

# SIMULATION DES GESAMTSYSTEMS BESTEHEND AUS HÖHENPRÜFSTAND UND TRIEBWERK

S. Köcke, S. Staudacher, J. Bierkamp\*, W. Berns\*\*

Institut für Luftfahrtantriebe  
Universität Stuttgart

\* MTU Aero Engines GmbH  
Dachauer Straße 665  
80995 München

\*\* FTI Engineering Network GmbH  
Ludwig-Erhard-Ring 8  
15827 Blankenfelde-Mahlow

## ÜBERSICHT

Die Anforderungen in der Zulassung und Validierung des Betriebsverhaltens moderner Flugtriebwerke stellen steigende Ansprüche an die Leistungsfähigkeit und Flexibilität der hierzu verwendeten Testeinrichtungen. In diesem Zusammenhang erfährt die Interaktion zwischen Versuchsträger und Prüfstandsanlage immer größere Bedeutung. Dies trifft insbesondere auch auf den Höhenprüfstand der Universität Stuttgart zu. Im Folgenden wird daher die am Institut für Luftfahrtantriebe erstellte Simulation des Höhenprüfstands beschrieben, welche durch ihre Einbettung in eine Gesamtsimulation die Grundlage für ein kostengünstiges und vielseitiges Werkzeug zur frühzeitigen Untersuchung des Betriebsverhaltens eines Versuchsträgers im Höhenprüfstand der Universität Stuttgart bildet. Zunächst wird aus diversen in der Literatur behandelten Ansätzen ein Konzept zur Simulation abgeleitet. Daran anschließend wird die Höhenprüfstandssimulation anhand eines Teilsystems validiert und die Integration der Simulation in eine Gesamtsimulation mit Triebwerksmodell und Reglern erläutert. Abschließend wird am Beispiel eines Beschleunigungsmanövers der Einfluss einer Prüfstandsregelung auf das Prüfstandsverhalten demonstriert.

## BEZEICHNUNGEN

$A$	Fläche
$A$	Systemmatrix
$B$	Steuermatrix
$c$	Konstante
$C$	Beobachtungsmatrix
$c_p$	spezifische Wärmekapazität bei konst. Druck
$c_v$	spezifische Wärmekapazität bei konst. Volumen
$D$	Durchgangsmatrix
$h$	Flughöhe
$k_v$	Ventilkoeffizient
$Ma$	Machzahl
$m(t)$	Masse, zeitabhängig
$\dot{m}$	Massenstrom
$\tilde{n}$	Drehzahlparameter
$p$	Druck
$p(t)$	Druck, zeitabhängig
$R$	spezifische Gaskonstante
$S$	Klappenstellungen

$t$	Zeit, Intervall
$T$	Temperatur
$T(t)$	Temperatur, zeitabhängig
$\underline{u}$	Eingangsvektor
$V$	Volumen
$\underline{x}$	Zustandsvektor
$\dot{\underline{x}}$	Ableitung des Zustandsvektors
$\underline{y}$	Ausgangsvektor
$\alpha$	Wärmeübergangszahl, Schrittweite
$\kappa$	Isentropenexponent

## Fußzeiger

0	Umgebung, Höhe
1	eintretend, vor
2	austrittend, nach
25	Eintrittsebene des Triebwerks
50	Austrittsebene des Triebwerks
90	Index für den Höhendruck
aus	ausströmend
Br	Brennstoff
eff	effektiv
ein	einströmend
i	Zählindex
i	ist
Int	Integration
L	Luft
struk	Struktur
n	Anzahl dynamischer Elemente
real	real
s	soll
t	total
TW	Triebwerk
ueber	überströmt

## Abkürzungen

BDF	Bachward Differentiation Formula
EPR	Engine Pressure Ratio
HBV	Zapfluftentnahme
SHS	Schubhebelstellung
VSV	Hochdruckverdichterleitschaufelposition

