

Yokogawa Deutschland GmbH

Test- und Messtechnik

Leistungsmesstechnik Seminar

**KIT – Karlsruher Institut für  
Technologie**

20.03.2014

**YOKOGAWA**   
TEST & MEASUREMENT

Ugur Gürsoy

Produkt Support Leistungsanalysatoren

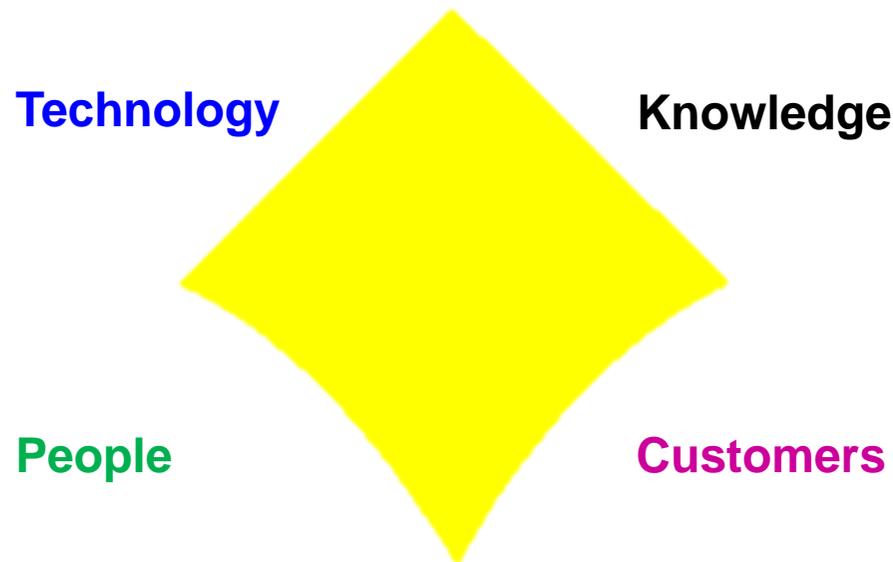
**Yokogawa Deutschland GmbH**  
Niederlassung Herrsching  
Test- und Messtechnik  
Gewerbestr. 17  
82211 Herrsching  
Tel.: +49 8152 9310-0  
Fax: +49 8152 9310-60

Precision Making

[tmi.yokogawa.com/de](http://tmi.yokogawa.com/de)

- Das Yokogawa-Branding
- Grundlagen der elektrischen Leistungsmessung
  - Elektrische Leistung bei Gleich- und Wechselstrom, Harmonischen Analyse, Mechanische Leistung
- Funktionsweise digitaler Leistungsmessgeräte
- 3-phasige Leistungsmessung an elektrischen Antrieben
  - 3-Phasensysteme
    - 3-Wattmeter-Methode 3P4W
    - 2-Wattmeter-Methode 3P3W / 2-Wattmeter-Methode 3V3A mit zusätzlichem Wattmeter
    - DELTA Transformation
    - Zusammenfassung 3-Phasensysteme
- Leistungsmessung an elektrischen Antrieben
  - Messungen am Umrichter
  - Synchrone, mechanische Leistungsmessung
  - Wirkungsgrad- und Verlustleistungsmessung
- Spezifikationen breitbandiger Leistungsmessgeräte
- Anwendungsgebiete
- Praktische Vorführung

# Die Yokogawa-Philosophie



Die spitzen Winkel und die scharfen Kanten repräsentieren die Spitzentechnologie.

Die geraden Linien repräsentieren die Richtung des Unternehmens und die Hingabe zur Qualität, Präzision und die ständige Weiterentwicklung unserer Produkte und Dienstleistungen.

Die sanfte Wölbung der unteren Hälfte steht für die warmherzige Natur der Yokogawa Mitarbeiter.

Und vermittelt die starke Beziehung mit unseren Kunden, die uns vertrauen und unsere hochpräzisen und sehr zuverlässigen Messinstrumente einsetzen.

# About Yokogawa Test & Measurement

## Branding

What does Yokogawa Test &  
Measurement make?



**Precision**

# About Yokogawa Test & Measurement

## Branding

What does Yokogawa Test &  
Measurement do?



**Precision  
Making**

# About Yokogawa Test & Measurement

## Branding

Who are Yokogawa Test & Measurement people?

Yokogawa is the most trusted Test & Measurement company in the world.



# Grundlagen der elektrischen Leistung

YOKOGAWA   
TEST & MEASUREMENT

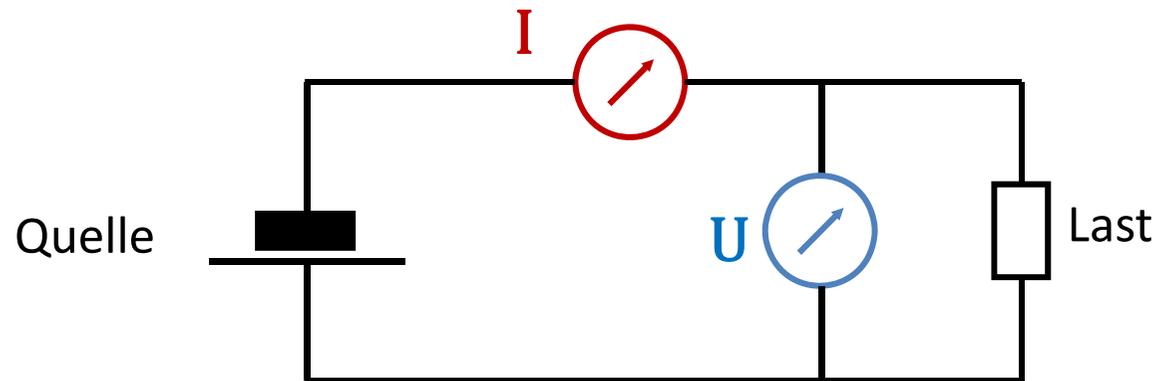


# Grundlagen

## Elektrische Leistung bei Gleichstrom

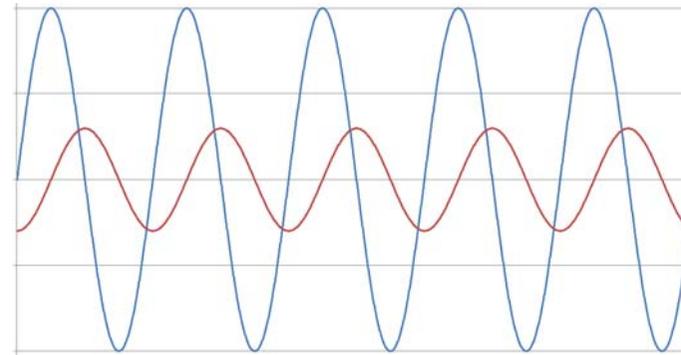
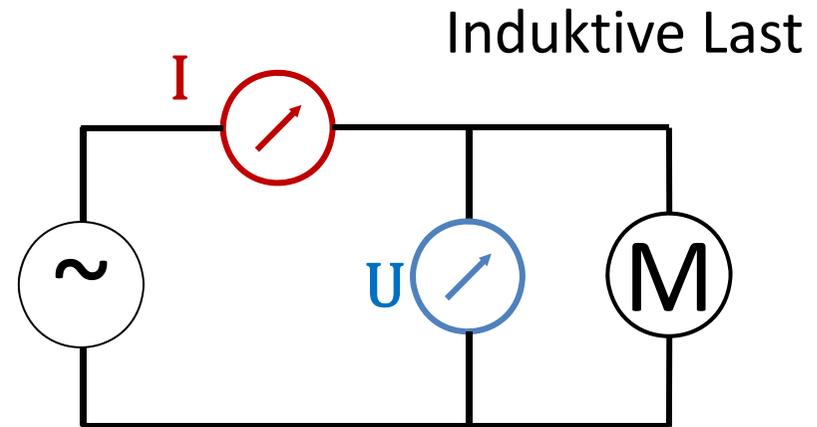
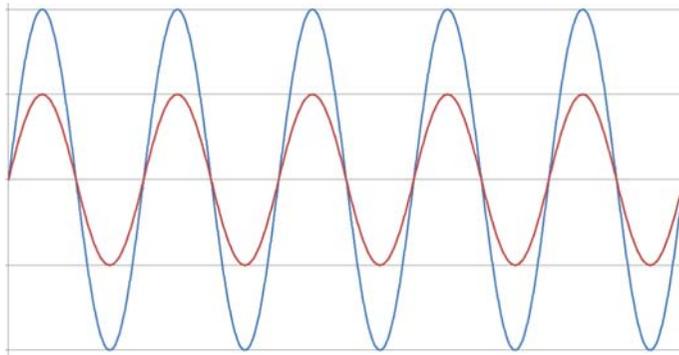
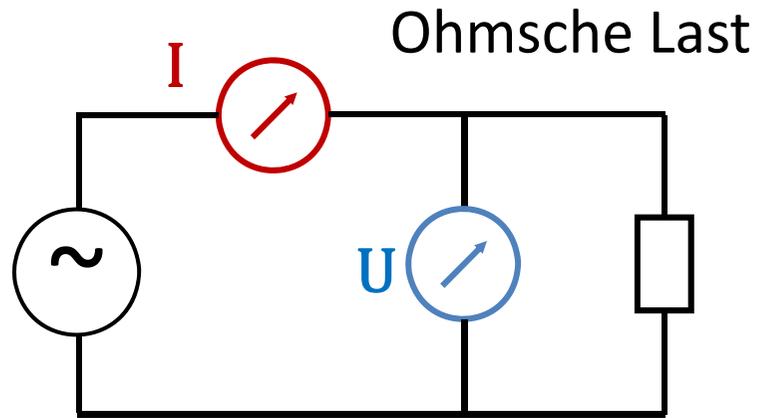
Gleichstrom (DC) :

$$P = U_{dc} * I_{dc}$$
$$[W] = [V] * [A]$$



# Grundlagen

## Elektrische Leistung bei Wechselstrom



# Grundlagen

## Elektrische Leistung bei Wechselstrom

$$\text{Wechselstrom (AC): } P = U_{\text{eff}} * I_{\text{eff}} * \cos \varphi$$
$$[\text{W}] = [\text{V}] * [\text{A}]$$



## Elektrische Leistung bei Wechselstrom allgemein

Wirkleistung allgemein, für nicht-sinusförmige, beliebige Signale:

$$P = U_{\text{eff}} * I_{\text{eff}} * \lambda$$
$$[W] = [V] * [A]$$

Leistungsfaktor

$$\lambda = \frac{|P|}{S} = \frac{|Wirkleistung|}{Scheinleistung}$$
$$0 < \lambda < 1 \quad [\text{dimensionslos}]$$

Andere Bezeichnung: Power Factor PF

$\lambda = \cos\phi$  bei der Grundschiwingung

# Grundlagen

## Leistungsfaktor-Messung bei Harmonischen

### Leistungsfaktor

$\lambda = \cos\varphi$  bei  
Grundschwingungen  
und Oberschwingungen

$$\lambda = \cos(27,19^\circ)$$

$$\lambda = 0,8895$$

$$\lambda = P1(1) / S1(1)$$

$$\lambda = 265,17 \text{ W} / 298,13 \text{ VA}$$

$$\lambda = 0,8895$$



# Grundlagen

## Elektrische Leistung allgemein

### Definition der elektrischen Leistung

#### Allgemeine Leistungsberechnung (AC + DC)

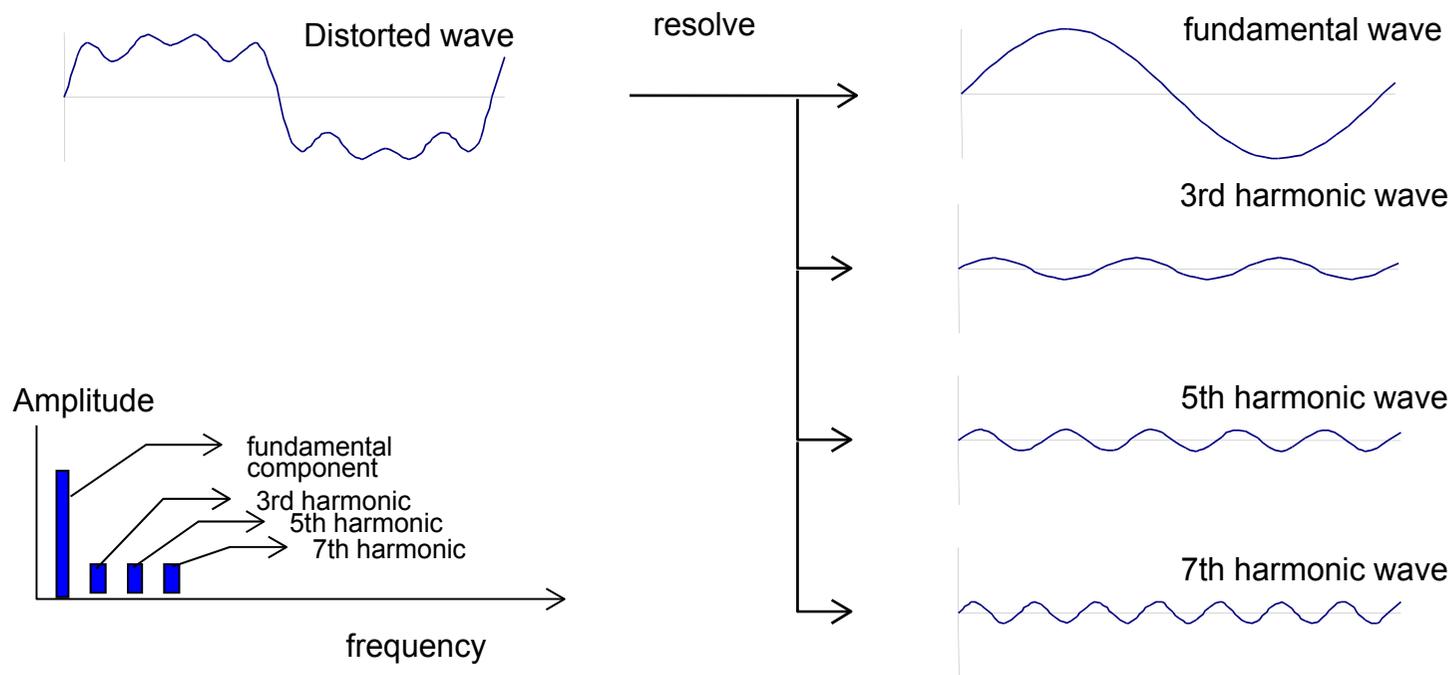
Effektivwert *	$U_{rms} = \sqrt{1/T \int_0^T u^2(t) dt}$	$I_{rms} = \sqrt{1/T \int_0^T i^2(t) dt}$
Gleichrichtwert	$U_{rm} = 1/T \int_0^T  u(t)  dt$	$I_{rm} = 1/T \int_0^T  i(t)  dt$
Mittelwert	$U_m = 1/T \int_0^T u(t) dt$	$I_m = 1/T \int_0^T i(t) dt$
Pos. Scheitelwert	$U_{pk+} = u_{max}(t) dt$	$I_{pk+} = i_{max}(t) dt$
Neg. Scheitelwert	$U_{pk-} = u_{min}(t) dt$	$I_{pk-} = i_{min}(t) dt$
Wirkleistung	$P = 1/T \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt$	
Scheinleistung	$S = U_{rms} \cdot I_{rms}$	
Blindleistung	$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$	
Leistungsfaktor	$\lambda = P / S$	
Crestfaktor	$F_{CU} = U_{pk} / U_{rms}$	$F_{CI} = I_{pk} / I_{rms}$
Formfaktor	$F_{FU} = U_{rms} / U_{rm}$	$F_{FI} = I_{rms} / I_{rm}$

- \* Der Effektivwert eines Wechselsignals oder schwankenden Gleichsignals verursacht am ohmschen Widerstand die gleiche Wärmewirkung (Verlustleistung) wie ein konstantes Gleichsignal.

