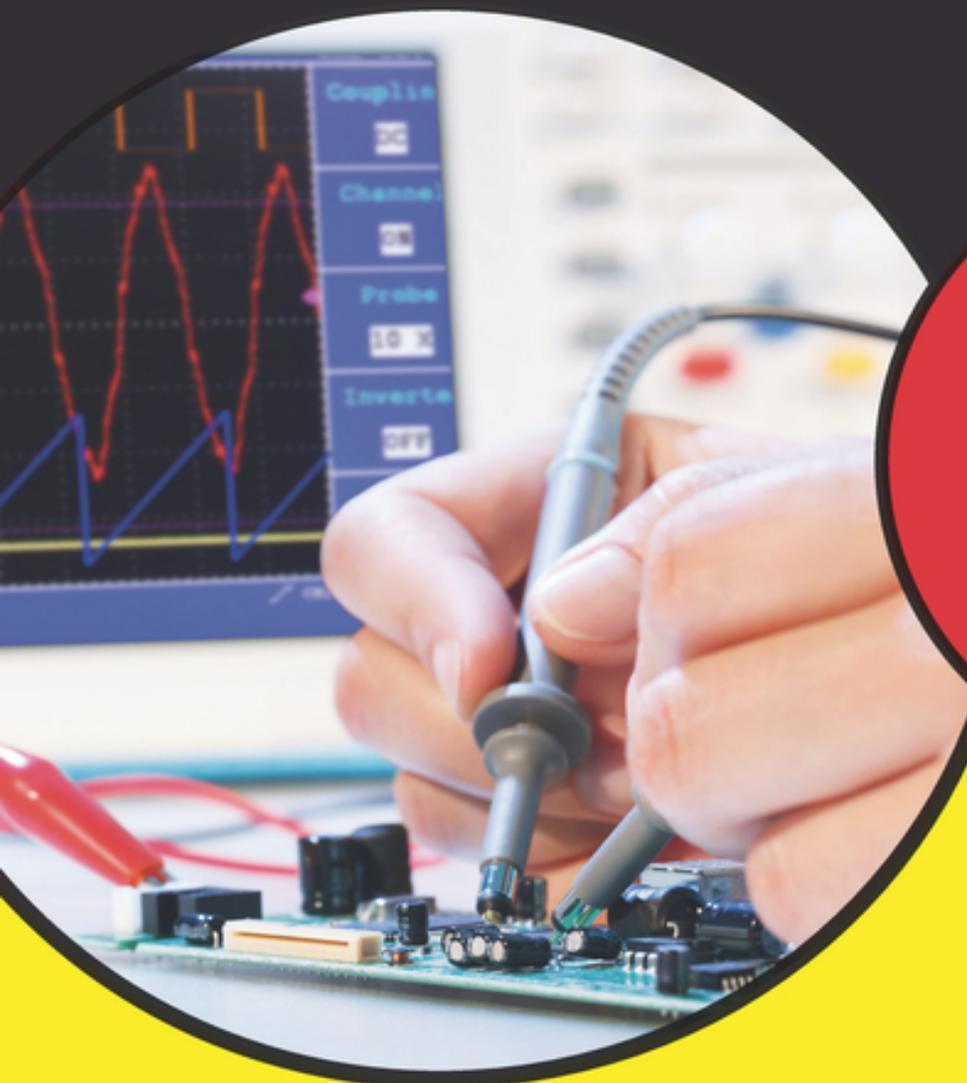


LERNEN EINFACH GEMACHT



# Wechselstrom- technik

für  
**dummies**<sup>®</sup>



Wechselgrößen  
und ihre Zusammen-  
hänge richtig verstehen

Gesetze der  
Wechselstromtechnik  
kennenlernen

Rechenbeispiele mit  
nachvollziehbaren  
Lösungen

**Michael Felleisen**

# Wechselstromtechnik für Dummies

## Schummelseite

---

### KOMPLEXE ZAHLEN

---

---

✓ Normalform:  $\underline{Z} = R + j \cdot X$

---

✓ Betrag:  $|\underline{Z}| = Z = \sqrt{R^2 + X^2}$

---

✓ Realteil:  $R = Z \cdot \cos \phi$

---

✓ Imaginärteil:  $X = Z \cdot \sin \phi$

---

✓ Winkel:  $\phi = \arctan \frac{X}{R}$

---

✓ Imaginäre Einheit:  $j = \sqrt{-1}, j^2 = -1, -j^2 = +1$

---

✓ Trigonometrische Form:  $\underline{Z} = Z \cdot \cos \phi + j \cdot Z \cdot \sin \phi$

---

✓ Exponentialform:  $\underline{Z} = Z \cdot e^{j \cdot \phi}$

---

---

# KENNWERTE SINUSFÖRMIGER WECHSELGRÖßEN

✓ Wechselspannung:  $u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0)$

✓ Periodendauer:  $T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$

✓ Frequenz:  $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2 \cdot \pi}$

✓ Kreisfrequenz:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{T}$

✓ Phasenverschiebungswinkel:  $\phi = \phi_u - \phi_i$

am Ohm'schen Widerstand  $\phi = 0^\circ$ , Strom und Spannung in Phase

an der Spule  $\phi = +\frac{\pi}{2}$ , Induktivität: Strom zu **spät!**

am Kondensator  $\phi = -\frac{\pi}{2}$ , Kondensator: Strom **vor!**

✓ Effektivwert:  $I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 \cdot dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \hat{i} = 0,707 \cdot \hat{i}$

✓ Scheitelwert (Amplitude):  $\hat{i} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff}} = 1,414 \cdot I_{\text{eff}}$

# WIDERSTAND, SPULE UND KONDENSATOR KOMPLEX

✓ Komplexer  
Widerstand:

$$\underline{Z} = \frac{u(t)}{i(t)} = R + j \cdot X = Z \cdot e^{j \cdot \phi_Z}$$

