

Daraus folgt für die Ausgangsspannung $U_2 = U_{20}$:

$$U_{20} = \frac{-G_1 \cdot U_1 \cdot (V \cdot G_i - G_2)}{(G_1 + G_2 + G_e) \cdot (G_2 + G_i + G_L) + G_2 \cdot (V \cdot G_i - G_2)} \stackrel{v \rightarrow \infty}{=} -\frac{G_1}{G_2} \cdot U_1$$

Für sehr hohe Verstärkungen wird der Einfluss von Last, Eingangs- und Innenwiderstand vernachlässigbar und es ergibt sich die bekannte Verstärkung $U_2/U_1 = -R_2/R_1$ für die invertierende Grundschialtung.

Die vorgängig behandelte invertierende Grundschialtung mit zwei Eingangsklemmen und zwei Ausgangsklemmen wird auch als **Vierpol** bezeichnet. Da Verstärker- und Filterschaltungen in der Nachrichtentechnik aus solchen Vierpol-Netzwerken aufgebaut sind, wurde zur analytischen Behandlung die *Vierpoltheorie* entwickelt. Durch die heute verfügbaren mächtigen Simulationswerkzeuge für elektronische Schaltungen geht deren praktische Bedeutung für die Elektrotechnik/Elektronik zurück. ♦

■ 2.2 Elektrisches Feld

Die Maxwell'schen¹⁵ Feldgleichungen beschreiben die Veränderung des Raumes durch ruhende und fließende elektrische Ladungen. In diesem Abschnitt beschäftigen wir uns nur mit ruhenden oder vergleichsweise langsam bewegten Ladungen, mit dem Ziel, das Verhalten des Kondensators als elektrischen Energiespeicher zu beschreiben.

Aus Experimenten weiß man, dass sich unterschiedliche Ladungen $Q_{1,2}$ anziehen und Ladungen mit gleichem Vorzeichen abstoßen. Diese Kraft F kann im Vakuum mit dem Coulomb'schen Gesetz quantifiziert werden:

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (2.59)$$

mit r Abstand der beiden Ladungen Q_1 und Q_2 ,
 ϵ_0 elektrische Feldkonstante $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A}\cdot\text{s}/(\text{V}\cdot\text{m})$.

Diese Kraftwirkung auf eine Entfernung r ohne direkte Berührung (wie in der Mechanik) und ohne stoffliches Medium beschreibt man mit dem **elektrischen Feld**. Die elektrische Feldstärke E an einem Raumpunkt ist definiert als die auf eine Ladung ausgeübte Kraft, bezogen auf die Ladung selbst. Bringt man also eine kleine Probeladung $q = Q_2$ in die Nähe (d. h. in das Feld) einer größeren Ladung $Q = Q_1$, so ergibt sich die Feldstärke E um die Ladung Q zu:

¹⁵ James Clerk Maxwell (1831 – 1879), schottischer Physiker,

$$E = \frac{F}{q} = \frac{1}{q} \cdot \frac{Q \cdot q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \quad (2.60)$$

(2.60) macht deutlich, dass das Feld einer Ladung nur in der Nähe zu großen Kräften führt. Befinden sich mehrere Ladungen Q_i im Umfeld einer Probeladung q , so müssen die Kraftwirkungen bzw. die Feldstärkeanteile vektoriell überlagert werden.

2.2.1 Elektrische Feldstärke und elektrischer Fluss

Wir betrachten zunächst den in Bild 2.30 dargestellten Plattenkondensator mit einer gegenüber dem Plattenabstand d sehr großen Ausdehnung der Platten (Plattenfläche A).

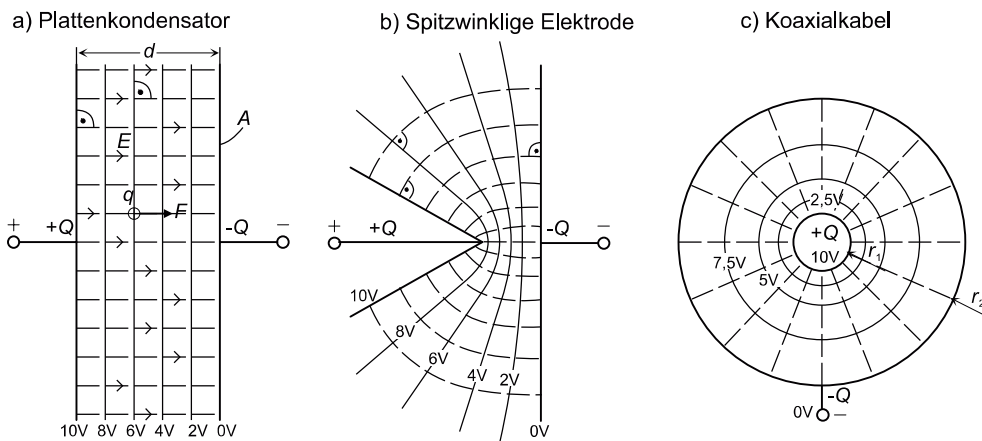


Bild 2.30 a) Feldlinien und Äquipotenzialflächen am Plattenkondensator
b) Feldverdichtung an einer spitzwinkligen Elektrode
c) Konzentrisches Feld am Zylinderkondensator/Koaxialkabel

Legt man an die Platten eine Spannungsquelle (z.B. 10 V), so sammeln sich positive Ladungen $+Q$ an der am Pluspol der Spannungsquelle angeschlossenen Platte und gegenüber aufgrund der Ladungserhaltung gleich viele negative Ladungen $-Q$. Zwischen diesen Flächenladungen bildet sich ein homogenes elektrisches Feld aus.