# Grundlagen

## Harmonischen-Analyse

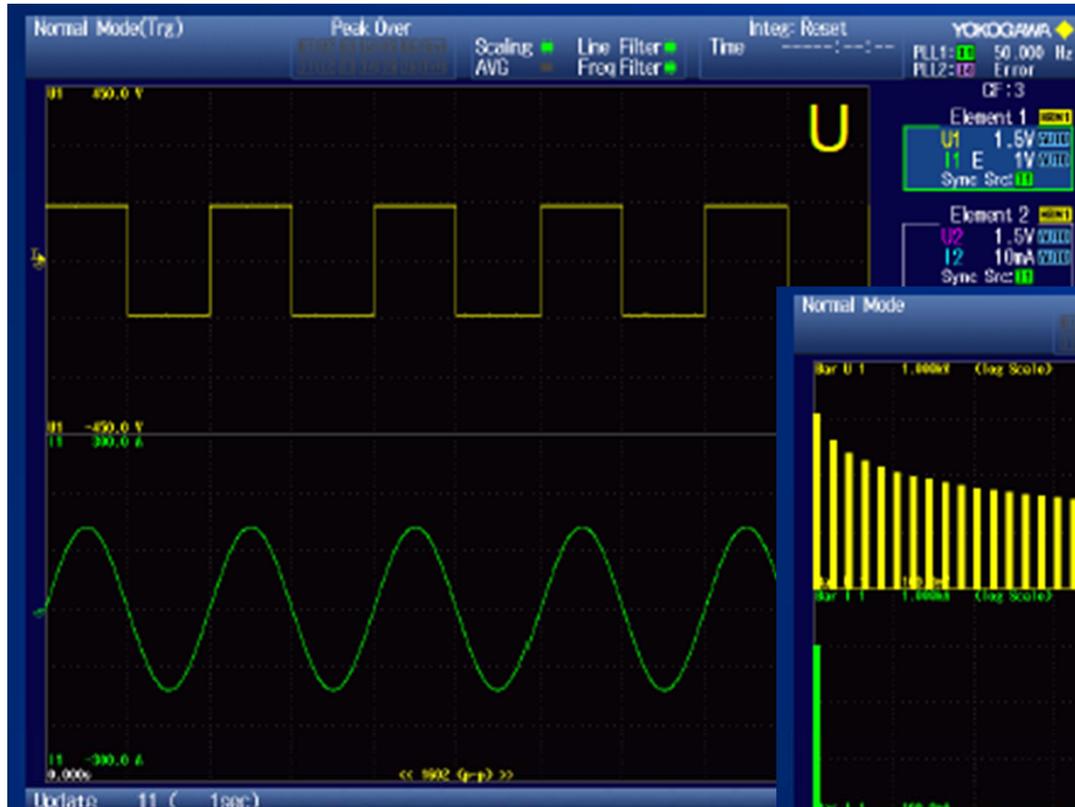
Eine verzerrtes Signal besteht aus mehreren Sinuskurven mit mehrfachen Frequenzen der Grundwelle.



Die Harmonischen Analyse zerlegt ein verzerrtes Signal in einen DC-Anteil (falls vorhanden), Grundwelle und die höheren Harmonischen.

# Grundlagen

## Harmonischen-Analyse



Nur Harmonische gleicher Ordnungszahl (Frequenz) resultieren in Wirkungsleistung.

## Klirrfaktor

- Klirrfaktor = Oberschwingungsgehalt = Verzerrungsgehalt

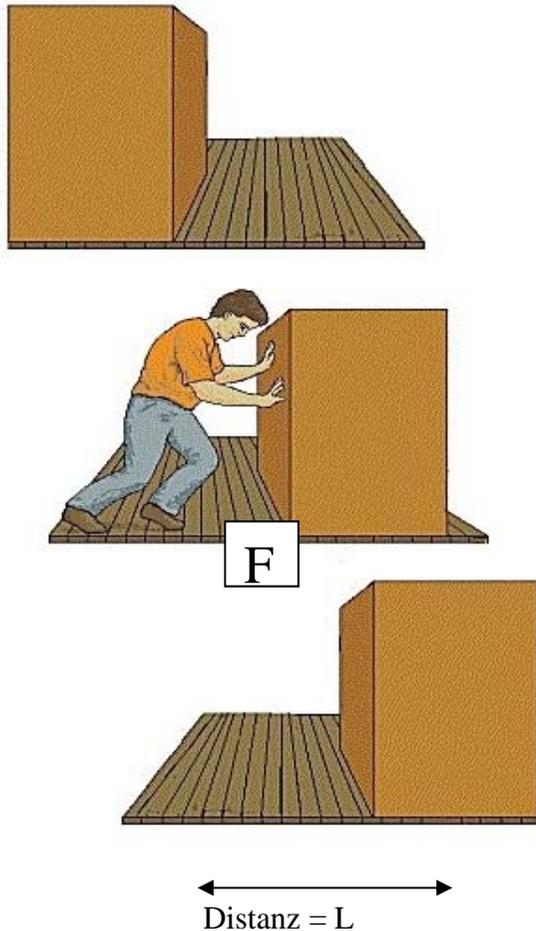
$$k = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}} = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U}$$

- Leistungsmessgeräte müssen in der Lage sein **simultan** (ohne Messmodus Umschaltung) die Oberschwingungsanalyse durchzuführen.
  - es müssen Effektivwerte von Strom und Spannung gleichzeitig mit den Klirrfaktoren bestimmt werden
  - bei Umrichtern/Motoren sollte die Messung von Gesamtleistung und Grundschwingungsleistung ohne Umschaltung des Messmodus geschehen.
  - ...

# Grundlagen

## Mechanische Leistung

Arbeit (Energie) wird verrichtet, wenn ein Objekt über die **Distanz L** mit der **Kraft F** verschoben wird.



- Arbeit =  $F \times L$  [Nm] = [J]

- Einheit: Newton x Meter = Joule

$$\text{Leistung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}}$$

$$P = \frac{F \times L}{t} \equiv \left[ \frac{\text{Nm}}{\text{s}} \right] = \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}} \right] = [\text{Watt}] = [\text{W}]$$

**Leistung ist die pro Zeiteinheit verrichtete Arbeit.**

# Grundlagen

## Meachanische Leistung bei Rotation (am Motor)

$$\begin{aligned}P_{\text{mech}} &= M * \omega \\ &= 2\pi * M * n \\ &= 2\pi * \text{Drehmoment} * \text{Drehzahl}\end{aligned}$$

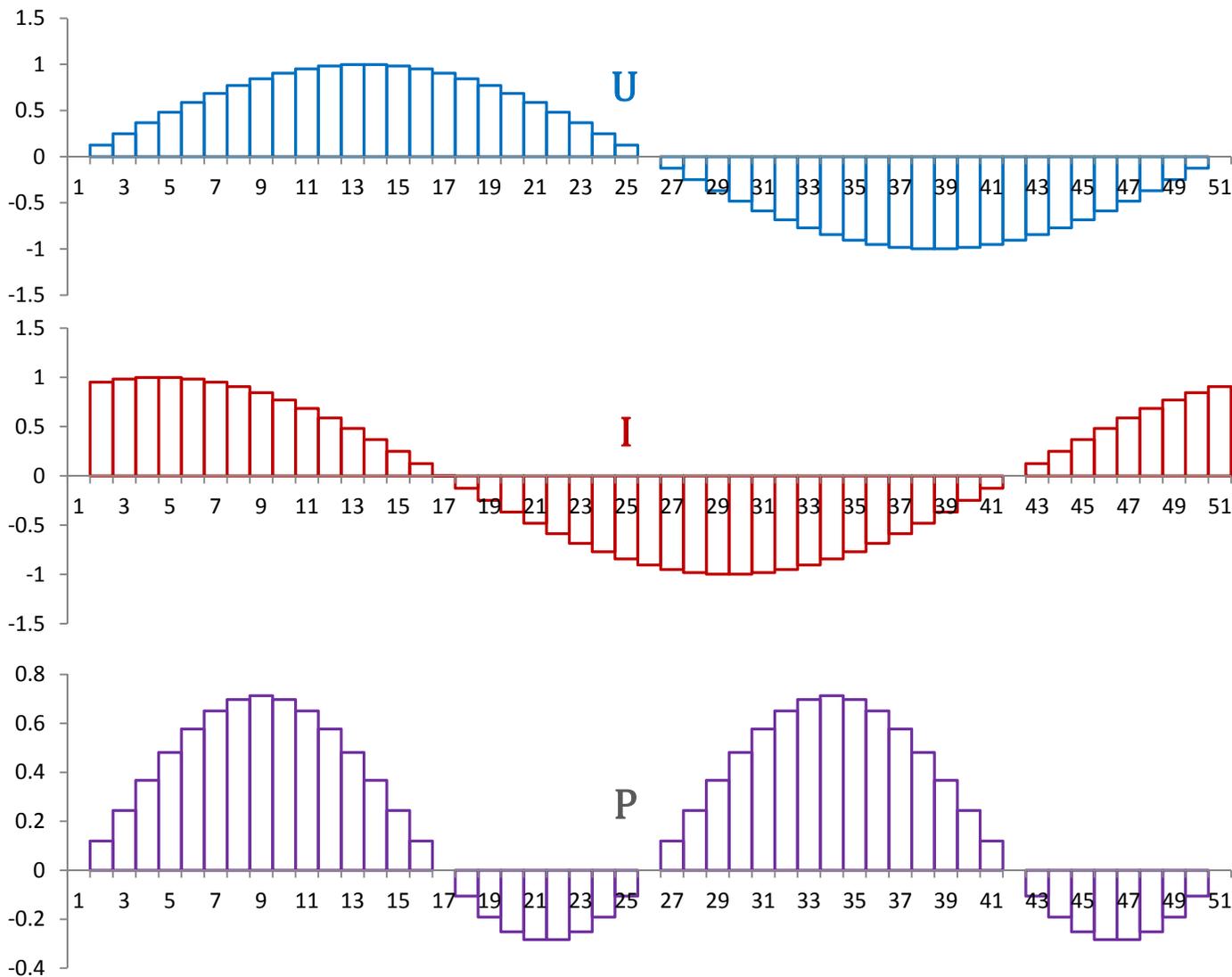
- Bei Rotation: Leistung ist proportional zu *Drehmoment \* Drehzahl*
- Drehzahl **n** in Umdrehung pro Minute
- Drehmoment **M** in Nm (Newton meter)
- Mechanische Leistung **Pmech** in W (Watt)

# Wie arbeitet ein Leistungsmessgerät? Digitalisieren und berechnen

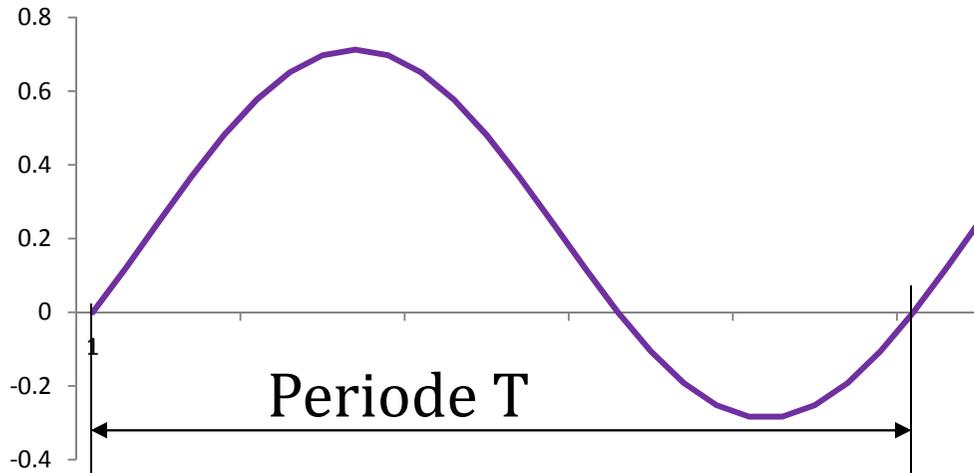
**YOKOGAWA**   
TEST & MEASUREMENT



## Digitalisieren

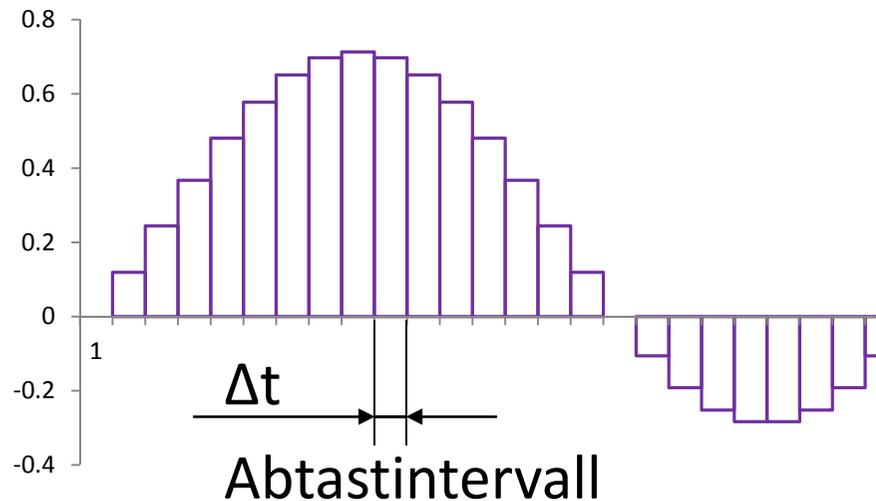


## Abtasten und Berechnen



$$P_{AVG} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) * i(t) dt$$

$u(t)$  Momentanwert der Spannung zur Zeit  $t$   
 $i(t)$  Momentanwert des Stromes zur Zeit  $t$   
 $T$  Periodendauer

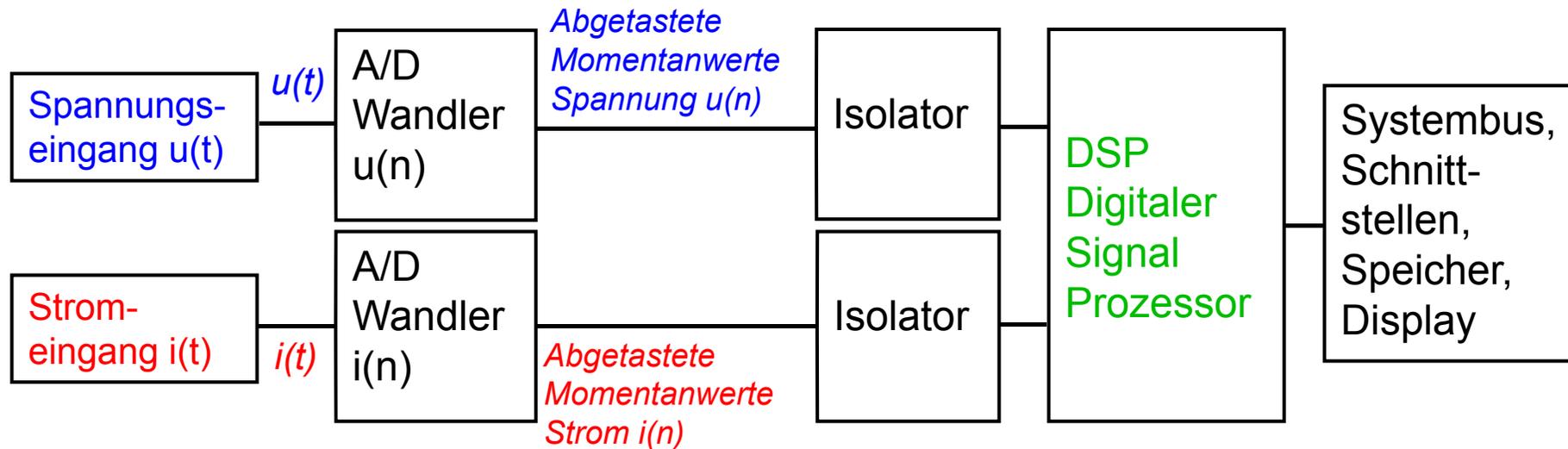


$$P_{AVG} = \frac{1}{k} \int_{k=1}^{k=T/\Delta t} u(k) * i(k) \Delta t$$

$u(k)$  Momentanwert der Spannung zur Zeit  $k$   
 $i(k)$  Momentanwert des Stromes zur Zeit  $k$   
 $T$  Periodendauer

# Funktionsweise digitaler Leistungsmessgeräte

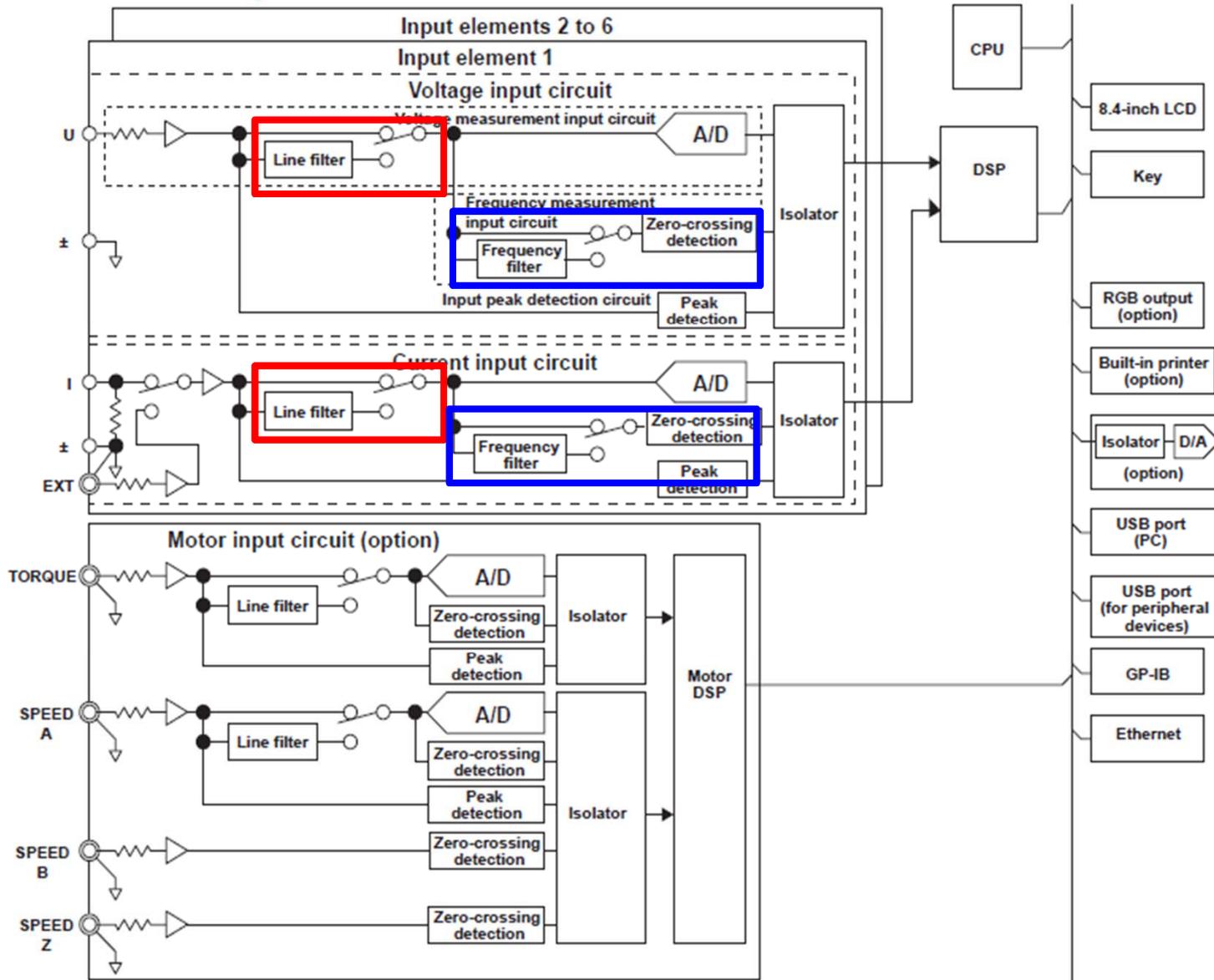
## Prinzipschaltung digitaler Leistungsmessgeräte



Strom und Spannung sind zu einem Leistungsmodul zusammengefasst.  
Keine getrennten Steckkarten für Strom und Spannung!

