



Axel Rossmann

Strukturbildung und Simulation technischer Systeme

Band 1: Die statischen Grundlagen
der Simulation

Strukturbildung und Simulation technischer Systeme Band 1

Axel Rossmann

Strukturbildung und Simulation technischer Systeme Band 1

Die statischen Grundlagen der Simulation

Axel Rossmann
Hamburg, Deutschland

ISBN 978-3-662-46765-7
DOI 10.1007/978-3-662-46766-4

ISBN 978-3-662-46766-4 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

Vorwort

Simulationsprogramme werden heute in größerer Zahl angeboten. Mit ihnen ist die graphische Programmierung nicht besonders schwierig. Das eigentliche Problem besteht in der Darstellung aller Funktionen eines Systems im Zusammenhang, genannt **Struktur**.

Diese **„Strukturbildung und Simulation technischer Systeme“** zeigt durch vielfältige Beispiele aus allen Bereichen der **Technik und klassischen Physik**, wie Strukturen gebildet und durch Simulation getestet und optimiert werden. So werden frühzeitig Fehler erkannt, die in der Realität nur ungleich schwerer zu korrigieren wären. Der Bau einer neuen Anlage beginnt dann erst nach der Simulation mit einem umfangreichen und virtuell getesteten Vorwissen über ihr zu erwartendes Verhalten (Abb. I).

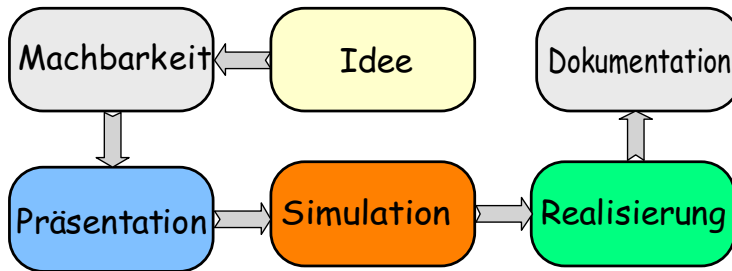


Abb. I Die Stellung der Simulation bei der Produkt-Entwicklung

Ermittelt man die Struktur einer existierenden Anlage, so kann diese durch **Parameter-variation viel einfacher optimiert** werden, als wenn dies an der realen Anlage im Probierversahren gemacht werden müsste. Die virtuell ermittelten Änderungen können dann auf die reale Anlage übertragen werden. Die Vorteile liegen auf der Hand: besseres Verständnis des Systems, kürzere Entwicklungszeiten und Fehlervermeidung.

Die Struktur ist die symbolische Darstellung aller Funktionen, die zusammen das System bilden. Zur **Struktur und Simulation**, die zeigen **wie** etwas ist, gehört auch die Analytik, die klärt, **warum** etwas so ist. Analytik mit Strukturen liefert die gesuchten Zusammenhänge ohne aufwändige Mathematik. **Simulationen veranschaulichen** alle interessierenden Zusammenhänge. Analyse und Simulation bilden zusammen ein optimales Werkzeug zur Untersuchung auch komplexester Systeme.

Oft wird die Meinung vertreten, dass nur das, was man real gesehen hat, auch verstanden wird. Der Autor ist nicht ganz der Meinung. Was man real gesehen hat, fördert die Anschauung ungemein und man wird es kaum bestreiten. Aber nur die Struktur zeigt, **wie** Systeme im Einzelnen funktionieren. Durch Simulation werden auch die Unterschiede des aktuellen Verständnisses zur Realität besser erkannt. Dadurch können

sie schrittweise verringert werden. Am Schluss ist **das simulierte Verhalten vom realen kaum noch zu unterscheiden**.

Dieses Buch will die **Werkzeuge** zur Strukturbildung und Simulation vermitteln und zeigen, wie leistungsfähig dieses Verfahren ist. Zu jedem behandelten Thema wird eine kurze Einführung gegeben. Vorkenntnisse sind nicht unbedingt erforderlich, aber hilfreich.

Zur **dynamischen Analyse**:

Zum Verständnis dynamischer Vorgänge sind die Begriffe Differenzierung und Integration unerlässlich, nicht aber die Differenzial- und Integral-Rechnung. Differenzierung und Integration werden erklärt und durch Simulation veranschaulicht. Die Simulationen zeigen die Lösungen der als Struktur dargestellten Differenzialgleichungen.

Die zur **Systemanalyse** benötigte **komplexe Rechnung** wird in Kurzform dargestellt. Zur Untersuchung räumlicher Systeme wird der Begriff des Vektors und seiner Komponenten (x, y, z) benötigt, **nicht** aber die Vektor- und Matrizen-Rechnung.

Zur **Methode**:

1. Zu jedem Beispiel (Gerät oder Schaltung) wird die **Funktion als Modell in Form einer Struktur** symbolisch dargestellt. Wenn möglich, erscheinen steuernde Signale links und die gesteuerten Signale rechts. So liest man Strukturen wie ein Buch.
2. Die Struktur zeigt die Verarbeitung der äußeren Signale durch **Blöcke, die die Funktionen der Bauelemente darstellen**, und **ihre Verknüpfung** durch interne Signale. So fördern Strukturen das **systematische Denken in Ursache und Wirkung**. Eine Struktur ist vollständig, wenn außer den steuernden und gesteuerten Signalen keine offenen Leitungen, d.h. unerklärte Signale, mehr vorkommen.
3. Danach müssen die **Konstanten der Blöcke bestimmt** werden. Sie sind so einzustellen, dass bekannte, geforderte oder gemessene Ein- und Ausgangssignale als Aussteuerung um einen Arbeitspunkt (Mittelwert) entstehen. Durch die Parameter wird die Struktur der Realität angepasst.
4. Ist eine Struktur gebildet, ganz oder in Teilen, kann das Verhalten der Anordnung simuliert – und das heißt veranschaulicht werden: im **Zeitbereich meist als Sprungantwort** oder im **Frequenzbereich für sinusförmige Aussteuerung**.
5. Es wird gezeigt, wie die interessierenden analytischen Zusammenhänge **ohne höhere Mathematik** aus der Struktur **abgelesen** werden können. Das bleibt immer übersichtlich und ist effizient, weil Wiederholungen vermieden werden.

Strukturen bleiben **gerade bei umfangreichen Systemen** nachvollziehbar. Deshalb sind sie umso notwendiger, je komplexer ein System ist.

Angestrebt wird größtmögliche Vielseitigkeit der Themen, verbunden mit möglichst einfacher und übersichtlicher Darstellung des Wesentlichen. Das bedeutet, dass letzte Exaktheit nicht immer erreicht wird. Daher besteht keine Konkurrenz zu kommerziellen Simulationen, die bestrebt sind, ein spezielles Thema ganz genau abzubilden. Diese Expertensysteme lassen sich anwenden, ohne dass der Benutzer die internen Einzelheiten verstanden haben muss.

Bei der hier vorliegenden **Strukturbildung** ist das aber möglich und gewollt. Sie eignet sich daher besonders zum praxisnahen **Erlernen der Regelungstechnik**.

Abgesehen von den elektronischen Schaltungen hat der Autor die meisten der hier simulierten Beispiele nicht praktisch erprobt (das kann eine einzelne Person nicht leisten). Seine Referenzen sind die in Büchern und dem **Internet veröffentlichten technischen Daten und Messungen**. Der Autor kann daher keine Garantie für die Richtigkeit jeder Struktur und Simulation übernehmen. Aber auch falsche oder nur teilweise richtige Strukturen können ein Denkanstoß sein.

Falls Sie selbst über Erfahrungen zu den behandelten Themen verfügen, würde sich der Autor über Rückmeldungen freuen. Für alle Hinweise auf Fehler, Kritik und Verbesserungsvorschläge bin ich meinen Lesern dankbar. Mein herzlicher Dank gilt allen, die mich bei diesem Projekt unterstützt haben, insbesondere den Firmen, deren Abbildungen und technische Daten ich benutzen durfte.

Axel Rossmann

Hamburg, im April 2016

Fragen und Antworten zum Thema Simulation:

Warum Simulation?

- Systeme sollten so weit wie möglich berechnet werden, bevor sie realisiert werden.
- Reale Systeme sind zu komplex, um sie ‚per Hand‘ vollständig zu berechnen.
- Zur Simulation werden Systeme in überschaubare Teile zerlegt.
- Das Gesamtsystem kann das Simulationsprogramm berechnen.
- Simulationen können schnell geändert werden, bis sie sich von der Realität kaum noch unterscheiden.

Was ist eine Struktur?

- Strukturen zeigen sämtliche Funktionen eines Systems als Verknüpfung aller Ursachen und Wirkungen in graphischer Form.
- Alle am System beteiligten physikalischen Größen – ob sie gemessen werden können oder nicht – werden durch Signalleitungen dargestellt.
- Dass das System vollständig beschrieben ist, erkennt man daran, dass es intern keine offenen ‚Leitungen‘ mehr gibt. Das System wird von Messgrößen angesteuert (Eingangsgrößen). Die Struktur berechnet daraus sämtliche interessierenden Informationen als Ausgangsgrößen.

Was sind die Vorteile von Strukturen?