✓ Wirkwiderstand:

$$\operatorname{Re}\{\underline{Z}\} = Z \cdot \cos \phi_Z = R$$

✓ Blindwiderstand:

$$\operatorname{Im}\{\underline{Z}\} = Z \cdot \sin \phi_Z = X$$

✓ Scheinwiderstand:

$$Z = |\underline{Z}| = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \text{Impedanz}$$

✓ Phase zum  
Widerstand:

$$\phi_Z = \arctan \frac{X}{R}$$

✓ Komplexer Leitwert:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{i(t)}{u(t)} = G + j \cdot B = Y \cdot e^{j \cdot \phi_Y}$$

✓ Wirkleitwert:

$$\operatorname{Re}\{\underline{Y}\} = Y \cdot \cos \phi_Y = G$$

✓ Blindleitwert:

$$\operatorname{Im}\{\underline{Y}\} = Y \cdot \sin \phi_Y = B$$

✓ Scheinleitwert:

$$Y = |\underline{Y}| = \frac{I_{\text{eff}}}{U_{\text{eff}}} = \sqrt{G^2 + B^2} = \frac{1}{Z}$$

Admittanz

✓ Phase zum Leitwert:

$$\phi_Y = \arctan \frac{B}{G} = -\phi_Z$$

## OHM'SCHES GESETZ FÜR VERSCHIEDENE WIDERSTÄNDE

✓ Ohm'sches Gesetz:

$$\underline{U} = \underline{Z} \cdot \underline{I}$$

✓ rein Ohm'scher  
(Wirk-)Widerstand/Leitwert:

$$\underline{Z}_R = \frac{\underline{U}_R}{\underline{I}_R} = R, \quad G = \frac{1}{R}, \quad \phi_R = 0^\circ$$

✓ induktiver  
(Blind-)Widerstand/Leitwert:

$$\underline{Z}_L = \frac{\underline{U}_L}{\underline{I}_L} = j \cdot \omega \cdot L = j \cdot X_L$$

$$B_L = -\frac{1}{\omega \cdot L} = -\frac{1}{X_L}$$

$$\phi_L = +90^\circ$$

✓ kapazitiver  
(Blind-)Widerstand/Leitwert:

$$\underline{Z}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{I}_C} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = j \cdot \left(-\frac{1}{\omega \cdot C}\right) = j \cdot X_C$$

$$B_C = \omega \cdot C = -\frac{1}{X_C}$$

$$\phi_C = -90^\circ$$

## SCHALTUNGEN IN DER WECHSELSTROMTECHNIK

✓ Reihenschaltung von  $R$   
und  $L$ :

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L = \underline{Z}_R \cdot \underline{I} + \underline{Z}_L \cdot \underline{I}$$

$$U = |\underline{U}| = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{(R \cdot I)^2 + (\omega \cdot L \cdot I)^2}$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = R + j \cdot \omega \cdot L$$

$$Z = |\underline{Z}| = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}$$

$$\phi = \arctan \frac{U_L}{U_R} = \arctan \left( \frac{\omega \cdot L}{R} \right)$$

- ✓ Reihenschaltung von R und C:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_C = \underline{Z}_R \cdot \underline{I} + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}$$

$$U = |\underline{U}| = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = \sqrt{(R \cdot I)^2 + \left( -\frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I \right)^2}$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = R + j \cdot \left( -\frac{1}{\omega \cdot C} \right)$$

$$Z = |\underline{Z}| = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + \left( -\frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}$$

$$\phi = \arctan \frac{U_C}{U_R} = -\arctan \left( \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R} \right)$$

- ✓ Reihenschaltung von R, L und C:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = \underline{Z}_R \cdot \underline{I} + \underline{Z}_L \cdot \underline{I} + \underline{Z}_C \cdot \underline{I}$$

$$U = |\underline{U}| = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$

$$= \sqrt{(R \cdot I)^2 + \left\{ \left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) \cdot I \right\}^2}$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = R + j \cdot \left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)$$

$$Z = |\underline{Z}| = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + \left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}$$

$$\phi = \arctan \frac{(U_L - U_C)}{U_R} = \arctan \frac{\left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)}{R}$$

- ✓ Spannungsteiler:

$$\underline{U}_1 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \underline{U}, \quad \underline{U}_2 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot \underline{U}$$

- ✓ Parallelschaltung von R und L:

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L = \frac{U}{\underline{Z}_R} + \frac{U}{\underline{Z}_L} = \frac{1}{\underline{Z}} \cdot \underline{U} = \underline{Y} \cdot \underline{U}$$

$$I = |\underline{I}| = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R} \cdot U\right)^2 + \left(-\frac{1}{\omega \cdot L} \cdot U\right)^2}$$

$$\underline{Y} = \frac{1}{R} + j \cdot \left(-\frac{1}{\omega \cdot L}\right)$$

$$Y = |\underline{Y}| = \frac{I}{U} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(-\frac{1}{\omega \cdot L}\right)^2}$$

$$\phi = \arctan \frac{I_L}{I_R} = -\arctan \left(\frac{R}{\omega \cdot L}\right)$$

- ✓ Parallelschaltung von R und C:

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_C = \frac{U}{\underline{Z}_R} + \frac{U}{\underline{Z}_C} = \frac{1}{\underline{Z}} \cdot \underline{U} = \underline{Y} \cdot \underline{U}$$

$$I = |\underline{I}| = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R} \cdot U\right)^2 + (\omega \cdot C \cdot U)^2}$$

$$\underline{Y} = \frac{1}{R} + j \cdot \omega \cdot C$$

$$Y = |\underline{Y}| = \frac{I}{U} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega \cdot C)^2}$$

$$\phi = \arctan \frac{I_C}{I_R} = \arctan(\omega \cdot C \cdot R)$$

- ✓ Parallelschaltung von R, L und C:

$$\underline{I} = I_{-R} + I_{-L} + I_{-C} = \frac{U}{Z_R} + \frac{U}{Z_L} + \frac{U}{Z_C} = \underline{Y} \cdot \underline{U}$$

$$I = |\underline{I}| = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{R} \cdot U\right)^2 + \left\{\left(\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L}\right) \cdot U\right\}^2}$$

$$\underline{Y} = \left\{ \frac{1}{R} + j \cdot \left(\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L}\right) \right\}$$

$$Y = |\underline{Y}| = \frac{I}{U} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L}\right)^2}$$

$$\phi = \arctan \frac{(I_C - I_L)}{I_R} = \arctan \frac{\left(\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L}\right)}{G}$$

✓ Stromteiler:

$$I_{-1} = \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2} \cdot I, \quad I_{-2} = \frac{Y_2}{Y_1 + Y_2} \cdot I$$

## ERSATZZWEIPOLE

✓ Ersatz für Parallelschaltung:  $R_{\text{ers}} = \frac{G}{G^2 + B^2}, \quad X_{\text{ers}} = -\frac{B}{G^2 + B^2}$

✓ Ersatz für Reihenschaltung:  $G_{\text{ers}} = \frac{R}{R^2 + X^2}, \quad B_{\text{ers}} = -\frac{X}{R^2 + X^2}$

## LEISTUNG IM WECHSELSTROMKREIS

✓ Wirkleistung:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \phi = \frac{1}{2} \cdot \hat{u} \cdot \hat{i} \cdot \cos \phi = S \cdot \cos \phi$$

$$Q_L = S \cdot \sin \phi = \omega \cdot L \cdot I^2$$

✓ induktive Blindleistung:

✓ kapazitive Blindleistung:

$$Q_C = S \cdot \sin \phi = -\omega \cdot C \cdot U^2$$

✓ Scheinleistung:

$$S = U \cdot I$$

✓ Leistungsfaktor:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

✓ Komplexe Leistung:

$$\underline{S} = S \cdot \cos \phi + j \cdot S \cdot \sin \phi = P + j \cdot Q$$

✓ Blindleistungskompensation:  $Q_L = Q_C$

✓ Kapazität  
Parallelkompensation:

$$C_P = \frac{P_V}{U^2 \cdot \omega} \cdot [\tan(\phi_V) - \tan(\phi_K)]$$

## GRAFISCHE DARSTELLUNGEN DER FREQUENZABHÄNGIGKEIT

✓ Frequenzgang:

$$\underline{F}(j\omega) = \frac{U_A(j\omega)}{U_E(j\omega)} = \frac{U_A}{U_E} \cdot e^{j(\phi_A - \phi_E)}$$

✓ Amplitudengang (Betrag):

$$F(\omega) = \frac{U_A}{U_E}$$

✓ Phasengang (Winkel):

$$\phi(\omega) = \phi_A - \phi_E$$

✓ Amplitudengang in dB:

$$F(\omega)_{dB} = 20 \cdot \log|F(j\omega)| = 20 \cdot \log \frac{U_A}{U_E}$$

✓ Normierte Frequenz:

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_g} = \omega \cdot R \cdot C$$

## FILTERSCHALTUNGEN UND RESONANZKREISE

### ✓ RC- und RL-Tiefpassschaltungen

---

---

Frequenzgang RC-Tiefpass:  $\underline{F}(j\omega) = \frac{\underline{U}_A(j\omega)}{\underline{U}_E(j\omega)} = \frac{1}{1+j\omega \cdot R \cdot C} = \frac{1}{1+j\Omega}$

Betrag:  $F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega \cdot R \cdot C)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+\Omega^2}}$

Phase:  $\phi = -\arctan(\omega \cdot R \cdot C) = -\arctan \Omega$

Grenzfrequenz:  $\omega_{g,RC} = \frac{1}{R \cdot C}, \quad \omega_{g,RL} = \frac{R}{L}$

---

---

### ✓ RC- und RL-Hochpassschaltungen

---

---

Frequenzgang RC-Hochpass:  $\underline{F}(j\omega) = \frac{\underline{U}_A(j\omega)}{\underline{U}_E(j\omega)} = \frac{j\omega \cdot R \cdot C}{1+j\omega \cdot R \cdot C} = \frac{j\Omega}{1+j\Omega}$

Betrag:  $F(\omega) = \frac{\omega \cdot R \cdot C}{\sqrt{1+(\omega \cdot R \cdot C)^2}} = \frac{\Omega}{\sqrt{1+\Omega^2}}$

Phase:  $\phi = \frac{\pi}{2} - \arctan(\omega \cdot R \cdot C) = \frac{\pi}{2} - \arctan \Omega$

Grenzfrequenz:  $\omega_{g,RC} = \frac{1}{R \cdot C}, \quad \omega_{g,RL} = \frac{R}{L}$

---

---

### ✓ Bandpassschaltung

---

---

Frequenzgang Bandpass:  $\underline{F}(j\omega) = \frac{\underline{U}_A(j\omega)}{\underline{U}_E(j\omega)} = \frac{1}{2+j\left(\omega \cdot R \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C}\right)} = \frac{1}{2+j\left(\Omega - \frac{1}{\Omega}\right)}$

Betrag:  $F(\omega) = \frac{\omega \cdot R \cdot C}{1+(\omega \cdot R \cdot C)^2} = \frac{\Omega}{1+\Omega^2}$

Phase:  $\phi = -\arctan \frac{\left(\omega \cdot R \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C}\right)}{2} = -\arctan \frac{\left(\Omega - \frac{1}{\Omega}\right)}{2}$

