bühnenwerk

Jenfelder Allee 80 — 22045 Hamburg

Meister Veranstaltungstechnik

Konzeption & Planung / Technische Leitung:

Grundlagen Technische Mechanik

Datum:	Dozent:	Revision:
12.11.2025	Michael Kiel	6.0

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen der technischen Mechanik

1.1 Teilgebiete der technischen Mechanik

- **Statik**: Die Mechanik der ruhenden Körper
  - **Statik** der starren Körper
  - **Festigkeitslehre**: Statik der verformbaren Körper
- **Dynamik**: Die Mechanik der bewegten Körper
  - **Kinematik**: Die Bewegung der Körper, ohne Berücksichtigung von Kräften
  - **Kinetik**: Die Bewegung der beschleunigten Körper unter dem Einfluss von Kräften

Ein paar Beispiele zu Anwendungsfällen dieser Teilgebiete:

- Die Statik der starren Körper betrachtet die Wirkung von Kräften auf einen Körper, der als starr angesehen wird, was er in der Realität natürlich nie ist. Es geht zum Beispiel darum, angeben zu können, wie sich Lasten auf Tragsystemen verteilen: Kräfte auf Tragmittel und Auflagepunkte.
- In der Festigkeitslehre geht es um die Verformungen, die äußere Kräfte an einem Körper verursachen. Die Hauptaufgabe der Festigkeitslehre ist die ausreichende Dimensionierung von Bauteilen, um plastische Verformungen oder die Zerstörung des Materials zu verhindern.
- Die Kinematik beschreibt Bewegungen von Körpern mit Hilfe der Größen Weg und Zeit und von diesen abgeleiteten Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung, ohne dabei die Kräfte auf den Körper zu betrachten. Mit Hilfe der Kinematik ist es z.B. möglich, die Zeit für einen Vorgang bei bekannter Geschwindigkeit zu bestimmen.
- Die Kinetik betrachtet die Kräfte, die bei Bewegungen auftreten bzw. diese verursachen. Z.B. kann man so die Kraft bestimmen, die nötig ist, damit ein Körper seine Geschwindigkeit ändert. Auch Reibungs- und Fliehkräfte können bei Bewegungen auftreten.

Übungsaufgaben:

1. Finde zu jedem Teilgebiet der Technischen Mechanik konkrete Situationen aus deinem Berufsalltag, die in dem jeweiligen Teilgebiet beschrieben und berechnet werden können.

1.2 Die vier Grundprinzipien von Newtons Mechanik

Die technische Mechanik ist ein Teilgebiet der Physik, das sich mit der Anwendung physikalischer Gesetze auf technische Einrichtungen beschäftigt. Die physikalischen Grundlagen, die in der technischen Mechanik zur Anwendung kommen, hat Isaac Newton entwickelt. Nach ihm ist die Einheit der vielleicht wichtigsten Größe der Mechanik benannt, der Kraft. Seine Aussagen zur Mechanik fasste er in vier Prinzipien zusammen, deren Anwendung auf die verschiedenen Teilgebiete der technischen Mechanik ein Verständnis der in ihnen behandelten Zusammenhänge ermöglicht:

- **Prinzip der Trägheit**
  Ein Körper, auf den keine resultierende Kraft wirkt, verharrt in seinem Bewegungszustand, behält also die Richtung der Bewegung und die Geschwindigkeit bei.
- **Dynamisches Grundgesetz**
  Ändert ein Körper seinen Bewegungszustand, so wirkt eine Kraft auf ihn: $F = m \cdot a$. Kraft = Masse mal Beschleunigung.
- **Prinzip von Aktion und Reaktion**
  Kräfte treten immer paarweise auf. Übt ein Körper A auf einen anderen Körper B eine Kraft aus (actio), so wirkt eine gleich große, aber entgegen gerichtete Kraft von Körper B auf Körper A (reactio).
- **Superpositionsprinzip**
  Kräfte, die auf einen Körper wirken überlagern sich störungsfrei. Sie können zu einer resultierenden Kraft zusammengefasst werden, die in ihrer Wirkung auf den Körper der Wirkung der Einzelkräfte entspricht.

