noch extremeren Varianzen führen würde.

Einen Ausweg bietet einzig der Einsatz von Versuchsturbinen, die speziell für den proaktiven Qualifikationsprozeß entwickelt worden sind. Die wichtigste Frage ist dabei die geometrische und physikalische Modellierung der oben beschriebenen ND-Fluten.

Geometrische Modellierung

Hier kann zwischen einer vollständigen und einer ausschnittweisen Nachbildung ge-

wählt werden. Ideal wäre natürlich eine vollständige Nachbildung der ND-Fluten im Maßstab 1:1, denn nur dann wäre eine hundertprozentige geometrische Ähnlichkeit gegeben. In einem ersten, vertretbaren Schritt hin zur Vereinfachung werden die Eintrittsspirale und die axial/radiale Stufe in **3a** eliminiert. Beide Elemente wurden bereits getrennt mit Luft untersucht [3]. Im Zuge einer zweiten Vereinfachung wird die Anzapfung A3 weggelassen. Beide Vereinfachungen setzen theoretische oder numerische Korrekturen an der Geometrie der ersten axialen Stufe (L-4) voraus. Diese sind heute im Gebiet trockenen Dampfes hinreichend genau möglich. Aus dem gleichen Grund, und um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, kann auch die Stufe L-5 in **3b** entfallen.

Weitere Vereinfachungen der strömungsführenden Geometrie sind nicht zulässig, da sie die Messungen (der Dampf vor der Beschaufelung muß stets trocken sein), die problematische Aufbereitung des turbomaschinenspezifischen Naßdampfes sowie die Wechselwirkung wichtiger Komponenten (Frontstufen, Stufe L-1, Stufe L-0, Diffusor, Abdampfgehäuse, Anzapfungen) beeinträchtigen würden.

Physikalische Modellierung

Die physikalische Ähnlichkeit der Strömung verlangt Gleichheit der Ähnlichkeitskennzahlen an allen Punkten des Strömungsfeldes. Im Gebiet des trockenen Dampfes sind dies der Isentropenexponent, die Rossby-Zahl (Strömungs-/Umfangsgeschwindigkeit), die Reynolds-Zahl und die Mach-Zahl sowie die zeitlichen Inhomogenitäten. Im Naßdampfgebiet dienen die Damköhler-Zahlen (Relaxationszeit des Mediums in Abhängigkeit von der Laufzeit der Strömung) usw. zur Charakterisierung der thermodynamischen und kinematischen Relaxation des Naßdampfes [6]. Beide Relaxationsprozesse sind für die Erhöhung der Dissipationsleistung verantwortlich [7]; darüber hinaus führt der kinematische Relaxationsprozeß zur Erosion.

Eine geometrische Verkleinerung der Flut mit Hilfe eines Skalierungsfaktors muß

folglich mit im gleichen Maße erhöhter Drehzahl und sonst gleichen Bedingungen wie die Flut in Originalgröße betrieben werden. Allerdings ergeben sich dann stets kleinere Reynolds-Zahlen und größere Damköhler-Zahlen als bei der Flut im Maßstab 1:1.

Der richtige Skalierungsfaktor ergibt sich letztlich aus einer wirtschaftlichen Beurteilung auf der Basis der Eigenkapitalrendite aus der Sicht des Lieferanten. Hierbei spielen die Herstellungs- und Betriebskosten der Versuchsturbine sowie die erreichbaren Varianzen und ihr wirtschaftlicher Wert die Hauptrolle. Für den hier betrachteten Fall des ND41 wurde ein Skalierungsfaktor von 0,316 gewählt. Damit liegt die Reynolds-Zahl für das Modell 1,5 mal tiefer als der kritische Wert von $4 \cdot 10^5$. Die Damköhler-Zahlen für das Modell sind 1,5 mal höher als beim Original, weil die Tropfengröße und die Laufzeit gleichzeitig entsprechend verringert werden.

Der Qualifikationsprozeß, der mit der Übernahme der strömungsführenden Geometrie, der Betriebsbedingungen und der Vorausberechnungen beginnt und mit der Aktivierung der proaktiven Feedback Loops endet, ist in 4 dargestellt. Die wichtigsten Elemente des Prozesses werden nachfolgend beschrieben.