Bandbreite:  $B = \omega_{go} - \omega_{gu}$

---

---

✓ Spannungsresonanz-Reihenresonanzkreis

---

---

Resonanzbedingung:  $U_L = U_C$

Widerstand:  $Z_{\text{Res}} = R$

Phase:  $\phi_{\text{Res}} = 0^\circ$

Bandbreite:  $B = f_{\text{go}} - f_{\text{gu}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{R}{L}$

Gütefaktor:  $Q = \frac{f_{\text{Res}}}{B} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$

Dämpfungsfaktor:  $d = \frac{1}{Q}$

Resonanzfrequenz:  $f_{\text{Res}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$

---

---

✓ Stromresonanz-Parallelresonanzkreis

---

---

Resonanzbedingung:  $I_L = I_C$

Bandbreite:  $B = f_{\text{go}} - f_{\text{gu}} = \frac{f_{\text{Res}}}{Q}$

Gütefaktor:  $Q = \frac{R_p}{\omega_{\text{Res}} \cdot L} = R_p \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$

---

---

## DREIPHASEN-WECHSELSTROM (DREHSTROM)

---

---

✓ Symmetrische Belastung:  $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 = \underline{Z}$

✓ Sternschaltung mit Neutralleiter

Außenleiter- und Strangspannung:  $U_A = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Str}}$

$U_{\text{Str}} = I_A \cdot Z_{\text{Str}}$

---

Außenleiterströme:

$$I_A = I_{\text{Str}}$$

Strom im Neutralleiter (symmetrische Last):  $I_{-1} + I_{-2} + I_{-3} = I_{-N} = 0$

✓ Sternschaltung ohne Neutralleiter

Sternspannung bei unsymmetrischer Last:

$$U_{-N} = \frac{U_{1N} \cdot Y_1 + U_{2N} \cdot Y_2 + U_{3N} \cdot Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3}$$

✓ Dreieckschaltung

Außenleiter- und Strangspannung:

$$U_A = U_{\text{Str}}$$

Außenleiter- und Strangströme:

$$I_A = \sqrt{3} \cdot I_{\text{Str}}$$

✓ Leistung bei Drehstrom

Scheinleistung:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

Wirkleistung:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi$$

Blindleistung:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \phi$$



Michael Felleisen

# Wechselstromtechnik

für  
**dummies**<sup>®</sup>

Fachkorrektur von Frank Thuselt  
Lektorat von Tobias Schwaibold

**WILEY**

WILEY-VCH GmbH

## **Wechselstromtechnik für Dummies**

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

1. Auflage 2021

© 2021 Wiley-VCH GmbH, Weinheim

Wiley, the Wiley logo, Für Dummies, the Dummies Man logo, and related trademarks and trade dress are trademarks or registered trademarks of John Wiley & Sons, Inc. and/or its affiliates, in the United States and other countries. Used by permission.

Wiley, die Bezeichnung »Für Dummies«, das Dummies-Mann-Logo und darauf bezogene Gestaltungen sind Marken oder eingetragene Marken von John Wiley & Sons, Inc., USA, Deutschland und in anderen Ländern.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Coverfoto: luchschenF/[stock.adobe.com](https://stock.adobe.com)

Korrektur: Claudia Lötschert

**Print ISBN:** 978-3-527-71674-6

**ePub ISBN:** 978-3-527-82553-0

# Über den Autor

---

Professor Dr.-Ing. Michael Felleisen ist für die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik an der Fakultät für Technik der Hochschule Pforzheim berufen. Nach seiner Ausbildung zum Mess- und Regelmechaniker bei der BASF studierte er Elektrotechnik mit der Vertiefung Regelungstechnik bei Prof. Dr. Dr. Otto Föllinger an der Universität (TH) Karlsruhe. Anschließend arbeitete er als Automatisierungsingenieur bei Siemens und SAP. Er promovierte am Lehrstuhl für Prozessleittechnik der RWTH Aachen bei Prof. Dr. Martin Polke, bevor er 1999 den Ruf an die Hochschule Pforzheim annahm.

Michael Felleisens Aufgabenschwerpunkte in der Lehre sind die Elektrotechnik (mit den Teilgebieten Gleichstromtechnik und Wechselstromtechnik), die Regelungstechnik, die Modellbildung sowie die Prozessleit- und Automatisierungstechnik. Für die Elektro-, Regelungs- und Automatisierungstechnik leitet er Lehr- und Projektlabore. Seine Forschungsaufgaben liegen in der Entwicklung formaler Prozessbeschreibungen und in der Modellbildung dynamischer Systeme. 2005 wurde ihm der Landeslehrpreis verliehen. Von 2007 bis 2011 war er der erste hauptamtliche Prorektor der Hochschule Pforzheim, von 2011 bis 2014 Prodekan und Bereichsleiter der Informationstechnik. In beiden Ämtern verantwortete er den Ausbau neuer Studiengänge. Von 2001 bis 2014 war er im Beirat der Fachzeitschrift »Automatisierungstechnische Praxis (atp)« und seit 2003 im Förderkreis und dem Redaktionsbeirat des »P&A-Kompodiums«. Im Wiley-Verlag veröffentlichte er im Dezember 2015 das Buch »Elektrotechnik für Dummies«. Im Januar 2019 kam das

»Übungsbuch Elektrotechnik für Dummies« hinzu. Als Ergänzung zu diesen beiden Büchern liegt nun die »Wechselstromtechnik für Dummies« vor.

Mehr Informationen finden Sie unter [www.hs-pforzheim.de](http://www.hs-pforzheim.de).

