

# Strukturbildung und Simulation

technischer Systeme

## Modellbildung ohne Ballast

für Ingenieure und Studenten

# Strukturbildung und Simulation technischer Systeme

Was ist Simulation?

Simulation ist die **Nachbildung der Realität** (auch der geplanten) auf dem PC.

Zur Simulation von Maschinen werden von Ihnen **virtuelle Modelle** erzeugt. Diese Modelle nennt der Autor **„Strukturen“**.

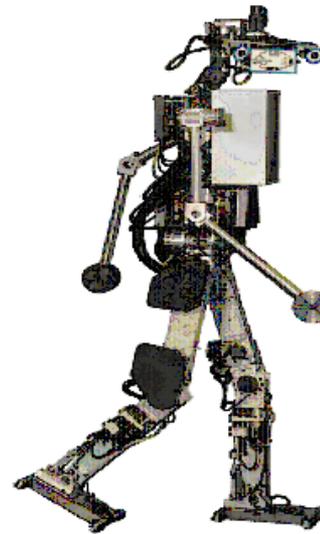
**Strukturen** sind die bildliche Darstellung aller Funktionen eines Systems im Zusammenhang.

Strukturen können von Simulations-Programmen berechnet werden. Dadurch lassen sich Systeme virtuell wie mit einem Teststand untersuchen.

Durch Simulation erhalten Sie ein einfaches, flexibles und leistungs-fähiges Werkzeug zur

**System-Analyse und -Dimensionierung im Zeit- und im Frequenz-Bereich.**

## Strukturbildung und Simulation technischer Systeme



Laufroboter Johnnie  
© Copyright TU München

Axel Rossmann

Simulation ohne Ballast  
für Ingenieure, Techniker  
und Studenten

Inhalt der  
Gesamt-Ausgabe

<http://strukturbildung-simulation.de/>

### Impressum

Autor: Axel Rossmann - Brödermannsweg 37a - 22453 Hamburg

Tel. (040) 4677 4108

e-mail: [axel.rossmann@hamburg.de](mailto:axel.rossmann@hamburg.de)

internet: <http://strukturbildung-simulation.de>

Verlag: epubli GmbH, Berlin

ISBN 978-3-7375-0007-4

Finanzamt Hamburg Tiergarten  
USt-ID: 42/202/1282

Copyright © 2014 Axel Rossmann

# GESAMT-AUSGABE DER STRUKTURBILDUNG UND SIMULATION TECHNISCHER SYSTEME

**Band 1/7** - - - - -  
1 Von der Realität zur Simulation  
Das Simulations-Programm SimApp  
2 Signalverarbeitung - statisch  
Elektrizitäts-Lehre  
Einführung in die Regelungstechnik

**Band 2/7** - - - - -  
3 Elektrische Dynamik  
4 Mechanische Dynamik

**Band 3/7** - - - - -  
5 Magnetismus  
Teil 1/2: Grundlagen, Induktion  
und Wechselstrom  
Teil 2/2: Dauer- und Elektro-  
Magnete, Spulen

**Band 4/7** - - - - -  
6 Elektrische Maschinen  
Gleichstrom, Allstrom, Drehstrom  
7 Transformatoren  
Netztrafos und Übertrager

**Band 5/7** - - - - -  
8 Elektronik  
Diode, Transistor, Operations-  
Verstärker, Thyristor  
9 PID-Regelungen

**Band 6/7** - - - - -  
10 Sensorik  
Hall-Effekt/Photometrie/  
Temperatur- Messung  
11 Aktorik Peltier-  
Elemente/Piezoelemente/Akustik

**Band 7/7** - - - - -  
12 Pneumatik/Hydraulik  
13 Wärme-Technik  
14 Kälte-Technik (geplant)

---

## Spezielle Themen:

- Simulierte Regelungstechnik
- Simulierte Messtechnik
- Der simulierte  
Operations-Verstärker
- Der simulierte Schrittmotor
- Der simulierte Asynchron-Motor

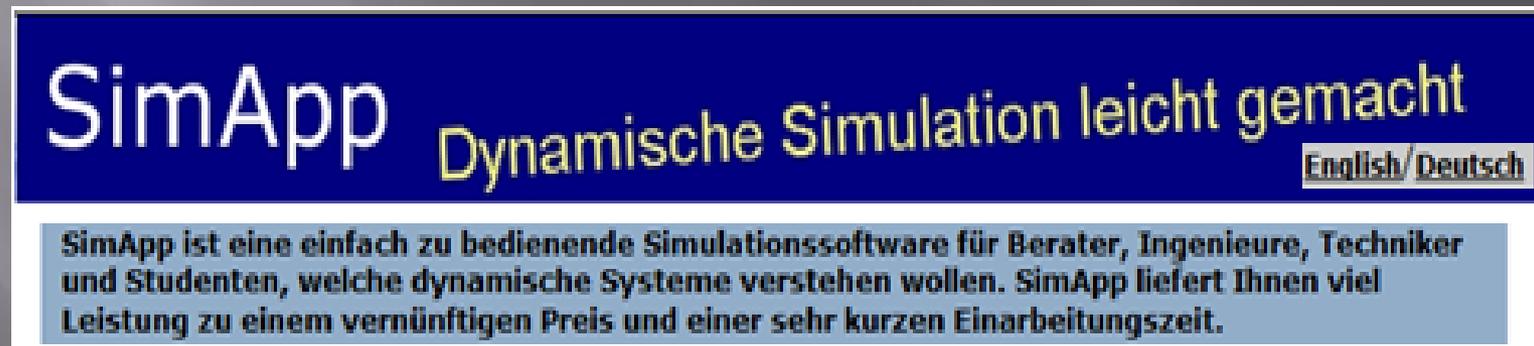
# Theorie und Praxis

Durch Struktur-Analysen (Modellbildung)

- ▣ werden Systeme so gut verstanden wie durch praktische Versuche,
- ▣ werden die Daten gewonnen, die zum Bau oder der Beschaffung von Komponenten gebraucht werden,
- ▣ können Fehler erkannt werden, die in der Realität zu vermeiden sind.

# Wie soll simuliert werden?

- Zu Entwicklung von Strukturen sind Grundkenntnisse der Physik und Technik erforderlich, aber keine höhere Mathematik.  
In dieser ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘ wird die Modellbildung an Beispielen aus allen Bereichen der Technik gezeigt:  
Mechanik, Elektronik, Hydro-Pneumatik, Thermo-Dynamik.  
Die dazu benötigten Grundlagen werden vor jeder Simulation kurz erklärt.
- Zur Simulation wird ein Programm benötigt.  
Es soll leicht zu erlernen, leistungsfähig und bezahlbar sein.  
Diese Anforderungen erfüllt z.B. das hier verwendete Programm SimApp:



**SimApp** Dynamische Simulation leicht gemacht English/Deutsch

**SimApp ist eine einfach zu bedienende Simulationssoftware für Berater, Ingenieure, Techniker und Studenten, welche dynamische Systeme verstehen wollen. SimApp liefert Ihnen viel Leistung zu einem vernünftigen Preis und einer sehr kurzen Einarbeitungszeit.**

# Die Simulations-Objekte

Simulations-Programme stellen eine Vielzahl von

- linearen,
- nicht-linearen und
- logischen Funktionen, genannt Objekte, zur Verfügung.

Damit können Sie beliebige technische Systeme nachbilden.

Hier zeigen wir beispielhaft eine Auswahl aus SimApp.

Als erste Anwendungen zeigen wir die linearen Grund-Operationen

- proportional (P),
  - integral (I) und
  - differenzial (D)
- und simulieren damit
- eine elektrische Verzögerung
  - und einen Oszillator.

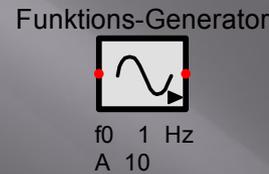
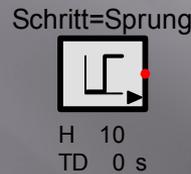
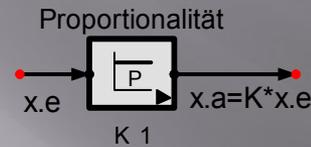
Danach zeigen wir die Sprung-Antworten eines

- kriechenden,
- schwingenden und
- dynamisch optimierten Oszillators.

Diese Kenntnisse werden u.a.

- bei der Dimensionierung von Bauelementen und
- bei der Optimierung von Regelkreisen

benötigt.



## Objekt-Beispiele

Objekte aus der Gruppe 'Linear'

Objekte aus der Gruppe 'Nichtlinear'

Objekte aus der Gruppe 'Quelle'

Objekte aus der Gruppe 'Logik'

Objekte aus der Gruppe 'Verschiedenes'

Objekte aus der Gruppe 'Messen'

# Sprungantworten

Verzögerungen beschreiben natürliche **Ausgleichs-Vorgänge**. Im einfachsten Fall bestehen sie aus einem Energie-Speicher und einem Energie-Verbraucher.

Der Schnelltest eines Systems besteht darin, es einzuschalten. Seine Reaktion heißt

## Sprungantwort.

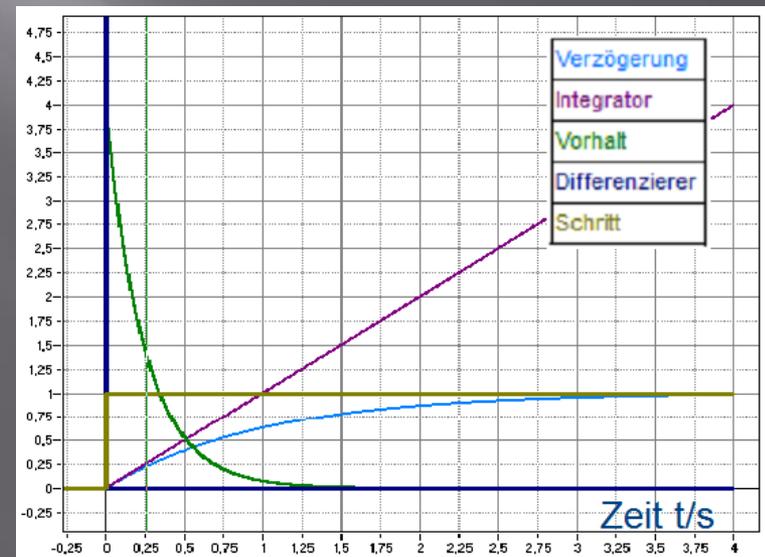
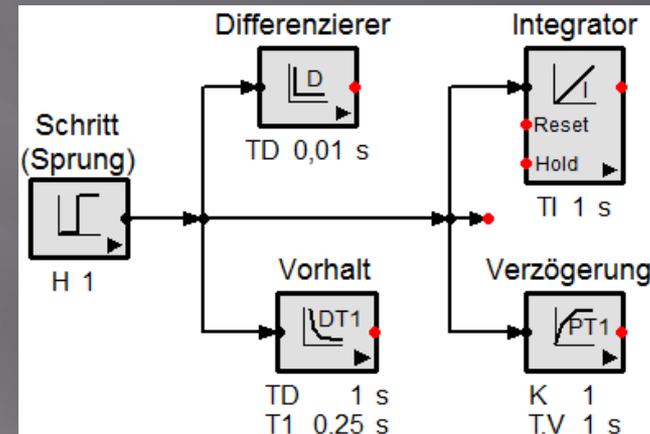
Sprungantworten zeigen den Charakter von Systemen, z.B.

### Verzögerung oder Vorhalt

kriechend (starke Dämpfung) oder  
schwingend (schwache Dämpfung)

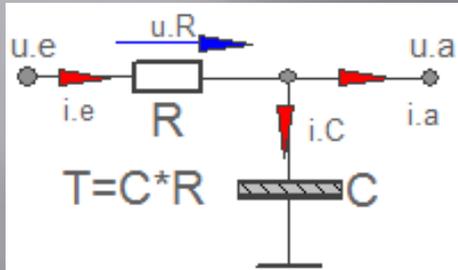
Das Symbol zeigt den Ausgleichs-Vorgang:  
Hier ist es eine **Exponential (e)-Funktion**.

- Zur Berechnung des Endwerts wird eine **Proportionalitäts-Konstante K** benötigt.
- Zur Zeichnung des Anfangs-Verlaufs dient die **Zeit-Konstante T**. Sie ist das Maß für die Trägheit einer Verzögerung.



# RC-Verzögerung

Eine Schaltung aus C und R soll den Mittelwert einer Eingangs-Spannung  $u.e$  bilden:



Periodische Signale (Periode  $t.0$ ) werden gemittelt (geglättet), wenn  $T$  groß gegen die Periodendauer  $t.0$  ist. Zur Bemessung der Verzögerung wird die Zeitkonstante  $T$  gefordert. Zu zeigen ist,

- wie  $T$  aus einer gemessenen oder simulierten Sprungantwort bestimmt werden kann und
- wie  $T$  aus  $C$  und  $R$  berechnet wird.

