Elementare RC- und RL-Glieder

1. Der Stromfluß durch einen Kondensator

Abb. 1.1 veranschaulicht einen Kondensator, der durch Anschalten an eine Spannungsquelle geladen und anschließend durch Anschalten an einen Lastwiderstand entladen wird.

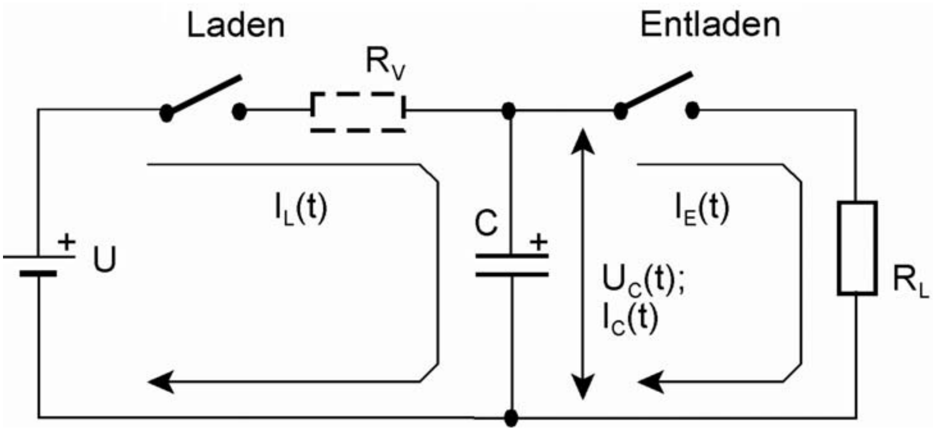

Abb. 1.1 Laden und Entladen eines Kondensators (1). Prinzipschaltung. R_V - zusammengefaßter Vorwiderstand (= Summe aller ohmschen Widerstände, durch die der Strom $I_L(t)$ fließt); R_L - Lastwiderstand; $I_L(t)$ - Ladestrom; $I_E(T)$ - Entladestrom; $U_C(t)$ - Spannung über Kondensator; $I_C(t)$ - Strom durch Kondensator.

Laden
Das einfache Verbinden des Kondensators mit einer Spannungsquelle – ohne jeglichen weiteren Widerstand dazwischen – führt zum augenblicklichen Aufladen auf die Quellenspannung U. In der Theorie fließt ein Stromimpuls mit Dauer Null und Amplitude Unendlich, der die Ladung C • U auf die Elektroden des Kondensators transportiert. Im Augenblick des Einschaltens wirkt der Kondensator somit als Kurzschluß. Ist er vollständig aufgeladen, stellt er im Grunde nur noch einen offenen Kontakt dar.

Tatsächlich gibt es aber keinen Widerstand Null. Vielmehr wird die maximale Stromstärke durch parasitäre Widerstände begrenzt (Innenwiderstand der Spannungsquelle, Ersatzserienwiderstand des Kondensators). Viele Anwendungsschaltungen enthalten zudem Widerstandsbauelemente im Stromweg. In Abb. 1.1 wurden alle diese Widerstände im Vorwiderstand R_V zusammengefaßt. Unter der Annahme, der ideale Kondensator sei zunächst ein Kurzschluß, kann der Strom $I_L(t)$ nicht weiter ansteigen als bis auf den Höchstwert $\frac{U}{R_V}$. Danach fällt er gemäß einer Exponentialfunktion bis auf Null ab. Gleichzeitig nähert sich die Spannung $U_C(t)$ über dem Kondensator der Quellspannung U an (Abb. 1.2a; Tabelle 1.1).

Der geladene Kondensator
Wird nach dem Laden der linke Schalter in Abb. 1.1 wieder geöffnet, so ist der Kondensator praktisch ein freistehender Energiespeicher, an dessen Elektroden die Spannung U anliegt.

Entladen
Wird der Kondensator mit einem Lastwiderstand verbunden, so fließt die Ladung ab. Da die Spannung $U_C(t) = U$ anliegt, nimmt der Entladestrom $I_E(t)$ zunächst seinen Höchstwert $\frac{U}{R_L}$ an. Danach fällt er zusammen mit der Spannung $U_C(t)$ gemäß einer Exponentialfunktion bis auf Null ab (Abb. 1.2b; Tabelle 1.1).

Die Zeitkonstante
Das Produkt aus Widerstands- und Kapazitätswert entscheidet über den Verlauf der Exponentialfunktionen (vgl. Tabelle 1.1). Es wird deshalb als Zeitkonstante τ bezeichnet:

$$\tau = R \cdot C$$

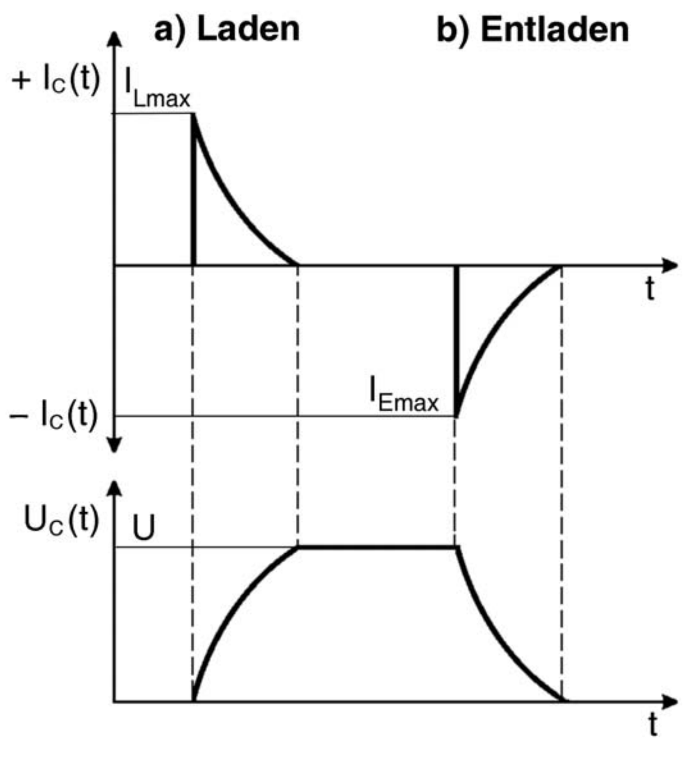

Abb. 1.2 Strom und Spannung beim Laden und Entladen. Der Strom kann sich nahezu sprunghaft ändern, die Spannung nicht.

