



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Messung einer Drehzahlkennlinie der Kleingasturbine KHD T 216

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhard Willinger

und

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Pouya Ghaffari

am Institut für Energietechnik und Thermodynamik

eingereicht an der technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Christopher Oertel

Matr.Nr.: 0527800

Wattenberg 27

6113 Wattenberg

Wien, im September 2015



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Christopher Oertel

Wien, im September 2015

Kurzfassung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, das Kennfeld der Kleingasturbine KHD T 216, die sich im Labor für Energietechnik und Thermodynamik der TU Wien befindet, zu vermessen. Dafür werden bei konstanter Drehzahl unterschiedliche Messpunkte eingestellt. Die Messergebnisse werden dokumentiert und anschließend ausgewertet. Ein Vergleich der Ergebnisse mit früheren Aufzeichnungen vor diversen Umbauten wird durchgeführt. Das Kennfeld wird im gemessenen Teillastbereich dargestellt. Beim Vergleich mit früheren Messdaten aus dem Jahr 1995 stimmt dieses mit geringen Abweichungen überein. Es wird festgestellt, dass die Umgebungsbedingungen Einfluss auf das Betriebsverhalten der Turbine haben.

Zusätzlich wird eine für den Prüfstand spezifische Betriebsanleitung für die Bedienung der Gasturbine erstellt. Diese soll einen sicheren und gefahrlosen Betrieb ermöglichen.

Für die Auswertung der notwendigen Daten wird ein Berechnungsprogramm in der Programmiersprache FORTRAN95 modifiziert, damit die gemessenen aufgenommenen Daten ausgewertet werden können.

Abstract

This thesis aims to measure the characteristic diagram of the micro gas turbine KHD T 216, which is located in the laboratory for energy and thermodynamics of TU Wien. For this, different measuring points are set at a constant speed. The measurement results are documented and then evaluated. A comparison of results with previous records from various modifications has been carried out.

The identification field is represented in the appropriate partial load range. Comparisons to previous tests performed in 1995 are substantially identical with only small deviations noted. It has been established that environmental conditions have influence on the performance of the turbine.

In addition, the test-specific operating instructions for the operation of the gas turbine have been created. This should enable the secure and safe operation.

For the evaluation of the necessary data a calculation program in the programming language FORTRAN95 has been modified so that the recorded data can be evaluated.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Abstract	4
Inhaltsverzeichnis	5
Nomenklatur	7
1 Einleitung	9
1.1 Allgemein	9
1.2 Ziele und Forschungsfragen	9
2 Grundlagen	11
2.1 Thermodynamik	11
2.2 Geschichte und Anwendungen der Gasturbine	12
2.3 KHD – Gasturbine	13
3 Aufnahme der Turbinenkennlinie	17
3.1 Versuchsstand und Betriebsanleitung für die Gasturbine KHD T 216	17
3.2 Messungen	32
3.3 Auswertung	36
3.3.1 Berechnung	36
3.3.2 Programm zur Auswertung	45
3.3.3 Drehzahlkennlinie	48
3.4 Vergleich der Drehzahlkennlinie mit früheren Aufzeichnungen	55
4 Zusammenfassung	64
5 Ausblick	65
6 Literaturverzeichnis	66
7 Anhang	67
7.1 Messwerte	67
7.2 Programmcode	68

7.2.1	Messwerteingabe.for	68
7.2.2	Auswertung.for	71

Nomenklatur

Lateinische Formelzeichen:		
b_B	[kg/J]	Spezifischer Brennstoffverbrauch
c	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
c_p	[J/kgK]	spez. Wärmekapazität bei konst. Druck
c_{pm}	[J/kgK]	Mittlere spez. Wärmekapazität bei konst. Druck
h	[J/kg]	spezifische Enthalpie
H	[J/kg]	Totale spezifische Enthalpie
m	[kg]	Masse
\dot{m}	[kg/s]	Massenstrom
n_r	[U/min]	Rotordrehzahl
n_{ab}	[U/min]	Abtriebsdrehzahl
p	[Pa]	Druck
P	[W]	Leistung
P_{eff}	[W]	Effektive Leistung
P_G	[W]	Getriebeverlustleistung
P_V	[W]	Gasturbinenverdichterleistung
P_T	[W]	Turbinenleistung
R	[J/kgK]	spezifische Gaskonstante
s	[J/kgK]	spezifische Entropie
T	[K]	Temperatur
t	[°C]	Temperatur

Griechische Formelzeichen:		
Δ	[-]	Differenz
η	[-]	Wirkungsgrad
κ	[-]	Isentropenexponent
λ	[-]	Verbrennungsluftverhältnis
ρ	[kg/m ³]	Dichte
μ	[-]	Brennstoffladung
Π_V	[-]	Verdichterdruckverhältnis
Π_T	[-]	Turbinendruckverhältnis
τ	[s]	Zeit

Indizes:	
<i>BK</i>	Brennkammer
<i>B</i>	Brennstoff
<i>eff</i>	effektiv
<i>L</i>	Luft
<i>ref</i>	Referenzzustand
<i>RG</i>	Rauchgas
<i>s</i>	isentrop
<i>t</i>	Totalzustand
<i>th</i>	theoretisch
<i>T</i>	Turbine
<i>U</i>	Umgebung
<i>V</i>	Verdichter

1 Einleitung

1.1 Allgemein

In den letzten Jahren ist die Förderung fossiler Brennstoffe, wie Erdgas und Rohöl, immer schwieriger geworden. In dieser Situation ist es wichtig, bestehende Strukturen zu hinterfragen. Gasturbinen können beispielsweise mit Biokraftstoffen betrieben werden. Bestehende Strukturen müssen effizienter gestaltet werden, um sich beständig am Markt halten zu können. Deshalb ist es wichtig auf diesem Gebiet weiter Forschung zu betreiben.

Gasturbinen sind als Antrieb für Verkehrsflugzeuge weit verbreitet. Auch im Bereich von Strom- und Wärmeversorgungen werden diese oftmals eingesetzt. Das gilt zum Teil auch für die kleinere Ausführung, die Kleingasturbine, mit der sich die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt.

Ein Vergleich des Entwicklungsfortschritts vom Ottomotor zur Gasturbine der letzten fünfzig Jahre lässt daraus schließen, dass bei der Gasturbine noch Entwicklungspotential vorhanden sein müsste. Mit Forschung in diesem Bereich könnte sich die Gasturbine auch in anderen Bereichen, wie z.B. dem Automobilbau etablieren.

1.2 Ziele und Forschungsfragen

Im Labor des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik steht eine Kleingasturbine des Typs KHD T 216 zur Verfügung. Die einwellige Gasturbine, die nach dem einfachen offenen Prozess arbeitet, besteht aus einem einstufigen Radialverdichter, einer zylindrischen Brennkammer und einer einstufigen Radialturbine; als Brennstoff wird Dieselöl eingesetzt. Die Turbineneintrittstemperatur der ungekühlten Turbine beträgt 750°C bei einem Verdichterdrukverhältnis von 2,8. Die Nutzleistung der Gasturbine beträgt 75 kW, die maximale Rotordrehzahl 50000 U/min. Über ein Untersetzungsgetriebe wird die Nutzleistung bei einer Drehzahl von maximal 3600 U/min an eine Wirbelstrombremse abgegeben.

Es werden folgende Größen am Prüfstand gemessen: Bremsmoment (Wirbelstrombremse), Abtriebsdrehzahl, Umgebungstemperatur, Umgebungsdruck, Druckdifferenz Blende (U-Rohrmanometer), Verdichtereintrittsdruck (U-Rohrmanometer), Verdichteraustrittsdruck (piezoelektrischer Druckaufnehmer), Verdichteraustrittstemperatur (Thermolement), Druckdifferenz Brennkammer (U-Rohrmanometer), Turbinenaustrittsdruck (U-Rohrmanometer),

Turbinenausstrittstemperatur (Thermolement), Brennstoffmassenstrom (Zeitstopfung für ein Liter Brennstoff).

Die KHD T 216 wurde im Zuge mehrerer Dissertationen und Diplomarbeiten umgebaut und mit Holzstaub befeuert. Durch den Betrieb mit Holzstaub entstanden am Turbinenlaufrad diverse Ablagerungen, sodass die Turbine teilweise zerlegt werden musste. Um das Turbinenlaufrad von den Ablagerungen wieder zu befreien, erfolgte eine Abstrahlung mit Nusschalen. Anschließend wurde die Maschine in den ursprünglichen Zustand zurückgebaut.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird eine Drehzahlkennlinie der Gasturbine ermittelt. Dazu werden bei einer nahezu konstanten Drehzahl mittels der Wirbelstrombremse verschiedene Bremsmomente eingestellt. Der Betrieb der Gasturbine sowie die Messwerte werden dokumentiert. Ebenso soll untersucht werden, ob sich die aktuellen Messwerte zu Messwertaufzeichnungen vor dem Umbau der Holzstaubfeuerung unterscheiden.

2 Grundlagen

2.1 Thermodynamik

Eine Gasturbine ist eine thermische Strömungsmaschine, deren Hauptkomponenten im Wesentlichen ein Verdichter, eine Brennkammer und eine Turbine sind. Im Gegensatz zu anderen Arbeitsmaschinen wird die Gasturbine kontinuierlich durchströmt und weist eine vergleichsweise sehr hohe Energiedichte auf. [1]

Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Bauarten, Wellenturbinen und Strahltriebwerke. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde eine Wellenturbine untersucht. Die weiteren Ausführungen beziehen sich daher auf diese. [1]

In Abbildung 1 ist ein offener Gasturbinenprozess qualitativ dargestellt. Das Grundprinzip der Gasturbinenanlage beruht auf dem Joule-Prozess, einem rechtsumlaufenden Kreisprozess (Abbildung 1). Luft wird durch einen Filter (0-1 in Abbildung 1) über eine Einlaufstrecke angesaugt und im Verdichter komprimiert (1-2 in Abbildung 1). Der verdichteten Luft wird in der Brennkammer (B in Abbildung 1) Treibstoff beigemischt. Anschließend wird das Gemisch bei annähernd konstantem Druck verbrannt (2-3 in Abbildung 1). Das entstandene Heißgas wird der Turbine zugeführt und expandiert (3-4 in Abbildung 1). Hierbei wird thermische und kinetische Energie in mechanische Wellenarbeit umgewandelt. Üblicherweise ist die Turbine über eine Welle mit dem Verdichter gekoppelt. Dadurch kann ein Teil der in der Turbine entstandenen Energie genutzt werden, um den Verdichter zu betreiben. Die Differenz ist die Nutzenergie der Gasturbinenanlage. Das Heißgas passiert vor Erreichen des Umgebungsdrucks noch einen Schalldämpfer im Abgasrohr (4-5 in Abbildung 1). [1]

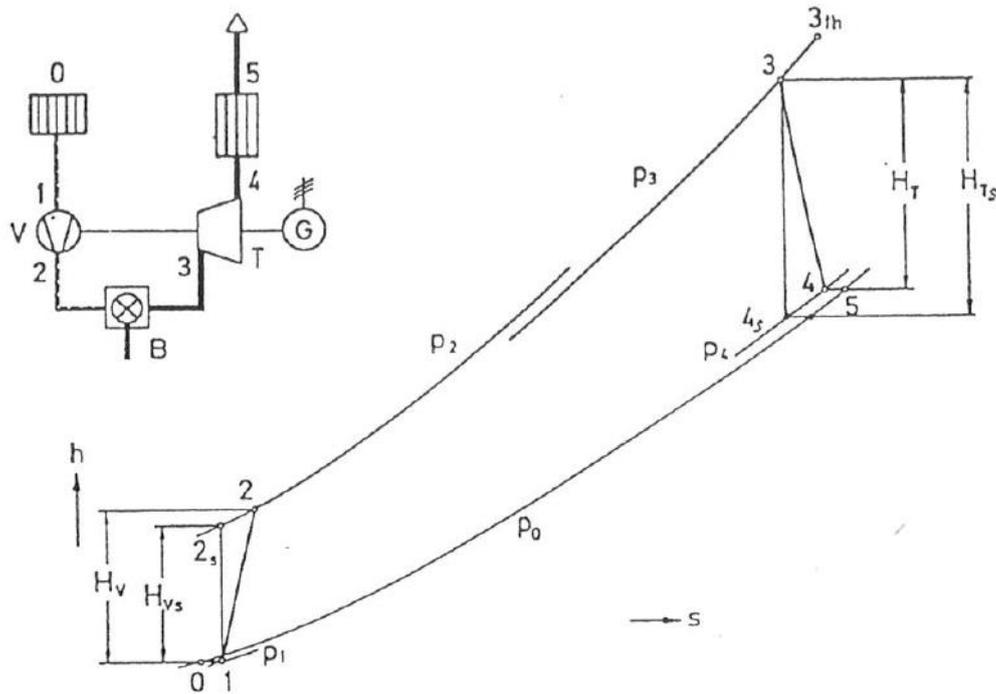


Abbildung 1 qualitativer offener Gasturbinenprozess [2]

2.2 Geschichte und Anwendungen der Gasturbine

John Barber ließ sich im Jahr 1791 eine Verbrennungskraftmaschine patentieren, die dem heutigen Prinzip der Gasturbine entspricht. Da zu dieser Zeit die Werkstoffe nicht den benötigten Temperaturen standhalten konnten, wurde dieses Grundprinzip erst wieder Ende des 19. Jahrhunderts aufgegriffen. Anfang des 20. Jahrhunderts wurden die ersten Versuche mit Gasturbinen durchgeführt. [3]

Nachdem der Ottomotor in der Fliegerei bezüglich Langstrecken und Höhe an seine Grenzen gestoßen war, wurde die Gasturbine entwickelt. Der Durchbruch der Gasturbine erfolgte zu Beginn des zweiten Weltkriegs 1939 in Deutschland durch Hans Pabst von Ohain und Max Hahn und 1941 durch Frank Whittle in England. Am 27.08.1939 erfolgte der erste Strahlflug der Welt mit dem eingebauten Triebwerk (Heinkel HeS 3B mit 500 kp Schub) der deutschen Erfinder. Am 1.5.1941 flog die erste Maschine mit Frank Whittle's Triebwerk Whittle W1 mit 385 kp Startschub. Nach weiterer Entwicklung wurde die Gasturbine auch im Automobilbau von mehreren namhaften Herstellern verbaut. Sie konnte sich aber wegen der hohen Anschaffungskosten, des hohen Treibstoffverbrauchs und schlechter Teillasteigenschaften nicht

durchsetzen. Bewährt hat sich die Gasturbine allerdings bei hohen Leistungsanforderungen, wenn über längere Zeit Leistung kontinuierlich abgenommen wird. [4]

Primär wird die Gasturbine heute im Flugzeugbau eingesetzt. In der Kraftwerkstechnik spielt die Gasturbine ebenfalls eine wichtige Rolle. In diesem Bereich werden sie hauptsächlich in Form von Kraft-Wärme-Kopplungen und Gas-und-Dampfturbinenanlagen zur Strom- und Prozesswärmeerzeugung eingesetzt wie z.B. für verfahrenstechnische Anlagen. Bei Güterzügen, die lange Strecken mit konstanter Last fahren, wird diese Antriebsart vor allem in Ländern wie der USA, Kanada und Russland verbaut. Gasturbinen werden auch für Panzer, Luftkissenboote und die Schifffahrt verwendet. Zur Förderung von flüssigen und gasförmigen Brennstoffen ist die Verwendung der Gasturbine für Pumpstationen die kostengünstigste Möglichkeit. Mit einem Teil der geförderten Menge kann dabei direkt die Turbine betrieben werden und zum Antrieb von Pumpen oder Verdichtern verwendet werden. Des Weiteren wird sie als zuschaltbares Notromaggregat für vorübergehende Spitzenleistungen verwendet. [4], [5]

Kleingasturbine:

Es gibt keine offizielle Definition des Begriffs Kleingasturbine. Nach Schulte [4] werden Gasturbinen bis 1000 PS als diese definiert. Verwendet werden Kleingasturbinen unter anderem als Auxiliary Power Units (APU). Ebenso sind sie in Hubschraubern, unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs) und Modellflugzeugen eingebaut. Auch werden sie in Land- und Wasserfahrzeugen (Motorrad, Gokart, Panzer) eingesetzt. Im Bereich der stationären Energieeinheiten werden sie für Blockheizkraftwerke, Stromgeneratoren und Kombieinheiten (Strom und Druckluft) verwendet. [4]

Kleingasturbinen werden von verschiedenen Herstellern gebaut. Sie haben ein geringes Gewicht und sind sehr zuverlässig.

2.3 KHD – Gasturbine

Das Institut für Energietechnik und Thermodynamik der TU Wien verfügt über zwei Kleingasturbinen. Es handelt sich um die Rover 1 S60 Gasturbine und um eine KHD T 216 des Herstellers Klöckner Humboldt Deutz (Köln). In der vorliegenden Arbeit wurde letztere näher untersucht. Die KHD T 216 wurde damals im Wettbewerb zur Rover 1 S60 und Perkins Mars entwickelt. Sie ist einfach und robust gebaut. Ihre Länge beträgt zirka 90 cm. Das Gewicht liegt bei 50 kg. Die allgemeinen technischen Daten sind in Tabelle 1 angeführt.

Brennstoff:	Diesel oder Heizöl extra leicht
Nennleistung:	75 kW
Brennstoffverbrauch:	61 kg/h
Nenndrehzahl des Rotors:	50.000 U/min
Nenndrehzahl der Abtriebswelle:	3.000 U/min
Druckverhältnis:	2,8
Abgastemperatur:	650°C
Ansaugluftmassenstrom:	0,9 kg/s

Tabelle 1 Technische Daten der Gasturbine KHD T 216

Bei der KHD T 216 handelt sich um eine einfache Einwellen-Turbine. Auf der Welle sind die Hauptkomponenten verbaut. Ein einstufiger Radialverdichter und eine einstufige Radialturbine sind zu einer Baueinheit, dem Läufer, (Abbildung 2) zusammengefasst. Diese sind durch eine Zwischenwand gegeneinander abgetrennt. Rings um die Turbine ist eine tangentielle Gegenstrom-Brennkammer angeordnet. Das Flammrohr ist mit Sekundärluftöffnungen versehen. Stirnseitig sind die Kraftstoffeinspritzdüse und ein Drallkörper verbaut. Damit wird der Kraftstoff in die Brennkammer fein verteilt. Das aus der Brennkammer kommende Heißgas wird über eine Spirale durch den Leitkranz zum Turbinenrad geführt. Eine Abdichtung zwischen Welle und Zwischenwand erfolgt über berührungslose Labyrinthdichtungen. [6]

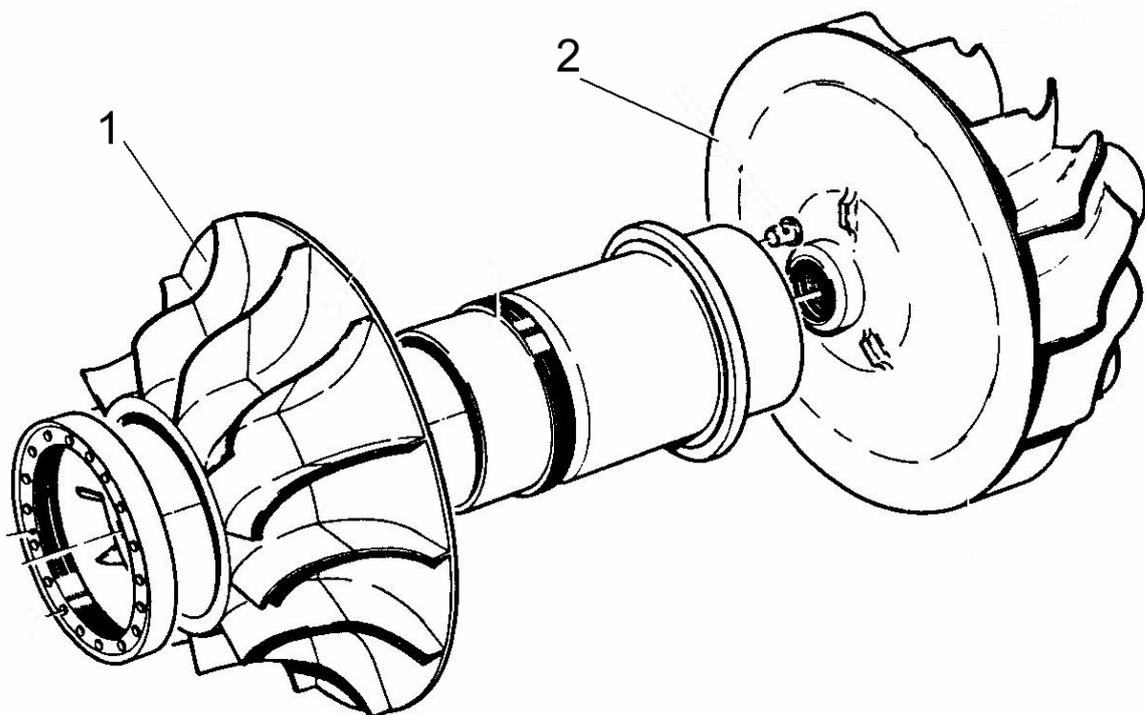


Abbildung 2 Verdichter (1)-Turbinenläufer (2) [6]

Ein zweistufiges Untersetzungsgetriebe ist direkt am Verdichter verbaut. Dort verbindet eine Korbzahn­hülle die Getriebeeingangswelle mit dem Läufer. Das Getriebe übersetzt die Eingangsdrehzahl im Verhältnis 1:16,667. Somit wird die Abtriebsdrehzahl in Abhängigkeit von der Antriebsdrehzahl geregelt. [6]

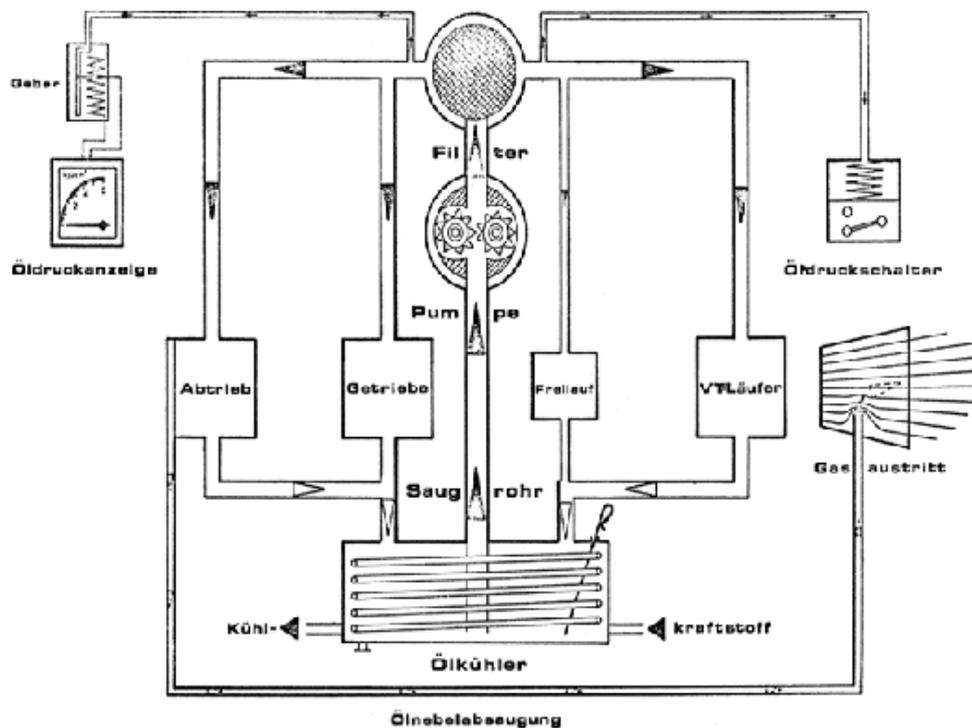


Abbildung 3 Schmierstoffsystem der KHD T 216 [6]

Alle drehenden Teile der Anlage sind wälzgelagert. Die Ölversorgung der Lager erfolgt über eine Druckumlaufschmierung. Eine Zahnradpumpe saugt das im Kreis gepumpte Öl aus dem Ölsumpf an. Es passiert einen Kühler und einen Filter bevor es den Schmierstellen zugeführt wird. Die Ölkühlung erfolgt mittels des geförderten Kraftstoffs über einen Wärmetauscher. Ein Plan des Schmierstoffsystems ist in Abbildung 3 dargestellt. [6]

Das Anlassen der Turbine ist sowohl elektrisch mit einem Dynastarter als auch über eine manuell betriebene Kurbel möglich. Beide sind durch einen Zahnriemen mit dem Getriebe verbunden. Die Zündung der KHD Gasturbine erfolgt über eine Hochenergieeinrichtung. Durch die elektrische Zündung bei einer Drehzahl zwischen 3000 und 5000 U/min wird die Turbine gestartet. Ab 10000 U/min ist der Anfahrvorgang beendet. [6]

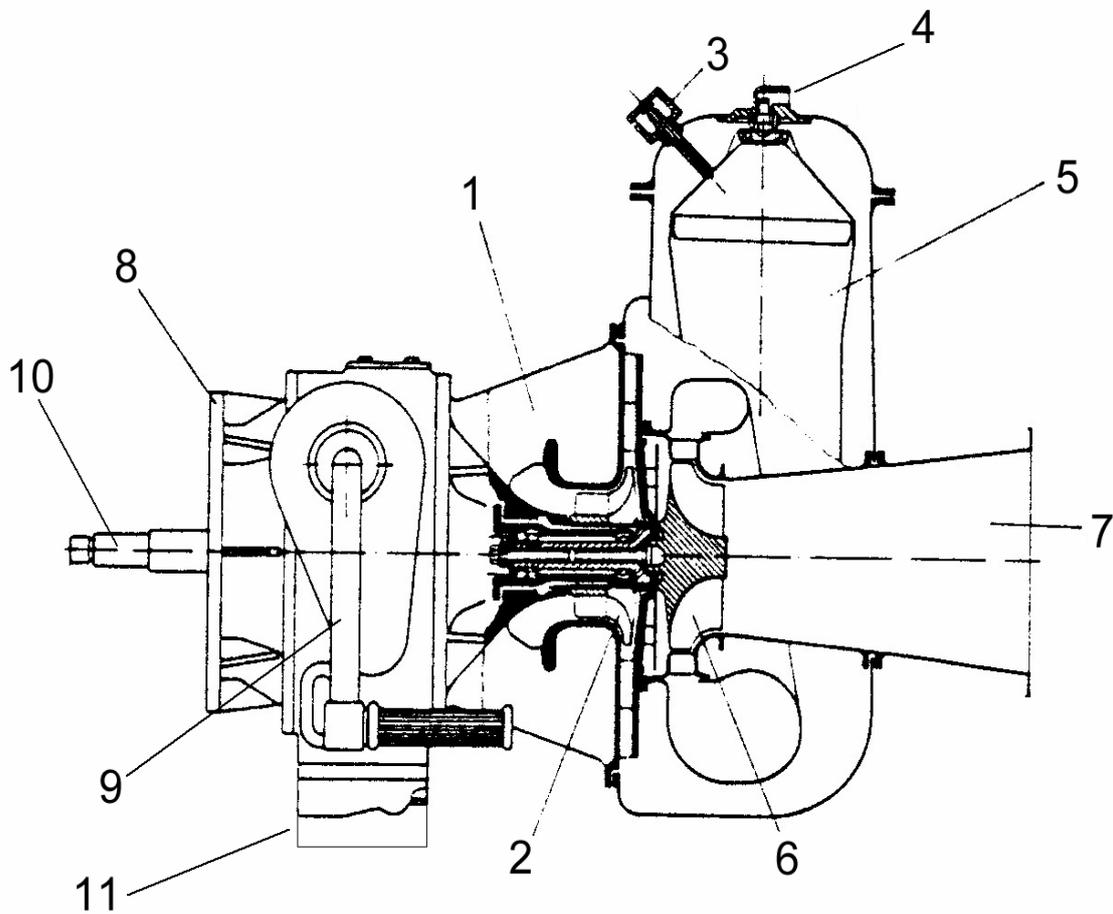


Abbildung 4 KHD-Gasturbine T216 [6]

Die Ziffern in Abbildung 4 haben folgende Bedeutung:

- (1) Lufteintritt
- (2) Verdichterlaufrad
- (3) Zündeinrichtung
- (4) Kraftstoffdüse
- (5) Brennkammer
- (6) Turbinenlaufrad
- (7) Abgasdiffusor
- (8) zweistufiges Untersetzungsgetriebe
- (9) Handkurbel
- (10) Abtriebswelle
- (11) Wärmetauscher für das Schmieröl

3 Aufnahme der Turbinenkennlinie

Für die Aufnahme der Turbinenkennlinie wurde für diese Diplomarbeit nur im Teillastbetrieb gefahren.

