



Hochschule
Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Skript zur Vorlesung

Technische Thermodynamik und Wärmeübertragung

Thermische Verfahrenstechnik

Fakultät Maschinenwesen
Fachgebiet Technische Thermodynamik

von
Dr.-Ing. S. Herrmann

Ausgabe: Wintersemester 2023/24

Literatur

Technische Thermodynamik und Wärmeübertragung

Lehrbücher

Kretzschmar, H.-J.; Kraft, I.:
Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik.
Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München

Hering, E.; Modler, K.-H. (Hrsg.):
GRUNDWISSEN des Ingenieurs, Kapitel 8: Thermodynamik.
Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München (ab 13. Auflage)

Cerbe, G.; Wilhelms, G.:
Technische Thermodynamik.
Carl Hanser Verlag, München

Elsner, N.; Dittmann, A.; Fischer, S.; Huhn, J.:
Grundlagen der Technischen Thermodynamik,
Band 1: Energielehre und Stoffverhalten, Band 2: Wärmeübertragung (ab 8. Auflage).
Akademie-Verlag, Berlin

Marek, R.; Nitsche, K.:
Praxis der Wärmeübertragung.
Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München

Baehr, H. D.; Stephan, K.:
Wärme- und Stoffübertragung.
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Wasserdampfatafel und Stoffwertsammlungen

Kretzschmar, H.-J.; Wagner, W.:
International Steam Tables.
Springer-Verlag, Berlin

Wagner, W.; Kruse A.:
Properties of Water and Steam.
Springer-Verlag, Berlin

Grigull, U.:
Properties of Water and Steam in SI Units.
Springer-Verlag, Berlin

Baehr, H. D.; Tillner-Roth, R.:
Thermodynamische Eigenschaften umweltverträglicher Kältemittel.
Springer-Verlag, Berlin

Kompendien

VDI-Wärmeatlas.
Springer-Verlag, Düsseldorf

Energietechnische Arbeitsmappe.
Springer-Verlag, Berlin

Recknagel-Sprenger-Schramek:
Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik.
Oldenbourg Industrie-Verlag, München

Literatur

Thermische Verfahrenstechnik

Lehrbücher

Lohrengel, B.:
Einführung in die thermischen Trennverfahren.
Oldenbourg Verlag, München und Wien

Schwister, K. (Hrsg.):
Taschenbuch der Verfahrenstechnik (3. Aufl.).
Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München

Mersmann, A.; Kind, M.; Stichlmair, J.:
Thermische Verfahrenstechnik (2. Aufl.).
Springer-Verlag, Berlin und Heidelberg

Jungnickel, H.; Agsten, R.; Kraus, W.-E.:
Grundlagen der Kältetechnik.
Verlag Technik, Berlin oder Verlag C. F. Müller, Karlsruhe

Wasserdampf- und Kältemitteltafeln

Wagner, W.; Kretzschmar, H.-J.:
International Steam Tables.
Springer-Verlag, Berlin

Wagner, W.; Kruse A.:
Properties of Water and Steam.
Springer-Verlag, Berlin

Grigull, U.:
Properties of Water and Steam in SI Units.
Springer-Verlag, Berlin

Baehr, H. D.; Tillner-Roth, R.:
Thermodynamische Eigenschaften umweltverträglicher Kältemittel.
Springer-Verlag, Berlin

Kompendien

VDI-Wärmeatlas.
Springer-Verlag, Düsseldorf

Energietechnische Arbeitsmappe.
Springer-Verlag, Berlin

Schramek, E.-R.; Sprenger, E.; Recknagel, H.:
Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik.
Oldenbourg Industrie Verlag, München

Technische Thermodynamik und Wärmeübertragung

0 Was ist Thermodynamik?

1 Grundlegende Begriffe und thermodynamische Zustandsgrößen

- 1.1 System, Zustand und Zustandsgrößen
 - 1.1.1 Thermodynamisches System und Systemgrenze
 - 1.1.2 Zustand und Zustandsgrößen
 - 1.1.3 Prozess und Zustandsänderung
- 1.2 Thermisches Gleichgewicht und thermodynamische Temperatur
- 1.3 Der Druck
- 1.4 Das p, T - Verhalten der Stoffe
- 1.5 Das spezifische Volumen, die Dichte
 - 1.5.1 Gase im Idealgaszustand
 - 1.5.2 Inkompressible Flüssigkeiten und Festkörper
 - 1.5.3 Reale Fluide
- 1.6 Innere Energie, Enthalpie und Wärmekapazitäten
 - 1.6.1 Reale Fluide
 - 1.6.2 Gase im Idealgaszustand
 - 1.6.3 Inkompressible Flüssigkeiten und Festkörper

2 Der I. Hauptsatz der Thermodynamik – Energiebilanzen

- 2.1 Der I. Hauptsatz bei geschlossenen Systemen
 - 2.1.1 Formulierung des I. Hauptsatzes bei geschlossenen Systemen
 - 2.1.2 Äußere Nutzarbeit am Kolben
 - 2.1.3 Enthalpie-Form des I. Hauptsatzes bei geschlossenen Systemen für $p = \text{const}$
 - 2.1.4 Wärmestrom und Arbeitsleistung
 - 2.1.5 Anwendung des I. Hauptsatzes auf den Mischungsprozess
 - 2.1.6 Diskussion Sonderfall $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$
- 2.2 Der I. Hauptsatz bei offenen Systemen
 - 2.2.1 Masse- und Volumenstrom
 - 2.2.2 Formulierung des I. Hauptsatzes bei stationären offenen Systemen
 - 2.2.3 Anwendung des I. Hauptsatzes auf Wärmeübertrager
 - 2.2.4 Anwendung des I. Hauptsatzes auf die Mischung von Fluidströmen

3 Der II. Hauptsatz der Thermodynamik – Entropiebilanzen

- 3.1 Irreversible und reversible Prozesse
 - 3.1.1 Irreversible Prozesse
 - 3.1.2 Reversible Prozesse
- 3.2 Definition der Zustandsgröße Entropie
- 3.3 Entropiedifferenzen bei Zustandsänderungen
 - 3.3.1 Reale Fluide
 - 3.3.2 Gase im Idealgaszustand
 - 3.3.3 Inkompressible Flüssigkeiten und Festkörper
- 3.4 Zusammenhang Entropie – Wärme
- 3.5 Entropiebilanz bei ruhenden geschlossenen Systemen
- 3.6 Irreversibilität bei Arbeitszuführung
- 3.7 Irreversibilität der Stoffübertragung
- 3.8 Irreversibilität der Wärmeübertragung
- 3.9 Entropiebilanz bei ruhenden offenen stationären Systemen

4 Die technische Arbeitsfähigkeit – Exergiebilanzen

- 4.1 Energie, Exergie und Anergie
- 4.2 Die Exergie als technische Arbeitsfähigkeit eines Stoffstromes
- 4.3 Stationäre Exergiebilanz bei offenen Systemen

5 Wärmeübertragung

- 5.0 Was ist Wärmeübertragung?
- 5.1 Wärmeleitung
 - 5.1.1 Stationärer Wärmestrom
 - 5.1.2 Stationäres Temperaturfeld
- 5.2 Konvektiver Wärmeübergang – α -Berechnung
 - 5.2.1 Grundlagen
 - 5.2.2 Freie Konvektion
 - 5.2.3 Erzwungene Konvektion
- 5.3 Eindimensionaler stationärer Wärmedurchgang
- 5.4 Energietransport durch Strahlung
 - 5.4.1 Grundlagen
 - 5.4.2 Wärmestrom durch Strahlung
 - 5.4.3 Strahlungsschirme
 - 5.4.4 Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung
 - 5.4.5 Wärmestrom durch Strahlung und Konvektion

Thermische Verfahrenstechnik

6 Thermische Verfahrenstechnik

6.1 Absorption, Desorption und Rektifikation

6.1.1 Prinzip vom Absorbieren und Austreiben

6.1.2 Berechnung von Gemischen

6.1.3 Darstellung der Eigenschaften von Gemischen im $\lg p, 1/T$ -Diagramm

6.1.4 Darstellung der Eigenschaften von Gemischen im h, ξ -Diagramm

6.1.5 Grundlegende Prozesse und deren Darstellung

6.1.5.1 Adiabate Mischung von Stoffströmen unterschiedlicher Konzentration an Absorptiv

6.1.5.2 Absorptionsprozess

6.1.5.3 Austreiben und Rektifizieren

6.2 Adsorption

6.3 Stoffübertragung

0. Was ist Thermodynamik?

Im Lehrfach *Technische Thermodynamik* werden die folgenden **4 Teilgebiete** behandelt.

a) Energielehre:

Gesetzmäßigkeiten für die technisch interessierende Umwandlung verschiedener Energieformen ineinander.

Die folgenden Energieformen werden betrachtet.

Wichtige Energieformen für die Thermodynamik:

- Wärme
- Arbeit
- innere Energie

Die Thermodynamik

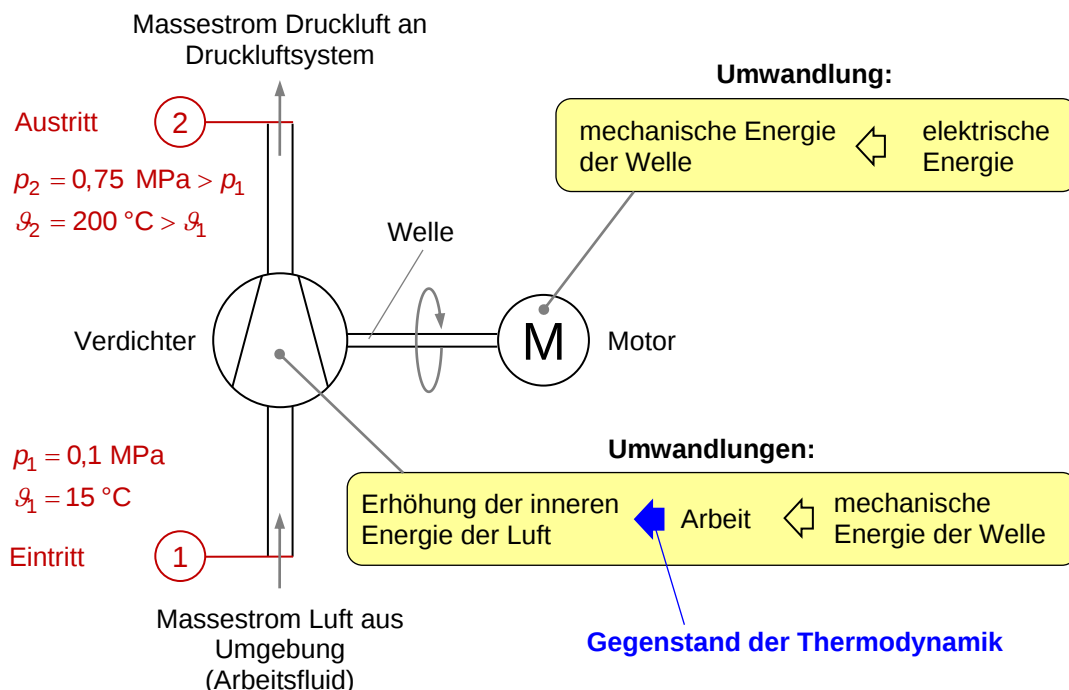
tangierende Energieformen:

- mechanische Energie (potentielle und kinetische Energie)
- chemische Energie
- elektrische Energie

Für die Darstellung werden die technischen Apparate, Maschinen und Anlagen durch thermodynamische Formalismen abstrahiert.

