

En-Lab-FS15

ENergie - LABor

Eine Entdeckungsreise in der Energietechnik
Theoretische Grundlagen

U.C. Müller, S. Deniz, J. Lodewyks, E. Casartelli

Gliederung

1. Einführung in das En-Lab
2. Organisation / Administration
3. Einführung Erhaltungssätze und Bilanzierung
 - Systeme, Systemgrenzen und Kontrollvolumen
 - Erhaltungssätze
 - Massenerhaltung
 - Energieerhaltung
 - Stöchiometrie
4. Beispiele zur Anwendung der Erhaltungssätze
5. Problemlösungsmethodik mit Anwendungsbeispielen
6. Qualität und Größenordnungen von Energien
7. Einführung in die Messtechnik

1. Einführung in das En-Lab

Hintergrund/Idee/Ziele

- Verbindung von Praxis und Theorie, ausgehend von Experimenten
- Entdeckungsreise, d.h. ausprobieren, beobachten, keine Angst vor Fehlern
- Probleme systematisch angehen
- Qualitativ vs. Quantitativ
- Beispiele sind nur exemplarisch und entsprechen nicht immer dem neusten Stand der Technik

Qualitativ vs. quantitativ

- Physikalisch denken => Fragen stellen, ohne Hemmungen
- Überblick, nicht Tiefe (spez. Kenntnisse kommen später)
- Formeln sekundär
- Größenordnungen kennen, abschätzen

2. Organisation / Administration

Organisatorisches

- Vorgehensweise
 - Theorie: 2 Wo, am Anfang
 - Postenlauf (PL): 5 mal, 1 pro Wo während 5 Wo, jeweils ein Laborbericht
 - Theorie Zusammenfassung, Vergleich der PL, Übungen (2 Wo)
 - PL Vertiefung (PLV): 2 mal je 2 Wo, inkl. Bericht
 - Präsentationen: **Alle 1. PLV** werden am Schluss präsentiert
- „Testat“:
 - Vorbereitung für alle PL und PLV
 - Aktive Teilnahme im Labor
 - Laborberichte und Präsentation
- Prüfung
 - Situationen/Systeme analysieren
 - Einheiten konvertieren, Grössenordnungen abschätzen
 - Spezifische Fragen zu eigenen Postenläufe
 - Bewertung: A, B, C, D, E, F
- Fragen: ernesto.casartelli@hslu.ch, ulfchristian.mueller@hslu.ch,
sabri.deniz@hslu.ch

Zeitplan Mittwoch: 32 Studierenden => 8 Gruppen

Grundlagen	16. Sep
Grundlagen	23. Sep
Postenlauf	30. Sep
Postenlauf	07. Okt
Postenlauf	14. Okt
Postenlauf	21. Okt
Postenlauf	28. Okt
Wrap-up GL, Übungen	04. Nov
Wrap-up GL, Übungen	11. Nov
Postenlauf lang 1	18. Nov
Postenlauf lang 1	25. Nov
Postenlauf lang 2	02. Dez
Postenlauf lang 2	09. Dez
Präsentation PLV 1	16. Dez

Zeitplan Donnerstag : 22 Studierenden => 6 Gruppen

Grundlagen	17. Sep
Grundlagen	24. Sep
Postenlauf	01. Okt
Postenlauf	08. Okt
Postenlauf	15. Okt
Postenlauf	22. Okt
Postenlauf	29. Okt
Wrap-up GL, Übungen	05. Nov
Wrap-up GL, Übungen	12. Nov
Postenlauf lang 1	19. Nov
Postenlauf lang 1	26. Nov
Postenlauf lang 2	03. Dez
Postenlauf lang 2	10. Dez
Präsentation PL V1	17. Dez

Laborarbeiten / Experimente

Postenläufe (je 1 SW)

1. Brennstoffzelle (BZ)
2. Windrad (Propeller)
3. BHKW
4. Vietnam Turbine
5. Wärmepumpe (WP)
6. Pelton Turbine
7. Fusspumpe
8. Solarthermie
9. Rotating-Stall Verdichter

Postenläufe Vertiefung (2 x 2 SW)

1. Eindampfanlage
2. Windrad (Savonius)
3. BHKW
4. Kaplan Turbine
5. Wärmepumpe (WP)
6. Pelton Turbine
7. Smart Motor
8. Solarthermie
9. Durchflussmessung

3. Einführung Erhaltungssätze und Bilanzierung

- Systeme, Systemgrenzen und Kontrollvolumen
- Erhaltungssätze
- Massenerhaltung
- Energieerhaltung
- Stöchiometrie

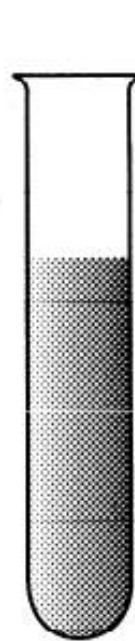
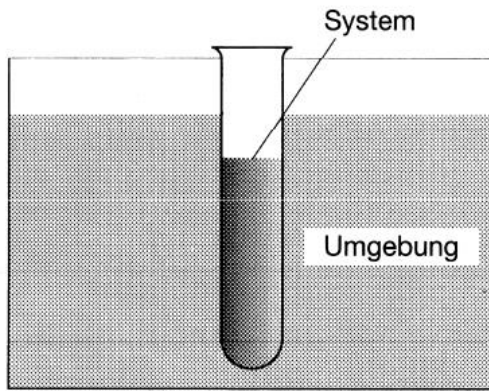
Thermodynamische Systeme

Man unterscheidet zwischen offenen, geschlossenen und abgeschlossenen Systemen.

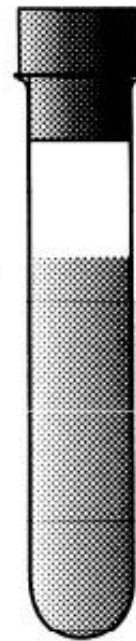
- a) **Offene Systeme:** Stoff – und Energieaustausch mit der Umgebung möglich
- b) **Geschlossene Systeme:** Energie- aber kein Stoffaustausch mit der Umgebung möglich
- c) **Abgeschlossenes System:** Weder Stoff- noch Energieaustausch mit Umgebung möglich

Thermodynamische Systeme

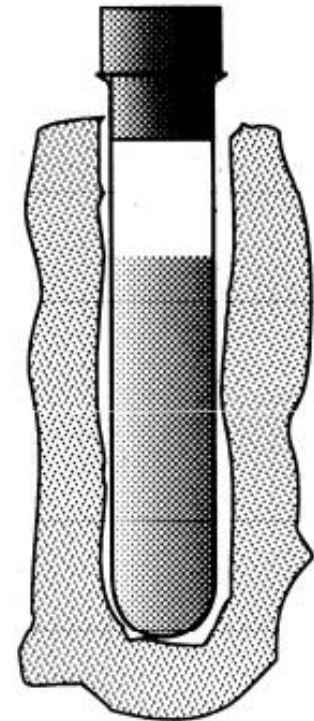
Beispiel:



(offen)

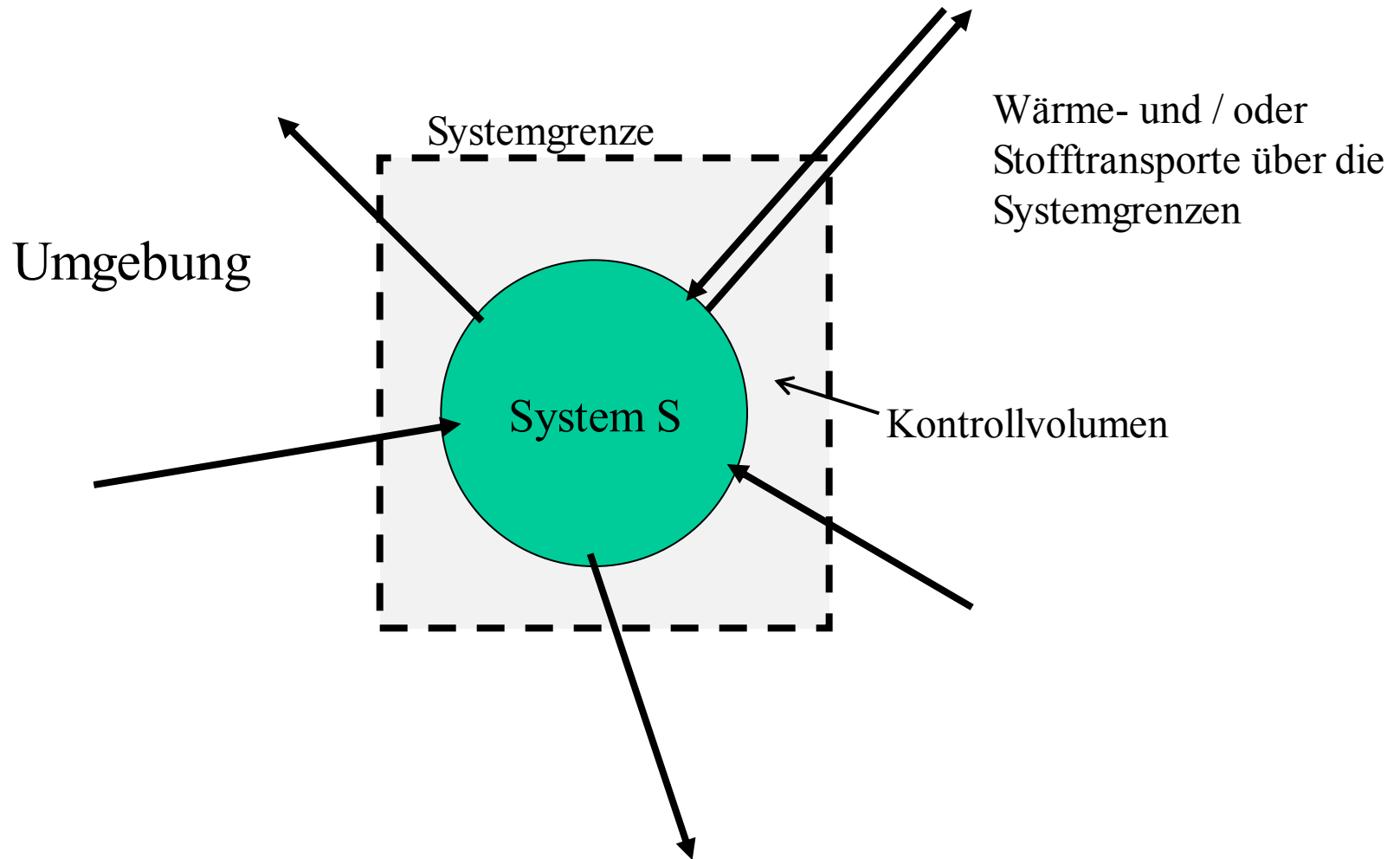


(geschlossen)