Bringt man nun eine kleine (positive) Probeladung q zwischen die Platten, so erfährt diese Probeladung eine Kraft

$$F = E \cdot q \quad (2.61)$$

Diese Kraft F können wir mithilfe des elektrischen Potentials genau bestimmen. Für eine Verschiebung der Probeladung um den gesamten Plattenabstand d nimmt deren Arbeitsfähigkeit um

$$W = U \cdot q = F \cdot d \quad (2.62)$$

zu. Daraus ergibt sich für die Kraft und die Feldstärke zwischen den Kondensatorplatten:

$$F = \frac{U}{d} \cdot q \quad \text{bzw.} \quad E = \frac{U}{d} \quad (2.63)$$

Die elektrische Feldstärke im Inneren des Plattenkondensators hängt also nur von der am Kondensator angelegten Spannung U und umgekehrt proportional vom Plattenabstand d ab. Dieses Feld kann man durch die Kraftlinien visualisieren, die eine Probeladung erfährt – die sogenannten Feldlinien. Die elektrischen Feldlinien beginnen bei der Ladung $+Q$ und enden bei der Ladung $-Q$, sie haben also Anfang und Ende.

Bewegt man eine Probeladung q senkrecht zu den Feldlinien, so verändert sich das Potenzial von q nicht und man muss dafür keine Arbeit verrichten bzw. gewinnt keine Energie. Man führt bei der Visualisierung des elektrischen Feldes daher auch die sogenannten Äquipotenziallinien oder -flächen ein, wie dies in Bild 2.30a beispielhaft für die Potenziale von 0 V bis 10 V gezeigt ist¹⁶. Metallische Körper im elektrischen Feld sind grundsätzlich Äquipotenzialflächen, da sich die dort vorhandenen verschiebbaren Ladungsträger bei einer Potentialdifferenz bewegen würden (\rightarrow stationäres Strömungsfeld). Äquipotenziallinien sind immer senkrecht zu den Feldlinien, daher gehen Feldlinien auch immer senkrecht von metallischen Oberflächen aus, wie dies in Bild 2.30 für verschiedene ebene Feldanordnungen skizziert ist.

Mit etwas Übung kann man so auch ohne numerische Feldberechnungsprogramme ein elektrisches Feld zwischen zwei metallischen Flächen skizzieren. Man versucht dabei, die Äquipotenziallinien und die Feldlinien so zu zeichnen, dass möglichst „schöne“ Quadrate entstehen. Dort, wo die Quadrate besonders klein sind, herrschen die größten Feldstärken, wie das bei der spitzwinkligen Elektrode oder dem Innenleiter des Koaxialkabels in Bild 2.30b/c deutlich sichtbar ist. Diese Maximalfeldstärke kann sogar recht zuverlässig abgeschätzt werden, da man sich jedes Quadrat als kleinen Plattenkondensator vorstellen kann.

Sehr hohe Feldstärken können zu einem Durchschlag führen, da die mit dem E -Feld belasteten Moleküle ionisiert werden und so ein leitfähiger Kanal entsteht. In trockener Luft ist die Durchschlagfeldstärke E_{\max} ca. 3 kV/mm, während sie im Vakuum und bei Isolatoren (Porzellan, Glas, PVC, Plexiglas) oft mehr als zehnmal höher liegt. Wenn man sehr kompakte Hochspannungsanlagen bauen muss, füllt man diese anstelle von Luft mit Schwefelhexafluorid (SF_6), das mit $E_{\max} = 8$ kV/mm eine deutlich höhere Durchschlagfestigkeit aufweist.

Die elektrischen Feldlinien in Bild 2.30 können auch als Flussröhren aufgefasst werden, weshalb der Begriff der elektrischen Flussdichte D eingeführt wurde. Diese elektrische Flussdichte beschreibt die mit dem Feld einhergehende Dichte von Ladungen und trägt die Einheit $1 \text{ A}\cdot\text{s}/\text{m}^2$.

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E \quad (2.64)$$

¹⁶⁾ Höhenlinien auf einer Wanderkarte sind ebenfalls Äquipotenziallinien, da man sich auf ihnen ohne Veränderung der potenziellen Energie $W = m \cdot g \cdot h$ bewegen kann. Die Hangabtriebskraft steht senkrecht auf diesen Höhenlinien.

mit ϵ_r Permittivitätszahl (auch relative Dielektrizitätszahl genannt, Luft/Vakuum: $\epsilon_r = 1$, Polyethylen: $\epsilon_r = 2$, Glas: $\epsilon_r = 6$, Tantalpentoxid: $\epsilon_r = 27$).

Insbesondere durch zusätzliche Ladungsverschiebungen in einem Dielektrikum (Isolator) zwischen den Kondensatorplatten kann die Flussdichte deutlich verstärkt werden. Bildet man das Flächenintegral über die eine geschlossene Hülle A durchstoßende Flussdichte D , so ergibt dies die in dieser Fläche eingeschlossene Gesamtladung Q (3. Maxwell'sche Gleichung):

$$\int \int_A \vec{D} dA = Q \quad (2.65)$$

Beispiel 2.9: Feldstärkeabschätzung an einer spitzen Elektrode

Bild 2.30b zeigt Feldlinien und Äquipotenzialflächen einer zylindrischen Anordnung mit spitzwinkliger Elektrode, die nach der „Quadratmethode“ von Hand gezeichnet wurden. Die Feldstärke E kann gemäß (2.63) für jedes Quadrat abgeschätzt werden:

$$E_i = \frac{\Delta U_i}{\Delta d_i} \quad (2.66)$$

Damit wird deutlich, dass die Feldstärke um die Spitze herum deutlich größer ist als im Randfeldbereich oder nahe der Platte. Um quantitativ belastbare Ergebnisse zu erhalten, müsste man das Feld um die Spitze herum noch deutlich weiter verfeinert skizzieren. Für abgerundete Konturen (die man bei Bauteilen im Hochspannungsbereich immer anstrebt) hingegen kann bereits eine so grobe Feldskizze ausreichende Aussagen zur Belastbarkeit liefern. ♦

Beispiel 2.10: Zylinderkondensator

Bild 2.30c zeigt die Feldlinien und Äquipotenzialflächen eines sehr langen Zylinderkondensators (Koaxialkabel) der Länge h in z -Richtung (senkrecht zur Tafelenebene). Die Feldstärke im Zylinderkondensator kann mithilfe der 3. Maxwell'schen Gleichung analytisch bestimmt werden. Legt man um die innere Elektrode mit $+Q$ eine konzentrische Zylinderfläche A mit dem Radius $r_1 < r < r_2$ und der Länge h , so wird diese Fläche senkrecht von den Feldlinien durchstoßen. Mit (2.65) folgt:

$$\int \int_A \vec{D} dA = Q = \int_0^h \int_0^{2\pi} D \cdot r \cdot d\phi \cdot dz = D \cdot h \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E \cdot h \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \quad (2.67)$$