3.1 Versuchsstand und Betriebsanleitung für die Gasturbine KHD T 216

Im Folgenden wird erläutert, wie Untersuchungen am Versuchsstand durchzuführen sind und was dabei zu beachten ist.

Die hier geschriebene Betriebsanleitung soll das richtige und gefahrlose Bedienen des Turbinenprüfstandes ermöglichen. Sie wurde zusammen mit Herrn Ing. Gerhard Kanzler verfasst.

Es ist darauf hinzuweisen, dass diese Zusammenschrift nur für technisch sehr versierte Personen verfasst ist. Um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten sollte vor Inbetriebnahme des Prüfstandes unbedingt anhand des Manuals jeder Schritt genau durchgedacht und auch die unten beschriebenen Schritte am Turbinenprüfstand visualisiert werden. Es sollte ein Muss sein, anhand der nicht gestarteten Turbine die einzelnen Handgriffe mehrmals in der richtigen Reihenfolge zu üben.

Die Turbine ist unter Last nur drehzahl geregelt zu betreiben!

Vor Inbetriebnahme ist sicher zu stellen, dass die Batterie am Tag vor der Inbetriebnahme aufgeladen wird.

Allgemeine Sicherheitsmaßnahmen: Ein Feuerlöscher ist vor Inbetriebnahme der Turbine im nahen Umkreis zu positionieren. Durch die hohe Lärmentwicklung sollte unbedingt ein Gehörschutz getragen werden.

Maßnahmen vor dem Start:

1. Es ist zu kontrollieren, ob der Kraftstofftank mit Diesel befüllt ist. Bei Befüllung des Kraftstofftanks mit der vorgesehenen Pumpe ist diese vor dem Vollwerden des Tanks rechtzeitig abzuschalten.
2. Vor dem Starten der Gasturbine ist eine Ölstandkontrolle des Schmieröls durchzuführen. In der Regel soll der Ölstand ca. in der Mitte von Minimum und Maximum liegen.

Der Ölmesstab (1 in Abbildung 5) klemmt etwas und muss daher kräftig herausgezogen werden.

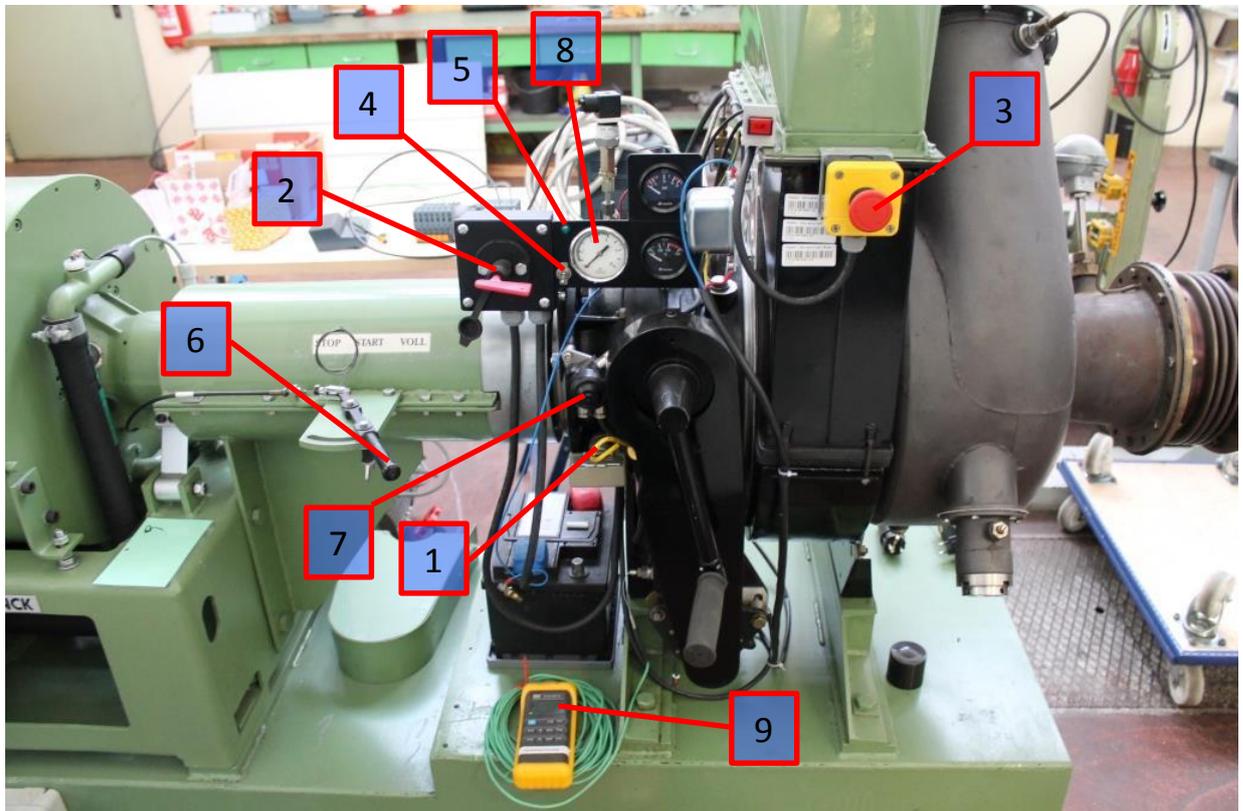


Abbildung 5 Vorderansicht der Gasturbine

- (1) Ölmesstab
- (2) Batterie Hauptschalter
- (3) Not-Aus-Taster Turbine
- (4) Kippschalter Kraftstoffzufuhr
- (5) LED
- (6) Kraftstoffhebel
- (7) Startknopf Turbine
- (8) Öldruckanzeige
- (9) digitale Öltemperaturanzeige

3. Nach längerem Stillstand oder bei häufigem Betrieb sammelt sich durch innere Undichtigkeiten Öl an der tiefsten Stelle des Lufteintrittsgehäuses. Dieses ist durch die Ölablassschraube (1 in Abbildung 6) abzulassen.

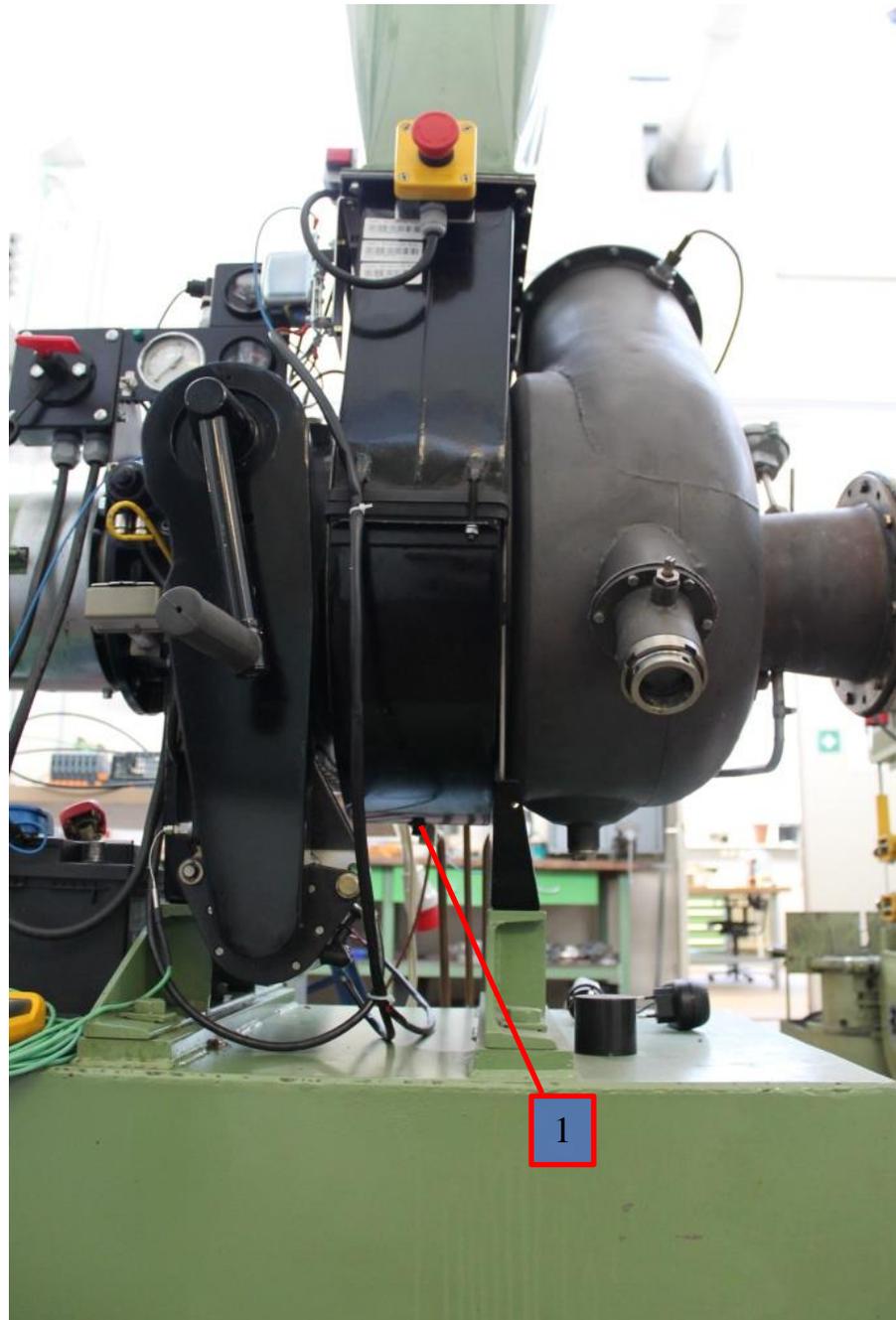


Abbildung 6 Ölablassschraube Lufteintrittsgehäuse

(1) Ölablassschraube

4. Für den Betrieb der KHD Gasturbine muss der Kraftstoffhahn der daneben stehenden Rover Gasturbine geschlossen sein – unbedingt kontrollieren!

5. Kraftstoffhahn an der KHD- Turbine aufdrehen (1 in Abbildung 7)

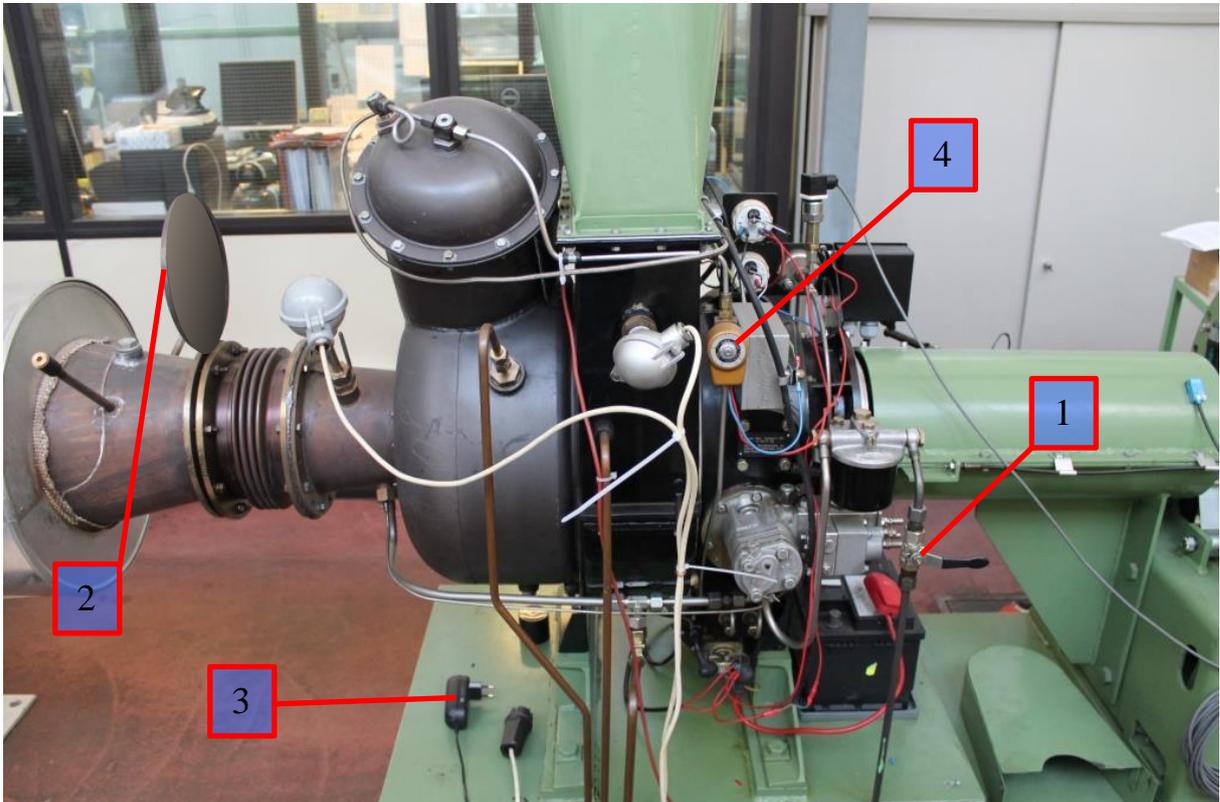


Abbildung 7 Rückansicht der Gasturbine

- (1) Kraftstoffhahn Turbine
- (2) Steckscheibe
- (3) Transformator 24V des Messgeräts für den Verdichteraustrittsdruck
- (4) Magnetventil für die Treibstoffzufuhr

6. Die Steckscheiben (2 in Abbildung 7), welche sich in den Abgasrohren befinden, müssen richtig montiert sein. Dabei muss der volle Kreis der Steckscheibe im Abgasrohr der Rover Gasturbine eingelegt sein. Der offene Kreisring der Steckscheibe ist in das Abgasrohr der KHD Gasturbine einzusetzen. Beim Wechsel der Steckscheiben ist es von Vorteil, die Schrauben vor dem Öffnen einzuölen.

7. Für die Wärmeabfuhr in der Wirbelstrombremse ist der Kühlwasserkreislauf zu öffnen. Die im Bild abgebildete untere Leitung (1 in Abbildung 8) ist der Rücklauf. Diese bleibt immer geöffnet! Die obere Wasserleitung (2 in Abbildung 8) im Bild ist der Kühlwasservorlauf. Beim Öffnen ist der Wasserhahn (3 in Abbildung 8) langsam zu betätigen.

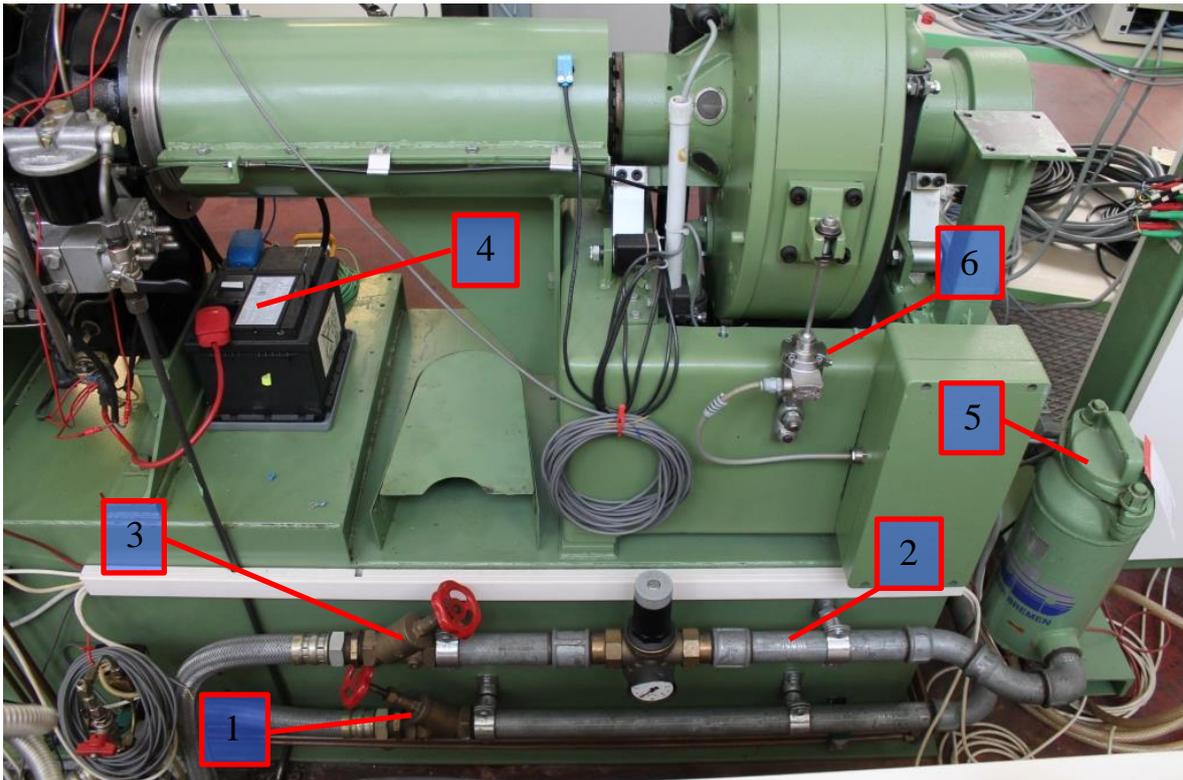


Abbildung 8 Kühlwasserleitungen

- (1) Wasserhahn für Kühlwasserrücklauf (immer offen)
- (2) Kühlwasservorlauf
- (3) Wasserhahn für Kühlwasservorlauf
- (4) Batterie
- (5) Wasserfilter
- (6) Kraftmesseinrichtung Wirbelstrombremse

Elektrische Vorbereitungsarbeiten:

8. Batterie anklemmen.

Beim Anklemmen der Batterie (4 in Abbildung 8) sollte auf die Reihenfolge geachtet werden. Zuerst wird die rote Batterieklemme auf den (+) Pol der Batterie angeklemmt, anschließend die blaue Klemme auf den (–) Pol.

9. Schuko-Stecker (1 in Abbildung 9) der Messinstrumente in die vorgesehenen 230V Steckdosen einstecken. Dabei ist das Steckernetzteil (24V) (2 in Abbildung 9) für den piezoelektrischen Druckaufnehmer nicht zu vergessen.

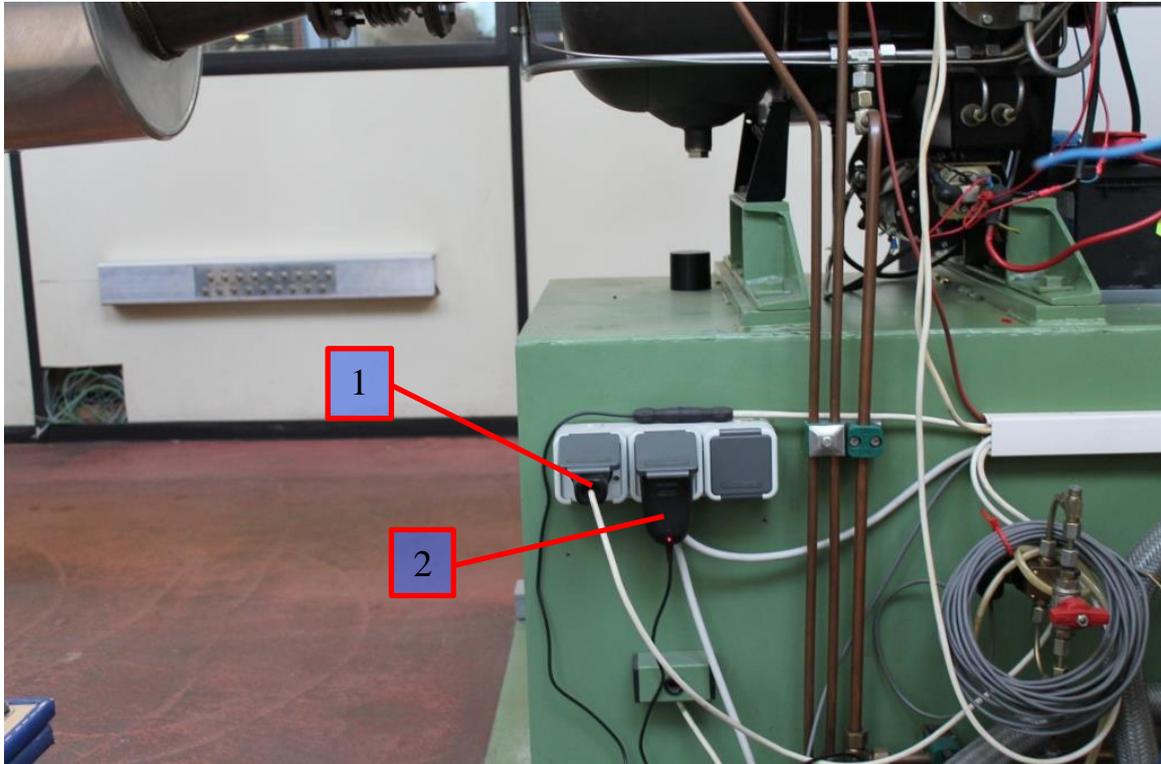


Abbildung 9 Stecker für Anzeigebord

(1) Schukostecker Anzeigebord

(2) Transformator 24V für piezoelektrischen Druckaufnehmer für den Verdichteraustrittsdruck

10. Den Batterie Hauptschalter der Turbine (2 in Abbildung 5) einschalten. Zum Einschalten ist dieser im Uhrzeigersinn zu drehen.
11. Überprüfen, ob der Not-Aus Taster (3 in Abbildung 5) der Turbine geöffnet ist. Falls dieser gedrückt ist, ist dieser mit einer leichten Drehung entgegen den Uhrzeigersinn zu entriegeln.

Die Ladekontrollleuchte (1 in Abbildung 14) leuchtet jetzt rot. Das Voltmeter (2 in Abbildung 14) und die analoge Temperaturanzeige (3 in Abbildung 14) leuchten.

12. Elektronik einschalten. Am Anzeigebord ist der Wippschalter (5 in Abbildung 10) und am Bedienelement der Wirbelstrombremse der Schalter (1 in Abbildung 11) auf 1 zu schalten.