# Funktionsweise digitaler Leistungsmessgeräte

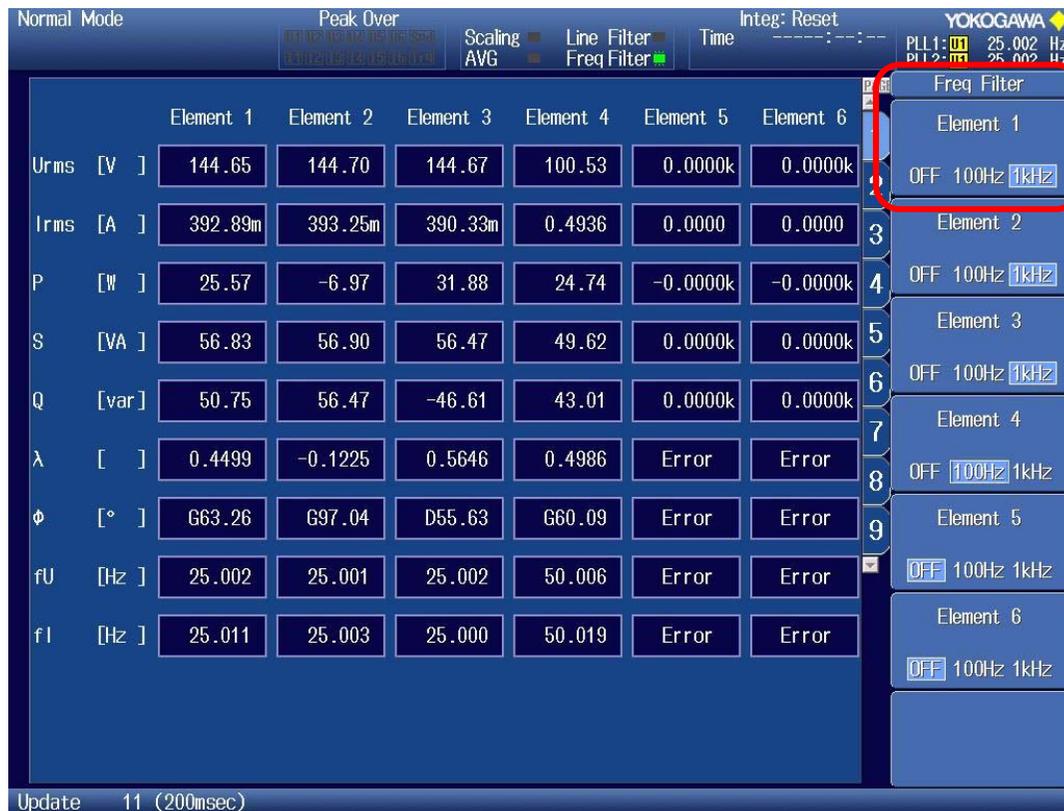
## WT1800 Blockdiagramm



- **Line-Filter = Netzfilter = Bandbreitenfilter = Eingangsfiler → beeinflusst das Messsignal**
- **Zero-Cross-Filter = Frequenzfilter (einschalten wenn die Grundfrequenz nicht erkannt wird)**
- **Current input und Current sensor /EXT input sind miteinander verbunden. Deshalb nie zusammen versorgen!**

## WT1800 Frequenzfilter (Zero-Cross-Filter)

Mit diesem Tiefpaßfilter können unerwünschte Störungen vom Frequenzzähler ferngehalten werden. (Beispiel: Frequenzerkennung beim Umrichtersignal)



# Funktionsweise digitaler Leistungsmessgeräte

## WT1800 Line-Filter (Bandbreitenfilter)

LINE FILTER um die Auswahl der Eckfrequenz für jedes Modul zu treffen (OFF, 100 Hz bis 100.0 kHz in Schritten von 100 Hz, 300kHz, 1MHz). **Mit diesem Tiefpaßfilter können unerwünschte Störungen von Spannungs-, Strom- und Leistungsmessungen ferngehalten werden.**



*Beispiel: Messung am Umrichter*

Bandbreite 100 kHz

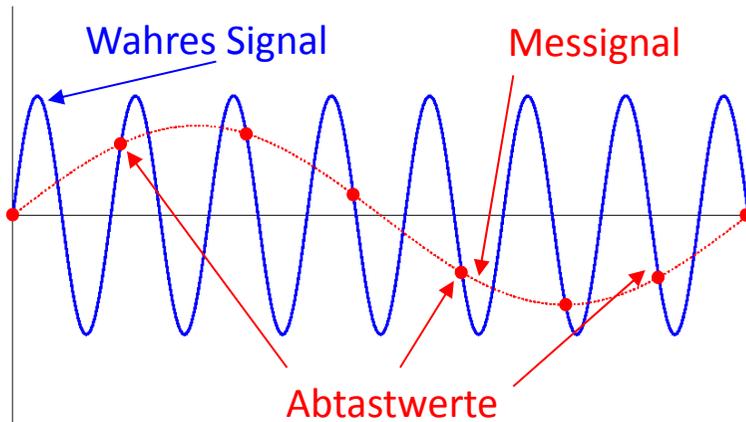
Bandbreite 10 kHz

Bandbreite 500 Hz



## Line-Filter (Bandbreitenfilter im Messkreis)

### Begründung für Eingangsfiler: Aliasing (Spiegelfrequenzen)



Nach SHANNON:

$$f_{\text{Samplingfrequenz}} > 2 f_{\text{Signalfrequenz}}$$

Aliasing ist in der Antriebstechnik kein Thema. Gut 95 % der Leistung steckt in der Grundschwingung bis ca. 1 kHz. Die Abtastfrequenz der Messgeräte liegen bis zu 2000 mal höher.



## Line-Filter (Bandbreitenfilter im Messkreis)

### Begründung für Eingangsfiler: EMV-Probleme



Am Umrichterausgang treten immer wieder Probleme mit Störungen im Signal auf.

Die direkte Messung mit den internen Shunts des WTs ist relativ problemlos.

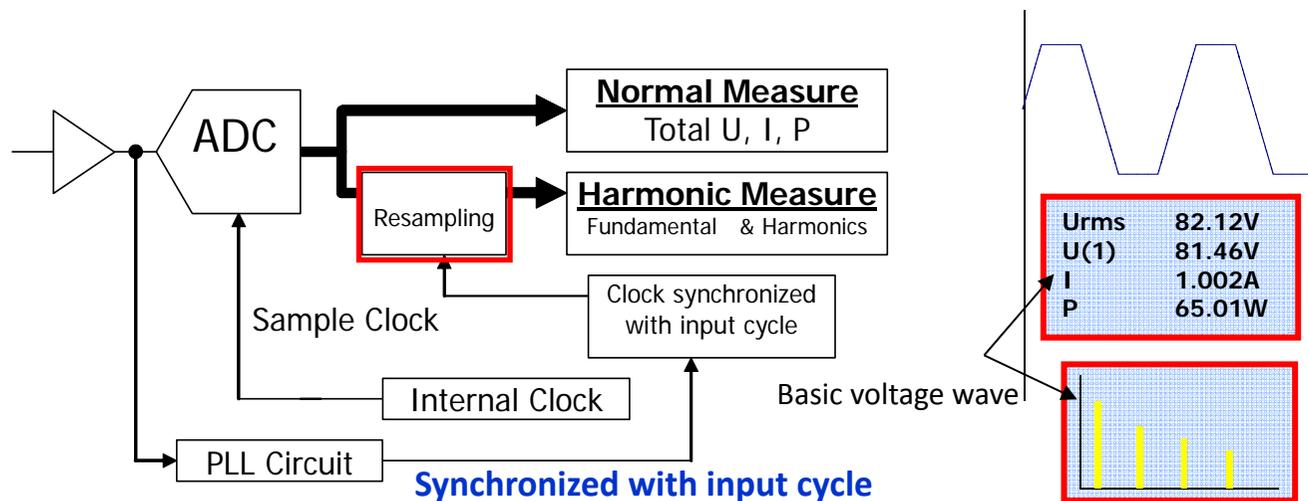
Bei externen Stromsensoren mit niedrigem Ausgangssignal kann ein Eingangsfiler > 50 kHz eine gute Problemlösung darstellen.

Zu niedrig gewählte Filterwerte verfälschen das Ergebnis.

Filterung ist keine Begründung für die Erhöhung des Wirkungsgrades!

# Funktionsweise digitaler Leistungsmessgeräte

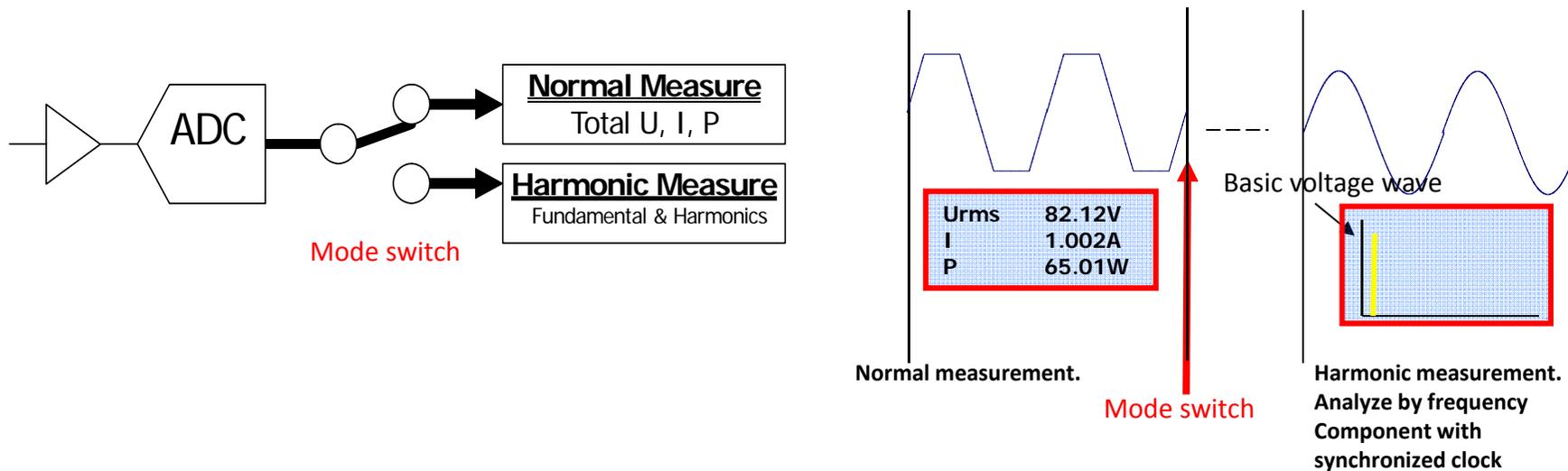
## Simultane Harmonischen-Analyse



- Normale Leistungsmessung und Harmonischen-Analyse läuft **simultan!**
- Keine Umschaltung des Messmodus erforderlich.
- Wichtig bei Messungen am Frequenzumrichter/Motor. *I.d.R ist nur die Grundwelle ist für den mechanischen Antrieb verantwortlich.*
- Alle YOKOGAWA Leistungsmessgeräte können **simultan** alle Parameter ermitteln!

# Funktionsweise digitaler Leistungsmessgeräte

## Keine simultane Messung aller Parameter (veraltete Technik)



- Zwischen zwei Messmodi muss umgeschaltet werden!
- Keine vollständige Analyse aller Parameter zur selben Zeit!
- Nicht ideal für Messungen am Frequenzumrichter/Motor für gleichzeitige Analyse.
- Ungeeignet wenn breitbandige und einzelne Harmonische gleichzeitig zu analysieren sind.
- Mehr Zeitaufwand!

# 3-phasige Leistungsmessung an elektrischen Antrieben

**YOKOGAWA**   
TEST & MEASUREMENT



# Grundlagen

## Blondel's Lehrsatz

Für die Messung der Gesamtleistung (in einem mehrphasigen System) wird ein Wattmeter weniger benötigt als die Anzahl der vorhandenen Leitungen.