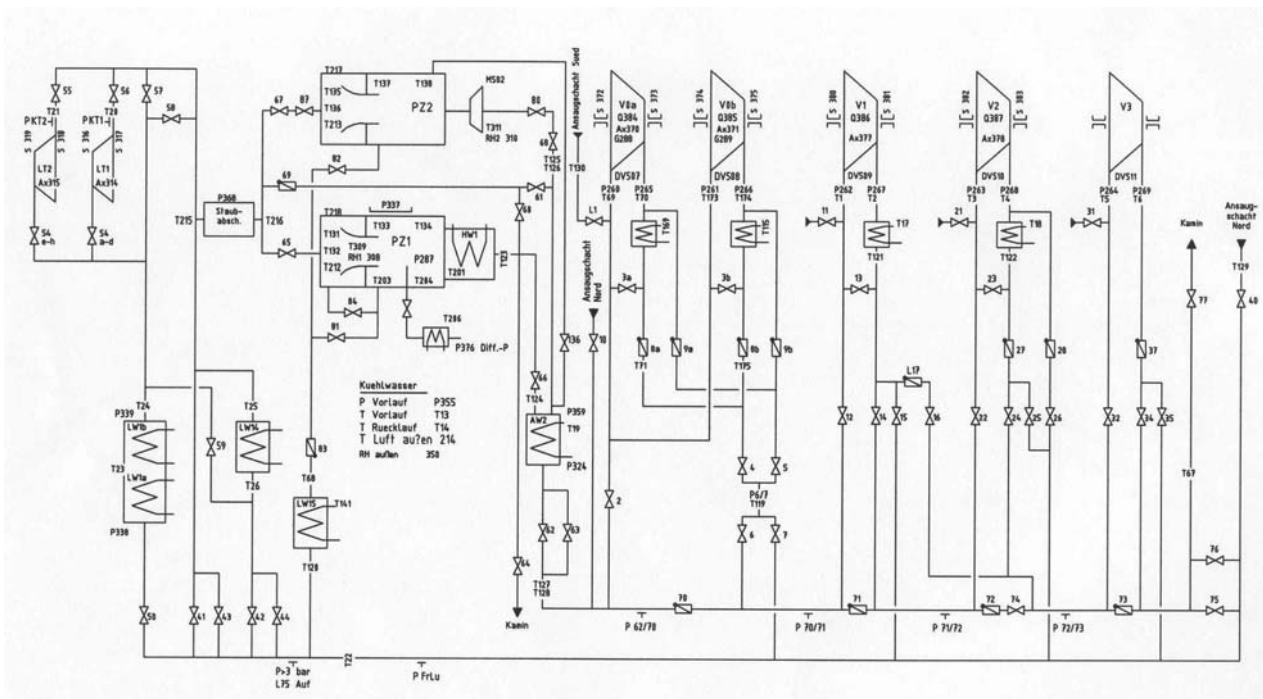


BILD 1. Schema des Höhenprüfstands

## 1. EINLEITUNG

Die Anforderungen in der Zulassung und Validierung des Betriebsverhaltens moderner Flugtriebwerke stellen steigende Ansprüche an die Leistungsfähigkeit der hierzu verwendeten Testeinrichtungen. Im Falle eines Höhenprüfstands misst sich dessen Leistungsfähigkeit an der Fähigkeit des Prüfstands, die geforderten Zustände und Massenströme sowohl im stationären Betrieb, als auch bei schnellen transienten Manövern des Triebwerks bereit zu stellen. Vor allem bei den zuletzt genannten schnellen Transienten treten Kopplungseffekte an den Schnittstellen zwischen Prüfstand und Triebwerk auf, die ohne entsprechende Regelung zu einer Abweichung von den geforderten Zuständen an Eintritt und Austritt des Triebwerks führen können. Erreichen diese Abweichungen eine bestimmte Größe, kann das am Höhenprüfstand gemessene Betriebsverhalten nur schlecht interpretiert werden. Es ist daher erforderlich durch die Untersuchung der Kopplungseffekte ein tiefer gehendes Verständnis für die Wechselwirkungen zu erlangen und daraus Regelstrategien zur Leistungssteigerung abzuleiten. Hierzu ist eine numerische Simulation erforderlich, die Aufschluss über die Kopplungseffekte und deren Auswirkungen auf Prüfstand und Triebwerk geben. Damit entsteht die Möglichkeit, die Versuchskonfiguration von Prüfstand und Triebwerk vor dem Eintritt in die reale Testphase auf deren Leistungsfähigkeit zu untersuchen und gegebenenfalls mögliche Korrekturverfahren noch vor dem Versuch abzuleiten.

## 2. HÖHENPRÜFSTANDS-SIMULATION

Der Höhenprüfstand des Instituts für Luftfahrtantriebe ist eine Versuchseinrichtung für die Untersuchung von Triebwerken und Triebwerkskomponenten unter Höhenbedingungen. Die Aufgabe des Prüfstands besteht in der Bereitstellung des Totaldrucks  $p_{t0}$  und der Totaltemperatur  $T_{t0}$  am Triebwerkeintritt sowie des Umgebungsdrucks  $p_0$  am Triebwerksaustritt unter Einhaltung des geforderten Massenstroms [1]. Für den Betrieb von zwei Prüfzellen

stehen im Höhenprüfstand zehn Wärmetauscher, zwei Kühlturbinen, fünf Verdichter und mehr als 70 Klappen zur Verfügung. Die verbindenden Rohrleitungen lassen sich in 190 Abschnitte unterteilen. Das Schema in BILD 1 gibt einen Überblick über den Aufbau des Prüfstands. Die bei einer Simulation des Gesamtsystems zu berücksichtigenden Grundelemente sind somit:

- Verdichter
- Turbine
- Wärmetauscher
- Volumenelement
- Klappe.

Bei der Modellbildung des oben dargestellten Systems wird ein modularer Ansatz verfolgt, der durch die Bereitstellung der Grundelemente die frei definierbare Konfiguration jeglicher Teilsysteme oder Änderungen im Gesamtsystem erlaubt.

In Anlehnung an [2], [3] und [4] wird bei der numerischen Simulation eine Unterteilung in statische und dynamische Berechnungsmodulare vorgenommen. Bei dieser Vorgehensweise unterliegt die Anordnung der Module bei der Konfiguration des betrachteten Systems der Beschränkung, dass ein Modul entweder aus den Massenströmen und Temperaturen als Eingangsgrößen Drücke und Temperaturen berechnet oder umgekehrt aus den Drücken und Temperaturen die Massenströme ermittelt. Das dynamische Verhalten einer Komponente infolge von Wärmeaustausch zwischen der Gasströmung und der Struktur des Systems sowie durch die zeitliche Verzögerung beim Durchströmen und Auffüllen von Volumina wird wie bei [2], [3] und [5] durch Differentialgleichungen für Druck und Temperatur erfasst. Das stationäre Betriebsverhalten von Verdichtern und Turbinen wird durch Ähnlichkeitskennfelder beschrieben. Die Dynamik der Turbomaschinen wird, wie in [4] vorgeschlagen, in den angrenzenden Volumenelementen berücksichtigt.

