

ENTWURF UND IDENTIFIKATION EINES MODULAREN MODELLS DES HÖHENPRÜFTSTANDES DER UNIVERSITÄT STUTTGART

Sebastian Bolk und Stephan Staudacher
 Institut für Luftfahrtantriebe
 Universität Stuttgart
 D-70569 Stuttgart

Zusammenfassung

Das Institut für Luftfahrtantriebe betreibt seit 1964 einen Höhenprüfstand für Flugtriebwerke und deren Komponenten. Der Prüfstand stellt dabei dem Prüfling Umgebungsbedingungen zur Verfügung, wie sie unter Flugbedingungen in der Atmosphäre auftreten. Druck und Temperatur am Eintritt sowie der Druck am Austritt des Prüflings können so eingestellt werden, daß sie einem Flug mit verschiedenen Geschwindigkeiten bei unterschiedlichen Flughöhen entsprechen.

Für den sehr komplexen Prüfstand wurde ein Modell entwickelt, das es erlaubt, das zeitliche Verhalten der Größen Druck und Temperatur des Luftmassenstroms im Versuchsbetrieb abilden zu können. Da für verschiedene Versuche häufig modifizierte Versuchsaufbauten verwendet werden und der Aufbau des Höhenprüfstandes verschiedene Betriebsweisen erlaubt, wurde das Modell modular aufgebaut. Die Elemente des Prüfstandes wie Rohre, Wärmetauscher, Luftklappen, Staubabscheider, Diffusor und der Prüfling wurden dazu einzeln modelliert und können beliebig miteinander verschaltet werden. Da das Modell zum Aufbau einer Regelung verwendet werden soll, muss die benötigte Rechenzeit kleiner sein als die simulierte Zeit.

Die Parameter des Modells, wie die Kennlinien der Stellorgane und die Größe der Volumenelemente, wurde anschließend mittels eines Versuchs quantitativ bestimmt. Dabei wurde beurteilt, inwieweit die identifizierten Parameter für den gesamten Arbeitsbereich des Prüfstandes gültig sind.

Die Ergebnisse zeigen - insbesondere bei dynamischen Vorgängen - eine hohe Modellgüte, die das Verhalten des Prüfstandes über einen großen Arbeitsbereich gut abbildet.

Bezeichnungen

Fußzeiger

α	mittlerer Wärmeübergangskoeffizient	1	vor der Klappe
A_{ref}	Referenzquerschnittsfläche	2	hinter der Klappe
A_{Wand}	überströmte Rohrwandfläche	i	zu einem Volumenelement gehörig
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konst. Druck	j	zu einer Klappe gehörig
c_v	spezifische Wärmekapazität bei konst. Volumen	param	normierter Parameter
$\Delta\mu$	Unsicherheit des Widerstandsbeiwertes	Struk	Struktur bzw. Rohrwand betreffend
h	spezifische Enthalpie		
κ	Isentropenexponent		
m	Masse		
μ	Widerstandsbeiwert		
p	Druck		
Π	Druckverhältnis		
Q	Wärme		
R	spezifische Gaskonstante		
s	Öffnungsgrad einer Klappe		
σ	Standardabweichung		
T	Temperatur		
U	innere Energie		
V	Volumen		
w	Strömungsgeschwindigkeit		

1 Höhenprüfstand

Seit 1964 betreibt das Institut für Luftfahrtantriebe der Universität Stuttgart einen Höhenprüfstand für Flugtriebwerke und deren Komponenten. Der Prüfstand stellt dabei dem Prüfling Umgebungsbedingungen zur Verfügung, wie sie unter Flugbedingungen in der Atmosphäre auftreten. Druck und Temperatur am Eintritt sowie der Druck am Austritt des Prüflings können so eingestellt werden, daß sie einem Flug mit verschiedenen Geschwindigkeiten in unterschiedlichen Flughöhen entsprechen.

Der Prüfstand kann auf zwei Arten betrieben werden.

