

Leseprobe aus Kapitel 4 ‚Mechanische Dynamik‘ des Buchs

‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘

Weitere Informationen zum Buch finden Sie unter strukturbildung-simulation.de

4.1 Dynamische Grundbegriffe

Technisch wichtig ist die Umwandlung von einer Energieform in eine andere durch **Maschinen**. Hier soll gezeigt werden, wie sie durch Strukturbildung und Simulation berechnet werden. Wir beginnen das Thema ‚Dynamische Mechanik‘ mit der Erläuterung wichtiger Begriffe.

4.1.1 Was ist Energie?

Alle grundlegenden System-Eigenschaften basieren auf den Begriffen Energie und Leistung. So ermitteln wir die Vorwärts- und Rückwärts-Konstanten passiver Vierpole aus der Gleichheit von Energie oder Leistung am Ein- und Ausgang des Systems.

Beispiele: Motor und Generator - Kapitel 7 und Piezos - Kapitel 11.

Energie kann bekanntermaßen weder aus dem Nichts erzeugt werden (Perpetuum-Mobile 1. Art) noch vernichtet werden, sondern immer nur von einer in eine andere Form umgewandelt werden (erster Hauptsatz der Wärmelehre –

Ausnahme: der **Urknall**.

Dort soll auf ein-mal alle Energie des Universums durch eine Quanten-Fluktuation des Vakuums entstanden sein.

In Physik und Technik und zur Simulation müssen die Begriffe Kraft und Energie natürlich genau definiert sein, damit sie gemessen und berechnet werden können. Deshalb beginnen wir mit der Erklärung der mechanischen Begriffe.

Drei Erscheinungsformen der Energie sind möglich:

1. Die **Energie der Lage** (statische oder potentielle Energie).
Sie ist gespeichert, wenn Federn gespannt sind oder sich Teilchen anziehen oder abstoßen (Massen, Ladungen). Potentielle Energien erzeugen in Materialien mechanische Spannungen.
2. Die **Bewegungs-Energie** (kinetische Energie).
Sie wird in bewegten Massen und magnetischen Feldern gespeichert. Bei Änderung der kinetischen Energie entstehen Trägheits-Kräfte.
3. Die **Reibungs-Arbeit**. Sie tritt immer dann auf, wenn Körper mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in Kontakt kommen. Reibungs-Arbeit erzeugt Wärme, die bei niedrigen Temperaturen technisch nicht mehr genutzt werden kann und dann als Abfall bezeichnet wird.

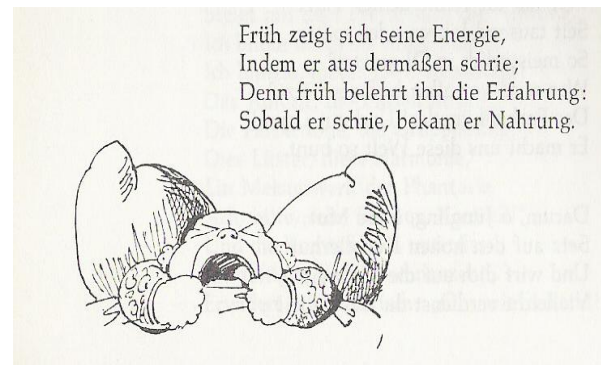


Abb. 4.1.1-1 Wilhelm Busch\Maler Klexel: Was ist Energie? Wilhelm Busch verwendet den Ausdruck ‚Energie‘ allerdings mehr Umgangssprachlich zur Beschreibung großer Kraft und Anstrengung.



Abb. 4.1.1-1 Die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie durch eine Windenergie-Anlage.

Energie-Speicher

Energie lässt sich speichern – leider aber nur schwer in großen Mengen.

Beispiele: Pumpspeicherwerke, heißes Öl, Batterien, elektrische Kondensatoren.

Die in Gasen gespeicherte Wärme-Energie heißt **Enthalpie**

Auch elektrische Energie kann nicht in großen Mengen gespeichert werden. Um die Spannung eines Versorgungs-Netzes stabil zu halten, darf nur so viel erzeugt werden, wie gerade verbraucht wird.

Je größer das spezifische Gewicht des Speicher-Mediums ist, desto größer ist auch die **Energie-Dichte E/Vol** (Energie/Volumen) des Speichers. Dies zu wissen ist für den Bau von Maschinen wichtig. Vergrößert man die Nennleistung eines Motors bei gleichem oder kleinerem Volumen, so bedeutet dies stets höheren Stress für das Material, z.B. durch höhere Temperatur.

Entropie

Man unterscheidet **höhere und niedrigere Formen der Energie**, die sich durch ihre innere **Unordnung (Entropie)** unterscheiden. Eine höhere Energieform (mit geringerer Entropie) kann sich unter Wärmeabgabe von selbst in eine niedrigere umwandeln (z.B. Kondensation von Dampf zu Wasser), nie aber umgekehrt (zweiter Hauptsatz der Wärmelehre). So kann ein Schiff nicht auf dem Ozean kreuzen (potentielle Energie ist konstant, kinetische Energie wird der Wärme des Wassers entzogen) und die Energie dafür ohne Maschine der Wärme des Wassers entnehmen (Perpetuum Mobile 2. Art).