Design des Experiments

Modellflut

5 zeigt die aus der Original-ND-Flut mit Axial/Radial-Abdampf 3a entwickelte Modell-ND-Flut. Das Modell umfaßt die Kernkomponenten der strömungsführenden Geometrie. In 6 ist die Beschaufelung vergrößert dargestellt. Hervorzuheben ist, daß auch die Fertigungstoleranzen und die Oberflächenrauigkeit um den Skalierungsfaktor verkleinert werden müssen.

Bemerkenswert ist der Umstand, daß der Austritt der Hauptströmung und auch der der Anzapfströmungen A1 und A2 nach oben erfolgt. Deshalb können die Grobwassermengen, die durch die strömungsführende Geometrie abgeschlossen werden, nach unten abgeführt und – was ganz wichtig ist – auch gemessen werden.

Betriebsbedingungen

Die von den Original-ND-Fluten abgeleiteten Betriebsbedingungen sind in 7 in einem *h-s*-Diagramm dargestellt. Hierbei spielt auch die Qualität des Dampfes eine wichtige Rolle. Bei der Modell-ND-Flut liegen die Schwankungen der Betriebsbedingungen um ein Mehrfaches unter den nach IEC 953-2 zugelassenen Werten.

Strömungsfeld

Das kontrollierte Strömungsfeld (d. h. das Kontrollvolumen) reicht von der Kontrollfläche (CS) 20 am Eintritt der Hauptströmung bis zu den Kontrollflächen A0₁ bis A0₃ am Austritt der Hauptströmung sowie A1 und A2 am Austritt der Anzapfströmungen. Hinzu kommen noch die drei Austritte für die Grobwasserströme A0_c, A1_c und A2_c 5.

Die zusätzlichen Kontrollflächen 42, 52, 62 und 63 gestatten die strömungsmechanische/thermodynamische Unterteilung der

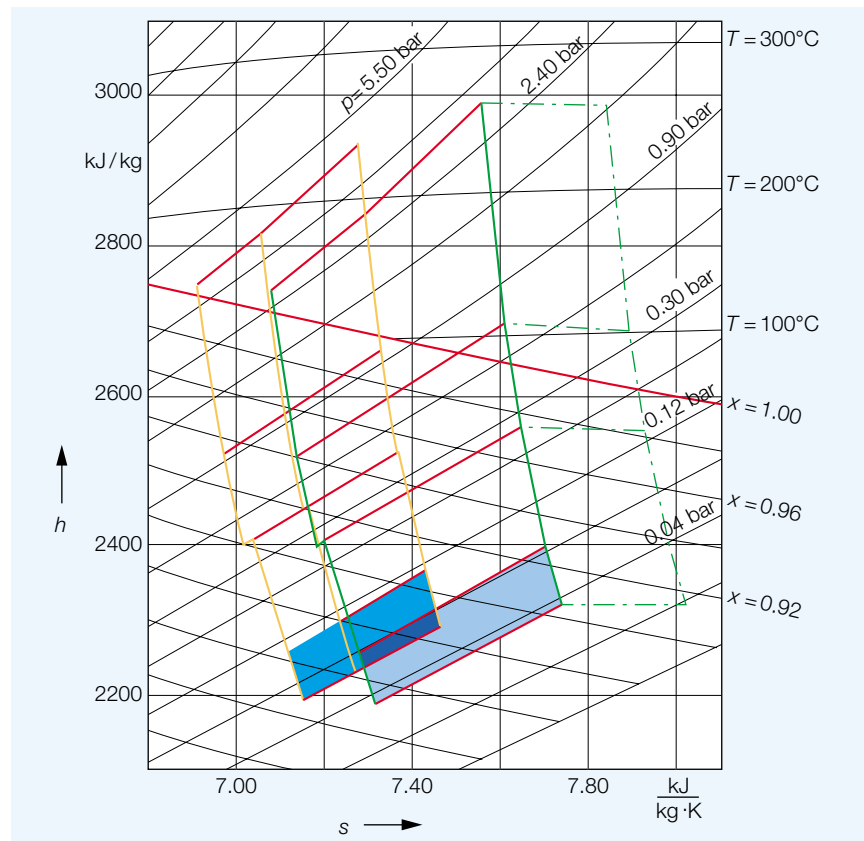
Flut in ihre 7 Komponenten: Frontstufen, Stufe L-1, Stufe L-0, Diffusor, Abdampfhäuser (jeweils bis CS A0₁ bzw. A0₃), Anzapfung A1 und Anzapfung A2. Auf eine weitere Unterteilung, welche die Einführung von Kontrollflächen hinter den Leitreihen erforderlich gemacht hätte, wurde mit Rücksicht auf die heute noch begrenzten Möglichkeiten störungsfrei arbeitender Meßsysteme, insbesondere im Naßdampfgebiet, verzichtet.

