

## Steuer- und Regelungstechnik

WT 2019

### Vorlesung:

Dozent: Professor Ferdinand Svaricek

Ort: 33/1331

Zeit: Di 11.30 – 13.00 Uhr

### Seminarübungen:

Dozenten: Felix Goßmann, Korbinian Figel

Ort: 33/1201

Zeit: Mo 15.00 – 16.30 Uhr (Beginn: 14.01.2019)

### Vorlesungsskript:

<https://www.unibw.de/lrt15/lehre/vorlesungen-1/unterlagen-srt/vorlesung/skript-steuer-und-regelungstechnik.pdf/download>



- Die Steuer- und Regelungstechnik befaßt sich mit der zielgerichteten Beeinflussung **komplexer dynamischer Systeme** (z.B. Flugsysteme, Kraftfahrzeuge, mechatronische Systeme ...).
- In dieser Grundlagenveranstaltung geht es weniger um die **gerätetechnischen** als vielmehr um die **systemtheoretischen** Grundlagen der Regelungstechnik.
- Das Regelungsprinzip ist keine technische Erfindung, sondern ein Naturphänomen (**Aufrechter Gang, Körpertemperatur, Blutdruck**).
- Die Regelungstechnik ist ein wichtiges Teilgebiet der **Automatisierungstechnik** und der **Mechatronik**.



- **Steuerung und Regelung:** Unterscheidung, Vor- und Nachteile.
- Was bewirken **Rückkopplungen** in dynamischen Systemen?
- Wie können die Eigenschaften eines dynamischen Systems durch **Rückkopplungen gezielt** beeinflusst werden?
- Einordnung des dynamischen Verhaltens von Systemen in Systemklassen (P-System,  $PT_1$ -System,  $PT_2$ -System, I-System, D-System, ...).
- Was sind **Übertragungsfunktion, Pole** und **Nullstellen** eines dynamischen Systems ?  
(Anwendung der Laplace-Transformation)
- Einstellung von **PID-Reglern**.



## Physik

- **Grundprinzipien** (Bewegungsgesetze von Newton, Energie- und Impulserhaltung, ...)
- **Gasgesetze, Strömungsgesetze**

## Mathematik

- **Aufstellen und Lösen gewöhnlicher linearer DGL**
- **Rechnen mit komplexen Zahlen** (Skript Anhang A.1)
- **Polynome und rationale Funktionen** (Pole und Nullstellen, Partialbruchzerlegung, Skript Anhang A.2-4)
- **Laplace-Transformation** (Definition, Eigenschaften, Skript Anhang A.5)

## Elektrotechnik

- **Einfache Schaltungen** (Kirchhoffsche Gesetze)



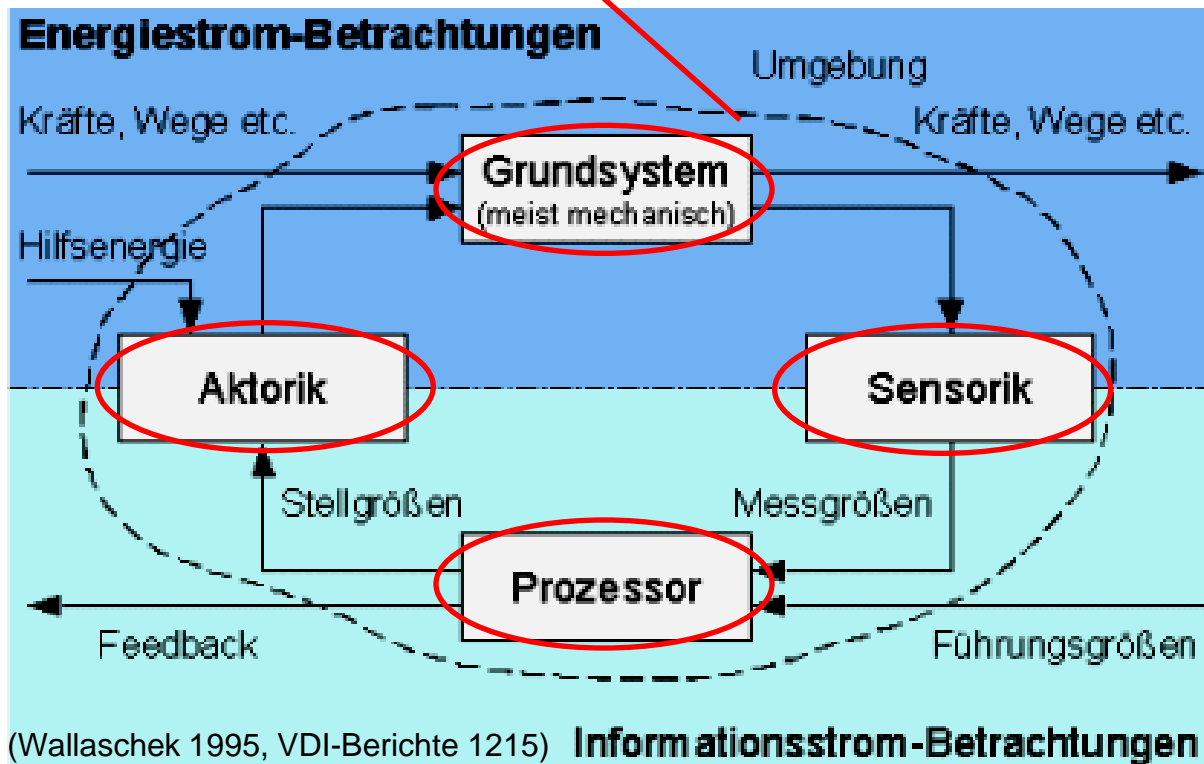
Die Regelungstechnik als ein wichtiges Teilgebiet der **Automatisierungstechnik** und der **Mechatronik**.

Die Mechatronik ist ein **interdisziplinäres** Gebiet der Ingenieurwissenschaften, das auf den klassischen Disziplinen **Maschinenbau**, **Elektrotechnik** und **Informatik** aufbaut. Ein typisches mechatronisches System nimmt Signale auf, verarbeitet sie und gibt Signale aus, die es z.B. in Kräfte und Bewegungen umsetzt. (Uni-Saarland)

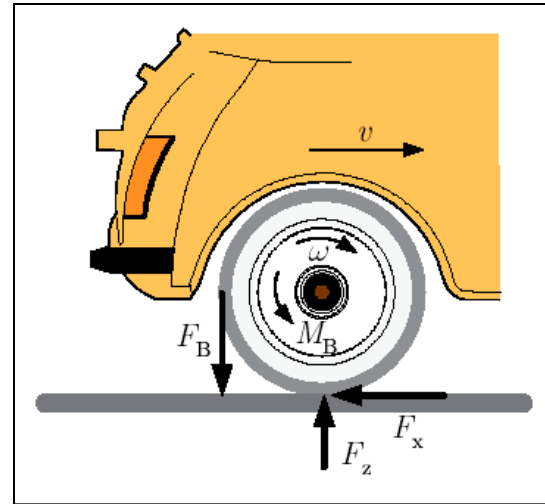
Die Mechatronik befaßt sich mit der Entwicklung und technischen Umsetzung neuer integrierter **mechanisch-elektrotechnischer** Systeme, die sich durch einen gewissen Grad an **"Intelligenz"** und **"eigenständiger Handlungsfähigkeit"** auszeichnen. (ETH Zürich)



Ein **mechatronisches System** ist dabei ein funktionell und räumlich integriertes **mechanisch-elektrisches** System, in dem **Sensoren** Informationen aufnehmen, **Prozessoren** diese Informationen auswerten und **Aktoren** gezielt eingesetzt werden, um auf ein meist **mechanisches Grundsystem** einzuwirken. ([http://www.mechatronik-portal.de/mechatronik\\_definition.html](http://www.mechatronik-portal.de/mechatronik_definition.html))