- Strukturen bleiben auch bei komplexen Systemen, die in Blöcke (Funktionseinheiten) zerlegt werden, immer übersichtlich. Simulationen sind so anschaulich wie die Praxis selbst. Allerdings sagt Ihnen die Praxis nur, **ob** etwas funktioniert oder nicht. Die Simulation hat darüber hinaus den Vorteil, dass sie auch zeigt, **wie** und **warum** etwas funktioniert.
- Strukturen können von beliebigen Simulationsprogrammen berechnet werden. Durch Variation der Parameter – die als Daten zum Bau eines Systems gebraucht werden – wird das System optimiert. Das spart Entwicklungskosten und Zeit.
- Dadurch erhalten Sie in kürzester Zeit alle Informationen zum statischen und dynamischen Verhalten eines Systems im Zeit- und im Frequenz-Bereich: Informationen, die durch den praktischen Aufbau – wenn überhaupt – nur mit großem Aufwand und Kosten zu erhalten wären.

Wenn man die Funktionen eines Systems analytisch kennt, kann man sie z.B. durch Excel berechnen lassen. In dieser Hinsicht ist ein Simulationsprogramm etwa gleichwertig. Der besondere Vorteil eines Simulationsprogramms ist jedoch, dass es das Verhalten auch komplexester Systeme übersichtlich und im Zeit- oder Frequenzbereich darstellen kann - und das kann Excel nicht. Die besondere Stärke von SimApp besteht darin, die Realität in allen Details mit einfachen Mitteln abzubilden. Davon handelt dieses Buch.

Ist Simulation schwierig?

- Mit dieser ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘ nicht, denn es werden nur elementare Gesetze verwendet. Man muss sich nur an das **UVW-Prinzip** gewöhnen:

‚Ursache – Verarbeitung – Wirkung‘

Höhere Mathematik in klassischer Form ist dazu nicht erforderlich.

- Häufig benötigt werden die Begriffe **Integration** und **Verzögerung**. Was das ist, wird anschaulich erklärt. Die Berechnung von Integralen übernimmt der PC, dem die Struktur sagt, was er integrieren soll.
- Klassische Ableitungen allgemeiner Zusammenhänge können direkt aus Strukturen abgelesen werden. Wie das gemacht wird, wird erklärt.

Dadurch werden die Zusammenhänge zwischen den Signalen und den Bauelementen, die zu dimensionieren sind, erkannt.

Simulationen sind wie die Realität immer konkret!

Die durch sie ermittelten, optimalen Parameter der Systemkomponenten sind die Vorgaben zur späteren Realisierung. Die hier behandelten Themen sollen Sie anhand vieler Beispiele in die spezielle Denkweise der Strukturbildung und Simulation einführen.

Was sind die Simulationsvoraussetzungen?

Der Autor geht davon aus, dass Sie über einschlägige technische Erfahrungen und Grundkenntnisse der Physik und Mathematik verfügen. Mehr nicht.

Die Grundlagen zur Simulation werden, soweit es zum Verständnis der Strukturen erforderlich ist, zu allen behandelten Themen in Kürze vorangestellt. Wer Spaß an Simulationen hat und sich gründlicher in diese Themen einarbeiten möchte, dem empfiehlt der Autor seine Bände der Reihe

‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘

Darin werden die Grundlagen der Simulation systematisch vermittelt und in 14 Kapiteln in Beispielen aus vielen Bereichen der Technik angewendet.

Informationen zum Buch finden Sie im Internet unter

<http://strukturbildung-simulation.de>

Wie simulieren?

Die hier angegebenen Strukturen lassen sich mit vielen auf dem Markt befindlichen Programmen simulieren. Der Autor hat sich für **SimApp** aus der Schweiz entschieden, denn es bietet wichtige Vorteile:

- SimApp ist leicht zu erlernen und trotzdem äußerst leistungsfähig.
- SimApp verwendet die in der Regelungstechnik üblichen Symbole.
- SimApp ist gut dokumentiert und preiswert.

Weitere Informationen zu SimApp finden Sie unter

<http://www.simapp.com/>

Falls Sie über ein anderes Simulationsprogramm als SimApp verfügen, sollte es kein Problem sein, damit die hier angegebenen Strukturen nachzustellen.

Zum Simulationsprogramm

Für viele der hier angegebenen Strukturen ist die **Light-Version** von **SimApp** ausreichend (maximal 30 Blöcke). Allerdings erlaubt sie nicht die Erstellung von Anwenderblöcken. Daher empfiehlt der Autor, sich die **Vollversion** zu leisten. Sie kann **30 Tage kostenlos** als **Test-Version** genutzt werden.

Hinweise zum Gebrauch des Simulationsprogramms:

1. Falls Ihnen diese Strukturbildung nur als PDF-Datei und nicht in Papierform vorliegt und Sie gleichzeitig mit SimApp arbeiten wollen, richten Sie am besten zwei Fenster ein (Abb. II).

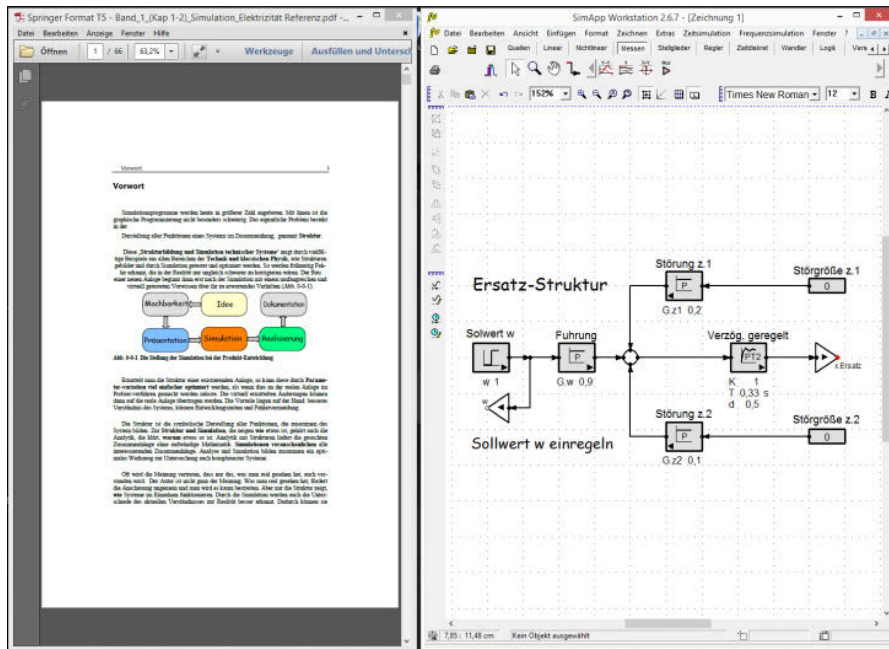


Abb. II Darstellung von Word und SimApp in zwei Fenstern. Links: Seite aus diesem Worddokument und rechts: SimApp-Zeichnung.

2. Den Simulationen mit SimApp sind häufig Abbildungen des simulierten Objekts hinzugefügt. Das soll den Zusammenhang zwischen Realität und Struktur herstellen. Allerdings wird der Bildaufbau durch die Bilder verlangsamt. Wenn Sie mit den Strukturen experimentieren wollen, empfiehlt es sich, nur die Strukturen in eine neue Datei mit ähnlichem Namen zu kopieren. Dann können Sie Änderungen nach eigenem Gutdünken vornehmen und der Bildaufbau geht viel schneller.
3. In den folgenden Kapiteln werden Tabellen und Formeln aus der **Technischen Formelsammlung von K.+R.Gieck: 30. Auflage von 1995** verwendet. Auch in der **Nomenklatur** hält sich diese Strukturbildung so weit wie möglich an den Gieck.

Zur Nomenklatur

Konstanten erhalten wenn möglich große Buchstaben, z.B. der elektrische Widerstand R . Arbeitspunktabhängige Konstanten erhalten kleine Buchstaben, z.B. der differenzielle Diodenwiderstand r_{AK} .

Signale erhalten, wenn es nicht anders üblich ist, auch kleine Buchstaben, z.B. der elektrische Strom i .

Ausnahmen: Die konstante Masse heißt traditionsgemäß klein m . Das Drehmoment, eine Variable (=Signal), heißt dagegen groß M .

Schreibweisen von Zahlenwerten

- dezimal: 123456,789 – ist scheinbar genau, aber unübersichtlich
- exponentiell: $123,456789 \cdot 10^3 \approx 123 \text{ E}(3)$
ist übersichtlich und mit an die Messpraxis angepasster Genauigkeit.
Die dritte Ziffer hat eine Unsicherheit von höchstens 1%.

Abb. III SimApp schreibt große und kleine Zahlen in exponentieller Form: $E=10^{\text{Exp}}$.



Abb. III Konstante, exponentiell geschrieben

Die symbolische Darstellung einer exponentiellen Messgröße ist in Abb. IV gezeigt:

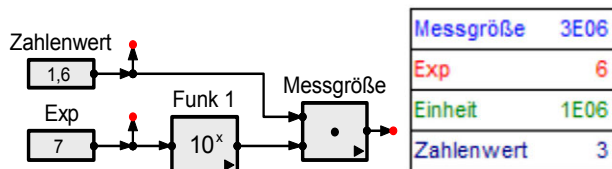


Abb. IV Simulation einer Messgröße, bestehend aus Zahlenwert und Einheit

Den Grundeinheiten werden dekadische Vorfaktoren (Präfixe) vorangestellt. So ist z.B. die Kräfteinheit $\text{N}/1000=1\text{mN}$. Dagegen ist 1Nm ein **Drehmoment**.