Aus Gründen der Bilanzierung ist es notwendig, den Druck und den Geschwindigkeitsvektor sowie die Temperatur (bei trockenem Dampf) bzw. die Nässe und den Sauter-Durchmesser (bei Naßdampf) in den eingeführten Kontrollflächen zu messen. Der Sauter-Durchmesser, der über die Tröpfchen-Oberflächen gemittelt wird, kennzeichnet die Dispersion der Nässe und dient darüber hinaus zur Bildung der Dam-

Betriebsbedingungen für die ND-Modellflut (ND41)

7

- h* Enthalpie
- s* Entropie
- p* Druck
- T* Temperatur
- x* Dampfanteil



köhler-Zahlen. Die auf die Wandoberflächen wirkenden Drücke werden in den Kontrollflächen und über das ganze Kontrollvolumen verteilt, z.B. nach den Leitreihen, an den Leitschaufeln und an den Diffusorwänden, gemessen. Die Wärmeübergangszahlen werden numerisch nach dem weiter unten beschriebenen Verfahren ermittelt.

Obwohl die Massenflüsse durch die verschiedenen Kontrollflächen durch numerische Integration aus den Feldgrößen ermittelt werden können, werden die Massenflüsse durch CS 20 (dampfseitig), A0₁ bis A0₃, A1 und A2 sowie A0_c, A1_c und A2_c (wasserseitig) zur Gewährleistung der erforderlichen Genauigkeit direkt gemessen. Damit an dieser Stelle keine parasitären Dampfmengen ein- oder austreten, werden jeweils die innersten Labyrinth kontrolliert gesperrt.

Aus Gründen der Genauigkeit werden die über die rotierenden Wandoberflächen übertragenen mechanischen Leistungen der drei Frontstufen sowie der Stufen L-1 und L-0 ebenfalls direkt gemessen. Hierzu ist es notwendig, den Rotorteil der Stufe L-1 einmal am Frontstufen-Rotor und einmal am Endstufen-Rotor zu befestigen. Die Messungen an den beiden Rotoren erfolgen dann über die Pendelgehäuse der Wasserbremsen und der hydrodynamischen Rotorlager **5**. Zusätzlich kann –

wenn nötig – der Endstufen-Rotor durch eine Curtis-Turbine angetrieben werden. Die ebenfalls über die Wandoberflächen übertragenen Wärmeströme werden numerisch ermittelt.

Verschiebungsfeld

Wegen der starken Interaktion zwischen der Stömung und der Struktur sind Montage- und Betriebsgeometrie teilweise sehr unterschiedlich. Besonders ausgeprägt sind die Unterschiede beim Schaufelspiel, bei den Axialabständen zwischen den Schaufelreihen und bei der Form der letzten Schaufelreihe. Darüber hinaus können auch Schaufelschwingungen auftreten, die bis zu den einzelnen Schaufeln aufgelöst werden müssen. Eine direkte Messung dieser Größen ist deshalb ratsam **6**. Zur Rekonstruktion der gesamten Betriebsgeometrie wird eine FE-Analyse durchgeführt.

ND-Versuchsturbine, Meß- und Kalibriereinrichtungen

ND-Versuchsturbine

Die ND-Versuchsturbine **8** ist so konzipiert, daß sie für die zwei repräsentativen ND-Fluten gemäß **3a** und **3b** eingesetzt werden kann. Dargestellt ist die Konfiguration gemäß **3a** und **5**. Bei der Flut gemäß

3b ist die Abströmung nach oben und unten symmetrisch, um jede Strömungsunsymmetrie zu vermeiden **5**.

Strömungssonden

Der Kopf der 5-Loch-Sonden, die in den Kontrollflächen 42, 52 und 62 verwendet werden, hat mit Rücksicht auf die hohen Mach-Zahlen einen kleinen Winkel. Der gleiche Sondentyp, jedoch mit einem größeren Kopfwinkel, kommt auch in den Kontrollflächen 63 und A0₁ bis A0₃ zum Einsatz. 3-Loch-Sonden können ebenfalls eingesetzt werden.