Oben: Schaltung und Messgrößen (Signale)

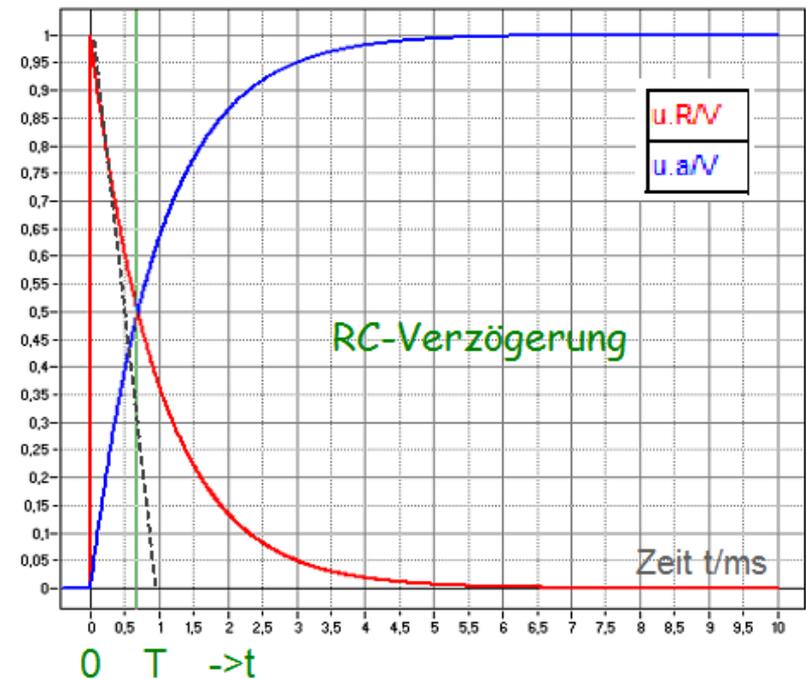
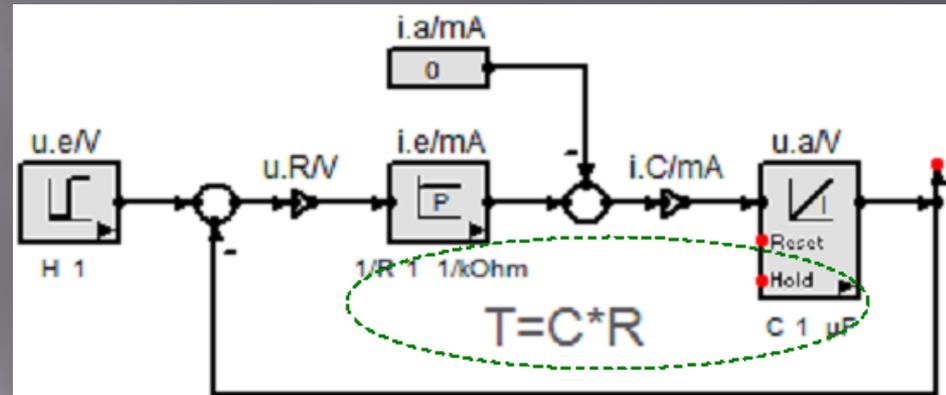
Rechts: die Detail (=Original)-Struktur

Darunter ihre Sprungantwort:

Sie zeigt eine aufklingende e-Funktion mit der Zeitkonstanten  $T$ .

Die Berechnung des Systems liefert den Zusammenhang:  $T=C*R$ .

$T$  wird zur Dimensionierung des RC-Gliedes gebraucht. Wenn  $R$  gewählt wird, ist  $C=T/R$ .

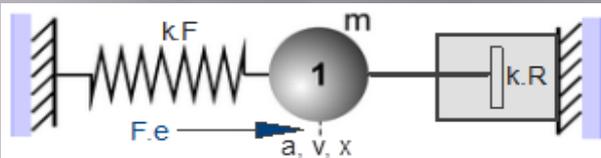


# Oszillatoren im Zeit-Bereich

Mehrfach verzögernde Systeme haben eine Eigen-Frequenz und Dämpfung. Zu ihrer Dimensionierung müssen die Alternativen bekannt sein. Sie heißen

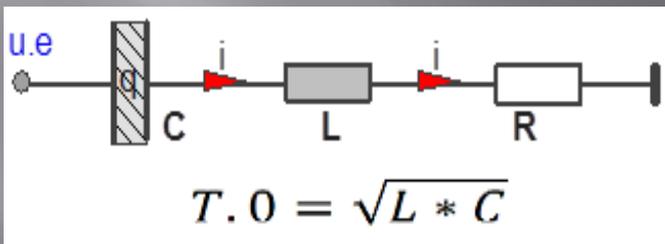
- stark gedämpft (kriechend) und
- schwach gedämpft (schwingend)

## Mechanischer Oszillator



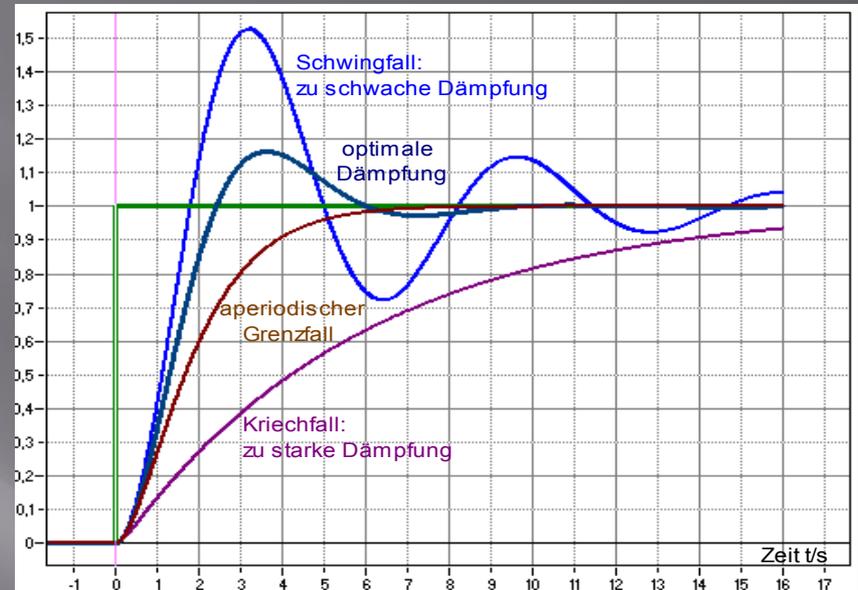
$$T.O = \sqrt{m/k.F}$$

## Elektrischer Oszillator

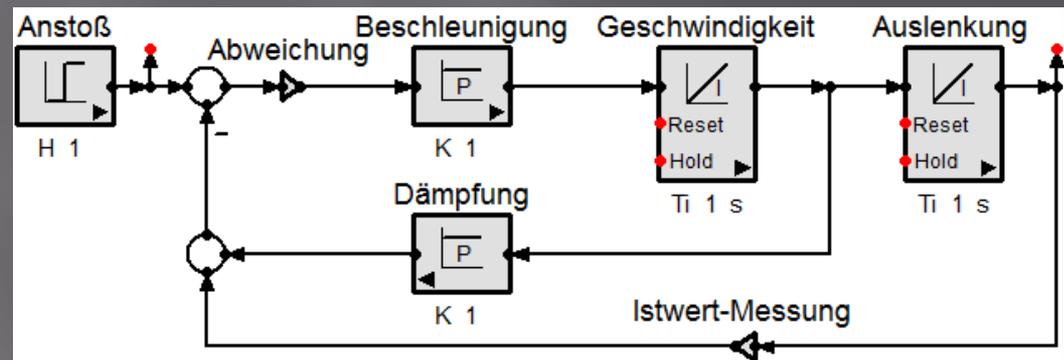


$$T.O = \sqrt{L * C}$$

- Struktur, Analogien
- Eigenfrequenz, Dämpfung
- Kenn-Widerstand



Optimale Dynamik: der beste Kompromiss zwischen Schnelligkeit und Stabilität -> Regelungstechnik

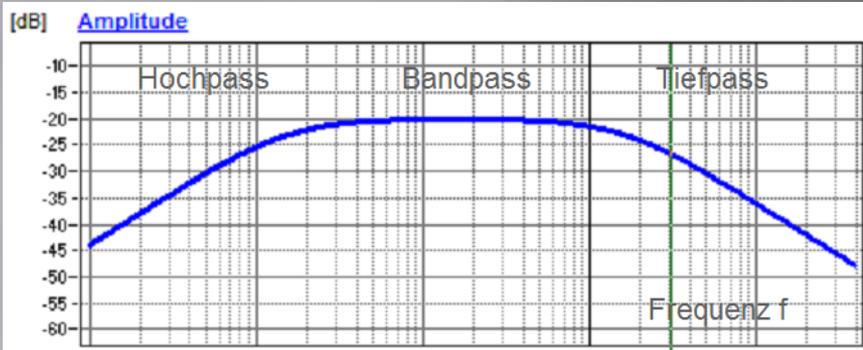


# System-Analyse im Frequenz-Bereich

Test-Signal = Sinus

Lineare Systeme werden komplex berechnet

-> der komplexe Frequenzgang  $F = x.a / x.e(j\omega)$



Darstellung von Frequenzgängen im Bode-Diagramm

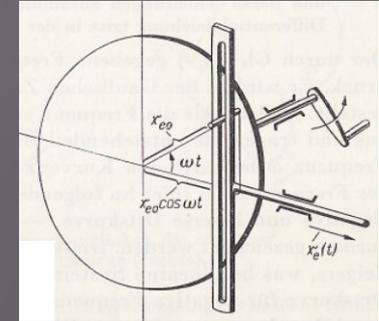
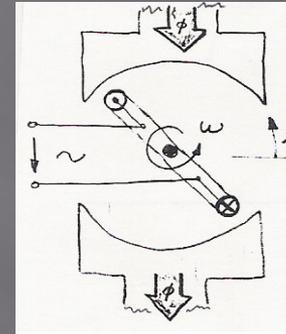
Tiefpass, Hochpass, Bandpass  
Systeme 1. und 2.Ordnung

Gesucht werden die Zusammenhänge zwischen den System-Daten und den Bauelementen.

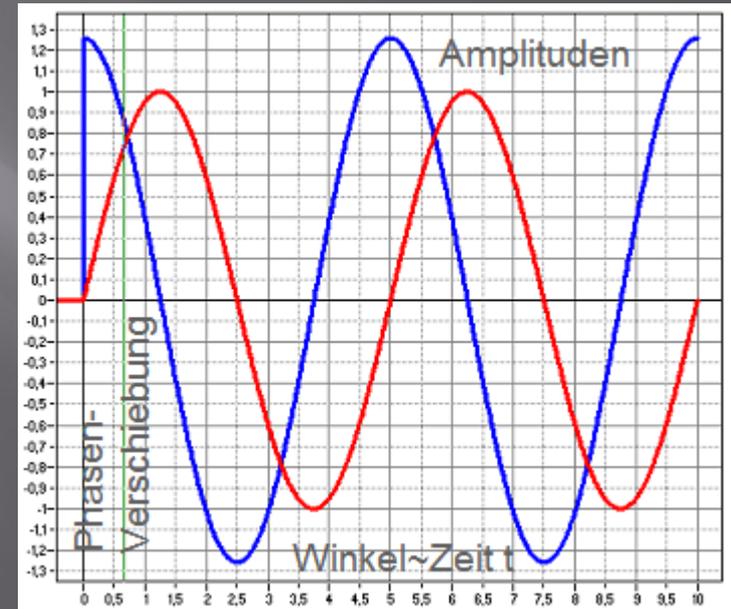
Resonanz-Frequenz und System-Zeitkonstante

**Dämpfung und Kenn-Widerstand**

Resonanz-Überhöhung=Güte=1/2d



Generator und Kurbelschleifen-Getriebe



Frequenzgang -> Sprungantwort

# Band 1/7 Grundlagen und Simulations-Voraussetzungen

Zum Inhalt von Band 1/7

## Kapitel 1

- Einführung in das Simulations-Programm SimApp
- Beispiele aus Alltagsleben, Schule und Betrieb  
Mittel- und Effektivwerte, quadratische Gleichung, implizite Funktion, Zinseszins
- Einführung in die Regelungstechnik  
Beispiel: Rekursion

## Kapitel 2

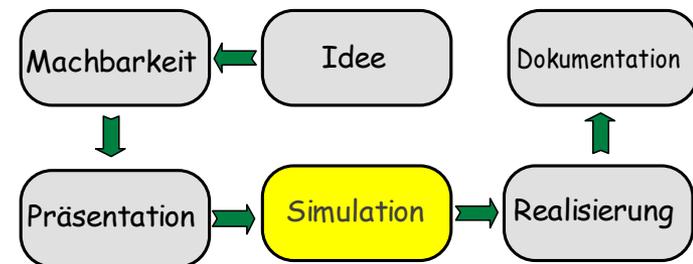
### Elektrizitätslehre

- Elektrischer Stromkreis, R
- Ladungs-Verschiebung, C  
Beispiel: Elektro-Filter

# Strukturbildung und Simulation technischer Systeme

Axel Rossmann

## Simulation ohne Ballast



Band 1/7

Die Grundlagen der Simulation  
mit einer  
Einführung in die Regelungstechnik

1 Von der Realität zur Simulation  
2 Elektrizität

<http://strukturbildung-simulation.de/>

# Beispiel zu Kapitel 1/13: Rekursion

Simulations-Programme berechnen die Messwerte von Strukturen durch **Iteration** (schrittweise Annäherung an den Endwert).