Beispiel: Verdichter, auch als Kompressor bezeichnet, mit Luft

Die Darstellung erfolgt in einem Schaltschema:



Arbeitsfluid Ein Arbeitsfluid ist ein Gas oder eine Flüssigkeit, das in Maschinen, Apparaten und Anlagen an Energieumwandlungsprozessen beteiligt ist.

Fluid

Unter Fluid ist der Sammelbegriff für Gase und Flüssigkeiten zu verstehen.

D. h., wenn im Weiteren von einem Fluid gesprochen wird, kann es sich sowohl um ein Gas als auch eine Flüssigkeit handeln.

b) Bereitstellung von Stoffdaten

Berechnung thermodynamischer Zustandsgrößen und Transporteigenschaften der Arbeitsfluide.

- Beispiele:
- Dichte
 - innere Energie
 - Wärmekapazität
 - etc.

c) Wärmeübertragung im Modul Technische Thermodynamik II

- Stoffgebiete:
- Wärmeleitung
 - konvektiver Wärmeübergang
 - Wärmestrahlung
 - Wärmedurchgang

d) Stoffübertragung im Modul Technische Thermodynamik III für ME

- Stoffgebiete:
- Diffusion
 - konvektiver Stoffübergang
z. B. Verdunstung
 - Stoffdurchgang



„Die Technische Thermodynamik ist eine der grundlegenden Ingenieurwissenschaften.“

1. Grundlegende Begriffe und thermodynamische Zustandsgrößen

Die Technische Thermodynamik beinhaltet

- eine phänomenologische Betrachtungsweise, d. h., es wird von den Erscheinungen ausgegangen. Es werden keine Hypothesen aufgestellt.
- eine makroskopische Betrachtung der Stoffe als Ganzes, d. h., die Molekularbewegung wird nicht betrachtet.

1.1 System, Zustand und Zustandsgrößen

1.1.1 Thermodynamisches System und Systemgrenze

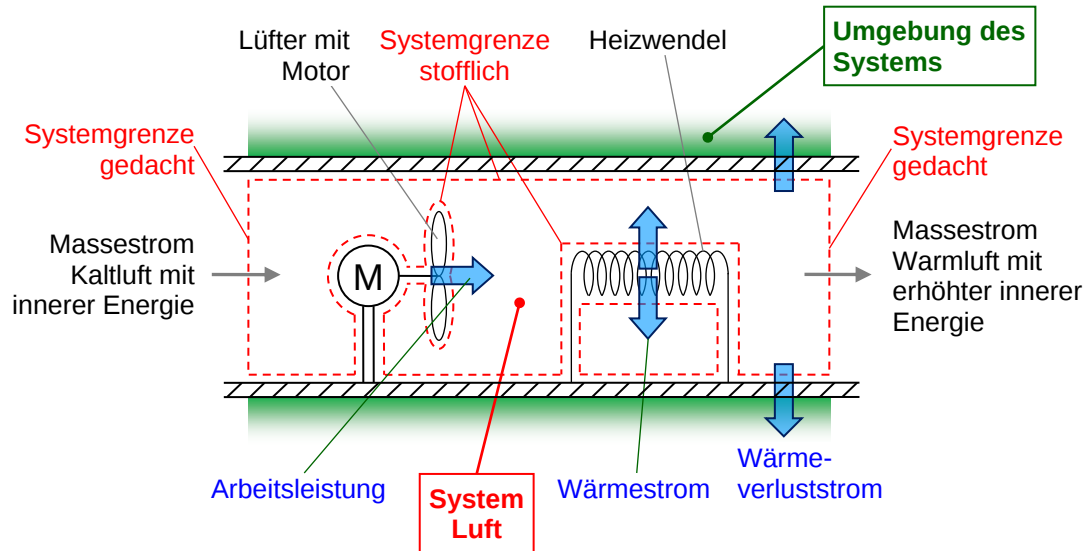
Thermodynamisches System	Es ist ein zur Umgebung abgegrenzter stofflicher Kontrollraum, der thermodynamisch untersucht werden soll. Auch ein bewegtes Volumenelement kann ein System sein. Die Abgrenzung zur Umgebung erfolgt durch die Systemgrenze.
Systemgrenze	Sie dient zur Kontrolle der Masse- und Energieströme, die das System mit seiner Umgebung austauscht.

Diese Grenze kann

- stofflich sein,
- oder gedacht, z. B. der durchströmte Querschnitt eines Flusses oder der einer Rohrleitung.

Beispiel für ein System:

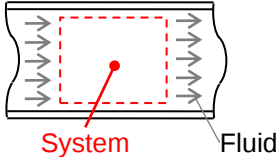
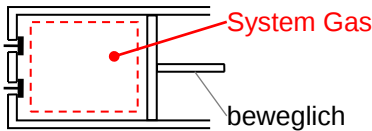
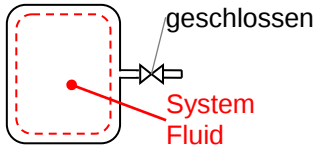
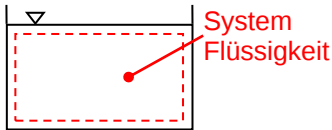
Lüfterhitzer



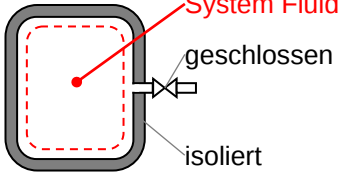
In diesem Beispiel tauscht das System Luft mit seiner Umgebung aus:

- | | |
|----------------|---|
| Masseströme: | <ul style="list-style-type: none"> • angesaugte und abgeblasene Luft |
| Energieströme: | <ul style="list-style-type: none"> • Arbeitsleistung des Lüfters • Wärmestrom der Heizung • Wärmeverluststrom nach außen |

Unterscheidung von thermodynamischen Systemen nach Art der Systemgrenze:

Art	Systemgrenze	Beispiele
Offenes System	Durchlässig für Stoffe Dadurch ist ein Masseaustausch mit der Umgebung vorhanden.	- Luftherhitzer - Pumpe, Verdichter - Turbine - Rohrleitung  - Wärmeübertrager
Geschlossenes System	Undurchlässig für Stoffe - Dadurch ist die Masse im System konstant. - Die Größe des Systems kann sich ändern. - Auch strömende Volumenelemente sind geschlossene Systeme.	- Zylinderinnenraum mit Kolben bei geschlossenen Ventilen  - Geschlossener Behälter  - Offener Behälter mit Flüssigkeit, bei Vernachlässigung der Verdunstung 

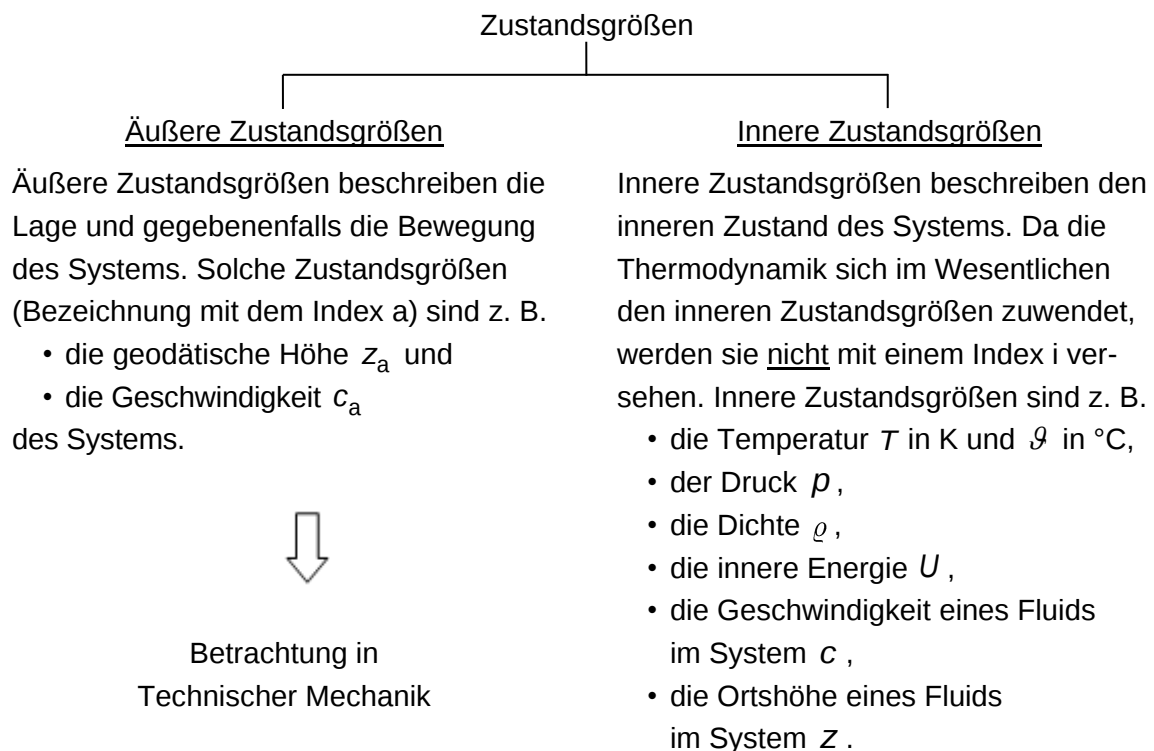
Theoretische Grenzfälle thermodynamischer Systeme:

Art	Systemgrenze	Beispiele
Adiabates System	Undurchlässig für Wärme • Dadurch kann nur die Energieform Arbeit die Systemgrenze überschreiten. • Ein Masseaustausch mit der Umgebung kann vorhanden sein.	Bei sehr guter Isolation, bzw. wenn die anderen Energien weit größer sind als die Verlustwärme.
Abgeschlossenes System (geringe technische Bedeutung)	Undurchlässig für Stoffe • Dadurch ist die Masse im System konstant. Undurchlässig für Energie • Dadurch ist die Energie im System konstant.	Isolierter geschlossener Behälter 

1.1.2 Zustand und Zustandsgrößen

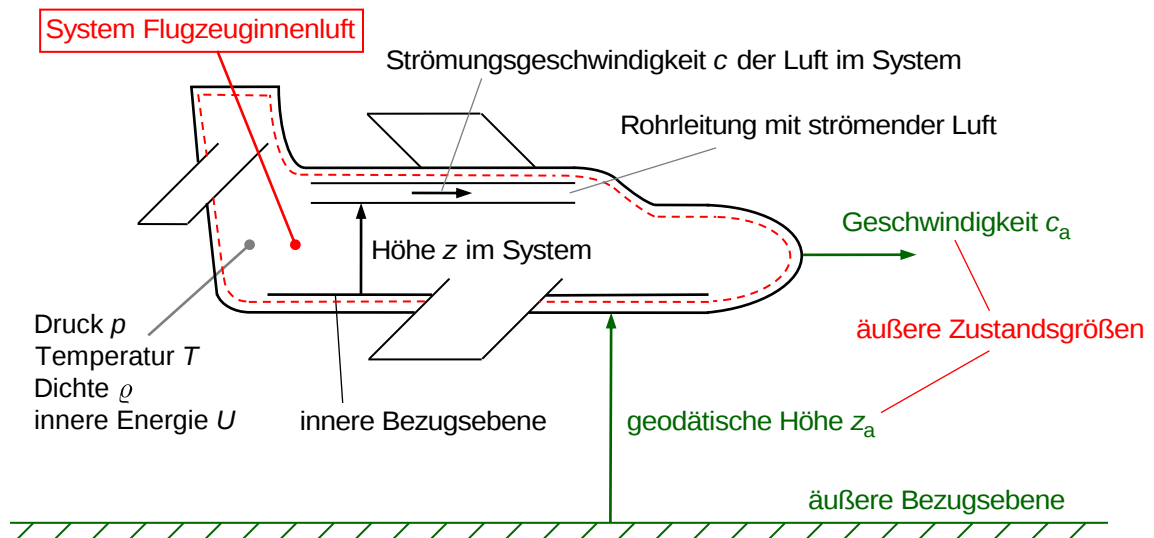
Thermodynamischer Zustand:	Er beschreibt die Gesamtheit der thermodynamischen Eigenschaften eines Systems.
Zustandsgrößen:	Die thermodynamischen Eigenschaften des Systems werden als (thermodynamische) Zustandsgrößen, abgekürzt „Zgr“, bezeichnet.
Gleichgewicht:	Dabei wird streng genommen davon ausgegangen, dass sich das System im Gleichgewicht, d. h. im thermischen Gleichgewicht (an allen Stellen im System herrscht die gleiche Temperatur), im mechanischen Gleichgewicht (es herrscht gleicher Druck) und im chemischen Gleichgewicht (es finden keine chemischen Reaktionen und Phasenwechsel statt) befindet.

Unterteilung der thermodynamischen Zustandsgrößen:

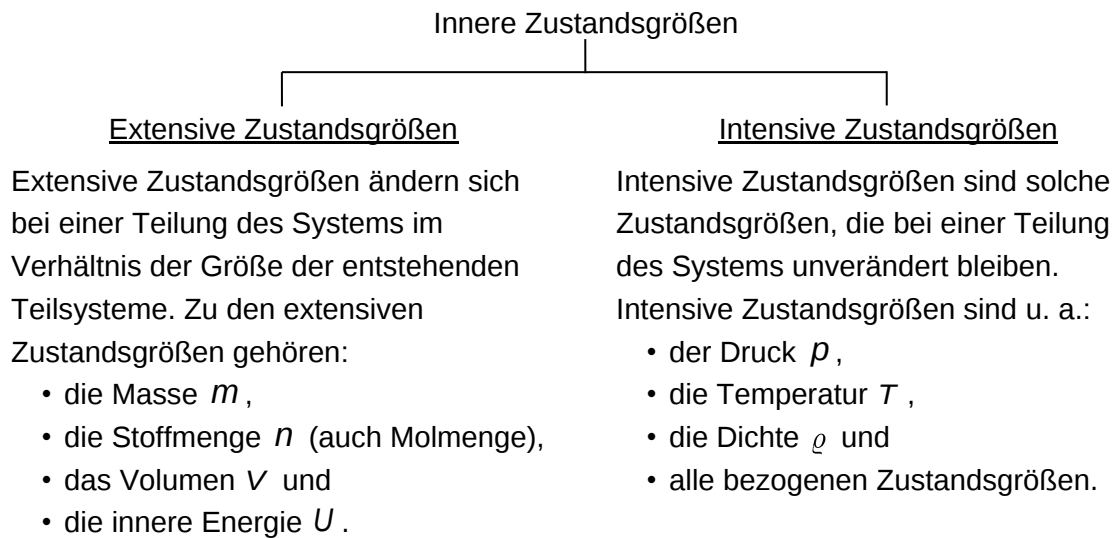


Veranschaulichung der äußeren und inneren Zustandsgrößen:

System Flugzeuginnenluft mit äußeren und inneren Zustandsgrößen

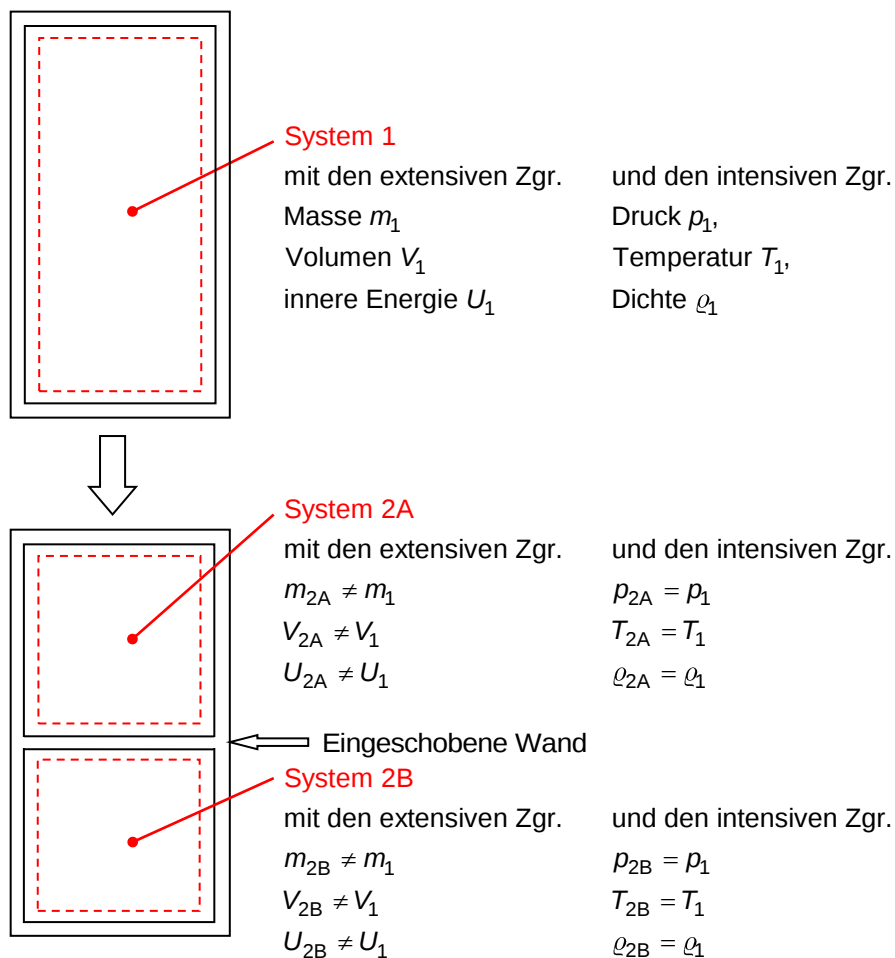


Weitere Unterteilung der inneren Zustandsgrößen:

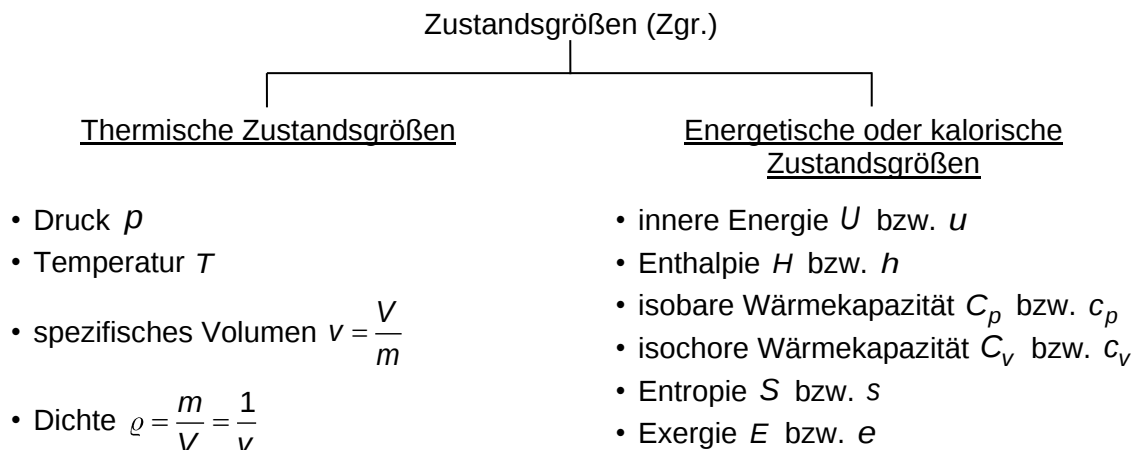


Veranschaulichung:

Teilung eines Systems 1 Flüssigkeit bzw. Gas in einem Behälter in die Teilsysteme 2A und 2B durch Einführen einer Trennwand



Weitere Unterteilung der thermodynamischen Zustandsgrößen:



Weitere Eigenschaften von Systemen, ausgehend von Zustandsgrößen:

Homogenes System

In einem homogenen System haben die Zustandsgrößen überall gleiche Werte.