**1P 2W**      **1 Wattmeter**

**1P 3W**      **2 Wattmeter** (auch Split Phase genannt - in USA bei Haushaltsgeräten üblich)

**3P 3W**      **2 Wattmeter**

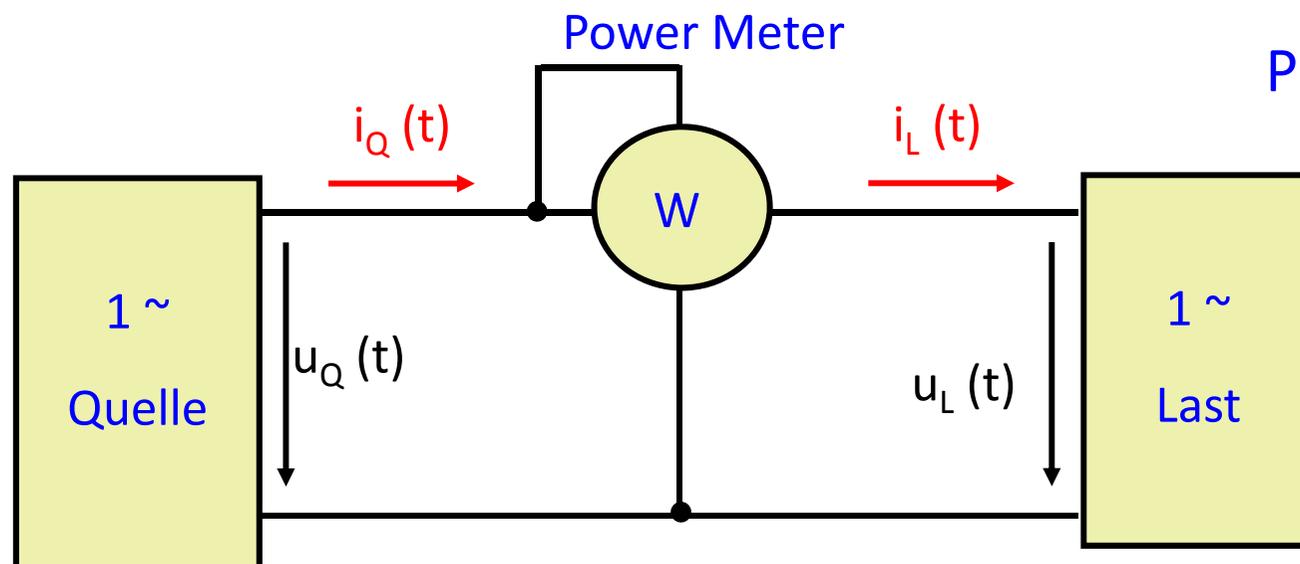
**3P 4W**      **3 Wattmeter**

P = Phase

W = Wire

# Grundlagen

## 1-Phasensystem (1P2W)

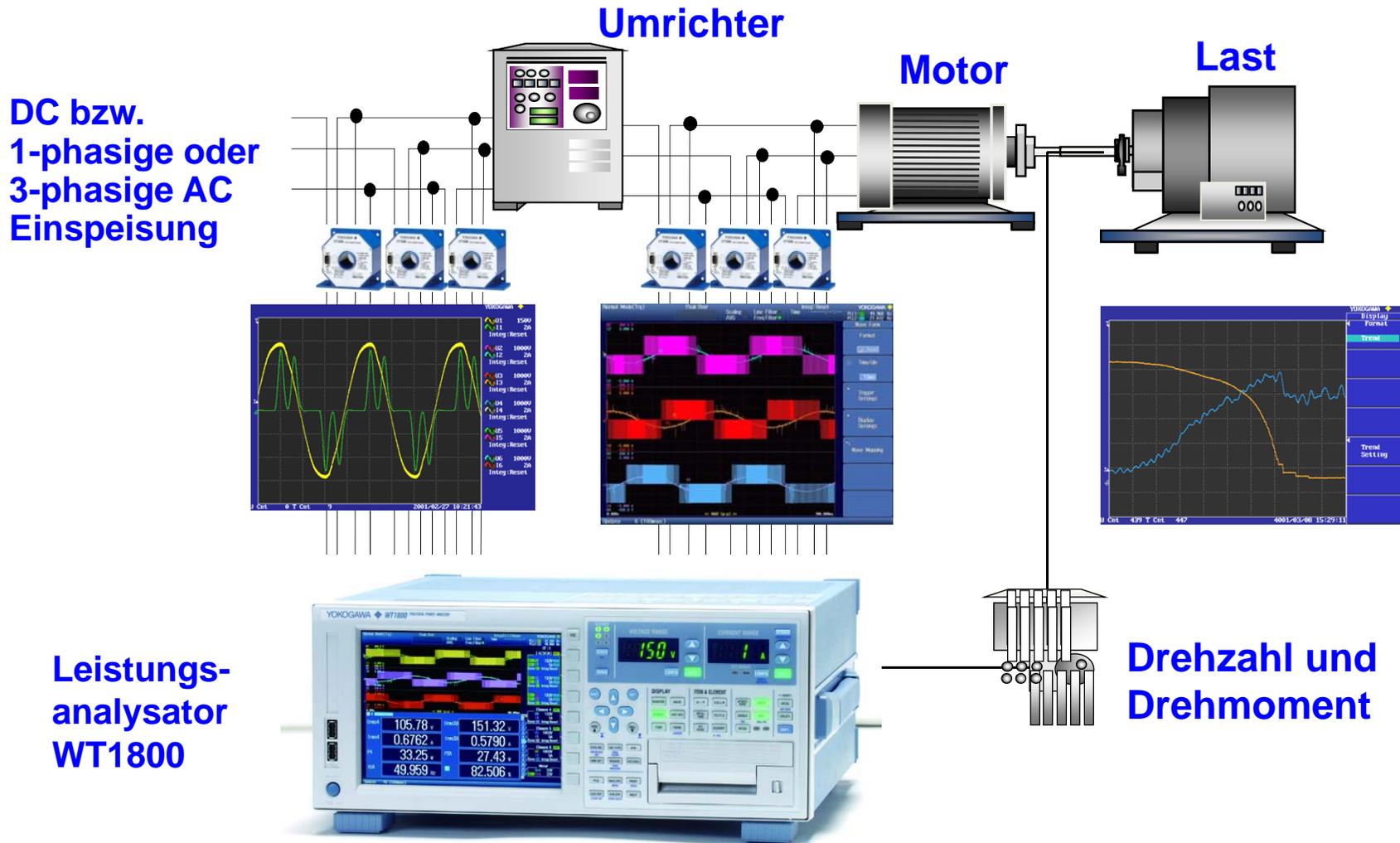


$$P = U_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \cdot \lambda$$

- Bei Einphasensystemen gibt es verdrahtungstechnisch wenig zu beachten.
- Bei langen Leitungen könnten jedoch Leitungsimpedanzen einen Einfluss auf das Ergebnis haben.
- Messgeräteimpedanzen (YOKOGAWA U-Eingang einige M $\Omega$ , I-Eingang wenige m $\Omega$ ) spielen in der Antriebstechnik eigentlich keine Rolle, könnten aber im Messgerät kompensiert werden

# 3-Phasensysteme

## Kompletter Testaufbau an drehzahlvariablen E-Motoren



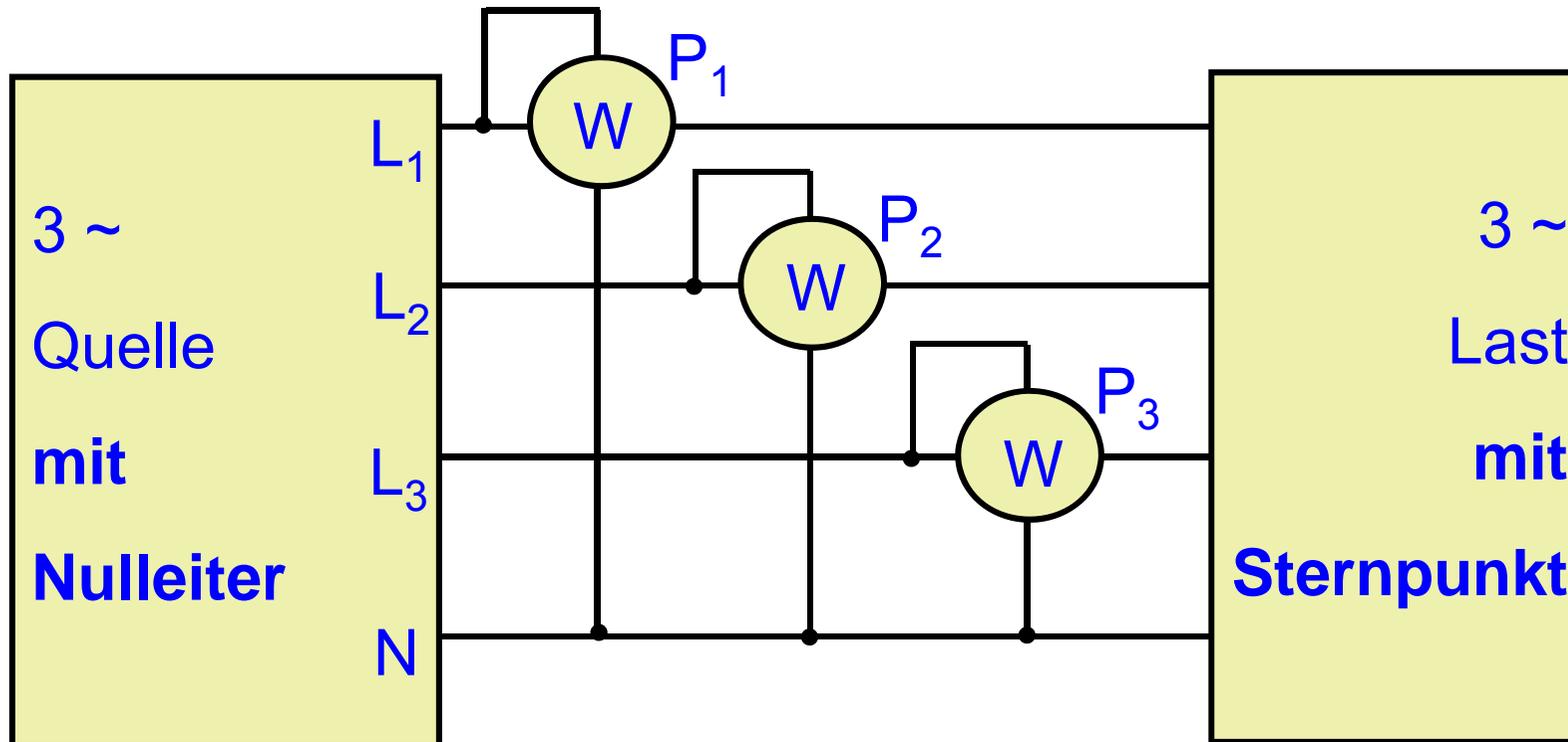
# 3-Phasensysteme

## Messfunktionen und Berechnungen

		Aronschal- tung	Aronschtaltung mit zusätzlichem Wattmeter	
Verdrahtungs- system	1 Phase, 2 Leiter 1P3W	3 Phasen, 3 Leiter 3P3W	3 Phasen, 3 Leiter (3 Spannungen, 3 Ströme) 3P3W (3V3A)	3 Phasen, 4 Leiter 3P4W
$U_{\Sigma}$ [V]		$(U1 + U2) / 2$	$(U1 + U2 + U3) / 3$	
$I_{\Sigma}$ [A]		$(I1 + I2) / 2$	$(I1 + I2 + I3) / 3$	
$P_{\Sigma}$ [W]		$P1 + P2$		$P1 + P2 + P3$

# 3-Phasensysteme

## 3-Wattmeter-Methode (3P4W)



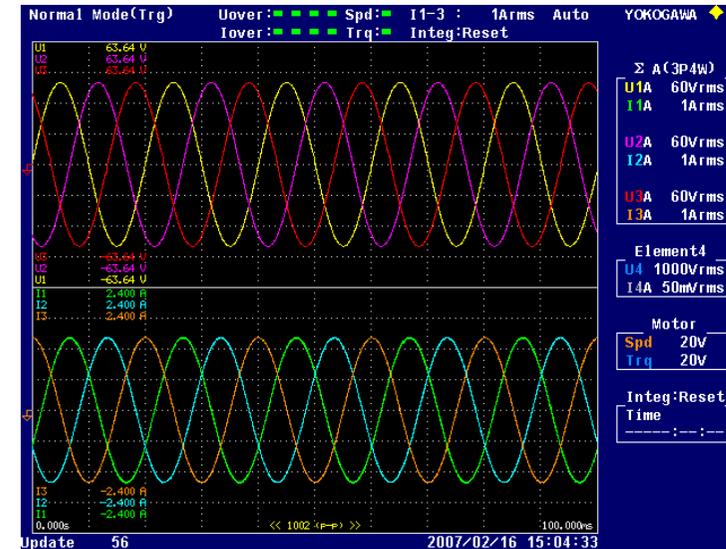
$$U_{\Sigma_{rms}} = (U_{1rms} + U_{2rms} + U_{3rms}) / 3$$

$$I_{\Sigma_{rms}} = (I_{1rms} + I_{2rms} + I_{3rms}) / 3$$

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2 + P_3$$

# 3-Phasensysteme

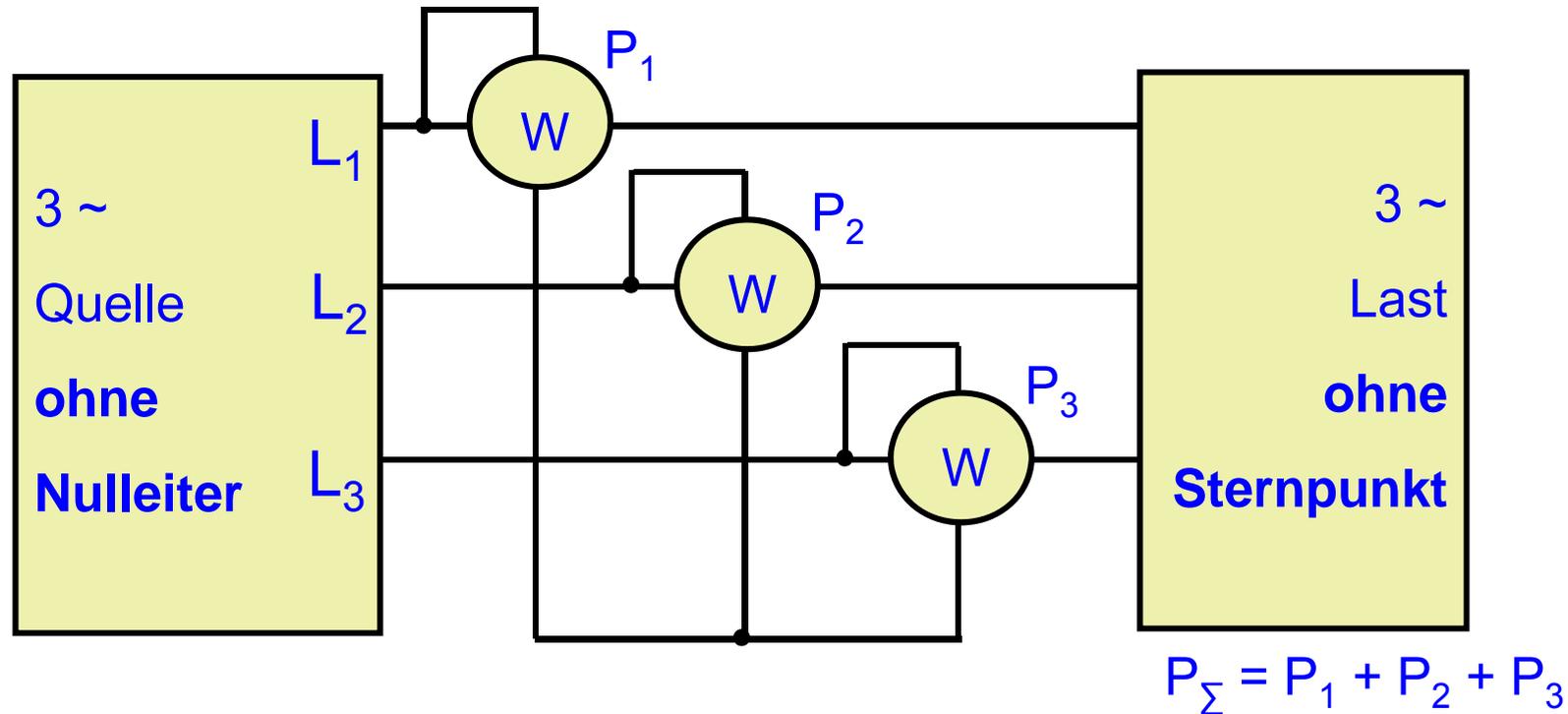
## 3-Wattmeter-Methode (3P4W)



- Gesamtleistung ist die Summe der drei Einzelleistungen.  $P_{\Sigma} = P_1 + P_2 + P_3$
- Symmetriebetrachtung möglich.
- **Aber:** In der Antriebstechnik kaum einsetzbar, weil der Motorsternpunkt selten herausgeführt ist.

# 3-Phasensysteme

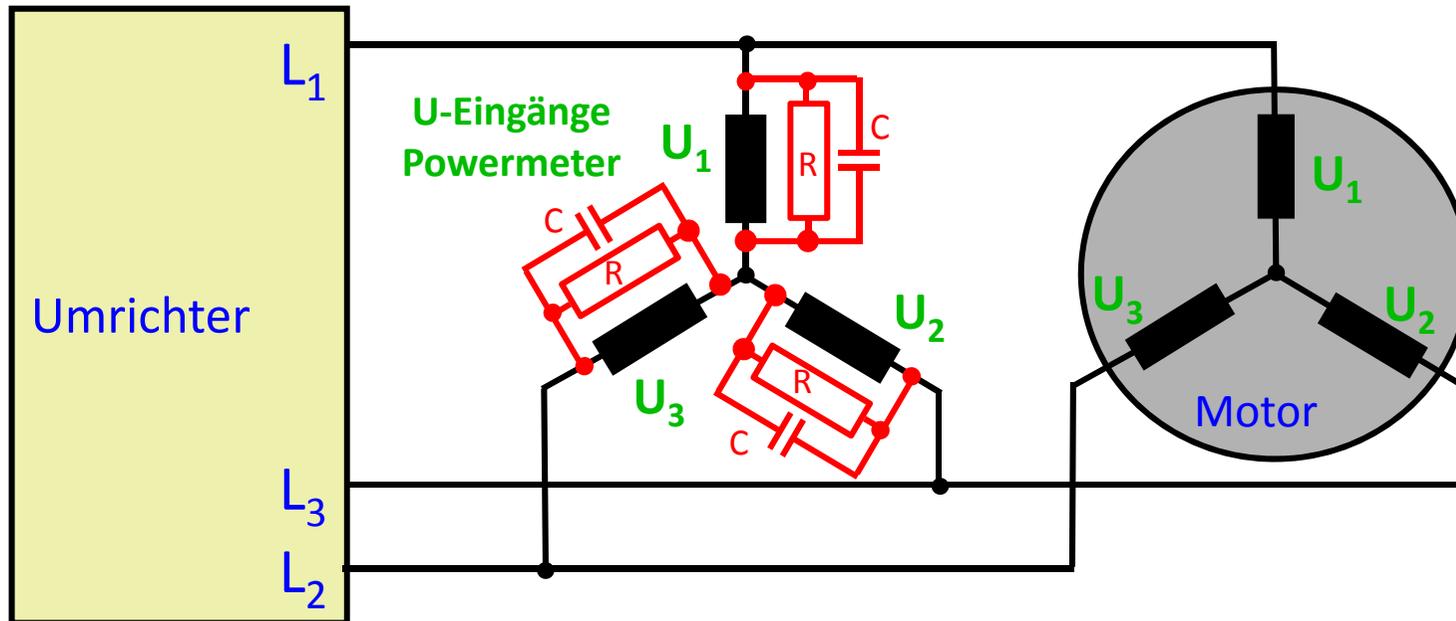
## 3-Wattmeter-Methode (3P4W) mit künstlichem Sternpunkt



- Künstliche Sternpunktbildung über die drei Low-Buchsen des Leistungsmessgeräts theoretisch möglich.
- **Problem:** Springender Sternpunkt am Umrichterausgang → Impedanzanpassung notwendig.

# 3-Phasensysteme

## 3-Wattmeter-Methode (3P4W) mit künstlichem Sternpunktadapter



Sehr unterschiedliche Impedanzen von Spannungseingängen und Motorwicklung führt zu unterschiedlichen Sternpunkt-potentialen

Mit  $R = \text{einige k}\Omega$  und  $C = \text{einige nF}$  wird ein virtueller Sternpunkt gebildet.

