dummy

Student Group

First Name	Surname	Matrikel Nr.

Table of Contents

Formelsammlung EEE1 / EEE2 – Mehrspaltig

Konventionen:
DC-Größen: U,I,R
zeitabhängige Größen: $u(t),i(t)$
AC-Zeiger: $\underline U,\underline I,\underline Z$
Effektivwerte: U,I
$\omega=2\pi f$, $\varepsilon=\varepsilon_0\varepsilon_r$, $\mu=\mu_0\mu_r$

Konstanten

Größe	**Wert**	**Größe**	**Wert**
Elementarladung	$e=1.602176634\cdot10^{-19}\,\mathrm C$	Avogadro-Konstante	$N_A=6.022142\cdot10^{23}\,\mathrm{mol^{-1}}$
Vakuumpermeabilität	$\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}\,\mathrm{Vs/(Am)}$	Vakuumpermittivität	$\varepsilon_0=8.854187817\cdot10^{-12}\,\mathrm{As/(Vm)}$
Thermische Spannung	$U_T=\frac{kT}{q}\approx25.85\,\mathrm{mV}$	Kreisfrequenz	$\omega=2\pi f$, $T=\frac1f$

EEE1

Grundgrößen, Widerstände, Leistung

Thema	**Formel 1**	**Formel 2**	**Formel 3**	**Hinweis**
Ladung	$Q=ne$			$[Q]=\mathrm C=\mathrm{As}$
Strom	$I=\frac Qt$	$i(t)=\frac{\mathrm dq}{\mathrm dt}$		$[I]=\mathrm A$
Spannung	$U=\frac{\Delta W}{Q}$	$U=\varphi_1-\varphi_2$		$[U]=\mathrm V$
Arbeit / Energie	$W=UQ$	$W=UIt$		$[W]=\mathrm J=\mathrm{Ws}$
Leistung	$P=\frac{\mathrm dW}{\mathrm dt}$	$P=UI$	$W=Pt$	$[P]=\mathrm W$
Leistung am Widerstand	$P=UI$	$P=RI^2$	$P=\frac{U^2}{R}$	DC
Ohmsches Gesetz	$R=\frac UI$	$U=RI$		$[R]=\Omega$
Leitwert	$G=\frac1R$	$G=\frac IU$		$[G]=\mathrm S$
Differentiell	$r=\frac{\mathrm du}{\mathrm di}$	$g=\frac{\mathrm di}{\mathrm du}$		Nichtlineare Kennlinien
Leiter	$R=\rho\frac lA$	$G=\kappa\frac Al$	$\kappa=\frac1\rho$	ρ: spezifischer Widerstand
Temperatur	$R(\vartheta)=R_0(1+\alpha\Delta\vartheta+\beta\Delta\vartheta^2+\dots)$			Näherung

Kirchhoff, Teiler, Netzwerke

Thema	**Formel 1**	**Formel 2**	**Formel 3**	**Hinweis**
Knotenregel	$\sum_k I_k=0$			
Maschenregel	$\sum_k U_k=0$			
Widerstände in Reihe	$R_\mathrm{eq}=\sum_kR_k$	$U_k=IR_k$		Gleicher Strom
Widerstände parallel	$G_\mathrm{eq}=\sum_kG_k$	$\frac1{R_\mathrm{eq}}=\sum_k\frac1{R_k}$	$R_\mathrm{eq}=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}$	Letzte Formel für zwei Widerstände
Spannungsteiler unbelastet	$U_1=U\frac{R_1}{R_1+R_2}$	$U_2=U\frac{R_2}{R_1+R_2}$		
Spannungsteiler belastet	$R_1\parallel R_L=\frac{R_1R_L}{R_1+R_L}$	$U_1=U\frac{R_1\parallel R_L}{R_2+(R_1\parallel R_L)}$	$U_1=\frac{U}{1+\frac{R_2}{R_L}+\frac{R_2}{R_1}}$	Last R_L parallel zu R_1