Bei der Berechnung der Klappen wird aus den Zustandsgrößen vor der Klappe und dem Druck hinter der Klappe der Massenstrom

$$(1) \quad \dot{m}_{real} = A_{eff} \cdot \rho_1 \sqrt{\frac{2}{R \cdot T}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \left( \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right)}$$

bestimmt [6]. Die effektiv durchströmte Fläche

$$(2) \quad A_{eff} = c \cdot k_V$$

wird als Funktion vom Ventilkoeffizienten  $k_V$  ermittelt, welcher die Bauform und die Stellung des Ventils sowie Verluste durch Reibung und Strahleinschnürung berücksichtigt. Der vom Hersteller unter Einheitsbedingungen experimentell ermittelte Ventilkoeffizient liegt hierbei in der Klappencharakteristik als Funktion des Öffnungswinkels vor. Die Umrechnung der Einheitsbedingungen auf die jeweils vorliegenden Bedingungen wird durch den Faktor  $c$  in Gl.(2) berücksichtigt [6].

Im Verdichtermodul wird aus den Zustandsgrößen vor dem Verdichter und dem Druck hinter dem Verdichter der Massenstromparameter aus dem Verdichterkennfeld ermittelt (siehe BILD 2).

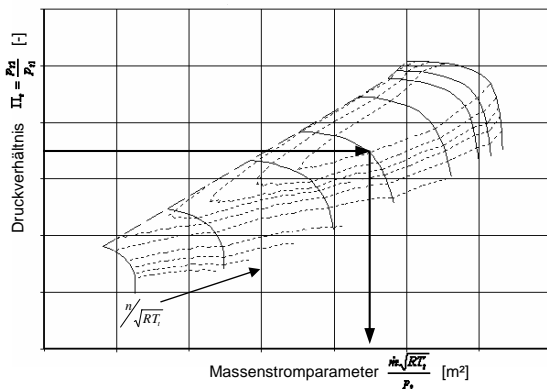


BILD 2. Ermittlung des Massenstromparameters aus einem Verdichterkennfeld

Hierbei ist zu beachten, dass die Verdichter des Höhenprüfstandes bei konstanten Drehzahlen betrieben werden. Der Massenstrom

$$(3) \quad \dot{m} = \frac{p_t}{\sqrt{R \cdot T_t}} \cdot \left( \frac{\dot{m} \cdot \sqrt{R \cdot T_t}}{p_t} \right)$$

wird aus dem Massenstromparameter sowie dem Druck und der Temperatur am Eintritt berechnet. Die Temperatur nach Verdichter ergibt sich aus der polytropen Zustandsgleichung [7].

Bei der Berechnung der Volumenelemente wird jeweils eine Differentialgleichung für die Temperatur

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{c_v \cdot m(t)}$$

$$(4) \quad \left[ c_p \cdot \sum_{i=1}^n (\dot{m}_i \cdot T_i) - c_v \cdot T(t) \cdot \sum_{i=1}^n \dot{m}_i - \alpha_L \cdot A_{ueber} \cdot (T(t) - T_{Struk}(t)) \right]$$

und den Druck

$$(5) \quad \frac{dp(t)}{dt} = \frac{1}{V} \left[ R \cdot T(t) \cdot \sum_{i=1}^n \dot{m}_i + m(t) \cdot R \cdot \frac{dT(t)}{dt} \right]$$

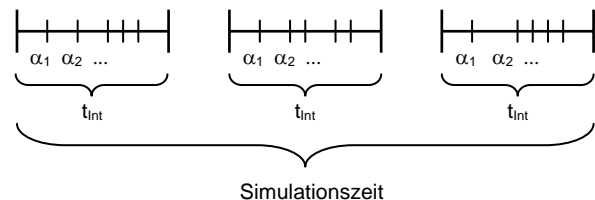
des Fluids im Volumenelement gelöst. Diesen Gleichungen wird eine Differentialgleichung zur Berechnung der Strukturtemperatur

$$(6) \quad \frac{dT_{Struk}(t)}{dt} = \frac{\alpha_L \cdot A_{ueber}}{c_v \cdot m_{Struk}} \cdot (T(t) - T_{Struk}(t))$$

hinzugefügt. Die Volumenelemente werden hierbei als adiabatisch, ideal gerührte Volumen mit homogener Strukturtemperatur angenommen. Der in den Volumina auftretende Druckverlust wird in den stationären Elementen bilanziert. Das Modul für einen Wärmetauscher unterscheidet sich vom Volumenelement lediglich in der Berechnung des Terms für die Berücksichtigung des Wärmeaustauschs [8]. Die benötigten Wärmeübergangskoeffizienten ergeben sich aus den Nusseltbeziehungen nach [8].

## 2.1. Berechnungsprinzip und Verfahren zur Lösung der Differentialgleichungen

Das aus den in 2. vorgestellten Elementen konfigurierte System wird während der Simulationszeit regelmäßig abgetastet. Zwischen den Zeitpunkten der Abtastung entstehen somit feste Integrationsintervalle, wie Sie in BILD 3 dargestellt sind.