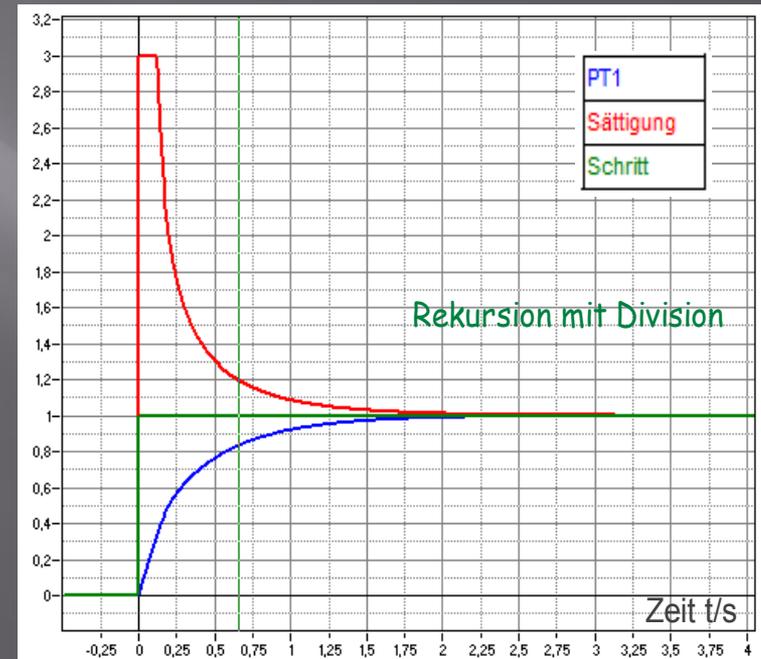
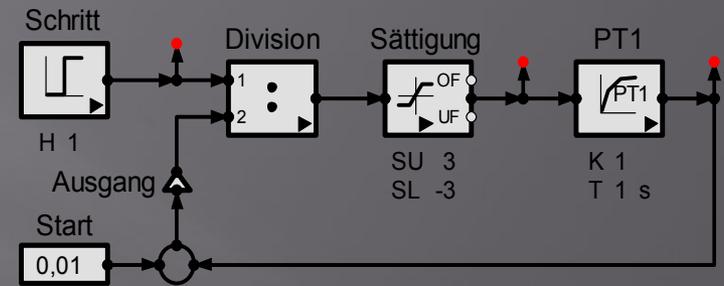
Dabei kommt es oft vor, dass eingangsseitig Messwerte benötigt werden, die erst am Ausgang zur Verfügung stehen. Dieser Fall heißt **Rekursion**. Die nebenstehende Abbildung zeigt die Struktur einer Rekursion.

Beispiele dazu folgen in allen Kapiteln.

Um sie verstehen zu können, muss das Rekursions-Verfahren bekannt sein. Wir erklären es hier durch ihre Struktur.

**Rekursionen sind Regelkreise.** Ihr Ziel ist, die Regelabweichung (hier die Differenz aus dem Ziel und dem Ausgangs-Signal PT1) zu null zu machen. Damit das durch Iteration gelingt, muss

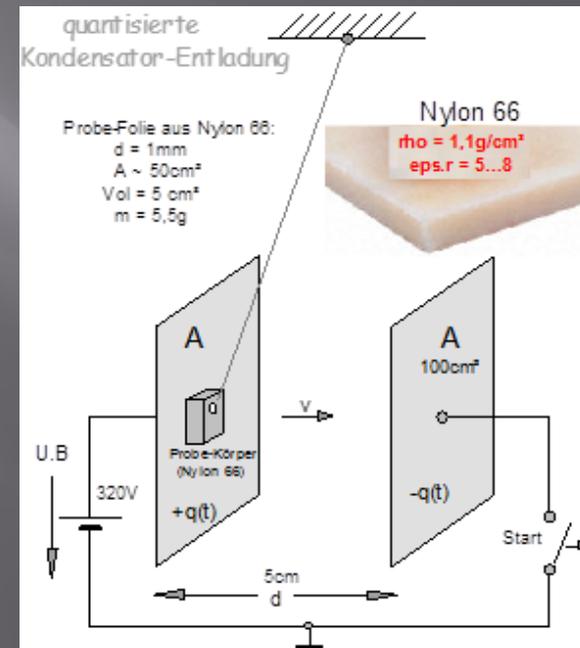
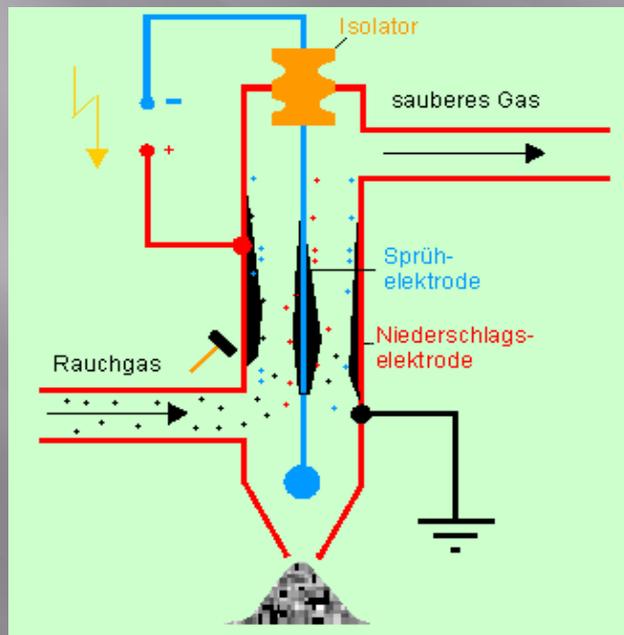
- ein Anfangswert (Start) vorgegeben werden und
- der Kreis eine Verzögerung  $T$  enthalten (frei wählbar).



# Beispiel zu Kapitel 2/13: Elektro-Filter

Aufbau und Funktion eines Elektro-Filter:

Elektro-Filter sind **röhrenförmige Kondensatoren**, in denen das zu reinigende **Rauchgas** strömt. Die Staubteilchen werden durch dünne **Hochspannungsdrähte, genannt Sprüh-Elektroden**, im Gas-Strom elektrisch aufgeladen (ionisiert). Dann können sie im Feld des Filter-Kondensators in Richtung der Kondensator-Platten (Niederschlags-Anoden) beschleunigt und abgeschieden werden. Die abgeschiedene Asche wird mit Wasser befeuchtet und abtransportiert.



Mit Elektro-Filtern werden über 95% der Teilchen mit Größen unter  $1\mu\text{m}$  erfasst.

# Band 2/7 Technische Dynamik

Prolog zur technischen Dynamik  
Handwerkszeug zur dynamischen Analyse,  
das in allen Simulationen gebraucht wird.

- Kinetik und Kinematik
- Differenzierung und Integration

Beispiel:

Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)

Kapitel 3: elektrische Dynamik

- Spulen und ihre Induktivität  $L$
- Einführung in den Elektro-Magnetismus
- Systeme 1. und 2.Ordnung
- Frequenzgang und Bode-Diagramm

Kapitel 4: mechanische Dynamik

- Massen-Federn-Dämpfer
- Mechanischer Oszillator
- Analogien
- Kreisel

Beispiel: Trägheits-Navigation

## Strukturbildung und Simulation technischer Systeme

Axel Rossmann



Band 2/7

Die dynamischen Grundlagen der Simulation

<http://strukturbildung-simulation.de/>

3 elektrische Dynamik  
4 mechanische Dynamik

# Beispiel zu Kapitel 3/13: Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung HGÜ

Mittels HGÜ lassen sich große elektrische Leistungen über weite Strecken verlustärmer als mit Wechselstrom übertragen.

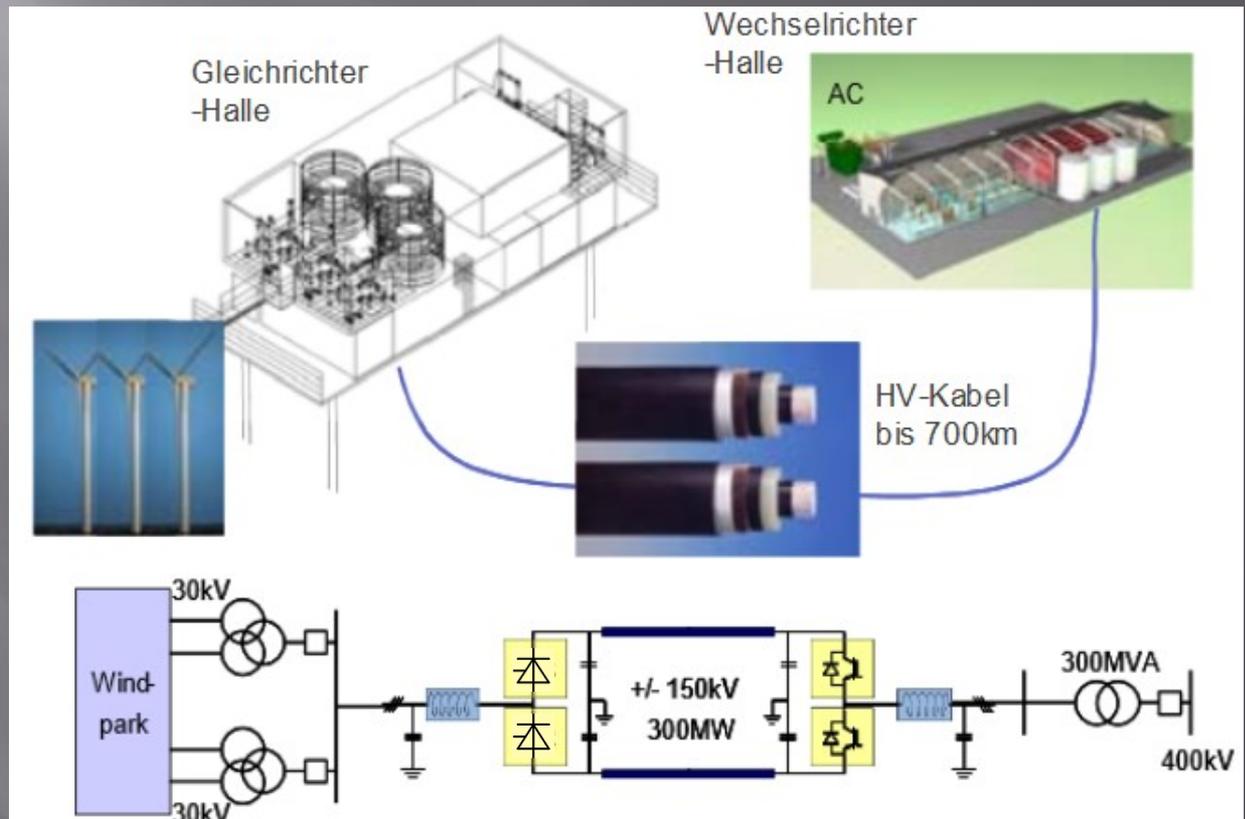
Sie dient hier als Beispiel für dynamische Simulationen und die Berechnung von Spulen.

Zur Nachbildung einer HGÜ sind folgende **Komponenten** zu simulieren:

- Gleichrichter
- Wechselrichter
- Transformatoren
- Drosseln und Luft-Spulen
- Kabel und Leitungen

... und die **Regelkreise** zur Frequenz- und Spannungs-Stabilisierung.

Sie müssen die Kraftwerks-Leistung bei Last-Schwankungen schnell dynamisch optimal an den Verbrauch anpassen.



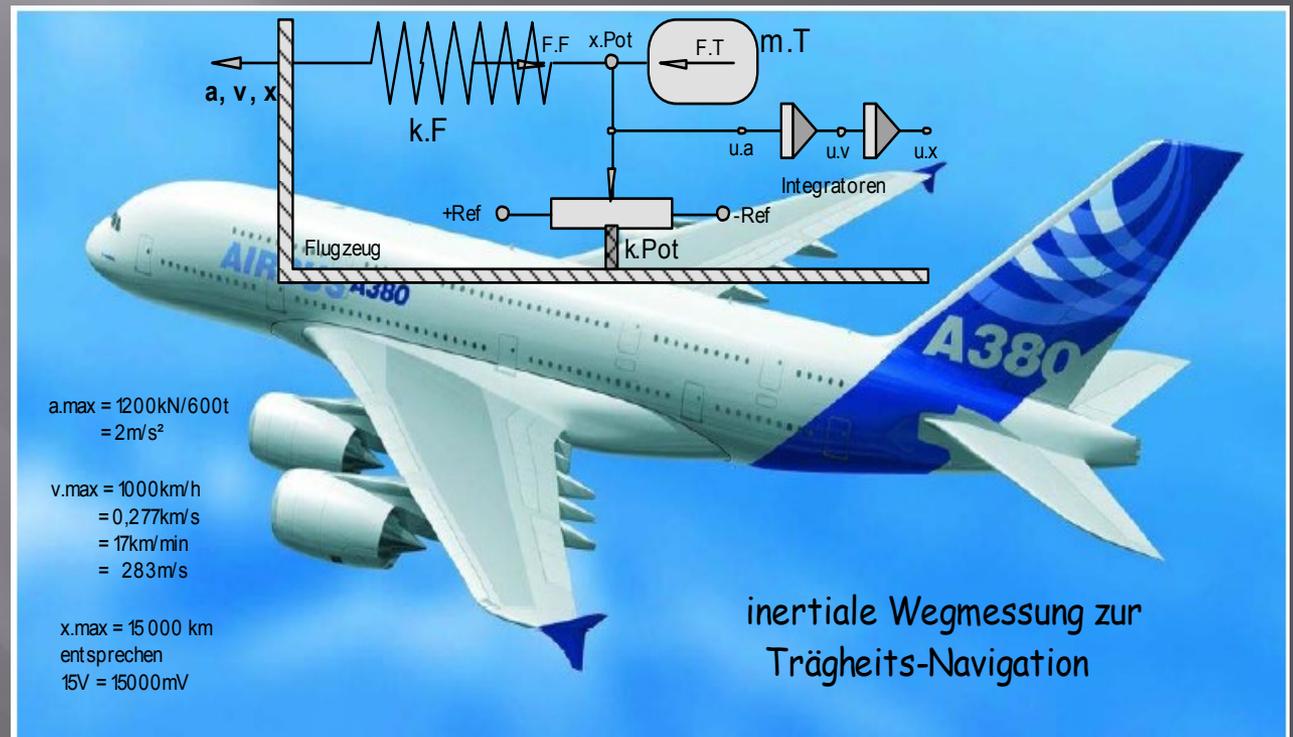
## Beispiel zu Kapitel 4/13: Trägheits-Navigation:

Als abschließendes Beispiel zum Thema Dynamik untersuchen wir eine Positions-Ermittlung mit Hilfe der Massenträgheit.