(abgeschlossen)

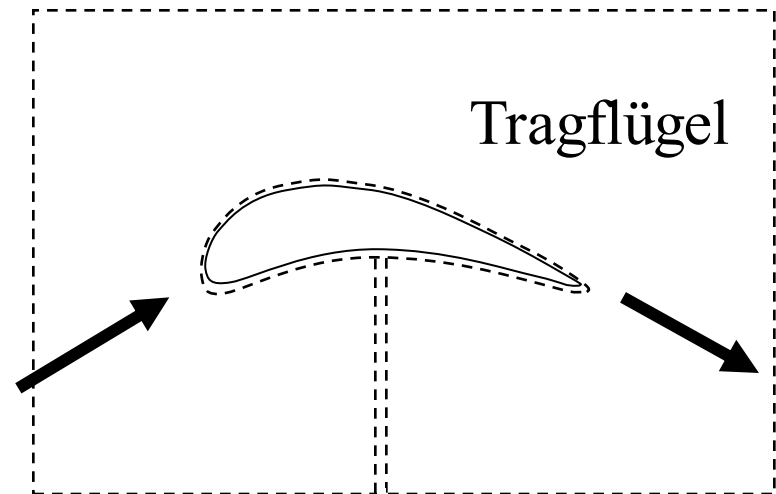
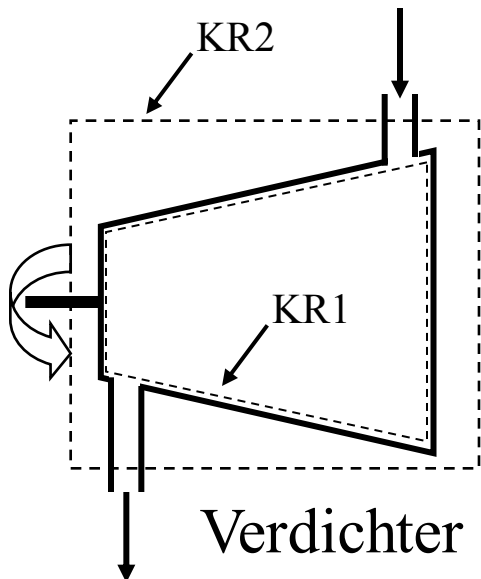
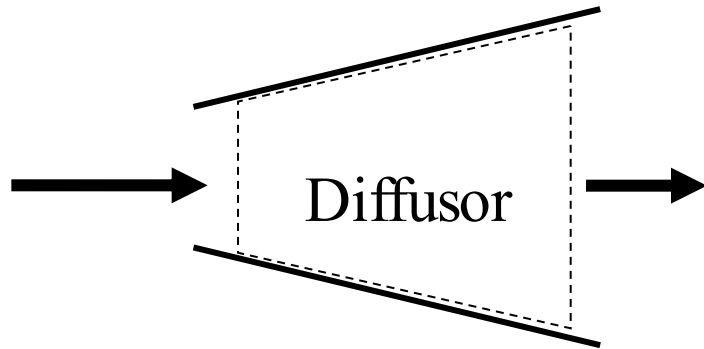
Systemgrenzen und Kontrollvolumen



Systemgrenzen und Kontrollvolumen

- Die Grenzfläche zwischen Kontrollraum (= Kontrollvolumen = System) und Umgebung ist die **Systemgrenze**
- Definition von Kontrollraum (System) ist „willkürlich“
- Systemgrenze kann real oder fiktiv, fix oder beweglich sein
- Funktion der Systemgrenze: Bilanzierung mit Umgebung (globale Betrachtung)
- Eigenschaften der Systemgrenze:
 - hat keine Masse
 - kann keine Energie speichern
 - Kräfte wirken auf Systemgrenze
 - Ströme/Flüsse fließen durch Systemgrenze
- Die Kunst besteht darin, die Systemgrenze so zu legen, dass die Berechnungen möglichst einfach wird
 - dies benötigt Intuition und Übung

Systemgrenzen und Kontrollvolumen



Erhaltungssätze

Erhaltungssätze

zugehörige Bilanzierungen der Flüsse

Massenerhaltung

Bilanzierung der Massenströme

Energieerhaltung

Bilanzierung der Energieströme

Impulssatzerhaltung

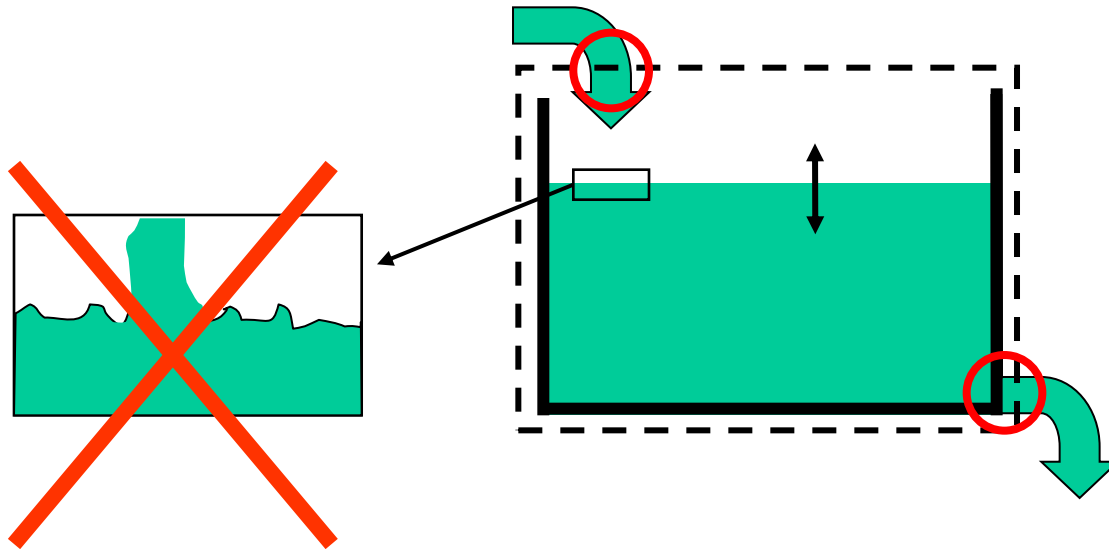
Bilanzierung der Impulsströme / Kräfte

Drallerhaltung

Bilanzierung der Drallströme / Momente

Erhaltungssätze

- Erhaltungssätze/Bilanzen können zum Beispiel für Masse, Energie, Impuls und Drall formuliert werden



- Detaillierte Kenntnisse nur am System-Rand nötig

Erhaltungssätze

- Erhaltungssätze/Bilanzen können für Masse, Energie, Impuls und Drall formuliert werden
- Detaillierte Kenntnisse nur am System-Rand nötig
- Als Konvention für Vorzeichen gilt:
 - Eintritt in System: positiv
 - Austritt aus System: negativ
- Für eine Grösse X in einem System gilt allgemein:

$$\Delta X = \sum X_{Ein} + \sum X_{Aus}$$

positiv negativ

Stationäre / Instationäre Prozesse

- **Stationär:** keine lokale zeitliche Änderung der statistischen Kenngrößen (Mittelwert, Standardabweichung,...)
- **Instationär:** lokale und/oder globale Änderung der statistischen Kenngrößen
- **Quasi-stationär:** lokale zeitliche Änderungen sind klein bezogen auf globale Zeitmassstab.
- Bilanzen: „Änderung“ bzw. „Momentane Änderung“ = 0
- Achtung: Ob ein Prozess stationär oder instationär ist, hängt auch von der Definition der Systemgrenze ab

Erhaltungssätze (2)

- Die Konvention erlaubt die Verallgemeinerung der Prozedur, inkl. Standardisierung und Automatisierung
- In der Praxis wendet der Ingenieur, je nach Feld, auch andere Methoden
- In einem stationären System gilt (mit pos/neg Konvention):

$$\Delta X = \underbrace{\sum X_{Ein}}_{> 0} + \underbrace{\sum X_{Aus}}_{< 0} = 0$$

- Man kann auch alle Grössen als Positiv betrachten und sie auf die «richtigen» Seite in der Bilanzierung einsetzen (alles «Ein» links, alles «Aus» rechts)

$$\sum X_{Ein} = \sum X_{Aus}$$

- Es sind «nur» Betrachtungsweisen. Am Schluss muss die Bilanz stimmen, d.h. Mathematik stimmt mit der Physik überein!

Stationäre / Instationäre Prozesse

Übung: Überlegen Sie sich je ein praktisches Beispiel zu einen stationären, instationären und quasistationären Prozess.