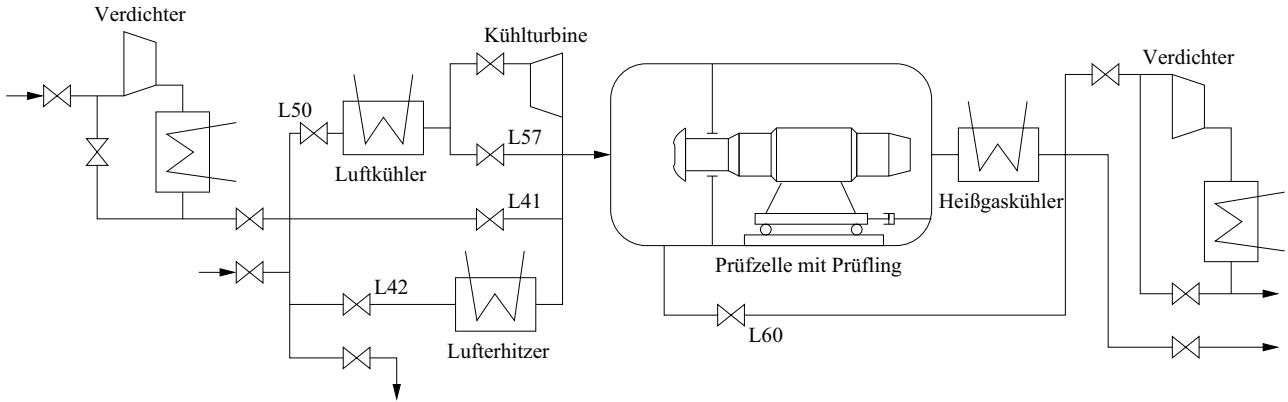


Abbildung 1: Aufbau des Höhenprüfstandes

Im Staubetrieb wird mit einem Verdichter Luft aus der Atmosphäre angesaugt, verdichtet und dem Prüfling zugeführt. Die Luft kann wahlweise über Wärmetauscher erheizt oder abgekühlt werden, wobei die genaue Einstellung der Temperatur durch Mischen zweier Luftströme mit unterschiedlicher Temperatur erfolgt (Abb. 1). Dies entspricht einem Flug in Bodennähe.

Im Saugbetrieb werden die Abgase des Triebwerks hinter der Prüfzelle abgesaugt. Die Einstellung des Eintrittsdrucks erfolgt durch Androsseln der Regelklappen vor der Prüfzelle. Der entstehende Unterdruck vor und hinter dem Prüfling simuliert einen Flug unter Höhenbedingungen. Wie im Staubetrieb kann auch hier die Temperatur durch Mischen von Luftströmen eingestellt werden.

Vorangegangene Arbeiten haben sich mit der Simulation und der Regelung des Prüfstands beschäftigt [7]. In [11] wird gezeigt, daß der in [8] entwickelte Regler mit einem einfachen Modell des HP zusammenarbeitet.

Im folgenden wird ein detailliertes Modell der Einlaufstrecke entwickelt und unter Verwendung neuer Meßtechnik identifiziert. Dieses Modell soll das Verhalten von Druck und Temperatur des Luftmassenstroms in der Anlage im Versuchsbetrieb mit verbesserter Genauigkeit abbilden und später die Grundlage für die Entwicklung einer neuen Regelung dienen.

Da die Elemente des Prüfstandes durch Stellen von Luftklappen in verschiedener Weise miteinander kombiniert werden können, soll das Modell modular aufgebaut werden, d.h. die Elemente werden einzeln modelliert, um sie später entsprechend der Betriebsart der Anlage miteinander verschalten zu können.

Um die Modularität zu erreichen, werden alle Elemente des Prüfstandes auf Basiselemente zurückgeführt, die mit einer wohldefinierten Schnittstelle verbunden werden können. Unterschieden werden dabei zwei Arten von Basiselementen: Dynamische Elemente beinhalten ein bestimmtes Volumen an Luft. Ihr Verhalten wird über die Differentialgleichungen für Druck

$$(1) \quad \frac{dp_i}{dt} = f(p_i, T_i, m_j, T_j)$$

und Temperatur

$$(2) \quad \frac{dT_i}{dt} = f(p_i, T_i, m_j, T_j)$$

beschrieben. Dynamische Elemente werden durch statische Elemente miteinander verbunden. Diese sind definiert durch den Massenstrom

$$(3) \quad \dot{m}_j = f(p_{i_1}, p_{i_2}, T_{i_1}, T_{i_2})$$

und die Temperatur

$$(4) \quad T_j = f(p_{i_1}, p_{i_2}, T_{i_1}, T_{i_2})$$

der strömenden Luft.