Eine Übersicht über die SI-Präfixe für die Zehnerpotenzen ist in Tab. I angegeben.

Tab. I Abkürzungen für Zehnerpotenzen

SI-Präfixe										
Name	Deka	Hekto	Kilo	Mega	Giga	Tera	Peta	Exa	Zetta	Yotta
Symbol	da	h	k	M	G	T	P	E	Z	Y
Faktor	10^1	10^2	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}	10^{21}	10^{24}
Name	Dezi	Zenti	Milli	Mikro	Nano	Piko	Femto	Atto	Zepto	Yokto
Symbol	d	c	m	μ	n	p	f	a	z	y
Faktor	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}	10^{-21}	10^{-24}

Tab. II Verwendet werden die allgemein üblichen Abkürzungen, z.B. **M** für Drehmomente, **n** für Drehzahlen, **U** oder **u** für Spannungen, **I** oder **i** für Ströme und **f** für Frequenzen. Für spezielle Fälle werden sie entsprechend indiziert, z.B. die Resonanzfrequenz ist **f.Res.** Größen, die individuell verschieden sein können, werden als ‚ind‘ bezeichnet.

Abkzg.	Einheit	Größe
φ	rad	Winkel
ε	ppm	Dehnung
α	l	Stromübertrag.-faktor
ϑ	°C	Temperatur
Δ	l	Änderung
ρ	kg/m ³	mechanische Dichte
ρ	$\Omega \cdot m$	spez.elekt.Wider.
σ	N/m ²	mechanische Spannung
A	l	Exponent
A	Ind	Amplitude
b	A/s	Ladungsbeschl.
C	F=As/V	el. Kondensator
DT	ind/K	Temperaturdurchgriff
d		Kleine Änderung
dT	K	Temperaturänderg
F.ind	ind	Absoluter Fehler
F.rel	%	Relativer Fehler
E	lx	Beleuchtungs-Stärke
E.Mod	N/m ²	Elastizitätsmodul
h	m	Höhe
I	W/m ²	Strahlungintens.
I oder i	A	elektrischer Strom
I.Nen	A	Nennstrom
Komp	l	Kompensations-faktor
k.DMS	l	Dehnungsmess-konstante
k.Str	ind.	Streckenverstärkg
k.F	N/m	Federkonstante
L	M	Länge
M	Nm	Drehmoment
M.A	Nm	Antriebsmoment
MB	ind	Messbereich
n	rad/s	Drehzahl

Abkzg.	Einheit	Größe
n	Umd/min	Drehzahl
~		proportional
≈		ungefähr
ω	rad/s	Kreisfrequenz
Ω	rad/s	Winkelgeschw.
P	W	Leistung
P.A	W	Antriebsleistung
P.el	W	elektrische Leistung
P.L	W	Belastungsleistg.
PWM	-	Pulsbreiten-modulator
phi	°	Winkel
Pa	N/m ²	Pascal
P	W	Leistung
p	Pa, bar	Druck
q.M	kg/s	Massenstrom (Durchsatz)
q.V	lit/s	Volumenstrom
Q	As	Ladung
R	Ω	elektrischer Widerstand
r	Ω	arbeitspunktabh. Widerstand
SF	Ind	Skalenfaktor
t	s	Zeit
T	s	Zeitkonstante
T	°C, K	absolute Temperatur
TE		Thermoelement
TK	ppm/K	Temperatur-koeffizient
T.el	%	Toleranz
T.el	s	elektrische Zeitkonstante
U; u	V	elektrische Spannung
V		konstante Verstärkung
v		arbeitspunktabh. Verstärkung

Inhaltsverzeichnis

1	Von der Realität zur Simulation.....	1
1.1	Schnelleinstieg in SimApp.....	9
1.1.1	Signalwandler.....	13
1.1.2	Eine Struktur zeichnen.....	16
1.1.3	Fehlerquellen.....	23
1.1.4	Simulationen im Zeitbereich.....	25
1.1.5	Parametervariation.....	30
1.1.6	Simulationen im Frequenzbereich.....	33
1.1.7	Blockbildung.....	40
1.2	Formeln berechnen durch Simulation.....	44
1.2.1	Träger auf zwei Lagern.....	46
1.2.2	Winkelfunktionen.....	48
1.2.3	Implizite Funktionen.....	49
1.2.4	Zinseszins (Potenzfunktion).....	50
1.3	Simulation von Zeitfunktionen.....	53
1.3.1	Integration und Verzögerung.....	53
1.3.2	Differenzierung und Vorhalt.....	58
1.3.3	Mittelwerte.....	62
1.3.4	Der Goldene Schnitt.....	65
1.3.5	Gleichung mit zwei Unbekannten.....	66
1.3.6	Quadratische Gleichung.....	67
1.3.7	Die Sinusfunktion.....	68
1.3.8	Effektivwerte.....	72
1.3.9	Tankbefüllung und –entleerung.....	74
1.4	Symbolische Berechnungen.....	86
1.4.1	Serien (Reihen)- und Parallelschaltungen.....	89
1.4.2	Mit- und Gegenkopplung.....	96
1.4.3	Entflechtung.....	101
1.5	Einführung in die Regelungstechnik.....	107
1.5.1	Das Prinzip ‚Regelung‘.....	107
1.5.2	Die statischen (stationären) Regelkreissignale.....	112
1.5.3	Regler-Optimierung.....	115
1.5.4	PID-Regler.....	121
1.5.5	Das Wendetangentenverfahren.....	126
1.5.6	Temperaturregelung.....	133

1.6	Drehzahlregelung.....	145
1.6.1	Der Gleichstrom (DC)-Motor.....	146
1.6.2	Die technischen Daten eines DC-Motors	148
1.6.3	Tachogeneratoren.....	154
1.6.4	Der Wirkungsgrad von DC-Motoren	161
1.6.5	Motor und Generator als Vierpole	163
1.6.6	Simulation einer Drehzahlsteuerung	175
1.6.7	Simulation einer Drehzahlregelung.....	182
1.6.8	Motor mit Haftreibung	189
1.7	Schaltende (unstetige) Regelungen	194
1.7.1	Der Zweipunktregler.....	195
1.7.2	Zweipunktregelungen.....	196
1.7.3	Zweipunktregelung mit Rückführung	203
1.7.4	Dreipunktregelung	205
1.7.5	Dreipunkt-Positionsregelung.....	210
2	Elektrizität.....	213
2.1	Elektrische Grundlagen.....	214
2.1.1	Elektrische Zweipole.....	215
2.1.2	Spannungs- und Stromquellen	215
2.1.3	Netzteile	220
2.1.4	Die Diode als Schalter.....	226
2.1.5	Gleichrichterschaltungen.....	229
2.1.6	Elektrische Vierpole.....	235
2.1.7	Der Spannungsteiler als Vierpol	240
2.1.8	Das Überlagerungsprinzip.....	245
2.2	Elektronische Grundsaltungen	248
2.2.1	Der Operationsverstärker (OP, OpAmp).....	248
2.2.2	Der schaltende OP.....	251
2.2.3	Elektronische Zwei- und Dreipunktregler.....	255
2.2.4	Lineare Verstärker.....	258
2.2.5	Der nichtinvertierende Verstärker	258
2.2.6	Der invertierende Verstärker.....	260
2.2.7	Differenzbildende Verstärker.....	263
2.3	Das elektrische Strömungsfeld.....	264
2.3.1	Die elektrischen Bauelemente R, C und L	265
2.3.2	Die elektromagnetische Übersichtsstruktur.....	268
2.3.3	Der elektrische Strom.....	270
2.3.4	Elektrische Widerstände.....	271
2.3.5	Feldstärke und Driftgeschwindigkeit	273
2.3.6	Temperaturabhängige Widerstände.....	278

2.4	Das elektrostatische Feld.....	282
2.4.1	Das Feld zweier Punktladungen.....	282
2.4.2	Kondensatoren	286
2.4.3	Die Kapazität C	288
2.4.4	Berechnung realer Kondensatoren	291
2.4.5	Die Zeitkonstante eines Kondensators	299
2.4.6	Der Kondensator als Ladungsspeicher	301
2.4.7	Der Kondensator als Energiespeicher	306
2.4.8	Elektrofilter (Staubabscheider)	317
2.4.9	Der Kondensator bei Wechselstrom.....	327
	Wie geht es weiter?	329

Abb. V: Liste der Simulationen in Bd. 1/7

Simulationen:

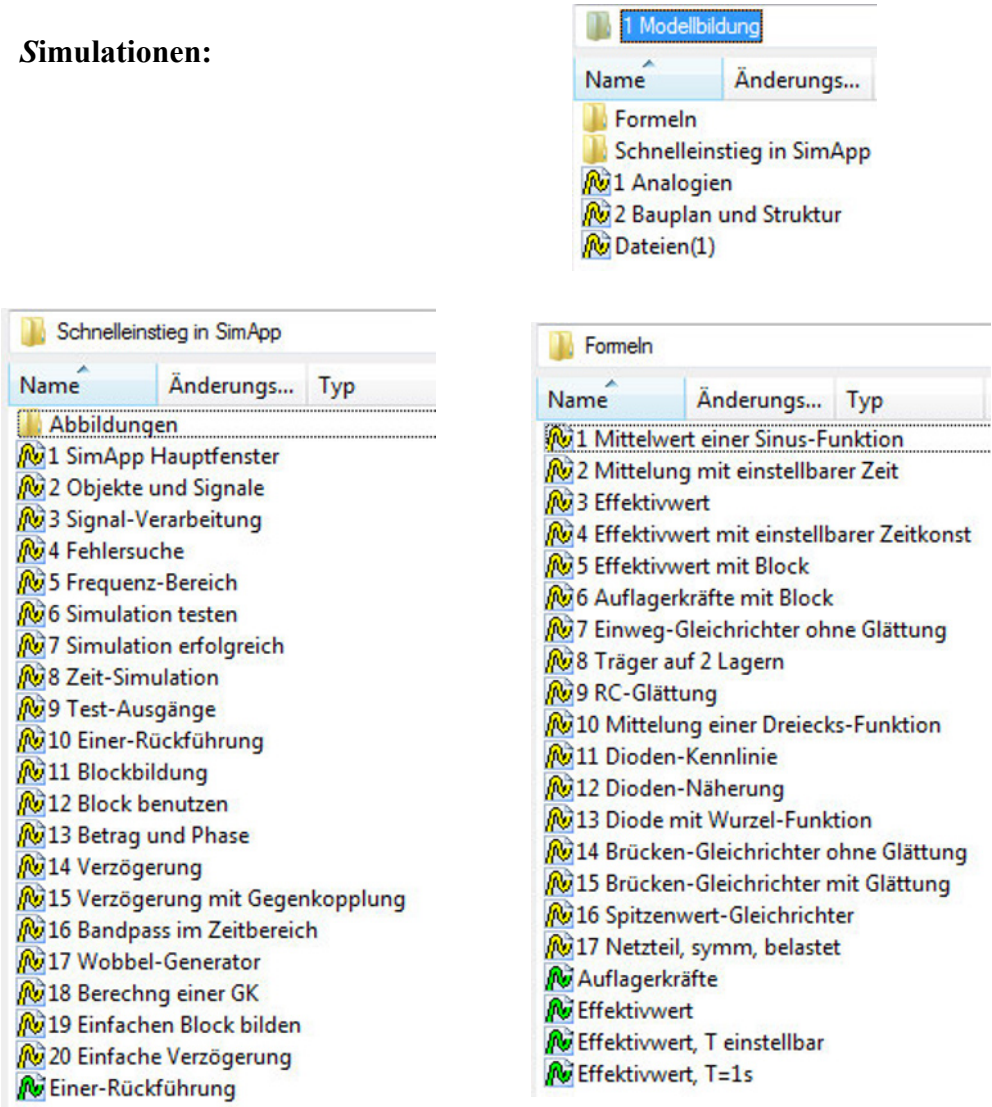


Abb. V Simulationen von Kap. 1 – Änderungen vorbehalten

Eine DVD mit den in Bd. 1/7 angegebenen Strukturen zum Ausprobieren und Variieren mit dem Simulationsprogramm SimApp ist in Vorbereitung. Sie soll ab Ende 2017 im Internet unter <http://strukturbildung-simulation.de> angeboten werden.

1 Von der Realität zur Simulation

Was Sie in Kap. 1 lernen:

- Die Analogien zwischen Mechanik, Elektrik, Pneumatik/Hydraulik und Wärme/Kälte
- Den Umgang mit SimApp, einem einfach zu erlernenden und sehr leistungsfähigen Simulationsprogramm
- Formeln berechnen durch Simulation
- Zinseszins, quadratische Gleichung und Gleichung mit zwei Unbekannten
- Winkelfunktionen
- Die Sinusschwingung: Mittelwerte und Effektivwerte
- Die Vierpolmethode
- Das symbolische Rechenverfahren

Einführung in die Regelungstechnik

Die meisten Systeme sind rückgekoppelt. Zu ihrer Simulation sind regelungstechnische Grundkenntnisse erforderlich.

- Zwei- und Dreipunkt-Regelungen
- Testverfahren: Sprungantwort und Anstiegsantwort
- Das Stabilitätsproblem und optimale Dynamik
- Proportionalregelung und Regleroptimierung
- Temperaturregelung
- Wendetangentenverfahren
- PID-Regelungen
- Gleichstrom-Motor und -Generator
- Drehzahl-Steuerung und -Regelung
- Elektronischer Tacho mit Widerstandsmessbrücke

Warum Sie Kap. 1 lesen sollten:

- Sie erkennen die Vorteile der Struktur gegenüber mathematischen Funktionsbeschreibungen durch Gleichungen.
- Sie werden durch Strukturbildung und Simulation zum wahren **Rechenmeister**.
- Sie erkennen die **Anschaulichkeit und Flexibilität** der Simulation. Das fördert Ihr Verständnis technischer Zusammenhänge wie die Praxis selbst, nur schneller.

Von der Realität zur Simulation

Durch Simulation wird die Funktion technischer Systeme mittels graphischer Systemanalyse nachgebildet. Sie ist bei der Komponentenbeschaffung, im technischen Unterricht und bei der Systementwicklung eine unschätzbare Hilfe.

Die Reihe ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘ behandelt Grundlagen und Anwendungen zur Simulation aus allen Bereichen der Physik und Technik. Dadurch erhalten Sie die Fähigkeit zur Analyse und Optimierung eigener Systeme und ihrer Komponenten. Angestrebt wird maximaler Nutzen bei größtmöglicher Einfachheit. Höhere Mathematik ist dazu nicht erforderlich. Damit ist diese Schrift nicht nur für Studenten der Technik sondern auch für Ingenieure der Praxis gedacht, die sich die ‚Kunst‘ der Simulation ohne Ballast aneignen wollen.

Dieser erste Bd. 1/7 der ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘ legt die Grundlagen zur Simulation auch komplexer Systeme, die in den folgenden Bänden die Themen sind. Das soll

- das Verständnis technischer Systeme fördern,
- die Entwicklung technischer Systeme beschleunigen und
- den technischen und physikalische Unterricht unterstützen.

Der Autor wendet sich an Leser mit technischen Vorkenntnissen – wie sie auf Ingenieurschulen, aber auch auf technischen Gymnasien vermittelt werden. Höhere Mathematik (Infinitesimalrechnung, Matrizenrechnung) wird zum Erlernen der ‚Kunst‘ der Simulation nicht benötigt.

Technische Systeme sind meist so komplex, dass sie analytisch nicht mehr berechenbar sind. Dann gewinnt man die gesuchten Daten zur Dimensionierung der Bauelemente am besten durch Simulation. Das ist wesentlich einfacher, schneller und billiger als das praktische Ausprobieren, auf das letztlich natürlich nicht verzichtet werden kann.

Die Praxis zeigt nur, **wie** etwas funktioniert, sagt aber nicht **warum**. Die Simulationen zeigen die Funktionen eines Systems im Einzelnen. Die **Systemanalysen** klären die Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der grundlegenden Systeme. Damit können die Bauelemente so dimensioniert werden, dass geforderte Systemeigenschaften entstehen. Damit sind die Ziele dieser ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘ umrissen.

Bauplan und Struktur

Als Kind hatten wir eine Modelleisenbahn oder eine Dampfmaschine. Damit ließen sich viele Zusammenhänge zu Hause spielend erfahren. Und spielen hieß gestalten. Dabei haben wir das Meiste aus Fehlern gelernt. Fehler zu machen soll in der Technik vermieden werden, denn das kostet Zeit und Geld und ist oft nicht ungefährlich.

Deshalb muss der projektierende Ingenieur Vorversuche machen, die die grundsätzliche Machbarkeit eines Projekts klären. Vorausgegangen sind mehr oder weniger komplizierte Berechnungen. Diese lassen sich heute am besten durch einen Computer erledigen. Nur muss man ihm sagen, was er rechnen soll. Das könnte in traditioneller Weise durch einen Satz von Funktionen erfolgen (zeilenorientiertes Programm des gesamten Algorithmus). Diese Methode wird jedoch schnell unübersichtlich.

Wesentlich übersichtlicher dagegen ist die graphische Darstellung von Algorithmen. Dieses Verfahren unterteilt komplexe Systeme in leichter zu überblickende Einheiten, die dann zu einem Ganzen zusammengefügt werden. Das bezeichnet man als Struktur. Allerdings muss man, um eine Struktur bilden zu können, zwischen Ursache und Wirkung unterscheiden (Schaltbilder wie Abb. 1-1 zeigen dies nicht).