Für die Messung der Dampftröpfchen, der Tröpfchengröße und der Temperatur werden kombinierte Extinktions-/Temperatursonden verwendet. Sie arbeiten nach dem Prinzip der Lichtabschwächung beim Durchgang des Lichtes durch den Dampf [8]. Es werden zwei Farben, nämlich rot und blau, verwendet. Die Sonden ermöglichen die Messung von Tröpfchengrößen im Bereich von 0,1 bis 2 m sowie der Nässe mit einer Meßunsicherheit von ca. 15%. Solche Sonden kommen in den Kontrollflächen 42, 52 und 62 zum Einsatz.

Da diese Sonden nicht in der Lage sind, Meßwerte zeitabhängig aufzulösen, werden die gemessenen Feldgrößen als zeitlich irreversibel gemittelt angesehen [9].

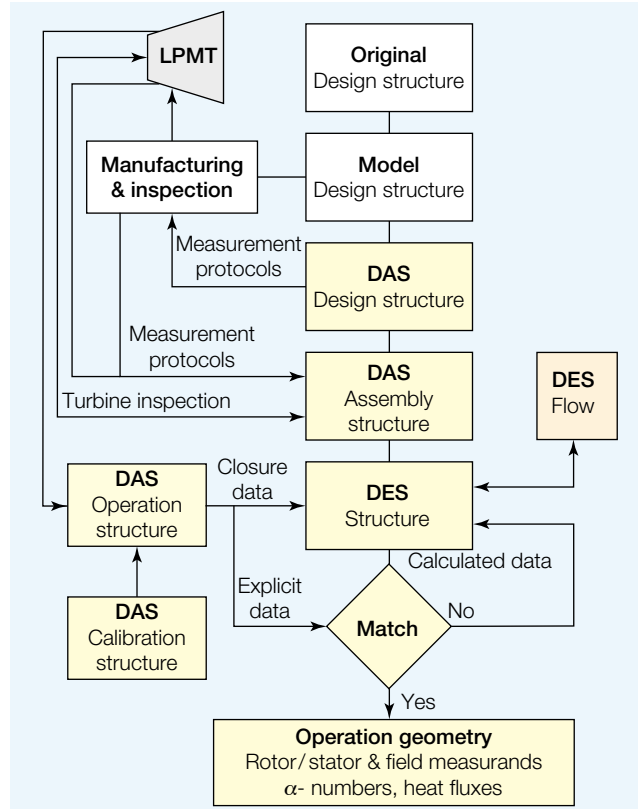
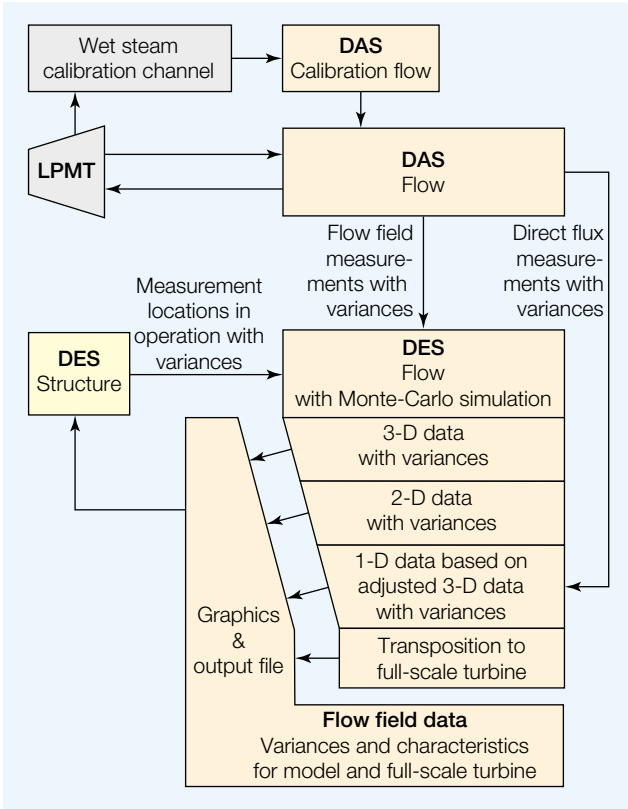
Kalibrierung der Strömungssonden