Es ist nicht der Motor-Sternpunkt. Es ein künstlich herausgezogener Mittelpunkt.

Ist die beste Alternative wenn es der Motor-Sternpunkt nicht herausgeführt ist.

# 3-Phasensysteme

## 3-Wattmeter-Methode (3P4W) mit künstlichem Sternpunktadapter KSTP

### WT Leistungsmessgerät



Einfache Verkabelung

*U1, U2, U3 sind ohne Verkettung direkt in die drei Leistungselemente einzustecken.*



Mit  $R =$  einigen  $k\Omega$  und  $C =$  einigen  $nF$  wird die Impedanz der Eingänge angepasst.



Einfache Verkabelung

*U1, U2, U3 sind die drei Phasenspannungen der Last*

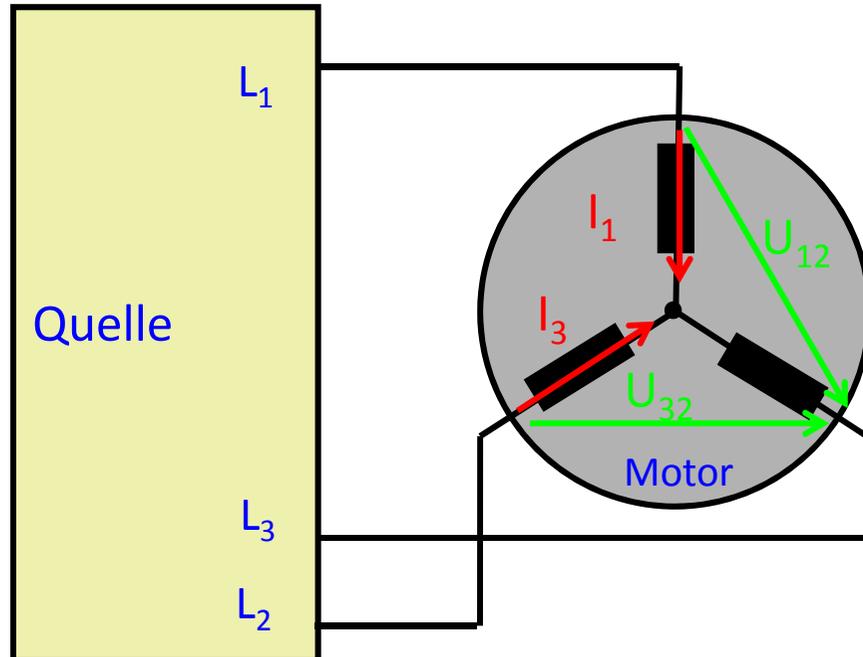
# 3-Phasensysteme

## Messfunktionen und Berechnungen

		<b>Aronschal- tung</b>	<b>Aronschtaltung</b> mit zusätzlichem Wattmeter	
Verdrahtungs- system	1 Phase, 2 Leiter 1P3W	3 Phasen, 3 Leiter 3P3W	3 Phasen, 3 Leiter (3 Spannungen, 3 Ströme) 3P3W (3V3A)	3 Phasen, 4 Leiter 3P4W
$U_{\Sigma}$ [V]		$(U1 + U2) / 2$	$(U1 + U2 + U3) / 3$	
$I_{\Sigma}$ [A]		$(I1 + I2) / 2$	$(I1 + I2 + I3) / 3$	
$P_{\Sigma}$ [W]		<b><math>P1 + P2</math></b>		<b><math>P1 + P2 + P3</math></b>

# 3-Phasensysteme

## 2-Wattmeter-Methode (3P3W)



### Die Aronschaltung

Dahinter steckt eine einfache Rechnung. Aus den Einzelleistungen, bezogen auf einen virtuellen Mittelpunkt, errechnet sich die Gesamtleistung zu

$$p = p_a + p_b + p_c = u_a \cdot i_a + u_b \cdot i_b + u_c \cdot i_c$$

Unter der Annahme, dass keine Leckströme auftreten, gilt

$$i_a + i_b + i_c = 0 \text{ oder } i_b = -i_a - i_c$$

Oben eingesetzt, ergibt sich

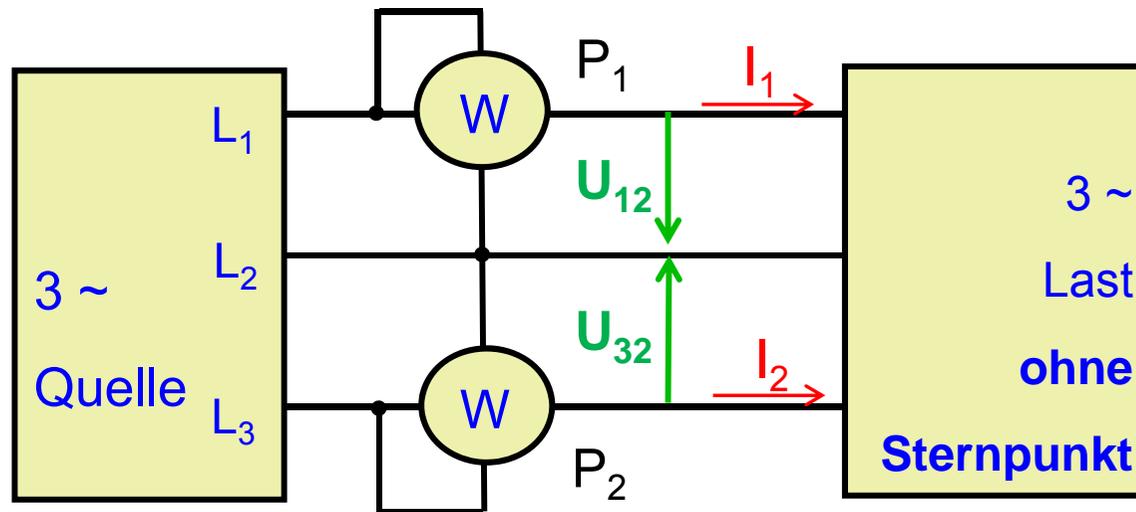
$$\begin{aligned} p &= u_a \cdot i_a - u_b \cdot (i_a + i_c) + u_c \cdot i_c \\ &= (u_a - u_b) \cdot i_a + (u_c - u_b) \cdot i_c \\ &= u_{ab} \cdot i_a + u_{cb} \cdot i_c \end{aligned}$$

Es reicht also, die Leistung zweier Phasen gegeneinander zu messen – vorausgesetzt, dass die Annahme gilt!

- Vollkommen **ohne** Sternpunktbildung kommt die Zwei-Wattmeter-Methode (Aronschaltung) aus.
- Zwei-Wattmeter reichen für die **Gesamtleistung** aus, aber ein Rückschluss auf die Leistungen der einzelnen Phasen ist nicht möglich.

# 3-Phasensysteme

## 2-Wattmeter-Methode (3P3W)



$$P_1 = U_{12} \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1$$

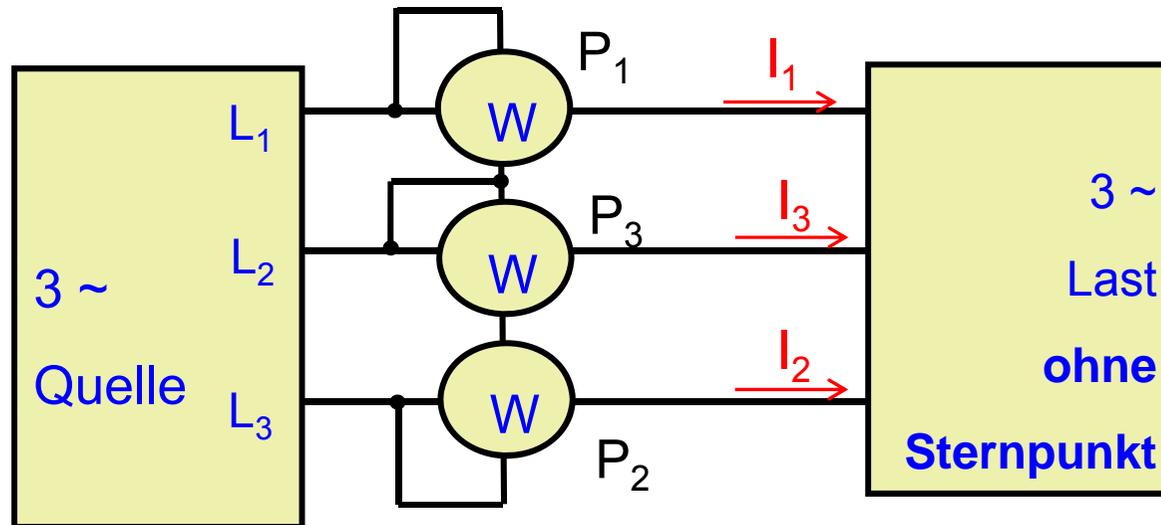
$$P_2 = U_{32} \cdot I_3 \cdot \cos\phi_3$$

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2$$

- Anstatt des Sternpunktes ist hier eine Phase die Referenz.
- Es werden Aussenleiterspannungen gemessen.
- Da nicht die Strangspannungen zum Mittelpunkt gemessen werden, machen auch die Einzelleistungen keinen Sinn! Die Summenleistung stimmt.
- **Voraussetzung: keine Leckströme:  $i_1 + i_2 + i_3 = 0$  (Kirchhoffsches Gesetz)**
- → ist für Messungen am Umrichter nicht empfehlenswert

# 3-Phasensysteme

## 2-Wattmeter-Methode (3V3A) mit zusätzlichem Wattmeter



$$P_1 = U_{12} \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1$$

$$P_2 = U_{32} \cdot I_3 \cdot \cos\phi_3$$

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2$$

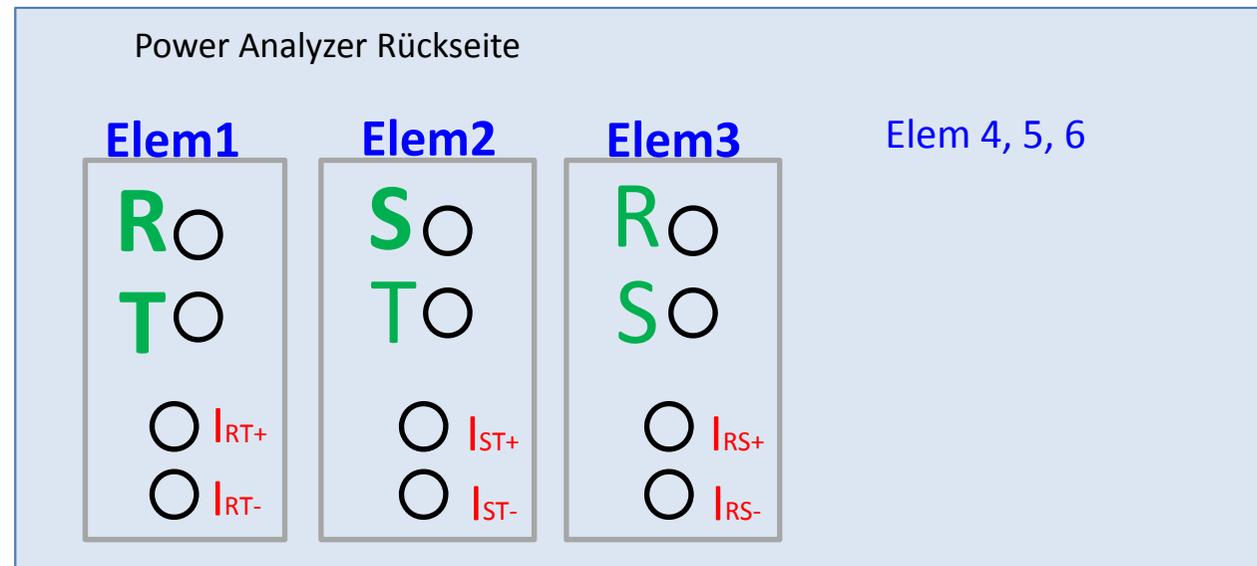
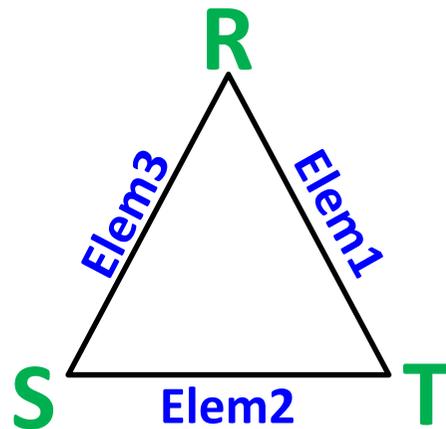
- **Keine 3-Wattmeter-Methode! Aronschaltung mit zusätzlichem Wattmeter.**
- Es werden Aussenleiterspannungen gemessen (Dreieck).
- **Man erhält die Gesamtwirkleistung auch aus der Summe von zwei Wattmetern!**
- **Man beachte, dass keines der Wattmeter die korrekte Einzelleistung je Phase anzeigt!**
- Statt Mittelpunkt dient auch bei 3V3A eine Phase als Referenz (vertauschbar.)

# 3-Phasensysteme

## 2-Wattmeter-Methode (3V3A) mit zusätzlichem Wattmeter

### ACHTUNG:

Bei der Aronschaltung werden die Spannungen in verketteter Form angeschlossen (im Dreieck).



# 3-Phasensysteme

## Zusammenfassung 1/4

### VORTEILE 3P4W (Stern)

- Die drei Wattmeter benutzen den neutralen Leiter (MP) als gemeinsame Spannungsreferenz
- Jedes Wattmeter zeigt die Leistung pro Phase an
- Die Gesamtleistung aller 3 Phasen ist die algebraische Summe der 3 einzelnen Phasen.

### VORTEILE 3V3A (Dreieck)

#### Warum sollte man bei einer Aronschaltung doch die 3V3A Methode verwenden?

- Direkte Messung aller 3 Phasenströme zur Beobachtung der Lastsymmetrie und Leckströme  $\Delta i = i_1 + i_2 + i_3$
- Direkte Messung aller 3 Phasenspannungen zur Beobachtung der Generatorsymmetrie

# 3-Phasensysteme

## DELTA Transformation

- Gegenseitige Umrechnung von Stern- und Dreieckskonfigurationen.
- Auch bei 3-phasigen Systemen ohne Mittelpunktleiter werden Strang- und Leiter-spannungen plus die einzelnen Phasenleistungen angezeigt.
- Somit werden alle elektrischen Werte und die Symmetrie eines 3-Phasensystems in einer Messung analysiert.
- **WT3000, WT1800 und WT500 unterstützen die DELTA Transformation**
- WT1800 bietet die umfangreichste DELTA Berechnung

# 3-Phasensysteme

## DELTA Transformation



### Line Voltage and Phase Current (3P3W > 3V3A)



Die nicht mitgemessene Aussenleiterspannung und Phasenstrom werden rechnerisch ermittelt

# 3-Phasensysteme

## DELTA Transformation

Messung

Element4	Element5	ΣB(3P3W)	Element6
A 300V	A 300V		1000V
A 2A	A 2A		50A
248.50	248.54	248.52	
0.6632	0.6441	0.6537	
134.05	7.99	142.04	

Berechnung

Σ B(3P3W)	Σ C(None)
Ur sB 248.59	
---	
---	
---	
ItB 0.6583	
---	

**U<sub>rms</sub>**

**I<sub>rms</sub>**

**P**

**Aron-**  
**Schaltung**  
**3P3W**  
**(Außenleiter-**  
**spannungen**  
**U<sub>L1-L2</sub>)**

**Berechnung der**  
**fehlenden**  
**Strangspannung und**  
**des Phasenstroms**  
**aus 3P3W**

**Aronschtaltung**  
**Zwei-Wattmeter Methode**

U1  
I1  
Sync

U2  
I2  
Sync

U3  
I3  
Sync

U4  
I4  
Sync

U5  
I5  
Sync

U6  
I6  
Sync

# 3-Phasensysteme

## DELTA Transformation



### Delta-Star transformation (Delta > Star)



→ Simultane Berechnung der einzelnen Phasenspannungen, Phasenleistungen und Neutralleiterstrom

### Star-Delta transformation (Star > Delta)



→ Simultane Berechnung der Außenleiter-spannungen und Neutralleiterstrom

# 3-Phasensysteme

## DELTA Transformation

Messung

	Element1	Element2	Element3	$\Sigma A(3V3A)$	Element4	Element5	Element6	$\Sigma B(3P4W)$
Voltage	300V	300V	300V		150V	150V	150V	
Current	1A	1A	1A		2A	2A	2A	
Urms [V]	249.65	249.62	249.70	249.66	144.47	144.12	143.88	144.16
Irms [A]	0.6727	0.6530	0.6675	0.6644	0.6724	0.6526	0.6670	0.6640
P [W]	135.30	5.54	127.49	140.84	46.53	45.79	48.51	140.84
S [VA]								
Q [var]								
$\lambda$ [-]								
$\phi$ [°]								
fU [Hz]					95.169	95.169	95.169	
fI [Hz]					95.169	95.155	95.170	

**3V3A Aronschaltung**  
mit zusätzlichem  
**Wattmeter**  
(Außenleiterspannung zu  
Außenleiterspannung  $U_{L1-L2}$   
werden gemessen)

**3P4W mit KSTP**  
**Drei-Wattmeter Methode**  
(Phasenspannungen  $U_{L1-N}$   
werden gemessen)

Berechnung

<u>DELTA Measure:</u>		$\Sigma A(3V3A)$	$\Sigma B(3P4W)$	<u>DELTA Measure:</u>	
<b>Gerechneter Sternpunkt und Phasenspannungen aus 3V3A</b>		UrA	144.16	UrsB	249.69
		UsA	144.15	UstB	249.65
		UtA	144.11	UtrB	249.62
		U $\Sigma$ A	144.14	U $\Sigma$ B	249.66
		InA	0.0143	InB	0.0141
		PrA	46.58	<b>Leckstrom</b>	
		PsA	45.81		
		PtA	48.46		
		P $\Sigma$ A	140.84		
$\Delta P2$ [W]					
$\Delta P3$ [W]					
$\Delta P\Sigma$ [W]					

# 3-Phasensysteme

## Zusammenfassung 2/4

- Nahezu bei keinem modernen Motor wird der Mittelpunktleiter herausgeführt.
- Wir bieten für eine umfangreiche Analyse zwei messtechnische Lösungen an:

### →KSTP künstlicher Sternpunktadapter

Verwendung eines künstlichen Sternpunktes (virtuelle Masse), um den Mittelpunkt zu simulieren und mit der gewohnten 3P4W Methode in Stern zu messen.