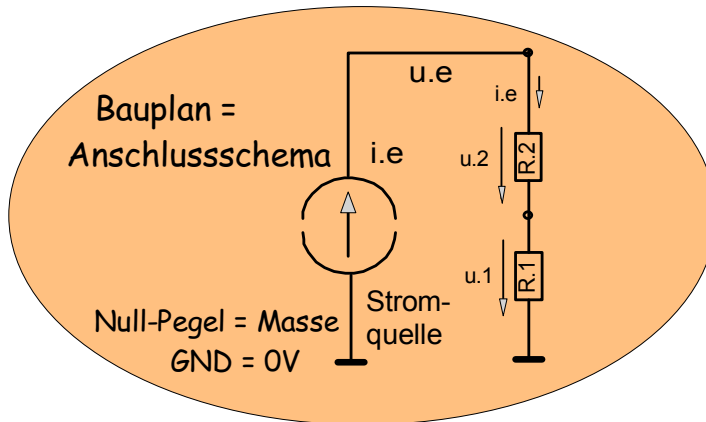


Abb. 1-1 Beispiel für einen elektrischen Bauplan aus zwei Widerständen und einer Stromquelle: Das System soll als erstes Beispiel simuliert werden. Dazu bekommen alle Bauelemente und Signale Namen und die Signale noch Zählpfeile, die die positive Richtung festlegen. Ist ein Nullpegel (GND) festgelegt, genügt der Name eines Signals.

Strukturbildung setzt physikalische Grundkenntnisse des untersuchten Systems voraus und ist nicht immer einfach. Bei der Klärung der inneren Zusammenhänge hilft die Strukturdarstellung selbst. Sie sagt uns durch **offene Signalleitungen**, die weder Ein- noch Ausgänge sind, wo noch Abhängigkeiten zu klären sind.

Die Darstellung der Struktur eines zu analysierenden Systems beginnt immer mit einer Zeichnung oder Skizze (Abb. 1-1). Sie zeigt die Funktion so gut es geht und benennt alle daran mitwirkenden Signale. Ihre positiven Zählrichtungen werden z.B. durch Zählpfeile definiert.

Dann beginnt die Darstellung der **Signalverknüpfungen in graphischer Form** durch **Funktionsblöcke**. Ob man dabei bei irgendeinem Signaleingang, irgendwo in der Mitte oder an einem Signalausgang beginnt, ist unerheblich. Sind alle **Signalverknüpfungen** zwischen allen Ein- und Ausgängen hergestellt, **ist die Struktur fertig**.

Danach folgt die **Konstantenbestimmung**. Dazu benötigt man **Stützwerte**, die entweder am realen System **gemessen sind**, **gefordert** oder **auch nur abgeschätzt** werden. Wenn alle beteiligten Konstanten bestimmt sind, kann das **System simuliert** werden. Die Simulation zeigt dann Abweichungen zur Realität, die durch Änderung der Struktur oder ihrer Parameter minimiert werden.

In dieser Strukturbildung werden die Skizzen zu allen Beispielen vorgegeben. Daran wird dann die Entwicklung der Strukturen gezeigt.

Zur Definition der positiven Zählrichtungen

Strukturen stellen die Gesetzmäßigkeiten, nach denen ein System Signale verknüpft, symbolisch dar. Das setzt voraus, dass alle Signale Namen erhalten und ihre positiven Zählrichtungen durch Zählpfeile festgelegt sind. Die Festlegung ist prinzipiell willkürlich, sollte aber so erfolgen, dass in Berechnungen (Simulationen) möglichst wenige Minuszeichen auftreten, denn zu viele Minuszeichen führen leicht zur Verwirrung.

Das Simulationsprogramm, hier **SimApp** – **aber auch jedes andere**, berechnet Strukturen. Durch Diagramme sieht man sofort, ob die Simulation mit der Realität übereinstimmt oder noch modifiziert werden muss. Beschreibt die Simulation die Realität dann richtig, lässt sich die Dimensionierung der Bauteile des Systems aus der Struktur entnehmen.

Beispiel für einen Bauplan und seine Struktur (Abb. 1-2):

die Hintereinanderschaltung zweier Widerstände

Gesucht sei die Struktur bei Stromsteuerung. Der wesentlich kompliziertere Fall der Spannungssteuerung und die Spannungsteilung wird in Kap. 2 Signalverarbeitung als Beispiel zum Thema Vierpole behandelt.

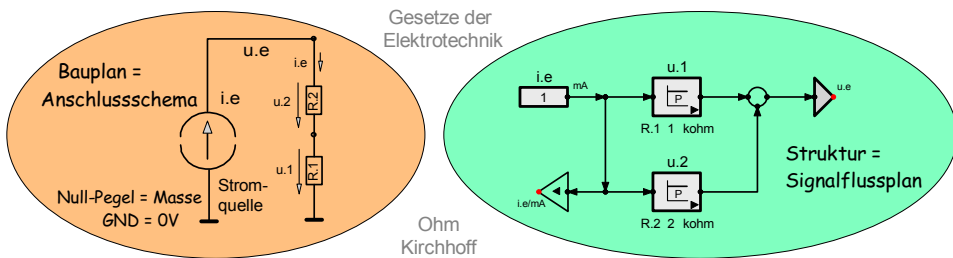


Abb. 1-2 links der Bauplan, rechts die Struktur einer stromgespeisten elektrischen Reihenschaltung: In diesem Beispiel wird der Strom als Ursache für die Spannung aufgefasst. Dann addieren sich die Teilspannungen zur Gesamtspannung, die die Stromquelle erzeugen muss. Das ist z.B. bei Solarzellen der Fall (Kap. 10: Photometrie).

Die Struktur eines Systems zu kennen, hat entscheidende Vorteile:

1. kann das Verhalten des Systems z.B. mittels Simulation nachgebildet werden, so als ob es real existieren würde.
2. lassen sich die Einflüsse von Veränderungen sofort erkennen. Dadurch ist es möglich, die Bauelemente eines Systems zu optimieren.
3. überblickt man das dynamische Verhalten (Sprungantworten, Frequenzgänge) und kann das System auch diesbezüglich optimieren.
4. lassen sich aus Strukturen die analytischen Zusammenhänge (Übertragungsfaktoren) ohne formale Mathematik ablesen. Wie das gemacht wird, erfahren Sie in Kap. 2 (statisch) und Kap. 3 (dynamisch). Einfacher und übersichtlicher geht es nicht.
5. Strukturen fördern das systematische Denken in Ursache und Wirkung. Eine Struktur ist vollständig, wenn es außer den Ein- und Ausgängen keine offenen Signalleitungen (unerklärte Signale) mehr gibt. So sagt Ihnen die Struktur, dass Ihre Überlegungen zur Funktion eines Systems abgeschlossen sind.
6. Strukturen lassen Analogien zu Systemen aus anderen Bereichen schnell erkennen. Dadurch fällt die Einarbeitung in ein neues Gebiet leichter.

Beispiele:

- In Bd. 4/7, Kap. 6 wird der elektrodynamische Motor und Generator behandelt. Darauf folgt in Bd. 6/7, Kap. 11 Aktorik der Piezo als elektrostatischer Motor und Generator.
- In Bd. 5/7, Kap. 8 wird der elektronische Operationsverstärker behandelt und in Bd. 7/7, Kap. 12 in gleicher Weise der pneumatische Verstärker.

Die genannten Beispiele unterscheiden sich erheblich durch ihre äußere Erscheinung. Prinzipiell verhalten sie sich jedoch ähnlich. Das wird durch ihre Strukturen transparent.

Wie man eine Struktur gewinnt, behandelt diese Schrift an Hand von Beispielen aus vielen Bereichen der Physik und Technik. So soll der Leser die Übung bekommen, die er zum Erstellen eigener Strukturen braucht.

Die dazu nötigen Grundlagen werden in den Kapiteln **2 Signalverarbeitung** und **3 Dynamik** vermittelt – und zwar ohne höhere Mathematik. Die dann folgenden Beispiele können je nach Interesse in den einzelnen Kapiteln ausgewählt werden (siehe Schluss: Wie geht es weiter?).

Analogien

Zur Verdeutlichung allgemeiner Aussagen wird zuerst auf elektrische Beispiele verwiesen. Die sind besonders einfach, denn Strom ist inkompressibel und die Widerstände sind linear. Dann folgen mechanische Beispiele (analog zur Elektrik, aber mit Haftreibung bei kleinen Geschwindigkeiten) und zuletzt hydraulische Beispiele (nichtlineare Widerstände, aber inkompressibles Medium) und pneumatische Beispiele (nichtlineare Widerstände und kompressibles Medium), denn die sind am kompliziertesten.

Tab. 1-1 Analogien - senkrecht: Themen der Strukturbildung, Grundgrößen. Von links nach rechts: Integration=Zeitfläche, von rechts nach links: Differenzierung= zeitliche Änderung

Translation	Beschleunigung a	Geschwindigkeit v	Weg x, y, z
Rotation	Winkel-Beschl. α	Winkel-Geschw. ω, Ω	Winkel φ
Wärme	Wärmestrom/Zeit	Wärmestrom $P, \dot{Q}$	Wärmemenge Q
Elektrik	Ladungs-Beschl. b	elektr. Strom i	Ladung q
Photometrie	Photonen Emission Absorption	Lichtstrom Φ	Strahlungs-Dosis D
Hydraulik	Öl-Beschleunig. m/t^2	Ölstrom m/t	Ölmenge m
Pneumatik	Luft-Beschl. V/t^2	Luftstrom V/t	Luftvolumen $V(p)$

Tab. 1-1 zeigt die hier behandelten Themenbereiche:

- Die untereinander stehenden Größen sind einander ähnlich.
- Nebeneinander stehen die zeitlichen Zusammenhänge mit von rechts nach links differenzierten (abgeleiteten) Größen.
- Von links nach rechts werden die Signale integriert. Differenzierung und Integration werden in Kap. **3 Dynamik** behandelt.