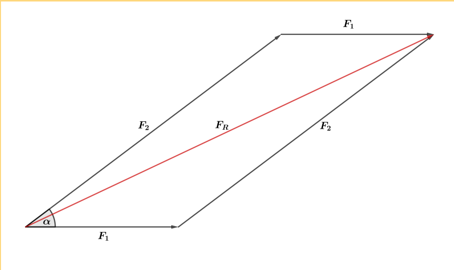
Ein paar Beispiele zur Anwendung der Newtonschen Prinzipien:

- Eine Rakete, die aus dem Schwerefeld der Erde und in den fast materiefreien Weltraum gelangt ist, bewegt sich ohne Antrieb mit konstanter Geschwindigkeit auf einer Linie fort. Auf der Erde wird jede Bewegung durch Reibungskräfte verzögert, so dass sie nach einer Zeit zum Erliegen kommt.
- Um ein Fahrzeug (aus der Ruhe) zu beschleunigen braucht man Kraft (Motorkraft oder Muskelkraft). Je schwerer das Fahrzeug, desto mehr Kraft braucht man.
- Die Kraft, die ein an einem Seil hängender Körper auf dieses Seil bewirkt, wirkt auch in umgekehrter Richtung vom Seil auf den Körper. Ansonsten würde das Seil den Körper nicht tragen.
- Eine Kraft die schräg an einem Körper angreift kann z.B. in eine vertikale und eine horizontale Kraftkomponente zerlegt werden. So kann man die Wirkung der Kraft nach oben/unten und nach rechts/links unabhängig voneinander betrachten. Umgekehrt kann man mehrere Kräfte, die den gleichen Angriffspunkt am gleichen Körper haben zu einer resultierenden Kraft zusammenfassen. Z.B. kann man so die Richtung und die Größe der beschleunigenden Kraft in dieser Richtung auf ein Boot bestimmen, das durch einen Motor nach vorne und durch die Strömung zur Seite getrieben wird.

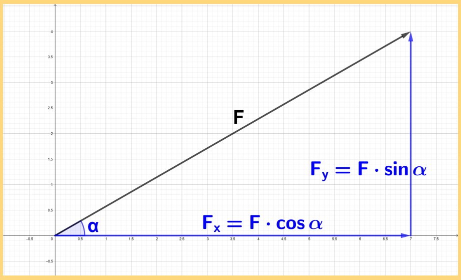
2 Beispielaufgaben zur Technischen Mechanik

2.1 Lastverteilung in zentralen Kräftesystemen

Nach dem Superpositionsprinzip kann man eine Kraft in zwei Kräfte zerlegen oder zwei Kräfte zu einer resultierenden Kraft zusammensetzen. Zeichnerisch macht man das folgendermaßen: Man bildet aus allen Einzelkräften ein Parallelogramm, bei dem die resultierende Kraft die Diagonale und die beiden anderen Kräfte die Seiten des Parallelogramms bilden:

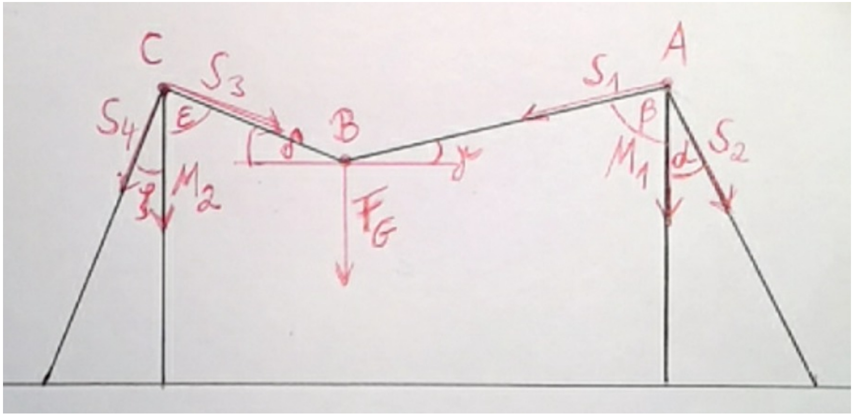


Rechnerisch bestimmt man unbekannte Kräfte durch die Winkelfunktionen, den Sinus- und Kosinussatz oder durch das Zerlegen der Kräfte in horizontale und vertikale Komponenten.



Übungsaufgabe:

2. Eine Last von $F_G = 2,5\,\mathrm{kN}$ soll wie in folgender Skizze von einem Seil gehalten werden, das an zwei Masten befestigt ist, die durch Abspannseile gehalten werden. Bestimme alle Kräfte auf die Seilstücke und Masten. Die in der Zeichnung angegebenen Winkel haben folgende Größen: $\alpha = 38°$, $\beta = 77°$, $\epsilon = 64°$, $\zeta = 30°$. Die Winkel γ und δ lassen sich aus der Zeichnung erschließen.