$\alpha_1, \alpha_2$  ..... Schrittweite  
 $t_{int}$  ..... Integrationsintervall

BILD 3. Zusammenhang zwischen Simulationszeit, Integrationsintervall und Schrittweite

Zu Beginn eines jeden Integrationsintervalls werden die Stellgrößen aktualisiert. Für die Integration über das Intervall  $t_{int}$  wird dieses unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Genauigkeit der Lösung in Zeitschritte  $\alpha$  unterteilt. Zu Beginn eines Zeitschrittes  $\alpha_i$  werden die Massenströme und die zugehörigen Temperaturen an den statischen Komponenten berechnet. Die Ergebnisse werden den Volumenelementen und Wärmetauschern als Randbedingungen weitergegeben. In diesen Komponenten werden damit die Ableitungen von Temperatur und Druck berechnet und zur Integration an das numerische Lösungsverfahren übergeben. Dieser berechnet für einen Schritt mit der Schrittweite  $\alpha$  die aktuellen Temperaturen

und Drücke der dynamischen Komponenten, welche wiederum die Randbedingungen der statischen Komponenten im nächsten Zeitschritt  $\alpha_{i+1}$  darstellen. In BILD 4 ist der Durchlauf einer Berechnung dargestellt.

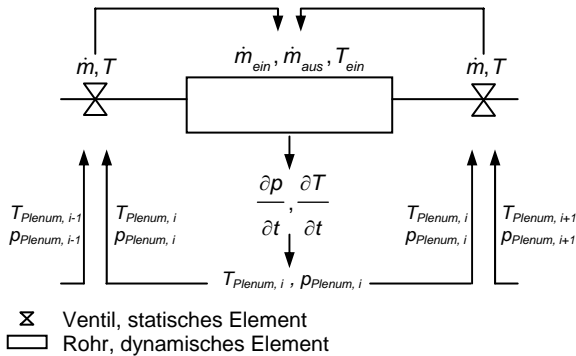


BILD 4. Darstellung eines Berechnungsdurchlaufs

Für die Lösung des Differentialgleichungssystems wurde eine unter der Bezeichnung „Backward Differentiation Formula“ (BDF) bekannte Methode nach C. W. Gear [9] ausgewählt. Diese Methode gehört zu den Prädiktor-Korrektor-Verfahren und wird durch die Verwendung eines Polynomansatzes im Prädiktor unabhängig von der Schrittweite. Beim BDF handelt es sich um ein implizites Mehrschrittverfahren, welches zur Lösung von steifen Systemen geeignet ist. Die Schrittweite und die Ordnung des Lösers sind variabel. Zur Lösung der Differentialgleichungen eines dynamischen Moduls werden die Zustandsvariablen der übrigen Module während eines Integrationsschrittes als konstant angenommen. Der Informationsaustausch zwischen den Modulen erfolgt jeweils am Ende eines Zeitschrittes.

## 2.2. Validierung der Simulation am Beispiel des Verdichters

Die Validierung der in 2. und 2.1 vorgestellten Modellbildung erfolgt nicht an Hand des in BILD 1 dargestellten Gesamtsystems, sondern an gut abgrenzbaren Teilsystemen. Ein Beispiel für ein solches Teilsystem ist das in BILD 5 dargestellte System um einen Verdichter bestehend aus einem Wärmetauscher, einer Klappe, einem Verdichter und den verbindenden Rohrleitungen. Die Validierung wird beispielhaft am Verdichtermodell bestehend aus dem Verdichtermodule und einem Volumenelement zur Abbildung von Wärmeübergang und Volumenpackung vorgestellt.

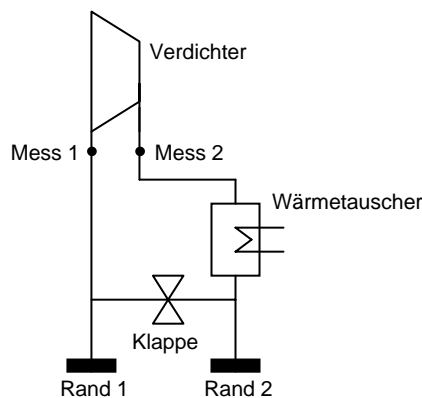


BILD 5. Schema des Teilsystems zur Validierung

An den Rändern Rand 1 und Rand 2 werden der Simulation die Werte für Druck und Temperatur vorgegeben, wobei die Temperatur des austretenden Massenstroms an Rand 2 als Vorgabe für die Simulation nicht von Bedeutung ist. Die Vorgabewerte orientieren sich hierbei an Messwerten aus dem Versuch (siehe BILD 6, 7 und 8). Die Klappe im Teilsystem war während des Versuchs geschlossen.