## ABS

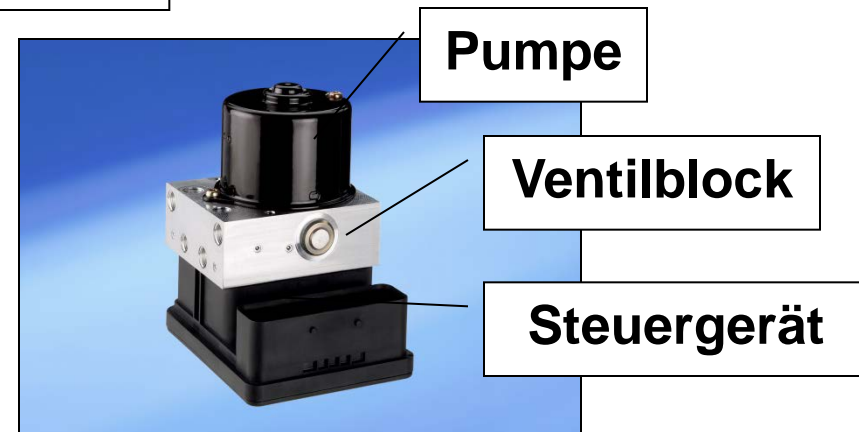


Grundsystem



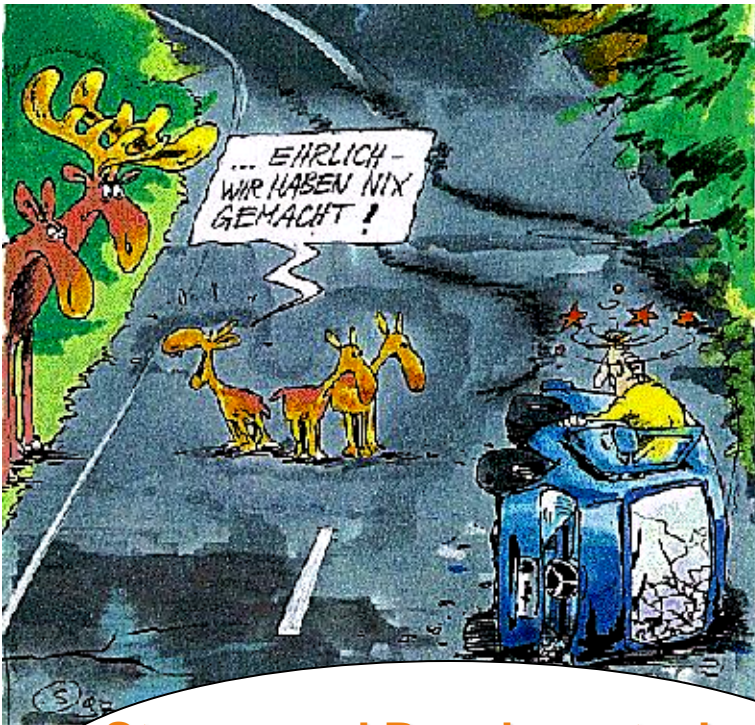
Radsensoren

Aufrechterhaltung der **Lenkfähigkeit** beim Bremsen



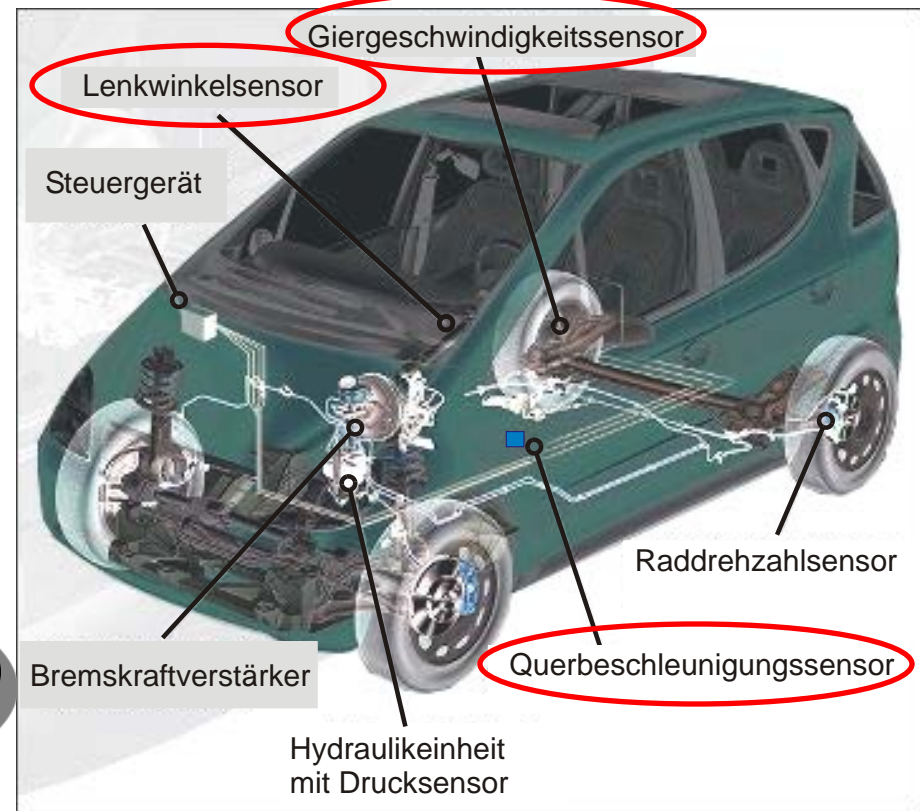
Steuergerät und Aktorik

## Problem: Elch-Test



**Steuer- und Regelungstechnik  
vergrößert die Freiheiten  
der Designer**

## Lösung: ESP (Electronic Stability Program)

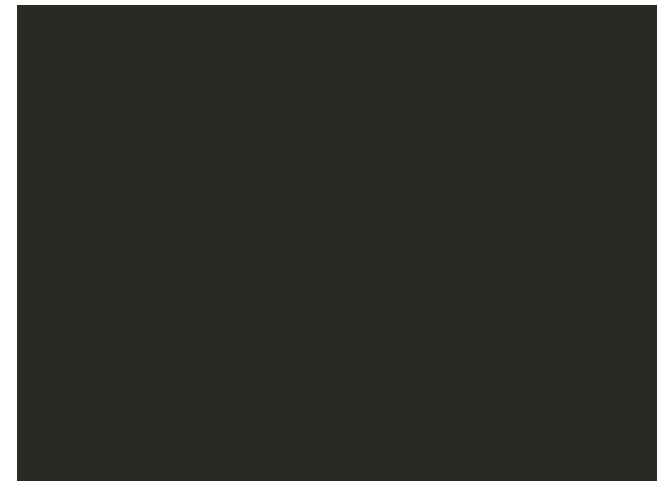
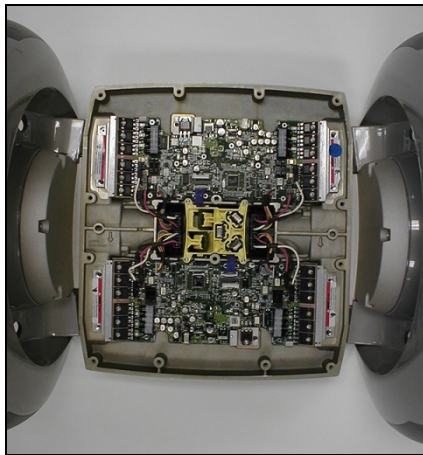






**Dynamische Stabilisierung mit 5 Mikrogyroskope und 2 Neigesensoren mit Hilfe von 2 DSP Prozessoren (Texas Instrument, Abtastzeit 10 ms).**

**Maximale Geschwindigkeit: 20 km/h**  
**Reichweite: ca. 15 km**





Finally, fly-by-wire technology has also made it possible for Airbus to develop a true family of aircraft, from the 107-seat A318 to the 555-seat A380, with near identical cockpit designs and handling characteristics. This makes crew training and conversion shorter, simpler and highly cost-effective for airlines and allows pilots to remain current on more than one type simultaneously.