Massenerhaltung

Massenbilanz:

$$\Delta m_{\text{System}} = \sum_{\text{Ein}} m_{\text{Ein}} - \sum_{\text{Aus}} m_{\text{Aus}}$$

Massenstrombilanz:

$$\frac{\Delta m_{\text{System}}}{\Delta t} = \sum_{\text{Ein}} \dot{m}_{\text{Ein}} - \sum_{\text{Aus}} \dot{m}_{\text{Aus}}$$

Stationär:

$$0 = \sum_{\text{Ein}} \dot{m}_{\text{Ein}} - \sum_{\text{Aus}} \dot{m}_{\text{Aus}}$$

Volumenstrom:

$$\dot{V} = c_n \cdot A$$

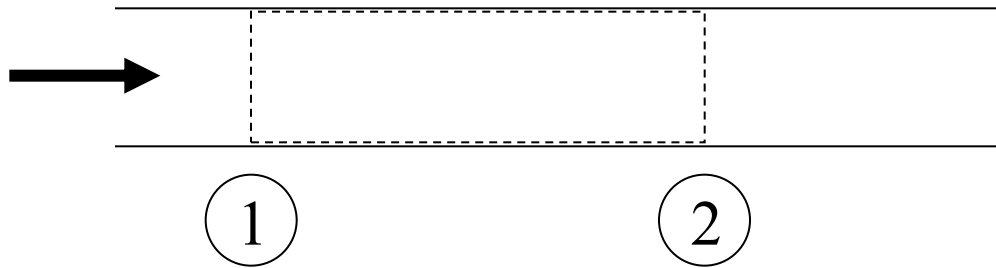
Massenstrom:

$$\dot{m} = \rho \cdot c_n \cdot A$$

c_n : Die auf die Fläche A senkrecht, gerichtete Geschwindigkeitskomponente.

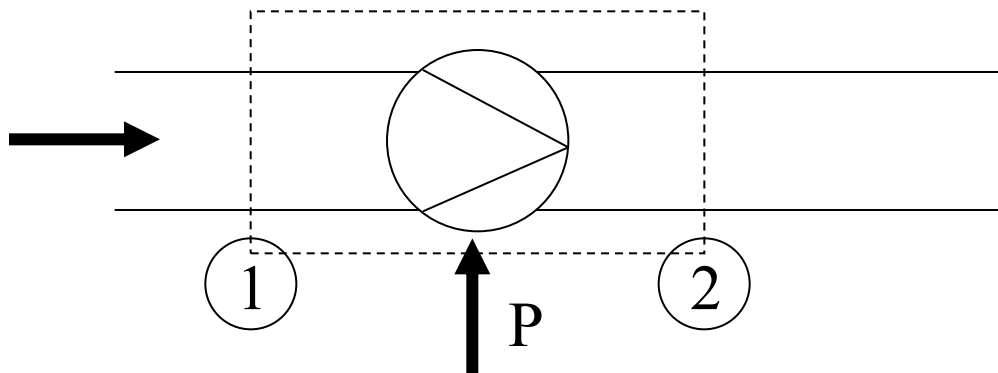
Beispiele Massenerhaltung

Rohrströmung ($\rho = \phi$)



$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2$$

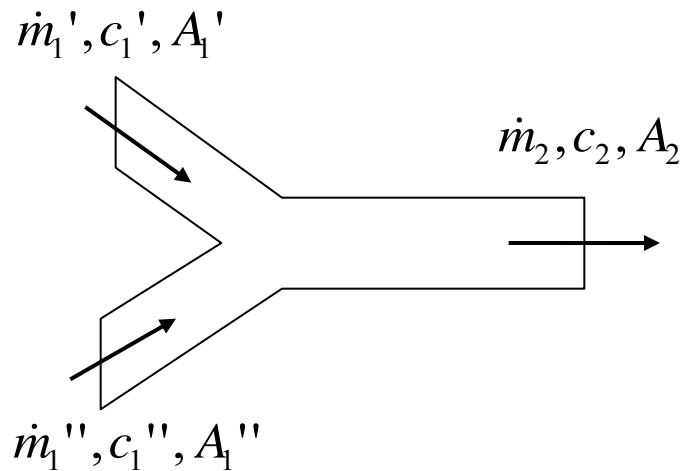
Pumpe ($\rho = \phi$)



$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2$$

Massenerhaltung

„2“ in „1“: Vereinigung

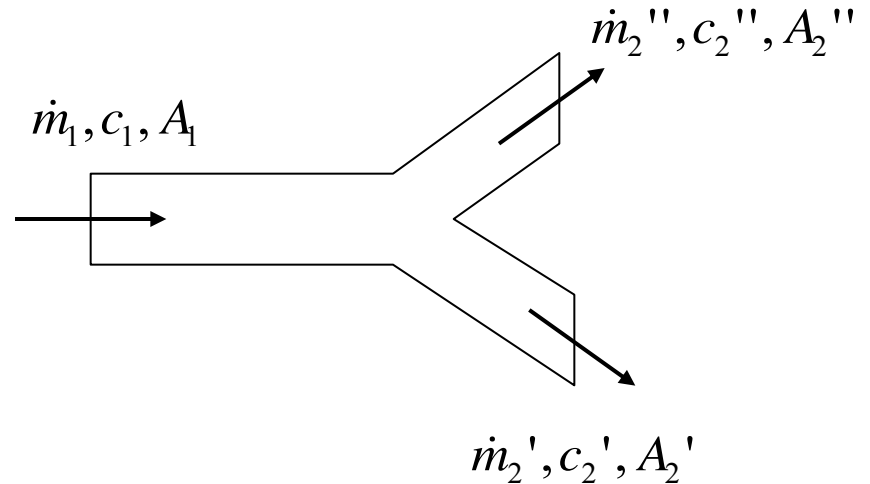


Annahmen: $\rho = \text{konst.}$

Massenerhaltung: $\dot{m}_1' + \dot{m}_1'' = \dot{m}_2$

$$\Rightarrow c_2 = \frac{c_1' A_1' + c_1'' A_1''}{A_2}$$

„1“ in „2“: Verzweigung



Annahmen: $\rho = \text{konst.}$

Massenerhaltung: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2' + \dot{m}_2''$

$$\Rightarrow c_2', c_2''?$$

Energieerhaltung

Energieformen:

- Kinetische Energie (Bewegungsenergie)
- Potentielle Energie (Lageenergie, Spannungen)
- Druckänderungsarbeit
- Innere (thermische) Energie
- Chemische Energie
- Elektrische Energie
- Magnetische Energie
- Lichtenergie
- Kernenergie

Energieerhaltung

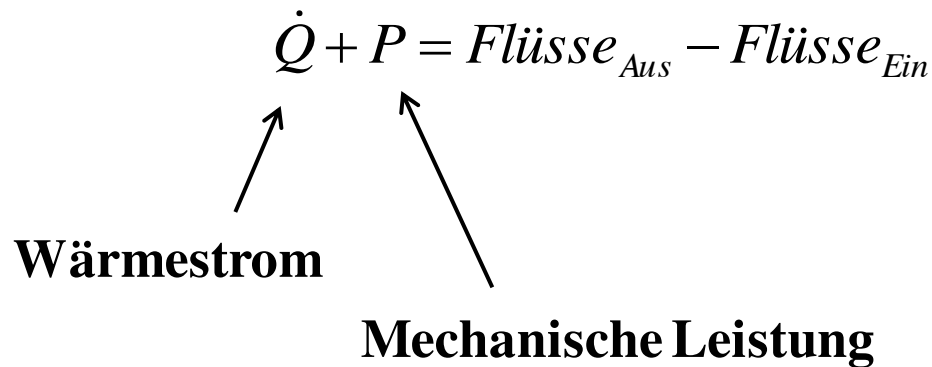
Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für **geschlossene** Systeme:

- In einem abgeschlossenen (isolierten) System kann Energie weder vernichtet noch erzeugt werden. Energie bleibt erhalten.
- Der Energieinhalt eines geschlossenen Systems kann nur durch das Leisten von **Arbeit** und / oder die Übertragung von **Wärme** geändert werden.

Energieerhaltung

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für **offene** Systeme:

- Der Energiefluss durch ein offenes System lässt sich nur durch Zu- oder Abfuhr von Wärme und / oder mechanischer Leistung ändern

$$\dot{Q} + P = \text{Flüsse}_{\text{Aus}} - \text{Flüsse}_{\text{Ein}}$$


Wärmestrom

Mechanische Leistung

- Vorzeichen für \dot{Q} und P :
 - In das System rein: positiv
 - Aus dem System heraus: negativ

Energieerhaltung

Wärmestrom \dot{Q} : Energieübertragung, als Folge einer Temperaturdifferenz zwischen System und Umgebung. (Einheit [W]=[J/s])

Leistung P : Technische Leistung, die zum Beispiel mit einem Kolben oder einer Pumpe am System verrichtet wird. (Einheit [W])

Energiefluss: Energiestrom (Leistung) des ein- und austretenden Stoffstromes. Für die im EnLab relevanten Energieformen reduziert sich der Energiefluss zu:

$$\text{Energiefluss} = \dot{m} \cdot \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right)$$

$c^2 / 2$: Spezifische kinetische Energie

$g \cdot z$: Spezifische potentielle Energie

$h = u + p / \rho$: Spezifische Enthalpie (innere Energie + Druckänderungsarbeit)

Energieerhaltung

- Der Enthalpiestrom (Einheit [W])

$$\dot{H} = \dot{m} \cdot h = \dot{m} \cdot \left(u + \frac{p}{\rho} \right)$$

- Jeder Materialfluss ist mit einem Enthalpiestrom verbunden
- Masse besitzt eine gewisse innere Energie „u“
- Um Masse dem bzw. aus dem System zu- bzw. abzuführen muss Arbeit geleistet werden (Druckverschiebearbeit): p / ρ
- Beispiele: Wärmetransport $\dot{m} \cdot h = \dot{m} \cdot c_p \cdot T$
Chemisch gebundene Energie $\dot{m} \cdot \Delta h$

Energieerhaltung

Zusammenfassend lautet der für uns relevante erste Hauptsatz für offene Systeme (mit Vorzeichen-Konvention):

$$\sum \dot{Q} + \sum P = \sum_{Aus} \dot{m}_{Aus} \cdot \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{Aus} - \sum_{Ein} \dot{m}_{Ein} \cdot \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{Ein}$$

Alternativ mit «allem Positiv» (d.h. man muss für jeden Beitrag wissen und klar bezeichnen, auf welche Seite aufgeführt werden muss):

$$\sum (\text{Allevorhandenen Energiefomen})_{Ein} = \sum (\text{Allevorhandenen Energiefomen})_{Aus}$$

$$\sum \dot{Q}_{Ein} + \sum P_{Ein} + \sum_{Ein} \dot{m}_{Ein} \cdot \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{Ein} = \sum \dot{Q}_{Aus} + \sum P_{Aus} + \sum_{Aus} \dot{m}_{Aus} \cdot \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{Aus}$$

