

# ENERGIEMONITORINGSYSTEME

## ELEKTRISCHE LEISTUNGSMESSUNG

Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach

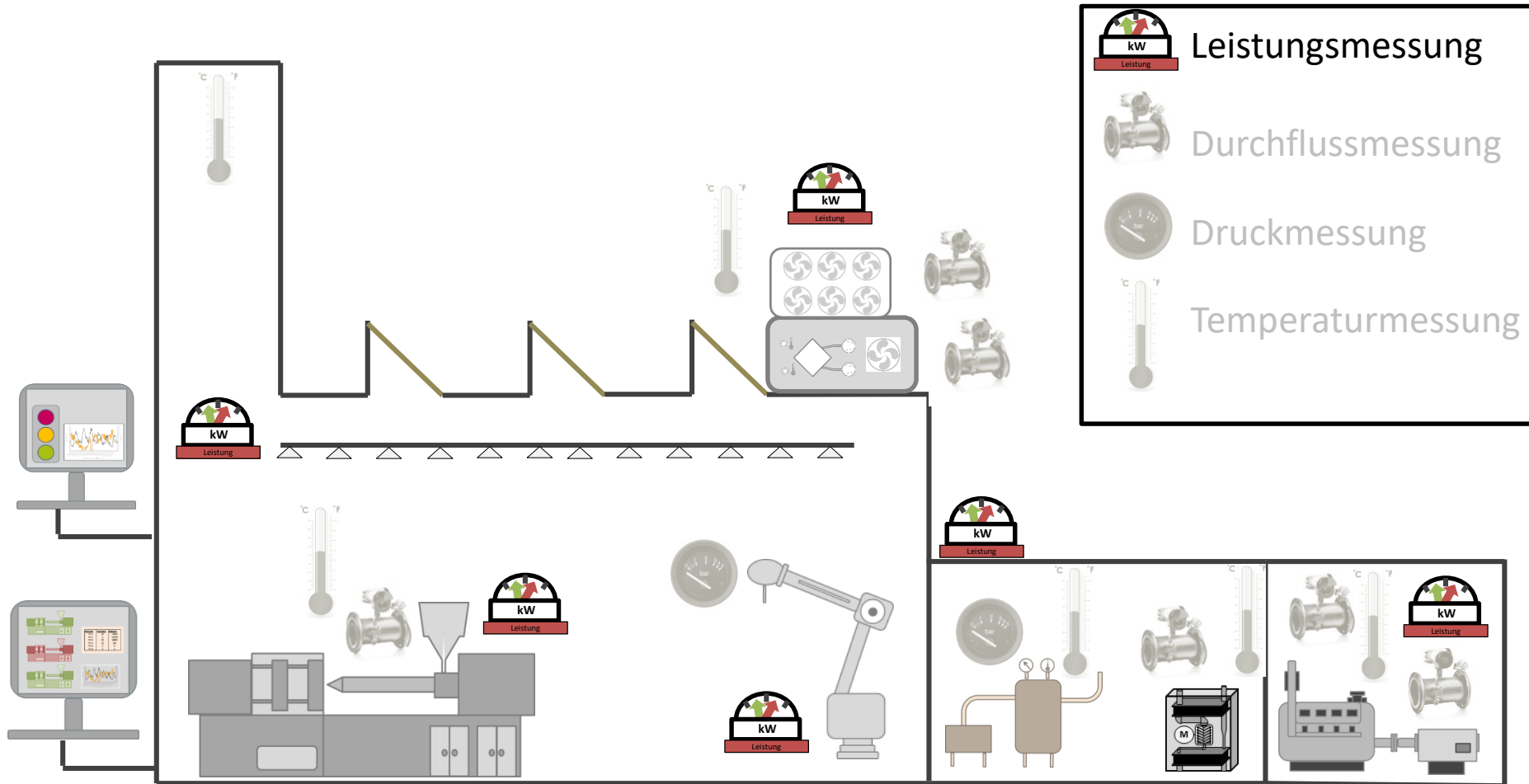


# Inhalte der Vorlesung

- Einführung / Historie
- Grundlagen
  - Erdung
  - IP Schutzarten
  - Grundlagen Elektrotechnik
- Netzqualitätsanalyse
- Technische Umsetzung
- Anwendungsbeispiele

# Messtechnik im Industriebetrieb

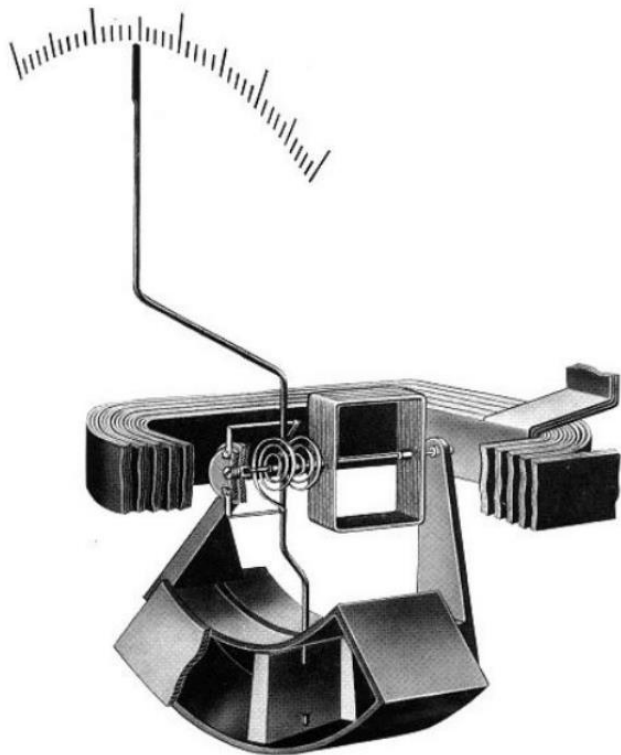
## Leistungsmessung



Historie / Einführung

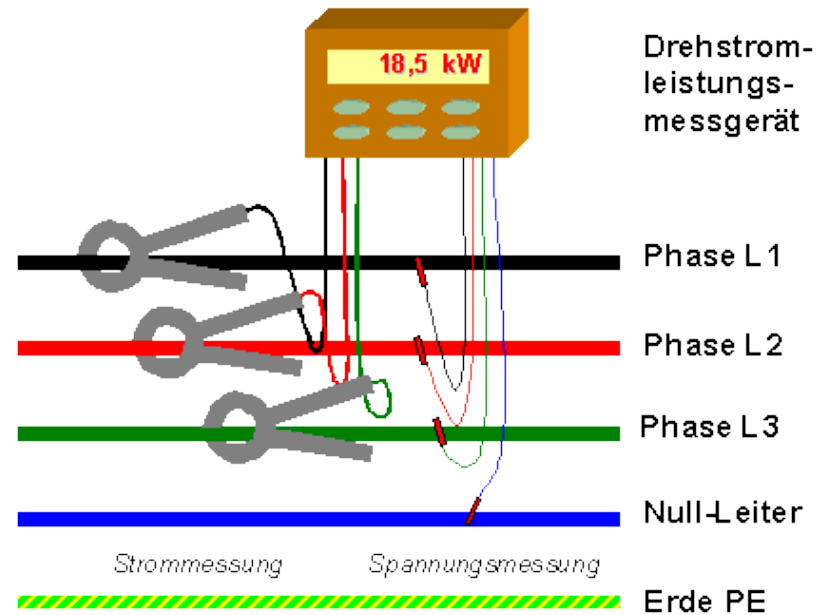
# ELEKTRISCHE LEISTUNGSMESSUNG

# Einführung / Historie



**Abb.:** Analoge Wirkleistungsmessung

Quelle: <http://www.alte-messtechnik.de/technik/elektrodynamisch-eisenlos.jpg>



**Abb.:** Leistungsmessung

Quelle:

[http://images.google.de/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.energie.ch%2Fassets%2Fimages%2Farticle%2FBilder%2FSkizzen%2Fmesstechnik\\_leistungsmessung.gif](http://images.google.de/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.energie.ch%2Fassets%2Fimages%2Farticle%2FBilder%2FSkizzen%2Fmesstechnik_leistungsmessung.gif)

Erdung, Schutzarten, Grundlagen Elektrotechnik

# ELEKTRISCHE LEISTUNGSMESSUNG

# Erdung (I)

## Was bedeutet „Erden“?

- Als Erden bezeichnet man im allgemeinen Sprachgebrauch jeden Anschluss an ein Bezugspotenzial, das über sogenannte „Erder“ mit dem leitfähigen Erdreich verbunden ist
- Erder sind leitfähige Teile, die in einem guten elektrischen Kontakt mit dem Erdreich stehen und deren Anschlusspunkte meist aus dem Erdreich herausgeführt sind
- Erder können, je nach Funktion oder örtlichen Gegebenheiten, verschieden ausgeführt sein, z.B. als Staberder, Banderder oder Plattenerder

# Erdung (II)

## Warum „Erden“?

- Das Verbinden mit Erdpotential verfolgt unterschiedliche Ziele:
  1. Das Erden als Schutzmaßnahme im Sinne der geltenden VDE-Vorschriften (DIN VDE 0100) und der Niederspannungsrichtlinien, wobei diverse nationale Unterschiede zu beachten sind
  2. Das Verhindern von Störeinstrahlungen und Störausstrahlungen im Sinne der EMV-Richtlinien
  3. Das für den Betrieb elektrischer Geräte und Einrichtungen erforderliche Festlegen eines gemeinsamen Bezugspotenzials



# Erdung (III)

## Bezeichnungen für Bezugs- und Erdungsleiter

Für Bezugs und Erdungspunkte sind die folgenden Bezeichnungen üblich:



- ◆ **0 V/Masse** - allgemein für das Bezugspotential elektrischer Schaltungen



- ◆ **0 VA** - für Bezugsleiter innerhalb analoger Schaltkreise eines Geräts



- ◆ **0 VD** - für Bezugsleiter innerhalb digitaler Schaltkreise eines Geräts



- ◆ **TE** - für den Sternpunkt (meist Sammelschiene), an dem 0 VA und 0 VD zusammengeführt sind. TE wird oft auch als "Elektronikerde" oder "Messerde" bezeichnet.



- ◆ **SE** - Sternpunkt (meist Sammelschiene), an dem alle Kabelschirme z.B. in einem Gehäuse aufgelegt werden. SE ist oder wird meist mit PE verbunden.



- ◆ **PE** - für den Anschluss des grün-gelben Schutzleiters der Netzversorgung oder allgemeiner Schutzerdungspunkt.

TE und SE können mit PE verbunden werden, wenn PE störungsarm ist. Ist das nicht der Fall, muss zumindest TE an eine getrennte, saubere (störungs-armen) Erde angeschlossen werden.



- ◆ **FE** - Betriebsstätten mit konsequentem Erdungskonzept stellen solche sogenannten Funktionserden **FE** zur Verfügung (z.B. in Schaltwarten).