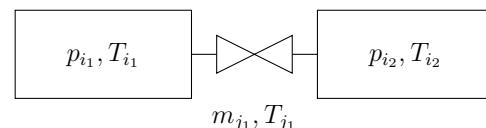


Abbildung 2: Kombination von dynamischen und statischen Elementen des Modells

Im folgenden werden die verwendeten Elemente des Prüfstandes vorgestellt.

Rohr

Grundelement des Prüfstandsmodells ist das Rohrelement. Ein Rohr wird als Volumen V modelliert, in dem der Druck und die Temperatur der eingeschlossenen Luft von

den ein- und ausströmenden Luftmassen \dot{m}_j beeinflusst werden. Zusätzlich findet ein Wärmeaustausch \dot{Q}_{Struk} zwischen der Luft und der Rohrwand statt. Wird Wärme von der Rohrwand an die Luft abgegeben, so ist \dot{Q}_{Struk} positiv. Da die Rohre aussen isoliert sind, wird der Wärmeübergang zwischen der Rohrwand und der Umgebung vernachlässigt.

Werden in den ersten Hauptsatz der Thermodynamik in differentieller Form

$$(5) \quad dU - dQ_{\text{Struk}} = \sum_j h_j dm_j$$

die thermischen Zustandsgleichung des idealen Gases

$$(6) \quad pV = mRT$$

und die kalorischen Zustandsgleichungen bei konstanter spezifischer Wärmekapazität

$$(7) \quad dU = m c_v dT + c_v T dm$$

$$(8) \quad dh = c_p dT$$

eingesetzt, ergeben sich die Differentialgleichungen für Druck und Temperatur in den Rohrelementen.

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= \frac{c_p R}{c_v V} \sum_j \dot{m}_j T_j + \frac{R}{c_v V} \dot{Q}_{\text{Struk}} \\ \frac{dT}{dt} &= \frac{RT}{c_v V p(t)} \left[c_p \sum_j \dot{m}_j T_j - c_v T \sum_j \dot{m}_j + \dot{Q}_{\text{Struk}} \right] \end{aligned}$$

Die von der Rohrwand auf die Luft übertragene Wärme beträgt

$$(9) \quad \dot{Q}_{\text{Struk}} = \alpha \cdot A_{\text{Wand}} \cdot (T_{\text{Struk}} - T) .$$

Da die Temperatur der Rohrwand der Fluidtemperatur langsam folgt, wird die Differentialgleichung der Rohrwandtemperatur

$$(10) \quad \frac{dT_{\text{Struk}}}{dt} = \frac{\alpha \cdot A_{\text{Wand}}}{c_v \cdot m_{\text{Struk}}} (T - T_{\text{Struk}})$$

hinzugefügt.

Wärmetauscher

Wärmetauscher werden als Rohre betrachtet, in denen ein Wärmeaustausch mit einem Medium stattfindet. Die

Modellierung erfolgt ähnlich dem bei Rohren verwendeten Vorgehen, der erste Hauptsatz enthält jedoch die zugeführte Wärme Q .

$$(11) \quad dU - dQ - dQ_{\text{Struk}} = \sum_j h_j dm_j$$

Dadurch erhalten die Zustandsgleichungen die Form

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= \frac{c_p R}{c_v V} \sum_j \dot{m}_j T_j + \frac{R}{c_v V} (\dot{Q} + \dot{Q}_{\text{Struk}}) \\ \frac{dT}{dt} &= \frac{RT}{c_v V p(t)} \left[c_p \sum_j \dot{m}_j T_j - c_v T \sum_j \dot{m}_j \right] \\ &\quad + \frac{RT}{c_v V p(t)} [\dot{Q} + \dot{Q}_{\text{Struk}}] . \end{aligned}$$

Luftklappe

In der Prüfzelle werden Druck und Temperatur über das Mischen zweier Luftströme unterschiedlicher Temperatur eingestellt. Dies geschieht durch Drosselung der Luftströme über Luftklappen. Bei gleichsinnigem Fahren der Luftklappen verändert sich der Druck, bei gegensinnigem verändert sich die Temperatur. Da das Luftpolumen in der Klappe klein ist, wird diese als statisches Element modelliert.