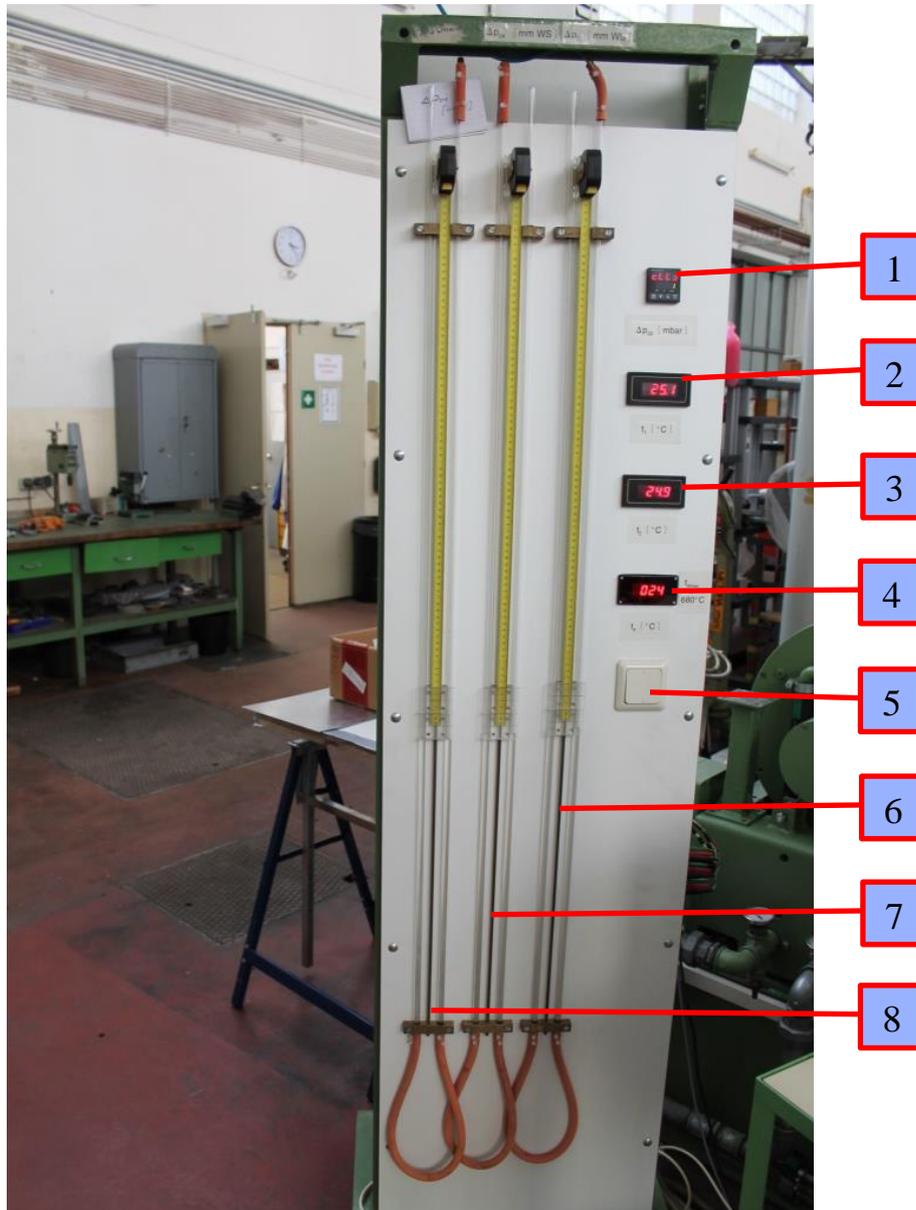


Abbildung 10 Anzeigeboard

- (1) Verdichteraustrittsdruck Δp_{02} [mbar]
- (2) Verdichtereintrittstemperatur t_1 [°C]
- (3) Verdichteraustrittstemperatur t_2 [°C]
- (4) Abgastemperatur t_4 [°C]
- (5) Ein- Aus Wippschalter der Messinstrumente
- (6) U- Rohrmanometer Δp_{01} [mmWS]
- (7) U- Rohrmanometer Δp_{04} [mmWS]
- (8) U- Rohrmanometer Δp_{02} [mmWS]

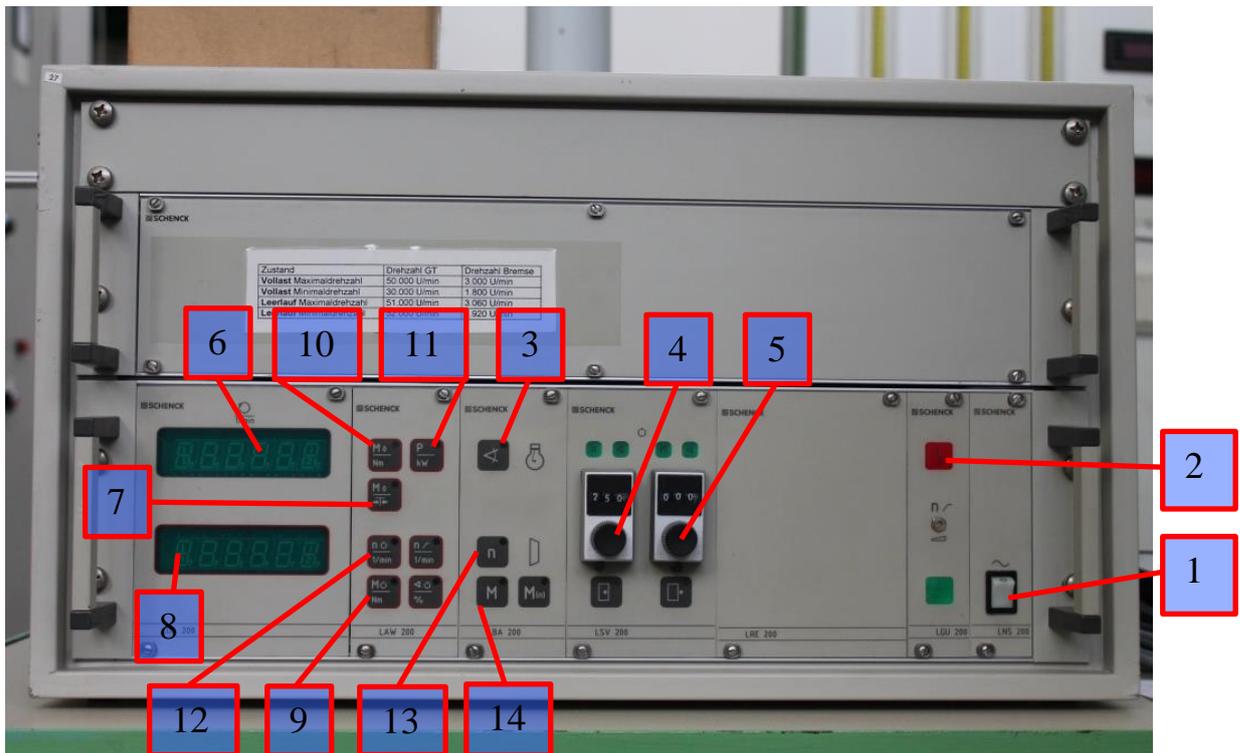


Abbildung 11 Bedienelement Wirbelstrombremse

- (1) Wippschalter Ein- Aus
- (2) Quittiertaste für Not- Aus
- (3) Stellungsregelung
- (4) linkes Potentiometer
- (5) rechtes Potentiometer
- (6) Drehzahlanzeige
- (7) Nullpunktтарierung Drehmoment
- (8) Bremsleistungsanzeige
- (9) Drehmomentsollwerttaste
- (10) Drehmoment- Istwert- Taste
- (11) Leistungsanzeige-Taste
- (12) Drehzahlsollwerttaste
- (13) Bremse drehzahleregelt
- (14) Bremse drehmomenteregelt



Abbildung 12 Not-Ausschaltung Wirbelstrombremse

(1) Not-Aus Wirbelstrombremse

13. Am Bedienelement der Wirbelstrombremse gilt:

- 111111 blinkt, wenn kein Durchfluss im Wasserkreislauf für die Kühlung der Wirbelstrombremse vorhanden ist. Es ist zu kontrollieren, ob die Wasserhähne (1 in Abbildung 8) und (3 in Abbildung 8) geöffnet sind. Falls trotz geöffneter Hähne kein Wasser durch die Leitungen fließt, so ist der Wasserfilter (5 in Abbildung 8) zu kontrollieren und bei Bedarf zu reinigen.
- 333333 blinkt, wenn der Not-Aus Taster der Wirbelstrombremse (1 in Abbildung 12) gedrückt ist. Er befindet sich unter dem Bedienpult. Dieser ist mit einer leichten Drehung entgegen den Uhrzeigersinn zu entriegeln.

Hinweis: Im Betrieb darf dieser Not-Aus Taster **nur im äußersten Notfall** gedrückt werden, da die Betätigung einen abrupten Stillstand der Turbine hervorruft und es dabei zu Beschädigungen kommen kann!

- Not- Aus quittieren. Das geschieht, indem der rote Taster am Regelgerät (2 in Abbildung 11) gedrückt wird.
- Die Stellungsregelung ist mit dem Taster (3 in Abbildung 11) auszuschalten.

- Im Stillstand wird das Bremsmoment mit der Taste (7 in Abbildung 11) auf 0 justiert.
- Maßnahmen zum Einstellen eines Messpunktes: für den drehzahlgeregelten Bereich ist das linke Potentiometer (4 in Abbildung 11) im Stillstand unter gleichzeitigem gedrückt halten des n_0 Tasters (9 in Abbildung 11) auf die Drehzahl zu stellen, die nicht überschritten werden darf. Diese soll ca. 200 U/min höher liegen als der angepeilte Messpunkt. Der angezeigte Wert des Potentiometers ist mit dem Faktor 10 zu multiplizieren.

Beispiel: Wenn eine gewünschte Drehzahl von 2300 U/min eingestellt werden soll, ist eine Drehzahl von ca. 2500 einzustellen. Das linke Potentiometer wird somit auf 250 eingestellt.

14. Für das Starten der Turbine wird Momentenregelung durch Drücken des M- Tasters (14 in Abbildung 11) gewählt. Die Kontrollleuchte des Tasters leuchtet anschließend grün.
15. Am rechten Potentiometer (5 in Abbildung 11) wird die Bremsleistung an der Wirbelstrombremse eingestellt. Dieses Potentiometer ist **im Stillstand** unter gleichzeitigem gedrückt Halten des M_0 Tasters auf 000 zu justieren.

Starten und Betrieb der Turbine:

16. Der Kraftstoffhahn beim Tank (4 in Abbildung 13) ist langsam zu öffnen



Abbildung 13 Dieseltank

- (1) Messzylinderrohr
- (2) Kraftstofftank
- (3) Kraftstofffüllanzeige
- (4) Kraftstoffhahn am Tank

17. Für die Kraftstoffzufuhr zur Turbine ist der Kippschalter (5 in Abbildung 14) auf ON zu stellen. Er befindet sich neben dem Batterieauptschalter und öffnet das Magnetven-

til (4 in Abbildung 7) für die Treibstoffzufuhr zur Turbine. Bei geöffnetem Magnetventil leuchtet eine grüne LED Lampe (6 in Abbildung 14) neben dem Kippschalter.

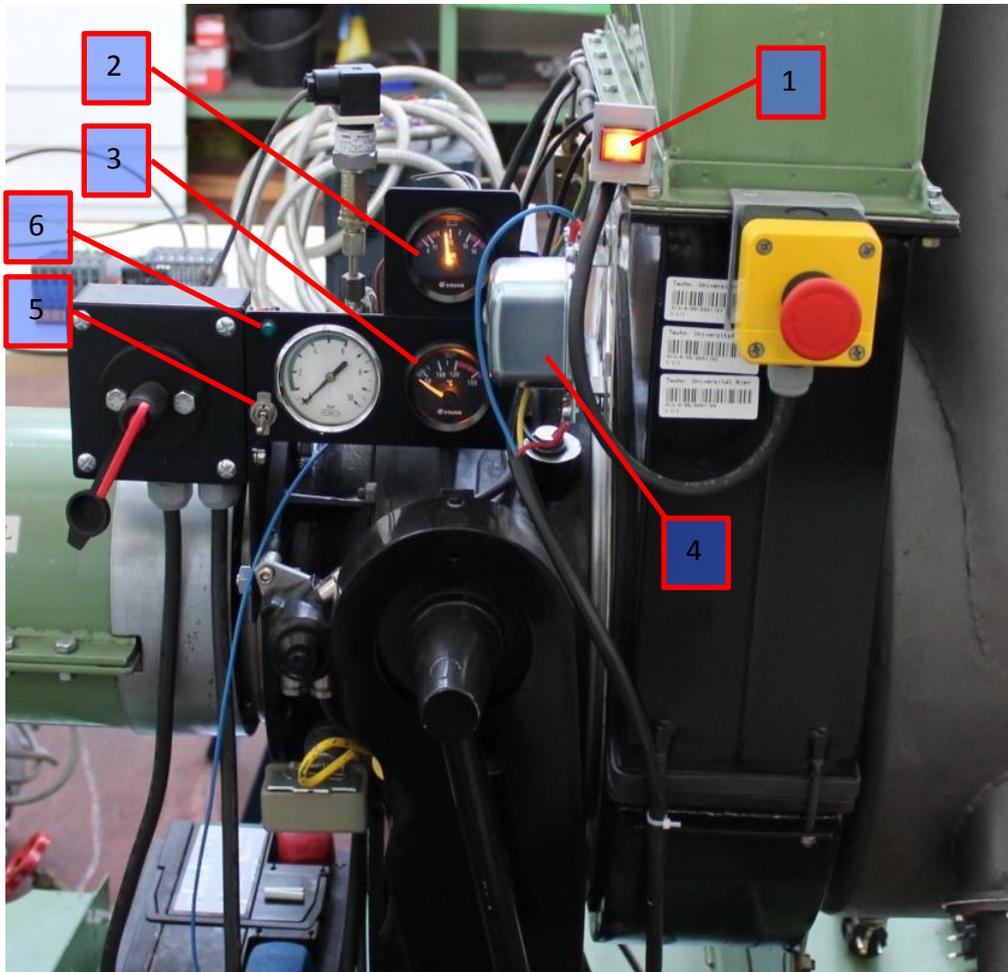


Abbildung 14 Schalter Gasturbine

- (1) Ladekontrollleuchte
- (2) Voltmeter
- (3) Öltemperaturanzeige
- (4) Laderegler
- (5) Kippschalter Kraftstoffzufuhr
- (6) grüne LED

18. Den Kraftstoffhebel (Gasseilzug) (6 in Abbildung 5) der Turbine in Startposition bringen. Er sollte zwischen Stop und Start gewählt werden. Wenn beim Starten zu viel Kraftstoff zugeführt wird (dies ist bereits der Fall, wenn der Kraftstoffhebel auf Start steht) neigt der Verdichter dazu, beim Anfahren die Pumpgrenze zu erreichen.

19. Mit dem schwarzen Startknopf (7 in Abbildung 5) wird die Turbine gezündet. Den Knopf so lange gedrückt halten, bis die Drehzahl der Turbine gesteigert wird. Dabei erlischt die Ladekontrollleuchte (1 in Abbildung 14).
20. Unmittelbar nach dem Start ist der Öldruck (8 in Abbildung 5) zu kontrollieren. Dieser sollte in der Regel über 1 bar liegen. Wenn der Öldruck diesen Wert nicht erreicht, ist die Gasturbine sofort stillzusetzen.
21. Am Bedienelement der Wirbelstrombremse wird nun mit dem n- Taster (13 in Abbildung 11) auf drehzahlgeregelten Betrieb umgeschaltet. Die Kontrollleuchte des Tasters leuchtet jetzt grün.
22. Nach kurzem Warmlaufen wird immer mehr Brennstoff mittels Kraftstoffhebel zugeführt um die Turbine zu beschleunigen. Wichtig ist dabei, dass der Kraftstoffhebel nur sehr feinfühlig betätigt wird. Schon kleine Änderungen am Kraftstoffhebel bewirken eine große Drehzahländerung. Unter gleichzeitiger Kontrolle der Drehzahlanzeige (6 in Abbildung 11) wird hier im unbelasteten Zustand die Drehzahl auf den Wert der vorher gewählten Drehzahlkennlinie eingestellt.
23. Einstellen der Bremsleistung: Ziel der Messung ist es, die Bremsleistung entlang einer Drehzahlkennlinie zu steigern. Um die Drehzahl zur Messung der Drehzahlkennlinie konstant zu halten, müssen bei der Einstellung die Bremsleistung und die Brennstoffzufuhr fein aufeinander abgestimmt werden. Die Einstellung der Bremsleistung wird am Bedienelement der Wirbelstrombremse vorgenommen. Durch Drücken des Tasters P (11 in Abbildung 11) wird auf Leistungsanzeige umgeschaltet. Unter gleichzeitigem gedrückt Halten der Taste M_0 (7 in Abbildung 11) und Drehen des rechten Potentiometers (5 in Abbildung 11) im Uhrzeigersinn, kann die Bremsleistung kontinuierlich gesteigert werden. Der Wert der Bremsleistungsanzeige (8 in Abbildung 11) hat als Einheit kW. Es muss unbedingt darauf geachtet werden, dass die Steigerung des Bremsmoments nur langsam erfolgt, da sonst die Drehzahl der Turbine zu weit absinkt. Eine gegenseitige Abstimmung zwischen Brennstoffzufuhr und Bremsleistung ist daher für das Konstanthalten der Drehzahlkennlinie notwendig.
24. **Wichtig:** Bei der Einstellung der Betriebspunkte muss unbedingt die Abgastemperatur T_4 (4 in Abbildung 10) im Auge behalten werden. Der Grenzwert dafür liegt bei **ca. 680°C**. Wenn die Abgastemperatur diesem Wert sehr nahe kommt oder ihn übersteigt (je nach Umgebungstemperatur), erfolgt eine automatische Notabschaltung der Kraftstoffzufuhr. Beim Auslösen der Notabschaltung ist eine sofortige Rückstellung des Bremsmoments wie im Punkt Nr. 27 beschrieben erforderlich, da sonst ein

abrupter Stillstand der Turbine verursacht wird und es dabei zu Beschädigungen kommen kann! Um eine Problematik mit der Umgebungstemperatur - wie in Kapitel 3.2 beschrieben - auszuschließen, sollte die Turbine mit einer maximalen Abgastemperatur zwischen 630- 650 °C betrieben werden.

25. Nach Einstellen der gewünschten Bremsleistung ist die nahezu exakte Drehzahl mittels Kraftstoffhebel auf den angepeilten Wert einzustellen. Der Anzeigewert der Bremsleistung in kW (8 in Abbildung 11) besitzt keine Kommastelle. Er kann allerdings während des Betriebs durch Drücken der Taste (10 in Abbildung 11) auf das eingestellte Bremsmoment in Nm umgeschaltet werden. Dieses wird auf der Anzeige mit einer Kommastelle angezeigt. Durch Rückrechnung auf kW können dadurch für die Auswertung höher aufgelöste Ergebnisse erzielt werden. Eine Rückschaltung des Anzeigewertes in kW erfolgt über die Taste (11 in Abbildung 11)
26. Für die Zeitmessung des Kraftstoffverbrauchs ist der Kraftstoffhahn beim Tank (4 in Abbildung 13) zu schließen. Damit wird der Kraftstoff über den Zeitraum der Messung aus dem Messzylinderrohr (1 in Abbildung 13) verbraucht. Nach Abschluss der Zeitmessung muss der Kraftstoffhahn beim Tank (4 in Abbildung 13) unverzüglich wieder geöffnet werden, da sonst die Kraftstoffleitung leer gesaugt wird. Das Steigen des Kraftstoffs im Messzylinderrohr ist gut sichtbar.
27. Nachdem alle zu untersuchenden Messpunkte aufgenommen wurden, ist die Bremsleistung zu reduzieren: Während mit der einen Hand die Taste M_0 (7 in Abbildung 11) gedrückt gehalten wird, wird gleichzeitig mit der anderen Hand das rechte Potentiometer (5 in Abbildung 11) gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Wie bei der Steigerung der Bremsleistung in Punkt Nr.23 ist auch beim Absenken der Bremsleistung nur kontinuierlich langsam vorzugehen. Ein zu schnelles Rückstellen des Bremsmoments verursacht ein Hochlaufen der Turbine. **Achtung:** Die Turbine reagiert etwas zeitverzögert. Deshalb ist dabei immer die Drehzahlanzeige (6 in Abbildung 11) im Auge zu behalten. Ebenso ist es wieder notwendig, die Bremsleistung und die Kraftstoffzufuhr mittels Kraftstoffhebel (6 in Abbildung 5) aufeinander abzustimmen. (Je nach Einstellung sollte die Drehzahl niemals über die Drehzahl des eingestellten Maximalwertes steigen, da sie mittels Wirbelstrombremse begrenzt ist.) Bei Rückstellung der Bremsleistung muss die Abgastemperatur T_4 (4 in Abbildung 10) entsprechend sinken!

Abstellen der Turbine:

28. Nach vollständiger Rückstellung des Bremsmoments wird nun die Drehzahl weiter verringert, indem der Kraftstoffhebel (6 in Abbildung 5) in die Position STOP gebracht wird. Für das Abschalten der Turbine sollte die Abgastemperatur T_4 so weit wie möglich abgesenkt werden, damit im Abgasrohr keine allzu großen Temperaturdifferenzen entstehen. Die Abgastemperatur (4 in Abbildung 10) liegt dabei erfahrungsgemäß bei ca. 370°C und ist vor dem Abschalten zu kontrollieren.
29. Nach Erreichen der Leerlaufdrehzahl in STOP – Position muss am Bedienelement der Wirbelstrombremse wieder auf Momentenregelung mit dem Taster (14 in Abbildung 11) umgeschaltet werden. Anschließend kann der Kraftstoffhahn am Tank (4 in Abbildung 13) zuge dreht werden.
30. Abstellen der Turbine: Die Turbine darf nie unter Last abgestellt werden! Es gibt mehrere Möglichkeiten die Turbine sicher abzustellen.
 - a.) Die bevorzugte Variante ist, den Kippschalter (4 in Abbildung 5), der das Magnetventil der Kraftstoffzufuhr schaltet, auf OFF zu stellen. Dabei erlischt die grüne LED Lampe (5 in Abbildung 5).
 - b.) Trennen der Spannungsversorgung mit dem Batterie Hauptschalter (2 in Abbildung 5)
 - c.) Drücken des Not-Aus Tasters (3 in Abbildung 5) der sich neben dem Batterie Hauptschalter befindet und das Magnetventil der Kraftstoffzufuhr schließt.
31. Nach Auslaufen des Rotors kann der Kraftstoffhahn an der Turbine (1 in Abbildung 7) geschlossen werden.
32. Die Elektrik wird nun in umgekehrter Reihenfolge wie bei der Inbetriebnahme abgeschaltet. Die Messinstrumente werden vom Strom getrennt und die Batterie abgeklemmt.
33. Der Kühlwasservorlauf (3 in Abbildung 8) wird wieder langsam geschlossen. Der Kühlwasserrücklauf (1 in Abbildung 8) ist dadurch ohnehin druckfrei und bleibt in geöffneter Stellung.
34. Nach Beendigung der Messung sollte die Batterie (4 in Abbildung 8) erhaltungsgeladen werden.

3.2 Messungen

Der Messaufbau ist als Schaltbild in Abbildung 15 dargestellt. Für die Untersuchungen an der Gasturbine sind die physikalischen Gegebenheiten der Umgebung relevant, da für die Messungen Luft aus der Laborhalle angesaugt wird. Deshalb werden mit einem Thermometer die Umgebungstemperatur t_0 und mit einem Barometer der Umgebungsdruck p_0 ermittelt. Um den aus der Laborhalle angesaugten Luftmassenstrom zu erfassen, ist unmittelbar nach dem Rohreinlauf eine Blendenmessung angebracht. Über die Blende wird mittels eines U-Rohrmanometers der Differenzdruck Δp_{Bl} ermittelt. Mit diesem Messwert wird der angesaugte Luftmassenstrom \dot{m}_L errechnet.

Mittels eines U-Rohrmanometers kann der Verdichtereintrittsdruck Δp_{01} abgelesen werden. Der Verdichteraustrittsdruck Δp_{02} wird mit einem piezoelektrischen Absolutdruckaufnehmer abgegriffen. Auf einem digitalen Anzeigergerät wird der Druck am Messboard angezeigt.

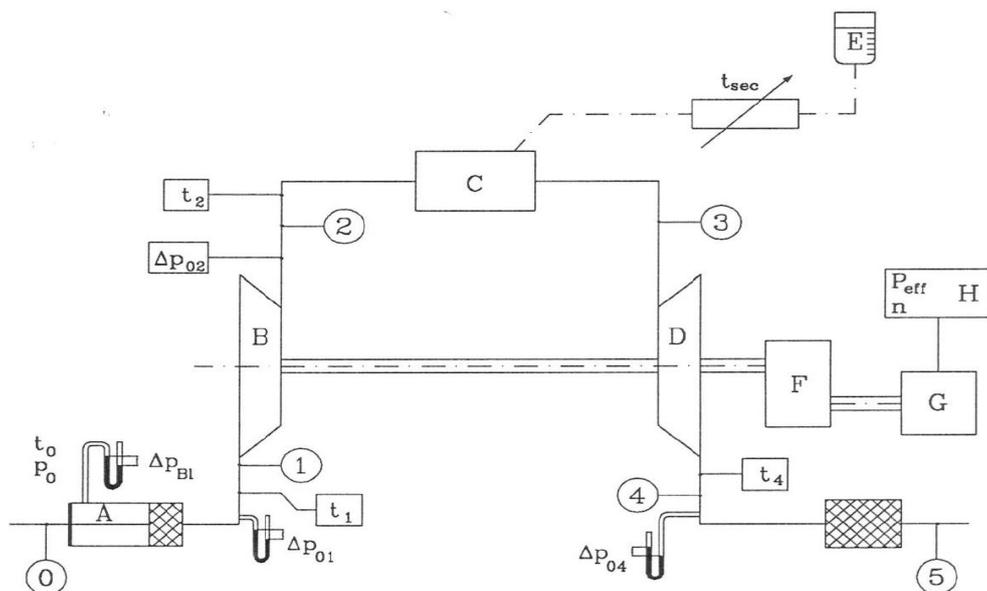


Abbildung 15 Schaltbild des Meßaufbaus

- (A) Blende
- (B) Verdichter
- (C) Brennkammer
- (D) Turbine
- (E) Brennstoffbehälter
- (F) Getriebe
- (G) Wirbelstrombremse
- (H) Steuereinheit für die Wirbelstrombremse

Während des Betriebs erfolgt die Messung des verbrauchten Treibstoffs. Mit einer Stoppuhr wird dabei die Zeit τ für den Verbrauch von einem Liter Diesel gemessen, welcher während der Messung über ein Messzylinderrohr zugeführt wird.

An der Turbine werden während des Betriebs die Verdichtereintrittstemperatur, die Verdichteraustrittstemperatur und die Abgastemperatur gemessen. Diese werden mit Pt100 Widerstandsthermometern erfasst und wiederum am Messboard digital angezeigt. Mit einer am Getriebe angeschlossenen Wirbelstrombremse wird die abgegebene Leistung reguliert. Dabei wird die erzeugte mechanische Energie der Turbine in Wärme umgewandelt und über einen Kühlwasserkreislauf abgeführt.