2.2 Auflagerkräfte (allgemeine Kräftesysteme)

Greifen an einem Körper Kräfte an verschiedenen Angriffspunkten an, spricht man von einem allgemeinen Kräftesystem. In der Veranstaltungstechnik ist dieser Fall vor allem interessant für Körper die an sog. Auflagern gehalten werden. Das können aufgelegte oder aufgehängte Bauteile sein. Bei Körpern, die an mehr als zwei Auflagepunkten gelagert sind, ist die Lastverteilung nicht mehr einfach zu berechnen (statisch unbestimmte Systeme, wie z.B. Mehrfeldträger). Um die Kräfte bei statisch bestimmten Systemen zu berechnen, die diese Lager aufnehmen müssen, damit das System im Gleichgewicht bleibt, muss man zwei Annahmen machen:

1. Alle Kräfte in horizontaler und alle Kräfte in vertikaler Richtung müssen sich im Gleichgewicht befinden:
$$\sum F_x = 0 \text{ und } \sum F_y = 0$$
2. Alle Drehmomente bezüglich eines Auflagerpunktes als Drehpunkt müssen im Gleichgewicht sein:
$$\sum M = 0$$

Übungsaufgabe:

3. Eine Traverse mit einer Eigenlast von $q_T = 150\,\frac{\text{N}}{\text{m}}$ wird an zwei Punkten angeschlagen und wird durch verschiedenen Punkt- und Streckenlasten (siehe Skizze) belastet, die folgende Größen haben:

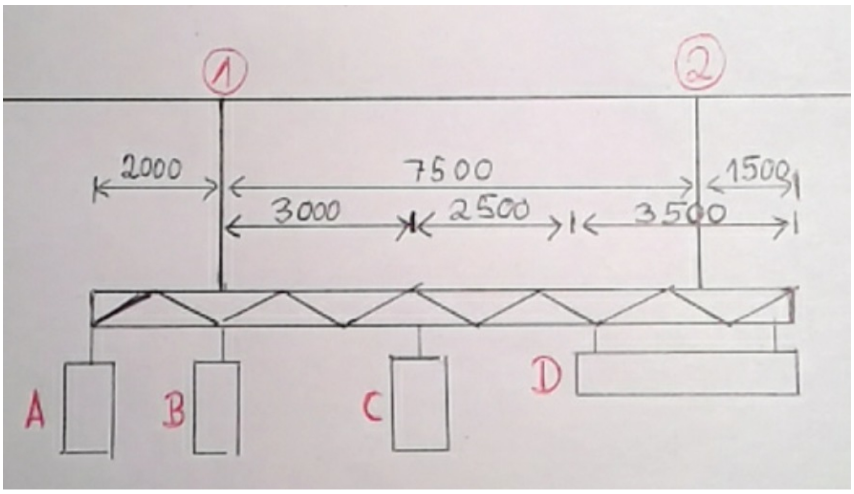
   A Einzellast $F_A = 1,75\,\text{kN}$

   B Einzellast $F_B = 1,75\,\text{kN}$

   C Einzellast $F_C = 2,25\,\text{kN}$

   D Streckenlast $q_D = 1,1\,\frac{\text{kN}}{\text{m}}$

   Berechne die Kräfte auf die beiden Aufhängepunkte A und B unter Berücksichtigung der Eigenlast der Traverse.



2.3 Dynamik: Beförderung von Lasten an Zügen

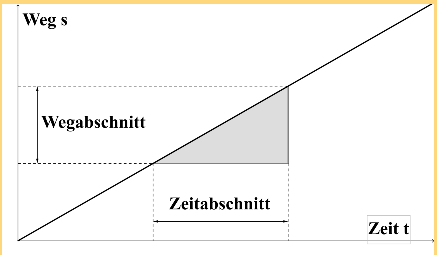
Gleichförmige Bewegungen: Eine gleichförmige Bewegung ist eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit. D.h. in jedem Zeitabschnitt Δt wird die gleiche Wegstrecke Δs zurückgelegt. Das Verhältnis von Wegstrecke zu Zeiteinheit heißt Geschwindigkeit v:

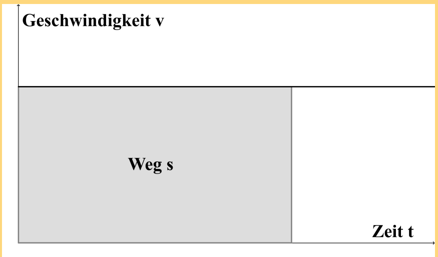
$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \qquad \left[\frac{m}{s} = 3,6\,\frac{km}{h}\right]$$

Stellt man diese Formel nach dem Weg um, erhält man das sog. Weg-Zeit-Gesetz der gleichförmigen Bewegung:

$$s = v \cdot t$$

Grafisch lässt sich die gleichförmige Bewegung in einem Weg-Zeit- und einem Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm darstellen:





Gleichmäßig beschleunigte Bewegungen: Bei Bewegungen mit gleichmäßiger Beschleunigung ändert sich die Geschwindigkeit in jedem Zeitabschnitt Δt um den gleichen Betrag Δv. Das Verhältnis von Geschwindigkeitsänderung zu Zeiteinheit heißt Beschleunigung a:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

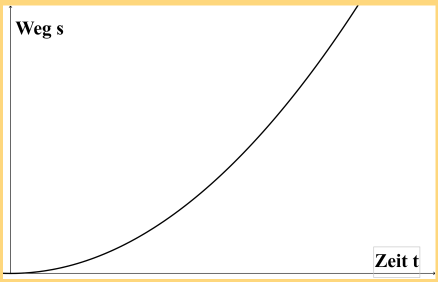
Umgestellt ergibt sich das Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz::

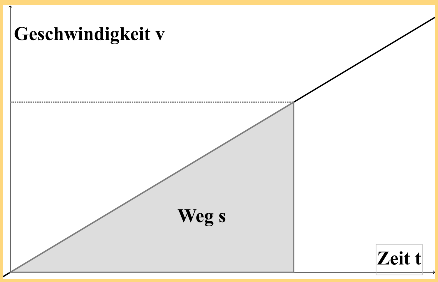
$$\Delta v = a \cdot \Delta t$$

Das Weg-Zeit-Gesetz lässt sich in zwei Formen schreiben:

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot \Delta v \cdot t$$

Grafisch lässt sich die gleichförmige Bewegung in einem Weg-Zeit- und einem Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm darstellen:





Trägheitskräfte
Wie oben schon angesprochen, verharrt ein Körper in seinem Bewegungszustand, ändert freiwillig weder Geschwindigkeit noch Richtung. Er ist träge. Will man ihn in Bewegung setzen oder seine Geschwindigkeit ändern, so muss eine Beschleunigungskraft auf den Körper wirken, die die Trägheit (=Trägheitskraft) überwindet. Diese Kraft tritt immer entgegen der Beschleunigungsrichtung auf und berechnet sich nach der Grundgleichung der Mechanik:

$$F = m \cdot a$$

Übungsaufgabe:

4. Ein Zug bewegt eine Last von 250 kg mit einer Geschwindigkeit von $1,2\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ nach unten. Er wird bei einem Stromausfall durch die Notbremsen so abgebremst, dass er innerhalb 0,6 s zum Stehen kommt.
   a) Wie groß ist die negative Beschleunigung a_{Brems} durch die Bremsen?
   b) Wie groß ist die daraus resultierende Trägheitskraft F_T der Last?
   c) Wie groß ist die Belastung der Tragmittel des Zuges bei Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit?
   d) Wie groß ist die Belastung der Tragmittel des Zuges beim Abbremsvorgang?
   e) Wie groß ist die Belastung der Tragmittel des Zuges, wenn die Last mit der gleichen Geschwindigkeit nach oben befördert wird und nun genauso abgebremst wird?
   f) Welche Entfernung s legt die Last beim Abbremsen zurück?