Sie ermöglicht die Bestimmung der Positions-Änderungen von Schiffen, Flugzeugen inertial, d.h. ohne einen externen Bezug.

Kennt man die (dreidimensionale) Bewegung relativ zur Start-Position, kann man ein Fahr- oder Flugzeug zu jedem gewünschten Ort navigieren (z.B. auch Raketen im Weltraum).

- Inertiale Geschwindigkeits-Messung
- Analoge und digitale Integratoren
- Das Drift-Problem
- Navigations-Fehler



# Band 3/7 - Kapitel 5/13

## Magnetismus

Die Grundlagen des Magnetismus werden gebraucht zur Simulation

- von Transformatoren (Kapitel 7)
- von Motoren (Kapitel 6) und für den ‚simulierten Asynchron-Motor‘

### Teil1: Induktion und Wechselstrom

- Vorschalt-Drossel für Leuchtstoff-Lampen
- Die Spulen eines Kernspin-Tomographen
- Blindstrom-Kompensation
- Induktions-Heizung
- DC/DC-Wandler (Gleichspannungs-Transformatoren)
- Spar-Transformator

### Teil 2: Magnetische Kräfte und Drehmomente

- Dauer- und Elektro-Magnete
- Relais und Kraft-Magnete
- Wirbelstrom-Bremse und -Verluste
- Massen-Spektrometer

## Strukturbildung und Simulation technischer Systeme

Axel Rossmann



Band 3/7 - Kapitel 5 - Teil 1 & 2

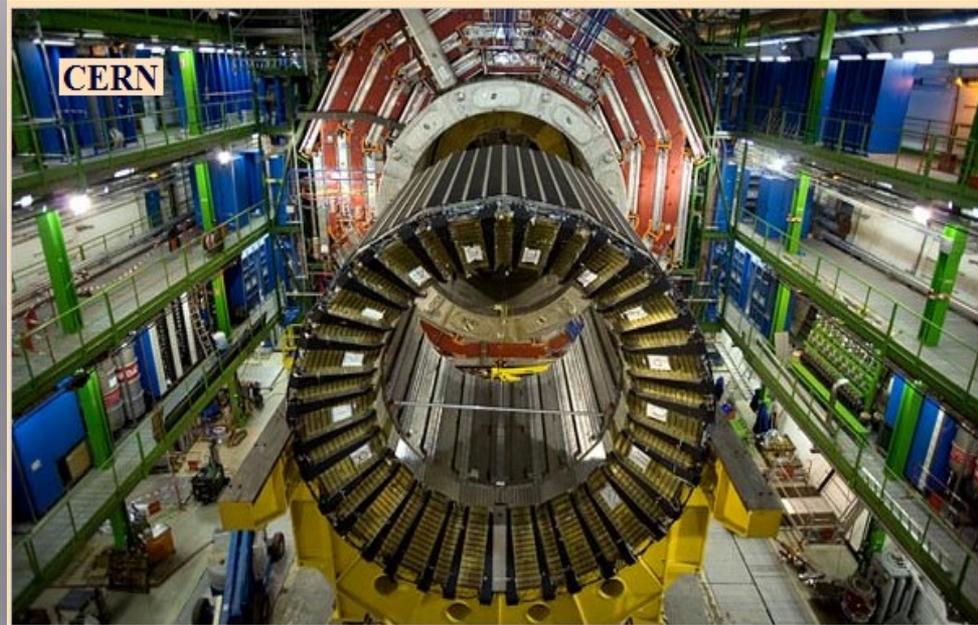
## Magnetismus

<http://strukturbildung-simulation.de/>

Grundlagen und Anwendungen  
Induktion und Wechselstrom  
Dauer- und Elektro-Magnete

# Erstes Beispiel zu Kapitel 5/13: Spulen und Induktion

Mit den zur Spulen-Dimensionierung entwickelten Algorithmen können Spulen jeder Größe berechnet werden, z.B. auch die eines Teilchen-Beschleunigers der Hochenergie-Physik.



## Teilchen-Beschleuniger der **Hochenergie-Physik**

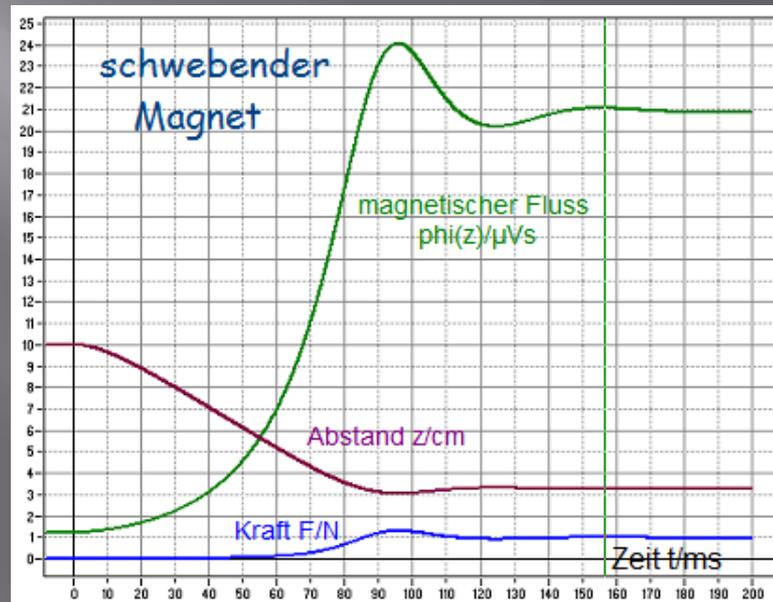
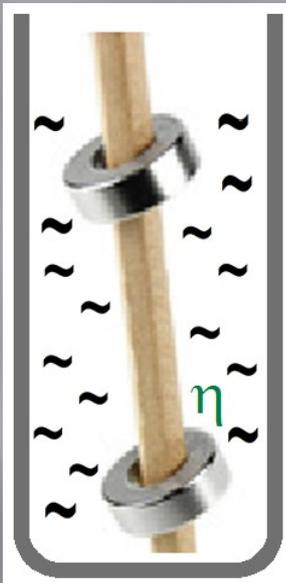
In der Grundlagen-Forschung dienen magnetische Felder zur Ablenkung und Fokussierung von Protonen- und Elektronen-Strahlen in Ring-Beschleunigern:

- Der LHC (Large Hadron Collider) im Cern bei Genf ,
- das DESY in Hamburg und das Bessy in Berlin.

## zweites Beispiel zu Kapitel 5/13: schwebender Magnet (Levitation)

Zwei gleiche Magnete können so stark sein, dass sie die Erdanziehung überwinden und sich dadurch auf Abstand halten.

Wie kompliziert die Dynamik schwebender Magnete ist, zeigt das folgende, simulierte Diagramm zum Einschwing-Vorgang beim Herunterfallen des oberen Magneten.



Durch magnetische Kräfte lässt sich die Schwerkraft kompensieren (Levitation). Dabei treten erhebliche Stabilitäts-Probleme auf. Wie sie gelöst werden, erfahren Sie im Kapitel 5.5 ‚PID-Regelungen‘ und noch ausführlicher in der ‚Simulierten Regelungs-Technik‘.

- Beim Transrapid werden die abstoßenden Kräfte durch elektrische Ströme erzeugt.

## Band 4/7 elektrische Maschinen und Transformatoren

Dieser vierte Band der ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘ behandelt zwei wichtige Anwendungen des Magnetismus:

### Kapitel 6 Elektrische Maschinen

- Gleichstrom-Maschinen
- Allstrom- und Synchron-Motoren

Die Themen Asynchron-Motor und Schritt-Motor hätten den hier gesteckten Rahmen gesprengt. Deshalb behandeln wir sie nur als Kurzfassung. Ihre ausführliche Darstellung finden Sie in den Schriften

- Der simulierte Asynchron-Motor
- Der simulierte Schritt-Motor

### Kapitel 7: Transformatoren und Übertrager

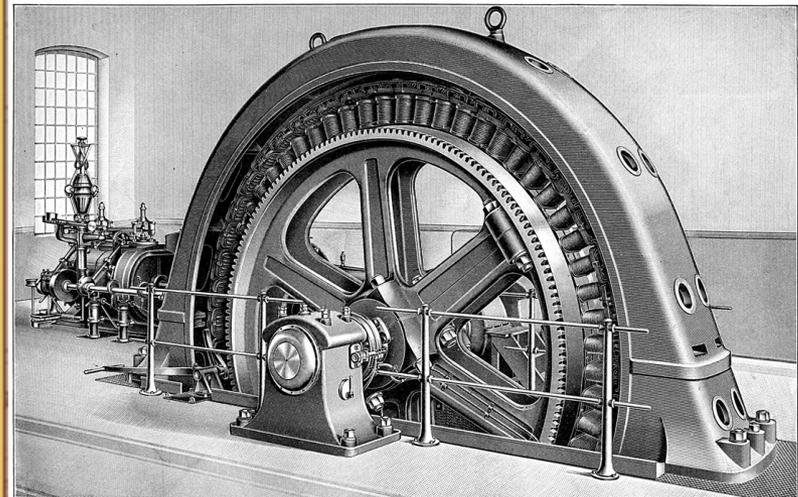
- Netz-Transformatoren
- Audio-Übertrager

## Strukturbildung und Simulation technischer Systeme

Axel Rossmann

Elektrische Maschinen und Transformatoren

Band 4/7



<http://strukturbildung-simulation.de/>

6 Elektrische Maschinen

Gleichstrom-Wechselstrom-Drehstrom

7 Transformatoren und Übertrager

# Beispiel zu Kapitel 6/13: elektrische Maschinen

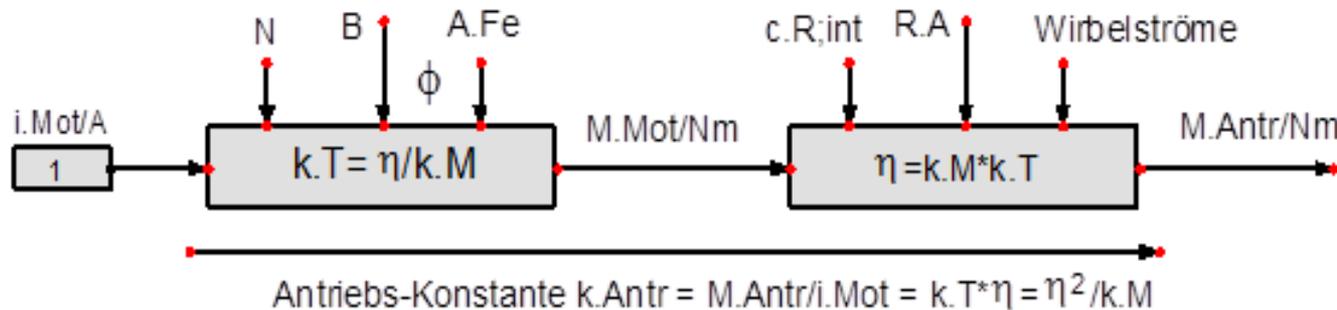
Die Themen des sechsten Kapitels:

- Das Barlow'sche Rad
- Der reale Gleichstrom-Motor mit Bürsten-Spannung und Wirkungsgrad
- Wechselstrom-Motoren
  - mit Permanent-Magnet
  - Nebenschluss-Motor
  - Reihenschluss-Motor
  - Allstrom-Motor
- Drehstrom-Maschinen
  - Synchron-Motor und
  - Synchron-Generator



Antrieb: Windungen - Magnet - Baugröße

Verluste: mechanisch - elektrisch - magnetisch



# Beispiel zu Kapitel 7/13: Transformatoren und Übertrager

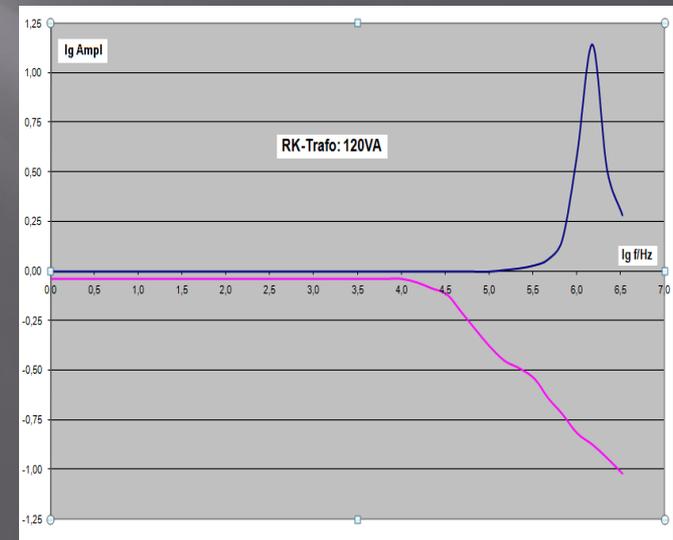
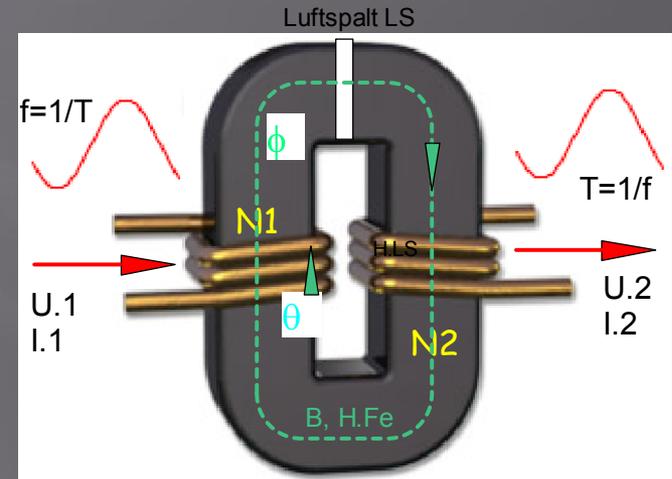
- **Netz-Trafos**

Hier interessieren die Abmessungen von Kern und Spulen als Funktion der Nennleistung.