Laden	**Entladen**
$U_C(t) = U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$	$U_C(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$
$I_L(t) = \frac{U}{R_V} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$	$I_E(t) = -\frac{U}{R_L} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$
$\tau = R_V \cdot C$ (Zeitkonstante)	$\tau = R_L \cdot C$ (Zeitkonstante)

Tabelle 1.1 Laden und Entladen eines Kondensators. Stombegrenzung beim Laden durch Vorwiderstand R_V, beim Entladen durch Lastwiderstand R_L.

Allgemeine Zusammenhänge:

- Durch den Kondensator fließt nur dann ein Strom, wenn sich die Ladung ändert. Je größer die Kapazität und die Spannungsänderung, desto größer die Stromstärke.

$$I_C(t) = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU_C}{dt}$$

- An den Elektroden eines Kondensators kann nur dann eine Spannung anliegen, wenn er geladen ist oder aufgeladen wird. Der fließende Strom führt die Ladungsträger zu, die sich im Laufe der Zeit auf den Kondensatorplatten ansammeln. Je größer die Kapazität, desto mehr Ladungsträger müssen zufließen, um eine bestimmte Spannung zustande zu bringen. Ein bestimmter Zufluß an Ladungsträgern (= Strom) ergibt bei geringerer Kapazität eine höhere Spannung und umgekehrt.

$$U_C(t) = \frac{1}{C} \int I_C dt$$

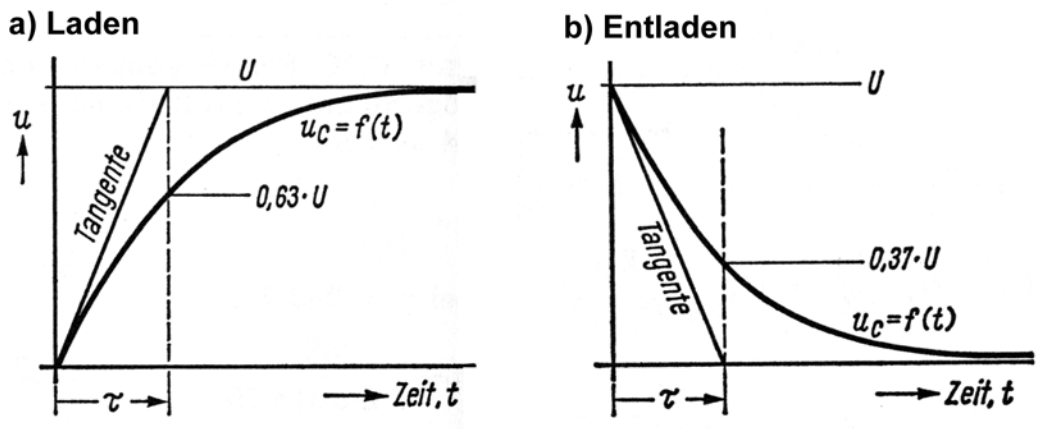

Abb. 1.3 Der Spannungsverlauf beim Laden und Entladen.

Laden
Der Kondensator ist entladen (u_C = 0). Wird die die Reihenschaltung von Widerstand R und Kondensator C mit der Spannungsquelle verbunden, so wird die Spannung u_C über dem Kondensator nach einer Exponentialfunktion ansteigen (erst schnell, dann immer langsamer). In der Theorie wird der Endwert (u_C = U) erst bei t = ∞ erreicht (also nie).

Typische Zeitpunkte beim Laden:

- nach der Zeit τ ist der Kondensator auf 63 % der Ausgangsspannung aufgeladen (0,63 U),
- nach der Zeit 2 τ ist der Kondensator auf 86 % der Ausgangsspannung aufgeladen (0,86 U),
- nach der Zeit 4 τ ist der Kondensator auf 98 % der Ausgangsspannung aufgeladen (0,98 U),
- nach der Zeit 7 τ weicht die Spannung über dem Kondensator weniger als 100 ppm von U ab.

Die Tangente im Punkt t = 0 schneidet die 100 %-Linie im Abstand τ.

Entladen (1)
Der Kondensator ist (praktisch) voll geladen (u_C = U). Er wird über den Widerstand R entladen. Die Spannung u_C über dem Kondensator wird nach einer Exponentialfunktion abfallen (erst schnell, dann immer langsamer). In der Theorie wird der Endwert (u_C = 0) erst bei t = ∞ erreicht (also nie).

Typische Zeitpunkte beim Entladen:

- nach der Zeit τ ist der Kondensator auf 37 % der Ausgangsspannung entladen (0,37 U),
- nach der Zeit 2 τ ist der Kondensator auf 14 % der Ausgangsspannung entladen (0,14 U),
- nach der Zeit 4 τ ist der Kondensator auf 2 % der Ausgangsspannung entladen (0,02 U),
- nach der Zeit 7 τ weicht die Spannung über dem Kondensator weniger als 100 ppm von 0 V ab.

Die Tangente im Punkt t = 0 schneidet die Nullinie im Abstand τ.

2. Zum Verhalten einfacher RC-Glieder

Wir betrachten einfache Reihenschaltungen aus Widerstand und Kondensator (RC-Glieder), die mit Spannungssprüngen und mit Impulsen beaufschlagt werden (Abb. 2.1).

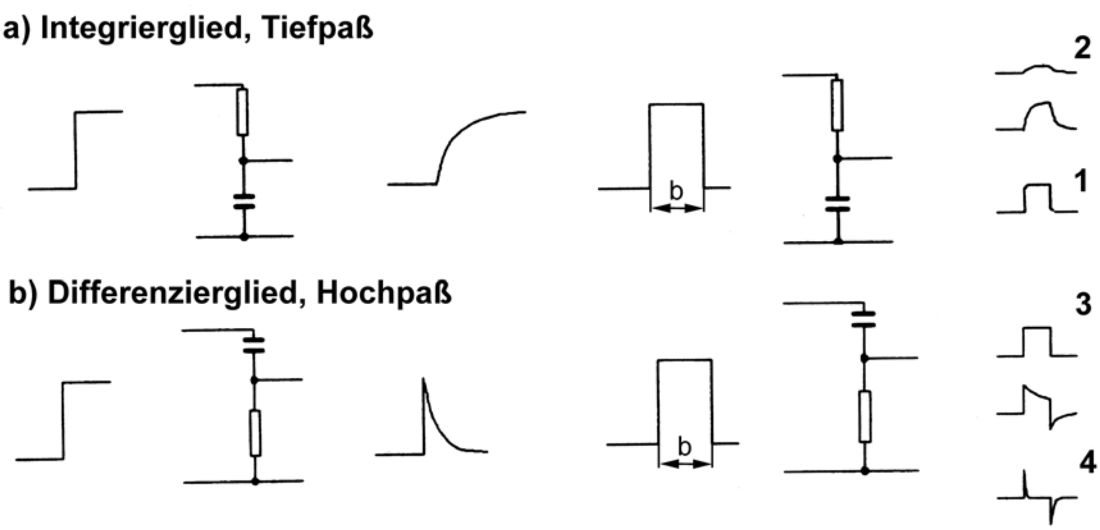

Abb. 2.1 Zum Verhalten einfacher C-Glieder. Ganz rechts: Impulsformen, die sich bei verschiedenen Verhältnissen von Zeitkonstante τ und Impulsbreite b ergeben. Jeweils oben: τ : t groß (τ >> b), jeweils unten: τ : t klein (τ < b).

