

Gasturbinen
Abnahmeregeln für Gasturbinen
Auswertungsbeispiele

DIN
4341
Teil 2

Gas turbines; acceptance tests; examples for evaluation

Inhalt

	Seite
1 Anwendungsbereich und Zweck	1
2 Begriffe und Formelzeichen	1
3 Bemerkungen zu den indirekten Bestimmungsverfahren	3
3.1 Allgemeines	3
3.2 Energie-Bezugsniveau	3
3.3 Abgasmassenstrom	4
3.4 Turbineneintrittstemperatur	4
3.5 Näherungsverfahren zur Vorabbestimmung der Turbineneintrittstemperatur ..	5
3.6 Kupplungsleistung	5
4 Verfahren zur Ermittlung der benötigten thermodynamischen Stoffwerte ..	5
4.1 Allgemeines	5
4.2 Ermittlung der Enthalpie für eine bekannte Temperatur	6
4.3 Ermittlung der Temperatur für eine bekannte Enthalpie	6
5 Meßunsicherheiten	6
5.1 Allgemeines	6
5.2 Einzelmeßunsicherheiten der Meßwerte	6
5.3 Ergebnismeßunsicherheiten	6
6 Ausführungsbeispiele	9
6.1 Allgemeines	9
6.2 Direkte Bestimmung der Nutzleistung und des thermischen Wirkungsgrades ..	10
6.3 Indirekte Bestimmung des Abgasmassenstromes	11
6.4 Indirekte Bestimmung der Turbineneintrittstemperatur	14
6.5 Berechnung der Ergebnismeßunsicherheiten	16

1 Anwendungsbereich und Zweck

Diese Norm gilt für Gasturbinen, die im offenen Prozeß und mit normalem Verbrennungssystem arbeiten, und dient auch als Grundlage für die in geschlossenen oder halboffenen Prozessen arbeitenden Gasturbinen. Falls die Gasturbinen mit Freikolbenverdichtern oder mit besonderen Wärmequellen ausgerüstet sind (z. B. chemische Prozesse, Kernreaktoren, Feuerung eines druckgefeuerten Kessels), dann kann diese Norm als Grundlage dienen, muß aber entsprechend angepaßt werden. Diese Norm gilt nicht für Gasturbinen, die als Hauptantrieb für Fluggeräte eingesetzt werden.

Diese Norm enthält neben einigen ergänzenden Erläuterungen Auswertungsbeispiele, die die Anwendung von DIN 4341 Teil 1 erleichtern sollen. Dabei wird unterstellt, daß alle für die Auswertung notwendigen Meßwerte mit ihren Einzelmeßspielen zur Verfügung stehen. Vornehmlich werden die indirekten Bestimmungsverfahren für Abgasmassenstrom und Turbineneintrittstemperatur behandelt. Die Auswertungsbeispiele sind nicht als Teil der Abnahmeregeln bezüglich der Pflichtabnahme zu betrachten. Sie können hinsichtlich des Umfangs Gegenstand entsprechender Vereinbarungen zwischen den Parteien sein.

2 Begriffe und Formelzeichen

Die in dieser Norm verwendeten Begriffe sind in DIN 4341 Teil 1 aufgeführt und erläutert. Die benutzten Formelzeichen sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Für Größen, die bereits in DIN 4341 Teil 1 enthalten sind, wurde die dort festgelegte Bedeutung übernommen.

Fortsetzung Seite 2 bis 23

Normenausschuß Maschinenbau (NAM) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, gestattet.