([http://www.airbus.com/media/fly\\_by.asp](http://www.airbus.com/media/fly_by.asp))

## Es werden 4 Entwicklungsperioden unterschieden:

- **Frühe Periode** (bis etwa 1900)
- **Periode der vor-klassischen Regelungstechnik** (1900 –1940)
- **Periode der klassischen Regelungstechnik** (1940 –1960)
- **Moderne Regelungstechnik** (seit 1955)

## Frühe Periode

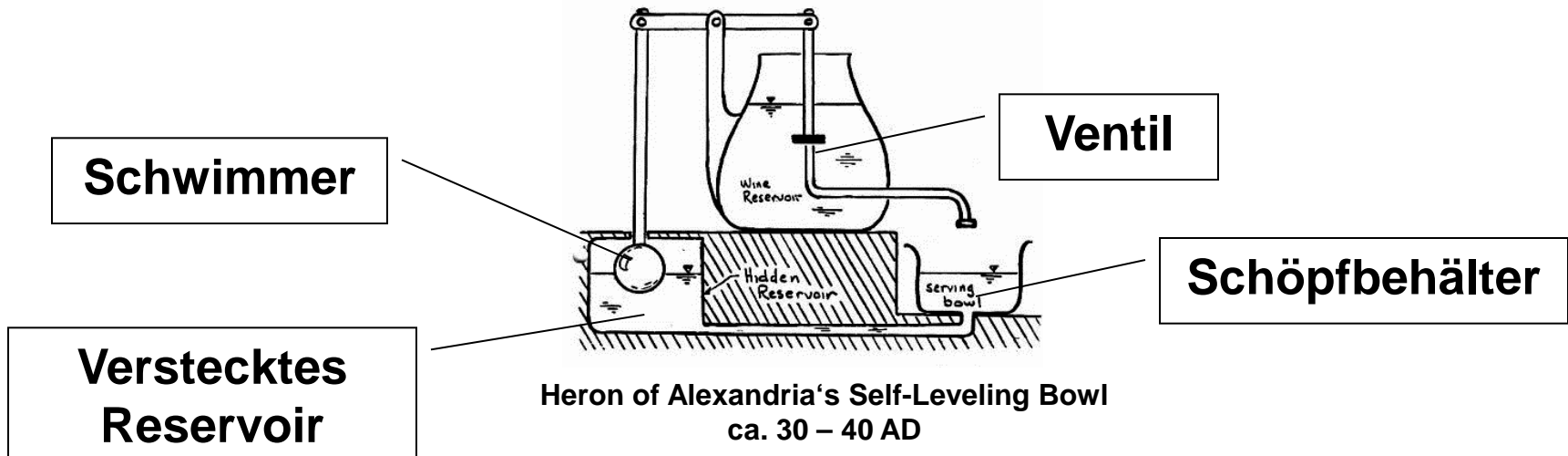
- 30-40 AD** ▶ Füllstandsregelung (Heron)
- 1788** ▶ Windmühlen und Dampfmaschinen (James Watt)
- 1868** ▶ Analyse des Fliehkraftreglers (J. Maxwell)

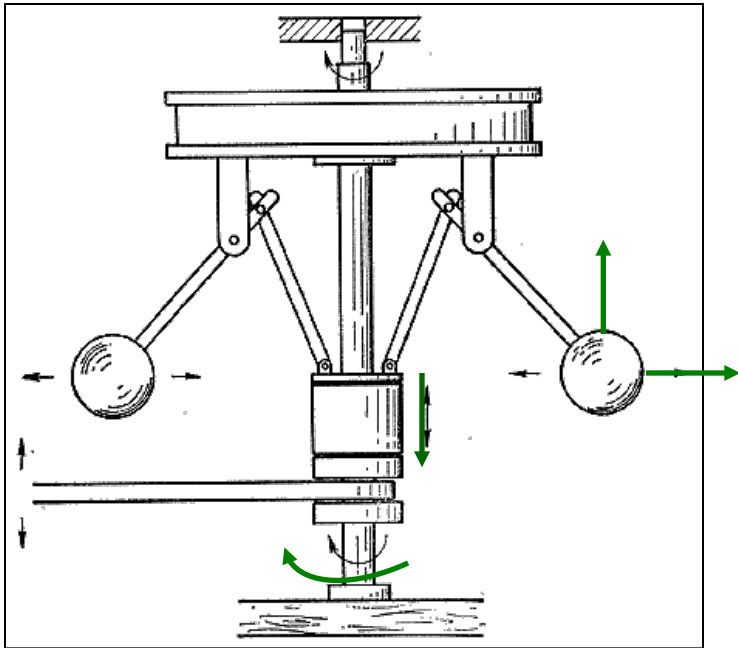
## Periode der vor-klassischen Regelungstechnik

- 1877,1895** Stabilitätsuntersuchungen (Routh, Hurwitz)
- 1905** Buch: Regelung von Kraftmaschinen (Tolle)
- 1912** ▶ Autopilot (Sperry)
- 1928** ▶ Negative Feedback Amplifier (Black)
- 1932** Stabilität im Frequenzbereich (Nyquist)



## Regulierung des Füllstandes eines Weinbehälters





<http://webserv.nhl.nl/~smits/windmill.htm>

- Fliehkraftsteller (**Patent Thomas Mead 1787**) hält den Abstand zwischen den Mühlsteinen bei Änderung der Drehzahl konstant.
- Ohne Fliehkraftsteller vergrößert sich der Abstand bei zunehmender Drehzahl.