Die Getriebeabtriebsdrehzahl wird mit Hilfe eines Drehzahlmessers gemessen. Sowohl Bremsleistung als auch die Abtriebsdrehzahl werden am Bedienboard der Wirbelstrombremse angezeigt.

Problematik der Umgebungstemperatur:

Beim Betrieb von Gasturbinen spielt die Umgebungstemperatur eine entscheidende Rolle. Eine erhöhte Umgebungstemperatur wirkt sich im Gasturbinenprozess mit einer erheblichen Steigerung der Turbineneintrittstemperatur aus. Folglich bedeutet dies eine Zunahme der Turbinenaustrittstemperatur.

In Abbildung 16 ist in einem offenen Gasturbinenprozess eine Variation der Umgebungstemperatur gegenübergestellt. Um eine direkte Auswirkung der steigenden Umgebungstemperatur auf die Abgastemperatur zu veranschaulichen, wurde dabei die Turbineneintrittstemperatur konstant gehalten. Dabei ist bei steigender Umgebungstemperatur eine Verschiebung der einzelnen Betriebspunkte auf den Isobaren klar zu erkennen.

Bei der durchgeführten Messung am 21.7.2014 mit einer konstanten Drehzahl von 2200 U/min trat ein Problem auf. Die ersten drei eingestellten Betriebspunkte mit 10, 15 und 20 kW Bremsleistung verliefen ohne Zwischenfall. Die dabei gemessenen Werte sind im Anhang dieser Diplomarbeit zu finden. Aber beim Einstellen des vierten Betriebspunkts mit 2200 U/min und 25 kW bei einer Umgebungstemperatur von 29,4 °C fand eine automatische Notabschaltung statt. Diese Notabschaltung trat vollkommen unerwartet ein, da die vom Hersteller angegebene maximale Abgastemperatur von 690 °C noch nicht erreicht war und bisherige Messungen bei den gleichen Betriebspunkten bei einer geringeren Umgebungstemperatur kein Problem darstellten.

Daher wurde zum Vergleich eine Messung vom 4.5.1995, die im Anhang zu finden ist, mit annähernd derselben Drehzahl herangezogen. Der Versuchslauf war bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C durchgeführt worden. Zur Messung zum 21.7.2014 ergibt das eine Steigerung der Verdichtereintrittstemperatur von 9,4 °C. Bei einer Bremsleistung von 20 kW hat dies zu einer Steigerung der Turbinenaustrittstemperatur von 20°C geführt. Es wäre daher in erster Linie durchaus plausibel, dass eine Notabschaltung aufgrund der erhöhten Umgebungstemperatur und der damit steigenden Abgastemperatur hervorgerufen wurde. Fraglich ist allerdings, warum die Regelung schon bei einer tatsächlich gemessenen Abgastemperatur von ca. 640 °C bereits eine Notabschaltung hervorgerufen hat, da die maximale Abgastemperatur der Firma Deutz mit 690 °C angegeben ist.

Eine Fehlmessung der angezeigten Abgastemperatur durch das Pt100 ist größtenteils auszuschließen, da es im Rahmen dieser Diplomarbeit bereits erneuert wurde.

Weitere Recherchen haben ergeben, dass die Turbine mit einer voll automatischen Temperaturabschaltung ausgestattet ist. Mit dieser soll verhindert werden, dass die Turbineneintrittstemperatur den zulässigen Maximalwert überschreitet. Ein Überschreiten des Maximalwertes könnte ein Abbrennen der Turbinenschaufeln zur Folge haben.

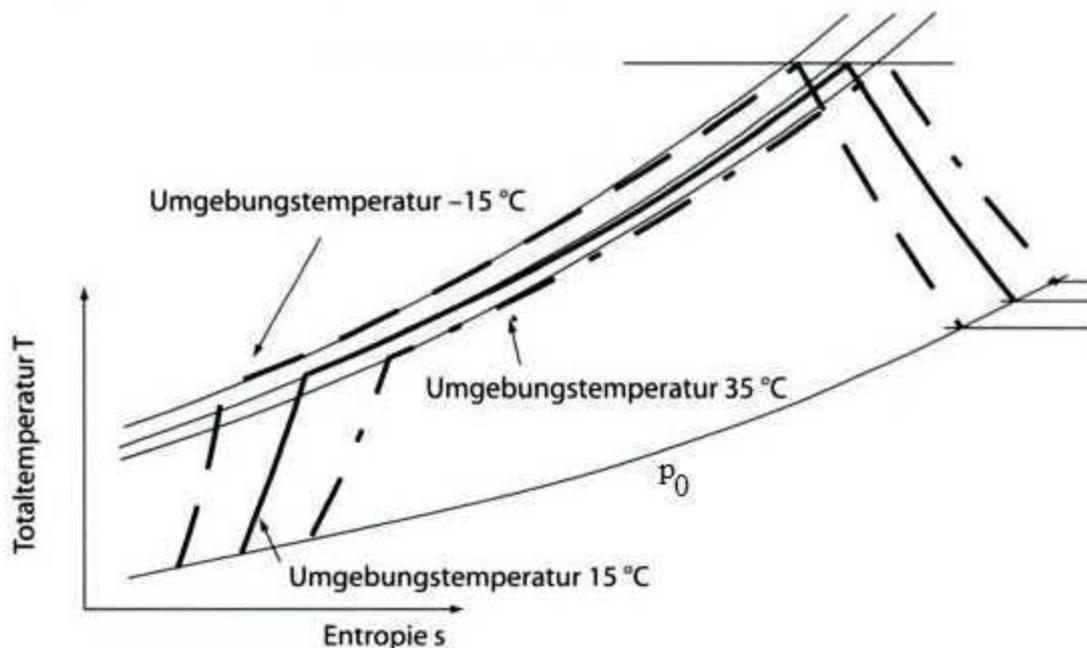


Abbildung 16 Zustandsänderung im T,s- Diagramm in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur, bei konstant gehaltener Turbineneintrittstemperatur [7]

Für die automatische Temperaturregelung ist, wie in Abbildung 17 ersichtlich, im Abgasdiffusor ein Temperaturfühler für die Abnahme der Abgastemperatur verbaut. Ein mit Quecksilber gefülltes Kapillarrohr führt vom Fühler über einen geschlossenen Metallfaltenbalg zum Bypass-Ventil. Durch die Temperaturerhöhung steigt im Fühler der Quecksilber-Dampfdruck. Dies bewirkt eine Ausdehnung des Mediums im Kapillarrohr. Folge ist ein Längerwerden des Metallfaltenbalges. Bei ausreichender Ausdehnung streckt sich der Metallfaltenbalg so weit, dass das Bypass-Ventil öffnet. Die einspritzende Kraftstoffmenge wird damit reduziert. Somit wird die Turbineneintrittstemperatur verringert und die Drehzahl der Gasturbine sinkt. [6]

Bei der Messung vom 21.7.2014 öffnete das oben beschriebene Bypass-Ventil frühzeitig bei 640 °C statt bei 690 °C. Der Temperaturbegrenzer reduzierte allerdings die Treibstoffzufuhr zu stark. Ein Erlöschen der Flamme in der Brennkammer war die Folge.

Das Zurückstellen des Bremsmoments an der Wirbelstrombremse war in dieser kurzen Zeit nicht mehr möglich. Daher konnte ein abrupter Stillstand der Turbine nicht mehr verhindert werden.

Gründe für das frühzeitige Öffnen des Stellventils könnte mangelhaftes Justieren oder Materialermüdung der einzelnen Komponenten des Reglers, wie z.B. der Wählfeder in Abbildung 17 sein. Das Bypass-Ventil wurde schon seit langem nicht mehr kalibriert, obwohl vom Hersteller ein regelmäßiges Wartungsintervall vorgeschlagen wird. Dabei ist anzumerken, dass die Firma Deutz sowohl die Herstellung als auch den Kundendienst bereits eingestellt hat. Eine herstellerspezifische Wartung und somit eine Kalibrierung des Bypass-Ventils ist daher nicht mehr möglich.

Hinzu kommt, dass die KHD Gasturbine mit der niedrigen Läuferdrehzahl von rund 36600 U/min und eine Bremsleistung von fast 25 kW bereits an Ihre Belastungsgrenze kommt. Beim Öffnen des Bypass-Ventils ist also davon auszugehen, dass durch die Verminderung des Treibstoffs die Turbine schlagartig gebremst wird.

Es soll hiermit darauf hingewiesen werden, dass in Zukunft entweder an der Wirbelstrombremse ein geringeres Bremsmoment eingestellt wird, oder die Turbine mit einer höhern Drehzahl zu betreiben ist, um Schäden zu vermeiden.

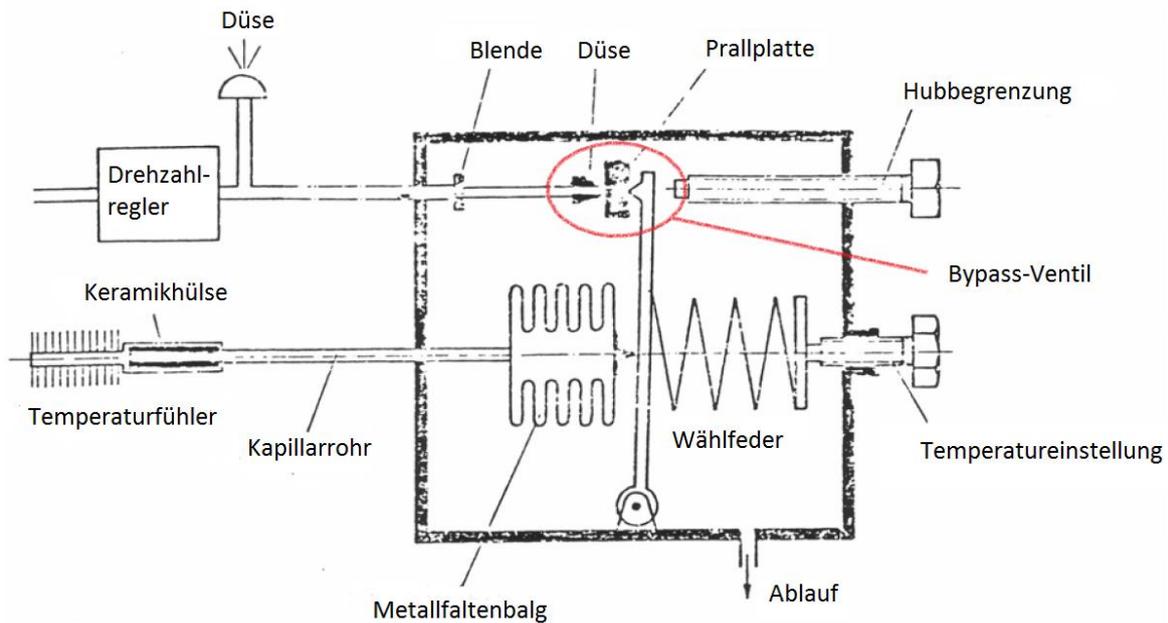


Abbildung 17 Temperaturbegrenzer KHD T 216 [6]

3.3 Auswertung

Für die Auswertung wurden im Zuge der thermodynamischen Anschauung isentrope Wirkungsgrade berechnet. Es wird die tatsächliche Arbeit, auf die der idealisierten adiabaten Zustandsänderung bezogen. Dabei wird Reibungsfreiheit angenommen, somit ist der Vergleichsverlauf eine Isentrope. Die benötigten Bestimmungsgrößen für den isentropen Verdichter- bzw. Turbinenwirkungsgrad sind in Abbildung 18 und Abbildung 19 zu sehen. Der isentrope Wirkungsgrad ist nur abschnittsweise zulässig, da er sich beim Übergang auf andere Zustände oder andere Arbeitsmedien ändert. Für die Ermittlung ist es möglich entweder mit statischen oder totalen Zustandsgrößen zu rechnen. Da bei der Auswertung die kinetische Energie des Arbeitsmittels berücksichtigt wird, erfolgt eine Berechnung mit Totalzustandsgrößen

3.3.1 Berechnung

Um die aufgenommenen Messdaten auszuwerten sind einige Berechnungsschritte notwendig. Die wichtigsten Gleichungen dafür sind anschließend angeführt.

3.3.1.1 Isentroper Verdichterwirkungsgrad

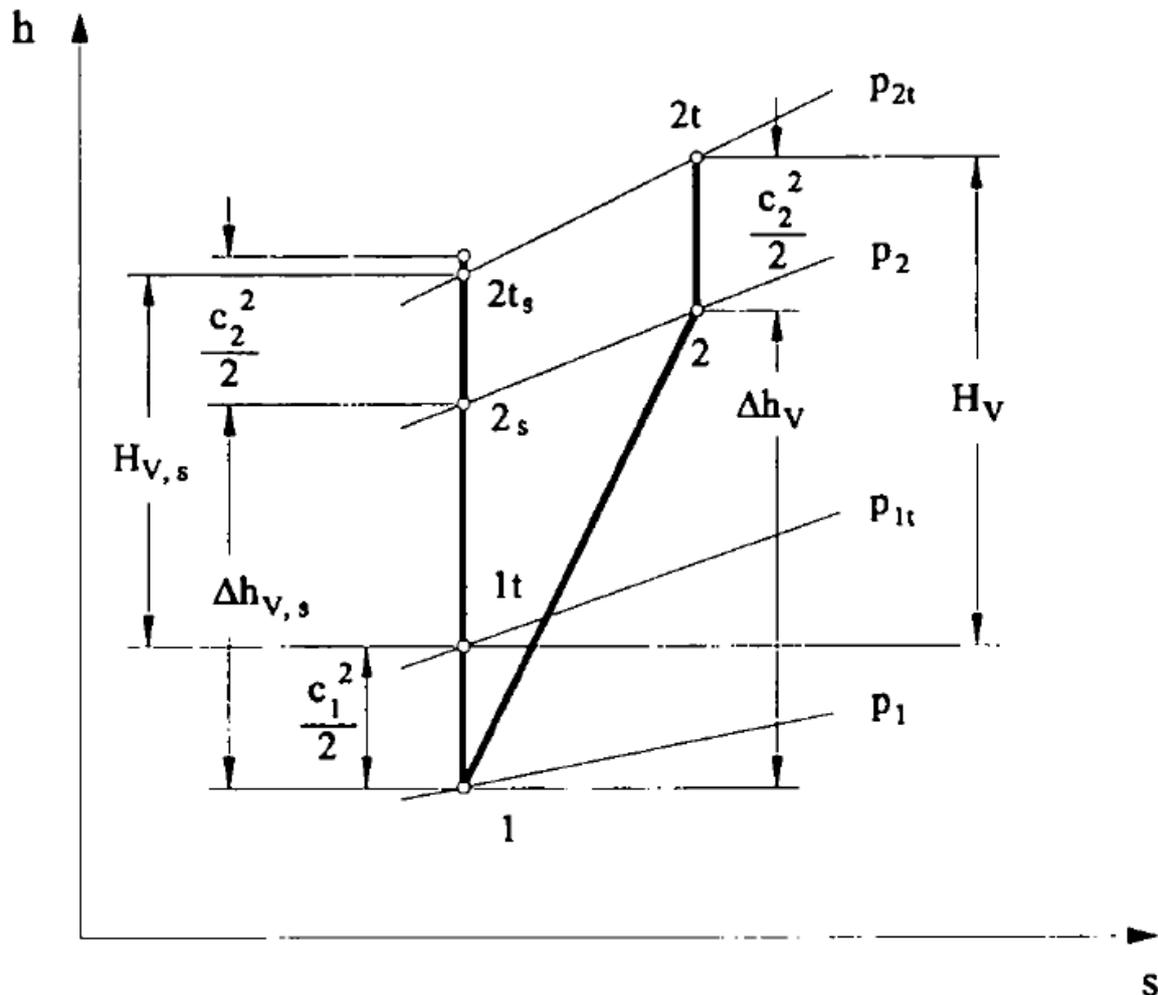


Abbildung 18 Darstellung der Verdichtung im h-s Diagramm [8]

Wie in der Abbildung 18 ersichtlich gilt:

$$h_{2t} - h_{1t} = H_V \quad \text{ sowie } \quad h_{2s} - h_{1t} = H_{V,s}$$

Der isentrope Verdichterwirkungsgrad ist wie folgt definiert:

$$\eta_{V,s} = \frac{H_{V,s}}{H_V} \quad (1)$$

Die tatsächliche Verdichterarbeit mit der mittleren spezifischen Wärmekapazität c_{pm} für die Verdichtung lautet

$$H_V = c_{pm}|_{1t}^{2t} (T_{2t} - T_{1t}) \quad (2)$$

und die Isentrope Verdichterarbeit dazu

$$H_{V,s} = c_{pm}|_{1t}^{2t,s} (T_{2t,s} - T_{1t}). \quad (3)$$

Da $T_{2t,s}$ unbekannt ist, muss die Isentropenbeziehung herangezogen werden

$$\frac{T_{2t,s}}{T_{1t}} = \left(\frac{p_{2t}}{p_{1t}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (4)$$

mit

$$\frac{\kappa - 1}{\kappa} = \frac{R_L}{c_{pm}|_{1t}^{2t,s}}. \quad (5)$$

Durch Umformung der Gleichung (3) erhält man

$$H_{V,s} = c_{pm}|_{1t}^{2t,s} T_{1t} \left[\left(\frac{T_{2t,s}}{T_{1t}} \right) - 1 \right]. \quad (6)$$

Mit Einführung des Verdichterdruckverhältnisses für die Berechnung des Zustandsverlaufs 1-2

$$\Pi_V = \frac{p_{2t}}{p_{1t}} \quad (7)$$

erhält man in Gleichung (6) eingesetzt

$$H_{V,s} = c_{pm}|_{1t}^{2t,s} T_{1t} \left[\Pi_V^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]. \quad (8)$$

Für die Berechnung der Verdichterarbeit wurde wie in Kapitel 3.3.1.6 beschrieben $c_{pm}|_{1t}^{2t}$ und $c_{pm}|_{1t}^{2t,s}$ durch das Unterprogramm HIGAS berechnet. Mit diesem Programm können Stoffdaten automatisch ausgewertet werden. Für die händische Nachrechnung ohne das Programm HIGAS wäre es notwendig, wegen der Temperaturabhängigkeit des c_p -Wertes itera-

tiv vorzugehen. Da sich der c_p Wert im untersuchten Temperaturbereich aber nur gering ändert, kann zur annähernden Berechnung $c_{pm}|_{1t}^{2t} = c_{pm}|_{1t}^{2t,s} = c_{pm}|_{20^\circ C}^{180^\circ C} = 1,012 \text{ [kJ/kgK]}$ eingesetzt werden.

3.3.1.2 Isentroper Turbinenwirkungsgrad

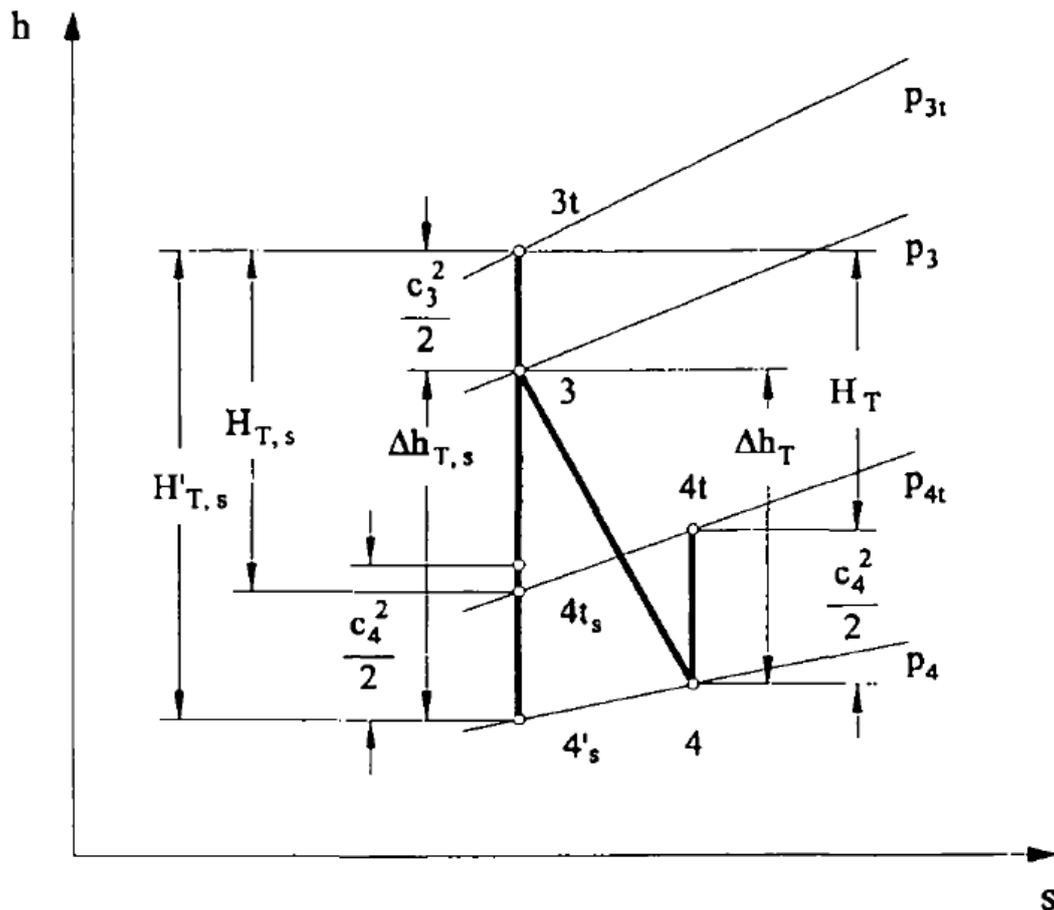


Abbildung 19 Darstellung der Expansion im h-s Diagramm [8]

Wie in der Abbildung 19 ersichtlich gilt:

$$h_{3t} - h_{4t} = H_T \quad \text{sowie} \quad h_{3t} - h_{4t,s} = H_{T,s}$$

Der isentrope Turbinenwirkungsgrad ist wie folgt definiert:

$$\eta_{T,s} = \frac{H_T}{H_{T,s}} \quad (9)$$

Die tatsächliche Turbinenarbeit mit der mittleren spezifischen Wärmekapazität c_{pm} für die Expansion lautet

$$H_T = c_{pm}|_{4t}^{3t} (T_{3t} - T_{4t}) \quad (10)$$

und die isentrope Turbinenarbeit dazu

$$H_{T,s} = c_{pm}|_{4t,s}^{3t} (T_{3t} - T_{4t,s}). \quad (11)$$

Da $T_{4t,s}$ unbekannt ist, muss die Isentropenbeziehung herangezogen werden

$$\frac{T_{4t,s}}{T_{3t}} = \left(\frac{p_{4t}}{p_{3t}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (12)$$

mit

$$\frac{\kappa - 1}{\kappa} = \frac{R_{RG}}{c_{pm}|_{4t}^{3t}}. \quad (13)$$

Durch Umformung der Gleichung (11) erhält man

$$H_{T,s} = c_{pm}|_{4t,s}^{3t} T_{3t} \left[1 - \left(\frac{T_{4t,s}}{T_{3t}} \right) \right]. \quad (14)$$

Mittels Einführung des Turbinendruckverhältnisses für die Berechnung des Zustandsverlaufs 3-4

$$\Pi_T = \frac{p_{4t}}{p_{3t}} \quad (15)$$

erhält man in Gleichung (14) eingesetzt

$$H_{T,s} = c_{pm}|_{4t}^{3t} T_{3t} \left(1 - \Pi_T^{\frac{R_{RG}}{c_{pm}|_{4t}^{3t}}} \right). \quad (16)$$

Die Luftüberschusszahl ist zur Ermittlung der Gaskonstante von Rauchgas notwendig

$$\lambda = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_B} \frac{1}{14,7597} \quad (17)$$

Für die Berechnung der Turbinenarbeit wurde, wie schon bei der Verdichterarbeit erwähnt, $c_{pm}|_{4t}^{3t}$ und $c_{pm}|_{4t,s}^{3t}$ durch das Unterprogramm HIGAS berechnet. Für die manuelle Auswertung können die Werte iterativ - wie in Gl. Nr.8 - bestimmt werden, oder aus einem Diagramm für wahre spezifische Wärme bei konstantem Druck in Abhängigkeit von Temperatur und Luftüberschusszahl für eine relative Luftfeuchtigkeit von 60 % bei 20 °C abgelesen werden.

3.3.1.3 Brennkammer

Aus dem Zustandsverlauf 2-3 kann die Brennkammeraustrittstemperatur ermittelt werden. Die theoretische Brennkammeraustrittstemperatur lautet bei Annahme eines vollständigen Ausbrands und einer adiabaten Verbrennung

$$T_{3t,th} = \frac{\dot{m}_B H_U}{c_{pm}|_{2t}^{3t,th} (\dot{m}_L - \dot{m}_B)} + T_{2t} \quad (18)$$

Der Brennstoffmassenstrom wird dabei über das Verhältnis der Brennstoffdichte zur gemessenen Zeit von einem Liter verbrauchtem Kraftstoff ermittelt

$$\dot{m}_B = \frac{1}{\tau} \rho_B \quad (19)$$

Für die Messung wurde ausschließlich Dieseldieselkraftstoff verwendet. Er besitzt eine Dichte ρ_B von 0,875 [kg/l]. Sein Heizwert H_U beträgt 42700 kJ/kg

Die spezifische Wärmekapazität $c_{pm}|_{2t}^{3t,th}$ wird wiederum iterativ ermittelt,

dazu muss $T_{3t,th}$ vorerst geschätzt werden und

$$c_{pm}|_{2t}^{3t,th} = \frac{1}{T_{3t,th} - T_{2t}} \int_{2t}^{3t,th} c_p(T) dT \approx \frac{c_{p3t,th} + c_{p2t}}{2} \quad (20)$$

berechnet werden. Das Ergebnis wird wiederum in Gleichung (18) eingesetzt. Der Iterationsschritt erfolgt so lange, bis der Unterschied zwischen neuem und altem Wert für $T_{3t,th}$ weniger als 3 °C beträgt.