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
c_{pa}	Mittlere spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck	kJ/(kg K)
c_{pc}	Mittlere spezifische Wärmekapazität des Kühlfluids bei konstantem Druck	kJ/(kg K)
c_{pf}	Mittlere spezifische Wärmekapazität des Brennstoffes bei konstantem Druck	kJ/(kg K)
c_{pg}	Mittlere spezifische Wärmekapazität des Gases bei konstantem Druck	kJ/(kg K)
h_{a1}	Spezifische Totalenthalpie der Luft beim Eintritt in das Kontrollvolumen	kJ/kg
h_{a4}	Spezifische Totalenthalpie der Luft beim Eintritt in den direkten Erhitzer (Brennkammer)	kJ/kg
h_{ae}	Spezifische Totalenthalpie der Luft, die aus dem Kontrollvolumen entnommen wird	kJ/kg
h_{f1}	Spezifische Totalenthalpie des Brennstoffes, bezogen auf die Lufttemperatur beim Eintritt in das Kontrollvolumen	kJ/kg
h_{f4}	Spezifische Totalenthalpie des Brennstoffes beim Eintritt in den direkten Erhitzer (Brennkammer)	kJ/kg
h_{fo}	Spezifische Totalenthalpie des Brennstoffes bei 15 °C	kJ/kg
h_{g1}	Spezifische Totalenthalpie des Gases, bezogen auf die Lufttemperatur Eintritt Kontrollvolumen	kJ/kg
h_{g5}	Spezifische Totalenthalpie des Gases beim Austritt aus dem direkten Erhitzer (Brennkammer) ¹⁾	kJ/kg
h_{g6}	Spezifische Totalenthalpie des Gases beim Eintritt in die Turbine ¹⁾	kJ/kg
$h_{g6,1}$	Spezifische Totalenthalpie des Gases beim Austritt aus der Verdichter-Antriebsturbine	kJ/kg
h_{g7}	Spezifische Totalenthalpie des Gases beim Austritt aus der Nutzleistungsturbine	kJ/kg
L_{min}	Mindest-Luftmenge bei stöchiometrischer Verbrennung, bezogen auf 1 kg Brennstoff	kg/kg
$\dot{m}_{a1}$	Massenstrom der Luft beim Eintritt in das Kontrollvolumen	kg/s
$\dot{m}_{a4}$	Massenstrom der Luft beim Eintritt in den direkten Erhitzer (Brennkammer)	kg/s
$\dot{m}_{f4}$	Massenstrom des Brennstoffes beim Eintritt in das Kontrollvolumen	kg/s
$\dot{m}_{g5}$	Massenstrom des Gases beim Austritt aus dem direkten Erhitzer (Brennkammer)	kg/s
$\dot{m}_{g6}$	Massenstrom des Gases beim Eintritt in die Turbine	kg/s
$\dot{m}_{g7}$	Massenstrom des Abgases beim Austritt aus der Nutzleistungsturbine	kg/s
$\dot{m}_e$	Massenstrom der Sperr-, Leck-, Anzapf- und Ladeluft beim Austritt aus dem Kontrollvolumen	kg/s
p_{a1}	Absoluter Totaldruck der Luft beim Eintritt in das Kontrollvolumen	bar
p_{a3}	Absoluter Totaldruck der Luft beim Austritt aus dem Verdichter	bar
P	Nutzleistung	kW
P_{ab}	Leistung der vom Gasturbosatz angetriebenen Aggregate, die aus dem Kontrollvolumen abgeführt wird	kW
P_{fr}	Leistungsaufnahme der vom Gasturbosatz angetriebenen Aggregate, die nicht Teil der Gasturbinenanlage sind	kW
P_g	Leistungsaufnahme separat angetriebener Aggregate, die Teil der Gasturbinenanlage sind	kW
P_{gr}	Brutto-Wellenleistung bzw. Generator-Klemmenleistung	kW
P_s	Kupplungsleistung (Antriebsleistung des angetriebenen Aggregates)	kW
P_t	Im Versuch bestimmte Nutzleistung	kW
P_{zu}	Leistung separat angetriebener Aggregate, die dem Kontrollvolumen zugeführt wird	kW
Q_{10}	Heizwert des Brennstoffes bei 15 °C und konstantem Druck	kJ/kg
Q_{1t}	Heizwert des Brennstoffes entsprechend der Heizwertbestimmung	kJ/kg
Q_{11}	Heizwert des Brennstoffes, bezogen auf die Lufttemperatur beim Eintritt in das Kontrollvolumen	kJ/kg
Q_m	Leistungsverluste	kW
Q_r	Wärmeleistungsverluste durch Strahlung und Konvektion aus dem Kontrollvolumen	kW
Q_{re}	Wärmeleistungsverluste durch Strahlung und Konvektion am direkten Erhitzer (Brennkammer)	kW

¹⁾ Basis ist der gemittelte oder integrierte Ablesewert der jeweiligen Temperatur (siehe auch DIN 4341 Teil 1, Ausgabe August 1979, Abschnitt 8).

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
T	Absolute Totaltemperatur	K
T_{a1}	Massenstrom-gemittelte absolute Totaltemperatur der Luft beim Eintritt in das Kontrollvolumen	K
T_{a3}	Absolute Totaltemperatur der Luft beim Austritt aus dem Verdichter	K
T_{a4}	Absolute Totaltemperatur der Luft beim Eintritt in den direkten Erhitzer (Brennkammer)	K
t_{a1}	Totaltemperatur der Luft beim Eintritt in das Kontrollvolumen	°C
t_{a3}	Totaltemperatur der Luft beim Austritt aus dem Verdichter	°C
t_{a4}	Totaltemperatur der Luft beim Eintritt in den direkten Erhitzer (Brennkammer)	°C
t_{ae}	Totaltemperatur der Luft, die aus dem Kontrollvolumen entnommen wird	°C
t_{f4}	Totaltemperatur des Brennstoffes beim Eintritt in den direkten Erhitzer (Brennkammer)	°C
t_{g6}	Totaltemperatur des Gases beim Eintritt in die Turbine	°C
$t_{g6.1}$	Massenstrom-gemittelte Totaltemperatur des Gases beim Austritt aus der Verdichter-Antriebsturbine	°C
t_{g7}	Massenstrom-gemittelte Totaltemperatur des Gases beim Austritt aus der Nutzleistungsturbine	°C
t_o	Normbezugstemperatur 15 °C	°C
x_{g6}	Massenverhältnis des stöchiometrischen Verbrennungsgases zum Gesamtgas beim Eintritt in die Turbine	kg/kg
τ_K	Temperaturverhältnis der Verdichtung T_{a3}/T_{a1}	—
π_K	Druckverhältnis der Verdichtung p_{a3}/p_{a1}	—
η_{pol}	Polytroper Wirkungsgrad	—
η_{tc}	Ausbrenngrad	—
η_{th}	Thermischer Wirkungsgrad	—
η_G	Wirkungsgrad des Generators	—