### →DELTA Berechnung

Die DELTA Funktion gestattet die gegenseitige Transformation von Stern- und Dreieckskonfigurationen.

**DELTA Berechnung ist sowohl bei 3P4W als auch bei 3V3A sinnvoll!**

# 3-Phasensysteme

## Zusammenfassung 3/4

- Am Besten: Zugang zum Mittelpunktsteiter vom Motor!
  - Phasenspannungen und –leistungen (in 3P4W) können direkt gemessen werden
  
- Motor ohne Sternpunkt
  - Künstlicher Sternpunktadapter (KSTP) ist die beste Alternative für die Analyse der Strangspannungen
  - Somit können U, P und weitere Parameter (in 3P4W) auf die jeweilige Phase bezogen gemessen und gerechnet werden
  - Jedes Wattmeter zeigt die **Leistung pro Phase** an

# 3-Phasensysteme

## Zusammenfassung 4/4

- **3V3A Messung in Dreieckverdrahtung** (*Aronschaltung mit drei Wattmetern*)
  - Es werden Aussenleiterspannungen gemessen
  - Keine Aussage über die Phasenspannungen, und –leistungen möglich
  - Gesamtwirkleistung wird aus der Summe von **zwei Wattmetern** gebildet
  - **Keines** der drei Wattmeter die zeigt korrekte Einzelleistung je Phase anzeigt
  - Statt Mittelpunkt ist einer der drei Phasen die Referenz (vertauschbar)
- **DELTA Berechnung**
  - **Ist sowohl bei 3P4W als auch bei 3V3A sinnvoll!**
  - Bei der Messung in 3P4W werden die Aussenleiterspannungen berechnet
  - Bei der Messung in 3V3A werden die einzelnen Phasenspannungen und Phasenleistungen berechnet
  - Der Neutralleiterstrom (Ableitstrom) wird berechnet
  - **Somit können alle elektrischen Werte und die Symmetrie eines 3-Phasen Systems mit einer Messung auf einem Blick analysiert werden. Es muss nicht neuverkabelt werden.**

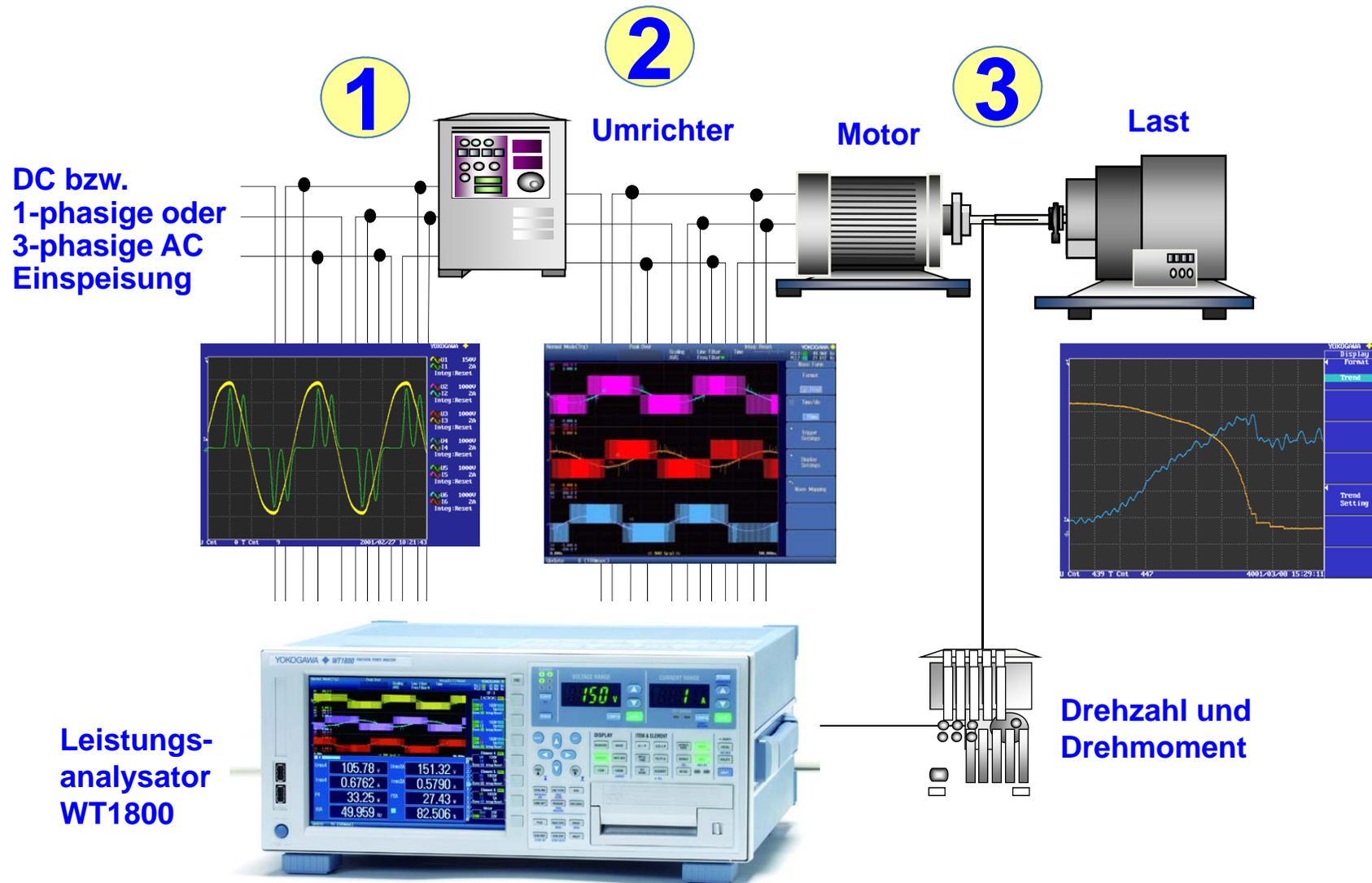
# Umrichter Kurvenformen, Wirkungsgrad- und Verlustleistungsmessung

YOKOGAWA   
TEST & MEASUREMENT



# 3-Phasensysteme

## Kompletter Testaufbau an drehzahlvariablen E-Motoren



# Leistungsmessung an el. Antrieben

## Was kann alles mit einem Leistungsanalysator gemessen werden?

### 1 Präzise Leistungsmessung am Eingang & Ausgang des Frequenzumrichters

- Präzise Verlustleistungs- und Wirkungsgradberechnung
- Messung anderer Parameter und Funktionen des elektrischen Antriebs

### 2 Präzise Messung der Motoreingangsleistung

- Messung und Analyse des umrichterbetriebenen E-Motors
- Wirk-, Blind-, und Scheinleistungen, Leistungsfaktor, u.v.a. Parameter im dreiphasigen System

### 3 Präzise Messung der mechanischen Leistung

- Drehmoment- und Drehzahlmessung für die Berechnung der mech. Leistung
- Drehmoment- und Drehzahlkurven

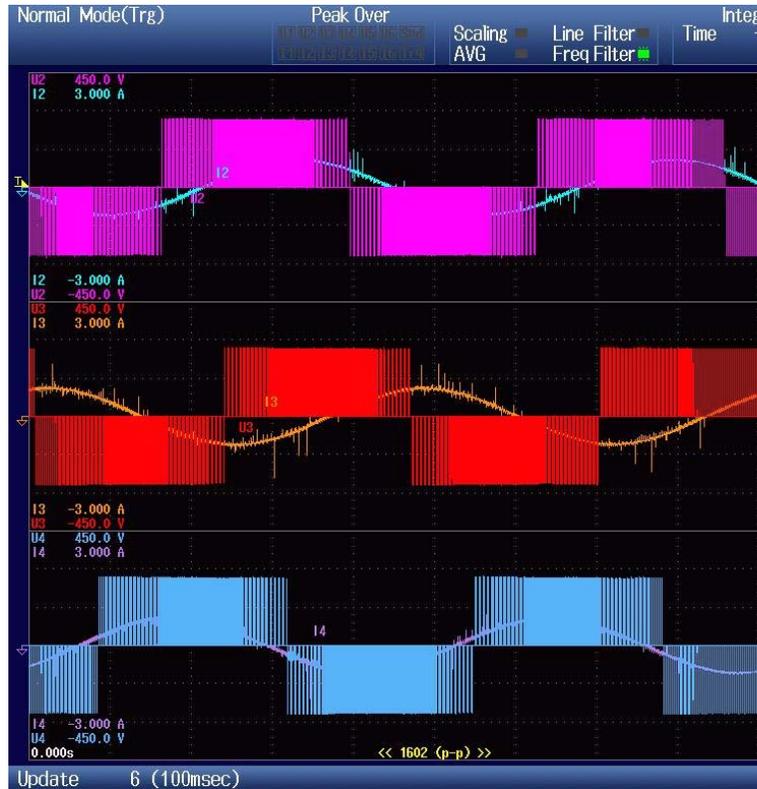
## Leistungsanalysatoren werden zur Messung elektrischer und mechanischer Leistung eingesetzt

- Alle Messungen werden **synchron** ausgeführt – ohne Zeitversatz zwischen elektrischer und mechanischer Messung
- Präzise Wirkungsgradbestimmung des Gesamtsystems

# Leistungsmessung an el. Antrieben

## Messungen am Umrichter

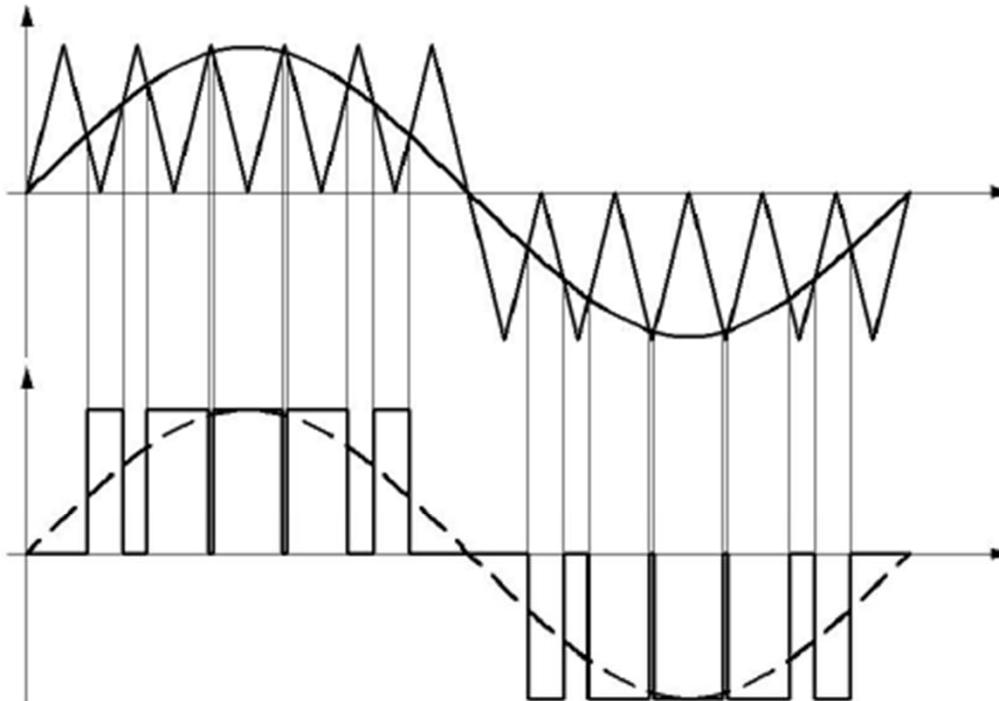
Beispielhaft:  
Kurvenformen von  
Umrichtersignalen



Beispielhaft:  
Graphische Harmonischen-  
Analyse von Umrichtersignalen

# Leistungsmessung an el. Antrieben

## Messungen am Umrichter



Bei der PWM (Pulsweitenmodulation, oder PBM, Pulsbreitenmodulation) wird die Amplitude der Signalspannung konstant gehalten, dafür variiert die Breite der Impulse und es entstehen gepulste Spannungsblöcke mit unterschiedlichen Breiten. Die Breite der Pulse wird erzeugt indem man über das Grundsignal eine Dreiecksspannung legt. Die Schnittpunkte der sinusförmigen Grundspannung und der Dreiecksspannung ergeben die Breite der Rechtecksimpulse. Gibt man diese Impulsfolge auf einen Motor wird sich ein annähernd sinusförmiger Strom einstellen.

# Leistungsmessung an el. Antrieben

## Messungen am Umrichter

- Spannungsmessung am Frequenzumrichter
  - Breitbandige Effektivwertmessung und **simultane** Harmonischen-Analyse. Somit werden die Amplituden aller Harmonischen berechnet.
  - Präzise Messung der Grundwelle, welches i.d.R. den E-Motor antreibt.
  
- Strommessung am Frequenzumrichter
  - Strom ist aufgrund der Induktivität des Motors weitgehend sinusförmig
  - Breitbandige Effektivwertmessung und **simultane** Harmonischen-Analyse. Die Harmonischen-Anteile des Stromes sind für die Erwärmung des Motors verantwortlich.

Leistungsmessgeräte müssen in der Lage sein simultan breitbandige Effektivwerte und Harmonischen-Analyse durchzuführen.

# Leistungsmessung an el. Antrieben

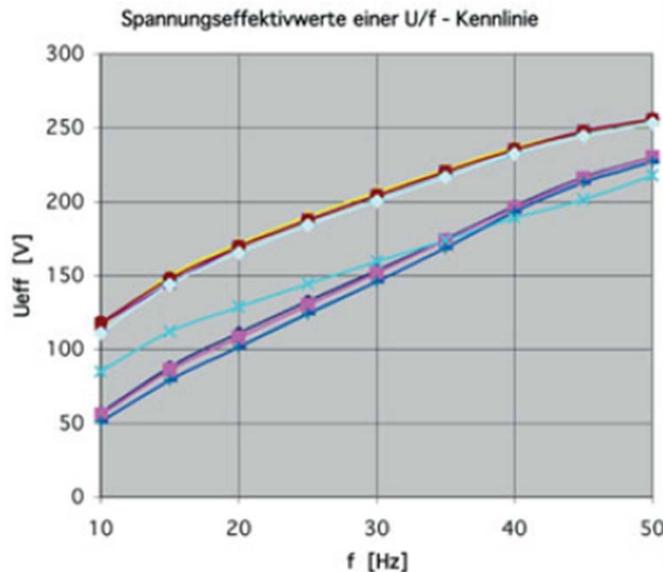
## Messproblematik bei Umrichtersignalen

- Das (ungefilterte) Spannungssignal enthält hohe Amplituden des Taktsignales
  - Komplexes Frequenzgemisch von DC bis einige kHz
  - Überlagerte Taktimpulse mit hoher Flankensteilheit
  - Variable Frequenz der Grundschiwingung von DC bis einige Hundert Hz.
- Das (ungefilterte) Strom-Signal enthält hohe Amplituden eines Gleichtaktsignales
  - Der Leistungsmesser benötigt eine hohe Gleichtaktunterdrückung auch bei hohen Frequenzen
  - Geeignete Stromsensoren verbessern die Gleichtaktunterdrückung erheblich.
- Eine variable, wohlbedachte Filterung (Line-Filter) der Signale ist sinnvoll.

# Leistungsmessung an el. Antrieben

## Messungen am Umrichter (U/f)

- Umrichter sollen ein konstantes Verhältnis von Spannung zu Frequenz aufrechterhalten.
- Die Größe U/f (V/Hz) kann für die Spannung den gesamten Effektivwert oder die Amplitude der Grundschiwingung verwenden.
- Die **“Benutzerspezifischen Mathematikfunktionen”** erlauben die direkte Berechnung von U/f.