3.3.1.4 Turbineneintrittstemperatur

Um die Turbineneintrittstemperatur zu ermitteln, muss die gesamte geleistete Arbeit der Turbine erfasst und mit der Temperaturdifferenz zur gemessenen mittleren Abgastemperatur addiert werden.

Die gesamte verrichtete Turbinenleistung kann aus der effektiven Leistung der Gasturbine, der vom Verdichter aufgenommenen Leistung und der Getriebeverlustleistung bestimmt werden. Es gilt also

$$P_T = P_{eff} + P_V + P_G \quad (21)$$

mit der Verdichterleistung

$$P_V = H_V \dot{m}_L . \quad (22)$$

Die effektive Leistung wird direkt im Versuch anhand der Wirbelstrombremse abgenommen und gemessen.

Die Getriebeverlustleistung vom verbauten Untersetzungsgetriebe kann aus dem vom Hersteller mitgelieferten Kennfeld, wie in Abbildung 20 dargestellt, entnommen werden. Dafür muss noch das Übersetzungsverhältnis des Getriebes bekannt sein

$$i = \frac{n_R}{n_{ab}} = 16,6 . \quad (23)$$

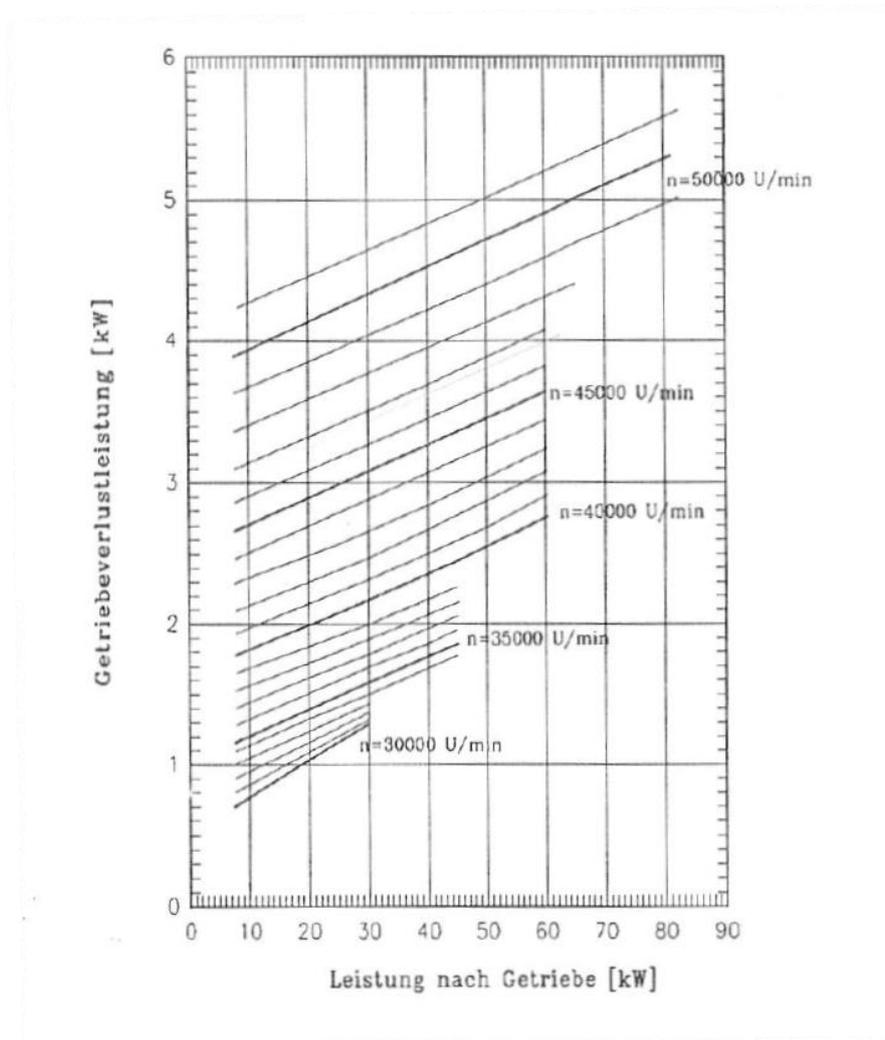


Abbildung 20 Getriebeverlustleistung

Für die Turbinenleistung gilt auch:

$$P_T = \dot{m}_{RG} H_T \quad (24)$$

Dabei ist der Rauchgasmassenstrom

$$\dot{m}_{RG} = \dot{m}_L + \dot{m}_B \quad (25)$$

Setzt man Gleichung (24) in die bereits errechnete Turbinenarbeit aus Gleichung (10) ein, erhält man

$$P_T = \dot{m}_{RG} c_{pm} |_{4t}^{3t} (T_{3t} - T_{4t}) \quad (26)$$

Schlussendlich kann die tatsächliche Turbineneintrittstemperatur mit

$$T_{3t} = \frac{P_T}{\dot{m}_{RG} c_{pm}|_{3t}} + T_{4t} \quad (27)$$

berechnet werden.

3.3.1.5 Wirkungsgrade, spezifischer Brennstoffverbrauch

Der Gesamtwirkungsgrad errechnet sich aus

$$\eta_{eff} = \frac{P_{eff}}{\dot{m}_B H_U} \quad (28)$$

Der Brennkammerwirkungsgrad aus

$$\eta_{BK} = \frac{\Delta T_{23t}}{\Delta T_{23t,th}} \quad (29)$$

und der spezifische Brennstoffverbrauch mit

$$\dot{b}_B \left[\frac{kg}{kWh} \right] = 3600 \frac{\dot{m}_B}{P_{eff}} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (30)$$

3.3.1.6 Korrigierter Luftmassenstrom

Die Berechnung des Luftmassenstroms \dot{m}_L erfolgt in Abhängigkeit des Umgebungszustands. Für die dimensionslose Darstellung im Kennfeld verwendet man vorzugsweise den korrigierten Luftmassenstrom

$$\dot{m}_{corr} = \dot{m}_L \frac{\sqrt{\frac{T_U}{T_{Uref}}}}{\sqrt{\frac{p_U}{p_{Uref}}}} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (31)$$

Als Bezugszustand wird dabei der genormte Zustand auf Meeresniveau mit einer Temperatur von $T_{Uref} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ und einem Druck von $p_{Uref} = 101000 \text{ Pa}$ verwendet.

3.3.2 Programm zur Auswertung

Die Gasturbine KHD T 216 soll in Zukunft in Abwechslung mit der Rover Gasturbine wieder für die Laborübung verwendet werden. Für diesen Zweck wurde das bereits bestehende Berechnungsprogramm modifiziert, welches von Martin Fux am Institut für Thermodynamik und Energietechnik für die damals abgehaltenen Übungseinheiten erstellt wurde.

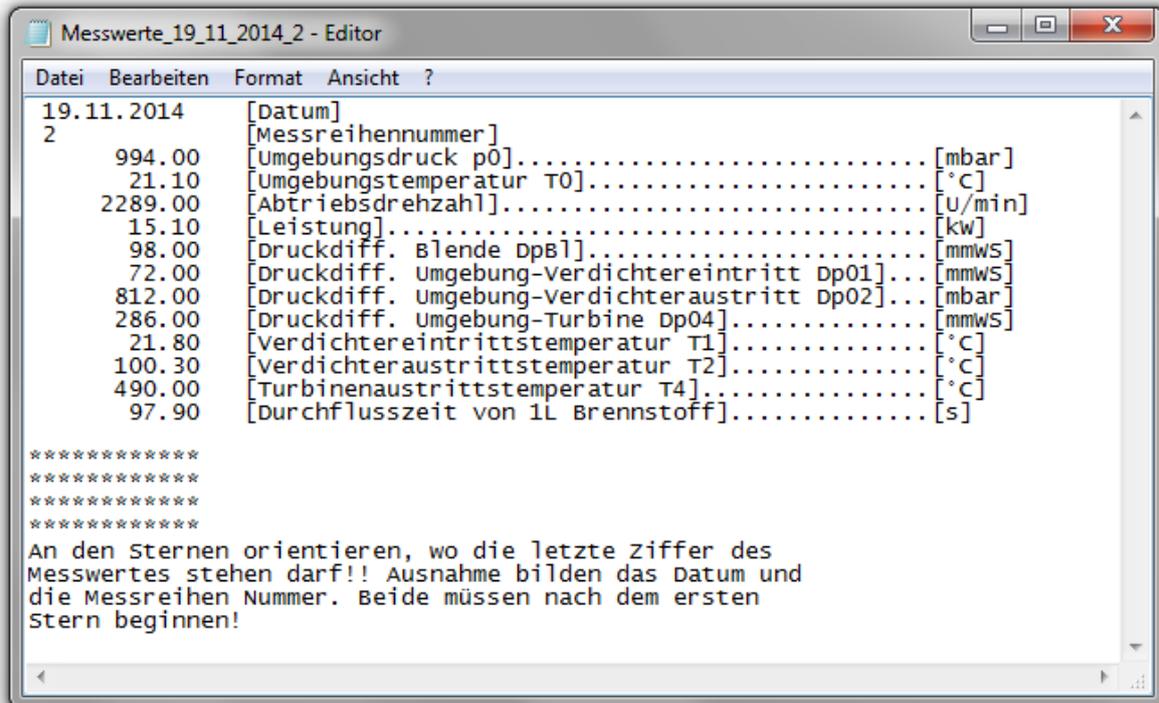
Das in FORTRAN77 geschriebene Programm war nur gering automatisiert. Rechenschritte mussten händisch durchgeführt werden. Für die Berechnung der Stoffdaten mussten aus aufliegenden Kennlinien der KHD T 216 und anderen thermodynamischen Kennlinien verschiedene Werte abgelesen und eingegeben werden. Des Weiteren führte das Programm keine automatisierten Iterationsschritte aus. Diese mussten vorerst eingegeben werden und bei nicht zutreffender Näherung wiederholt werden.

Das modifizierte Programm wurde ebenfalls in FORTRAN mit der Version FORTRAN95 erstellt. Die Entwicklungsumgebung von FORTRAN wirkt, als sei sie für den heutigen Stand der Technik bereits in die Jahre gekommen. Ein großer Vorteil ist aber, dass das bereits vorhandene Programm HIGAS für die Stoffdatenanalyse miteingebunden werden kann. Durch die Funktion ohne grafische Oberfläche können heute noch Berechnungsteile von früher ohne weitere Installation in einem Terminalfenster ausgeführt werden.

Der verwendete Compiler war von Fujitsu Lahey. Bei dem Versuch, diesen Compiler auf Windows mit 64 Bit System zu installieren, konnte leider kein Erfolg erzielt werden. Erst im Virtual PC Mode war es möglich, den Compiler zu installieren. Für die automatische Einbindung der Kennlinien in das Berechnungsprogramm mussten diese vorerst als rationale Funktion dargestellt werden, da sie nur in Tabellenform vorlagen. Das waren u.a. die original mitgelieferten Kennlinien von KHD über den Getriebeverlust und den Brennkammerdruckverlust. Sie wurden anhand von Polynomen dritten und vierten Grades ausgedrückt und sind im Anhang im Programmcode nachzulesen. Wie schon weiter oben erwähnt, konnte für die Berechnung der benötigten Stoffdaten das bereits bekannte, am Institut aufliegende Unterprogramm HIGAS verwendet werden.

Das Programm besteht aus zwei Teilen. Bei Ausführen des ersten Programms „Messwerteingabe.exe“ findet ein Dialog mit dem Benutzer statt. Dabei wird der Benutzer aufgefordert, das Messdatum, die Messreihennummer und die aufgenommenen Daten am Prüfstand einzugeben. Es leitet Schritt für Schritt durch jeden einzugebenden Messwert. Nach Eingabe all dieser Daten erstellt das Programm die Datei „Messwerte.out“ wie z.B. in Abbildung 21 dargestellt.

Dies hat den Vorteil, dass die eingegebenen Daten nochmals vor der tatsächlichen Auswertung kontrolliert werden können.



```

Messwerte_19_11_2014_2 - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
19.11.2014 [Datum]
2 [Messreihennummer]
994.00 [Umgebungsdruck p0]..... [mbar]
21.10 [Umgebungstemperatur T0]..... [°C]
2289.00 [Abtriebsdrehzahl]..... [U/min]
15.10 [Leistung]..... [kW]
98.00 [Druckdiff. Blende DpB1]..... [mmWS]
72.00 [Druckdiff. Umgebung-Verdichtereintritt Dp01]... [mmWS]
812.00 [Druckdiff. Umgebung-Verdichteraustritt Dp02]... [mbar]
286.00 [Druckdiff. Umgebung-Turbine Dp04]..... [mmWS]
21.80 [Verdichtereintrittstemperatur T1]..... [°C]
100.30 [Verdichteraustrittstemperatur T2]..... [°C]
490.00 [Turbinenaustrittstemperatur T4]..... [°C]
97.90 [Durchflusszeit von 1L Brennstoff]..... [s]

*****
*****
*****
*****
An den Sternen orientieren, wo die letzte Ziffer des
Messwertes stehen darf!! Ausnahme bilden das Datum und
die Messreihen Nummer. Beide müssen nach dem ersten
Stern beginnen!

```

Abbildung 21 Ausgabe „Messwerte.out“

Beim Starten des zweiten Programms „Auswertung.exe“ berechnet das Programm ohne weitere Zwischenschritte die Ergebnisse und schreibt diese in ein .txt File, welches nach Datum und Messreihennummer benannt ist, wie z.B. in Abbildung 22.

```

19.11.2014_2 - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
Messdatenanalyse KHD Gasturbine
Institut für Energietechnik und Thermodynamik
Forschungsbereich Strömungsmaschinen
*****
Messdatum = 19.11.2014 Betriebspunkt = 2/4
*****
Messwerte

Temperaturen:
T0 = 21.10 °C = 294.25 K
T2 = 100.30 °C = 373.45 K
T4 = 490.00 °C = 763.15 K

Drucke:
p0 = 994.0 mbar
p2 = 1806.0 mbar

Druckdifferenzen:
DpB1 = 98.00 mmWS
Dp01 = 72.00 mmWS
Dp04 = 286.00 mmWS

Sonstiges:
n = 2289.00 u/min
Peff = 15.10 kw
tau = 97.90 s

*****
Ergebnisse der Berechnung

Temperaturen: K
Verdichtereintritt T1 = 294.95
Verdichteraustritt T2s = 350.53
Turbineneintritt T3th = 916.51
Turbineneintritt T3 = 855.40
Turbinenaustritt T4s = 743.00

Massenstroeme: kg/s
Luft = 0.64184
Brennstoff = 0.00894
Rauchgas = 0.65078
Korrigiert = 0.65380
Luftzahl[-] = 4.86546

Drucke: mbar
Verdichtereintritt p1 = 986.94
Turbinenaustritt p4 = 1022.06
Turbineneintritt p3 = 1774.29

spez. Arbeiten: kJ/kg
Verdichter HV = 79.04
Verdichter HVs = 55.90
Turbine HT = 103.71
Turbine HTs = 126.37

Leistungen: kw
Verdichter PV = 50.73
Turbine PT = 67.49
Verlust PR = 1.66

Wirkungsgrade (n=eta): [-]
Verdichter nVs = 0.707
Turbine nTs = 0.821
Brennkam. nBK = 0.878
Gesamt neff = 0.040

*****

```

Abbildung 22 Ausgabe der berechneten Ergebnisse von FORTRAN

Es müssen also lediglich die am Prüfstand aufgenommenen Messwerte in der richtigen Reihenfolge eingegeben werden. Für die Auswertung zur Laborübung hat sich damit der Arbeitsaufwand erheblich erleichtert. Vor allem kann diese schneller und fehlerfrei durchgeführt werden.

3.3.3 Drehzahlkennlinie

Die Produktion der KHD Gasturbine wurde bereits eingestellt. Die Ersatzteilversorgung ist daher beschwerlich. Im Zuge der Diplomarbeit wurden daher nur Betriebspunkte im Teillastbereich betrieben bzw. untersucht.

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse und Auswertungen der Messungen angeführt.

Für die Ermittlung der Drehzahlkennlinie waren vier Betriebspunkte mit einer Bremsleistung P_{eff} von annähernd 10, 15, 20 und 25 kW eingestellt. Die Drehzahl wurde dabei möglichst konstant gehalten. Die bei den Messungen aufgenommenen Daten wurden handschriftlich aufgezeichnet. Diese sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Auswertung erfolgte mit dem oben beschriebenen Auswertungsprogramm. Die ausgewerteten Ergebnisse sind in Tabelle 3 eingetragen.

Messpunkt Nummer		1	2	3	4
p_0	[mbar]	993,7	994	994,1	994,1
t_0	[°C]	21	21,1	21,2	21,2
n_{ab}	[U/min]	2299	2289	2288	2300
P_{eff}	[kW]	9,8	15,1	19,7	25
Δp_{B1}	[mmWS]	110	98	94	94
Δp_{01}	[mmWS]	76	72	72	70
Δp_{02}	[mbar]	806	812	827	853
Δp_{04}	[mmWS]	281	286	298	315
t_1	[°C]	21,7	21,8	22	22
t_2	[°C]	99,4	100,3	101,1	102
t_4	[°C]	438	490	549	604
τ	[s]	104,9	97,9	89	79
Öltemperatur	[°C]	42,2	46,7	51,8	55
Öldruck	[bar]	1,8	1,7	1,6	1,5

Tabelle 2 aufgenommene Daten der Messung vom 19.11.2014

Messpunkt Nummer		1	2	3	4
P_{eff}	[kW]	9,8	15,1	19,7	25
t_{2s}	[°C]	76,98	77,38	78,45	79,97
t_{3th}	[°C]	582,57	643,36	705,31	770,81
t_3	[°C]	523,02	582,11	647,48	708,89
T_3	[K]	796,17	855,40	920,63	982,04
t_{4s}	[°C]	417,37	469,73	526,66	578,97
Drücke					
p_1	[mbar]	986,24	986,94	987,04	987,23
p_3	[mbar]	1766,60	1774,29	1790,77	1817
p_4	[mbar]	1021,27	1022,06	1023,33	1025,00
Π_V	[-]	1,828	1,898	1,845	1,871
Massenströme					
\dot{m}_L	[kg/s]	0,679	0,642	0,629	0,630
\dot{m}_B	[kg/s]	0,0083	0,0089	0,0098	0,0109
\dot{m}_{RG}	[kg/s]	0,688	0,651	0,638	0,640
\dot{m}_{corr}	[kg/s]	0,692	0,654	0,640	0,639
λ	[-]	5,520	4,865	4,331	3,880
spezifische Arbeiten					
H_V	[kJ/kg]	78,23	79,04	79,65	80,97
H_{Vs}	[kJ/kg]	55,6	55,90	56,77	58,21
H_T	[kJ/kg]	94,15	103,71	112,48	121,57
H_{Ts}	[kJ/kg]	116,78	126,37	138,00	150,58
Leistungen					
P_V	[kW]	53,18	50,73	50,07	50,89
P_T	[kW]	64,62	67,49	71,51	77,75
P_R	[kW]	1,59	1,66	1,74	1,86
Wirkungsgrade					
η_{Vs}	[-]	0,710	0,707	0,713	0,719
η_{Ts}	[-]	0,804	0,821	0,812	0,807
η_{BK}	[-]	0,866	0,878	0,896	0,900
η_{eff}	[-]	0,028	0,040	0,047	0,053

Tabelle 3 ausgewertete Messergebnisse der Messung vom 19.11.2014

Wie in Abbildung 23 ersichtlich, steigt die Turbineneintrittstemperatur T_3 linear an, wenn die Leistung erhöht wird. Grund dafür ist, dass mehr Brennstoff verbraucht wird, um die Drehzahl bei steigender Leistung konstant zu halten.

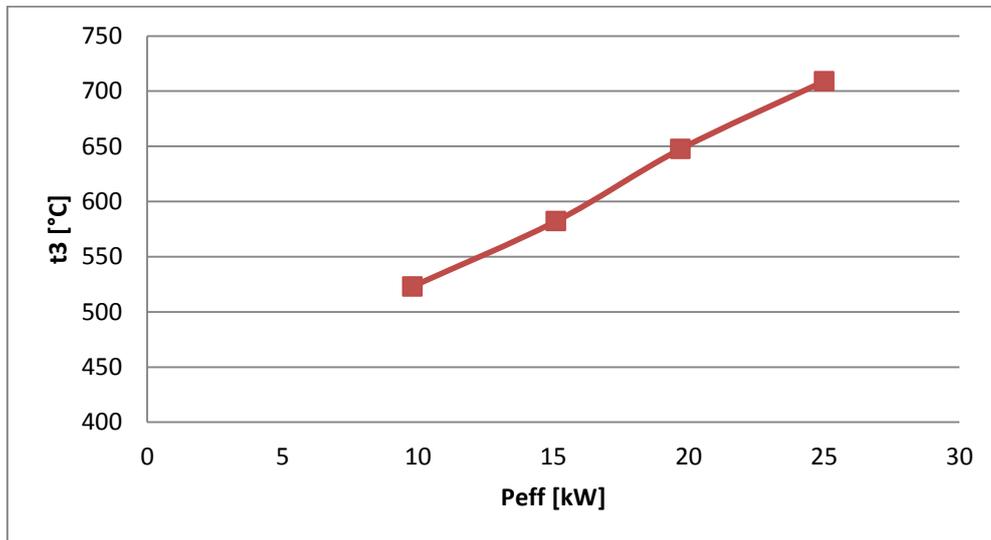


Abbildung 23 Turbineneintrittstemperatur der Messung vom 19.11.2014

In Abbildung 24 ist der Luftmassenstrom \dot{m}_L über die Leistung aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass der Luftdurchsatz bei steigender Leistung abnimmt. Ein Grund dafür ist die ansteigende Turbineneintrittstemperatur. Im Verdichter wird dadurch eine Drosselung ausgelöst, welche eine Senkung der Luftdurchsatzmenge bewirkt.

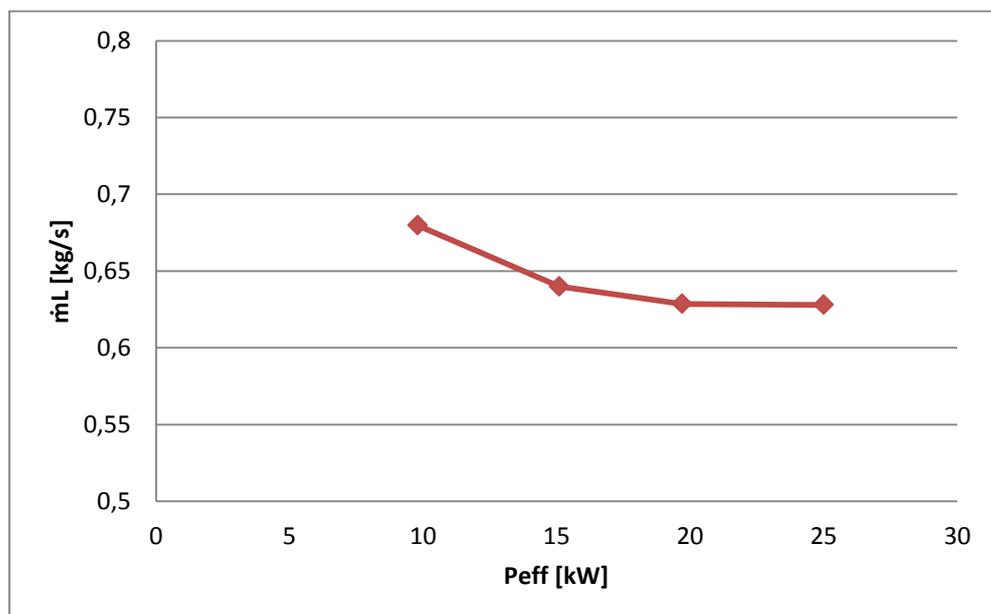


Abbildung 24 Luftmassenstrom der Messung vom 19.11.2014

Die gemessene Turbinenausstrittstemperatur ist in Abbildung 25 dargestellt. Der Verlauf verhält sich wie jener der Turbineneintrittstemperatur. Da diese bei steigender Leistung zunimmt, wirkt sich dies auch auf die Turbinenausstrittstemperatur aus. Das Heißgas expandiert beim Passieren der Turbine. Bei diesem Prozess wird thermische und kinetische in mechanische Energie umgewandelt. Am Turbinenausstritt wird deshalb eine niedrigere Temperatur als am Eintritt gemessen.

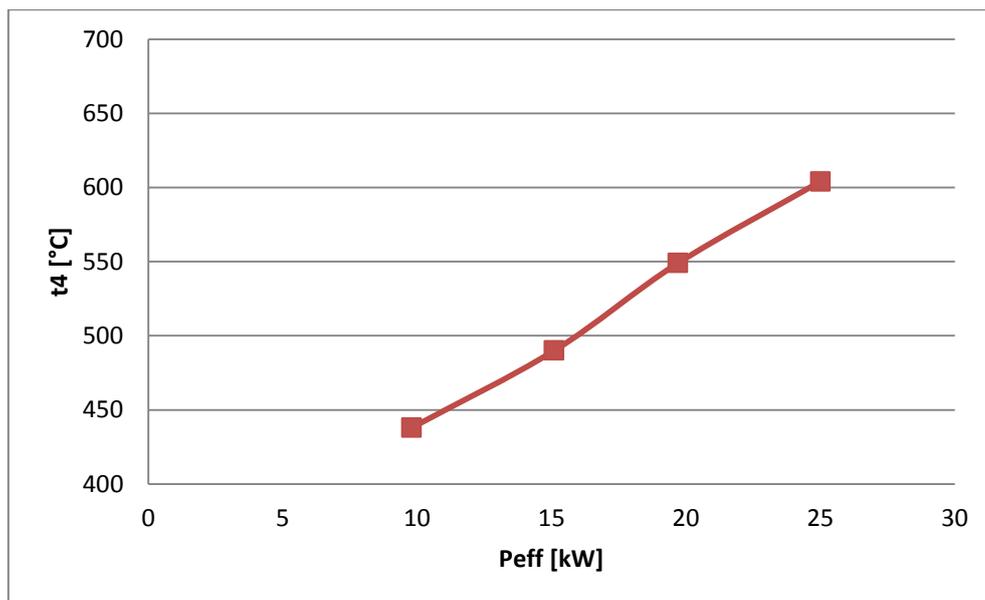


Abbildung 25 Turbinenausstrittstemperatur der Messung vom 19.11.2014

Der isentrope Turbinenwirkungsgrad (Abbildung 26) ist annähernd konstant und liegt im Bereich von 80 bis 82 %.