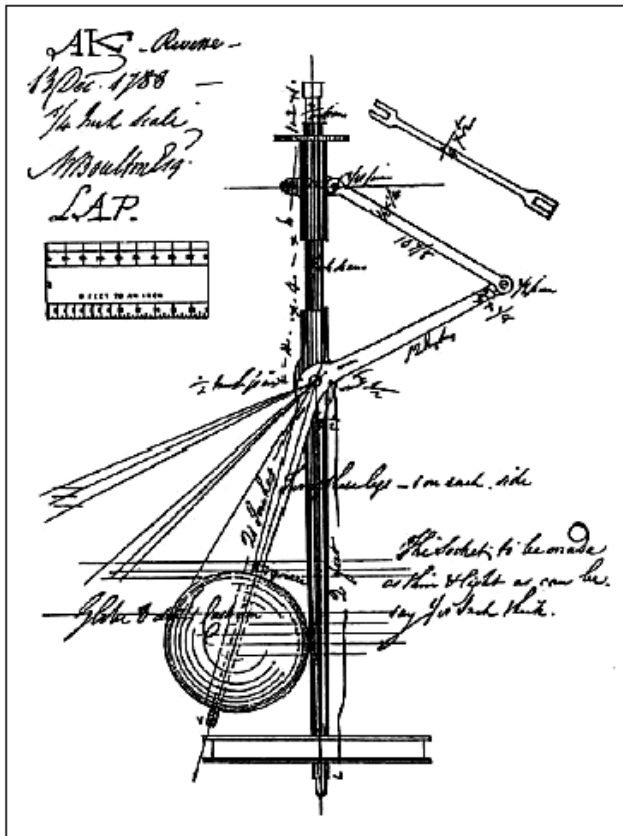


*The governor*

**Shipleigh Windmill**  
(in der Nähe von Horsham  
in West Sussex)

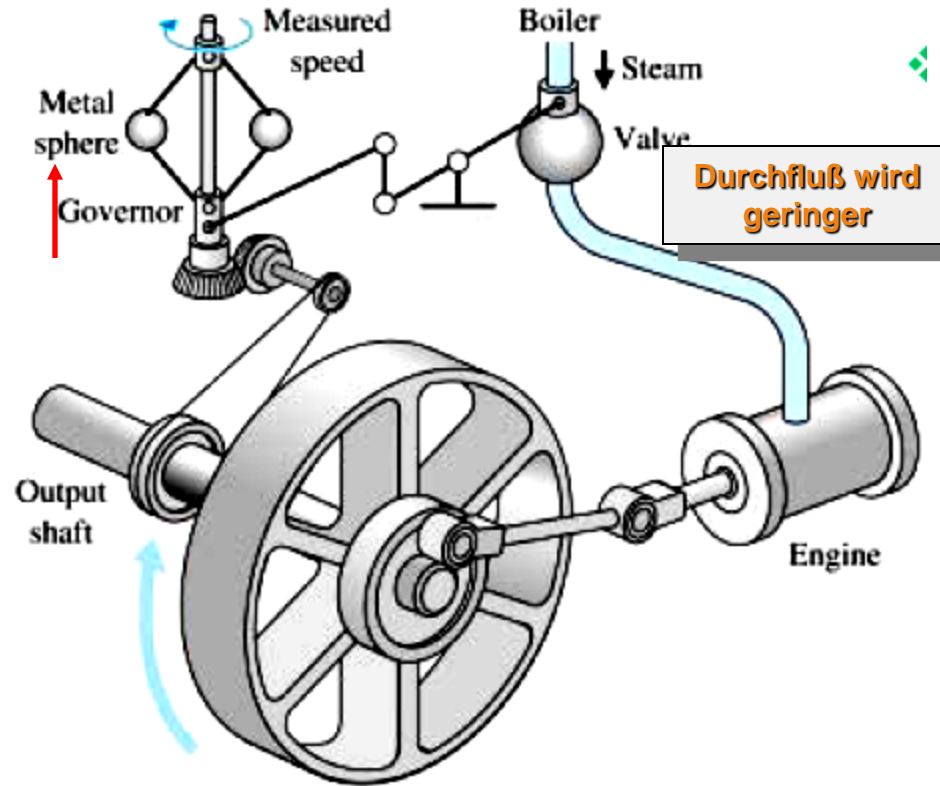
Steuer- und Regelungstechnik





Zeichnung (Boulton and Watt) von 1788

Fliehkraftregler liefert auch die Energie für die Ventilverstellung



Prinzip einer geregelten Dampfmaschine

**Demonstration (1914) der Möglichkeiten des Autopiloten in Paris** (Sohn von Sperry mit Händen in der Luft, Mechaniker läuft auf den Flügeln).





**Wright Brothers 1903**

**Sperry's Autopilot 1912**

**V1 und V2 1942**

**Robert E. Lee 1947**

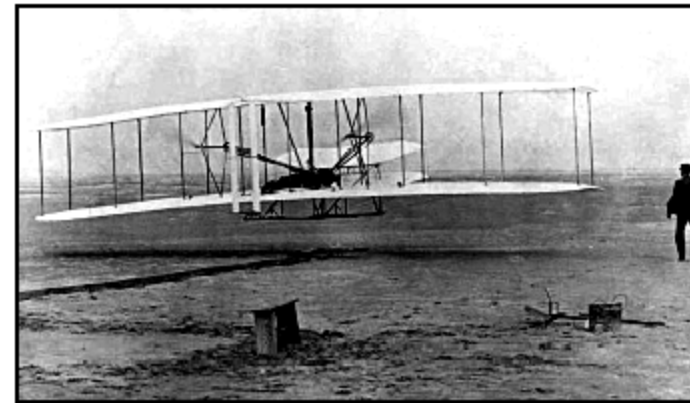
**Sputnik 1957**

**Apollo 1969**

**Delta Clipper (DC-X) 1993**

**SpaceX Falcon 9 2015**

**Flug der Gebrüder Wright**



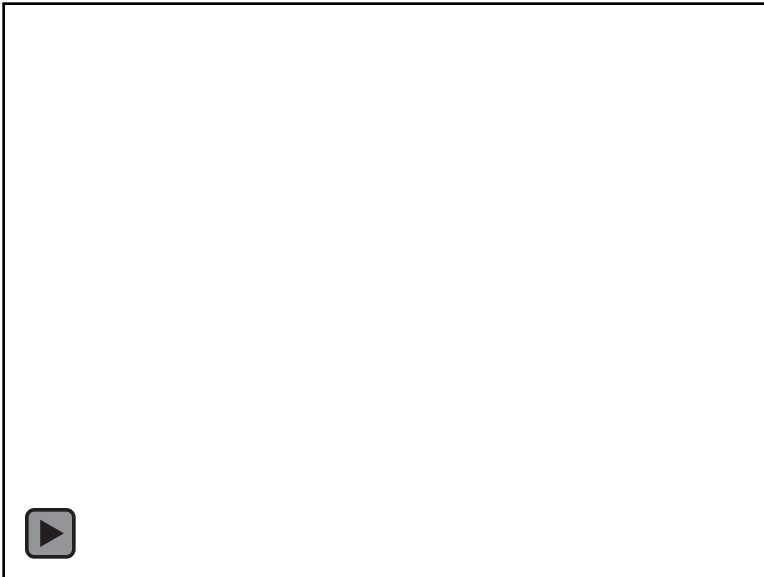
**Letzter Testflug am 31.7.1997**

**DC-X Testflug am 11.9.1993**

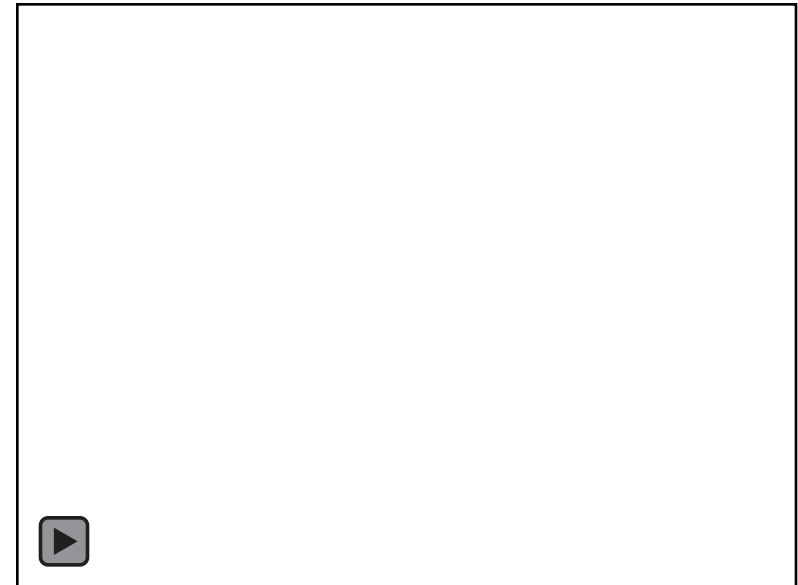


**SpaceX** ist ein privates US-amerikanisches Raumfahrtunternehmen, das im Juni 2001 vom PayPal-Gründer Elon Musk (E-Fahrzeug Tesla) gegründet wurde.

Im Dezember 2008 wurde ein Vertrag zwischen SpaceX und der NASA über 1,6 Milliarden US-Dollar für zwölf Versorgungstransporte zur Internationalen Raumstation ISS unterzeichnet.