Das Verhalten hängt offensichtlich von der Reihenfolge der Zusammenschaltung ab:

a) Die Ausgangsspannung wird über dem Kondensator abgenommen. Der Spannungsverlauf entspricht Abb. 1.2. Aus einem Spannungssprung wird ein allmähliches Ansteigen bzw. Abfallen. Ist der Impuls viel länger als die Zeitkonstante (1), so wird er nahezu unverfälscht weitergegeben (Tiefpaßverhalten – breite Impulse werden durchgelassen, schmale nicht). Seine Flanken werden dabei gemäß Abb. 1.2 verformt (= verschliffen). Ist der Impuls kürzer als die Zeitkonstante (2), so hat der Kondensator nicht genug Zeit zum vollständigen Laden bzw. Entladen, so daß der Ausgangsimpuls gar nicht mehr bis zum vollen Spannungspegel hochlaufen kann (2). Eine Folge kurzer Impulse führt dazu, daß sich eine Ausgangsspannung im Sinne eines Mittelwertes einstellt (integrierende oder glättende Wirkung (Siebwirkung)).

b) Die Ausgangsspannung wird über dem Widerstand abgenommen. Da der Kondensator anfänglich ungeladen ist, wirkt er zunächst als näherungsweiser Kurzschluß. Der fließende Strom bewirkt einen Spannungssprung über dem Widerstand. Dann lädt sich der Kondensator mehr und mehr auf. Dementsprechend vermindert sich die Spannung über dem Widerstand. Ist der Impuls kürzer als die Zeitkonstante (3), so wird der Kondensator so schnell umgeladen, daß er gar keine Zeit hat, irgend etwas zu verändern. Der Impuls wird also nahezu unverfälscht weitergegeben (Hochpaßverhalten – schmale Impulse werden durchgelassen, breite nicht). Ist der Impuls viel länger als die Zeitkonstante (4), so führen beide Flanken zu Nadeln am Ausgang (differenzierende Wirkung).

Das Laden und Entladen des Kondensators vollzieht sich stets gemäß der jeweiligen Exponentialfunktion. Folgen die eingangsseitigen Spannungsänderungen so schnell aufeinander, daß sich der Kondensator nicht mehr voll auf- oder entladen kann, so ergibt sich die Ausgangsspannung aus der Aneinanderreihung der entsprechenden Funktionsabschnitte (Abb. 2.2).

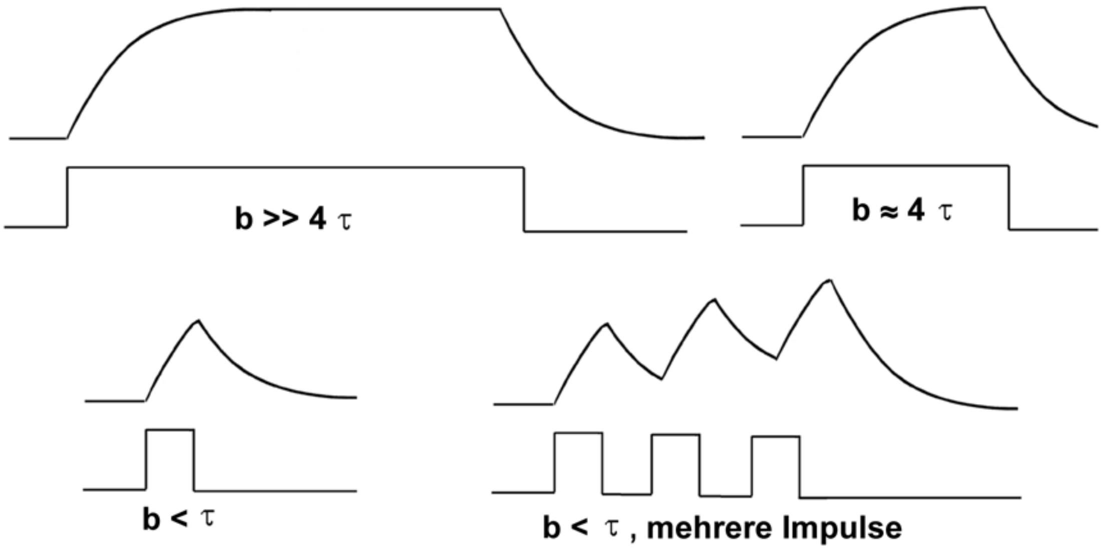

Abb. 2.2 Spannungsänderungen am Kondensator.

Anwendungsbeispiel: Impulstrennung im Fernsehempfänger (Abb. 2.3.

Zeilensynchronimpulse (HSYNC) haben eine Impulsfolgefrequenz von 15,625 kHz (Zeilendauer = 64 µs) und eine Breite von (nominell) 256 ns. Bildsynchronimpulse (VSYNC) haben bei gleicher Impulsfolgefrequenz eine Breite von (nominell) 58,24 µs. Der eigentliche Bildwechselimpuls besteht aus 5 Hauptimpulsen im Abstand von 64 µs.

a) Wirkung des Differenzierglieds: jede Impulsflanke führt zu einer Nadel. Nadeln der jeweils unnützen Polarität können mittels Diode kurzgeschlossen werden.
b) Wirkung des Integrierglieds: schmale Impulse führen zu kleine “Wellen” (der Kondensator wird kurze Zeit aufgeladen und hat dann wieder Gelegenheit, sich zu entladen. Die breiten Hauptimpulse hingegen laden den Kondensator soweit auf, daß ein Schwellwert überschritten wird. Das löst den Bildrücklauf aus.