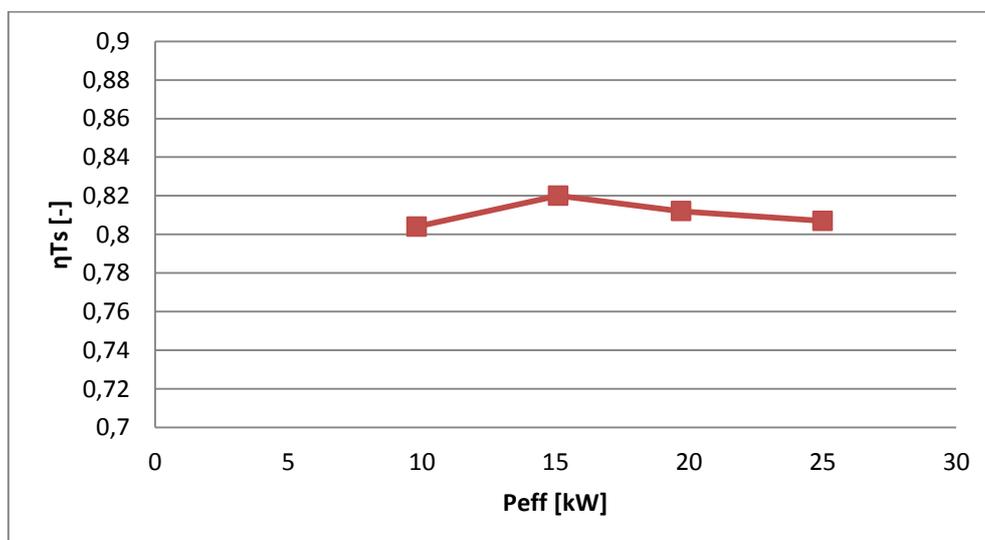


Abbildung 26 Isentroper Turbinenwirkungsgrad der Messung vom 19.11.2014

Der isentrope Verdichterwirkungsgrad in Abbildung 27 liegt zwischen 71 bis 72%. Aufgrund von Messtoleranzen ist dieser als konstant zu betrachten.

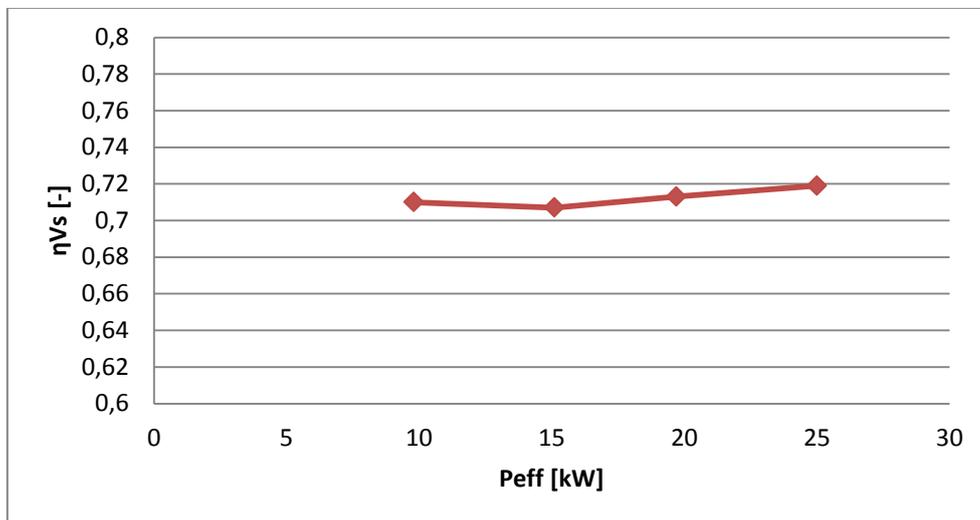


Abbildung 27 Isentroper Verdichterwirkungsgrad der Messung vom 19.11.2014

Der Brennkammerwirkungsgrad wird in der Energiebilanz als Ausbrenngrad bezeichnet. Dieser zeigt unter anderem an, wie viel der im Brennstoff enthaltenen chemischen Energie tatsächlich umgesetzt wird. Dabei werden alle Verluste berücksichtigt, die bei einer unvollständigen Verbrennung oder durch Abstrahlung über die Brennkammerwände auftreten können. [9]

Der in Abbildung 28 dargestellte Brennkammerwirkungsgrad steigt mit zunehmender Leistung an. Das bedeutet, dass durch die steigende Brennkammertemperatur der Kraftstoff zu einem größeren prozentuellen Anteil verbrennt.

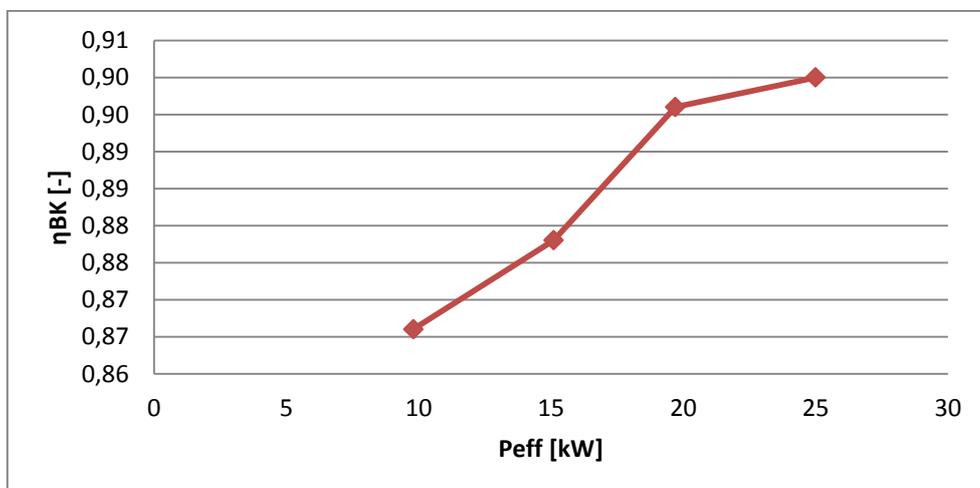


Abbildung 28 Brennkammerwirkungsgrad der Messung vom 19.11.2014

Wie in Abbildung 29 ersichtlich, steigt der effektive Wirkungsgrad der gesamten Anlage bei zunehmender Leistung. Dieser liegt bei der eingestellten Turbinendrehzahl von 38300U/min in einem zu erwartenden Bereich. [4]

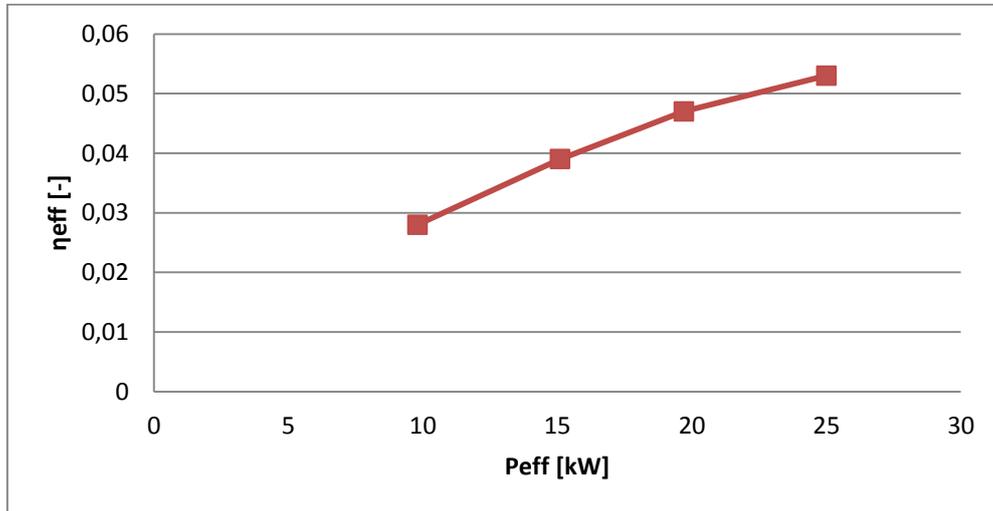


Abbildung 29 Effektiver Wirkungsgrad der Messung vom 19.11.2014

In Abbildung 30 ist das Verhältnis der Turbineneintrittstemperatur zur Verdichtereintrittstemperatur über die effektive Leistung aufgetragen. Wie erwartet, steigt bei zunehmender Leistung T_3/T_1 an. Dies rührt daher, dass die Turbineneintrittstemperatur bei zunehmender Leistung steigt, hingegen die Verdichtereintrittstemperatur bei steigender Leistung annähernd konstant bleibt.

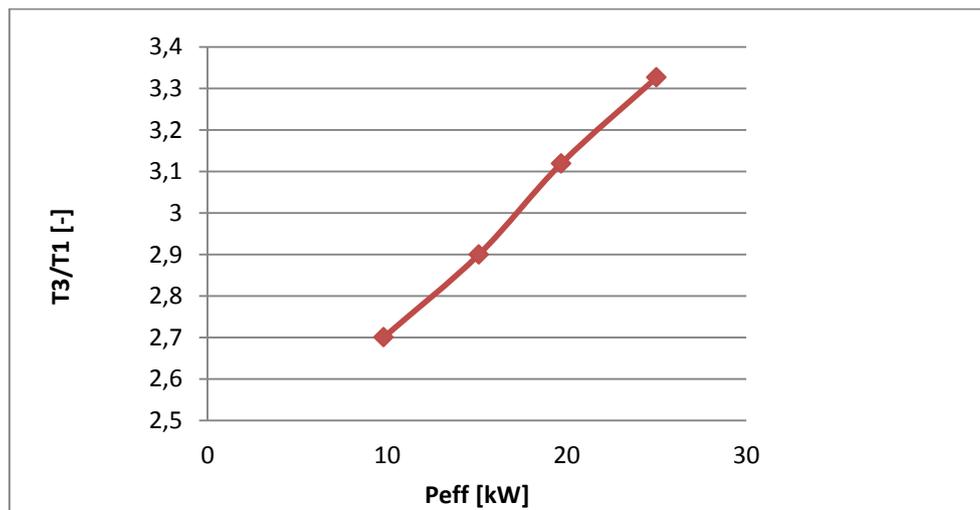


Abbildung 30 Turbineneintrittstemp. zu Verdichtereintrittstemp. der Messung vom 19.11.2014

Der spezifische Brennstoffverbrauch ist das Verhältnis zwischen Kraftstoffverbrauch pro Zeiteinheit und der abgegebenen mechanischen Leistung. Er errechnet sich nach Gleichung (30). Wie in Abbildung 31 dargestellt, wird bei einer höheren effektiven Leistung weniger Brennstoff pro Energieeinheit verbraucht. Das bedeutet, dass die Anlage in höheren Leistungsbereichen effektiver arbeitet.

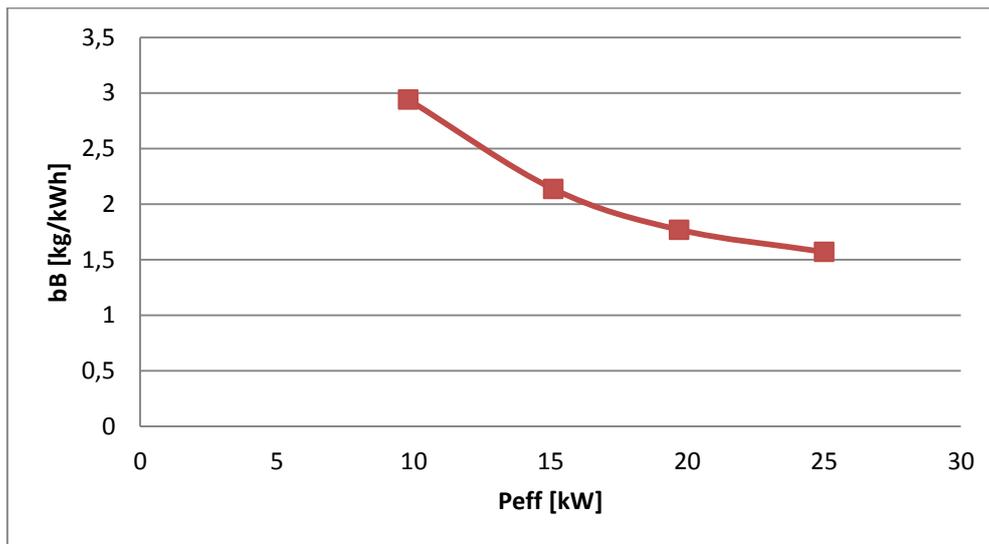


Abbildung 31 spezifischer Brennstoffverbrauch der Messung vom 19.11.2014

Das Verdichterdruckverhältnis über den korrigierten Massenstrom in Abbildung 32 weist einen unerwarteten Verlauf auf. Da bei den Messungen die Drehzahlen nicht exakt konstant gehalten wurden, kann hier keine qualitative Aussage über den Verlauf des Verdichterkennfeldes gegeben werden. Allerdings war bei Messung Nr.1 und Nr.4 eine Drehzahl von 2300 U/min und bei Messung Nr.2 und Nr.3 eine Drehzahl von 2289 U/min eingestellt. Dies gleicht nach einer Umrechnung mit der Übersetzung des Getriebes von 16,666 einer Verdichterdrehzahl von 38331 U/min und 38150 U/min. Wenn man nur die Messpunkte der unterschiedlichen Drehzahlen miteinander verbindet, können daraus die einzelnen Drehzahlkennlinien des Verdichters interpretiert werden. Um eine genauere Aussage über den Verlauf des Verdichterkennfeldes zu tätigen, müssten weitere Messungen mit unterschiedlichen konstant gehaltenen Drehzahlen durchgeführt werden.

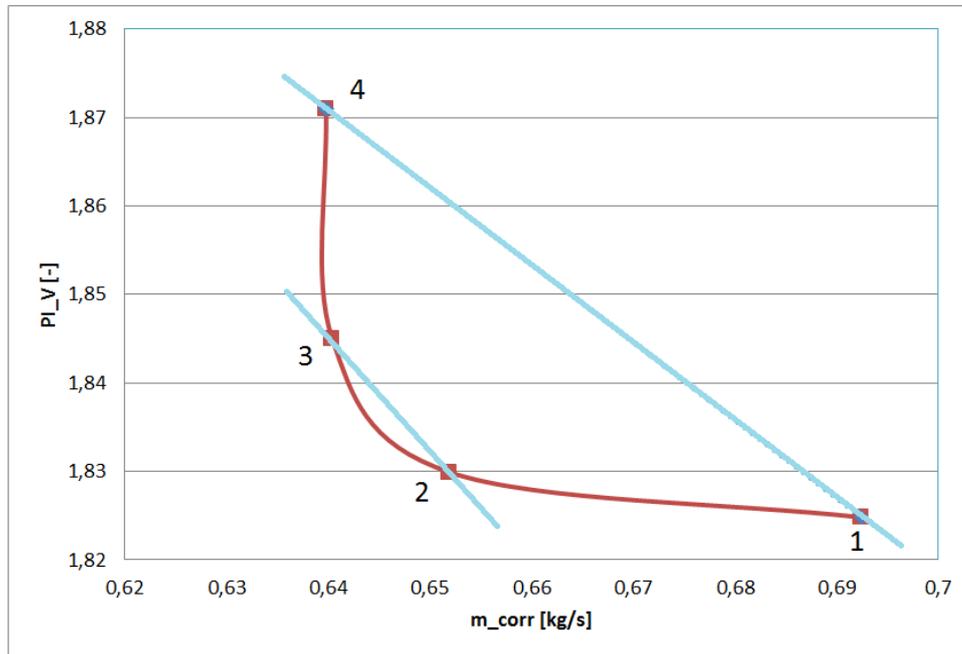


Abbildung 32 Verdichterdruckverhältnis der Messung vom 19.11.2014

3.4 Vergleich der Drehzahlkennlinie mit früheren Aufzeichnungen

Zum tatsächlichen Vergleich der Messungen vom 19.11.2014 wurden diese Aufzeichnungen aus dem Jahr 1995 gegenübergestellt. Es wurden drei ähnliche Messungen mit annähernd gleicher Drehzahl und effektiver Leistung dafür verwendet, welche am 12.04.1995 stattfanden. Die Messungen fanden damals ebenfalls mit Dieselmotorkraftstoff statt. Die dazu gehörigen Daten sind in Tabelle 4 angegeben. In Tabelle 5 sind die ausgewerteten Messergebnisse durch das neu geschriebene Programm eingetragen.

Messpunkt Nummer		1	2	3
p_0	[mbar]	985,8	985,8	985,8
t_0	[°C]	21	21	21
n_{ab}	[U/min]	2368	2350	2330
P_{eff}	[kW]	10,7	18,7	25
Δp_{Bl}	[mmWS]	109,3	104,7	99
Δp_{01}	[mmWS]	83,6	80	76
Δp_{02}	[mbar]	853,3	865,7	871
Δp_{04}	[mmWS]	567	582	591
t_1	[°C]	22,7	22,6	22,5
t_2	[°C]	108,8	107,8	107,1
t_4	[°C]	462,3	533,3	595,5
τ	[s]	103	90	82

Tabelle 4 aufgenommene Daten der Messung vom 12.04.1995

Messpunkt Nummer		1	2	3
P_{eff}	[kW]	10,7	18,7	25
t_{2s}	[°C]	81,24	81,77	81,90
t_{3th}	[°C]	602,82	678,61	744,90
t_3	[°C]	555,46	634,65	703,68
T_3	[K]	828,61	907,80	976,83
t_{4s}	[°C]	446,11	515,69	576,93
Drücke				
p_1	[mbar]	977,20	977,95	978,34
p_3	[mbar]	1804,46	1819,00	1826,21
p_4	[mbar]	1041,42	1042,89	1043,78
Π_v	[-]	1,882	1,893	1,897
Massenströme				
\dot{m}_L	[kg/s]	0,675	0,661	0,640
\dot{m}_B	[kg/s]	0,0085	0,0097	0,0100
\dot{m}_{RG}	[kg/s]	0,683	0,670	0,650
\dot{m}_{corr}	[kg/s]	0,690	0,675	0,657
λ	[-]	5,382	4,604	4,080
spezifische Arbeiten				
H_v	[kJ/kg]	86,74	85,82	85,22
H_{Vs}	[kJ/kg]	58,98	59,52	59,75

H_T	[kJ/kg]	103,89	115,25	125,04
H_{Ts}	[kJ/kg]	121,94	135,28	146,50
Leistungen				
P_V	[kW]	58,54	56,70	54,75
P_T	[kW]	71,00	77,26	81,67
P_R	[kW]	1,76	1,86	1,92
Wirkungsgrade				
η_{Vs}	[-]	0,679	0,694	0,701
η_{Ts}	[-]	0,852	0,852	0,854
η_{BK}	[-]	0,897	0,917	0,930
η_{eff}	[-]	0,029	0,045	0,055

Tabelle 5 ausgewertete Messergebnisse der Messung vom 12.04.1995

Beim ersten Vergleich der neuen mit den alten Messungen ist sofort ersichtlich, dass bei der Messung vom 12.04.1995 die Drehzahl bei den unterschiedlichen Messpunkten nicht konstant gehalten wurde. Die Druckdifferenz Δp_{04} am Turbinenaustritt, welche mit einem U-Rohrmanometer in Millimeter Wassersäule abgelesen wird, variiert zwischen den Messreihen.

Die Differenz in mmWS der aufgenommenen Messpunkte liegt bei fast 50%. Berechnet man allerdings den tatsächlichen Turbinenaustrittsdruck p_4 so liegt die Änderung bei ca. 2%. Für die Gegenüberstellung liegt diese Variation im tolerierbaren Bereich. Auf eine weitere Messung wurde daher verzichtet.

Schon beim Vergleich der abweichenden Werte aus Tabelle 4 wurde eine Leckage vermutet. Diese bestätigte sich auch bei gründlicher Untersuchung. Luft konnte über eine defekte Anschlussstelle des Messschlauchs zur Druckdifferenz zwischen Umgebung und des Turbinenaustritts entweichen. Diese Leckage wurde allerdings durch Austausch des Schlauchs nach Beendigung der Messung behoben.

In Abbildung 33 bis Abbildung 42 sind die Kennlinien der beiden Messreihen übereinandergelegt.

In Abbildung 33 und Abbildung 34 sind jeweils der Luftmassenstrom \dot{m}_L und die Turbineneintrittstemperatur T_3 über die Leistung der beiden Messungen gegenübergestellt. Man erkennt, dass die aufgetragenen Größen gut übereinstimmen. Kleine Abweichungen können auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden.

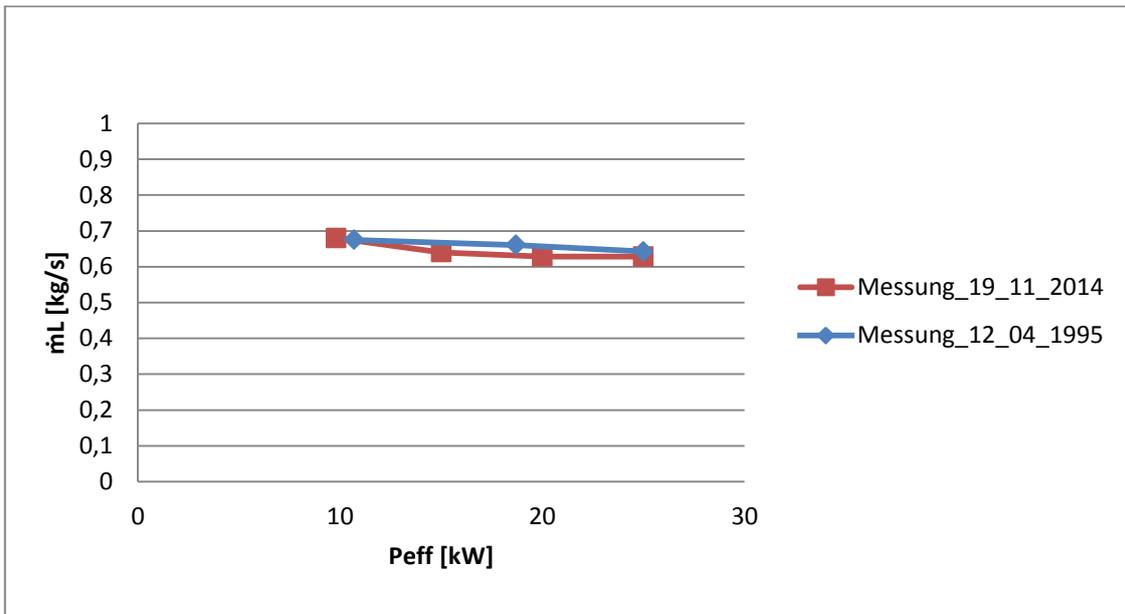


Abbildung 33 Vergleich des Luftmassenstroms der angeführten Messungen

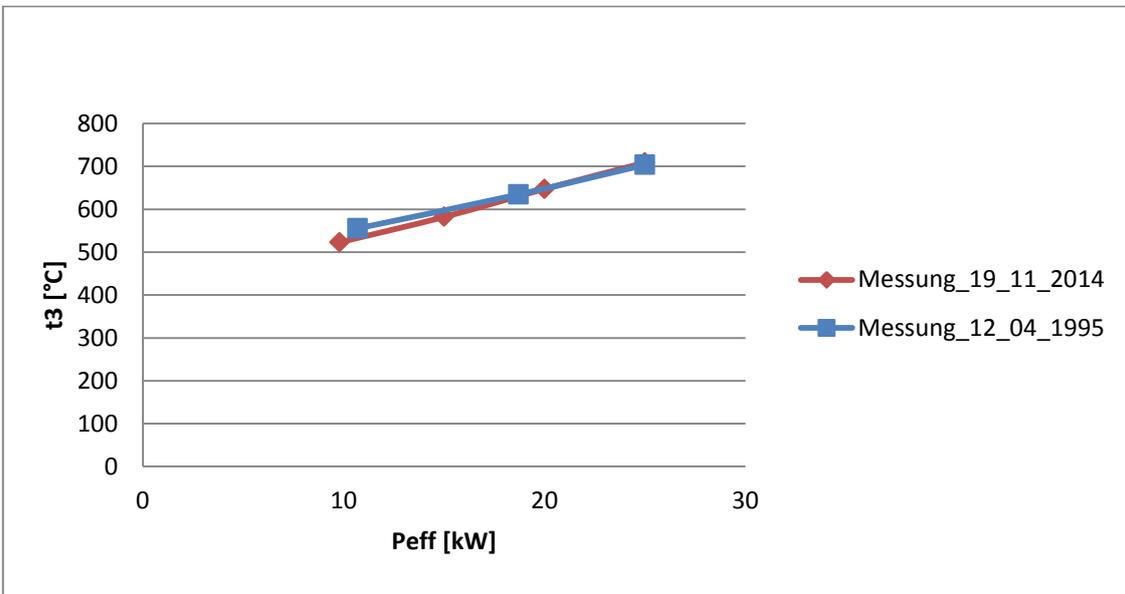


Abbildung 34 Vergleich der Turbineneintrittstemperatur der angeführten Messungen

In Abbildung 35 ist der isentrope Turbinenwirkungsgrad der beiden Messungen über die Leistung aufgetragen. Der isentrope Turbinenwirkungsgrad hat sich um wenige Prozent verringert. Da bei der Berechnung der isentropen Turbinenarbeit in Gleichung (16) der Turbinenaustrittsdruck Einfluss nimmt, wirkt sich die oben erwähnte Messungenauigkeit auf die Berechnungsergebnisse aus. Es ist aber auch gut möglich, dass die Abnahme des Turbinenwirkungsgrades auf eine geringe Schaufelverrundung der scharfen Kanten zurückzuführen ist, die eventuell durch das Abstrahlen des Turbinenlaufrades mit Nusschalen hervorgerufen wurde.