# Erdung (IV)

## Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

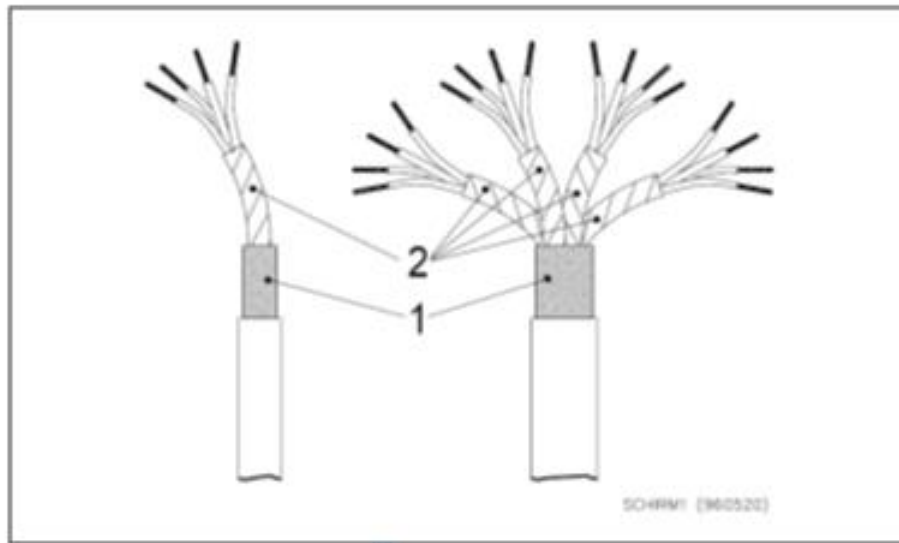
EMV-relevante Störsignale werden unterschieden in:

- Leitungsgebundene, wie sie z.B. von Leuchtstoffröhren, EDV-Anlagen, Schützen, Schaltheandlungen und vor allem Frequenzumrichtern verursacht werden und in strahlungsgebundene, die z.B. von HF-Sendern (Funk, Fernsehen, Mobiltelefon usw.) erzeugt werden
- Die eindeutige Zuordnung der Störquellen ist dabei nicht immer möglich, da viele in beide Kategorien eingeordnet werden können, wie z.B. Schütze

# Erdung (V)

## Abschirmen gegen Störungen (EMV)

- Kabelabschirmungen möglichst aus gut leitendem Material (z.B. Aluminiumfolie)
- Größtmöglicher Schutz durch doppelt abgeschirmte Kabel, bestehend aus: Gesamtschirm (1) und Einzelschirmen (2)



**Abb.:** Doppelt abgeschirmte Kabel

# Grundlagen Elektrotechnik

## Elektrischer Strom

- Elektrischer Strom  $i$  ist die in einer gewissen Zeit  $\Delta t$  durch einen definierten Querschnitt bewegte Ladungsmenge  $\Delta Q$ :

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

- Strom fließt von hohem zu niedrigem Potenzial
- Die Potentialdifferenz ist die Spannung

	Elektrische Stromstärke $I$ in A
Lichtbogenofen	bis $10^6$
Elektrolyse	$10^4$
Blitz	$3 * 10^3 - 5 * 10^4$
Handbohrmaschine	1
Glühlampe	0,1-1
Energiesparlampe	0,04-0,2
Nervenströme	$< 10^{-9}$

**Tabelle:** angelehnt an Nitsch, S.16

# Grundlagen Elektrotechnik

## Ohmsches Gesetz

$$U = R * I$$

## Elektrische Leistung P:

$$P = U * I$$

$$P = I^2 * R$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Größe	Beschreibung	Einheit
$U$	Spannung	V
$R$	Widerstand	$\Omega$
$I$	Stromstärke	A
$P$	Leistung	W

# Grundlagen Elektrotechnik

## Shunt

- Messsignal: **4 - 20 mA**
- Karte: **0 - 10 V**
- Shunt = Messwiderstand:

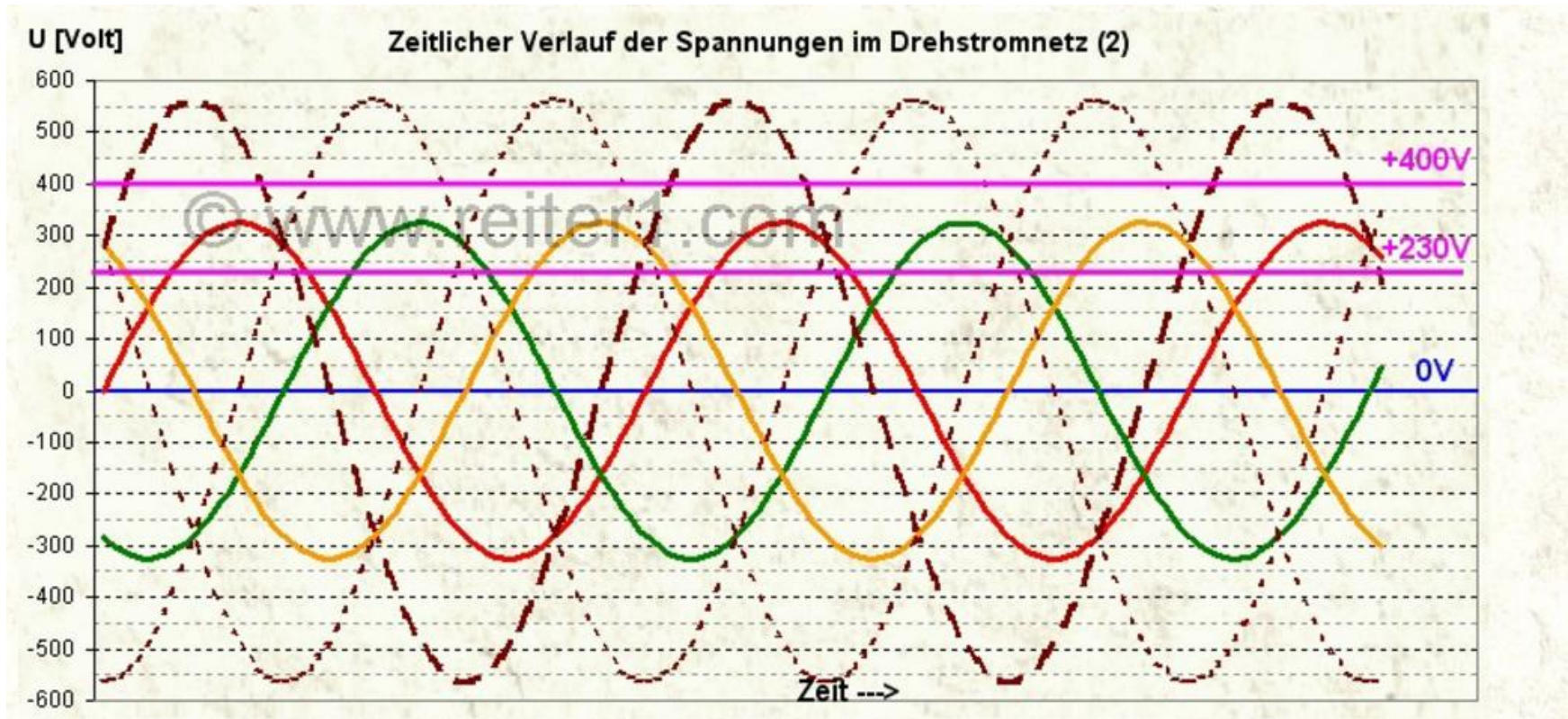
$$R = \frac{U}{I} = \frac{10V}{0,02A} = 500\Omega$$

## Problem bei Shunt



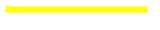


- Temperaturabhängigkeit →  $R(T)$
- kein Standardwiderstand!

# Dreiphasenwechselspannung im Drehstromnetz

## Spannungsniveaus



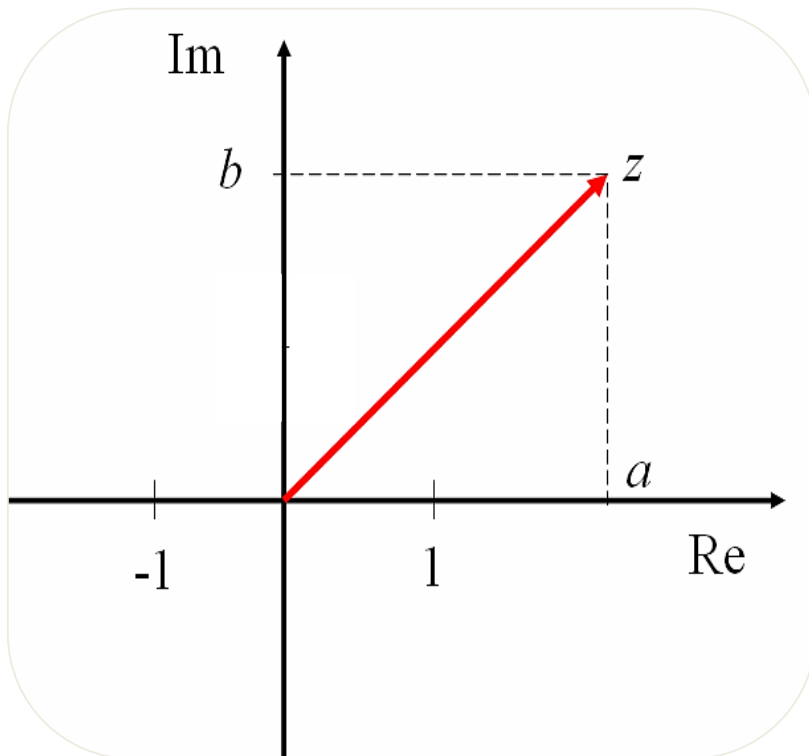
Quelle: <http://www.reiter1.com/index.html>

-  Differenz zw. Phasen
-   
  
 } Phasen
-  Effektivwert zw. Phasen und zwischen Phasen und Bezugspunkt 0V

# Wechselstrom (I)

## Komplexe Zahlen

- Komplexe Zahlen  $a + bi$  werden durch reelle Zahlenpaare  $(a,b)$  dargestellt, den so genannten Vektoren:



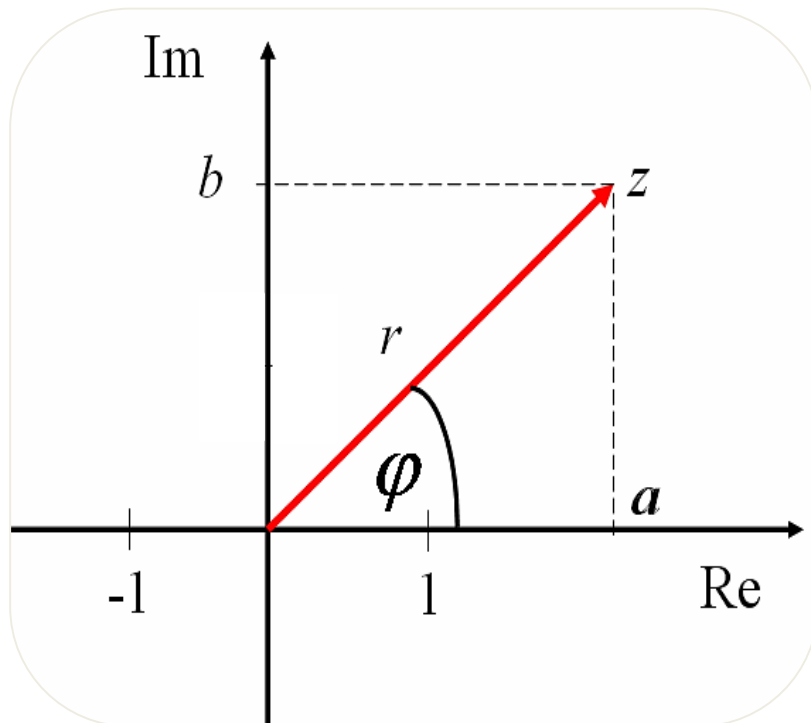
$$z = a + bi \Rightarrow \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$



# Wechselstrom (II)

## Komplexe Zahlen

- Der Vektor kann auch durch seine Länge  $r$  und seinen Winkel  $\varphi$  gegen die reelle Achse dargestellt werden.
- Man liest ab:



$$\begin{aligned} a &= r * \cos \varphi & b &= r * \sin \varphi \\ \Rightarrow z &= a + bi = r * (\cos \varphi + i * \sin \varphi) \end{aligned}$$

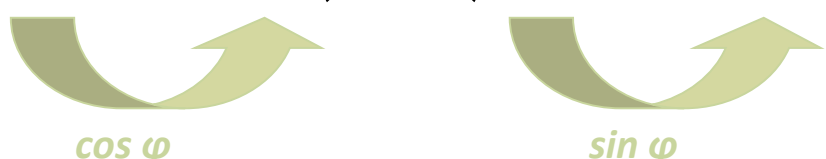
# Wechselstrom (III)