Spezialfall: Hydraulik

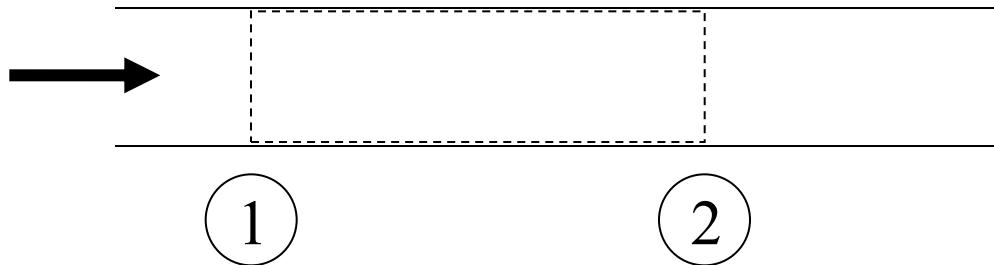
- In hydraulischen Systemen gelten meistens folgende Vereinfachungen:
 - Keine Wärme wird zu- bzw. abgeführt
 - Dichteänderungen sind vernachlässigbar klein
 - Änderungen der inneren Energie (Verluste) werden im Term $\Delta p_v / \rho$ zusammengefasst. (Δp_v : Druckverluste)

$$P = \sum_{Aus} \dot{m}_{Aus} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz + \frac{\Delta p_v}{\rho} \right)_{Aus} - \sum_{Ein} \dot{m}_{Ein} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{Ein}$$

Energieerhaltung

- Beispiele
 - Rohrströmung
 - Beheiztes Rohr
 - Pumpe (horizontal & vertikal)
 - Turbine
 - Verdichter

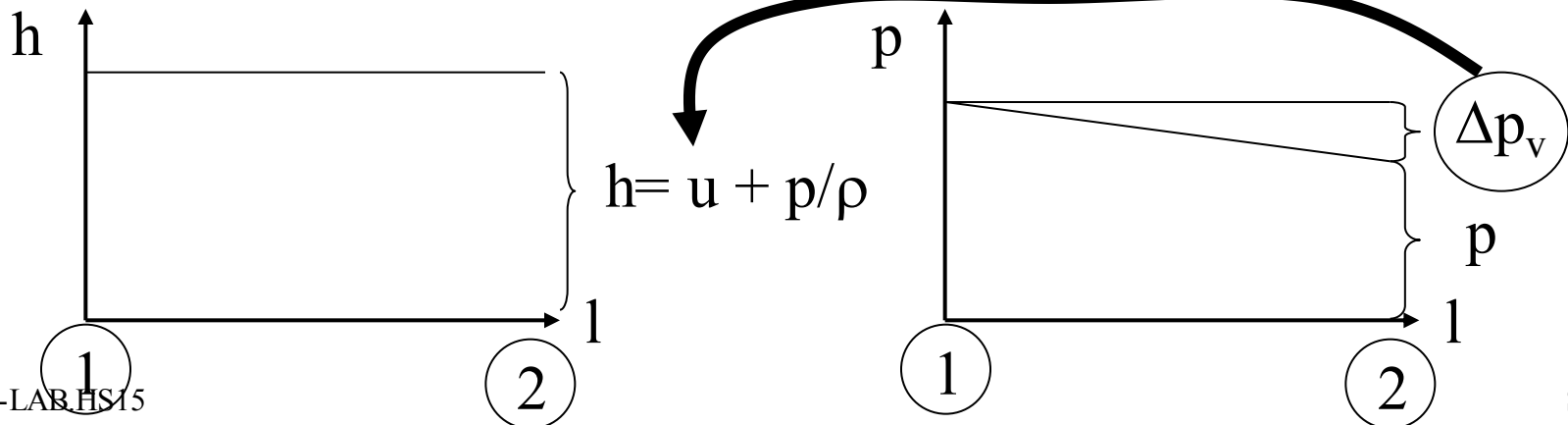
Rohrströmung ($\rho = \text{const.}$)



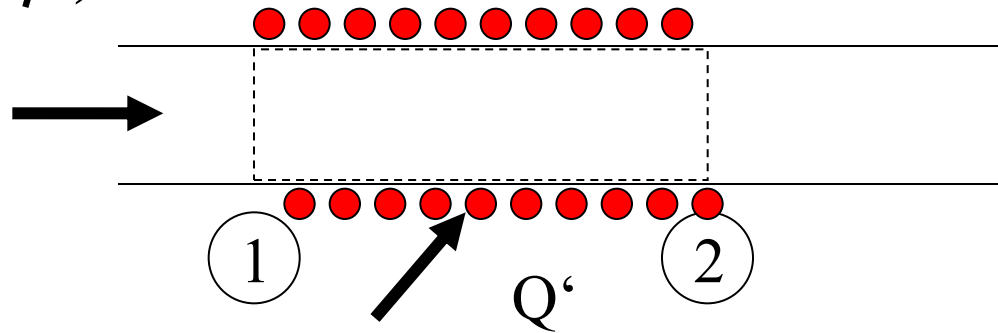
$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 \Rightarrow c_1 = c_2$$

$$\cancel{\dot{Q}} + \cancel{P} = \sum_{Aus} \cancel{\dot{m}}_{Aus} \cdot \left(\cancel{h} + \frac{c^2}{2} + \cancel{gz} \right)_{Aus} - \sum_{Ein} \cancel{\dot{m}}_{Ein} \cdot \left(\cancel{h} + \frac{c^2}{2} + \cancel{gz} \right)_{Ein} \Rightarrow h_1 + \frac{c_1^2}{2} = h_2 + \frac{c_2^2}{2} \Rightarrow \underline{\underline{h_1 = h_2}}$$

$$\cancel{P} = \sum_{Aus} \cancel{\dot{m}}_{Aus} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + \cancel{gz} + \frac{\Delta p_v}{\rho} \right)_{Aus} - \sum_{Ein} \cancel{\dot{m}}_{Ein} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + \cancel{gz} \right)_{Ein} \Rightarrow \frac{p_2}{\rho} + \frac{\Delta p_v}{\rho} = \frac{p_1}{\rho}$$



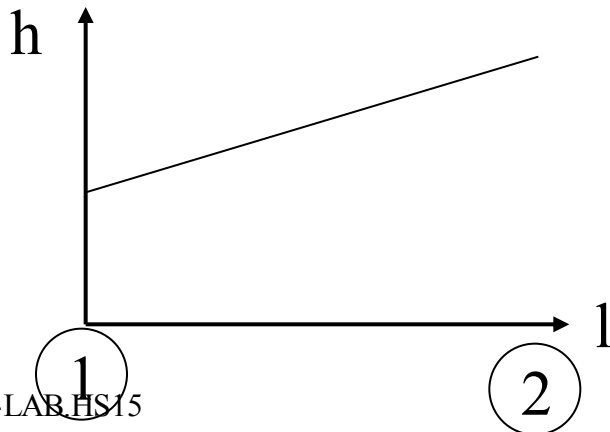
Rohrströmung mit Wärmezufuhr (Wärmetauscher, $\rho = \phi$)



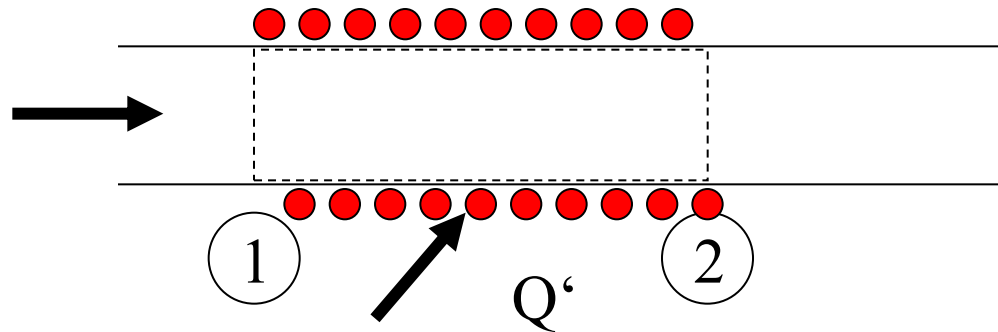
$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 \Rightarrow c_1 = c_2$$

$$\dot{Q} + \cancel{P} = \sum_{Aus} \dot{m}_{Aus} \cdot \left(h + \cancel{\frac{c^2}{2}} + \cancel{gz} \right)_{Aus} - \sum_{Ein} \dot{m}_{Ein} \cdot \left(h + \cancel{\frac{c^2}{2}} + \cancel{gz} \right)_{Ein}$$

$$h = c_p T \Rightarrow \underline{\underline{\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1)}}$$



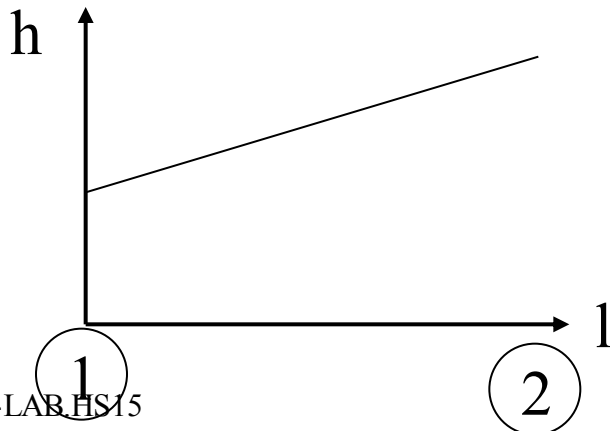
Rohrströmung mit Wärmezufuhr (Wärmetauscher, $\rho = \phi$, Formulierung «Ein» = «Aus»)