Für den Physiker, der Aussagen über den Zustand eines Systems machen will, ist dessen (potenzielle, kinetische oder Gesamt-) Energie E die Grundlage seiner Überlegungen. Z.B. absorbieren oder emittieren Atome Strahlung, wenn sich die potentielle Energie der Bindung ihrer Elektronen an den Kern ändert.

Die Lenz'sche Regel ist ein Gesetz, dass die Richtung von Kräften bestimmt.

Lässt man der Natur freien Lauf, so ist sie immer bestrebt, Energie-Unterschiede auszugleichen (Entropie-Maximierung). Dadurch wird die Energiedichte (Energie pro Volumen) im Raum minimiert. Solange das noch nicht der Fall ist, entstehen Kräfte **in diese Richtung**. Dieses **Naturgesetz** wird **Lenz'sche Regel** oder auch **Prinzip des kleinsten Zwanges** genannt. Dieses Gesetz wird technisch zum Bau von Energie-Wandlern genutzt: z.B. Motoren und Transformatoren.

Energie und Masse

Große Mengen von Wasserstoff bilden infolge Massenanziehung entgegen der allgemeinen Expansion des Raums Sterne und Galaxien. In Sternen, wie z.B. unserer Sonne, fusioniert der Wasserstoff zu Helium. Die dabei frei werdende Bindungsenergie erzeugt die Strahlung, die das Leben auf der Erde ermöglicht. Dabei wird ein Teil ihrer Masse wieder zurück in Strahlung verwandelt. Das Gesetz, das diese Energie-Umwandungen beschreibt, ist Einsteins berühmte Formel $E=mc^2$ mit der Lichtgeschwindigkeit $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s. Darin ist E die kurz nach dem Urknall in Masse m verwandelte Strahlungs-Energie. Weil c ein sehr großer Wert ist, ist dies eine unvorstellbar große Menge. Trotz aller Umwandlungen von Strahlung in Materie und umgekehrt, bleibt die Gesamt-Energie im Universum konstant (Erhaltungsgröße).

Gravitation und potentielle Energie

Massen ziehen einander an. Das erzeugt potentielle Energie.

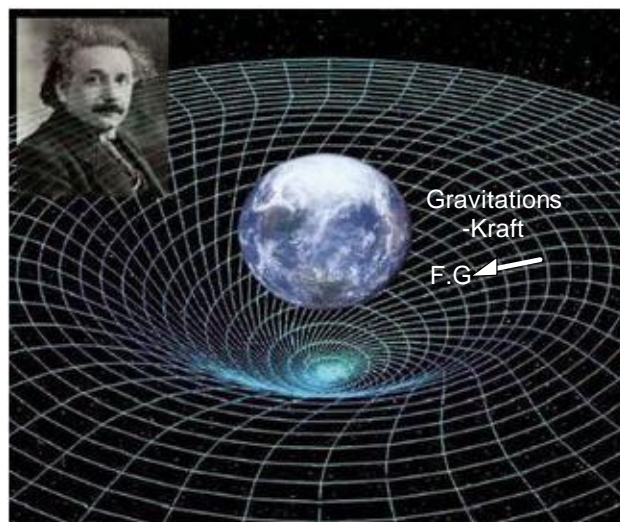
Die **Massenanziehungskraft F.G** lässt sich durch das **Gravitationsgesetz** berechnen:

$$F.G = -G \cdot m.1 \cdot m.2 / r^2 \quad \text{- in Newton N}$$

... mit der Gravitationskonstanten $G = 67 \cdot 10^{-12} \text{N} \cdot (\text{m/kg})^2$.

Gravitations-Kräfte sind proportional zu den beteiligten Massen $m.1$ und $m.2$ und nehmen mit dem Quadrat ihres Abstandes ab. Da abstoßende Kräfte positiv definiert werden, beschreibt das Minuszeichen die Massenanziehung. Massenabstoßung, entsprechend der elektrischen Abstoßung gleicher Ladungen, gibt es nicht (Die Ursache ist dem Autor unbekannt).

Abb. 4.1.1-2 Die Änderung des Gravitations-Potentials einer Bezugs-Masse erzeugt die Gewichtskraft auf eine Probe-Masse



Das Gravitationsgesetz regelt alle Bewegungen der Sterne und Galaxien im Kosmos, auch den Umlauf der Planeten um die Sonne. Bei Massen untereinander auf der Erde oder gar im Atomaren, spielt sie keine Rolle, denn dazu sind die Massen viel zu klein. Gravitationskräfte sind mit Abstand die schwächsten aller physikalisch bekannten Kräfte. Mit der Festigkeit von Materialien haben sie nichts zu tun. Die entsteht allein durch elektrostatische Kräfte.

Schwere und träge Masse

Zur Berechnung von **Trägheitskräften** $F.T = m.T \cdot a$ benötigt man die **träge Masse** $m.T$ und ihre **Beschleunigung** a . Das gilt universell im ganzen Universum.