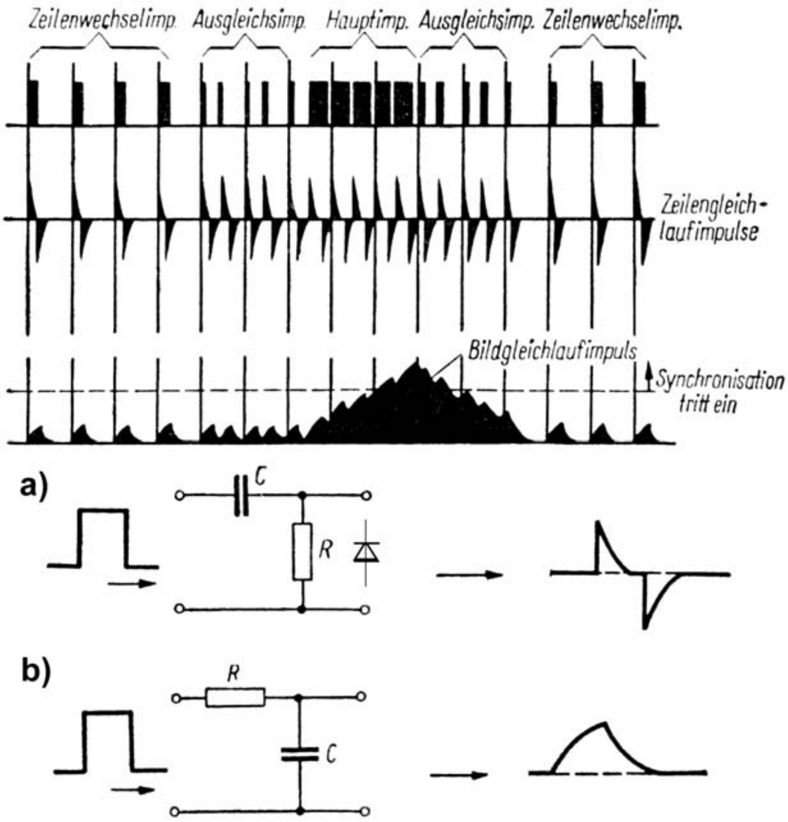

Abb. 2.3 Impulstrennung im Fernsehempfänger.

3. Der Tiefpaß (Grundlagen)

Der einfachste Tiefpaß ist nichts anderes als ein Integrierglied (Abb. 3.1). Hier interessiert aber nicht die Impulsverformung, sondern das Durchleiten von Sinusschwingungen. Viele Schaltungen können näherungsweise als einfache Tiefpässe angesehen werden.

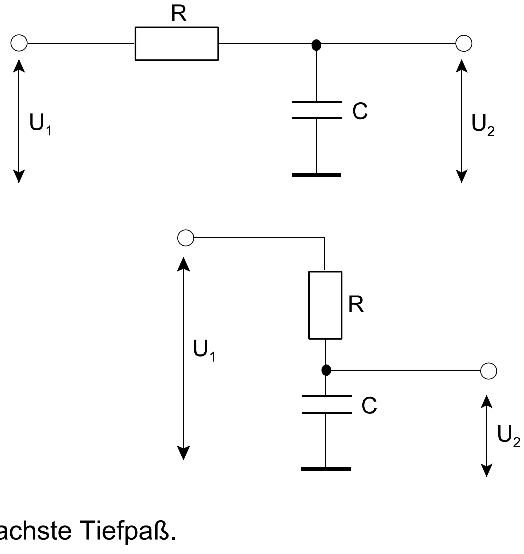

Abb. 3.1 Der einfachste Tiefpaß.

Der Übertragungsfaktor

Der Übertragungsfaktor A ist als Verhältnis von Ausgangsspannung U_2 zu Eingangsspannung U_1 definiert.

$$A = \frac{U_2}{U1}$$

A < 1 = Abschwächung; A > 1 = Verstärkung. Der RC-Tiefpaß kann nur abschwächend wirken.

Die Grenzfrequenz

Die Grenzfrequenz f_g ist definiert als jene Frequenz, bei der der Blindwiderstand ($X_C = \frac{1}{2\pi C}$) gleich dem Gleichstromwiderstand (R) ist.

$$\frac{1}{2\pi C} = R\,;\ f_g = \frac{1}{2\pi RC}$$

Der Tiefpaß als Spannungsteiler:

$$U_2 = U_1 \frac{X_C}{Z}$$

Damit wird der Übertragungsfaktor:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{X_C}{Z} = \frac{1}{2\pi fC \cdot Z} = \frac{1}{2\pi fC \cdot \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2}}$$

Die Grenzfrequenz ist gegeben, wenn R = X_C:

$$R = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{2\pi fC \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2}}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{2\pi fC \cdot \sqrt{\frac{2}{(2\pi fC)^2}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707...$$

Dieses Verhältnis entsprich einer Abschwächung um 3 dB. Deshalb heißt die Grenzfrequenz auch 3dB-Grenzfrequenz f_{3dB}:

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC}$$

Um zu bestimmen, welche Ausgangsspannung bei jeder beliebigen Frequenz abgegeben wird, setzen wir für R den Wert ein, der sich gemäß der 3-dB-Grenzfrequenz ergibt:

$$R = \frac{1}{2\pi f_{3dB} C}$$

Damit wird

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{2\pi fC \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\pi f_{3dB} C}\right)^2}}$$

Ausrechnung der Wurzel:

$$\frac{1}{4\pi^2 f^2 C^2} + \frac{1}{4\pi^2 {f_{3dB}}^2 C^2} = \frac{4\pi^2 C^2 (f^2 + {f_{3dB}}^2)}{16\pi^4 f^2 {f_{3dB}}^2 C^4}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{2\pi fC \cdot \sqrt{\frac{f^2 + {f_{3dB}}^2}{4\pi^2 f^2 {f_{3dB}}^2 C^2}}} = \frac{1}{2\pi fC \cdot \frac{\sqrt{f^2 + {f_{3dB}}^2}}{2\pi fC f_{3dB}}}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_{3dB}}{\sqrt{f^2 + {f_{3dB}}^2}}$$

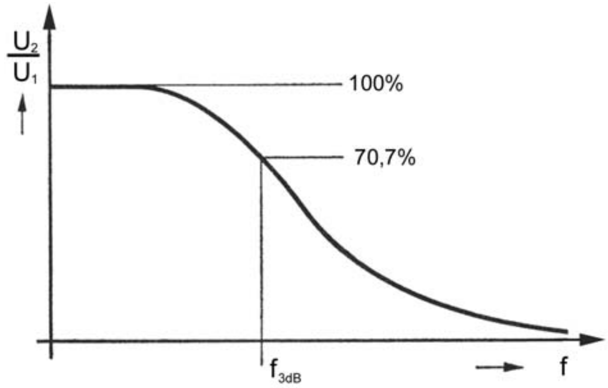

Abb. 3.2 Der Frequenzgang des einfachen Tiefpasses. Hier mit linear geteilten Skalen.

Umstellung nach f_{3dB}
Das Problem: Welche 3dB-Grenzfrequenz muß der Tiefpaß mindestens aufweisen, damit bei einer bestimmten Signalfrequenz f der Amplitudenfehler einen bestimmten Prozentwert nicht übersteigt?