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Stromteiler	$I_1=I\frac{R_2}{R_1+R_2}$	$I_2=I\frac{R_1}{R_1+R_2}$	$I_k=I\frac{G_k}{\sum_iG_i}$	
Brückenabgleich	$\frac{R_1}{R_2}=\frac{R_3}{R_4}$	$R_1R_4=R_2R_3$		

Quellen, Ersatzschaltungen, Anpassung

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Lineare Quelle	$U=U_0-R_iI$	$I=I_K-G_iU$		
Leerlauf / Kurzschluss	$U_0=U_\mathrm{OC}$	$I_K=I_\mathrm{SC}$		
Innenwiderstand	$R_i=\frac{U_\mathrm{OC}}{I_\mathrm{SC}}$	$G_i=\frac{I_\mathrm{SC}}{U_\mathrm{OC}}$		
Thevenin / Norton	$U_0=I_KR_i$	$I_K=\frac{U_0}{R_i}$		Thevenin: U_0 in Reihe mit R_i; Norton: I_K parallel zu R_i
Superposition				Nur linear; Spannungsquelle deaktivieren: Kurzschluss; Stromquelle deaktivieren: Leerlauf; Leistungen nicht direkt addieren
Wirkungsgrad	$\eta=\frac{P_\mathrm{out}}{P_\mathrm{in}}$	$\eta=\frac{R_L}{R_i+R_L}$		Zweite Formel für Quelle mit Last
Leistungsanpassung	$R_L=R_i$	$\varepsilon=\frac{R_LR_i}{(R_L+R_i)^2}$	$\varepsilon_\mathrm{max}=\frac14$	Maximale Lastleistung bei $R_L=R_i$

Elektrisches Feld, Flussdichte, Kapazität

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Coulomb-Kraft	$\vec F_{12}=\frac1{4\pi\varepsilon}\frac{Q_1Q_2}{r^2}\vec e_r$			
Feld Punktladung	$\vec E=\frac1{4\pi\varepsilon}\frac Q{r^2}\vec e_r$	$\vec F=q\vec E$		$[E]=\mathrm{V/m}$
Spannung im Feld	$U=\int_1^2\vec E\cdot\mathrm d\vec s$	$\Delta W=q\int_1^2\vec E\cdot\mathrm d\vec s$		
Homogenes Feld	$E=\frac Ud$			Plattenfeld
Ladungsdichten	$\rho_l=\frac Ql$	$\rho_A=\frac QA$	$\rho_V=\frac QV$	
Ladungsdichten differentiell	$\rho_l=\frac{\mathrm dQ}{\mathrm dl}$	$\rho_A=\frac{\mathrm dQ}{\mathrm dA}$	$\rho_V=\frac{\mathrm dQ}{\mathrm dV}$	
Flussdichte	$\vec D=\varepsilon\vec E$	$\vec D=\varepsilon_0\varepsilon_r\vec E$	$\vec E=\frac{\vec D}{\varepsilon_0\varepsilon_r}$	
Gaußsches Gesetz	$Q=\oint_A\vec D\cdot\mathrm d\vec A$			
Platte	$D=\frac QA$	$E=\frac D\varepsilon$		
Koax	$D(r)=\frac Q{2\pi lr}$	$E(r)=\frac Q{2\pi\varepsilon lr}$		
Kapazität	$C=\frac QU$	$Q=CU$		
Plattenkondensator	$C=\varepsilon_0\varepsilon_r\frac Ad$			
Zylinder / Koax	$C=\varepsilon_0\varepsilon_r\frac{2\pi l}{\ln(R_o/R_i)}$			
Kugelkondensator	$C=4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r\frac{R_iR_o}{R_o-R_i}$			
Kondensatoren parallel	$C_\mathrm{eq}=\sum_kC_k$	$U_1=U_2=\dots=U$	$Q_\mathrm{ges}=\sum_kQ_k$	
Kondensatoren in Reihe	$\frac1{C_\mathrm{eq}}=\sum_k\frac1{C_k}$	$Q_1=Q_2=\dots=Q$	$U_\mathrm{ges}=\sum_kU_k$	
Energie Kondensator	$W_C=\frac12CU^2$	$W_C=\frac12QU$	$W_C=\frac{Q^2}{2C}$	