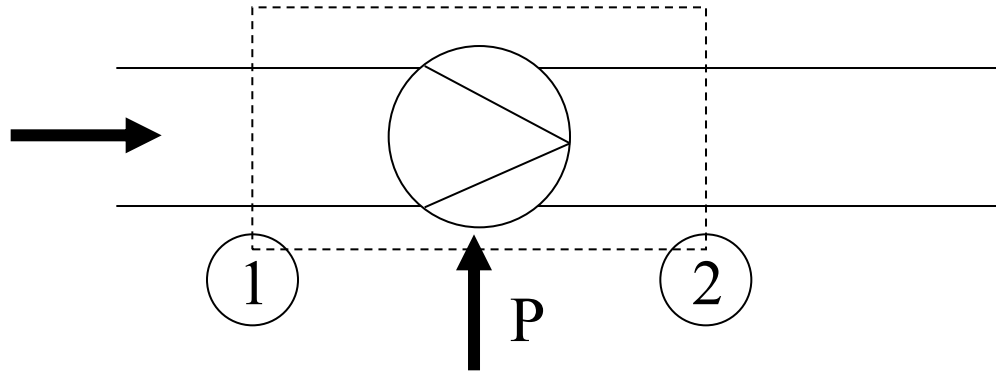
$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 \Rightarrow c_1 = c_2$$

$$\dot{Q}_{Ein} + \cancel{P_{Ein}} + \sum_{Ein} \dot{m}_{Ein} \cdot \cancel{\left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right)_{Ein}} = \dot{Q}_{Aus} + \cancel{P_{Aus}} + \sum_{Aus} \dot{m}_{Aus} \cdot \cancel{\left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right)_{Aus}}$$

$$h = c_p T \Rightarrow \underline{\underline{\dot{Q}_{Ein} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1)}}$$



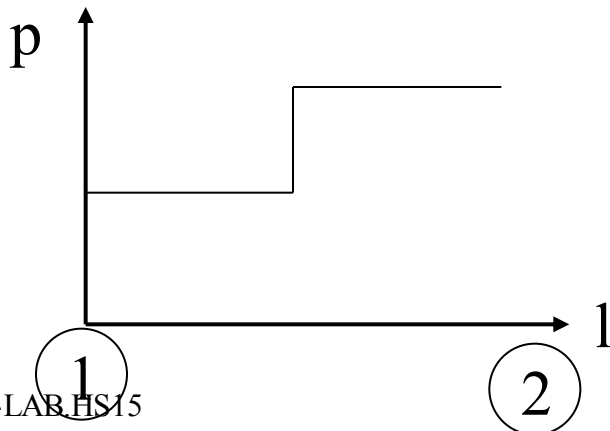
Pumpe ($\rho = \phi$)



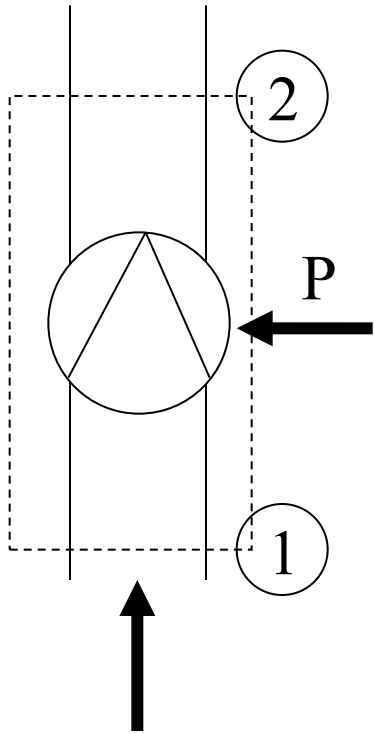
$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 \Rightarrow c_1 = c_2$$

$$P = \sum_{Aus} \dot{m}_{Aus} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \cancel{\frac{c^2}{2}} + \cancel{gz} + \frac{\Delta p_v}{\rho} \right)_{Aus} - \sum_{Ein} \dot{m}_{Ein} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \cancel{\frac{c^2}{2}} + \cancel{gz} \right)_{Ein}$$

$$P = \dot{m} \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{\Delta p_v}{\rho} - \frac{p_1}{\rho} \right) = \dot{V} (p_2 - p_1 + \Delta p_v) > 0 \quad \text{wobei } P_{hyd} \approx \dot{V} (p_2 - p_1)$$



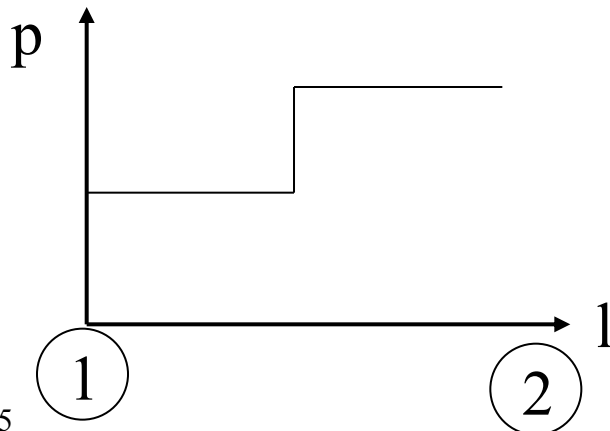
Pumpe ($\rho = \phi$, vertikal)



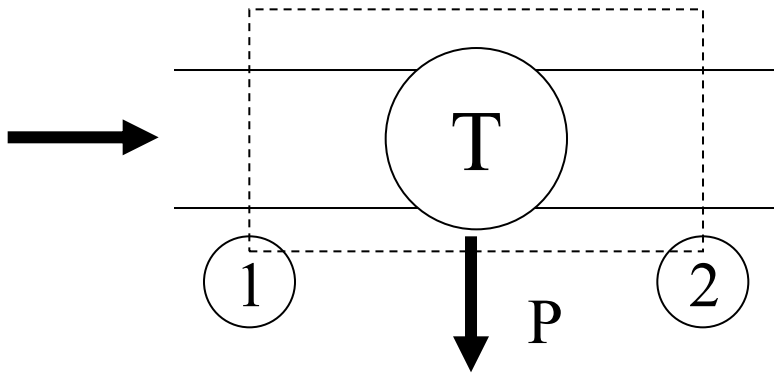
$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 \Rightarrow c_1 = c_2$$

$$P = \sum_{Aus} \dot{m}_{Aus} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \cancel{\frac{c^2}{2}} + gz + \frac{\Delta p_v}{\rho} \right)_{Aus} - \sum_{Ein} \dot{m}_{Ein} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \cancel{\frac{c^2}{2}} + gz \right)_{Ein}$$

$$P = \dot{m} \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{\Delta p_v}{\rho} - \frac{p_1}{\rho} + g(z_2 - z_1) \right) = \dot{V} \underbrace{(p_2 - p_1 + \Delta p_v + \rho g(z_2 - z_1))}_{= P_{hyd}} > 0$$



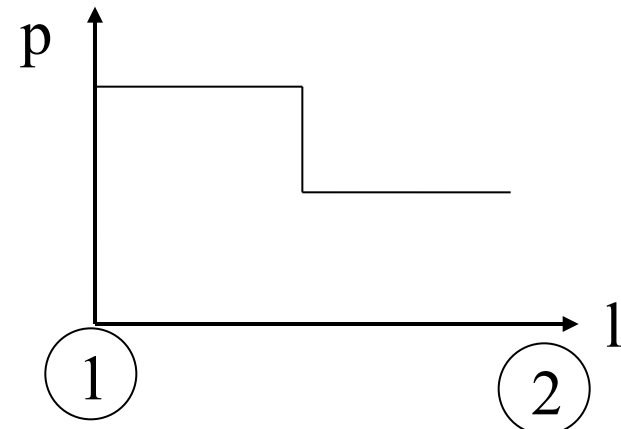
Turbine ($\rho = \phi$)



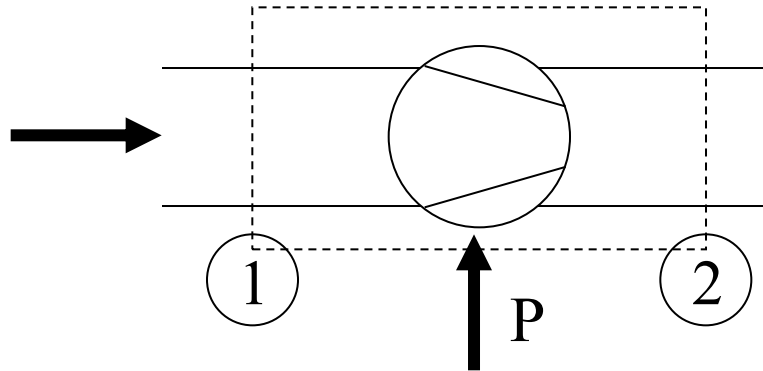
$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 \Rightarrow c_1 = c_2$$

$$P = \sum_{Aus} \dot{m}_{Aus} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \cancel{\frac{c^2}{2}} + \cancel{gz} + \frac{\Delta p_v}{\rho} \right)_{Aus} - \sum_{Ein} \dot{m}_{Ein} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \cancel{\frac{c^2}{2}} + \cancel{gz} \right)_{Ein}$$

$$P = \dot{m} \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{\Delta p_v}{\rho} - \frac{p_1}{\rho} \right) = \dot{V} \underbrace{(p_2 - p_1 + \Delta p_v)}_{\approx P_{hyd}} < 0$$



Verdichter ($\rho \neq \phi$)

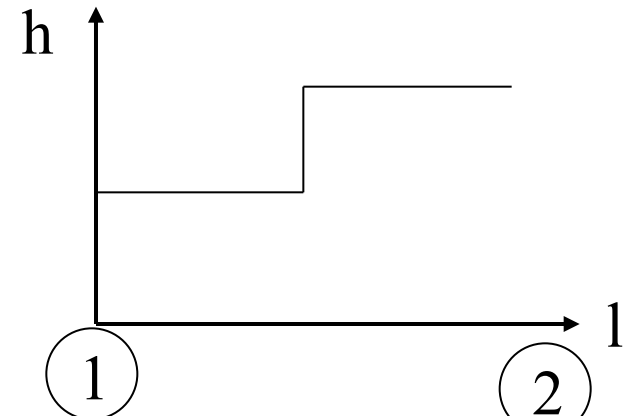


$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 \Rightarrow \rho_1 \cdot c_1 = \rho_2 \cdot c_2 (\Rightarrow c_1 \neq c_2)$$

$$\cancel{\dot{Q}} + P = \sum_{Aus} \dot{m}_{Aus} \cdot \left(h + \frac{c^2}{2} + \cancel{gz} \right)_{Aus} - \sum_{Ein} \dot{m}_{Ein} \cdot \left(h + \frac{c^2}{2} + \cancel{gz} \right)_{Ein}$$