## ***Danksagung***

Ein Buch zu schreiben bedeutet, Zeit, Geduld und Ausdauer aufzubringen. Darüber hinaus gehört ein Team dazu, das den Autor unterstützt. Zu diesem Team gehört an erster Stelle meine Frau Anja, der ich meinen herzlichen Dank ausspreche. Ohne ihr Verständnis und ihre Unterstützung wäre es mir kaum möglich, solche Projekte zu verwirklichen. Weiterhin gilt mein Dank meiner Lektorin, Diplom-Biologin Vanessa Schöner, die die zündende Idee für diese Bücher hatte und mich davon überzeugte, ein weiteres *...für Dummies*-Buch zu schreiben. Marcel Ferner danke ich dafür, dass unser Team frei von Sorgen an diesem Buch arbeiten konnte. Besonderer Dank gebührt meinem Lektor Diplom-Physiker Tobias Schwaibold, mit dem ich nun das dritte *...für Dummies*-Buch gestalte und der es stets versteht, meine Gedanken in die richtige Richtung zu lenken. Auch meinem Fachlektor Prof. Dr. Frank Thuselt gilt mein großer Dank. Er ergänzt unser Team mit seinem vielfältigen Hintergrundwissen und hat alle meine theoretischen Behauptungen wie auch die Rechenbeispiele sorgfältig auf deren Richtigkeit geprüft. Des Weiteren möchte ich meinem »mathematischen Gewissen« in Form meines Kollegen Diplom-Physiker Frank Schmidt danken, der mir immer dann wertvoll zur Seite steht, wenn etwas Rost im Getriebe meiner mathematischen Denkweisen steckt. Zu guter Letzt gilt es meinem Kollegen Prof. Dr.-Ing. Peter Heidrich, einem ausgewiesenen Experten für die Antriebstechnik, dafür

zu danken, dass er meine Zweifel an der (auch mir noch nicht so vertrauten) Drehstromtechnik beseitigen konnte.

# Inhaltsverzeichnis

Cover

Titelblatt

Impressum

Über den Autor

Danksagung

Einführung

Über dieses Buch

Konventionen in diesem Buch

Was Sie nicht lesen müssen

Törichte Annahmen über den Leser

Wie dieses Buch aufgebaut ist

Symbole, die in diesem Buch verwendet werden

Wie es weitergeht

**Teil I: Besonderheiten der Wechselstromtechnik**

**Kapitel 1: Stets zuerst die mathematischen Grundlagen**

Geradengleichungen, wohin das Auge blickt

Ohne den Logarithmus geht es nicht

Auch die Exponentialfunktion spielt mit

Dreiecke und deren Winkel braucht das Land

Und dann noch Skalare und Vektoren

Schwingungen gehören zur Wechselstromtechnik

Auch Ableitungen werden gebraucht

Die irre tolle Integration

Das Wunder der komplexen Rechnung

**Kapitel 2: Auf und ab: Sinusförmige Wechselgrößen**

Von der Gleich- zur periodischen Wechselgröße  
Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung

### **Kapitel 3: Kennwerte sinusförmiger Wechselgrößen**

Amplitude, Augenblickswert und Frequenz  
Woher kommt die Phasenverschiebung?  
Wechselgrößen und deren Mittelwerte

### **Kapitel 4: Zeiger- und Liniendiagramme für Wechselgrößen**

Vom Zeiger- zum Liniendiagramm  
Komplexe Darstellung sinusförmiger Wechselgrößen

## **Teil II: Widerstand, Spule und Kondensator an Wechselgrößen**

### **Kapitel 5: Vom Scheinwiderstand zum Scheinleitwert**

Widerstand an Wechselstrom

### **Kapitel 6: Der Wirkwiderstand an Wechselstrom**

Ohm'scher Widerstand an Wechselstrom  
Leistungen am Ohm'schen Widerstand

### **Kapitel 7: Der induktive Blindwiderstand der Spule**

Spule an Wechselstrom  
Leistungen an der Spule

### **Kapitel 8: Der kapazitive Blindwiderstand des Kondensators**

Kondensator an Wechselstrom  
Leistungen am Kondensator  
Vergleich der Grundsaltungen an Wechselstrom

## **Teil III: Gemischte Schaltungen an Wechselgrößen**

## **Kapitel 9: Reihenschaltung linearer Zweipole**

[Reihenschaltung von Widerstand und Spule](#)

[Reihenschaltung von Widerstand und Kondensator](#)

[Reihenschaltung von Widerstand, Spule und Kondensator](#)

[Reihenresonanz](#)

[Reihenschaltung komplexer Widerstände](#)

[Spannungsteilerregel für komplexe Widerstände](#)

## **Kapitel 10: Parallelschaltung linearer Zweipole**

[Parallelschaltung von Widerstand und Spule](#)

[Parallelschaltung von Widerstand und Kondensator](#)

[Parallelschaltung von Widerstand, Spule und Kondensator](#)

[Parallelresonanz](#)

[Parallelschaltung komplexer Leitwerte](#)

[Stromteilerregel für komplexe Leitwerte](#)

## **Kapitel 11: Umwandlung von Reihen- und Parallelschaltung - Ersatzzweipole**

[Ersatz für die Parallelschaltung](#)

[Ersatz für die Reihenschaltung](#)

## **Kapitel 12: Leistung im Wechselstromkreis**

[Leistung bei Wirklast - Wirkleistung am Ohm'schen Widerstand](#)

[Leistung bei induktiver Belastung - Blindleistung der Spule](#)

[Leistung bei kapazitiver Belastung - Blindleistung des Kondensators](#)

[Scheinleistung und Leistungsfaktor](#)

[Komplexe Leistung](#)

[Blindleistungskompensation](#)

## **Teil IV: Frequenzgang, Ortskurve und Filterschaltungen**

### **Kapitel 13: Frequenzgangdarstellung und das Bode-Diagramm**

Der Frequenzgang und seine Eigenschaften

Eigenschaften des Bode-Diagramms

## **Kapitel 14: Frequenzkennlinien braucht das Land**

Die Frequenzkennlinie – auf dem Weg zum Bode-Diagramm

Was geschieht mit der Ortskurvendarstellung?