Stromdichte und Leitung im Feld

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Stromdichte	$\vec J=\sigma\vec E$	$\sigma=\frac1\rho$		
Strom durch Fläche	$I=\iint_A\vec J\cdot\mathrm d\vec A$			
Spannung entlang Weg	$U=\int_1^2\vec E\cdot\mathrm d\vec s$			

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Leitwert aus Feldgrößen	$G=\frac IU$	$G=\frac{\iint_A\vec J\cdot\mathrm d\vec A}{\int_1^2\vec E\cdot\mathrm d\vec s}$		
Platte	$G=\sigma\frac Al$	$R=\frac l{\sigma A}$		
Koax	$G=\frac{2\pi\sigma l}{\ln(r_a/r_i)}$			

Magnetisches Feld, Fluss, Induktivität

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Langer Leiter	$H_\varphi(r)=\frac I{2\pi r}$			
Leiterinneres	$H(r)=\frac{I_0r}{2\pi r_L^2}$			Für $r<r_L$
Magnetische Spannung	$V_m=\int\vec H\cdot\mathrm d\vec s$			
Durchflutung	$\Theta=\oint\vec H\cdot\mathrm d\vec s$	$\Theta=NI$	$\Theta=\sum_kN_kI_k$	Zweite Formel für Spule
Lange Spule	$H=\frac{NI}{l}$			
Ringspule / Toroid	$H=\frac{NI}{2\pi R}$			
Flussdichte	$\vec B=\mu\vec H$	$\mu=\mu_0\mu_r$		
Lorentzkraft	$\vec F=I\vec l\times\vec B$	$F=IlB\sin\alpha$		
Magnetischer Fluss	$\Phi=\iint_A\vec B\cdot\mathrm d\vec A$	$\oint_A\vec B\cdot\mathrm d\vec A=0$		$[\Phi]=\mathrm{Wb}=\mathrm{Vs}$
Induktion	$u_\mathrm{ind}=-\frac{\mathrm d\Phi}{\mathrm dt}$	$u_\mathrm{ind}=-N\frac{\mathrm d\Phi}{\mathrm dt}$		Zweite Formel für N Windungen
Reluktanz	$R_m=\frac\Theta\Phi$	$R_m=\frac l{\mu A}$		Zweite Formel für homogenen Abschnitt
Magnetischer Kreis	$\sum_k\Phi_k=0$	$\sum_k\Theta_k=0$	$\Theta=R_m\Phi$	
Luftspalt	$R_{m,\delta}=\frac\delta{\mu_0A}$			
Induktivität	$L=\frac\Psi i$	$\Psi=N\Phi$	$u_L=L\frac{\mathrm di}{\mathrm dt}$	
Gegenspannung	$u_\mathrm{ind}=-L\frac{\mathrm di}{\mathrm dt}$			Lenzsches Vorzeichen
Lange Spule	$L=\mu_0\mu_r\frac{N^2A}{l}$			
Ringspule	$L=\mu_0\mu_r\frac{N^2h(r_o-r_i)}{\pi(r_o+r_i)}$			
Induktivitäten	$L_\mathrm{eq}=\sum_kL_k$	$\frac1{L_\mathrm{eq}}=\sum_k\frac1{L_k}$		Reihe; parallel
Energie Spule	$W_L=\frac12LI^2$			