Ausgangsformel: $$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_{3dB}}{\sqrt{f^2 + f_{3dB}^{\ 2}}}$$

Diese Formel ist nach f_{3dB} umzustellen. Wir setzen zunächst $U_2 / U_1 = V$ und $f_{3dB} = x$.

$$V = \frac{x}{\sqrt{f^2 + x^2}}; \quad V^2 f^2 + V^2 x^2 = x^2; \quad V^2 f^2 = x^2(1 - V^2); \quad x = \frac{V \cdot f}{\sqrt{1 - V^2}}$$

$$f_{3dB} = \frac{V \cdot f}{\sqrt{1 - V^2}}$$

$$V = 1 - \frac{\text{Amplitudenfehler [\%]}}{100}$$

Umstellung nach f
Das Problem: Wie hoch darf die Signalfrequenz f höchstens sein, wenn bei gegebener 3dB-Grenzfrequenz ein bestimmter Amplitudenfehler nicht überschritten werden soll?

Wir setzen zunächst $U_2 / U_1 = V$ und $f = x$.

$$V = \frac{f_{3dB}}{\sqrt{x^2 + f_{3dB}^{\ 2}}}; \quad V^2 x^2 + V^2 f_{3dB}^{\ 2} = f_{3dB}^{\ 2}; \quad V^2 x^2 = f_{3dB}^{\ 2} - V^2 f_{3dB}^{\ 2}; \quad x = \frac{f_{3dB}\sqrt{1 - V^2}}{V}$$

$$f = \frac{f_{3dB}\sqrt{1 - V^2}}{V}$$

$$V = 1 - \frac{\text{Amplitudenfehler [\%]}}{100}$$

Maximale Signalfrequenz	Amplitudenfehler
f_{3dB}	29%
0,5 f_{3dB}	10%
0,14 f_{3dB}	1%
0,014 f_{3dB}	0,01%

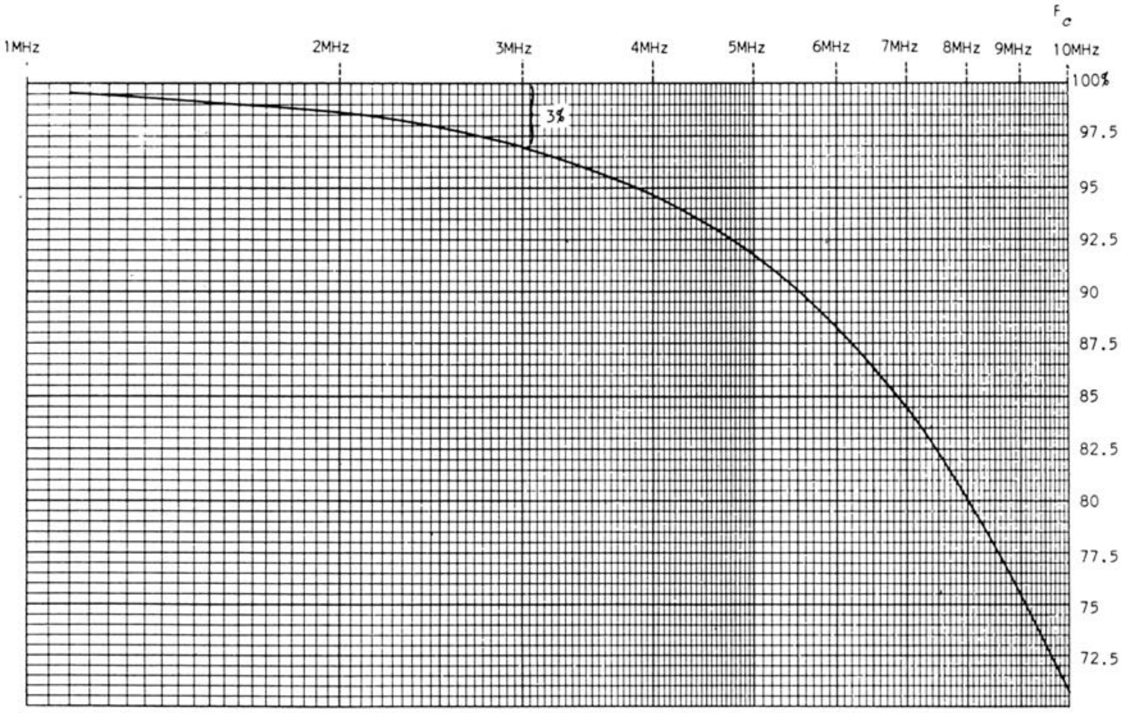

Abb. 3.3 Graphische Darstellung des Amplitudenfehlers. 3dB-Grenzfrequenz = 10 MHz.

Die Eigenanstiegszeit

Ein Tiefpaß antwortet auf eine ideale Sprungfunktion (Anstiegszeit Null) mit einer Funktion, die eine bestimmte Anstiegszeit aufweist (Eigenanstiegszeit).

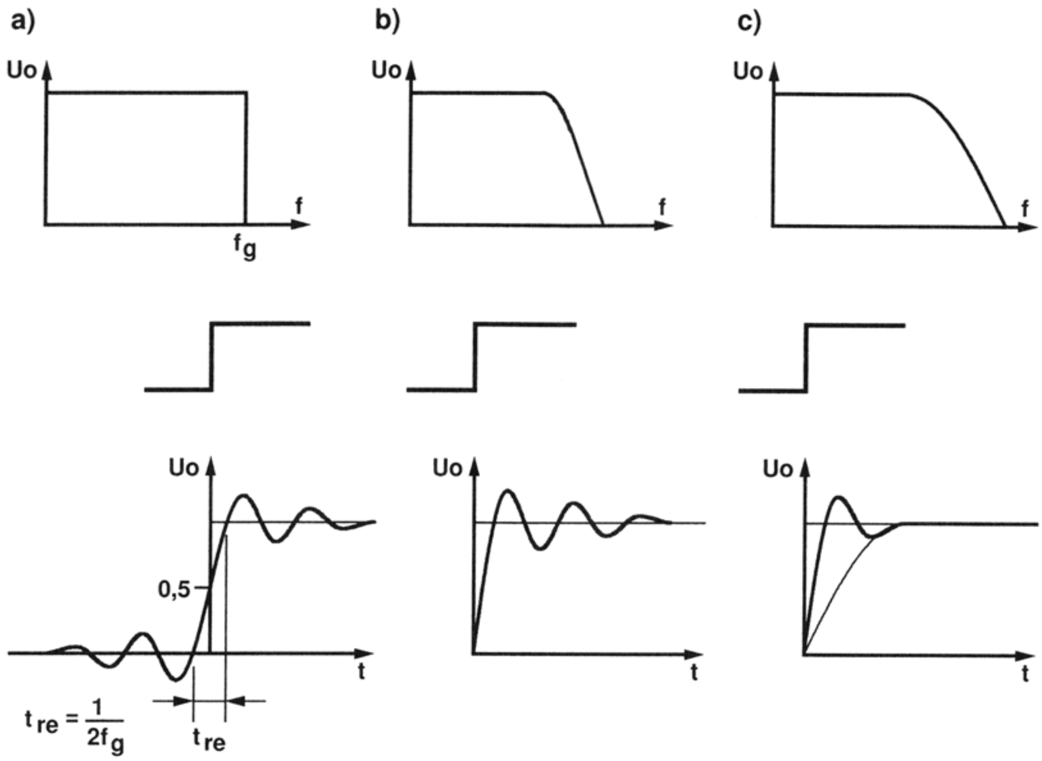

Abb. 3.4 Frequenzgang und Anstiegszeit.