3 Bemerkungen zu den indirekten Bestimmungsverfahren

3.1 Allgemeines

Die Turbineneintrittstemperatur und der Massenstrom durch die Maschinen werden bei Gasturbinenanlagen in der Regel nur indirekt aus Massenstrom- und Energiebilanzen bestimmt, da mangels geeigneter, langfristig betriebssicherer Meßeinrichtungen für das hohe Temperaturniveau und in Anbetracht der sehr oft beträchtlichen Abmessungen der Zu- und Abströmkanäle eine direkte Messung dieser Prozeßgrößen in der Praxis kaum möglich ist.

Prinzipiell ist auch die indirekte Bestimmung der von der Gasturbine abgegebenen mechanischen Leistung durch eine entsprechende Energiebilanz möglich. Doch wird sie nur selten angewandt, da andere Meßmethoden (z.B. elektrische Leistungsmessungen beim Antrieb von Generatoren) im allgemeinen eine wesentlich größere Genauigkeit haben und zudem der Massenstrom bekannt sein muß.

3.2 Energie-Bezugsniveau

Bei der Aufstellung von Energiebilanzen ist zu beachten, daß sich Energien nur von einem Bezugsniveau aus bestimmen lassen. Welches Niveau dies ist, bleibt belanglos, solange alle Energien einer Bilanz auf der gleichen Basis stehen. Bei Gasturbinen überschreiten drei Arten von Energieströmen die Grenzen des Kontrollvolumens.

a) Wärmeströme

Sie werden gebildet durch die Massenströme in Verbindung mit den zugehörigen Enthalpien, deren Nullpunkt üblicherweise auf eine

Temperatur von 0 °C

festgelegt ist. Wegen der Rechnung mit Enthalpiedifferenzen ist das Bezugsniveau im vorliegenden Fall belanglos.

b) Mechanische Energieströme

Sie stellen Exergieströme dar, deren Bezugsniveau die Temperatur der Umgebung ist, also die Temperatur der Außenluft.

c) Chemisch gebundene Energieströme

Sie werden gebildet durch das Produkt aus Massenstrom des Brennstoffes und dessen Heizwert. Der Heizwert stellt keine konstante Stoffeigenschaft dar, sondern ist von einer Bezugstemperatur abhängig, da bei seiner Bestimmung die Komponenten vor und nach der Verbrennung im allgemeinen unterschiedliche spezifische Wärmekapazitäten haben. Der Heizwert wird bei flüssigen Brennstoffen nach DIN 51 900 Teil 1, Ausgabe August 1977, Abschnitt 3.2 a) auf eine **Temperatur von 25 °C** bezogen und läßt sich nach DIN 51 900 Teil 1, Ausgabe August 1977, Abschnitt 16, auf andere Bezugstemperaturen umrechnen (siehe hierzu: Fortschrittsbericht VDI-Z, Reihe 6, Nr 46 (Juli 1976), Abschnitt 2.2).

Bei Brennstoffen mit hohem Heizwert sind die Unterschiede zu anderen Bezugstemperaturen jedoch so gering, daß sie vernachlässigt werden können.

Eine Umrechnung der mechanischen Energieströme der Aufzählung b) auf ein anderes Bezugsniveau bereitet Schwierigkeiten und ist mit größeren Ungenauigkeiten verbunden. Demgegenüber lassen sich die beiden anderen Energieformen einfach auf eine andere Temperatur umrechnen.

Deshalb wird das Bezugsniveau so gewählt, daß für die mechanischen Energieströme der Aufzählung b) eine Umrechnung entfällt, d.h. als Basis der Energiebilanzen wird die Lufttemperatur beim Eintritt in das Kontrollvolumen festgelegt. Sie kann im Sonderfall 15 °C betragen, wenn Norm-Bezugsbedingungen während des Versuches vorhanden sind.