Die Berechnung erfolgt ohne die Zuhilfenahme von Kennlinien.

- **Audio-Übertrager**

Hier interessiert besonders der **Frequenzgang**. Ihn zu kennen zeigt seine Eignung für eine gegebene Anwendung, z.B. zur Lautsprecher-Anpassung.



# Band 5/7 Elektronik und PID-Regelungen

## Kapitel 8 Elektronik

- Dioden, Transistoren  
Grund-Schaltungen, Netzteil, Spannungs-Regler
- Operations-Verstärker (OP's)  
und seine Schaltungs-Technik
- Thyristoren und Triacs  
Phasenanschnitt- und Vollwellen-Steuerung

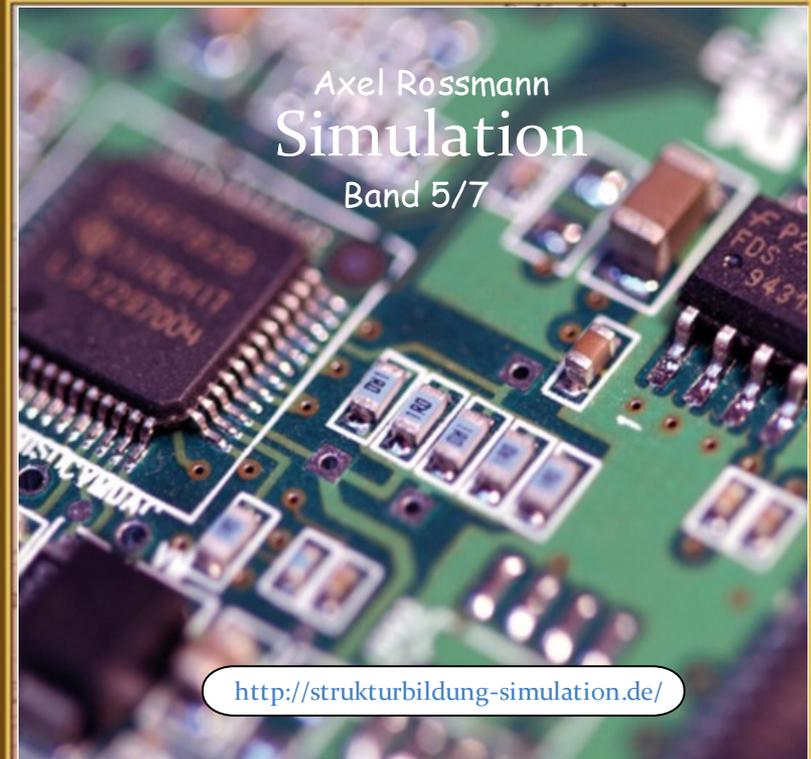
## Kapitel 9 PID-Regelungen

- Dynamische Ergänzung der in Kapitel 1 gelegten  
statischen Grundlagen
- Dynamische Optimierung von Regelkreisen
- Entwurf von Proportional-, Integral- und  
Differenzial-Reglern
- Elektronische Realisierung von PID-Reglern  
mit OP's

## Anwendungen

- Phasen-Regelung (PLL)
- Ausregelung von Stör-Spektren.

## Strukturbildung und Simulation technischer Systeme



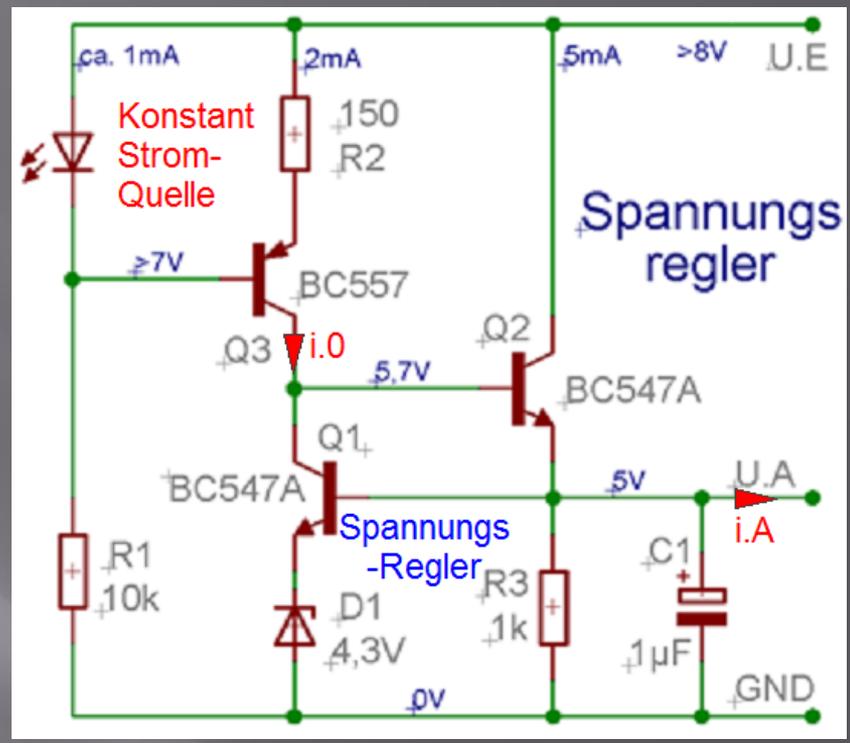
8 Elektronik  
9 PID-Regelungen

# Beispiel zu Kapitel 8/13: Spannungs-Regler 78xx

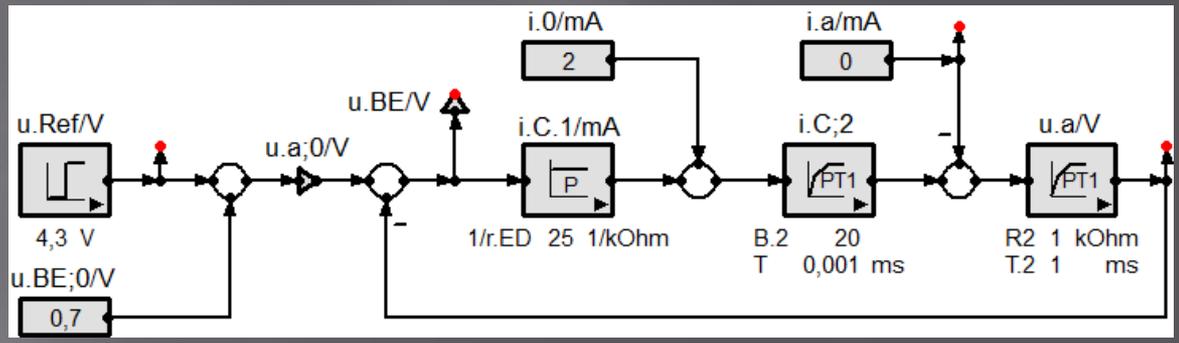
Spannungsregler werden zum Aufbau stabilisierter Netzgeräte benötigt.

Die nebenstehende Schaltung zeigt die diskrete Grund-Schaltung des integrierten Spannungs-Reglers 78xx. Sie dient zum Studium des Schaltungs-Prinzips und ihrer Eigenschaften.

Die Struktur zeigt die **Proportional-Regelung** der Ausgangs-Spannung  $u.A.$ .  $D1$  und  $u.BE;1$  (beide annähernd konstant) erzeugen den Sollwert von ca. 5V.

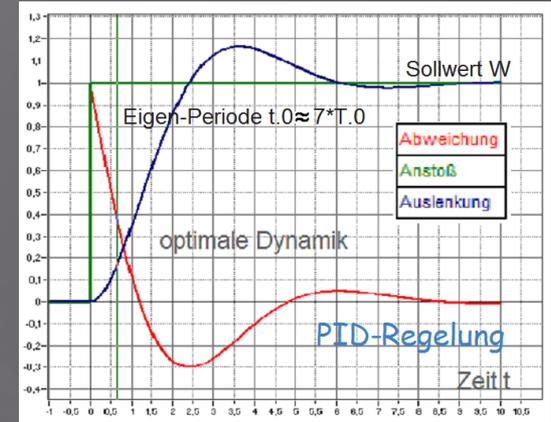


Der Transistor Q1 ist Regler und Stell-Verstärker in Einem. Er verteilt den Konstant-Strom  $i.0$  so, dass  $u.a$  der  $u.Ref$  angeglichen wird und auch bei Belastung durch  $i.A$  (Störgröße) annähernd angeglichen bleibt.



# Beispiel zu Kapitel 9/13: parametrische Regler-Dimensionierung

- Gemessen worden ist eine Sprungantwort der Regelstrecke.
- Gewählt wird die Regler-Kombination: P, PI, PD oder PID.
- Gesucht werden die Parameter des PID-Reglers: V.P, T.I und T.D
- und die Daten des geschlossenen Regelkreises: x.B und T.O.
- Das Ziel ist ein geschlossener Regelkreis mit optimaler Dynamik
- (Seite (8)).



Zu Berechnung des Reglers werden drei Parameter der Regelstrecke benötigt:

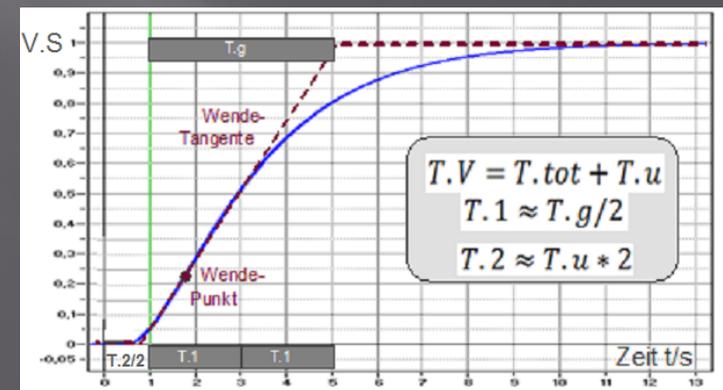
1. Die statische Strecken-Verstärkung V.S
2. Die dominierende Strecken-Zeitkonstante T.1
3. Die Verzugszeit T.2

Regelstrecke P-T2 stark gedämpft Parameter V.S, T.1, T.2	V.P	T.I	T.D	T.O	x.B
Regler-Daten gewählt: V.D > 1	$\frac{T.1}{T.2} * \frac{V.D}{V.S}$	$T.2 * \frac{V.S}{V.D}$	$\frac{T.1}{V.S}$	$T.2 * V.D$	0

Die Differenzier-Verstärkung V.D ist ein Parameter, der von der zulässigen Übersteuerung der Strecke abhängt.

Die nebenstehende Abbildung zeigt, wie diese Parameter einer gemessenen Sprungantwort der Regelstrecke entnommen werden können.

- Dazu legt man eine Tangente an den Wendepunkt und bestimmt ihre Schnittpunkte mit dem Anfangswert und dem Endwert. Daraus erhält man die zur Regler-Dimensionierung benötigten Strecken-Zeitkonstanten T.1 und T.2.
- Der Ausgangs-Hub ist die Strecken-Verstärkung V.S.



## Band 6/7 Sensorik und Aktorik

Der sechste Band der ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘ behandelt

- Sensoren (Messwandler) und
- Aktoren (Stellglieder)

mit ihren elektronischen Verstärkern. Gefordert werden Spannungs- oder Strom-Ausgänge.