2.4 Standsicherheit

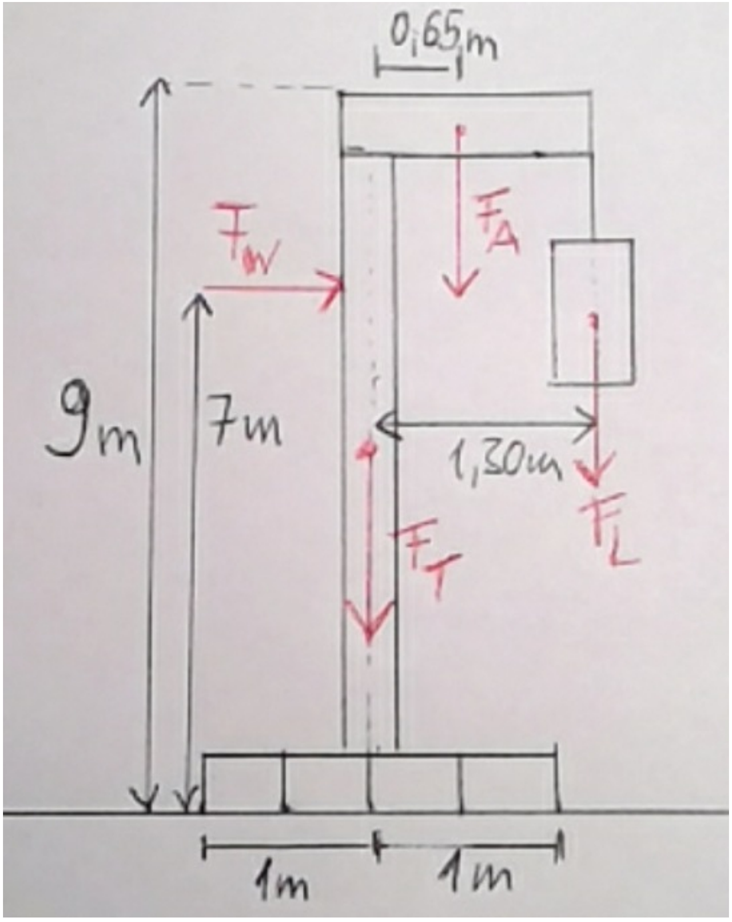
Unter der **Standsicherheit** S eines Aufbaus versteht man das Verhältnis von Standmoment M_S zu Kippmoment M_K:

$$S = \frac{M_S}{M_K}$$

Das Kippmoment ist die Summe aller Drehmomente, die in Kipprichtung des Aufbaus wirken, das Standmoment ist die Summe aller Drehmomente, die entgegen der Kipprichtung wirken.

Übungsaufgabe:

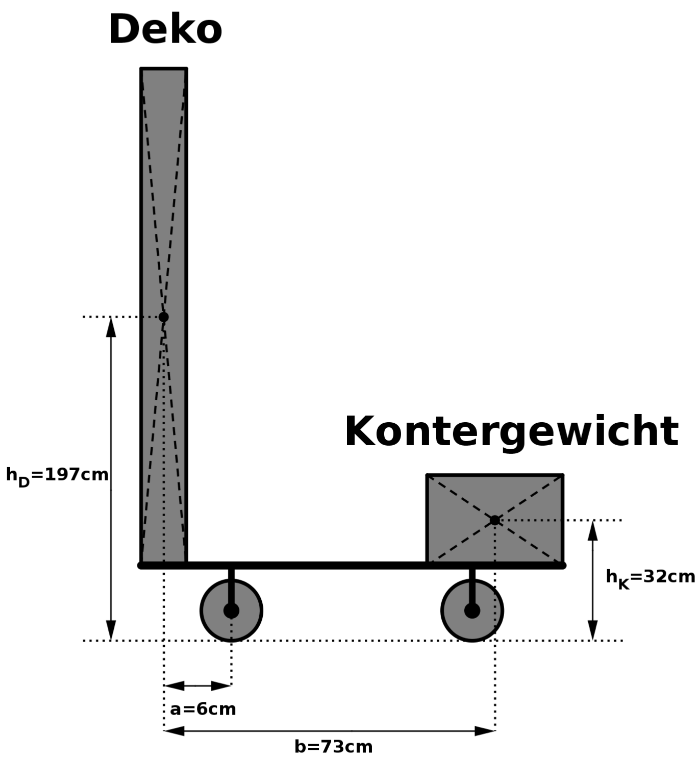
5. In folgender Zeichnung ist ein Tower (Eigenlasten: Tower und Basement $F_T = 2{,}3\,\text{kN}$, Ausleger $F_A = 0{,}25\,\text{kN}$) mit eingehängter Last $F_L = 4{,}8\,\text{kN}$ dargestellt. Eine Windlast nehmen wir horizontal in der eingezeichneten Höhe mit $F_W = 0{,}8\,\text{kN}$ an. Wie viel Ballast muss man zusätzlich mittig auf dem Basement anbringen, damit der Tower mit einer Standsicherheit von 2 steht?



