

Modulares Leistungsberechnungsverfahren zur automatisierten modellbasierten Leistungsanalyse von Gasturbinen

Von der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Michael Bauer
aus München

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Staudacher
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. H. Rick

Tag der mündlichen Prüfung: 8. April 2005

Institut für Luftfahrtantriebe der Universität Stuttgart

2005

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand parallel zu meiner Tätigkeit als Mitarbeiter der Firma MTU Aero Engines GmbH. Zum Gelingen meiner Arbeit trugen eine Reihe von Personen bei, denen ich an dieser Stelle einen großen Dank aussprechen möchte.

Sehr herzlich danken möchte ich insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Staudacher für das entgegengebrachte Interesse meiner Arbeit, für die stets freundliche Unterstützung sowie für die Übernahme des Hauptberichts. Unsere Gespräche sowie die Besuche am Institut für Luftfahrtantriebe der Universität Stuttgart mit seinen Mitarbeitern werden mir immer in angenehmer Erinnerung bleiben.

In gleichem Maße gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Rick, der meiner Arbeit stets großes Interesse entgegen brachte, jede erdenkliche Unterstützung gewährte und den Mitbericht übernahm.

Für die Übernahme des Vorsitzes meines Promotionsverfahrens bedanke ich mich weiterhin bei Herrn Prof. Dr.-Ing. J. von Wolfersdorf.

Besonderer Dank gilt der MTU Aero Engines GmbH für die volle Unterstützung meines Promotionsvorhabens sowie für die Möglichkeit die Ergebnisse veröffentlichen zu können. Insbesondere bin ich den Herren Dr.-Ing. J. Kurzke, Dr.-Ing. K. J. Schmidt und Dipl.-Ing. W. Duling zu Dank verpflichtet, die die Voraussetzungen für diese Arbeit schufen. Desweiteren verdanke ich Herrn Dr. Kurzke die Anregung zu dieser Arbeit.

An dieser Stelle möchte ich auch einen herzlichen Dank meinen Kollegen aussprechen, die in vielfältiger Art und Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen und mir stets eine freundschaftliche und dabei auch äußerst produktive Arbeitsatmosphäre geboten haben. Insbesondere ist die enge Zusammenarbeit mit den Herren Dr.-Ing. C. Riegler und Dr.-Ing. H. Schulte hervorzuheben, die mir durch ihre Sachkompetenz und ihre stete Diskussions- und Hilfsbereitschaft eine große Hilfe waren.

Nicht zuletzt möchte ich mich von ganzem Herzen bei meinen Eltern und bei meiner Großmutter bedanken, ohne deren stete Unterstützung und ohne deren Vertrauen weder mein Studium noch diese Arbeit möglich gewesen wären. Insbesondere danke ich meiner Freundin Ulla für die immer liebevolle moralische Unterstützung und für die mir in den letzten Jahren entgegengebrachte Geduld.

München, im April 2005

Michael Bauer

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VIII
Zusammenfassung	XII
Abstract	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Bisherige Verfahren zur Leistungsanalyse	4
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	10
1.4 Zweistrom-Turboluftstrahl-Triebwerk	11
2 Leistungsanalyse von Gasturbinen	13
2.1 Leistungssyntheserechnung als Basis der Leistungsanalyse	13
2.1.1 Modellbildung	14
2.1.2 Berechnung des Betriebsverhaltens	18
2.2 Instrumentierung und Meßwertaufbereitung	20
2.2.1 Meßgrößen zur Leistungsanalyse	20
2.2.2 Meßunsicherheit	22
2.2.3 Meßwertaufbereitung	23
2.3 Konventionelle Analyse	26
2.3.1 Analyseschema und Analyserechnung	26
2.3.2 Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen	29
2.3.3 Vergleich zu der Erwartung	30
2.4 Modellbasierte Analyse	31
2.4.1 Vergleich zu der Erwartung	31
2.4.2 Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen	34
2.4.3 Vergleich der modellbasierten mit der konventionellen Analyse	34
2.5 Modellbasierte Analysen mit einem Leistungsberechnungsprogramm	35
2.6 Konvergenzverhalten des modellbasierten Analyseverfahrens	39

3	Verfahren zur automatisierten modellbasierten Leistungsanalyse	40
3.1	Typische Vorgehensweise bei der nicht automatisierten modellbasierten Analyse	40
3.2	Anforderungen an das Verfahren und Überblick über die erforderlichen Erweiterungen	42
3.3	Automatisierung der Vorgehensweise	44
3.3.1	Berechnungsablauf und Konfiguration	44
3.3.2	Berechnung des erwarteten Betriebsverhaltens der Gasturbine	46
3.3.3	Erweiterung der Module zur Meßwertaufbereitung	48
3.3.4	Vorgehensweise bei Ausfall von Meßgrößen	51
3.3.5	Vorgabe von Schätzwerten	52
3.4	Einführung neuer Rechenwege zur Reduzierung der Anzahl der Iterationsvariablen	53
3.4.1	Anforderungen	54
3.4.2	Schematischer Ablauf der Rechenwege	54
3.4.3	Beispiele von Erweiterungen	56
3.4.4	Reduziertes Iterationsschema	58
3.5	Anbindung des Verfahrens an ein Prüfstandsprogramm	60
4	Erkennung von Fehlfunktionen mittels der modellbasierten Leistungsanalyse	62
4.1	Ergebnisse der modellbasierten Analyse	62
4.1.1	Erkannte grobe Meßfehler	62
4.1.2	Abweichungen von der Erwartung	62
4.2	Vorgehensweise zur Erkennung von Fehlfunktionen	64
4.3	Erkennung von Fehlfunktionen des Verdichters	65
4.3.1	Vergleichsmethoden	66
4.3.2	Erkennung von Fehlfunktionen des Niederdruckverdichters .	70
4.3.3	Erkennung von Fehlfunktionen des Hochdruckverdichters . .	72
4.4	Erkennung von Fehlfunktionen weiterer Komponenten	73
4.4.1	Turbinen	73
4.4.2	Düse	74
5	Anwendung des Verfahrens	77
5.1	Vorgaben des Verfahrens	77
5.2	Anwendung des Verfahrens anhand von simulierten Meßdaten . . .	81

5.2.1	Erzeugung von simulierten Meßdaten	81
5.2.2	Analyse von simulierten Meßdaten	82
5.3	Anwendung des Verfahrens während eines Versuchs mit einem Triebwerks- Prototypen	90
5.3.1	Allgemeine Beschreibung des Einsatzes	90
5.3.2	Erkennung von groben Meßfehlern	92
Literaturverzeichnis		95

Nomenklatur

Lateinische Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
a	J/kg	spezifische Arbeit
f	–	Faktor
h	J/kg	spezifische Enthalpie
k	$W/(m^2 K)$	Wärmedurchgangskoeffizient
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
n	U/s	Drehzahl
\dot{n}	U/s^2	Wellenbeschleunigung
p	Pa	Druck
r	m	Radius
t	–	Toleranz
\mathbf{u}, u_i		Randbedingungen
u		Unsicherheit
v	m/s	Geschwindigkeit
x	–	Wasser-Luft Verhältnis
\mathbf{y}, y_i		Meßgrößen
A	m^2	Fläche
C_D	–	Durchsatzkoeffizient
E		Meßfehler
F	N	(Schub-)Kraft
$\mathbf{F}(), F_i$		Synthesegrößen
$G()$		Zielfunktion
H_u	J/kg	unterer Heizwert
\mathbf{M}, M_i		Modifizierer
Ma	–	Machzahl
P	W	Leistung
PLA	mm	Schubhebelstellung (Power Lever Angle)
R	–	Recovery-Faktor
Re	–	Reynoldszahl
T	K	Temperatur
X		Parameter einer Komponente

Griechische Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
α	Grad	Winkel
β	-	Brennstoff-Luft-Verhältnis
β	-	Verdichter-Kennfeldparameter
ζ	-	Druckverlustbeiwert
δ	-	bezogener Druck $p_{\text{gem}}/p_{\text{soll}}$
η	-	(Isentroper) Wirkungsgrad
η	-	Ausbrenngrad
κ	-	Isentropenexponent
μ	-	Nebenstromverhältnis
μ	-	Erwartungsgröße
σ	-	Standardabweichung
Θ	-	bezogene Temperatur $T_{\text{gem}}/T_{\text{soll}}$
Θ	gm^2	polares Massenträgheitsmoment
Π	-	Druckverhältnis
φ	-	Düsenverlustbeiwert

Indizes

Index	Beschreibung
a	analysiert
aufb	aufbereitet
aus	austretender Fluidstrom
ein	eintretender Fluidstrom
eff	effektiv
erw	erwartet
ex	extern
gem	gemessen
i	Laufindex
max	Maximal-
min	Minimal-
r	richtig
red	reduziert
ref	für Referenzbedingungen
s	statisch
s	systematisch
soll	Soll-
t	Total-
tat	tatsächlich
schätz	geschätzt
y	Meßgröße
z	zufällig
A	Analyse

B	Beschleunigung
Br	Brennstoff
Bl	Abblase- bzw. Bleedluft
F	Faktor
FF	Feinfilterung
GF	Grobfilterung
H	Hauptstrom
HD	Hochdruck
Le	Leitschaufel
LS	Luftsystem
N	Nebenstrom
ND	Niederdruck
Δ	Addierer

Triebwerksebenen

0	Umgebung
12	Austritt Niederdruckverdichter (Nebenstrom)
13	Eintritt Nebenstromkanal
16	Eintritt Nachbrennkammer (Nebenstrom)
2	Eintritt Niederdruckverdichter
21	Austritt Niederdruckverdichter (Hauptstrom)
25	Eintritt Hochdruckverdichter
29	Austritt Hochdruckverdichter
3	Eintritt Brennkammer
4	Eintritt Hochdruckturbinen
45	Eintritt Niederdruckturbinen
59	Austritt Niederdruckturbinen
6	Eintritt Nachbrennkammer (Hauptstrom)
7	Eintritt Schubdüse
8	Engster Querschnitt Schubdüse
9	Austritt Schubdüse

Berechnungsmodule

BK	Brennkammer
D	Düse
E	Einlauf
HDT	Hochdruckturbine
HDV	Hochdruckverdichter
HDW	Hochdruckwelle
K	Kanal
MA	Meßwertaufbereitung
NDT	Niederdruckturbine
NDV	Niederdruckverdichter
NDW	Niederdruckwelle
NK	Nebenstromkanal
NBK	Nachbrennkammer
U	Umgebung

Abkürzungen

BP	Betriebspunkt
DLL	Dynamic Link Library
ISA	International Standard Atmosphere ($T = 288,15K, p = 101,325kPa$)
RP	Referenzpunkt

Zusammenfassung

Die Entwicklung moderner Gasturbinen wird durch ein umfangreiches Versuchsprogramm mit Prototypen begleitet. Zur Bewertung des Leistungs- und Betriebsverhaltens werden diese mit einer Vielzahl von Meßwertaufnehmern bestückt, mit denen Drücke, Temperaturen, Drehzahlen usw. gemessen werden. Die Auswertung der Meßdaten erfolgt mit Hilfe von Analyseverfahren, die nicht gemessene Größen, wie z. B. Wirkungsgrade der Gasturbinenkomponenten und Turbinentemperaturen, unter Verwendung bekannter Zusammenhänge berechnen. Dabei sind Meßfehler aufgrund von Mängeln der Meßeinrichtung oder aufgrund von falscher Handhabung, sogenannte grobe Meßfehler, zu erkennen und für die Analyse auszuschließen. Eingesetzt werden die Verfahren sowohl für eine detaillierte Bewertung des Prototypen nach Versuchsende (off-line) als auch zur Gewährleistung einer sicheren und effizienten Versuchsdurchführung (on-line). Aufgrund der sich verschärfenden Wettbewerbssituation für Gasturbinenhersteller und der damit verbundenen Forderung Entwicklungskosten und Zeiten kontinuierlich zu senken, gewinnen Anforderungen an die Verfahren hinsichtlich Automatisierung, Genauigkeit, Flexibilität sowie on-line- und off-line-Fähigkeit zunehmend an Bedeutung. Ebenso spielt die Erkennung von Fehlfunktionen der Gasturbine und von groben Meßfehlern bereits während der Versuchsdurchführung eine große Rolle. In der vorliegenden Arbeit wird ein modulares Leistungsberechnungsverfahren vorgestellt, das diese steigenden Anforderungen erfüllt.

Ausgangspunkt für die Arbeiten ist ein flexibel einsetzbares modulares Leistungsberechnungsverfahren, welches zur Analyse unterschiedlicher Gasturbinentypen bereits off-line eingesetzt wird. Diesem liegt eine Erwartung in Form eines mathematischen Modells zugrunde, welches das nichtlineare Betriebsverhalten der einzelnen Gasturbinenkomponenten in Form von Kennfeldern bzw. analytischen Gleichungen berücksichtigt. Neben der Berechnung von nicht gemessenen Größen wird ein Vergleich zwischen dem analysierten und dem erwarteten Betriebsverhalten durchgeführt. Dabei werden sogenannte Modifizierer in bezug auf Parameter, die das erwartete Betriebsverhalten der Komponenten beschreiben, bestimmt. Kennzeichnend für das modellbasierte Analyseverfahren ist ein nichtlineares Gleichungssystem, dessen Lösung nur sinnvoll mit Hilfe eines numerischen Iterationsverfahrens berechenbar ist. Das Konvergenzverhalten hängt dabei maßgeblich von der Güte der Schätzwerte und Meßdaten ab.

Die on-line-Fähigkeit des Verfahrens wird durch Erweiterungen in bezug auf eine automatisierte und numerisch robuste Analyse hergestellt. Vor der eigentlichen Analyserechnung werden Erwartungswerte unter Verwendung des Modells ermit-

telt, mit denen dann sämtliche Meßdaten auf Plausibilität hin überprüft werden. Hierzu werden maximal zulässige Abweichungen vorgegeben, die die Ungenauigkeit der Erwartung berücksichtigen. Abhängig von den als plausibel identifizierten Meßdaten wird ein Analyseschema ausgewählt, das die zu berechnenden Größen und die dafür zu berücksichtigenden Meßgrößen definiert. Geeignete Schätzwerte der Iterationsvariablen werden entweder anhand der Erwartungswerte oder anhand bereits durchgeführter Analysen ähnlicher Betriebspunkte abgeleitet. Weiterhin werden neue Rechenvorschriften in das Verfahren implementiert, um die Anzahl der Iterationsvariablen zu reduzieren. Dabei wird darauf geachtet, daß die Modularität und die Flexibilität des Verfahrens sowie die Güte der Ergebnisse gewahrt bleiben.

Das erweiterte Verfahren wird in ein modernes Datenerfassungssystem eines Prüfstands integriert. Hierfür wird eine Schnittstelle zwischen dem Prüfstandsprogramm und dem Leistungsberechnungsprogramm entwickelt. Beide Programme werden gemeinsam auf einem herkömmlichen PC unter dem Betriebssystem Windows XP eingesetzt. Das Analyseverfahren läßt sich automatisiert sowohl kontinuierlich (z. B. 4 Hz) als auch bei der Aufnahme eines Meßpunktes aufrufen. Eine on-line-Visualisierung der berechneten Größen ist mit Hilfe des Prüfstandsprogramms möglich.

Zur Erkennung von Fehlfunktionen der Gasturbine wie auch von groben Meßfehlern, die vom Betrag her gering und daher von der oben genannten Plausibilitätsüberprüfung nicht erkennbar sind, wird eine in einem Expertensystem implementierbare und on-line einsetzbare Verfahrensweise erläutert. Dabei werden anhand charakteristischer "Signaturen" der Modifizierer Fehlerfälle zu Komponenten oder zu Meßgrößen zugeordnet. Solche Signaturen werden beispielhaft für ein Turboluftstrahltriebwerk mit einer für einen Prototypen typischen Instrumentierung abgeleitet. Dazu werden unterschiedliche Methoden berücksichtigt, mit denen das analysierte und das erwartete Betriebsverhalten der Gasturbinenkomponenten verglichen wird. Die Signaturen beschränken sich auf die Anwesenheit eines einzelnen Fehlerfalls. Da das Auftreten mehrerer Fehlerfälle zum gleichen Zeitpunkt weitgehend ausgeschlossen werden kann, ist dies bei einer kontinuierlichen Überwachung des Gasturbinenzustands und der Meßdatenqualität zulässig.

Das beschriebene Verfahren wird zur Analyse von Daten eines Turboluftstrahltriebwerks angewandt, die mit Hilfe eines Simulationsverfahrens erzeugt wurden. Diese berücksichtigen Fehlfunktionen einzelner Triebwerkskomponenten sowie grobe Meßfehler. Die numerische robuste Berechnungsweise sowie die Erkennung der Fehlerfälle kann erfolgreich nachgewiesen werden. Das Verfahren wird weiterhin während eines realen Versuchs mit dem gleichen Triebwerkstyp zur kontinuierlichen Überwachung des Zustands der Komponenten und der Meßdatenqualität erfolgreich eingesetzt. Im Gegensatz zu den bisher on-line eingesetzten Verfahren kann eine Vielzahl von groben Meßfehlern schnell und zuverlässig erkannt werden.

Abstract

The development of modern gas turbines is accompanied by an extensive test program with prototypes. To evaluate the performance they are fitted with a substantial number of sensors measuring pressures, temperatures, shaft speeds etc. . The analysis of test data is performed with the help of procedures calculating not measured data, e. g. component efficiencies and turbine temperatures. Thereby measurement faults due to deficiencies of the measuring device and due to erroneous application have to be detected and to be excluded from the analysis. The procedures are applied for a detailed analysis of the prototype after the end of the test (off-line) as well as to ensure a safe and efficient operation during the test (on-line). Due to the increasing competitive environment of gas turbine manufacturers and the resulting demand for continuously decreasing development costs and time, the requirements concerning automation, accuracy, flexibility, on-line and off-line capability increase. Thereby the detection of component malfunctions and measurements faults already during the test is also very important. In this paper a modular performance procedure is presented, which fulfil these increasing demands.

The starting point is a flexible modular performance calculation tool which is already in use for off-line analysis of different gas turbines. The basis of the analysis procedure is a full thermodynamic model representing the expected characteristic of the gas turbine and its components. The non-linear behavior of the components are described with the help of maps or analytical equations. In addition to a pure test data analysis the model-based analysis performs a comparison between the analysed and the expected behavior. The deviations are represented by so-called modifiers which are related to parameters describing the expected behavior of the components. The procedure is characterised by a non-linear equation system, which can only be solved by a numerical iteration procedure. The convergency is strongly dependent on the quality of the estimation values and that one of the measured data.

The on-line-capability of the procedure is reached by enhancements related to an automated and numerical robust analysis. Before the analysis procedure is performed, expected values are derived by the model. These values are used to check all measured values. Maximal deviations allowed have to be quoted considering the uncertainty of the model. Dependent on the measurements identified as plausible an analysis scheme is selected defining the parameters to be analysed and the measurements to be considered. Suitable estimation values of the iteration variables are determined by the expected values or by already analysed values of similar operating points. Furthermore new calculation rules are integrated in the procedure to

reduce the number of iteration variables. This is carried out with respect to the modularity and flexibility of the procedure as well as to the quality of the results.

The analysis procedure is integrated in a modern data acquisition system of a test bed. An interface between the test bed program and the performance calculation tool is developed. Both are applied together on a conventional PC with the operating system Windows XP. The analysis procedure is called automatically continuously (e. g. 4 Hz) as well as by recording stabilized test data. An on-line-visualisation of the derived values can be performed by the test bed program.

To detect gas turbine malfunctions as well as measurement faults having a little value and consequently having not been detected by the above mentioned test data check a procedure is presented which can be integrated in an expert system and can be used on-line. In this procedure faults are assigned to components and measurements with the help of characteristic signatures. Such signatures are derived for a two spool turbofan engine with a typical development instrumentation. Different methods are thereby considered, how the analysed and the expected behavior of the components are compared. The signatures are limited for the case of a single fault. This is true if the gas turbine condition and the quality of the measurements are monitored continuously and if different faults don't occur at the same time.

The described procedure is used to analyse data of a turbofan created by a simulation procedure. This data considers faults of components malfunctions and measurement faults. The numerical robust calculation as well as the detection of the faults is demonstrated successfully. Furthermore the analysis procedure is applied during a real test with the same engine type to monitor the engine condition and the quality of the measurements. Compared to the procedure used so far a lot of measurement fault can be detected fast and reliable.

1 Einleitung

1.1 Einführung

Die Anforderungen, die an neue Gasturbinentypen in bezug auf Umweltverträglichkeit, Betriebssicherheit und Brennstoffverbrauch gestellt werden, steigen stetig. Dem ist nur durch eine kontinuierliche Entwicklung neuer Technologien und deren schnelle Umsetzung in eine serienreife Anwendung zu begegnen [61]. Die Entwicklung moderner Gasturbinen muß daher durch ein umfangreiches Versuchsprogramm mit Prototypen begleitet werden, um möglichst zu einem frühen Zeitpunkt durchgeführte Entwicklungsarbeiten zu validieren und um nachzuweisen, daß die Forderungen des Kunden und der Behörden erfüllt werden [6]. Neben Versuchen mit einzelnen Bauteilen und Komponenten finden Versuche mit der Gesamtgasturbine statt [23]. Diese wird mit einer Vielzahl von Meßwertaufnehmern bestückt, mit denen Drücke, Temperaturen, Drehzahlen usw. gemessen werden. Die Versuchsdurchführung erfolgt überwiegend in Bodenprüfständen, in denen das Verhalten der Gasturbine unter den im Prüfstand herrschenden Umgebungsbedingungen untersucht wird. Für Flugtriebwerke werden weiterhin Höhenprüfstände eingesetzt, in denen die Flughöhe und die Flugmachzahl simuliert werden. Bild 1.1 zeigt ein Turboluftstrahltriebwerk, das in einem Bodenprüfstand installiert ist.

Die Entwicklung von Gasturbinen wird weiterhin in zunehmendem Maße durch den Einsatz von leistungsfähigen Berechnungsverfahren geprägt. Unter anderem kommen Leistungsberechnungsverfahren zur Anwendung, die eine detaillierte Untersuchung des Leistungs- und Betriebsverhaltens einer kompletten Gasturbine erlauben. Dabei sind entsprechend der Aufgabenstellung Auslegungs-, Nachrechnungs- und Analyseverfahren zu unterscheiden [4]. Mit Ersterem lassen sich relevante Querschnitte in der Gasturbine unter Vorgabe eines thermodynamischen Arbeitsprozesses sowie einer Angabe über die Größe der Gasturbine ermitteln. Dagegen sind Nachrechnungsverfahren gebräuchlich zur Berechnung des Betriebsverhaltens einer bereits ausgelegten Gasturbine. Eingesetzt werden dabei überwiegend Syntheseverfahren, mit denen das Betriebsverhalten der Gesamtgasturbine durch das Verknüpfen des Betriebsverhaltens der einzelnen Komponenten bestimmt wird. Analyseverfahren erlauben die Auswertung des experimentell ermittelten Betriebsverhaltens einer aufgebauten Gasturbine und deren Komponenten. Dabei werden nicht gemessene Größen, wie z. B. Wirkungsgrade der Komponenten und Turbinentemperaturen, anhand von Meßdaten unter Verwendung bekannter Zusammenhänge berechnet.

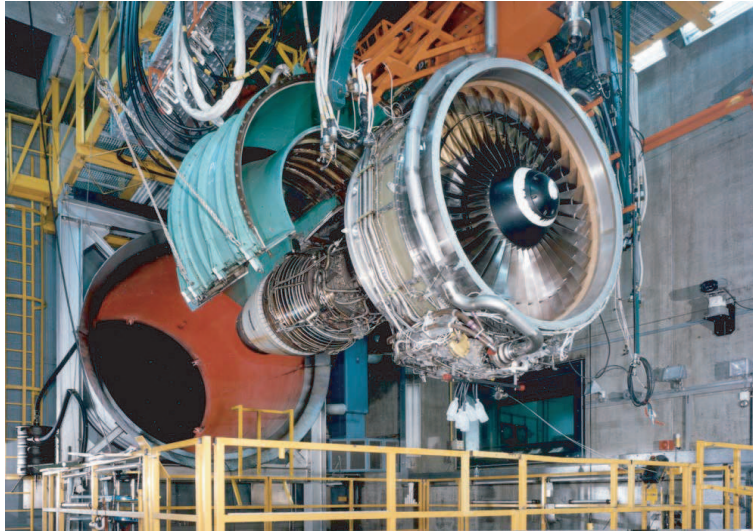


Bild 1.1: Turboluftstrahltriebwerk installiert in einem Bodenprüfstand

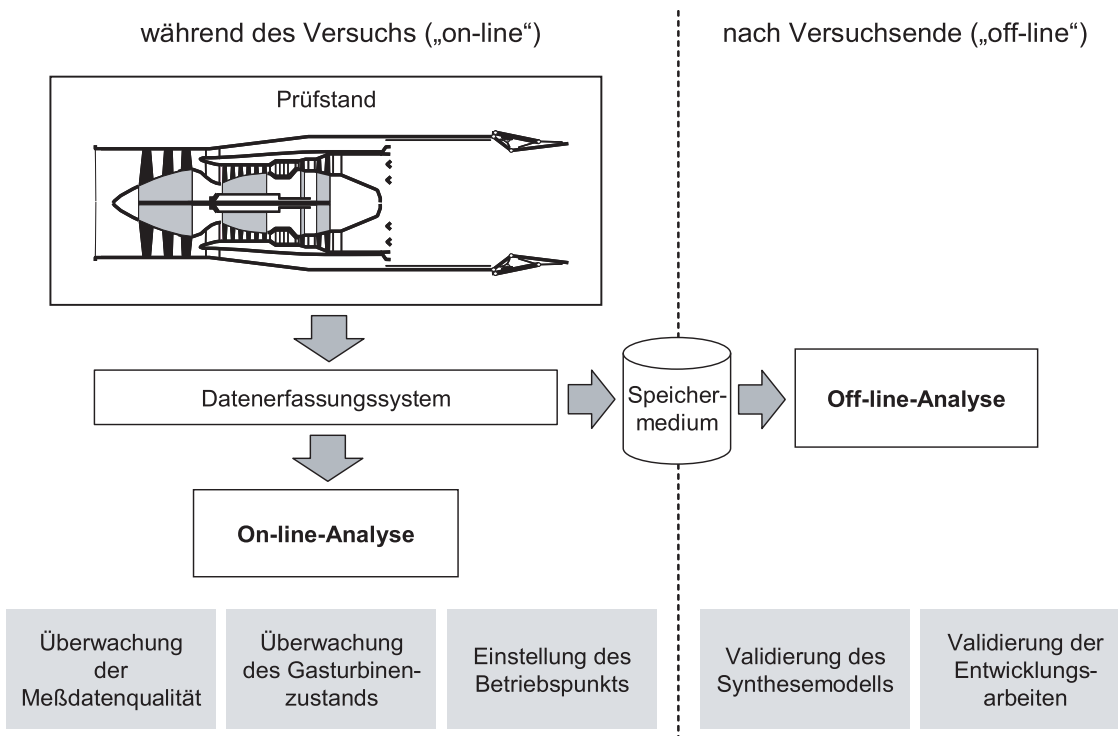


Bild 1.2: Einsatz von Analyseverfahren während des Versuchs und nach dem Versuch

Wie in Bild 1.2 dargestellt, kommen Analyseverfahren sowohl für eine detaillierte Bewertung des Prototypen nach Versuchsende (off-line) als auch zur Gewährleistung einer sicheren und effizienten Versuchsdurchführung (on-line) zur Anwendung. Mit der detaillierten Bewertung werden die durchgeführten Entwicklungsarbeiten in bezug auf das Betriebsverhalten der Gasturbine und deren Komponenten validiert. Hierbei ist insbesondere auch das Synthesemodell, welches das erwartete Betriebsverhalten beschreibt, zu überprüfen, zu korrigieren und zu verfeinern. Zur Analyse werden daher überwiegend Verfahren eingesetzt, die auf einem Synthesemodell basieren. Diese sogenannten modellbasierten Analyseverfahren erlauben neben der Berechnung von nicht gemessenen Größen die Durchführung eines Vergleichs zwischen dem analysierten und dem erwarteten Betriebsverhalten der Komponenten. Kennzeichnend für die hier eingesetzten Verfahren ist ein vom Anwender vorzugebendes nichtlineares Gleichungssystem, dessen Lösung mit Hilfe eines numerischen Iterationsverfahrens berechnet wird. Die Verfahren lassen sich weiterhin flexibel hinsichtlich Konfiguration und Instrumentierung des Prototypen einsetzen. Wie bei jeder meßtechnischen Aufgabe erfolgt die Analyse unter Berücksichtigung von Meßunsicherheiten. Insbesondere müssen Meßfehler aufgrund von Mängeln der Meßeinrichtung oder aufgrund von falscher Handhabung, sogenannte grobe Meßfehler, erkannt und für die Analyse ausgeschlossen werden [19]. Die Überprüfung der Meßdaten erfolgt dabei überwiegend durch den Entwicklungsingenieur. Die Qualität der Überprüfung und somit die der Analyse ist daher stark von dessen Wissens- und Erfahrungsstand abhängig. Die Entscheidungen sind nicht ausschließlich an objektiv "meßbare" Daten geknüpft, sondern obliegen im Zweifelsfall subjektiven Kriterien.

Bei der Versuchsdurchführung ist es erforderlich, den Zustand der Gasturbinenkomponenten und die Qualität der Meßdaten zu überwachen sowie nicht gemessene Größen in der Gasturbine einzustellen. Neben dem sicherheitsrelevanten Aspekt erfolgt die Überwachung unter dem Gesichtspunkt, daß unerkannte Fehlfunktionen der Gasturbine sowie unerkannte grobe Meßfehler unter Umständen eine kostenintensive Wiederholung des Versuchs zur Folge haben können. Auch können weitere Folgeschäden in der Gasturbine verursacht werden. Aufgrund der notwendigen zeitnahen Analyse stehen Anforderungen an die hier eingesetzten Verfahren in bezug auf eine schnelle, automatisierte und numerisch robuste Berechnungsweise im Vordergrund. On-line einsetzbare Verfahren sind deshalb darauf ausgelegt, eine iterative Berechnungsweise ganz zu vermeiden bzw. die Anzahl der iterativ zu bestimmenden Größen gering zu halten. In der Regel beinhalten diese eine vereinfachte Modellierung und sind nur für eine spezielle Konfiguration und Instrumentierung anwendbar. Weiterhin wird die Bewertung des Zustands der Gasturbinenkomponenten und der Meßdatenqualität überwiegend dem Prüfstandspersonal überlassen. In Anbetracht des großen Umfangs an anfallenden Meßdaten ist hierbei ein zuverlässiges Erkennen von Fehlfunktionen der Gasturbine sowie von groben Meßfehlern nicht gewährleistet. Weiterhin ist aufgrund der "vereinfachten" Modellierung eine präzise Einstellung von nicht gemessenen Größen nicht möglich.

Aufgrund der sich verschärfenden Wettbewerbssituation für Gasturbinenhersteller und der damit verbundenen Forderung Entwicklungskosten und -zeiten kontinuierlich zu senken sind für die Gasturbinenentwicklung verbesserte, beschleunigte, vereinfachte und automatisierte Prozesse erforderlich. Dadurch gewinnt

- der Einsatz von einheitlichen, automatisierten und flexiblen Analyseverfahren während des Versuchs und danach,
- schnelle und qualitativ hochwertige Leistungsanalysen sowie
- sichere und effektive Versuchsdurchführungen

zunehmend an Bedeutung [56].

Folgende Anforderungen an ein modernes Analyseverfahren lassen sich hieraus ableiten:

- vollautomatischer Einsatz,
- hohe Genauigkeit,
- hohe Flexibilität in der zu untersuchenden Gasturbinenkonfiguration und in den zu berücksichtigenden Meßdaten,
- schnelle und numerisch robuste Berechnungsweise,
- Bewertung des Betriebsverhaltens der Gasturbinenkomponenten,
- Erkennung von groben Meßfehlern.

1.2 Bisherige Verfahren zur Leistungsanalyse

Überblick

Dem Einsatz von Leistungsanalyseverfahren wird seit geraumer Zeit gleichermaßen bei Herstellern, Instandsetzungsunternehmen und Betreibern von Gasturbinen Beachtung geschenkt. Zu unterscheiden sind dabei folgende Anwendungen:

- Bewertung des Betriebsverhaltens von Gasturbinen und deren Komponenten sowie der Meßdatenqualität,
- Validierung und Verbesserung von Simulationsmodellen,
- Einstellung von nicht meßbaren Größen während des Betriebs.

Die folgende Diskussion soll einen Überblick über die gebräuchlichen Verfahren zur Leistungsanalyse geben. Hierbei werden diese auf ihre Eignung hinsichtlich der in Kap. 1.1 genannten Anforderungen eines Gasturbinenherstellers überprüft.

In der Anwendung befinden sich seit langem **konventionelle Analyseverfahren**, die das Betriebsverhalten von Gasturbinen und deren Komponenten unter Verwendung bekannter physikalischer Zusammenhänge berechnen (z. B. [2], [4]). Eine Bewertung des Betriebsverhaltens der Komponenten sowie der Meßdatenqualität wird dabei nicht durchgeführt. Gasturbinenhersteller setzen solche Verfahren häufig online zur Unterstützung der Versuchsdurchführung mit Prototypen ein. Um eine numerisch robuste Berechnungsweise zu gewährleisten, werden die hier eingesetzten Verfahren dahingehend ausgelegt, die Anzahl der iterativ zu bestimmenden Größen gering zu halten. Dabei werden die Verfahren auf Kosten der Flexibilität an eine spezielle Konfiguration und Instrumentierung angepasst. Weiterhin wird auf Kosten der Genauigkeit eine vereinfachte Modellierung eingebracht (z. B. [7], [71]).

Das Betriebsverhalten von Gasturbinenkomponenten sowie die Meßdatenqualität lassen sich mit einem Vergleich zu einer Erwartung bewerten. Hierzu sind sowohl wissensbasierte als auch modellbasierte Verfahren dokumentiert. Eine weitreichende Übersicht wird z. B. in [31] gegeben. Für wissensbasierte Verfahren sind exemplarisch **neuronale Netzwerke** (z. B. [15], [64] und [73]) und **Expertensysteme** (z. B. [12], [50] und [57]) zu nennen. Um solche Verfahren effektiv einsetzen zu können, muß ein erheblicher Aufwand vor deren Einsatz (Trainieren der Netzwerke, Wissenserfassung) betrieben werden, weshalb ein flexibler Einsatz nicht möglich ist. Da Gasturbinenhersteller modellbasierte Verfahren zur Simulation des Betriebsverhaltens von Gasturbinen anwenden, bietet sich dagegen der Einsatz von **modellbasierten Analyseverfahren** an. Diese werden im Folgenden näher diskutiert.

Modellbasierte Analyseverfahren

Das Prinzip von modellbasierten Analyseverfahren ist in Bild 1.3 dargestellt. Den Verfahren liegt eine Erwartung über das Betriebsverhalten der Gasturbinenkomponenten zugrunde, das entweder zu validieren ist oder den Soll-Zustand repräsentiert. Durch eine "ungenauere" Erwartung bzw. durch Bauteilprobleme weicht das tatsächliche Betriebsverhalten einzelner Komponenten vom erwarteten ab. Dies resultiert in unterschiedlichen thermodynamischen Gleichgewichtszuständen der Gasturbine und somit in unterschiedlichen Werten von meßbaren Größen. Die Zusammenhänge zwischen den Komponentenparametern und den meßbaren Größen werden mit Hilfe eines mathematischen Modells beschrieben. Anhand von Meßgrößen lassen sich dann umgekehrt Abweichungen von der Erwartung qualitativ und quantitativ den Komponenten zuordnen und entsprechend Schlußfolgerungen ziehen.

Verfahren basierend auf einem linearisierten Modell

Urban beschreibt in [67] und [68] die sogenannte "Gas Pfad Analyse", bei welcher die nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Komponentenparametern und Meßgrößen durch eine Linearisierung um das erwartete Betriebsverhalten mit Hilfe eines Gleichungssystems dargestellt werden. Das Verfahren wurde vielfach modifiziert (z. B. [21], [36], [49]), u. a. können Meßunsicherheiten berücksichtigt sowie grobe Meßfehler erkannt werden (z. B. [20], [69]). Zur Anwendung kommt es überwiegend

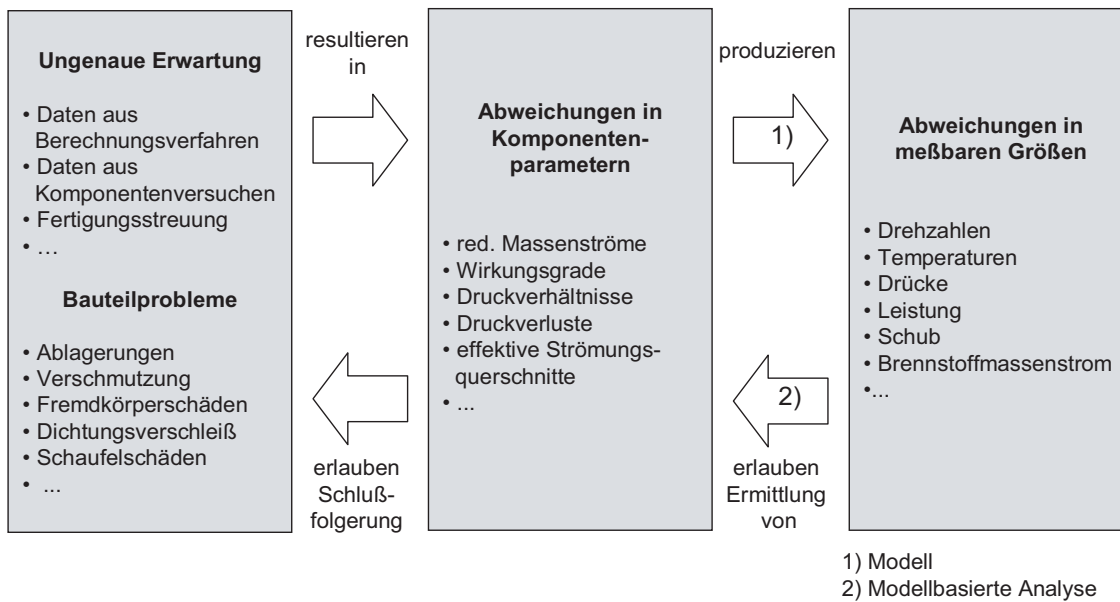


Bild 1.3: Prinzip von modellbasierten Analyseverfahren (basierend auf [67])

in Zustandsüberwachungssystemen von Seriengasturbinen. Exemplarisch seien hier die Systeme “TEMPER” [11] und “COMPASS” [43] genannt, die auch on-line anwendbar sind. Aufgrund der Linearisierung können hinreichend genaue Ergebnisse nur in der unmittelbaren Umgebung des erwarteten Betriebsverhaltens erzielt werden. Weiterhin lassen die Verfahren nur eine sehr begrenzte Zahl von vorher bereits festgelegten möglichen Abweichungen zu. Eine genaue Bewertung des Betriebsverhaltens der Komponenten sowie ein flexibler Einsatz sind daher nicht gegeben.

Verfahren basierend auf einem nichtlinearen Synthesemodell

Eine genauere Bewertung läßt sich dagegen erzielen, wenn die Analyse auf einem Synthesemodell basiert, welches das nichtlineare Betriebsverhalten von Gasturbinen berücksichtigt. Solche Syntheseverfahren ermitteln das Betriebsverhalten von Gasturbinen durch das Verknüpfen des Betriebsverhaltens der einzelnen Gasturbinenkomponenten unter Verwendung aerothermodynamischer Erhaltungssätze. Den Verfahren liegt ein Gleichungssystem zugrunde, dessen Lösung nur mit Hilfe numerischer Iterationsverfahren berechenbar ist. Ausführliche Beschreibungen über die Grundlagen der Leistungsrechnung werden z. B. in [4], [37] und [71] gegeben.

Die Vorläufer der heute verwendeten Syntheseverfahren entstanden in den 70er Jahren bei der NASA. Exemplarisch seien die von *Fishbach* und *Koenig* vorgestellten Verfahren GENENG und GENENG II ([17], [22]) und das von *Sellers* und *Daniele* beschriebene Verfahren DYNGEN [55] zu nennen, die die Berechnung des stationären und des instationären Betriebsverhaltens von Gasturbinen erlauben. Die hierfür iterativ zu lösenden Gleichungen sind weitgehend im Programm festgelegt, weshalb ein Einfluß hierauf durch den Anwender des Verfahrens nicht möglich ist.

Die Verfahren wurden dahingehend weiterentwickelt, daß ohne Veränderung des Programmcodes ein nahezu beliebiger Triebwerksaufbau simulierbar ist. Hierbei wird das Betriebsverhalten der Komponenten in jeweils eigenen Berechnungsmodulen beschrieben, die durch den Anwender in der Eingabe des Verfahrens verknüpft werden. Das iterativ zu lösende Gleichungssystem ist weitgehend beliebig durch den Anwender vorgebar. Solche modulare Syntheseverfahren werden u. a. von *Rick* und *Muggli* [45], *Therkorn* [63] und *Kurzke* [25] beschrieben.