3.3 Abgasmassenstrom

Die Energiebilanz für die gesamte Maschine, bei der alle zu- und abgeführten Energieströme des entsprechend gewählten Kontrollvolumens erfaßt werden (siehe DIN 4341 Teil 1, Ausgabe August 1979, Abschnitt 8.5.1), lautet bei Bezug auf die Lufttemperatur beim Eintritt in das Kontrollvolumen:

$$\dot{m}_{a1} (h_{a1} - h_{a1}) + \dot{m}_{f4} \cdot Q_{11} \cdot \eta_{tc} + \dot{m}_{f4} (h_{f4} - h_{f1}) = \dot{m}_{g7} (h_{g7} - h_{g1}) + \dot{m}_e (h_{ae} - h_{a1}) + Q_r + Q_m + P_s \quad (1)$$

Daraus folgt für die Bestimmungsgleichung des Abgasmassenstromes:

$$\dot{m}_{g7} = \frac{\dot{m}_{f4} [Q_{11} \cdot \eta_{tc} + (h_{f4} - h_{f1})] - \dot{m}_e (h_{ae} - h_{a1}) - (P_s + Q_m + Q_r)}{(h_{g7} - h_{g1})} \quad (2)$$

Diese Gleichungen gelten sinngemäß auch für Turbogasgeneratoren, wobei dann die Wellenleistung zur Null wird ($P_s = 0$), nur ist das Kontrollvolumen entsprechend zu modifizieren, siehe Bild 3. Es ist in diesem Fall anstelle der Totaltemperatur des Verbrennungsgases nach der Turbine (t_{g7}) diejenige nach der Verdichterantriebsturbine ($t_{g6.1}$) zur Bestimmung der Totalenthalpie des Verbrennungsgases ($h_{g6.1}$) einzusetzen.

3.4 Turbineneintrittstemperatur

Nach DIN 4341 Teil 1, Ausgabe August 1979, Abschnitt 8.6.1 wird die Turbineneintrittstemperatur indirekt aus der Energiebilanz der Brennkammer und der mit ihr verbundenen Leitungen bestimmt. Die Energiebilanzgleichung lautet bei Bezug auf die Lufttemperatur beim Eintritt in das Kontrollvolumen:

$$\dot{m}_{a4} (h_{a4} - h_{a1}) + \dot{m}_{f4} \cdot Q_{11} \cdot \eta_{tc} + \dot{m}_{f4} (h_{f4} - h_{f1}) = \dot{m}_{g5} (h_{g5} - h_{g1}) + Q_{re} \quad (3)$$

$$\text{Mit der Massenströmbilanz } \dot{m}_{g5} = \dot{m}_{a4} + \dot{m}_{f4} \quad (4)$$

folgt für die Bestimmung der Enthalpie des heißen Verbrennungsgases beim Austritt aus der Brennkammer:

$$(h_{g5} - h_{g1}) = (h_{a4} - h_{a1}) + \frac{\dot{m}_{f4}}{\dot{m}_{g5}} [Q_{11} \cdot \eta_{tc} + (h_{f4} - h_{f1}) - (h_{a4} - h_{a1})] - \frac{Q_{re}}{\dot{m}_{g5}} \quad (5)$$

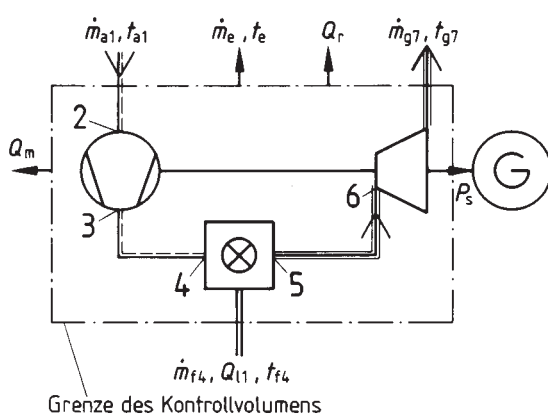


Bild 1. Offener Prozeß; Einwellengasturbine

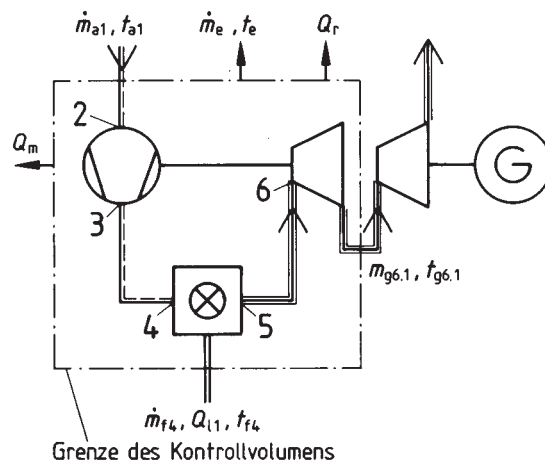


Bild 3. Offener Prozeß; Zweiwellengasturbine, Turbogasgenerator

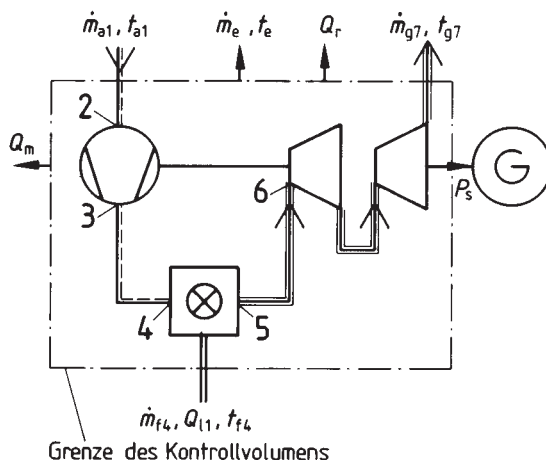


Bild 2. Offener Prozeß; Zweiwellengasturbine mit Nutzleistungsturbine

Außerdem gilt mit den Festlegungen

$$\dot{m}_{g5} = \dot{m}_{g6} = \dot{m}_{g7} \text{ und } h_{g5} = h_{g6} \quad (6)$$