Die Feldstärke

$$E = \frac{Q/h}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot r} \quad (2.68)$$

ist somit abhängig von der Ladungsdichte Q/h sowie umgekehrt proportional zum Radius r . Die größte Feldstärke herrscht am Innenleiter mit $r = r_1$, hier wird die Isolation eines Koaxialkabels maximal belastet. ♦

2.2.2 Kapazität

Wendet man die 3. Maxwell'sche Gleichung auf den Plattenkondensator an, so ergibt sich bei homogenem Innenfeld und vernachlässigbar kleinem Außen- bzw. Streufeld die eingeschlossene Ladung zu

$$\int_A \boxed{\frac{Q}{\epsilon_0}} dA = Q \stackrel{\text{hier}}{=} D \cdot A = A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E = A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{U}{d} = \underbrace{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}}_{\text{Kapazität}} \cdot U \quad (2.69)$$

Die in einem Kondensator gespeicherte Ladung Q ist der an den Kondensatorplatten anliegenden Potenzialdifferenz U somit proportional. Diesen Proportionalitätsfaktor bezeichnen wir als **Kapazität** C mit der Einheit $1 \text{ A} \cdot \text{s} / \text{V} = 1 \text{ F}$ (Farad¹⁷):

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{bzw.} \quad C \cdot U = Q \quad (2.70)$$

Kondensatoren können uns damit als Ladungsspeicher dienen und sind umso wirkungsvoller, je größer die Fläche A und je kleiner der Plattenabstand d ist.

Bild 2.31 zeigt das Schaltzeichen für dieses Bauteil, das an den Plattenkondensator erinnert. Kondensatoren mit verstellbarer Kapazität (sogenannte Drehkos) werden noch immer in Form von ineinandergreifenden Platten gebaut. Die meisten Kondensatoren sind heute jedoch Folienkondensatoren, bei denen die Platten als Aluminiumfolien ausgeführt sind, die durch ein folienartiges Dielektrikum getrennt sind. Diese Folien sind meist gewickelt und in zylindrischen Gehäusen untergebracht. Folienkondensatoren können mit beliebiger Polarität betrieben werden. Besonders hohe Kapazitäten erreichen Elektrolytkondensatoren (Elkos), bei denen ein Elektrolyt im Dielektrikum eingebracht wird. Bei diesen Kondensatoren ist jedoch auf die korrekte Polarität zu achten.

Kondensatoren sind wie Widerstände nur in bestimmten Nennwertereihen erhältlich. Man kann, wie in Bild 2.31 links angedeutet, eine beliebige Ersatzkapazität C_{ers} durch die Parallelschaltung mehrerer Kondensatoren realisieren. Da an allen Einzelkapazitäten C_i dieselbe Spannung U anliegt, ergibt sich die gesamte Ladung Q aus der Summe der Einzel Ladungen:

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 \cdot U + C_2 \cdot U = \underbrace{(C_1 + C_2)}_{C_{\text{ers}}} U \Rightarrow C_{\text{ers}} = \sum_i C_i \quad (2.71)$$

Die Ersatzkapazität ist also die Summe aller parallel geschalteter Kapazitäten und somit größer als die größte Einzelkapazität.

¹⁷ Michael Faraday (1791 – 1867), englischer Experimentalphysiker.

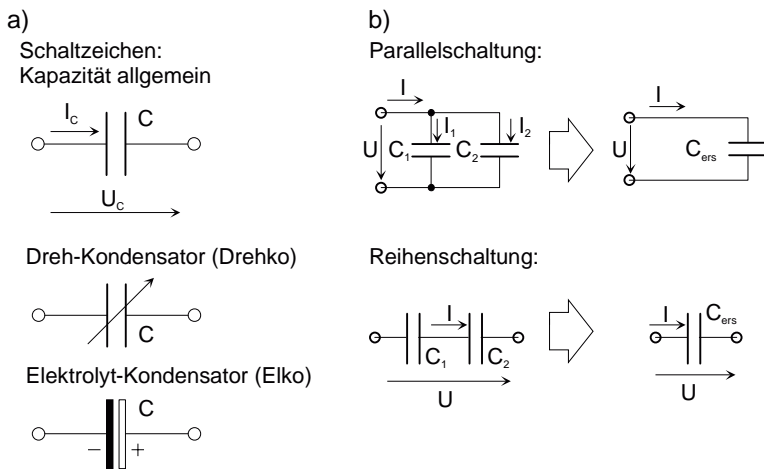


Bild 2.31 a) Schaltzeichen und elektrische Größen am Kondensator
b) Reihen- und Parallelschaltung von Kondensatoren

Bei der (seltener angewandten) Reihenschaltung hingegen ist die Ladung Q auf allen Einzelkondensatoren gleich, da alle vom selben Ladestrom I durchflossen sind. Die an der Ersatzkapazität anliegende Spannung ergibt sich nach der Maschenregel zu

$$U = \frac{Q}{C_{\text{ers}}} = U_1 + U_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = \frac{Q}{\frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}} \Rightarrow C_{\text{ers}} = \frac{1}{\sum_i 1/C_i} \quad (2.72)$$

Die Ersatzkapazität ist somit kleiner als die kleinste Einzelkapazität.

Bei Wechselströmen und transienten Ladevorgängen ist die Ladung auf einem Kondensator – und damit die Spannung – zeitabhängig. Ersetzt man in (2.70) die Ladung Q durch das Zeitintegral über den auf den Kondensator geflossenen Strom $I(t)$, so erhält man die **Kondensatorgleichung**¹⁸⁾:

$$U(t) = \frac{1}{C} \cdot \int I(\tau) d\tau \quad (2.73)$$

Die reine Kapazität C ist eine idealisierte Beschreibung von Kondensatoren. Tatsächlich weisen reale Kondensatoren weitere Eigenschaften auf, die durch das Ersatzschaltbild in Bild 2.32a beschrieben werden:

¹⁸⁾ Zum Verständnis der Kondensatorgleichung hilft eine hydraulische Analogie: Die Füllhöhe h eines zylindrischen Eimers mit dem Querschnitt A hängt vom zugeführten Flüssigkeitsvolumen V ab ($h = V/A$). Das Volumen ergibt sich aus dem Zeitintegral über den Volumenstrom Q (s. Abschnitt 2.1.1). Die Analogie ist jetzt leicht zu erkennen: $h \rightarrow U, A \rightarrow C, V \rightarrow Q, Q \rightarrow I$ (s. Beispiel 2.11).