Zur Berechnung von **Gewichtskräften** $F.G$ (kurz: Gewicht G) auf der Erde benötigt man außer der **Erd-Masse** $m.Erde$ und dem gemittelten **Erd-Radius** $r.Erde$ noch die **schwere Masse** $m.S$ eines Test-Körpers und eine universelle **Gravitations-Konstante** $k.Grav$ (auch G genannt):

$$F.G = k.Grav * \frac{m.Erde * m.S}{r.Erde^2}$$

Die Gravitations-Konstante $k.Grav$ wird zu $66,7 \text{ pN}(\text{kg/m})^2$ angegeben.

Der mittlere Erd-Radius ist $6,37 \text{ Mm}$ (mit $M=10^6$) -> $r.Erde^2 \approx 40 \text{ Tm}^2$ (mit $T=10^{12}$)

Die Erd-Masse ist $m.Erde \approx 6 \text{ Ykg}$ (mit $Y=10^{24}$)

Die folgende Struktur berechnet die Trägheitskraft $F.T$ einer Masse $m.T$ für die Erd-Beschleunigung $a=g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ und die Gewichtskraft $F.G$ für den Fall, dass die schwere Masse $m.G$ und die träge Masse $m.T$ gleich groß sind.

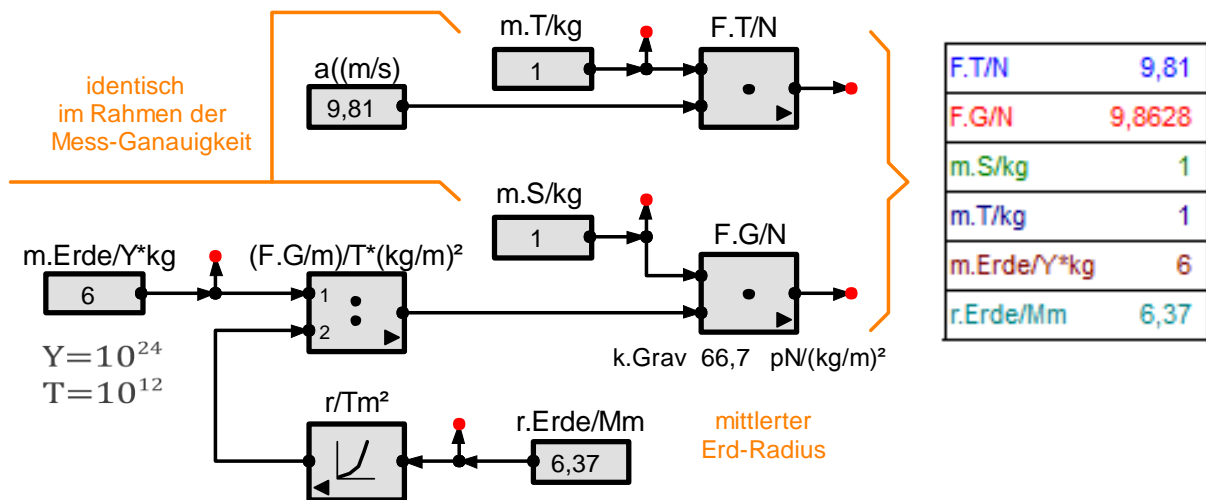


Abb. 4.1.1-3 Berechnung der Trägheitskraft (oben) und der Gewichtskraft (unten): Sie sind gleich, wenn die träge und die schwere Masse identisch ist.

Die **Trägheitskraft** $F.T = m \cdot a$ entsteht bei der **Geschwindigkeits-Änderung**, genannt **Beschleunigung** $a=v/t$ von Massen m . Sie benötigt keinerlei Bezug zur Umgebung. Man nennt Trägheitskräfte daher **inertial**.

Die **Einheit der Kraft**, das Newton N , wird über die **Massenträgheit** definiert: Aus der Trägheitskraft $F.T = m \cdot a$ wird die **Krafteinheit Newton: $1N = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$** .

Eine Tafel Schokolade ($m=100\text{g}$) hat auf der Erde die Gewichtskraft von $1N$.

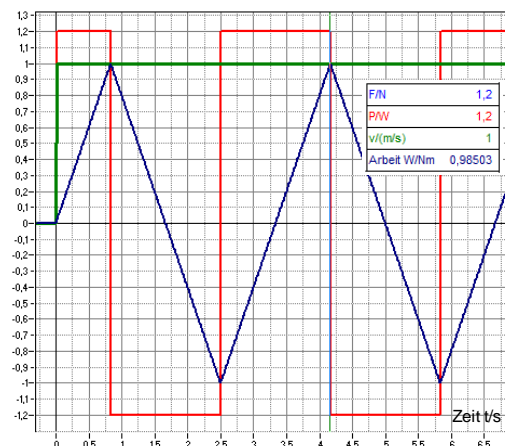


Abb. 4.1.1-4 Geschwindigkeit $v=P/\text{Feiner Masse}$ Leistung P ,

Das Äquivalenz-Prinzip

Die träge Masse zur Berechnung der Trägheitskraft ist aus ungeklärter Ursache gleich der schweren Masse (Äquivalenz-Prinzip).

Die Erde beschleunigt Massen mit der **Erdbeschleunigung $g = 9,8\text{m/s}^2$** . Daher hat die Masse von 1kg das Gewicht $9,8\text{kgm/s}^2 = 1\text{kp}$. Auf dem Mond, der 1/81 der Erdmasse hat und knapp 1/3 ihres Durchmessers, würde das kg nur 1/6·kp wiegen.