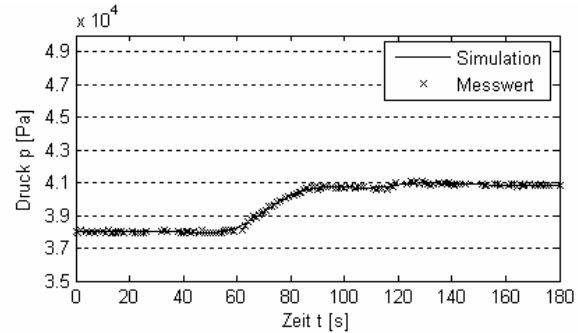


BILD 6. Druck am Eintritt des Teilsystems, Rand 1

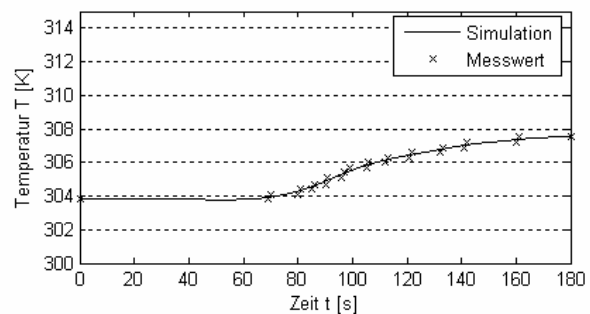


BILD 7. Temperatur am Eintritt des Teilsystems, Rand 1

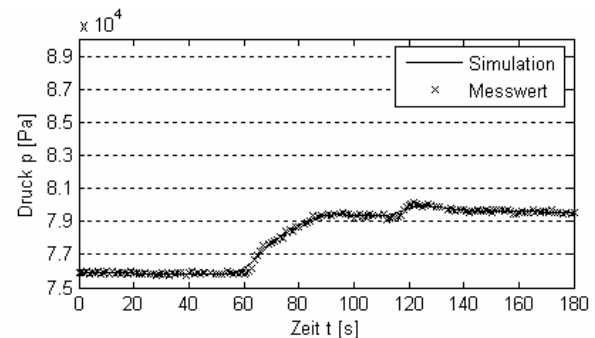


BILD 8. Druck am Austritt des Teilsystems, Rand 2

Zur Validierung des Verdichtermodells werden die Messwerte an den Stellen Mess 1 und Mess 2 vor und nach Verdichter mit den entsprechenden Ergebnissen aus der Simulation verglichen. Der Druck und die Temperatur vor dem Verdichter sowie der Druck hinter dem Verdichter (BILD 9, 10 und 11) liegen in der Bandbreite der Streuung der Messwerte. Die Temperatur hinter dem Verdichter (BILD 12) stimmt mit einer Abweichung von maximal 5% mit den Messwerten überein.

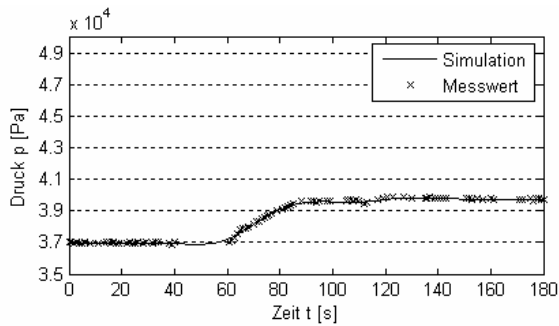


BILD 9. Druck am Verdichtereintritt, Mess 1

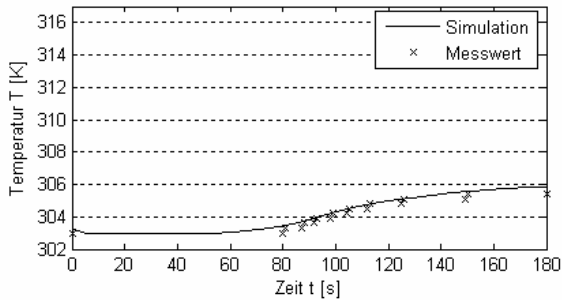


BILD 10. Temperatur am Verdichtereintritt, Mess 1

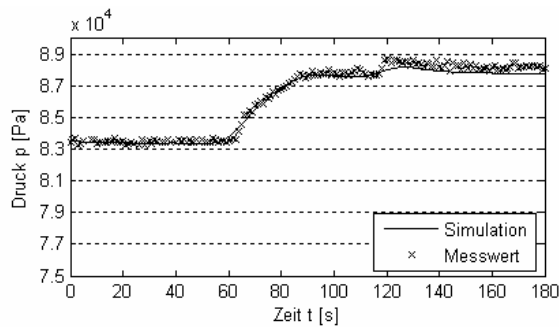


BILD 11. Druck am Verdichteraustritt, Mess 2

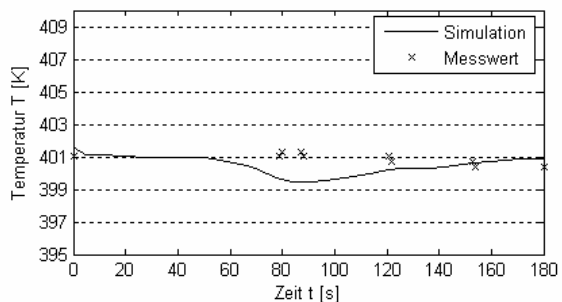


BILD 12. Temperatur am Verdichteraustritt, Mess 2

Das Verdichter-Druckverhältnis (BILD 13) stimmt mit einer maximalen Abweichung von unter 1% mit dem aus den Messwerten bestimmten Verhältnis überein. Der simulierte Verlauf des Temperaturverhältnisses zeigt deutlich den Einfluss der modellierten Wärmeübergänge. Die Abweichung zu dem aus gemessenen Werten abgeleiteten Temperaturverhältnis ist durch die Art der Messwerterfassung am Stuttgarter Höhenprüfstand zu erklären, die neue Messwerte erst ab einer Überschreitung eines Schwellwertes für die Temperaturänderung protokolliert. Diese Maßnahme zur Reduktion der protokollierten Daten führt zu der in BILD 10 dargestellten zeitlichen Verschiebung um 20 Sekunden, die in BILD 14 nochmals deutlich wird.