Als „elektrifizierte“ oder auch „alternative Antriebe“ bezeichnet man Fahrzeugantriebe, die nicht ausschließlich auf der klassischen Antriebskette Verbrennungsmotor–Getriebe–Achsgtriebe und den üblichen Kraftstoffen Benzin/Diesel basieren. Dazu kommen elektrische Maschinen oder alternative Kraftstoffe zum Einsatz. Diese alternativen Antriebe können unsere Abhängigkeit von Erdöl mildern und zur Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen.

Für die unterschiedlichen Anwendungsfelder in der Fahrzeugtechnik wird es unterschiedliche alternative Antriebsformen geben. Insbesondere bei Nutzfahrzeugen werden aufgrund des Produktivitätsdrucks andere Randbedingungen zu beachten sein als bei Personenkraftwagen oder Leicht-/Ultraleichtfahrzeugen. Der Fahrzeugtechnik-Ingenieur sollte mittels detaillierter Modellbildung und Simulation von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben Nutzen und Kosten dieser neuen Fahrzeuge aussagekräftig quantifizieren können.

Das vorliegende Kapitel befasst sich daher zunächst mit der Modellbildung, wendet diese zuerst auf reine mit Verbrennungs- und Elektromotor angetriebene Fahrzeuge an und analysiert in der Folge durch die weitere Modifikation des Längsmodells parallel hybridisierte Fahrzeuge.

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels

- kennen Sie den Aufbau von Fahrzeug-Längsmodellen sowie beispielhafte Lastzyklen;
- können Sie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor oder alternativem Elektroantrieb modellieren und praxisnah simulieren;
- können Sie ein Fahrzeug mit Parallel-Hybridantrieb modellieren und praxisnah simulieren;
- haben Sie eine Übersicht über die Betriebsarten und können die Strategien zur Betriebspunktoptimierung qualitativ erläutern;
- können Sie die Kraftstoff-Einsparpotenziale abhängig vom Hybridisierungsgrad und der Akkugröße für unterschiedliche Anwendungen quantifizieren;
- kennen Sie wesentliche elektrifizierte Mikromobilitätsalternativen.

7.1 Fahrzeug-Längsmodell

Die quantitative Beschreibung des Fahrverhaltens in Richtung des beabsichtigten Freiheitsgrades wird als Längsdynamik bezeichnet. Der prinzipielle Aufbau des Längsmodells zeigt eine gewisse Verwandtschaft zu den zuvor behandelten Antriebs- und Servoachsmodellen. Im Grunde genommen ist ein Fahrzeug ja auch eine Linearachse – nur mit wesentlich ungenauerer Führung durch die Reifen. Die diesem prinzipiellen Längsmodell zugrunde gelegten Submodelle zu Fahrer, Antrieb und Last werden in den nachfolgenden Abschnitten detailliert erläutert.

7.1.1 Prinzipieller Aufbau des Längsmodells

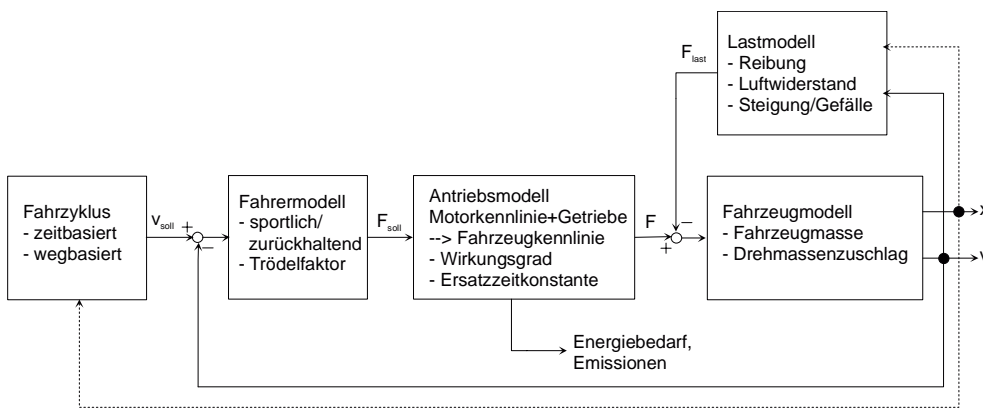


Bild 7.1 Prinzipieller Aufbau eines Fahrzeug-Längsmodells

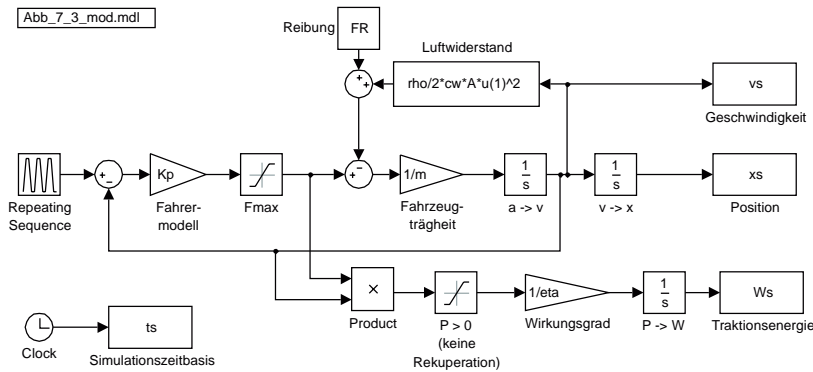
Ein Fahrzeug kann als geschwindigkeitsgeregelte Linearachse aufgefasst werden, bei der der Fahrer die Sollgeschwindigkeit v_{soll} mit der am Tacho angezeigten Ist-Geschwindigkeit v vergleicht und dementsprechend Gas gibt oder bremst. Der Fahrer kann mit einem PI-Regler modelliert werden. Diese geforderte Stellgröße F_{soll} wird vom Antrieb und der Bremsanlage zeitverzögert und begrenzt in die tatsächliche Stellgröße F umgesetzt. Die auf das Fahrzeug wirkenden Lasten F_{last} verfälschen die Stellgröße. Die Summe dieser Kräfte bewegt das Fahrzeug, das als doppeltintegrierende Regelstrecke nachgebildet werden kann.