Um bei der Modellierung eine Unabhängigkeit von Dichte, Temperatur und der Referenzfläche A_{ref} der Klappe zu erreichen, bietet es sich an, den Ähnlichkeitsparameter

$$(12) \quad m_{\text{param}} = \frac{\dot{m} \sqrt{R \cdot T_1}}{A_{\text{ref}} \cdot p_1}$$

zu verwenden. Durch Einsetzen von

$$(13) \quad \dot{m} = \frac{p_1}{RT} w A_{\text{ref}}$$

und der Gleichung von DE SAINT-VENANT und WANTZEL [5] für die isentrope Ausströmung von idealen Gasen aus Druckbehältern

$$(14) \quad w = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} RT_1 \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right)}$$

kann mit den Beziehungen für ideale Gase $c_p - c_v = R$ und $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ der Luftmassenstrom über die Klappe beschrieben werden durch

$$(15) \quad m_{\text{param}} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot c_p \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right)}}{\sqrt{R} \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \cdot \mu(s) .$$

Dabei ist μ ein Minderungswert, der vom Öffnungswinkel der Klappe abhängt.

Die Temperatur der Luft, die aus der Klappe in das nächste Volumenelement strömt, beträgt

$$(16) \quad T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{R}{c_p}} \cdot T_1 .$$

Prüfling

Der Prüfling wird ebenfalls als statisches Element modelliert. Hier wird davon ausgegangen, daß der Massenstrom und die Temperatur der aus dem Prüfling austretenden Luft bekannt ist.

Bei Triebwerksversuchen kann beides über die Drehzahl des Prüflings abgeschätzt und als Kennfeld hinterlegt werden.

Heißgaskühler

Der Heißgaskühler dient dazu, die heißen Triebwerksabgase herunterzukühlen, um die thermische Belastung der Rohrleitungen zu reduzieren.

Hierzu werden die Abgase zunächst in einem Diffusor verzögert, wobei sich die Strömungsgeschwindigkeit verringert und der statische Druck sich erhöht. Da das Modell durch die Annahme punktförmiger Volumina keine Information über die Strömungsgeschwindigkeit enthält, muß diese über den Prüfling abgeschätzt werden. Besitzt der Prüfling eine konvergente Schubdüse so ist der engste Querschnitt am Austritt zugleich der kritische [13].

Dieser Druckrückgewinn verringert im Saugbetrieb bei gleichen Druckverhältnis über die Verdichter den Druck hinter dem Prüfling und ermöglicht eine größere simulierte Höhe.

2 Struktur des Modells

Beim Aufbau des Modells soll mit Blick auf die erforderliche Rechenzeit die Komplexität möglichst gering sein, die wesentlichen Vorgänge im Prüfstand jedoch mit guter Genauigkeit abgebildet werden. Da für den Prüfling im Wesentlichen nur Druck und Temperatur der zu- bzw. abgeführten Luft entscheidend ist, beschränkt sich das Modell auf die Simulation dieser Größen. Dazu werden die Rohre des Prüfstands in Rohrelementen des Modells zusammengefasst und durch Klappen voneinander getrennt. Alle anderen Faktoren, die keinen nennenswerten Einfluß auf Druck oder Temperatur haben, werden vernachlässigt.

Da das Modell im Stau- und Saugbetrieb verwendet werden soll, bietet es sich an, daß Modell unabhängig von der Verschaltung der Verdichter zu entwickeln. Daher wurde die Systemgrenze am Eintritt so gewählt, daß sie Druck

und Temperatur der zugeführten Luft enthält. Diese entsprechen im Staubetrieb den von den Verdichtern erzeugten Druck und ihrer Austrittstemperatur. Die Verdichter arbeiten mit konstanter Drehzahl, so daß an dieser Stelle von konstanten Werten ausgegangen werden kann. Eine Modellierung der Verdichter entfällt damit.

Im Saugbetrieb herrschen vor den Regelklappen Atmosphären-Bedingungen. Für die Systemgrenze hinter dem Prüfling gilt analog das Gleiche (Abb. 3).

Für den Fall, daß sich im Prüfstand zwischen zwei für das Modell vorgesehenen Rohrelementen keine Klappe befindet, wird im Modell eine virtuelle Klappe eingefügt. So ist garantiert, daß statische und dynamische Elemente immer abwechselnd miteinander verschaltet werden können.