Kennzeichen:

- Ein System besteht nur aus Gas.
- Ein System besteht nur aus Flüssigkeit.
- Druck und Temperatur haben die gleichen Werte.

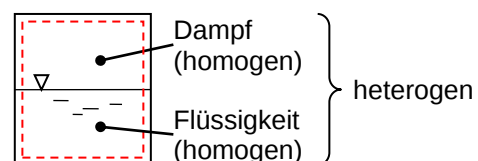
Heterogenes System

In einem heterogenen System haben die Zustandsgrößen nicht überall im System gleiche Werte.

Ein solches System besteht jedoch oft aus homogenen Teilbereichen, sogenannten Phasen.

⇒ Phasen sind homogene Teilbereiche eines heterogenen Gesamtsystems.

Beispiel:



Isotropes System

In einem isotropen System sind die Stoffeigenschaften richtungsunabhängig.

⇒ Metalle sind in der Regel isotrop.

Anisotropes System

In einem anisotropen System sind die Stoffeigenschaften richtungsabhängig.

⇒ Holz ist anisotrop.

Einfache Systeme

Die Zustandseigenschaften einfacher Systeme können mit thermodynamischen Zustandsgrößen vollständig beschrieben werden.

Bei reinen Stoffen sind die Zustandsgrößen Funktionen von zwei unabhängigen Variablen.

Allgemein: $z = f(x, y)$

Bsp.: $\varrho = f(p, T), \quad u = f(p, T), \quad c_p = f(p, T)$

Bei Gemischen kommen als weitere Variable die Masse- oder Molanteile der Gemischpartner hinzu.

Nicht berücksichtigt werden unter anderem:

- Gravitationskräfte,
 - Oberflächenkräfte,
 - elektrische Kräfte,
 - magnetische Kräfte
- und weitere.

Die Modellierung der meisten technischen Apparate und Maschinen als einfache Systeme ist möglich.

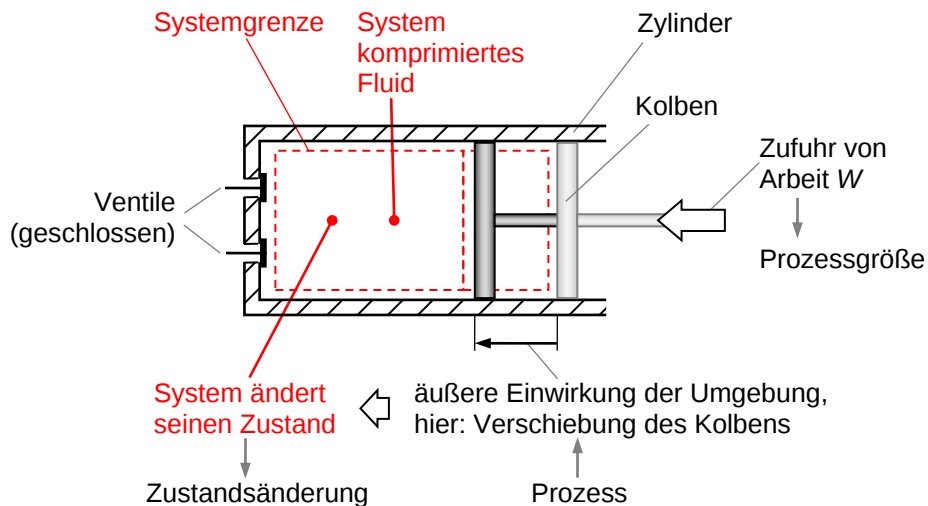
⇒ Im Weiteren beschränken wir uns auf einfache Systeme.

1.1.3 Prozess und Zustandsänderung

Prozess Ein thermodynamischer Prozess ist die äußere Einwirkung, um ein System von einem Gleichgewichtszustand* in einen anderen Gleichgewichtszustand zu bringen.

Veranschaulichung:

Verdichtung von Luft im Zylinder eines Motors

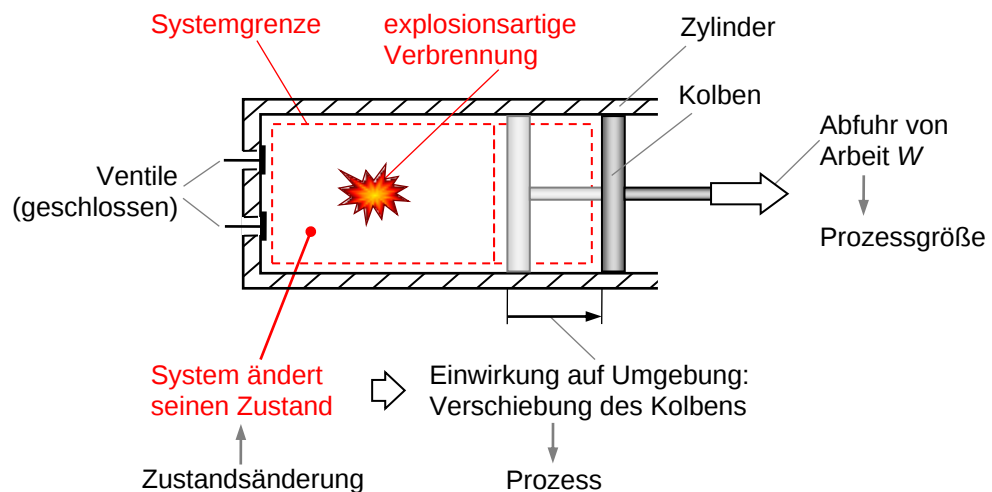


*Ist ein thermodynamisches System im Gleichgewichtszustand, so ist es in Ruhe. Die Eigenschaften im System sind an allen Orten des Systems gleich.

Ein thermodynamischer Prozess kann auch die Folge einer Zustandsänderung sein.

Veranschaulichung:

Expansion des Verbrennungsgases im Zylinder eines Motors



Zustandsänderung (ZÄ)

Bei einer Zustandsänderung ändern sich die Zustandsgrößen eines Systems. Die Zustandsänderung wird durch einen Prozess bewirkt oder sie bewirkt einen Prozess.

Quasistatische Zustandsänderung

Bei der quasistatischen Zustandsänderung durchläuft das System eine Folge von Gleichgewichtszuständen.

- ⇒ Sie verläuft langsam.
- ⇒ Sie ist ein theoretischer Grenzfall, der jedoch für die meisten technischen Prozesse als erfüllt angesehen werden kann.

Beispiel:

Die Zustandsänderungen des Verbrennungsgases im Zylinder eines Verbrennungsmotors können als quasistatisch angesehen werden, falls

Kolbengeschwindigkeit $\ll$ *Schallgeschwindigkeit des Gases*

- ⇒ Sie kann in ein Zustandsdiagramm eingetragen werden.
- ⇒ Quasistatische Zustandsänderungen sind Gegenstand der Vorlesung
 - ⇒ eigentlich Thermostatik!

Nichtstatische Zustandsänderung

Während einer nichtstatischen Zustandsänderung durchläuft das System eine Folge von Nichtgleichgewichtszuständen.

Entsprechende Wissenschaftsgebiete:

- Nichtgleichgewichtsthermodynamik
- irreversible Thermodynamik

Sonderfälle für Zustandsänderungen und Prozesse:

Isobare Zustandsänderung

Die Zustandsänderung verläuft bei konstantem Druck $p = \text{const.}$

⇒ viele technische Prozesse können mit guter Näherung als isobar berechnet werden.

Isotherme Zustandsänderung

Die Zustandsänderung verläuft bei konstanter Temperatur $T = \text{const.}$

⇒ Isotherme Zustandsänderungen haben eine geringe technische Bedeutung.

Isochore Zustandsänderung

Die Zustandsänderung verläuft bei konstantem Volumen $V = \text{const.}$

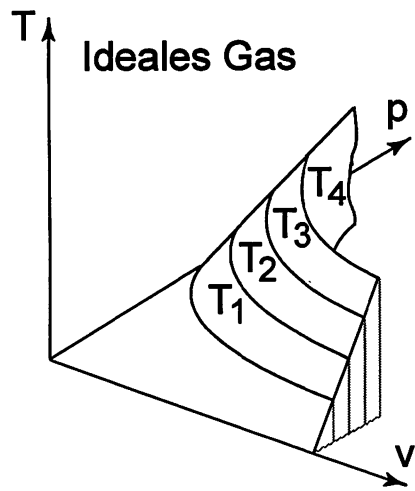
⇒ falls auch die Masse konstant bleibt $m = \text{const.}$, so ist auch

- das spezifische Volumen konstant $v = \frac{V}{m} = \text{const.}$
- bzw. die Dichte konstant $\varrho = \frac{1}{v} = \text{const.}$

Adiabater Prozess

Es wird keine Wärme zu oder abgeführt.

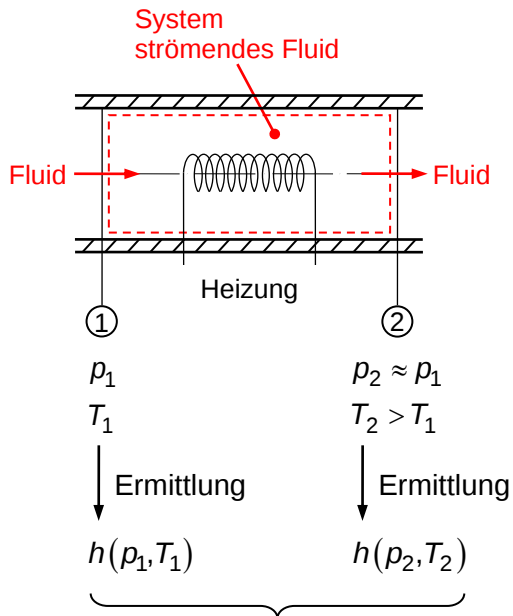
- ⇒ bei guter Isolierung eines Systems
- ⇒ falls die anderen dem System zu- und/oder abgeführten Energien viel größer sind als die Wärme, die zu- oder abgeführt wird.