**Erste erfolgreiche Rückkehr der ersten Stufe der Falcon 9 am 22.12.2015.**



**Rückkehr der ersten Stufe der Falcon 9 auf eine schwimmende Plattform am 8.4.2016.**



## Testflug der ersten Falcon Heavy am 6.2.2018

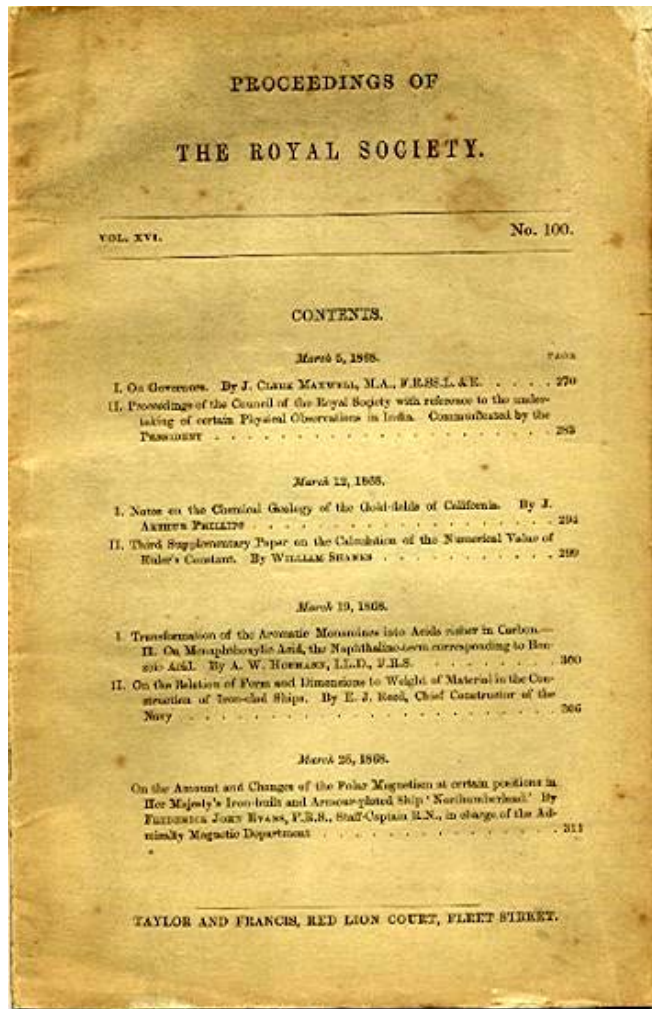


**Erfolgreiche Rückkehr der beiden Seiten-Booster**



13. Juni 1831	geb. in Edinburgh
1848 – 1854	Studium der Mathematik und Physik in Edinburgh
1856 - 1860	Professor für Physik am Marischal College in Aberdeen
1860 – 1865	Professor für Physik und Astronomie am King's College in London
1861 - 1873	Entwicklung der Maxwell'schen Gleichungen
1871-1879	Professor für Physik in Cambridge
1868	Beitrag „On Governors“ ( <b>Begründer einer mathematischen Behandlung von Regelungsproblemen</b> )
5. Nov. 1879	gestorben in Cambridge





## 1868 „On Governors“, Proc. of the Royal Society, Vol. XVI, No.100, 270-283.

- Beschreibung des dynamischen Verhaltens verschiedener Fliehkraftregler-Mechanismen mit Hilfe von gewöhnlichen linearen Differentialgleichungen.
- Untersuchung der Stabilität des dynamischen Verhaltens der Fliehkraftregler und des gesamten Systems anhand der Koeffizienten dieser Differentialgleichungen.
- Ableitung von notwendigen und hinreichenden Stabilitätsbedingungen für Differentialgleichungen der Ordnung 2,3 und 4.
- Ableitung notwendiger Bedingungen für Differentialgleichungen 5-ter Ordnung.





## Harold S. Black (1898-1983)

**Aufbau eines transkontinentalen Telefonnetzes mit 4 Kanälen im Jahr 1923 durch AT&T**

**Problem:** Verzerrungen in Reihenschaltungen von Röhrenverstärker durch Nichtlinearitäten und Verstärkungsänderungen.

**Lösung:** Negative Feedback Amplifier

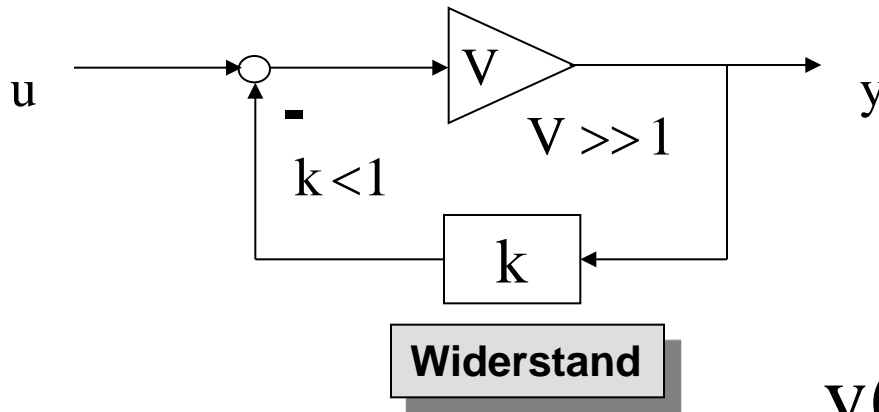
**Patent eingereicht 1928**

**Verstärker werden ab 1931 eingesetzt**

**Patent erteilt 1937**



## Verstärker mit negativer Rückführung



$$y = V(u - ky)$$

$$y = Vu - kVy$$

$$y(1 + kV) = Vu$$

➔ 
$$K = \frac{y}{u} = \frac{V}{1 + kV}$$

Verstärkung des rückgeführten Verstärkers

Für  $kV \gg 1$  folgt:

$$K = \frac{y}{u} \approx \frac{\cancel{V}}{k\cancel{V}} = \frac{1}{k}$$



- **Reduziert den Effekt von Störungen und Parameteränderungen.**
- **Reduziert den Einfluß von Nichtlinearitäten.**
- **Sorgt für eine konstante Verstärkung.**
- **Verändert die Systemeigenschaften.**
- **Kann instabile Systeme stabilisieren.**



## Verfahrenstechnik

Rückführungen wurden eingesetzt um den Einfluß von **Störungen** zu reduzieren und Prozeßgrößen auf vorgegebene Werte zu halten.

## Luft- und Schifffahrttechnik

Rückführungen wurden eingesetzt um das System zu **stabilisieren** und den Einfluß von **Störungen** (Wind, Luftdruck) zu reduzieren.

## Nachrichtentechnik

Rückführungen wurden eingesetzt um den Einfluß von **Parameterschwankungen** (Eigenschaften der elektronischen Röhren) und **Nichtlinearitäten** zu reduzieren.



## Definition: System

Ein **System** ist eine **abgegrenzte** Anordnung von aufeinanderwirkenden **Gebilden** (Teilen). Solche Gebilde können sowohl Gegenstände wie auch Denkmethode und deren Ergebnisse (z.B. Organisationsformen, mathematische Methoden, Programmiersprachen o. ä.) sein.

Diese Anordnung wird durch eine **Hüllfläche** von der Umgebung abgegrenzt oder abgegrenzt gedacht. (in Anlehnung an DIN 19226)

## Definition: Signal

**Signale** sind physikalische Tatbestände, die der **Übertragung**, **Speicherung** und **Verarbeitung** von **Informationen** dienen.