3 Versuchsaufbau

Für die Identifikation der Parameter der Modells sind die benötigten Meßwerte in einem eigenen Versuch bestimmt worden. In diesem Versuch konnte die vorhandene Druck- und Temperatursensorik des Prüfstandes genutzt werden.

Für die Datenerfassung wurden die Sensoren über den Feldbus EtherCAT der Fa. Beckhoff [1] mit einem Linux-PC verbunden (Abb. 4). Um die benötigte Abtastfrequenz von 100 Hz mit hoher Genauigkeit zu erfüllen, wird der Linux-Kernel mit dem RTAI-Patch erweitert, der eine hochgenaue Ausführung zeitkritischer Routinen ermöglicht [4]. Der Anschluss des EtherCAT-Bus an den PC benötigt eine gewöhnliche Netzwerkschnittstelle. Die Umsetzung auf das EtherCAT-Protokoll erfolgt durch den freien EtherCAT-Master aus dem EtherLab Projekt [3]. Die zur Datenerfassung, Visualisierung und Archivierung verwendete Software ist eine Eigenentwicklung des Instituts für Luftfahrtantriebe.



Abbildung 4: Anbindung von Druck- und Temperaturmeßstellen über EtherCAT (Quelle: Endress&Hauser)

Für die Erstellung der Kennfelder der Klappen muß der Luftmassenstrom durch die Klappe bekannt sein. Werden die Klappen einzeln verfahren, entspricht der Massenstrom durch die Klappe dem durch die Prüfzelle.

Den Volumenelementen des Modells wird je ein Temperatur- und ein Druckgeber zugeordnet, der die Temperatur bzw. den Druck im gesamten Element repräsentiert. Zum präzisen und reproduzierbaren Stellen der Klappen werden diese ebenfalls digital über den Feldbus angesteuert.

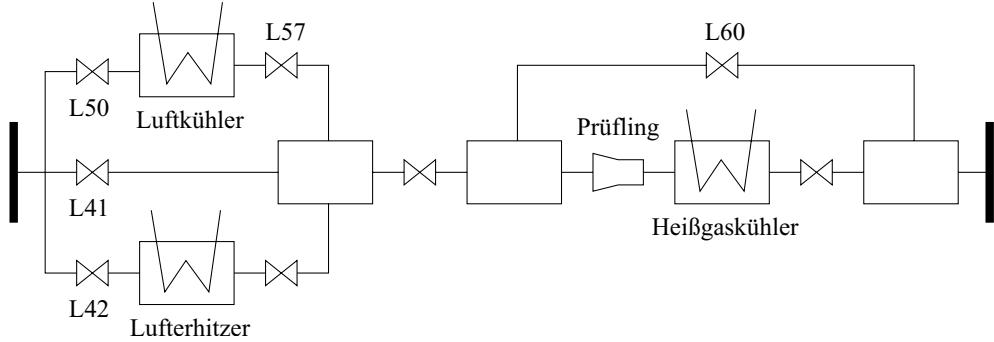


Abbildung 3: Struktur des Modells

ert.

Während der Identifikation wurde als Prüfling in der Prüfzelle ein Venturi-Rohr eingesetzt, um den Massenstrom bestimmen zu können. Der Durchmesser im engsten Querschnitt des Venturi-Rohrs beträgt 735 mm. Unter der Annahme, daß die Unsicherheit der Drücke 0,1 kPa und die der Temperatur 1 K beträgt, ist die erreichbare Messgenauigkeit abhängig vom Massenstrom und erlaubt oberhalb von ca. 20 kg/s eine hinreichend genaue Messung (Abb. 5).

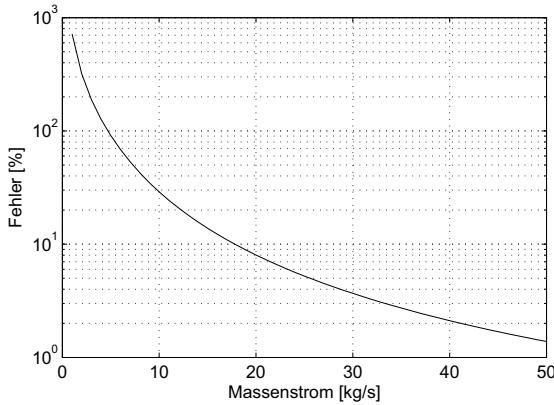


Abbildung 5: Unsicherheit bei der Bestimmung des Massenstroms bei Normatmosphäre

4 Identifikation

Bei der Identifikation wurden die Widerstandsbeiwerte μ der Luftklappen und die Volumina der dynamischen Elemente im Versuch ermittelt.