### 10 Sensorik

- Hall-Sensor und induktiver Strömungsmesser
- Photometrie und Beleuchtungs-Messer
- Photo-Voltaik und Solar-Kollektoren
- Temperatur-Messer und -Wächter

### 11 Aktorik

- Peltier-Elemente zur elektrischen Erzeugung von Temperatur-Differenzen
- Piezos als Druck-Messer
- Piezos als Mikrofon und Lautsprecher
- dynamisches Mikrofon und dynamischer Lautsprecher

## Strukturbildung und Simulation technischer Systeme



Axel Rossmann

Simulation

Band 6/7

10 Sensorik

11 Aktorik

<http://strukturbildung-simulation.de/>

# Beispiel zu Kapitel 10/13: Photometrie

Photometrische Messgrößen:

Licht-Strom PHI in lm

Lampen: PHI~P.eI

Licht-Stärke I in cd

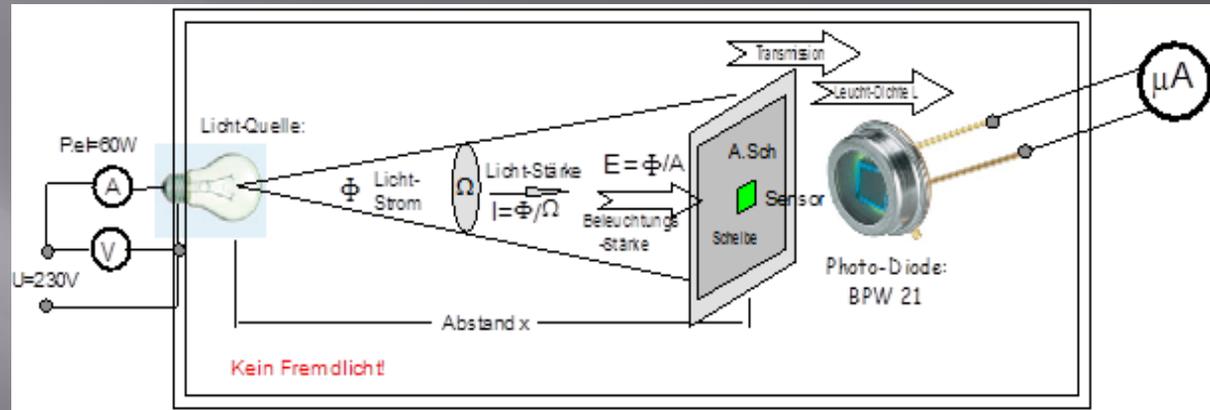
$I = \text{PHI} / \text{Raumwinkel}$  in srad

Beleuchtungs-Stärke E in lx

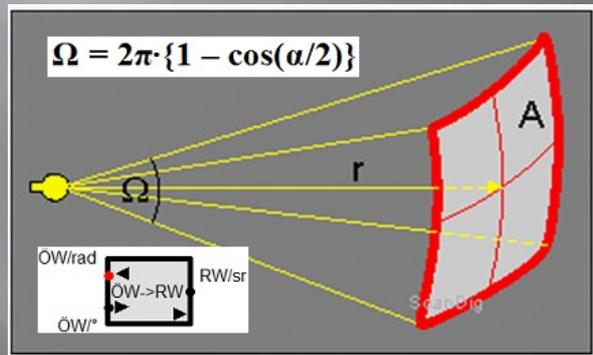
$E = I / \text{Abstand}^2$

Leucht-Dichte L in Silb sb

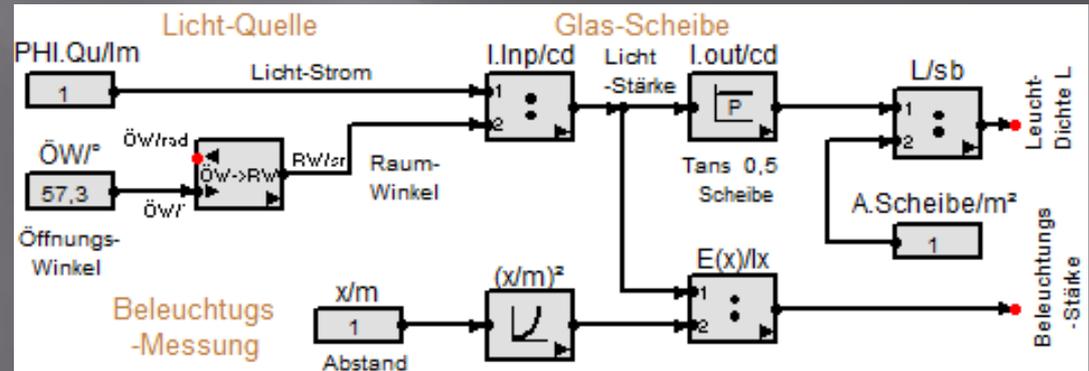
$L = I / A$



Photometrische Mess-Strecke



Öffnungs-Winkel -> Raum-Winkel



Photometrische Messgrößen

# Beispiel zu Kapitel 10/13: Nebelkammer

## Eine kleine Nebelkammer mit Peltier-Kühlung

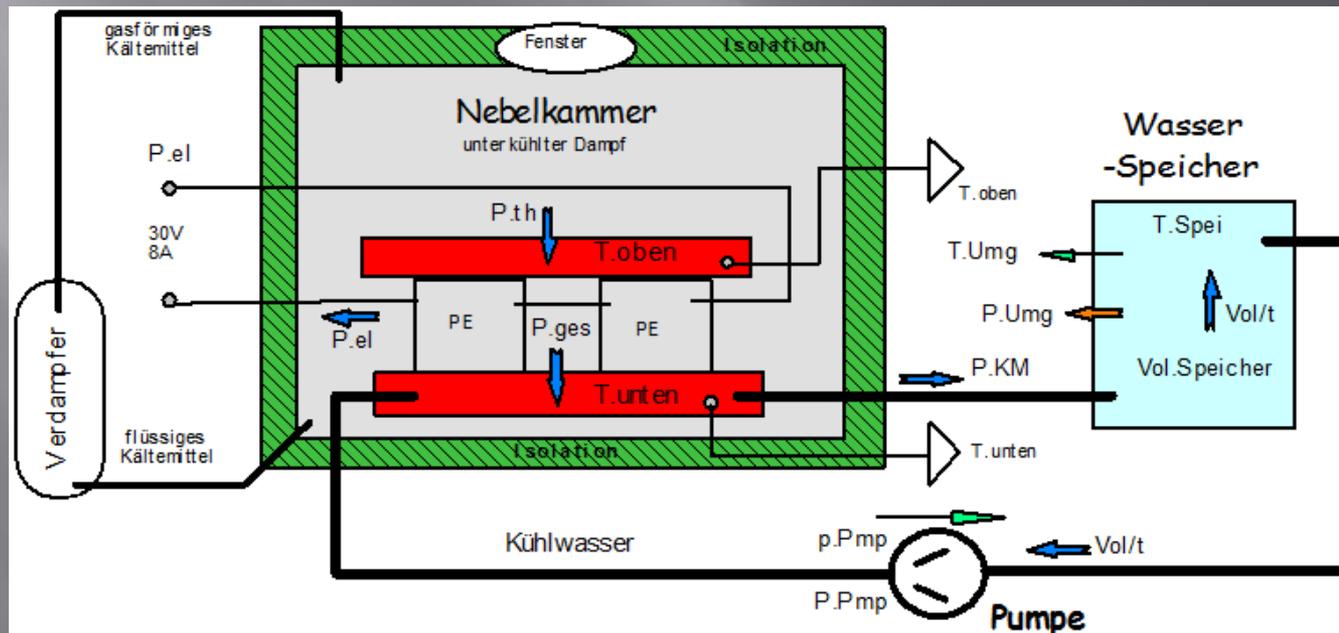
Durch Abkühlung von reinem Wasserdampf entsteht übersättigter Dampf. Er kann zunächst nicht kondensieren, da Kondensations-Kerne fehlen.

Strahlung erzeugt Kondensations-Kerne. Dadurch entstehen sichtbare Wasserdampf-Spuren.

Die folgende Zeichnung zeigt eine Nebelkammer mit nur zwei Peltier-Elementen zur Kühlung und eigenem Wasser-Kreislauf:



Spuren von schnellen und langsamen Elektronen



Band 7/7  
Pneumatik/Hydraulik  
Wärme-Technik

**Kapitel 12 : Pneumatik/Hydraulik**

- Hydro-pneumatische Grundlagen
- Pipeline: Strömung – laminar und turbulent
- Pumpe und Kompressor
- Drosseln und Blenden
- Heizkörper und Ventile
- Düse-Prallplatte
- Druck- und Volumen-Verstärker
- Pneumatischer Schwingkreis
- Öl-Motor und -Generator
- Druck-Regelungen

Weitere Beispiele zur Pneumatik/Hydraulik finden Sie in der ‚Simulierten Regelungstechnik‘, Kapitel 6 ‚Regelstrecken-Simulation‘.

**Kapitel 13: Wärme-Technik**

- Wärme-Leitung und Kühlkörper
- Wärme-Strahlung und Solar-Kollektoren
- Heizung und Wärme-Speicherung
- Konvektions-Kühlung

**Strukturbildung und Simulation**  
technischer Systeme



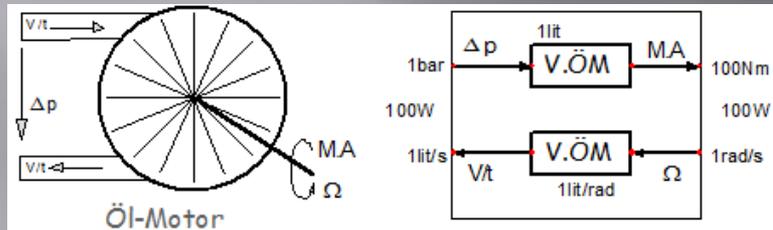
Axel Rossmann  
**Simulation  
ohne Ballast**  
Band 6/7

10 Sensorik  
11 Aktorik

<http://strukturbildung-simulation.de/>

# Beispiel zu Kapitel 12/13: Öl-Motor und -Generator

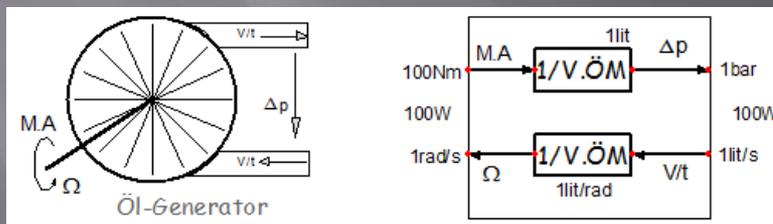
Öl-Motoren erzeugen aus Druck  $\rightarrow$  Drehmoment.  
 Sie sind das hydraulische Äquivalent zum Elektro (Torque)-Motor.



Konstanten-Bestimmung:  
 Den verlustfreien Motor beschreibt eine Konstante:  
 das **Schluck-Volumen V.ÖM**.

V.ÖM ist eine Hersteller-Angabe. Es ist das Maß für  
 die Größe eines Öl-Motors bzw. -Generators.  
 Die Berechnung folgt aus der Leistungs-Bilanz  $\rightarrow$

Öl-Motoren lassen sich auch invers als Generator  
 betreiben.  
 Dann erzeugen sie aus Drehmoment  $\rightarrow$  Druck.



Öl-Motoren werden überall da eingesetzt, wo  
 große Drehmomente bei kleinen Drehzahlen  
 benötigt werden: Bagger, Panzer.

**Leistungs-Bilanz** (ohne Reibungs-Verluste):

$$P_{hy} = \Delta p \cdot (V/t) \text{ gleich } P_{me} = M.A \cdot \Omega$$

Berechnung des Schluck-Volumens  
 aus Drehmoment M.A und Druck  $\Delta p$   
 oder Durchsatz (V/t) und Drehzahl  $\Omega$ :

$$V.ÖM = \frac{M.A}{\Delta p} = \frac{V/t}{\Omega} \text{ in } m^3$$

Antriebs-Moment M.A in Nm  
 Drehzahl  $\Omega$  in rad/s  $\approx 10$  Umd/min

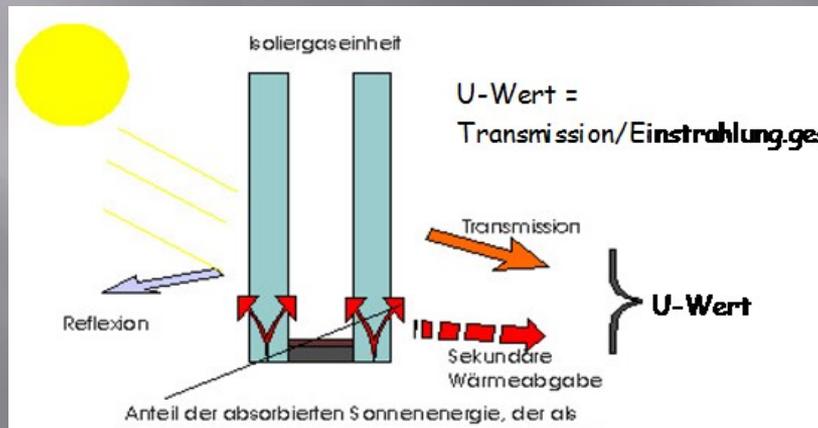
# Beispiel zu Kapitel 13/13: Heizung: Messung und Berechnung

Heizkosten können gemessen und berechnet werden:

Die **Berechnung** erfolgt vor jeder Energiespar-Maßnahme: neue Heizung, neue Fenster. Sie soll klären, durch welche Materialien die kürzeste **Amortisationszeit** erreicht wird.

Die **Messung** erfolgt vor und nach jeder Energiespar-Maßnahme. Zu bestimmen ist in beiden Fällen die pro Kelvin aufzuwendende Heiz-Leistung.

Der Unterschied ist die **spezifische Ersparnis (in kW/K)**. Damit kann die tatsächlich zu erwartende Amortisationszeit angegeben werden.



Tmp-Aus                      12V                      Tmp-Inn

---

**H\*E\*M**

Tank ● ● ● Brenner  
Takt

Heizanlagen-Effektivitäts-Messer

ABCDEFGHIJKLMN  
OP  
abcdefghijklmn  
op

Neustart: Alle vier Tasten gleichzeitig drücken

AUF	1..... Temperaturen 2..... Brenner-Zeiten 3..... bisheriger Verbrauch 4..... momentaner Verbrauch 5..... individueller Verbrauch 6..... spezifischer Verbrauch	AB
↑		↓

nein	7..... Düse & Elektrik 8..... beheizter Raum 9..... Tank 10..... relative Ersparnis 11..... Preise 12..... Heizkosten	ja
-		+

Daten-Transfer: Tasten AUF und AB gleichzeitig  
Daten-Speicher löschen: Tasten + und - gleichzeitig

axel.rossmann@hamburg.de

---

Brn-Sen                      Kommunikation                      Strg

Im Kapitel 13 werden die Heizkosten durch Simulation berechnet. Gezeigt wird auch, wie ein Heizobjekt-Effektivitäts-Messer HEM (kurz Heizkosten-Messer), mit dem die spezifische Heiz-Leistung in kW/K bestimmt wird, realisiert werden kann.