Operationsverstärker, ideal

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Idealer OPV	$A_0\to\infty$	$R_\mathrm{in}\to\infty$	$R_\mathrm{out}\to0$	
Gegenkopplung	$u_+=u_-$	$i_+=i_-=0$		
Invertierend	$U_a=-\frac{R_2}{R_1}U_e$	$A_v=-\frac{R_2}{R_1}$		
Nichtinvertierend	$U_a=(1+\frac{R_2}{R_1})U_e$	$A_v=1+\frac{R_2}{R_1}$		
Spannungsfolger	$U_a=U_e$	$A_v=1$		
Addierer invertierend	$U_a=-R_f(\frac{U_1}{R_1}+\frac{U_2}{R_2}+\dots+\frac{U_n}{R_n})$	$U_a=-\frac{R_f}{R}\sum_kU_k$		Zweite Formel bei gleichen Eingangswiderständen
Subtrahierer symmetrisch	$U_a=\frac{R_2}{R_1}(U_2-U_1)$			Bei $R_1=R_3$ und $R_2=R_4$

EEE2

RC-Schaltvorgänge

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Zeitkonstante	$\tau=RC$			Endzustand praktisch nach ca. 5τ
Allgemeine Lösung	$x(t)=x(\infty)+[x(0^+)-x(\infty)]e^{-t/\tau}$			System 1. Ordnung

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Laden $0\to U_s$	$u_C(t)=U_s(1-e^{-t/(RC)})$	$i_C(t)=\frac{U_s}{R}e^{-t/(RC)}$	$q_C(t)=Cu_C(t)$	
Laden bei $t=\tau$	$u_C(\tau)\approx0.632U_s$			
Entladen $U_s\to0$	$u_C(t)=U_se^{-t/(RC)}$	$i_C(t)=-\frac{U_s}{R}e^{-t/(RC)}$		
Entladen bei $t=\tau$	$u_C(\tau)\approx0.368U_s$			
Energieänderung	$\Delta W_C=\frac12C(U_1^2-U_0^2)$			
Ladezeit auf Anteil a	$a=\frac{u_C}{U_s}$	$t=-\tau\ln(1-a)$		
Entladezeit auf Anteil a	$a=\frac{u_C}{U_0}$	$t=-\tau\ln(a)$		

Wechselstrom, komplexe Rechnung, Impedanzen

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Sinus	$u(t)=\hat U\sin(\omega t+\varphi_u)$	$i(t)=\hat I\sin(\omega t+\varphi_i)$		
Effektivwert	$X_\mathrm{RMS}=\sqrt{\frac1T\int_0^T x^2(t)\,\mathrm dt}$	$U=\frac{\hat U}{\sqrt2}$	$I=\frac{\hat I}{\sqrt2}$	Letzte Formeln für Sinus
Phasenwinkel	$\varphi=\varphi_u-\varphi_i$			
Phasenlage R	$\varphi=0$			u und i in Phase
Phasenlage C	$\varphi=-90^\circ$			Strom eilt Spannung um 90° voraus
Phasenlage L	$\varphi=+90^\circ$			Spannung eilt Strom um 90° voraus
Komplexe Größe	$\underline X=Xe^{j\varphi}$	$\underline X=X(\cos\varphi+j\sin\varphi)$	$j^2=-1$	
Impedanz	$\underline Z=\frac{\underline U}{\underline I}$	$\underline Z=R+jX$	$\underline Z_\mathrm{Betrag}=\sqrt{R^2+X^2}$	Betrag hier ohne Betragsstriche wegen DokuWiki-Tabellen
Phase Impedanz	$\varphi=\arctan(\frac XR)$			
Admittanz	$\underline Y=\frac1{\underline Z}$	$\underline Y=G+jB$		
Komplexes Ohm	$\underline U=\underline Z\,\underline I$	$\underline I=\underline Y\,\underline U$		
Reihe AC	$\underline Z_\mathrm{eq}=\sum_k\underline Z_k$			
Parallel AC	$\underline Y_\mathrm{eq}=\sum_k\underline Y_k$	$\frac1{\underline Z_\mathrm{eq}}=\sum_k\frac1{\underline Z_k}$		
Spannungsteiler AC	$\underline U_1=\underline U\frac{\underline Z_1}{\underline Z_1+\underline Z_2}$			
Stromteiler AC	$\underline I_1=\underline I\frac{\underline Z_2}{\underline Z_1+\underline Z_2}$			