Auch die Gesetzmäßigkeiten sind in allen Bereichen der Physik ähnlich (**Tab. 1-2**). Hier zeigen wir als Beispiel die Zusammenstellung der kinematischen Gesetze der Mechanik und der Elektrizität:

Tab. 1-2: Vergleich analoger Gesetze in der Mechanik und der Elektrotechnik: Mechanische Kräfte werden F genannt, Wege x , Geschwindigkeiten v und Beschleunigungen a . Elektrische Spannungen heißen u , Ladungen heißen q und Ströme i . $d.i/d.t$ ist die Ladungsbeschleunigung b . Die zugehörigen Konstanten werden in den Kapiteln 4 Mechanik und 3 Elektrizität erklärt.

Tab. 1-2 mechanische und elektrische Grundgesetze:

Analoge Bauelemente und Gesetze			
Translation	Trägheitskraft: $F.T=m*a$	Reibungskraft: $F.R=k.R*v$	Federkraft: $F.F=k.F*x$
Elektrik	Induktion: $u.L=L*d/dt(i)$	Ohmsches Gesetz: $u.R=R*i$	Kondensation: $u.C=1/C*q$

Abb. 1-3 zeigt zu Tab. 1-2 ein mechanisches Beispiel, Abb. 1-4 zeigt das Diagramm dazu. Ist die zweite Ableitung (linke Spalte in Tab. 1-2) konstant (Sprung = Schritt), steigen die erste Ableitung (mittlere Spalte) zeitproportional an (Rampe) und die physikalische Größe selbst (0.Ableitung, rechts) quadratisch an. Mit der Maus können Sie in der Simulation den Zeitzeiger (senkrechte grüne Linie) auf jede beliebige Stelle ziehen und die zugehörigen Signalwerte dazu in der Legende ablesen.

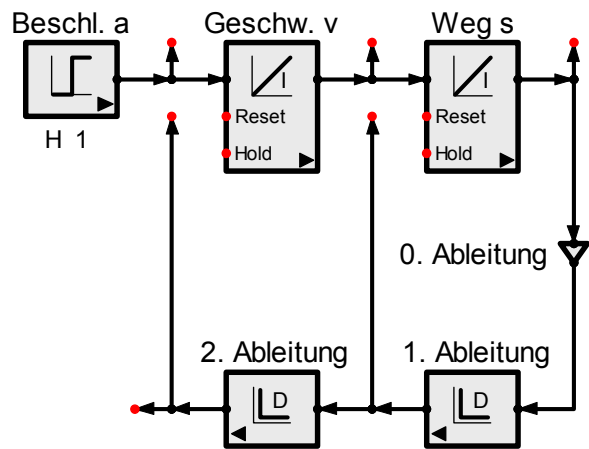


Abb. 1-3 Integration und Differenzierung: Sie werden beim Thema Dynamik in Bd. 2/7 der Strukturbildung und Simulation technischer Systeme erklärt.

Abb. 1-4: Die mechanische Kinetik verknüpft Wege s mit Geschwindigkeiten v und Beschleunigungen a .

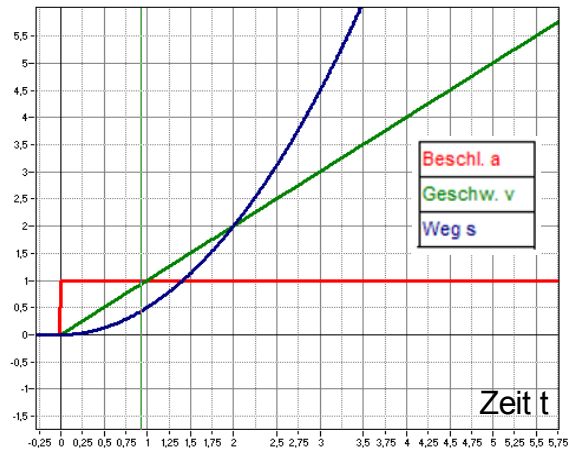


Abb. 1-4 Beschleunigung a , Geschwindigkeit v und Weg s sind Umkehrfunktionen. Sie werden in Bd. 2/7 beim Thema Dynamik behandelt.

Statik und Dynamik

Zu unterscheiden sind statische (bzw. stationäre) und dynamische Berechnungen. Abb. 1-5 zeigt, was darunter zu verstehen ist:

Energiespeicher und -verbraucher erzeugen das Zeitverhalten von Systemen. Die Darstellung von Zeitfunktionen $f(t)$ gehört zu den besonderen Stärken der Simulation.

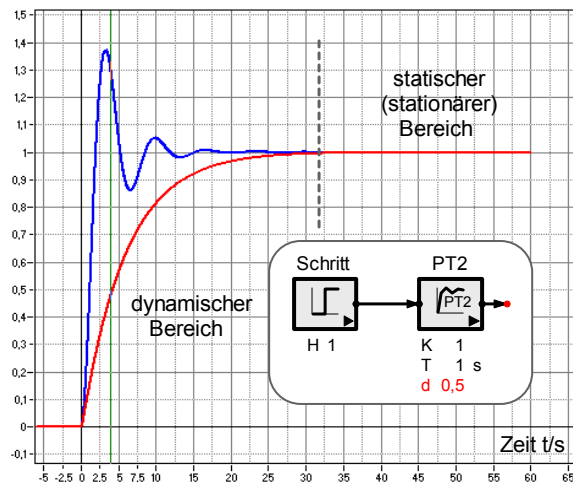


Abb. 1-5 Unterteilung einer Sprungantwort in einen statischen und einen dynamischen Bereich

Statisch heißen **zeitunabhängige** Vorgänge, z.B.

- speichern mechanische Federn (Kap. 4.2) bei Auslenkung x die Energie der Lage
- speichern elektrische Kondensatoren (Kap. 2.4) elektrische Ladungen q .

Deshalb sind Federn und Kondensatoren statische Speicher. Im Idealfall haben sie keine Verluste, d.h. sie erwärmen sich im Betrieb nicht.

Stationär heißen Vorgänge, die mit **konstanten Amplituden** ablaufen. Stationäre Vorgänge lassen sich statisch berechnen, z.B.

- erzeugen mechanische Dämpfer (Bd. 2/7, Kap. 4.2) Geschwindigkeits-proportionale Signale. Es gilt das lineare **Reibungsgesetz** $F \cdot R = k \cdot R \cdot v$.
- erzeugen elektrische Widerstände (Kap. 2.3) in Wechselstromkreisen Stromstärke-proportionale Signale. Es gilt das **ohmsche Gesetz** $U = R \cdot I$ für **Effektivwerte** (Abschnitte 1.3.7 und 1.3.8), das **Georg Simon Ohm 1826** zur Berechnung von Momentanwerten (u, i) in Gleichstromkreisen entdeckt hat.

Mechanische Widerstände (Dämpfer, Kap. 4.2) und elektrische Widerstände (Kap. 2.1) sind Energieverbraucher. Sie erwärmen sich im Betrieb und müssen gegebenenfalls gekühlt werden.

Dynamisch heißen **zeitabhängige** Vorgänge. z.B.

- erzeugen Massen m nur dann Trägheitskräfte $F \cdot T$, wenn sie beschleunigt werden.
Das Trägheitsgesetz lautet $F \cdot T = m \cdot a$ mit $a = dv/dt$ und $v = dx/dt$.
- induzieren Spulen nur bei Stromänderung Spannung.
Das **Induktionsgesetz** lautet: $u \cdot L = L \cdot b$ mit der Ladungsbeschleunigung $b = di/dt$ und dem elektrischen Strom $i = dq/dt$.

Massen m (Bd. 2/7, Kap. 4.2) und Induktivitäten L (Bd. 2/7, Kap. 3.1) sind dynamische Speicher. Sie erwärmen sich im Betrieb nicht, wenn sie keine Verluste haben.

In Kap. 2 dieses ersten Bd.es der ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘ werden **zuerst nur statische Vorgänge** berechnet. Sie sind einfacher als dynamische Prozesse und die Voraussetzung zur dynamischen Systemanalyse.

Dynamische Berechnungen enthalten für große Zeiten ($t \rightarrow \infty$) den statischen (stationären) Fall. Der Bd. 2/7 behandelt die **Simulation dynamischer Systeme** im Zeit- und im Frequenzbereich.

- Im Zeitbereich interessieren Ein-und Ausschaltvorgänge.
- Im Frequenzbereich interessieren Resonanzen und Dämpfungen.

Ein Ziel dabei ist die **dynamische Optimierung**. Dazu sind Komponenten (z.B. Dämpfer oder Widerstände) so einzustellen, dass das System möglichst schnell, aber immer stabil arbeitet.