Für die Führungsgrößen können die an Rollenprüfständen typischerweise verwendeten zeitbasierten Fahrzyklen (z. B. der Neue Europäische Fahrzyklus –NEFZ) vorgegeben werden. Stehen Fahrdaten von realen Messfahrten zur Verfügung, so können diese Daten auch als wegbasierte Sollwerte vorgegeben werden. Durch die Berücksichtigung der Streckentopografie sowie realen Anfahr- und Bremsvorgängen ist der damit ermittelte Energiebedarf wesentlich realistischer.

Die diesem prinzipiellen Längsmodell zugrunde gelegten Submodelle zu Fahrer, Antrieb und Last werden in den folgenden Abschnitten detailliert erläutert.

Ein einfaches **Fahrzeug-Längsmodell** kann bereits mit vergleichsweise geringem Aufwand in MATLAB/Simulink implementiert werden, wie dies in Bild 7.2 dargestellt ist.

Das hier dargestellte Simulationsbeispiel basiert auf dem in Abschnitt 7.2 detaillierter behandelten Smart-E, der ganz typisch für einen Kleinwagen ist. Das Lastmodell berücksichtigt Reibung und Luftwiderstand (s. u.), das Antriebsmodell wird sehr vereinfacht als Stellgrößensättigung vorgegeben.



```
% Abb_7_3_dat.m Einfaches Fahrzeug-Längsmodell
% Simulink-Modell: Abb_7_3_mod.mdl
%
clear all
% Sollwerte
Tsoll=[0 10 20 30 40]; % s Zeitbasis
vsoll=[0 10 10 0 0]/3.6; % km/h -> m/s Sollgeschwindigkeit
% Modellparameter E-Smart Roadster
m=1300; % kg Fahrzeugträgheit
Fmax=2500; % N Maximalkraft
rho=1.3; % kg/m^3 Dichte Luft
cw=0.42; % Luftwiderstandsbeiwert
A=1.6; % m^2 Querschnittsfläche
FR=80; % N Reibung
eta=0.8; % Wirkungsgrad
Kp=500; % Ns/m Fahrermodell
% Simulationsparameter
simulation_opt=simset('Solver','ode5','FixedStep',1e-2);
Tsim=max(Tsoll); % Simulationszeit
% Simulationsstart
[x,y,t]=sim('Abb_7_3_mod',Tsim,simulation_opt);
% Darstellen
figure(1); title('Einfaches Fahrzeug-Längsmodell')
subplot(3,1,1); hold off; plot(Tsoll,vsoll,'k--'); hold on;
plot(ts,vs,'k')
xlabel('t in s'); ylabel('v in m/s'); legend('Soll','Ist',1);
axis([0 max(Tsoll) 0 1.1*max(vs)]);
subplot(3,1,2); plot(ts,xs,'k'); xlabel('t in s'); ylabel('x in m');
axis([0 max(Tsoll) 0 1.1*max(xs)]);
subplot(3,1,3); plot(ts,Ws,'k'); xlabel('t in s'); ylabel('W in Ws');
% Verbrauchsabschätzung
n=length(Ws); % Länge des Ergebnisvektors
Ws_end=Ws(n); % Energiebedarf der Strecke
W_100=Ws_end/3.6e6*100e3/xs(n) % in kWh / 100 km
```

Bild 7.2 Einfaches Fahrzeug-Längsmodell in MATLAB/Simulink implementiert

Die hier noch sehr einfach gehaltenen Sollwerte sehen eine langsame Fahrzeugbewegung mit sehr zurückhaltender Beschleunigung und Verzögerung vor. Stellgröße und Geschwindigkeit werden, bewertet mit dem Antriebswirkungsgrad, zur mechanisch angeforderten Fahrleistung umgerechnet. Da dieses Fahrzeug zunächst nicht generativ bremsen kann, werden die positiven Leistungsanteile zum Energiebedarf aufintegriert, die Bremsleistung geht verloren.

Bild 7.3 zeigt das Simulationsergebnis für diese Schleichfahrt. Nach der Simulation (s. M-File) kann der Energiebedarf in kWh je 100 km umgerechnet werden. Die hier ermittelten 4,3 kWh/(100 km) entsprechen einem Kraftstoffbedarf von ca. 1,3 Liter/(100 km).

Bereits dieses einfache Kleinwagen-Längsmodell macht deutlich, dass ein 1-Liter-Auto eine echte Herausforderung bleibt.

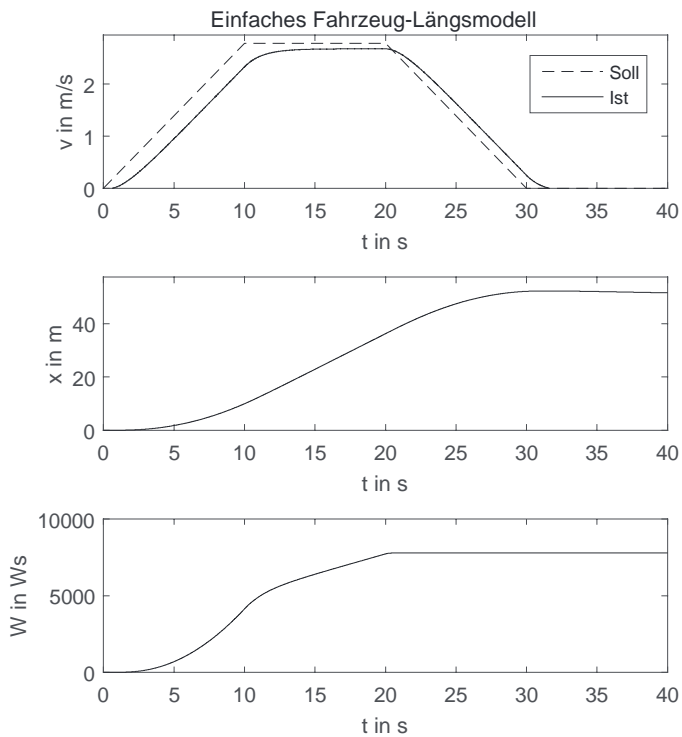


Bild 7.3 Simulationsergebnis für eine Schleichfahrt (MATLAB-Ausgabe:
 $W_{100} = 4,3 \text{ kWh}/100 \text{ km}$)