Differenzen von Zustandsgrößen bei einer Zustandsänderung ①→②

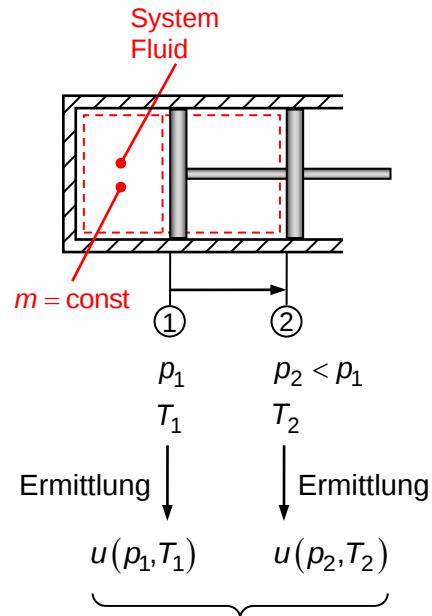
Veranschaulichung der Differenzenbildung

Offenes System



Differenz der spezifischen Enthalpie

Geschlossenes System



Differenz der spezifischen inneren Energie

Berechnung:

$$h_2 - h_1 = h(p_2, T_2) - h(p_1, T_1)$$

Wasserdampf-
tafel,
SW, Tab. 8 für Luft

damit

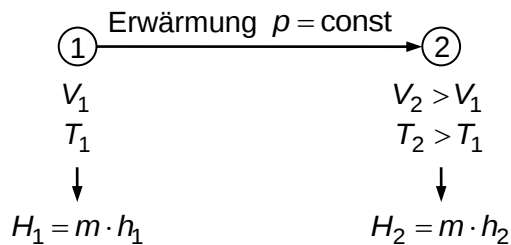
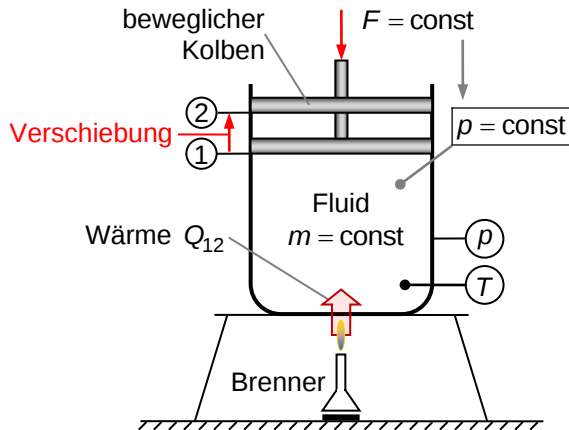
$$u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - [p_2 \cdot v(p_2, T_2) - p_1 \cdot v(p_1, T_1)]$$

Wasserdampf-
tafel,
SW, Tab. 6 für Luft

Die Differenz von Zustandsgrößen für eine Zustandsänderung ①→②
wird wie folgt gebildet:
Wert des Endzustands ② minus Wert des Anfangszustands ①

Wärmekapazitäten (WK)

Isobare Wärmekapazität C_p
gemessen bei konstantem Druck



$$C_{pm} \Big|_1^2 = \frac{Q_{12}}{T_2 - T_1} \Big|_{p=\text{const}} = \frac{H_2 - H_1}{T_2 - T_1} \Big|_{p=\text{const}}$$

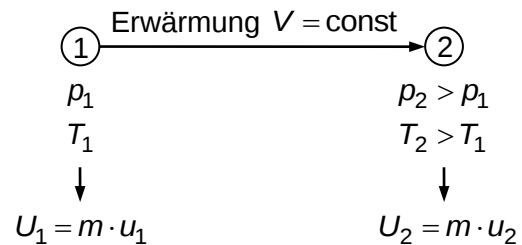
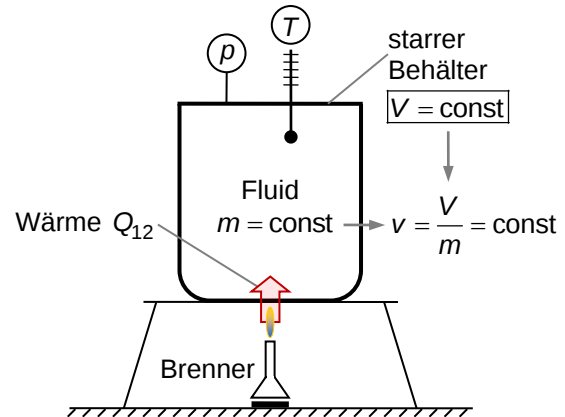
$| : m$

$$c_{pm} \Big|_1^2 = \frac{h_2 - h_1}{T_2 - T_1} \Big|_{p=\text{const}} = \frac{\Delta h}{\Delta T} \Big|_{p=\text{const}}$$

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

↑ spezif. isobare Wärmekapazität c_p

Isochore Wärmekapazität C_v
gemessen bei konstantem Volumen



$$C_{vm} \Big|_1^2 = \frac{Q_{12}}{T_2 - T_1} \Big|_{V=\text{const}} = \frac{U_2 - U_1}{T_2 - T_1} \Big|_{V=\text{const}}$$

$| : m$

$$c_{vm} \Big|_1^2 = \frac{u_2 - u_1}{T_2 - T_1} \Big|_{v=\text{const}} = \frac{\Delta u}{\Delta T} \Big|_{v=\text{const}}$$

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

↑ spezif. isochore Wärmekapazität c_v

Die spezifische isobare Wärmekapazität

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

↳ entspricht der Wärme, die 1 kg Fluid bei gegebenem p und T zugeführt oder abgeführt werden muss, um es bei konstantem Druck um 1 K zu erwärmen oder abzukühlen.



$$c_p = f(p, T)$$

↗ Werte für Wasser
in Wasserdampf tabel

↗ Werte für Luft in SW Tab. 7

Die spezifische isochore Wärmekapazität

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

↳ entspricht der Wärme, die 1 kg Fluid bei gegebenem p und T zugeführt oder abgeführt werden muss, um es bei konstantem Volumen um 1 K zu erwärmen oder abzukühlen.



$$c_v = f(p, T)$$

↗ Werte für Wasser
in International Steam Tables

3.3 Entropiedifferenzen bei Zustandsänderungen

3.3.1 Reale Fluide

Die Berechnung der spezifischen Entropiedifferenzen $s_2 - s_1$ realer Fluide für Zustandsänderungen ①→② erfolgt mit Tabellen oder Gleichungen $s = f(p, T)$.

- ⇒ Für Wasser können die Werte aus der Wasserdampf tabel (WDT) entnommen werden.
 - ⇒ Für Luft können die Werte aus der Tabelle 9 der Stoffwertsammlung (SW) entnommen werden.
 - ⇒ Des Weiteren können die Werte mit den Stoffwert-Programmbibliotheken des Fachgebietes Technische Thermodynamik
 - auf Taschenrechnern von Casio, Texas Instruments und HP
 - auf iPhone, iPad und iPod touch
 - auf Smart Phones und Tablet PCs mit Android
 - in Excel, Mathcad und MATLAB
 - online auf der Website www.technische-thermodynamik.de mit dem "Zittau's Fluid Property Calculator"
 ermittelt werden.
- Der Download ist auf der Website www.technische-thermodynamik.de unter "Lehre" und darin unter "Downloads für Studierende" möglich.

Entropiedifferenz:

$$s_2 - s_1 = s(p_2, T_2) - s(p_1, T_1)$$


 Wasserdampf tabel,
SW, Tab. 9 für Luft

3.3.2 Gase im Idealgaszustand

Die Berechnung der spezifischen Entropiedifferenzen $s_2 - s_1$ idealer Gase (ig) für Zustandsänderungen ①→② kann nach den folgenden Methoden erfolgen.

a) Mit Gleichungen oder Werten für den temperaturabhängigen Anteil der spezifischen Entropie $s_T^{\text{ig}} = f(T)$

In Abhängigkeit vom Druck p und der Temperatur T :

$$s_2 - s_1 = s_T^{\text{ig}}(T_2) - s_T^{\text{ig}}(T_1) - R \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad (3/4)$$

↖ ↗
aus SW, Tab. 3

In Abhängigkeit von der Temperatur T und dem spezifischen Volumen v :

$$s_2 - s_1 = s_T^{\text{ig}}(T_2) - s_T^{\text{ig}}(T_1) - R \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

↖ ↗
aus SW, Tab. 3

b) Mit Gleichungen für die spezifische isobare Wärmekapazität $c_p^{\text{ig}} = f(T)$

In Abhängigkeit vom Druck p und der Temperatur T :

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p^{\text{ig}}(T)}{T} dT - R \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad (3/5)$$

In Abhängigkeit von der Temperatur T und dem spezifischen Volumen v :

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v^{\text{ig}}(T)}{T} dT + R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

mit:

$$c_v^{\text{ig}}(T) = c_p^{\text{ig}}(T) - R$$

c) Mit Mittelwerten $c_{vm}^{ig} = \text{const}$ und $c_{pm}^{ig} = \text{const}$ zwischen T_1 und T_2

In Abhängigkeit von Druck p und Temperatur T , durch Integration von (3/5):

$$s_2 - s_1 = c_{pm}^{ig} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad (3/6)$$

Bestimmung siehe Fälle c1) oder c2)

In Abhängigkeit von der Temperatur T und dem spezifischen Volumen v :

$$c_{pm}^{ig} = c_{vm}^{ig} + R, \quad p_1 = \frac{R \cdot T_1}{v_1}, \quad p_2 = \frac{R \cdot T_2}{v_2}$$

führt zu

$$s_2 - s_1 = c_{vm}^{ig} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

Bestimmung siehe Fälle c1) oder c2)

c1) Näherung: Mittelwertbildung für c_{pm}^{ig} und c_{vm}^{ig} mit Werten $c_p^{ig} = f(T)$ für kleine Temperaturdifferenzen ($T_2 - T_1$)

$$c_{pm}^{ig} = \frac{1}{2} \cdot [c_p^{ig}(T_1) + c_p^{ig}(T_2)]$$

aus SW, Tab. 3

damit

$$c_{vm}^{ig} = c_{pm}^{ig} - R$$

c2) Weitergehende Näherung: Mittelwertbildung für c_{pm}^{ig} und c_{vm}^{ig} mit Festwerten für den Isentropenexponenten $\kappa = \text{const}$

$$c_{pm}^{ig} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R$$

$$c_{vm}^{ig} = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot R$$

Für mehratomige Gase geht die Temperaturabhängigkeit verloren

Näherungen für Festwerte für κ :

Einatomige ideale Gase (Ar, He, Xe)	$\kappa = 1,667$	(exakt)
Zweiatomige ideale Gase (N ₂ , O ₂ , Luft, CO...)	$\kappa = 1,4$	(gute Näherung)
Dreiatomige ideale Gase (SO ₂ , CO ₂ , H ₂ O-Dampf ...)	$\kappa = 1,3$	(grobe Näherung)

3.3.3 Inkompressible Flüssigkeiten und Festkörper

Die Berechnung der spezifischen Entropiedifferenzen $s_2 - s_1$ von inkompressiblen Flüssigkeiten (if) und Festkörpern für Zustandsänderungen ①→② kann nach den folgenden Methoden erfolgen.