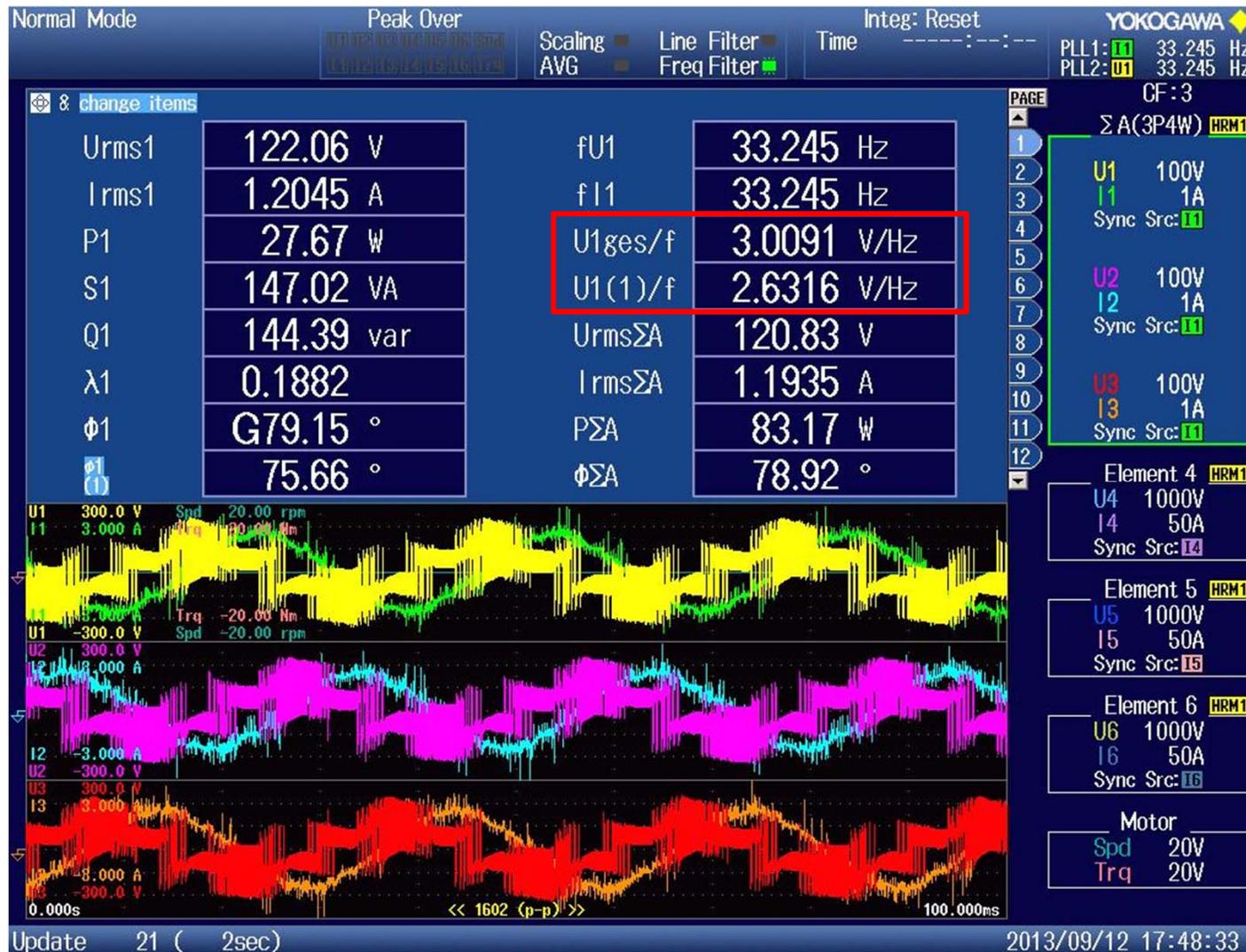
User Defined Function Settings

Function 1	<input type="checkbox"/> OFF <input checked="" type="checkbox"/> ON	Name	U1ges/f	Unit	V/Hz
Expression	UK(E1,ORT)/FU(E1)				
Function 2	<input type="checkbox"/> OFF <input checked="" type="checkbox"/> ON	Name	U1(1)/f	Unit	V/Hz
Expression	UK(E1,OR1)/FU(E1)				
Function 3	<input type="checkbox"/> OFF <input checked="" type="checkbox"/> ON	Name	U/f(I)	Unit	V/Hz
Expression	UK(E1,ORT)/FI(E1)				
Function 4	<input type="checkbox"/> OFF <input checked="" type="checkbox"/> ON	Name	I-ripple	Unit	%
Expression	(IPPK(E1)-IMPK(E1))/2/IDC(E1)*100				
Function 5	<input type="checkbox"/> OFF <input checked="" type="checkbox"/> ON	Name	D-UrmsR	Unit	V
Expression	DELTAU1RMS(E7)				

F01-F05      F06-F10      F11-F15      F16-F20

# Leistungsmessung an el. Antrieben

## Messungen am Umrichter (U/f)



# Mechanische Leistungsmessung

## Motor Setup Menü WT1800



The screenshot displays the 'MOTOR Settings' menu. The main area is divided into columns for Speed, Torque, and Pm. Settings include Scaling (1.0000), Unit (rpm, Nm, W), Sense Type (Pulse), Analog Auto Range (OFF), Analog Range (20V), Linear Scale (A: 1.000, B: 0.000), Line Filter (OFF), Sync Source (None), Pulse Range (Upper/Lower), Rated Upper/Lower (100.0000 Hz / 5000Hz), Pulse N (60), Pole (2), and Source (U1). The right-hand panel shows six measurement elements (U1-I6) with their respective ranges and sync sources. The bottom status bar shows 'Update 77 ( 1sec)' and the date/time '2012/02/28 00:08:58'.

Einstellungsfenster für Drehzahl- und Drehmomentensensor.

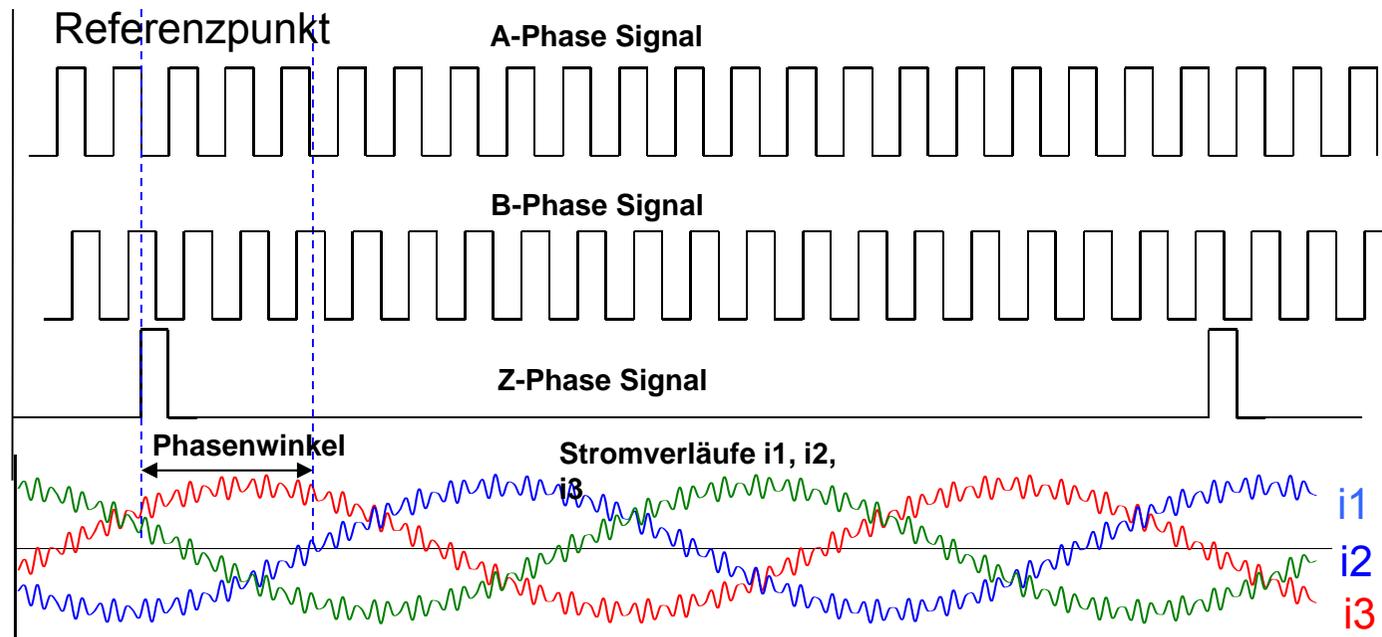
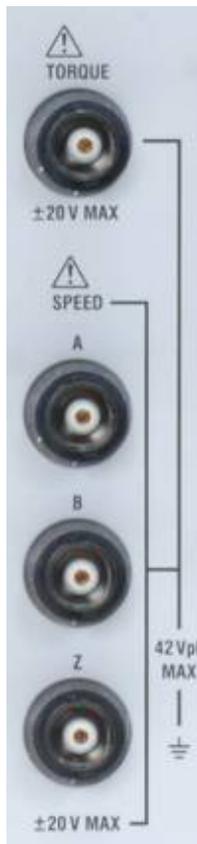
**Synchrone Messung der elektrischen und mechanischen Leistung.**

Analoge oder Pulssignale bis 20 Veff möglich

# Mechanische Leistungsmessung

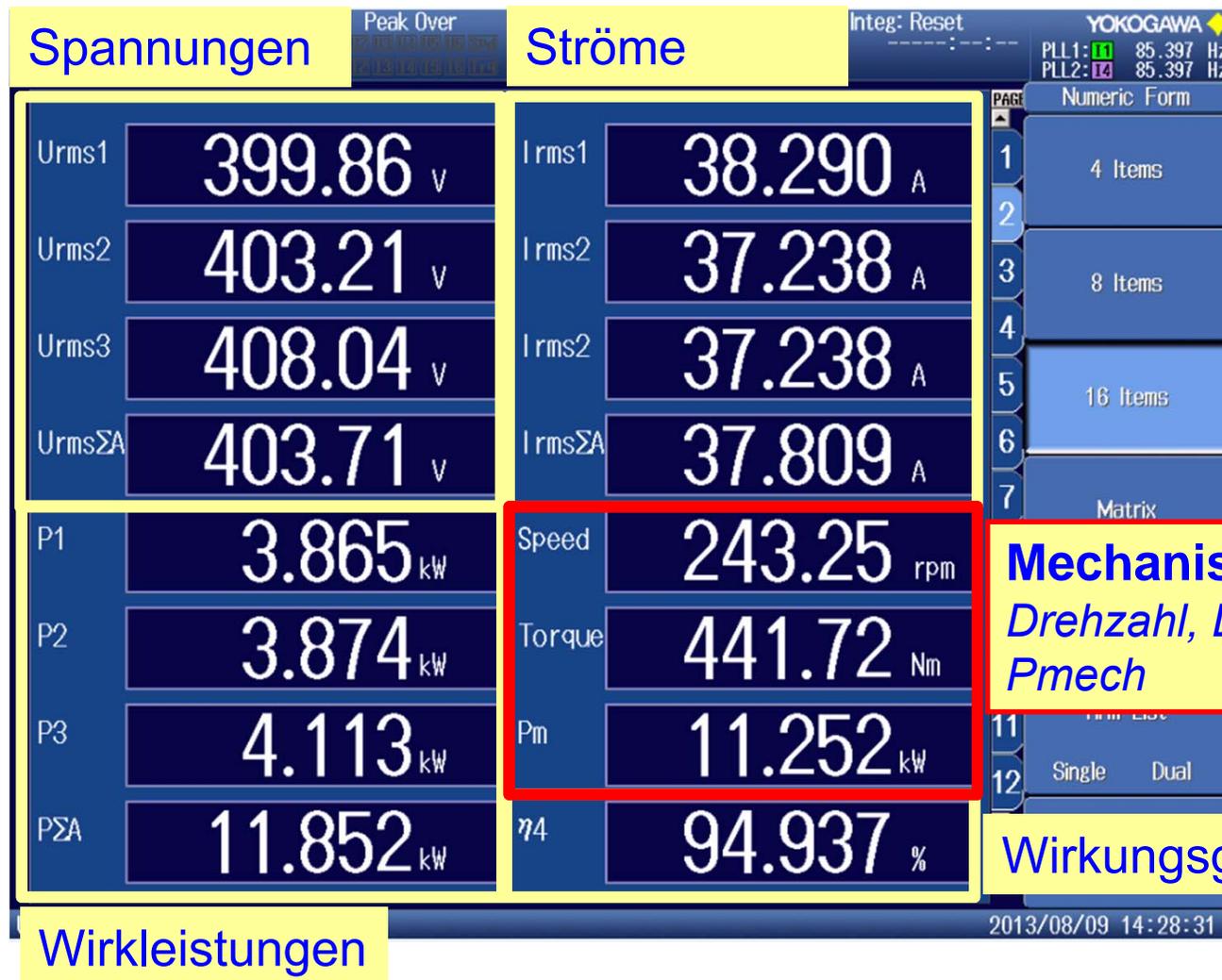
## Motor Eingänge WT1800

Die um  $90^\circ$  versetzten Drehzahlimpulse ermöglichen die **Drehrichtungsbestimmung**.



Der Z-Impuls dient als Referenzpunkt und wird pro Umdrehung einmal generiert. Mit diesem Referenzsignal und dem Nulldurchgang des Stromes  $i_1$  kann der WT1800 den **elektrischen Phasenwinkel des Motors messen**.

# Mechanische Leistungsmessung



Drehzahl und Drehmoment am **WT1800** in einem individuell zusammengestellten Numeric Fenster

**Mechanische Parameter:**  
*Drehzahl, Drehmoment*  
*P<sub>mech</sub>*

**Wirkungsgrad**

# Elektrischer-, mechanischer- und Gesamtwirkungsgrad



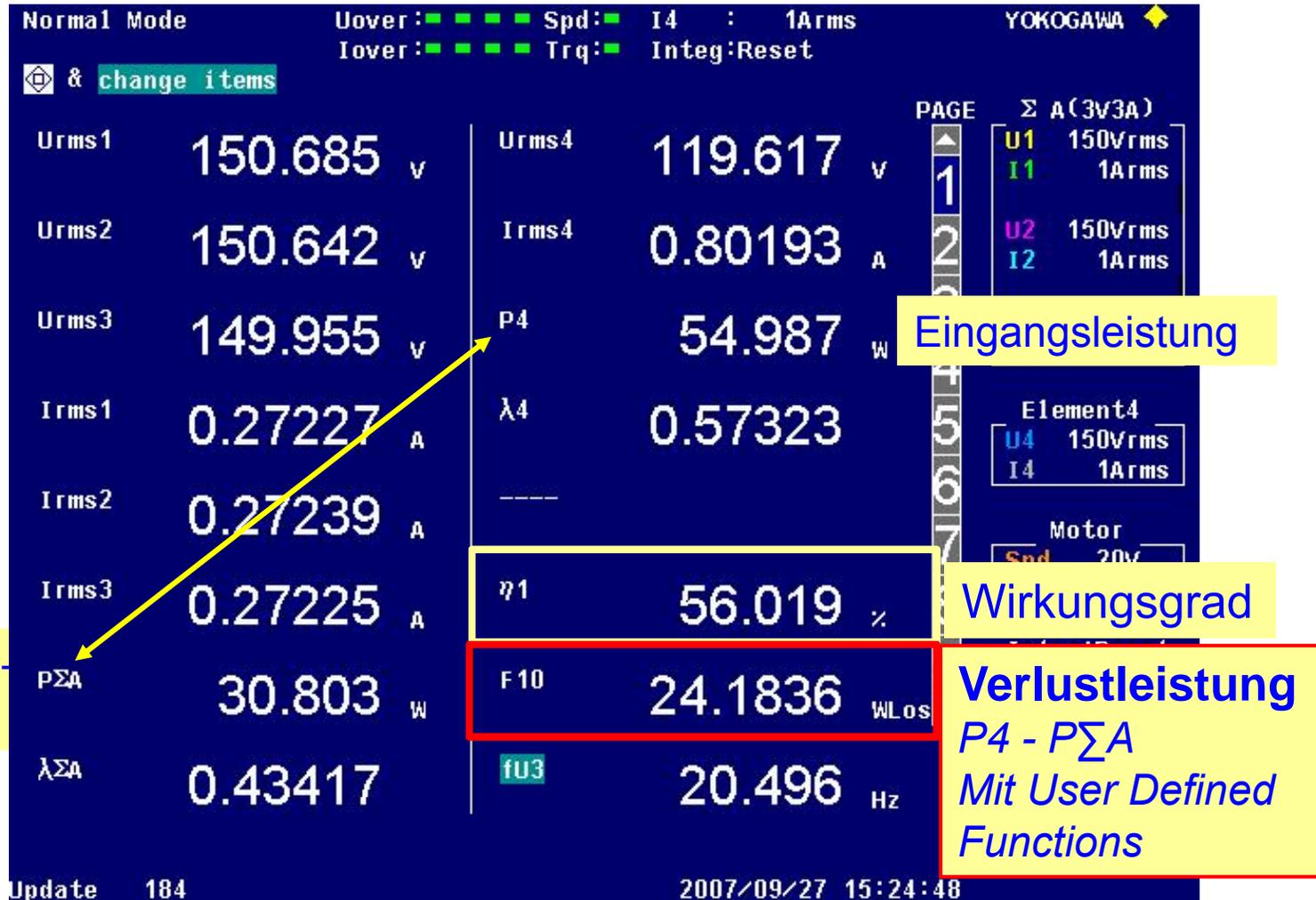
Umrichter  
Wirkungsgrad

Gesamt-  
wirkungsgrad

Motor-  
Wirkungsgrad

Wirkungsgrad Setup Menu **WT1800**

# Umrichter Verlustleistung



Individuelles Numeric Fenster im **WT3000**

# Spezifikationen breitbandiger Leistungsmessgeräte

**YOKOGAWA**   
TEST & MEASUREMENT



# Spezifikationen breitbandiger Leistungsmessgeräte

## ■ BASISGENAUIGKEIT

- Es gibt unter den Herstellern **keine** einheitliche Definition der Basisgenauigkeit  
Oft wird die Basisgenauigkeit bei AC 50/60 Hz definiert