Es könnte sich aber auch durch das erneute Zusammenbauen das Spaltmaß zum Turbinendeckel verändert haben. Dabei würden auch schon kleinste Veränderungen des Spaltmaßes eine Veränderung der Turbinenleistung bewirken, vor allem, weil die KHD T 216 ein halboffenes Turbinenlaufrad besitzt.

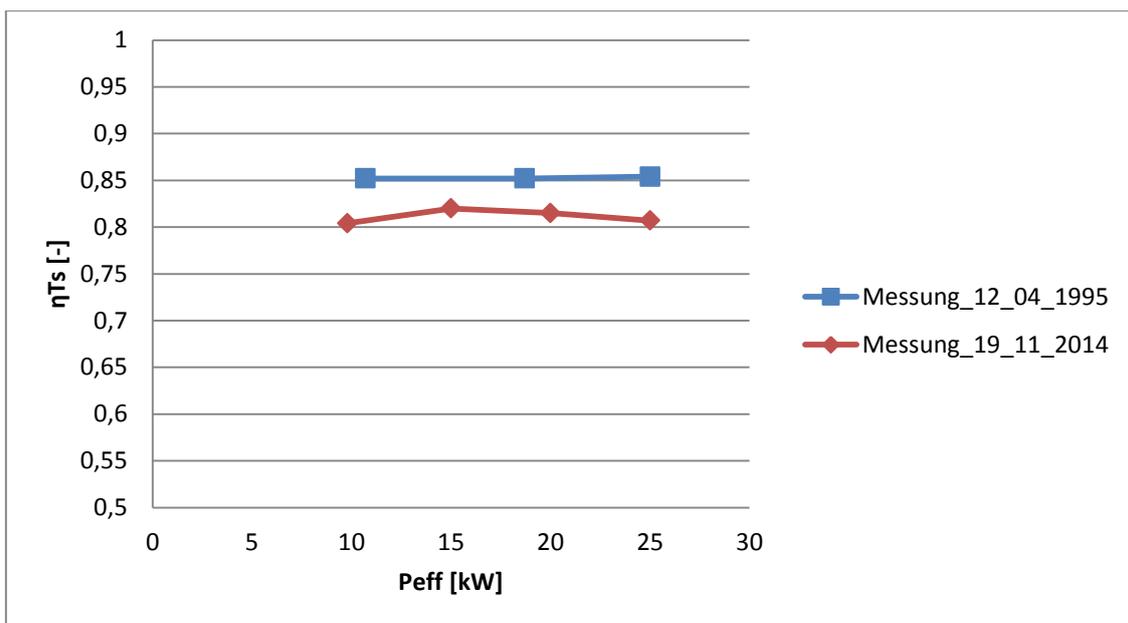


Abbildung 35 Vergleich des isentropen Wirkungsgrads der angeführten Messungen

In Abbildung 36 und Abbildung 37 sind jeweils der Brennkammerwirkungsgrad η_{BK} und der isentrope Verdichterwirkungsgrad η_{Vs} über die Leistung der beiden Messungen gegenübergestellt. Die aufgetragenen Größen stimmen bis auf kleine Abweichungen, welche auf Messungenauigkeiten zurückzuführen, sind gut überein.

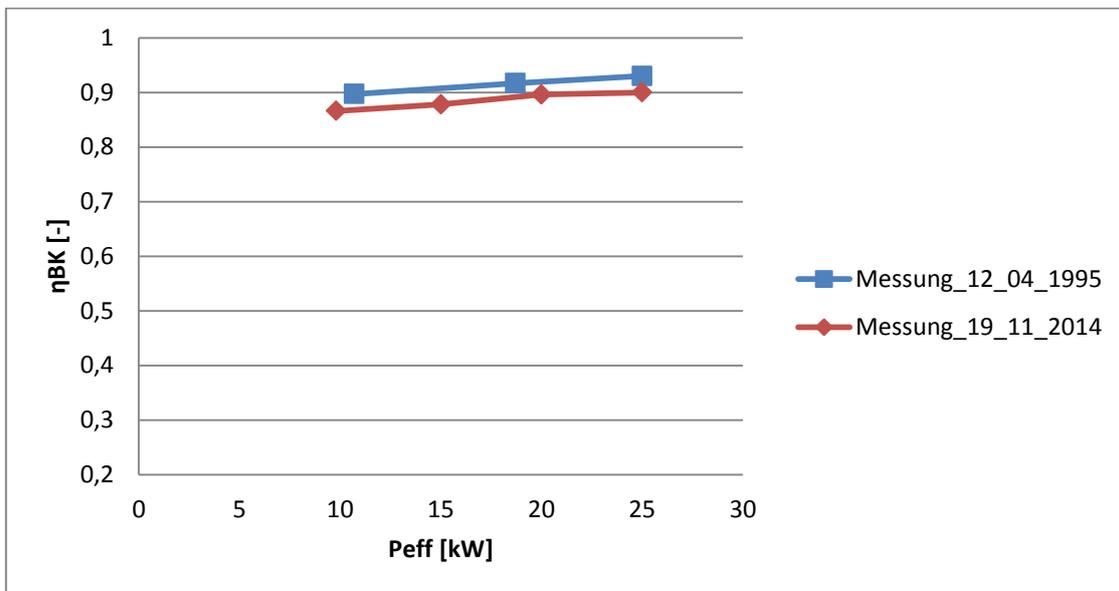


Abbildung 36 Vergleich des Brennkammerwirkungsgrads der angeführten Messungen

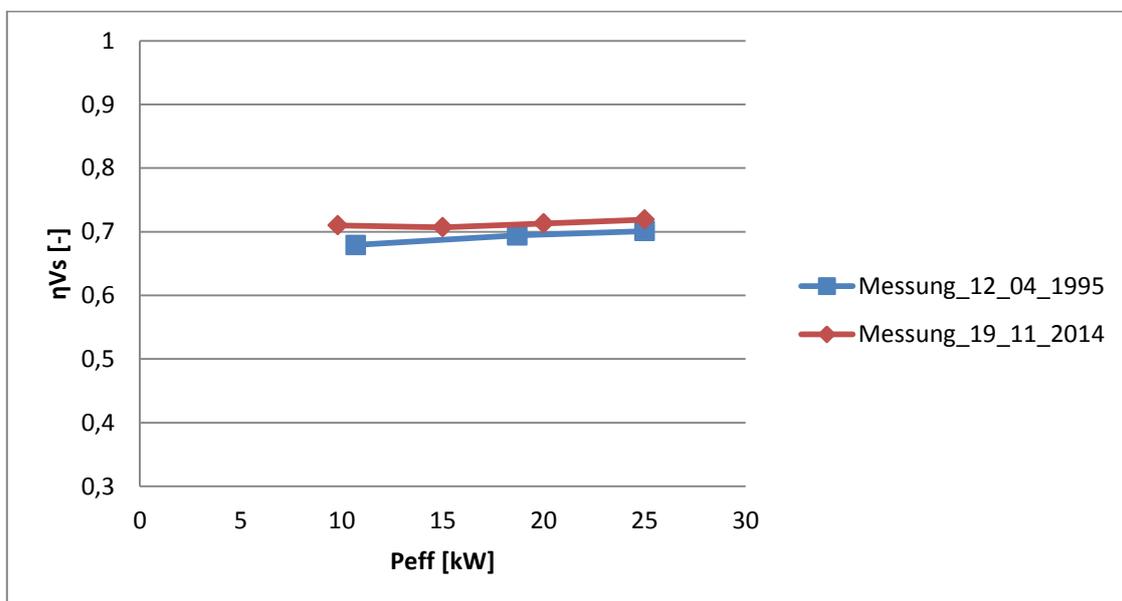


Abbildung 37 Vergleich des isentropen Verdichterwirkungsgrads der angeführten Messungen

In Abbildung 38 und Abbildung 39 erkennt man wieder eine gute Übereinstimmung der verglichenen Messpunkte. Dabei sind der effektive Wirkungsgrad und die Turbineneintrittstemperatur zur Verdichtereintrittstemperatur jeweils über die Leistung aufgetragen.

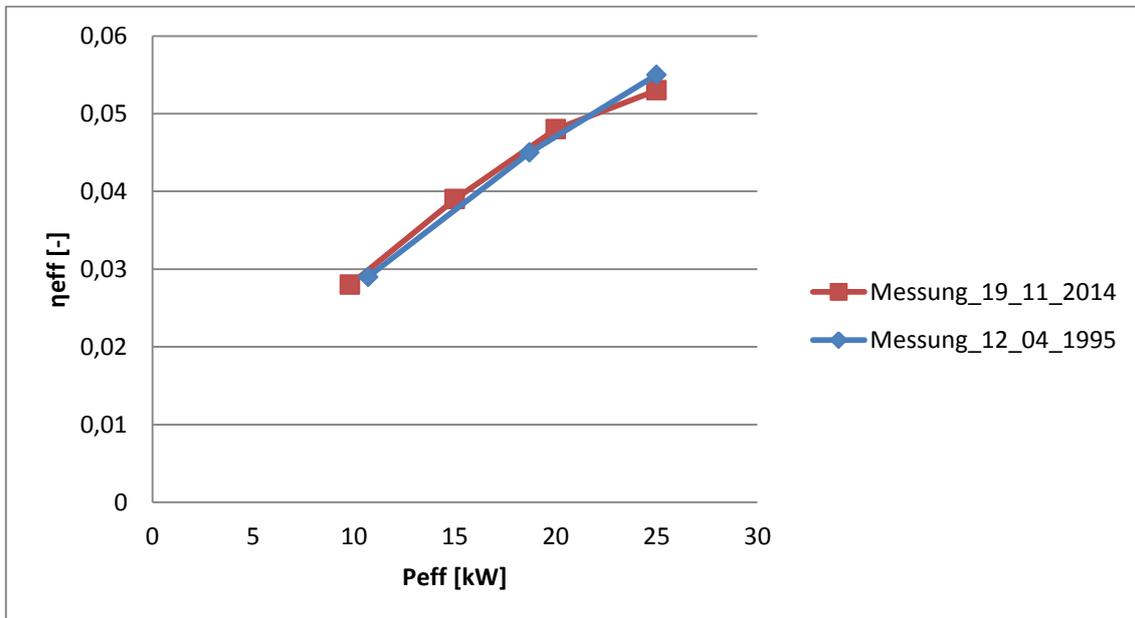


Abbildung 38 Vergleich des effektiven Wirkungsgrads der angeführten Messungen

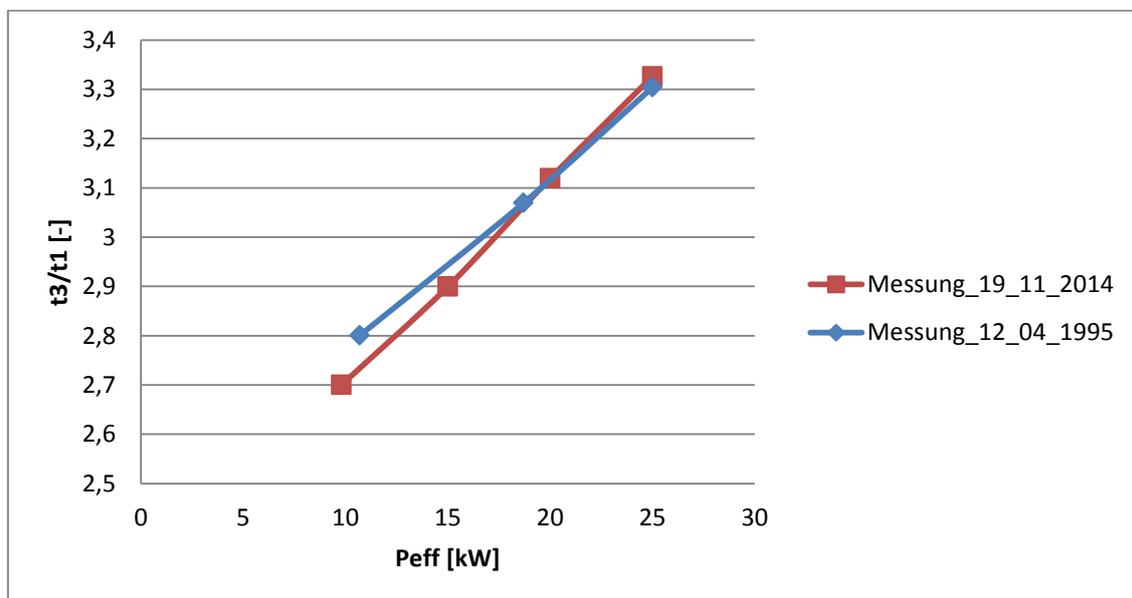


Abbildung 39 Vergleich der Turbineneintrittstemperatur zur Verdichtereintrittstemperatur für die angeführten Messungen

Die Abgastemperatur und der spezifische Brennstoffverbrauch welche in Abbildung 40 und Abbildung 41 über die Leistung aufgetragen sind, stimmen ebenfalls gut überein. Geringe Abweichungen sind wiederum auf Messungenauigkeiten zurückzuführen.

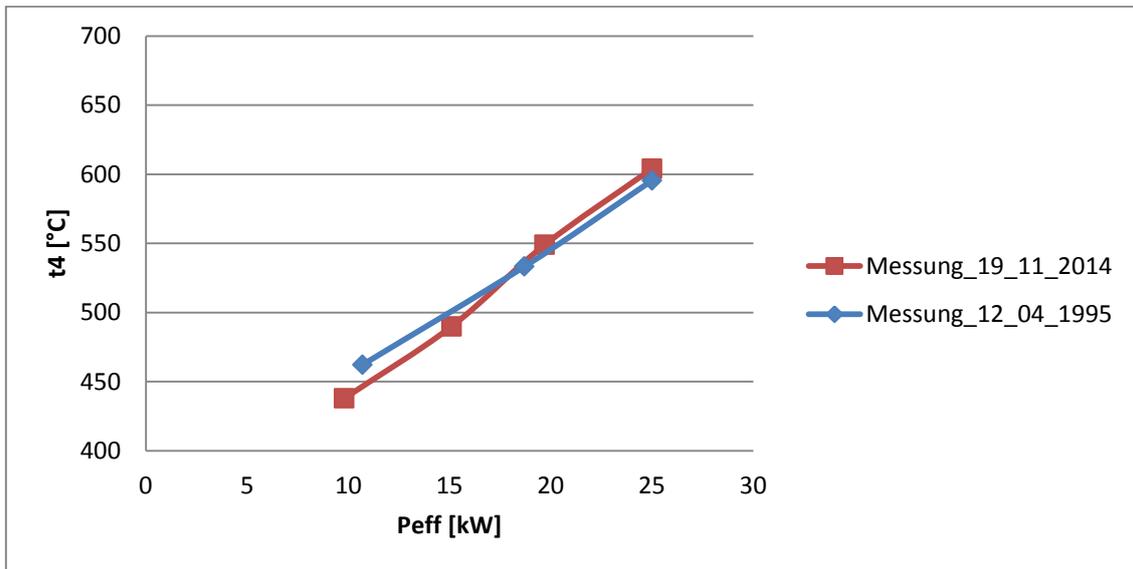


Abbildung 40 Vergleich der Turbinenaustrittstemperaturen der angeführten Messungen

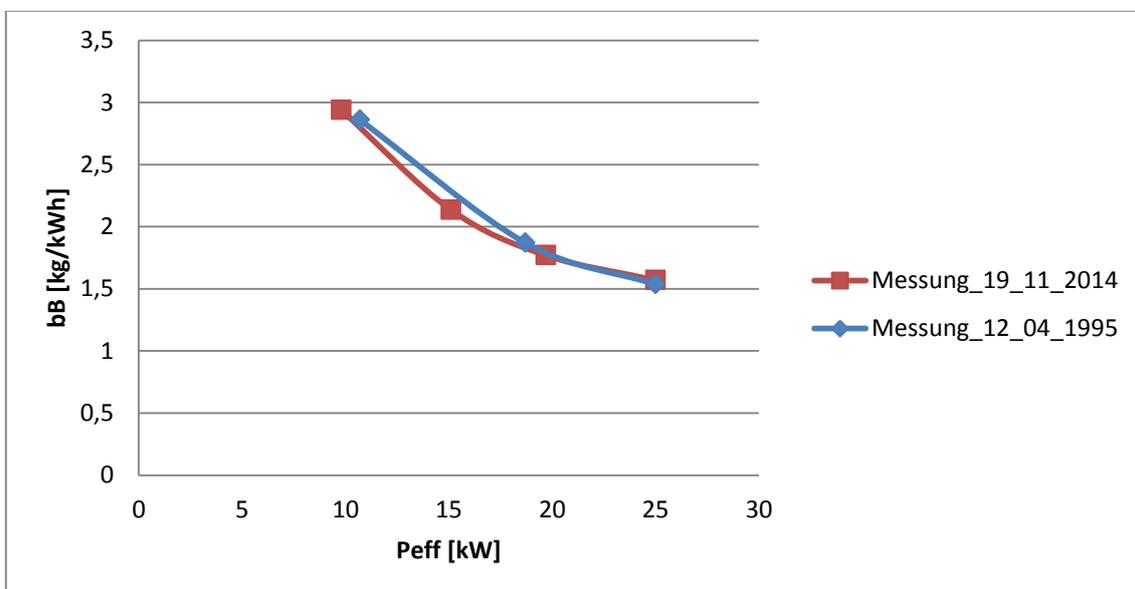


Abbildung 41 Vergleich des spezifischen Brennstoffverbrauchs der angeführten Messungen

Im Vergleich des Verdichterdruckverhältnisses über den korrigierten Massenstrom weichen die beiden Messreihen in Abbildung 42 voneinander ab. Grund dafür könnte die Drehzahlvariabilität im Versuch vom 12.04.1995 sein, die keine direkten Rückschlüsse ziehen lässt.

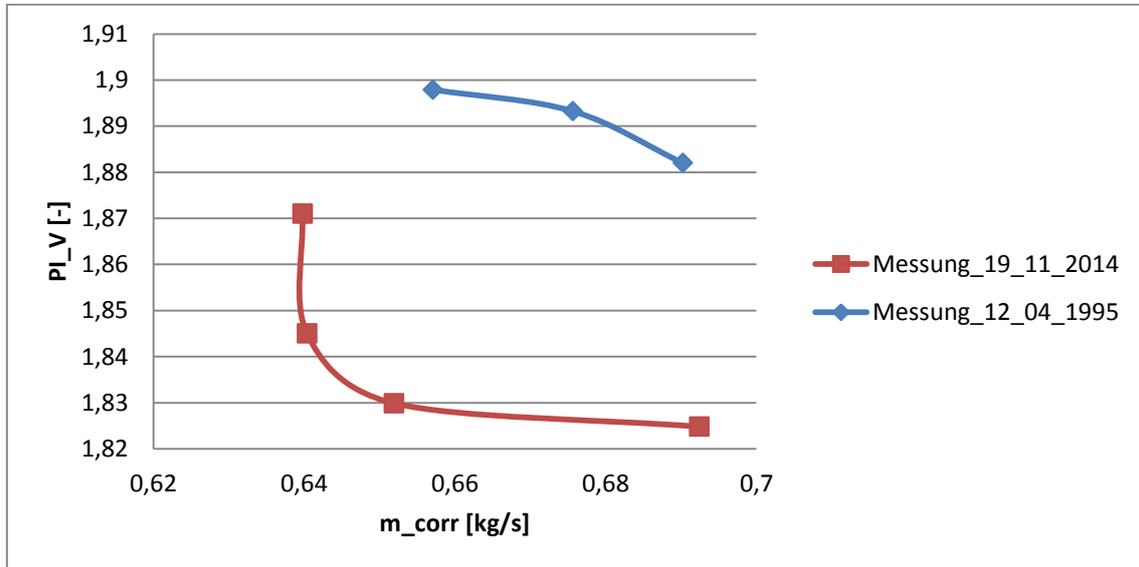


Abbildung 42 Vergleich des Verdichterdruckverhältnisses der angeführten Messungen

4 Zusammenfassung

Am Institut für Energietechnik und Thermodynamik gibt es eine Kleingasturbine des Typs KHD T 216. Für den Laborunterricht und diverse Folgeprojekte wurde eine Betriebsanleitung verfasst (siehe Kapitel 3.1). Mit dieser kann die Gasturbine nach gründlicher Einarbeitung sicher betrieben werden.

Des weiteren wurde ein Auswertungsprogramm in FORTRAN95 modifiziert, das zur vereinfachten Auswertung von Messergebnissen dient.

Um zu untersuchen, wie sich diverse Umbauten an der KHD T 216 Gasturbine auf das Betriebsverhalten des Versuchsstandes auswirken, wurde eine Drehzahlkennlinie der Turbine ermittelt. Bei der Gegenüberstellung mit Messdaten aus dem Jahr 1995 (siehe Abschnitt 3.4) konnte gezeigt werden, dass sich durch den Umbau keine wesentlichen Veränderungen des Betriebsverhaltens ergeben haben. Kleinere Abweichungen beruhen wahrscheinlich auf den Einfluss von Messungenauigkeiten. Die Abweichung des Turbinenwirkungsgrades könnte auf ein verändertes Spaltmaß zum Turbinendeckel durch das Zerlegen und den anschließenden Zusammenbau zurückzuführen sein.

5 Ausblick

Das Labor des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik übersiedelt auf die Gründe des Arsenalts. Im Zuge dessen könnte beim Neuaufbau der Turbine KHD T 216 eine automatisierte Steuerungstechnik für den Betrieb eingebaut werden, da diese zur Zeit manuell bedient werden muss. Hierfür würde sich das Programm LabView anbieten.

Prinzipiell erwiesen sich die Auswertungen der neuen Messungen zu den Messungen vor den Umbauten als ähnlich. Allerdings wäre es sinnvoll, mehrere Drehzahlbereiche gegenüberzustellen.

Die KHD T 216 besitzt für die Kühlung der Turbinenschaufeln Kühlluftbohrungen. Darüber sind allerdings keine genaueren Unterlagen vorhanden. Hierfür müsste der Hersteller für nähere Informationen zu Rate gezogen werden. Dies könnte aber schwierig werden, da der Hersteller Deutz die Produktion von Gasturbinen bereits eingestellt hat. Eine genaue Erfassung der Anzahl und Abmessungen der Kühlluftbohrungen könnte im Zuge einer Reparatur oder Wartung der Turbine erfasst werden. Somit könnte in Zukunft auch bei der Berechnung die Schaufelkühlung berücksichtigt werden.

Während des Betriebs der Gasturbine ist aufgrund des enormen Lärms eine Verständigung kaum möglich. Für die Laborübungen wäre es daher zweckmäßig, einen Simulationsprüfstand für die Visualisierung der einzelnen Schritte zu bauen. An diesem könnten die Studierenden auch vor dem tatsächlichen Betrieb der Turbine Erläuterungen zu den Einstellungen während des Betriebs bekommen. Für nähere Informationen siehe [10].

6 Literaturverzeichnis

- [1] H. Rick, Gasturbinen und Flugantriebe : Grundlagen, Betriebsverhalten und Simulation, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg , 2013.
- [2] R. Willinger, Skriptum zur Vorlesung Thermische Turbomaschinen, Wien: Technische Universität Wien, 2012.
- [3] P. Witt, Gasturbinen: Entwicklung, Konstruktion, Anwendungen, Berlin: VEB Verlag Technik Berlin, 1961.
- [4] K. Schulte, Kleingasturbinen und ihre Anwendungen, Köln: K.L.S.Publishing, 2006.
- [5] H.-G. Münzberg und J. Kurzke, Gasturbinen - Betriebsverhalten und Optimierung, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1977.
- [6] KHD, „Handbuch T216,“ 2015. [Online]. [Zugriff am 10 02 2015].
- [7] C. Lechner und J. Seume, Stationäre Gasturbinen, Springer, 2003.
- [8] J. Eberharter, Entwicklung und Inbetriebnahme einer direkt-holzstaubgefeuerten Gasturbinenanlage, Wien: TU Wien, 2005.
- [9] W. J. Bräunling, Flugzeugtriebwerke: Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme, Berlin- Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [10] Z. Lee, S. Lowe, B. P. V. Poppel, M. J. Benson und A. S. Leger, „UPGRADING THE UNDERGRADUATE GAS TURBINE LAB,“ *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition; GT2014-25943*, 16 June 2014.