Druck $p=F/A/E/\text{Vol}$ ist Kraft F pro Fläche A, entsprechend Energie $E=F \cdot x$ pro Volumen $\text{Vol}=A \cdot x$. Der Druck wird umso größer, je kleiner die **Fläche A** ist, auf die die Kraft F wirkt (z.B. mit einer Stecknadel). Drücke erzeugen in Materialien innere Spannungen. Das ist das Maß für den Stress, dem das Material ausgesetzt ist.

Drücke werden in den Kapiteln 12 Pneumatik/Hydraulik und 14 Kältetechnik (geplant) eine wichtige Rolle spielen

4.1.2 Arbeit, Leistung und Impuls

Mechanische **Arbeit $W = F \cdot s$** wird verrichtet, wenn eine **Kraft F** ihren Angriffspunkt um den **Weg x** verschiebt. Dabei müssen **F und x dieselbe Richtung** haben.

Die mechanische Leistung **$P=W/t = F \cdot v$** ist umso größer, je höher die **Geschwindigkeit $v=x/t$** der Kraft-Verschiebung ist. Die folgende Abbildung symbolisiert die Zusammenhänge:

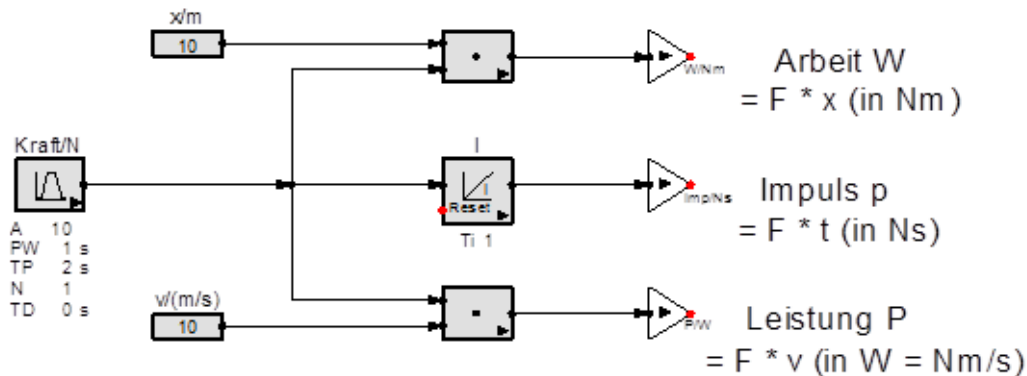


Abb. 4.1.2-5 Arbeit, Leistung und Impuls: So wird aus Kraft F und Geschwindigkeit v Arbeit W, Impuls p und Leistung P.

Leistung und Kraft

Die Energie (E oder W) spielt bei Simulationen keine Rolle wenn sie konstant ist. Technisch wichtig sind

- die **zeitliche** Änderung der Energie. Sie heißt **Leistung $P=dW/dt=F \cdot v$** .
- und die **räumliche** Änderung der Energie. Sie heißt **Kraft $F=dW/dr$** .
- Die Geschwindigkeit **$v=P/F$** , mit der eine Maschine arbeitet, ist das Verhältnis aus Leistung und Kraft.
- Der Impuls **$p=dF/dt=M \cdot v$** ist die zeitliche Änderung einer Kraft F auf eine **Masse m**

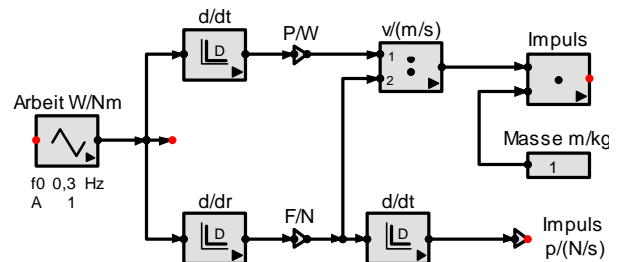


Abb. 4.1.2-6 Die Folgen der zeitlichen und räumlichen Energie-Änderung

Leistungs-Berechnung

Leistung wird immer aus einem statischen und einem dynamischen Faktor gebildet. Der dynamische Anteil der Leistung ist ein Teilchen-Strom. Strom mal Zeit ergibt eine Menge Q oder **Arbeit $W = \text{Energie-Änderung } \Delta E$** . Sie ändert den Zustand eines Systems:

- **translatorisch:** Geschwindigkeit $v \cdot \Delta t = \Delta x$ ergibt die Wegänderung Δx
- **rotatorisch:** Winkelgeschwindigkeit $\Omega \cdot \Delta t = \Delta \varphi$ ergibt eine Winkeländerung $\Delta \varphi$
- **elektrisch:** Strom $i \cdot \Delta t = \Delta q$ ergibt eine Ladungsänderung Δq
- **thermische** Leistung $P_{th} \cdot \Delta t = \Delta Q$ ergibt eine Wärmeänderung ΔQ .

Leistungs-Wandler (Motor, Generator)

Nur durch Maschinen kann eine niedrigere Energieform (z.B. Wärme) in eine höhere umgewandelt werden, z.B. in thermischen Kraftwerken: Dampf treibt eine Turbine, die Turbine einen Generator, der Generator erzeugt Strom.