Beispiele zur Konstruktion der Ortskurve

## **Kapitel 15: Elektrische Filterschaltungen**

RC- und RL-Tiefpassschaltungen

RC- und RL-Hochpassschaltungen

RC-Bandpass

## **Kapitel 16: Resonanz im Wechselstromkreis**

Die Spannungsresonanz in Reihenschaltungen

Die Resonanzfrequenz und die Thomson'sche Schwingungsformel

Die Stromresonanz in Parallelschaltungen

## **Teil V: Drehstrom als Dreiphasen-Wechselstromsystem**

### **Kapitel 17: Erzeugung und Darstellung von Dreiphasen-Wechselstrom**

Erzeugung von Dreiphasen-Wechselstrom

Generator für Drehstrom

Motor im Drehstromnetz

### **Kapitel 18: Stern- und Dreieckschaltung des Generators**

Sternschaltung des Generators

Dreieckschaltung des Generators

### **Kapitel 19: Anschluss des Verbrauchers ans Drehstromnetz**

Sternschaltung des Verbrauchers

Dreieckschaltung des Verbrauchers

## **Kapitel 20: Leistung bei Drehstrom**

### **Teil VI: Der Top-Ten-Teil**

## **Kapitel 21: Zehn wichtige Erfinder der Wechselstromtechnik**

Michael Faraday: aus Magnetismus werden Ströme

Werner von Siemens: das dynamoelektrische Prinzip

Carl Friedrich Gauß: die komplexe Zahl

Nikola Tesla: aus Gleich- wird Wechselstrom

Georg Westinghouse und die Energieübertragung

Sir William und die Schwingungen

Carl Steinmetz: die komplexe Rechnung

Oskar von Miller: die Drehstrom-Energieübertragung

Galileo Ferraris und das Drehfeld

Hendrik Wade Bode und die Frequenzeigenschaften

## **Kapitel 22: Zehn wichtige Einheiten und deren Bedeutung**

## **Kapitel 23: Zehn Dekaden der Elektrizität im 19. Jahrhundert**

## **Kapitel 24: Meine zehn Lieblingsbücher für die Wechselstromtechnik**

### **A: Lösungen der Aufgaben**

Aufgabe 1.1

Aufgabe 1.2

Aufgabe 3.1

Aufgabe 3.2

Aufgabe 4.1

Aufgabe 4.2

Aufgabe 5.1

Aufgabe 5.2

Aufgabe 7.1

Aufgabe 7.2

Aufgabe 8.1

[Aufgabe 8.2](#)

[Aufgabe 9.1](#)

[Aufgabe 9.2](#)

[Aufgabe 9.3](#)

[Aufgabe 9.4](#)

[Aufgabe 10.1](#)

[Aufgabe 10.2](#)

[Aufgabe 10.3](#)

[Aufgabe 10.4](#)

[Aufgabe 11.1](#)

[Aufgabe 12.1](#)

[Aufgabe 15.1](#)

[Aufgabe 16.1](#)

[Aufgabe 20.1](#)

## **Stichwortverzeichnis**

## **End User License Agreement**

# **Tabellenverzeichnis**

## **Kapitel 1**

[Tabelle 1.1: Funktionswerte der Sinus- und Kosinusfunktion](#)

## **Kapitel 8**

[Tabelle 8.1: Grundgleichungen für Wechselstromkreise](#)

## **Kapitel 13**

[Tabelle 13.1: Spannungsverhältnisse und ihre dB-Werte](#)

## **Kapitel 14**

[Tabelle 14.1: Regeln zur Konstruktion einfacher Ortskurven](#)

# **Illustrationsverzeichnis**

## **Kapitel 1**

[Abbildung 1.1: Hauptform der Geraden](#)  
[Abbildung 1.2: Beliebiges Dreieck mit Seitenlängen und Winkeln](#)  
[Abbildung 1.3: Rechtwinkliges Dreieck](#)  
[Abbildung 1.4: Vektor im kartesischen Koordinatensystem](#)  
[Abbildung 1.5: Addition und Länge von Vektoren](#)  
[Abbildung 1.6: Sinus- und Kosinusfunktion](#)  
[Abbildung 1.7: Ableitungen und die Tangente am Beispiel einer Kunde...](#)  
[Abbildung 1.8: Integration und Flächenintegral](#)  
[Abbildung 1.9: Darstellung einer komplexen Zahl](#)  
[Abbildung 1.10: Konjugiert komplexe Zahl](#)  
[Abbildung 1.11: Komplexe Zahl in Polarkoordinaten](#)  
[Abbildung 1.12: Wirkung der Drehung des Zeigers](#)  
[Abbildung 1.13: Arkustangensfunktion](#)  
[Abbildung 1.14: Drehung des Zeigers um  \$+90^\circ\$](#)   
[Abbildung 1.15: Anwendungsbeispiel zur komplexen Rechnung](#)

## **Kapitel 2**

[Abbildung 2.1: Faradays Versuchsaufbau zu seinem Elektromotor](#)  
[Abbildung 2.2: Grafische Darstellung von Gleichgrößen](#)  
[Abbildung 2.3: Periodische Sägezahnfunktion](#)  
[Abbildung 2.4: Periodische Zickzackfunktion](#)  
[Abbildung 2.5: Sinusförmige Wechselgröße](#)  
[Abbildung 2.6: Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung](#)  
[Abbildung 2.7: Fläche der Leiterschleife mit Vektor der Flächennorm...](#)  
[Abbildung 2.8: Spannungsverlauf am Spulenabgriff bei der Rotation d...](#)  
[Abbildung 2.9: Induktionsspannung und Scheitelwert](#)

## **Kapitel 3**

[Abbildung 3.1: Amplitude und Augenblickswert](#)  
[Abbildung 3.2: Periode und Periodendauer](#)  
[Abbildung 3.3: Spannungsverlauf und Nullphasenwinkel](#)  
[Abbildung 3.4: Phasenverschiebungswinkel](#)  
[Abbildung 3.5: Spannung- und Stromverlauf bei einer Spule](#)