Zur Bestimmung der Durchsatzcharakteristik der Regelklappen werden diese einzeln gefahren, d.h. während der Vermessung einer der im Versuchsbetrieb parallel arbeiten Reglklappen bleiben die übrigen geschlossen. Dadurch ist der in der Prüfzelle gemessene Massenstrom gleich dem durch die Klappe. An der Klappe werden wohlde-

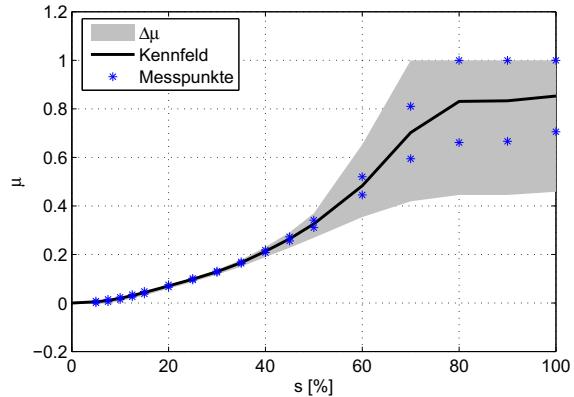
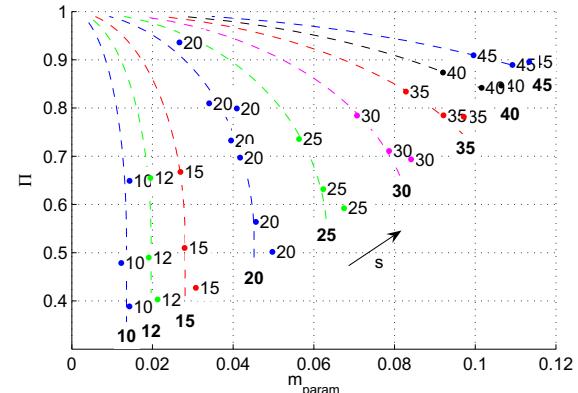
Abbildung 6: Widerstandsbeiwert μ der Klappe L57

Abbildung 7: Kennfeld der Klappe L41

finierte Öffnungswinkel bei unterschiedlichen Druckniveaus eingestellt. Nach ca. 2 Minuten wird angenommen, daß der Zustand stationär ist. Dann werden die Drücke vor und hinter der Klappe sowie die Temperatur vor der Klappe gemessen.

Prinzipiell können auch Arbeitspunkte, bei denen mehrere Klappen gleichzeitig fahren zur zusätzlichen Stützung der Identifikation beitragen. Dabei muss der Massenstrom

über die einzelne Klappe aus dem Gesamtmassenstrom, Mischtemperatur sowie der Temperatur der Teilmassenströme berechnet werden [9]. Da dies mit einer großen Unsicherheit in der Massenstromschätzung verbunden ist, wird auf die Verwendung dieser Arbeitspunkte verzichtet.

Für das in Abschnitt 1 vorgestellte Klappenmodell

$$m_{\text{param}} = f(\Pi) \cdot \mu(s)$$

kann jetzt der Widerstandsbeiwert μ in Abhängigkeit vom Öffnungsgrad s bestimmt werden (Abb. 6). Dabei sind die Werte jeweils einmal bei hohem Vordruck und einmal im Saugbetrieb bei niedrigem Vordruck ermittelt worden, um eine mögliche Abhängigkeit vom Druckniveau erkennen zu können. Dies war jedoch nicht erkennbar (Abb. 7). Sichtbar ist allerdings eine starke Streuung bei großen Öffnungswinkeln.

Bei der Betrachtung des Druckverhältnisses $\Pi = \frac{p_2}{p_1}$ über dem Massentromparameter m_{param} , lässt die Natur des verwendeten Modells vermuten, daß sich, bei Druckverhältnissen nahe 1, Unsicherheiten in der Messung stark auf das berechnete μ auswirken (Abb. 7). Um qualitative Aussagen über die Empfindlichkeit der Identifikation gegenüber Messunsicherheiten treffen zu können, werden zu den verwendeten Messgrößen die folgenden Unsicherheiten Δ angenommen.