- Die **Arbeit $F \cdot x$** bestimmt die Betriebskosten einer Anlage.
- Die installierte Leistung **$P_{Nen} = (F \cdot v)_{Nen}$** bestimmt ihre Baugröße.
- Die **Leistungsdichte (Leistung/Volumen)** bestimmt die (lokale) Erwärmung (Stress des Materials).
- Bei der Rotation wird aus dem Weg x der Winkel $\varphi = x/r$ und aus der Geschwindigkeit v die Winkel-Geschwindigkeit $\Omega = v/r$. Damit errechnen sich rotatorische Leistungen **$P_{rot} = M \cdot \Omega$** – in $Nm \cdot rad/s = W$
Bei Motoren heißt die Winkel-Geschwindigkeit ‘**Drehzahl n** ’ und wird in Umdrehungen pro Minute (Umd/min) gemessen. Der Umrechnung-Faktor ist $360^\circ/2\pi = 9,55$.

Die Umwandlung in höherwertige Energie ist immer mit Wärme-Verlusten verbunden. Je geringer die Verluste, desto besser ist der **Wirkungsgrad η** (abgegebene/aufgenommene Leistung) einer Maschine. Wärme ist die niedrigste aller Energie-Formen und damit ihr Endzustand. Die Temperatur T bewertet die Wärme. Je höher die Temperatur T ist, desto verlustärmer kann Wärme in andere Energieformen umgewandelt werden. Wärme mit Umgebungs-Temperatur ist zu nichts mehr zu gebrauchen (Abfall).

Ein Beispiel, in dem die hier genannten Gesetze angewendet werden, ist die **Windkraft-Anlage WKA**. Mit ihr wird elektrischer Strom aus der Kraft des Windes erzeugt. Die (angenäherte) Simulation einer WKA finden Sie im **Kapitel ‚Gleichstrom-Maschinen‘**.

Frei werdende Energie verrichtet Arbeit. Je schneller das geschieht, desto höher ist die Leistung. Einzelheiten über ihr Zustandekommen (die Vorgeschichte) sagt die Energie nicht aus.

Hier werden wir uns nur mit den technischen Aspekten der Energie-Umwandlung durch Maschinen befassen. Mechanische und elektrische Energie lassen sich durch Motoren und Generatoren verlustarm ineinander umwandeln:

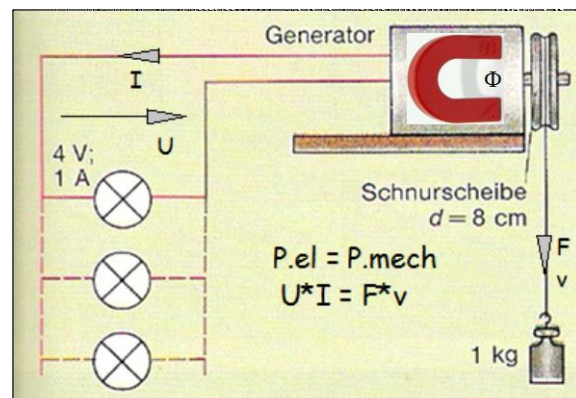


Abb. 4.1.2-7 Ein Motor wandelt die potenzielle Energie eines Gewichts in elektrische Leistung mal Zeit um. Im verlustfreien Fall gilt: $P_{mech} = F \cdot v \Rightarrow P_{el} = U \cdot I$.

Impulse

Wenn elektrische Signale nur eine begrenzte **Zeit** Δt wirken, spricht man von einem Impuls. Impulse beschleunigen Massen m und elektrische Ladungen q .

Je länger ein Impuls dauert, desto größer ist die **Geschwindigkeits-Änderung** Δv .

Der **translatorische Impuls**

$$p = F \cdot \Delta t. = m \cdot \Delta v$$

verursacht bei einer **Masse** m (dynamischer Speicher) die **Geschwindigkeits-Änderung** Δv .

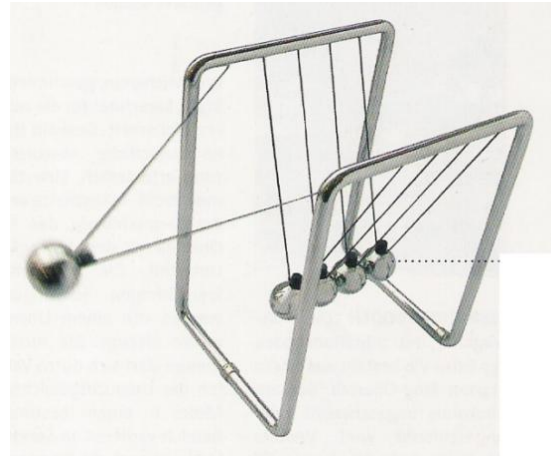
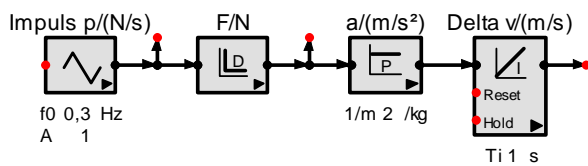


Abb. 4.1.2-8 Der mechanischer Impuls p ist ein Kraft-Stoß. Er bewirkt bei reibungsfreien Massen m eine Geschwindigkeits-Änderung $\Delta v=p/m$.