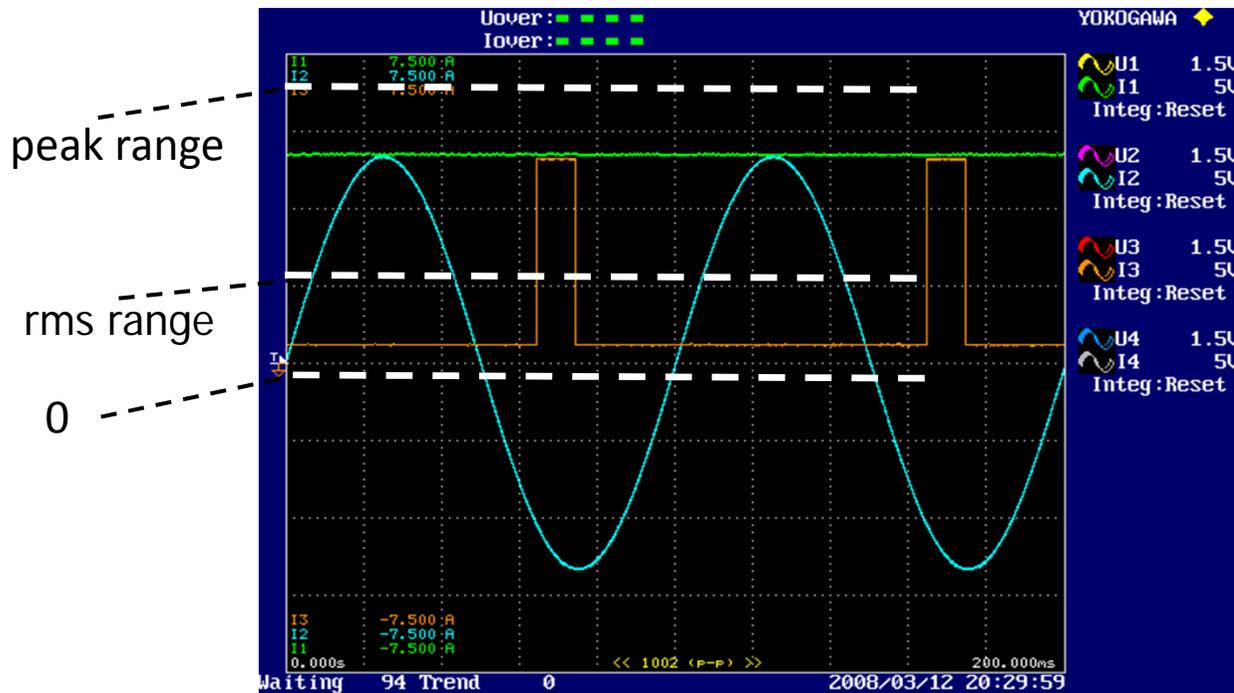
## ■ AMPLITUDENGENAUIGKEIT

- wird stets in % **vom MW + % vom MB** angegeben
  - % v. MW      Messwertfehler (Ablesefehler)
  - % v. MB      Messbereichsfehler
- **Je nach Aussteuerung des Messbereichs geht der Messbereichsfehler stärker in den Gesamtfehler ein.**

**Je nach Hersteller kann der Messbereich als Spitzenwert oder Effektivwert mit Crest-Faktor (Dynamik der Eingänge) definiert sein.**

- **Messbereiche der Yokogawa Power Analyzer sind immer Effektivwerte mit Crest-Faktor 3 oder 6.**
- Bezogen auf die Definition anderer Hersteller beträgt der Yokogawa Crest-Faktor 300.
- Bei Geräten, die Messbereiche grundsätzlich nur über Spitzenwerte definieren, ist der CF des Einganges nach Yokogawa-Spezifikation 1.

# Spezifikationen breitbandiger Leistungsmessgeräte



## DC-Signal

Messbereichsgenauigkeit unwichtig. Im Autorange werden alle Bereiche des Signals mit höchster Genauigkeit abgetastet.

## SINUS-Signal

Messbereichsgenauigkeit wichtiger. Genauigkeit im Bereich der Nulldurchgänge gering.

## VERZERRTE KURVENFORM

Messbereichsgenauigkeit sehr wichtig. Der größte Teil des Signals liegt im wenig ausgesteuerten Bereich.

# Spezifikationen breitbandiger Leistungsmessgeräte

- Weiterhin zu beachten sind folgende Punkte der Spezifikationen:
  - Definition der Messbereiche?
  - Gültigkeitsbereich der Genauigkeitsangaben? (z.B. **garantierte** Genauigkeit ab 1% Aussteuerung bis 130% Aussteuerung der Messbereiche?)
  - Phasenwinkelfehler des Messgerätes?
  - Fehlereinfluss des Leistungsfaktors?
  - Temperaturbereich der Genauigkeitsangaben? (z.B.  $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ )
  - Messbandbreite oder -3dB Punkt angegeben?
  - Aufwärmzeit? (z.B. 30 min)
  - Simultane Messung der breitbandigen Werte und Harmonischen-Analyse?
  - Wie wird die Harmonischen-Analyse ermittelt? (nur SW oder PLL Phase Locked Loop)
  - Ist die Harmonischen-Analyse spezifiziert?
  - Hohe Gleichtaktunterdrückung?
  - Garantiedauer?
  - Vergleichbare Kalibrierprotokolle von unabhängigen Kalibrierlaboren!
  
- Beispiel:
  - Messbereich:  $300 V_{\text{rms}}$  (Effektivwert mit Crest-Faktor 3)
  - Ab  $3 V_{\text{rms}}$  ( $\pm 1\%$ ) bis  $390 V_{\text{rms}}$  ( $\pm 130\%$ ) mit dem selben Messwertfehler
  - Bis  $900 V_{\text{peak}}$  ( $\pm CF=3$ ) werden gemessen.

# Spezifikationen breitbandiger Leistungsmessgeräte

## ZUSAMMENFASSUNG

- Es gibt keine einheitliche Spezifikationsvorschrift!
- Jeder Hersteller ist frei in der Wahl der Spezifikationen
- **Prozentangaben ohne Bezug sind nicht vergleichbar!**
  
- Spezifikationen der Yokogawa Leistungsmessgeräte?
  - Basisgenauigkeit bei AC 50/60Hz
  - Der Messbereichsfehler bezieht sich immer auf die eingestellten RMS-Messbereiche und nicht auf die Spitzenwerte.
    - In der Leistungsmessung sind die Effektivwerte die wichtigsten Messgrößen
  - In allen RMS-Messbereichen mit Crest-Faktor 3 (6) werden Signale mit 3-fachen (6-fachen) Spitzenwerten des Messbereichsendwertes problemlos erfasst
    - Gleicher Crest-Faktor über alle Messbereiche (Strom u. Spannung) spricht für eine exzellente Hardware
  - Yokogawa spezifiziert als einziger die Genauigkeiten der Harmonischen-Analyse.
  
  - *Hinweis auf das Artikel „Spezifikationen breitbandiger Leistungsmessgeräte“ in der ElektronikPraxis und Ausdrücke*

# Anwendungsgebiete

Hersteller von ...

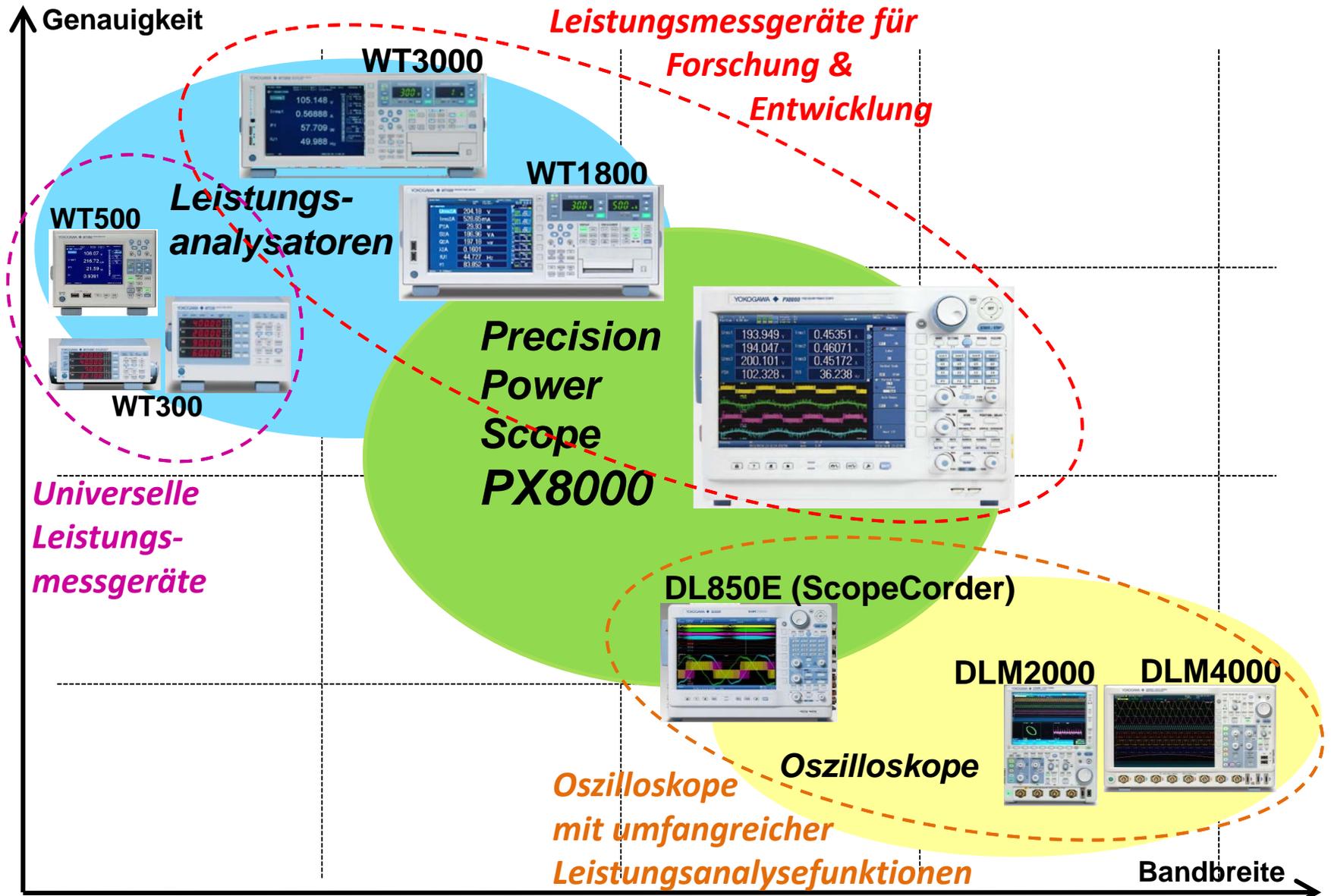
- Motoren & Antrieben
- Frequenzumrichter
- Automotive
- Alternative Energien
- Stromversorgungssysteme
- Beleuchtung
- Netzgeräte/Batterien
- Datenzentren (Server)
- Haushaltsgeräte
- Bürogeräte
- Luftfahrt
- ...

und

- Kalibrierlabore
- Prüfinstitute
- Universitäten, Hochschulen
- Jeder, der präzise und rückführbar Leistung misst.



# YOKOGAWA Messgeräte für die Leistungsmessung



# YOKOGAWA Leistungsmessgeräte

**WT3000**



**WT1800**



**WT500**



WT3000	WT1800	WT500	WT300 Familie
1 bis 4 Phasen	1 bis 6 Phasen	1 bis 3 Phasen	1 bis 3 Phasen
bis 1000 V <sub>eff</sub> (8 Bereiche)	bis 1000 V <sub>eff</sub> (12 Bereiche)	bis 1000 V <sub>eff</sub> (8 Bereiche)	bis 600 V <sub>eff</sub> (7 Bereiche)
bis 2 A <sub>eff</sub> (9 Bereiche) bis 30 A <sub>eff</sub> (7 Bereiche)	bis 5 A <sub>eff</sub> (9 Bereiche) bis 50 A <sub>eff</sub> (6 Bereiche)	bis 40 A <sub>eff</sub> (7 Bereiche)	bis 20 A <sub>eff</sub> (12 Bereiche) bis 40 A <sub>eff</sub> (6 Bereiche)
Höchste Genauigkeit Höchste Stabilität	Höchste Funktionalität Höchste Genauigkeit	Flexibel, kompakt, portabel, hochgenau	Kompakt, portabel, günstig, hochgenau
<b>Forschung &amp; Entwicklung</b> <b>Kalibriernormale</b> <b>Messung nach IEC Normen</b> Antriebstechnik Erneuerbare Energien Transformatormessungen Stand-by	<b>Forschung &amp; Entwicklung</b> <b>Antriebstechnik</b> <b>Erneuerbare Energien</b> Beleuchtung <b>Avionik</b> Energy saving, design Stand-by	<b>Forschung &amp; Entwicklung</b> Antriebstechnik <b>Erneuerbare Energien</b> Haushaltsgeräte <b>Energy saving, design</b>	<b>Forschung &amp; Entwicklung</b> Erneuerbare Energien <b>Haushaltsgeräte</b> Energy saving, design <b>Stand-by</b> <b>Produktion, Test</b>

# Unsere Vertriebsbüros

<http://tmi.yokogawa.com/de/about/offices/>

## Vertriebsbüro Hamburg

Herr Andreas Oelke  
Telefon 0451 49982-82  
eMail: [Andreas.Oelke@de.yokogawa.com](mailto:Andreas.Oelke@de.yokogawa.com)

## Vertriebsbüro Berlin

Herr Dennis Kreutzer  
Telefon 030 841095-13  
eMail: [Dennis.Kreutzer@de.yokogawa.com](mailto:Dennis.Kreutzer@de.yokogawa.com)

## Vertriebsbüro Dresden

Herr Dietmar Gulich  
Telefon 0351 28156-68  
eMail: [Dietmar.Gulich@de.yokogawa.com](mailto:Dietmar.Gulich@de.yokogawa.com)

## Vertriebsbüro Hanau

Herr Michael Müller-Wachter  
Telefon 06041 8204-50  
eMail: [Michael.Mueller-Wachter@de.yokogawa.com](mailto:Michael.Mueller-Wachter@de.yokogawa.com)

## Vertriebsbüro Mönchengladbach

Herr Jürgen Koerver  
Telefon 02166 5519-29  
eMail: [Juergen.Koerver@de.yokogawa.com](mailto:Juergen.Koerver@de.yokogawa.com)

## Vertriebsbüro Dortmund

Herr Jürgen Hillebrand  
Telefon 02306 3709-73  
eMail: [Juergen.Hillebrand@de.yokogawa.com](mailto:Juergen.Hillebrand@de.yokogawa.com)

## Vertriebsbüro Aschaffenburg

Herr Rainer Becker  
Telefon 06027 4648-23  
eMail: [Rainer.Becker@de.yokogawa.com](mailto:Rainer.Becker@de.yokogawa.com)

## Vertriebsbüro München

Herr Klaus Thalheimer  
Telefon 08191 42848-58  
eMail: [Klaus.Thalheimer@de.yokogawa.com](mailto:Klaus.Thalheimer@de.yokogawa.com)

## Vertriebsbüro Reutlingen

Herr Matthias Schöberle  
Telefon 08152 9310-86  
eMail: [Matthias.Schoeberle@de.yokogawa.com](mailto:Matthias.Schoeberle@de.yokogawa.com)

## Vertriebsbüro Nagold

Herr Joachim Hausner  
Telefon 07459 4055-01  
eMail: [Joachim.Hausner@de.yokogawa.com](mailto:Joachim.Hausner@de.yokogawa.com)

# Herzlichen Dank

**Haben Sie Bedarf an individuellen  
Seminaren/Schulungen Vorort oder in Herrsching  
am Ammersee?**

Für weitere Informationen/Fragen:

Ugur Gürsoy,

08152/9310-47

[ugur.guersoy@de.yokogawa.com](mailto:ugur.guersoy@de.yokogawa.com)

oder:

unsere Vertriebsbüros:

<http://tmi.yokogawa.com/de/about/offices/>

# PRAKTISCHE VORFÜHRUNG

## WT1800 + Frequenzumrichter

- Verdrahtung mit Sternpunktadapter
- WIRING, UPDATE RATE, SYNC SOURCE
- Leistungen pro Phase und Summenleistung
- FREQFilter, LINEFilter
- NUMERIC, WAVE
- Harm. Analyse, PLL Source, VECTOR
  
- Fragen?