Auf die Kalibrierung der 5-Loch- und 3-Loch-Sonden sowie der kombinierten Sonden wurde besonderes Augenmerk gelegt. Eine Kalibrierung in künstlich aufbereitetem Naßdampf schied aus, weil sich damit die richtigen Damköhler-Zahlen nicht erreichen lassen. Die Kalibrierung erfolgte schließlich direkt im Naßdampf der Modellflut, wobei in die Anzapfleitung A1 ein Kalibrierkanal eingebaut wurde. Dieser Kanal besitzt eine sogenannte ventilierte Düse, die stufenlos für Mach-Zahlen bis ungefähr 1,6 verwendet werden kann [10]. Vor ihrem Einsatz wurde die Düse auf Mach-Zahlen bis 1,6 kalibriert. Die so kalibrierten Sonden gewährleisten größtmögliche Genauigkeit der Messungen im Naßdampf (die Messung stellt eine vollständige Umkehrung der Kalibrierung dar!).

Eintrittsseite der Niederdruck-Versuchsturbine

8





Datenverarbeitung, Strömung

9

Datenverarbeitung, Struktur

10

LPMT *ND-Versuchsturbine*
 DAS *Datenerfassungssystem*
 DES *Datenauswertesystem*

LPMT *ND-Versuchsturbine*
 DAS *Datenerfassungssystem*
 DES *Datenauswertesystem* α *Wärmeübergangszahl*

Strukturmeßeinrichtungen

Für die Messung des Schaufelspiels an den letzten beiden Laufreihen wurden induktive Geber eingesetzt [6]. Zur Kompensation etwaiger Meßabweichungen wird jeweils ein zusätzlicher Geber verwendet. Die gleichen Geber werden auch zum Messen der Schaufelentwindung (L-0) und etwaiger Schaufelschwingungen eingesetzt.

Der axiale Abstand zwischen den Schaufelträgern bzw. zwischen den Leitschaufeln und dem vorderen und hinteren Rotor wird mit Wirbelstromgebern bzw. induktiven Gebern erfaßt. Zur Stützung der FE-Berechnungen wurden an den drei Schaufelträgern Temperaturmessungen durchgeführt.

Kalibrierung der Strukturmeßeinrichtungen

Die induktiven Sensoren wurden mit Hilfe eines rotierenden Laufrades, die Wirbelstromgeber und Thermoelemente dagegen mit herkömmlichen Verfahren kalibriert.

Datenverarbeitung, Strömung

Das Datenerfassungssystem **DAS Flow** 9 erhält Daten von 5-Loch- und 3-Loch-Sonden, kombinierten Sonden sowie Sondenrechen für Gesamtdruck und -temperatur, Wanddrücke, Druck und Temperatur an der Düse für den Eintrittsmassenstrom, Drehmomente an den Gehäusen der Wasserbremsen und hydrodynamischen Lager usw. **DAS Flow** überträgt auch die Daten für die Sondenpositionierung sowie die diskontinuierliche Spülung der Druckmeßbohrungen [11] und ist verantwortlich für die Auswertung der Meßdaten und deren Umrechnung auf Feldgrößen und Flüsse mit Hilfe der Kalibrierkurven. Dabei werden die Varianzen auf allen Stufen berücksichtigt.

Das Datenauswertesystem **DES Flow** integriert die Feldgrößen über Zeit und Raum und vergleicht den resultierenden Massenfluß und die Totalenthalpieflüsse mit

den direkt gemessenen Werten. Die zeitliche Integration stellt sicher, daß die Flüsse und Flußdichten richtig gemittelt werden (die herkömmliche Mittelung der Größen führt zu Inkonsistenzen und zwangsläufig größeren Varianzen [9]). Im Regelfall ergeben sich hier Differenzen, die eine Anpassung der Feldgrößen in Druck und spezifischer Enthalpie erfordern. Die endgültige Auswertung des Strömungsfeldes erfolgt dann anhand von 3-D-, 2-D- und 1-D-Feldmittelwerten und -kennzahlen [12].

Hierbei wird berücksichtigt, daß bei den (iterativen) Auswertungen die Betriebsgeometrie zugrunde gelegt werden muß. Dies gilt auch für die Lage der Sondenköpfe.

Abgeschlossen wird die Auswertung mit Charakteristiken für die Flut und ihre Komponenten. Jeder Schritt im **DES Flow**-Prozeß wird begleitet von Varianzen, die anhand einer Monte-Carlo-Simulation ermittelt werden.