- a) Mit Gleichungen oder Werten für den temperaturabhängigen Anteil der spezifischen Entropie $s_T^{\text{if}} = f(T)$

$$s_2 - s_1 = s_T^{\text{if}}(T_2) - s_T^{\text{if}}(T_1) - \frac{dv^{\text{if}}}{dT}(T_2) \cdot (p_2 - p_1) \quad (3/7)$$

aus SW, Tab. 4 für Wasser Berechnung siehe folgende Seite

- b) Mit Gleichungen für die spezifische isobare Wärmekapazität $c_p^{\text{ig}} = f(T)$

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p^{\text{if}}(T)}{T} dT - \frac{dv^{\text{if}}}{dT}(T_2) \cdot (p_2 - p_1) \quad (3/8)$$

Gleichungen
aus Literatur

Berechnung siehe folgende Seite

- c) Mit Mittelwerten $c_{pm}^{\text{if}} = \text{const}$ zwischen T_1 und T_2

Integration von (3/8):

$$s_2 - s_1 = c_{pm}^{\text{if}} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - \frac{dv^{\text{if}}}{dT}(T_2) \cdot (p_2 - p_1) \quad (3/9)$$

Berechnung siehe folgende Seite

Mittelwertbildung für c_{pm}^{if} mit Werten $c_p^{\text{if}} = f(T)$:

Näherung für kleine Temperaturdifferenzen $(T_2 - T_1)$

$$c_{pm}^{\text{if}} \approx \frac{1}{2} \cdot [c_p^{\text{if}}(T_1) + c_p^{\text{if}}(T_2)]$$

aus SW, Tab. 4 für Wasser

Berechnung des Differentialquotienten $\frac{dv^{if}}{dT}(T_2)$:

- Mit Gleichungen oder Werten für den isobaren Volumenausdehnungskoeffizienten $\beta^{if} = f(T)$ und die Dichte $\rho^{if} = f(T)$

$$\frac{dv^{if}}{dT}(T_2) = \frac{\beta^{if}(T_2)}{\rho^{if}(T_2)}$$



aus SW, Tab. 4 für Wasser

- Näherung als Differenzenquotient, falls keine Werte $\beta^{if} = f(T)$ vorliegen

$$\frac{dv^{if}}{dT}(T_2) \cong \frac{\left[\frac{1}{\rho^{if}(T_2 + \delta T)} - \frac{1}{\rho^{if}(T_2 - \delta T)} \right]}{[(T_2 + \delta T) - (T_2 - \delta T)]}$$

mit $\delta T = 0,1 \dots 1 \text{ K}$,

oder benachbarte Tabellenwerte zu T_2 benutzen, beispielsweise in SW, Tab. 4

für $T_2 = 292,15 \text{ K}$ (19°C) folgt $T_2 + \delta T = 293,15 \text{ K}$ (20°C), $T_2 - \delta T = 291,15 \text{ K}$ (18°C)

- Vereinfachte Näherung

$$\frac{dv^{if}}{dT}(T_2) \cong \frac{\left[\frac{1}{\rho^{if}(T_2)} - \frac{1}{\rho^{if}(T_1)} \right]}{(T_2 - T_1)}$$

mit $\rho^{if}(T_2)$ und $\rho^{if}(T_1)$ aus SW, Tab. 4 für Wasser

Sonderfall: $T_2 = T_1 = T = \text{const}$

$$s_2 - s_1 = -\frac{dv^{if}}{dT}(T) \cdot (p_2 - p_1) \quad (3/10)$$

Berechnung des Differentialquotienten $\frac{dv^{if}}{dT}(T)$:

mit $\beta^{if} = f(T)$

$$\frac{dv^{if}}{dT}(T) = \frac{\beta^{if}(T)}{\rho^{if}(T)}$$



aus SW, Tab. 4 für Wasser

als Differenzenquotient (Näherung)

$$\frac{dv^{if}}{dT}(T) \approx \frac{\left[\frac{1}{\rho^{if}(T + \delta T)} - \frac{1}{\rho^{if}(T - \delta T)} \right]}{(T + \delta T) - (T - \delta T)}$$

mit $\delta T = 0,1 \dots 1 \text{ K}$,

bzw. $(T + \delta T)$ und $(T - \delta T)$ als benachbarte Tabellenwerte zu T

Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{c \cdot l_{\text{char}}}{\nu} \quad (5/24)$$

Verhältnis von: $\frac{\text{Trägheitskraft des strömenden Fluids}}{\text{Reibungskraft}}$

Prandtl-Zahl

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (5/25)$$

Verhältnis von: $\frac{\text{Impulstransport}}{\text{Wärmetransport}}$

Grashof-Zahl

$$Gr = \frac{1}{\nu^2} \cdot (\beta \cdot g \cdot l_{\text{char}}^3 \cdot \Delta \vartheta_\alpha) \quad (5/26)$$

Beschreibung freier Konvektion
mit $\beta = \alpha_v$

Peclet-Zahl

$$Pe = Re \cdot Pr$$

Verhältnis von: $\frac{\text{Konvektiver Wärmetransport}}{\text{Wärmeleitung}}$

Rayleigh-Zahl

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Verhältnis von: $\frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Schwerkraft}}$

Archimedes-Zahl

$$Ar = \frac{Gr}{Re^2}$$

Verhältnis von: $\frac{\text{Auftriebskraft}}{\text{Trägheitskraft}}$

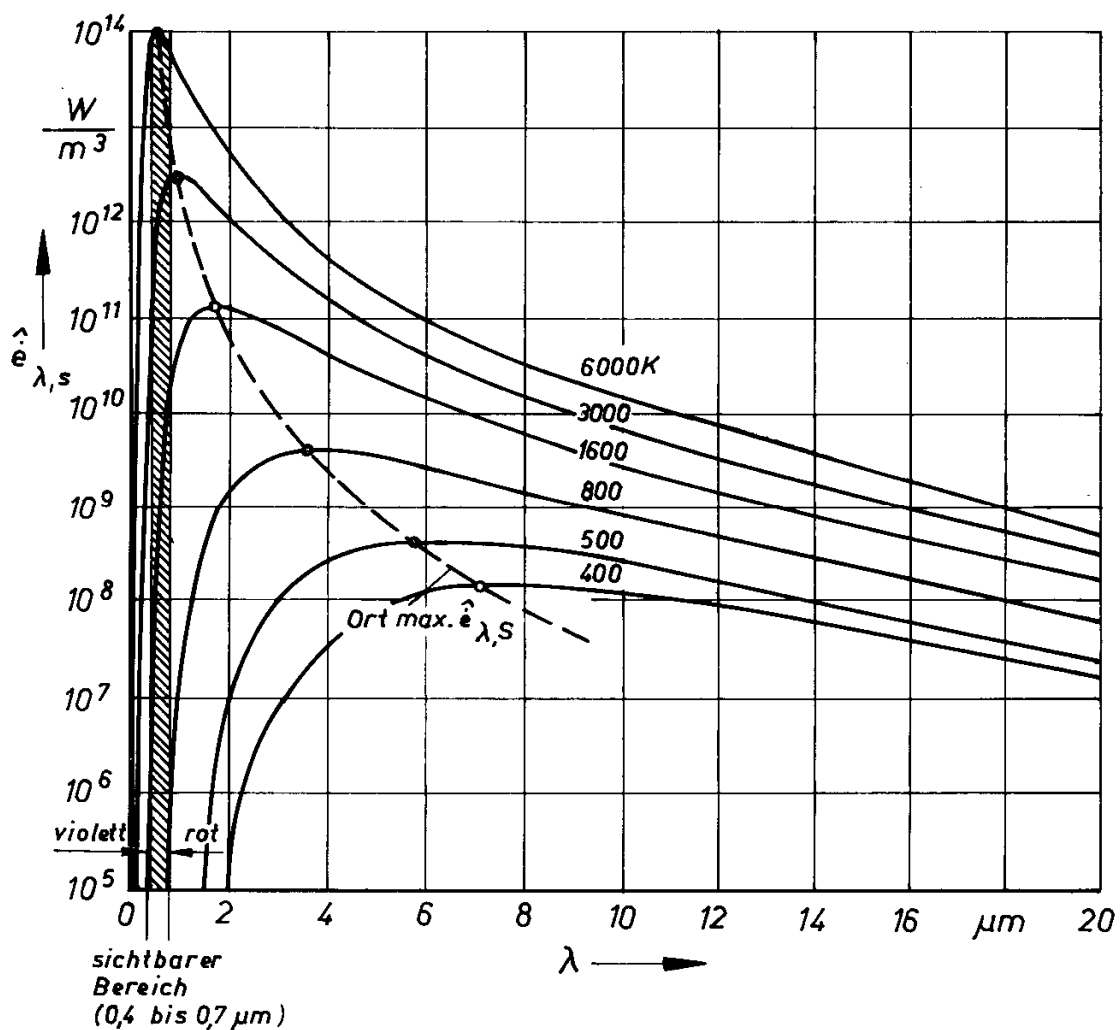
ϑ_{st} – Stoffwerttemperatur, von der ausgehend Stoffwerte für λ , η , ν , a und c_p ermittelt werden
(Ausnahme: β bei ϑ_F)

Berechnung von α über sogen. Nußelt-Gleichungen: $\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{l_{\text{char}}}$

Strahlungsarten

Strahlung	Wellenlänge λ
Höhenstrahlung	$< 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}$
Gammastrahlung	$0,5 \cdot 10^{-12} \dots 1 \cdot 10^{-11} \text{ m}$
Röntgenstrahlung	$1 \cdot 10^{-11} \dots 2 \cdot 10^{-11} \text{ m}$
UV-Strahlung	$2 \cdot 10^{-11} \dots 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
Licht	$4 \cdot 10^{-7} \dots 7 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
Infrarot-Strahlung	$7 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
Rundfunk (Hertzsche Wellen)	$1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^4 \text{ m}$

Strahlungsgesetz von PLANCK



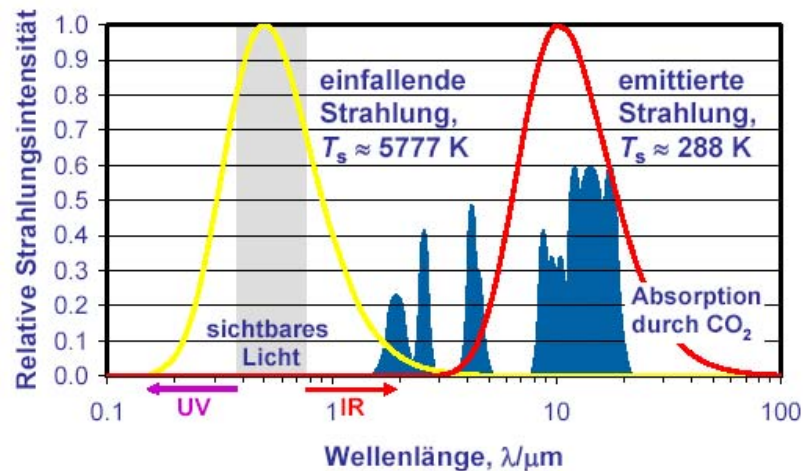
Emittierte Strahlungsenergieintensitäten des Schwarzen Strahlers.