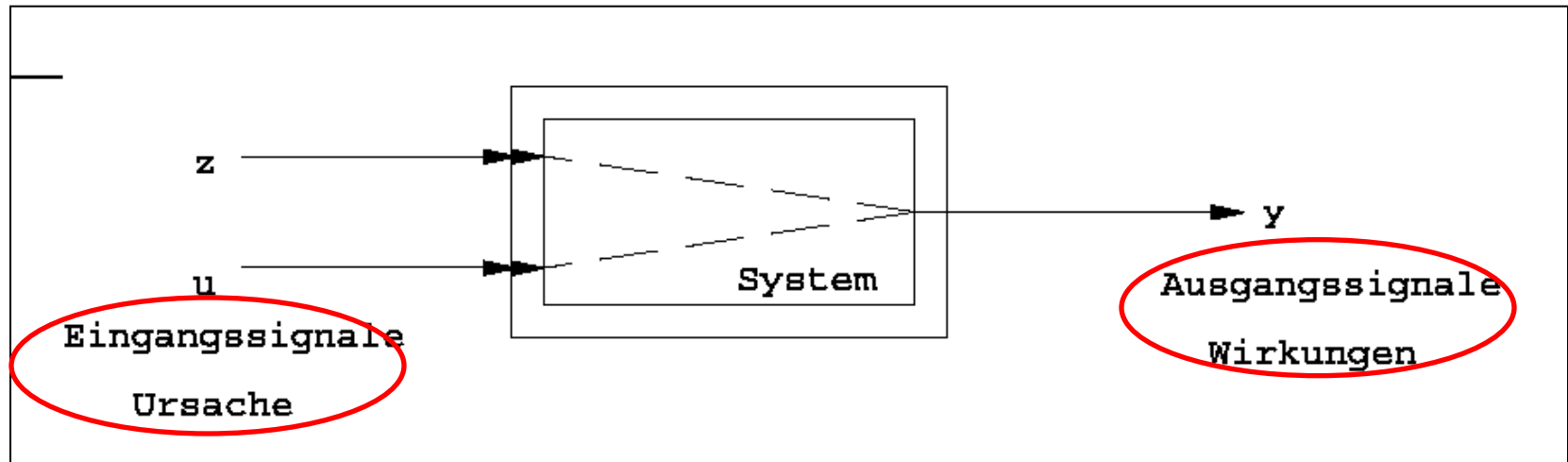
**Signal = Energie + Information**



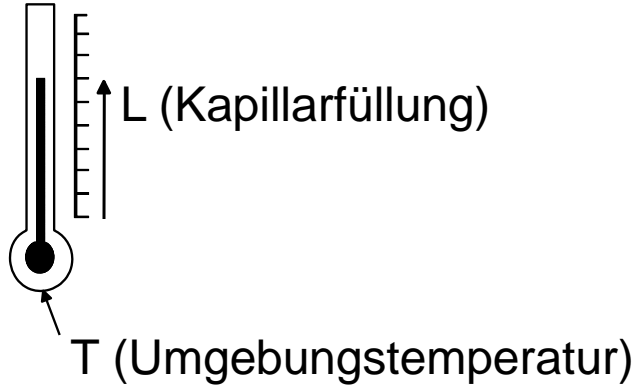
## Definition: Dynamisches System

Ein **dynamisches** System stellt eine Funktionseinheit zur **Verarbeitung** und **Übertragung** von **Signalen** dar, wobei die Systemeingangsgrößen als Ursache und die Systemausgangsgrößen als deren **zeitliche** Auswirkungen zueinander in Relation gebracht werden.

(Unbehauen 2000)



## Thermometer als dynamisches System



<b>Eingangsgröße:</b>	<b>Temperatur T</b>
<b>Innere Größen:</b>	<b>Quecksilbertemperatur, Quecksilbervolumen</b>
<b>Ausgangsgröße:</b>	<b>Kapillarfüllung L (Skalenanzeige)</b>

## Raumtemperaturregelung

**Regelgröße:** Größe, die unabhängig von äußeren Einflüssen auf einem gewünschten, festen oder veränderlichen Wert gehalten werden soll.

Regelgröße  $y$   
**Raumtemperatur**

**Regler:** Gerät zur Erfassung der Differenz zwischen Istwert und Sollwert der Regelgröße und zur Betätigung des Stellgliedes.

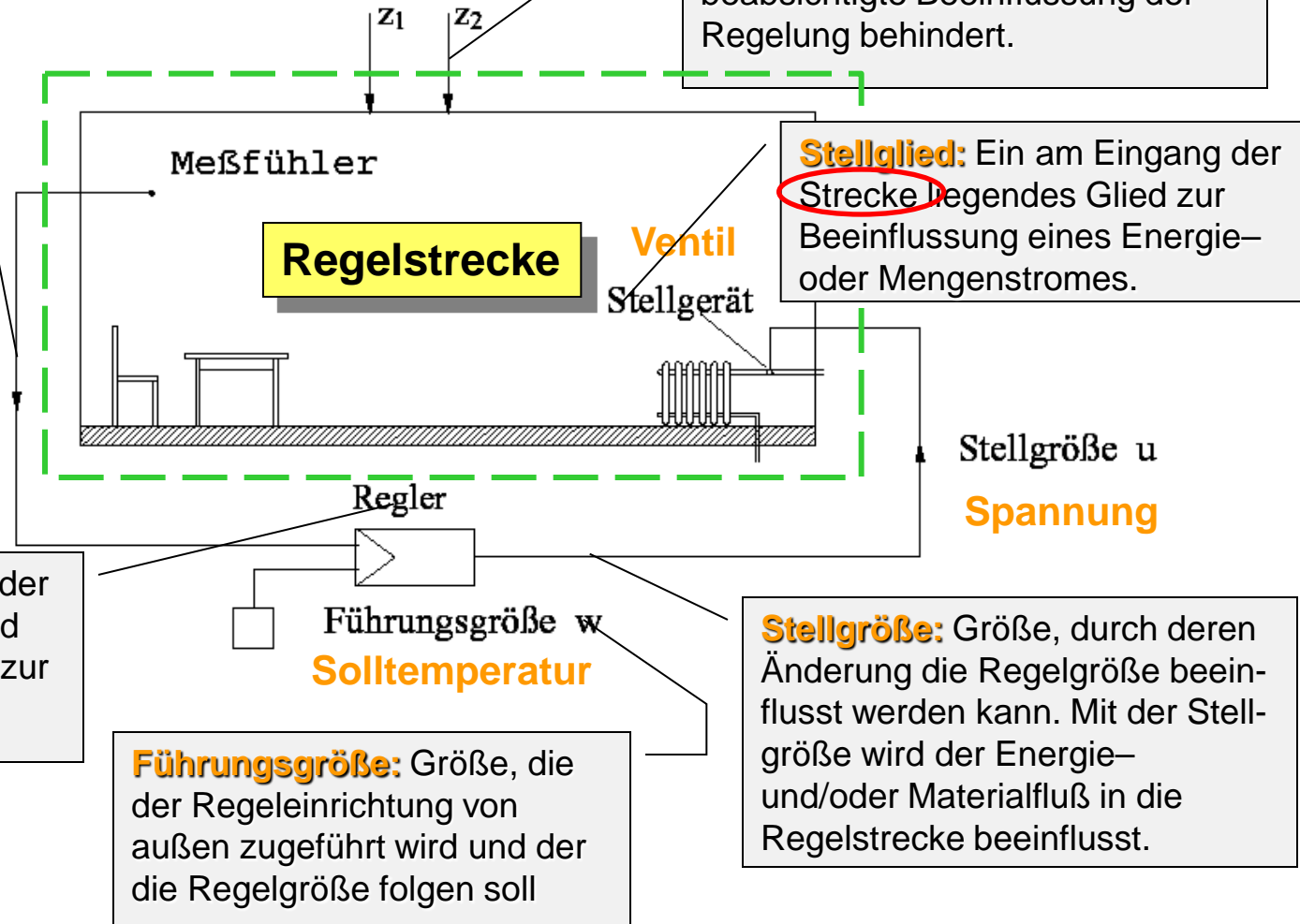
**Führungsgröße:** Größe, die der Regeleinrichtung von außen zugeführt wird und der die Regelgröße folgen soll