Die Ermittlung der Performance-Kennzahlen der Flut in Originalgröße beruht auf der ähnlichkeitsgetreu übertragenen strömungsführenden Betriebsgeometrie. Wie bereits ausgeführt, spielen dabei die Reynolds-Zahlen für die Frontstufen sowie die Damköhler-Zahlen für das Naßdampfgebiet eine entscheidende Rolle. Die in [13] beschriebenen Untersuchungen wurden an einer Flut in Originalgröße durchgeführt, auch um eine Kontrolle des Übertragungsverfahrens zu ermöglichen.

Datenverarbeitung, Struktur

Das Datenerfassungssystem *DAS Design Structure* [10] stellt den Prüfern, die die Fertigungsqualität der Kernkomponenten kontrollieren, tabellarische Daten zur strömungsführenden Design-Geometrie (einschließlich der Toleranzen) und den Design-Materialeigenschaften zur Verfügung. Diese liefern in vergleichbarer Form die Meßwerte für die strömungsführende

Montagegeometrie (einschließlich der Varianzen) sowie für die Montage-Materialeigenschaften und übertragen die Ergebnisse zum *DAS Assembly Structure*. Weitere Meßwerte für die strömungsführende Montagegeometrie (z. B. Montage-Schaufelspiel) werden aus den Messungen an der Versuchsturbine erwartet.

Das Herzstück der strukturorientierten Auswertung ist das *DES Structure*. Es hat zunächst die Aufgabe, anhand einer FE-Analyse der Kernkomponenten die strömungsführende Betriebsgeometrie (einschließlich der Varianzen) zu bestimmen. Darüber hinaus sind auch die Wärmeübergangszahlen und die Wärmeflüsse an der bzw. über die strömungsführende Oberfläche zu bestimmen. Diese Größen vervollständigen das Strömungsfeld.

Die Varianzen in der FE-Analyse werden mit Hilfe der im *DAS Operation Structure* gesammelten Meßdaten sowie der zugehörigen Funktionen im *DAS Calibration*

Structure verringert. Darüber hinaus werden auch die Daten des Strömungsfeldes aus *DES Flow* verwendet. Der einzige Freiheitsgrad liegt bei den Wärmeübergangszahlen, die iterativ angepaßt werden, bis alle Meßdaten approximativ erfüllt sind.

Die strömungsführende Betriebsgeometrie wird mit Hilfe des Skalierungsfaktors auf die Flut in Originalgröße übertragen. Die zirkular verteilten und mittleren Schaufelspiele stimmen wegen spezifischer Eigenschaften der Versuchsturbine, z. B. getrennte Rotoren, nicht genau mit den Original-Betriebsschaufelspielen überein. Dieses Problem läßt sich mit den normalerweise vorhandenen Daten der 2. und 6. Flut lösen. Die Wärmeübergangszahlen lassen sich als Funktion der Reynolds-Zahl übertragen.