7 Anhang

7.1 Messwerte

Messdaten vom 21.07.2014

Messpunkt Nummer		1	2	3
p_0	[mbar]	986,5	986,7	986,7
t_0	[°C]	29,7	29,5	29,4
n_{ab}	[U/min]	2208	2198	2194
P_{eff}	[kW]	10	15	20
Δp_{Bl}	[mmWS]	85	80	79
Δp_{01}	[mmWS]	63	60	58
Δp_{02}	[mbar]	715	722	746
Δp_{04}	[mmWS]	273	279	296
t_1	[°C]	29,6	29,7	29,8
t_2	[°C]	100,8	102,1	103,7
t_4	[°C]	485	551	611
τ	[s]	106	97	86
Öltemperatur	[°C]	47,3	52,4	56,6
Öldruck	[bar]	1,7	1,7	1,5

Messdaten vom 05.04.1995

Messpunkt Nummer		1	2	3	4
p_0	[mbar]	1002	1002	1002	1002
t_0	[°C]	20	20	20	20
n_{ab}	[U/min]	2203,2	2203	2204	2204
P_{eff}	[kW]	9,2	13	21,3	25,3
Δp_{Bl}	[mmWS]	92	89,6	86,6	83
Δp_{01}	[mmWS]	70	68	65,6	63,6
Δp_{02}	[mbar]	738,8	748,6	781,3	793,6
Δp_{04}	[mmWS]	565,6	546,3	587	591
t_1	[°C]	20,1	20,6	20,2	22,5
t_2	[°C]	93,7	95,8	95,3	107,1
t_4	[°C]	454	510	591	592
τ	[s]	103	99	85	77

7.2 Programmcode

7.2.1 Messwerteingabe.for

```

C      Last change:  0      2 Sep 2015      0:43 am
          Program Messwerteingabe          !Diese kleine Programm dient zur
Erstellung des Inputprogramms für die Messreihenanalyse

      Real T0, T1, T2, T4, p0, n, Peff, deltaBL, deltap01,
+      deltap02,deltap04, tau
      character datum*12, Nummer*1
C
C
C      WRITE(*,5)
5      FORMAT(5X,'Dieses Programm dient zur Erstellung der Einlesedatei'/
!Aufforderungsfenster
1      5X,'fuer die Messwertanalyse'/
2      5X,'Die Messdaten muessen genau in der Reihenfolge ein-'/
3      5X,'gegeben werden wie aufgefodert.'/)
C
      print *, ' '
      print *, 'Datum der Messreihe im format TT.MM.JJJJ
+'
      read *, datum
C
      print *, ' '
      print *, 'Nummer der Messreihe (Betriebspunkte 1-4)
+'
Messreihennummer und
      read *, Nummer
Datum werden beide
C
      print *, ' '
Die eingegeben werte werden untereinander
      print *, 'Umgebungsdruck p0 in mbar
+'
in den ersten 12 Stellen einer zeile
      read *, p0
geschrieben.
C
      print *, ' '
Das Programm Messwertanalyse.exe
      print *, 'Umgebungstemperatur T0 in Grad Celsius
+'
liest immer die ersten 12 Stellen
      read *, T0
einer zeile aus und speichert sie
C
      print *, ' '
      print *, 'Abtriebsdrehzahl in U/min

```

```
+  
  read *, N  
C  
  print *, ' '  
  print *, 'Leistung in kw  
+  
  read *, Peff  
C  
  print *, ' '  
  print *, 'Druckdiff. Blende DpBl in mmWS  
+  
  read *, deltapBL  
C  
  print *, ' '  
  print *, 'Druckdiff. Umgebung-Verdichtereintritt Dp01 in mmWS  
+  
  read *, deltap01  
C  
  print *, ' '  
  print *, 'Druckdiff. Umgebung-Verdichteraustritt Dp02 in mbar  
+  
  read *, deltap02  
C  
  print *, ' '  
  print *, 'Druckdiff. Umgebung-Turbine Dp04 in mmWS  
+  
  read *, deltap04  
C  
  print *, ' '  
  print *, 'Verdichtereintrittstemperatur T1 in Grad Celsius  
+  
  read *, T1  
C  
  print *, ' '  
  print *, 'Verdichteraustrittstemperatur T2 in Grad Celsius  
+  
  read *, T2  
C  
  print *, ' '  
  print *, 'Turbinenaustrittstemperatur T4 in Grad Celsius  
+  
  read *, T4  
C  
  print *, ' '  
  print *, 'Durchflusszeit von 1 Liter Brennstoffes in Sekunden  
+  
  read *, tau  
  
  open(unit=6,file='Messwerte.out')  
!Oeffnung des Text-Ausgabefiles 'Messwerte.out':  
C  
  write (6,110) datum
```

```

C
110  format (1x,a11,3x,'[Datum]')
C
      write (6,115) Nummer                                     !
als String gespeichert
115  format (1x,a1,13x,'[Messreihennummer]')                 !
und in die Ausgabedatei geschrieben.
C
      write (6,120) p0                                       !
120  format (1x,f11.2,3x,'[Umgebungsdruck p0].....
+...[mbar]')          !
C
      write (6,125) T0                                       !
ordnet Sie dann einer Variablen zu.
125  format (1x,f11.2,3x,'[Umgebungstemperatur T0].....
+...[°C]')          !
C
      write (6,130) N
130  format (1x,f11.2,3x,'[Abtriebsdrehzahl].....
+...[U/min]')
C
      write (6,135) Peff
135  format (1x,f11.2,3x,'[Leistung].....
+...[kW]')
C
      write (6,140) deltapBL
140  format (1x,f11.2,3x,'[Druckdiff. Blende DpB].....
+...[mmWS]')
C
      write (6,145) deltap01
145  format(1x,f11.2,3x,'[Druckdiff. Umgebung-Verdichtereintritt Dp01].
+..[mmWS]')
C
      write (6,150) deltap02
150  format(1x,f11.2,3x,'[Druckdiff. Umgebung-Verdichteraustritt Dp02].
+..[mbar]')
C
      write (6,155) deltap04
155  format (1x,f11.2,3x,'[Druckdiff. Umgebung-Turbine Dp04].....
+...[mmWS]')
C
      write (6,160) T1
160  format (1x,f11.2,3x,'[Verdichtereintrittstemperatur T1].....
+...[°C]')
C
      write (6,165) T2
165  format (1x,f11.2,3x,'[Verdichteraustrittstemperatur T2].....
+...[°C]')
C
      write (6,170) T4
170  format (1x,f11.2,3x,'[Turbinenaustrittstemperatur T4].....
+...[°C]')
C

```

```

        write (6,175) tau
175   format (1x,f11.2,3x,'[Durchflusszeit von 1L Brennstoff].....
+...[s]',/)

        write (6,180)
        write (6,180)
        write (6,180)
        write (6,180)
        write (6,185)
        write (6,190)
        write (6,195)
        write (6,200)
180   format ('*****')
185   format ('An den Sternen orientieren, wo die letzte Ziffer des')
190   format ('Messwertes stehen darf!! Ausnahme bilden das Datum und')
195   format ('die Messreihen Nummer. Beide müssen nach dem ersten')
200   format ('Stern beginnen!')

        END

```

7.2.2 Auswertung.for

```

C      Last change:  0      2 Sep 2015    1:29 am
C      Program Messwertanalyse
C
C
C      Real T0, T1, T2g, T2, T3, T3th, T3ang, T4, T4s, p0, p1, p2, p3, n,
+ deltap01,deltap04,deltapBL, tau, IIV, IIT, Hv, Hvs,Ht, Hts, nVs,
+ nTs,neff, nBK, ml, mb, mRG, lambda, R, Peff, Pv, Pt, Pr, epsilon,
+ bB, cp1, cp2, cp3, cp4, cp2s, cp3th, cpm12,cpm23th, cpm34, xv,
+ Toben, Tunten, Yoben, Yunten, T2s, nab, mcorr
C
C      Dimension Z(13)
C
C      character Mdatum*11, Betriebspunkt*1,out*4,Datumausgabe*20,
+ unterstrich*1
C      real PI, Hu, kappa                                ! Konstanten Deklari-
erung
C      out = '.out'                                       !
Die Endung wird für die Dateiausgabe benötigt
C      unterstrich = '_'                                   !
Unterstrich wird für dateiausgabe benötigt
C      kappa = 1.4
C      PI = 3.141592654                                    !
Kreiszahl
C      Hu = 42700                                         !
Brennwert Kraftstoff
C      G=9.81
! Gaskonstante von feuchter Luft

```

```

c
c
c+++++++ Öffnen des Inputfiles ++++++++
c
    open (unit=5,file='Messwerte.out')
c
c
c+++++++ Einlesen der Messdaten ++++++++
c
c
    read (5,100) Mdatum !
    read(5,101) Betriebspunkt !
Einlesen der Strings
100 format (a12) !
101 format (a2) !
c
    read(5,115) p0 !
Einlesen der Messwerte!
    read(5,115) T0 !
    read(5,115) nab !
Erfolgt nach der Reihenfolge wie
    read(5,115) Peff !
sie in der Messwerte.out datei
    read(5,115) deltapBL !
abgespeichert sind.
    read(5,115) deltap01 !
    read(5,115) deltap02
! Es werden aus einer Zeile immer
    read(5,115) deltap04
! die ersten 12 Stellen ausgelesen, in der
    read(5,115) T1 ! Varia-
ble hinterlegt und in die nächste Zeile
    read(5,115) T2g !
gesprungen.
    read(5,115) T4 !
    read(5,115) tau !
115 format(f12.0) !
c
c
c+++++++ Öffnen des outputfiles ++++++++
c
    Datumausgabe = mdatum // unterstrich// Betriebspunkt// out !
Zusammensetzen des Datums des Betriebspunktes und der endung .out
    open (unit=6, file= Datumausgabe) !
Die Ausgabe trägt nun den Namen bsp. 04.03.2011.out
c
c+++++++ Gestaltung der Messdatenübersicht auf dem Output ++++++++
c
c+++++++ Eigentliches Hauptprogramm ++++++++
c
c
c Aufrufen von Higas um Gaskonstante für trockene Luft festzu

```

```

        RL= HIGAS (0,0.,0.,Z) !
HIGAS (0,XV,XD,Z) mit XV=0 und XD= 0 für trockene, reine Luft
c
c      Verdichter Berechnung (Gleichungen 21-29)
        T1=T1+273.15 !
Verdichtereintrittstemperatur in Kelvin
        T2=T2g+273.15 !
Verdichteraustrittstemperatur in Kelvin
        p1=(p0*100-(deltap01*G))/100
! Verdichtereintrittsdruck in Grad
        p2=p0+deltap02
        IIV = p2/p1 !
Verdichterdruckverhältnis
        T2s = T1*(IIV**((kappa-1)/kappa)) !
isentropie Verdichteraustrittstemperatur
c
C
        cp1 = HIGAS (1,T1,0.,Z) !
        cp2 = HIGAS (1,T2,0.,Z) !
spezifische Wärmekapazitäten
        cpm12 = (cp1+cp2)/2 !
für T1,T2 und mittlere zwischen v. Ein- und Austritt
        cp2s = HIGAS (1,T2s,0.,Z) !
index: s für isentrope Zustandsänderung
        cpm12s = (cp1+cp2s)/2 !
HIGAS (N,A,P,Z) N, A, P, Z laut Programmbeschreibung
c
        Hv = cpm12*(T2-T1) !
spezifische Verdichterarbeit
        Hvs = cpm12s*(T2s-T1) !
Isentrope spezifische Verdichterarbeit
        nVs = Hvs/Hv !
Verdichterwirkungsgrad
c
c
c
c      Angesaugter Luftmassenstrom ml
c
        epsilon=1-(0.41*((deltapBL*G)/100)/(kappa*p0))
! Expansionszahl
c
        rohL = (p0*100)/((RL*100000)*(T0+273.15)) !
Luftdichte
        A_BL = (0.17/2)**2*PI !
Blendenquerschnitt
        CE = 0.5961 !
siehe Laborskript
c
        ml = CE*epsilon*A_BL*(2*rohL*(deltapBL*G))**0.5 ! Mas-
senstrom Luft
c
c      Brennkammer (Gleichungen 30-33)

```

```

      mb = 1/tau*0.875                                     !
Massenstrom Brennstoff l1 Diesel zu 0,875kg/l
      mRG = m1 + mb                                       !
Massenstrom Rauchgas
      mcorr= m1*((T0+273.15)/288.15)**0.5/(p0*10**2/101000)**0.5
      lambda = m1/(mb*14.7597)
! Luftzahl
C
C      Bestimmung der Gaskonstanten vom Brennngsgas
C
      xv = mb*(1+14.75) / (mb+m1)                         !
Berechnung des faktors xv laut Programmbeschreibung
      RRG = HIGAS (0,xv,0.,Z)                             !
zur Bestimmung der Gaskonsten für Rauchgas
C
      n=nab*16.6666667
C
! Getriebeverlustleistung für GT216 laut Unterlagen (Diagramm GV/Peff) [kw]
      if (n<30000) then
        GO TO 400
      400 PRINT*,('Drehzahl kontrollieren - zu niedrig')
C
      ELSE if ((n<31000).AND.(n>=30000)) then
        GO TO 410
C
      410 noben=31000
          nunten=30000
          GVoben=0.0236*peff+0.6233
          GVunten=0.0267*peff+0.5
C
      else if ((n<32000).AND.(n>=31000)) then
        GO TO 415
C
      415 noben=32000
          nunten=31000
          GVoben=0.213*peff+0.47
          GVunten=0.0236*peff+0.6233
C
      else if ((n<33000).AND.(n>=32000)) then
        GO TO 420
C
      420 noben=33000
          nunten=32000
          GVoben=0.0196*peff+0.8533
          GVunten=0.213*peff+0.47
C
C
      else if ((n<34000).AND.(n>=33000)) then
        GO TO 425
C
      425 noben=34000
          nunten=33000
          GVoben=0.019*peff+0.94

```

```

GVunten=0.0196*peff+0.8533
C
else if ((n<35000).AND.(n>=34000)) then
GO TO 430
C
430 noben=35000
nunten=34000
GVoben=0.193*peff+1.0067
GVunten=0.019*peff+0.94
C
else if ((n<36000).AND.(n>=35000)) then
GO TO 435
C
435 noben=36000
nunten=35000
GVoben=0.018*peff+1.13
GVunten=0.193*peff+1.0067
C
else if ((n<37000).AND.(n>=36000)) then
GO TO 440
C
440 noben=37000
nunten=36000
GVoben=0.0177*peff+1.273
GVunten=0.018*peff+1.13
C
else if ((n<38000).AND.(n>=37000)) then
GO TO 445
C
445 noben=38000
nunten=37000
GVoben=0.0177*peff+1.3733
GVunten=0.0177*peff+1.273
C
else if ((n<39000).AND.(n>=38000)) then
GO TO 450
C
450 noben=39000
nunten=38000
GVoben=0.016*peff+1.54
GVunten=0.0177*peff+1.3733
C
else if ((n<40000).AND.(n>=39000)) then
GO TO 455
455 noben=40000
nunten=39000
GVoben=0.019*peff+1.61
GVunten=0.016*peff+1.54
C
else if ((n<41000).AND.(n>=40000)) then
GO TO 460
C
460 noben=41000

```

```

nunten=40000
GVoben=0.0202*peff+1.698
GVunten=0.019*peff+1.61
C
else if ((n<42000).AND.(n>=41000)) then
GO TO 465
C
465 noben=42000
nunten=41000
GVoben=0.0196*peff+1.924
GVunten=0.0202*peff+1.698
C
else if ((n<43000).AND.(n>=42000)) then
GO TO 470
C
470 noben=43000
nunten=42000
GVoben=0.0188*peff+2.122
GVunten=0.0196*peff+1.924
C
else if ((n<44000).AND.(n>=43000)) then
GO TO 475
C
475 noben=44000
nunten=43000
GVoben=0.019*peff+2.31
GVunten=0.0188*peff+2.122
C
else if ((n<45000).AND.(n>=44000)) then
GO TO 480
C
480 noben=45000
nunten=44000
GVoben=0.019*peff+2.51
GVunten=0.019*peff+2.31
C
else if ((n<46000).AND.(n>=45000)) then
GO TO 485
C
485 noben=46000
nunten=45000
GVoben=0.019*peff+2.71
GVunten=0.019*peff+2.51
C
else if ((n<47000).AND.(n>=46000)) then
GO TO 490
C
490 noben=47000
nunten=46000
GVoben=0.0196*peff+2.914
GVunten=0.019*peff+2.71
C
else if ((n<48000).AND.(n>=47000)) then

```

```

        GO TO 495
C
495 noben=48000
    nunten=47000
    GVoben=0.018*peff+3.22
    GVunten=0.0196*peff+2.914
C
    else if ((n<49000).AND.(n>=48000)) then
        GO TO 510
C
510 noben=49000
    nunten=48000
    GVoben=0.019*peff+3.46
    GVunten=0.018*peff+3.22
C
    else if ((n<50000).AND.(n>=49000)) then
        GO TO 515
C
515 noben=50000
    nunten=49000
    GVoben=0.0197*peff+3.7229
    GVunten=0.019*peff+3.46
C
    else if ((n<=51000).AND.(n>=50000)) then
        GO TO 520
C
520 noben=51000
    nunten=50000
    GVoben=0.0197*peff+3.7229
    GVunten=0.0191*peff+4.0586
C
    else if (n>51000) then
        GO TO 525
525 PRINT*,('Drehzahl kontrollieren - zu hoch')
C
    end if
C
    GV=GVunten+(GVoben-GVunten)/(noben-nunten)*(n-nunten)
    Pr=GV
cccc
C          Turbine Gleichungen (34 - 40)
C
    Pv = Hv*m1                                     !
Verdichterabtriebsleistung                                     !
C                                                         ! verlustleistung
für Abtriebsdrehzahlen um 1990 herum
    Pt = Peff + Pv + Pr                                     !
Turbinenleistung
C
C          Iterationsschritt zur Bestimmung der
c          Theoretischen Brennkammertemperatur T3Th
C

```



```

C
  T4=T4-273.15
C
  if (T4<300) then
    GO TO 215
C
215 PRINT*,('Abgastemperatur kontrollieren - zu niedrig')
C
  if ((T4<350).AND.(T4>=300)) then
    GO TO 5
C
  5  Toben=350
     Tunten=300
     Yoben=2.667E-16*n**3-2.068E-11*n**2-2.681E-7*n+1.007
     Yuntten=-1.6E-15*n**3+1.88E-10*n**2-8E-6*n+1.101
C
  else if ((T4<400).AND.(T4>=350)) then
    GO TO 10
C
  10 Toben=400
     Tunten=350
     Yoben= 6E-16*n**3-5.829E-11*n**2+1.128E-6*n+0.9898
     Yuntten=2.667E-16*n**3-2.068E-11*n**2-2.681E-7*n+1.007
C
  else if ((T4<450).AND.(T4>=400)) then
    GO TO 15
C
  15 Toben=450
     Tunten=400
     Yoben=7.333E-16*n**3-7.314E-11*n**2+1.693E-6*n+0.9830
     Yuntten=6E-16*n**3-5.829E-11*n**2+1.128E-6*n+0.9898
C
  else if ((T4<500).AND.(T4>=450)) then
    GO TO 20
C
  20 Toben=500
     Tunten=450
     Yoben=8.667E-16*n**3-9.057E-11*n**2+2.474E-6*n+0.9719
     Yuntten=7.333E-16*n**3-7.314E-11*n**2+1.693E-6*n+0.9830
C
  else if ((T4<550).AND.(T4>=500)) then
    GO TO 25
C
  25 Toben=550
     Tunten=500
     Yoben=9.333E-16*n**3-9.8E-11*n**2+2.767E-6*n+0.9686
     Yuntten=8.667E-16*n**3-9.057E-11*n**2+2.474E-6*n+0.9719
C
  else if ((T4<600).AND.(T4>=550)) then
    GO TO 30
C
  30 Toben=600
     Tunten=550

```

```

Yoben=1.067E-15*n**3-1.160E-10*n**2+3.593E-6*n+0.9565
Yunten=9.333E-16*n**3-9.8E-11*n**2+2.767E-6*n+0.9686
C
  else if ((T4<=650).AND.(T4>=600)) then
  GO TO 40
C
  40 Toben=650
  Tunten=600
  Yoben=1.2E-15*n**3-1.34E-10*n**2+4.42E-6*n+0.9444
  Yunten=1.067E-15*n**3-1.160E-10*n**2+3.593E-6*n+0.9565
C
  else if (T4>650) then
  GO TO 220
C
  220 PRINT*,('Abgastemperatur kontrollieren - zu hoch')
C
  end if
C
C
  p23=Yunten+(Yoben-Yunten)/(Toben-Tunten)*(T4-Tunten)
!mittels Interpolation wird hier p23 ermittelt
  p3=p2*p23 !
C
  p4 = (p0*100+(deltap04*G))/100 !
Turbinenaustrittsdruck
  IIit = p4/p3 !
Turbinendruckverhältnis
  T4s = T3*((IIit)**((RRG*100)/cpm34)) !
isentropie Turbinenaustrittstemperatur (Annahme cpm34s = cpm34)
C
  Hts = cpm34*(T3-T4s) !
isentropie spezifische Turbinenarbeit
  Hts= cpm34*T3*(1-IIit**((RRG*100)/(cpm34)))
  Ht = Pt/mrg !
tatsächliche spezifische Turbinenarbeit
  nTs = Ht/Hts !
isentropier Turbinenwirkungsgrad
C
  Güte des Gasturbinenprozesses
C
  neff = Peff/(mb*Hu) !
Gesamtwirkungsgrad
  bB = 3600*mb/Peff !
spezifischer Brennstoffverbrauch
  nBK = (cp3*T3-cp2*T2)/(cp3th*T3th-cp2*T2)
  T12=T2s ! Brennkammerwirkungsgrad
C
C+++++++ Ende des Berechnungsteils ++++++++
C
C
C ! Sternzeile
C
  write (6,120)

```

```

120  format (10x,'Messdatenanalyse KHD Gasturbine')
      write (6,121)
121  format (7x,'Institut für Energietechnik und Thermodynamik')
      write (6,122)
122  format(10x,'Forschungsbereich Stroemungsmaschinen')
      c
      write (6,500)
500  format (6x,62('*')) !
zeile mit stern (wird unten öfters aufgerufen)
501  format (/) !
leerzeile      (wird öfters aufgerufen)
      write (6,125) mdatum, Betriebspunkt
125  format (1x,'Messdatum   = ',a12,11x,'Betriebspunkt = ',a2,'/4')
      write (6,500)
      c
      write (6,130)
130  format (25x,'Messwerte',/)
      c
      write (6,135)
135  format (8x,'Temperaturen:',22x,'Druecke:',/)
      c
      write (6,140) t0,t0+273.15,p0
140  format (1x,'T0 =',f7.2,1x,'°C = ',f7.2,1x,'K',9x,'p0   =',
+f10.1,1x,'mbar')
      c
      write (6,145) t2g,t2,p2
145  format (1x,'T2 =',f7.2,1x,'°C = ',f7.2,1x,'K',9x,'p2   =',
+f10.1,1x,'mbar')
      c
      write(6,150) T4,T4+273.15
150  format (1x,'T4 =',f7.2,1x,'°C = ',f7.2,1x,'K',/) !
      c
      write (6,155)
155  format (6x,'Druckdifferenzen:',19x,'Sonstiges:',/)
      c
      write (6,160) deltapBL,nab
160  format (1x,'DpBl   =',3x,f10.2,1x,'mmWS',
+9x,'n       =',1x,f9.2,1x,'U/min')
      c
      write (6,165) deltap01,Peff
165  format (1x,'Dp01   =',3x,f10.2,1x,'mmWS',
+9x,'Peff    =',1x,f9.2,1x,'kW')
      c
      write (6,170) deltap04,tau
170  format (1x,'Dp04   =',3x,f10.2,1x,'mmWS',
+9x,'tau     =',1x,f9.2,1x,'s',/)
      c
      write (6,500)
c+++++++ Ausgabe der Berechnungen ++++++++
      c
      write (6,300) !
300  format (18x, 'Ergebnisse der Berechnung',/)
      write (6,501) !

```

```

c                                     !
    write (6,310)                       !
310  format (8x,'Temperaturen: K',16x,'Massenstroeme: kg/s',/)  !
c                                     !
    write (6,315) T1, m1                 !
315  format(1x,'Verdichtereintritt T1   =',1x,f6.2,4x,         !
+'Luft      =',5x,f7.5)                 !
    write (6,320) T12, mb                !
320  format (1x,'Verdichteraustritt T2s =',1x,f6.2,4x,         !
+'Brennstoff =',5x,f7.5)                 !
Positionierung von                      !
    write (6,325)T3th, mRG                !
Temperaturen und Massenströmen          !
325  format (1x,'Turbineneintritt   T3th =',f7.2,4x,           !
in der Ausgabedatei                     !
+'Rauchgas   =',5x,f7.5)                 !
    write (6,330)T3,mcorr                 !
330  format (1x,'Turbineneintritt   T3      =',1x,f6.2,4x,    !
+'Korrigiert =',5x,f7.5)                 !
    write(6,335) T4s, lambda              !
335  format (1x,'Turbinenaustritt   T4s   =',1x,f6.2,4x,       !
+'Luftzahl[-] =',5x,f7.5,/)             !
    write(6,501)                          !
c                                     !
c                                     !
    write (6,340)                       !
340  format(9x,'Druecke: mbar',16x,'spez. Arbeiten: kJ/kg',/)!
    write (6,345) p1 , Hv                 !
345  format(1x, 'Verdichtereintritt p1 =',1x,f8.2,4x,!
+'Verdichter HV =',3x,f6.2)             !
    write (6,350) p4, Hvs                 !
Positionierung von                      !
350  format(1x, 'Turbinenaustritt   p4 =',1x,f8.2,4x,         !
Drücken und spezifischen                !
+'Verdichter Hvs =',3x,f6.2)             !
Arbeiten in der Ausgabedatei            !
    write (6,355) p3, Ht                  !
!
355  format(1x, 'Turbineneintritt   p3 =',1x,f8.2,4x,         !
+'Turbine   HT =',3x,f6.2)               !
    write (6,360) Hts                      !
360  format(37x, 'Turbine   HTs =',3x,f6.2,/)                 !
    write(6,501)                          !
c                                     !
c                                     !
    write (6,365)                       !
365  format (8x,'Leistungen: kw',15x,'Wirkungsgrade(n=eta): [-]',/) !
    write (6,370) Pv, nVs                 !
370  format (1x,'Verdichter PV      =',1x,f6.2,4x,           !
+'Verdichter nVs =',3x,f5.3)             !
Positionierung von                      !

```

```

        write(6,375)Pt, nTs                                     !
Leistungen und
375  format (1x,'Turbine    PT          =',1x,f6.2,4x,         !
wirkungsgraden
      +'Turbine    nTs = ',3x,f5.3)                            !
      write(6,380)Pr, nBk                                       !
380  format (1x,'Verlust    PR          =',1x,f6.2,4x,         !
      +'Brennkam.  nBK = ',3x,f5.3)                            !
      write(6,385)neff                                          !
385  format (37x,                                             !
      +'Gesamt    neff = ',3x,f5.3)                            !
C
      write (6,501)                                             !
Leerzeile
      write (6,500)
C
C
C+++++++ Ende des Programms einläuten ++++++++
C                                     z
C
      close (5)                                               !
Eingabe schließen
      close (6)                                               !
Ausgabe schließen
      end PROGRAM messwertanalyse                            ! Programm
schließen

```