Die Komplexität der Komponentenbeschreibung wurde ebenso erhöht, wofür folgende Arbeiten exemplarisch genannt seien. *Kurzke* beschreibt in [25] ein Verfahren, das untergeordnete Einflüsse, wie z. B. Einfluß der Reynoldszahl und des Isentropenexponenten, auf das Betriebsverhalten der Komponenten berücksichtigt. Ein Syntheseverfahren mit Kennfelddarstellung für Wärmeübertragungsvorgänge wird in [46] von *Riegler* vorgestellt. *Staudacher* geht in [60] auf die Modellierung des sekundären Luftsystems ein. Schließlich dokumentiert *Bauer* [5] die Berechnung des Gesamtbetriebsverhaltens eines integrierten Hyperschall-Kombinationsantriebs.

Zur Simulation von Abweichungen vom erwarteten Betriebsverhalten wurden die Verfahren mit Modifizierern \mathbf{M} in bezug auf die Komponentenparametern erweitert. Bei der Durchführung von modellbasierten Analysen wird mit diesen das Synthesemodell durch eine vorgegebene Zielfunktion $G(\mathbf{M}, \mathbf{u})$ in der Weise angepasst, daß bei vorgegebenen Randbedingungen \mathbf{u} die berechneten Größen $\mathbf{F}(\mathbf{M}, \mathbf{u})$ bestmöglichst die Meßgrößen \mathbf{y} wiedergeben (s. Bild 1.4). Somit sind alle nicht gemessenen Größen bestimmt und anhand der Werte der Modifizierer läßt sich das analysierte Betriebsverhalten mit dem erwarteten vergleichen.

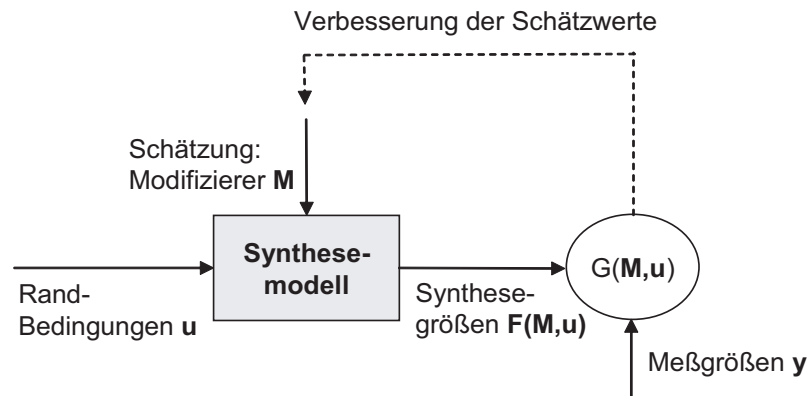


Bild 1.4: Arbeitsweise von modellbasierten Analyseverfahren

Habrard [18] stellte in den 70er Jahren ein Verfahren zur Validierung von Synthesemodellen vor, das den noch heute eingesetzten entspricht. Die Anzahl der Randbedingungen und Modifizierer ist dabei gleich der Anzahl der Meßgrößen, wodurch sich ein Satz von Randbedingungen / Modifizierern ermitteln läßt, mit dem das Syn-

thesemodell exakt die Meßgrößen wiedergibt ($G(\mathbf{M}, \mathbf{u}) = \mathbf{F}(\mathbf{M}, \mathbf{u}) - \mathbf{y} = \mathbf{0}$). Weitere verfügbare Meßgrößen werden hierbei ignoriert. Die Anwendung des Verfahrens wird u. a. in folgenden Arbeiten erläutert. In [9] wird die Analyse einer zwischengekühlten Gasturbine mit Wärmetauscher beschrieben. Die Validierung des Synthesemodells eines modernen militärischen Zweiwellen-Zweistrom-Turboluftstrahltriebwerks im Bereich zwischen Stillstand und Leerlauf wird in [48] dargestellt. In [29] ist die Validierung eines Modells zur Beschreibung des Betriebsverhaltens einer konvergent-divergenten Düse zu finden.

Stamatis, Mathioudakis und *Papailliou* benutzen in [58] und [59] das gleiche Verfahren zur Zustandsüberwachung von Gasturbinen. Dabei wird die Gasturbine zunächst in ihrem “gesunden” Zustand analysiert, um Referenzwerte für die Modifizierer zu bestimmen. Mit einem Vergleich zwischen den aktuell analysierten Werten der Modifizierer und deren Referenzwerten läßt sich dann der Zustand einzelner Gasturbinenkomponenten überwachen. Das Verfahren wird anhand von Meßdaten einer Industriegasturbine demonstriert, mit denen der Zustand des Verdichters, der Brennkammer und der Turbine überwacht wird. Implementierte Fehlfunktionen im Verdichter werden erfolgreich identifiziert. Weitere Erläuterungen und Anwendungsbeispiele sind auch in [8] und [34] zu finden.

Zur Erkennung von groben Meßfehlern wird von *Habrard* [18] weiterhin ein sogenanntes “überbestimmtes” Verfahren erläutert, bei welchem die Anzahl der Meßgrößen größer ist als die Anzahl der Randbedingungen und Modifizierer. Da aufgrund der stets vorhandenen Meß- und Modellunsicherheiten das sich ergebende überbestimmte Gleichungssystem nicht exakt lösen läßt, wird eine Näherungslösung mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens ermittelt. Die zu minimierende Zielfunktion $G(\mathbf{M}, \mathbf{u})$ basiert dabei auf der Methode der kleinsten Fehlerquadrate:

$$G(\mathbf{M}, \mathbf{u}) = \sum_i (F_i(\mathbf{M}, \mathbf{u}) - y_i)^2 = \min.$$

Die Elemente der Zielfunktion können entsprechend den Meßunsicherheiten gewichtet werden. Der Betrag des Minimums ist ein Maß für die Konsistenz von angepasstem Synthesemodell und Meßgrößen. Ein vom Betrag her hohes Minimum kennzeichnet die Anwesenheit eines groben Meßfehlers oder einer größeren Modellunsicherheit. Eine Zuordnung zu einer Meßgröße bzw. zu einem Modellparameter ist aber nicht möglich. Durch das zu lösende überbestimmte Gleichungssystem wirkt sich eine tatsächliche Abweichung nicht ausschließlich auf die Modifizierer der verursachenden Komponente, sondern auch auf Modifizierer anderer Komponenten aus. Tatsächliche Abweichungen werden daher falsch eingeschätzt, bzw. nicht existierende Abweichungen werden unter Umständen identifiziert. Für eine präzise Validierung des Betriebsverhaltens einzelner Komponenten ist dieses Verfahren somit nicht geeignet. Weitreichende Erläuterungen zu diesem Verfahren werden auch in [13] und [51] gegeben.

Zedda und *Singh* erweitern in [74] das Verfahren dahingehend, daß nun grobe Meßfehler zu den entsprechenden Meßgrößen zuordbar sind. Im Gegensatz zu [18] ist eine Auswahl der zu überprüfenden Komponenten und der für die Analyse zu berücksichtigenden Meßgrößen nicht erforderlich. Vielmehr wird ein Satz von Modifizierern und Meßgrößen mit Hilfe eines genetischen Algorithmus gesucht, mit dem der Betrag der Zielfunktion minimal wird. Dieser Satz beinhaltet somit die Modifizierer derjenigen Komponenten, deren analysiertes Betriebsverhalten von dem erwarteten abweicht, sowie die “korrekten” Meßgrößen, die keine groben Meßfehler aufweisen. Aufgrund der erforderlichen Redundanz der “korrekten” Meßgrößen ist die Anzahl der Modifizierer entsprechend einzuschränken. Das Verfahren ist daher nur einsetzbar, wenn wenige Komponenten ein von der Erwartung abweichendes Betriebsverhalten und nur wenige Meßgrößen einen groben Meßfehler aufweisen. Das Verfahren wurde erfolgreich anhand von simulierten Fehlfunktionen im Nieder- und Hochdruckverdichter des Triebwerks EJ200 demonstriert. Dabei kamen simulierte Meßgrößen mit charakteristischen Meßunsicherheiten zur Anwendung, die weiterhin vier grobe Meßfehler aufwiesen. Da die Analyse eines Betriebspunktes mit einem zur Zeit modernen PC ca. 50 Stunden dauert, ist der on-line-Einsatz derzeit noch ungeeignet.

Der automatisierte Einsatz eines modellbasierten Analyseverfahrens bei der Versuchsdurchführung wird in [32] und [33] beschrieben. Der Aufruf des Verfahrens erfolgt dabei zyklisch, d. h. kontinuierlich mit einer vorgegebenen Frequenz. Zur Überwachung des Gasturbinenzustands und der Meßdatenqualität werden die berechneten Werte der Modifizierer jeweils mit Referenzwerten verglichen, die beispielsweise zu Beginn des Versuchs bestimmt wurden. Sind die Unterschiede größer als ein vorgegebenes Maß, so wird die Anwesenheit eines groben Meßfehlers oder einer Fehlfunktion einer Gasturbinenkomponente erkannt und es beginnt automatisch eine Suche nach der Ursache. Dabei werden zunächst grobe Meßfehler in Betracht gezogen, indem die Werte einzelner Meßgrößen variiert und deren Einfluß auf die Modifizierer untersucht werden. Ist die Suche erfolglos, so wird die Ursache anhand der Modifizierer einer Komponente zugeordnet. Das Verfahren wird mit abrupt auftretenden groben Meßfehlern demonstriert, die während eines realen Versuchs mit einem Prototypen des Triebwerks F119 auftraten. Eine detaillierte Behandlung der Automatisierung und der erforderlichen Maßnahmen zur Gewährleistung der numerischen Robustheit des Verfahrens erfolgt in den vorgestellten Arbeiten jedoch nicht.

Wie aus der Literaturübersicht zu entnehmen ist, können nur Analyseverfahren, die auf Synthesemodellen basieren, die in Kap. 1.1 gestellten Anforderungen hinsichtlich Flexibilität und Genauigkeit erfüllen. Weiterhin erlauben sie, Abweichungen vom erwarteten Betriebsverhalten der Gasturbine zu erkennen und diese Gasturbinenkomponenten zuzuordnen. Die Verfahren kommen daher bereits seit geraumer Zeit zur Validierung von Synthesemodellen zur Anwendung. Um grobe Meßfehler zu erkennen und diese Meßgrößen zuzuordnen, werden die Verfahren gewöhnlich in Verbindung mit Optimierungsverfahren eingesetzt. Dies führt jedoch zu höheren

Rechenzeiten sowie zu einer geringeren Genauigkeit.

Den Verfahren wird weiterhin vermehrt Aufmerksamkeit zur Zustandsüberwachung von Gasturbinen und deren Komponenten geschenkt. Da aufgrund des iterativ zu lösenden Gleichungssystems eine numerisch robuste Berechnungsweise nicht generell gewährleistet ist, wird in der Literatur der Einsatz eines solchen Verfahrens zur Unterstützung von Versuchsdurchführungen jedoch kaum behandelt. Bei den wenigen vorhandenen Literaturstellen werden Informationen über die Güte dieser Verfahren und der Grad der Automatisierung nicht gegeben. Gleiches gilt für die notwendigen numerischen Voraussetzungen zur Realisierung eines solchen Verfahrens. Der Einsatz eines Optimierungsverfahrens mit entsprechend hohen Rechenzeiten zur Erkennung von groben Meßfehlern stellt ein weiteres Problem dar.

1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht zum einen in der Erweiterung eines bestehenden modularen Leistungsberechnungsverfahrens, mit dem off-line wie auch on-line modellbasierte Analysen automatisiert durchführbar sind. Dabei ist sowohl die typische Vorgehensweise eines Anwenders des bisherigen Verfahrens zu automatisieren, als auch eine numerisch robuste Berechnungsweise zu gewährleisten. Weiterhin ist das Verfahren in ein Datenerfassungssystem eines Prüfstands zu implementieren. Die Erweiterungen sollen unter Bewahrung der Arbeitsweise eines modularen Leistungsberechnungsverfahrens, der vorhandenen Flexibilität des Verfahrens sowie der bestehenden Modellierung des Fluids und der Gasturbinenkomponenten durchgeführt werden.

Zum anderen besteht die Zielsetzung dieser Arbeit darin, eine on-line anwendbare Vorgehensweise zu beschreiben, mit der eine während der Versuchsdurchführung auftretende Fehlfunktion der Gasturbine oder eines groben Meßfehlers erkannt wird. Insbesondere wird dabei Wert gelegt auf die Zuordnung des Fehlerfalls zu einer Gasturbinenkomponente bzw. zu einer Meßgröße anhand von charakteristischen "Signaturen" in den Werten der Modifizierer einer modellbasierten Analyse. Solche "Signaturen" sollen z. B. in einem Expertensystem hinterlegt werden können.

Ausgangspunkt der durchzuführenden Arbeiten ist das bei dem Gasturbinenhersteller *MTU Aero Engines* eingesetzte modulare Leistungsberechnungsverfahren MOPS (MOdular Performance Synthesis) [25], mit dem u. a. modellbasierte Analysen durchgeführt werden. Zunächst werden die grundlegenden Eigenschaften des modellbasierten Analyseverfahrens beschrieben und dessen Vorteile gegenüber einem konventionellen Analyseverfahren, welches bisher während der Versuchsdurchführung bei der MTU eingesetzt wurde, herausgestellt. Danach werden die Anforderungen an ein automatisiertes modellbasiertes Analyseverfahren hergeleitet sowie die hierzu erforderlichen Erweiterungen des bestehenden Verfahrens beschrieben. Dabei wird

sowohl auf die typische Vorgehensweise eines Anwenders als auch auf die Umsetzung von Maßnahmen zur Gewährleistung der numerischen Robustheit eingegangen. Hinsichtlich der Vorgehensweise des Anwenders ist diese zu erfassen, zu standardisieren und im Verfahren entsprechend abzubilden. Weiterhin wird die Integration des Verfahrens in das bei der MTU eingesetzte moderne Datenerfassungssystem PULS (Prüfstand- Und LaborSoftware) erläutert.

Anschließend werden für unterschiedliche Gasturbinenkomponenten und Meßgrößen jeweils die Auswirkungen einer Fehlfunktion bzw. eines groben Meßfehlers auf die Werte der Modifizierer untersucht. Dabei werden auch unterschiedliche Ansätze behandelt, in welcher Weise die Vergleiche zwischen dem analysierten und dem erwarteten Betriebsverhalten der Komponenten durchgeführt werden. Anhand der Untersuchungen werden dann für Fehlfunktionen von jeweils unterschiedlichen Komponenten und für grobe Meßfehler von jeweils unterschiedlichen Meßgrößen charakteristische "Signaturen" in den Werten der Modifizierer abgeleitet.

Abschließend wird das erweiterte Verfahren zur automatisierten modellbasierten Leistungsanalyse sowie die Vorgehensweise zur Erkennung von Fehlerfällen beispielhaft anhand von simulierten Meßdaten, die mittels eines Synthesemodells erzeugt wurden, demonstriert. Weiterhin wird der Einsatz des Verfahrens in Verbindung mit dem Datenerfassungssystem *PULS* während eines realen Versuchs mit einem Prototypen beschrieben.

1.4 Zweistrom-Turboluftstrahl-Triebwerk

Die Ausführungen in der vorliegenden Arbeit erfolgen beispielhaft anhand eines militärischen Zweiwellen-Zweistrom-Turboluftstrahltriebwerks in gemischter Bauweise (s. [53]). Diese sind auf andere Gasturbinenkonfigurationen ohne Einschränkungen übertragbar.

Der Längsquerschnitt des Triebwerks ist schematisch in Bild 1.5 dargestellt. Hierbei durchläuft der Luftstrom zunächst den Einlauf und den Niederdruckverdichter und teilt sich dann in Haupt- und Nebenstrom auf. Der Hauptstrom passiert anschließend den Hochdruckverdichter mit verstellbaren Eintrittsleitschaufeln, die Brennkammer sowie die Hoch- und Niederdruckturbine. Bei dem Eintritt in die Nachbrennkammer findet eine Mischung zwischen dem Haupt- und einem Teil des Nebenstroms statt. Die weitere Zumischung des Nebenstroms erfolgt in der Nachbrennkammer und in der Düse. Die Luft strömt durch eine verstellbare konvergent-divergente Düse in die Umgebung. Wegen des Verstellmechanismus der Düse besteht eine eindeutige Zuordnung zwischen den Flächen des engsten Querschnitts der Düse und der Austrittsebene. Dem Triebwerk kann weiterhin Bleedluft des Hochdruckverdichters sowie Wellenleistung der Hochdruckwelle entnommen werden.

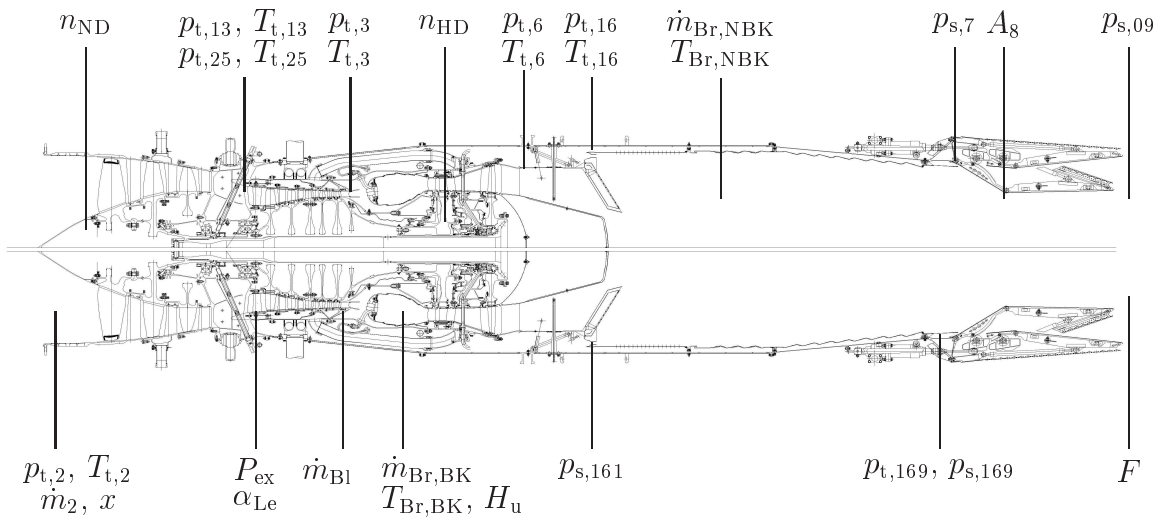


Bild 1.5: Längsquerschnitt eines militärischen Turboluftstrahltriebwerks mit einer für einen Prototypen typischen Instrumentierung

In Bild 1.5 ist weiterhin schematisch die Instrumentierung dargestellt, die typischerweise für Versuche mit einem Prototypen dieses Triebwerks benutzt wird. Der Aufbau eines Prototypen in einem Bodenprüfstand wird in Bild 1.6 gezeigt.

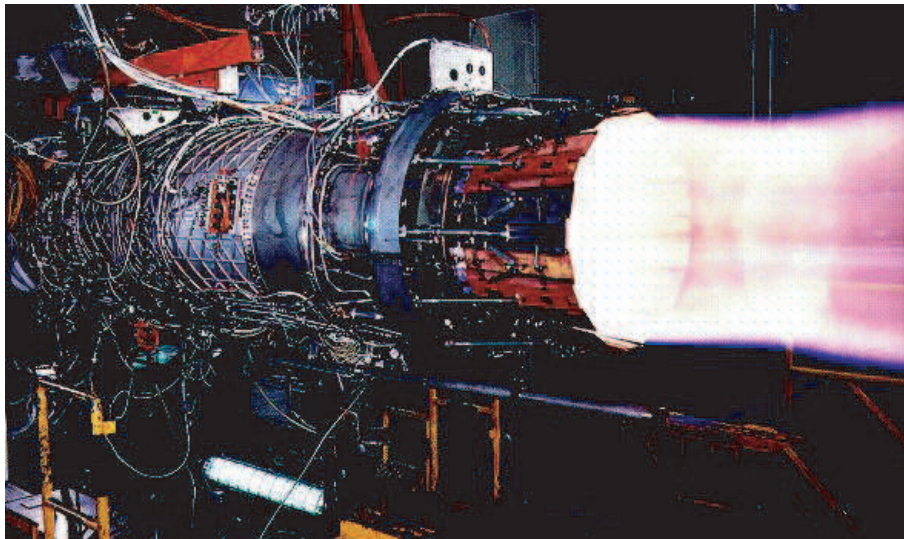


Bild 1.6: Militärisches Turboluftstrahltriebwerk in einem Bodenprüfstand

2 Leistungsanalyse von Gasturbinen

Ausgangspunkt der durchzuführenden Arbeiten ist das in der *MTU Aero Engines* eingesetzte Leistungsberechnungsprogramm MOPS [25], das für Syntheserechnungen wie auch für modellbasierte Analysen von zahlreichen unterschiedlichen Gasturbinenkonfigurationen eingesetzt wird. Im Folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften des modellbasierten Analyseverfahrens zusammengefaßt. Dabei wird auch auf die Syntheserechnung als Basis der Leistungsanalyse, auf die zur Leistungsanalyse erforderlichen Meßgrößen sowie auf deren Aufbereitung inklusive der Plausibilitätsbetrachtungen zur Erkennung von groben Meßfehlern eingegangen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Versuchs- und Meßtechnik nicht explizit behandelt. Hierzu wird auf die zahlreich vorhandene Literatur (z. B. [10], [42]) verwiesen.

2.1 Leistungssyntheserechnung als Basis der Leistungsanalyse

Im Rahmen von Leistungsberechnungen wird die Gasturbine in einzelne Komponenten aufgeteilt. Wie in Bild 2.1 schematisch dargestellt, wird das in dieser Arbeit behandelte Triebwerk in die Komponenten Niederdruckverdichter (NDV), Hochdruckverdichter (HDV), Brennkammer (BK), Hochdruckturbinen (HDT), Niederdruckturbinen (NDT), Nebenstromkanal (NK), Nachbrennkammer (NBK) und Düse (D) gegliedert. Das Betriebsverhalten des Triebwerks wird durch das Verknüpfen (Synthese) des Betriebsverhaltens der einzelnen Komponenten (z. B. [25], [37], [71]) ermittelt.

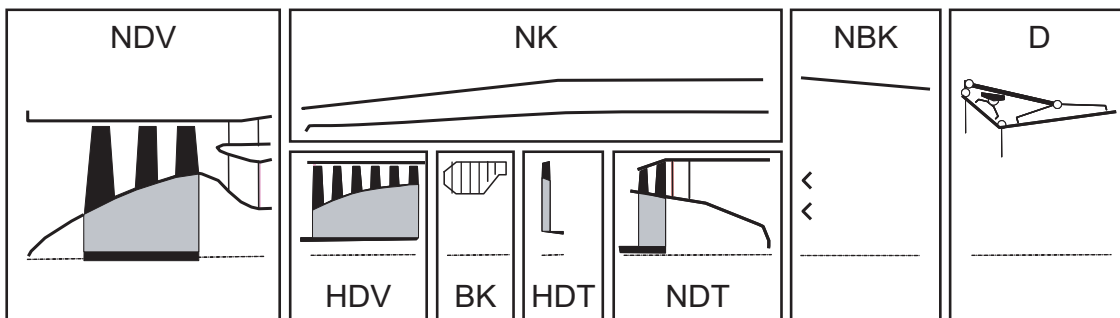


Bild 2.1: Aufteilung des Triebwerks in Komponenten

2.1.1 Modellbildung

Das Betriebsverhalten der Komponenten wird auf der Basis von analytischen Gleichungen oder mit Hilfe von Kennfeldern beschrieben. Diese setzen prinzipiell Parameter, die die Zustandsänderungen über die Komponenten hinweg charakterisieren, mit Durchsatz und Drehzahl gebildeten Parametern in Beziehung. Dabei wird der thermogasdynamische Zustand im Ein- und Austritt der Komponenten mit über den Querschnitt gemittelte Größen wie Totaldruck, Totaltemperatur, Massenstrom und Fluidzusammensetzung dargestellt. Die Zusammenhänge sind für bestimmte Ein- bzw. Austrittsbedingungen der Komponenten (Referenzbedingungen) gültig und basieren überwiegend auf Machähnlichkeitsparametern (siehe z. B. [37], [71]). Weitere untergeordnete Einflüsse, wie z. B. der Einfluß der Reynoldszahl, lassen sich in Form von Korrekturen in bezug auf die Parameter der "Basis"-Beziehungen berücksichtigen (siehe z. B. [25], [47]).

Zum besseren Verständnis wird im Folgenden die prinzipielle Modellierung der Komponenten des in dieser Arbeit behandelten Triebwerks dargestellt. Für weitergehende Erläuterungen, insbesondere über die Modellbildung des triebwerksinternen Luftsystems, wird auf die zahlreich verfügbare Literatur verwiesen (z. B. [4], [37], [60], [71]).

Kanal (Druckverluststrecke)

Zur Beschreibung des Druckverlusts wird die Differenz der Totaldrücke im Ein- und Austritt der Komponente mit dem dynamischen Druck im Eintritt $p_{t,\text{ein}} - p_{s,\text{ein}}$ und dem Druckverlustbeiwert ζ in Beziehung gesetzt:

$$p_{t,\text{ein}} - p_{t,\text{aus}} = \zeta(p_{t,\text{ein}} - p_{s,\text{ein}}). \quad (2.1)$$

Verdichter

Das Betriebsverhalten des Hochdruckverdichters läßt sich mit Hilfe eines Kennfelds beschreiben, das einen Zusammenhang zwischen den abhängigen Parametern Druckverhältnis Π und isentroper Wirkungsgrad η sowie den unabhängigen Parametern reduzierter Eintrittsmassenstrom \dot{m}_{red} und reduzierte Drehzahl n_{red} herstellt (s. Bild 2.2), wobei gilt:

$$\dot{m}_{\text{red}} = \frac{\dot{m}_{\text{ein}} \sqrt{T_{t,\text{ein}}}}{p_{t,\text{ein}}} \quad \text{und} \quad n_{\text{red}} = \frac{n}{\sqrt{T_{t,\text{ein}}}}. \quad (2.2)$$

Basierend auf den vier Kennfeldparametern lassen sich weitere Parameter ableiten, wie z. B. die reduzierte Arbeit

$$a_{\text{red}} = \frac{h(T_{t,\text{aus}}) - h(T_{t,\text{ein}})}{T_{t,\text{ein}}}. \quad (2.3)$$

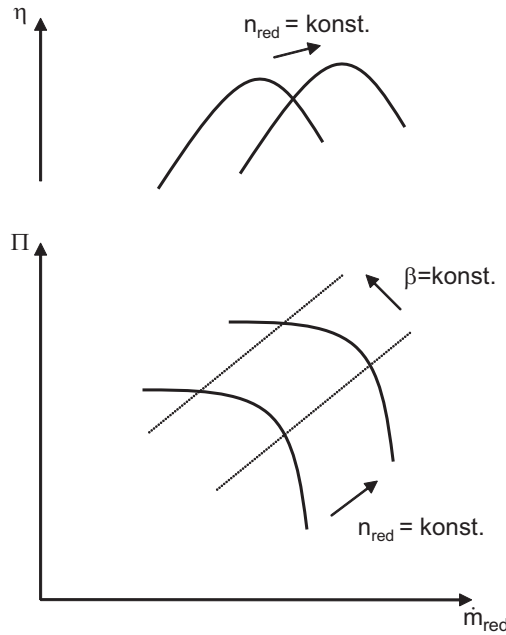


Bild 2.2: Schematische Darstellung eines Verdichterkennfelds

Die Kennfelddarstellung ist für den Einsatz in einem Leistungsberechnungsprogramm jedoch ungeeignet, da mit den Parametern n_{red} und \dot{m}_{red} nicht eindeutig ein Wert für das Druckverhältnis im senkrechten Bereich der Drehzahlline, in dem der Verdichter kritisch durchströmt wird, ermittelbar ist. Es wird daher ein weiterer, für die Kennfelddarstellung günstiger Parameter β eingeführt (s. Bild 2.2), bei dem es sich nicht um einen physikalischen sondern um einen “künstlichen” Parameter handelt [27]. Es ergibt sich somit folgende Kennfelddarstellung:

$$\dot{m}_{\text{red}}, \Pi, \eta = f(n_{\text{red}}, \beta). \quad (2.4)$$

Neben den beiden Parametern β und n_{red} können in dem hier beschriebenen Leistungsberechnungsverfahren weitere untergeordnete Einflüsse auf das Kennfeld in Form von Korrekturen erfaßt werden, wie z. B. der Einfluß eines variablen Leitschaukelwinkels α_{Le} , eines veränderlicher Isentropenexponenten κ oder einer veränderlichen Reynoldszahl Re [25].

Analog zum Hochdruckverdichter wird für den Niederdruckverdichter eine Kennfelddarstellung benutzt, bei welcher jeweils für Haupt- und Nebenstrom die Druckverhältnisse Π_{H} , Π_{N} , die isentropen Wirkungsgrade η_{H} , η_{N} und der reduzierte Eintrittsmassenstrom \dot{m}_{red} abhängig von β und der reduzierten Drehzahl n_{red} beschrieben werden [25]:

$$\dot{m}_{\text{red}}, \Pi_{\text{H}}, \Pi_{\text{N}}, \eta_{\text{H}}, \eta_{\text{N}} = f(n_{\text{red}}, \beta). \quad (2.5)$$

Die Aufteilung des Eintrittsmassenstroms in Haupt- und Nebenmassenstrom geschieht abhängig vom Nebenstromverhältnis

$$\mu = \frac{\dot{m}_N}{\dot{m}_H}. \quad (2.6)$$

Brennkammer

Die Berechnung der Temperaturerhöhung infolge der Wärmezufuhr erfolgt mittels einer Energiebilanz über die ein- und austretenden Fluidströme. Die Güte der Energieumsetzung wird mit dem Ausbrenngrad η erfaßt, der den Anteil des umgesetzten Brennstoffmassenstroms zu dem Gesamtbrennstoffmassenstrom charakterisiert.

Die aerodynamischen und thermischen Druckverluste werden mit Hilfe des Druckverlustbeiwerts ζ erfaßt.

$$p_{t,\text{ein}} - p_{t,\text{aus}} = \zeta \left(\frac{T_{t,\text{aus}}}{T_{t,\text{ein}}} - 1 \right) (p_{t,\text{ein}} - p_{s,\text{ein}}). \quad (2.7)$$

Turbine

Das Betriebsverhalten der Turbine wird mit einem Kennfeld beschrieben, das einen Zusammenhang zwischen den abhängigen Parametern reduzierter Eintrittsmassenstrom \dot{m}_{red} und isentroper Wirkungsgrad η sowie den unabhängigen Parametern reduzierte Arbeit a_{red} und reduzierte Drehzahl n_{red} herstellt.

$$\dot{m}_{\text{red}}, \eta = f(a_{\text{red}}, n_{\text{red}}) \quad (2.8)$$

Analog zum Verdichter sind weitere Einfüsse auf das Kennfeld in Form von Korrekturen erfaßbar, wie z. B. der Einfluß eines veränderlichen Isentropenexponenten κ oder einer veränderlichen Reynoldszahl Re .

Nachbrennkammer

In Bild 2.3 ist der Längsquerschnitt einer Nachbrennkammer mit entsprechenden Ebenenbezeichnungen dargestellt.

Aufgrund der Auslegung ist bei der Zumischung des Nebenstroms (161) zum Hauptstrom (61) die Annahme eines statischen Druckgleichgewichts für die Ebenen 61 und 161 nicht zulässig [4]. Vielmehr muß an dieser Stelle ein statisches Druckgleichgewicht modelliert werden. Die beiden Ströme werden dann beschleunigend bzw. verzögernd zu den Ebenen 63 und 163 unter Erfüllung des statischen Druckgleichgewichts sowie unter Vorgabe der effektiven Gesamtquerschnittsfläche weitergeführt. Die Mischung der beiden Ströme erfolgt zwischen den Ebenen 63, 163 und

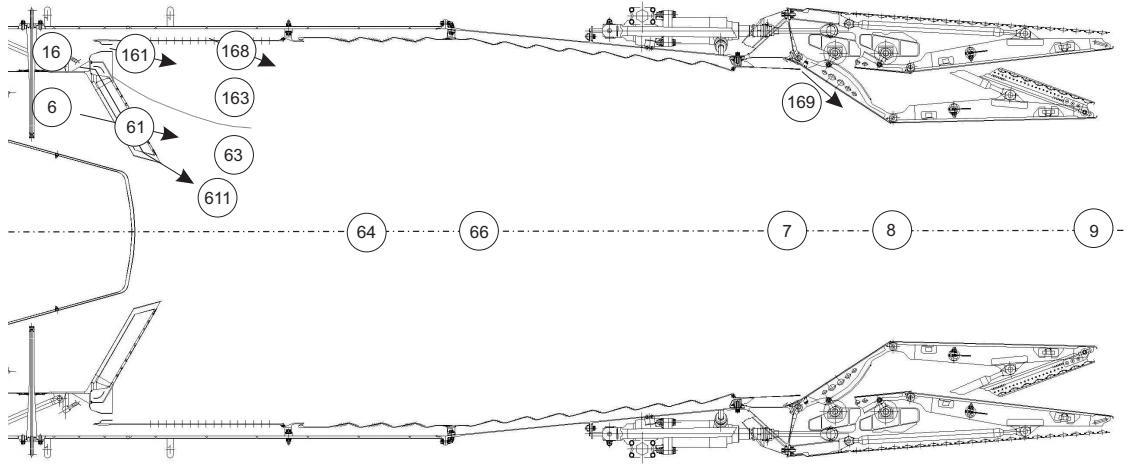


Bild 2.3: Längsquerschnitt des Nachbrenners und der Schubdüse mit Ebenenbezeichnungen

64 unter Berücksichtigung der Erhaltungsgleichungen für Masse, Energie und Impuls bei konstanter Strömungsquerschnittsfläche. Dabei sind die Gleichungen nur mit Hilfe einer iterativen Berechnungsweise lösbar [4], wobei das Druckverhältnis $p_{s,64}/p_{t,6}$ als Iterationsvariable benutzt wird.

Die Berechnung der Temperaturerhöhung infolge der Wärmezufuhr (64-66) geschieht analog zur Brennkammer. Die Druckverluste werden mittels der Erhaltungsgleichungen für Masse, Energie und Impuls bei konstanter Strömungsquerschnittsfläche berücksichtigt. Diese sind wieder nur mit einer iterativen Berechnungsweise lösbar [4], wobei das Druckverhältnis $p_{s,66}/p_{t,6}$ als Iterationsvariable benutzt wird.

Auf die Modellierung der weiteren Fluidströme wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Für detailliertere Erläuterungen wird auf [4] und [29] verwiesen.

Schubdüse

Während bei rein konvergenten Düsen das Fluid maximal bis auf $Ma_9 = 1,0$ beschleunigt werden kann, kann bei konvergent-divergenten Düsen der engste Querschnitt kritisch durchströmt sowie Austrittsmachzahlen $Ma_9 > 1,0$ erreicht werden. Unter Vorgabe des Düsendruckverhältnisses $\Pi = p_{t,7}/p_{s,09}$ ist daher zunächst die Düse auf eine kritische Durchströmung des engsten Querschnitts hin zu überprüfen. Ist dies der Fall, so ist der durchsatzbestimmende Querschnitt der engste Querschnitt der Düse und es gilt $Ma_8 = 1,0$. Ansonsten ist dieser der Querschnitt der Austrittsebene und es gilt $p_{s,9} = p_{s,09}$. Zur Berechnung der thermogasdynamischen Zustände in den Ebenen werden die effektiven Querschnittsflächen

$$A_{\text{eff},8} = A_8 \cdot C_{D,8} \quad \text{und} \quad A_{\text{eff},9} = A_9 \cdot C_{D,9} \quad (2.9)$$

benutzt, wobei die Durchsatzkoeffizienten C_D Grenzschichteinflüsse und die Einschnürung der Strömung berücksichtigen.

Der Schub wird mittels

$$F = \dot{m}_9 \cdot v_9 \cdot \varphi + (p_{s,9} - p_{s,09}) \cdot A_9 \quad (2.10)$$

berechnet, wobei der Düsenverlustbeiwert φ die nicht vollständige Mischung des Haupt- und Nebenstroms sowie die Verluste infolge der Düsenkühlung erfasst.

2.1.2 Berechnung des Betriebsverhaltens

Bei modularen Leistungsberechnungsverfahren wird das Betriebsverhalten der Komponenten getrennt in jeweils eigenen Berechnungsmodulen erfasst. Weitere Module werden benutzt u. a. zur Berücksichtigung von Regelgesetzen der Gasturbine und zur Berechnung von Größen, die die Gasturbine als Ganzes beschreiben wie der spezifische Brennstoffverbrauch. Entsprechend der Gasturbinenkonfiguration werden die Berechnungsmodule vom Anwender in der Eingabe des Verfahrens verknüpft (s. Bild 2.4). Dabei sind neben dem Hauptstrom Kopplungen, wie z. B. die mechanische Kopplung von Komponenten auf einer Welle, zu berücksichtigen.

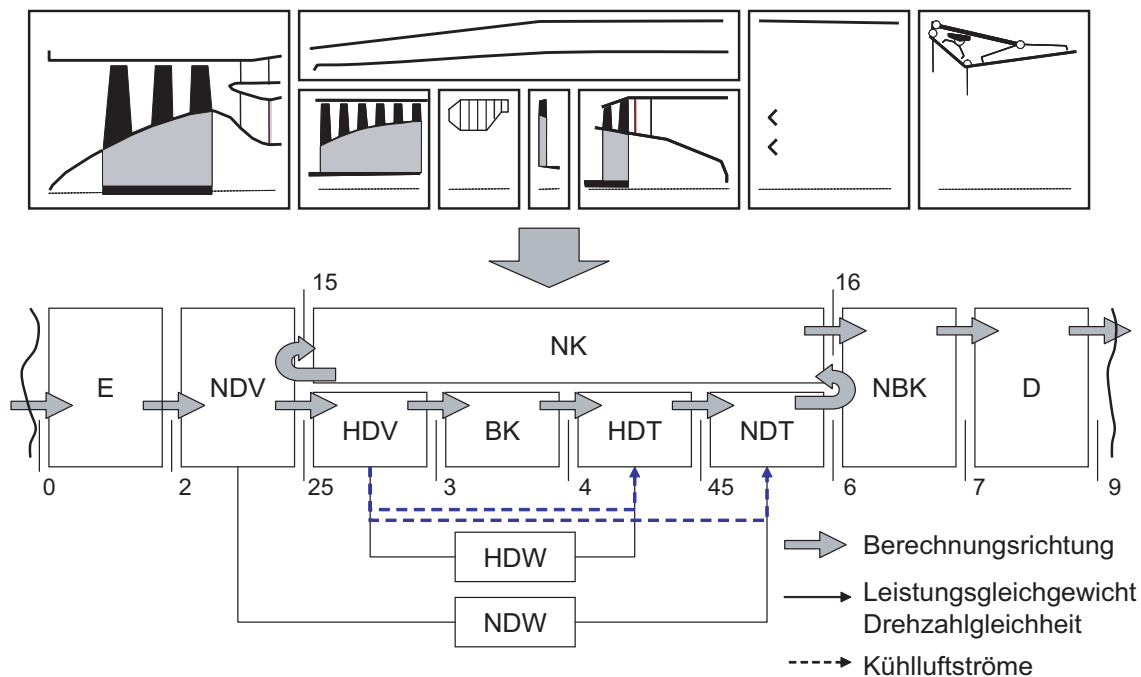


Bild 2.4: Verknüpfung von Berechnungsmodulen

In einem Berechnungsmodul sind unterschiedliche Rechenwege wählbar, mit denen unterschiedliche Modellbildungen berücksichtigt werden können. Die Auswahl geschieht durch Setzen von Schaltern in der Eingabe des Verfahrens.

Dem Verfahren müssen Randbedingungen, die den Umgebungs- und Lastzustand der Gasturbine festlegen, vorgegeben werden. Wie in Bild 2.5 dargestellt, kann der Umgebungszustand mit dem Totaldruck $p_{t,0}$, der Totaltemperatur $T_{t,0}$ und der Fluidzusammensetzung im Eintritt der Gasturbine, sowie mit dem statischen Gegendruck an der Düse $p_{s,09}$ definiert werden. Für das in dieser Arbeit behandelte Triebwerk erfolgt die Vorgabe des Lastzustands mit Hilfe der Brennstoffzufuhr in die Brennkammer und in die Nachbrennkammer ($\dot{m}_{Br,BK}$, $\dot{m}_{Br,NBK}$, H_u , T_{Br}), der vom Hochdruckverdichter entnommenen Bleedluft \dot{m}_{Bl} sowie der von der Hochdruckwelle abgenommenen Wellenleistung P_{ex} . Weiterhin sind verstellbare Geometrien innerhalb des Triebwerks zu berücksichtigen, wie die verstellbare Eintrittsleitschaufeln des Hochdruckverdichters α_{Le} und die Stellung der Querschnittsflächen A_8 und A_9 der Düse.