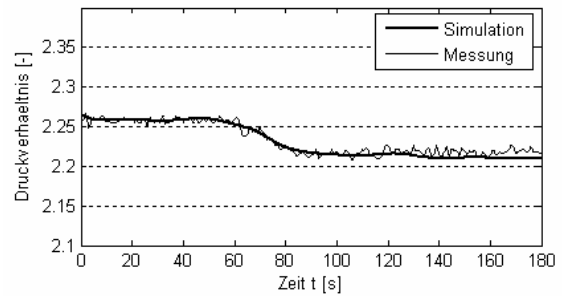


BILD 13. Verdichter-Druckverhältnis

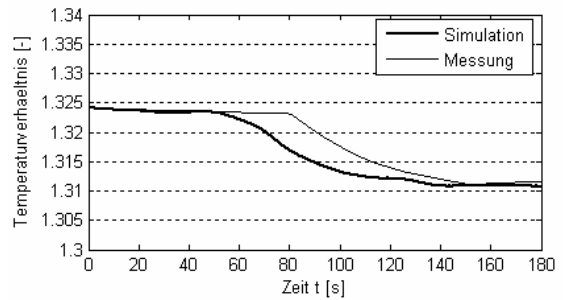


BILD 14. Verdichter-Temperaturverhältnis

Es ist weiterhin ersichtlich, dass die Druckverluste und das Zeitverhalten des Abschnitts zwischen Rand 1 und Verdichtereintritt mit guter Genauigkeit wieder gegeben werden.

### 3. HÖHENPRÜFSTANDSREGLER

Die Regelung des Höhenprüfstands erfolgt mit Hilfe eines bereits vorhandenen Regelsystems. Die Aufgabe dieses Höhenprüfstandsreglers besteht in der Bestimmung der notwendigen Soll-Klappenstellungen zur Einstellung eines geforderten Betriebspunktes an der Prüfzelle [10]. Die Vorgabe des Betriebspunktes erfolgt durch einen übergeordneten Hauptregler, welcher den Eintrittszustand, den Austrittsdruck, die Drehzahl und den Druckgradienten am Triebwerk an den Höhenprüfstandsregler übergibt. Weitere Eingangsgrößen des Reglers sind die vom Höhenprüfstand bzw. Höhenprüfstandsmodell übergebenen Ist-Klappenstellungen sowie die für die Berechnungen notwendigen Zustandsgrößen des Höhenprüfstands. Der Signalfluss zwischen den an der Regelung beteiligten Systemen ist in BILD 15 dargestellt.

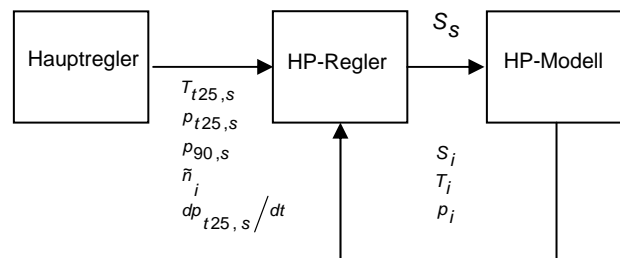


BILD 15. Übergabestruktur am Höhenprüfstandsregler

Für die Ermittlung der Klappenstellungen teilt sich der Regler in die Bereiche Temperaturregelung und Druckregelung auf. Die Temperaturregelung basiert auf der Bestimmung einer nahe den Regelorganen gelegenen Mischungstemperatur. Die Ermittlung dieser Mischungstem-

peratur ist über zwei Berechnungsansätze möglich. Der erste Ansatz berücksichtigt die Wärmeübertragung zwischen Luftmassenstrom und Höhenprüfstandsstruktur bei einer zeitunabhängigen Strukturtemperatur, während der zweite Ansatz mit einer zeitabhängigen Strukturtemperatur rechnet. Des Weiteren wird neben der Temperaturänderung infolge von Kompressions- und Expansionseffekten ein Totzeiteffekt berücksichtigt, welcher aus der Verzögerung auf Grund der zur Durchströmung des Systems notwendigen Zeit resultiert. Für die Druckregelung stehen im Regler drei verschiedene Modi zur Verfügung, welche sich in den Freiheitsgraden der Klappen und ihren daraus folgenden Aufgaben unterscheiden. Die Wahl der entsprechenden Berechnungsansätze und Modi ist abhängig von Betriebspunkt und Manöver und wird vom Höhenprüfstandsregler selbstständig vorgenommen.

#### 4. TRIEBWERKSMODELL UND TRIEBWERKS-REGLER

Die Systemdynamik des Triebwerks wird durch die Kopplung der Simulationsmodelle für die Regelgesetze, das Triebwerksverhalten und die Aktuartordynamik für Kraftstoffsystem, Verdichter, Leitschaufelverstellungssystem und Ablasssystem abgebildet. Die Eingangsgrößen sind die Flugbedingungen, Triebwerkseintrittsdruk- und -temperatur, sowie die rückgeführte Drehzahl. Mittels der Regelgesetze werden der Brennstoffmassenstrom, die Hochdruckverdichterleitschaufelposition (VSV) und die Ventilstellung für die Zapfluftentnahme (HBV) bestimmt und an das Triebwerksmodell übergeben. Das nichtlineare zeitvariable Betriebsverhalten des Triebwerks wird durch ein Vektor-Differentialgleichungssystem im Zustandsraum [11] beschrieben. In BILD 16 werden die Ein- und Ausgangsgrößen von Triebwerksregler und Triebwerksmodell dargestellt.