In den nachfolgenden Abschnitten wird dieses Längsmodell schrittweise detailliert und erweitert, um die Fahrgrenzen und den Energiebedarf von modernen Kraftfahrzeugen schließlich sehr realitätsnah ermitteln zu können.

7.1.2 Zugkraft und Lastmodell

Die zur Bewegung eines Fahrzeuges erforderliche Kraft wird in der Fahrzeugtechnik als Zugkraft F_{zug} bezeichnet. Sie setzt sich aus Luftwiderstand, Steigungswiderstand, Reibung und Beschleunigungswiderstand zusammen. Bild 7.4a zeigt den Angriffspunkt dieser Kräfte am Fahrzeug. Nur die d'Alembert'sche Trägheitsreaktion und die Hangabtriebskraft F_H setzen exakt am Schwerpunkt des Fahrzeuges an. Die Rollreibung F_R setzt an den Rädern an. Der Kraftangriffspunkt des Luftwiderstandes F_W hängt von der Karosserieform und den Strömungsverhältnissen ab.

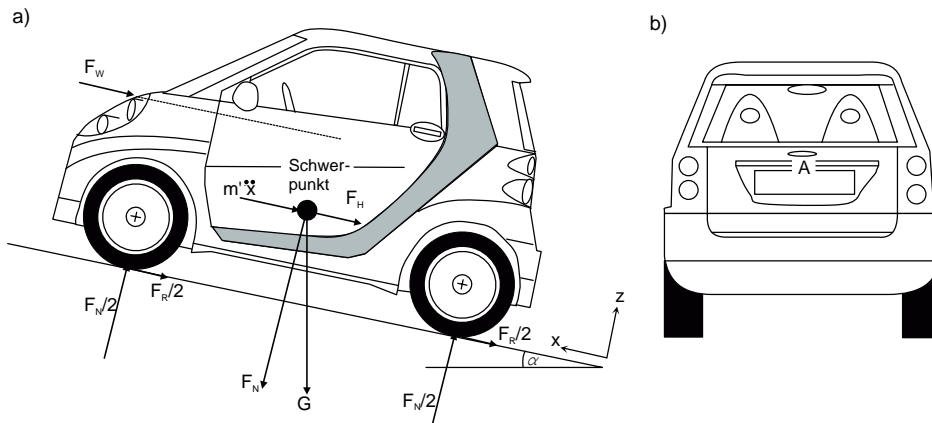


Bild 7.4 a) Angriffspunkte verschiedener Lasten am Fahrzeug [14]
b) Querspanfläche zur Luftwiderstandsermittlung

Für das Längsmodell können diese Kräfte jedoch mit ausreichender Näherung als direkt auf den Schwerpunkt wirkend angenommen werden. Die **Zugkraft** ergibt sich somit zu:

$$F_{\text{zug}} = F_R + F_W + F_H + m' \cdot \ddot{x} \quad (7.1)$$

Die überschlägige Ermittlung der Zugkraftanteile wird nachfolgend genauer ausgeführt.

$$\text{Reibungskraft: } F_R = f \cdot F_N = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \approx f \cdot m \cdot g \quad (7.2)$$

$\alpha \ll 1$

mit f Rollreibungsbeiwert (Reifenart, Reifendruck und Fahrbahn),
 F_N Normalkraft,
 m Fahrzeugmasse,
 g Fallbeschleunigung.

Die Reibung in den Motor- und Getriebelagern wird bei der Zugkraft nicht berücksichtigt, diese Verluste sind in den Antriebs- und Getriebewirkungsgraden (siehe nachfolgende Abschnitte) enthalten.

$$\text{Luftwiderstandskraft: } F_W \approx \frac{\rho}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot v^2 \quad (7.3)$$

mit c_W Luftwiderstandsbeiwert (im Windkanal ermittelt),
 A Querspanfläche (s. Bild 7.4b),
 ρ Luftdichte (ca. 1,3 kg/m³).

$$\text{Hangabtriebskraft: } F_H = m \cdot g \cdot \sin \alpha \stackrel{\alpha < 1}{\approx} m \cdot g \cdot \alpha \quad (7.4)$$

Anstelle des Steigungswinkels α wird in der Fahrzeugtechnik meist die Steigung p in Prozent angegeben. Die Steigung p beschreibt den Quotienten aus Höhendifferenz und horizontaler Fahrstrecke. 5% Steigung (d. h. $p = 0,05$) bedeuten somit einen Anstieg von 5 m auf eine Strecke von 100 m. 100% Steigung ($p = 1$) entsprechen einem Winkel von $\alpha = 45^\circ$.

Typische Steigungen sind:

Autobahnen	< 4 %
Bundesstraßen	< 5 %
Landstraßen	< 6,5 %
Kreisstraßen	< 10 %
Stadtstraßen	< 7 % (Sammelstraßen)
	< 15 % (Wohnstraßen)

Auffahrten und Kurvenstücke mit mehr als 20% Steigung sind auf befestigten Straßen sehr selten (Ausnahme: Alpenstraßen).

Für die Beschleunigungsreaktion müssen alle gekoppelten Trägheiten des Fahrzeuges berücksichtigt werden. Dies sind neben der Fahrzeugeigenmasse m auch die Motor- und Getriebeträgheit J_M sowie die Radträgheit J_R :

$$m' = \lambda \cdot m = m + n \cdot \frac{J_R}{r^2} + J_M \cdot \frac{\ddot{u}^2}{r^2} \quad (7.5)$$

mit r Radradius,
 \ddot{u} Getriebeübersetzung von Motorwelle zu Rad,
 n Anzahl der Räder.