Datenanalyse

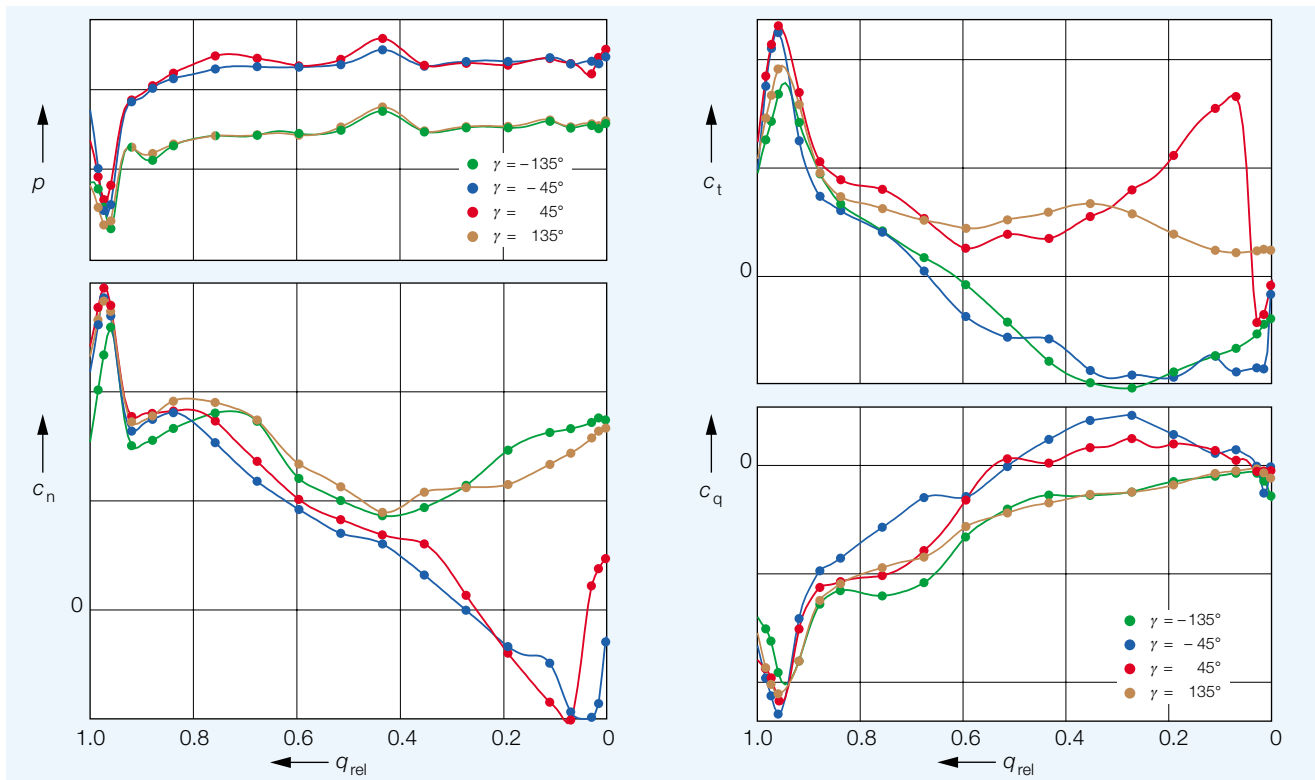
Für die in [5] und [6] dargestellte Modellflut (sie entspricht der 6. Flut einer Turbine vom

Strömungsfeld in Kontrollfläche 63 (ND41/6. Flut)

[11]

- p Druck
- c_n Geschwindigkeitskomponente, normal
- c_t Geschwindigkeitskomponente, tangential

- c_q Geschwindigkeitskomponente, transversal
- q_{rel} Abstand von Prallwand zur Kanalbreite
- γ Zirkulare Position



Typ ND41) werden nachstehend zwei Beispiele für das Strömungsfeld und das Verschiebungsfeld der Flut aufgeführt.

11 zeigt das Strömungsfeld in der Kontrollfläche 63 (am Austritt des Diffusors) bei mittleren Betriebsbedingungen gem. **7**. Dargestellt sind der statische Druck und die Geschwindigkeitskomponenten in Abhängigkeit vom dimensionslosen Abstand von der Prallwand. Der Kurvenparameter entspricht der zirkularen Position der Geber. Die Position $\gamma = 0^\circ$ liegt gegenüber dem Austritt des Abdampfes in Strömungsrichtung gesehen und ist bezogen auf die Drehrichtung positiv.

Deutlich zu sehen sind die stark ausgeprägte Rotationsunsymmetrie, die durch das einseitige Abdampfgehäuse verursacht wird, und ein Jet, der durch die starke Spaltströmung der vorliegenden großen Schaufelspiele entsteht.

12 zeigt die über alle Schaufeln gemittelten Schaufelspiele an der Hinterkante der letzten Laufreihe in Abhängigkeit von der zirkularen Position. Wie zu sehen ist, ist der Rotor im Montagezustand nicht genau zentriert. Darüber hinaus ist eine Vergrößerung der Schaufelspiele erkennbar, die hauptsächlich auf die unterschiedliche axiale Verschiebung von Rotor und Schaufelträger unter Betriebsbedingungen zurückzuführen ist.