a) Ein idealer Impuls am Eingang eines idealen Tiefpasses führt zu Überschwingern am Ausgang. Die mathematische Behandlung ergibt sogar ausgangsseitige Schwingungen *vor* der Impulsflanke – eine physikalische Unmöglichkeit, die sich daraus erklärt, daß hier zwei Idealisierungen (= Grenzübergänge) zusammenfallen. Es ist ersichtlich, daß auch der ideale Tiefpaß auf eine ideale Flanke (Anstiegszeit 0) mit einer Flanke antwortet, die eine endliche Anstiegszeit (Eigenanstiegszeit t_{re}) hat.

b) Ein realer Frequenzgang mit weitgehender Annäherung an das ideale Tiefpaßverhalten. Auch diese Auslegung führt zu Überschwingern.

c) Frequenzgang mit flacherem Abfall. Je nachdem, wie die Kurve im einzelnen aussieht, gibt es entweder nur ein geringes Überschwingen oder gar keines. Bei zu flachem Abfall wird aber die Eigenanstiegszeit zu groß.

Eigenanstiegszeit und 3-dB-Grenzfrequenz:

$$t_r = \frac{0{,}35}{f_{3dB}}$$

4. Der Stromfluß durch eine Spule

Abb. 4.1 veranschaulicht eine Induktivität L in einem umschaltbaren Stromkreis. Durch entsprechendes Umschalten kann veranlaßt werden, daß die Induktivität von Strom durchflossen und daß dieser Stromfluß wieder getrennt wird. Abb. 4.2 zeigt die charakteristischen Spannungs- und Stromverläufe.

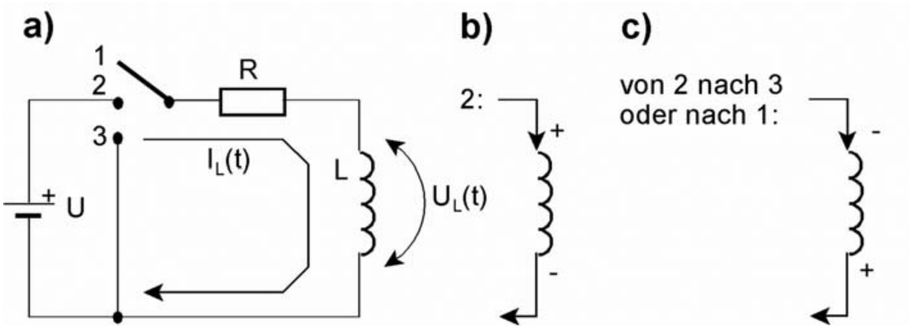

Abb. 4.1 Eine Induktivität in einem umschaltbaren Stromkreis. a) Schaltung. b) Polung der Spulenspannung bei geschlossenem Stromkreis. Die Spule ist Verbraucher (Last). c) Polung der Spulenspannung beim Öffnen oder Kurzschließen. Die Spule wird jetzt zur Spannungsquelle. 1 - Stromkreis getrennt; 2 - Stromkreis geschlossen; 3 - Induktivität über Widerstand R kurzgeschlossen. $I_L(t)$ - Stromfluß durch Induktivität; $U_L(t)$ - Spannung über Induktivität; R - zusammengefaßter Vorwiderstand (= Summe aller ohmschen Widerstände, durch die der Strom $I_L(t)$ fließt).

Einschalten

Die Induktivität ist stromlos ($I_L(t) = 0$). In Abb. 4.1 bringen wir den Schalter in Stellung 2, verbinden also die Reihenschaltung von Widerstand R und Induktivität L mit der Spannungsquelle. Der einsetzende Stromfluß bewirkt eine magnetische Durchflutung und somit einen magnetischen Fluß im Magnetkreis der Spule. Das Entstehen dieses magnetischen Flusses, also die Flußänderung von Null auf einen bestimmten Wert, verursacht eine Induktionsspannung (Selbstinduktion). Die Induktivität wirkt als zusätzliche Spannungsquelle, die genau so gepolt ist wie die eigentliche Spannungsquelle. Die Induktionsspannung will gleichsam den Stromanstieg verhindern. Die Spannung über der Induktivitität $U_L(t)$ springt zunächst auf einen Maximalwert $U_{Emax} = U$[1)]. Da die Ursache der Induktionsspannung eine Stromänderung ist, kann sie nicht ständig anliegen. Die Spannung $U_L(t)$ fällt gemäß einer Exponentialfunktion ab, der Strom steigt dementsprechend an. Ändert sich der Strom nicht mehr, wird die Spannung auf Null zurückgehen (Abb. 4.2a, Tabelle 4.1).

Der stationäre Wert des Stromes I ergibt sich aus Quellenspannung U und Widerstand R zu

$$I = \frac{U}{R}.$$

1: Im ersten Moment gibt es gar keinen Stromfluß – und damit auch keinen Spannungsabafall über dem Widerstand R. Die Spannung über der Induktivität entspricht deshalb der Quellspannung.

Ausschalten (1). Kurzschließen

Die Induktivität wird von Gleichstrom durchflossen. Um den Stromfluß abzustellen, bringen wir in Abb. 4.1 den Schalter in Stellung 3, bilden also aus Widerstand R und Spule L einen geschlossenen Stromkreis. Die Stromänderung führt zu einer Induktionsspannung, die den Stromfluß weiter aufrecht erhalten will. Die Induktivität wirkt somit als Spannungsquelle, die so gepolt ist, daß der Strom in der bisherigen Richtung weiterfließt. Die Spannung über der Induktivitität $U_L(t)$ springt zunächst auf einen Maximalwert $U_{Amax} = -U$[2] (Abschaltspannungsspitze). Da die Ursache der Induktionsspannung eine Stromänderung ist, kann diese Spannung nicht ständig anliegen. Spannung und Strom fallen gemäß einer Exponentialfunktion ab (Abb. 4.2b, Tabelle 4.1). Beide Werte sind dann auf Null abgeklungen, wenn die in der Spule gespeicherte Energie im Widerstand R in Wärme umgesetzt wurde.