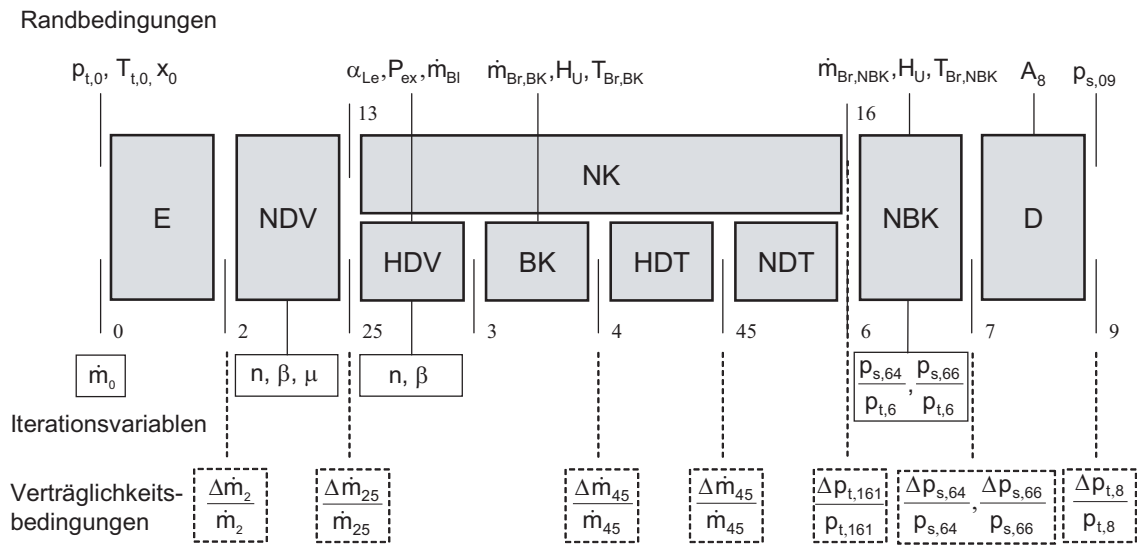


Bild 2.5: Randbedingungen, Schätzwerte und Verträglichkeitsbedingungen einer Syntheserechnung

Die Berechnung erfolgt entlang eines Stromfadens durch die Gasturbine unter Berücksichtigung der Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie. In den Ebenen zwischen den Komponenten werden über den Querschnitt gemittelte Größen bestimmt, die den thermogasdynamischen Zustand beschreiben, wie Totaldruck, Totaltemperatur, Massenstrom und Fluidzusammensetzung. Unter Vorgabe des Dralls der Strömung und der effektiv durchströmten Querschnittsfläche lassen sich weiterhin statische Größen berechnen. Neben den Erhaltungsgleichungen sind die Randbedingungen sowie weitere Zwangsbedingungen, wie z. B. die Drehzahlgleichheit von Komponenten auf einer Welle, zu berücksichtigen (s. Bild 2.4). Existieren Strömungsverzweigungen in der Gasturbine, z. B. bei Zweistromtriebwerken, so wird aufeinanderfolgend jeweils entlang eines Stromfadens bis zu der Stelle gerechnet, an welcher der Strom entweder aus der Gasturbine austritt oder mit einem anderen Strom zusammengeführt wird.

Das Verhalten des Arbeitsfluids entspricht dem eines halbidealen Gases, bei welchem die spezifische Enthalpie, die spezifische Entropie und die Gaskonstante abhängig von der Temperatur und der Fluidzusammensetzung erfaßt werden (siehe z. B. [37]).

Aufgrund der Durchrechnung entlang eines Stromfadens und den wechselseitigen Abhängigkeiten der Komponenten müssen Größen, wie z. B. die unabhängigen Parameter des Verdichters, zunächst geschätzt werden (s. Bild 2.5). Die Schätzung führt im weiteren Verlauf der Berechnung zur Verletzung von Verträglichkeitsbedingungen, wie z. B. der Massenerhaltung in der Turbine. Mit Hilfe eines numerischen Iterationsverfahrens (Newton-Raphson-Verfahren; s. auch [37], [54]) werden die Schätzwerte so lange verbessert, bis die Fehler in den Verträglichkeitsbedingungen unter eine vorgegebene Toleranzgrenze gebracht wurden. Die Vorgabe der Schätzwerte sowie des Syntheschemas, bestehend aus den Randbedingungen und der Zuordnung der Iterationsvariablen zu Verträglichkeitsbedingungen, geschieht durch den Anwender. Neben den vom Anwender vorgegebenen Iterationsvariablen werden weitere Größen innerhalb eines Berechnungsmoduls iterativ bestimmt. So läßt sich beispielsweise die Temperatur für eine vorgegebene spezifische Enthalpie mit der Beziehung $h = f(T)$ nur iterativ ermitteln. In dem hier vorgestellten Leistungsberechnungsverfahren werden solche Größen mit Hilfe des Regula-falsi-Verfahrens (siehe z. B. [54]) berechnet.

Um das Konvergenzverhalten des Verfahrens positiv zu beeinflussen und um den Anwender von der Wahl geeigneter Schätzwerte zu entlasten, kann ein Schätzwertemodul eingesetzt werden, das abhängig von den vorgegebenen Randbedingungen der Gasturbine geeignete Schätzwerte für die Iterationsvariablen vorgibt.

2.2 Instrumentierung und Meßwertaufbereitung

2.2.1 Meßgrößen zur Leistungsanalyse

Aus Tabelle 2.1 sind typische Meßgrößen zur Analyse des Betriebsverhaltens von Gasturbinen und deren Komponenten entnehmbar. Die Meßgrößen werden entweder unmittelbar gemessen (direktes Meßverfahren) oder aus unmittelbar meßbaren Größen, unter Verwendung physikalischer Zusammenhänge, bestimmt (indirektes Meßverfahren). Welche Größen gemessen werden, hängt maßgeblich von der Montierbarkeit der Instrumentierung, der mechanischen und thermischen Beanspruchung der Instrumentierung sowie dem Einfluß der Instrumentierung auf die Strömung ab. Weiterhin sind die damit verbundenen Kosten zu berücksichtigen.

Meßgrößen sind in Ebenengrößen und Nicht-Ebenengrößen unterscheidbar. Dabei beschreiben Ebenengrößen den thermogasdynamischen Zustand in den Ebenen zwischen den Komponenten. Zur Erfassung dieser Größen müssen, aufgrund der über

Meßgröße	Meßverfahren	Meßunsicherheit *) [3], [71]
Totaldruck	direkt	$\pm 0,5\%$
statischer Druck	direkt	$\pm 0,5\%$
Totaltemperatur	direkt	$\pm 1,5 \text{ K}$
Drehzahl	direkt	$\pm 0,1\%$
Luftmassenstrom	indirekt	$\pm 0,5\%$
Brennstoffmassenstrom	indirekt	$\pm 0,5\%$
Wellenleistung	indirekt	$\pm 1\%$
Schub	direkt	$\pm 1\%$
Wasser-Luftverhältnis	indirekt	$\pm 0,2\%$
variable Geometrien	direkt / indirekt	$\pm 0,1-0,5\%$
Heizwert des Brennstoffs		$\pm 0,1\%$

*) Prozentangaben beziehen sich auf die Obergrenze des zulässigen Meßbereichs

Tabelle 2.1: Typische Meßgrößen zur Analyse des Betriebsverhaltens einer Gasturbine sowie deren Unsicherheiten

den Querschnitt nicht homogenen Strömung, Meßrechen an unterschiedlichen Umfangspositionen angeordnet werden, an denen Meßwertaufnehmer an unterschiedlichen radialen Positionen installiert sind. In Bild 2.6 a) sind schematisch 4 Meßrechen mit jeweils 5 Meßwertaufnehmern dargestellt, mit denen sich beispielsweise die in 2.6 b) gezeigten Meßwerte für die Totaldruckprofile an den unterschiedlichen Umfangspositionen erfassen lassen. Zur Erfassung von Nicht-Ebenengrößen, wie z. B. des Brennstoffmassenstroms, ist dagegen im Prinzip die Benutzung eines Meßwertaufnehmers ausreichend, allerdings werden häufig aufgrund von Genauigkeitsanforderungen mehrere redundante Meßwertaufnehmer eingesetzt.

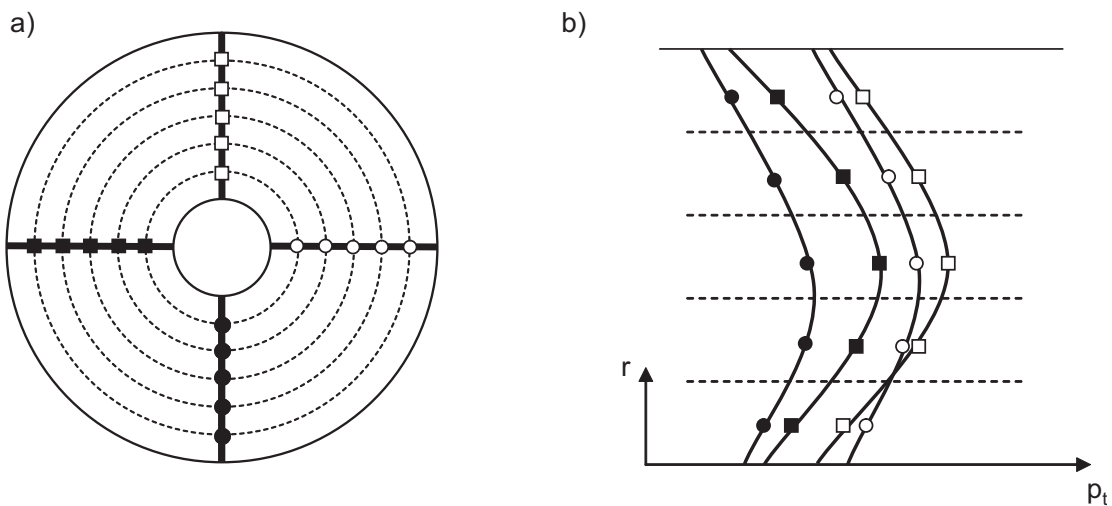


Bild 2.6: Beispiel zur Anordnung von Meßrechen und Meßwertaufnehmern in einer Ebene (a) sowie die damit erfassbaren Meßwerte (b)

2.2.2 Meßunsicherheit

Aufgrund von stets vorhandenen Störeinflüssen aus der Umgebung und der Unvollkommenheit der Meßeinrichtung ist jede Messung fehlerbehaftet. Der Meßfehler ist definiert als die Differenz zwischen dem gemessenen Wert y und dem richtigen Wert y_r der Meßgröße (s. Bild 2.7):

$$E = y - y_r. \quad (2.11)$$

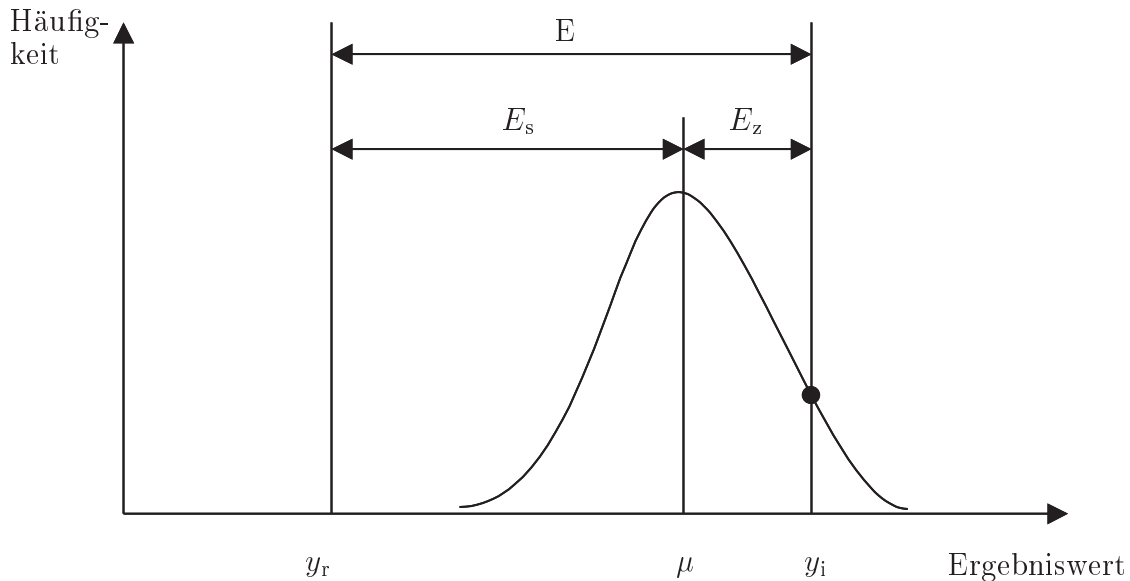


Bild 2.7: Aufteilung des Meßfehlers in einem systematischen und zufälligen Anteil

Wird eine Messung unter gleichbleibenden Versuchsbedingungen N -Mal wiederholt, so streuen die Meßwerte y_i erfahrungsgemäß um den Erwartungswert μ . Ist die Streuung rein zufälliger Natur, so können die einzelnen Meßwerte y_i als normalverteilt angenommen werden und für $N \rightarrow \infty$ geht der arithmetische Mittelwert

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (2.12)$$

in den Erwartungswert μ über (siehe z. B. [19], [41]).

Nach [19] läßt sich der Meßfehler in folgende Fehleranteile aufteilen:

- **systematischer Fehleranteil** ($E_s = \mu - y_r$)

Der systematische Fehleranteil bewirkt eine Abweichung des gemessenen vom richtigen Wert, die in Vorzeichen und Betrag unverändert bleibt, so oft die

Messung auch wiederholt wird. Bekannte systematische Fehleranteile, die z. B. mit Hilfe einer Kalibrierung bestimmt wurden, können als Korrektur im Meßergebnis berücksichtigt werden.

- **zufälliger Fehleranteil** ($E_z = y_i - \mu$)

Die Abweichungen der Einzelwerte vom Erwartungswert werden als zufällige Anteile des Meßfehlers bezeichnet. Sie schwanken stochastisch nach Vorzeichen und Betrag und werden deshalb mit Methoden der Statistik behandelt.

- **grober Fehleranteil**

Dieser Fehleranteil ist auf gravierende Mängel der Meßeinrichtung oder auf falsche Handhabung zurückzuführen und tritt nur gelegentlich auf. Der Betrag des Meßfehlers ist deutlich “größer”, als es unter den gegebenen Umständen zu erwarten wäre. Durch nicht erkannte grobe Meßfehler können folglich die Ergebnisse der Analyse maßgeblich verfälscht werden.

Die Meßunsicherheit u_y ist definiert als der Bereich, in welchem der richtige Wert der Meßgröße, unter nicht Vorhandensein eines groben Fehleranteils, mit einem vorgegebenen Vertrauensniveau liegt. Dieser Bereich berücksichtigt sowohl den zufälligen Fehleranteil als auch den nicht korrigierbaren systematischen Restfehler. Die Meßunsicherheit einer Meßgröße wird in der Regel für ein Vertrauensniveau von 95% (2σ -Grenze) angegeben. Aus Tabelle 2.1 sind typische Meßunsicherheiten von unterschiedlichen Meßgrößen entnehmbar.

2.2.3 Meßwertaufbereitung

Vor der Durchführung von Analysen müssen zunächst die Meßwerte in einer für die Analyse geeigneten Form aufbereitet werden. Hierbei sind indirekt gemessene Größen zu berechnen, Mittelwerte zu bilden, Meßwerte auf grobe Meßfehler hin zu überprüfen und Meßwertkorrekturen durchzuführen.

Mittelwertbildung

Werden zur Erfassung einer Meßgröße mehrere Meßwertaufnehmer eingesetzt, so ist für diese ein geeigneter Mittelwert aus den Meßwerten zu bilden. Während für Nicht-Ebenengrößen in der Regel ein arithmetischer Mittelwert zu berechnen ist, muß für Ebenengrößen eine geeignete Mittelwertbildungsmethode zur Berücksichtigung der inhomogenen Verteilung der Größe angewendet werden. Unterschiedliche Ansätze hierzu sind in [1], [3] und [14] beschrieben.

Meßwertüberprüfung

Die Überprüfung der Meßwerte auf grobe Meßfehler hin erfolgt mittels Plausibilitätsbetrachtungen [19]. Dabei werden u. a. A-priori-Informationen benutzt, um für die Meßwerte sinnvolle Bereiche festzulegen. Grobe Meßfehler werden erkannt, wenn

Meßwerte außerhalb des Bereichs, definiert durch eine untere Grenze $y_{i,\min}$ und eine obere Grenze $y_{i,\max}$, liegen. In Bild 2.8 a) ist schematisch eine Bereichsüberprüfung von Meßwerten zur Erfassung des Totaldrucks einer Strömung dargestellt. Mit Hilfe der Überprüfung ist einer von drei vorhandenen groben Meßfehlern erkennbar.

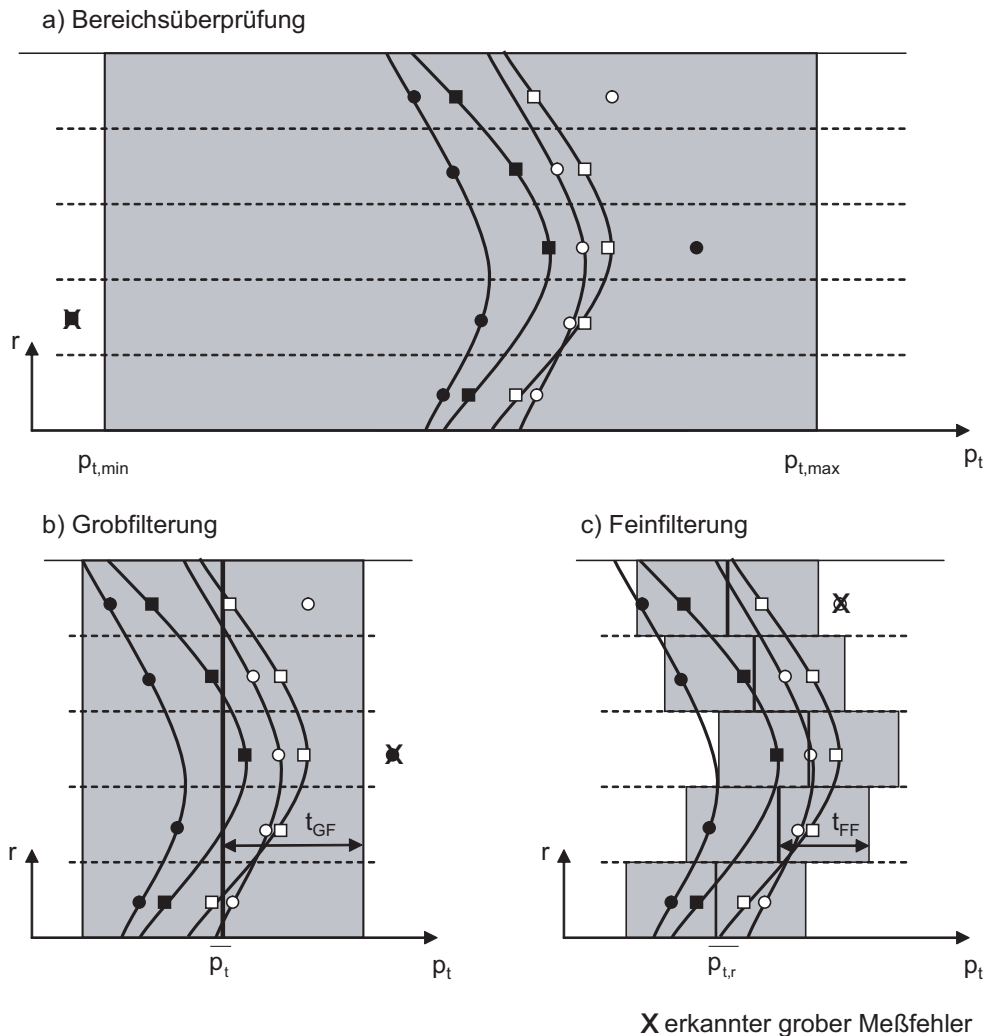


Bild 2.8: Bereichsüberprüfung, Grob- und Feinfilterung zur Erkennung von groben Meßfehlern

Bei Mehrfachmessungen wird weiterhin überprüft, ob ein Meßwert ungewöhnlich stark vom Mittelwert abweicht. Für Ebenengrößen wird die Überprüfung in zwei Schritten durchgeführt. Mit Hilfe einer Grobfilterung wird zunächst überprüft, ob ein Meßwert außerhalb einer vorgegebenen Toleranz

$$t_{GF} = \frac{|y_i - \bar{y}|_{\max}}{\bar{y}} \quad (2.13)$$

vom Mittelwert aller Meßwerte liegt (s. Bild 2.8 b)). Dann wird mit einer Feinfiltration überprüft, ob ein Meßwert außerhalb einer vorgegebenen Toleranz

$$t_{\text{FF}} = \frac{|y_i - \bar{y}_r|_{\text{max}}}{\bar{y}_r} \quad (2.14)$$

vom Mittelwert der Meßwerte der gleichen radialen Position liegt (s. Bild 2.8 c)). Die Toleranzen der beiden Filterungen müssen sowohl die Unsicherheit der Meßwerte als auch den Grad der Inhomogenität der Strömung berücksichtigen. Mit Hilfe der beiden Filterungen sind die nach der Bereichsüberprüfung verbleibenden groben Meßfehler des in Bild 2.8 dargestellten Beispiels erkennbar.

Zur Berechnung von “repräsentativen” Mittelwerten von Ebenengrößen ist es notwendig, für als fehlerhaft erkannte Meßwerte entsprechende Ersatzwerte zu bestimmen. Regeln zur Substitution von als fehlerhaft erkannten Meßwerten sind beispielsweise in [3] beschrieben.

Meßwertkorrekturen

Gemäß Kapitel 2.2.2 sind systematische Fehleranteile durch Korrekturen ausschaltbar. Dabei sind einige davon von anderen aufbereiteten Meßgrößen oder von Ergebnisgrößen der Analyse abhängig, weshalb diese erst während der Meßwertaufbereitung oder während der Analyse durchführbar sind. Dazu zählen typischerweise folgende Korrekturen:

- Korrektur des Schubs,

mit der die auf die Gasturbine einwirkenden Kräfte im Prüfstand, wie z. B. Reibungskräfte infolge von Sekundärströmungen ([52], [71]), berücksichtigt werden. Diese Korrektur ist in der Regel abhängig vom berechneten Gesamtmassestrom der Gasturbine und ist somit erst während der Meßwertaufbereitung durchführbar.
- (Recovery-)Korrektur der Totaltemperaturen,

mit der u. a. die Wärmeübertragung vom Meßwertaufnehmer auf das umströmende Fluid berücksichtigt wird ([3], [71]). Zur Ermittlung der korrigierten Totaltemperatur T_t mittels der gemessenen Temperatur T_{gem} wird der sogenannte Recovery-Faktor

$$R = \frac{T_{\text{gem}} - T_s}{T_t - T_s} \quad (2.15)$$

benutzt. Folglich ist die Korrektur abhängig von der statischen Temperatur T_s bzw. von der Machzahl Ma in der Meßebe, die Ergebnisse der Analyse sind. Da diese wiederum von der korrigierten Totaltemperatur abhängen, ist die Korrektur nur iterativ und während der Analyse durchführbar.

2.3 Konventionelle Analyse

2.3.1 Analyseschema und Analyserechnung

In Bild 2.9 ist ein Analyseschema des in dieser Arbeit behandelten Turboluftstrahltriebwerks dargestellt. Analog zur Syntheserechnung müssen Randbedingungen der Gasturbine vorgegeben werden. Um den tatsächlichen Betriebspunkt der Gasturbine auf dem Prüfstand zu erfassen, werden hierfür Meßgrößen benutzt. Die Berechnung von nicht gemessenen Größen erfolgt unter Verwendung der in Kapitel 2.1 erläuterten Gesetzmäßigkeiten. Abhängig vom Instrumentierungsumfang der Gasturbine sind dabei Annahmen über das Betriebsverhalten einzelner Komponenten zu berücksichtigen. Bei Versuchen mit Prototypen gilt dies überwiegend für die Brennkammer, für die Nachbrennkammer (Ausbrenngrad, Druckverluste) und für das gasturbineninterne Luftsystem.

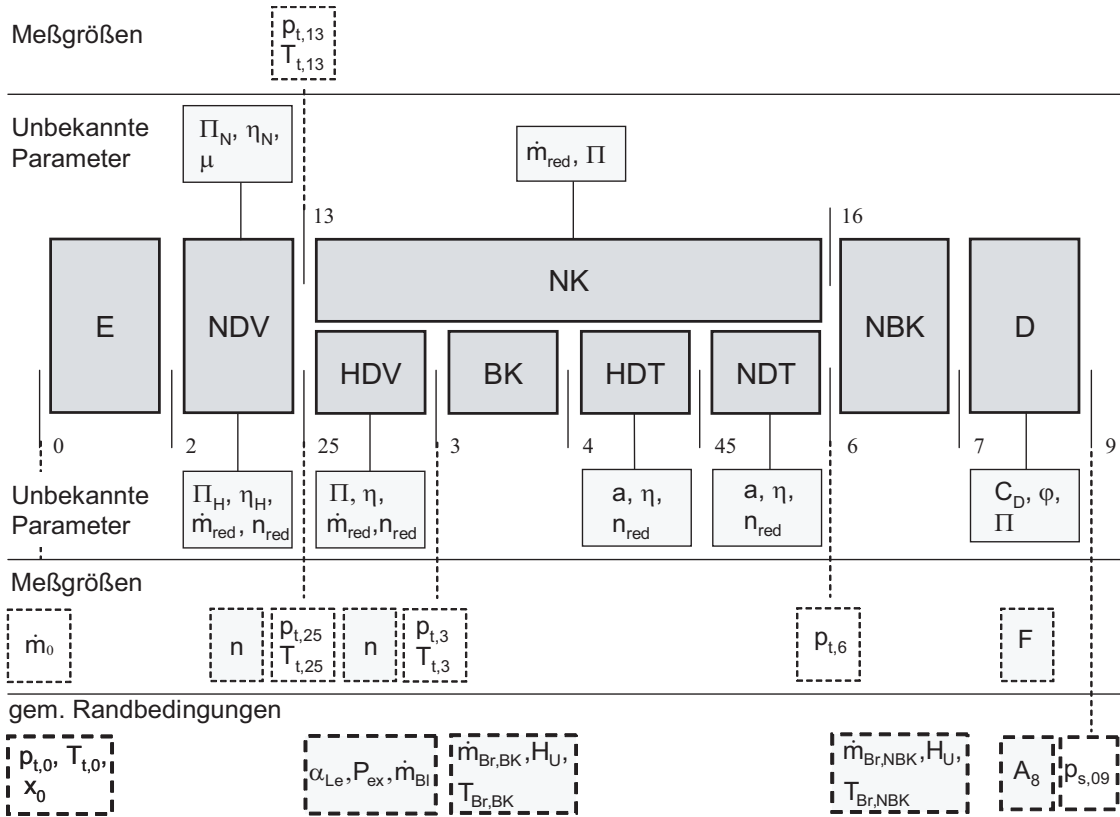


Bild 2.9: Konventionelles Analyseschema mit Annahmen über das Durchsatzverhalten der Turbinen

Im Folgenden wird das in Bild 2.9 dargestellte Analyseschema näher erläutert. Hierbei wird die Ermittlung der Massenströme in den Ebenen und die Ermittlung der Komponentenparameter einschließlich der Totaldrücke und der Totaltemperaturen in den Ebenen getrennt voneinander behandelt.

Berechnung der Massenströme

Die Massenströme in den Ebenen werden anhand des gemessenen Gesamtmassenstroms \dot{m}_0 unter Berücksichtigung der Massenerhaltung und Annahmen über das gasturbineninterne Luftsystem berechnet. Dies gilt in gleicher Weise für die Fluidzusammensetzung in den Ebenen. Bei Zweistromtriebwerken ist weiterhin die Aufteilung der Massenströme in Haupt- und Nebenstrom, beschrieben durch das Nebenstromverhältnis μ , zu ermitteln. Hierzu sind zwei in ihrem Charakter unterschiedliche Methoden anwendbar ([18], [71]):

- Annahme über das Durchsatzverhalten einer Komponente im Haupt- oder Nebenstrom (z. B. HDT, NDT, HDV, NK).
- Energiebilanz, z. B. über den eintretenden Hauptstrom Ebene 25, den eintretenden Brennstoffstrom, den austretenden Hauptstrom Ebene 45 sowie den ein- und austretenden Luftsystemströmen, wobei $T_{t,45}$ gemessen wird.

Überwiegend wird eine Annahme über das Durchsatzverhalten der Hochdruckturbinen benutzt (Hochdruckturbinenkapazitätsmethode) (s. Bild 2.9).

Berechnung der Komponentenparameter

Verdichter

Die Verdichterparameter lassen sich fast ausschließlich mit Hilfe von Meßgrößen bestimmen (s. Tabelle 2.2). Ausnahme bilden dabei die berechneten Massenströme des Haupt- und Nebenstroms.

	vorgegebene Größen	Berechnung
Niederdruckverdichter	$p_{t,2,gem}$ $T_{t,2,gem}$ $\dot{m}_{2,gem}, \dot{m}_{25}, \dot{m}_{13}$ $p_{t,25,gem}$ $T_{t,25,gem}$ $p_{t,13,gem}$ $T_{t,13,gem}$ $n_{ND,gem}$	$\Pi_H = p_{t,25,gem}/p_{t,2,gem}$ $\eta_H = f(\Pi_H, T_{t,2,gem}, T_{t,25,gem})$ $\Pi_N = p_{t,13,gem}/p_{t,2,gem}$ $\eta_N = f(\Pi_N, T_{t,2,gem}, T_{t,13,gem})$ $\dot{m}_{red} = \dot{m}_{2,gem} \sqrt{T_{t,2,gem}/p_{t,2,gem}}$ $n_{red} = n_{ND,gem} / \sqrt{T_{t,2,gem}}$ $\mu = \dot{m}_{13}/\dot{m}_{25}$
Hochdruckverdichter	$p_{t,25,gem}$ $T_{t,25,gem}$ \dot{m}_{25} $p_{t,3,gem}$ $T_{t,3,gem}$ $n_{HD,gem}$	$\Pi_H = p_{t,3,gem}/p_{t,25,gem}$ $\eta_H = f(\Pi, T_{t,25,gem}, T_{t,3,gem})$ $\dot{m}_{red} = \dot{m}_{25} \sqrt{T_{t,25,gem}/p_{t,25,gem}}$ $n_{red} = n_{HD,gem} / \sqrt{T_{t,25,gem}}$

Tabelle 2.2: Berechnung der Verdichterparameter

Turbinen

Im Vergleich zum Verdichter gestaltet sich die Leistungsanalyse der Turbinen als schwieriger. Aufgrund der hohen Temperaturen und der ausgeprägten Profile des Gasstroms ist die Messung der Ebenengrößen, insbesondere in der Ein- und Austrittsebene der Hochdruckturbinen, sehr aufwendig bzw. sehr ungenau. Die Ein- und Austrittsgrößen müssen deshalb unter Berücksichtigung des Leistungsgleichgewichts sowie unter Annahmen über das Betriebsverhalten der Brennkammer und das Durchsatzverhalten der Niederdruckturbinen berechnet werden (s. Tabelle 2.3).

vorgegebene Größen	Berechnung
$T_{t,2,\text{gem}}$	$T_{t,4} = f(T_{t,3,\text{gem}}, \dot{m}_{\text{Br,BK,gem}}, T_{\text{Br,BK,gem}}, H_U)$
$T_{t,13,\text{gem}}$	$T_{t,45} = f(T_{t,25,\text{gem}}, T_{t,3,\text{gem}}, T_{t,4})$
$T_{t,25,\text{gem}}$	$p_{t,4} = f(p_{t,3,\text{gem}})$
$p_{t,3,\text{gem}}$	$p_{t,45} = \dot{m}_{45} \sqrt{T_{t,45}} / \dot{m}_{\text{red},45}$
$T_{t,3,\text{gem}}$	$\Pi_{\text{HDT}} = p_{t,4} / p_{t,45}$
$\dot{m}_{\text{Br,BK,gem}}$	$\eta_{\text{HDT}} = f(\Pi_{\text{HDT}}, T_{t,4}, T_{t,45})$
$T_{\text{Br,BK,gem}}, H_U$	$a_{\text{red,HDT}} = f(T_{t,4}, T_{t,45})$
$\dot{m}_{\text{red},4}$	$n_{\text{red,HDT}} = n_{\text{HD,gem}} / \sqrt{T_{t,4}}$
$\dot{m}_{\text{red},45}$	$\Pi_{\text{NDT}} = p_{t,45} / p_{t,6,\text{gem}}$
\dot{m}_{45}	$T_{t,6} = f(T_{t,2,\text{gem}}, T_{t,25,\text{gem}}, T_{t,13,\text{gem}}, T_{t,45})$
$p_{t,6,\text{gem}}$	$\eta_{\text{NDT}} = f(\Pi_{\text{NDT}}, T_{t,45}, T_{t,6})$
$n_{\text{ND,gem}}$	$a_{\text{red,NDT}} = f(T_{t,45}, T_{t,6})$
$n_{\text{HD,gem}}$	$n_{\text{red,NDT}} = n_{\text{ND,gem}} / \sqrt{T_{t,45}}$

Tabelle 2.3: Berechnung der Turbinenparameter

Nebenstromkanal

Zur Bestimmung des Druckverlusts des Nebenstromkanals wird der Totaldruck in dessen Austrittsebene anhand des Totaldrucks im Austritt der Niederdruckturbinen, unter Berücksichtigung des statischen Druckgleichgewichts $p_{s,61} / p_{s,161}$, bestimmt.

Schubdüse

Zur Analyse des Betriebsverhaltens der Düse werden die Eintrittsbedingungen der Düse, basierend auf den bekannten Austrittsgrößen von Niederdruckturbinen und Nebenstromkanal und unter Berücksichtigung der Annahmen über das Betriebsverhalten der Nachbrennkammer berechnet. Mit Hilfe von Annahmen über die Druckverlustcharakteristika der Düse lassen sich weiterhin die Totaldrücke in den Ebenen 8 und 9 ermitteln. Das Düsendruckverhältnis ist mit Hilfe des gemessenen statischen Gegendrucks an der Düse bestimmbar. Die Düse ist dann auf eine kritische Durchströmung des engsten Querschnitts hin zu überprüfen. Ist dies der Fall, so ist der durchsatzbestimmende Querschnitt der engste Querschnitt der Düse und

es gilt $Ma_8 = 1$. Andernfalls ist der durchsatzbestimmende Querschnitt der Querschnitt der Austrittsebene und es gilt $p_{s,9} = p_{s,09}$. Für den durchsatzbestimmenden Querschnitt lässt sich die effektive Fläche $A_{\text{eff},8}$ bzw. $A_{\text{eff},9}$ sowie mit den bekannten geometrischen Flächen A_8 und A_9 den Durchsatzkoeffizienten $C_{D,8}$ bzw. $C_{D,9}$ berechnen.

Mittels des bekannten thermogasdynamischen Gaszustandes in der Ebene 9 sowie des gemessenen Schubs wird weiterhin der Düsenverlustbeiwert φ berechnet.

2.3.2 Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen

Damit die Größen einer Analyse mit denen einer Erwartung vergleichbar sind, müssen diese für den gleichen Umgebungs- und Lastzustand der Gasturbine gelten. Die Größen einer Erwartung beziehen sich hierbei auf die am Prüfstand einzustellenden Soll-Bedingungen, wie z. B. Umgebungsbedingungen nach ISA. In einem Prüfstand ist eine präzise Einstellung dieser Bedingungen allerdings nur bedingt möglich. In einem Bodenprüfstand hängen diese sogar ausschließlich von der Höhe des Prüfstands und der Wetterlage ab. Die Ergebnisse der Analyse müssen somit auf Soll-Umgebungsbedingungen korrigiert werden.

Die überwiegend eingesetzte Korrekturmethode basiert prinzipiell auf einer Anpassung der Meßgrößen unter Beibehaltung der Werte der Machähnlichkeitsparameter der Gasturbine (s. auch [28], [70] und [71]). So wird beispielsweise der gemessene Totaldruck korrigiert zu

$$p_{t,\text{korr.}} = \frac{p_t}{\delta^1 \Theta^0} \quad (2.16)$$

mit $\Theta = \frac{T_{t,0,\text{gem}}}{T_{t,0,\text{soll}}}$ und $\delta = \frac{p_{t,0,\text{gem}}}{p_{t,0,\text{soll}}}$.

Die der Korrektur zugrunde liegende Annahme, daß die Werte der Machähnlichkeitsparameter bei sich verändernden Eintrittsbedingungen konstant bleiben, ist jedoch nur näherungsweise erfüllt. Für eine präzise Korrektur ist der Einfluß weiterer Parameter auf die korrigierten Größen zu berücksichtigen, deren Werte sich bei sich ändernden Umgebungsbedingungen ebenfalls ändern, wie z. B. der Einfluß der Reynoldszahl. Die Berücksichtigung dieser Parameter geschieht mittels einer Anpassung der Exponenten der Größen Θ und δ , abhängig von den Eintrittsbedingungen der Gasturbine. Eine präzise Berücksichtigung aller Parameter ist allerdings extrem aufwendig [28].

2.3.3 Vergleich zu der Erwartung

Das analysierte Betriebsverhalten der Gasturbine wird mit einem Vergleich zu einer Erwartung bewertet. Dabei kann die Erwartung auf analysierte Größen einer bereits getesteten, ähnlichen Gasturbine basieren, wie auch auf Größen, die mit Hilfe einer Syntheserechnung berechnet wurden.

Bei dem reinen Vergleich von analysierten mit erwarteten Größen wird der Einfluß der Abweichungen anderer Komponenten auf die erwarteten Leistungsparameter der Komponenten nicht berücksichtigt. Folglich läßt sich nur das Betriebsverhalten der Gasturbine im Ganzen bewerten. Die Ermittlung von Abweichungen im Betriebsverhalten einzelner Komponenten ist nicht möglich. In Bild 2.10 ist beispielhaft ein Vergleich von Verdichterparametern in einem Verdichterkennfeld dargestellt. Zum einen ist der erwartete Betriebspunkt eingezeichnet, der sich aus der Verknüpfung des erwarteten Betriebsverhaltens aller Komponenten ergibt. Zum anderen wird ein tatsächlicher Betriebspunkt gezeigt, der sich einstellt, wenn der Wirkungsgrad der Turbine geringer ist als erwartet. Obwohl das tatsächliche Betriebsverhalten des Verdichters dem erwarteten Betriebsverhalten entspricht, unterscheiden sich dessen tatsächliche und erwartete Parameter.

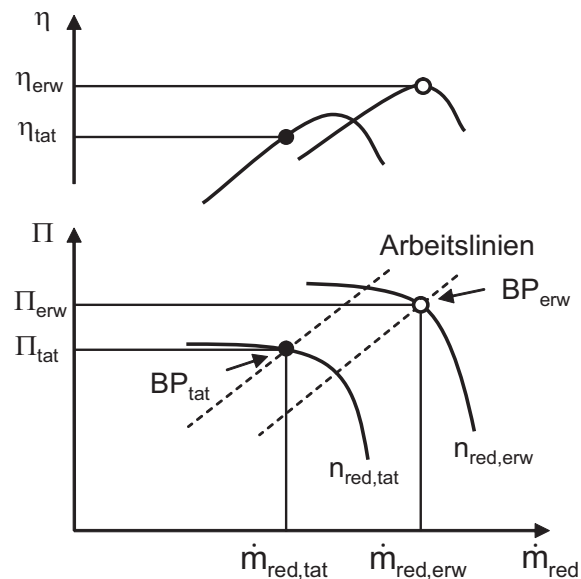


Bild 2.10: Änderung des Betriebspunktes im Verdichterkennfeld infolge einer Wirkungsgradverschlechterung in der Turbine für $n_{red,NDV} = konst.$

2.4 Modellbasierte Analyse

Die Methode der modellbasierten Analyse basiert auf der Vorgehensweise der konventionellen Analyse, berücksichtigt aber bei dem Vergleich zur Erwartung den Einfluß der Abweichungen anderer Komponenten auf die erwarteten Leistungsparameter der Komponenten ([13], [18]).

2.4.1 Vergleich zu der Erwartung

Die Bewertung des Betriebsverhaltens der Gasturbine und deren Komponenten erfolgt mittels eines Vergleichs zwischen analysierten und erwarteten Komponentenparametern. Im Gegensatz zu der in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Vergleichsmethode liegt dabei die Erwartung nicht in Zahlenwerten der Parameter sondern in Form eines Synthesemodells vor. Der Vergleich des in dieser Arbeit behandelten Verfahrens basiert auf den Referenzbedingungen der jeweiligen "Basis"-Beziehungen der Komponenten. Dazu müssen die analysierten Komponentenparameter \mathbf{X}_a auf die entsprechenden Referenzbedingungen der "Basis"-Beziehungen $\mathbf{X}_{a,\text{ref}}$ mit Hilfe der Korrekturen des Synthesemodells umgerechnet werden (s. Kapitel 2.1.1).