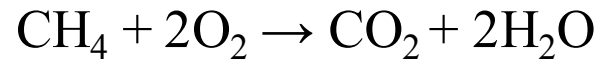
$$P = \dot{m} \left[\left(h + \frac{c^2}{2} \right)_2 - \left(h + \frac{c^2}{2} \right)_1 \right] = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} \right] > 0$$

$$h = c_p T \Rightarrow \underbrace{P \approx \dot{m} \Delta h = \dot{m} c_p \Delta T = \dot{m} c_p (T_2 - T_1)}_{\approx P_{th}}$$



Stöchiometrie

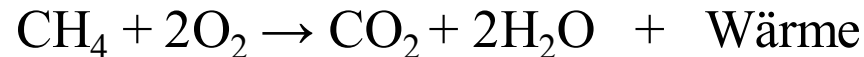
- Für chemische Reaktionen, z.B. der Verbrennung, ist eine Bilanzierung der beteiligten Atome bzw. deren Massen zu berücksichtigen



- Eine Bilanzierung führt zu einem Verhältnis, der Stöchiometrie, der verschiedenen Reaktionspartner, damit die Reaktion vollständig abläuft
 - 2 Sauerstoffmoleküle werden benötigt, um 1 Methanmolekül zu verbrennen
 - molarer stöchiometrischer Sauerstoffbedarf von Methan ist 2

Reaktionsenthalpie und Luftbedarf

- Während der Verbrennung wird chemisch gebundene Energie (Reaktionsenthalpie) in thermische Energie umgewandelt



- Die Wärmemenge hängt vom Brennstoff ab (Heizwert oder Brennwert)

CH_4 : Heizwert_{H₂O gasförmig} 50 MJ/kg, Brennwert_{H₂O flüssig} 55.5 MJ/kg

- In technischen Verbrennungsprozessen ist der spez. Luftbedarf relevant
 - Wieviel kg Luft braucht es um 1 kg Brennstoff vollständig zu verbrennen?
 - 1 kg Methan benötigt 4 kg Sauerstoff (aus Molekulargewichten und Stöchiometrie)
 - Mit einem Anteil O₂ in Luft von ca. 23.2% ergibt sich der spezifische Luftbedarf von CH₄ zu 17.24 (d.h. 17.24 kg Luft für 1 kg Methan)

5. Problemlösungsmethodik

Problemlösungsmethodik

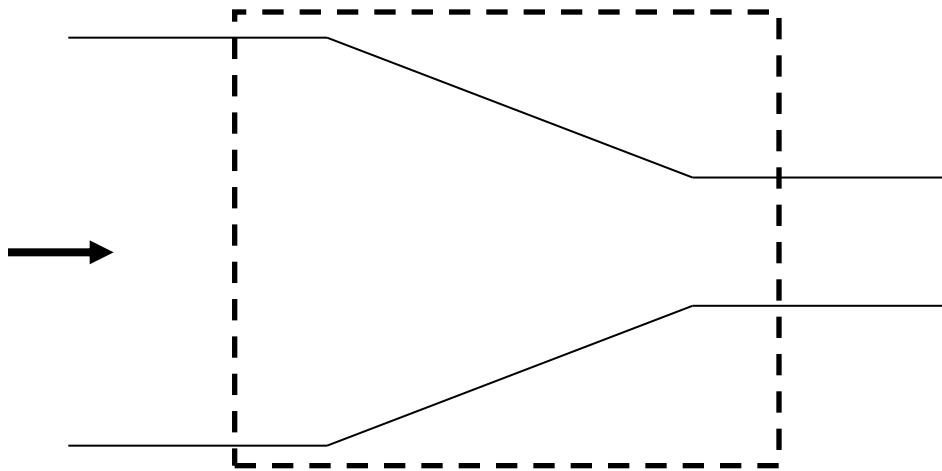
- Systematik:
 - Beobachten, beschreiben, analysieren, modellieren, simulieren, synthetisieren
- 7 Schritte: **Prüfungsfrage !!!**
 1. System identifizieren und skizzieren Systemgrenzen
 2. Besonderheiten suchen Konstanten
 3. Annahmen treffen
 4. Erhaltungsgleichungen formulieren Massenerhaltungssatz
 5. Diagramme zeichnen
 6. Unbekannten bestimmen
 7. Resultate überprüfen und diskutieren

Problemstellung

An der Druckleitung eines Pelton-Wasserkraftwerks soll vor dem Verteiler ein horizontaler Konfusor/Düse angehängt werden. Die Druckänderung über den Konfusor ist in Abhängigkeit des Flächenverhältnisses und der Wassergeschwindigkeit in der Druckleitung (d.h. vor dem Konfusor) zu bestimmen. Für diese Berechnung kann die Strömung als verlustfrei (reibungsfrei) betrachtet werden.

Vorgehen nach Problemlösungsmethodik

1: System = Konfusor → Skizze



2: Besonderheiten: Wasser, horizontale Rohrleitung mit Querschnittsänderung
($A_{\text{Aus}}/A_{\text{Ein}}$ gegeben) → keine Energiezu- bzw. abfuhr

3: Annahmen: Dichte = Konstant, reibungsfrei

Vorgehen nach Problemlösungsmethodik

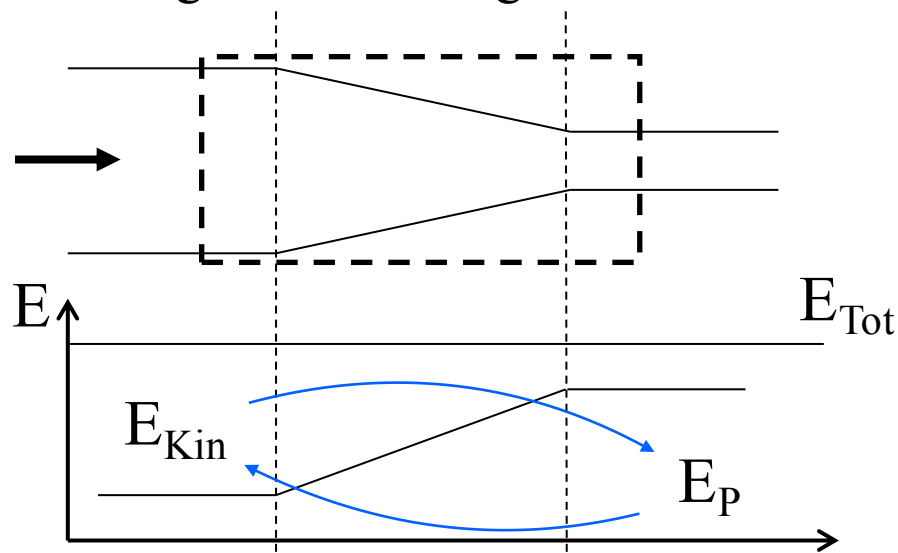
4: Massenerhaltung + Energieerhaltung

Massenerhaltung : $\dot{m}_{Ein} = \dot{m}_{Aus} \rightarrow (\rho \cdot c \cdot A)_{Ein} = (\rho \cdot c \cdot A)_{Aus}$

Energieerhaltung :

$$P = \sum_{Aus} \dot{m}_{Aus} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz + \frac{\Delta p_v}{\rho} \right)_{Aus} - \sum_{Ein} \dot{m}_{Ein} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{Ein}$$

5: Diagramme: Energieumwandlung

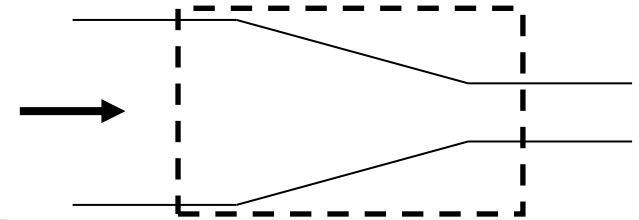


mehr kinetische Energie am Schluss
da die Geschwindigkeit grösser ist

Vorgehen nach Problemlösungsmethodik

6: Gleichungen lösen

$$\text{Massenerhaltung : } (\rho \cdot c \cdot A)_{\text{Ein}} = (\rho \cdot c \cdot A)_{\text{Aus}} \rightarrow \underline{\underline{c_2 = c_1 \cdot \frac{A_1}{A_2}}}$$



Energieerhaltung :

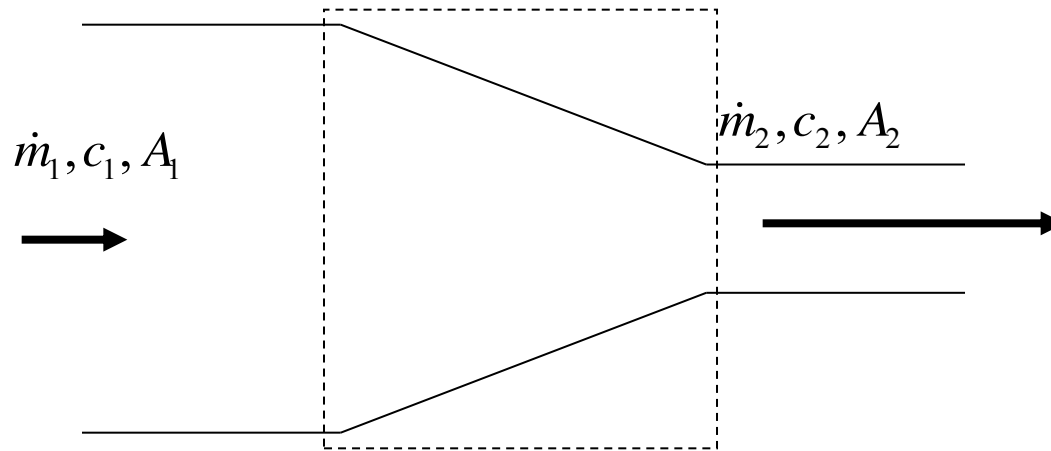
$$P = \sum_{\text{Aus}} \dot{m}_{\text{Aus}} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz + \frac{\Delta p_v}{\rho} \right)_{\text{Aus}} - \sum_{\text{Ein}} \dot{m}_{\text{Ein}} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{\text{Ein}}$$

$$\dot{m}_{\text{Aus}} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz + \frac{\Delta p_v}{\rho} \right)_{\text{Aus}} = \dot{m}_{\text{Ein}} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{\text{Ein}}$$

$$\left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} \right)_{\text{Aus}} = \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} \right)_{\text{Ein}} \Rightarrow \underline{\underline{\frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2}}}$$