Der zum Linear-Impuls analoge **Drehimpuls** $L = M \cdot \Delta t. = J \cdot \Delta \Omega$ entsteht durch ein mechanisches **Drehmoment** $M=F \cdot r$, mit der eine Kraft F in einem Abstand r eine bestimmte **Zeit** Δt angreift. Es verursacht bei der **Drehmasse** J die **Drehzahl-Änderung** $\Delta \Omega$.

Der Drehimpuls L wird im **Abschnitt** ‚**Kreisel**‘ dieses Kapitels zur Erklärung des **Kreisels** benötigt.

Elektrische Impulse

- der Strom-Impuls $i \cdot \Delta t = \Delta q$ ändert die elektrische Ladung q ,
- der Spannungs-Impuls $u \cdot \Delta t = \Delta \Phi$ ändert in einer Leiterschleife den magnetischen Fluss Φ .

4.2 Mechanische Bauelemente

Passive mechanische Systeme bestehen aus Federn (statische Speicher), Massen (dynamische Speicher) und Dämpfern (Reibungs-Erzeuger). Das Zeitverhalten dynamischer Systeme entsteht durch das Zusammenspiel von Speichern und Verbrauchern. Um es nach eigenen Wünschen gestalten zu können, müssen **mechanische Zeitkonstanten** aus den Parametern der Bauelemente berechnet werden. Wie, wird nun gezeigt.

Zu unterscheiden sind statische Speicher aus Feder und Dämpfer und dynamische Speicher aus Massen und Dämpfer.

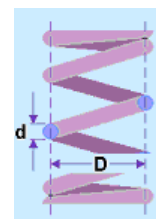
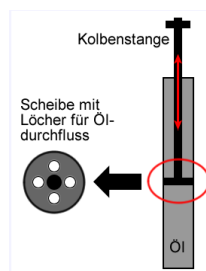


Abb. 4.2-1 linearer Dämpfer, Schrauben-Feder und das Auto als Misch-System aus rotierenden Massen (im Motor, Getriebe und den Rädern) und linear bewegten Massen (Chassis und Karosserie).

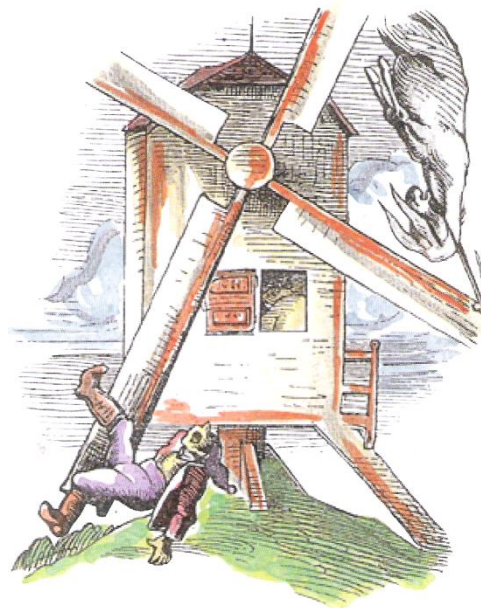
Die Anzahl der ein System bildenden (entkoppelten) Speicher kennzeichnet die Ordnung eines Systems. Systeme 0.Ordnung ohne Speicher gibt es nur theoretisch. Systeme mit einem Dämpfer und einer Masse oder Feder sind von 1.Ordnung, Systeme mit Masse, Feder und Dämpfer sind von 2.Ordnung. Da diese Systeme allgemein von Bedeutung sind, werden sie nun mit Methoden untersucht, die ebenfalls von grundsätzlicher Bedeutung (Frequenzgang, Bode-Diagramm) sind.

Kraft und Drehmoment

Um eine Rotation zu erzeugen, muss die Kraft F im Abstand r von ihrem Drehpunkt angreifen. Maßgeblich für seine Wirkung ist das **Dreh-Moment** $M=F*r$ – in Nm.

Drehmomente spielen im letzten Abschnitt ‚Kreisel‘ eine entscheidende Rolle. Auch bei der Simulation elektrischer Maschinen (Kapitel 6) werden sie gebraucht.

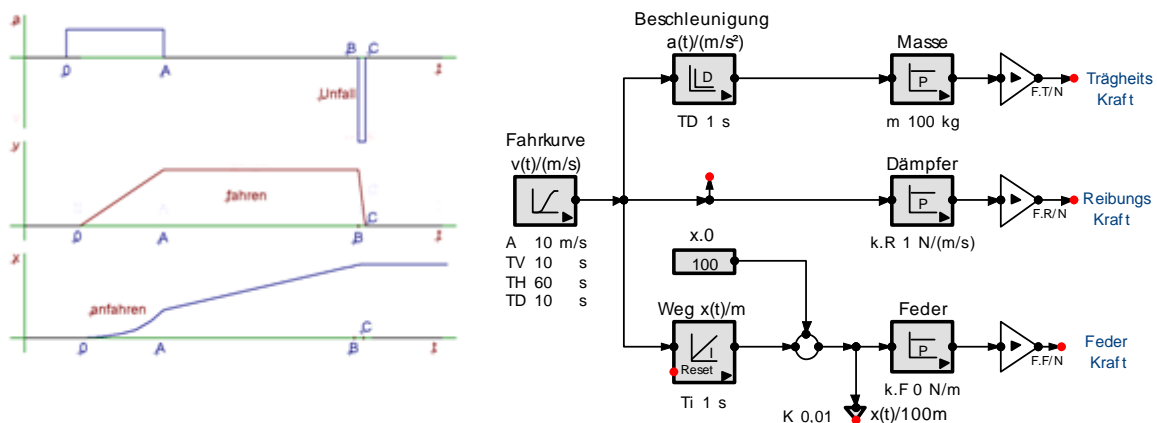
Abb. 4.2-2 Die Kraft des Windes erzeugt ein Drehmoment, dass hier zu kriminellen Zwecken missbraucht wird.