Um den Einfluß der Abweichungen anderer Komponenten auf die erwarteten Leistungsparameter der Komponenten zu berücksichtigen, liegt der Vergleich dem aktuellen Betriebspunkt der Komponente, im Folgenden als Referenzpunkt (RP) bezeichnet, zugrunde. Dabei werden geeignete analysierte Parameter der Komponente als unabhängige Parameter der "Basis"-Beziehung ausgewählt. Mit Hilfe der Charakteristik der Komponente sind dann Erwartungswerte für die abhängigen Parameter $\mathbf{X}_{\text{erw,ref}}$ bestimmbar. Die Unterschiede zwischen den erwarteten und den analysierten Werten dieser Parameter werden mit sogenannten Modifizierern M beschrieben. Bei diesen kann es sich entweder um Faktoren oder um Addierer handeln und sie sind folgendermaßen definiert:

$$M_{F,X} = \frac{X_{a,\text{ref}}}{X_{\text{erw,ref}}} \quad (2.17)$$

$$M_{\Delta,X} = X_{a,\text{ref}} - X_{\text{erw,ref}} \quad (2.18)$$

Entspricht das analysierte Betriebsverhalten einer Komponente dem erwarteten, so gilt für dessen Modifizierer: $\mathbf{M}_{F,X} = 1$ bzw. $\mathbf{M}_{\Delta,X} = 0$.

Die Benutzung eines Faktors oder eines Addierers als Modifizierer ist prinzipiell gleichwertig. Allerdings sollte hierbei der Betrag des Erwartungswertes berücksichtigt werden. Wenn der Betrag des Erwartungswertes gering ist und ein Faktor als Modifizierer benutzt wird, so kann der Faktor, selbst bei geringen Abweichungen im Betriebsverhalten der Komponenten, vom Betrag her hohe Werte annehmen.

Dies gilt in gleicher Weise bei der Benutzung eines Addierers als Modifizierer bei Erwartungswerten mit hohem Betrag.

Zum besseren Verständnis wird im Folgenden die modellbasierte Analyse unterschiedlicher Komponenten, angelehnt an das in Kapitel 2.3.1 behandelte Analyse-schema, näher erläutert:

Hochdruckverdichter

In Bild 2.11 ist die modellbasierte Analyse des Hochdruckverdichters schematisch dargestellt. Mit Hilfe der gemessenen bzw. analysierten Größen im Ein- und Austritt werden die Leistungsparameter des Verdichters berechnet. Danach erfolgt eine Korrektur der Parameter auf die Referenzbedingungen des Verdichterkennfelds (s. Bild 2.11 a)). In Bild 2.11 b) ist eine Drehzahlkurve eines Verdichterkennfelds dargestellt. Zudem sind die analysierten Komponentenparameter eines Meßpunktes eingezeichnet. In dem in dieser Arbeit behandelten Verfahren wird der Referenzpunkt für den Vergleich zur Erwartung mittels der reduzierten Drehzahl sowie β bestimmt, wobei der Wert für β am Schnittpunkt des analysierten reduzierten Eintrittsmassenstroms mit dem analysierten Druckverhältnis ermittelt wird (s. auch [4]).

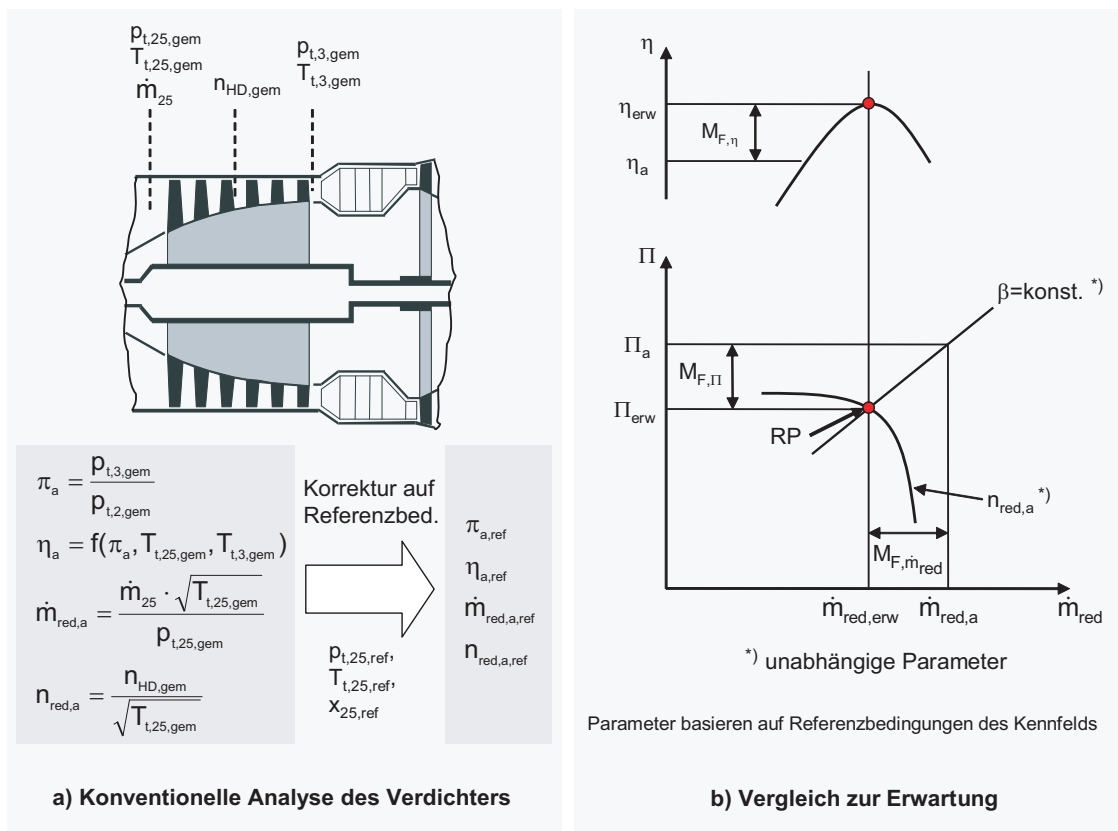


Bild 2.11: Modellbasierte Analyse des Verdichters

Für den Referenzpunkt lassen sich Erwartungswerte für die unabhängigen Parameter \dot{m}_{red} , Π und η aus dem Verdichterkennfeld ablesen. Die Unterschiede zwischen dem erwarteten und dem analysierten Betriebsverhalten des Verdichters werden mit folgenden Modifizierern beschrieben:

$$M_{F,\dot{m}_{\text{red}}} = \frac{\dot{m}_{\text{red,a,ref}}}{\dot{m}_{\text{red,erw,ref}}} = f(n_{\text{red}}, \beta) \quad (2.19)$$

$$M_{F,\Pi} = \frac{\Pi_{\text{a,ref}} - 1}{\Pi_{\text{erw,ref}} - 1} = f(n_{\text{red}}, \beta) \quad (2.20)$$

$$M_{F,\eta} = \frac{\eta_{\text{a,ref}}}{\eta_{\text{erw,ref}}} = f(n_{\text{red}}, \beta) \quad (2.21)$$

Bei der Bewertung der Modifizierer ist zu berücksichtigen, daß ein Zusammenhang zwischen $M_{F,\dot{m}_{\text{red}}}$ und $M_{F,\Pi}$ abhängig von der Steigung der β -Linie besteht.

Aufgrund der Kennfelddarstellung $\dot{m}_{\text{red}}, \Pi, \eta = f(n_{\text{red}}, \beta)$ ist zur Ermittlung des Werts des Parameters β eine iterative Berechnungsweise erforderlich, wobei sowohl β als auch n_{red} Iterationsvariable sind. Wie in Bild 2.11 ersichtlich, liegt der Schnittpunkt des analysierten Eintrittsmassenstroms und des analysierten Druckverhältnisses nicht zwingend auf der analysierten reduzierten Drehzahl.

Turbinen

Analog zu Kapitel 2.3.1 werden die Turbinenparameter anhand der analysierten bzw. gemessenen Größen im Ein- und Austritt der Turbine berechnet. Danach erfolgt eine Korrektur der Parameter auf die Referenzbedingungen des Turbinenkennfelds. In dem in dieser Arbeit behandelten Verfahren wird der Referenzpunkt für den Vergleich zur Erwartung mittels der Parameter $n_{\text{red,a,ref}}$ und $a_{\text{ref,a,ref}}$ festgelegt. Mit dem Turbinenkennfeld lassen sich dann Erwartungswerte für

$$\dot{m}_{\text{red,erw,ref}}, \eta_{\text{erw,ref}} = f(a_{\text{red,a}}, n_{\text{red,a}}) \quad (2.22)$$

bestimmen. Der Erwartungswert für den reduzierten Eintrittsmassenstrom wird zur Bestimmung des Nebenstromverhältnisses bzw. des Drucks $p_{t,45}$ benötigt. Das Betriebsverhalten der Turbinen wird somit anhand des Modifizierers

$$M_{F,\eta} = \frac{\eta_{\text{a,ref}}}{\eta_{\text{erw,ref}}} = f(a_{\text{red}}, n_{\text{red}}) \quad (2.23)$$

bewertet.

2.4.2 Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen

Im Rahmen einer modellbasierten Analyse kann das Synthesemodell mit Hilfe der Modifizierer in der Weise angepasst werden, daß es das analysierte Betriebsverhalten der Gasturbine auf dem Prüfstand beschreibt. Mit einem solchen “kalibrierten” Synthesemodell ist es möglich, das Betriebsverhalten der Gasturbine bei Soll-Umgebungsbedingungen zu ermitteln. Im Gegensatz zu der in Kapitel 2.3.2 erläuterten Korrekturmethode der konventionellen Analyse werden hierbei alle Einflüsse auf das Betriebsverhalten der Gasturbine berücksichtigt, die im Synthesemodell modelliert sind. Für detailliertere Erläuterungen wird auf [28] verwiesen.

2.4.3 Vergleich der modellbasierten mit der konventionellen Analyse

In Tabelle 2.4 sind die Vor- und Nachteile der modellbasierten Analyse gegenüber der konventionellen Analyse zusammengefaßt. Hierbei bietet die modellbasierte Analyse den Vorteil, bei dem Vergleich zu der Erwartung den Einfluß der Abweichungen anderer Komponenten auf die erwarteten Leistungsparameter der Komponenten zu berücksichtigen. Bei der modellbasierten Analyse werden weiterhin für die Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen sämtliche Einflüsse auf das Betriebsverhalten der Gasturbine, die im Synthesemodell modelliert sind, berücksichtigt. Während bei der konventionellen Analyse in der Regel lediglich Annahmen über das gasturbineninterne Luftsystem, das Durchsatzverhalten der Turbinen und das Betriebsverhalten der Brennkammer zu treffen sind, muß bei der modellbasierten Analyse das Betriebsverhalten sämtlicher Komponenten, einschließlich der Turbomaschinen, bekannt sein. Damit wird allerdings auch eine höhere Flexibilität z. B. hinsichtlich eines Ausfalls einer Meßgröße erreicht, indem das Betriebsverhalten einer weiteren Komponente als bekannt vorausgesetzt wird.

	modellbasierte Analyse	konventionelle Analyse
Vergleich zur Erwartung	+	–
Es entsteht sofort ein neues validiertes Modell	+	–
Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen	+	–
notwendige Informationen	–	+
Flexibilität	+	–

Tabelle 2.4: Vergleich der modellbasierten mit der konventionellen Analyse

2.5 Modellbasierte Analysen mit einem Leistungsberechnungsprogramm

Das in dieser Arbeit behandelte Leistungsberechnungsprogramm erlaubt die Durchführung von Syntheserechnungen wie auch die von modellbasierten Analysen. In diesem Abschnitt werden, basierend auf den bereits in Kapitel 2.1 gegebenen Erläuterungen zur Syntheserechnung, die Anwendung dieses Programms zur modellbasierten Analyse dargestellt.

In Bild 2.12 ist schematisch der Prozeß der modellbasierten Analyse dargestellt. Die Meßwerte liegen hierbei auf einer Datenbank vor. Das Leistungsberechnungsprogramm führt einerseits die Aufbereitung der Meßwerte in eine für die Analyse geeignete Form und andererseits die eigentliche modellbasierte Analyse durch. Die berechneten Modifizierer werden dann benutzt, das Synthesemodell zu validieren.

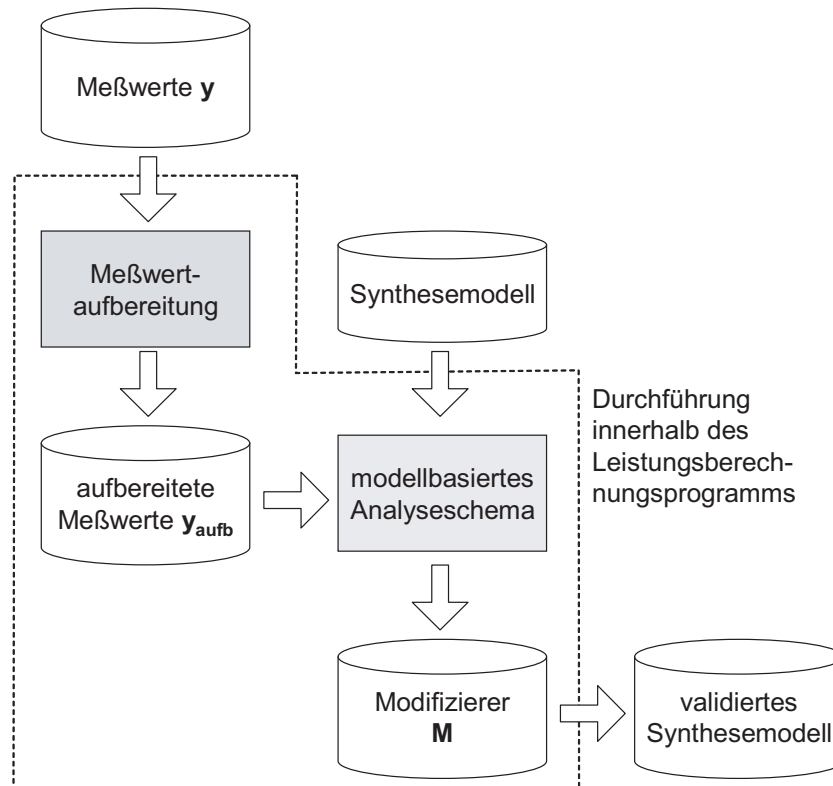


Bild 2.12: Prozess der modellbasierten Analyse

Aufbereitung der Meßwerte

Gemäß Kapitel 2.2.3 umfasst die Meßwertaufbereitung die Berechnung von indirekt gemessenen Größen, die Bildung von Mittelwerten, die Überprüfung der Meßwerte auf grobe Meßfehler (Bereichsüberprüfungen, Filterverfahren) sowie die

Durchführung von Meßwertkorrekturen. Hierzu werden eigene Berechnungsmodule eingesetzt, die zu Beginn der Analyserechnung aufgerufen werden (s. Bild 2.13). Die Berechnungsmodule lassen sich in Module zur Aufbereitung von Nicht-Ebenen-Größen und in Module zur Aufbereitung von Größen einer Ebene unterscheiden. Die Meßwerte y werden von der Datenbank geladen und den entsprechenden Eingabegrößen dieser Module zugewiesen. Ausgabegrößen dieser Module sind die aufbereiteten Meßgrößen y_{aufb} .

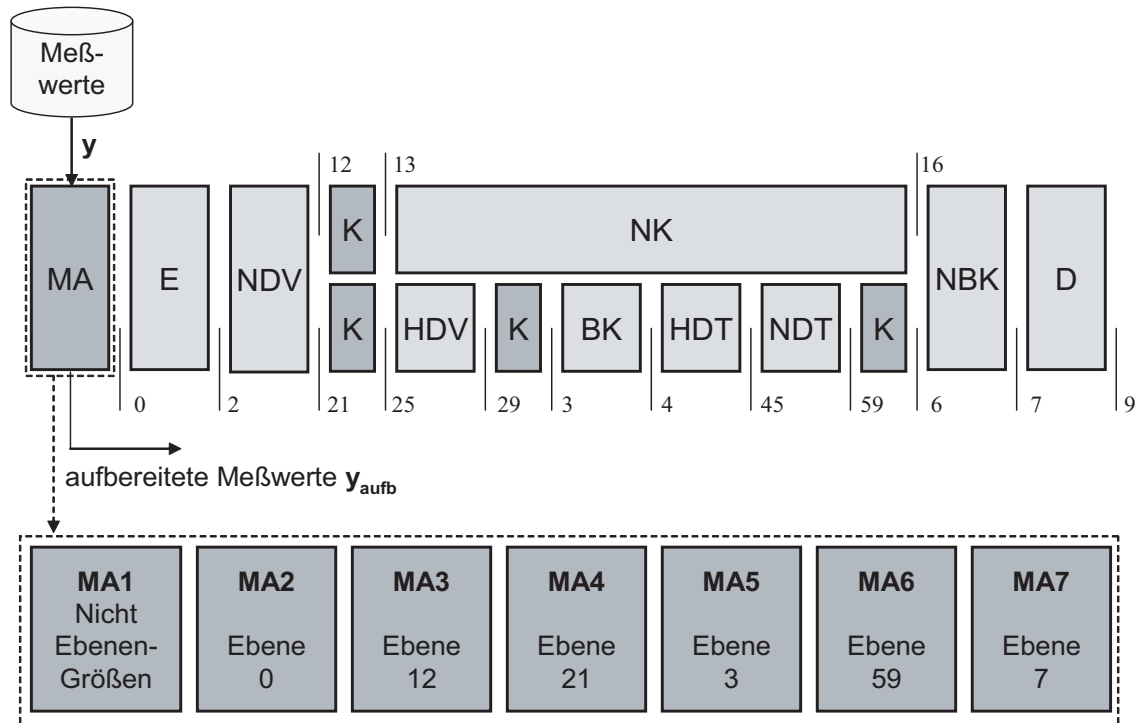


Bild 2.13: Konfiguration einer modellbasierten Analyse mit Meßwertaufbereitungsmodulen und Kanälen zur Simulation der Meßebenen

Simulation der Meßebenen

Die Simulation der Meßebenen innerhalb der Gasturbine geschieht mittels spezieller Rechenwege des Berechnungsmoduls "Kanal". Diese beinhalten eine Modellierung von Druckverlusten, die infolge der Instrumentierung verursacht werden. Zudem beinhalten die Rechenwege die Recovery-Korrektur von Temperaturmeßwerten, die nur während der eigentlichen Analyse durchführbar ist (s. Kapitel 2.2.3). Dabei wird die Recovery-Korrektur auf den berechneten Wert der Temperatur angewendet und somit ein "nicht"-korrigierter Wert ermittelt. In der Konfiguration ist das Berechnungsmodul "Kanal" jeweils an den entsprechenden Stellen der Meßebenen innerhalb der Gasturbine anzuordnen (s. Bild 2.13).

Referenzpunkte / Modifizierer

Die Modifizierer sind Eingabegrößen der entsprechenden Berechnungsmodule und basieren auf den jeweiligen Modellparametern:

$$X_{a,\text{ref}} = X_{\text{erw,ref}} \cdot M_{F,X} \quad (2.24)$$

$$X_{a,\text{ref}} = X_{\text{erw,ref}} + M_{\Delta,X}. \quad (2.25)$$

Aufgrund der Definition des Referenzpunktes beinhalten die Berechnungsmodule für Nieder- und Hochdruckverdichter jeweils einen speziellen Rechenweg zur Ermittlung des Wertes des unabhängigen Parameters β (s. Kapitel 2.4.1). Die Referenzpunkte der Turbinen werden mit den unabhängigen Parametern der Kennfelddarstellung gebildet, weshalb für diese keine speziellen Rechenwege erforderlich sind.

Analyseschema

In Tabelle 2.5 ist das bereits in Kapitel 2.3.1 behandelte Analyseschema einschließlich des erforderlichen Iterationsschemas dargestellt. Die Randbedingungen der Gasturbine sowie der Gesamtmassenstrom und die Drehzahlen werden direkt mit Hilfe von Meßgrößen vorgegeben. Die Modifizierer werden mit Hilfe einer iterativen Berechnungsweise ermittelt. Weiterhin sind Größen aufgrund der Synthesemodellbildung iterativ zu berechnen. Die Verträglichkeitsbedingungen berücksichtigen zum einen die Fehler zwischen den aufbereiteten Meßwerten sowie die dazugehörigen berechneten Werte. Zum anderen wird weiterhin die Einhaltung der Erhaltungsgleichungen gewährleistet. Die Definition der Iterationsvariablen und Verträglichkeitsbedingungen geschieht in der Eingabe des Verfahrens seitens des Anwenders. Durch die ausschließlich iterative Berechnungsweise der Modifizierer ist eine hohe Flexibilität bezüglich der Wahl der Modifizierer und der zu berücksichtigenden Meßgrößen gegeben.

Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen

Das Leistungsberechnungsprogramm erlaubt es mehrere aufeinanderfolgende Rechnungen durchzuführen, zwischen denen Änderungen in der Eingabe möglich sind (s. [66]). Zur Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen wird ein zweiter Rechenpunkt definiert, mit dem eine Syntheserechnung mit dem Synthesemodell, unter Berücksichtigung der analysierten Modifizierer, mit vorgegebenen Soll-Umgebungsbedingungen durchgeführt wird. Hierbei werden die analysespezifischen Rechenwege und Module durch entsprechendes Setzen von Schaltern ausgeschaltet.

direkte Vorgabe von Meßgrößen zur Festlegung des Betriebspunkts der Gasturbine	$p_{t,0}$
	$T_{t,0}$
	x_0
	$p_{s,09}$
	α_{Le}
	$\dot{m}_{Br,BK}$
	$\dot{m}_{Br,NBK}$
	$T_{Br,BK}$
	$T_{Br,NBK}$
	H_u
	A_8 und A_9
	P_{ex}
	\dot{m}_{Bl}
direkte Vorgabe von Meßgrößen	n_{ND}
	n_{HD}
	\dot{m}_0
Iterationsvariablen	Verträglichkeitsbedingungen
$M_{F,\Pi_H,NDV}$	$\Delta p_{t,21}/p_{t,21,gem}$
$M_{F,\eta_H,NDV}$	$\Delta T_{t,21}/T_{t,21,gem}$
$M_{F,\Pi_N,NDV}$	$\Delta p_{t,12}/p_{t,12,gem}$
$M_{F,\eta_N,NDV}$	$\Delta T_{t,12}/T_{t,12,gem}$
$M_{F,\dot{m}_{red},NDV}$	$\Delta \dot{m}_2/\dot{m}_2$
$M_{F,\Pi,HDV}$	$\Delta p_{t,29}/p_{t,29,gem}$
$M_{F,\eta,HDV}$	$\Delta T_{t,29}/T_{t,29,gem}$
$M_{F,\dot{m}_{red},HDV}$	$\Delta \dot{m}_{25}/\dot{m}_{25}$
$M_{F,\eta,HDT}$	$\Delta \dot{m}_{45}/\dot{m}_{45}$
$M_{F,\eta,NDT}$	$\Delta p_{t,59}/p_{t,59,gem}$
$M_{\Delta,\zeta,NK}$	$\Delta p_{t,161}/p_{t,161}$
$M_{\Delta,C_D,D}$	$\Delta \dot{m}_8/\dot{m}_8$
$M_{\Delta,\varphi,D}$	$\Delta F/F_{gem}$
μ	$\Delta \dot{m}_4/\dot{m}_4$
$p_{s,64}/p_{t,6}$	$\Delta p_{s,64}/p_{s,64}$
$p_{s,66}/p_{t,6}$	$\Delta p_{s,66}/p_{s,66}$

Tabelle 2.5: Randbedingungen, Vorgabe von Meßgrößen und Iterationsschema einer modellbasierten Analyse

2.6 Konvergenzverhalten des modellbasierten Analyseverfahrens

In dem im Rahmen dieser Arbeit behandelten modellbasierten Analyseverfahren werden numerische Iterationsverfahren angewandt zur Ermittlung

1. des thermogasdynamischen Zustandes in einer Ebene,
2. von Referenzpunkten (z. B. Verdichter),
3. weiterer Parameter aufgrund der Synthesemodellbildung sowie
4. von Modifizierern.

Dabei werden Gleichungen sowohl intern in einem Berechnungsmodul mit Hilfe eines Regula-falsi-Verfahrens (s. [54]) gelöst, wie z. B. die Gleichungen von 1. und 2. , als auch in einem Gleichungssystem mittels eines Newton-Raphson-Verfahren (s. [37], [54]), wie z. B. die Gleichungen von 4. .

Das Konvergenzverhalten von numerischen Iterationsverfahren ist dabei abhängig von

- der Stetigkeit und Differenzierbarkeit der Funktionen,
- der geforderten Genauigkeit,
- der Existenz einer oder mehrerer Lösungen (Doppeldeutigkeiten) sowie
- der Güte der Schätzwerte.

Das Konvergenzverhalten der modellbasierten Analyse hängt insbesondere von der Qualität der aufbereiteten Meßwerte ab. Es ist keine Konvergenz möglich, wenn Meßwerte außerhalb des Bereichs liegen, den das Synthesemodell mittels der Modifizierer erzeugen kann.

3 Verfahren zur automatisierten modellbasierten Leistungsanalyse

Zur Definition von Anforderungen an ein Verfahren zur automatisierten modellbasierten Leistungsanalyse wird zu Beginn dieses Kapitels die typische Vorgehensweise eines Anwenders des bestehenden Verfahrens beschrieben. Darauf basierend werden dann die dafür erforderlichen Erweiterungen abgeleitet.

Die folgenden Erläuterungen setzen voraus, daß die Analyse auf einem Synthesemodell basiert, mit dem sämtliche Betriebspunkte der Gasturbine numerisch robust berechenbar sind. D. h. allgemeine Maßnahmen zur Erhöhung der numerischen Robustheit von Leistungssyntheseverfahren werden im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt.

3.1 Typische Vorgehensweise bei der nicht automatisierten modellbasierten Analyse

Der Anwender wählt zunächst den zu analysierenden Meßpunkt von der Datenbank aus. Hierbei zieht er nur Meßpunkte heran, bei welchen der Betriebspunkt der Gasturbine innerhalb des Gültigkeitsbereichs des Synthesemodells liegt. So ist es nicht zielführend, modellbasierte Analysen von Meßpunkten unter "Windmilling"-Betriebsbedingungen durchzuführen, während das Synthesemodell lediglich das Betriebsverhalten der Gasturbine zwischen Leerlauf und Vollast abbildet.

Nachdem er ein für den Instrumentierungsumfang der Gasturbine geeignetes Analyseschema einschließlich Iterationsschema erstellt hat, wird das Analyseverfahren gestartet. Unabhängig vom Konvergenzverhalten der Berechnung prüft der Anwender zunächst die aufbereiteten Meßwerte, ob diese in dem von ihm erwarteten Bereich liegen. Die erwarteten Werte basieren dabei entweder auf der Erfahrung des Anwenders oder sie werden mit Hilfe von Syntheserechnungen zuvor ermittelt. Zwar wird der Anwender durch Verfahren zur Meßwertüberprüfung unterstützt (s. Kapitel 2.2.3), diese können allerdings unter bestimmten Umständen fehlschlagen. So werden in der Regel für die Bereichsüberprüfungen wegen des sonst zu hohen Arbeitsaufwands zulässige Bereiche angegeben, die den gesamt möglichen Betriebsbereich der Gasturbine umfassen. Folglich sind mit dieser Überprüfung nur vom Betrag her hohe grobe Meßfehler erkennbar. Weiterhin sind die Filterverfahren nur

einsetzbar, wenn mehr als zwei Meßwerte für die Meßgröße existieren. Sie versagen außerdem, wenn alle Meßwerte der Meßgröße den gleichen groben Meßfehler beinhalten (z. B. wenn für alle Meßwerte eine fehlerhafte Konversionskurve benutzt wurde).

Erkennt der Anwender eine aufbereitete Meßgröße als fehlerhaft, so erstellt er ein neues Analyseschema, in dem diese Meßgröße nicht mehr berücksichtigt wird. Hierbei benutzt er Alternativen in folgender Reihenfolge:

1. Benutzung eines *Ersatzmeßwertes* (falls vorhanden)

Neben der Instrumentierung zur Erfassung des Betriebsverhaltens der Gasturbinenkomponenten existieren in der Gasturbine weitere Meßwertaufnehmer, z. B. zur Regelung der Gasturbine. Diese Meßwerte können ersatzweise zur Leistungsanalyse benutzt werden.

2. Benutzung einer *redundanten Meßgröße* (falls möglich)

In der Regel wird nicht die vollständige Instrumentierung der Gasturbine bei der Leistungsanalyse berücksichtigt. So ist bei der Analyse eines Zweistromtriebwerks mit Hilfe der Hochdruckturbinenkapazitätsmethode die Temperatur im Austritt der Niederdruckturbinen $T_{t,6}$ eine redundante Meßgröße. Fällt z. B. die Temperaturmessung $T_{t,13}$ aus, so läßt sich die spezifische Arbeit des Niederdruckverdichters weiterhin mit $T_{t,6}$ unter Berücksichtigung des Leistungsgleichgewichts an der Niederdruckwelle analysieren.

3. Benutzung weiterer Annahmen über das Betriebsverhalten einer Komponente

Fällt zur Ermittlung des Betriebsverhaltens einer Komponente eine entsprechende Meßgröße aus, so kann das erwartete Betriebsverhalten dieser Komponente benutzt werden, um die Leistungsanalyse der übrigen Komponenten weiterhin zu gewährleisten.

Um das Konvergenzverhalten des Verfahrens positiv zu beeinflussen, gibt der Anwender für den Meßpunkt geeignete Schätzwerte vor. Die Schätzwerte leitet er entweder aus seiner Erwartung ab oder besser, er benutzt die Ergebnisse eines ähnlichen bereits analysierten Meßpunktes.

Wenn das Verfahren konvergiert, betrachtet der Anwender die Ergebnisse der Analyse, insbesondere die Modifizierer, und versucht anhand dieser noch weitere bisher nicht erkannte grobe Meßfehler zu erkennen. Konvergiert das Verfahren dagegen nicht, so wird dies in der Regel von einer nicht optimalen Wahl der Schätzwerte oder von bisher noch nicht erkannten groben Meßfehlern verursacht. Der Anwender hat in diesem Fall die Ursache entsprechend zu ermitteln, indem er noch detaillierter die Schätzwerte und die aufbereiteten Meßwerte mit den entsprechenden Erwartungswerten überprüft.

3.2 Anforderungen an das Verfahren und Überblick über die erforderlichen Erweiterungen

Für einen automatisierten Einsatz des modellbasierten Analyseverfahrens zur Unterstützung des Versuchsbetriebs ergibt sich die Anforderung, daß das Verfahren für jeden möglichen Satz von Meßwerten, ohne Eingriff des Anwenders, numerisch robust rechnet. Folglich muß die in Kapitel 3.1 beschriebene typische Vorgehensweise eines Anwenders im Verfahren abgebildet werden. Hierbei wird auch prinzipiell gewährleistet, daß das während der Versuchsdurchführung eingesetzte Verfahren die gleichen Meßgrößen berücksichtigt und die gleichen Ergebnisse berechnet wie der Anwender mit dem herkömmlichen modellbasierten Analyseverfahren nach der Versuchsdurchführung. In Bild 3.1 ist die im Verfahren abzubildende Vorgehensweise dargestellt, die im Folgenden näher erläutert wird.

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, hängt das Konvergenzverhalten des Verfahrens maßgeblich von der Güte der Schätzwerte wie auch von der Qualität der aufbereiteten Meßgrößen ab. Zur Vorgabe der Schätzwerte sowie zur Erkennung von groben Meßfehlern, die nicht von den bereits im Verfahren implementierten Plausibilitätsüberprüfungen erkannt werden, greift der Anwender auf Erwartungswerte dieser Größen zurück. Da einer modellbasierten Analyse ein vollständiges Synthesemodell zugrunde liegt, welches das erwartete Betriebsverhalten der Gasturbine widerspiegelt, ist es für die Automatisierung der Vorgehensweise des Anwenders naheliegend, vor der eigentlichen Analyse mit Hilfe des Synthesemodells Erwartungswerte zu ermitteln. Damit die Erwartungswerte für den tatsächlichen Betriebspunkt der Gasturbine gelten, sind als Randbedingungen der Syntheserechnung Meßgrößen zu benutzen. Da das Synthesemodell in der Regel den "bestmöglichen" Kenntnisstand über das Betriebsverhalten der auf dem Prüfstand installierten Gasturbine repräsentiert, werden mit dieser Vorgehensweise ebenfalls die "bestmöglichen" Erwartungswerte für den tatsächlichen Umgebungs- und Lastzustand ermittelt.

Der bisher vom Anwender durchgeführte Vergleich zwischen den aufbereiteten Meßwerten und deren Erwartungswerten muß nun in den entsprechenden Meßwertaufbereitungsmodulen abgebildet werden. Die Weitergabe der Informationen über das Resultat des Vergleichs geschieht in Form von Indikatoren. Weiterhin fällt den Meßwertaufbereitungsmodulen die Aufgabe zu, entsprechende Ersatzmeßwerte zur Verfügung zu stellen, falls der eigentliche Meßwert als fehlerhaft erkannt wird.

Wie in Kapitel 3.1 dargestellt, erstellt bisher der Anwender, abhängig von dem als gültig erkannten Satz von Meßgrößen, ein entsprechendes Analyseschema. Für die Automatisierung der Vorgehensweise des Anwenders bedeutet dies, daß bereits vor der Versuchsdurchführung für unterschiedliche Sätze von Meßgrößen ein entsprechender Pool von unterschiedlichen Analyseschemata zu erstellen ist. Da zur Berechnung der Erwartung ebenfalls Meßgrößen benutzt werden, gilt dies an dieser Stelle in gleicher Weise.

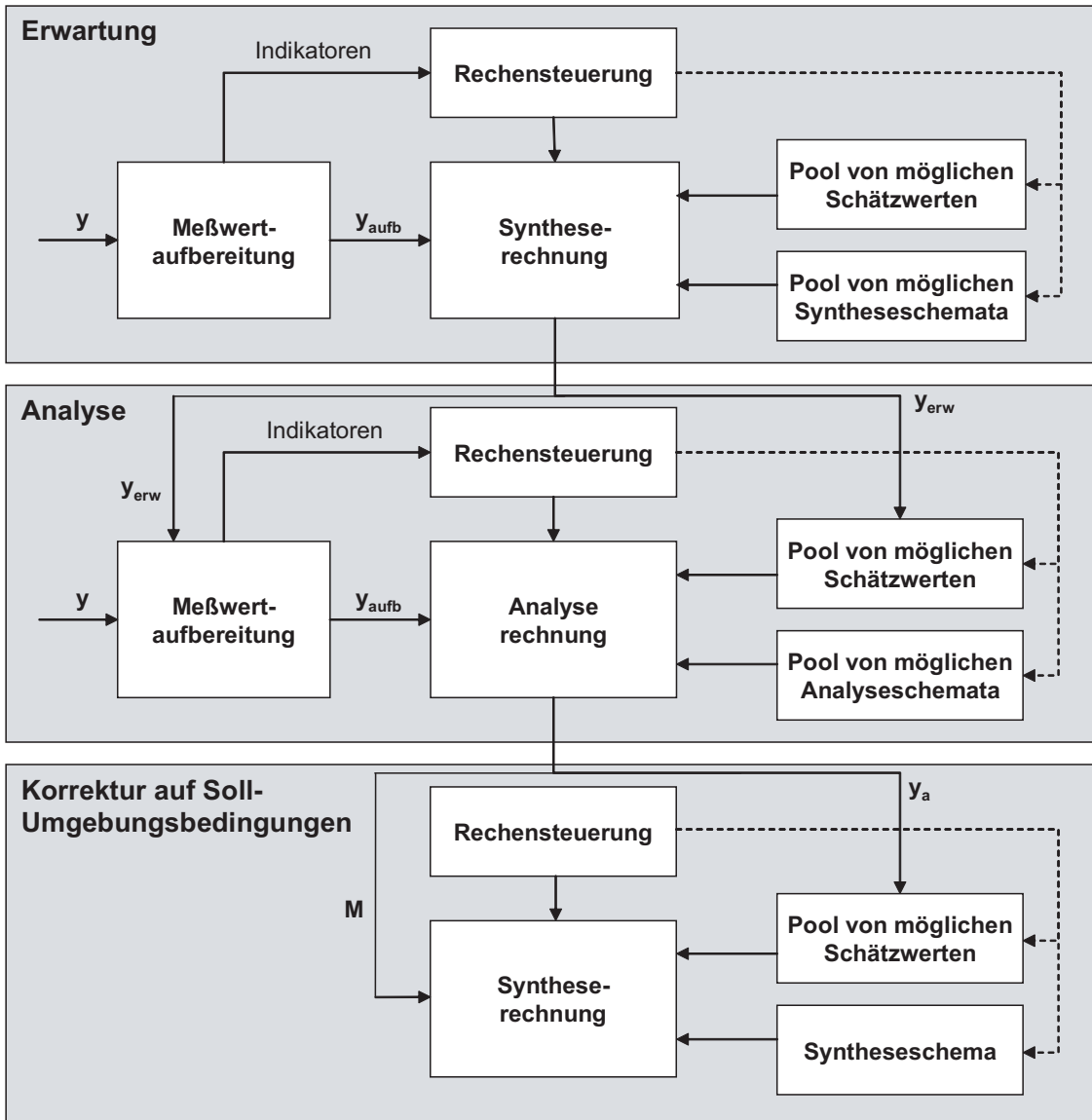


Bild 3.1: Schema der automatisierten modellbasierten Analyse

Der Anwender leitet bisher die optimalen Schätzwerte für die Iterationsvariablen entweder aus seiner Erwartung oder aus Ergebnissen eines bereits analysierten ähnlichen Meßpunktes ab. Um dem Verfahren die unterschiedlichen Quellen von Schätzwerten verfügbar zu machen und um eine Auswahl des für den aktuellen Meßpunkt optimalen Satzes von Schätzwerten zu ermöglichen, wird entsprechend der Methode eines modularen Leistungsberechnungsverfahrens ein neues sogenanntes Schätzwertefiltermodul eingeführt. Dieses Modul verwaltet einen Pool von möglichen Schätzwerten und leitet die optimalen entsprechend weiter. Das Modul muß in gleicher Weise für Synthese- und Analyserechnungen einsetzbar sein.

Zur Abbildung der bisher vom Anwender getroffenen Entscheidungen ist es erforderlich, ein weiteres sogenanntes Steuermodul einzuführen. Dieses Modul übernimmt

die Entscheidungen,

- ob der Betriebspunkt der Gasturbine des zu analysierenden Meßpunktes innerhalb des Gültigkeitsbereichs des Synthesemodells liegt und somit die modellbasierte Analyse durchgeführt werden darf,
- welches Synthese- bzw. Analyseschema zur Berechnung der Erwartung, zur modellbasierten Analyse und zur Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen benutzt wird sowie
- aus welcher Quelle jeweils die optimalen Schätzwerte für die Iterationsvariablen gewählt werden.

Um insgesamt die Wahrscheinlichkeit von Konvergenzproblemen zu mindern, ist es weiterhin erforderlich, die Anzahl der iterativ zu bestimmenden Modifizierer auf ein notwendiges Maß zu reduzieren. Hierfür sind neue Rechenwege in den bestehenden Berechnungsmodulen zu integrieren, die, so weit wie möglich, mit Hilfe einer direkten Berechnungsweise die Modifizierer ermitteln.

3.3 Automatisierung der Vorgehensweise

3.3.1 Berechnungsablauf und Konfiguration

In Bild 3.2 ist schematisch der Berechnungsablauf wie auch die zu dem Verfahren gehörende Konfiguration dargestellt.