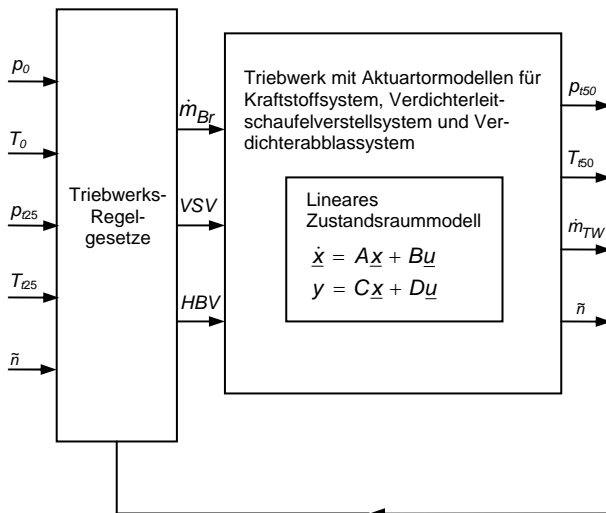


BILD 16. Ein- und Ausgangsgrößen an Triebwerksmodell und Triebwerksregler

#### 5. INTEGRATION IN EINE GEMEINSAME SIMULATIONSUMGEBUNG

Für den Aufbau einer Gesamtsimulation wurde das Programm MATLAB/SIMULINK ausgewählt. Die zuvor beschriebenen Bausteine Höhenprüfstandsmodell und Höhenprüfstandsregler sowie Triebwerksmodell und Trieb-

werksregler werden zusammen mit dem übergeordneten Hauptregler in MATLAB/SIMULINK integriert und bilden die Höhenprüfstands-Triebwerks-Gesamtsimulation. In BILD 17 sind das Funktionsprinzip und die Übergabe der charakteristischen Werte der Gesamtsimulation dargestellt.

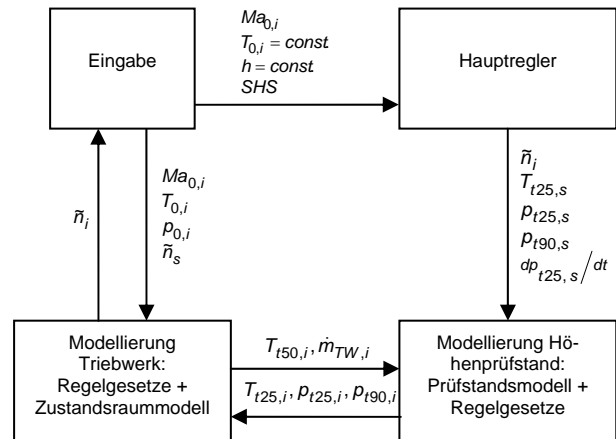


BILD 17. Funktionsprinzip und Datenübergabe der Gesamtsimulation

Der Triebwerksregler und der Hauptregler sind in MATLAB/SIMULINK abgebildet. Das Modell des Höhenprüfstands, der Prüfstandsregler und das Triebwerksmodell liegen als Fortran-Programme vor und werden mittels einer Schnittstellenfunktion in SIMULINK aufgerufen. Während zur dynamischen Berechnung des Triebwerksmodells die in MATLAB implementierten Lösungsmethoden Anwendung finden, wird zur Berechnung des Höhenprüfstandsmodells das in 2.2. vorgestellte numerische Verfahren eingesetzt. Zu Beginn jeden Zeitschrittes ermittelt der Hauptregler aus den kommandierten Flugbedingungen und der Schubhebelstellung unter Verwendung von Synthesetabellen und in Abhängigkeit des zu simulierenden Triebwerksmanövers die entsprechenden Ein- und Austrittsbedingungen des Triebwerks sowie den geforderten Drehzahlparameter. Die Simulation des Triebwerks stellt dem Höhenprüfstandsmodell den aktuellen Triebwerksmassenstrom und die Triebwerksaustrittstemperatur zur Verfügung. Mit diesen Eingangsgrößen und den vom Hauptregler übermittelten geforderten Ein- und Austrittsbedingungen des Triebwerks werden in der Höhenprüfstandssimulation die einstellbaren Ein- und Austrittsbedingungen bestimmt. Diese werden an das Triebwerksmodell übergeben. Zusätzlich kann für schnelle Beschleunigungsmanöver ein geforderter Druckgradient am Triebwerkseintritt als Führungsgröße an den Höhenprüfstandsregler übergeben werden.

#### 6. ANWENDUNG DER GESAMTSIMULATION

Die so entstandene Gesamtsimulation kann nun auf typische Fragestellungen des Höhenprüfstandsbetriebs angewandt werden. Beispielhaft wird im Folgenden die Beschleunigung eines Versuchsträgers mit anschließender Stabilisierung und Verzögerung diskutiert. Der Höhenprüfstand wird im vorliegenden Fall im reinen Staubetrieb gefahren. Das so entstehende Teilsystem ist in BILD 18 dargestellt.