In der Fahrzeugtechnik wird anstelle der Motor- und Radträgheiten gern mit dem Drehmassenzuschlag λ gearbeitet. Bei Pkw liegt dieser Faktor typischerweise bei 1,1 (höchster Gang) bis 1,5 (erster Gang).

In der Literatur wird die Zugkraft auch oft so dargestellt, dass Steigung und Beschleunigung zusammengefasst werden, um eine möglichst einfache **Lastkennliniendarstellung** für statische Betrachtungen zu erhalten:

Sachwortverzeichnis

A

Absorption 134
Abtastzeit 238
Admittanz 94
Akkumodell 311
Alterung 59
Anfangsbedingung 110
Anfangssteigung 111
Anfangswert 115
Anti-Reset-Windup 282
Antriebsanpassung 221
Antriebsfrequenzgang 128
Äquipotenziallinie 55
Arbeitspunkt 235
Asynchronmaschine 204
Außenläufer 192
Autotuning 238

B

Bader 45
Bandpass 100
Batterie 15
Beharrungszustand 139
Betriebsart 301
Bewegungswandler 221
B-H-Kennlinie 68
Bildbereich 115
Bildraum 116
BLDC-Motor 192
Blindleistung 91, 102, 214
Blindleistungskompensation 103
Blockschaltbild 148

Bode-Diagramm 100
Bode-Plot 125, 154
Boost 302
Bordnetz 15
Bremskraft 285
Bürstenlos 192

C

Clarke-Park-Transformation 248
CO₂-Emission 296
Coulomb 53

D

Dämpfung 122
Dämpfungswinkel 245
DCDC-Wandler 51
Dielektrizitätszahl 56
Differenzialgleichung 109
Diode 30, 81, 113
Drain 62
Drehfeld 202
Drehmassenzuschlag 277
Drehstrom 212
Durchflutungsgesetz 67
Durchlassbereich 102
Durchschlag 55

E

effektive Geschwindigkeit 295
effektives Gefälle 316

Effektivwert 89, 105
EFU-Diode 83
Eigenfrequenz 123, 242, 244
Eigenschwingungsform 131
Eigenvektor 131
Eigenwert 111, 130
Eigenwertproblem 130
Eingangsvariable 132
Einmassenschwinge 122
Einschwingverhalten 124
Einstellregel 239, 267
Einzelwirkung 42
Eisenblechpaket 83
Eisensättigung 219
Elektrolyt 57
Emission 134
Endwert 115
Endzustand 111
Energie 78
Energiedichte 16
Energiespeicher 110
Energiewende 296
Erdknoten 20, 137
Erregerstrom 190, 213
Ersatzschaltbild 58, 68, 97, 209
Ersatzspannungsquelle 38
Ersatzstromquelle 37
Ersatzträgheit 267
Ersatzwiderstand 26
Ersatzzeitkonstante 240, 256

F

Fahrroboter 282
Fahrzeugkennlinie 291
Faraday 64
Federkraft 122
Feldeffekt-Transistor 61
Feldkonstante 53, 65
Feldlinie 55
feldorientierte Regelung 249
Feldschwächbereich 212, 253
Feldschwächung 218
Feldstärke 53
Ferrit 68

ferromagnetisch 66
FFT 153
Filter 100
Flächenschubkraft 219
Flussdichte 56
Flusslinie 72
Flussröhre 55
Flussverkettung 180, 193
Folgeverhalten 256
Fourier 104
Frequenz 98, 115
Frequenzbereich 105
Frequenzgang 100, 125, 154
Führungsgröße 273
Führungsgrößengenerator 255
Funktion 164

G

Gate 62
Gegeninduktion 77
Generator 49, 189
Generatorbetrieb 187
Gesamtträgheit 243
Geschwindigkeitsregler 240
gleichphasig 90
Gleichstrommaschine 179
Gleichungssystem 45
Gleitreibung 168
Grenzfrequenz 100, 102
Grenzgefälle 315
Grundschiwingung 105

H

Halbleiter 23
Hangabtriebskraft 278
Hauptdiagonalelement 46
Hauptfluss 97
Henry 78
Hilfe-Funktion 161
Hintransformation 114
Hochpass 95
Hochsetzsteller 81
Hybridfahrzeug 299

Hybridisierungsgrad 300
 hydraulischer Kreis 16
 Hydrozylinder 17

I

I-Anteil 237
 ideale Spannungsquelle 47
 Identifikation 152
 IFFT 153
 Impedanz 94
 Impulshammer 125
 Inbetriebnahme 238
 Induktion 65
 Induktionsgesetz 75
 Induktivität 77, 110
 Innenwiderstand 187

K

Kachelofenkonstante 136
 Käfigläufer 204
 Kapazität 57
 kaskadiert 257
 Kennlinie 235
 Kippmoment 205, 213
 Kippschlupf 210
 Kirchhoff 24, 138
 Klirrfaktor 105
 Kloss'sche Formel 210
 Knoten 20
 Knotenpotenzialspannung 45
 Knotenpotenzialverfahren 44, 95, 171
 Knotenregel 25, 138
 Koerzitivfeldstärke 68, 220
 Kohleschichtwiderstand 24
 Kommentar 163
 Kommutierung 183, 193
 Kompensation 236
 Kondensator 57
 Konvektion 134
 Korrespondenz 108, 115
 Kräftegleichgewicht 122
 Kraftwirkung 83
 Kurzschluss 38, 97