In Kap. 3 werden elektrische und in Kap. 4 mechanische Systeme dynamisch analysiert. Die darin vorgestellten Verfahren (komplexe Rechnung, Bode-Diagramme) werden in den nachfolgenden Kapiteln zur Analyse beliebiger Systeme gebraucht, z.B. in Kap. 5 ‚magnetisch‘, in Kap. 9 ‚PID-Regelungen‘ oder in Kap. 12 ‚hydraulisch und pneumatisch‘.

1.1 Schnelleinstieg in SimApp

Ein Simulationsprogramm ist das Handwerkszeug des Systemanalytikers. Am Beispiel von SimApp soll gezeigt werden, wie einfach der Umgang damit ist. Wenn Sie noch nicht in Besitz von SimApp sind oder ein anderes Simulationsprogramm benutzen wollen oder nur an der Methode der Strukturbildung interessiert sind, genügt es, wenn Sie sich die in diesem Abschnitt angegebenen Simulationsbeispiele ansehen.

Das **Zeichnungsfenster** (Abb. 1-6):

Ein Simulator wie **SimApp** ist nur ein schneller Rechner. Was er rechnen soll, sagt man ihm anschaulich durch Symbole (= Blöcke = Glieder = Objekte), die durch Signalleitungen verknüpft werden. So entsteht die Struktur eines Systems.

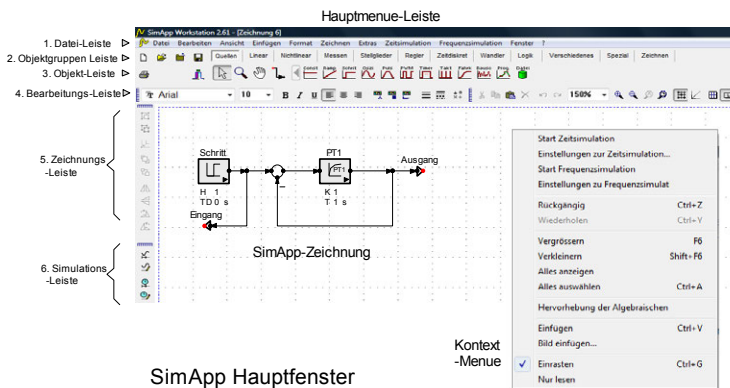


Abb. 1-6 Das kommentierte SimApp-Hauptfenster: Links: die Bezeichnungen der Bearbeitungsleisten. Mitte: eine Beispielzeichnung. Rechts: Das Kontextmenü: Es öffnet sich nach dem Anklicken der rechten Maustaste.

SimApp verwendet die meisten der in Word üblichen Shortcuts zum Editieren einer Zeichnung, z.B.

- Strg+Z = Befehl rückgängig machen
- Strg+Y = rückgängig machen wieder rückgängig machen

Aber: Strg+Druck = in Zwischenablage kopieren (copy) und Strg+Einfüg = einfügen (paste) funktionieren nicht. Dazu benötigt man das Kontextmenü (rechte Maustaste).

Aufgabe dieses Kapitels ist, Sie anhand einfacher Beispiele möglichst schnell in die Benutzung von **SimApp** einzuführen. Die angegebenen Strukturen dienen in erster Linie als Vorlage zur Simulation. Genau erklärt werden sie erst in den folgenden Kapiteln 2 (statisch) und 3 (dynamisch). Vollständigkeit ist nicht beabsichtigt. Wer sich vorher lieber gründlich informiert, bevor er das Programm verwendet, der sei auf die SimApp-Beschreibung

<http://www.simapp.com/simulation-software-description.php>

... die SimApp-Beispiele <http://www.simapp.com/simulation-tutorials.php>

und das **Benutzerhandbuch** verwiesen:

http://www.simapp.com/SimApp_Handbuch.pdf

Das SimApp Hauptfenster = Arbeitsfenster = Zeichnungsfenster

Durch Simulation werden Sie zu einem Rechenmeister. Um mit SimApp arbeiten zu können, machen wir uns zunächst mit seiner Bedienoberfläche vertraut. Nach dem Programmstart öffnet sich das SimApp-Hauptfenster. Es zeigt zunächst eine leere Seite, die zum Zeichnen der gewünschten Strukturen dient. Betrachten Sie dazu bitte das Hauptfenster in der Abbildung Abb. 1-6.

Im Hauptfenster werden die zu simulierenden **Strukturen gezeichnet und verwaltet**. Es enthält alles, was Sie zur Simulation benötigen. Sie müssen nur wissen, **was** Sie simulieren wollen und **wo Sie etwas** finden. Dazu müssen Sie sich die Leisten oben und an den Rändern des Hauptfensters näher (Abb. 1-6) ansehen.

Die Menüleisten

Zuerst erläutern wir Ihnen die Aufgaben der einzelnen Leisten (Abb. 1-7). Danach zeigen wir, wie man mit den darin zu findenden Befehlen eine Struktur zeichnet und simuliert. Am oberen Rand des SimApp Hauptfensters befinden sich vier Leisten:

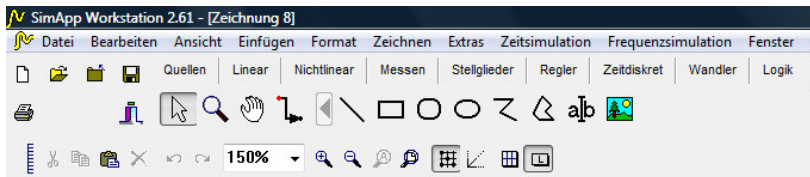


Abb. 1-7 Funktions-Leisten des SimApp Hauptfensters: Sie besitzen schraffierte Anfasser zum Verschieben (Anklicken mit linker Maustaste und ziehen). Aktiviert oder deaktiviert werden sie unter ‚Ansicht‘.

1. Die Dateileiste

Die Dateileiste enthält alle, in Funktionsgruppen zusammengefasste SimApp-Befehle (Abb. 1-8). Durch Anklicken mit der linken Maustaste öffnet sich die Gruppe und zeigt die in ihr enthaltenen Befehle. Als Beispiele zeigen wir die Inhalte der Gruppen **Datei** und **Bearbeiten**.

Für den Anfang genügt es, wenn Sie sich die Befehle (=Funktionen) der übrigen Gruppen einmal kurz ansehen. Wenn wir sie zum Zeichnen einer Struktur benötigen, wird angegeben, wo die Objekte (=Blöcke) zu finden sind.

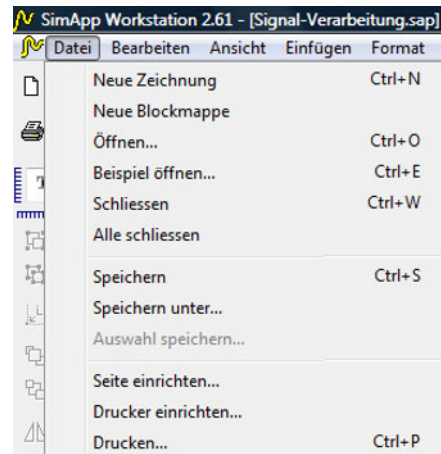


Abb. 1-8 Inhalte der Gruppe Datei: Die ausführbaren Befehle erscheinen schwarz, die zurzeit nichtaktiven Funktionen (=Befehle) sind blassgrau.

In der Gruppe **Bearbeiten** finden Sie die Befehle zum Kopieren und Ausschneiden markierter Objekte und zum Einfügen aus dem Zwischenspeicher (Abb. 1-9).

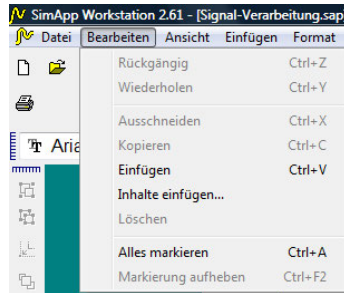


Abb. 1-9 Die Gruppenleiste: Auswahl der Gruppe Bearbeiten

2. die Gruppenleiste

In Abb. 1-9 finden sie - in Gruppen zusammengefasst - sämtliche Objekte und Steuerbefehle, die zur Simulation benötigt werden.

3. die Objektleiste

Die Objektleiste zeigt den Inhalt (die Objekte) der momentan ausgewählten Objektgruppe. Durch Anklicken mit der linken Maustaste und Absetzen holen Sie die Objekte in die Zeichnungsebene.

4. die Bedienleiste

Mit den Befehlen der Bedienleiste (Abb. 1-10) wird die Form und Größe der Zeichnungsebene eingestellt. Probieren Sie sie aus!



Abb. 1-10 Ausschnitt aus der Bedienleiste von SimApp

Am linken Rand des Hauptfensters finden Sie noch zwei weitere Leisten (Abb. 1-11):

die **Zeichnungsleiste** und die **Simulationsleiste**

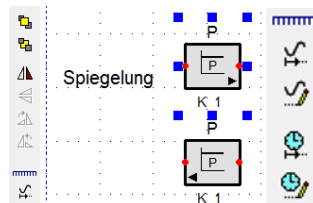


Abb. 1-11 Zeichnungsleiste mit gespiegelter Block (blau markiert) und Simulationsleiste

Mit den Befehlen der Zeichnungsleiste können Sie z.B. Objekte spiegeln und drehen, mit der Simulationsleiste stellen Sie die Simulationsparameter ein und starten Sie die Zeit- oder Frequenzsimulation.