**Fenster auf Störgrößen**

**Störgröße:** Jede auf eine Regelung einwirkende Größe, die die beabsichtigte Beeinflussung der Regelung behindert.

**Stellglied:** Ein am Eingang der Strecke liegendes Glied zur Beeinflussung eines Energie- oder Mengenstromes.

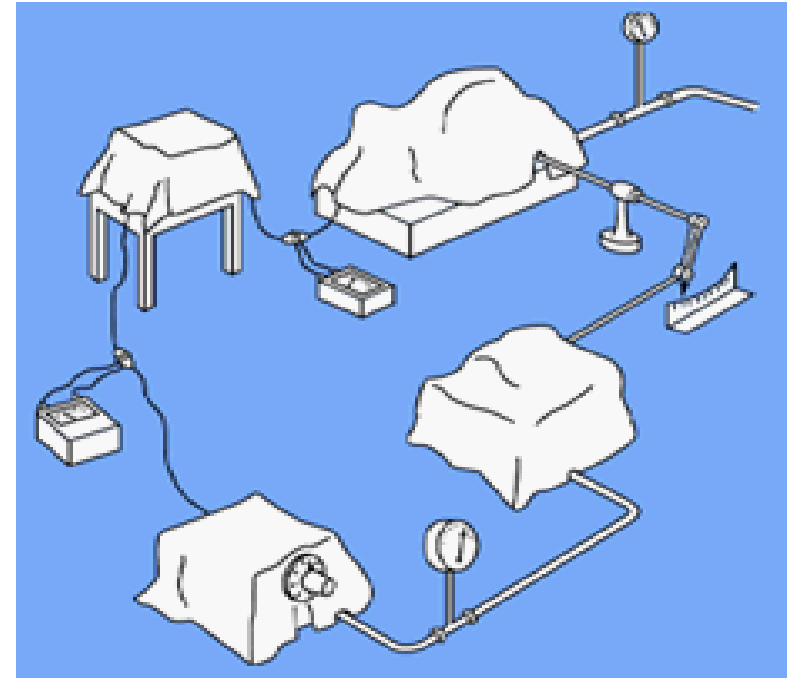
**Stellgröße:** Größe, durch deren Änderung die Regelgröße beeinflusst werden kann. Mit der Stellgröße wird der Energie- und/oder Materialfluß in die Regelstrecke beeinflusst.



- **Konzentration auf das Wesentliche**
- **Focus auf Übertragungsverhalten**
- **Informationen werden versteckt**
- **Verschiedene Abstraktionsebenen**



**Beschreibung mit Hilfe von  
Blockschaltbildern (MIT 1948)**

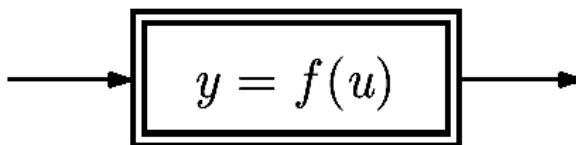


- Das Blockschaltbild (oder der Signalflußplan) ist ein **Signalflußdiagramm** zur Darstellung des Signalflusses und des Wirkungszusammenhangs in einem Regelkreis.
- Mit Hilfe des Blockschaltbildes wird eine von allen **technischen Details abstrahierte** Darstellung des Regelungsproblems gewonnen.

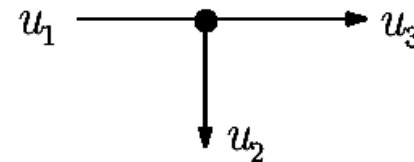
## Elementare Elemente



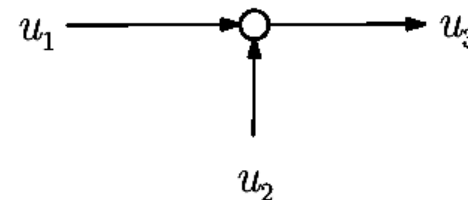
Übertragungsglied (allgemein)



Nichtlineares Übertragungsglied



Signalverzweigung ( $u_1 = u_2 = u_3$ )



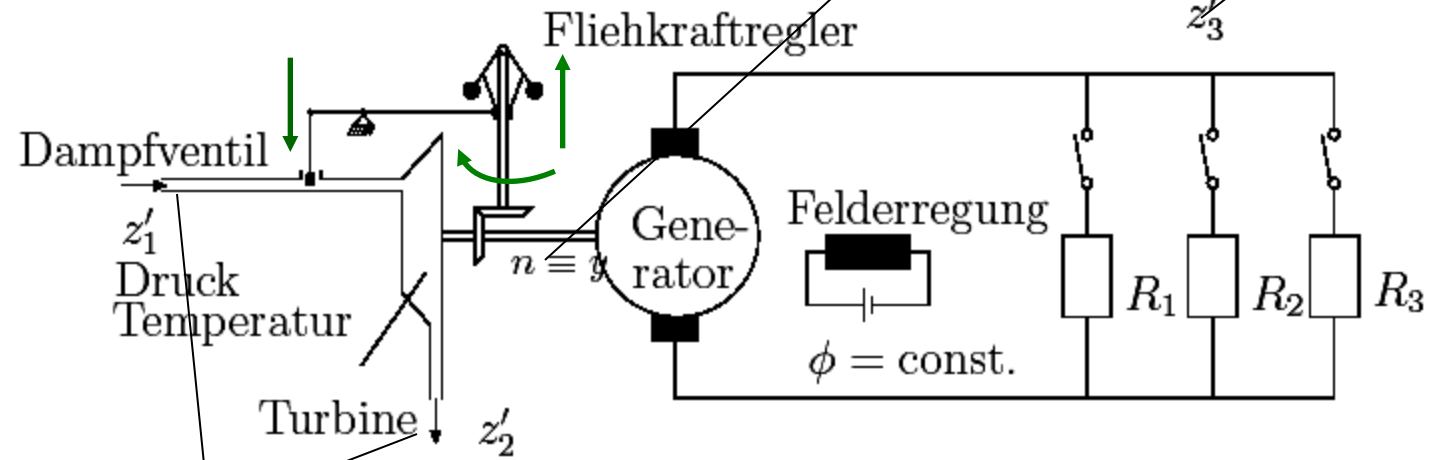
Summationsstelle ( $u_3 = u_1 + u_2$ )