2.5 Standsicherheit und Dynamik

Übungsaufgabe:

6. Ein Bühnenwagen mit folgenden Abmessungen ist gegeben. Auf diesem frei verfahrbaren Bühnenwagen ist ein Dekorationsteil montiert. Die Gewichtskraft der Dekoration beträgt $1,5\,\text{kN}$. Die DIN 15 920 Teil 14 legt fest, dass in diesem Fall eine horizontale Zusatzlast in Höhe von 10% der vertikalen Lasten angenommen werden muss. Diese Zusatzlast setzt man am Schwerpunkt der vertikalen Lasten an.



a) Wann kann eine horizontale Zusatzlast bei dem Bühnenwagen auftreten?

b) Wie groß muss das Kontergewicht mindestens sein, wenn ein Sicherheitsfaktor 2 gegen Kippen berücksichtigt wird (mit horizontaler Zusatzlast nach DIN 15 920)?

c) Angenommen der Wagen fährt mit einer Geschwindigkeit von $1\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ und kommt abrupt zum Stehen (innerhalb von $0,1\,\text{s}$). Wie groß ist die auftretende horizontale Zusatzlast? Wird sie durch das oben berechnete Kontergewicht abgefangen oder kippt der Wagen?

d) Wie schnell darf der Wagen höchstens sein, wenn er so abrupt abgebremst wird, dass er gerade nicht kippt?

e) Angenommen der Wagen fährt mit einer Geschwindigkeit von $1\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ und soll nun zum Stehen gebracht werden. Wie lange muss der Abbremsvorgang dauern, damit der Wagen gerade nicht kippt (Kontergewicht, wie in Aufgabe (e) berechnet)?

2.6 Festigkeitslehre

Äußere Kräfte, die auf ein Bauteil wirken, heißen **Lasten** oder **Belastungen**. Die **inneren Kräfte**, die dadurch im Bauteil in gleicher Größe hervorgerufen werden, heißen **Beanspruchungen**. Die Belastungen verursachen Verformungen. Die inneren Kräfte wirken diesen Deformationen entgegen. Je größer die Belastung ist, desto größer sind auch die inneren Kräfte.
Häufig geht es in der Festigkeitslehre um die Frage, ob das Bauteil der jeweiligen Beanspruchung standhält. Die Widerstandsfähigkeit eines Bauteils gegen Beanspruchungen nennt man **Festigkeit**.
Die Beanspruchung eines Materials hängt von der **Größe der inneren Kräfte bzw. Momente** und dem **Querschnitt** des Bauteils ab. Die Messgröße der Beanspruchung ist die **Spannung**, die man ganz allgemein aus dem Verhältnis von Kraft bzw. Drehmoment zu einer Querschnittsgröße berechnet. Die Spannungen, die aus inneren Kräften resultieren, beziehen sich auf die Querschnittsfläche A des Bauteils. Die Spannungen, die von Momenten hervorgerufen werden, beziehen sich auf das sog. **Widerstandsmoment** W, die man in Tabellenwerken finden kann. Die in einem Bauteil auftretende Spannung kann man über eine der beiden folgenden Grundformeln berechnen:

$$\text{Spannung} = \frac{F}{A} \text{ oder } \frac{M}{W} \qquad \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$$

Man unterscheidet folgende Spannungsarten:

- **Normalspannungen**:
  - Zugspannung σ_z
  - Druckspannung σ_d
  - Biegespannung σ_b
- **Schubspannungen**:
  - Abscherspannung τ_a
  - Torsionsspannung τ_t

Außerdem gibt es noch zwei Sonderfälle der Druckspannung, die für die Veranstaltungstechnik auch von Interesse sind:

- Auflagedruck oder Flächenpressung p
- Lochleibungsspannung σ_L

Zulässige Spannungen für alle Beanspruchungsarten und Materialien finden sich in allen Tabellenwerken. Diese hängen auch von Sicherheitsfaktoren ab, die für einige Anwendungen vorgeschrieben, für andere sinnvoll angesetzt werden müssen. Letztlich muss nachgewiesen werden, dass:

$$\sigma_{tatsächlich} < \sigma_{zulässig}$$

Die zulässige Spannung hängt von Materialkennwerten (z.B. Zugfestigkeit R_m, Streckgrenze R_e) und Sicherheitsfaktoren ab.