Wilhelm Busch: Der Bauer und der Windmüller

4.2.1 Kinetik und Kinematik

Die zur Berechnung mechanischer Systeme nötigen Grundlagen wurden bereits in Kapitel 1 **Signalverarbeitung \Serien- und Parallelschaltung** besprochen. Sie seien hier noch einmal kurz am vereinfachten Beispiel einer Autofahrt wiederholt. Dazu beobachten wir den Tacho (Geschwindigkeit v) während der Fahrt:



Struktur 4.2.1-1 Autofahrt: Zu unterscheiden sind drei Zonen: Anfahren, Fahren und Bremsen. Zum Verständnis werden die Begriffe Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung benötigt.

Anfahren: Die Motorkraft $F.M$ sei konstant, Reibungskräfte spielen bei niedrigen Geschwindigkeiten noch keine Rolle. Dann ist die Trägheitskraft $F.T = m \cdot a$ der Fahrzeugmasse m gleich $F.A$. Daraus folgt, dass die Beschleunigung $a \approx F.A/m$ ebenfalls konstant ist.

Wenn die **Beschleunigung a** konstant ist, steigt die **Geschwindigkeit v** proportional und der **Weg x** quadratisch mit der Zeit an. Die Wegmessung beginnt bei einem Anfangswert, der willkürlich festgelegt werden kann, z.B. Null. Wenn räumliche Vorgänge behandelt werden, heißen die beiden anderen Koordinaten y und z und r ist der Vektor, den sie aufspannen.

Fahren: Mit steigender Geschwindigkeit werden die Reibungskräfte $F.R = k.R \cdot v$ immer stärker. Das vermindert die beschleunigende Kraft bis auf null. Dann ist die Geschwindigkeit konstant: $v = F.A / k.R$ und der Weg steigt nur noch zeit-proportional an: $\Delta x = v \cdot \Delta t$.

Bremsen: Am Ende der Fahrt wird abrupt gebremst, z.B. wegen eines Unfalls. Dann ist die Beschleunigung negativ – entsprechend groß sind die Trägheitskräfte. Die Geschwindigkeit wird in kurzer Zeit zu Null und der Weg nimmt in dieser Zeit nur noch minimal zu.

Reibungskräfte entstehen durch die Bewegung fester, flüssiger und gasförmiger Materialien gegeneinander. Das ist im Motor und an der Karosserie unerwünscht, denn es erzeugt Verluste. Beim Stoßdämpfer dagegen sind sie der Sinn der Sache. Richtig dimensioniert gibt er der Fahrzeug-Federung die gewünschte Dämpfung.

Federkräfte treten in diesem Beispiel nicht auf. Wäre das Fahrzeug (der Antrieb) durch eine Feder gefesselt, würde die Federkraft wegproportional zunehmen: $F.F = k.F \cdot \Delta x$. Dann wäre der Weg sehr begrenzt: $\Delta x = F.A/k.F$.

Ein Stoßdämpfer besteht aus einer Feder und definierter Reibung, z.B. durch Flüssigkeit oder Gas. Sie müssen an die zu federnde **Masse m** angepasst werden. Dazu muss eine Feder mit der **Federkonstanten $k.F$** und ein Dämpfer mit der **Reibungskonstanten $k.R$** gewählt werden. Die Berechnung solcher Systeme wird im nächsten Abschnitt gezeigt.

4.2.2 Massen und Federn (Speicher)

Massen m speichern Bewegungs-Energie: $E.kin = (m/2) \cdot v^2$. Die Masseneinheit ist das kg. Es ist durch 1Liter Wasser definiert. Daraus folgt die Krafteinheit Newton $N = kg \cdot m/s^2$.

Wird ein kg mit $1m/s^2$ beschleunigt, erzeugt es eine **Trägheitskraft $F.T = m \cdot a$** von 1N.

Federkräfte: $F.F = k.F \cdot x$ sind der Auslenkung x proportional. Konstant ist das Verhältnis aus Federkraft und Auslenkung, genannt Federkonstante $k.F = F.F/x$ – in N/m.

$k.F$ beschreibt die Härte einer Feder.