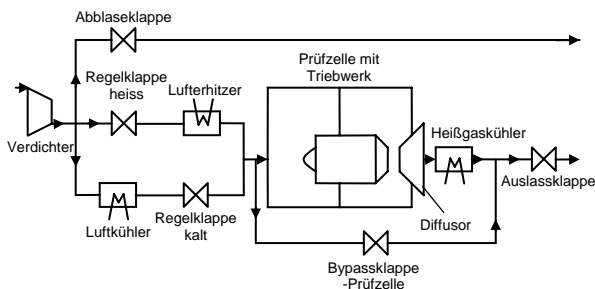


BILD 18. Schaltschema des Beispielfalles

Um die Bedeutung einer effizienten Regelung des Höhenprüfstandes zu unterstreichen, wird die Simulation sowohl mit als auch ohne Höhenprüfstandsregler durchgeführt. Der Ablauf des Manövers des Versuchsträgers ist an Hand des Luftmassenstroms in BILD 19 dargestellt.

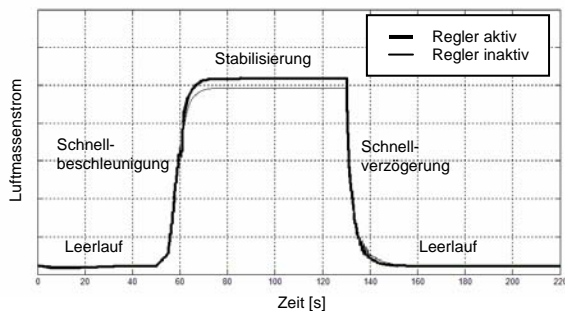


BILD 19. Manöver des Versuchsträgers

In BILD 20 wird der Druckverlauf am Eintritt des Triebwerks für den geregelten und den ungeregelten Betrieb des Prüfstands dargestellt. Ohne Eingriff des Reglers sinkt auf Grund der Steigerung des Massenstroms der Druck am Eintritt des Triebwerks, wodurch sich eine Abweichung vom Sollwert von 4000Pa, anteilig entsprechend 4%, einstellt. Bei aktivem Regler wirkt die gezielte Anpassung der Klappenstellungen des Prüfstands dem Druckabfall entgegen. Der Eintrittsdruck weicht um 300Pa, anteilig entsprechend 3%, vom Sollwert ab.

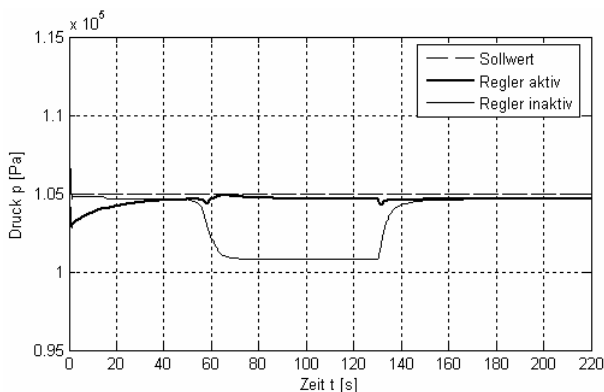


BILD 20. Druckverlauf am Triebwerkseintritt

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Am Institut für Luftfahrtantriebe wurde eine numerische Methode zur Abbildung des Stuttgarter Höhenprüfstandes entwickelt. Die Vorgehensweise bei der Validierung dieses Modells wurde am Beispiel eines Subsystems vorgestellt. Das Simulationsmodell des Höhenprüfstandes konnte in

eine Gesamtsimulation bestehend aus Höhenprüfstand, Hauptregler, Triebwerksregler und Triebwerksmodell eingebettet werden. Die Fähigkeit, eine solche Simulation durchführen zu können, bildet, wie an einem Beispielfall gezeigt, die Grundlage für ein kostengünstiges und vielseitiges Werkzeug zur frühzeitigen Untersuchung des Betriebsverhaltens eines Versuchsträgers im Höhenprüfstand der Universität Stuttgart. Darüber hinaus dient dieses Modell zur kontinuierlichen Weiterentwicklung der Regelung des Höhenprüfstandes.

## 8. LITERATUR

- [1] W. Braig, Enhancement of the Stuttgart Altitude Test Facility. Proceeding of the European Propulsion Forum, 1989, pp. 4.1-4.16.
- [2] R. V. Cottington, Total powerplant simulation. AGARD Paper No 24, 1975
- [3] R. A. Onions, A. M. Foss: Improvements in the dynamic simulation of gas turbines. AGARD Paper No 27, 1982.
- [4] F. Hörl, Systemtheoretische Methode zur dynamischen Zustandsüberwachung von Gasturbinen. Dissertation, Lehrstuhl für Flugantriebe, TU München, 1987.
- [5] K. Bauerfeind, Die exakte Bestimmung des Übertragungsverhaltens von Turbostrahltriebwerken unter Berücksichtigung des instationären Verhaltens seiner Komponenten. Dissertation, Lehrstuhl für Flugantriebe TU München, 1968.
- [6] W. Wagner: Regelarmaturen. Vogel Fachbuch, 1996.
- [7] W. Traupel, Thermische Turbomaschinen. Erster Band, 2. Auflage, Springer-Verlag, 1966.
- [8] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas. VDI-Verlag GmbH, 4. Auflage, 1984.
- [9] G. Engeln-Müllges, F. Reutter: Formelsammlung zur Numerischen Mathematik mit Standard FORTRAN 77-Programmen. Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, 6. Auflage, 1988.
- [10] W. Braig: Transient aeroengine testing at Stuttgart Altitude Test Facility. ISABE Paper No 99-7074, 1999.
- [11] J. Lunze: Regelungstechnik1, Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen. 3. Auflage, Springer-Verlag, 2001.