Für einen Meßpunkt werden folgende drei Rechenpunkte durchgeführt:

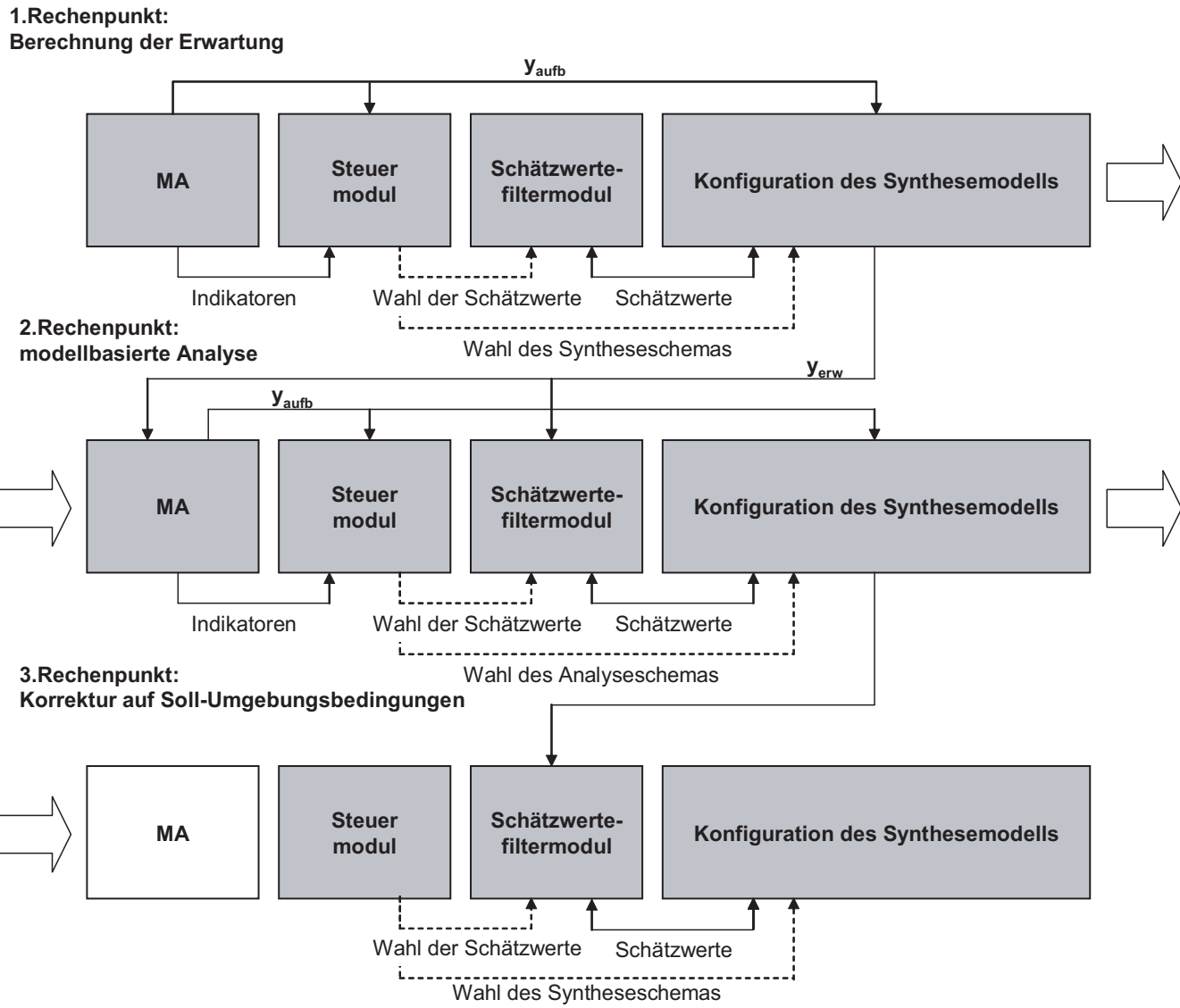
- Berechnung der Erwartung,
- modellbasierte Analyse sowie
- Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen.

Basierend auf der in Kapitel 2.5 erläuterten Konfiguration werden dieser sowohl das Steuermodul als auch das Schätzwertefiltermodul in der in Bild 3.2 gezeigten Reihenfolge hinzugefügt.

Berechnung der Erwartung

Zur Berechnung der Erwartung muß zunächst ein Teil der Meßgrößen aufbereitet werden, um den tatsächlichen Umgebungs- und Lastzustand der Gasturbine zu ermitteln. Im Steuermodul erfolgt zunächst die Entscheidung, ob der Betriebspunkt der Gasturbine innerhalb des Gültigkeitsbereichs des Synthesemodells liegt. Dieser Gültigkeitsbereich wird dabei beispielsweise durch Vorgaben von Bereichen für n_{ND} , $p_{\text{t},0}$, $p_{\text{s},0}$ und $T_{\text{t},0}$ definiert. Liegt der Betriebspunkt der Gasturbine außerhalb des Gültigkeitsbereichs, so werden alle Rechenpunkte des Meßpunktes übersprungen.

Bild 3.2: Berechnungsablauf und Konfiguration einer automatisierten modellbasierten Analyse



Ansonsten erfolgt im Steuermodul die Auswahl eines entsprechenden Syntheschemas, abhängig von den Indikatoren der Meßwertaufbereitungsmodule, mit denen der “fehlerfreie” Satz von Meßgrößen definiert wird. Weiterhin wird durch das Steuermodul ein optimaler Satz von Schätzwerten im Schätzwertefiltermodul ausgewählt und entsprechend weitergegeben. Nach der Berechnung werden ausgewählte Ergebniswerte dem Schätzwertefiltermodul übergeben, damit diese einerseits als Schätzwerte zur Berechnung der Erwartung eines nachfolgenden Meßpunktes mit einem ähnlichen Betriebspunkt der Gasturbine und andererseits als Schätzwerte für die folgende Analyserechnung verfügbar sind. Für die folgende Analyserechnung werden weiterhin berechnete Erwartungswerte an die Meßwertaufbereitungsmodule zur Überprüfung der aufbereiteten Meßwerte weitergegeben.

Modellbasierte Analyse

Für die modellbasierte Analyse erfolgt zunächst eine weitere Meßwertüberprüfung, mit welcher nun die aufbereiteten Meßwerte mit den berechneten Erwartungswerten auf ihre Plausibilität hin überprüft werden. Die Auswahl eines entsprechenden Analyseschemas geschieht wieder im Steuermodul, abhängig von den Indikatoren der Meßwertaufbereitungsmodule. Weiterhin wird durch das Steuermodul ein optimaler Satz von Schätzwerten im Schätzwertefiltermodul ausgewählt und entsprechend weitergegeben. Nach der Analyse werden ausgewählte Ergebniswerte dem Schätzwertefiltermodul übergeben, damit diese einerseits als Schätzwerte zur Analyse eines nachfolgenden Meßpunktes mit einem ähnlichen Betriebspunkt der Gasturbine und andererseits als Schätzwerte für die folgende Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen verfügbar sind.

Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen

Für die Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen werden, wie bisher, keine Meßwertaufbereitungsmodule benötigt. Die Auswahl des entsprechenden Syntheschemas geschieht im Steuermodul. Weiterhin wird durch das Steuermodul ein optimaler Satz von Schätzwerten im Schätzwertefiltermodul ausgewählt und entsprechend weitergegeben. Nach der Rechnung werden ausgewählte Ergebniswerte dem Schätzwertefiltermodul übergeben, damit diese als Schätzwerte für die Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen eines nachfolgenden Meßpunktes mit einem ähnlichen Betriebspunkt der Gasturbine verfügbar sind.

3.3.2 Berechnung des erwarteten Betriebsverhaltens der Gasturbine

Die Berechnung des erwarteten Betriebsverhaltens der Gasturbine ist erforderlich

- zur Überprüfung der aufbereiteten Meßwerte und

- zur Vorgabe von Schätzwerten für die Iterationsvariablen der Analyserechnung.

Das erwartete Betriebsverhalten der Gasturbine wird mit Hilfe des Synthesemodells berechnet, welches der Analyse zugrunde liegt. Dieses Synthesemodell repräsentiert in der Regel den “bestmöglichen” Kenntnisstand über das Betriebsverhalten der auf dem Prüfstand installierten Gasturbine. So werden u. a. auch die Druckverluste berücksichtigt, die infolge der Instrumentierung verursacht werden.

Damit die berechneten Erwartungswerte für den tatsächlichen Betriebspunkt der Gasturbine gelten, sind als Randbedingungen der Syntheserechnung Meßgrößen vorzugeben. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß sich Meßfehler dieser Größen entsprechend auf die berechneten Erwartungswerte auswirken. Folglich sind Meßgrößen zu wählen, deren Meßunsicherheiten gering sind und die erfahrungsgemäß selten grobe Meßfehler beinhalten. Für das im Rahmen dieser Arbeit behandelte Turboluftstrahltriebwerk können aus Tabelle 3.1 beispielhaft Meßgrößen entnommen werden, die sich als Randbedingungen zur Berechnung des erwarteten Betriebsverhaltens der Gasturbine eignen. Diese entsprechen in etwa den bereits in Kapitel 2.1.2 behandelten Randbedingungen. Da der Meßwert der Niederdruckwellendrehzahl im Vergleich zum Brennstoffmassenstrom eine geringere Meßunsicherheit aufweist (s. Tabelle 2.1), wird dieser Meßgröße der Vorzug gegeben.

Umgebungsbedingungen	Totaldruck Eintritt $p_{t,0}$
	Totaltemperatur Eintritt $T_{t,0}$
	Gegendruck an der Düse $p_{s,09}$
	Luftfeuchte x_0
Lastzustand und Installation	Drehzahl der Niederdruckwelle n_{ND}
	Positionen von variablen Eintrittsleitschaufeln α_{Le}
	Leistungsentnahme P_{ex}
	Luftentnahme \dot{m}_{Bl}
	engste Düsenquerschnittsfläche A_8
	Nachbrennerbrennstoffmassenstrom $\dot{m}_{Br,NBK}$
	Temperatur des Brennstoffs $T_{Br,NBK}$
	unterer Heizwert H_u

Tabelle 3.1: Randbedingungen der Syntheserechnung zur Berechnung des erwarteten Betriebsverhaltens der Gasturbine

Gemäß Kapitel 2.1 sind in einer Syntheserechnung auch die Regelgesetze der Gasturbine berücksichtigbar. Es ist somit möglich, mittels dieser Regelgesetze Werte z. B. für n_{ND} , α_{Le} , A_8 und $\dot{m}_{Br,NBK}$ abhängig von der gemessenen Schubhebelstellung PLA zu ermitteln. Zur Berechnung der Erwartung sind folglich deren Meßwerte nicht mehr erforderlich (s. Tabelle 3.2). Da die Schubhebelstellung im Vergleich zu anderen Größen sehr genau meßbar ist, wird weiterhin die Unsicherheit der berechneten Erwartungswerte reduziert. Werden bei der Berechnung der Erwartung

Regelgesetze berücksichtigt, so ist darauf zu achten, daß diese identisch mit den im Regelungssystem der Gasturbine definierten Regelgesetzen sind. Insbesondere bei Versuchen mit Prototypen werden häufig Regelgesetze während der Versuchsdurchführung geändert.

Umgebungsbedingungen	Totaldruck Eintritt $p_{t,0}$
	Totaltemperatur Eintritt $T_{t,0}$
	Gegendruck an der Düse $p_{s,09}$
	Luftfeuchte x_0
Lastzustand und Installation	Schubhebelstellung PLA
	Leistungsentnahme P_{ex}
	Luftentnahme \dot{m}_{B1}
	Temperatur des Brennstoffs $T_{Br,NBK}$
	unterer Heizwert H_u

Tabelle 3.2: Randbedingungen der Syntheserechnung zur Berechnung des erwarteten Betriebsverhaltens der Gasturbine unter Berücksichtigung von Regelgesetzen

3.3.3 Erweiterung der Module zur Meßwertaufbereitung

Überprüfung der aufbereiteten Meßwerte

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, können die bisher in den Meßwertaufbereitungsmodulen implementierten Plausibilitätsüberprüfungen der Meßwerte unter bestimmten Umständen fehlschlagen. Deshalb werden diese mit einer weiteren Überprüfung des aufbereiteten Meßwerts ergänzt. Hierbei wird überprüft, ob der aufbereitete Meßwert $y_{i,aufb}$ innerhalb eines Erwartungsbereichs, definiert durch eine untere Grenze $y_{i,aufb,min}$ und eine obere Grenze $y_{i,aufb,max}$, liegt.

Bei der Vorgabe der Erwartungsbereiche der aufbereiteten Meßwerte ist zu unterscheiden, ob die jeweilige Meßgröße ausschließlich zur Leistungsanalyse oder auch zur Berechnung des erwarteten Betriebsverhaltens der Gasturbine benötigt wird.

Die Erwartungsbereiche von Meßgrößen, die zur Berechnung der Erwartung benötigt werden, müssen sämtliche Werte umfassen, die sich während des Versuchs einstellen können. Allerdings sind während der Versuchsdurchführung die Variationen der Werte von einem Teil der Größen gering, wodurch deren Erwartungsbereiche entsprechend eng faßbar sind. Dies gilt beispielsweise für Meßgrößen zur Erfassung der Umgebungsbedingungen in einem Bodenprüfstand. Die Werte der weiteren Meßgrößen werden außerdem in der Regel im Versuchsplan definiert, wie z. B. Werte für die Schubhebelstellung, und sind entsprechend vom Prüfstandspersonal aktiv einzustellen. Beinhalten diese Meßgrößen grobe Meßfehler, so werden diese im allgemeinen sofort bemerkt.

Die Erwartungsbereiche derjenigen Meßgrößen, die ausschließlich zur Leistungsanalyse benötigt werden, sind mit deren Erwartungswerten y_{erw} bestimmbar:

$$y_{i,\text{aufb,min}}/y_{i,\text{aufb,max}} = y_{i,\text{erw}} \pm (u_{i,y} + u_{i,\text{erw}}) \quad (3.1)$$

wobei sowohl die Unsicherheit des Meßwertes $u_{i,y}$ als auch die Unsicherheit des Erwartungswertes $u_{i,\text{erw}}$ zu berücksichtigen sind.

Annahmen über die Meßunsicherheiten können der Tabelle 2.1 entnommen werden. $u_{i,\text{erw}}$ berücksichtigt einerseits die Unsicherheit infolge der nicht genauen Abbildung des tatsächlichen Betriebsverhaltens der Gasturbine im Synthesemodell, und andererseits die Unsicherheit infolge der Meßunsicherheiten der Größen, die als Randbedingungen zur Berechnung der Erwartungswerte benötigt werden. Der Wert von $u_{i,\text{erw}}$ ist mit großer Sorgfalt zu wählen, denn wenn der Wert zu gering ist, kann eine Abweichung im Betriebsverhalten einer Komponente als grober Meßfehler interpretiert werden. Wird der Wert dagegen zu hoch gewählt, so steigt die Wahrscheinlichkeit, daß grobe Meßfehler nicht erkannt werden und somit das Konvergenzverhalten des Verfahrens negativ beeinflusst wird.

Die Größen $u_{i,y}$ und $u_{i,\text{erw}}$ sind flexibel durch die Eingabe des Verfahrens vorgebar. Die Größen können als Konstante, als prozentuale Anteile von $y_{i,\text{erw}}$ oder als Kombination von beiden definiert werden. Weiterhin ist der Betriebspunkt der Gasturbine berücksichtigbar, wodurch der Erwartungsbereich für Leerlauf im Vergleich zu Vollast, z. B. aufgrund einer höheren Meßunsicherheit und eines qualitativ schlechteren Synthesemodells, größer gewählt werden kann.

Teilweise werden Meßwertkorrekturen, wie z. B. die Recovery-Korrektur von Temperaturmeßwerten, erst während der Leistungsanalyserrechnung durchgeführt. Diese sind vor der Festlegung des Erwartungsbereichs entsprechend auf den Erwartungswert anzuwenden. Der “unkorrigierte” Meßwert wird somit mit einem “unkorrigierten” Erwartungswert verglichen.

Aufbereitung von redundanten Meßgrößen

Damit im Fall von erkannten groben Meßfehlern ein alternatives Synthese- bzw. Analyseschema mit alternativen Meßgrößen benutzbar ist, müssen auch sämtliche redundanten Meßgrößen aufbereitet und überprüft werden. Typische redundante Meßgrößen sind z. B. :

- *Austrittstemperatur einer Turbine*,
wenn das Nebenstromverhältnis mit Hilfe einer Annahme über das Durchsatzverhalten einer Komponente im Haupt- oder Nebenstrom analysiert wird,
- *statischer Druck*,
wobei zu dessen Nutzung die effektive Querschnittsfläche der Meßebe-
kannt sein muß.

Bereitstellung von Ersatzgrößen

Wenn eine Meßgröße als fehlerhaft erkannt wird, so ist neben der Benutzung eines alternativen Synthese- bzw. Analyseschemas auch die Berücksichtigung eines Ersatzwerts für diese Meßgröße möglich. Ersatzwerte können hierbei aus folgenden Quellen stammen:

- Meßgrößen zur Regelung der Gasturbine
- Erwartungsgrößen

Hierbei sind gemessene Ersatzwerte den Erwartungswerten vorzuziehen.

Indikatoren

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wird im Steuermodul, abhängig vom Ausgang der Meßwertaufbereitung, ein entsprechendes Synthese- bzw. Analyseschema ausgewählt. Der Informationsaustausch zwischen den Meßwertaufbereitungsmodulen und dem Steuermodul geschieht mittels sogenannter Indikatoren. Mit diesen wird beschrieben, welche Meßgrößen "gültig" sind und für welche ein Ersatzwert benutzt wird. In Bild 3.3 ist schematisch dargestellt, wie die Indikatoren ermittelt werden.

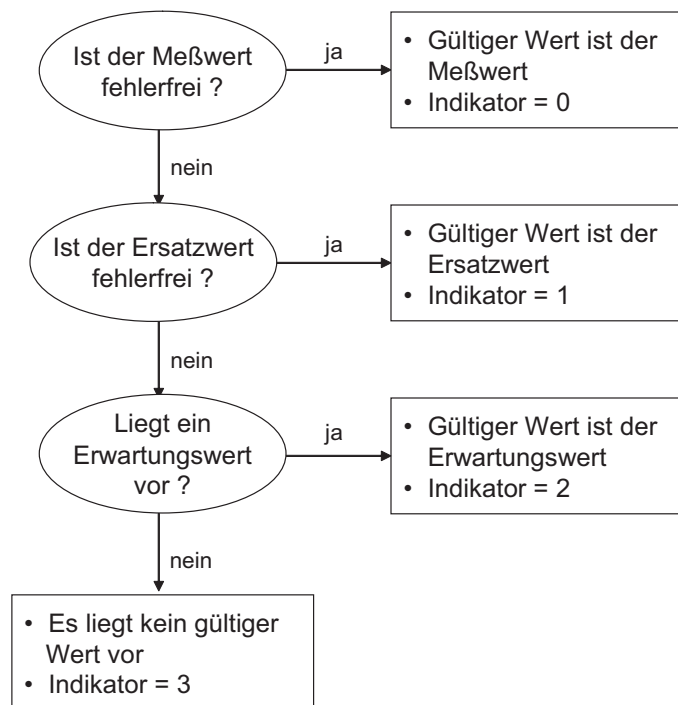


Bild 3.3: Ermittlung der Indikatoren der Meßwertaufbereitungsmodule

3.3.4 Vorgehensweise bei Ausfall von Meßgrößen

Auswahl der “gültigen” Synthese- und Analyseschemata

Die Auswahl des “gültigen” Synthese- bzw. Analyseschemas geschieht im Steuermodul, abhängig von den Indikatoren der Meßwertaufbereitungsmodule. Dabei ist zu entscheiden, ob das eigentliche vom Anwender vorgegebene Schema benutzbar ist oder ob ein alternatives Schema herangezogen werden muß. Dies kann folgendermaßen entschieden werden:

- *Indikator* ≤ 1 für alle Meßgrößen, die im eigentlichen Schema berücksichtigt werden.

In diesem Fall ist für jede Meßgröße ein gültiger Wert (Meßwert oder Ersatzmeßwert) vorhanden und das eigentliche vom Anwender vorgegebene Schema kann gewählt werden.

- *Indikator* > 1 für mindestens eine Meßgröße, die im eigentlichen Schema berücksichtigt wird.

Abhängig von den Indikatoren, die einen Wert > 1 aufweisen, wird ein alternatives Schema gewählt.

alternative Synthese- und Analyseschemata

Alternative Schemata unterscheiden sich von dem eigentlichen Schema in den berücksichtigten Meßgrößen und in den zur Analyse benutzten Annahmen über das Betriebsverhalten der Komponenten. Welche Meßgrößen und welche Annahmen über das Betriebsverhalten von Komponenten im alternativen Schema berücksichtigt werden, hängt maßgeblich vom Ziel des Versuchs und von der verfügbaren Instrumentierung in der Gasturbine ab. Im folgenden sollen deshalb nur einige Beispiele erläutert werden.

Beispiel 1: Berechnung der Erwartung - Ausfall von n_{ND}

Anstatt der gemessene Niederdruckdrehzahl n_{ND} kann als Randbedingung der Syntheserechnung der gemessene Brennstoffmassenstrom $\dot{m}_{\text{Bt,BK}}$ vorgegeben werden.

Beispiel 2: Analyse des Niederdruckverdichters - Ausfall von $T_{\text{t},13}$ (1)

Anstatt der gemessenen Temperatur $T_{\text{t},13}$ kann zur Analyse der spezifischen Arbeit des Außenstroms die gemessene Temperatur $T_{\text{t},6}$, unter Berücksichtigung des Leistungsgleichgewichts an der Niederdruckwelle, benutzt werden. Die Analyse des Nebenstromverhältnisses muß hierbei mit Hilfe einer Annahme über das Durchsatzverhalten einer Komponente im Haupt- oder Nebenstrom geschehen.

Beispiel 3: Analyse des Niederdruckverdichters - Ausfall von $T_{\text{t},13}$ (2)

Eine Alternative zu Beispiel 2 ist die spezifische Arbeit des Außenstroms nicht zu

analysieren, sondern die erwartete spezifische Arbeit (d. h. $M_{F,aa} = 1$) zu berücksichtigen.

Analyse mit Erwartungsgrößen

Aufgrund des Aufwands und der Sinnfälligkeit ist es unmöglich bzw. unnötig, für jede Kombination von ausgefallenen Meßgrößen ein entsprechendes alternatives Schema bereitzustellen. So ist bei einem Ausfall von bestimmten Meßgrößen das Versuchsziel nicht mehr erreichbar und somit sind die Meßdaten unbrauchbar. Folglich muß in einem solchen Fall bereits während der Versuchsdurchführung entsprechend gehandelt, also die Ursache hierfür ermittelt und behoben werden. Dies entspricht auch einer der Zielsetzungen dieser Arbeit, nämlich grobe Meßfehler bereits während der Versuchsdurchführung zu erkennen, damit entsprechend gehandelt werden kann (s. Kapitel 1.3). Um dennoch weiterhin die Überwachung des Zustands der Gasturbine zu gewährleisten, kann auf Basis der Erwartungswerte der ausgefallenen Meßgrößen analysiert werden.

3.3.5 Vorgabe von Schätzwerten

Gemäß Kapitel 3.2 werden Schätzwerte aus unterschiedlichen Quellen im Schätzwertefiltermodul verwaltet. Folgende Quellen von Schätzwerten sind bei einem automatisierten Einsatz des modellbasierten Analyseverfahrens verfügbar:

- **Schätzwerte zur Berechnung der Erwartung**

In Kapitel 2.1 wurde bereits das Schätzwertemodul für Syntheserechnungen behandelt, mit dem geeignete Schätzwerte, abhängig von den Umgebungs- und Lastbedingungen der Gasturbine, ermittelbar sind.

- **Schätzwerte zur modellbasierten Analyse**

Gemäß Kapitel 2.6 sind bei einer modellbasierten Analyse u. a. Modifizierer, Größen zur Festlegung von Referenzpunkten sowie weitere Größen aufgrund der Synthesemodellbildung iterativ zu ermitteln. Da das Synthesemodell, das der Analyse zugrundeliegt, in der Regel den “bestmöglichen” Kenntnisstand über das Betriebsverhalten der Gasturbine repräsentiert, sind folglich die “bestmöglichen” Schätzwerte für die Modifizierer $M_{F,X} = 1$ bzw. $M_{\Delta,X} = 0$. Für die weiteren Iterationsvariablen, wie z. B. das Nebenstromverhältnis μ oder β , mit dem der Referenzpunkt des Verdichters festgelegt wird, werden die berechneten Erwartungswerte dieser Größen als Schätzwerte vorgegeben.

- **Schätzwerte zur Korrektur auf Soll-Umgebungsbedingungen**

Da die Soll- und Ist-Umgebungsbedingungen in der Regel nicht stark unterschiedlich sind, werden die Schätzwerte unter der Annahme, daß die Werte der Machähnlichkeitsparameter der beiden Betriebspunkte unverändert bleiben, aus den zuvor analysierten Werten abgeleitet.

Wurde vor dem Meßpunkt ein Meßpunkt mit einem ähnlichen Betriebspunkt der Gasturbine analysiert, so sind alternativ die Ergebniswerte des jeweiligen Rechenpunktes des vorhergehenden Meßpunktes als Schätzwerte benutzbar. Dies ist z. B. der Fall, wenn zum Zweck der Überwachung des Zustands der Gasturbine und der Instrumentierung die Analyse zyklisch, d. h. mit einer vorgegebenen Frequenz, während des Versuchs gestartet wird. Bei der Verwendung dieser Schätzwerte werden bereits Kenntnisse über das tatsächliche Betriebsverhalten der Gasturbine berücksichtigt.

Dem Verfahren stehen folglich für jeden Rechenpunkt prinzipiell zwei Quellen zur Verfügung, aus denen die optimalen Schätzwerte auswählbar sind. Alle möglichen Schätzwerte der unterschiedlichen Quellen werden auf Eingabegrößen des Schätzwertefiltermoduls gespeichert. Die Auswahl der optimalen Schätzwerte für den aktuellen Meßpunkt und Rechenpunkt geschieht durch das entsprechende Setzen eines Schalters durch das Steuermodul (s. Kapitel 3.2). Die ausgewählten Werte werden dann entsprechend den Iterationsvariablen zugewiesen.

3.4 Einführung neuer Rechenwege zur Reduzierung der Anzahl der Iterationsvariablen

Gemäß Kapitel 2.5 werden die Modifizierer der modellbasierten Analyse mit Hilfe einer iterativen Berechnungsweise ermittelt. Die entsprechenden Verträglichkeitsbedingungen berücksichtigen die Fehler zwischen den aufbereiteten Meßwerten und die dazugehörigen berechneten Werte. Weiterhin wird die Einhaltung der Erhaltungsgleichungen gewährleistet (s. Tabelle 2.5). Die Berechnung wird u. a. aus folgenden Gründen iterativ durchgeführt:

- **Modularität**, wenn der Modifizierer und die entsprechende Verträglichkeitsbedingung nicht der gleichen Komponente angehören,
- **Recovery-Korrektur von Temperaturmeßwerten** (s. Kapitel 2.2.3),
- **Flexibilität** hinsichtlich der Wahl der Modifizierer und den in der Analyse zu berücksichtigenden Meßgrößen.

Wird ein Modifizierer nicht aufgrund der Modularität oder aufgrund der Recovery-Korrektur iterativ berechnet, so ist unter Umständen auch eine direkte Berechnungsweise möglich. Dabei würde die Anzahl der Iterationsvariablen reduziert und somit das Konvergenzverhalten des Verfahrens insgesamt verbessert werden. Im Folgenden wird beschrieben, wie in den bestehenden Berechnungsmodulen neue Rechenwege zur direkten Berechnung der Modifizierer und der entsprechenden Parameter der Komponenten integriert werden.

3.4.1 Anforderungen

Hinsichtlich der Rechenwege sind folgende Anforderungen zu stellen:

- Die Erweiterungen sollen unter Bewahrung der Modularität des Verfahrens durchgeführt werden.
- Die Flexibilität des modellbasierten Verfahrens hinsichtlich der Wahl der Modifizierer und der entsprechenden Veträglichkeitsbedingungen ist zu erhalten, d. h. die Modifizierer müssen weiterhin auch im Iterationsschema definierbar sein.
- Die Erweiterungen sind in der Weise durchzuführen, daß weiterhin identische Werte berechnet werden. Insbesondere darf keine vereinfachte Modellbildung eingebracht werden, wie es z. B. bei konventionellen online eingesetzten Analyseverfahren üblich ist.

3.4.2 Schematischer Ablauf der Rechenwege

Wie in Kapitel 2.5 erläutert, werden zur modellbasierten Analyse einer Komponente der Syntheserechenweg des Berechnungsmoduls unter Berücksichtigung der Modifizierer

$$X_{a,\text{ref}} = X_{\text{erw},\text{ref}} \cdot M_{F,X} \quad (3.2)$$

$$X_{a,\text{ref}} = X_{\text{erw},\text{ref}} + M_{\Delta,X} \quad (3.3)$$

benutzt. Hierbei sind die Modifizierer Eingabegrößen des Berechnungsmoduls. Anhand dieser und der Eintrittsgrößen des Hauptstroms werden die Parameter der Komponente analysiert sowie die Austrittsgrößen des Hauptstroms berechnet (s. Bild 3.4 a)).

Um eine direkte Berechnung der Modifizierer und der entsprechenden Parameter der Komponente zu ermöglichen, ist es erforderlich, daß sämtliche Meßgrößen, die zur Komponente gehören, Eingabegrößen des Berechnungsmoduls sind (s. Bild 3.4 b)). Da die Meßwerte von Eintrittsgrößen des Moduls vom Verfahren vorgegeben werden (Ebene 0), bzw. deren Werte sich aus der Analyse einer Komponente stromaufwärts zwangsläufig einstellen, ist deren Vorgabe nicht erforderlich.

Die Berechnung läuft in der Weise ab, daß zunächst entsprechend einer konventionellen Analyse die Parameter der Komponente X_a berechnet werden (s. Bild 3.4 c)). In einem nächsten Schritt werden diese Parameter auf die Referenzbedingungen der Basisbeziehungen der Komponente korrigiert. Daraufhin wird der Referenzpunkt für den Vergleich zur Erwartung, falls erforderlich auch iterativ, bestimmt. Basierend

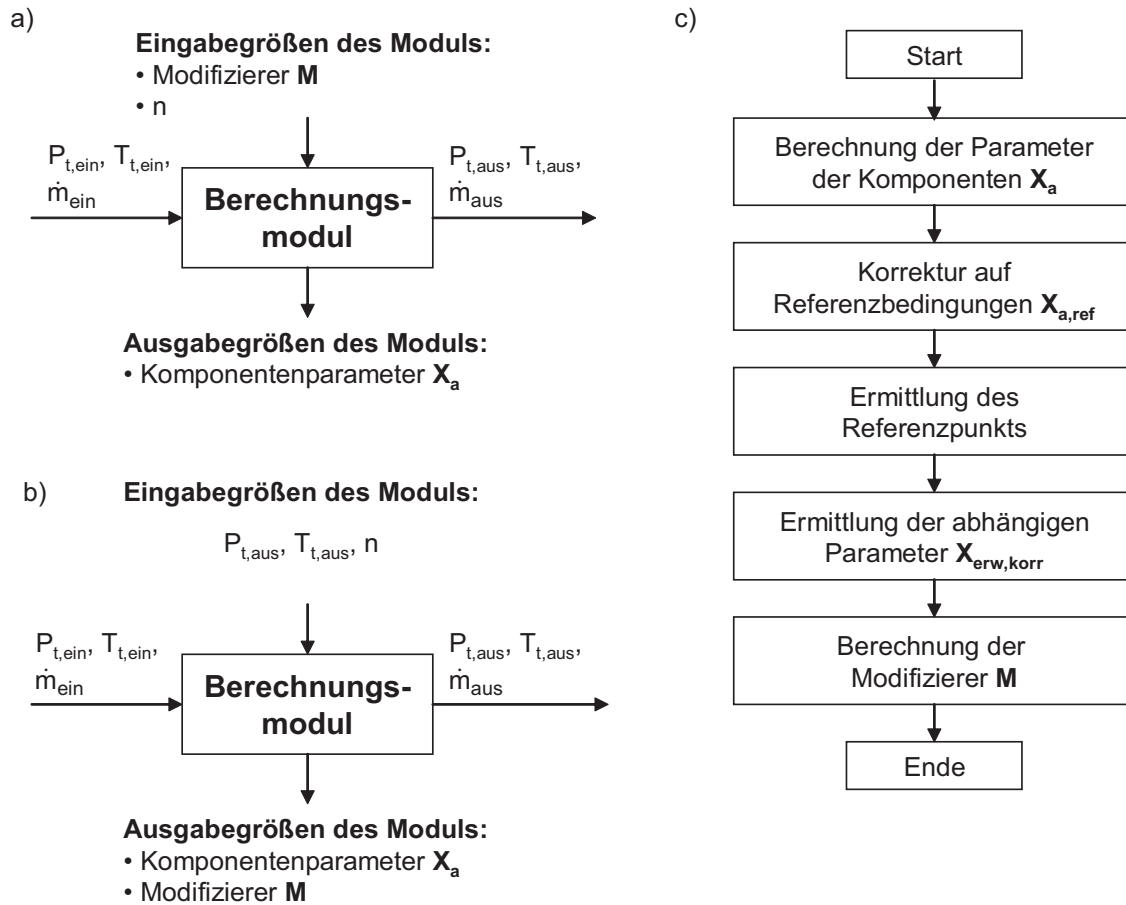


Bild 3.4: Ein- und Ausgabegrößen des alten (a) und des neuen (b) Rechenwegs sowie schematischer Ablauf des neuen Rechenwegs (c)

auf dem Referenzpunkt wird die Charakteristik der Komponente ausgewertet und die Erwartungswerte der abhängigen Parameter $X_{erw,ref}$ ermittelt. Die Modifizierer lassen sich dann mit

$$M_{F,X} = \frac{X_{a,ref}}{X_{erw,ref}} \quad (3.4)$$

$$M_{\Delta,X} = X_{a,ref} - X_{erw,ref} \quad (3.5)$$

direkt berechnen.

Damit die Vorteile des Rechenwegs auch nutzbar sind, wenn eine der Austrittsgrößen nicht gemessen wird, oder wenn eine Recovery-Korrektur der Austrittstemperatur durchzuführen ist, sind nicht die Austrittsgrößen Eingabegrößen des Berechnungsmoduls, sondern Schätzgrößen und Faktoren, die auf den Schätzgrößen basieren, wobei gilt:

$$p_{t,\text{aus}} = p_{t,\text{aus,schätz}} \cdot f_{p_{t,\text{aus,schätz}}} \quad (3.6)$$

$$T_{t,\text{aus}} = T_{t,\text{aus,schätz}} \cdot f_{T_{t,\text{aus,schätz}}} \quad (3.7)$$

Die Größen $p_{t,\text{aus,schätz}}$ und $T_{t,\text{aus,schätz}}$ werden in der Regel mit dem Meßwert belegt. Ist die Meßgröße zugleich die Austrittsgröße, so wird $f_{p_{t,\text{aus,schätz}}} = 1$ bzw. $f_{T_{t,\text{aus,schätz}}} = 1$ vorgegeben. Andernfalls wird der Faktor mit einer entsprechenden Verträglichkeitsbedingung im Iterationsschema aufgenommen. Der Rechenweg ist somit weiterhin nutzbar.

Beispiele:

- Recovery-Korrektur

Die Größe $T_{t,\text{aus,schätz}}$ wird mit der unkorrigierten gemessenen Temperatur belegt. Der Faktor $f_{T_{t,\text{aus,schätz}}}$ spiegelt folglich die Recovery-Korrektur wider und wird entsprechend im Iterationsschema berücksichtigt. Da der Korrekturwert in der Regel im Vergleich zum Wert der Temperatur gering ist, lässt sich der Faktor mit dem Wert 1 gut schätzen.

- Druckverluststrecke zwischen Austrittsebene der Komponente und Meßebe

Die Größe $p_{t,\text{aus,schätz}}$ wird mit dem gemessenen Druck belegt. Der Faktor $f_{p_{t,\text{aus,schätz}}}$ spiegelt folglich den Druckverlust zwischen der Austrittsebene und der Meßebe wider und wird entsprechend im Iterationsschema berücksichtigt. Da der Wert des Druckverlusts im Vergleich zum Wert des Drucks gering ist, lässt sich der Faktor $f_{p_{t,\text{aus,schätz}}}$ mit dem Wert 1 gut schätzen.

3.4.3 Beispiele von Erweiterungen

Zum besseren Verständnis der Erweiterungen werden diese beispielhaft für eine Druckverluststrecke, einen Verdichter sowie eine Turbine näher erläutert.

Kanäle (Druckverluststrecke)

Die Größen $p_{t,\text{aus,schätz}}$ und $f_{p_{t,\text{aus,schätz,aus}}}$ sind Eingabegrößen des Berechnungsmoduls, mit denen der Totaldruck in der Austrittsebene $p_{t,\text{aus}}$ ermittelt wird. Mit Hilfe $p_{t,\text{aus}}$ sowie den bekannten Drücken $p_{t,\text{ein}}$ und $p_{s,\text{ein}}$ der Eintrittsebene lässt sich daraufhin der Druckverlustbeiwert

$$\zeta_a = \frac{p_{t,\text{ein}} - p_{t,\text{aus}}}{p_{t,\text{ein}} - p_{s,\text{ein}}} \quad (3.8)$$

berechnen. Dem Synthesemodell liegt der Druckverlustbeiwert ζ_{erw} zugrunde, mit dem schließlich der entsprechende Modifizierer

$$M_{\Delta,\zeta} = \zeta_{a,\text{ref}} - \zeta_{\text{erw,ref}} \quad (3.9)$$

berechenbar ist.

Verdichter

Die Größen $p_{t,\text{aus,schätz}}$ und $T_{t,\text{aus,schätz}}$, sowie $f_{p_{t,\text{aus,schätz}}}$ und $f_{T_{t,\text{aus,schätz}}}$ sind Eingabegrößen des Berechnungsmoduls, mit denen sich $p_{t,\text{aus}}$ und $T_{t,\text{aus}}$ bestimmen lassen. Mit Hilfe der gegebenen Eintrittsgrößen und der gemessenen Drehzahl lassen sich die Parameter des Verdichters berechnen:

$$\Pi_a = \frac{p_{t,\text{aus}}}{p_{t,\text{ein}}} \quad (3.10)$$

$$a_{\text{red,a}} = \frac{h(T_{t,\text{aus}}) - h(T_{t,\text{ein}})}{T_{t,\text{ein}}} \quad (3.11)$$

$$\dot{m}_{\text{red,a}} = \frac{\dot{m}_{\text{ein}} \sqrt{T_{t,\text{ein}}}}{p_{t,\text{ein}}} \quad (3.12)$$

$$n_{\text{red,a}} = \frac{n}{\sqrt{T_{t,\text{ein}}}}. \quad (3.13)$$

Der isentrope Wirkungsgrad η_a lässt sich aus dem Druckverhältnis Π_a und der reduzierten Arbeit $a_{\text{red,a}}$ berechnen.

In einem nächsten Schritt erfolgt die Korrektur der Parameter auf die Referenzbedingungen des Basiskennfelds. Der Referenzpunkt für den Vergleich zur Erwartung wird mit den unabhängigen Parametern n_{red} und β festgelegt. Hierbei muß der Wert für β mittels einer iterativen Berechnungsweise ermittelt werden. Mit Hilfe des Kennfelds können Werte für $\Pi_{\text{erw,ref}}$, $\dot{m}_{\text{red,erw,ref}}$ und $\eta_{\text{erw,ref}}$ bestimmt sowie die entsprechenden Modifizierer

$$M_{F,\dot{m}_{\text{red}}} = \frac{\dot{m}_{\text{red,a,ref}}}{\dot{m}_{\text{red,erw,ref}}} \quad (3.14)$$

$$M_{F,\Pi} = \frac{\Pi_{a,\text{ref}} - 1}{\Pi_{\text{erw,ref}} - 1} \quad (3.15)$$

$$M_{F,\eta} = \frac{\eta_{a,\text{ref}}}{\eta_{\text{erw,ref}}} \quad (3.16)$$

berechnet werden.

Turbine

Die Größen $p_{t,\text{aus,schätz}}$ und $f_{p_{t,\text{aus,schätz}}}$ sind Eingabegrößen des Berechnungsmoduls, mit denen sich der Totaldruck in der Austrittsebene $p_{t,\text{aus}}$ bestimmen lässt. Mit Hilfe der gegebenen Eintrittsgrößen sowie unter Berücksichtigung der mechanischen Kopplung zwischen Verdichter und Turbine lassen sich die Parameter der Turbine berechnen:

$$\Pi_a = \frac{p_{t,\text{aus}}}{p_{t,\text{ein}}} \quad (3.17)$$

$$a_{\text{red,a}} = \frac{\alpha_{\text{Leistungsgleichgewicht}}}{T_{\text{t,ein}}} \quad (3.18)$$

$$\dot{m}_{\text{red,a}} = \frac{\dot{m}_{\text{ein}} \sqrt{T_{\text{t,ein}}}}{p_{\text{t,ein}}} \quad (3.19)$$

$$n_{\text{red,a}} = \frac{n_{\text{Drehzahlgleichheit}}}{\sqrt{T_{\text{t,ein}}}}. \quad (3.20)$$

Der isentrope Wirkungsgrad η_a lässt sich aus dem Druckverhältnis Π_a und der reduzierten Arbeit $a_{\text{red,a}}$ berechnen.

In einem nächsten Schritt werden die Parameter auf die Referenzbedingungen des Basiskennfelds korrigiert. Mit Hilfe des Kennfelds werden basierend auf dem Referenzpunkt, der durch die Parameter $n_{\text{red,a,ref}}$ und $a_{\text{red,a,ref}}$ definiert ist, Werte für $\eta_{\text{erw,ref}}$ und $\dot{m}_{\text{red,erw,ref}}$ ermittelt. Daraufhin erfolgt die Berechnung des Modifizierers

$$M_{\text{F},\eta} = \frac{\eta_{\text{a,ref}}}{\eta_{\text{erw,ref}}}. \quad (3.21)$$

Wird $\dot{m}_{\text{red,erw,ref}}$ weder zur Ermittlung des Nebenstromverhältnisses noch zur Analyse des Wirkungsgrads der Hochdruckturbinen benötigt, so wird weiterhin der Modifizierer

$$M_{\text{F},\dot{m}_{\text{red}}} = \frac{\dot{m}_{\text{red,a,ref}}}{\dot{m}_{\text{red,erw,ref}}} \quad (3.22)$$

ermittelt.