7: Überprüfung + Diskussion

Energieerhaltung: Konfusor/Düse



Besonderheiten + Annahmen : reibungsfrei, horizontal, $\rho = \text{konst.}$, $\dot{Q} = 0$, $P = 0$

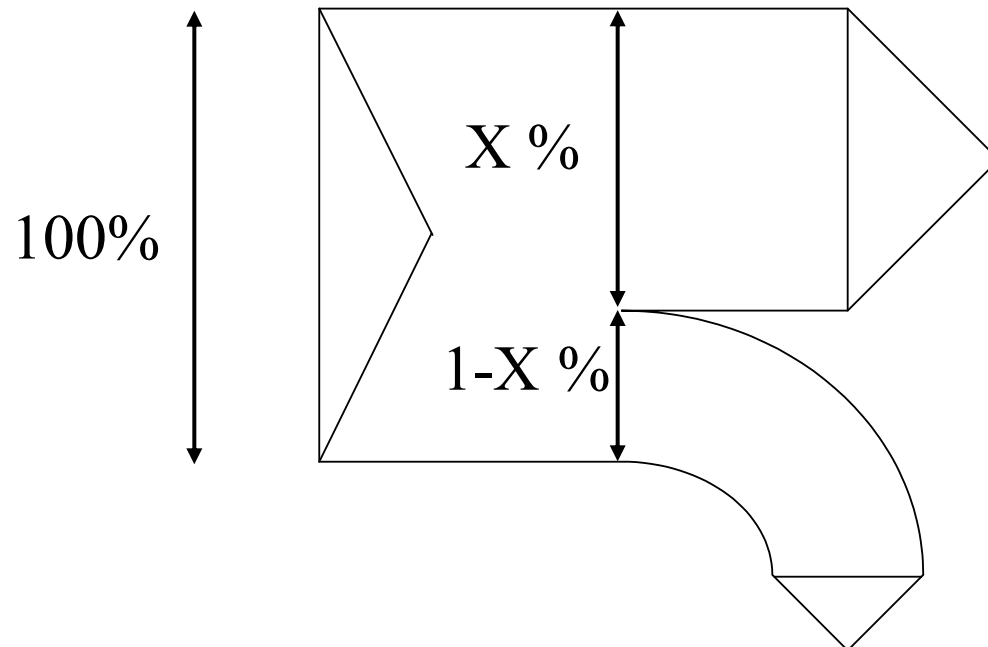
Massenerhaltung : $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow c_2 = c_1 \cdot \frac{A_1}{A_2}$

Energieerhaltung : $P = \sum_{Aus} \dot{m}_{Aus} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz + \frac{\Delta p_v}{\rho} \right)_{Aus} - \sum_{Ein} \dot{m}_{Ein} \cdot \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{Ein}$

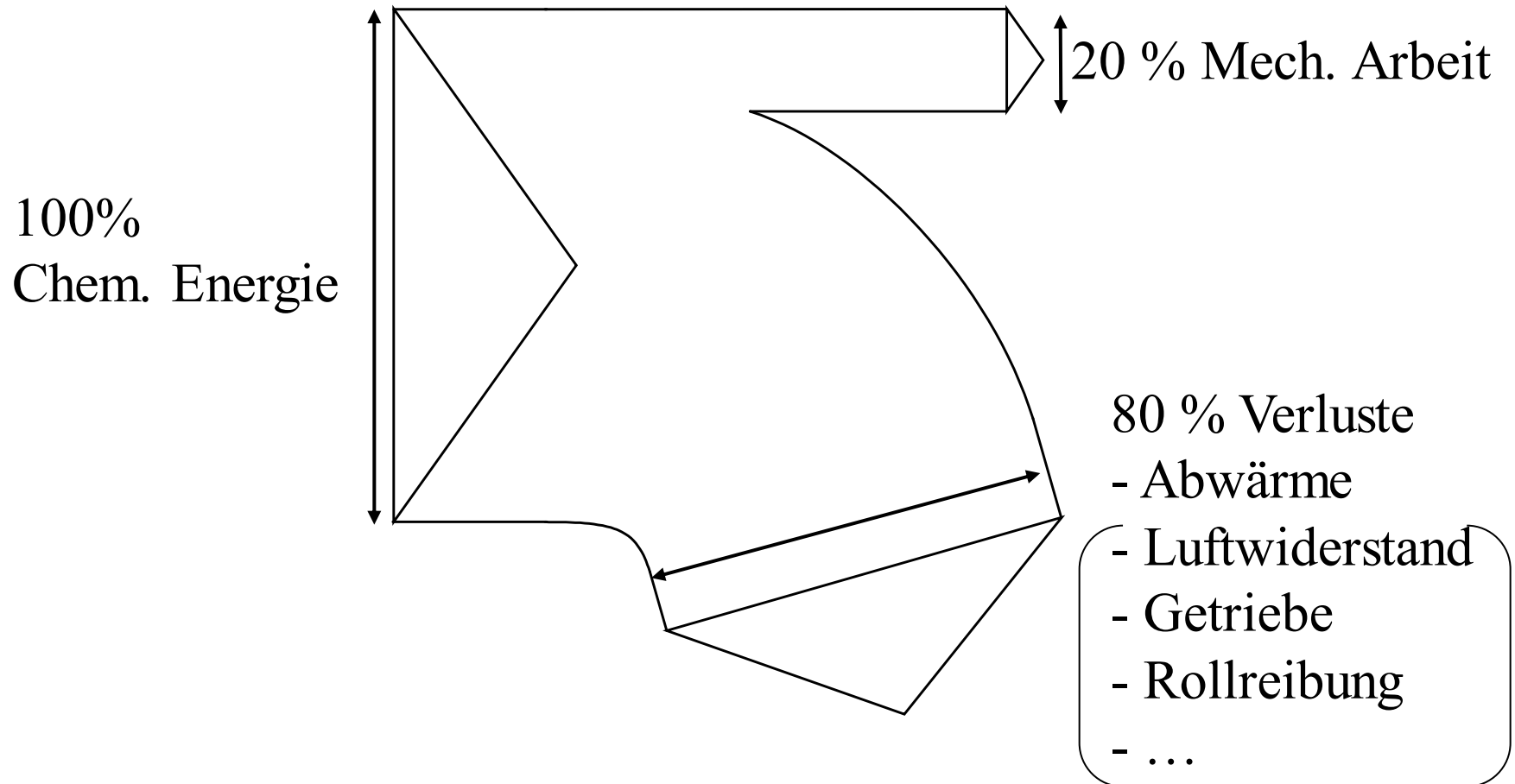
$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} \quad \Rightarrow \quad p_2 - p_1 = \rho \left(\frac{c_1^2}{2} - \frac{c_2^2}{2} \right) = \rho \frac{c_1^2}{2} \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right)$$