Druckaufnehmer	$\pm 1\%$
Temperaturmessung	$\pm 1\text{ K}$
Massenstrom	$\pm 5\text{ kg/s}$

Bei der Betrachtung der in der Identifikation bestimmten Widerstandsbeiwerte μ und ihrer Unsicherheit $\Delta\mu$, zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit vom Öffnungsgrad bzw. vom Druckverhältnis. Der Bereich, in dem μ unsicher ist, ist in Abbildung 6 grau hinterlegt.

Durch den Austausch der Druckaufnehmer vor und hinter den Klappen gegen aktuelle Modelle, kann eine höhere Messgenauigkeit erreicht werden. Exemplarisch ist die Klappe L42 mit neuer Druckmesstechnik ausgerüstet worden, für die eine Unsicherheit von 0,1 % angenommen werden kann. Auf diese Weise erreicht kann auch bei großen Klappenwinkeln eine geringe Streuung in den ermittelten Widerstandsbeiwerten erreicht werden (Abb. 8).

Bei der Identifikation der Volumina der Rohrelemente werden die Stellglieder mit Sprungfunktionen angeregt. Die gemessenen Verläufe der Drücke werden mit den simulierten Sprungantworten verglichen und die Größe der Volumina so angepaßt, daß die Abweichung zwischen Modell und gemessenen Größen minimal wird. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse der Volumenidentifikation findet sich in [6].

5 Verifizierung des Gesamtmodells

Für die Beurteilung der Modellgüte werden Messungen aus den Identifikationsversuchen herangezogen, bei de-

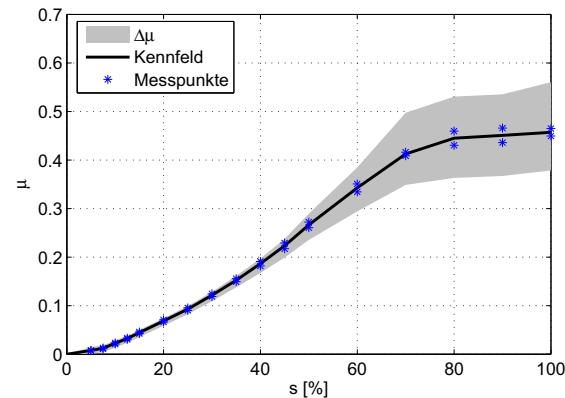


Abbildung 8: Widerstandsbeiwert μ der Klappe L42

nen zwei Klappen gleichzeitig geöffnet sind. Druck und Temperatur in der Prüfzelle lassen sich damit unabhängig einstellen. Dies entspricht dem Betrieb des Prüfstands bei Triebwerksversuchen.

Im betrachteten Beispiel sind die Klappen L57 und L41 anfangs 20 % geöffnet, L42 ist geschlossen. Dann fährt zum Zeitpunkt $t=180$ die Klappe L57, die den Strom der kalten Luft drosselt, bis 50 % auf. Der Druck in der Prüfzelle erhöht sich von 160 auf 190 kPa und die Temperatur sinkt um etw 20 K (Abb. 9). Der Verlauf des Druckes während dieses Manövers wird vom Modell mit hoher Güte abgebildet.

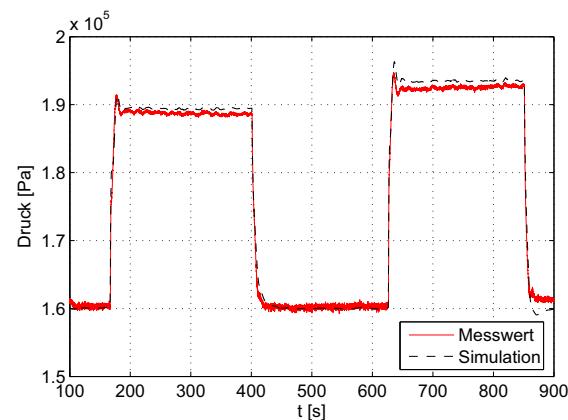


Abbildung 9: Simulation des Eintrittsdrucks am Prüfling

Auch der Verlauf der Temperatur an der Mischstelle wird vom Modell gut getroffen, wobei die Trägheit der verwendeten Pt100 Meßwiderstände durch ein PT1-Glied mit $T=20\text{ s}$ modelliert wird (Abb. 10).