Die Zeitkonstante

Der Quotient des Widerstands- und des Induktivitätswerts entscheidet über den Verlauf der Exponentialfunktionen. Er wird deshalb als Zeitkonstante τ bezeichnet:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Hierbei steht R für den Gesamtwert des im Spulenstromweg liegenden ohmschen Widerstands. Der Widerstandswert R ergibt sich als Summe aus dem Gleichstromwiderstand R_{DC} der Spule und dem Widerstandswert R_V weiterer vorgeschalteter Bauelemente:

$$R = R_{DC} + R_V$$

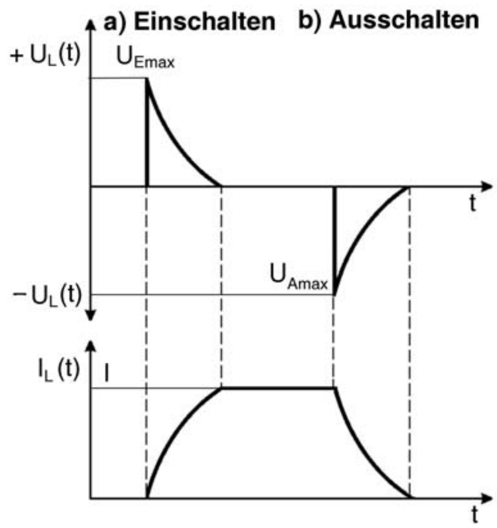

Abb. 4.2 Strom und Spannung beim Ein- und Ausschalten. Die Spannung kann sich nahezu sprunghaft ändern, der Strom nicht.

2: Im ersten Moment fließt der bisherige (stationäre) Strom I = U/R weiter. Über dem Widerstand R ergibt sich somit ein Spannungsabfall I • R = U. Da die Spule als Spannungsquelle wirkt, muß die Quellspannung U_{Amax} den gleichen Betrag haben. Das umgekehrte Vorzeichen folgt aus der beibehaltenen Stromrichtung (vgl. Abb. 4.1c).

Einschalten	Ausschalten
$U_L(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$	$U_L(t) = -U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$
$I_L(t) = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$	$I_L(t) = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$

Tabelle 4.1 Ein- und Ausschalten einer Induktivität. Strombegrenzung durch Vor- bzw. Lastwiderstand R

Ausschalten (2). Trennen

Um den Stromfluß abzustellen, bringen wir in Abb. 4.1 den Schalter von Stellung 2 wieder in Stellung 1. Die Spule hängt also gleichsam in der Luft. In der Theorie bewirkt die unendlich schnelle Stromänderung eine unendlich hohe und unendlich kurze Abschalt-Spannungsspitze. In der Praxis entsteht eine sehr hohe Spannungsspitze (bis zu mehreren kV). Hierbei wird die in der Spule gespeicherte Energie so umgesetzt, wie dies die jeweilige Schaltungsanordnung zuläßt (Funkenüberschlag, Durchbruch im Leistungsbauelement o. dergl.). Die Höhe der Spannungsspitze hängt von der gespeicherten Energie und von der Stromänderung ab. Die maximale Amplitude U_{Amax} ergibt sich aus dem Induktionsgesetz:

$$U_{Amax} = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \approx L \cdot \frac{I}{t_{off}}$$

(t_{off}= Ausschaltzeit der Schaltstufe.)

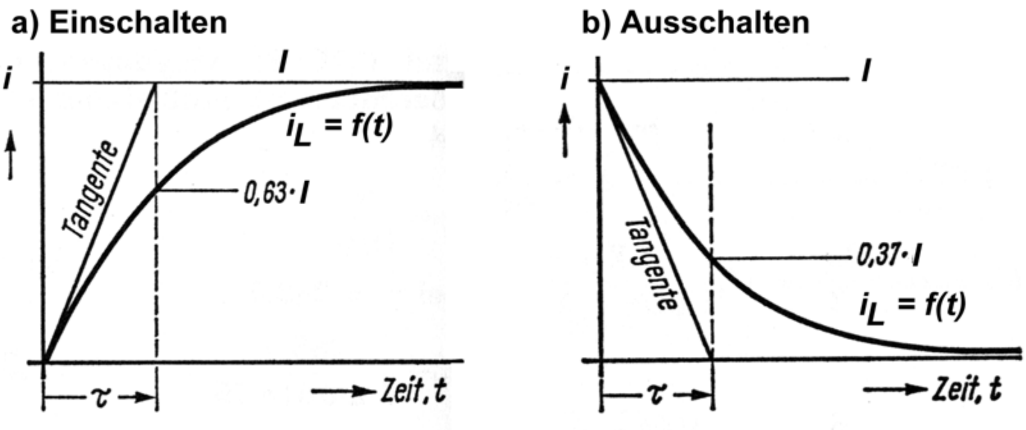

Abb. 4.3 Der Stromverlauf beim Ein- und Ausschalten.

Einschalten

Die Spule ist stromlos ($i_L = 0$). Wird die Reihenschaltung von Widerstand R und Induktivität L mit der Spannungsquelle verbunden, so wird der durch die Spule fließende Strom i_L nach einer Exponentialfunktion ansteigen (erst schnell, dann immer langsamer). In der Theorie wird der Endwert ($i_L = I = U/R$) erst bei $t = \infty$ erreicht (also nie).

Typische Zeitpunkte beim Einschalten:

- nach der Zeit τ fließen 63 % des Dauerstromes durch die Spule (0,63 U/R),
- nach der Zeit 2 τ fließen 86 % des Dauerstromes durch die Spule (0,86 U/R),
- nach der Zeit 4 τ fließen 98 % des Dauerstromes durch die Spule (0,98 U/R),,
- nach der Zeit 7 τ weicht der Strom weniger als 100 ppm vom Dauerstrom U/R ab.

Die Tangente im Punkt t = 0 schneidet die 100%-Linie im Abstand τ.

Ausschalten (1)
Die Spule wird von Gleichstrom durchflossen (i_L = U/R). Um den Stromfluß abzustellen, wird aus Widerstand R und Spule L ein geschlossener Stromkreis gebildet. Die Stromänderung führt zu einer Induktionsspannung, die ihrerseits einen Stromfluß bewirkt. Der die Spule durchfließende Strom i_L wird nach einer Exponentialfunktion abfallen (erst schnell, dann immer langsamer). In der Theorie wird der Endwert (u_C = 0) erst bei t = ∞ erreicht (also nie).