## Herleitung Euler'sche Formel

- Die komplexe Exponentialfunktion wurde über ihre Taylor-Reihe definiert
- Diese Reihenentwicklung ergibt:

$$e^{i\varphi} = 1 + i\varphi - \frac{\varphi^2}{2!} - i\frac{\varphi^3}{3!} + \frac{\varphi^4}{4!} + i\frac{\varphi^5}{5!} \dots \dots$$

- Sortieren nach reellen und nach imaginären Termen liefert:

$$e^{i\varphi} = \left( 1 - \frac{\varphi^2}{2!} + \frac{\varphi^4}{4!} \dots \right) + i \left( \varphi - \frac{\varphi^3}{3!} + \frac{\varphi^5}{5!} \dots \right)$$


*cos*  $\varphi$                       *sin*  $\varphi$

- Ein Vergleich mit den Taylor-Reihen von  $\cos \phi$  und  $\sin \phi$  ergibt die **Euler'sche Formel:**

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$$

# Wirkleistung (I)

- Die Wirkleistung  $P$  ist die elektrische Leistung, die für die Umwandlung in andere Leistungen (z.B. mechanische, thermische oder chemische) verfügbar ist.
- Es handelt sich um den arithmetischen Mittelwert der Augenblicksleistung  $p$

$$P = \bar{p} = \overline{u * i} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) * i(t) dt$$

*Die Wirkleistung wird in der Einheit Watt angegeben*

# Wirkleistung (II)

## sinusförmiger Wechselstrom

- Einen wichtigen Sonderfall bilden gleichfrequente Wechselgrößen mit sinusförmigen Zeitverläufen (so genannte *harmonische* Größen), wie sie Grundlage unserer Stromversorgungsnetze sind.
- Für die Augenblicksleistung  $p$  gilt hier, dass sie das Produkt aus den Augenblickswerten  $u$  und  $i$  von Spannung und Strom ist.
- Unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung, den Scheitelwerten von Spannung und Strom sowie der *Kreisfrequenz* wird hieraus:

$$p = u * i = \hat{u} * \hat{i} * \sin \omega t * \sin(\omega t + \varphi)$$

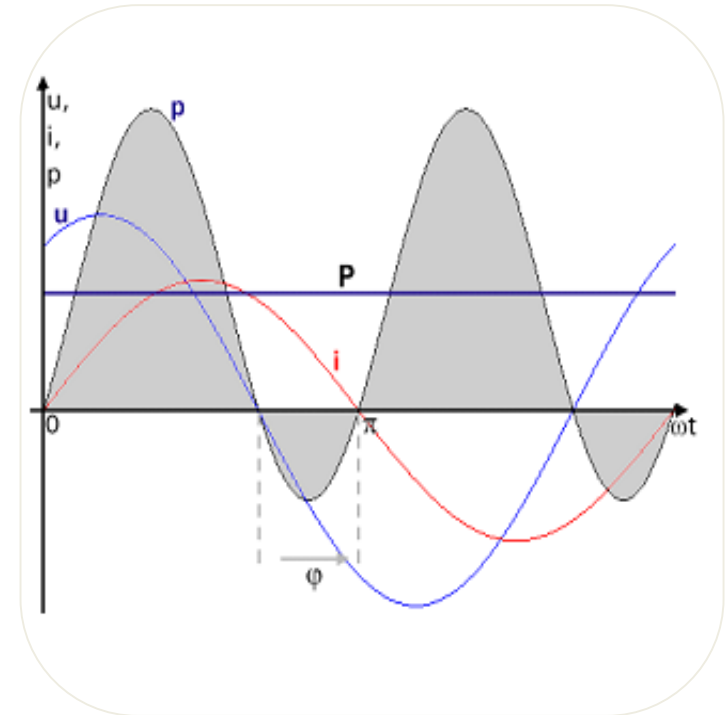


Abb.: zeitlicher Verlauf von Spannung, Strom und Leistung

# Wirkleistung (III)

## sinusförmiger Wechselstrom

- Durch Anwenden der trigonometrischen Beziehung  $\sin a \sin b = 1/2 [\cos (a-b) - \cos (a+b)]$  und Verwendung der Effektivwerte  $U$  und  $I$  von Spannung und Strom folgt:

$$p = \frac{1}{2} \hat{u} * \hat{i} * [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)]$$

$$p = U * I * \cos \varphi - U * I * \cos(2\omega t + \varphi)$$

- Folgender Ausdruck stellt den zeitlichen Mittelwert dar, den man als Wirkleistung  $P$  bezeichnet:

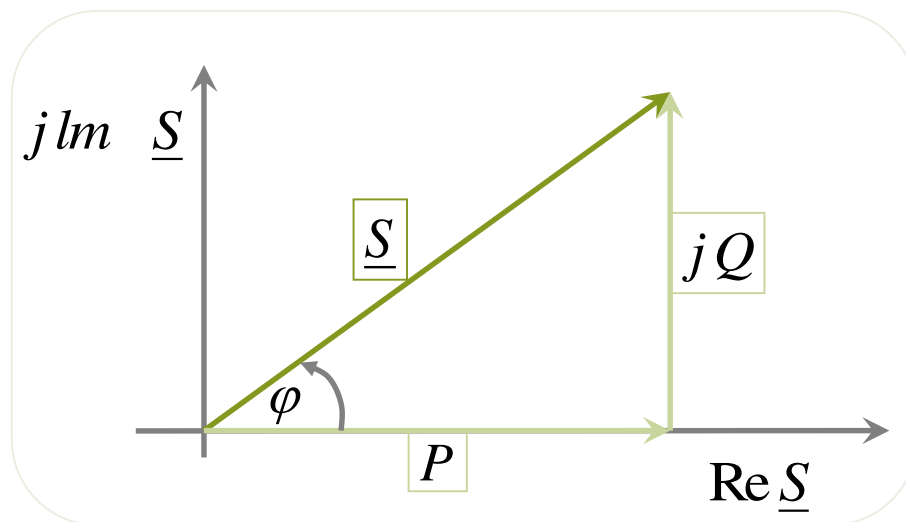
$$P = U * I * \cos \varphi$$

- Um ihn schwingt der Augenblickswert  $p$  der Leistung mit doppelter Frequenz.

# Wirk-, Blind- und Scheinleistung (I)

## Herleitung

- In der Elektrotechnik ist es üblich die Wechselstromrechnung (das Rechnen mit sinusförmigen Wechselgrößen) mit Hilfe komplexer Zeiger im Bildbereich durchzuführen, da dies wesentlich einfacher ist als die analytische Berechnung im Zeitbereich.
- Zum Anschluss der Leistungsgrößen an die komplexe Wechselstromrechnung wurde die **komplexe Scheinleistung  $\underline{S}$**  eingeführt, die Wirk- und Blindleistung in einer komplexwertigen Größe zusammenfasst.



$$\underline{S} = P + jQ$$

# Wirk-, Blind- und Scheinleistung (II)

## Herleitung

- Die Scheinleistung  $S$ , also der Betrag der komplexen Scheinleistung  $S$ , ist die geometrische Summe aus Wirk- und Blindleistung

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

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2}$$

- Die Wirkleistung  $P$  ist der Realteil der komplexen Scheinleistung  $S$
- Der Imaginärteil wird hingegen als Blindleistung  $Q$  bezeichnet

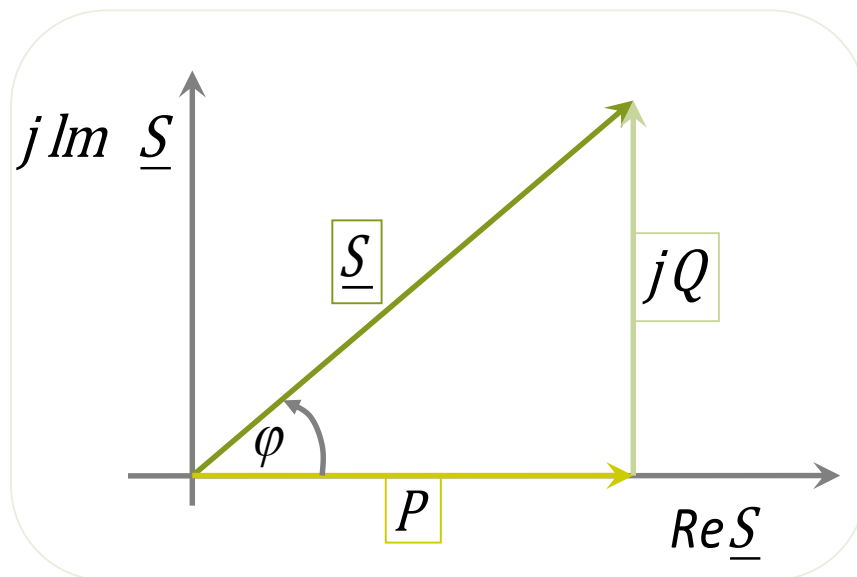
$$P = \operatorname{Re} * (\underline{U} * \underline{I}^*) = \operatorname{Re} * (S * e^{j\varphi}) = \operatorname{Re} * (U * I * e^{j\varphi})$$

$$P = U * I * \cos \varphi$$

# Wirk-, Blind- und Scheinleistung (III)

## Herleitung

- In der komplexen Zeigerdarstellung ist die Blindleistung durch die imaginären Anteile an der Leistung beschrieben
- Der Winkel zwischen den Zeigern von Wirk- und Blindleistung entspricht der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung
- Die Scheinleistung  $S$  ist die geometrische Summe aus Wirkleistung  $P$  und Blindleistung  $Q$



$$\underline{S} = P + jQ$$

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

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$



# Wirk-, Blind- und Scheinleistung (IV)

## Beschreibung Blindleistung

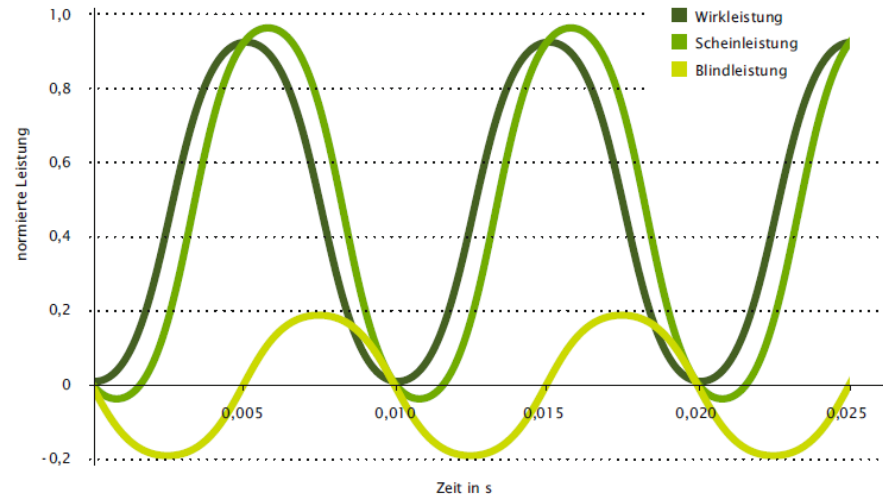
- Leistungsanteil eines Wechselstromkreises, der keine nutzbare Arbeit verrichten kann
- Dient zur Erzeugung elektrischer Ladungen und elektromagnetischer Felder und kann in elektrischen Verbrauchern nicht in andere Formen der Leistung umgewandelt werden
- Die Blindleistung nimmt abwechselnd positive und negative Werte an, d. h. die Energie pendelt zwischen Netz und Verbraucher hin und her, ohne im zeitlichen Mittel elektrische Energie zu übertragen
- Blindleistung ist ein Gleichgewicht zwischen den kapazitiven und induktiven Netzanteilen, sie wird daher manchmal auch als Pendelleistung beschrieben
- Das Formelzeichen ist: **Q**

# Wirk-, Blind- und Scheinleistung (V)

## Veranschaulichung

- Die Multiplikation von Strom und Spannung als Wechselgrößen ergibt die mit doppelter Frequenz pulsierende Scheinleistung (schwarz)
- Die Scheinleistung enthält einen Anteil, der kurzzeitig eine Umkehr der Energieflussrichtung verursacht. Mit Nutzung der trigonometrischen Funktionen kann die Scheinleistung in zwei Bestandteile zerlegt werden