**Beispiel: Dampfturbine**

**Drehzahl = Regelgröße**

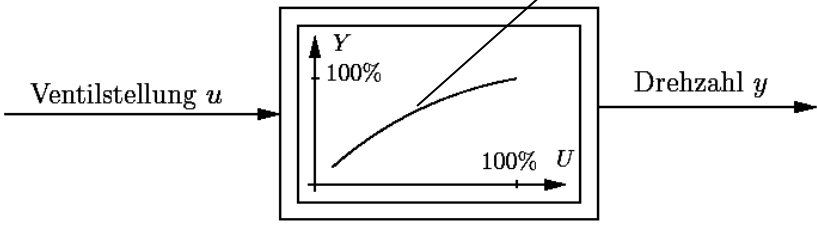
**Laststörung**



**Gerätebild**

**Versorgungsstörung**

**Nichtlineare statische Kennlinie**



**Statisches (quasistationäres) Verhalten der Turbine**



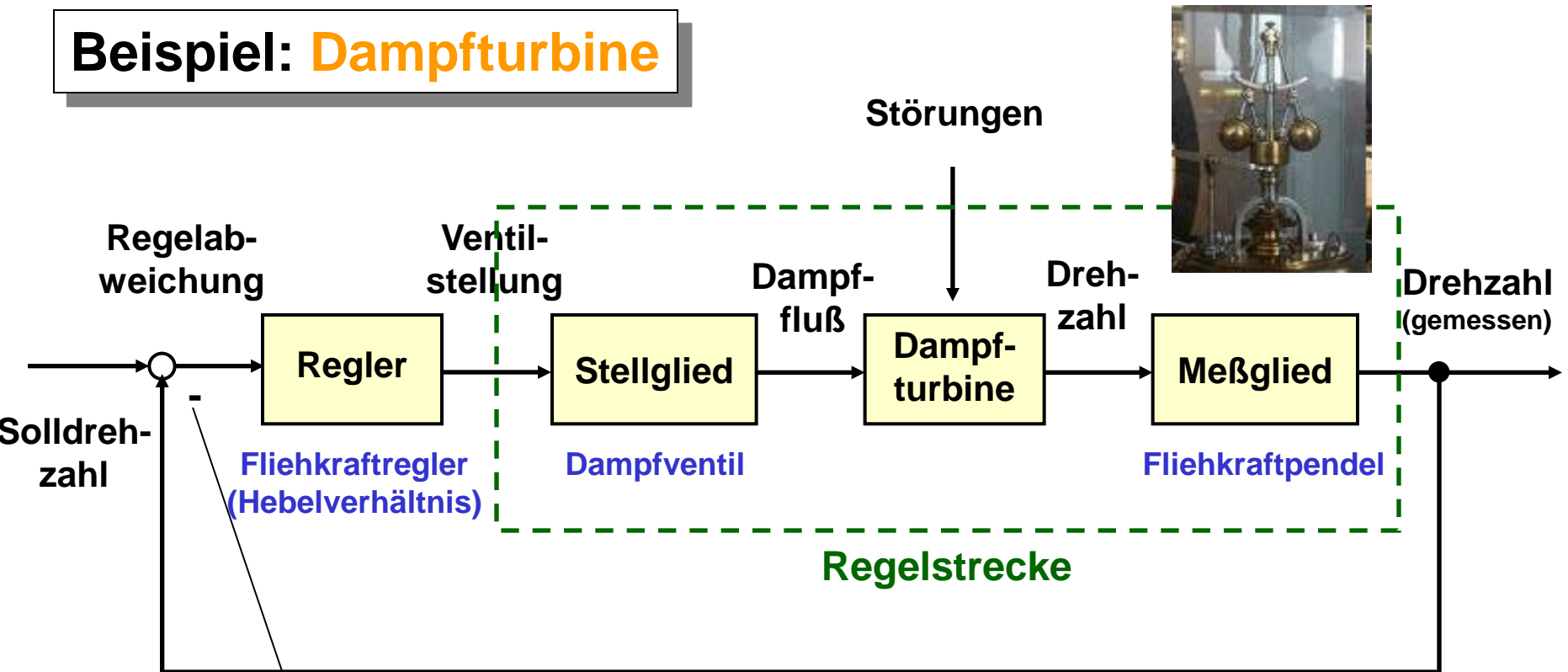


## Vom Geräteplan zum Blockschaltbild

- **Aufspüren der Ein- und Ausgangsgrößen eines Systems und im Blockschaltbild eintragen.**
- **Das Blockschaltbild von der Ausgangsgröße her entwickeln.**
- **Bilanzgleichungen (Erhaltungsgesetze) als Summationsstelle festlegen.**
- **Bei vorhandenen Zeitableitungen in den Bewegungsgesetzen entsprechende Integrationskette einzeichnen, von der aus die Einzelgesetze abgezweigt werden können.**
- **Einzelgesetze durch Systemblöcke formulieren.**



## Beispiel: Dampfturbine



Rückführung muß der Änderung der Drehzahl **entgegenwirken**

**Drehzahl kleiner  $\Rightarrow$  Dampffluß größer**

- **MATLAB** ist die Abkürzung für **MAT**rix **LAB**oratory (Matrizenlabor) und ist aus einem von **Cleve Moler** in FORTRAN 77 geschriebenen Interpreter hervorgegangen. Ziel des Interpreters war der leichte Zugang zu den numerischen Bibliotheken EISPACK und LINPACK, die Unterprogramme zur Lösung von Eigenwertproblemen und linearen Gleichungssystemen zur Verfügung stellten.
- Nach der Gründung von **The MathWorks** (1984) wurde MATLAB nach C portiert und eine erste kommerzielle Version auf den Markt gebracht.
- **MATLAB** ist ein interaktives System, dessen grundlegende Datenelemente **Matrizen** sind, die keine Deklaration erfordern.
- **MATLAB** hat sich im Verlauf von mehreren Jahren und Beiträge vieler Benutzer, insbesondere aus den Universitäten, zu seinem heutigen Umfang entwickelt.
- **MATLAB/Simulink** ist weltweit sowohl in den Universität als auch in der Industrie das **Standwerkzeug** zur Lösung regelungstechnischer Aufgaben.



- **MATLAB** verfügt über applikationsspezifische Lösungen, sogenannte Toolboxen, wobei die *Control System Toolbox* eine der ersten Toolboxen war.
- Toolboxen sind umfassende Sammlungen von MATLAB-Funktionen (M-Dateien) für die Lösung von bestimmten Klassen von Problemen. So gibt es neben der Control System Toolbox u.a. Toolboxen für die Bereiche
  - Signalverarbeitung (Signal Processing Toolbox)
  - Fuzzy-Logik (Fuzzy Logic Toolbox)
  - Neuronale Netze (Neural Network Toolbox)
  - Wavelets (Wavelet Toolbox)
  - Simulation dynamischer Systeme (**Simulink**)
- **Simulink** ist ein interaktives System zur Simulation von nichtlinearen dynamischen Systemen, das ein als **Blockdiagramm** dargestelltes Modell eines Systems unter dynamischen Einwirkungen nachbildet.



>> help format

% Auskunft über die möglichen Formate

>> help inv

% Auskunft über die Funktion **inv**

>> A = [ 1 2 3  
4 5 6  
7 8 9]

% Eingabe einer Matrix

>> A = [ 1 2 3 ; 4 5 6; 7 8 9 ]

% Kompakte Eingabe der Matrix

>> A = [ 1 2 3 ; 4 5 6; 7 8 9 ];

% Ohne Ausgabe auf dem Bildschirm

>> A'

% Berechnung und Ausgabe der Transponierten

>> A

% Ausgabe der Matrix A auf dem Bildschirm

>> B = inv(A)

% Speichern der Inversen von A in B



```

>> A(3,3) = 1           % Ändern eines Matrizenelementes
>> B = inv(A)          % Speichern der Inversen von A in B
>> erg = A * B         % Überprüfung der Inversion
>> [EV, lambda] = eig(A) % Speichern der Eigenvektoren und Eigenwerte
                        % von A in EV und lambda
>> (lambda(1,1)*eye(3) - A) * EV(:,1) % Kontrolle durch [lambda(1)I - A] V(1)
>> t = 0:pi/100:2*pi;  % Vektor t definieren [0 pi/100 pi/50 ... 2*pi]
>> plot(t, sin(t))     % Graphische Darstellung von sin(t)
>> who, whos           % Liste aller Variablen im Arbeitsspeicher
>> clear               % Löscht alle Variablen im Arbeitsspeicher

```



**Matlab/Simulink und die wichtigsten Toolboxen sind hier verfügbar:**

- **Benutzerarbeitsräumen**
- **PC-Pools**
- **Windows Terminal Server**

Eine Studentenversion von Matlab/Simulink 2018b gibt es bei MathWorks für 69€:

[http://www.mathworks.de/academia/student\\_version/](http://www.mathworks.de/academia/student_version/)