Anwendungen: Federwaage als Kraftmesser

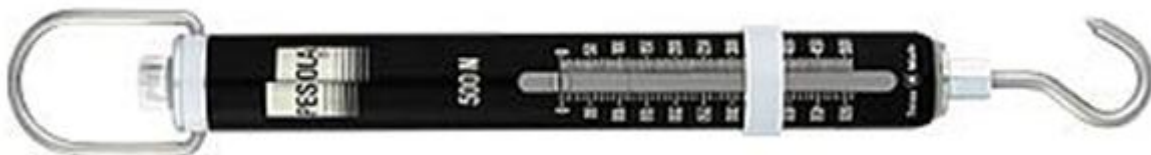


Abb. 4.2.2-1 Federwaage zur Messung von Kräften

Federn speichern Energie der Lage (potentielle Energie): $E.pot = (k.F/2) \cdot x^2$.

4.2.3 Dämpfer (Energie-Verbraucher)

Dämpfer erzeugen im Betrieb Reibungskräfte $F.R$, die proportional zu der Geschwindigkeit v sind, mit der sie bewegt werden (Gleitreibung). Dabei behindern sie den Bewegungsvorgang und erwärmen sich. Das kann wegen der dämpfenden Wirkung erwünscht sein (Stoßdämpfer) oder auch nicht (Rollreibung bei Fahrzeugen).

Die **Reibungskonstante** $k.R = F.R/v$ in $N(m/s) = N \cdot s/m$ beschreibt die Stärke eines Dämpfers.

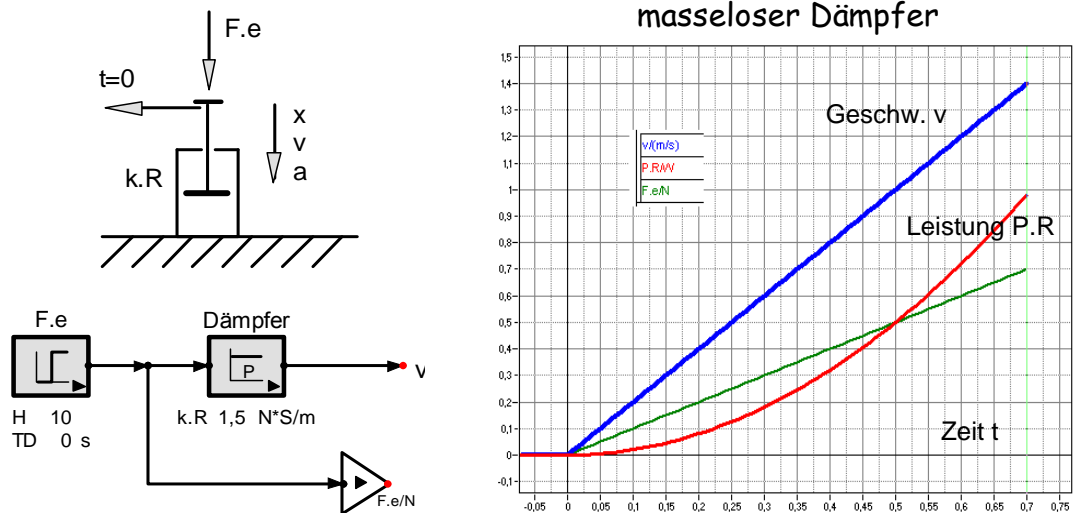


Abb. 4.2.3-1 Dämpferkraft bei linearer Erhöhung der Geschwindigkeit v

Dämpfer erzeugen **Verlustleistung** $P.R$, die sie erwärmt: $\Delta T = P.R/R.th$ – mit dem von der Baugröße abhängigen **thermischen Widerstand** $R.th$ (Kapitel 13 Wärme-Technik). Die Reibungs-Verlustleistung $P.R$ steigt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit v an:

$$P.R = F.R \cdot v = k.R \cdot v^2$$

Erwünschte und unerwünschte Reibung

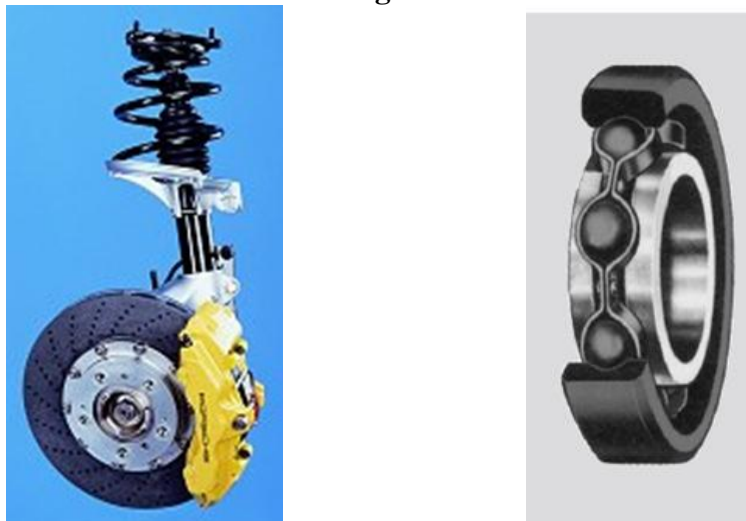


Abb. 4.2.3-2 Links: Scheiben-Bremse. Erwünschte Reibung zur ‚Vernichtung‘ kinetischer Energie. Rechts: : Vermeidung unerwünschter Reibung durch Kugellager