1. Die Wirkleistung kann Arbeit verrichten, weil ihr Mittelwert von Null verschieden ist
2. Die Blindleistung hingegen schwankt periodisch um den Nullwert, sie kann daher keine Arbeit verrichten



**Abb.:** Zusammenhang zwischen Schein-, Wirk- und Blindleistung

Quelle: Hesselbach, S.52

# Phasenverschiebung und Blindleistung

## Phasenverschiebungswinkel $\varphi > 0^\circ$

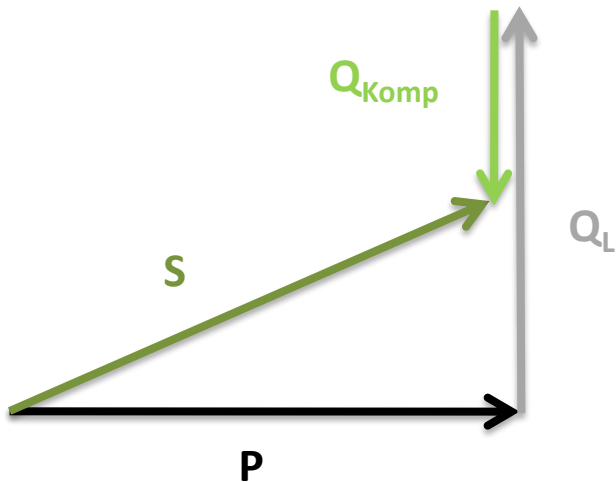
- Stromstärke folgt Spannung nach:  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$
- Überwiegend **induktive Last**  
(bei  $\varphi = 90^\circ$  reine Induktivität, bei  $\varphi = 0^\circ$  reine Ohm'sche Last)
- Effektivwert der Blindleistung  $Q > 0$  kVAr, wegen  $Q = U * I * \sin \varphi$

## Phasenverschiebungswinkel $\varphi < 0^\circ$

- Spannung folgt Stromstärke nach:  $0^\circ > \varphi > -90^\circ$
- Überwiegend **kapazitive Last** (bei  $\varphi = -90^\circ$  reine Kapazität)
- Effektivwert der Blindleistung  $Q < 0$  kVAr, wegen  $Q = U * I * \sin \varphi$

# Blindleistungskompensation

- Im technischen Bereich hat man es meist mit Blindstrom durch induktive Lasten, wie z.B. Motoren, zu tun.



$Q_L$  : Blindleistung verursacht durch induktive Lasten

$Q_{Komp}$  : Kapazitive Kompensationsleistung

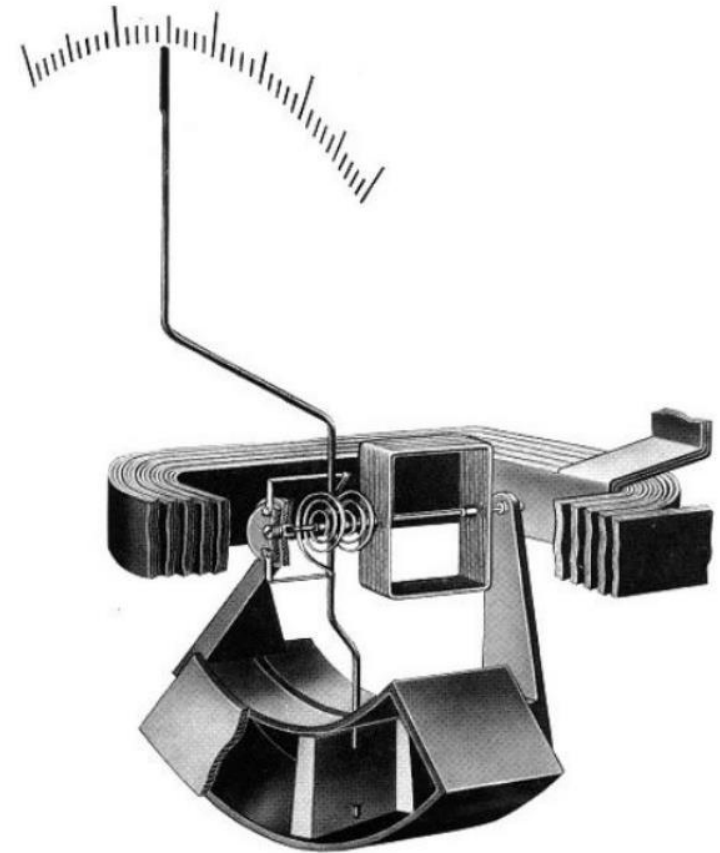
Technische Umsetzung

# ELEKTRISCHE LEISTUNGSMESSUNG

# Historische Messtechnik

## Wirkleistungsmessung mit elektrodynamischen Messwerk

- **Funktionsweise:**
  1. Strom fließt durch beide Spulen
  2. Es entsteht ein Drehmoment
  3. Spannungsspule mit dem daran befestigten Zeiger dreht sich, bis die Gegenkraft zweier Spiralfedern mit dem erzeugten Drehmoment im Gleichgewicht steht
- Analoge Anzeige der momentanen elektrischen Leistung
- Hauptanwendung in Analogmultimetern
- Heutzutage durch Digitalmultimeter ersetzt



**Abb.:** Analoge Wirkleistungsmessung

Quelle: <http://www.alte-messtechnik.de/technik/elektrodynamisch-eisenlos.jpg>

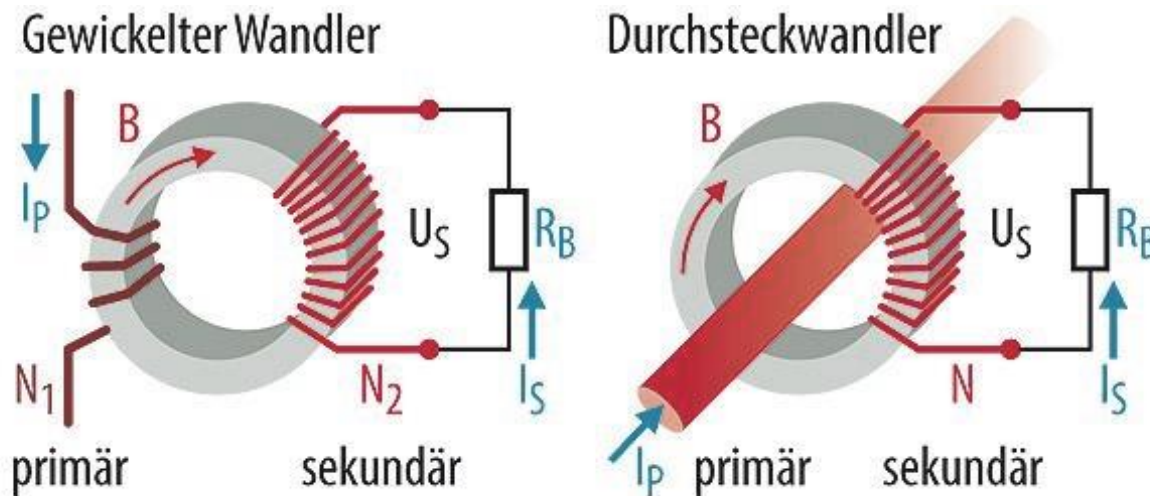
# Spannungs- und Strommessung

## Allgemeines

- Die Spannungsmessung erfolgt parallel, also ohne Auftrennen des Stromkreises
- Die Strommessung erfolgt in Reihe, also normalerweise mit Auftrennen des Stromkreises
- Bei Gleichspannung und auch bei üblichem Wechselstrom mit 220 V und einer Phase gelingt dies noch relativ einfach
- Bei dreiphasigem Wechselstrom, wie er in der Industrie für die Versorgung von Maschinen und Anlagen eingesetzt wird, gestaltet sich dies aufwändiger!

# Stromwandler im Detail (I)

## Stand der Technik, Aufbau und Funktionsweise



Stromübersetzungsverhältnis:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \left( 1 - \frac{I_{\mu}}{I_1} \right)$$

R<sub>B</sub> : Bürdenwiderstand  
I<sub>μ</sub> : Magnetisierungsstrom

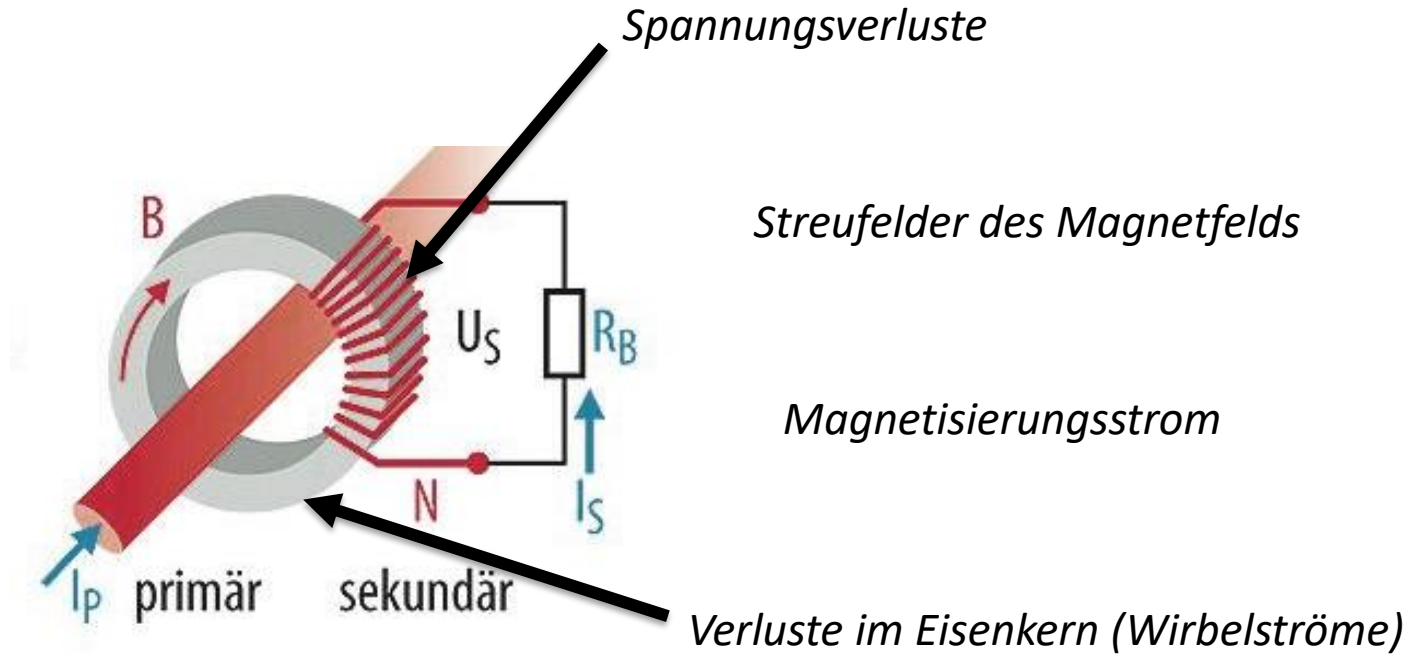
Quelle Backs & Henne (2018)

Bildquelle: <https://www.elektroniknet.de/elektronik/power/bilder/bilder-1-bis-4-4646.html?aid=109539>



# Stromwandler im Detail (II)

## Verluste



Quelle: <https://www.elektroniknet.de/elektronik/power/bilder/bilder-1-bis-4-4646.html?aid=109539>

Quelle Backs & Henne (2018)