Übungsaufgabe:

7. Ein Träger der Länge 7,5 m liegt mit seinen Enden auf zwei Lagern auf. In 3 m Entfernung vom linken Auflager beginnt eine vertikale Streckenlast mit $q = 1,6\,\frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{m}}$, die in 6,2 m Entfernung vom linken Auflager endet.
   a) Berechne die Auflagerkräfte in den beiden Lagern und fertige eine Zeichnung des freigestellten Trägers mit allen Abständen an.
   b) Fertige eine Skizze der Verläufe von Normalkraft, Querkraft und Biegemoment an.
   c) An welcher Stelle tritt das größte Biegemoment auf? Berechne das maximale Biegemoment.
   d) Wie muss ein Träger aus St37 (kreisförmiges Hohlprofil) dimensioniert sein, damit die zulässige Biegespannung nicht überschritten wird? Wie groß ist in diesem Fall die maximale Biegespannung?
   e) Welche Durchbiegung hat der Träger?

2.7 Knicken nach Euler

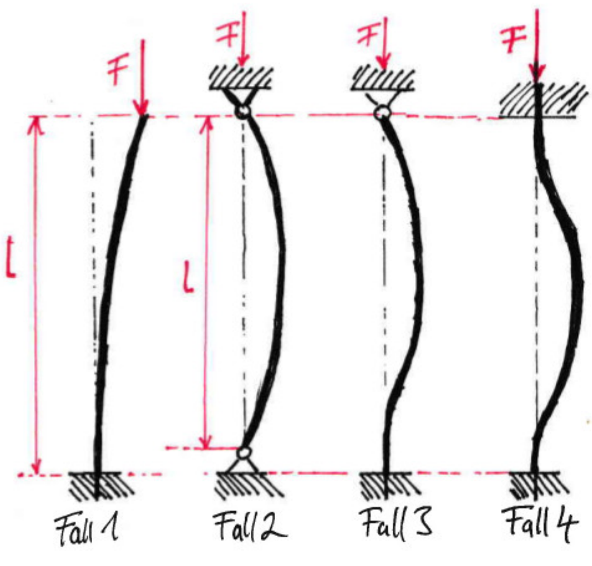
Zum seitlichen **Ausknicken** eines Stabes bei Druckbelastung kann es kommen, obwohl die Belastung genau in Richtung der Stabachse wirkt. Der Vorgang kann noch vor Erreichen der **Quetschgrenze** des Materials eintreten.
Die Gefahr des seitlichen Ausknickens ist um so größer, je schlanker der Stab ist, d.h., wenn die Stablänge l im Verhältnis zu seiner Querschnittsfläche A sehr groß ist.
Man definiert die **Knickkraft** F_K als diejenige Kraft, die nötig ist, damit das Ausknicken eines Stabes beginnt. Die **Knickspannung** σ_K ist analog dazu die nötige Druckspannung. Die vorhandene Druckkraft in einem Bauteil muss genauso wie die vorhandene Druckspannung mit Sicherheit unter der Knickkraft bzw. Knickspannung bleiben. Deshalb werden die zulässigen Werte für diese Größen in der Regel mit sehr großen Sicherheitsfaktoren berechnet:

$$F_{D_{zulässig}} = \frac{F_K}{\nu} \qquad \text{bzw.} \qquad \sigma_{D_{zulässig}} = \frac{\sigma_K}{\nu}$$

Man spricht von elastischer Knickung, wenn die Knickspannung kleiner ist als die Proportionalitätsgrenze der Druckspannung des Materials. Für diesen Fall hat der Mathematiker Leonhard Euler eine Formel zur Berechnung der Knickkraft aufgestellt:

$$F_K = \frac{E \cdot I_{min} \cdot \pi^2}{s^2}$$

Die Knickkraft ist vom Material (der Elastizitätsmodul E ist eine Stoffkonstante), der Querschnittsform und -größe (Flächenmoment 2. Grades I) und der Stablänge s abhängig.
Die wirksame Knicklänge s des Stabes wird, außer von der tatsächlichen Stablänge l, von der **Lagerung der Stabenden** bestimmt. Es können folgende Fälle unterschieden werden:



Wie die wirksame Knicklänge s mit der tatsächlichen Stablänge l zusammenhängt, zeigt folgende Tabelle:

Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
$s = 2 \cdot l$	$s = l$	$s = 0,7 \cdot l$	$s = 0,5 \cdot l$

Setzt man in die Eulergleichung für F_K das Produkt aus Sicherheitsfaktor ν und Druckkraft F_D ein und stellt die Gleichung nach dem Flächenmoment I um, so erhält man eine Gleichung, mit der man das erforderliche Flächenmoment 2. Grades und damit die Abmessungen eines Trägers, der ausreichend gegen Knicken gesichert ist, bestimmen kann:

$$I_{erforderlich} = \frac{\nu \cdot F_D \cdot s^2}{E \cdot \pi^2}$$

Mit Hilfe einer entsprechenden Tabelle kann man nun die Abmessungen des Trägers bestimmen, wenn man die Querschnittsform gewählt hat.
Nun muss überprüft werden, ob die Bedingung für das Rechnen mit der Eulerformel überhaupt gegeben ist. Die Druckspannung im Träger muss unterhalb der Proportionalitätsgrenze der Druckspannung liegen. Dazu bestimmt man eine Größe, die **Schlankheitsgrad** des Trägers genannt wird und mit λ bezeichnet wird:

$$\lambda = \frac{s}{i}$$

Der Trägheitsradius i ist meistens auch in Tabellen für Widerstandsmomente und Flächenmomente zu finden und kann andernfalls aus dem zugehörigen Flächenmoment 2. Grades bestimmt werden:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Man bestimmt also mit obiger Gleichung den Schlankheitsgrad λ des Trägers und vergleicht ihn mit dem sog. Grenzschlankheitsgrad λ_0, der mit der Proportionalitätsgrenze der Druckspannung σ_{D_P} zusammenhängt:

$$\lambda_0 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{D_P}}}$$

Ist der Schlankheitsgrad größer als der Grenzschlankheitsgrad, so darf man mit der Eulerformel rechnen.

$$\lambda > \lambda_0$$

Über den Schlankheitsgrad kann man auch sehr einfach die Knickspannung im Träger berechnen:

$$\sigma_K = \frac{F_K}{A} = \frac{E \cdot \pi^2}{\lambda^2}$$

Hier eine Tabelle mit Elastizitätsmodulen E und Grenzschlankheitsgraden λ_0[1] einiger Werkstoffe:

Werkstoff	E in $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	λ_0
Nadelholz	10000	100
Gußeisen	100000	80
S235JR (St37)	210000	105
E295 (St50) und E335 (St60)	210000	89
Al-Cu-Mg	70000	66
Al-Mg3	70000	110

[1] Werte entnommen aus: Alfred Böge: Technische Mechanik. Vieweg + Teubner, 29. Aufl. 2011. S. 354

Übungsaufgaben:

8. Ein 0,5 m langer Rundstab aus S235J mit einem Durchmesser von 5 mm ist senkrecht gelagert und nur unten fest eingespannt.
   a) Überprüfe, ob es sich hierbei um eine elastische Knickung handelt. Berechne die kritische Knickkraft und die zugehörige Knickspannung.
   b) Wie groß darf die Druckkraft auf den Stab bei einer fünffachen Sicherheit gegen Knicken höchstens sein?
   c) Welchen Durchmesser müsste der Rundstab haben, damit er die doppelte Druckkraft bei gleicher Sicherheit aufnehmen darf?

9. Eine gleichmäßig mit 36 kN belastete rechteckige Platte wird in jeder Ecke durch eine Stütze der Länge 2,15 m getragen. Die Stützen sollen Rundrohre aus Baustahl St37 mit einer Wandstärke von 5 mm sein, die fest im Boden verankert sind. Die Platte habe eine sehr hohe Biegesteifigkeit, sodass Biegemomente hier nicht betrachtet werden müssen. Die Frage ist aber, wie die Stützen dimensioniert werden müssen, damit gegen Druck und Knicken jeweils eine Sicherheit von 5 gewährleistet ist. Wie groß müsste der Außendurchmesser der Rundrohre mindestens sein?
   Hinweis: Die Berechnung des Außendurchmessers ist hier mathematisch recht anspruchsvoll. Du kannst auch eine Tabelle mit Flächenmomenten 2. Grades für Rundrohre zu Hilfe nehmen, um ein passendes Format zu finden.