6. Qualität von Energien und Grössenordnungen

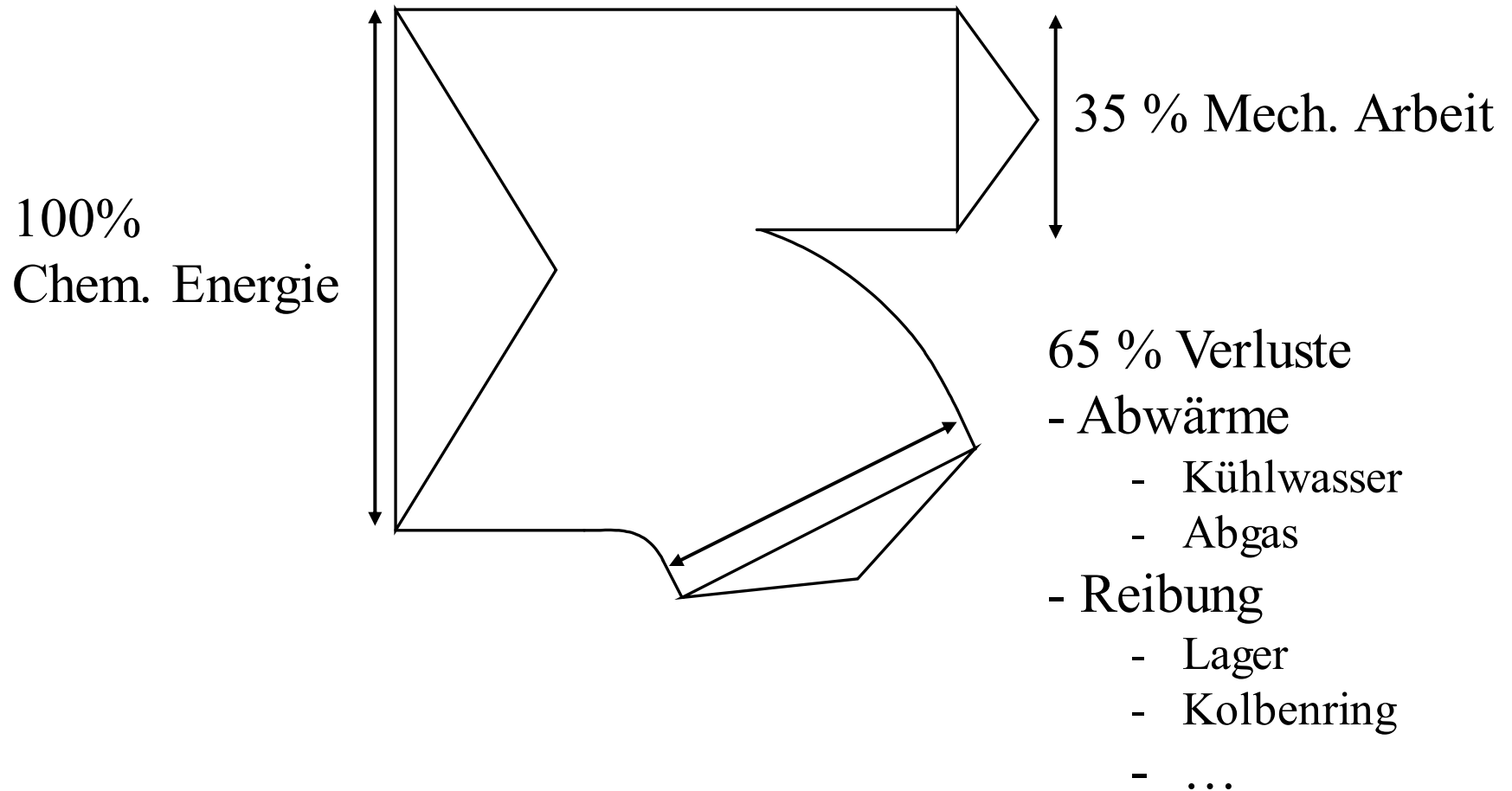
Energieflussbild

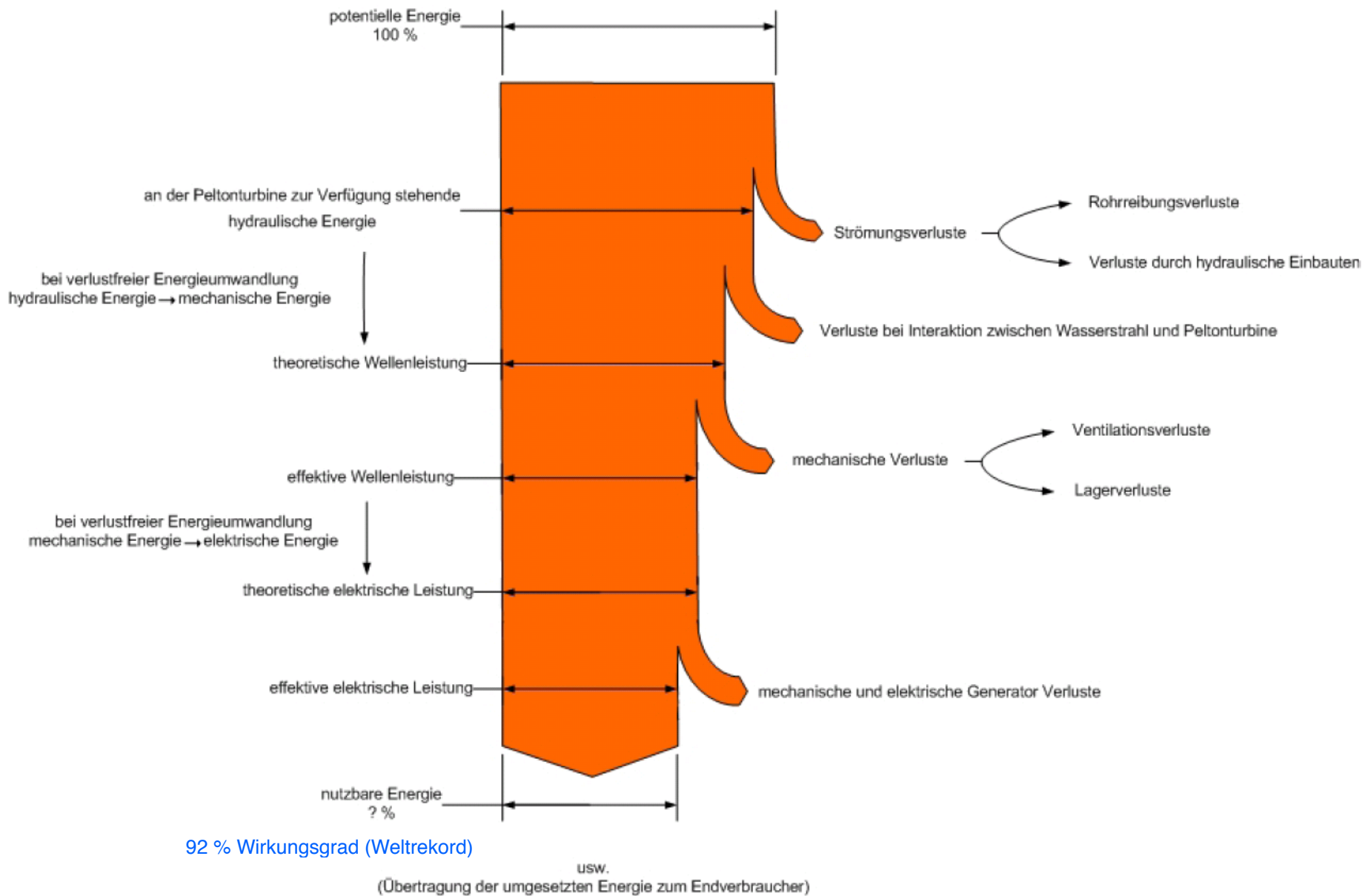


Energieflussbild: Auto



Energieflussbild: Verbrennungsmotor



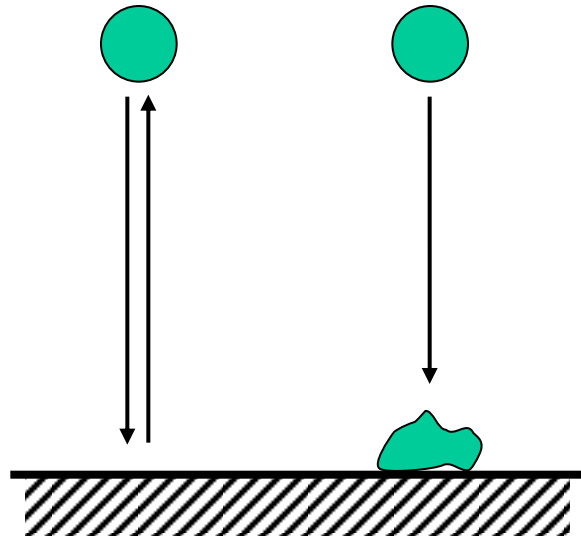


Die Qualität der Energie

- Energieerhaltung ist eine Bilanzierung der Energiemenge, d.h. Energiequantität
- Energie hat aber auch eine Qualität
 - vollständig in andere Energieform umwandelbar
 - Mechanische Energie (Lage-, kinetische, Druck-Energie)
 - Elektrische Energie
 - nur bedingt in andere Energieformen umwandelbar
 - Wärme
- Der Wirkungsgrad
 - ist eine Definitionssache!
 - ist vom Kontrollvolumen, Referenz, ... abhängig

$$\eta = \frac{\text{Abgeführte Leistung}}{\text{Zugeführte Leistung}} = \frac{\text{"Nutzen"}}{\text{"Aufwand"}}$$

Energiequalität



Symmetrischer Prozess (reversibel): $E_{\text{pot}} \rightarrow E_{\text{kin}} \rightarrow E_{\text{def}} \rightarrow E_{\text{kin}} \rightarrow E_{\text{pot}}$

Asymmetrischer Prozess (irreversibel): $E_{\text{pot}} \rightarrow E_{\text{kin}} \rightarrow E_{\text{def}} \rightarrow \text{Wärme}$

In beiden Vorgängen bleibt die Energie erhalten.

Durch reine Wärmeabfuhr (d.h. Abkühlung) ist es unmöglich den ursprünglichen Zustand wieder herzustellen (Carnot Wirkungsgrad \Rightarrow 2. Hauptsatz der TD).

Grössenordnungen

- Massenstrom (Masse pro Zeit)
 - Wasserhahn: 0.1 kg/s
 - Ventilator (30 cm D): 0.1 kg/s
 - Flugzeugtriebwerk: 100-500 kg/s
 - Rhein: 800'000 kg/s
- Druck (Kraft pro Fläche)
 - 1 kg Zucker auf Tisch: 2000 Pa
 - 10 m Wassersäule/Erdatmosphäre: 100'000 Pa = 1 bar
 - Auto auf 10 Rappen: 500 bar
- Leistung (Arbeit pro Zeit)
 - Hauskühlschrank: 100 W
 - Auto auf Autobahn bei 100 km/h: 10 kW
 - Lokomotive (im Flache): 1 MW
 - Grosse Kraftwerke (Gasturbinen, KKW, Hydroanlagen): 100-1000 MW

Grössenordnungen

	Energieform	Formel	Betrag
1 kg Wasser mit 10 m/s bewegen	kinetische Energie	$m c^2/2$	50 J
1 kg Wasser um 10 m anheben	potentielle Energie	$m g z$	100 J
1 kg Wasser um 10 K erwärmen	thermische Energie	$m c_p \Delta T$	42'000 J
1 kg Wasser bei 100°C verdampfen	thermische Energie	$m \Delta h_v$	2'250'000 J
1 kg Heizöl verbrennen	chemische Energie	$m \Delta H_R$	41'800'000 J

Größen in EnLab

c	Geschwindigkeit [m/s]	g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
A	Fläche [m ²]	z	Höhe [m]
ρ	Dichte [kg/m ³]	\dot{Q}	Wärmestrom [W]
\dot{m}	Massenstrom [kg/s]	P	Leistung [W]
\dot{V}	Volumenstrom [m ³ /s]	F	Kraft [N]
p	Druck [Pa=N/m ²]	M	Drehmoment [N.m]
u	spez. Innere Energie [J/kg]	ω	Winkelgeschwindigkeit [rad/s]
h	spez. Enthalpie [J/kg]	n	Drehzahl [U/min]
T	Temperatur [K]	t	Zeit [s]
c_p	spez. Wärmekapazität [J/kg.K]	l	Länge, Abstand [m]
		η	Wirkungsgrad [-]

Achtung: die Liste ist nicht abschliessend. Es kann vorkommen, dass das gleiche Symbol für etwas anders verwendet wird! Mit Einheiten überprüfen.