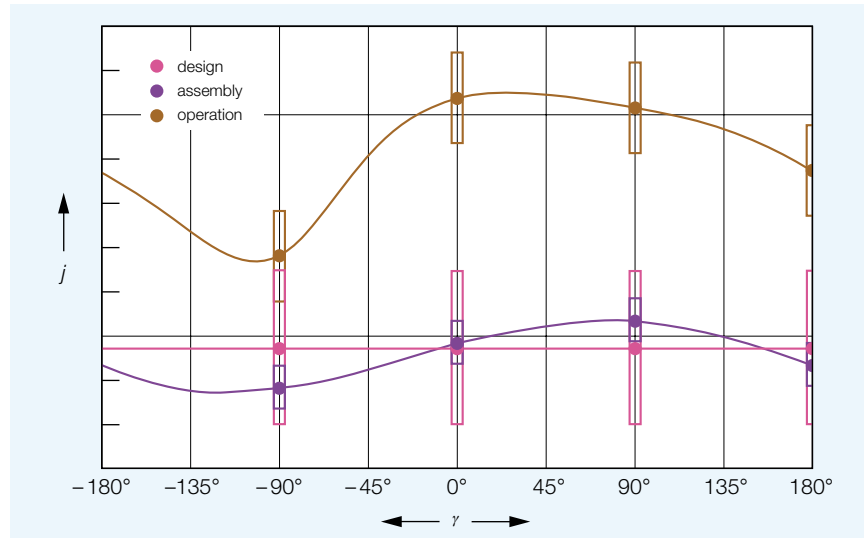
Ausblick

Die zwei beschriebenen, proaktiven Feedback Loops werden zu einer kontinuierlichen Reduktion der Differenzen zwischen den Ziel- und Erwartungswerten sowie der Varianzen aller wichtigen Kennzahlen der ND-Fluten führen.

Kraftwerkskunden, welche eine klare Vorgabe für die wirtschaftlichen Parameter haben, werden von den Feedback Loops in Form einer stetigen Reduktion der Wahrscheinlichkeit für Nichtkonformität profitieren – bei gleichzeitiger Erfüllung der Umwelt-Vorschriften.

Literaturhinweise

[1] F. Kreitmeier, H. U. Frutschi, M. Vogel: Optimized NO_x reduction for GT and CC



Mittleres Spiel an der letzten Laufreihe (ND41/6. Flut)

12

j Schaufelspiel an der Hinterkante

γ Zirkulare Position

power plants based on an economic evaluation. 1991 ASME COGEN TURBO IGTI.

[2] D. Young: Modern Engineering Economy. John Wiley & Sons, Inc., 1993.

[3] U. Wieland, H. P. Meer, G. Lindberg: Field verification of improved LP turbine design. JPGC Conf, Oct 1990, Boston.

[4] B. Scarlin, E. Krämer, H. Huber, N. Lannefors: Low Pressure Steam Turbine Retrofits. Power Gen '97, Madrid.

[5] R. Listmann: Advanced combined cycle power plants with advanced steam turbine concepts. CEPSI Conf, 1994, Christchurch, NZ.

[6] F. Kreitmeier, W. Schlachter, J. Smutny: Strömungsuntersuchungen in einer Niederdruck-Modellturbine zur Bestimmung der Nässeverluste. VDI Report No. 361, 1980.

[7] G. Gyarmathy: Grundlagen einer Theorie der Naßdampfturbine. Diss. ETH-Zürich, Juris 1962.

[8] L. Feldberg, J. J. Katchuriner: Optical methods for initial condensation in a turbine cascade. EPRI-TR-108942, 1997.

[9] F. Kreitmeier: A new time-averaging procedure for compressible, unsteady turbulent flows. ASME Paper 87-GT-83.

[10] H. A. Knight: Some notes on the design and performance of a slotted super-

sonic nozzle. Nat. Gas Turbine Estab. Pyestock, Note No.: NT.312 (1957).

[11] M. Marder, C. Zimmermann, W. Steffens: Intermittent purging for pressure measurements under wet steam conditions. Measuring Techniques in Transonic and Supersonic Cascades and Turbomachines. Zurich, 1996.

[12] F. Kreitmeier: Space-averaging 3D flows using strictly formulated balance equations in turbomachinery. IGTI vol. 7, ASME Cogen Turbo, 1992.

[13] W. Riess et al., D. Bohn et al., H. Stetter et al.: Strömungsuntersuchungen an der Endstufe der Niederdruckdampfturbine im Kraftwerk Schkopau. VGB Conference: Forschung in der Kraftwerkstechnik, Essen, 1998.

Adresse der Autoren

Franz Kreitmeier
 Dr. Philippe Juvet
 Peter Weiss
 ABB Kraftwerke AG
 CH-5401 Baden
 Schweiz
 Telefax: +41 (0) 56 205 56 62
 E-mail:
 franz.kreitmeier@chkra.mail.abb.com