# Stromwandler im Detail (III)

## Bauformen

### 1. *Durchführungs- oder Aufsteckstromwandler*

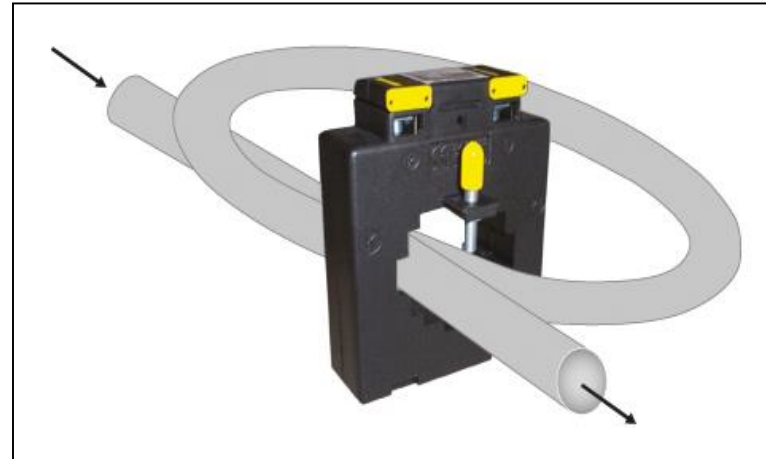
- Montage auf Stromschienen
- meist bei Neueinrichtungen

#### Nachteil:

Stromleiter muss unterbrochen werden

#### Spezialfall: Große Wandler, kleine Ströme

→ Primärstromleiter kann äquivalent mehrfach durch Wandler geführt werden



Quelle: Janitza GmbH, 2018

Quelle: <https://www.elektroniknet.de/elektronik/power/bilder/bilder-1-bis-4-4646.html?aid=109539>

Quelle Backs & Henne (2018)

# Stromwandler im Detail (IV)

## Bauformen

### 2. Klappwandler

- Wandlerkerne können geöffnet werden
- Montage ohne Unterbrechung der Primärstromleitung



Quelle: [http://bg-etech.de/bgshop/product\\_info.php/elektrozubehoer-klappwandler-esct-t24-1005a-p-507](http://bg-etech.de/bgshop/product_info.php/elektrozubehoer-klappwandler-esct-t24-1005a-p-507)

- Einsatz bei nachträglichem Einbau von Stromwandlern

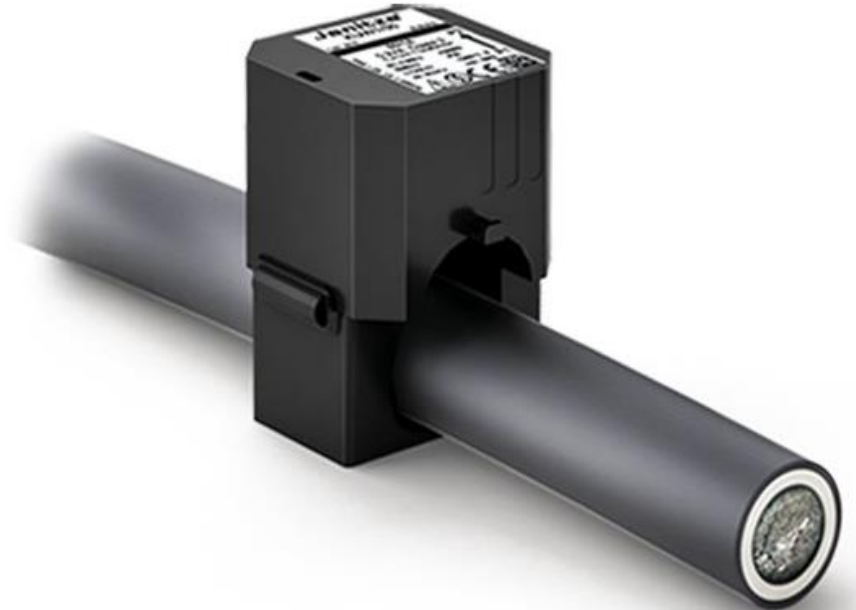
Quelle Backs & Henne (2018)

# Stromwandler im Detail (V)

## Bauformen

### 3. Kabelumbauwandler

- Montage ausschließlich **an isolierten Primärleitungen** (Zuleitungskabeln) an trockenen und witterungsgeschützten Orten
- Einsatz ohne Unterbrechung des Primärstromkreises möglich



Bildquelle:  
<https://www.janitza.de/files/produkte/uebersicht/Stromwandler/Kabelumbauwandler-Typ-KUW.jpg>

Quelle Backs & Henne (2018)

# Stromwandler im Detail (VI)

## Bauformen

### 4. DIN Hutschienenwandler

- Sonderform mit integriertem Spannungsabgriff und Sicherung
- Hohe Eigensicherheit durch Sicherung am Primärstromleiter
- weitere Vorteile:
  - + Einfache Verdrahtung
  - + niedrige Montagekosten
  - + Verringerter Platzbedarf
  - + hohe Zuverlässigkeit



Bildquelle: <https://www.secomp.de>

Quelle Backs & Henne (2018)

# Stromwandler im Detail (VII)

## Rogowskispule, Strommesszange

- Ein Öffnen der Stromkreise ist in der industriellen Praxis nicht ohne größeren Aufwand machbar.
- Durch die Verwendung von Induktionsklemmen (Zangenstrommesser, Rogowskispule) kann das Öffnen umgangen werden.
- Das durch den Stromfluss verursachte magnetische Feld in dem jeweiligen Leiter wird durch die Zange oder Schlaufe umschlossen.
- Der Strom induziert ein Magnetfeld und dieses wiederum in einer Sekundärspule wieder einen Strom, der proportional zum Leitungsstrom ist.



Abb.: Beispiel Rogowskispule



Abb.: Beispiel Strommesszange

# Stromwandler im Detail (VIII)

## Stromzange

- Funktionsprinzip analog der Klappwandler
- Besteht aus Spule auf Eisenkern
- Zangen aus ferromagnetischem Material
- Der zu messende Primärstrom wird ungefähr mit Wicklungsanzahlverhältnis herabgesetzt



Fluke 1800

Bildquelle: <https://www.datatec.de/Multimeter/Zubehoer-Multimeter/Stromzangen-Wandler/1800>

Quelle Backs & Henne (2018)

# Stromwandler im Detail (IX)

## Rogowski-Spule

- Spule auf Kunststoffrohr + Isolierung
- Induzierte Spannung in Spule proportional zur zeitlichen Änderung des Stromflusses (*→ nur bei Wechselstrom anwendbar*)
- Spule muss nicht exakt mittig und/oder rund um Stromleiter platziert werden
- **Vorteile:**
  - + universelle Anwendbarkeit (auch an unzugänglichen Stellen) und großer Messbereich
  - + robust und unempfindlich gegenüber Störgrößen (magnet. Strahlung) und Überstrom



Bildquelle: [https://www.wago.com/de/stromwandler-spannungsabgriffe/rogowski-spule/p/855-9300\\_500-000](https://www.wago.com/de/stromwandler-spannungsabgriffe/rogowski-spule/p/855-9300_500-000)

Quelle Backs & Henne (2018)



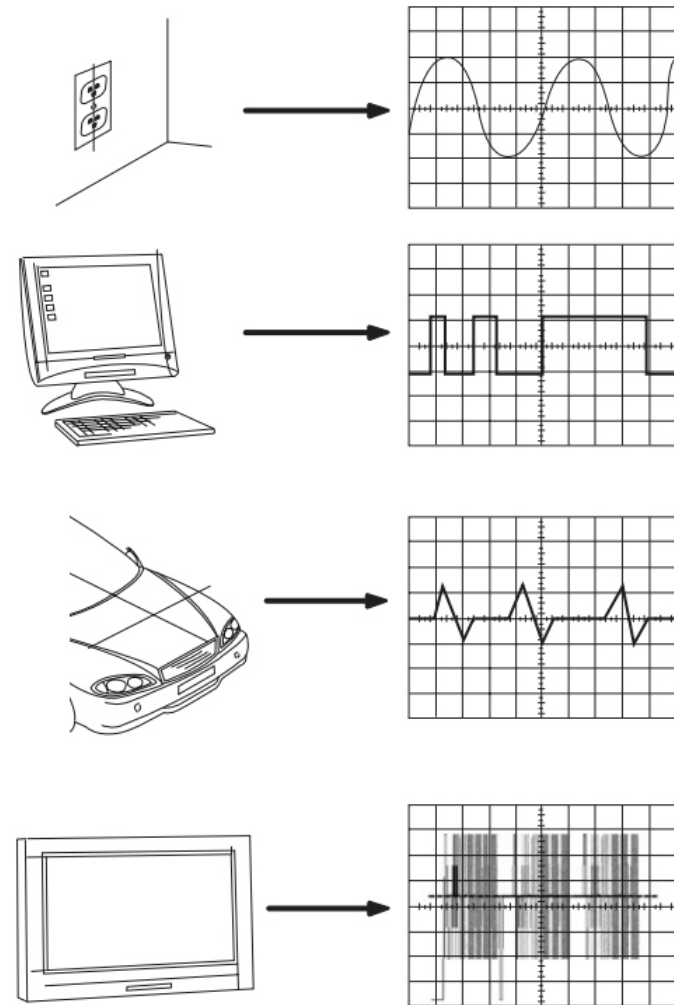
Digitale Messgeräte

# ELEKTRISCHE LEISTUNGSMESSUNG

# Messung über digitale Messgeräte (I)

## Oszilloskop

- Misst nur die Spannung direkt.
- Es gibt analoge (Kathodenstrahloszilloskop) und digitale Geräte.
- Digitale Geräte heute Stand der Technik.
- Oszilloskop ist eine Erweiterung eines simplen Voltmeters, da der Spannungsverlauf inklusive der Schwankungen über die Zeit dargestellt wird.
- Oszilloskop als Hilfsmittel zur möglichst schnellen visuellen Überprüfung von Veränderungen über die Zeit.



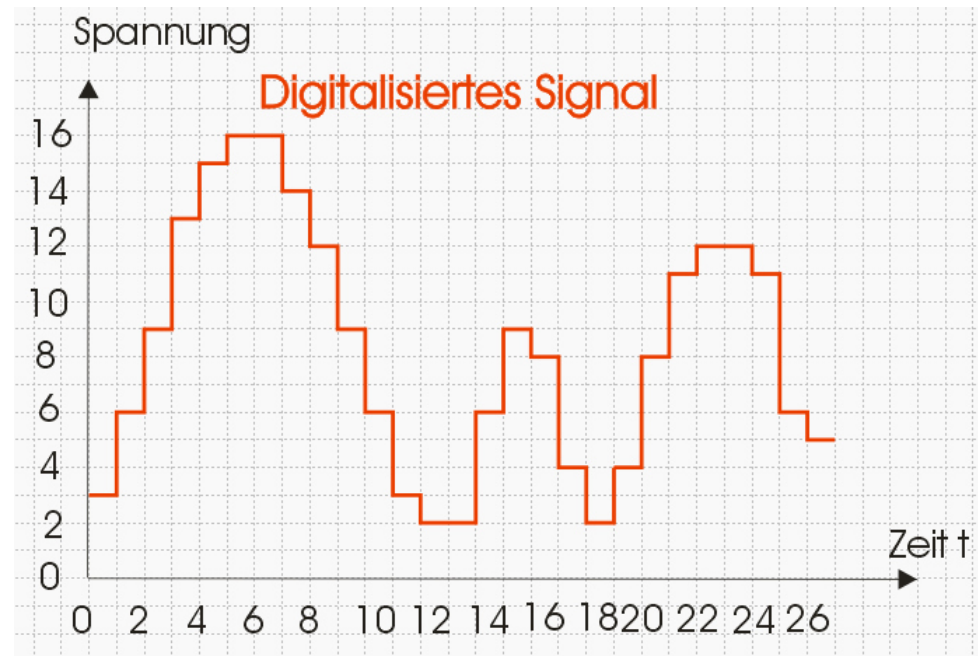
**Abb.:** Quellen üblicher Signale

Quelle: [http://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/media/fb\\_e/labore/gelab/xyz\\_oszilloskope.pdf](http://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/media/fb_e/labore/gelab/xyz_oszilloskope.pdf), Seite 8

# Messung über digitale Messgeräte (II)

## Allgemeines

- In digitalen Messgeräten wird die elektrische Leistung nicht explizit, sondern indirekt über die Spannung und den Strom bestimmt ( $P = U I$ ).
- Mit einem Digitalmultimeter können diverse Messgrößen aufgenommen werden (Voltmeter, Amperemeter).
- Mittels Analog-Digital-Umsetzer (ADU, engl. ADC) wird das analoge Signal in ein digitales umgewandelt.