[Abbildung 3.6: Gleichanteil einer periodischen Funktion](#)

[Abbildung 3.7: Widerstand an Gleich- und Wechselspannung](#)

[Abbildung 3.8: Zeitverlauf der Leistung am Widerstand bei Wechselst...](#)

[Abbildung 3.9: Verlauf der Sinusfunktion](#)

[Abbildung 3.10: Sinusförmiger Strom und dessen Effektivwert](#)

## **Kapitel 4**

[Abbildung 4.1: Addition zweier Spannungen im Liniendiagramm](#)

[Abbildung 4.2: Übergang vom Zeiger- zum Liniendiagramm](#)

[Abbildung 4.3: Zeigerdiagramm mit vollem Zeigerumlauf](#)

[Abbildung 4.4: Geometrische Addition von Zeigern](#)

[Abbildung 4.5: Ermittlung des Augenblickswerts](#)

[Abbildung 4.6: Phasenverschiebung zweier Wechselgrößen](#)

[Abbildung 4.7: Komplexe Darstellung einer Spannung](#)

## **Kapitel 5**

[Abbildung 5.1: Sinusförmige Spannung und Strom am Zweipol](#)

[Abbildung 5.2: Komplexer Widerstand in der Gauß'schen Zahlenebene](#)

[Abbildung 5.3: Komplexer Leitwert in der Gauß'schen Zahlenebene](#)

## **Kapitel 6**

[Abbildung 6.1: Spannung und Strom am Wirkwiderstand](#)

## **Kapitel 7**

[Abbildung 7.1: Spannung und Strom an der Spule](#)

## **Kapitel 8**

[Abbildung 8.1: Spannung und Strom am Kondensator](#)

## **Kapitel 9**

[Abbildung 9.1: Reihenschaltung von Widerstand und Spule](#)

[Abbildung 9.2: Zeigerdiagramm für eine Reihenschaltung von Widersta...](#)

[Abbildung 9.3: Ein Spannungsdreieck lässt sich bequem mithilfe des ...](#)

[Abbildung 9.4: Widerstandsdreieck für eine Reihenschaltung von Wide...](#)

[Abbildung 9.5: Reihenschaltung von Widerstand und Kondensator](#)

[Abbildung 9.6: Zeigerdiagramm mit Strom als Bezugszeiger](#)

[Abbildung 9.7: Das Spannungsdreieck für die Reihenschaltung von Wid...](#)

[Abbildung 9.8: Widerstandsdreieck für die Reihenschaltung aus Wider...](#)

[Abbildung 9.9: Reihenschaltung von Widerstand, Spule und Kondensato...](#)

[Abbildung 9.10: Zeigerdiagramm für die Reihenschaltung aus Widerst...](#)

[Abbildung 9.11: Das Spannungsdreieck für die Reihenschaltung aus W...](#)

[Abbildung 9.12: Widerstandsdreieck für die Reihenschaltung aus Wid...](#)

[Abbildung 9.13: Verhältnis der Blindwiderstände](#)

[Abbildung 9.14: Reihenschaltung komplexer Widerstände mit Ersatzzw...](#)

[Abbildung 9.15: Spannungsteiler für komplexe Widerstände](#)

## **Kapitel 10**

[Abbildung 10.1: Parallelschaltung von Widerstand und Spule](#)

[Abbildung 10.2: Zeigerdiagramm für die Parallelschaltung von Wider...](#)

[Abbildung 10.3: Im rechtwinkligen Stromdreieck für die Parallelsch...](#)

[Abbildung 10.4: Leitwertdreieck für die Parallelschaltung aus Wide...](#)

[Abbildung 10.5: Parallelschaltung von Widerstand und Kondensator](#)

[Abbildung 10.6: Zeigerdiagramm der Parallelschaltung von Widerstan...](#)

[Abbildung 10.7: Stromdreieck mit Dreieck von Pythagoras](#)

[Abbildung 10.8: Leitwertdreieck für die Parallelschaltung aus Wide...](#)

[Abbildung 10.9: Parallelschaltung von Widerstand, Spule und Konden...](#)

[Abbildung 10.10: Zeigerdiagramm für die Parallelschaltung von Wid...](#)

[Abbildung 10.11: Das Stromdreieck für die Parallelschaltung eines...](#)

[Abbildung 10.12: Leitwertdreieck](#)

[Abbildung 10.13: Verhältnis der Blindleitwerte](#)

[Abbildung 10.14: Parallelschaltung komplexer Leitwerte](#)

[Abbildung 10.15: Stromteiler für komplexe Leitwerte](#)

[Abbildung 10.16: Schaltung zu Aufgabe 10.4](#)

## **Kapitel 12**

[Abbildung 12.1: Leistungskurve für den Ohm'schen Widerstand](#)

[Abbildung 12.2: Leistungskurve für die Spule](#)

[Abbildung 12.3: Leistungskurve für den Kondensator](#)

[Abbildung 12.4: Komplexe Darstellung der Leistung](#)

[Abbildung 12.5: Induktiv wirkender Verbraucher für die Parallelkom...](#)

[Abbildung 12.6: Stromdreieck ohne Parallelkompensation](#)

[Abbildung 12.7: Kompensation durch Parallelschaltung eines Kondens...](#)

[Abbildung 12.8: Stromdreieck mit Parallelkompensation](#)

[Abbildung 12.9: Leistungsdreieck zur Parallelkompensation – links ...](#)

## **Kapitel 13**

[Abbildung 13.1: Bode-Diagramm eines  \$VZ\_1\$ -Glieds](#)

## **Kapitel 14**

[Abbildung 14.1: Komplexer Zeiger des I-Glieds](#)