# Simulierte Regelungstechnik

Das Anliegen des Autors ist eine praxisnahe, interessante und verständliche Darstellung der Regelungstechnik (ohne mathematischen Ballast).

Durch die Beispiele aus den Gebieten Mechanik, Elektronik, Hydro-Pneumatik und Thermo-Dynamik sollen Sie in die Lage versetzt werden, eigene Regelungen zu konzipieren, ihr Verhalten weitgehend zu planen und die zu erwartende Genauigkeit und Schnelligkeit angeben zu können.

Behandelt werden schaltende und stetige Regelungen: Zwei- und Dreipunkt-Regelungen und PID-Regelungen, u.a. das Servo-Ventil und die Dampf-Maschine.

Ziel ist die Bestimmung der optimalen Regler-Parameter:

- Die Proportional-Verstärkung des P-Reglers
- Die Integrations-Zeitkonstante T.I des I-Reglers
- Die Differenzier-Zeitkonstante T.D des D-Reglers.

Sie werden zur Realisierung des Reglers gebraucht.

## Strukturbildung und Simulation technischer Systeme



Axel Rossmann

### Simulierte Regelungstechnik

Teil 1 & 2  
Grundlagen  
und  
Anwendungen

<http://strukturbildung-simulation.de/>

Teil 1/2: Steuerung und Regelung  
thermisch, mechanisch, elektrisch, hydro-pneumatisch  
Zwei- und Dreipunkt-Regelungen

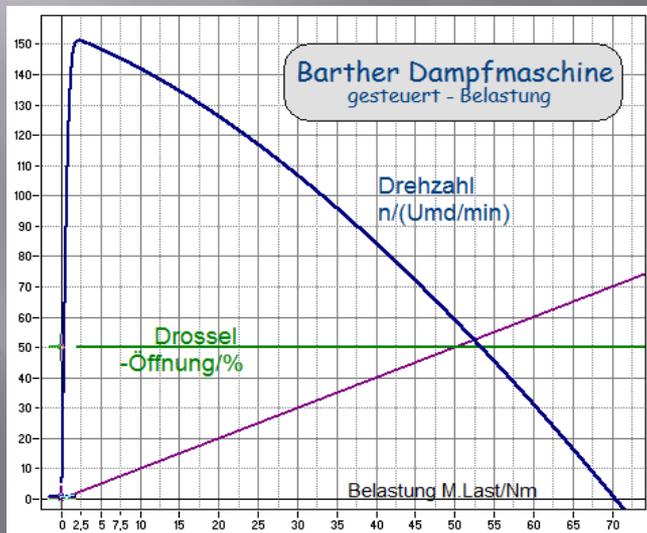
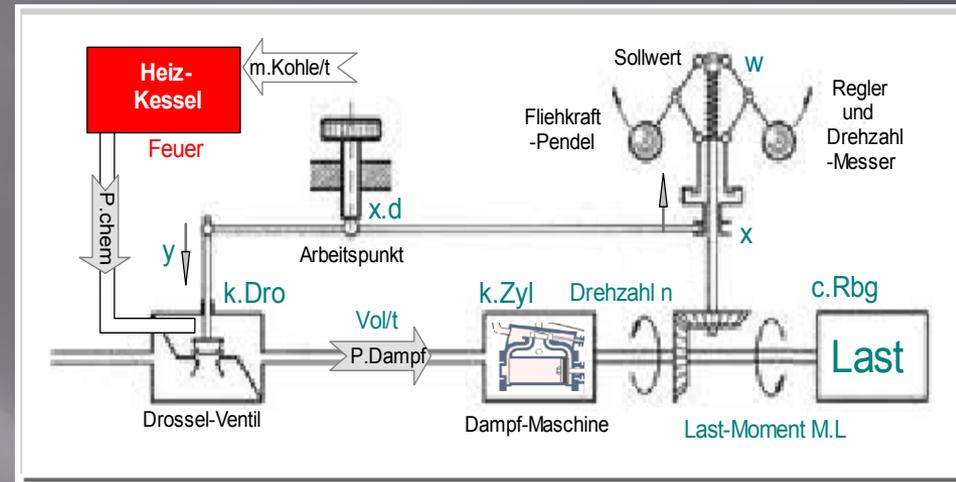
Teil 2/2: PID-Regelungen  
Stabilität und Regler-Optimierung  
Anwendungen: Motor, Kran, Dampfmaschine

# Beispiel zur 'Simulierten Regelungstechnik': die Dampf-Maschine

Dampfmaschinen wandeln thermische Leistung mittels Wasserdampf in mechanische um. Von Interesse ist z.B. der **Wirkungsgrad**.

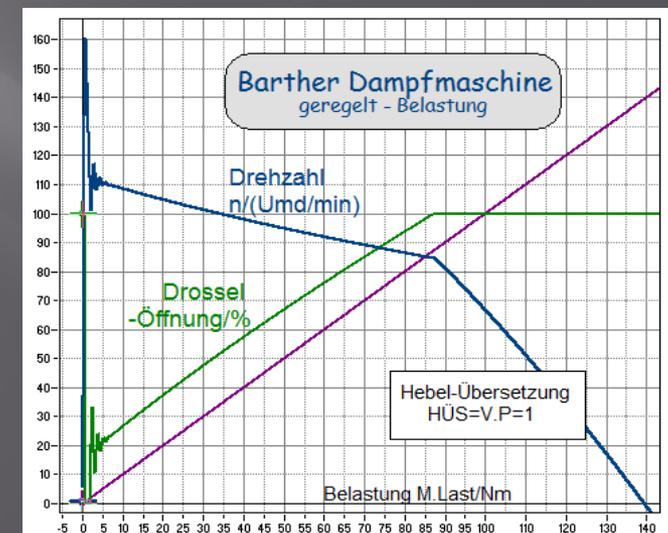
Um ihn berechnen zu können, sind folgende Komponenten zu simulieren:

- der Dampf-Kreislauf mit Heizung und Kondensator
- der Zylinder und das stetige Drossel-Ventil
- das Fliehkraft-Pendel
- die Drehzahl-Regelung mit Regel-Hebel



- gesucht werden
- die Stabilität der Drehzahl bei Belastung
  - der Verbrauch von Wasser und Kohle

Dampf-Maschine:  
links: gesteuert  
rechts: geregelt



# Simulierte Messtechnik

Dieser Teil der Reihe ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘ behandelt das Thema ‚Analoge Messtechnik‘ durch Simulation.

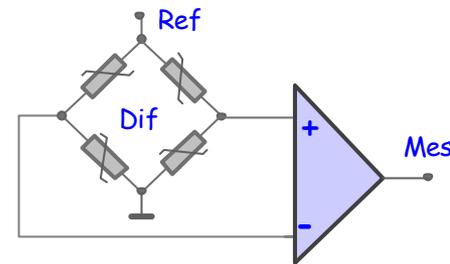
Erklärt werden sowohl die Grundlagen der Mess- und Verstärker-Technik als auch die zur Simulation erforderliche Strukturbildung.

Folgende Beispiele werden behandelt und bezüglich ihrer Genauigkeit untersucht:

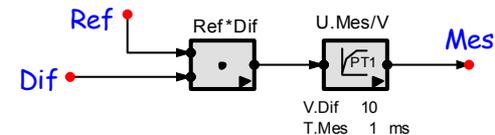
- Temperatur-Messung
- Beleuchtungs-Messung
- Druck-Messung
- Dehnungs-Messung

Gesucht werden die thermischen Messfehler und die Grenz-Frequenz als Maß für die Schnelligkeit der Mess-Systeme.

## Strukturbildung und Simulation technischer Systeme



### Simulierte Messtechnik



Temperatur-Messung  
Licht-Messung  
Druck-Messung  
Dehnungs-Messung

Axel Rossmann

# Beispiel zur ‚Simulierten Messtechnik‘: Mess-System

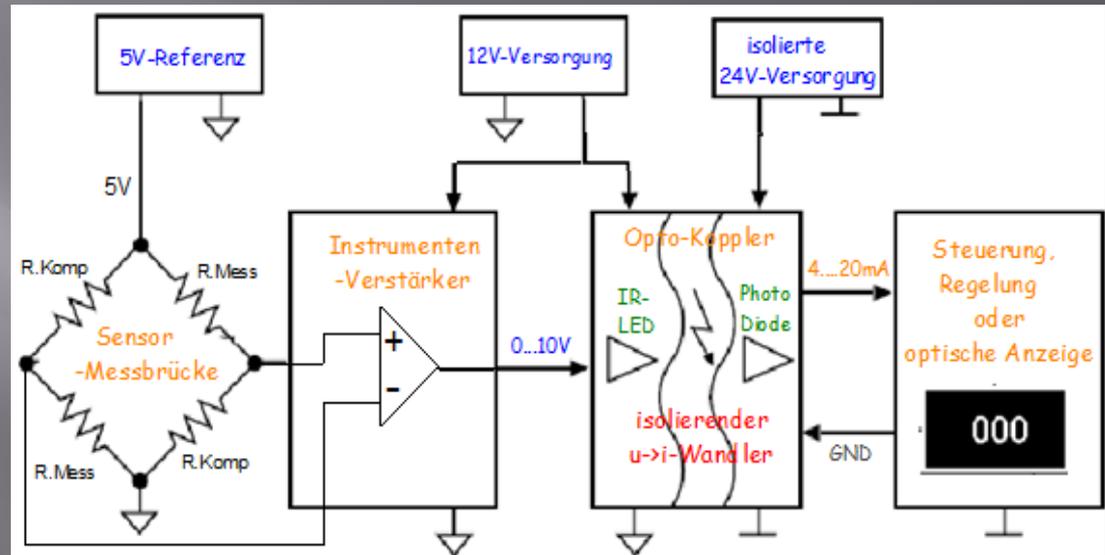
Ein Mess-System besteht aus

- dem Sensor

Er wandelt die Messgröße in eine elektrische Größe um:

Spannung, Strom oder Widerstand

- dem Mess-Verstärker
  - mit Spannungs-, Strom oder Widerstands-Eingang und
  - Spannungs- oder Strom-Ausgang
- der Signal-Aufbereitung, z.B.
  - thermischer Kompensation und
  - Linearisierung



Die Abbildung des Mess-Systems zeigt die zu simulierenden Komponenten:

- Messbrücken
- Mess-Verstärker
- Opto-Koppler

Das Ziel ist, die jeweilige Messgröße (hier Temperatur, Beleuchtung, Druck und Dehnung) in proportionale Spannung oder Strom umzuwandeln, die sich zur Digitalisierung eignet:

0-5V für AD-Wandler,  $\pm 10V$  für eine SPS oder 4-20mA für Industrie-Steuerungen

# Der simulierte Operations-Verstärker

Operations-Verstärker (OP's oder Op-Amp's) sind das Standard-Bauelement zum Aufbau **linearer Präzisions-Schaltungen**.

Sie werden in großer Zahl und Vielfalt integriert angeboten.

Deshalb hat der Anwender die Qual der Wahl.

Durch den ‚Simulierten Operations-Verstärker‘ sollen Sie in den Stand versetzt werden, den für Ihre Anwendung geeigneten OP aussuchen zu können.

Die dazu benötigten Grundlagen des OP's und der Strukturbildung zur Schaltungs-Simulation werden erklärt.