für die Enthalpie des Arbeitsfluids vor der Turbine:

$$h_{g6} = (h_{a4} - h_{a1}) + \frac{\dot{m}_{f4}}{\dot{m}_{g7}} [Q_{11} \cdot \eta_{tc} + (h_{f4} - h_{f1}) - (h_{a4} - h_{a1})] - \frac{Q_{re}}{\dot{m}_{g7}} + h_{g1} \quad (7)$$

Bei bekanntem Massenstrom $\dot{m}_{g7}$ (aus direkter Messung oder indirekter Bestimmung nach Abschnitt 3.3), Ausbrenngrad η_{tc} und Strahlungsverlust Q_{re} kann mit den normalen Meßgrößen eines Gasturbinenversuches über den Enthalpiewert aus obiger Bestimmungsgleichung die gesuchte Turbineneintrittstemperatur errechnet werden.

Für den letzten Rechenschritt, d. h. für die Zuordnung der dem ermittelten Enthalpiewert entsprechenden Temperatur

$$t_{g6} = f(h_{g6}, x_{g6}) \quad (8)$$

mit

$$x_{g6} = \frac{\dot{m}_{g \text{ stöchiom}}}{\dot{m}_{g \text{ gesamt}}} = \frac{(1 + L_{\min}) \cdot \dot{m}_{f4}}{\dot{m}_{g7}} \quad (9)$$

ist dann noch eine geeignete Gastafel für die vorliegende Gaszusammensetzung (siehe Abschnitt 4) erforderlich.

3.5 Näherungsverfahren zur Vorabbestimmung der Turbineneintrittstemperatur

Die vorangehende Bestimmungsgleichung der Enthalpie vor Turbine läßt sich durch weitere Näherungen noch wesentlich vereinfachen, so daß sie sehr leicht für eine erste überschlagsmäßige Berechnung der Turbineneintrittstemperatur verwendet werden kann.

$$\begin{aligned} \text{Wegen } (h_{a4} - h_{a1}) &\ll Q_{11} \cdot \eta_{tc} \\ Q_{re} &\ll \dot{m}_{f4} \cdot Q_{11} \cdot \eta_{tc} \end{aligned}$$

und mit den Vereinfachungen

$$\begin{aligned} h_{a1} &\approx h_{g1} \\ h_{f4} &\approx h_{f1} \\ \eta_{tc} &\approx 1 \end{aligned}$$

läßt sich schreiben:

$$h_{g6} \approx h_{a4} + \frac{\dot{m}_{f4} \cdot Q_{11}}{\dot{m}_{g7}} \quad (10)$$

Aus der Definition des thermischen Wirkungsgrades

$$\eta_{th} = \frac{P}{\dot{m}_{f4} (Q_{10} + h_{f4} - h_{f0})} \quad (11)$$

ergibt sich die bei

$$t_o = t_{a1} = t_{f4} = 15^\circ \text{C}$$

geltende Beziehung:

$$\eta_{th} = \frac{P}{\dot{m}_{f4} \cdot Q_{11}} \quad (12)$$

Mit der Vereinfachung

$$P \approx \dot{m}_{f4} \cdot Q_{11} - \dot{m}_{g7} \cdot h_{g7} \quad (13)$$

ergibt sich dann die Beziehung:

$$h_{g6} \approx h_{a4} + h_{g7} \cdot \frac{1}{1 - \eta_{th}} \quad (14)$$

Hieraus läßt sich gemäß der Enthalpie-Definition unter Verwendung der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten schreiben:

$$t_{g6} \cdot c_{pg} \Big|_{0^\circ \text{C}}^{t_{g6}} = t_{a4} \cdot c_{pa} \Big|_{0^\circ \text{C}}^{t_{a4}} + t_{g7} \cdot c_{pg} \Big|_{0^\circ \text{C}}^{t_{g7}} \cdot \frac{1}{1 - \eta_{th}} \quad (15)$$

Unter Berücksichtigung des Verhältnisses der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten von Luft und Verbrennungsgas in dem hier interessierenden Temperaturbereich wird dann aus der bisherigen Enthalpiegleichung die einfache Temperaturbeziehung:

$$t_{g6} \approx 0,93 \cdot t_{a4} + t_{g7} \cdot \frac{1}{1 - \eta_{th}} \quad (16)$$