[Abbildung 14.2: Frequenzkennlinie des I-Glieds](#)

[Abbildung 14.3: Bereinigte Frequenzkennlinie des I-Glieds](#)

[Abbildung 14.4: Endgültige Frequenzkennlinie des I-Glieds](#)

[Abbildung 14.5: Amplituden- und Phasengang im Bode-Diagramm des I-...](#)

[Abbildung 14.6: Frequenzkennlinie eines P- und dreier  \$VZ\_1\$ -Glieder](#)

[Abbildung 14.7: Ortskurve \(oben\) und Frequenzkennlinie \(unten\).](#)

[Abbildung 14.8: Entwicklung der Ortskurve über die konforme Abbild...](#)

[Abbildung 14.9: Verlauf einer Ortskurve eines  \$VZ\_3\$ -Glieds](#)

[Abbildung 14.10: Ortskurve zum Frequenzgang der Abflussregelung](#)

[Abbildung 14.11: Reihenschaltung von Widerstand und Spule](#)

[Abbildung 14.12: Ortskurve des komplexen Widerstands der RL-Reihe...](#)

[Abbildung 14.13: Ortskurve zum komplexen Leitwert der RL-Reihensch...](#)

[Abbildung 14.14: RC-Tiefpassschaltung.](#)

[Abbildung 14.15: Ortskurve der RC-Tiefpassschaltung.](#)

## **Kapitel 15**

[Abbildung 15.1: Durchlass- und Sperrbereich](#)

[Abbildung 15.2: RC- und RL-Tiefpassschaltung.](#)

[Abbildung 15.3: Verlauf der Amplitangenfunktion](#)

[Abbildung 15.4: Frequenzkennlinie eines Tiefpasses](#)

[Abbildung 15.5: RC- und RL-Hochpassschaltung](#)

[Abbildung 15.6: Frequenzkennlinie eines Hochpasses](#)

[Abbildung 15.7: Bandpass](#)

[Abbildung 15.8: Frequenzkennlinie eines Bandpasses](#)

[Abbildung 15.9: Schaltung zu Aufgabe 15.1](#)

## **Kapitel 16**

[Abbildung 16.1: Resonanzkreis mit Widerstand, Spule und Kondensato...](#)

[Abbildung 16.2: Spannungs- \(links\) und Widerstandsdiagramm \(rechts\)...](#)

[Abbildung 16.3: Resonanzkurven des Reihenresonanzkreises](#)

[Abbildung 16.4: Resonanzkreis mit Widerstand, Spule und Kondensato...](#)

[Abbildung 16.5: Stromdiagramm des Resonanzkreises](#)

[Abbildung 16.6: Resonanzkurven des Parallelresonanzkreises](#)

## **Kapitel 17**

[Abbildung 17.1: Erzeugung eines Einphasen-Wechselstroms](#)

[Abbildung 17.2: Erzeugung eines Dreiphasen-Wechselstroms](#)

[Abbildung 17.3: Liniendiagramm zum Spannungsverlauf bei Drehstrom](#)

[Abbildung 17.4: Generator zur Erzeugung von Drehstrom](#)

[Abbildung 17.5: Schaltung der Spulen des Drehstromgenerators](#)

[Abbildung 17.6: Motor im Drehstromnetz](#)

[Abbildung 17.7: Verlauf der Ströme des permanenterregten Drehstrom...](#)

[Abbildung 17.8: Funktionsprinzip des permanenterregten Drehstrommo...](#)

[Abbildung 17.9: Verlauf der Ströme und Lage des Rotors des Drehstr...](#)

[Abbildung 17.10: Kraftwirkung der Magnetfelder und Drehrichtung d...](#)

## **Kapitel 18**

[Abbildung 18.1: Sternschaltung des Generators](#)

[Abbildung 18.2: Zeigerdiagramm für die Sternschaltung](#)

[Abbildung 18.3: Dreieckschaltung des Generators](#)

## **Kapitel 19**

[Abbildung 19.1: Verbraucherseitige Sternschaltung mit Neutralleite...](#)

[Abbildung 19.2: Ermittlung des Gesamtstroms bei symmetrischer Last](#)

[Abbildung 19.3: Ermittlung des Gesamtstroms bei unsymmetrischer La...](#)

[Abbildung 19.4: Sternschaltung ohne angeschlossenen Neutralleiter](#)

[Abbildung 19.5: Verbraucherseitige Dreieckschaltung](#)

[Abbildung 19.6: Bestimmung der Außenleiterströme bei symmetrischer...](#)

## **Kapitel 20**

[Abbildung 20.1: Verbindung von Generator und Verbraucher](#)

## **Anhang A**

[Abbildung A.1: Darstellung der komplexen Zahl  \$\underline{Z}\_1 = -2 - j \cdot 2\$](#)

[Abbildung A.2: Darstellung der komplexen Zahl  \$\underline{Z}\_2 = -10\$](#)

[Abbildung A.3: Zeigerdiagramm mit Effektivwerten zu Aufgabe 4.1](#)

[Abbildung A.4: Zeiger- und Liniendiagramm zu Aufgabe 4.2](#)

[Abbildung A.5: Berechnung von Vor- und Scheinwiderstand zu Aufgabe 9.1](#)

[Abbildung A.6: Schaltung des unbelasteten Spannungsteilers zu Aufgabe 9.4](#)

[Abbildung A.7: Stromdreieck zu Aufgabe 10.1](#)

[Abbildung A.8: Stromdreieck zu Aufgabe 10.2](#)

[Abbildung A.9: Leitwertdreieck zu Aufgabe 10.2](#)

[Abbildung A.10: Umgeformte Stromteilerschaltung zu Aufgabe 10.4](#)

[Abbildung A.11: Leistungsdreieck ohne \(links\) und mit \(rechts\) Kompensation zu Aufgabe...](#)