Bauteil	Impedanz	Betrag	Phase
Widerstand	$\underline Z_R=R$	R	0°
Kondensator	$\underline Z_C=\frac1{j\omega C}=-\frac j{\omega C}$	$\frac1{\omega C}$	-90°
Spule	$\underline Z_L=j\omega L$	ωL	$+90^\circ$

Komplexe Leistung

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Augenblicksleistung	$p(t)=u(t)i(t)$			
Scheinleistung	$S=UI$			
Wirkleistung	$P=UI\cos\varphi$			
Blindleistung	$Q=UI\sin\varphi$			

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Komplexe Leistung	$\underline S=\underline U\,\underline I^*$	$\underline S=P+jQ$	$\underline S=UIe^{j\varphi}$	
Leistungsdreieck	$S^2=P^2+Q^2$	$\cos\varphi=\frac PS$	$\sin\varphi=\frac QS$	

Bauteil	Wirkleistung P	Blindleistung Q	Hinweis
Widerstand	$P=I^2R=\frac{U^2}{R}$	$Q=0$	
Spule	$P=0$	$Q=I^2\omega L=\frac{U^2}{\omega L}$	Induktiv
Kondensator	$P=0$	$Q=-I^2\frac1{\omega C}=-U^2\omega C$	Kapazitiv

Filter und Grenzfrequenzen

Filter / Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Allgemein	$\underline A=\frac{\underline U_\mathrm{out}}{\underline U_\mathrm{in}}$	$A=\underline A_\mathrm{Betrag}$	$A=\frac1{\sqrt2}$	Letzte Formel bei Grenzfrequenz
RC-Tiefpass	$\underline A=\frac1{1+j\omega RC}$	$A=\frac1{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}$	$f_c=\frac1{2\pi RC}$	Ausgang am Kondensator
RC-Hochpass	$\underline A=\frac{j\omega RC}{1+j\omega RC}$	$A=\frac{\omega RC}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}$	$f_c=\frac1{2\pi RC}$	Ausgang am Widerstand
RL-Tiefpass	$\underline A=\frac R{R+j\omega L}$	$A=\frac1{\sqrt{1+(\frac{\omega L}{R})^2}}$	$f_c=\frac R{2\pi L}$	Ausgang am Widerstand
RL-Hochpass	$\underline A=\frac{j\omega L}{R+j\omega L}$	$A=\frac{\omega L/R}{\sqrt{1+(\frac{\omega L}{R})^2}}$	$f_c=\frac R{2\pi L}$	Ausgang an der Spule

RLC-Schwingkreise

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Serien-RLC	$\underline Z=R+j(\omega L-\frac1{\omega C})$			
Resonanz	$\omega_0L=\frac1{\omega_0C}$	$\omega_0=\frac1{\sqrt{LC}}$	$f_0=\frac1{2\pi\sqrt{LC}}$	
Bei Resonanz	$\underline Z=R$			Serienkreis
Güte Serienkreis	$Q=\frac{\omega_0L}{R}$	$Q=\frac1{\omega_0CR}$		
Bandbreite Serienkreis	$\Delta\omega=\frac RL$	$Q=\frac{\omega_0}{\Delta\omega}$		
Parallel-RLC ideal	$\underline Y=\frac1R+j(\omega C-\frac1{\omega L})$	$\omega_0=\frac1{\sqrt{LC}}$		

Magnetisch gekoppelte Spulen / Transformator

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Gegenseitige Induktivität	$M=k\sqrt{L_1L_2}$	$0\le k\le1$		
Gekoppelte Spulen	$u_1=L_1\frac{\mathrm di_1}{\mathrm dt}\pm M\frac{\mathrm di_2}{\mathrm dt}$	$u_2=L_2\frac{\mathrm di_2}{\mathrm dt}\pm M\frac{\mathrm di_1}{\mathrm dt}$		Vorzeichen je nach Punktkonvention
Idealer Transformator	$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}$	$\frac{I_1}{I_2}=-\frac{N_2}{N_1}$	$P_1=P_2$	

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Transformierte Last	$\underline Z'=(\frac{N_1}{N_2})^2\underline Z_L$			