Für den Fall, daß die Temperatur der Luft beim Eintritt in die Brennkammer t_{a4} nicht bekannt ist, kann sie aus dem stets gemessenen Verdichtungsdruckverhältnis bzw. Verdichter-Enddruck näherungsweise bestimmt werden.

$$T_{a4} = T_{a3} \approx T_{a1} \cdot \tau_K \quad (17)$$

$$\tau_K = \pi_K^a \quad (18)$$

$$a = \frac{\kappa - 1}{\kappa \cdot \eta_{Pol}} \approx 0,32 \quad (19)$$

Damit wird:

$$t_{g6} \approx 0,93 \cdot [(t_{a1} + 273) \cdot \pi_K^a - 273] + t_{g7} \cdot \frac{1}{1 - \eta_{th}} \quad (20)$$

Ohne die Kenntnis des Brennstoffverbrauches und der Stoffdaten dieses Brennstoffes kann somit, lediglich mit den Ansaug- und Abgastemperaturen sowie dem Verdichterdruckverhältnis und dem aus den Maschinenunterlagen entnommenen thermischen Wirkungsgrad, auf sehr einfache Weise eine erste überschlagsmäßige Bestimmung der Turbineneintrittstemperatur vorgenommen werden. Es wird aber ausdrücklich darauf hingewiesen, daß diese Berechnungsmethode aufgrund der starken Vereinfachungen zum Nachweis von t_{g6} bei Abnahmemessungen nicht angewendet werden darf.

3.6 Kupplungsleistung

Aus der in Abschnitt 3.3 angegebenen Energiebilanz für die gesamte Maschine kann bei bekanntem Massenstrom auch die Kupplungsleistung der Gasturbine (Wellenleistung P_s) indirekt bestimmt werden; hiernach gilt:

$$\begin{aligned} P_s &= \dot{m}_{f4} [Q_{11} \cdot \eta_{tc} + (h_{f4} - h_{f1})] - \dot{m}_{g7} \cdot (h_{g7} - h_{g1}) \\ &\quad - \dot{m}_e (h_{ae} - h_{a1}) - Q_m - Q_r \end{aligned} \quad (21)$$

4 Verfahren zur Ermittlung der benötigten thermodynamischen Stoffwerte

4.1 Allgemeines

IN DIN 4341 Teil 1 wie auch in der Internationalen Norm ISO 2314-1973 wird für die Bestimmung der Enthalpie von Luft- und Verbrennungsgas Bezug genommen auf die von Joseph H. Keenan und Joseph Kayes 1948 veröffentlichten GAS TABLES (Thermodynamic Properties of Air, Products of Combustion and Component-Gases etc.). Diese sind für viele Benutzer der oben genannten DIN-Norm oft nicht greifbar. Deshalb wurden neuere Veröffentlichungen ergänzend in DIN 4341 Teil 1 genannt.

Für die folgenden Auswertungsbeispiele werden verschiedene Enthalpiewerte benötigt. Um dem Benutzer der Norm die Möglichkeit des Nachvollzuges zu geben und ihm auch weitere Berechnungen ohne Hinzuziehung von besonderen Tafeln und Tabellen zu ermöglichen, wird im folgenden die Enthalpie für Luft und Verbrennungsgase in einer einfach anwendbaren Weise dargestellt. Die Genauigkeit dieser Darstellung ist für viele Fälle ausreichend. Die Handhabung ist den praktischen Bedürfnissen angepaßt, wie die folgenden Beispiele zeigen. Es bleibt aber dem Benutzer vorbehalten, seinen Erfordernissen gemäß (z. B. Berechnung mit Computer oder Berücksichtigung einer anderen Brennstoffzusammensetzung usw.) auf andere Darstellungen zurückzugreifen.

4.2 Ermittlung der Enthalpie für eine bekannte Temperatur

Der überwiegende Anteil von Luft und Verbrennungsgas ist Stickstoff. Dieser bestimmt maßgeblich die Abhängigkeit der Enthalpie von der Temperatur. Der Sauerstoff der Luft wird bei vollkommener stöchiometrischer Verbrennung durch die Verbrennungsprodukte CO_2 und H_2O vollständig ersetzt. Dabei wird eine Brennstoffzusammensetzung nach DIN 4342 vorausgesetzt, also ein Gehalt z. B. an Schwefel nicht berücksichtigt.

Die Enthalpien dieser Verbrennungsprodukte sind höher als die des Sauerstoffes. Das Verbrennungsgas hat deshalb eine höhere Enthalpie als Luft, Verbrennungsgas einer vollkommenen stöchiometrischen Verbrennung die höchstmögliche. Zwischen diesem Höchstwert und dem von Luft ändert sich die Enthalpie proportional mit dem Anteil der Verbrennungsprodukte.

Aufgrund dieser Verhältnisse läßt sich die Enthalpie von Verbrennungsgasen vereinfacht, aber übersichtlich darstellen (siehe Bild 4). Dabei wurde von Normbezugsbedingungen entsprechend DIN 4342 für die Ansaugluft ausgegangen. Bei wesentlich größeren Werten für die Luftfeuchte treten geringfügige Abweichungen auf, die bei Bedarf zu korrigieren sind.