Zum Zeitpunkt $t=400$ fährt die Klappe L57 wieder auf 20 % zurück und der ursprüngliche Zustand stellt sich wieder ein. Bei $t=620$ wird die Klappe L41, die den Strom der untemperierten Luft regelt, auf 50 % geöffnet. Der Druck in der Prüfzelle steigt nun stärker an, da die Luft in diesem Fall ohne die Verluste des Wärmetauschers direkt

in die Prüfzelle strömt. Auch die Temperaturveränderung fällt etwas größer aus.

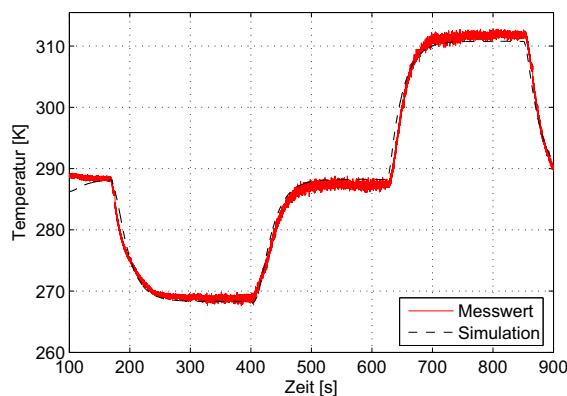


Abbildung 10: Simulation der Temperatur an der Mischstelle

6 Schlußfolgerung

Die Dynamik des Druckes wird vom Modell gut abgebildet. Bei der Temperatur ergeben sich durch die Trägheit der Meßwiderstände Abweichungen im Zeitverhalten. Diese kann durch Nachschalten eines Verzögerungsgliedes 1. Ordnung ausgeglichen werden. Die dabei verwendete Zeitkonstante entspricht dabei in guter Näherung der vom Hersteller für Pt100-Sensoren mit Schutzrohr angegebenen.

Das simulierte Verhalten von Druck und Temperatur nach Änderungen an den Stellorganen entspricht in guter Näherung dem im Versuch bestimmten Verhalten des Prüfstands, so daß sich das Modell für die weitere Verwendung zur Auslegung einer Regelung eignet.

Literatur

- [1] Beckhoff, 2008. www.beckhoff.de.
- [2] Endress+Hauser, 2008. www.endress.com.
- [3] EtherLab Projekt, 2008. www.etherlab.org.
- [4] RTAI Dokumentation, 2008. www.rtai.org.
- [5] BAEHR, H. D.: *Thermodynamik*. Springer-Verlag, 1966.
- [6] BETZ, K.: *Parameteridentifikation eines Modells des Höhenprüfstands der Universität Stuttgart*. Studienarbeit, Institut für Luftfahrtantriebe, 2008.
- [7] BIERKAMP, J., S. KÖCKE und S. STAUDACHER: *Influence of ATF Dynamics and Controls on Jet Engine Performance*. In: *Proceedings of ASME TURBOEXPO*, Montreal, Kanada, 2007.

- [8] BRAIG, W.: *Transient aeroengine testing at Stuttgart altitude testing facility*. 14th International Symposium on Air Breathing Engines, Florenz, Italien, September 1999.
- [9] BRAIG, W.: *Kalibrierung der Höhenprüfstandsklappen für den Reglerbetrieb*. Technischer Bericht, Institut für Luftfahrtantriebe, 2001.
- [10] KUHN, K.: *Untersuchung zur Strahlausbreitung in Triebwerksprüfständen*. Doktorarbeit, Universität Stuttgart, 1991.
- [11] KÖCKE, S., S. STAUDACHER, J. BIERKAMP und W. BERNS: *Simulation des Gesamtsystems bestehend aus Höhenprüfstand und Triebwerk*. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2006.
- [12] MÖLLER, D.: *Modellbildung, Simulation und Identifikation dynamischer Systeme*. Springer-Verlag, 1992.
- [13] MÜLLER, R.: *Luftstrahltriebwerke*. Vieweg-Verlag, 1996.
- [14] SIEKMANN, H.: *Strömungslehre für den Maschinenbau*. Springer-Verlag, 2001.
- [15] STEPHAN, K. und F. MAYINGER: *Thermodynamik*. Springer-Verlag, 1998.