Halbleiter, Diode, Gleichrichter

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Thermische Spannung	$U_T=\frac{kT}{q}$	$U_T\approx25.85\,\mathrm{mV}$		Zweite Formel bei $T\approx300\,\mathrm K$
Shockley-Gleichung	$I_D=I_S(e^{\frac{U_D}{nU_T}}-1)$			$n\approx1\dots2$
Diodenmodell	$I_D\approx0$	$U_D\approx0.7\,\mathrm V$	$U_D\approx0.2\dots0.4\,\mathrm V$	Sperre; Si; Schottky
Z-Diode	$U_D\approx-U_Z$			Durchbruch
Kleinsignalwiderstand	$r_d\approx\frac{nU_T}{I_D}$			
Einweggleichrichter ideal	$U_\mathrm{DC}\approx\frac{\hat U}{\pi}$			
Zweiweg / Brücke ideal	$U_\mathrm{DC}\approx\frac{2\hat U}{\pi}$			
Glättung	$\Delta U\approx\frac{I_L}{f_rC}$	$f_r=f$	$f_r=2f$	Einweg; Zweiweg/Brücke
Begrenzerschaltung	$u_\mathrm{out}\lessapprox U_\mathrm{ref}+U_D$	$u_\mathrm{out}\gtrapprox U_\mathrm{ref}-U_D$		Positive; negative Begrenzung

Bipolartransistor

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Ströme	$I_E=I_C+I_B$	$I_C=\beta I_B$	$I_E=(\beta+1)I_B$	
Stromverstärkung	$\alpha=\frac{I_C}{I_E}$	$\beta=\frac{I_C}{I_B}$	$\alpha=\frac{\beta}{\beta+1}$	
Basis-Emitter	$U_{BE}\approx0.7\,\mathrm V$			Silizium
Sperrbereich	$I_B\approx0$	$I_C\approx0$		NPN
Aktiver Bereich	$I_C\approx\beta I_B$			NPN
Sättigung	$U_{CE}\approx U_{CE,\mathrm{sat}}$	$U_{CE,\mathrm{sat}}\approx0.1\dots0.3\,\mathrm V$		NPN
Kleinsignal	$g_m=\frac{I_C}{U_T}$	$r_e\approx\frac{U_T}{I_E}$	$r_\pi=\frac{\beta}{g_m}$	
Emitterschaltung	$A_v\approx-g_mR_C$	$A_v\approx-\frac{R_C}{r_e+R_E}$		Ohne; mit Emittergegenkopplung

MOSFET

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Sperrbereich	$U_{GS}<U_{th}$			N-Kanal Enhancement
Linearbereich Bedingung	$U_{GS}>U_{th}$	$U_{DS}<U_{GS}-U_{th}$		
Sättigungsbereich Bedingung	$U_{GS}>U_{th}$	$U_{DS}\ge U_{GS}-U_{th}$		
Linearbereich Strom	$I_D\approx k[(U_{GS}-U_{th})U_{DS}-\frac{U_{DS}^2}{2}]$			
Sättigung Strom	$I_D\approx\frac k2(U_{GS}-U_{th})^2$			
Kanallängenmodulation	$I_D\approx\frac k2(U_{GS}-U_{th})^2(1+\lambda U_{DS})$			
Transkonduktanz	$g_m\approx\frac{2I_D}{U_{GS}-U_{th}}$			

dB und Näherungen

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
dB Spannung / Strom	$A_\mathrm{dB}=20\log_{10}(\frac{X_2}{X_1})$			
dB Leistung	$P_\mathrm{dB}=10\log_{10}(\frac{P_2}{P_1})$			

Thema	Formel 1	Formel 2	Formel 3	Hinweis
Näherungen	$e^{-1}=0.368$	$1-e^{-1}=0.632$	$\sqrt2=1.414$	
Näherungen	$\frac1{\sqrt2}=0.707$	$20\log_{10}(\frac1{\sqrt2})=-3.01\,\mathrm{dB}$		