3.4.4 Reduziertes Iterationsschema

In Tabelle 3.3 ist das in Tabelle 2.5 gezeigte Analyseschema mit einer reduzierten Anzahl von Iterationsvariablen dargestellt. Es sind zum einen Faktoren, die auf den Austrittstemperaturen der Verdichter basieren, aufgrund der Recoverykorrektur iterativ zu berechnen. Zum anderen wird zur Analyse des Wirkungsgrads bzw. des Druckverhältnisses der Hochdruckturbinen anstatt einer Druckmessung im Austritt der Komponente eine Annahme über das Durchsatzverhalten der Niederdruckturbinen benutzt. Folglich muß der Faktor $f_{p_{\text{t},45,\text{schätz}}}$ als Iterationsvariable berücksichtigt werden. Da zur Belegung von $p_{\text{t},45,\text{schätz}}$ kein Meßwert zur Verfügung steht, ist der zuvor berechnete Erwartungswert zu benutzen. Dies gilt in gleicher Weise zur Analyse des Druckverlusts im Nebenstromkanal, bei der auch kein gemessener Totaldruck in der Austrittsebene zur Verfügung steht.

Neben den in Tabelle 3.3 gezeigten Faktoren als Iterationsvariable können selbstverständlich weiterhin auch Modifizierer als Iterationsvariable definiert werden. Die Flexibilität des Verfahrens ist somit gewährleistet.

direkte Vorgabe von Meßgrößen zur Festlegung des Betriebspunkts der Gasturbine	$p_{t,0}$
	$T_{t,0}$
	x_0
	$p_{s,09}$
	α_{Le}
	$\dot{m}_{Br,BK}$
	$\dot{m}_{Br,NBK}$
	$T_{Br,BK}$
	$T_{Br,NBK}$
	H_u
	A_8 und A_9
	P_{ex}
	\dot{m}_{Bl}
direkte Vorgabe von Meßgrößen	n_{ND}
	n_{HD}
	\dot{m}_0
	$p_{t,21}$
	$p_{t,12}$
	$p_{t,29}$
	$p_{t,59}$
Iterationsvariablen	Verträglichkeitsbedingungen
$f_{T_{t,21},schätz}$	$\Delta T_{t,21}/T_{t,21,gem}$
$f_{T_{t,12},schätz}$	$\Delta T_{t,12}/T_{t,12,gem}$
$f_{T_{t,29},schätz}$	$\Delta T_{t,29}/T_{t,29,gem}$
$f_{p_{t,45},schätz}$	$\Delta \dot{m}_{45}/\dot{m}_{45}$
$f_{p_{t,16},schätz}$	$\Delta p_{t,161}/p_{t,161}$
μ	$\Delta \dot{m}_4/\dot{m}_4$
$p_{s,64}/p_{t,6}$	$\Delta p_{s,64}/p_{s,64}$
$p_{s,66}/p_{t,6}$	$\Delta p_{s,66}/p_{s,66}$

Tabelle 3.3: Randbedingungen, Vorgabe von Meßgrößen und Iterationsschema mit dem erweiterten Verfahren

3.5 Anbindung des Verfahrens an ein Prüfstandsprogramm

Bei neuen Generationen von Systemen zur Datenerfassung an Prüfständen wird auf Basis immer leistungsfähigerer Rechner die Versuchsdurchführung und Versuchsüberwachung vereinfacht (s. [40]). Hierbei sind die Schwerpunkte insbesondere die Visualisierung von Daten sowie der Einsatz von Programmen zur online-Auswertung von Meßdaten.

Ein solches System ist in [38] und [39] beschrieben und übernimmt folgende Aufgaben:

- Schnittstelle zur Meßwerterfassungshardware,
- Aufbereitung der rohen Meßdaten,
- Auswertung der Daten,
- Visualisierung der Daten,
- Überwachung von Daten mit Alarmauslösung und
- Archivierung der Daten.

Das dem System zugrunde liegende Programm wird auf einem herkömmlichen PC unter dem Betriebssystem Windows XP eingesetzt.

Für den automatisierten Betrieb des modellbasierten Analyseverfahrens während der Versuchsdurchführung wurde eine Schnittstelle zwischen dem Leistungsberechnungsprogramm und dem Prüfstandsprogramm entwickelt. Das Leistungsberechnungsprogramm wird hierbei als Programmroutine in Form einer *Dynamic Link Library (DLL)* zur Verfügung gestellt. Anstatt des Lesens der Meßwerte von einer Datenbank, werden diese nun über die Schnittstelle an das Analyseverfahren übergeben (s. Bild 3.5). Nach der Analyse werden die Ergebnisse an das Prüfstandsprogramm zur Visualisierung, Überwachung und Archivierung zurückübergeben.

Das Prüfstandsprogramm kann das Analyseverfahren in den folgenden zwei unterschiedlichen Betriebsmodi aufrufen:

- **zyklisch:** automatisierter Aufruf des Analyseverfahrens mit einer fest vorgegebenen Frequenz (z. B. 4 Hz),
- **statisch:** automatisierter Aufruf des Analyseverfahrens bei der Aufnahme eines Meßpunktes.

Während die zyklische Analyse primär zur Überwachung und zum Anfahren von nicht direkt gemessenen Größen genutzt wird, dient die statische Analyse zur Auswertung derjenigen Meßdaten, die bisher auch offline analysiert wurden.

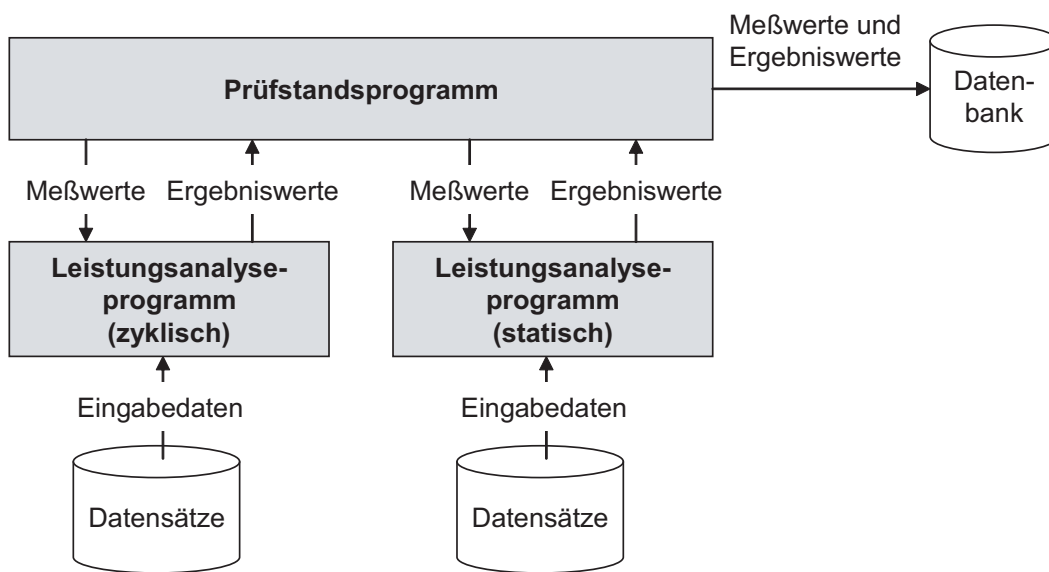


Bild 3.5: Anbindung des Leistungsanalyseprogramms an das Prüfstandsprogramm

4 Erkennung von Fehlfunktionen mittels der modellbasierten Leistungsanalyse

Aufgrund der implementierten Plausibilitätsüberprüfungen der Meßwerte und dem Vergleich zum erwarteten Betriebsverhalten der Gasturbine eignet sich ein modellbasiertes Analyseverfahren auch zur Überwachung des Zustands der Instrumentierung und der Gasturbine während Versuchsdurchführungen. Im Folgenden wird dargestellt, wie anhand der Ergebnisse dieses Verfahrens Fehlfunktionen der Gasturbinenkomponenten und grobe Meßfehler erkennbar sind.

4.1 Ergebnisse der modellbasierten Analyse

4.1.1 Erkannte grobe Meßfehler

Mit den in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Plausibilitätsüberprüfungen (Bereichsüberprüfung, Grob- und Feinfilterung) lassen sich einzelne Meßwerte y_i erkennen, die einen groben Meßfehler enthalten. Wie in Kapitel 3.1 gezeigt, versagen diese Verfahren jedoch unter bestimmten Umständen.

Mit der in Kapitel 3.3.3 eingeführten Plausibilitätsüberprüfung wird weiterhin der aufbereitete Meßwert y_{aufb} mit dessen Erwartungswert verglichen. Anstatt eines einzelnen Meßwertes y_i erkennt diese Überprüfung einen komplett aufbereiteten Meßwert als fehlerhaft. Da der Erwartungswert mit einem Synthesemodell berechnet wird, welches nicht das tatsächliche Betriebsverhalten der Gasturbine genau abbildet, ist für die Überprüfung eine Unsicherheit des Erwartungswerts zu berücksichtigen. Daher sind nur vom Betrag her hohe grobe Meßfehler erkennbar.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß mit den vorhandenen Plausibilitätsüberprüfungen nicht sämtliche grobe Meßfehler mit Sicherheit erkennbar sind.

4.1.2 Abweichungen von der Erwartung

Das analysierte Betriebsverhalten der Gasturbinenkomponenten läßt sich mittels der berechneten Modifizierer bewerten. Abweichungen von der Erwartung können

aus einer Vielzahl von Gründen verursacht werden. Einige sind nachfolgend exemplarisch aufgeführt:

Tatsächliche Abweichung im Betriebsverhalten einer Komponente

Abweichungen zwischen dem tatsächlichen und dem erwarteten Betriebsverhalten von Komponenten können sowohl aufgrund einer ungenauen Abbildung des Betriebsverhaltens im Synthesemodell als auch aufgrund von Bauteilproblemen, welche Rückwirkungen auf das Betriebsverhalten der Komponenten haben, entstehen (s. Kapitel 1.2).

- **Abweichungen infolge einer ungenauen Abbildung des Betriebsverhaltens im Synthesemodell**

Die Güte der Abbildung des Betriebsverhaltens von Komponenten im Synthesemodell wird limitiert durch die Güte der Berechnungsverfahren, die zur Erzeugung der Daten angewandt werden. Weiterhin wird die Güte durch Limitierungen bei Komponentenversuchen festgelegt. Dabei sind zu berücksichtigen ([25], [35]):

- Änderungen der Geometrie der Turbomaschinen (Radialspalte, Schaufelverwindung, durchströmte Querschnitte),
- variable Luftentnahmeströme im Verdichter sowie variable Kühlluftströme in der Turbine,
- Einflüsse des Isentropenexponenten und der Reynoldszahl auf die Ähnlichkeitskennfelder von Turbomaschinen und
- Einflüsse ungleichförmiger Druck- und Temperaturverteilungen am Eintritt einer Komponente.

Zudem sind Abweichungen vom erwarteten Betriebsverhalten durch Streuungen in der Produktion und Montage zu berücksichtigen.

- **Abweichungen infolge von Bauteilproblemen**

Bauteilprobleme lassen sich in

- *vermeidbare Fehlfunktionen*, die sich in einem eng begrenzten Zeitraum entwickeln sowie in
- *unvermeidbare Alterungsprozesse*, die sich über einen langen Zeitraum langsam entwickeln, wie z. B. Erosion, Korosion, Verschmutzung, Ablagerungen, Dichtungsverschleiß usw. (s. [44], [72])

unterscheiden. In Turbomaschinen bewirken diese u. a. Vergrößerungen der Radialspalte, Änderungen der Schaufelgeometrien sowie Änderungen der Oberflächenqualität (s. [34]).

Grober Meßfehler

Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, sind nur vom Wert her hohe grobe Meßfehler mit Sicherheit erkennbar. Daher besteht die Möglichkeit, daß der Vergleich zu der Erwartung durch nicht erkannte grobe Meßfehler verfälscht wird.

4.2 Vorgehensweise zur Erkennung von Fehlfunktionen

Für eine zuverlässige Überwachung des Zustands der Gasturbine und der Instrumentierung ist es erforderlich, auftretende Fehlfunktionen zu erkennen und diese Komponenten oder Meßgrößen zu zuordnen. Diese Anforderungen sind von dem in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren nicht erfüllbar. Denn nach Kapitel 4.1 verursachen neben Fehlfunktionen auch ein “ungenaueres” Synthesemodell oder Alterungsprozesse Abweichungen von der Erwartung. Weiterhin sind nicht alle groben Meßfehler mit Hilfe der Plausibilitätsüberprüfungen identifizierbar.

Dennoch sind die Ursachen von Abweichungen vom erwarteten Betriebsverhalten hinsichtlich ihres zeitlichen Verlaufs und hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Modifizierer unterscheidbar. So bleiben Abweichungen infolge eines “ungenauen” Synthesemodells und infolge von Alterungsprozessen während des Versuchs unverändert bzw. sie entwickeln sich sehr langsam, während Abweichungen infolge einer Fehlfunktion in einem eng begrenzten Zeitraum entstehen. Zur Identifizierung von Fehlfunktionen sind daher die relativen Änderungen der Werte der Modifizierer zu Referenzwerten zu betrachten. Als Referenzwerte können Werte von Modifizierern eines “kurz” zuvor analysierten Meßpunkts eines ähnlichen Betriebspunktes der Gasturbine dienen. Dabei bedeutet “kurz” einen Zeitraum, in dem sowohl abrupt auftretende als auch langsam veränderliche Fehlfunktionen (wie z. B. Driftfehler von Meßgrößen) erkennbar sind.

Hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Modifizierer verhalten sich Fehlfunktionen der Komponenten und der Instrumentierung unterschiedlich (s. Kapitel 4.1). Eine tatsächliche Abweichung im Betriebsverhalten einer Komponente wirkt sich ausschließlich in den entsprechenden Modifizierern dieser Komponente aus (s. Kapitel 2.4.1). Ein grober Meßfehler beeinflusst dagegen ausschließlich diejenigen Modifizierer, zu deren Bildung die fehlerhafte Meßgröße benötigt wird. Hierbei sind durch die aerothermodynamischen und mechanischen Kopplungen in der Regel Modifizierer von unterschiedlichen Komponenten betroffen. So verfälscht eine fehlerhafte Druckmessung zwischen den Komponenten Nieder- und Hochdruckverdichter die berechneten Druckverhältnisse und entsprechend die Modifizierer beider Komponenten. Es ist folglich möglich, für unterschiedliche Fehlfunktionen charakteristische Signaturen in den relativen Änderungen der Werte der Modifizierer (positive Änderung +,

keine Änderung 0, negative Änderung -) zu ermitteln, die umgekehrt zur Identifizierung einer Fehlfunktion verwendbar sind. Solche Signaturen sind u. a. leicht in ein Expertensystem implementierbar. Da die Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Auftretens von mehreren Fehlfunktionen gering ist, ist die Ermittlung von Signaturen von jeweils einer Fehlfunktion ausreichend.

Die Ermittlung der charakteristischen Signaturen von unterschiedlichen Fehlfunktionen wird in den folgenden Abschnitten beispielhaft für das in dieser Arbeit behandelte Turboluftstrahltriebwerk vorgestellt. Die Referenzwerte der Modifizierer sind dabei 1 bzw. 0.

4.3 Erkennung von Fehlfunktionen des Verdichters

Für die exemplarische Analyse eines Verdichters wird angenommen, daß zur Berechnung seiner Leistungsparameter fast ausschließlich Meßgrößen in der Ein- und Austrittsebene benutzt werden. Folglich sind die möglichen Ursachen von Abweichungen vom erwarteten Betriebsverhalten auf eine Fehlfunktion des Verdichters sowie auf eine fehlerhafte zur Analyse benötigte Meßgröße eingrenzbar. Der Hochdruckverdichter eines Zweistromtriebwerks bildet dabei eine Ausnahme, da dessen Massenstrom nicht gemessen wird (s. Kapitel 2.3.1).

Für eine Fehlfunktion des Verdichters kann angenommen werden, daß sich sämtliche Beziehungen zwischen den Parametern des Verdichters ändern (s. [24], [30], [62], [65]). Ein grober Meßfehler wirkt sich dagegen nicht auf die tatsächlichen Beziehungen zwischen den Parametern des Verdichters aus. Es werden lediglich diejenigen Parameter "verfälscht", zu deren Bildung die fehlerhafte Meßgröße benutzt wird. Wird für den Vergleich zu der Erwartung der Referenzpunkt nur mit "unverfälschten" Parametern festgelegt, so manifestiert sich der grobe Meßfehler nur in den Werten derjenigen Modifizierer, die auf den "verfälschten" Parametern basieren. Somit ist es möglich, durch eine geschickte Wahl der Modifizierer sowie der Parameter zur Festlegung des Referenzpunktes eine eindeutige Signatur in den Werten der Modifizierer für jede fehlerhafte Meßgröße zu ermitteln.

Wird eine Änderung in den Werten der Modifizierer erkannt, so ist der Vergleich zu der Erwartung mehrmals mit jeweils unterschiedlichen Vergleichsmethoden durchzuführen. Die für jede Vergleichsmethode ermittelte Signatur in den Werten der Modifizierer ist mit den für fehlerhafte Meßgrößen charakteristischen Signaturen zu vergleichen. Ergibt sich eine Übereinstimmung in den Signaturen, so ist dies ein Hinweis auf einen groben Meßfehler der entsprechenden Größe. Da ein solcher in der Regel ebenfalls Parameter anderer Komponenten "verfälscht", kann der Hinweis bei der Analyse weiterer Komponenten bestätigt werden. Ergibt sich dagegen keine

Übereinstimmung in den Signaturen, so ist dies ein Hinweis auf eine Fehlfunktion des Verdichters.

Im Folgenden werden geeignete Vergleichsmethoden erläutert sowie ihre Anwendung zur Analyse des Nieder- und Hochdruckverdichters näher beschrieben.

4.3.1 Vergleichsmethoden

Eine Vergleichsmethode ist durch die Parameter, die den Referenzpunkt festlegen, charakterisiert. Bei der Wahl dieser Parameter ist zu beachten, daß der Referenzpunkt eindeutig im Verdichterkennfeld festlegbar ist. In Kapitel 2.4.1 wurde bereits eine geeignete Vergleichsmethode für den Verdichter erläutert. Der Einsatz dieser Methode ist allerdings nicht zwingend, so daß zur Festlegung des Referenzpunktes auch andere Parameter des Verdichters verwendbar sind.

Im Folgenden werden unterschiedliche Vergleichsmethoden erläutert, mit denen sich charakteristische Signaturen in den Werten der Modifizierer für unterschiedliche fehlerhafte Meßgrößen ableiten lassen. Im Gegensatz zu der im Kapitel 2.4.1 vorgestellten Vergleichsmethode werden die Referenzpunkte ausschließlich mit Ähnlichkeitsparametern und nicht mit dem Hilfsparameter β gebildet. Somit werden anstatt drei nur zwei Modifizierer benötigt, um das analysierte Betriebsverhalten des Verdichters komplett zu beschreiben.

Vergleichsmethode I: Referenzpunkt gebildet mit Π_a und $\dot{m}_{\text{red},a}$

In Bild 4.1 a) ist der Ausschnitt eines Verdichterkennfeldes dargestellt, in dem die reduzierte Arbeit und das Druckverhältnis über dem reduzierten Eintrittsmassenstrom für Linien konstanter reduzierter Drehzahlen aufgetragen sind. Weiterhin ist ein Referenzpunkt eingezeichnet, der mit den analysierten Werten für den reduzierten Eintrittsmassenstrom und dem Druckverhältnis gebildet ist. Dieser läßt sich immer eindeutig im Kennfeld festlegen.

Da der Referenzpunkt unabhängig von den Größen n und $T_{t,\text{aus}}$ ist, beeinflussen grobe Meßfehler dieser Größen ausschließlich die zu bestimmenden Modifizierer. Werden für den Vergleich zu der Erwartung die Modifizierer $M_{F,n_{\text{red}}}$ und $M_{F,a_{\text{red}}}$ gewählt, so lassen sich grobe Meßfehler von n und $T_{t,\text{aus}}$ unterscheiden. Wie in Bild 4.1 a) dargestellt, gilt für einen fehlerhaften Meßwert von n :

$$M_{F,n_{\text{red}}} \neq 1 \text{ und } M_{F,a_{\text{red}}} = 1. \quad (4.1)$$

Weiterhin gilt für einen fehlerhaften Meßwert von $T_{t,\text{ein}}$ (s. Bild 4.1 b)):

$$M_{F,n_{\text{red}}} = 1 \text{ und } M_{F,a_{\text{red}}} \neq 1. \quad (4.2)$$

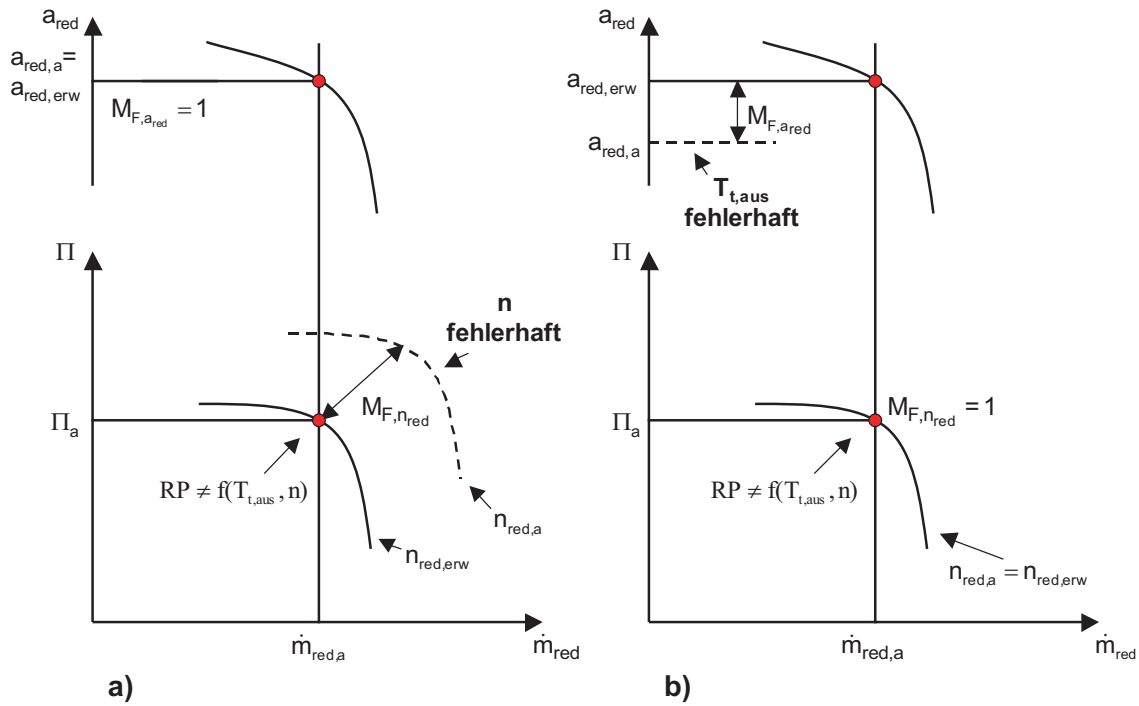


Bild 4.1: Auswirkungen von groben Meßfehlern in den Größen n (a) und $T_{t,aus}$ (b) bei der Vergleichsmethode I

Vergleichsmethode II: Referenzpunkt gebildet mit $n_{red,a}$ und $(\frac{\Delta h}{n^2})_a$

Neben den Parametern Π und η lassen sich die Zustandsänderungen über den Verdichter hinweg auch mit den Parametern Π und $\Delta h/n^2$ beschreiben. In Bild 4.2 a) ist das Druckverhältnis über den reduzierten Eintrittsmassenstrom für eine Linie $n_{red} = konst.$ dargestellt. Weiterhin ist eine Linie für $\Delta h/n^2 = konst.$ eingezeichnet, wobei gilt:

$$\frac{\Delta h}{n^2} = \frac{\Delta h}{T} \left(\frac{\sqrt{T}}{n} \right)^2 = \frac{a_{red}}{n_{red}^2} \quad (4.3)$$

mit

$$\frac{\Delta h}{T} = f(\Pi, \eta) \quad (4.4)$$

Für $\Delta h/n^2 = konst.$ steigen bei steigender reduzierter Drehzahl n_{red} die spezifische Arbeit a_{red} und entsprechend das Druckverhältnis. Wird der Verdichter für $n_{red} = konst.$ angedrosselt, so steigt das Druckverhältnis bzw. die spezifische Arbeit und somit $\Delta h/n^2$. Ein mit n_{red} und $\Delta h/n^2$ festgelegter Betriebspunkt ist damit im "normalen" Betriebsbereich des Verdichters eindeutig.

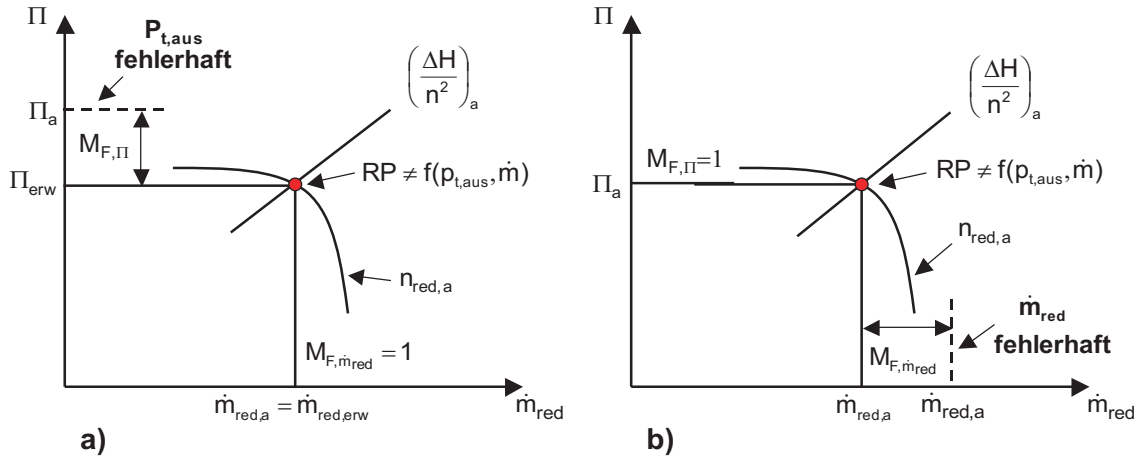


Bild 4.2: Auswirkungen eines groben Meßfehlers in $p_{t,aus}$ (a) und in \dot{m} (b) bei der Vergleichsmethode II

Da der Referenzpunkt unabhängig von den Größen \dot{m} , $p_{t,ein}$ und $p_{t,aus}$ ist, beeinflussen grobe Meßfehler dieser Größen ausschließlich die zu bestimmenden Modifizierer. Werden für den Vergleich zu der Erwartung die Modifizierer $M_{F,\dot{m}_{red}}$ und $M_{F,\Pi}$ gewählt, so lassen sich grobe Meßfehler der Größen \dot{m} und $p_{t,aus}$ unterscheiden. Wie in Bild 4.2 a) dargestellt, wirkt sich ein fehlerhafter Meßwert von $p_{t,aus}$ folgendermaßen aus:

$$M_{F,\dot{m}_{red}} = 1 \text{ und } M_{F,\Pi} \neq 1. \quad (4.5)$$

Weiterhin gilt für einen fehlerhaften Meßwert von \dot{m} (s. Bild 4.2 b)):

$$M_{F,\dot{m}_{red}} \neq 1 \text{ und } M_{F,\Pi} = 1. \quad (4.6)$$

Vergleichsmethode III: Referenzpunkt gebildet mit $n_{red,aus,a}$ und $\dot{m}_{red,aus,a}$

Das Betriebsverhalten eines Verdichters lässt sich u. a. mit den Parametern reduzierte Arbeit und Druckverhältnis sowie den mit Drehzahl und Durchsatz gebildeten Parametern

$$n_{red,aus} = \frac{n}{\sqrt{T_{t,aus}}} \quad (4.7)$$

$$\dot{m}_{red,aus} = \frac{\dot{m}_{aus} \sqrt{T_{t,aus}}}{p_{t,aus}} \quad (4.8)$$

beschreiben.

In Bild 4.3 a) ist der Ausschnitt eines Verdichterkennfelds dargestellt, in dem die reduzierte Arbeit und das Druckverhältnis über $\dot{m}_{\text{red,aus}}$ für eine Linie $n_{\text{red,aus}} = \text{konst.}$ aufgetragen ist. Nach [47] beschreibt der Parameter $\dot{m}_{\text{red,aus}}$ die Drosselung des Verdichters. Wird der Verdichter für $n_{\text{red,aus}} = \text{konst.}$ angedrosselt, d. h. der reduzierte Austrittsmassenstrom $\dot{m}_{\text{red,aus}}$ sinkt, so steigen die reduzierte Arbeit bzw. das Druckverhältnis. Da im Gegensatz zur herkömmlichen Kennfelddarstellung bei der Entdrosselung des Verdichters der reduzierte Austrittsmassenstrom auch steigt, wenn eine Querschnittsfläche im Verdichter kritisch durchströmt wird, ist ein mit diesen Parametern festgelegter Betriebspunkt eindeutig.

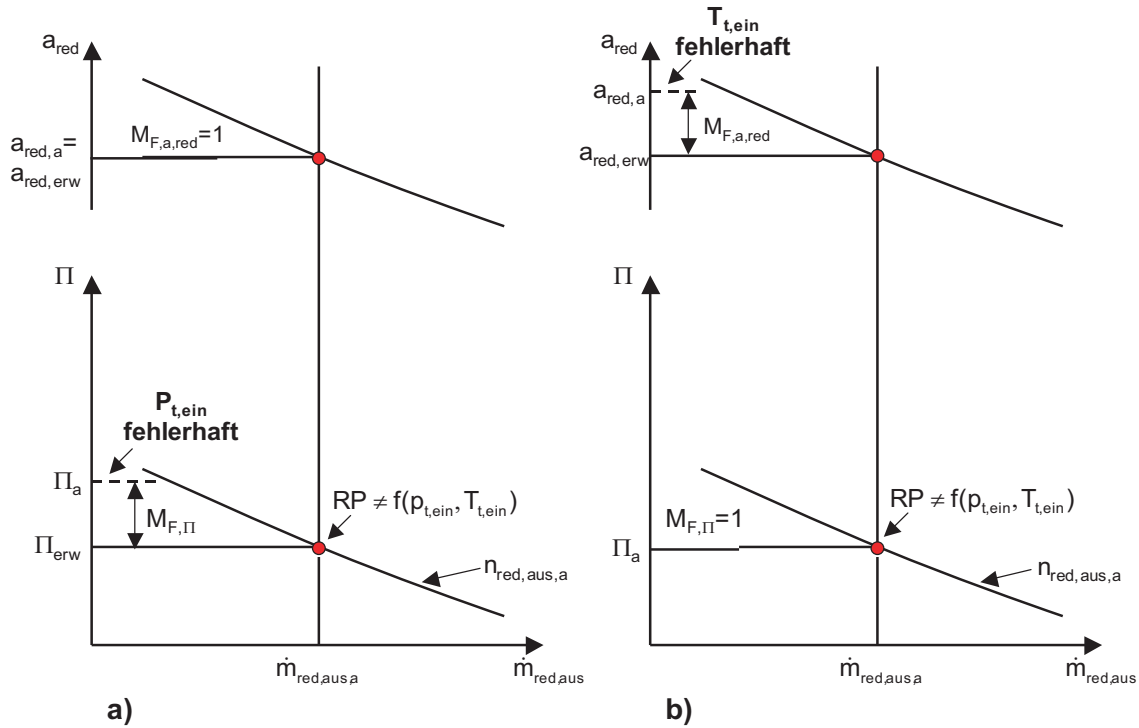


Bild 4.3: Auswirkungen eines groben Meßfehlers in $p_{t,\text{ein}}$ (a) und $T_{t,\text{ein}}$ (b) bei der Vergleichsmethode III

Da der Referenzpunkt unabhängig von den Größen $p_{t,\text{ein}}$ und $T_{t,\text{ein}}$ ist, beeinflussen grobe Meßfehler dieser Größen ausschließlich die zu bestimmenden Modifizierer. Werden für den Vergleich zu der Erwartung die Modifizierer $M_{F,\Pi}$ und $M_{F,a,\text{red}}$ gewählt, so lassen sich grobe Meßfehler von $p_{t,\text{ein}}$ und $T_{t,\text{ein}}$ unterscheiden. Wie in Bild (s. Bild 4.3 a)) dargestellt, wirkt sich ein fehlerhafter Meßwert von $p_{t,\text{ein}}$ folgendermaßen aus:

$$M_{F,\Pi} \neq 1 \text{ und } M_{F,a,\text{red}} = 1. \quad (4.9)$$

Weiterhin gilt für einen fehlerhaften Meßwert von $T_{t,\text{ein}}$ (s. Bild 4.3 b)):

$$M_{F,\Pi} = 1 \text{ und } M_{F,a_{\text{red}}} \neq 1. \quad (4.10)$$

4.3.2 Erkennung von Fehlfunktionen des Niederdruckverdichters

Für den Niederdruckverdichter werden die Zustandsänderungen des Haupt- und Nebenstroms getrennt voneinander behandelt (s. Kapitel 2.1.1). Folglich wird das Betriebsverhalten des Niederdruckverdichters vollständig mit zwei unabhängigen und vier abhängigen Parametern beschrieben (z. B. n_{red} , \dot{m}_{red} , Π_{H} , Π_{N} , a_{H} und a_{N}). Zur Analyse der Parameter werden die Größen n , \dot{m} , $T_{t,2}$, $p_{t,2}$, $T_{t,25}$, $p_{t,25}$, $T_{t,13}$ und $p_{t,13}$ gemessen (s. Bild 4.4). Für die modellbasierte Analyse müssen - basierend auf einem Referenzpunkt - vier Modifizierer ermittelt werden, um komplett das analysierte Betriebsverhalten des Niederdruckverdichters zu beschreiben.

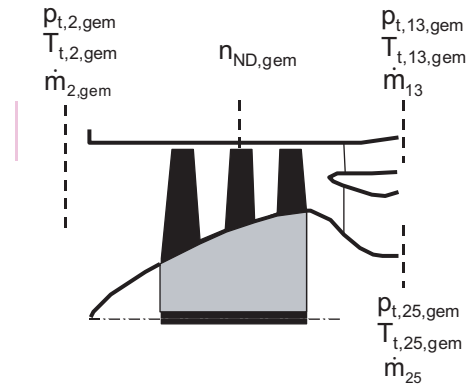


Bild 4.4: Längsquerschnitt des Niederdruckverdichters mit Ein- und Austrittsgrößen

In Tabelle 4.1 sind abgeleitete Signaturen von fehlerhaften Meßgrößen für die drei in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Vergleichsmethoden dargestellt. Die Referenzpunkte werden hierbei jeweils mit Parametern des Hauptstroms festgelegt. Alternativ sind auch Parameter des Nebenstroms oder die über beide Austritte gemittelten Parameter (s. [47]) verwendbar. Wie aus den grau hinterlegten Spalten der Tabelle 4.1 ersichtlich, hat jede mögliche fehlerhafte Meßgröße für einen bestimmten Referenzpunkt eine Signatur, bei der einzelne Werte der Modifizierer unbeeinflusst bleiben (0). Anhand der Tendenzen der anderen Modifizierer (+/-) läßt sich weiterhin ableiten, ob der fehlerhafte Meßwert zu hoch oder zu gering ist.

Fehlerhafte Meßgröße	Referenzpunkt $\mathbf{n}_{\text{red}}, (\Delta\mathbf{h}/\mathbf{n}^2)_{\text{H}}$				Referenzpunkt $\Pi_{\text{H}}, \dot{\mathbf{m}}_{\text{red}}$			
	$M_{\text{F},\Pi_{\text{H}}}$	$M_{\text{F},\dot{\mathbf{m}}_{\text{red}}}$	$M_{\text{F},\Pi_{\text{N}}}$	$M_{\text{F},\mathbf{a}_{\text{N}}}$	$M_{\text{F},\Pi_{\text{red}}}$	$M_{\text{F},\mathbf{a}_{\text{H}}}$	$M_{\text{F},\Pi_{\text{N}}}$	$M_{\text{F},\mathbf{a}_{\text{N}}}$
$p_{t,0}$ +	-	-	-	0	+	+/-	+/-	+/-
$p_{t,0}$ -	+	+	+	0	-	+/-	+/-	+/-
$p_{t,13}$ +	0	0	+	0	0	0	+	0
$p_{t,13}$ -	0	0	-	0	0	0	-	0
$p_{t,25}$ +	+	0	0	0	-/0	+/-	-	+/-
$p_{t,25}$ -	-	0	0	0	+/0	+/-	+	+/-
$T_{t,0}$ +	+	+/-	+	+/-	-	+/-	+/-	+/-
$T_{t,0}$ -	-	+/-	-	+/-	+	+/-	+/-	+/-
$T_{t,13}$ +	0	0	0	+	0	0	0	+
$T_{t,13}$ -	0	0	0	-	0	0	0	-
$T_{t,25}$ +	-	+/0	-	-	0	-	0	0
$T_{t,25}$ -	+	-/0	+	+	0	+	0	0
\dot{m} +	0	+	0	0	-	+/-	+/-	+/-
\dot{m} -	0	-	0	0	+	+/-	+/-	+/-
n +	+/-	-	+/-	+/-	+	0	0	0
n -	+/-	+	+/-	+/-	-	0	0	0

Fehlerhafte Meßgröße	Referenzpunkt $\mathbf{n}_{\text{red,aus}}, \dot{\mathbf{m}}_{\text{red,aus,H}}$			
	$M_{\text{F},\Pi_{\text{H}}}$	$M_{\text{F},\mathbf{a}_{\text{H}}}$	$M_{\text{F},\Pi_{\text{N}}}$	$M_{\text{F},\mathbf{a}_{\text{N}}}$
$p_{t,0}$ +	-	0	-	0
$p_{t,0}$ -	+	0	+	0
$p_{t,13}$ +	0	0	+	0
$p_{t,13}$ -	0	0	-	0
$p_{t,25}$ +	+/-	-	-	-
$p_{t,25}$ -	+/-	+	+	+
$T_{t,0}$ +	0	-	0	-
$T_{t,0}$ -	0	+	0	+
$T_{t,13}$ +	0	0	0	+
$T_{t,13}$ -	0	0	0	-
$T_{t,25}$ +	+	+	+	+
$T_{t,25}$ -	-	-	-	-
\dot{m} +	+	+	+	+
\dot{m} -	-	-	-	-
n +	-	-	-	-
n -	+	+	+	+

Tabelle 4.1: Niederdruckverdichter: Auswirkungen von groben Meßfehlern auf Modifizierer unterschiedlicher Referenzpunkte

4.3.3 Erkennung von Fehlfunktionen des Hochdruckverdichters

Zur Analyse des Hochdruckverdichters werden die Größen n , $T_{t,25}$, $p_{t,25}$, $T_{t,3}$ und $p_{t,3}$ gemessen (s. Bild 4.5). Der Massenstrom \dot{m} wird nicht gemessen, sondern mit einer Annahme über das Durchsatzverhalten einer Komponente im Haupt- oder Nebenstrom oder mit Hilfe einer Energiebilanz berechnet (s. Kapitel 2.3.1). D. h. neben einer Fehlfunktion des Verdichters oder einer fehlerhaften Meßgröße wirkt sich weiterhin eine Abweichung vom erwarteten Durchsatzverhalten einer anderen Komponente, bzw. eine fehlerhafte Temperaturmeßgröße stromabwärts der Brennkammer auf die Werte der Modifizierer des Hochdruckverdichters aus.

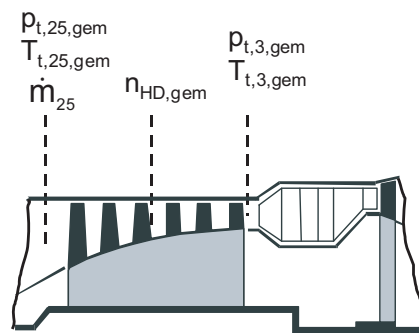


Bild 4.5: Längsquerschnitt des Hochdruckverdichters mit Ein- und Austrittsgrößen

Wird zur Analyse des Nebenstromverhältnisses die Hochdruckturbinenkapazitätsmethode benutzt, so besteht eine direkte Beziehung zwischen den Größen $p_{t,3}$, $T_{t,3}$ und dem analysierten Massenstrom \dot{m} des Verdichters. Folglich wirkt sich ein fehlerhafter Meßwert von $p_{t,3}$ oder $T_{t,3}$ auch auf den analysierten Massenstrom aus, wodurch eindeutige Signaturen nicht mehr ermittelbar sind. Daher ist die Analyse des Nebenstromverhältnisses mit Hilfe einer Annahme über das Durchsatzverhalten des Nebenstromkanals durchzuführen. Der Einfluß eines fehlerhaften Meßwertes von $T_{t,25}$ und $T_{t,3}$ auf das analysierte Nebenstromverhältnis ist dabei vernachlässigbar.

In Tabelle 4.2 sind abgeleitete Signaturen von fehlerhaften Meßgrößen sowie eines abweichenden Massenstroms für die drei in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Vergleichsmethoden dargestellt. Wie aus den grau hinterlegten Spalten der Tabelle ersichtlich, hat jede mögliche fehlerhafte Meßgröße sowie der abweichende Massenstrom für einen bestimmten Referenzpunkt eine Signatur, bei der einzelne Werte von Modifizierern unbeeinflusst bleiben (0).