**Abb.:** Digitalisiertes Signal

Quelle: <http://infokurs.de/wiki/images/a/ac/Signal8.gif>

# Messung über digitale Messgeräte (III)

## Beispiel

- Auswahl der von der Stromstärke und Spannung abgeleiteten zahlreichen Messgrößen in einem digitalen Leistungsmessgerät:

Effektivwerte	Bezeichnung	Einheit
Phasenspannung	$U_{L1-N}/U_{L2-N}/U_{L3-N}$	V, kV
Außenleiterspannung	$U_{L1-L2}/U_{L2-L3}/U_{L3-L1}$	V, kV
Strom	$I_{L1}/I_{L2}/I_{L3}$	A, kA
Scheinleistung je Phase	$S_{L1}/S_{L2}/S_{L3}$	VA, kVA, MVA, GVA
Wirkleistung je Phase Bezug/Abgabe	$\pm P_{L1}/\pm P_{L2}/\pm P_{L3}$	W, kW, MW, GW
Blindleistung je Phase positiv/negativ	$\pm Q_{L1}/\pm Q_{L2}/\pm Q_{L3}$	var, kvar, Mvar, Gvar
Gesamtscheinleistung	$S_{\text{gesamt}}$	VA, kVA, MVA, GVA
Gesamtwirkleistung Bezug/Abgabe	$\pm P_{\text{gesamt}}$	W, kW, MW, GW
Gesamtblindleistung positiv/negativ	$\pm Q_{\text{gesamt}}$	var, kvar, Mvar, Gvar
Leistungsfaktor	$ PF_{L1} / PF_{L2} / PF_{L3} $	%
Gesamtleistungsfaktor	$PF_{\text{gesamt}}$	%

# Spannungs- und Strommessung von dreiphasigem Wechselstrom (I)

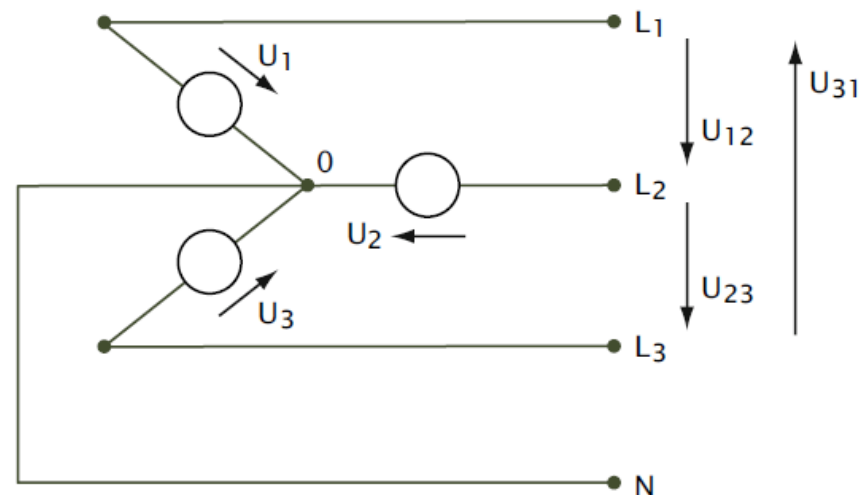
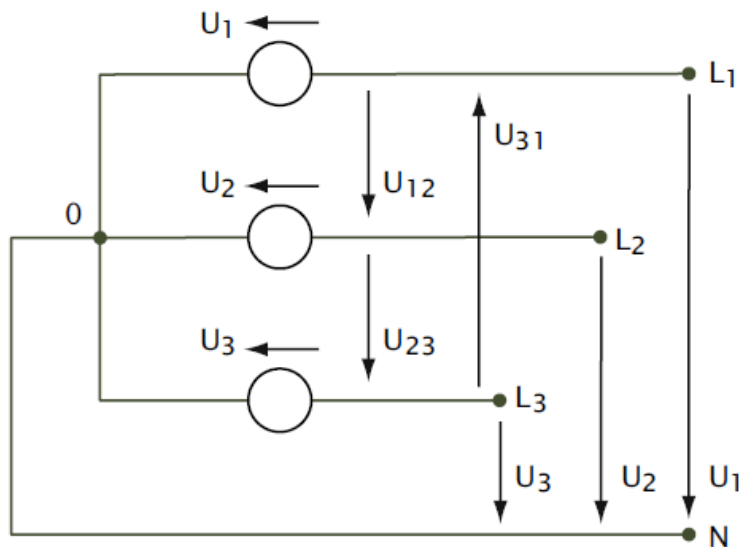
## Sternschaltung

- Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$U_{\text{Leiter}} = \sqrt{3}U_{\text{Strang}}$$

$$I_{\text{Leiter}} = I_{\text{Strang}}$$

$$P_{\text{ges}} = 3U_{\text{Strang}}I_{\text{Strang}} = \sqrt{3}U_{\text{Leiter}}I_{\text{Leiter}}$$



**Abb.:** Sternschaltung; 0=Sternpunkt

Quelle: Hesselbach S. 88 (Ahlers 2010)

# Spannungs- und Strommessung von dreiphasigem Wechselstrom (II)

## Dreieckschaltung

- Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$I_{\text{Leiter}} = \sqrt{3} I_{\text{Strang}}$$

$$U_{\text{Leiter}} = U_{\text{Strang}}$$

$$P_{\text{ges}} = 3 U_{\text{Strang}} I_{\text{Strang}} = \sqrt{3} U_{\text{Leiter}} I_{\text{Leiter}}$$

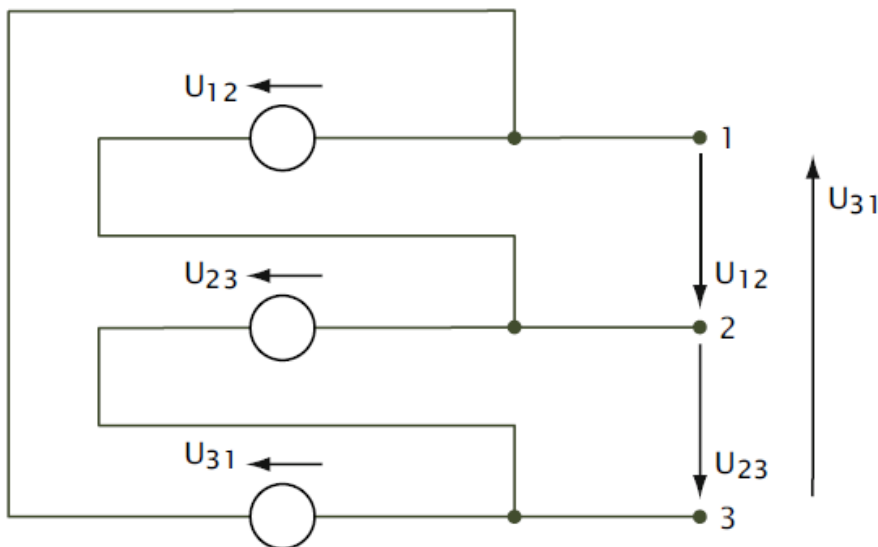
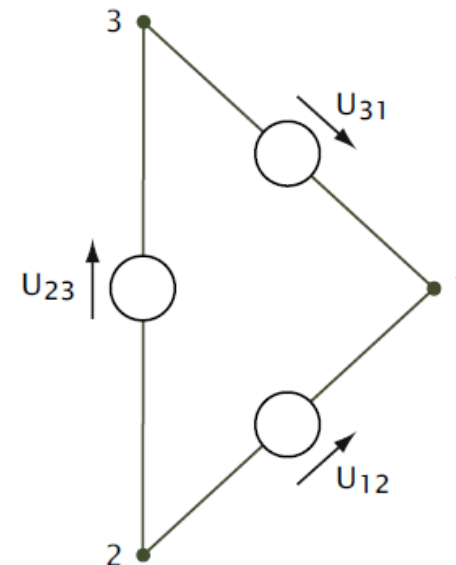


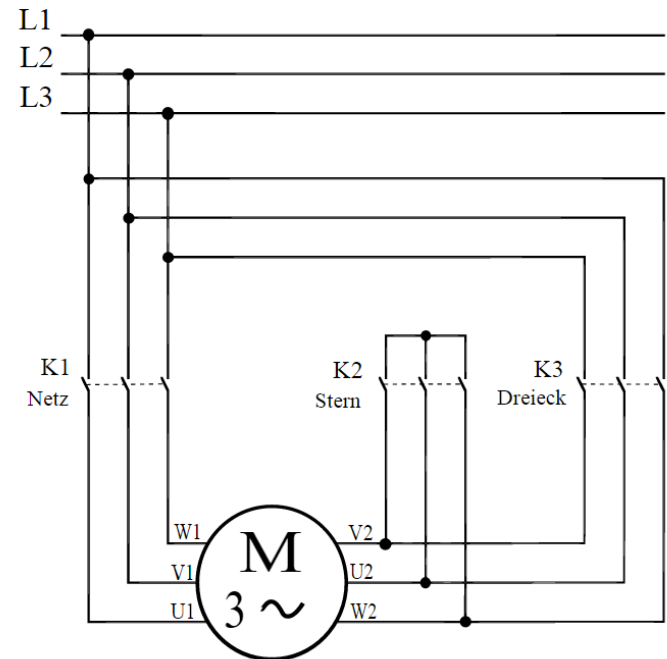
Abb.: Dreieckschaltung

Quelle: Hesselbach S. 88 (Ahlers 2010)



# Exkurs: Stern-Dreiecks-(Anlauf)Schaltung

- Große Drehstrommotoren werden mit reduzierter Leistung angefahren um hohe Anfahrströme zu vermeiden
- Motor beim Anlassen zuerst in Sternschaltung (im reinen Leerlauf, also ohne Belastung, gilt:  $P_{\text{Stern}} = 1/3 P_{\text{Dreieck}}$ )
- Wenn die Belastung durch den Antrieb erhöht wird, wird ein höheres Drehmoment verlangt
- Schaltung in Dreieck (Höhere Spannung sorgt für höheres Drehmoment)



**Abb.:** Stern-Dreieckschaltung

Quelle: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/dd/Stern-Dreieck.svg/220px-Stern-Dreieck.svg.png>