Entnommen aus: Elsner, N.; Fischer, S.; Huhn, J.: Grundlagen der Technischen Thermodynamik, Band 2 Wärmeübertragung, 8. Auflage. Akademie Verlag (1993).

Die Strahlungsbilanz



- Im Gleichgewicht strahlt die Erde so viel Wärme ins Weltall ab, wie sie von der Sonne absorbiert



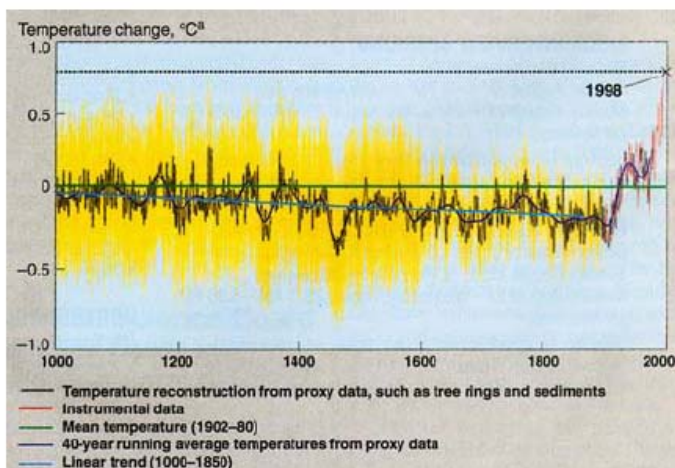
- CO₂ absorbiert bevorzugt die emittierte Infrarotstrahlung ⇒ **Treibhauseffekt** durch steigende CO₂-Konzentration in der Atmosphäre

Roland Span

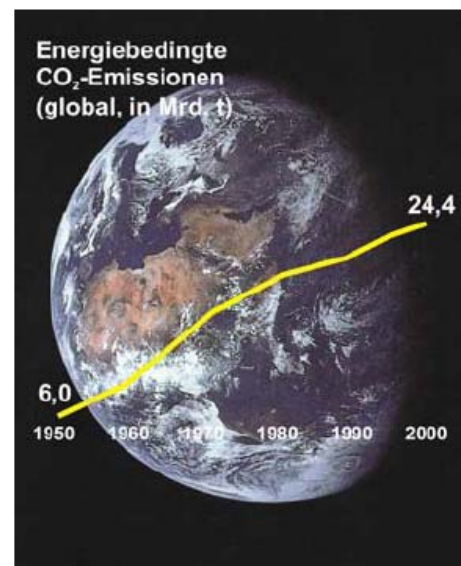


CO₂ und Treibhauseffekt

- Verschiedene Datenquellen zeigen, dass sich die Erdatmosphäre seit etwa 100 Jahren deutlich erwärmt
- Die Nutzung fossiler Energieträger hat zu einem Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration geführt

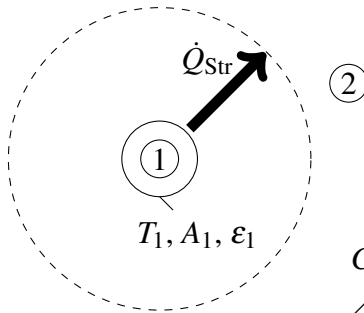


Quelle: Geophys. Res. Lett., 26, 759 (1999)



5.4.4 Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung

T_2 im unendl. großen Raum



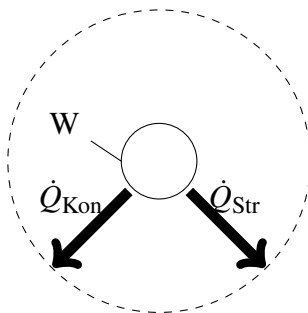
$$\dot{Q}_{\text{Str}} = \alpha_{\text{Str}} \cdot A_1 \cdot (T_1 - T_2) = C_{12} \cdot A_1 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

$$\alpha_{\text{Str}} = C_{12} \cdot \frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{T_1 - T_2} \quad (5/77)$$

$C_{12} = C_1 = \varepsilon_1 \cdot C_S$ bei unendlich großer Umgebung
 ↗ FS 15/2

5.4.5 Wärmestrom durch Strahlung und Konvektion

Umgebung mit Fluid F



$$\dot{Q}_{\text{ges}} = \dot{Q}_{\text{Kon}} + \dot{Q}_{\text{Str}}$$

$$\dot{Q}_{\text{Kon}} = \alpha_{\text{Kon}} \cdot A_W \cdot (T_W - T_F)$$

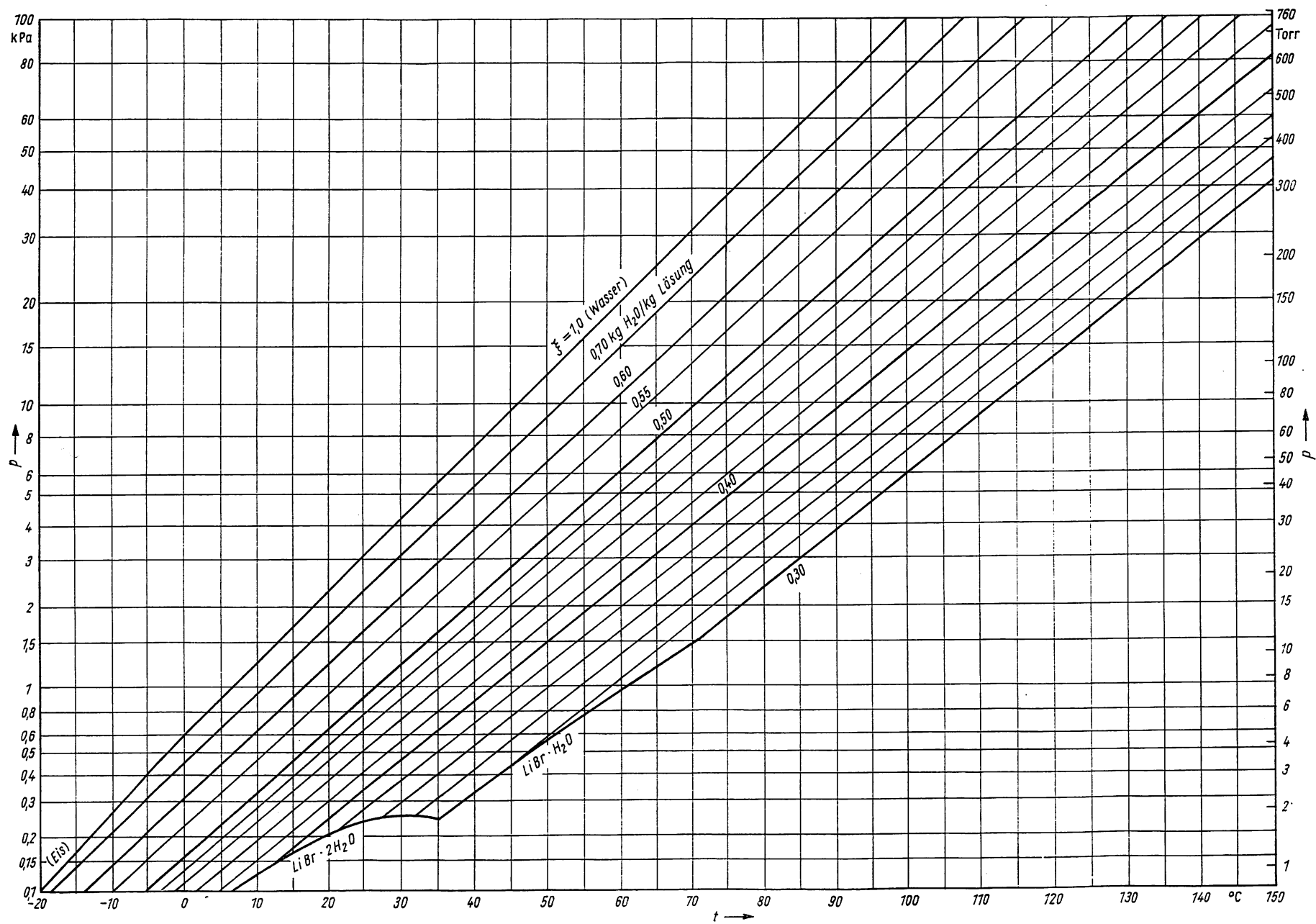
$\dot{Q}_{\text{Str}}$ gemäß Gl. oberhalb 5/77

$$\dot{Q}_{\text{ges}} = \underbrace{(\alpha_{\text{Kon}} + \alpha_{\text{Str}})}_{\alpha_{\text{ges}}} \cdot A_W \cdot (T_W - T_F) \quad (5/78)$$