Wird der Massenstrom als fehlerhaft erkannt, so kann dies an fehlerhaften Meßwerten von \dot{m}_2 , $p_{t,13}$, $T_{t,13}$ und $p_{t,59}$ liegen. Wurden bei der Analyse des Niederdruckverdichters \dot{m}_2 , $p_{t,13}$ oder $T_{t,13}$ bereits als fehlerhaft erkannt, so ist die erkannte

Fehlerhafte Meßgröße	Referenzpunkt $\mathbf{n}_{\text{red}}, \Delta h/\mathbf{n}^2$		Referenzpunkt $\Pi, \dot{\mathbf{m}}_{\text{red}}$		Referenzpunkt $\mathbf{n}_{\text{red,aus}}, \dot{\mathbf{m}}_{\text{red,aus}}$	
	$M_{F,\Pi}$	$M_{F,\dot{\mathbf{m}}_{\text{red}}}$	$M_{F,n_{\text{red}}}$	$M_{F,a}$	$M_{F,\Pi}$	$M_{F,a}$
$p_{t,25}$ +	–	–	+	+/-	–	0
$p_{t,25}$ –	+	+	–	+/-	+	0
$p_{t,3}$ +	+	0	-/0	+/-	+/-	–
$p_{t,3}$ –	–	0	+/0	+/-	+/-	+
$T_{t,25}$ +	+	+/-	–	+/-	0	–
$T_{t,25}$ –	–	+/-	+	+/-	0	+
$T_{t,3}$ +	–	+/0	0	–	+	+
$T_{t,3}$ –	+	-/0	0	+	–	–
$\dot{m}^*)$ +	0	+	–	+/-	+	+
$\dot{m}^*)$ –	0	–	+	+/-	–	–
n +	+/-	–	+	0	–	–
n –	+/-	+	–	0	+	+

*) ausgelöst durch grobe Meßfehler in $p_{t,13}$, $T_{t,13}$, $p_{t,5}$ oder \dot{m}_2

Tabelle 4.2: Hochdruckverdichter: Auswirkungen von groben Meßfehlern auf Modifizierer unterschiedlicher Referenzpunkte

Abweichung im Massenstrom eine Bestätigung hierfür. Im anderen Fall deutet dies auf einen fehlerhaften Meßwert von $p_{t,59}$ hin.

4.4 Erkennung von Fehlfunktionen weiterer Komponenten

4.4.1 Turbinen

Die Analyse der Hochdruckturbinen ist dadurch gekennzeichnet, daß die Eintrittsgrößen mit Hilfe der Meßgrößen $T_{t,3}$, $p_{t,3}$, $\dot{m}_{\text{Br,BK}}$ und $T_{\text{Br,BK}}$, dem analysierten Massenstrom \dot{m}_3 sowie Annahmen über das Betriebsverhalten der Brennkammer berechnet werden (s. Kapitel 2.3.1). Die spezifische Arbeit der Hochdruckturbinen wird unter Berücksichtigung des Leistungsgleichgewichts an der Hochdruckwelle mit Hilfe der spezifischen Arbeit des Hochdruckverdichters, die mit den Meßgrößen $T_{t,25}$ und $T_{t,3}$ berechnet wird, ermittelt. Zur Bestimmung des Druckverhältnisses der Turbinen wird weiterhin eine Annahme über das Durchsatzverhalten der Niederdruckturbinen verwendet. Der Vergleich zu der Erwartung basiert auf einem Referenzpunkt, der mit der reduzierten Drehzahl und der reduzierten Arbeit gebildet wird. Entsprechend lassen sich die Modifizierer $M_{F,\dot{\mathbf{m}}_{\text{red,HDT}}}$ und $M_{F,\Pi,\text{HDT}}$ ermitteln.

Die Analyse der Niederdruckturbinen ist dadurch gekennzeichnet, daß die Eintrittsgrößen Ergebnisse der Hochdruckturbinenanalyse sind. Die spezifische Arbeit wird unter Berücksichtigung des Leistungsgleichgewichts an der Niederdruckwelle mit Hilfe der spezifischen Arbeit des Niederdruckverdichters, die mit den Meßgrößen $T_{t,0}$, $T_{t,13}$ und $T_{t,25}$ berechnet wird, ermittelt. Zur Bestimmung des Druckverhältnisses wird der Totaldruck im Austritt der Turbine $p_{t,59}$ gemessen. Der Vergleich zu der Erwartung basiert auf einem Referenzpunkt, der mit der reduzierten Drehzahl und der reduzierten Arbeit gebildet wird. Entsprechend läßt sich der Modifizierer $M_{F,II,NDT}$ ermitteln. Das Durchsatzverhalten wird zur Analyse des Druckverhältnisses der Hochdruckturbinen benötigt.

Im Gegensatz zu der Analyse der Verdichter basiert die Analyse der Turbinen auf wenigen Meßgrößen, die den Turbinen selbst angehören. Entsprechend ist die Anzahl der möglichen Ursachen für eine Abweichung vom erwarteten Betriebsverhalten höher. Da die Analyse von Hoch- und Niederdruckturbinen eng miteinander gekoppelt ist, werden zur Ermittlung von charakteristischen Signaturen beide Komponenten zusammen betrachtet.

Eine Fehlfunktion der Turbinen kann sich sowohl ausschließlich auf den Wirkungsgrad als auch zusätzlich auf das Durchsatzverhalten auswirken. So beeinflußt beispielsweise ein Schaden am Rotor nicht das Durchsatzverhalten der Turbinen, wenn dessen Eintrittsleitschaufeln kritisch durchströmt werden. In Tabelle 4.3 sind Signaturen der Modifizierer für Fehlfunktionen der Hoch- und Niederdruckturbinen dargestellt. Hierbei hat eine Fehlfunktion der Hochdruckturbinen einen Einfluß auf $M_{F,II,HDT}$ und eventuell auf $M_{F,\dot{m}_{red},HDT}$. Eine Fehlfunktion der Niederdruckturbinen wirkt sich im Wert des Modifizierers $M_{F,II,NDT}$ aus. Wenn zudem das Durchsatzverhalten der Komponente betroffen ist, so ist die Annahme über das Durchsatzverhalten in der Analyse nicht mehr gültig und folglich wird der Wert des Modifizierers $M_{F,II,HDT}$ verfälscht. Der Modifizierer $M_{F,\dot{m}_{red},HDT}$ bleibt aber unverändert.

In Tabelle 4.3 sind weiterhin Signaturen für grobe Meßfehler dargestellt, die sich aus entsprechenden Betrachtungen herleiten lassen. Zur Analyse der Turbinen werden überwiegend Meßgrößen benutzt, die bereits bei der Analyse von Nieder- und Hochdruckverdichtern überprüft wurden ($T_{t,0}$, $T_{t,13}$, $T_{t,25}$, $T_{t,3}$, $p_{t,3}$, $p_{t,59}$, n und \dot{m}). Wurde eine dieser Meßgrößen als fehlerhaft erkannt, so dient die Betrachtung der Modifizierer der Turbinenanalyse der Bestätigung. Wie weiterhin in Tabelle 4.3 ersichtlich ist, lassen sich Fehlfunktionen der Turbinen von fehlerhaften Meßwerten von \dot{m}_{Br} und T_{Br} unterscheiden.

4.4.2 Düse

Die Analyse der Düse ist dadurch gekennzeichnet, daß die Eintrittsgrößen maßgeblich von den Meßgrößen $p_{t,59}$, $p_{t,13}$, $\dot{m}_{Br,BK}$, $\dot{m}_{Br,NBK}$, $T_{Br,BK}$, $T_{Br,NBK}$, \dot{m}_2 und $T_{t,0}$ abhängen. Weiterhin werden der Schub F und der statische Gegendruck an der

Fehler	HDT		NDT
	$M_{F,\Pi}$	$M_{F,\dot{m}_{\text{red}}}$	$M_{F,\Pi}$
HDT	+/-	+/-/0	0
NDT	+/-/0	0	+/-
$\dot{m}_{\text{Br}}, T_{\text{K}}$ +	+/-	+/-	+/-
$\dot{m}_{\text{Br}}, T_{\text{K}}$ -	+/-	+/-	+/-
$T_{\text{t},0}$ +	0/-	0	+
$T_{\text{t},0}$ -	0/+	0	-
$T_{\text{t},13}$ +	0/+	0	-
$T_{\text{t},13}$ -	0/-	0	+
$T_{\text{t},25}$ +	+/-	0/-	+/-
$T_{\text{t},25}$ -	+/-	0/+	+/-
$T_{\text{t},3}$ +	+/-	+/-	0
$T_{\text{t},3}$ -	+/-	+/-	0
$p_{\text{t},3}$ +	+/-	+/-	+/-
$p_{\text{t},3}$ -	+/-	+/-	+/-
$p_{\text{t},59}$ +	0	0	-
$p_{\text{t},59}$ -	0	0	+
\dot{m} +	+/-	+/-	+/-
\dot{m} -	+/-	+/-	+/-
n +	+/-	+/-	+/-
n -	+/-	+/-	+/-

Tabelle 4.3: Turbinen: Auswirkungen von Fehlern auf die Werte der Modifizierer

Düse $p_{s,09}$ gemessen. Für den Vergleich zu der Erwartung werden gemäß Kapitel 2.4.1 die Modifizierer basierend auf den Durchsatzkoeffizienten M_{Δ,C_D} und auf den Düsenverlustbeiwert $M_{\Delta,\varphi}$ gebildet.

Für eine Fehlfunktion der Düse kann angenommen werden, daß sich die Werte beider Modifizierer ändern. Allerdings wirkt sich ein fehlerhafter Meßwert von $p_{s,09}$ auch auf die Werte beider Modifizierer aus, so daß dieser von einer tatsächlichen Abweichung im Betriebsverhalten der Düse nicht unterscheidbar ist.

Dagegen wirkt sich ein fehlerhafter Meßwert von F ausschließlich auf den Wert des Modifizierers $M_{\Delta,\varphi}$ aus.

Grobe Meßfehler in den weiteren Größen wurden bereits während den Analysen der Verdichter und Turbinen erkannt. Änderungen in den Werten der Modifizierer der Düse können dies somit bestätigen.

5 Anwendung des Verfahrens

Das Verfahren zur automatisierten modellbasierten Leistungsanalyse (s. Kapitel 3) sowie die beschriebene Vorgehensweise zur Erkennung von Fehlfunktionen (s. Kapitel 4) werden im Folgenden beispielhaft anhand von Daten des in dieser Arbeit behandelten Turboluftstrahltriebwerks demonstriert. Dabei wird die Funktionsweise des Verfahrens zum einen anhand von simulierten Meßdaten beschrieben, die mittels eines Synthesemodells erzeugt wurden. Zum anderen wird der Einsatz des Verfahrens während eines realen Versuchs mit einem Prototypen erläutert. Die Instrumentierung des Prototypen ist dabei hinsichtlich der Aufnahme von stationären Meßdaten optimiert. Das Verfahren wird deshalb ausschließlich zur Validierung des stationären Betriebsverhaltens des Triebwerks angewendet.

5.1 Vorgaben des Verfahrens

Analyseschema

Das Analyseschema ist der Tabelle 5.1 zu entnehmen. Dieses basiert auf dem bereits in Tabelle 3.3 vorgestellten Schema und berücksichtigt weitere Meßgrößen zur Analyse der Druckverlustcharakteristik des Nebenstromkanals, der Druckverlustcharakteristika und der Aufteilungen der Massenströme der Nachbrennkammer sowie des Wärmestroms vom Haupt- zum Nebenstrom, der mit dem Wärmeübergangskoeffizienten k beschrieben wird. Die Anordnung der Meßgrößen im Triebwerk sind dem Bild 1.5 entnehmbar.

Da sowohl der Totaldruck in der Austrittsebene der Niederdruckturbine als auch der Totaldruck in der Austrittsebene des Nebenstromkanals gemessen wird, ist nun das statische Druckverhältnis $p_{s,161}/p_{s,61}$ analysierbar und entsprechend ein Modifizierer basierend auf der Modellgröße ermittelbar. Die im Iterationsschema der Tabelle 5.1 aufgeführten Modifizierer sind aus Gründen der Modularität und der Synthesemodellbildung nicht mit Hilfe einer direkten Berechnungsweise bestimmbar.

Das Verfahren soll u. a. “zyklisch” angewendet werden (s. Kapitel 3.5), d. h. das Verfahren wird auch während Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen vom Prüfstandsprogramm aufgerufen. Das bisher zur Ermittlung von stationären Betriebspunkten genutzte Synthesemodell wird deshalb dahingehend erweitert, daß in den Leistungsbilanzen der Wellen zusätzlich die Beschleunigungsterme

direkte Vorgabe von Meßgrößen zur Festlegung des Betriebspunkts der Gasturbine	$p_{t,0}$
	$T_{t,0}$
	x_0
	$p_{s,09}$
	α_{Le}
	$\dot{m}_{Br,BK}$
	$\dot{m}_{Br,NBK}$
	$T_{Br,BK}$
	$T_{Br,NBK}$
	H_u
	A_8/A_9
	P_{ex}
	\dot{m}_{Bl}
	\dot{n}_{ND}
\dot{n}_{HD}	
direkte Vorgabe von Meßgrößen	n_{ND}
	n_{HD}
	\dot{m}_0
	$p_{t,21}$
	$p_{t,12}$
	$p_{t,29}$
	$p_{t,59}$
	$p_{t,15}$
	$p_{t,169}$
	$p_{s,169}$
Iterationsvariablen	Verträglichkeitsbedingungen
$f_{T_{t,21},schätz}$	$\Delta T_{t,21}/T_{t,21,gem}$
$f_{T_{t,12},schätz}$	$\Delta T_{t,12}/T_{t,12,gem}$
$f_{T_{t,29},schätz}$	$\Delta T_{t,29}/T_{t,29,gem}$
$f_{p_{t,45},schätz}$	$\Delta \dot{m}_{45}/\dot{m}_{45}$
$M_{\Delta,k,NDT}$	$\Delta T_{t,15}/T_{t,15,gem}$
$M_{\Delta,stat.Druckungleichgewicht,NBK}$	$\Delta p_{t,161}/p_{t,161}$
$M_{\Delta,\dot{m}_{168}/\dot{m}_{16},NBK}$	$\Delta p_{s,161}/p_{s,161,gem}$
$M_{\Delta,\zeta,NBK}$	$\Delta p_{s,7}/p_{s,7,gem}$
μ	$\Delta \dot{m}_4/\dot{m}_4$
$p_{s,64}/p_{t,6}$	$\Delta p_{s,64}/p_{s,64}$
$p_{s,66}/p_{t,6}$	$\Delta p_{s,66}/p_{s,66}$

Tabelle 5.1: Randbedingungen, direkte Vorgabe von Meßgrößen und Iterationschema

$$P_{B,ND} = 4 \cdot \Pi^2 \cdot n_{ND} \cdot \Theta_{ND} \cdot \dot{n}_{ND} \quad (5.1)$$

$$P_{B,HD} = 4 \cdot \Pi^2 \cdot n_{HD} \cdot \Theta_{HD} \cdot \dot{n}_{HD} \quad (5.2)$$

berücksichtigt werden (s. [26]). Dabei werden die entsprechenden Massenträgheitsmomente der Wellen Θ_{ND} und Θ_{HD} dem Verfahren vorgegeben. Die Beschleunigungen der Niederdruckwelle \dot{n}_{ND} und der Hochdruckwelle \dot{n}_{HD} werden im Prüfstandsprogramm anhand der Drehzahländerungen berechnet und als weitere Randbedingungen in das Analyseschema eingebracht (s. Tabelle 5.1). Da im Rahmen dieser Arbeit das Verfahren zur Validierung von Meßdaten zur Ermittlung des stationären Betriebsverhaltens des Triebwerks eingesetzt wird, wird auf eine Modellierung der weiteren instationären Effekte, wie z. B. Wärmeübertragungsvorgänge und Volumenauffüllvorgänge verzichtet (s. [16], [46], [71]).

Berechnung der Erwartung

Zur Berechnung des erwarteten Betriebsverhaltens werden als Randbedingungen die in Tabelle 3.1 aufgelisteten Größen benutzt. Analog dem Analyseschema werden diese ergänzt durch die Beschleunigungen der Wellen \dot{n}_{ND} und \dot{n}_{HD} zur Berücksichtigung der Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsleistungen in den Leistungsgleichgewichten an den Wellen.

Erwartungsbereiche zur Überprüfung der aufbereiteten Meßwerte

Die Erwartungsbereiche von den Meßgrößen, die zur Berechnung der Erwartung benötigt werden, umfassen sämtliche Werte, die sich während des Versuchs einstellen können.

Für die Meßgrößen, die ausschließlich zur Leistungsanalyse benötigt werden, sind die maximal zulässigen Abweichungen vom Erwartungswert der Tabelle 5.2 entnehmbar. Hierbei sind diese als prozentuale Anteile vom Erwartungswert für die Meßgrößen Druck, Temperatur und Schub sowie als Konstanten für die Meßgrößen Massenstrom und Drehzahl aufgrund ihrer geringen Beträge angegeben. Die Zahlenwerte wurden anhand von mehreren bereits zuvor durchgeführten Versuchen mit Triebwerken des gleichen Typs abgeleitet. Beispielhaft hierfür sind in den Bildern 5.1 a) und b) die Abweichungen zwischen den aufbereiteten und als fehlerfrei erkannten Meßwerten sowie deren Erwartungswerten dargestellt.

Ersatzmeßgrößen

Während der Versuchsdurchführung erfasst das Datenerfassungssystem auch Meßwerte, die zur Regelung des Triebwerks benutzt wird. Es ist zu beachten, daß hier spezielle Meßwertaufnehmer eingesetzt werden. Dabei handelt es sich um die Größen $p_{t,2}$, $T_{t,2}$, $p_{s,09}$, α_{Le} , A_8 , n_{ND} , n_{HD} , $p_{t,3}$, $T_{t,3}$, $p_{s,7}$, $\dot{m}_{Br,BK}$ und $\dot{m}_{Br,NBK}$, deren Werte als Ersatzmeßwerte dem Verfahren zur Verfügung gestellt werden können.

Meßgröße	maximal zulässige Abweichung
Druck	$\pm 3 - 5\%$ vom Erwartungswert
Temperaturen	$\pm 2 - 5\%$ vom Erwartungswert
Schub	$\pm 5\%$ vom Erwartungswert
Gesamtmassenstrom	$\pm 1 kg/s$
Brennstoffmassenstrom	$\pm 0,15 kg/s$
Drehzahlen	$\pm 2\%$

Tabelle 5.2: Annahmen über zulässige Abweichungen zwischen aufbereiteten Meßwerten und deren Erwartungswerten

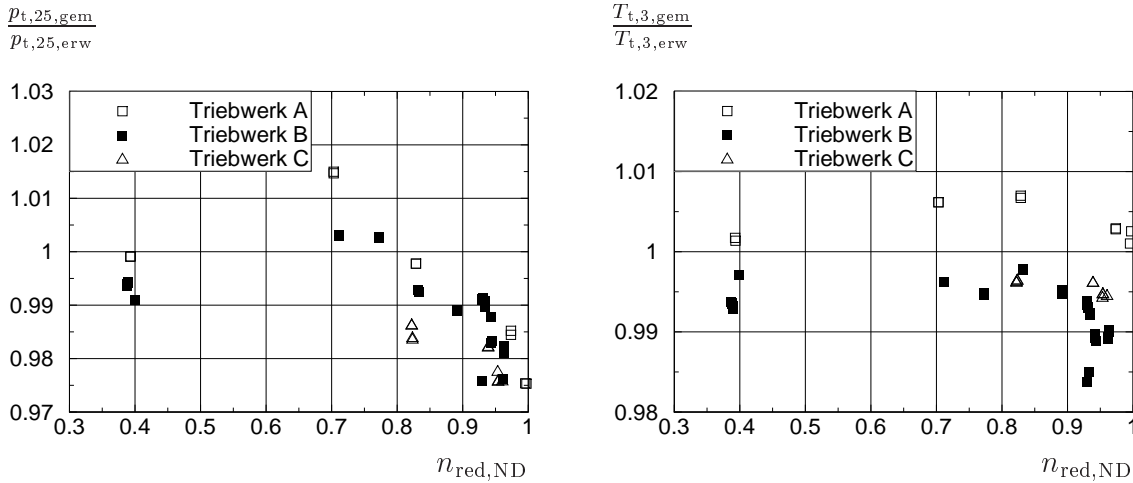


Bild 5.1: Vergleich zwischen aufbereiteten und als fehlerfrei erkannten Meßwerten sowie deren Erwartungswerten für $p_{t,25}$ (a) und $T_{t,3}$ (b)

Alternative Analyseschemata

Basierend auf dem in Tabelle 5.1 definierten Analyseschema werden alternative Analyseschemata erstellt, die jeweils eine Meßgröße des eigentlichen Analyseschemas nicht berücksichtigen. Folglich ist es möglich, wenn bei der Meßwertüberprüfung ein aufbereiteter Meßwert mit einem groben Meßfehler erkannt wird, daß automatisch auf ein entsprechendes alternatives Analyseschema zurückgegriffen wird. Wird dagegen mehr als ein aufbereiteter Meßwert mit einem groben Fehler erkannt, so erfolgt die Analyse mit dem eigentlichen Analyseschema, wobei die fehlerbehafteten Meßwerte durch die entsprechenden Erwartungswerte ersetzt werden.

5.2 Anwendung des Verfahrens anhand von simulierten Meßdaten

Der Nachweis der Funktionsfähigkeit des Verfahrens zur automatisierten modellbasierten Analyse sowie der Vorgehensweise zur Erkennung von Fehlfunktionen geschieht zunächst anhand von simulierten Meßdaten. Deren Benutzung bietet gegenüber der Benutzung von echten Meßdaten den Vorteil, daß einerseits das zu analysierende Betriebsverhalten exakt bekannt ist und andererseits gezielt Abweichungen zwischen dem tatsächlichen und dem erwarteten Betriebsverhalten von Komponenten sowie grobe Meßfehler in den Meßdaten berücksichtigbar sind. Allerdings ist zu beachten, daß es sich bei den simulierten Meßdaten bereits um aufbereitete Meßwerte handelt.

5.2.1 Erzeugung von simulierten Meßdaten

Die simulierten Meßdaten werden mit dem Synthesemodell erzeugt, auf dem die Analyse basiert. Abweichungen zwischen dem tatsächlichen und dem erwarteten Betriebsverhalten von Komponenten lassen sich hierbei durch eine Vorgabe von entsprechenden Werten der Modifizierer einzelner Komponenten berücksichtigen. Weiterhin können die berechneten Werte gezielt manipuliert werden, um grobe Meßfehler in den simulierten Meßdaten zu implementieren.

Damit die Recovery-Korrektur der Temperaturmeßwerte auch bei der Analyse dieser Meßdaten durchführbar ist, werden auf die berechneten Totaltemperaturen die entsprechenden Recovery-Korrekturen angewandt, um "nicht recovery-korrigierte" Temperaturmeßwerte zu erzeugen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird beispielhaft die automatisierte modellbasierte Analyse anhand von folgenden simulierten Meßdaten behandelt:

- **Meßdaten I: stationäre Fahrlinie - ideales Triebwerk - ideale Instrumentierung**

Es werden die in Tabelle 5.3 definierten Betriebspunkte einer stationären Fahrlinie für Umgebungsbedingungen eines Boden-Stand-Falls unter Berücksichtigung der Regelgesetze des Triebwerks berechnet.

- **Meßdaten II: stationäre Fahrlinie - Abweichung im Betriebsverhalten des Hochdruckverdichters - ideale Instrumentierung**

Analog zu den Meßdaten I wird die stationäre Fahrlinie unter Berücksichtigung der folgenden Modifizierer berechnet:

$$M_{F,\eta,\text{HDV}} = 0,97$$

$$M_{F,\Pi,\text{HDV}} = 0,97$$

$$M_{F,\dot{m}_{\text{red}},\text{HDV}} = 0,97.$$

- **Meßdaten IIIa: stationäre Fahrlinie - ideales Triebwerk - $T_{t,3}$ enthält einen vom Betrag her großen groben Meßfehler**

Die Totaltemperaturmeßwerte $T_{t,3}$ der Meßdaten I werden jeweils um 5% erhöht.

- **Meßdaten IIIb: stationäre Fahrlinie - ideales Triebwerk - $p_{t,25}$ enthält einen vom Betrag her geringen groben Meßfehler**

Die Totaldruckmeßwerte $p_{t,25}$ der Meßdaten I werden jeweils um 2% reduziert.

Meßpunkt	n_{ND} *)
1	39% (Leerlauf)
2	47%
3	56%
4	65%
5	74%
6	83%
7	94% (Vollast)

*) Vorgabe ist die Schubhebelstellung PLA

Tabelle 5.3: Betriebspunkte der simulierten Meßdaten

5.2.2 Analyse von simulierten Meßdaten

Da es sich bei den simulierten Meßdaten bereits um aufbereitete Meßwerte handelt, werden bei der Analyse dieser Meßdaten die Verfahren zur Berechnung von indirekt gemessenen Größen, Bildung von Mittelwerten, Meßwertkorrekturen und Überprüfung von Einzelmeßwerten ausgeschaltet. Der Vergleich zwischen den aufbereiteten Meßwerten und den Erwartungswerten wird weiterhin durchgeführt.

Meßdaten I

In den Bildern 5.2 a) - h) sind ausgewählte Ergebnisse von durchgeführten modellbasierten Analysen der Meßdaten I dargestellt. Da die Meßdaten genau dem erwarteten Betriebsverhalten des Triebwerks entsprechen, sind die Meßwerte und die entsprechenden Erwartungswerte identisch. Beispielhaft hierfür werden in den Bildern 5.2 a) und b) jeweils das Verhältnis von Meßwert zu Erwartungswert für

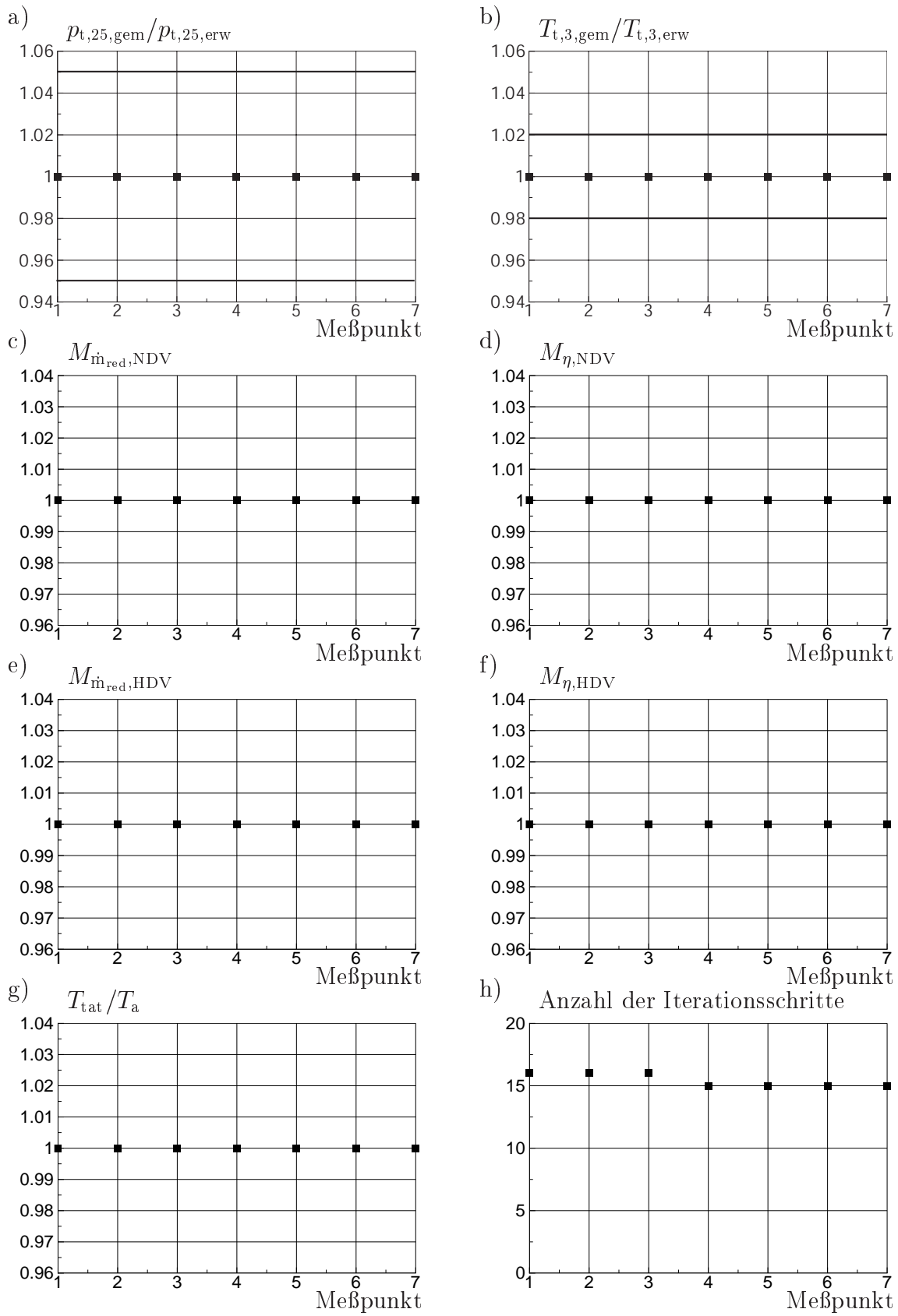


Bild 5.2: Ausgewählte Ergebnisse von modellbasierten Analysen der Meßdaten I

die Größen $p_{t,25}$ und $T_{t,3}$, sowie die maximal zulässigen Abweichungen vom Erwartungswert, gezeigt. Bei der Überprüfung der Meßwerte wird folglich kein grober Meßfehler erkannt.

Weiterhin werden keine Abweichungen zwischen dem analysierten und dem erwarteten Betriebsverhalten der Komponenten festgestellt. Dies ist z. B. den Bildern 5.2 c) - f) entnehmbar, in denen die Modifizierer für den reduzierten Eintrittsmassenstrom und Wirkungsgrad jeweils für den Hauptstrom des Niederdruckverdichters und des Hochdruckverdichters dargestellt sind. Folglich werden auch weitere Größen, die während einer Versuchsdurchführung zu überwachen, jedoch nicht meßbar sind, wie z. B. die Turbineneintrittstemperatur, korrekt berechnet (s. Bild 5.2 g)).

Hinsichtlich des Konvergenzverhaltens des Verfahrens ist in Bild 5.2 h) für jeden Meßpunkt die Anzahl der erforderlichen Iterationen bis zur Erreichung der Konvergenz dargestellt. Da für die Erstellung der Funktionaldeterminante zur Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems bereits 12 Iterationen (1 Iteration mit den vorgegebenen Schätzwerten + 1 Iteration mit jeweils einem geänderten Schätzwert pro Iterationsvariable, s. [54]) benötigt werden, sind zur Erreichung der geforderten Genauigkeit lediglich 3-4 Iterationsschritte erforderlich.

Meßdaten II

In den Bildern 5.3 a) und b) sind die Verhältnisse vom Meßwert zum Erwartungswert beispielhaft für die Größen $p_{t,25}$ und $T_{t,3}$ dargestellt. Aufgrund der Abweichung im Betriebsverhalten des Verdichters unterscheiden sich die Meßwerte und die Erwartungswerte. Allerdings sind die maximal zulässigen Abweichungen des Meßwerts vom Erwartungswert so groß gewählt, daß nicht fälschlicherweise ein grober Meßfehler erkannt wird.

In den Bildern 5.3 c) - f) werden die Modifizierer beispielhaft für den reduzierten Eintrittsmassenstrom und den Wirkungsgrad jeweils für den Hauptstrom des Niederdruckverdichters und des Hochdruckverdichters dargestellt. Wie zu erkennen ist, werden die Abweichungen zwischen dem tatsächlichen und dem erwarteten Betriebsverhalten des Triebwerkes korrekt der verursachenden Komponente zugeordnet. Allerdings entsprechen die analysierten Werte der Modifizierer nicht denjenigen, die zur Erzeugung der Meßdaten benutzt wurden. Die Ursache hierfür ist anhand von Bild 5.4 erklärbar, in dem schematisch ein Verdichterkennfeld dargestellt ist. In dem Kennfeld ist der Betriebspunkt BP eingezeichnet, auf welchem basierend die Modifizierer von jeweils 0,97 bei der Erzeugung der Meßdaten angewendet werden. Dies führt zu dem Punkt S, wobei die Verbindungslinie zwischen BP und S die Steigung $(0,03 \cdot \Pi_{BP}) / (0,03 \cdot \dot{m}_{red,BP})$ aufweist. Bei der modellbasierten Analyse wird für den Vergleich zu der Erwartung nach Kapitel 2.4.1 der Referenzpunkt mit Hilfe der Parameter $n_{red,a}$ sowie β festgelegt, wobei der Wert für β am Schnittpunkt S des analysierten reduzierten Eintrittsmassenstroms mit dem analysierten Druckverhältnis ermittelt wird. Da die Steigung der Linie $\beta = konst.$ sich von der Steigung der Linie BP-S unterscheidet, wird der Referenzpunkt RP an einer anderen Stelle als

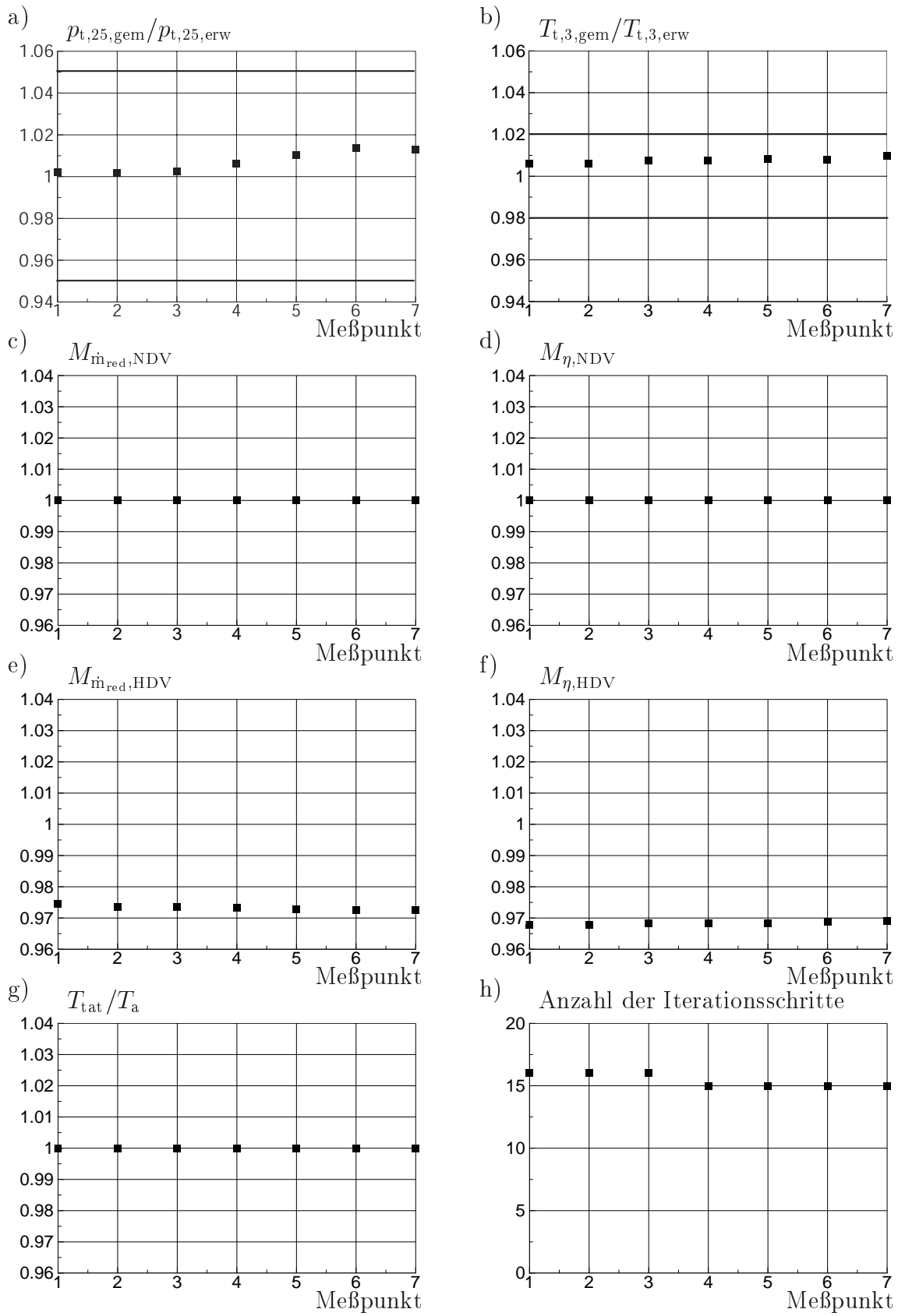


Bild 5.3: Ausgewählte Ergebnisse von modellbasierten Analysen der Meßdaten II

BP auf der Drehzahllinie $n_{\text{red,a}} = n_{\text{red,BP}}$ platziert. Folglich unterscheiden sich die Werte der analysierten Modifizierer von den Werten, die zur Erzeugung der Meßdaten benutzt wurden.

Weitere Größen, wie z. B. die Turbineneintrittstemperatur, werden korrekt berechnet (s. Bild 5.3 g)).

Hinsichtlich des Konvergenzverhaltens hatte die Abweichung im Betriebsverhalten des Verdichters keine negative Auswirkungen (s. Bild 5.3 h)).

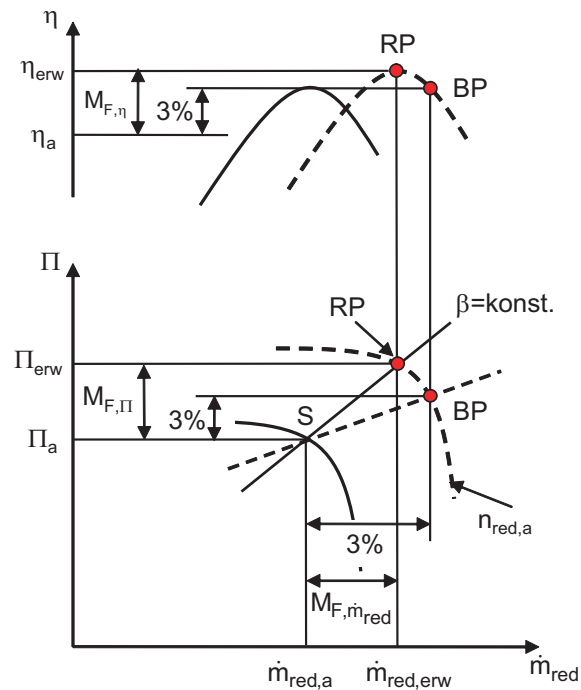


Bild 5.4: Darstellung des Betriebspunktes, auf dem basierend die Modifizierer bei der Erzeugung der Meßdaten angewendet werden, sowie des sich ergebenden Referenzpunktes

Meßdaten IIIa

In den Bildern 5.5 a) und b) sind die Verhältnisse vom Meßwert zum Erwartungswert beispielhaft für die Größen $p_{t,25}$ und $T_{t,3}$ aufgetragen. Dabei ist ersichtlich, daß der Meßwert von $T_{t,3}$ mehr als zulässig vom Erwartungswert abweicht. Entsprechend wird bei der Meßwertüberprüfung ein grober Meßfehler erkannt und es wird der Indikator von $T_{t,3}$ mit dem Wert 2 belegt (s. Bild 5.5 c)).

Für die Analyse wird folglich ein alternatives Analyseschema benutzt. In diesem wird nun nicht mehr das Betriebsverhalten des Hochdruckverdichters analysiert sondern dieses als bekannt vorgegeben. Entsprechend sind die Modifizierer des Hochdruckverdichters mit dem Wert 1 vorgegeben (s. Bilder 5.5 d) und e)).