Es gilt folgende Zahlenwertgleichung:

$$h = t + D_L + \frac{(1 + L_{\min}) \cdot \dot{m}_{f4}}{\dot{m}_{g7}} \cdot D_G \quad (22)$$

mit

h Spezifische Enthalpie in kJ/kg

t Temperatur der Luft bzw. des Gases in °C

D_L Luftbeiwert in kJ/kg; Funktion von t
(siehe Bild 4)

D_G Gasbeiwert in kJ/kg; Funktion von t
(siehe Bild 4)

Übrige Größen siehe Tabelle 1.

Das Glied D_L stellt für Luft die Abweichung vom linearen Anstieg des Enthalpiewertes mit der Temperatur dar und D_G die zusätzliche Abweichung des bei vollkommener stöchiometrischer Verbrennung entstandenen Verbrennungsgases gegenüber Luft. In Bild 4 werden also nur die Glieder D_L und D_G dargestellt. Sie sind in einem weiten Temperaturbereich klein gegenüber der Temperatur t . Fehlerhafte Darstellung und Ablesung wirken sich also nur begrenzt auf die Genauigkeit der Ermittlung des Enthalpiewertes aus. Es sei darauf hingewiesen, daß die so ermittelten Enthalpiewerte um so ungenauer sind, je mehr der absolute Feuchtigkeitsgehalt der Ansaugluft und die Brennstoffzusammensetzung von den dem Bild 4 zugrunde liegenden Annahmen abweichen. Diese Ungenauigkeiten wirken sich hauptsächlich bei der indirekten Bestimmung des Abgasmassenstromes aus. Wird bei der indirekten Bestimmung der Turbineneintrittstemperatur der indirekt bestimmte Abgasmassenstrom benutzt, so ist hier der Einfluß der Enthalpieungenauigkeiten gering.

4.3 Ermittlung der Temperatur für eine bekannte Enthalpie

Eine direkte Ablesung der Temperatur für eine bekannte Enthalpie ist bei Benutzung von Bild 4 nicht möglich. Ein Iterationsverfahren ist notwendig. Vorteilhafterweise beginnt man dieses damit, daß man mit dem im Abschnitt 3.5 angegebenen Näherungsverfahren die erste Annahme errechnet. Sie liegt in der Regel bereits nahe dem gesuchten Wert.

5 Meßunsicherheiten

5.1 Allgemeines

Die in dieser Norm behandelten Auswertungsbeispiele zeigen die Ermittlung der Nutzleistung, des thermischen Wirkungsgrades, des Abgasmassenstromes und der Turbineneintrittstemperatur. Da alle diese Ergebnisse aus einer Vielzahl von grundsätzlich mit Abweichungen behafteten Größen bestimmt werden, ist für jedes eine Ergebnismessunsicherheit anzugeben, die aus den Einzelmessunsicherheiten der benutzten Größen zu ermitteln ist. Grundlage für die Bezeichnung der Meßunsicherheiten ist die VDI-Richtlinien 2048.

5.2 Einzelmessunsicherheiten der Meßwerte

Es wird vorausgesetzt, daß die Meßwerte von ihren systematischen Abweichungen, die nach Betrag und Vorzeichen bekannt sind, durch entsprechende Korrekturen befreit sind. Diese Abweichungsart wird daher nicht weiter behandelt.

Die Einzelmessunsicherheit eines Meßwertes umfaßt daher die zufälligen Abweichungen, zu denen auch Repräsentationsfehler gerechnet werden können, wie sie z.B. bei der Ermittlung der Abgastemperatur als arithmetischem Mittelwert einer Netzmessung anstelle einer schwierigen massenstromgewogenen Mittelung auftreten.

Die Einzelmessunsicherheit der in die Ergebnisse eingehenden Größen, auf die hier nicht eingegangen wird, sind nach den bekannten Normen und Richtlinien zu bestimmen.

5.3 Ergebnismessunsicherheiten

Sind die Einzelmessunsicherheiten der verschiedenen Größen festgelegt, so ist die Ergebnismessunsicherheit nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz zu berechnen.