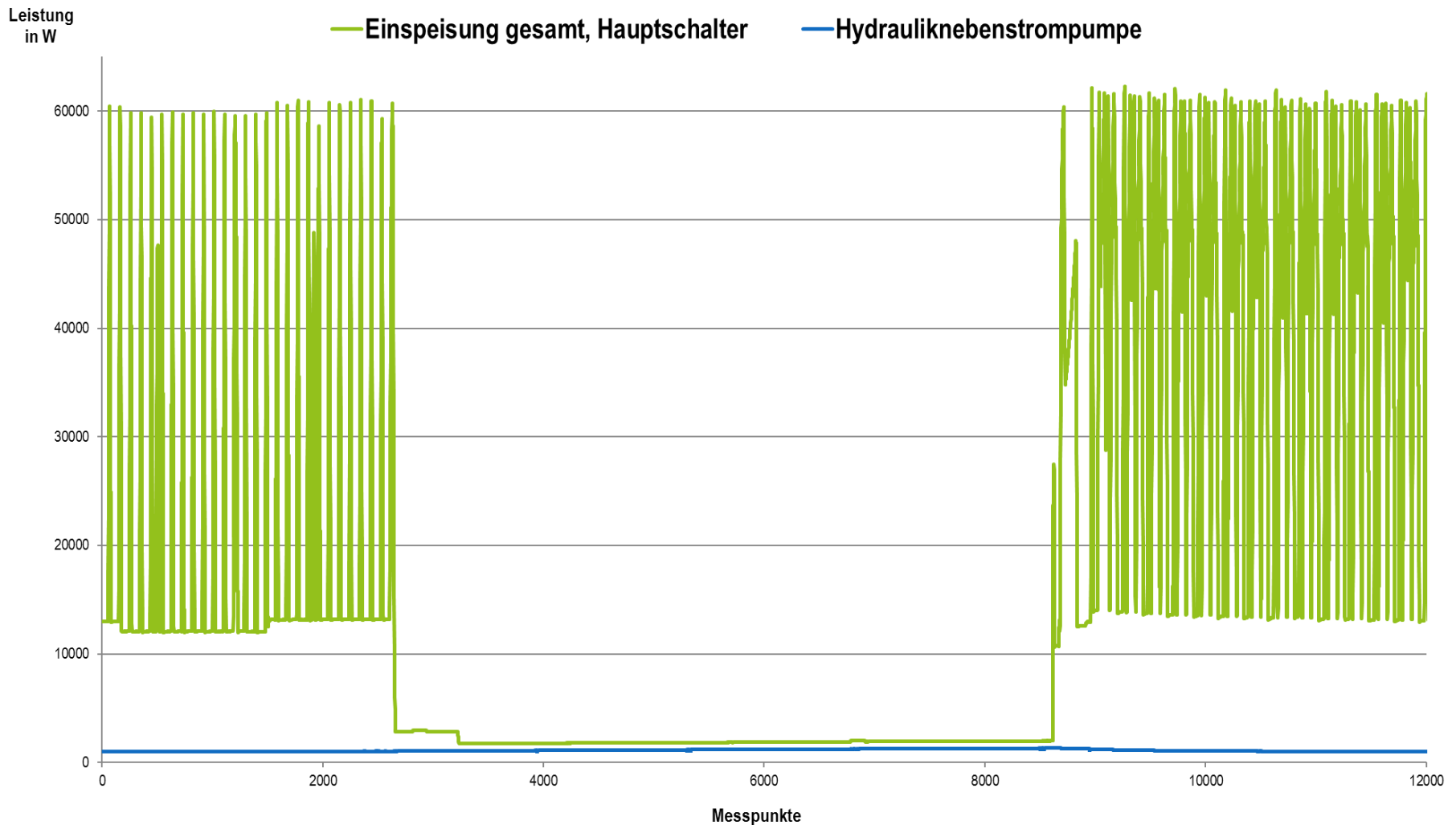
Beispiele aus der Praxis

# ELEKTRISCHE LEISTUNGSMESSUNG



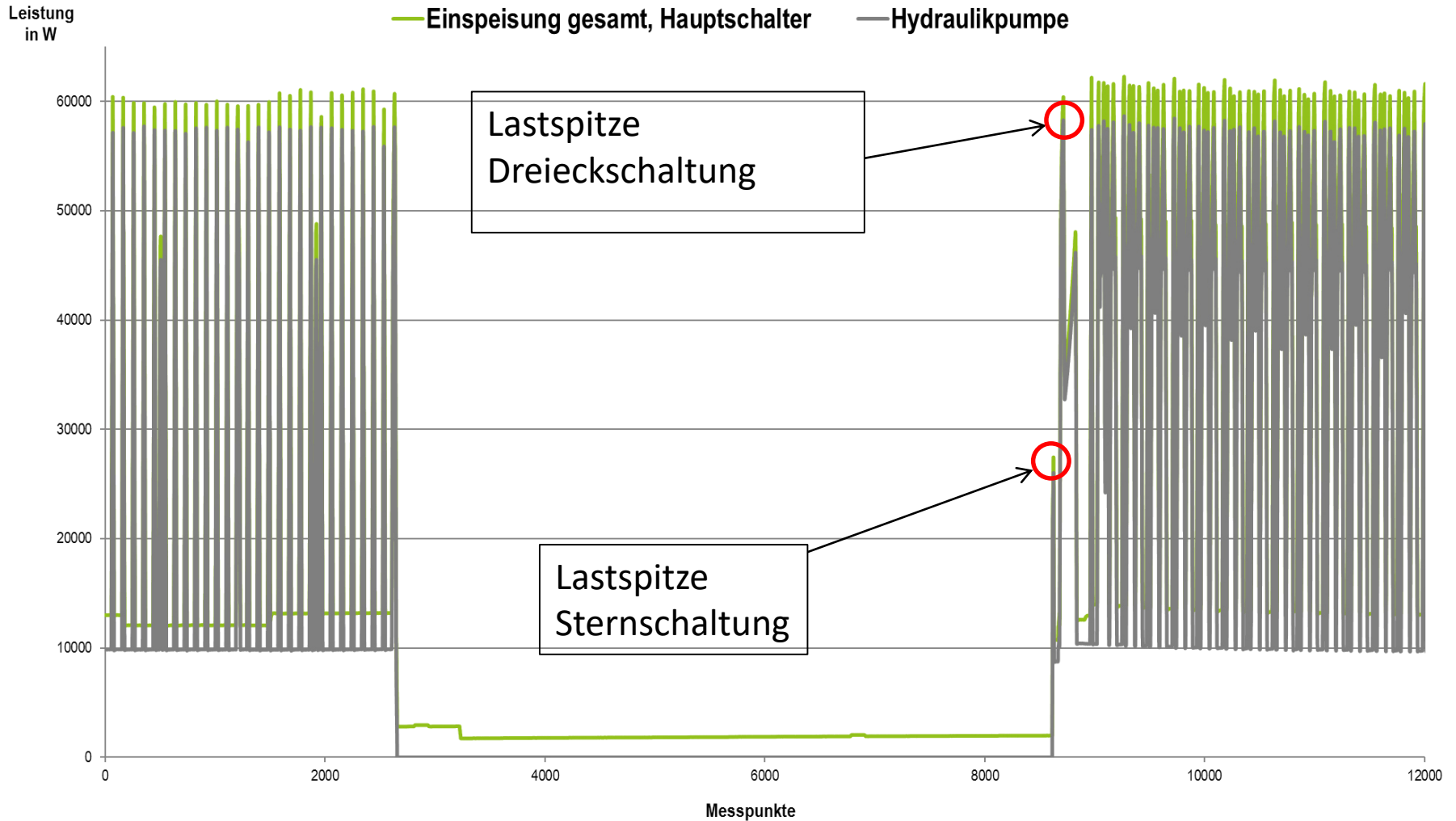
# Beispiel Werkzeugmaschine (Axialformen) (I)

Messung der Gesamteinspeisung und einer einzelnen Maschinenkomponente A



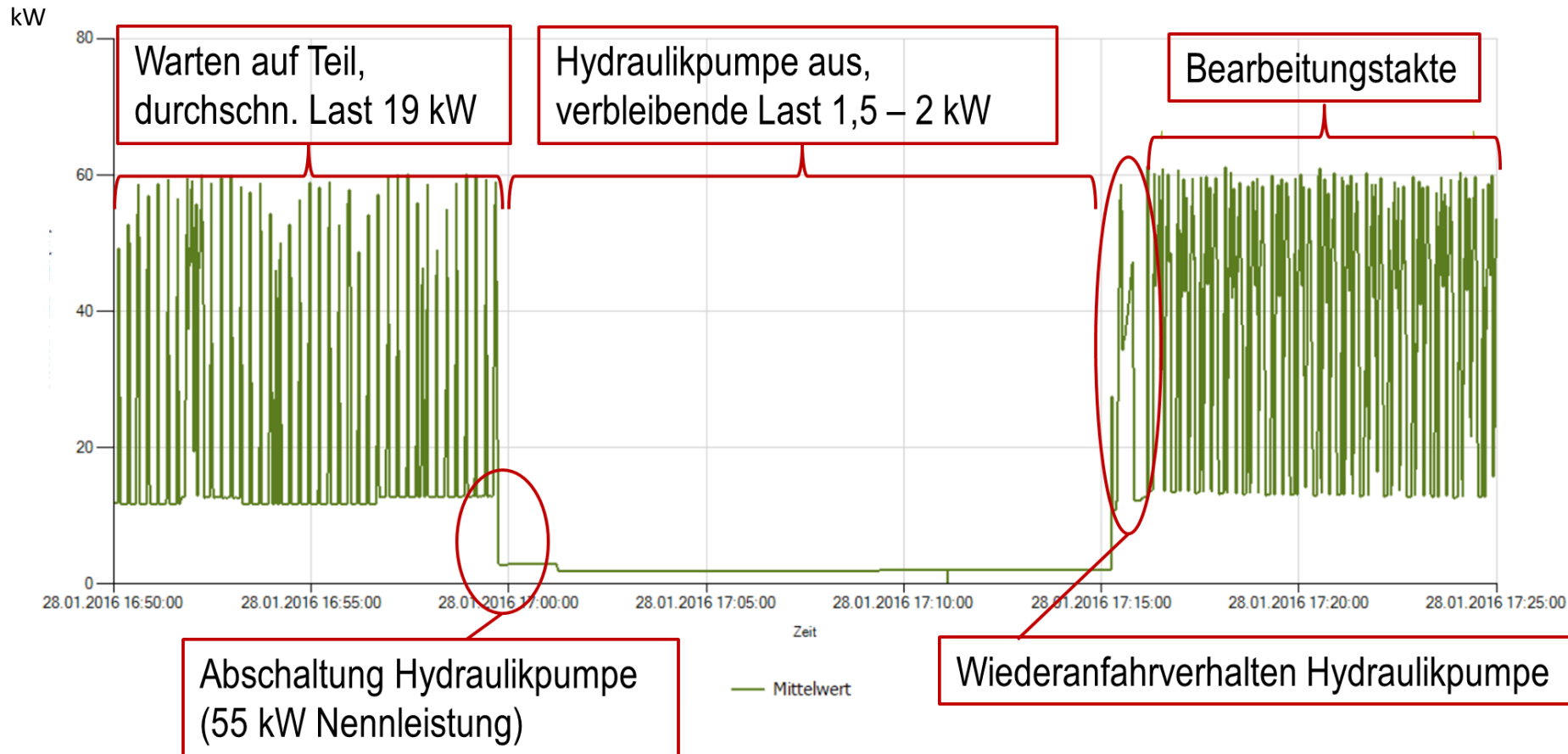
# Beispiel Werkzeugmaschine (Axialformen) (II)

Messung der Gesamteinspeisung und Komponente B (Top-Verbraucher der Maschine)