Zeichnung mit Bauplan und Struktur

Wie man aus einem Bauplan dessen Struktur (oder umgekehrt) gewinnt, ist das Thema aller folgenden Kapitel dieser **Strukturbildung und Simulation** (Abb. 1-12). Darin erlernen Sie die **Bildung von Strukturen** anhand von Beispielen aus vielen Bereichen der klassischen Physik und Technik. Dabei werden die nach dieser Einführung noch vorhandenen Lücken in der Benutzung von SimApp geschlossen. Hier geht es zunächst nur darum, zu zeigen, wie eine **gegebene Struktur** durch SimApp dargestellt und simuliert wird.

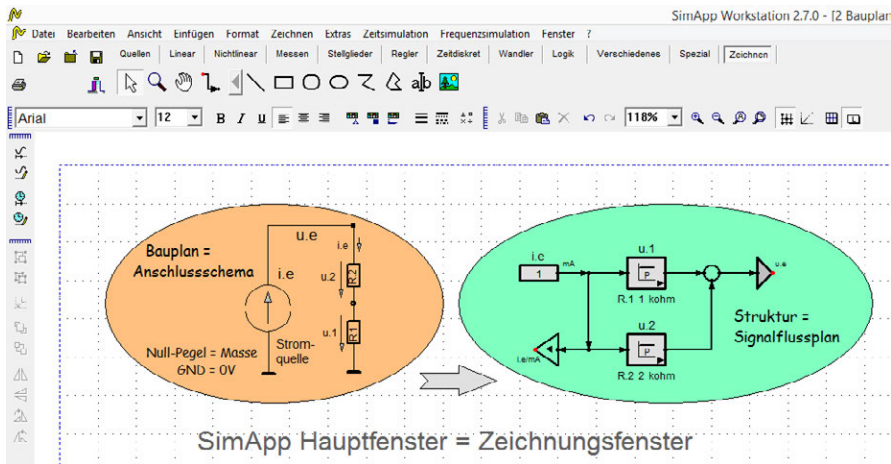


Abb. 1-12 Zeichnung(=Haupt)-Fenster: Anschlussschema (Bauplan) und Struktur gehören zusammen.

Der Bauplan zeigt, was wie anzuordnen (hier anzuschließen) ist. Die Struktur der Abb. 1-12 zeigt, wie das Gebilde funktioniert: Zwei hintereinandergeschalteten Widerständen wird ein Strom $i.e$ eingeprägt. Dadurch entstehen zwei Teilspannungen, die sich zur Gesamtspannung $u.a$ addieren (**Kirchhoff'sches Gesetz**).

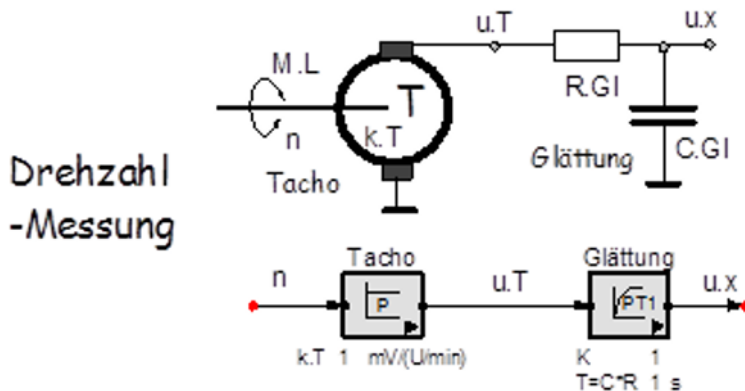


Abb. 1-13 zeigt ein elektromechanisches Beispiel zum Bauplan und seiner Struktur: ein Tachogenerator mit Glättung. Drehzahlmessung: C-Glättung: Alle Signale haben einen Namen und eine positive Zählrichtung.

1.1.1 Signalwandler

Strukturen beschreiben die Funktionen signalverarbeitender Systeme. Dabei werden über Wandler aus steuernden Signalen gesteuerte. Die Signalwandlung wird durch Blöcke symbolisiert, die hier auch (Simulations-) Objekte genannt werden (Abb. 1-17).

Objekte sind Signalwandler, z.B. von Kraft nach Weg oder Spannung in Strom. Wenn ein Teil eines Systems einen anderen ansteuert, ist das **Ausgangssignal** des ersten Objekts das **Eingangssignal** eines zweiten. In der Struktur werden die Teilsysteme durch Blöcke mit Ein- und Ausgängen dargestellt. Ihre Verknüpfung erfolgt durch **gerichtete Signalflosslinien**, die auch **Signalleitungen** heißen. Als Beispiel dazu zeigten wir in Abb. 1-13 eine Drehzahlmessung mit Tachogenerator und Glättung.

Signale stellen Messgrößen dar (Abb. 1-14). Sie besitzen immer eine Wirkungsrichtung, die durch Pfeile kenntlich gemacht wird. Zu ihnen gehört die Definition der positiven Zählrichtung im Bauplan (Zählpfeile).

Zu summierende Signale (allgemein: Eingangssignale) laufen auf die Summierstelle (allgemein: den Verarbeitungsblock) zu, die Summe (allgemein: das Ausgangssignal) hat die Richtung von der Summierstelle (dem Verarbeitungsblock) weg.

Summierstellen

Häufig vorkommende Signaloperationen sind die Summation und Differenzbildung. Sie werden durch Kreise dargestellt. Die zu summierenden Signale werden durch Signalflosslinien symbolisiert.

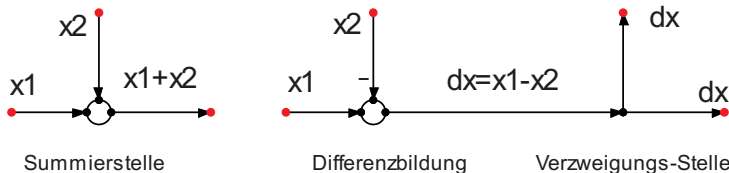


Abb. 1-14 links: Summation zweier Signale, Mitte: Differenzbildung, rechts: Verzweigung

Signalverzweigung

Signale sind energielose Informationen. Deshalb lassen sie sich, sobald sie irgendwo in einer Struktur gebraucht werden, durch eine **Verzweigung** darstellen.

Differenzbildung

Hat ein System mehrere Eingänge, so erzeugen Änderungen an einem Eingang Signaländerungen im gesamten System. Gleichzeitige Änderungen an mehreren Eingängen überlagern sich bei allen Signalen (**Überlagerung = vorzeichenrichtige Addition**). Das zugehörige Symbol ist die Summierstelle. Beispiele dazu folgen in allen Kapiteln.

Zur Differenzbildung muss ein Signal invertiert werden. Dazu **markieren** Sie es durch Anklicken mit der **rechten Maustaste**. Es öffnet sich ein Fenster (Abb. 1-15), in dem Sie die Invertierung auswählen können: **„Vorzeichen ändern“**.

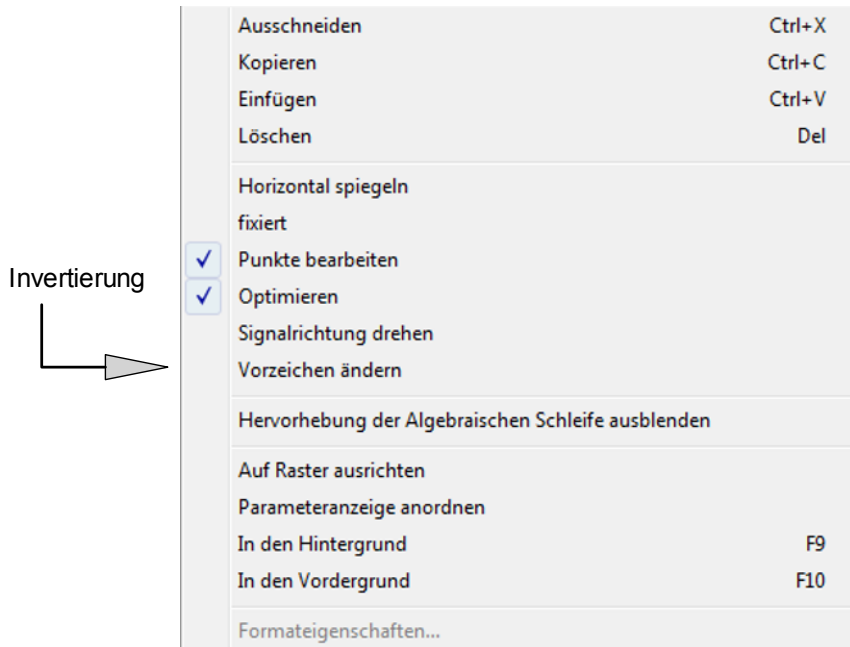


Abb. 1-15 Kontextmenü: Es zeigt die Änderungsmöglichkeiten zu dem markierten Objekt.

Objekte

Um Ihnen einen ersten Eindruck von den vielfältigen Berechnungsmöglichkeiten in SimApp zu verschaffen, folgt nun eine Auswahl oft benötigter Simulationsobjekte.

Funktionen mit einem Eingang

Alle elementaren mathematischen Funktionen finden Sie in der Gruppe Nichtlinear (Abb. 1-16), hier z.B. die mit einem Eingang: