

vgbe-Standard

# Das thermische Verhalten von Dampfturbinen

VGBE-S-105-00-2025-05-DE  
(Inhaltsgleich mit VGB-R 105, 2. Ausgabe)



# vgbe-Standard

## Das thermische Verhalten von Dampfturbinen

VGBE-S-105-00-2025-05-DE  
(Inhaltsgleich mit VGB-R 105)

Herausgeber:  
vgbe energy e.V.

Verlag:  
vgbe energy service GmbH  
Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften  
Deilbachtal 173 | 45257 Essen

Tel.: +49 201 8128-200  
E-Mail: [sales-media@vgbe.energy](mailto:sales-media@vgbe.energy)

ISBN 978-3-96284-415-8 (Print, Deutsch)  
ISBN 978-3-96284-416-5 (E-Book, Deutsch)

Alle Rechte vorbehalten, vgbe energy.

[www.vgbe.energy](http://www.vgbe.energy) | [www.vgbe.services](http://www.vgbe.services)

## --- Single-User-Version | Einzelplatzversion ---

The GTC of vgbe energy service GmbH apply.  
Es gelten die AGB der vgbe energy service GmbH.  
All rights reserved! | Alle Rechte vorbehalten!

Any modification of this document is not permitted.  
Jegliche Änderung dieses Dokuments ist nicht gestattet.

**Single-User-Version  
Einzelplatzversion**



**One printout allowed  
Ein Ausdruck erlaubt**



**No electronic copy allowed  
Keine elektronische Kopie erlaubt**



**No network storage allowed  
Kein Einstellen in Netzwerke erlaubt**



**Passing on of print-outs or electronic copies  
to third parties is not permitted.  
Die Weitergabe von Ausdrucken und/oder elek-  
tronischen Kopien an Dritte ist nicht gestattet.**



**No further rights are granted.  
Es werden keine weiteren Rechte eingeräumt.**



**Notice:** Any further use of contents requires a written agreement with vgbe energy.  
Please contact us at [sales-media@vgbe.energy](mailto:sales-media@vgbe.energy).

**Hinweis:** Jegliche weitere Nutzung von Inhalten bedarf einer schriftlichen  
Vereinbarung mit vgbe energy.  
Kontakt und Rückfragen an [sales-media@vgbe.energy](mailto:sales-media@vgbe.energy).

### **Urheberrechtsvermerk**

*vgbe-Standards, hier im Weiteren als „Werk“ bezeichnet, und sämtliche im Werk enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Es liegt in der alleinigen Zuständigkeit von vgbe energy, die Nutzungsrechte wahrzunehmen.*

*Der Begriff „Werk“ umfasst die vorliegende Publikation sowohl in gedruckter als auch in digitaler Form. Der Urheberrechtsschutz umfasst dieses Werk als Ganzes als auch Teile bzw. Ausschnitte.*

*Jede Nutzung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Genehmigung des vgbe energy unzulässig. Dies gilt für jede Form von Vervielfältigung, Übersetzung, Digitalisierung sowie Veränderung.*

*Vervielfältigungen und Nutzung dieses Werkes für das Text- und Data-Mining bleiben vorbehalten. Die Verwendung des Werkes oder Teilen davon zum Training künstlicher Intelligenz-Technologien oder -Systeme ist untersagt.*

### **Haftungsausschluss**

*vgbe-Standards sind Empfehlungen, deren Anwendung freigestellt ist. Sie berücksichtigen den zum Zeitpunkt der jeweiligen Ausgabe herrschenden bekannten Stand der Technik. Sie erheben jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit.*

*Die Anwendung erfolgt auf eigene Verantwortung und auf eigene Gefahr. vgbe energy e.V. schließt insoweit jegliche Haftung aus.*

*Die deutschsprachige Version dieses vgbe-Standards ist für Übersetzungen die maßgebliche Referenzausgabe.*

### **Hinweis zur Behandlung von Änderungsvorschlägen**

*Änderungsvorschläge können an die E-Mail-Adresse [vgbe-standard@vgbe.energy](mailto:vgbe-standard@vgbe.energy) gesendet werden. Zur eindeutigen Zuordnung des Inhalts sollte die Betreffzeile die Kurzbezeichnung des betreffenden Dokuments enthalten.*

## Vorwort

Der vorliegende vgbe-Standard wurde erstmalig 1977 als Neufassung der VDEW-Broschüre „Der Anwärmvorgang in Dampfturbinen“ als VGB-Richtlinie VGB-R 105 M herausgegeben.

Seitdem haben sich die Methoden der Auslegung und Berechnung von Turbinenkomponenten maßgeblich verändert. Die Physik und die grundlegenden Aspekte gelten jedoch unverändert.

Der technische Ausschuss „Dampfturbinen“ sieht diesen vgbe-Standard weiterhin als sinnvolle Informationsquelle, in dem Grundlagenwissen vermittelt wird. Er ist inhaltsgleich mit der VGB-Richtlinie VGB-R 105 („Das thermische Verhalten von Dampfturbinen“ 1990, Zweite überarbeitete Auflage; 1977, Erste Auflage). Beide Veröffentlichungen sind gleichwertig.

Der vgbe-Standard ist in seinem Stand rein informativ zu nutzen und wird auch zukünftig nicht weiter überarbeitet. Zitierte bzw. referenzierte Literatur kann zwischenzeitlich in überarbeiteter Form angepasst worden sein.

Essen, Februar 2025

vgbe energy e.V.\*

\* vgbe energy e.V. ist seit April 2022 der neue Name des VGB PowerTech.

## Vorwort zur 1. Auflage

Beim Anfahren, Abfahren und Leistungsändern von Dampfturbinen treten zwangsläufig Dampftemperaturänderungen auf, die zu Temperaturunterschieden in und zwischen den Bauteilen führen. Aus diesen Temperaturunterschieden entstehen freie Dehnungen der Bauteile zueinander, Verformungen der Bauteile selbst und Beanspruchungen in diesen Bauteilen. Überschreiten solche Dehnungen, Verformungen und Beanspruchungen bestimmte, durch Konstruktion und eingesetzte Werkstoffe gegebene Grenzen, so können sowohl sofortige Schäden - axiales oder radiales Anstreifen - als auch Langzeitschädigungen - unzulässige bleibende Verformungen, Rissbildung - eintreten.

Dieser Problemkreis erlangt für den Dampfturbinenbau und -betrieb zunehmende Bedeutung. Einerseits steigen mit der Einheitenleistung naturgemäß die Abmessungen der Bauteile und damit die Auswirkungen großer Temperaturunterschiede, andererseits sind Verfügbarkeitseinschränkungen wegen thermischer Überbeanspruchungen zu vermeiden. Darüber hinaus wurden in letzter Zeit von der Netzseite die Forderungen hinsichtlich der Belastungs- und Regelfähigkeit von Großturbosätzen erhöht. Auch das Abdrängen mittlerer und großer konventioneller Anlagen in den spitzen- und Mittellastbereich durch weitere, die Grundlast übernehmende, wirtschaftlichere Kraftwerke, z.B. Kernkraftwerke, verleiht den hier angeschnittenen Fragen neben der auch in Zukunft noch zu erwartenden Steigerung der Einheitenleistung immer mehr Gewicht.

Der Bedeutung dieses Problems entsprechend sind in den vergangenen Jahren zahlreiche theoretische Untersuchungen, Laborversuche und Versuche auf Anlagen durchgeführt worden, die zu vertieftem Verständnis der Vorgänge und der möglichen Schäden geführt haben. Die im Jahr 1961 von der VDEW herausgegebene Broschüre „Der Anwärmvorgang in Dampfturbinen“ ist dadurch in wesentlichen Teilen veraltet. Der VGB-Arbeitskreis „Turbinenentwicklung“ hat sich daher der Aufgabe unterzogen, den heutigen Stand der Kenntnisse darzulegen. Um den Umfang einer solchen Arbeit nicht zu sprengen, ist eine Beschränkung auf allgemeingültige Erläuterungen notwendig. Ein Literaturverzeichnis ermöglicht ein vertieftes Studium der angeschnittenen Probleme.

Der Arbeitskreis „Turbinenentwicklung“ hofft, durch diese Veröffentlichung das erweiterte Gedankengut über den Kreis der Turbinenhersteller hinaus vor allem Kraftwerkspanern und -betreibern zugänglich zu machen und so Verständnis für die Möglichkeiten, aber auch für die Grenzen im thermischen Verhalten der Turbinen zu wecken. Überhöhte Anforderungen an das Anfahr- und Belastungsverhalten von Turbinen verkürzen zusätzlich die Lebensdauer bestimmter Bauteile. Auf die heutigen Möglichkeiten schonender Fahrweise mit Hilfe geeigneter Überwachungsgeräte oder entsprechender Automaten wird hingewiesen. Es ist nicht beabsichtigt, Betriebsvorschriften oder Anfahrkurven der Turbinenhersteller zu ersetzen, auch wenn die Gedankengänge

zur Erstellung solcher Anfahrkurven erläutert und „übliche“ Anfahr- und Belastungszeiten angegeben werden. Die Broschüre wurde verfasst im VGB-Arbeitskreis „Turbinenentwicklung“ von einer Arbeitsgruppe unter Federführung von Herrn Haas, Kraftwerk Union AG, unter maßgeblicher Beteiligung der Herren Dr. Busse und Kramer, Brown Boveri & Cie., Andreae, Langbein, Dr. Loreck und Tümmers, Kraftwerk Union AG, Cernoch, Dr. Martin, Mayer und Strätz, Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG.

Mitglieder des AK, „Turbinenentwicklung“ sind die Herren:

*Huppmann, Adrian, Prof. Bammert, Buchwald, Dangl, Prof. Dibelius, Haas, Haase, Dr. Hirschfelder, Höxtermann, Koch, Dr. Martin, Mitschel, Riedlinger, Schulte, Prof. Thomas, Wittich.*

Essen, im November 1977

### **Vorwort zur 2. Auflage**

Die 2. Überarbeitung dieser Richtlinie wurde von einer Arbeitsgruppe, bestehend aus den Herren Andreae, Dr. Busse, Höxtermann, Dr. Peter, Strätz und Wolf, vorgenommen.

Mitglieder des Arbeitskreises „Turbinenentwicklung“ sind die Herren:

*Dr. Linnemann, Aldrian, Dr. Bohnstedt, Professor Dibelius, Professor Haas, Hebel, Hedström, Höxtermann, Huppmann, Jensen, Keysselitz, Neft, Riedlinger, Schulte, Professor Stetter, Trinkle und Wolf.*

Essen, im Mai 1990

**Inhalt**

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Temperaturdifferenzen in Bauteilen.....</b>	<b>11</b>
2.1	Einflussgrößen für die Berechnung von Temperaturfeldern .....	12
2.1.1	Wärmeübergang .....	13
2.1.2	Werkstoffeinfluss .....	17
2.2	Temperaturverteilung in Bauteilen .....	20
2.2.1	Vereinfachte Lösung der Differentialgleichung .....	20
2.2.1.1	Stationäre Temperaturverteilung .....	23
2.2.1.2	Quasistationäre Temperaturverteilung.....	24
2.2.1.3	Instationäre Temperaturverteilung .....	26
2.2.2	Mehrdimensionaler Wärmefluss .....	27
<b>3</b>	<b>Dehnungs- und Verformungsverhalten von Bauteilen.....</b>	<b>29</b>
3.1	Berechnung der thermischen Absolut- und Relativdehnung.....	30
3.2	Einfluss von Fliehkraft und Innendruck.....	31
3.3	Folgerungen aus der Relativdehnung für die Konstruktion .....	32
3.4	Verkrümmung von Läufern .....	33
3.5	Verkrümmung von Gehäusen.....	34
<b>4</b>	<b>Beanspruchung von Bauteilen.....</b>	<b>35</b>
4.1	Beanspruchungsarten von Bauteilen .....	35
4.1.1	Eindimensionale Wärmespannungen und behinderte Wärmedehnung ....	35
4.1.1.1	Stationäre Wärmespannungen .....	38
4.1.1.2	Quasistationäre Wärmespannungen .....	38
4.1.1.3	Instationäre Wärmespannungen.....	40
4.1.2	Mehrdimensionale Spannungsverteilung.....	41
4.2	Kerbeinflüsse .....	42
<b>5</b>	<b>Beurteilung von Beanspruchungen .....</b>	<b>46</b>
5.1	Kriechverhalten von Werkstoffen .....	48
5.1.1	Konstante Zeitstandsbeanspruchung .....	49
5.1.2	Veränderliche Zeitstandsbeanspruchung .....	49
5.2	Relaxationsbeanspruchung .....	51
5.3	Dehnungswechselverhalten von Werkstoffen .....	51
5.4	Beurteilung der Werkstoffermüdung .....	54
<b>6</b>	<b>Aussagen für den Betrieb von Dampfturbinen .....</b>	<b>58</b>
6.1	Begriffsdefinitionen .....	58
6.1.1	Ausgangszustand .....	58

6.1.1.1	Anfahrvorgang .....	59
6.1.1.2	Fahren auf Nenndrehzahl .....	59
6.1.1.3	Belasten .....	59
6.1.2	Leistungs- und Temperaturänderungsvorgang .....	59
6.2	Auswirkungen verschiedener Betriebsarten auf den Anfahrvorgang sowie auf Leistungsänderungen .....	60
6.2.1	Betriebsarten .....	60
6.2.2	Einfluss von Dampftemperaturen und Wärmeübergang auf Bauteiltemperaturen .....	61
6.2.3	Auswirkung auf den Anfahrvorgang und das Leistungsändern von Heißdampfturbinen .....	62
6.2.3.1	Anfahrvorgang .....	62
6.2.3.2	Leistungsänderung bei konstanter Frischdampftemperatur im Leistungsbetrieb .....	64
6.2.4	Auswirkungen auf den Anfahrvorgang und das Leistungsändern von Sattdampfturbinen .....	67
6.3	Anhaltswerte für den Anfahrvorgang und das Leistungsändern der Turbine .....	69
6.3.1	Abkühlvorgang .....	70
6.3.2	Idealisierte Anfahrdiagramme .....	72
6.3.3	Anhaltswerte für Anfahrzeiten .....	75
6.3.4	Anhaltswerte für Temperatursprünge und Temperaturtransienten in Bauteilen .....	76
6.3.5	Anhaltswerte für Leistungssprünge und Leistungstransienten .....	77
6.4	Praktische Regeln für das Anfahren und Leistungsändern von Heißdampf- und Sattdampfturbinen .....	80
6.4.1	An- und Abfahrvorgang .....	80
6.4.1.1	Inbetriebnahme der Sperrdampfversorgung .....	81
6.4.1.2	Anwärmen der Rohrleitungen und der Ventilgehäuse .....	82
6.4.1.3	Anwärmen der Rohrleitungen und der Ventilgehäuse .....	84
6.4.1.4	Anstoßen, Fahren auf Nenndrehzahl, Leerlaufbetrieb, Belasten .....	85
6.4.1.5	Leistungsänderungen und Abfahrvorgänge .....	89
6.4.2	Funktion von Anwärmleitungen und Entwässerungen .....	90
6.4.3	Hinweise für Sattdampfturbinen .....	90
<b>7</b>	<b>Betriebsüberwachung des thermischen Verhaltens von Turbinen ....</b>	<b>91</b>
7.1	Temperaturüberwachung .....	91
7.1.1	Dampftemperaturen .....	91
7.1.1.1	Frischdampf- und ZÜ-Dampftemperatur .....	92
7.1.1.2	Abdampftemperaturen .....	92
7.1.1.3	Sperrdampftemperatur .....	92
7.1.2	Bauteiltemperatur .....	93
7.1.2.1	Ventilgehäusetemperaturen .....	93

7.1.2.2	Turbinengehäusetemperaturen .....	93
7.1.2.3	Läufertemperatur .....	94
7.2	Überwachung der freien Dehnungen .....	94
7.2.1	Überwachung stehender Bauteile.....	94
7.2.2	Überwachung rotierender Bauteile .....	95
7.2.3	Überwachungsgeräte und deren Anbauort .....	96
7.3	Überwachung der Verformung.....	96
7.3.1	Überwachung stehender Bauteile.....	96
7.3.2	Überwachung rotierender Bauteile .....	97
7.3.3	Überwachungsgeräte.....	98
7.3.4	Überwachung des Fundaments .....	98
7.4	Beanspruchungsüberwachung .....	98
7.4.1	Überwachung stehender Bauteile.....	100
7.4.2	Überwachung rotierender Bauteile .....	100
7.4.3	Überwachungsgeräte.....	101
7.4.4	Lebensdauerüberwachung .....	101
<b>8</b>	<b>Automatisches Anfahren .....</b>	<b>102</b>
8.1	Ziel und Zweck.....	102
8.2	Technologischer Aufbau der Automatik .....	102
8.3	Wirkungsweise.....	104
8.4	Automatikskriterien des thermischen Verhaltens der Turbine .....	105
<b>9</b>	<b>Turbinenschutz .....</b>	<b>107</b>
<b>10</b>	<b>Formelzeichen und Indizes .....</b>	<b>108</b>
10.1	Formelzeichen .....	108
10.2	Indizes .....	111
<b>11</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>112</b>