Typische Zeitpunkte beim Ausschalten:

- nach der Zeit τ ist der Strom auf 37 % des Dauergleichstroms abgeklungen (0,37 U/R),
- nach der Zeit 2 τ ist der Strom auf 14 % des Dauergleichstroms abgeklungen (0,23 U/R),
- nach der Zeit 4 τ ist Strom auf 2 % des Dauergleichstroms abgeklungen (0,2 U/R),
- nach der Zeit 7 τ weicht der Strom als 100 ppm von 0 A ab.

Die Tangente im Punkt t = 0 schneidet die Nullinie im Abstand τ.

Ausschalten (2)
Der Stromfluß wird unterbrochen. Die Spule hängt also gleichsam in der Luft. In der Theorie bewirkt die unendlich schnelle Stromänderung eine unendlich hohe und unendlich kurze Spannungsspitze (Abschalt-Induktionsspannung). In der Praxis entsteht eine sehr hohe Spannungsspitze (bis hin zu einigen kV), die im Laufe der Zeit abklingt, und zwar nach eine Exponentialfunktion gemäß Abb. 4.2b, wobei sich die Zeitkonstante aus der Induktivität und aus den parasitären Widerständen ergibt. Die Höhe der Spannungsspitze hängt von der gespeicherten Energie und von der Geschwindigkeit der Stromänderung ab.

Die Spannung über der Spule
Wenn wir einen Impuls auf eine Spule geben, so verhält sich diese zunächst wie ein *sehr hoher Widerstand* und wird dann allmählich zum *(näherungsweisen) Kurzschluß* (es wirkt dann nur der Leitungswiderstand der Drahtwicklung). Wenn wir eine stromdurchflossene Spule abschalten, so bedeutet das wiederum eine Stromänderung. Diese führt zu einer Induktionsspannung, die gleiche Polarität hat wie die ursprünglich anliegende Spannung; es ensteht eine Abschaltspannungsspitze.

Die Abschaltspannungsspitze unterdrücken
Es gibt verschiedene Schaltungsmaßnahmen (RC-Glieder, Varistoren, Dioden usw.). Hierbei bevorzugt man das Prinzip des Kurzschließens oder Ableitens. Die Schaltmittel wirken so, daß beim Abschalten der Stromweg nicht unterbrochen, sondern noch eine gewisse Zeit geschlossen gehalten wird, so daß die in der Induktivität gespeicherte Energie abfließen kann (Freilaufschaltung; Freewheel Circuit). Im Prinzip kann – vgl. Abb. 4.2 – die Amplitude der

Abschaltspannungsspitze nicht größer sein als die Spulenspannung[3)]. Allerdings klingt auch das Magnetfeld vergleichsweise langsam ab, so daß beispielsweise ein angezogener Anker nur verzögert losgelassen wird. Ist diese Verzögerung nicht tragbar, bleibt manchmal nur der Ausweg, den Stromkreis tatsächlich abrupt zu trennen und Leistungsbauelemente einzusetzen, die die dann entstehende hohe Abschaltspannungsspitze aushalten.

Die Polarität der Induktionsspannung

Wenn eine Induktionsspannung entsteht, wird die Spule zur Spannungsquelle. Beim Einschalten soll der Stromfluß verhindert werden. Die Induktionsspannung ist also genauso gepolt wie die angelegte Spannung (so daß sich die Spannungsdifferenz verringert). Beim Ausschalten soll der Stromfluß aufrecht erhalten werden. Der Strom muß also am gleichen Ende herausfließen wie bisher. Damit dreht sich die Polung um (Abb. 4.3; vgl. auch Abb. 4.1c):

a) Wird der Stromweg am negativen Ende geschaltet (also dort, wo im eingeschalteten Zustand der Strom herausfließt), so entsteht eine positive Spannungsspitze.

b) Wird der Stromweg am positiven Ende geschaltet (also dort, wo im eingeschalteten Zustand der Strom hineinfließt), so entsteht eine negative Spannungsspitze.

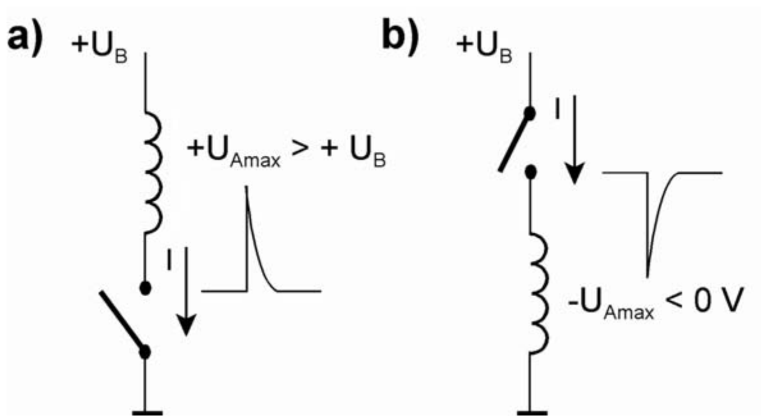

Abb. 4.4 Zur Polarität der Abschaltspannungsspitze. a) Schaltstufe an Masse (Low Side Drive), b) Schaltstufe an Betriebsspannung U_B (High Side Drive).

Wenn die Spule beim Einschalten dem Stromanstieg entgegenwirkt – wieso kommt es dann, daß Transformatoren und Elektromotoren für extrem hohe Einschaltströme geradezu berüchtigt sind? Weil es hier Fälle geben kann, in denen keine dem Stromanstieg entgegenwirkende Induktionsspannung wirksam wird. Dann ist die Spule zeitweise wirklich nur ein Draht, und der Strom wird lediglich durch den (vergleichsweise geringen) ohmschen Widerstand (Leitungswiderstand) begrenzt.Typische Betriebsfälle:

3: Aufgrund der Verzögerungszeiten im Stromweg (z. B. Durchlaßverzögerung der Freilaufdiode) können sich anfänglich höhere Spitzenwerte ergeben.

- Einschalten bei Nulldurchgang der Wechselspanung. Bei Spannung Null kann auch kein Strom fließen, folglich gibt es zunächst kein $\Delta I / \Delta t$, also auch keine Induktionsspannung. Im weiteren Verlauf ändert sich die Spannung nicht sprunghaft, sondern allmählich (Sinuskurve). Aus einer langsamen zeitlichen Änderung ($\Delta I / \Delta t$ klein) ergibt sich aber auch nur eine geringe Induktionsspannung.
- Beim Einschalten eines Elektromotors dreht sich zunächst nichts. Folglich gibt es anfänglich auch keine Gegeninduktionsspannung (Gegen-EMK).