Gesamt-WÜG-Koeffizient α_{ges} → wird oft in DIN-Vorschriften angegeben

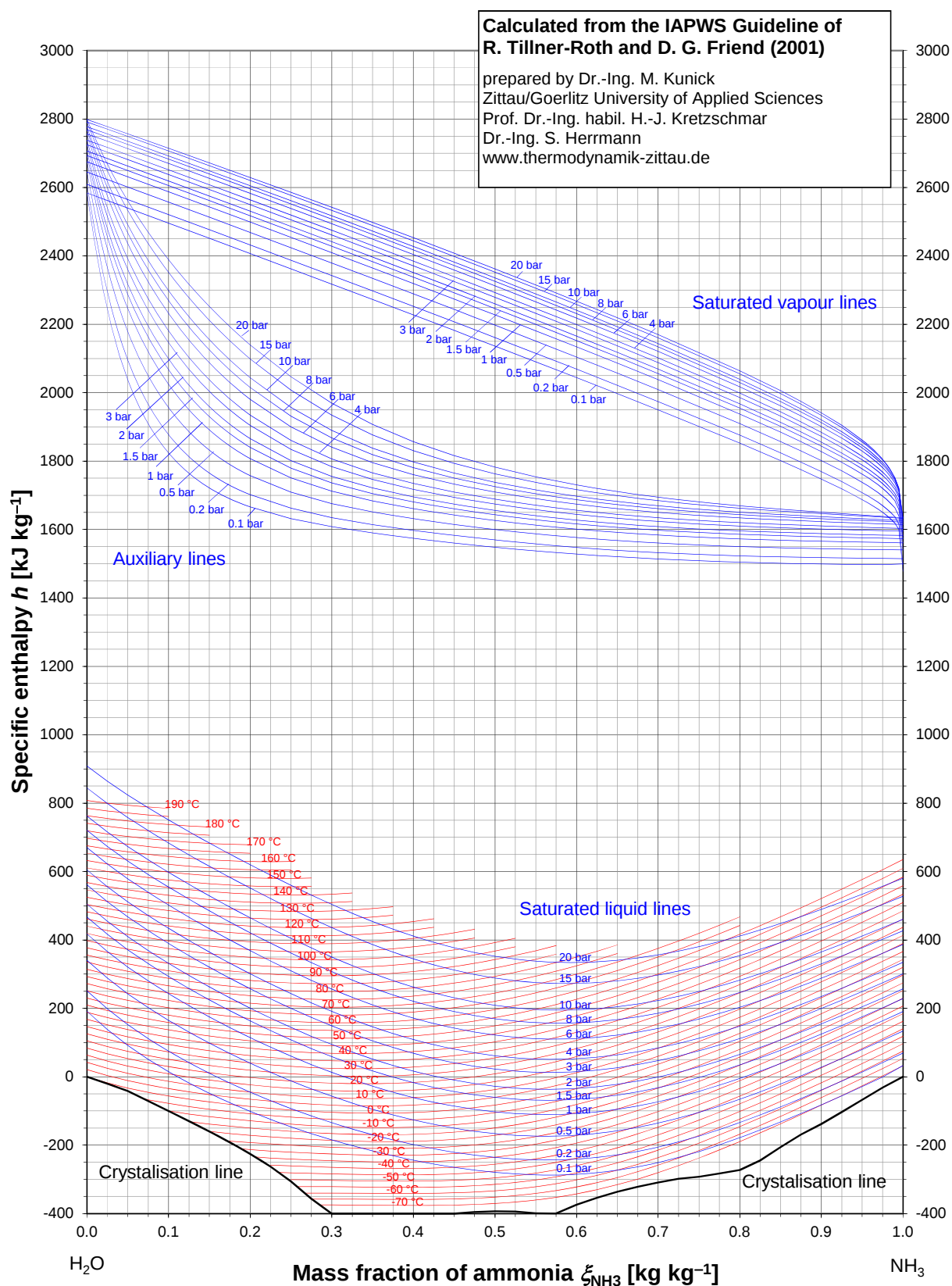
$$\alpha_{\text{ges}} = \alpha_{\text{Str}} + \alpha_{\text{Kon}} \quad (5/79)$$

mit α_{Str} gemäß Gl. 5/77 und α_{Kon} gemäß Gl. 5/23 (über Nu -Gleichungen)



Beilagediagramm 5. $\log p, 1/T$ -Diagramm für $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ -Gemische, bearbeitet nach [5.9]

h - ξ Diagram for Ammonia / Water Mixtures



Reference states: NH₃: $h' = 2.333$ kJ/kg at triple point temperature $t_t = -77.655$ °C
H₂O: $h' = 0.00061178$ kJ/kg at triple point temperature $t_t = 0.01$ °C

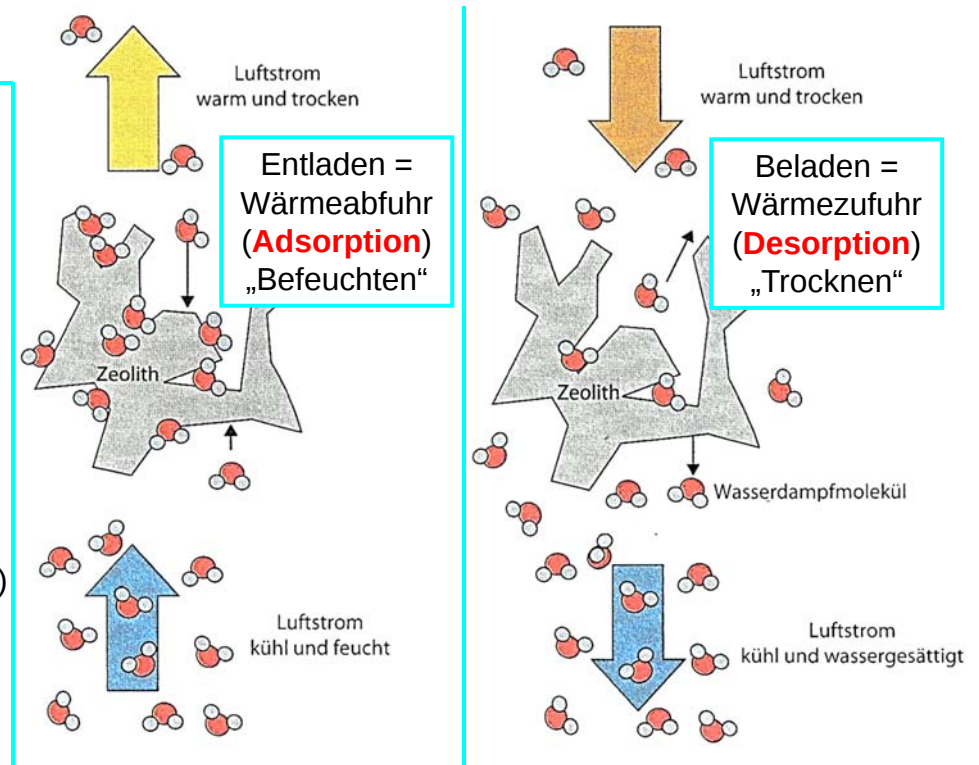
Adsorptionsspeicher

Beladung (mit Wärme):

- Abspaltung (Desorption) der Wasser-Moleküle von der Zeolith-Oberfläche
- Wärmeträger Luft
- Wasserabtransport durch Wärmeträger (feuchte Luft)
- „Trocknen“ des Zeoliths

Entladung:

- Anlagerung (Adsorption) der Wasser-Moleküle (Luftfeuchte) an der Zeolith-Oberfläche
- Wärmeabgabe an Luft (Wärmeträger)
- „Befeuchten“ des Zeoliths



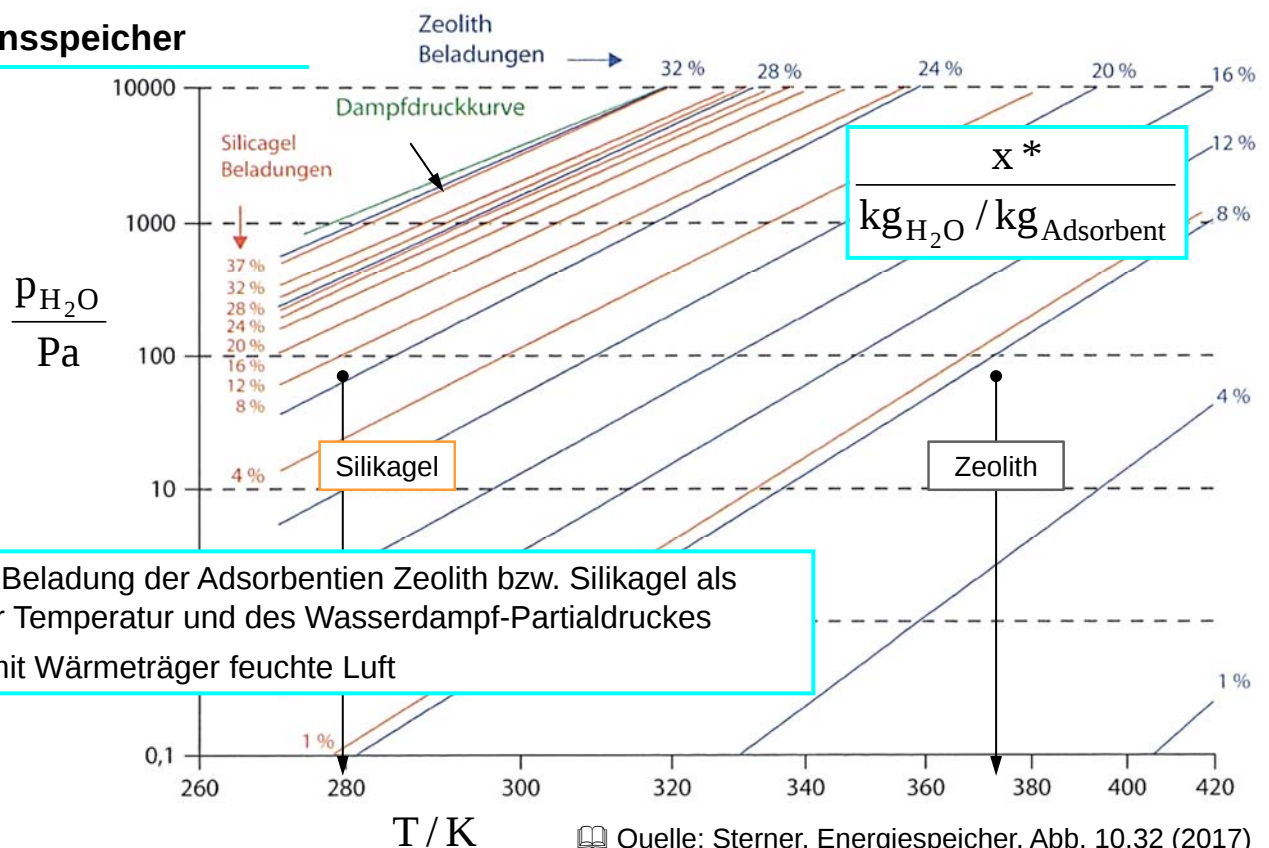
Ent- bzw. Beladen eines Sorptionsspeichers (Zeolith/Wasser)

Quelle: Sterner, Energiespeicher, Abb. 10.36 (2017)

Thermische Speicher

Sorptive und thermochemische Speicher

Adsorptionsspeicher



Quelle: Sterner, Energiespeicher, Abb. 10.32 (2017)