Die im Abnahmeversuch ermittelten Ergebnisse sind jeweils aufgrund ihrer Bestimmungsgleichung eine Funktion

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

mehrerer Einzelgrößen $x_1, x_2, \dots, x_n$,

die ihrerseits mit den zufälligen absoluten Einzelmessunsicherheiten

$$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$$

bzw. den zufälligen relativen Einzelmessunsicherheiten

$$\frac{\Delta x_1}{x_1}, \frac{\Delta x_2}{x_2}, \dots, \frac{\Delta x_n}{x_n}$$

behaftet sind. Die Abhängigkeit des Ergebnisses von einem bestimmten Einzelwert entspricht der partiellen Ableitung des Ergebnisses nach diesem Einzelwert in der Bestimmungsgleichung. Damit ist auch der Einfluß der dieser Größe anhaftenden Einzelmessunsicherheit auf die Ergebnismessunsicherheit gegeben. Die absolute Ergebnismessunsicherheit wird als die absolute statistische Abweichung aus Einflußfaktor und Einzelmessunsicherheit durch quadratische Addition ermittelt:

$$\Delta y = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n\right)^2} \quad (23)$$

Diese Beziehung besitzt nur Gültigkeit, wenn voneinander unabhängige Werte verarbeitet werden, d.h. in den vorbereitenden Rechnungen zur Ermittlung der Einzelmessunsicherheiten dürfen keine Meßgrößen benutzt werden, die später zur Berechnung der Ergebnismessunsicherheit nochmals verwendet werden. Dies ist insbesondere wichtig für die Ergebnismessunsicherheit der indirekt bestimmten

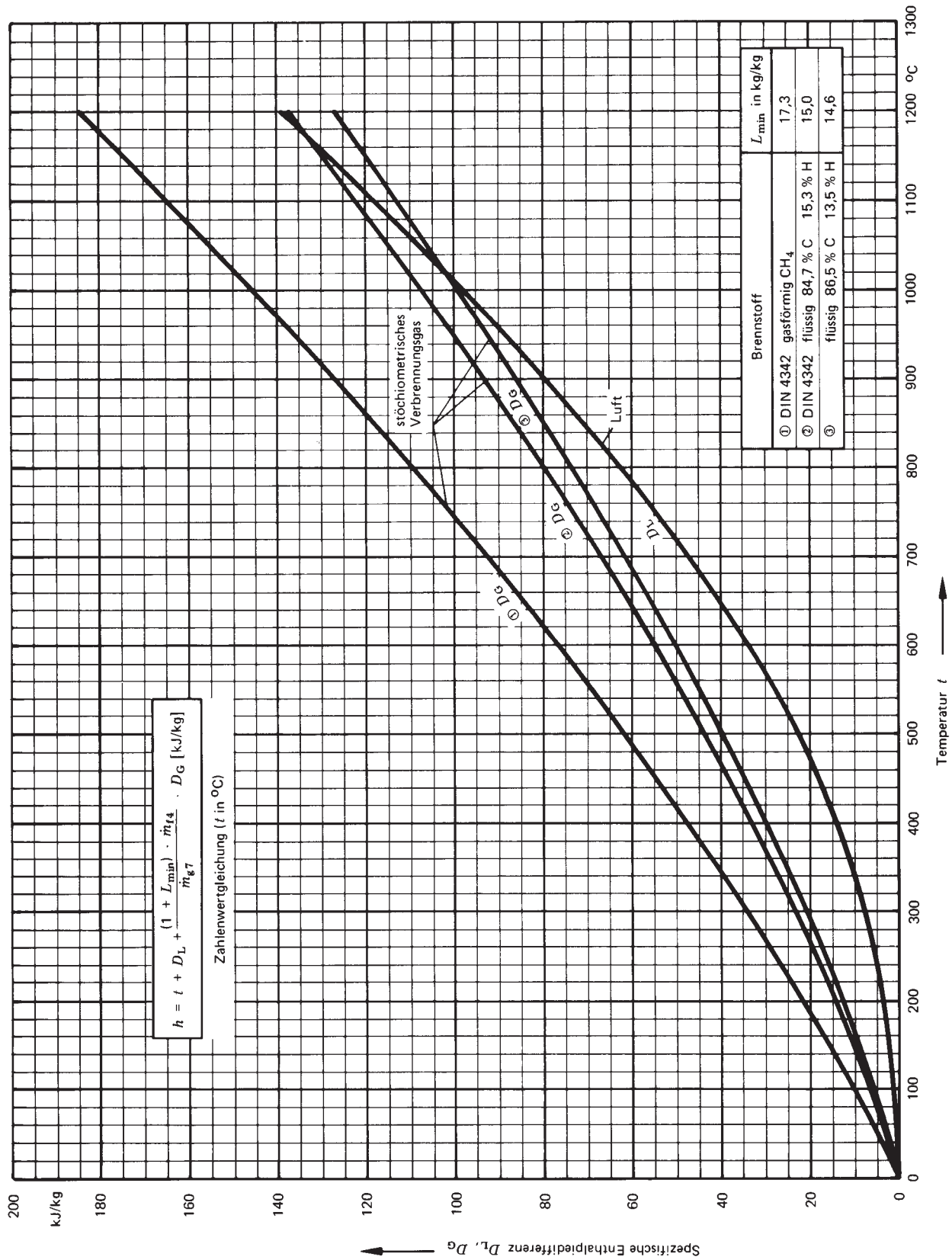


Bild 4. Spezifische Enthalpie von Luft und Verbrennungsgasen (Ansaugluftzustand: 15 °C; 1,013 bar; 60 % relative Feuchte / Stoffwerte: VDI, Thermodynamische Tabellen 1977)