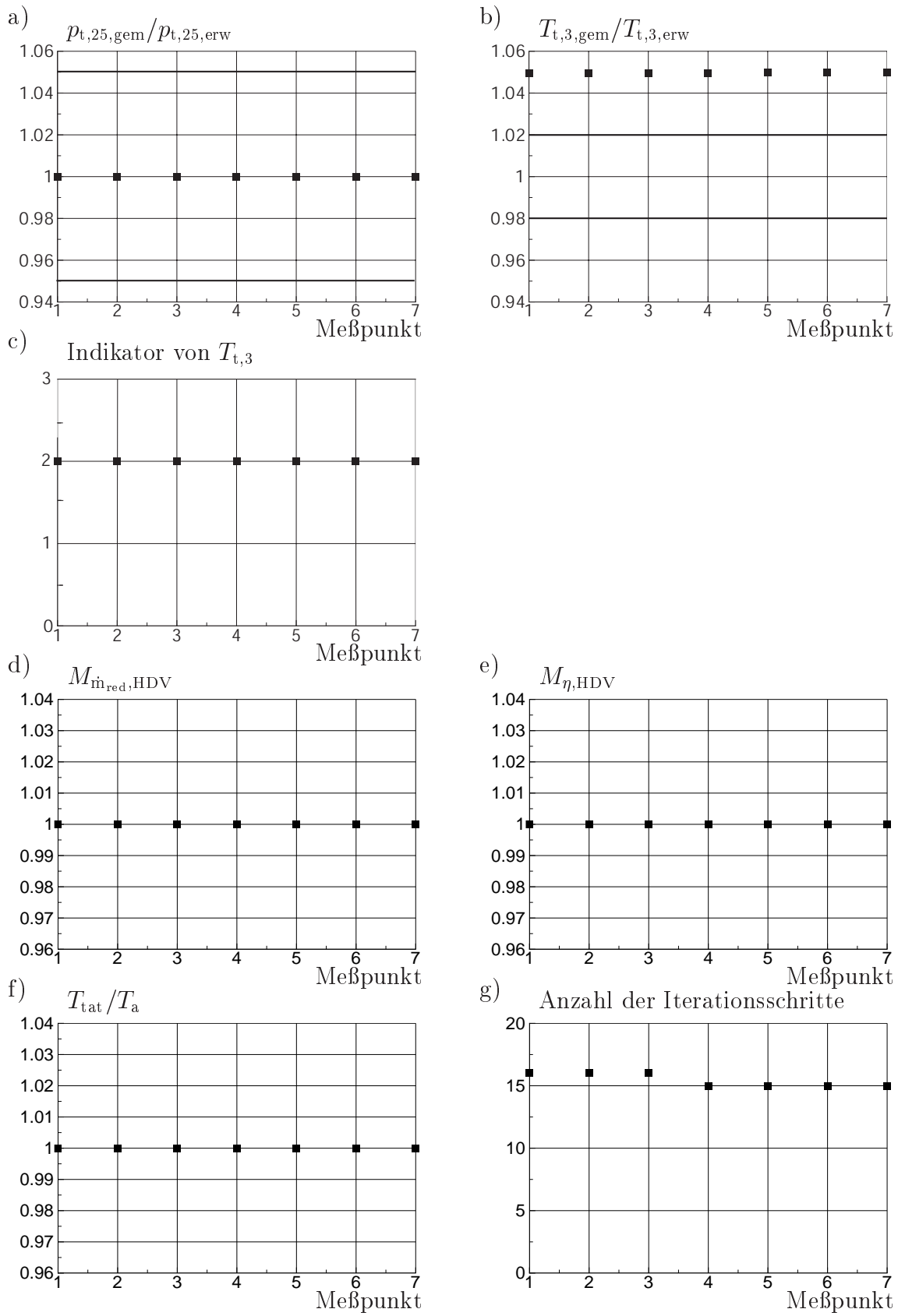


Bild 5.5: Ausgewählte Ergebnisse von modellbasierten Analysen der Meßdaten IIIa

Weitere Größen, wie z. B. die Turbineneintrittstemperatur, werden folglich weiterhin korrekt berechnet (s. Bild 5.5 f)).

Wie in Bild 5.5 g) ersichtlich ist, wird das Konvergenzverhalten des Verfahrens durch das Auftreten des groben Meßfehlers nicht negativ beeinflusst.

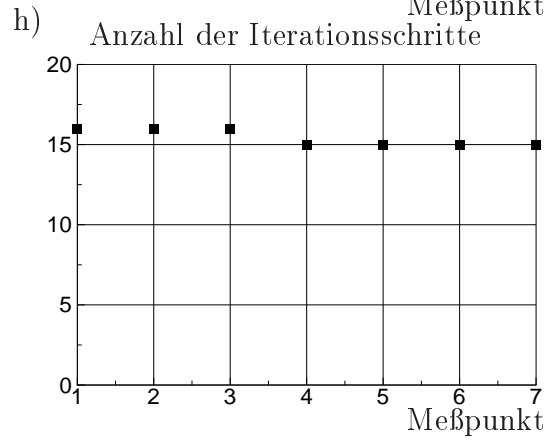
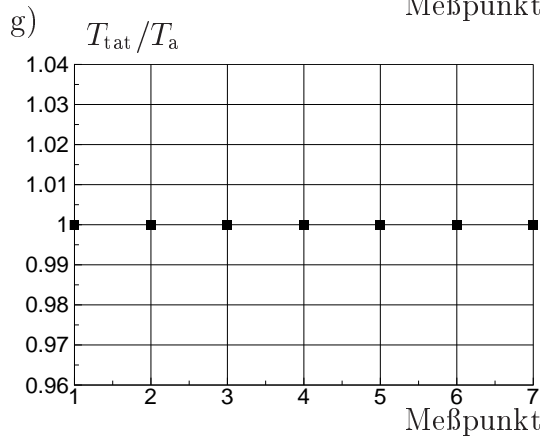
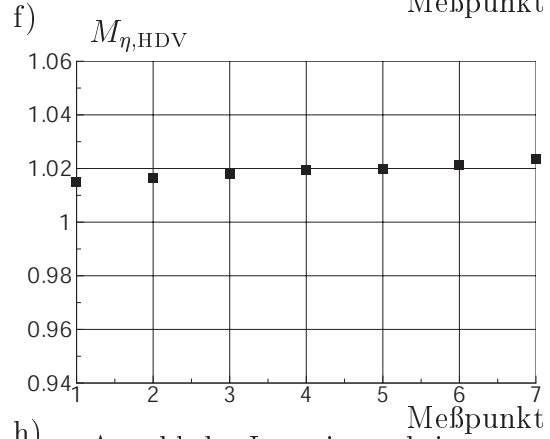
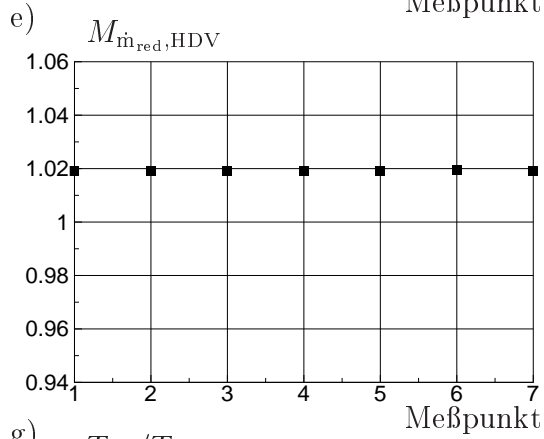
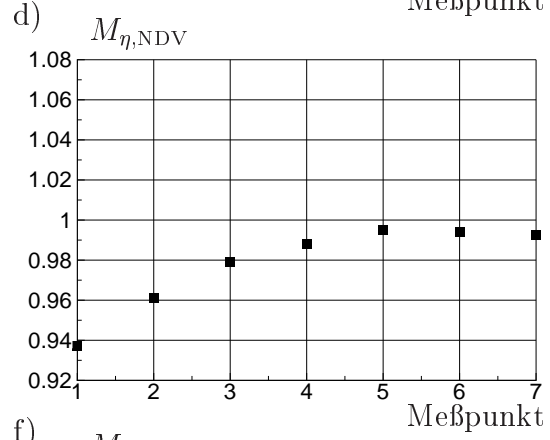
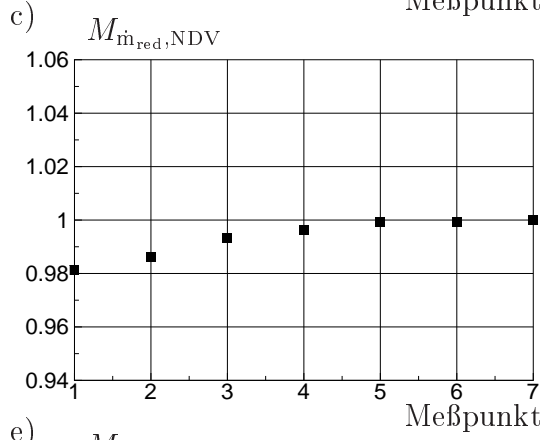
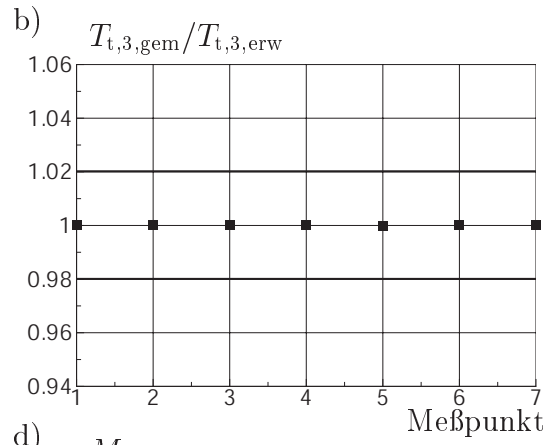
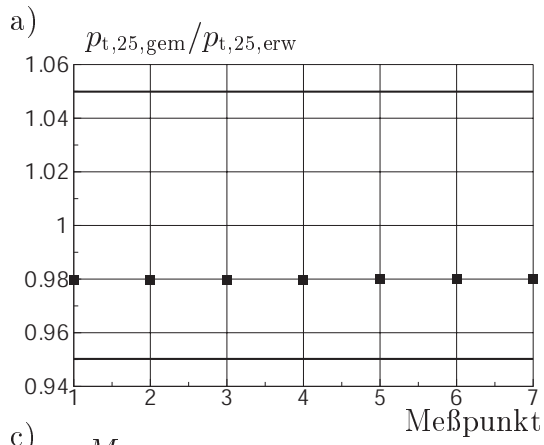
Meßdaten IIIb

In den Bildern 5.6 a) und b) sind die Verhältnisse vom Meßwert zum Erwartungswert beispielhaft für die Größen $p_{t,25}$ und $T_{t,3}$ aufgetragen. Dabei ist ersichtlich, daß für $p_{t,25}$ der Meßwert vom Erwartungswert abweicht, wobei allerdings die maximal zulässige Abweichung nicht überschritten wird. Entsprechend wird bei der Meßwertüberprüfung der grobe Meßfehler nicht erkannt.

Die Auswirkungen des nicht erkannten groben Meßfehlers auf die Modifizierer für den reduzierten Eintrittsmassenstrom und Wirkungsgrad, jeweils für den Hauptstrom des Niederdruckverdichters und des Hochdruckverdichters, sind in den Bildern 5.6 c) - f) dargestellt. Hierbei ist es nicht ohne weiteres zu erkennen, daß die Abweichungen von der Erwartung nur durch einen mit einem groben Fehler behafteten Meßwert von $p_{t,25}$ verursacht werden. Wird für den Niederdruckverdichter anstatt der herkömmlichen Vergleichsmethode die Vergleichsmethode II des Kapitels 4.3.1 benutzt, so ergeben sich die in den Bildern 5.6 i) und j) aufgetragenen Werte der Modifizierer für den reduzierten Eintrittsmassenstrom und das Druckverhältnis. Werden diese mit den in Kapitel 4.3.2 gegebenen Signaturen verglichen, so ist die Größe $p_{t,25}$ als fehlerbehaftet identifizierbar.

Da der mit einem groben Fehler behaftete Meßwert der Größe $p_{t,25}$ bei der Analyse keinen Einfluß auf die Turbineneintrittstemperatur hat, wird diese weiterhin korrekt berechnet (s. Bild 5.6 g)).

Wegen des geringen Betrags des nicht erkannten groben Meßfehlers hat dieser keine negativen Auswirkungen auf das Konvergenzverhalten des Verfahrens (s. Bild 5.6 h)).



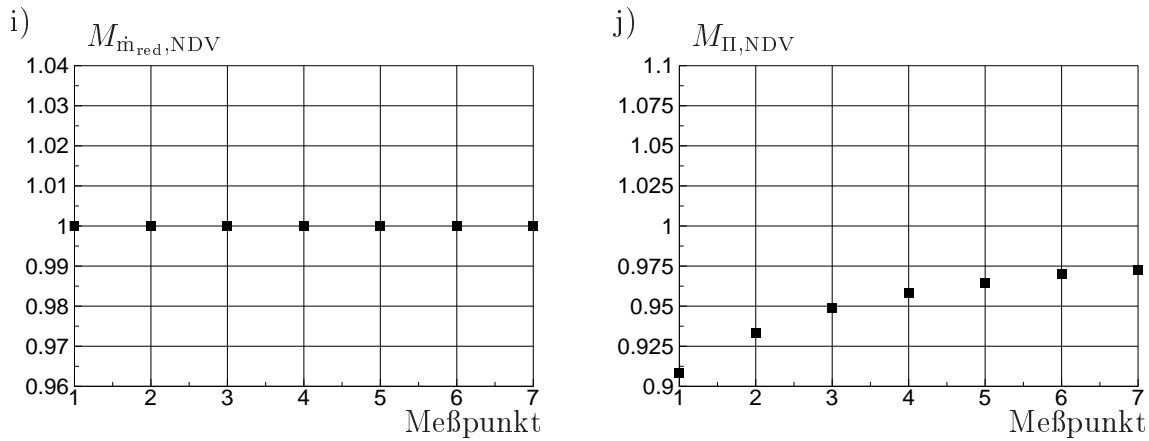


Bild 5.6: Ausgewählte Ergebnisse von modellbasierten Analysen der Meßdaten III

5.3 Anwendung des Verfahrens während eines Versuchs mit einem Triebwerks-Prototypen

Das Verfahren zur automatisierten modellbasierten Analyse wird bereits während der Durchführung von realen Versuchen mit Prototypen erfolgreich eingesetzt.

5.3.1 Allgemeine Beschreibung des Einsatzes

Das Leistungsberechnungsprogramm ist in Verbindung mit dem in Kapitel 3.5 beschriebenen Prüfstandsprogramm auf einem herkömmlichen PC (Pentium III, 2GHz) am Prüfstand installiert.

Während der Versuchsdurchführung wird das Verfahren sowohl im Betriebsmodus “zyklisch” als auch im Betriebsmodus “statisch” eingesetzt. Die zyklischen Analysen werden hierbei mit einer Frequenz von 4 Hz durchgeführt. Die Ergebnisse der zyklischen Analyse sind online am Prüfstand visualisierbar und sind somit zur Überwachung des Zustands des Triebwerks und zur Einstellung von nicht direkt gemessenen Größen nutzbar. In Bild 5.7 ist ein am Prüfstand anzeigbares Diagramm zu sehen, in dem beispielhaft der spezifische Brennstoffverbrauch, die Drehzahl der Niederdruckwelle, das Nebenstromverhältnis und die Turbineneintrittstemperatur über die letzten 60 Sekunden aufgetragen sind. In diesem Zeitraum fand eine Beschleunigung des Triebwerks statt, weshalb die Werte für die Drehzahl und die Turbineneintrittstemperatur steigen sowie die Werte für das Nebenstromverhältnis und den spezifischen Brennstoffverbrauch fallen. In Bild 5.8 ist weiterhin für einen Zeitpunkt beispielhaft eine Auflistung aller Modifizierer, die bei der modellbasierten Analyse berücksichtigt werden, dargestellt.

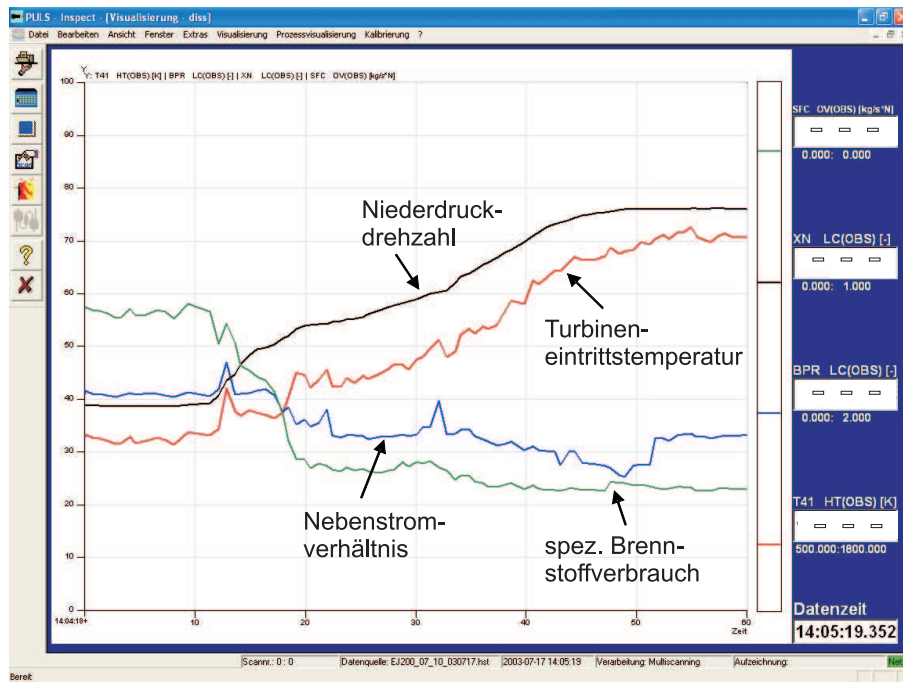


Bild 5.7: On-line-Visualisierung von berechneten und gemessenen Größen

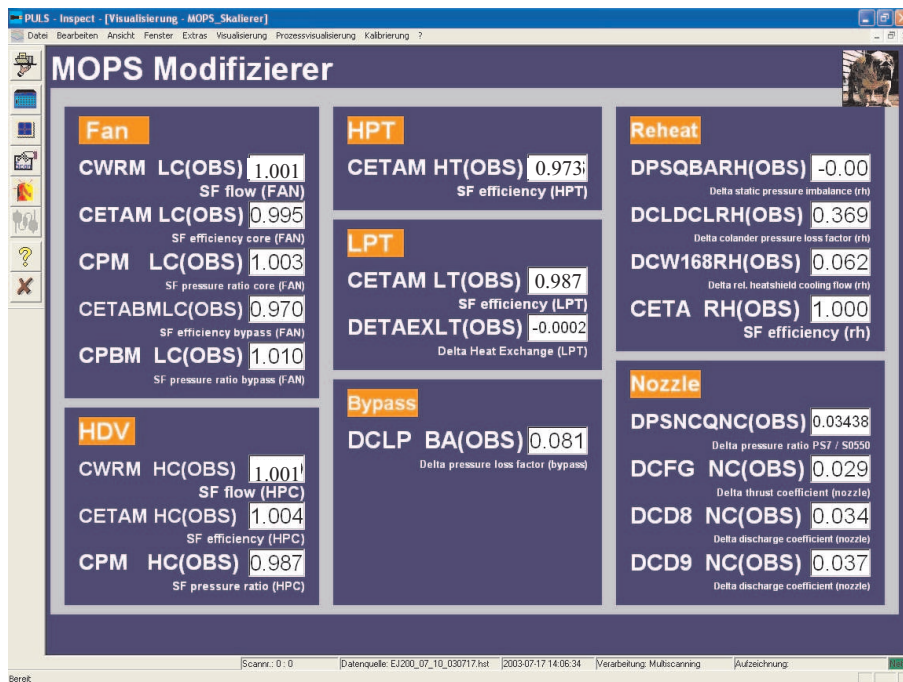


Bild 5.8: On-line-Visualisierung von berechneten Modifizierern unterschiedlicher Komponenten des Triebwerks

Wenn ein Meßpunkt aufgenommen wird, wird automatisch eine statische Analyse durchgeführt. Die Ergebnisse der Analyse werden zusammen mit den Meßdaten auf eine Datenbank geschrieben und stehen somit sofort dem entsprechenden Fachmann zur Verfügung.

5.3.2 Erkennung von groben Meßfehlern

Neben der Überwachung des Zustands des Triebwerks und der Einstellung von nicht direkt gemessenen Größen wird das modellbasierte Analyseverfahren zur Erkennung von groben Meßfehlern eingesetzt. Hierbei werden sowohl die in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Verfahren zur Überprüfung einzelner Meßwerte als auch die in Kapitel 3.3.3 erläuterte Plausibilitätsüberprüfung von aufbereiteten Meßwerten eingesetzt.

Überprüfung der einzelnen Meßwerte

Mit der in Kapitel 2.2.3 erläuterten Bereichsüberprüfung, Grob- und Feinfilterung sind einzelne Meßwerte überprüfbar. Werden hierbei grobe Meßfehler erkannt, so ist das Versuchsziel solange nicht gefährdet, wie für die Meßgröße weiterhin ein sinnvoll aufbereiteter Wert ermittelbar ist. Die als fehlerhaft erkannten Meßwerte werden mit den entsprechenden Meßstellenbezeichnungen in einem Protokoll vermerkt, das vom Personal am Prüfstand einsehbar ist (s. Bild 5.9).

Überprüfung der aufbereiteten Meßwerte

Wird bei der Überprüfung der aufbereiteten Meßwerte ein grober Meßfehler erkannt, so ist in der Regel das Versuchsziel gefährdet. Es wird automatisch ein entsprechender Eintrag in eine Alarmliste gegeben, die vom Personal am Prüfstand zu quittieren ist [39]. In Bild 5.10 ist eine Alarmliste dargestellt, die während des Erstlaufs eines Prototypen vor der eigentlichen Versuchsdurchführung, dem sogenannten Instrumentierungslauf, aufgenommen wurde. Hierbei wurden von den Plausibilitätsüberprüfungen die Meßwerte der Größen $p_{s,09}$, $\dot{m}_{Br,BK}$, $p_{t,169}$, $p_{s,169}$ und $p_{t,161}$ als fehlerbehaftet erkannt. Die Überprüfung dieser Meßgrößen durch das Personal am Prüfstand ergab sowohl Eingabefehler im Prüfstandsprogramm als auch Defekte von Meßwertaufnehmern der Größe $p_{t,161}$.

Wenn ein Alarm während der Versuchsdurchführung ausgelöst wird, so hat das Personal am Prüfstand die Möglichkeit, anhand eines grafischen Vergleichs des aufbereiteten Meßwertes mit dem entsprechenden zulässigen Bereich des Meßwertes zu beurteilen, wie gravierend die Abweichung zum Erwartungswert ist. In Bild 5.11 sind für unterschiedliche Druckmeßgrößen die aufbereiteten Meßwerte mit Hilfe einer Balkengrafik dargestellt. Über den Balken sind für den aktuellen Betriebspunkt des Triebwerks jeweils die zulässigen Erwartungsbereiche aufgetragen. Liegt der aufbereitete Meßwert außerhalb des zulässigen Bereichs, so erscheint dessen Balken in roter, ansonsten in grüner Farbe.

STAT.	3	NUMBER OF MEASUREMENT PROBES	NUMBER OF ELEMENTS OUT OF RANGE	ABSOLUTE PERCENTAGE	COARSE FILTER	FINE FILTER
TOT. PRESS.		16	2	12.5%	1	0

* NAMES OF PROBES - OUT OF RANGE | P300A3 P300A4
 * OUTLYING PROBES - COARSE FILTER 6.00% | P300A1

STAT.	3	NUMBER OF MEASUREMENT PROBES	NUMBER OF ELEMENTS OUT OF RANGE	ABSOLUTE PERCENTAGE	COARSE FILTER	FINE FILTER
TOT. TEMP.		16	4	25.0%	0	0

* NAMES OF PROBES - OUT OF RANGE | T300B1 T300D2 T300A3
 | T300B4

Bild 5.9: Darstellung der Ergebnisse der Plausibilitätsüberprüfung einzelner Meßwerte für $p_{t,3}$ und $T_{t,3}$

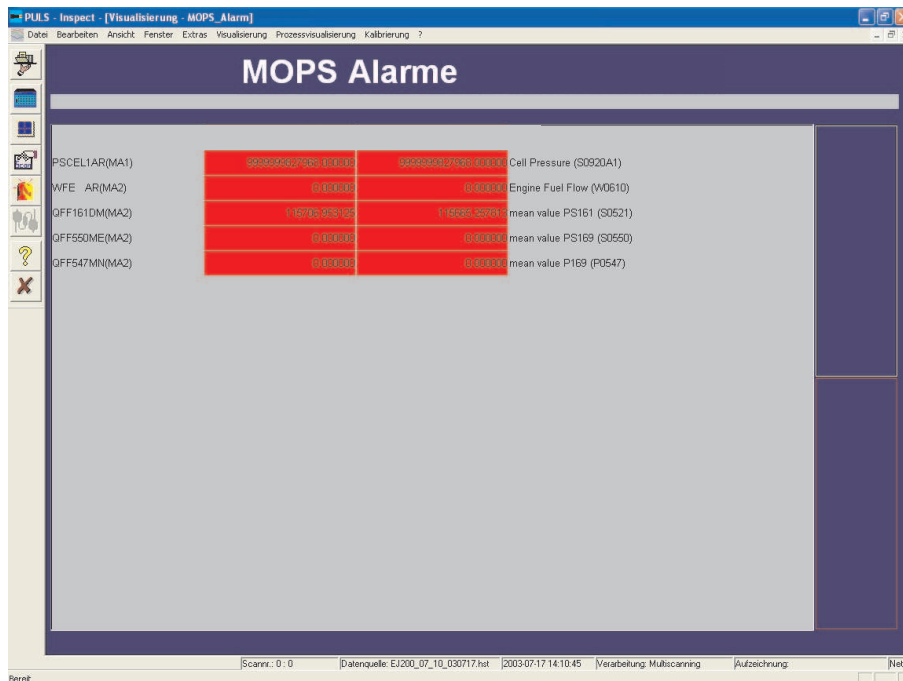


Bild 5.10: Alarmliste mit Einträgen für $p_{s,09}$ (PSCEL1AR), $\dot{m}_{Br,BK}$ (WFE AR), $p_{s,161}$ (QFF161DM), $p_{t,169}$ (QFF550ME), $p_{s,169}$ (QFF547MN)

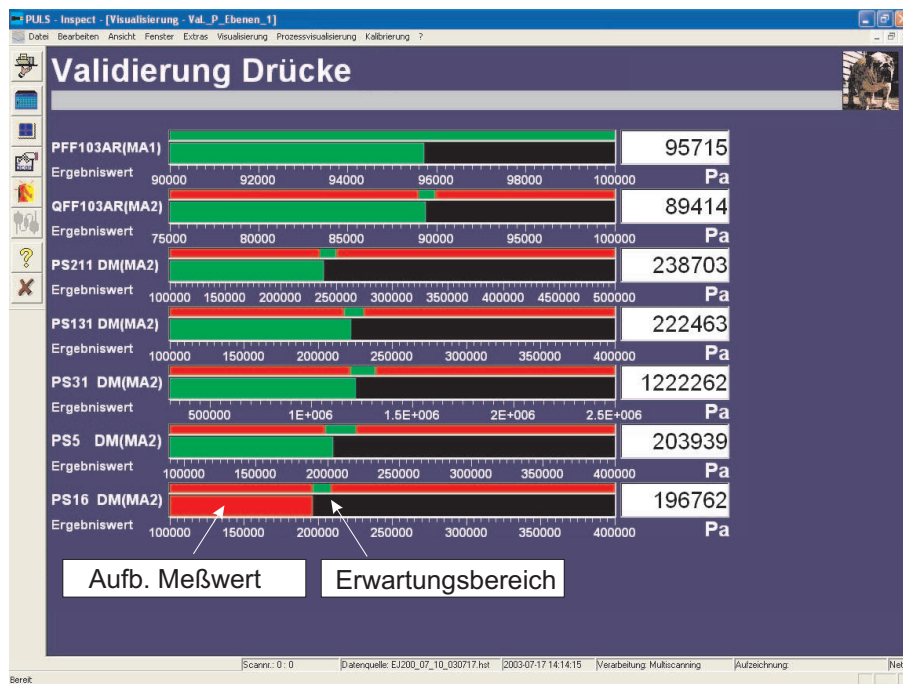


Bild 5.11: Vergleich von aufbereiteten Druckmeßwerten mit deren Erwartungsbereichen

Literaturverzeichnis

- [1] AGARD Working Group 14: *Suitable Averaging Techniques in Non-Uniform Internal Flows*. AGARD-AR-182, 1983.
- [2] AGARD Working Group 15: *The Uniform Engine Test Programme*. AGARD-AR-248, 1990.
- [3] AGARD Working Group 19: *Recommended Practices for Measurement of Gas Path Pressures and Temperatures for Performance Assessment of Aircraft Turbine Engines and Components*. AGARD-AR-245, 1990.
- [4] AVT Working Group 018: *Performance Prediction and Simulation of Gas Turbine Engine Operation*. RTO-TR-044, 2002.
- [5] Bauer A.: *Betriebsverhalten luftatmender Kombinationsantriebe für den Hyperschallflug unter besonderer Berücksichtigung der Triebwerksintegration*. Dissertation, Technische Universität München, Institut für Luft- und Raumfahrt, 1994.
- [6] Beanland M.H.: Development Testing - Use of Sea Level Test Beds and Rigs. In *AGARD-LS-132*, S. 3.1–3.6, 1984.
- [7] Berling K.: V2500 Specification of Quick-Analysis-Program QAP. Interner Bericht, MTU Aero Engines, 2000.
- [8] Bettocchi R. und Spina P.R.: Diagnosis of Gas Turbine Operating Conditions by Means of the Inverse Cycle Calculation. In *ASME 99-GT-185*, Juni 1999.
- [9] Biraud B., Despierre A. und Gayraud S.: Simulation of the WR-21 Advanced Cycle Engine. In *ASME 2001-GT-0020*, Juni 2001.
- [10] Cronin C.E.: Instrumentation Techniques in Sea Level Test Facilities. In *AGARD-LS-132*, S. 4.1–4.10, 1984.
- [11] Doel D.: TEMPER - A Gas-Path Analysis Tool for Commercial Jet Engines. In *ASME 92-GT-315*, September 1992.
- [12] Doel D.L.: The Role for Expert Systems in Commercial Gas Turbine Engine Monitoring. In *ASME 90-GT-374*, Juni 1990.
- [13] Duponchel J.P., Loisy J. und Carrillo R.: Steady and Transient Performance Calculation Method for Prediction, Analysis and Identification. In *AGARD-LS-183*, S. 3.1–3.21, 1992.
- [14] Dzung L.S.: Konsistente Mittelwerte in der Theorie der Turbo- Maschinen für kompressible Medien. In *BBC Mitteilungen*, S. 485 – 492, 1971.

- [15] Eustace R.: Neural Network Fault Diagnosis of a Turbofan Engine. In *ISABE 93-7011*, September 1993.
- [16] Fiola R.: *Berechnung des instationären Betriebsverhaltens von Gasturbinen unter besonderer Berücksichtigung von Sekundäreffekten*. Dissertation, Technische Universität München, Institut für Luft- und Raumfahrt, 1993.
- [17] Fishbach L.H. und Koenig R.W.: GENENG II - A Program for Calculating Design and Off-Design Performance of Two- and Three-Spool Turbofans with as many as Three Nozzles. TN D-6553, NASA, 1972.
- [18] Habrard A.G.: Characterization of Component Performance and Optimization of Matching in Jet-Engine Development. In *AGARD-LS-83*, S. 7.1–7.19, 1976.
- [19] Hart H., Lotze W. und Woschni E.G.: *Meßgenauigkeit*. VEB Verlag Technik Berlin, 1989.
- [20] Hillemann R.: Zustandsdiagnose und Sensorfehlerdetektion an Gasturbinen unter Verwendung unscharfer Verfahren. Dissertation, Bundeswehrhochschule Hamburg, 1994.
- [21] Hörl F.: Systemtheoretische Methode zur dynamischen Zustandsüberwachung von Gasturbinen. Dissertation, TU München, 1987.
- [22] Koenig R.W. und Fishbach L.H.: GENENG - A Program for Calculating Design and Off-Design Performance for Turbojet and Turbofan Engines. TN D-6552, NASA, 1972.
- [23] Kuhn K.: *Prüfstände im Triebwerksbau*. Dokumentation zur Vorlesung, Institut für Luftfahrtantriebe, 1993.
- [24] Kurz R. und Brun K.: Degradation in Gas Turbine Systems. In *ASME 2000-GT-0345*, 2000.
- [25] Kurzke J.: Calculation of Installation Effects within Performance Computer Programs. In *AGARD-LS-183*, S. 7.1–7.19, 1992.
- [26] Kurzke J.: Advanced User-Friendly Gas Turbine Performance Calculations on a Personal Computer. In *ASME 95-GT-147*, Juni 1995.
- [27] Kurzke J.: How to Get Components Maps for Aircraft Gas Turbine Performance Calculations. In *ASME 96-GT-164*, Juni 1996.
- [28] Kurzke J.: Model Based Gas Turbine Parameter Corrections. In *ASME GT-2003-38234*, Juni 2003.
- [29] Kurzke J. und Riegler C.: A Mixed Flow Turbofan Afterburner Simulation for the Definition of Reheat Fuel Control Laws. In *RTO Symposium on Design Principles and Methods for Aircraft Gas Turbine Engines, Toulouse*, 1998.
- [30] Lakshiminarashimha A.N., Boyce M.P. und Meher-Homji C.B.: Modeling and Analysis of Gas Turbine Performance Deterioration. In *ASME 92-GT-395*, 1992.

- [31] Li Y.G.: Performance-analysis-based gas turbine diagnostics: a review. In *Proceedings Of The Institution of Mechanical Engineers, PART A, Journal of Power and Energy, Vol 216 No A6*, S. 363 – 377, Dezember 2002.
- [32] Malloy D.J., Chappell M.A. und Biegl C.: Real-Time Fault Identification for Developmental Turbine Engine Testing. In *ASME 97-GT-141*, Juni 1997.
- [33] Malloy D.J., Webb A.T. und Kidman D.S.: F-22/F119 Propulsion System Ground and Flight Test Analysis Using Modeling and Simulation Techniques. In *ASME GT-2002-30001*, Juni 2002.
- [34] Mathioudakis K.: Non-Linear Methods for Gas Turbine Fault Diagnostics. In *Von Karman Institute Lecture Series - Gas Turbine Condition Monitoring and Fault Diagnosis*, Jan 2003.
- [35] Mathioudakis K. und Tsalavoutas A.: Uncertainty Reduction in Gas Turbine Performance Diagnostics by Accounting for Humidity Effects. In *ASME 2001-GT-0010*, Juni 2001.
- [36] Menrath M.: Experimentelle Kennfeldermittlung und Systemanalyse bei Hubschrauber-Gasturbinen. Dissertation, TU München, 1989.
- [37] Münzberg H.G. und Kurzke J.: *Gasturbinen - Betriebsverhalten und Optimierung*. Springer-Verlag, 1977.
- [38] N. N.: *PULS Prüfstand- und Laborsoftware Schulungsunterlagen Kurs 1: Einführungskurs für alle Benutzergruppen*, 2002.
- [39] N. N.: *PULS Prüfstand- und Laborsoftware Schulungsunterlagen Kurs 3: Kurs für Prüfstandsingenieure*, 2002.
- [40] Preinesberger E. und Mitterhuber J.: Anforderungen an die Systeme der neuen Generation zur Datenerfassung und Überwachung an Triebwerksprüfstände. In *DGLR-JT2001-041*, 2001.
- [41] Profos P.: *Meßfehler*. B. G. Teubner Stuttgart, 1984.
- [42] Profos P.: *Handbuch der industriellen Messtechnik*. Vulkan Verlag Essen, 1987.
- [43] Provost M.J.: Kalman Filtering Applied to Gas Turbine Analysis. In *Von Karman Institute Lecture Series - Gas Turbine Condition Monitoring and Fault Diagnosis*, Jan 2003.
- [44] Razak A.M.Y. und Carlyle J.S.: An Advanced Model Based Health Monitoring System to Reduce Gas Turbine Ownership Cost. In *ASME 2000-GT-0627*, Juni 2000.
- [45] Rick H. und Muggli W.: Generalized Digital Simulation Technique with Variable Engine Parameter Input for Steady State and Transient Behaviour of Aero Gas Turbines. In *AGARD-CP-324*, S. 26.1–26.20, 1983.
- [46] Riegler C.: *Modulares Leistungsberechnungsverfahren für Turboflugtriebwerke mit Kennfelddarstellung für Wärmeübertragungsvorgänge*. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Luftfahrtantriebe, 1997.

- [47] Riegler C., Bauer M. und Kurzke J.: Some Aspects of Modeling Compressor Behavior in Gas Turbine Performance Calculations. In *ASME 2000-GT-574*, Mai 2000.
- [48] Riegler C., Bauer M. und Schulte H.: Validation of a Mixed Flow Turbofan Performance Model in the Sub-Idle Operating Range. In *ASME GT-2003-38223*, Juni 2003.
- [49] Roesnick M.: Eine systemtheoretische Lösung des Fehlerdiagnoseproblems am Beispiel eines Flugtriebwerkes. Dissertation, Institut für Automatisierungstechnik, Bundeswehrhochschule Hamburg, 1984.
- [50] Romessis C., Stamatis A. und Mathioudakis K.: Setting up a Belief Network for Turbofan Diagnostics with the Aid of an Engine Performance Model. In *ISABE 2001-1032*, September 2001.
- [51] Roth B., Mavris D., Doel D.L. und Beeson D.: High-Accuracy Matching of Engine Performance Models to Test Data. In *ASME GT-2003-38784*, Juni 2003.
- [52] Rudnitski D.M.: Performance Derivation of Turbojets and Turbofans from Tests in Sea Level Test Cells. In *AGARD-LS-132*, S. 5.1–5.22, 1984.
- [53] Schäffler A.: Design of a new Fighter Engine - The Dream in an Engine Man's Life. In *RTO Symposium on Design Principles and Methods for Aircraft Gas Turbine Engines, Toulouse*, 1998.
- [54] Selder H.: *Einführung in die Numerische Mathematik für Ingenieure*. Carl Hanser Verlag München, 1973.
- [55] Sellers J.F. und Daniele C.J.: DYNGEN - A Program for Calculating Steady-State and Transient Performance of Turbojet and Turbofan Engines. TN D-7901, NASA, 1975.
- [56] Smith V.K. und Wehofer S.: Accelerated Development and Application of Integrated Test and Evaluation Technologies for Aeropropulsion Systems. In *ISABE 99-7071*, September 1999.
- [57] Spina P.R., Torella G. und Venturini M.: The Use of Expert Systems for Gas Turbine Diagnostics and Maintenance. In *ASME GT-2002-30033*, Juni 2002.
- [58] Stamatis A., Mathioudakis K. und Papailiou K.D.: Adaptive Simulation of Gas Turbine Performance. In *ASME 89-GT-205*, Juni 1989.
- [59] Stamatis A., Mathioudakis K., Smith M. und Papailiou K.: Gas Turbine Component Fault Identification by Means of Adaptive Performance Modeling. In *ASME 90-GT-376*, Juni 1990.
- [60] Staudacher S.: *Untersuchungen zum sekundären Luftsystem von Luftstrahltriebwerken*. Dissertation, Technische Universität München, Institut für Luft- und Raumfahrt, 1995.
- [61] Steffens K. und Walther R.: Driving the Technological Edge in Airbreathing Propulsion. In *ISABE 2003-1002*, September 2003.

- [62] Tabakoff W., Lakshiminarashimha A.N. und Pasin M.: Simulation of Compressor Performance Deterioration due to Erosion. In *ASME 89-GT-182*, 1989.
- [63] Therkorn D.: *Fortschrittliches Leistungs-Berechnungsverfahren für luftatmende Turbotriebwerke*. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Luftfahrtantriebe, January 1992.
- [64] Torella G. und Lombardo G.: Utilization of Neural Networks for Gas Turbine Engines. In *ISABE 95-7032*, September 1995.
- [65] Tsalavoutas A., Mathioudakis K., Stamatis A. und Smith M.: Identifying Faults in the Variable Geometry System of a Gas Turbine Compressor. In *ASME 2000-GT-0033*, 2000.
- [66] Unterreitmeier R.: *MOPS Benutzeranweisung*, 1995.
- [67] Urban L.A.: Gas Path Analysis Applied to Turbine Engine Condition Monitoring. In *AIAA Paper No. 72-1082*, Dezember 1972.
- [68] Urban L.A.: Parameter Selection for Multiple Fault Diagnostics of Gas Turbine Engines. In *ASME Paper 74-GT-62*, 1974.
- [69] Urban L.A. und Volponi A.J.: Mathematical Methods of Relative Engine Performance Diagnostics. In *SAE Paper 922048*, Oktober 1992.
- [70] Volponi A.J.: Gas Turbine Parameter Corrections. In *ASME 98-GT-347*, Juni 1998.
- [71] Walsh P.P. und Fletcher P.: *Gas Turbine Performance*. Blackwell Science, 1998.
- [72] Zaita A.V., Baley G. und Carlsons G.: Performance Deterioration Modeling in Aircraft Gas Turbine Engines. In *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol 120*, S. 344–394, 1998.
- [73] Zedda M. und Singh R.: Fault Diagnosis of a Turbofan Engine using Neural Networks: A Quantitative Approach. In *AIAA Paper No. 98-3602*, Juli 1998.
- [74] Zedda M. und Singh R.: Gas Turbine Engine and Sensor Fault Diagnosis Using Optimisation Techniques. In *AIAA Paper No. 99-2530*, Juni 1999.

Lebenslauf

Name		Michael Bauer
Personalien	Geburtsdatum	04.04.1973
	Geburtsort	München
	Familienstand	ledig
	Staatsangehörigkeit	deutsch
	Wohnsitz	Alter Messeplatz 6a, 80339 München
Schulbildung	1979 – 1983	Konrad-Celtis-Schule (Grundschule) in München
	1983 – 1992	Klenze-Gymnasium in München
	Mai 1992	Allgemeine Hochschulreife
Studium	1992 – 1998	Technische Universität München, Maschinenwesen
	1998	Diplom
	1995 – 1996	Université Pierre et Marie Curie mécanique
	1996	maîtrise de mécanique
Praktika	1992 und 1997	BMW AG in München
Berufstätigkeit	seit November 1998	Berechnungsingenieur bei MTU Aero Engines GmbH