Mittels Strukturen können die Schaltungseigenschaften statisch und dynamisch untersucht werden:

- Linearität,
- Nullpunkts-Fehler
- thermische Stabilität

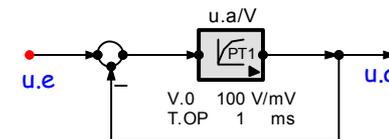
## Strukturbildung und Simulation technischer Systeme

Axel Rossmann



### Der simulierte Operations-Verstärker

mit  
statischer, dynamischer und thermischer  
Schaltungs-Analyse



Impedanzwandler  
invertierende Verstärker  
nicht-invertierende Verstärker  
Differenz-Verstärker  
Instrumenten-Verstärker

# Beispiel zum 'Simulierten Operations-Verstärker': Dimensionierung

Folgende Schaltungen werden simuliert

- Der OP als Schalter , Anwendungen: Schmitt-Trigger und Rechteck-Oszillator

Die linearen Grund-Schaltungen:

- der Impedanz-Wandler:
  - + extrem hochohmig im Eingang und
  - + belastbar am Ausgang
- der nicht-invertierende OP:
  - + durch das Widerstands-Verhältnis  $R.R/R.E$  einstellbare Spannungs-Verstärkung
  - + hochohmig im Eingang,
  - + niederohmig im Ausgang
- der invertierende OP
  - + besonders stabil durch Aussteuerungs-unabhängigen Arbeitspunkt in der Mitte der Versorgungs-Spannungen
  - + Rückwirkungsfreiheit durch virtuellen Nullpunkt

Untersucht wird

- die Genauigkeit , die Schnelligkeit und Stabilität dieser Schaltungen im Kleinsignal-Betrieb (nicht übersteuert)
- Die Schnelligkeit der Schaltungen im Großsignal-Betrieb (bei Übersteuerung)

OP-Daten	nicht-invertierender Verstärker	invertierender Verstärker	
offene Verstärkung $V.O$ Diff.-Eingangswiderstand $r.d$ Ausgangs-Widerstand $r.o$ Temperatur-Durchgriff $DU(u.0)$ Bandbreite-Verstärkgs-Prod. $BVP$ Anstiegs-Geschwindigkeit $SR$			
Spannungs-Verstärkung	$v.u$	$1+R.R/R.E$	$R.R/R.E$
Eingangswiderstand	$r.e$	$r.d*V.O/v.u$	$R.E$
Ausgangs-Widerstand	$r.a$	$r.o*v.u$	
Temperatur-Durchgriff	$DT$	$DU(u.0)*v.u$	
Grenzfrequenz (Kleinsignal)	$f.g$	$BVP/v.u$	
Kleinsignal-Grenze	$u.e;max$	$SR/(2\pi*BVP)$	

die linearen Grund-Schaltungen des OP's als Grundlage der Schaltungs-Dimensionierung

# Der simulierte Schritt-Motor

Dieser Teil der Reihe ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘ behandelt das Thema

‚Der Schrittmotor und seine Ansteuerung‘

Die Themen:

- Der Schrittmotor im Spannungs- Modus (geringer Strom-Bedarf, aber langsam)

Der Schrittmotor im Strom- Modus (schnell, aber geringer Strom-Bedarf)

- Die Elektronik zur Schrittmotor-Ansteuerung
- Die Translator-Logik für den Voll- und Halbschritt-Betrieb

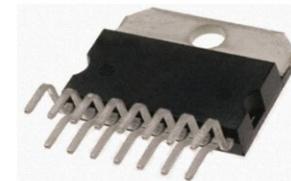
Die zur Behandlung dieser Themen benötigten Grundlagen werden in Kurzform erklärt.

## Strukturbildung und Simulation technischer Systeme

Axel Rossmann

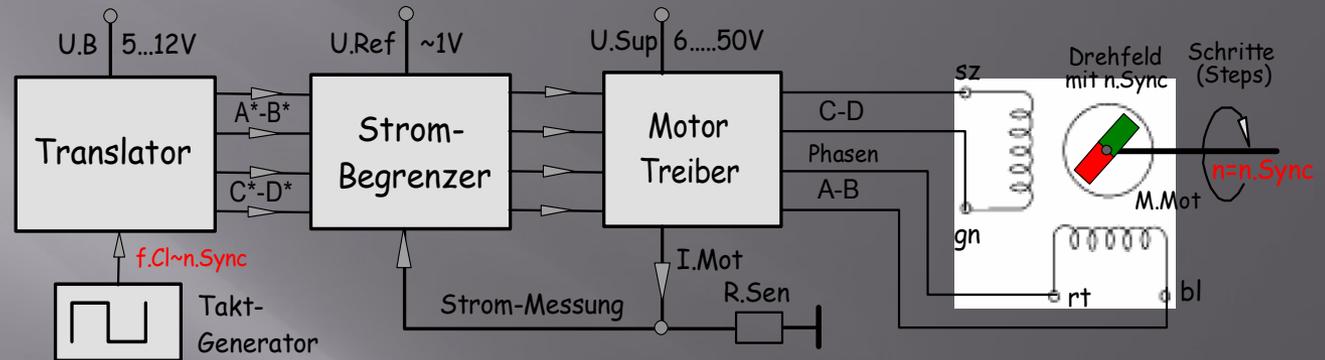


Simulation des Schrittmotors  
und seiner Ansteuerung

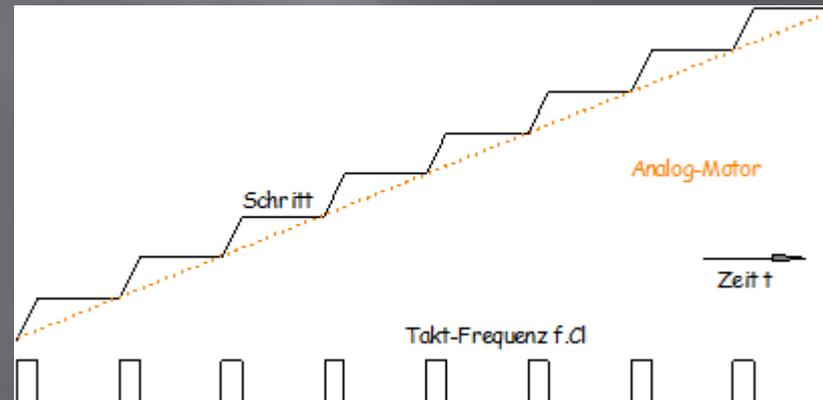
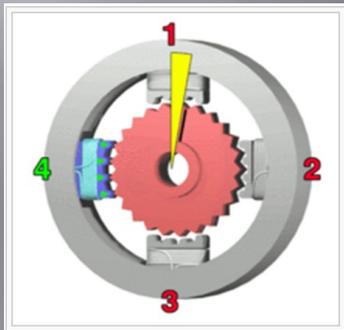


Vollschritt-Halbschritt-Betrieb  
Spannungs- und Strom-Modus  
Drehmomente und Drehzahlen  
Translator zur Drehfeld-Erzeugung

# Beispiel zum 'Simulierten Schritt-Motor': Das Prinzip



Die Schrittfolge des Motors wird durch einen Taktgeber bestimmt. Zur vereinfachten Darstellung seiner Funktion nehmen wir zunächst an, dass ein Takt pro Schritt benötigt wird.



# Der simulierte Asynchron-Motor

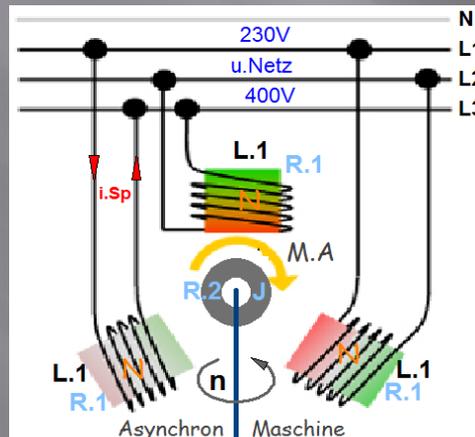
Asynchron-Motoren haben ein bis zum Kipp-Punkt ansteigendes Drehmoment (Abb. umseitig). Das macht sie robust und stark.

Die Simulation soll zeigen, dass dies an der Verwirbelung der Rotor-Ströme liegt:

Sie ist beim Anlauf maximal und sinkt mit steigender Annäherung an die Synchron-Drehzahl ( $\sim$ Netz-Frequenz).

In dieser Schrift wird der Asynchron-Motor mit realen Messgrößen simuliert:

- Spannungen und Ströme,
- Drehmomente und Drehzahlen.

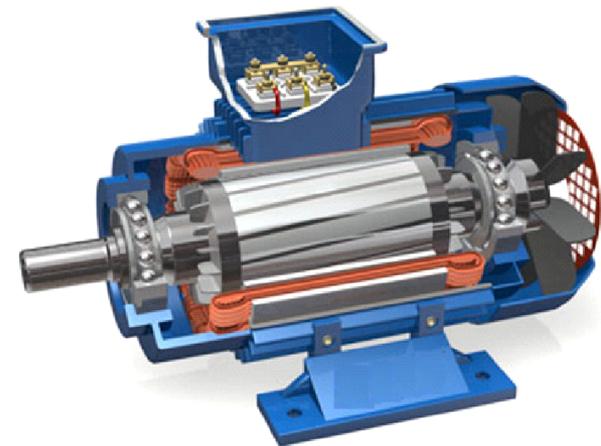


Das erlaubt die Untersuchung dieser Maschine wie mit einem Test-Stand - nur viel einfacher, schneller und billiger.

Umseitig sehen Sie das Ergebnis.

## Strukturbildung und Simulation technischer Systeme

Axel Rossmann



Der simulierte Asynchron-Motor

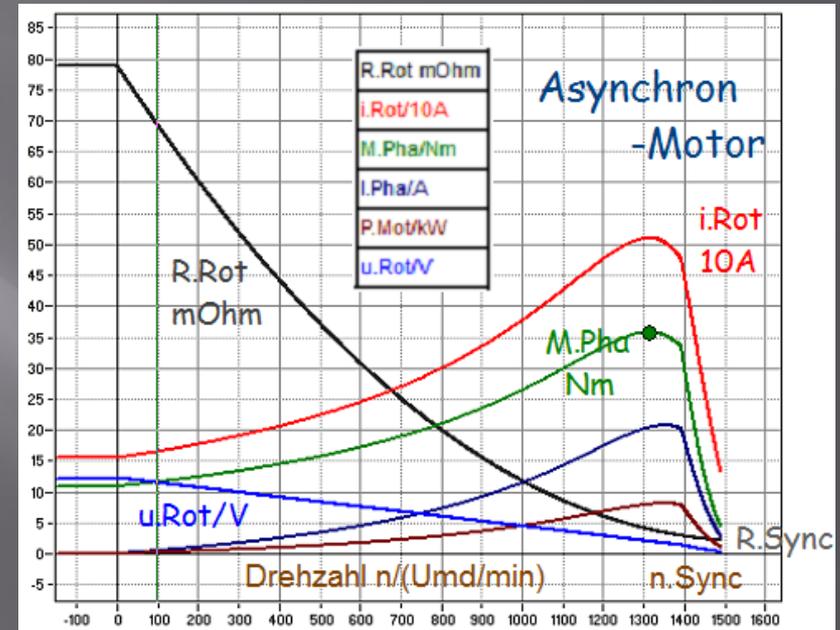
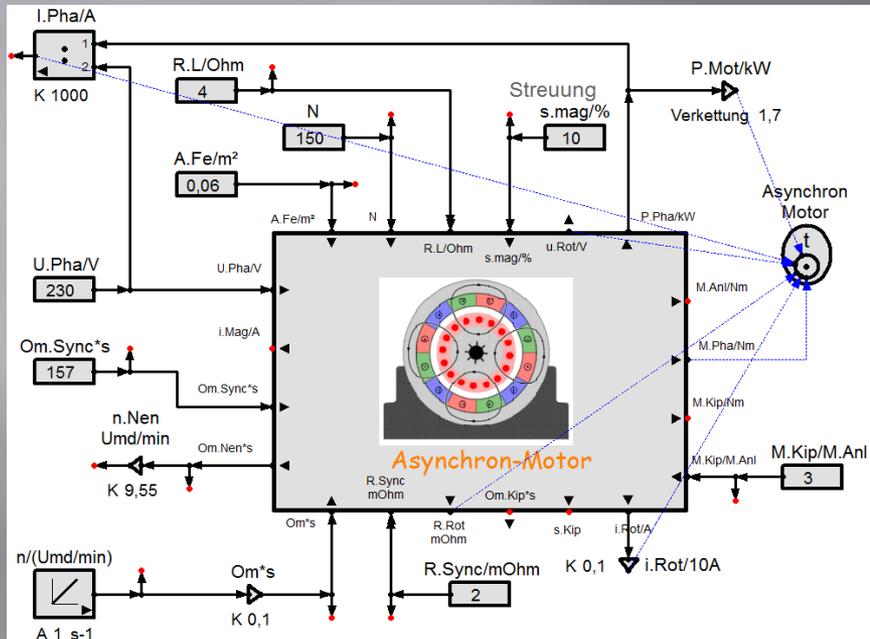
Simulations-Grundlagen, Kennlinien,  
Parameter-Variation und Dimensionierung

<http://strukturbildung-simulation.de/>

# Beispiel zum ‚Simulierten Asynchron-Motor‘: simulierte Kennlinien

Die Simulation des Asynchron-Motors muss die gemessenen Kennlinien ergeben. Sie ist so kompliziert, dass wir hier nur das Ergebnis als Anwenderblock zeigen können.

- Der Block lässt erkennen, was womit errechnet wird.
- Die Motor-Parameter hängen von der Nenn-Leistung (Baugröße) ab.



Das rechte Bild zeigt simulierte Motor-Kennlinien als Funktion der Drehzahl:

Das Drehmoment  $M = I_{\text{Rot}} \cdot \phi_{\text{Stat}}$  ist das Produkt aus dem Strom des Rotors und dem magnetischen Fluss des Stators. Der Rotor-Strom steigt mit der Drehzahl an, obwohl die induzierte Rotor-Spannung sinkt.

Ursache ist die mit steigender Annäherung der Drehzahl an die Synchron-Drehzahl des umlaufenden Feldes sinkende Verwirbelung des Rotor-Stroms. Dadurch sinkt der Rotor-Widerstand stärker als die Rotor-Spannung.

# Der Autor der ,Strukturbildung und Simulation technischer Systeme'

Axel Rossmann, geb. am 22.01.1944

Ausbildung zum Fernmelde-Monteur in Hannover.

Erstes Studium zum Ingenieur der Nachrichten-Technik in Darmstadt.

Entwicklung von Kreisel-Stabilisierungen bei der AEG in Wedel/Holstein.

Techniker-Ausbilder in den Fächern Elektronik und Regelungs-Technik.

Zweites Studium der Physik in Hamburg

Sensor-Entwicklung, u.a. Strömungs- und Druck-Messer.

Elektronik-Entwicklung für die Elementarteilchen-Physik beim Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg.

Seit 2009 Rentner, der endlich Zeit hat, ein Buch zum Thema ,Modellbildung und Simulation' zu schreiben.