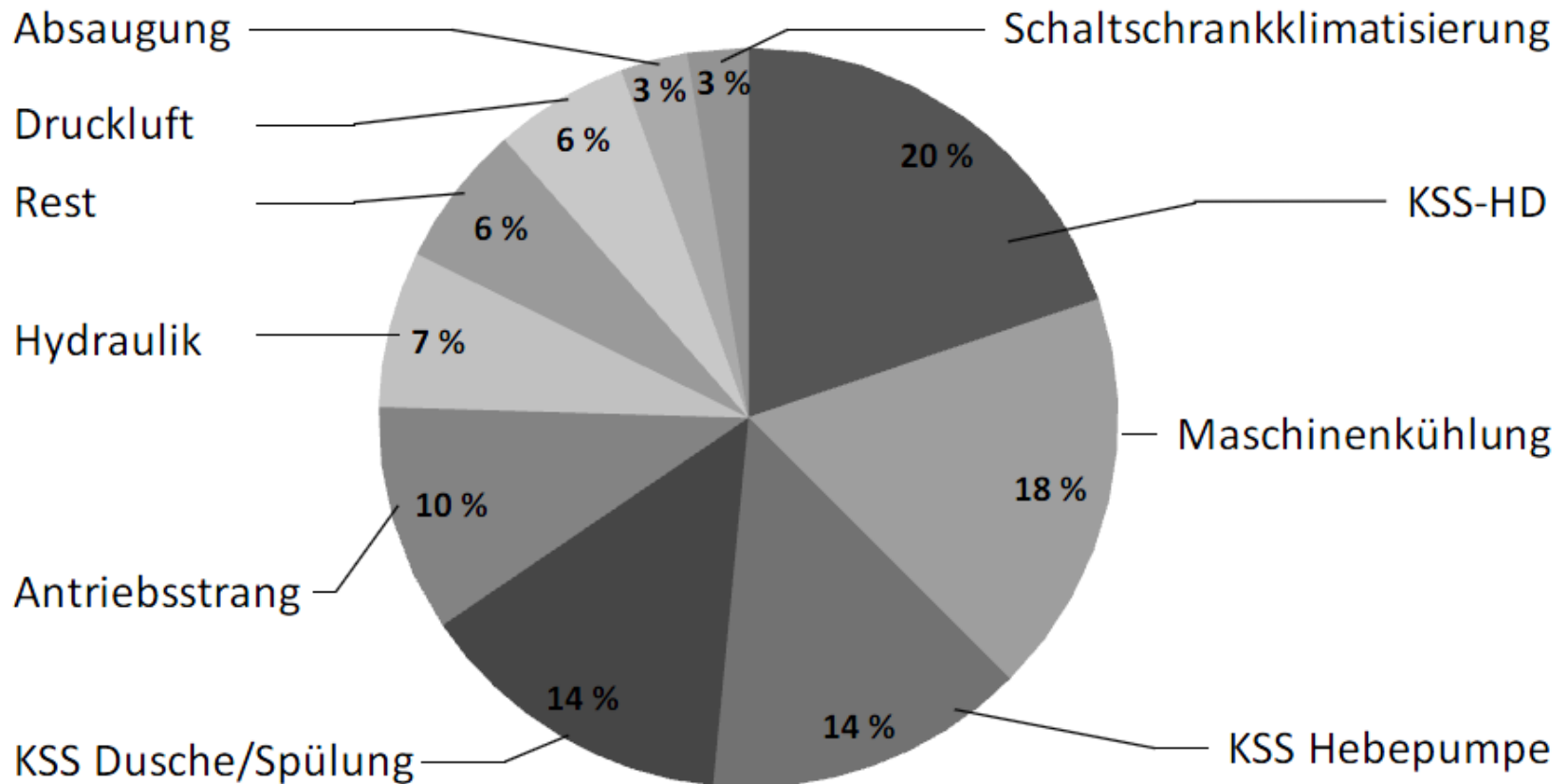


# Beispiel Werkzeugmaschine (Axialformen) (III)

## Analyse verschiedener Betriebszustände



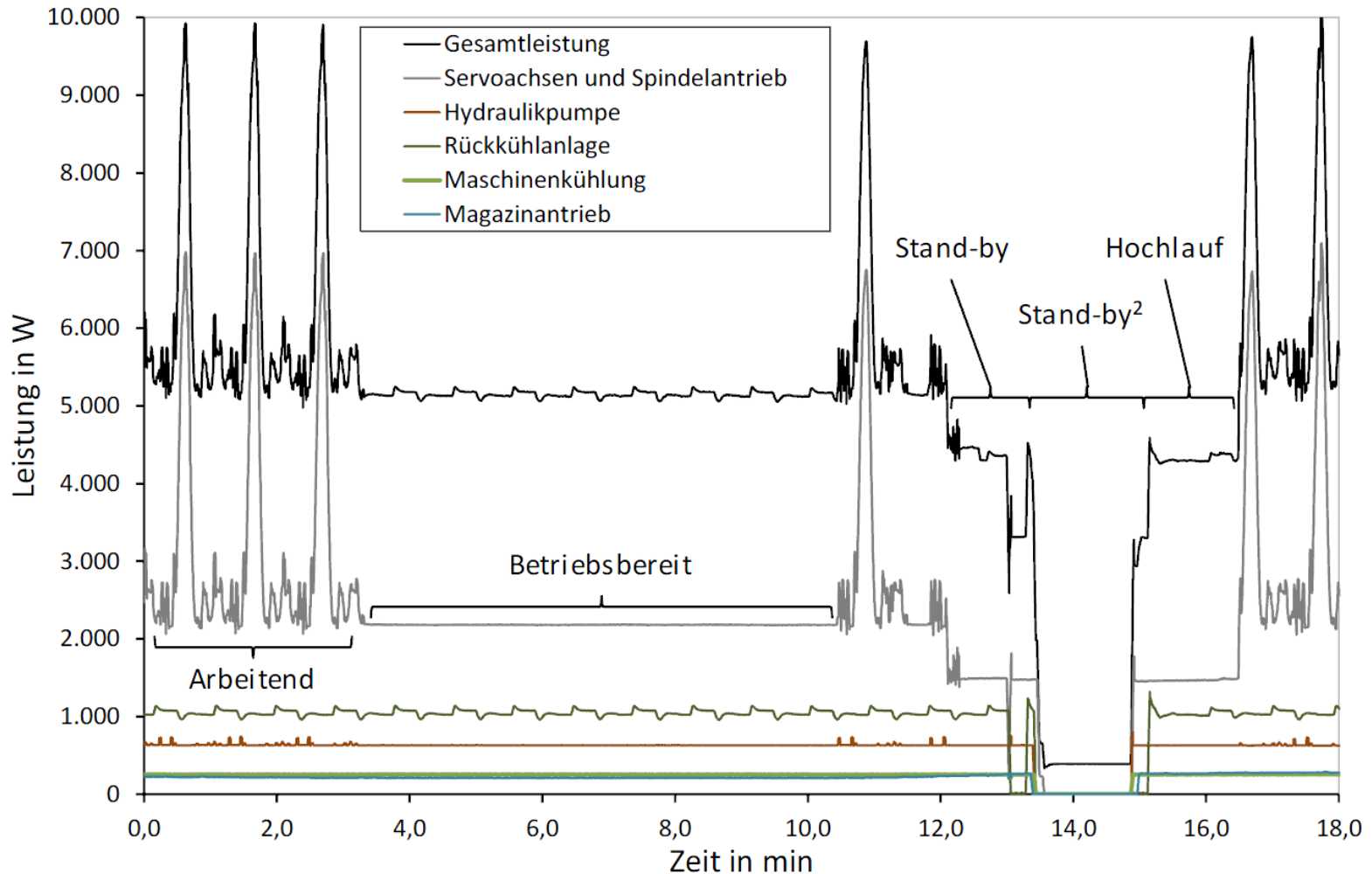
# Prozentuale Energiekostenverteilung einer typischen Werkzeugmaschine



Quelle: vgl. Abele et al. 2011a, S. 66

# Beispiel Fräsmaschine

## Gesamtleistungsverlauf und Leistungsverläufe der Einzelkomponenten

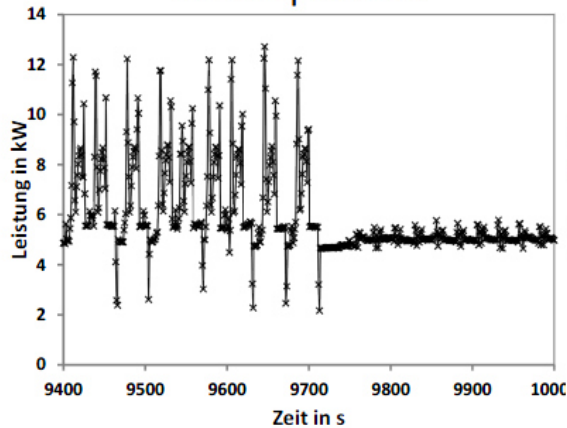


Quelle: vgl. Goy 2016, S. 41

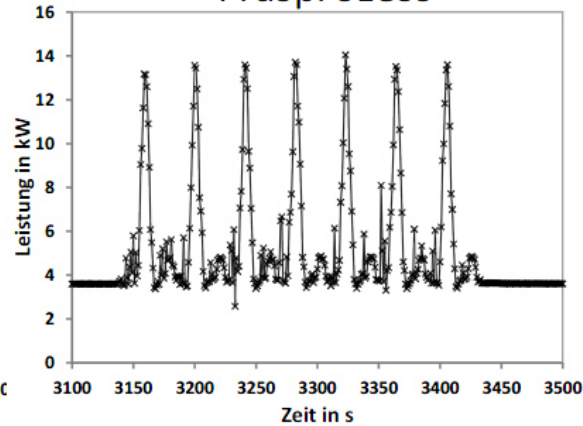
# Typische Leistungsverläufe weiterer Prozesse

## Metallbearbeitung

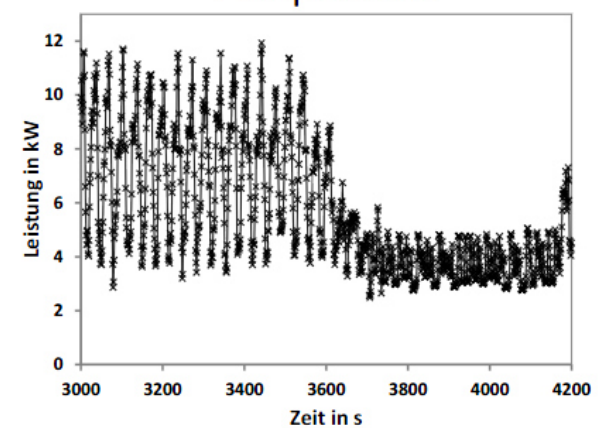
### Schleifprozess



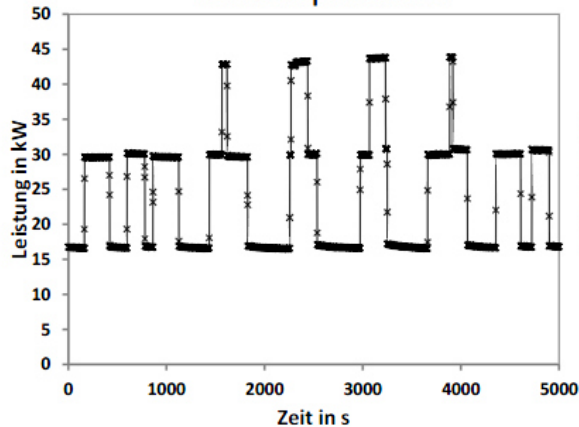
### Fräsprozess



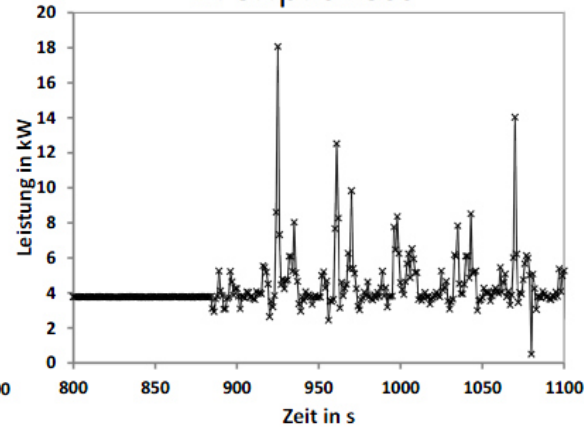
### Honprozess



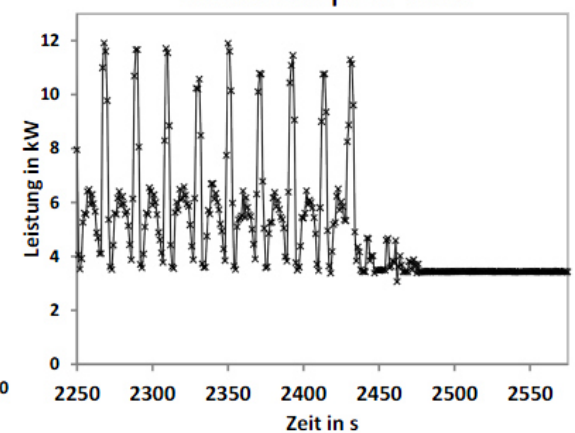
### Waschprozess



### Drehprozess



### Schweißprozess



Quelle: vgl. Goy 2016, S. 38

**VIELEN DANK FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT**

# Quellen (Auszug)

- Abele, Eberhard; Benjamin, Kuhrke; Rothenbücher, Stefan (2011a). *Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen*. Hg. v. Technische Universität Darmstadt (PTW). Darmstadt
- Goy (2016): Stand-by-Betrieb von Maschinen und Anlagen, Dissertation Universität Kassel