L

Labornetzgerät 36
 Ladeendspannung 190
 Ladestrom 190
 Ladung 53
 Ladungsträger 18
 Lageregler 254
 Lagerreibung 198
 Längsdynamik 273
 Laplace 114
 Lastfrequenzgang 128
 Lastmoment 235
 Lautsprecher 109
 Leerlauf 38, 185
 Leerlaufdrehzahl 185
 Leerlaufdruck 16
 Leerlaufgeschwindigkeit 120, 181
 Leerlaufspannung 20
 Lehr'sches Dämpfungsmaß 123
 Leistung 21
 Leistungsanpassung 35
 Leistungsfaktor 103
 Leistungsfluss 222
 Leitwertmatrix 45
 Lenz'sche Regel 75
 Lichtmaschine 189
 Lichtquanten 40
 Lkw 296
 Lorentz-Kraft 65, 87, 181
 Lösung 110
 Lüfterleistung 191
 Luftspaltinduktion 72
 Luftwiderstand 276
 Luftwiderstandsbeiwert 277

M

Magnetfeld 64
 magnetischer Fluss 67
 magnetischer Kreis 66
 magnetischer Widerstand 68
 Maschenregel 25
 Massenmatrix 130
 mathematisches Modell 150
 MATLAB 157

Matrizen 159
Maximalgeschwindigkeit 297
Maximalkraft 181
Maximalleistung 185
Maxwell 53
M-File 162
Minstdrehzahl 190
Mitteldruck 280
mittleren Geschwindigkeit 295
Modaltransformation 132
mode 131
Modellbildung 146
Modellparameter 163
Motorbetrieb 187
Motorkennlinie 181, 291
Motorkonstante 180

N

Nachstellzeit 237, 245
Nebenelement 46
NEFZ 282
Nennpunkt 185
Nennspannung 235
Nordpol 69
Nullstellenfrequenz 128, 244
Nuten 83
Nutzfahrzeug 309

O

Oberschwingung 105
Ohm 21
Operationsverstärker 51
Originalraum 116
Outrunner 192

P

Parallelhybrid 299
Parallelschaltung 25
Periodendauer 186
Permanentmagnet 68
Permeabilitätszahl 65
Permittivitätszahl 56

Phasenplan 147
Phasenschieber 214
Phasenverschiebung 90
physikalisches Modell 28, 87, 147
Plattenkondensator 54
plot 162
Plug-in-Hybrid 304
PMSM 214
Pole 122, 242
Polradwinkel 218
Potenzial 20
Potenziometer 24, 257
Probeladung 55
Proportionalanteil 237
Pulsweitenmodulation 62, 112, 186, 215

Q

Quadranten 187
Quellenvektors 45
Querspanntfläche 277, 314

R

Raumladungszone 30
Rechte-Hand-Regel 66
Regelgesetz 245, 256
Regelstrecke 273
Regler 273
Reibmoment 189
Reibung 149, 168
Reifenreibung 314
Reihengesetzmäßigkeit 220
Reihenschaltung 26
Rekuperation 293, 302
Reluktanzmotor 86
Remanenzinduktion 68
Resonanzfrequenz 128, 130
Ringkernspule 79
Rollreibung 276
Rücktransformation 114
Ruheinduktion 75

S

Sättigung 66, 72
 Schaltbild 28
 Scheinleistung 103
 Schleppfehler 255
 Schlupf 205
 Script-Datei 162
 Selbstinduktion 77
 Selbstinduktionsspannung 90
 Seltenerdsmagnet 68
 sensorlos 194
 serielle Hybride 299
 Siemens 22
 Signal 104
 Simulationswerkzeug 157
 Simulink 158, 165
 Softwarewerkzeug 156
 Solarmodul 41
 Solarzelle 40
 Source 62
 Spannung 20
 Spannungsanpassung 36
 Spannungskonstante 180
 Spannungsquelle 19, 33
 Spannungssteuerung 235
 Spannungsteiler 26, 39, 94
 Spektrum 105, 152
 Sprung 110
 Spule 77
 Starrkörper 131
 Starthilfe 28
 Steifigkeit 124
 Steifigkeitsmatrix 130
 Steigfähigkeit 297
 Steigung 277
 Steigungswiderstand 276
 Stellgröße 273
 Stellgrößenbegrenzung 150
 Steuerstrategie 307
 Stillstand 185
 Streufluss 97
 Stromquelle 37
 Stromregelkreis 237
 Stromrippel 113
 Stromteiler 27

Südpol 69
 Superposition 41
 Synchronmaschine 212
 Systemzeitkonstante 111

T

Tauchspulmotor 71, 119, 172, 180
 technische Stromrichtung 19
 Temperatur 134
 Temperaturkoeffizient 23
 Tesla 65, 88
 Thermalanalyse 133
 Thermisches Ersatzschaltbild 198
 Tiefpass 94
 Tiefpassfilter 240
 Tilgerfrequenz 128
 Toleranzklassen 24
 Toolboxen 164
 Torquemotor 193
 Totzeit 237
 Trägheitsverhältnis 243
 Trägheitsverteilung 242
 Transformation 107
 Transformator 76, 97
 Transistor 81
 Transistorbrücke 186
 Trödel-Filter 281

U

Überlagerung 41
 Übertrager 76, 96
 Übertragungsfunktion 98, 115, 122, 154,
 167, 281
 Umformer 199
 Umgebungstemperatur 134
 Ummagnetisierungsverlust 184, 190,
 208
 Umrichter 211

V

V2G 291
 Validierung 154

Vektorregelung 247
Verbrauchsabschätzung 295
Verbrauchskennfeld 278
Verstärkungsfaktor 47
Vierpol 53, 76
Volt 19
Volumenstrom 17, 285
Vorsteuerung 255
Vorwiderstand 186

W

Wandler 82
Wärmeabfuhrvermögen 135
Wärmekapazität 136 f.
Wärmeleistung 134
Wärmestrahlung 134
Wärmewiderstand 133
Wechselspannung 89
Weicheisen 66
Wicklungstemperatur 198
Widerstand 22
Windungszahl 96

windup 246
Wirkleistung 102
Wirkungsgrad 183, 185, 291
Wirkungsgradkennfeld 306
Wirkzusammenhang 147
WLTP 282
Workspace 161
Wurzelortskurve 242

Z

Zahnbandantrieb 223
Zeiger 92, 105
Zeitbereich 105
Zeitkonstante 111, 117
Zener-Diode 33
Zugkraft 276
Zündanlage 83
Zustandsdarstellung 139
Zustandsvariable 133
Zweimassenschwinger 127
Zwischenkreisspannung 186
Zylinderkondensator 56