

Christian Lehrmann (Hrsg.)

Leistungsmesstechnik



ISSN 1868-5838
ISBN 978-3-95606-444-9

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Explosionsschutz

PTB-Ex-10

Braunschweig, Dezember 2018

Christian Lehrmann (Hrsg.)

Leistungsmesstechnik

Tagungsband zum 306. PTB-Seminar

ISSN 1868-5838

ISBN 978-3-95606-444-9

306. PTB-Seminar

Leistungsmesstechnik

Tagungsband

zum

306. PTB-Seminar
Leistungsmesstechnik

Braunschweig, 18.01.2018

Inhalt

- 1** Anwendung der EN 60034-30-1 bei explosionsgeschützten elektrischen Maschinen
Dipl.-Ing. Manfred Sattler, VEM motors GmbH Wernigerode
- 9** Die Messunsicherheit bei der Wirkungsgradmessung an permanentmagneterregten Synchronmaschinen – ein Vergleich des direkten und indirekten Messverfahrens
Dr.-Ing. Christian Lehrmann, Nijan Yogal, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig
- 23** Dreiphasenmessungen nach verschiedenen Methoden im Vergleich
Matthias Schöberle, Yokogawa Deutschland GmbH, Herrsching
- 43** Normenkonforme Wirkungsgradmessung an Drehstromasynchronmaschinen kleiner Leistung
Dr. Simon Hoffmann, Tobias Bleif, SEW-Eurodrive GmbH & Co. KG, Bruchsal
- 59** Herausforderungen für die elektrische Leistungsmesstechnik im Umfeld der Elektromobilität
Dr.-Ing. Matthias Schmidt, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig
- 75** Meeting the challenges of high-frequency power measurement
Erik Kroon, Yokogawa Europe Solutions B.V., Amersfoort

Anwendung der EN 60034-30-1 bei explosionsgeschützten elektrischen Maschinen

Dipl. Ing. Manfred Sattler, VEM motors GmbH Wernigerode

Kurzfassung

Die umweltgerechte Konstruktion und Fertigung von Niederspannungsasynchronmotoren wird im wesentlichen im Leistungsbereich bis 1000kW durch die Einhaltung der Bestimmungen der

VO 640/2009 sowie VO 04/2014 mit der Einhaltung von festgelegten Mindestwirkungsgraden realisiert.

Zahlreiche Motoren sind jedoch von den Forderungen dieser Verordnungen ausgenommen und können nach wie vor ohne die Einhaltung von Mindestwirkungsgraden geliefert werden. Dies trifft unter anderem auf alle Motoren zu, die in explosionsgefährdeten Bereichen im Sinne der Richtlinie 2014/34/EU (früher: 94/9/EG) eingesetzt werden. Aus ökologischen und finanziellen Gesichtspunkten macht aber auch in diesen Bereichen der Einsatz energiesparender Elektromotoren Sinn, insbesondere wenn diese Motoren täglich hohe Betriebszeiten aufweisen.

Die für die Wirkungsgradklassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren zuständige Norm EN 60034-30-1 lässt eine IE-Kennzeichnung auch von Motoren für explosionsgeschützte Bereiche zu.

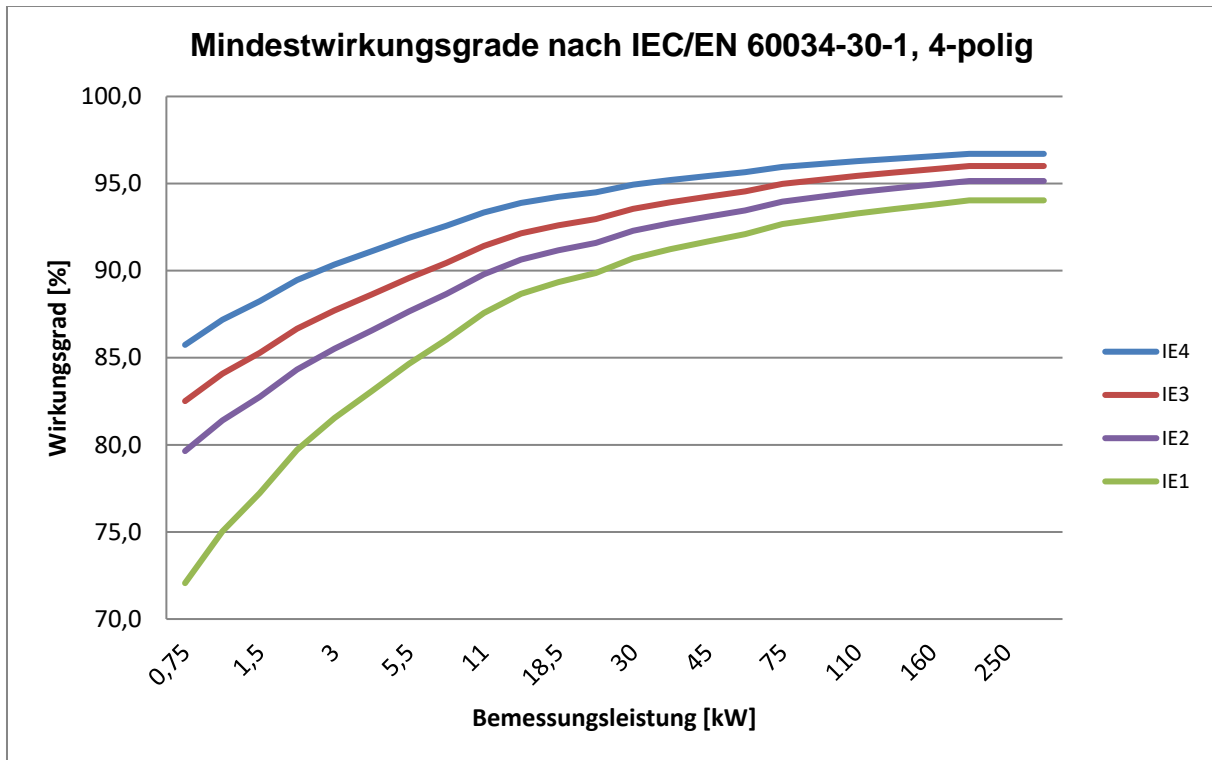
Die Besonderheiten bei der Anwendung dieser Norm werden aufgezeigt.

Rückblick

Energiesparmotoren leisten seit vielen Jahren ihren Beitrag zur Einsparung elektrischer Energie in der Industrie. Dazu gab es bereits im Jahr 1998 innerhalb des europäischen Herstellerverbandes CEMEP eine freiwillige Vereinbarung. Hier wurden 2- und 4-polige Asynchronmotoren im Leistungsbereich 1,1kW bis 90kW in die 3 Effizienzklassen eff1, eff2 und eff3 eingeteilt. Die Hersteller verpflichteten sich, nur noch Motoren in Verkehr zu bringen, die mindestens die Mindestwirkungsgrade der Effizienzklasse eff2 erfüllten, Motoren der Effizienzklasse eff3 durften nicht mehr verkauft werden. Bei dieser Verpflichtung waren Motoren zum Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen ausgenommen. Ende 2009 lief diese Vereinbarung aus, das EFF-Logo wurde von der CEMEP zurückgezogen.

Seit 2008 stehen mit der Norm IEC 60034-30 neue Effizienzklassen mit der bekannten IE-Klassifizierung zur Verfügung. Derzeit gültige Norm in Europa ist die EN 60034-30-1:2014.

Diese Wirkungsgradklassen gelten für eintourige Niederspannungsmotoren der Polzahlen 2, 4, 6 und 8 für den Betrieb am sinusförmigen Netz bei 50Hz oder 60Hz im Leistungsbereich 0,12kW bis 1000kW. Im Unterschied zu den Mindestwirkungsgraden für die EFF-Klassifizierung, die auf der Wirkungsgradbestimmung nach EN 60034-2 beruhten, ist für die EN 60034-30 die Wirkungsgradermittlung nach EN 60034-2-1 festgelegt. Dies ist beim Vergleich von Angaben zu Wirkungsgraden zwischen Motoren nach alter und neuer Norm zu beachten.



Beispiel: Wirkungsgradklassen 4-poliger 50Hz-Motoren

VO (EG) 640/2009 und VO (EU) 4/2014

Die ehemalige freiwillige Verpflichtung der europäischen Hersteller, nur noch Motoren in den Effizienzklassen eff 1 und eff 2 zu verkaufen wurde ersetzt durch die VO (EG) 640/2009 vom 22. Juli 2009. Der Vertrieb energiesparender Motoren erhielt damit eine gesetzliche Grundlage. In 3 Stufen soll erreicht werden, dass bei 2-, 4- und 6-poligen Niederspannungsmotoren innerhalb Europas nur noch Motoren mit der Mindestwirkungsgradklasse IE3 oder optional Motoren der Wirkungsgradklasse IE2 mit Frequenzumrichter verkauft werden:

Stufe 1:

Mindestwirkungsgrad (MEPS) IE2 ab 16. Juni 2011

Stufe 2:

Verschärfung auf IE3 zum 01.01.2015 für den Leistungsbereich 7,5 kW bis 375 kW.
Optionale Möglichkeit: IE2 + Umrichter

Stufe 3:

Erweiterung des Leistungsbereichs auf 0,75 kW bis 375 kW zum 01.01.2017
Optionale Möglichkeit: IE2 + Umrichter

Für den verpflichtenden Einsatz von Motoren in den festgelegten Wirkungsgradklassen gibt es in der VO (EG) 640/2009, ergänzt durch die VO (EU) 04/2014 nachfolgende Ausnahmeregelungen:

„Diese Verordnung gilt nicht für

- (a) Motoren, die dafür ausgelegt sind, ganz in eine Flüssigkeit eingetaucht betrieben zu werden
- (b) vollständig in ein Produkt (z. B. ein Getriebe, eine Pumpe, einen Ventilator oder einen Kompressor) eingebaute Motoren, deren Wirkungsgrad nicht unabhängig von diesem Produkt erfasst werden kann
- (c) Motoren, die speziell für den Betrieb unter folgenden Bedingungen ausgelegt sind:
 - (i) in Höhen über 4 000 Meter über dem Meeresspiegel
 - (ii) bei Umgebungstemperaturen über 60 °C
 - (iii) bei Betriebshöchsttemperaturen über 400 °C
 - (iv) bei Umgebungstemperaturen unter –30 °C (beliebiger Motor) bzw. bei Umgebungstemperaturen unter 0 °C (luftgekühlter Motor)
 - (v) bei Kühlflüssigkeitstemperaturen am Einlass eines Produkts unter 0 °C oder über 32 °C
 - (vi) **in explosionsgefährdeten Bereichen im Sinne der RL 94/9/EG (2014/34/EU)**
- (d) Bremsmotoren.“

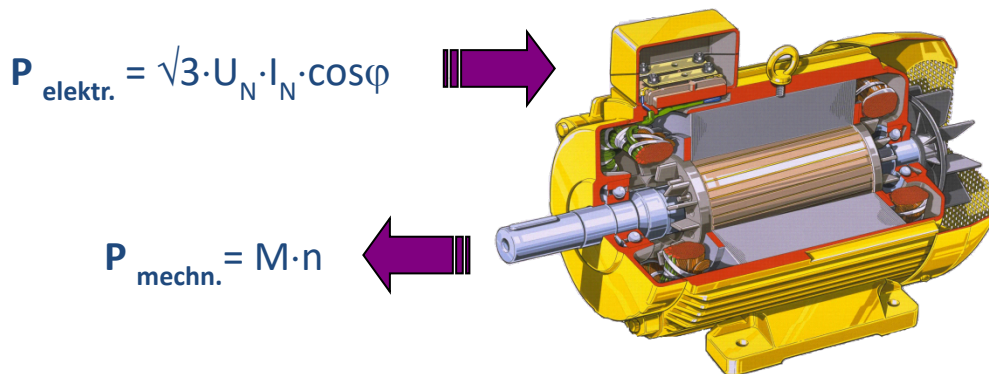
Motoren, die in explosionsgefährdeten Bereichen im Sinne der RL94/9/EG bzw. 2014/34/EU eingesetzt werden, sind also von der VO 640/2009 komplett ausgenommen und brauchen somit keine Mindestwirkungsgrade einhalten. Dies ergibt sich zum einen aus den besonderen Anforderungen an die durch die Motoren und deren Einsatz zu realisierende Explosionssicherheit. Damit verbunden können Einschränkungen in der Motorauslegung wie beispielsweise erhöhter Luftspalt, ein begrenzter Bereich des Anlaufstromverhältnisses oder des Materialeinsatzes sein. Ein weiterer Grund ist der teilweise hohe zeitliche Aufwand bei der Zertifizierung, insbesondere der Motoren für die Kategorie 2 nach RL 2014/34/EU.

Die Fertigung explosionsgeschützter Motoren in energiesparender Ausführung und der entsprechenden Kennzeichnung ist jedoch auf freiwilliger Basis möglich, da der Anwendungsbereich der EN 60034-30-1 die explosionsgeschützten Motoren nicht ausschließt. Und so verwundert es auch nicht, dass etliche Kunden, insbesondere große Konzerne aus der Chemieindustrie, von Anfang an auch Motoren nach RL 94/9/EG in Energiesparausführung gefordert haben. Gerade bei Motoren mit einer hohen täglichen Laufzeit ist es ökonomisch sehr sinnvoll, auch im Ex-Bereich Energiesparmotoren einzusetzen. Der höhere Preis kann sich hier in einem relativ kurzen Zeitraum amortisieren.

Maßnahmen zur Verlustreduzierung von Elektromotoren

Die prinzipielle Herangehensweise an die Konstruktion energiesparender explosionsgeschützter Motoren unterscheidet sich nicht von der der Standardmotoren. Die Grundlage bildet die Analyse der auftretenden Verluste im Motor.

Die Verlustaufteilung der Asynchronmotoren



$$V_{\text{ges}} = V_{\text{Fe}} + V_{\text{Cu1}} + V_{\text{Cu2}} + V_{\text{R}} + V_{\text{zu}}$$

- Eisenverluste V_{Fe} (Stator/Rotorpaket/Gehäuse)
- Stromwärmeverluste (Statorwicklung V_{Cu1} , Rotorwicklung V_{Cu2})
- Reibungsverluste V_{R} (Lüfterreibungsverluste, Lagerreibungsverluste)
- Zusatzverluste V_{zu}

$$\eta = \frac{P_{\text{mechanisch}}}{P_{\text{elektrisch}}} = \frac{P_{\text{mechanisch}}}{P_{\text{mechanisch}} + \text{Verluste}}$$

Damit ergeben sich folgende Möglichkeiten der Energieeinsparung:

- Einsatz von höherwertigem Elektroband zur Senkung der Eisenverluste
- Optimierung des Stator designs zur Senkung der Stromwärmeverluste im Stator
- Optimierung des Rotor designs zur Senkung der Stromwärmeverluste im Rotor
- Optimierung der Lagerung zur Senkung der Lagerreibungsverluste
- Optimierung des Belüftungskonzeptes zur Senkung der Lüfterreibung
- Optimierung der Gesamtverlustbilanz durch weitere konstruktive und technologische Maßnahmen
- Einsatz neuer Motortechnologien auch im Ex-Bereich, beispielsweise der Einsatz von permanenterregten Motoren oder Reluktanzmotoren
- Einsatz von Frequenzumrichtern

Während bei der Konstruktion von Energiesparmotoren im Standardmotorenbereich der Hauptaugenmerk auf die Senkung der Verluste gerichtet werden kann, stehen bei Motoren zum Einsatz in explosionsgeschützten Bereichen die Anforderungen an den Explosionsschutz durch Einhaltung der Normen der Reihe EN 60079 oder gleichwertiger Lösungen an erster Stelle.

Fast alle Maßnahmen zur Senkung der Verluste bei Standardmotoren können ohne große Einschränkungen auch für Motoren der Zündschutzarten druckfeste Kapselung „db“ und „db eb“, erhöhte Sicherheit „ec“ (bisher Zündschutzart „n“) sowie Schutz durch Gehäuse „tb“ und

„tc“ zur Anwendung kommen. Positiver Nebeneffekt der Erhöhung der Wirkungsgrade für den Explosionsschutz ist die in der Regel damit einhergehende Senkung des Temperaturniveaus im Motor. Nachdem entsprechend RL 2014/34/EU die für die Motoren der Kategorie 2 erforderlichen Nachträge zu den vorhandenen EG-Baumusterprüfbescheinigungen vorlagen, konnten wir bei der VEM motors GmbH sehr frühzeitig nach Inkrafttreten der EN 60034-30 komplette Reihen Energiesparmotoren mit IE2- und IE3- Klassifizierung in den oben genannten Zündschutzarten anbieten. Schwieriger gestaltete sich die Entwicklung und Zertifizierung der Reihe für Motoren der Zündschutzart erhöhte Sicherheit „eb“.

Bereits bei der Auslegung der neuen Reihen musste der Einhaltung des zulässigen Anlaufstromverhältnisses große Beachtung geschenkt werden. Die EN 60079-7 lässt zwar den unkritischen Wert von maximal 10-fach zu. Da die Motoren jedoch unverändert auch der VIK-Empfehlung VE 01 entsprechen sollen, galt bisher ein maximaler Wert von 8,0. Die neue VE 01, die ab 01.07.2018 gültig ist, erhöht diesen Wert auf 9,0.

Auch zeitlich stellt die Entwicklung einer neuen Reihe Energiesparmotoren für die Zündschutzart erhöhte Sicherheit „eb“ erhöhte Anstrengungen. Nach dem Entwurf der Reihe gilt es, für jede Motorausführung entsprechende Prüfmuster zu bauen, bei Bemessungsspannung und an den gewünschten Spannungsgrenzen sowie in Kurzschlussversuchen zu testen und die Messwerte zur Erlangung der nach den ATEX-Richtlinien geforderten EG- bzw. EU-Baumusterprüfbescheinigungen bei einer notifizierten Stelle einzureichen. Dies ist erforderlich, da sich neben einer eventuellen Änderung der Typbezeichnung nicht nur einzelne elektrische Werte aus den zugehörigen Datenblättern sondern auch die sicherheitsrelevanten Kenngrößen t_E -Zeit und I_A/I_N ändern werden.

VEM hat sich auch diesen Anforderungen an die Betriebsmittel gestellt, die Baureihen technisch überarbeitet und bietet heute komplette Reihen in IE2- und IE3-Ausführung zum Einsatz in Zone 1 an.

Zusammenfassung

Wirkungsgradklassifizierung nach EN 60034-30-1 bei Ex-Motoren?

- Unter Berücksichtigung der besonderen sicherheitstechnischen Anforderungen aus der RL 2014/34/EU sind die Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrades elektrischer Maschinen auch bei Motoren zum Einsatz in explosionsgeschützten Bereichen umsetzbar.
- In Zukunft ist eine Erweiterung der Forderung zum Einsatz von IE3-Motoren oder optional IE2-Motoren am Frequenzumrichter auch für den Geltungsbereich der RL 2014/34/EU denkbar. Bereits heute kaufen beispielsweise große Chemiekonzerne ihre Motoren zum Einsatz in explosionsgeschützten Bereichen in der Wirkungsgradklasse IE3 und/oder zum Einsatz am Frequenzumrichter.
- Jeder Hersteller muß sich intensiv mit den Problemen der Wirkungsgradbestimmung bei elektrischen Maschinen beschäftigen.
Mit den höheren Wirkungsgradklassen IE3 und IE4 (IE5) kommt der Betrachtung der Messunsicherheit eine immer größere Bedeutung zu. Es gilt, die nach

EN 60034-30-1 geforderten Mindestwirkungsgrade sicher einzuhalten aber auch einen zu hohen Materialeinsatz zu vermeiden.

- Die Mehrzahl der Maßnahmen zur Einhaltung der Wirkungsgradklassen bringen eine Herabsetzung des Temperaturniveaus mit sich und wirken damit positiv auf die Explosionssicherheit.
- Vorhandene EU-(EG-) Baumusterprüfbescheinigungen nach RL 2014/34/EU in den Zündschutzarten druckfeste Kapselung „d“, erhöhte Sicherheit „ec“ sowie Schutz durch Gehäuse „t“ lassen sich in der Regel problemlos auf neu entwickelte Baureihen mit Wirkungsgradklassifizierung erweitern.
- Beim Austausch vorhandener ‚alter‘ Ex-Motoren durch Motoren mit Wirkungsgradklassifizierung sind die teilweise vergrößerten Hüllmaße sowie größere Trägheitsmomente zu beachten.
Bei Motoren der Zündschutzart erhöhte Sicherheit „eb“ kann eine Neueinstellung und/oder Austausch des Schutzschalters erforderlich werden.
- Da sich die elektrischen Werte einschließlich t_E -Zeiten und Anlaufstromverhältnisse I_A/I_N in den Datenblättern der EU-Baumusterprüfbescheinigungen in der Regel ändern, entsteht bei Motoren der Zündschutzart erhöhte Sicherheit „eb“ ein sehr hoher Aufwand sowohl bei der Konstruktion, bei den notwendigen Prüfungen und bei der Zertifizierung durch die notifizierten Stellen. Die Einhaltung des von der VIK-Empfehlung VE 1 (2018) geforderten maximalen I_A/I_N von 9 kann Sondermaßnahmen erfordern.

Literatur

Verordnung (EG) Nr. 640/2009 der Kommission vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren

Verordnung (EU) Nr. 4/2014 der Kommission vom 6. Januar 2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 640/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren

RICHTLINIE 94/9/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. März 1994

Richtlinie 2014/34/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (Neufassung)

EN 60034-1: 2010 Drehende elektrische Maschinen – Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten

EN 60034-2-1:2014 Drehende elektrische Maschinen – Teil 2-1: Standardverfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades aus Prüfungen

EN 60034-30-1:2014 Drehende elektrische Maschinen – Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren (IE-Code)

Aktuelle Ausgaben der Normen der Reihe EN 60079

VIK-Empfehlung 01 Drehstrom-Asynchronmotoren
Technische Anforderungen, Stand Januar 2018

Lehrmann, C., Dreger, U., Lienesch, F.; Wirkungsgradbestimmung an (explosionsgeschützten) elektrischen Maschinen – eine Übersicht unter den Aspekten der Messunsicherheit; Vortrag auf dem 264. PTB-Seminar Leistungsmesstechnik am 03. November 2011

Die Messunsicherheit bei der Wirkungsgradmessung an permanentmagneterregten Synchronmaschinen – ein Vergleich des direkten und indirekten Messverfahrens

Dr.-Ing. Christian Lehrmann, Nijan Yogal, Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig

Kurzfassung

Im Rahmen dieses Beitrages werden die indirekte Bestimmung des Wirkungsgrades über das Einzelverlustverfahren und die direkte Wirkungsgradbestimmung an einer permanentmagneterregten Synchronmaschine der Bemessungsleistung 7,5 kW mit Oberflächenmagneten verglichen. Hierbei wurde gemäß des „Guide of the uncertainty of measurement“ /1/ eine detaillierte Messunsicherheitsanalyse durchgeführt und die Ergebnisse gegenübergestellt und bewertet.

Überblick

Die permanentmagneterregte Synchronmaschine erobert sich als industrielle Antriebslösung wegen der im Vergleich zur Asynchronmaschine gerade im Teillastbereich deutlich höheren Energieeffizienz immer breitere Anwendungsfelder. Ein weiterer Aspekt ist hierbei gerade bei Antrieben mit hohen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit oder den Synchronlauf die deutlich bessere Regelbarkeit im Vergleich zum Induktionsmotor.

Ein wichtiges Kriterium bei der Charakterisierung elektrischer Antriebe allgemein - und auch der permanentmagneterregten Synchronmaschine – ist der Wirkungsgrad des Antriebes, der die abgegebene mechanische Leistung und die aufgenommene elektrische Leistung ins Verhältnis setzt.

Von der messtechnischen Seite her betrachtet ist die Ermittlung des Wirkungsgrades eine Herausforderung, da hier zwei Größen ins Verhältnis gesetzt werden, deren Differenz – die Verlustleistung des Antriebes – oftmals um zwei Zehnerpotenzen kleiner ist als die Größen selbst. Dieses bedeutet aber auch praktisch, dass die Messunsicherheiten bei der elektrischen Leistungsmessung „ P_1 “ und der mechanischen Leistungsmessung „ P_2 “ einen großen Einfluss auf das Ergebnis, die Verlustleistung bzw. den Wirkungsgrad, hat. Wenn die betrachtete Maschine unter eine Energieeffizienzrichtlinie der Europäischen Union, wie z.B. die Asynchronmaschinen unter die Richtlinie 640/2009/EU fallen, kann der ermittelte Wirkungsgrad unter Umständen darüber entscheiden, ob eine elektrische Maschine innerhalb der EU in Verkehr gebracht werden darf oder nicht – mit den entsprechenden wirtschaftlichen Konsequenzen für den Hersteller der Maschine.

Bei der permanentmagneterregten Synchronmaschine bestehen bisher noch keine Anforderungen an den Mindestwirkungsgrad, allerdings ist auch hier der Wirkungsgrad ein wichtiges Instrument um eine elektrische Maschine im Vergleich verschiedener Hersteller

einordnen zu können und somit neben den technischen Daten und dem Preis auch eine wichtige Größe für den Käufer der Maschine beim Vergleich mehrerer Hersteller.

Die Wirkungsgradmessung an Asynchronmaschinen sowie elektrisch erregten Synchronmaschinen ist in der Norm EN 60034-2-1 /2/ festgelegt. Dort wird bei der Asynchronmaschine die indirekte Wirkungsgradmessung empfohlen.

Die direkte und die indirekte Messmethode

Die Durchführung der direkten Bestimmung des Wirkungsgrades erfordert bei der PM-Synchronmaschine, genau so wie bei der Asynchronmaschine, die Messung der beiden Größen „elektrische Leistung“ (P_1) und „mechanische Leistung“ (P_2), wobei bei den in der PTB durchgeführten Messungen der im folgenden skizzierte Versuchsaufbau eingesetzt wurde:

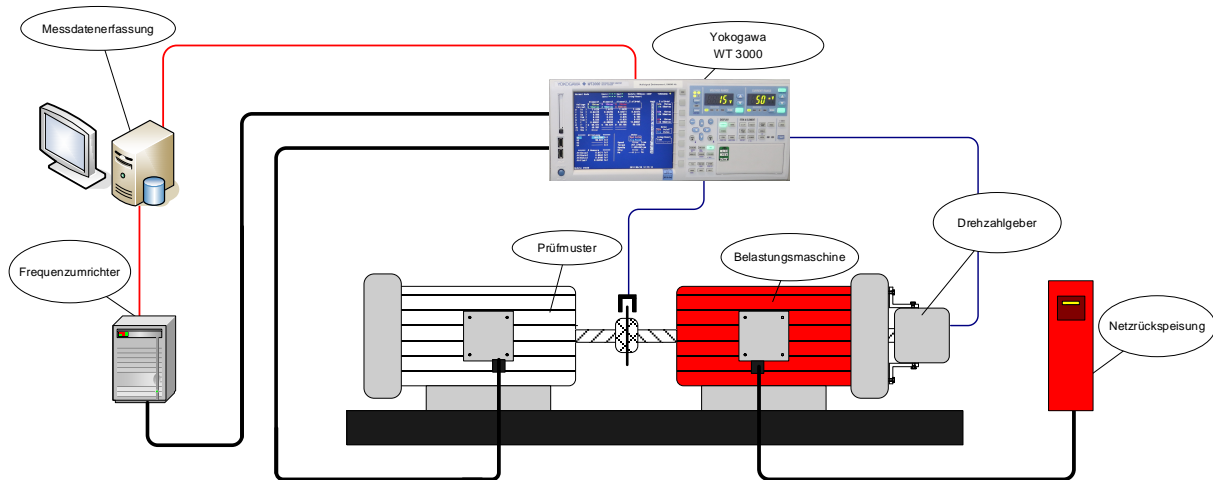


Bild 1: Versuchsaufbau direkte Wirkungsgradmessung

Der Wirkungsgrad der Maschine ergibt sich dann durch Quotientenbildung aus der abgegebenen mechanischen Leistung mit der aufgenommenen elektrischen Leistung.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\left(\frac{n}{60}\right) * 2 * \pi * M}{\sqrt{3} * U * I * \cos \varphi}$$

Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass es im Vergleich zur später beschriebenen indirekten Methode einfach durchführbar und auch für routinemäßige Prüfungen, z.B. im Prüffeld eines Motorherstellers, geeignet ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich mit der direkten Messmethode auch sehr einfach Wirkungsgradkennlinien in Abhängigkeit z.B. der Drehzahl oder des Belastungsdrehmomentes aufnehmen lassen und die Messwerte sofort zur Verfügung stehen.

Eine wichtige Frage neben dem Ergebnis, also dem Wirkungsgrad als Zahlenwert, ist hierbei auch die Messunsicherheit, mit der die Größe „Wirkungsgrad“ angegeben werden kann und dessen Optimierung.

Und an dieser Stelle zeigen sich, sowohl bei der permanentmagneterregten Synchronmaschine als auch bei der Asynchronmaschine, die prinzipiellen Schwächen der direkten Wirkungsgradmessung:

Da die Verlustleistung der Maschine durchaus um mehr als eine Zehnerpotenz kleiner ist als die aufgenommene und die abgegebene Leistung führen hier bereits kleine Messunsicherheiten bei der elektrischen und der mechanischen Leistungsmessung zu signifikanten Abweichungen der Messgröße „Wirkungsgrad“, welche durchaus über die Eingruppierung in die IE – Wirkungsgradklasse und der Frage, ob die Maschine innerhalb der Europäischen Union in Verkehr gebracht werden darf, entscheiden kann.

Für die permanentmagneterregte Synchronmaschine ist bisher neben der direkten Wirkungsgradmessung kein alternatives Verfahren, wie z.B. die indirekte Methode bei der Asynchronmaschine, normativ festgeschrieben. Dieses ist zwar für die elektrisch erregte Synchronmaschine der Fall, jedoch lässt sich dieses Verfahren aufgrund der physikalischen Gegebenheiten nicht auf die permanentmagneterregte Synchronmaschine übertragen:

Die Verlustaufteilung bei der Synchronmaschine

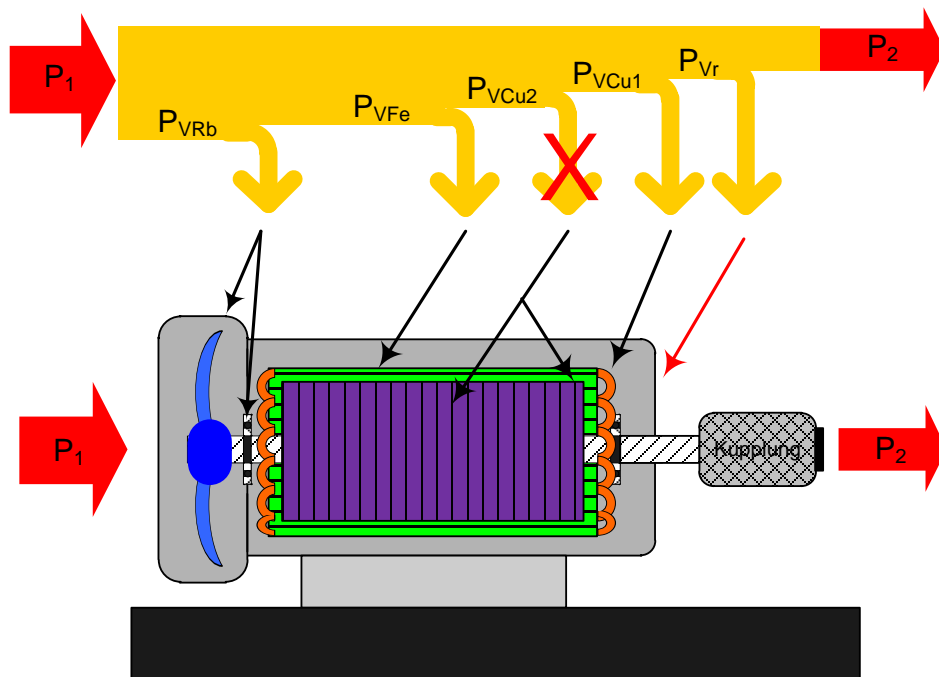


Bild 2: Verlustaufteilung PM-Synchronmaschine

So ist es z.B. bei der permanentmagneterregten Synchronmaschine nicht möglich, ohne aufwändigen Eingriff in die Maschine die Reibungsverluste zu bestimmen, da sich die Rotormagnete im Gegensatz zur Erregerwicklung einer elektrisch erregten Maschine nicht abschalten lassen und somit eine Rotation des Läufers zwangsläufig auch Eisenverluste im Statorblechpaket hervorruft.

Zur Anwendung der indirekten Wirkungsgradbestimmung müssen die folgenden Verlustquellen separiert werden:

1. Statorwicklungsverluste – $P_{V_{Cu1}}$
2. Eisenverluste (Ummagnetisierung und Wirbelstrom), P_{Fe}
3. Mechanische Reibungsverluste (Reibung und Lüfter), $P_{V_{rbg}}$
4. Restverluste, P_{V_r}
5. Oberschwingungsverluste, $P_{V_{OS}}$

In der folgenden Tabelle 1 ist für die permanentmagneterregte Synchronmaschine beschrieben, auf welche Weise die Einzelverluste bestimmt werden können:

Tabelle 1: Einzelverlustaufteilung Synchronmaschine

Statorwicklungsverluste	$P_{V_{Cu1}}$	$P_{V_{Cu1}} = 3 \cdot I_{Strang}^2 \cdot R_{Strang}$
Eisenverluste	P_{Fe}	$P_{Leerlauf} - P_{V_{rbg}}$
Reibungsverluste	$P_{V_{rbg}}$	Generatorischer Leerlaufversuch ohne Erregung
Restverluste	P_{V_r}	Bohrungsfeldversuch
Oberschwingungsverluste	$P_{V_{OS}}$	$P_{V_{OS}} = P_{I_{eff}} - P_{IH01}$

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass im Gegensatz zur elektrisch erregten Synchronmaschine ein generatorischer Leerlaufversuch ohne Erregung nicht ohne zusätzliche Maßnahmen möglich ist, da sich bei den permanentmagneterregten Maschinen die Erregung von außen nicht abschalten lässt.

Und genau dieser Punkt führt bei der praktischen Durchführung der Wirkungsgradmessung zu einem erheblich größeren Aufwand als bei der elektrisch erregten Synchronmaschine.

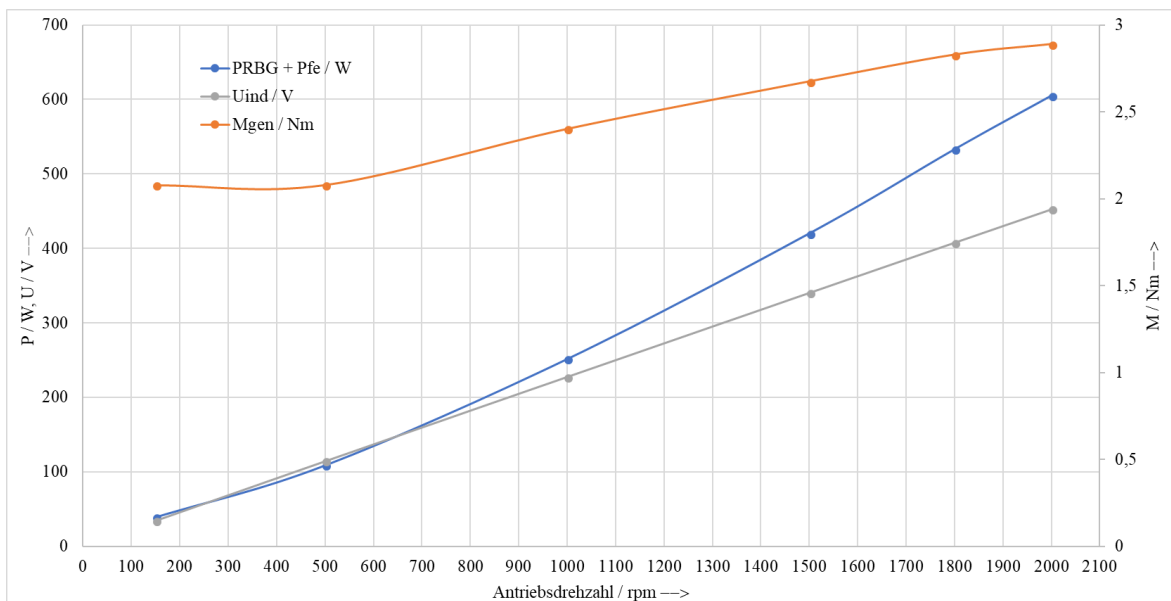


Bild 3: Generatorische Leerlaufmessung an der hier betrachteten PM-Synchronmaschine, Bemessungsleistung = 7,5 kW

In Bild 3 ist das Ergebnis einer mittels dem beispielhaft in Bild 4 dargestellten Versuchsaufbaus durchgeführten generatorischen Leerlaufversuches an einer PM-Synchronmaschine der Bemessungsleistung $P_2 = 7,5 \text{ kW}$ dargestellt.

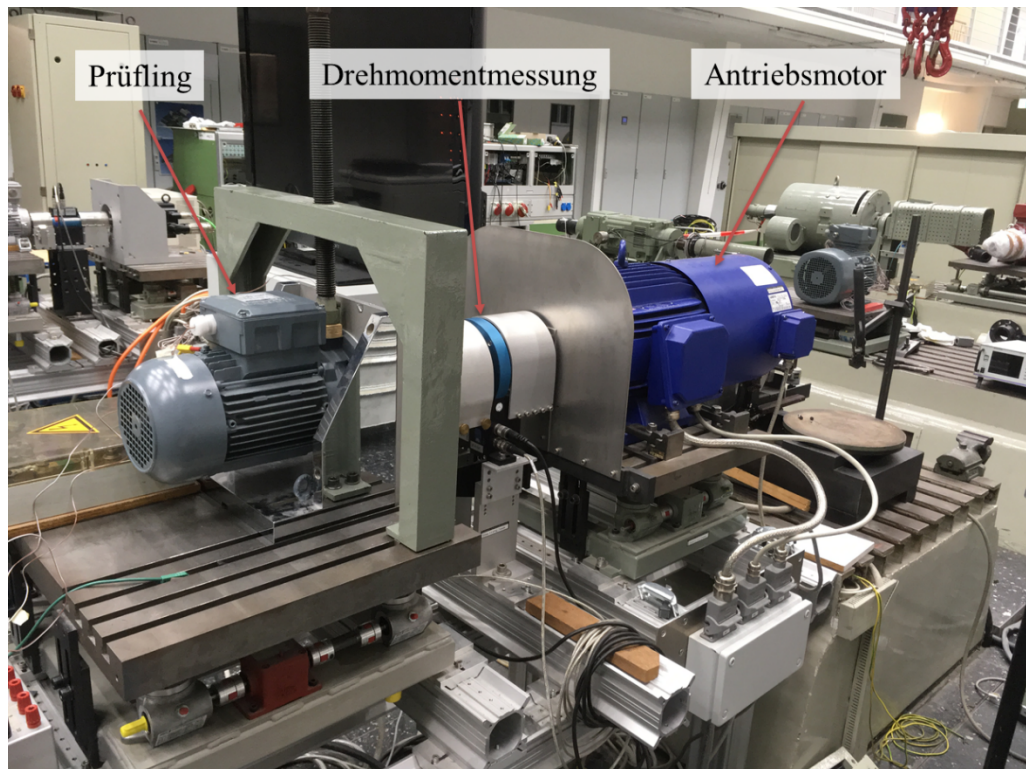


Bild 4: Foto eines beispielhaften Versuchsaufbaus zur Durchführung des generatorischen Leerlaufversuches

Generatorischer Leerlaufversuch

Für die permanentmagneterregte Synchronmaschine kann im generatorischen Leerlaufversuch dabei das folgende Ersatzschaltbild angegeben werden:

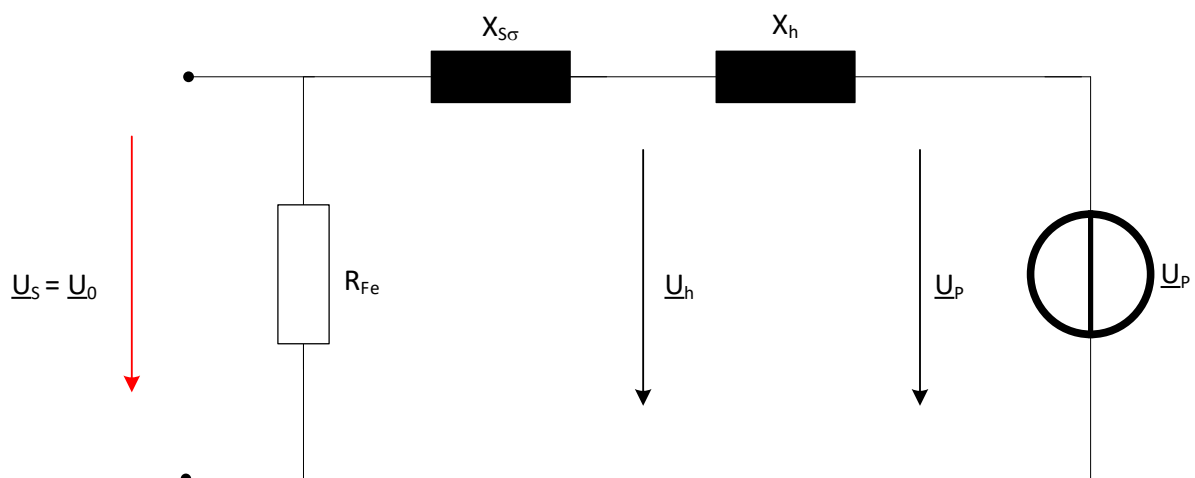


Bild 5: Ersatzschaltbild der permanentmagneterregten Synchronmaschine beim generatorischen Leerlaufversuch

Für die Ersatzschaltbildgrößen kann dabei geschrieben werden:

- Statorspannung $\underline{U}_S \approx$ Reaktanzspannung $\underline{U}_h \approx$ Polradspannung \underline{U}_P
- Statorstrom $I_S = 0A$
- Messung: mechanische Antriebsleistung $P_{\text{mech}} = 2\pi \cdot n \cdot M_G = P_{Fe} + P_{Rbg}$

Eine weitere Aufteilung der generatorischen Leerlaufverlustleistung auf die Reibungsverluste und die Eisenverluste ist ohne eine zusätzliche Messung nicht möglich.

Die Bestimmung der Reibungsverluste muss dabei über einen separaten Rotor mit nicht aufmagnetisierten Magneten erfolgen, der für diesen Versuch im Austausch gegen den Originalrotor in die Maschine eingesetzt wird. Alternativ ist auch eine Berechnung möglich, wobei hier die Angabe einer „Messunsicherheit“ sehr schwierig werden wird. Die gesamten Leerlaufverluste setzen sich dann nur noch aus den Luftreibungs- den Lagerreibungs- und den Lüfterverlusten zusammen. Somit entspricht das Ergebnis dieser Messung direkt den gesamten mechanischen Reibungsverlusten P_{fr} .

Die unsicherheitsbehafteten Messgrößen dieses Versuches sind das Antriebsdrehmoment M_G und die Antriebsdrehzahl n . Hinzu kommt der Einfluss der Motortemperatur über die temperaturabhängigen Lagerreibungsverluste und die temperaturabhängige, im betrachteten Temperaturbereich reversible Abnahme der Magnetisierung der Rotormagnete bei der Messung mit dem originalen, magnetisierten Rotor. Ein ganz wichtiger Punkt sind hier aber auch die z.B. durch Lagerverspannungen nach der Demontage und Montage des Rotors auf die Lagerreibung hervorgerufenen Einflüsse. Dieses ist auch ein Erklärungsansatz für die beobachteten Abweichungen zwischen der direkten und der indirekten Wirkungsgradbestimmung.

Motorischer Leerlaufversuch

Nach der Bestimmung der Reibungsverluste der Maschine mittels der Verwendung eines nicht magnetisierten Rotors können über einen motorischen Leerlaufversuch am Frequenzumrichter die Eisenverluste P_{Fe} und die Oberschwingungsverluste P_{Vos} bestimmt werden.

Hierbei ist es wichtig, möglichst einen baugleichen Frequenzumrichter mit der gleichen Parametrierung wie bei der späteren Maschine in der Anwendung, für die der Wirkungsgrad bestimmt werden soll zu verwenden. Dieser Punkt ist hier relevant um zusätzliche und schwer quantifizierbare Messunsicherheiten durch unterschiedliche Umrichtereigenschaften möglichst zu vermeiden.

Des Weiteren ist wegen des im Vergleich zur Asynchronmaschine fehlenden Magnetisierungsstromes der Leerlaufstrom der permanentmagneterregten Synchronmaschine sehr gering, dieses muss bei der Auswahl der Messtechnik berücksichtigt werden um eine ausreichende Aussteuerung der Stromkanäle zu gewährleisten.

Die Ermittlung der Oberschwingungsverluste erfolgte dann gemäß Tabelle 1 durch die Subtraktion der Grundschwingungsleistung vom Effektivwert der Leistung.

Da sich aber sowohl der PM-Synchronmaschine als auch bei der Asynchronmaschine die umrichterbedingten Oberschwingungsverluste als belastungsunabhängig darstellen, können die hier ermittelten Oberschwingungsverluste auch für den Betrieb mit Bemessungslast angenommen werden.

Die durch die Spannungsgrundschiwingung hervorgerufenen Eisenverluste P_{Fe} lassen sich dann gemäß der Formel $P_{Fe} = P_{VLeerlauf} - P_{VRbg}$ durch Subtraktion der über den generatorischen Leerlaufversuch mit nicht magnetisiertem Rotor ermittelten mechanischen Reibungsverlusten von den gesamten Leerlaufversuchen ermitteln.

Die aus dem motorischen Leerlaufversuch in die spätere Wirkungsgradmessung eingehenden, messunsicherheitsbehafteten Größen sind die Grundschiwingungsleistung P_{H01} und der Effektivwert der Leistung P_{eff} . Da es sich hier um rein elektrische Messgrößen handelt, lassen sich mit der aktuell am Markt verfügbaren Messtechnik sehr geringe Messunsicherheitsbeiträge realisieren, eine Herausforderung bleiben hierbei jedoch die hohen Frequenzanteile insbesondere in der für die Leistungsmessung benötigten Spannung an den Motorklemmen.

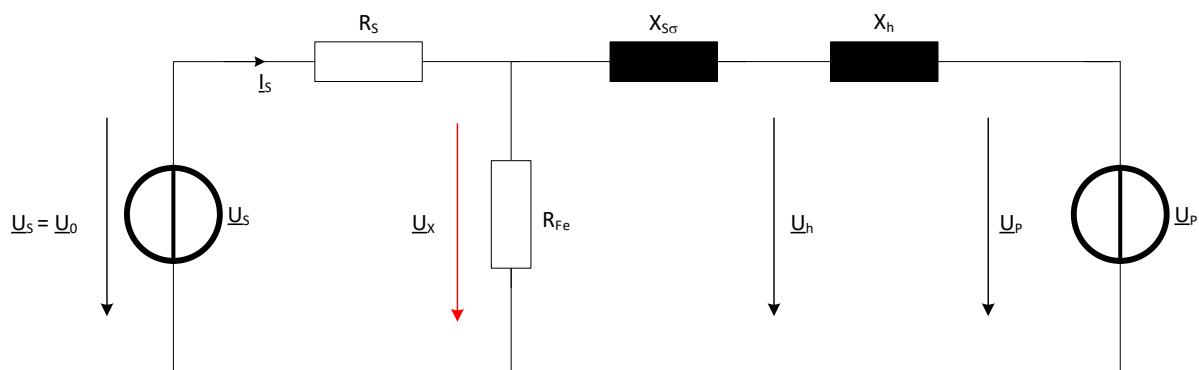


Bild 6: Ersatzschaltbild zur Korrekturrechnung für die Eisenverluste bei Belastung des Motors.

Als weiterer Punkt muss berücksichtigt werden, dass die Eisenverluste gemäß dem in Bild 6 dargestellten Ersatzschaltbild im Eisenverlustwiderstand R_{Fe} umgesetzt werden und somit von der Spannung U_x über dem Widerstand abhängig sind. Bedingt durch den in Reihe geschalteten ohmschen Widerstand der Statorwicklung führt ein belastungsabhängiger Stromfluss von der Quelle U_s zu einer Abnahme der Spannung U_x und der Eisenverluste gemäß folgendem Zusammenhang

$$P_{Fe} \approx P_{Fe,LL} \cdot \left(\frac{U_x}{U_0}\right)^2, \quad \underline{U}_x = \underline{U}_s - R_s \cdot \underline{I}_s$$

Hierbei ist allerdings auch zu berücksichtigen, dass der Statorwiderstand R_s ebenfalls von der Statortemperatur abhängig ist.

Die Eisenverluste bei Leerlauf der Maschine, $P_{Fe,LL}$ wurden aus der generatorischen und motorischen Leerlaufmessung bestimmt.

Ermittlung der Restverluste

Die für die Einzelverlustaufteilung bisher noch nicht vorliegenden lastabhängigen Zusatzverluste wurden mittels des sogenannten Bohrungsfeldversuches ermittelt:

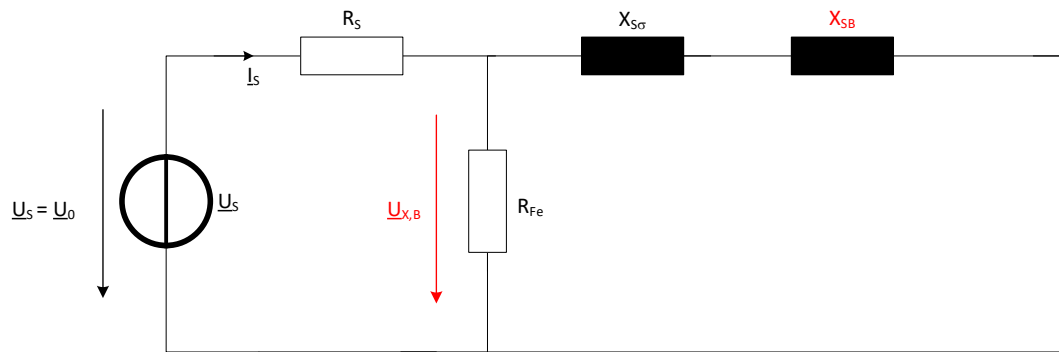


Bild 6: Ersatzschaltbild der Maschine im Bohrungsfeldversuch

Für den Bohrungsfeldversuch wurde der Rotor der Maschine entfernt und der Stator mit sinusförmiger Spannung variabler Frequenz gespeist. Die gemessene elektrische Leistung setzt sich dabei gemäß dem Zusammenhang $P_{1,B} = P_{Cu,S} + P_{Vr} + P_{Fe,B}$ zusammen.

Es gilt weiterhin:

$$P_{Fe,B} \approx P_{Fe,LL} \cdot \left(\frac{U_{X,B}}{U_0} \right)^2 \quad \text{und} \quad U_{X,B} = U_S - R_S \cdot I_S$$

Hieraus folgt für die Zusatzverluste der Zusammenhang $P_{Vr} = P_{1,B} - P_{Fe,B} - P_{Cu,S}$

Bestimmung des Motorwirkungsgrades

In der folgenden Abbildung 7 sind zusammenfassend die in den vorherigen Abschnitten beschriebene Vorgehensweise zur indirekten Wirkungsgradmessung an der permanentmagneterregten Synchronmaschine zusammengestellt. Hieraus ist auch gut ersichtlich, dass die Unterschiede der Verlustleistungen und somit die Wirkungsgrade für den Betrieb am Umrichter und für den Betrieb am Netz, sofern die Maschine hierfür ausgelegt ist, lediglich über die lastunabhängigen, umrichterbedingten Oberschwingungsverluste begründet sind. Es kann somit geschrieben werden:

$$\eta_{\text{Mot}} = \frac{P_1 - P_{Fe} - P_{Rbg} - P_{Zus} - P_{VCu1}}{P_1} = \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{Netzbetrieb})$$

$$\eta_{\text{Mot}} = \frac{P_1 - P_{Fe} - P_{Rbg} - P_{Zus} - P_{VCu1} - P_{VOS}}{P_1} = \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{Umrichterbetrieb})$$

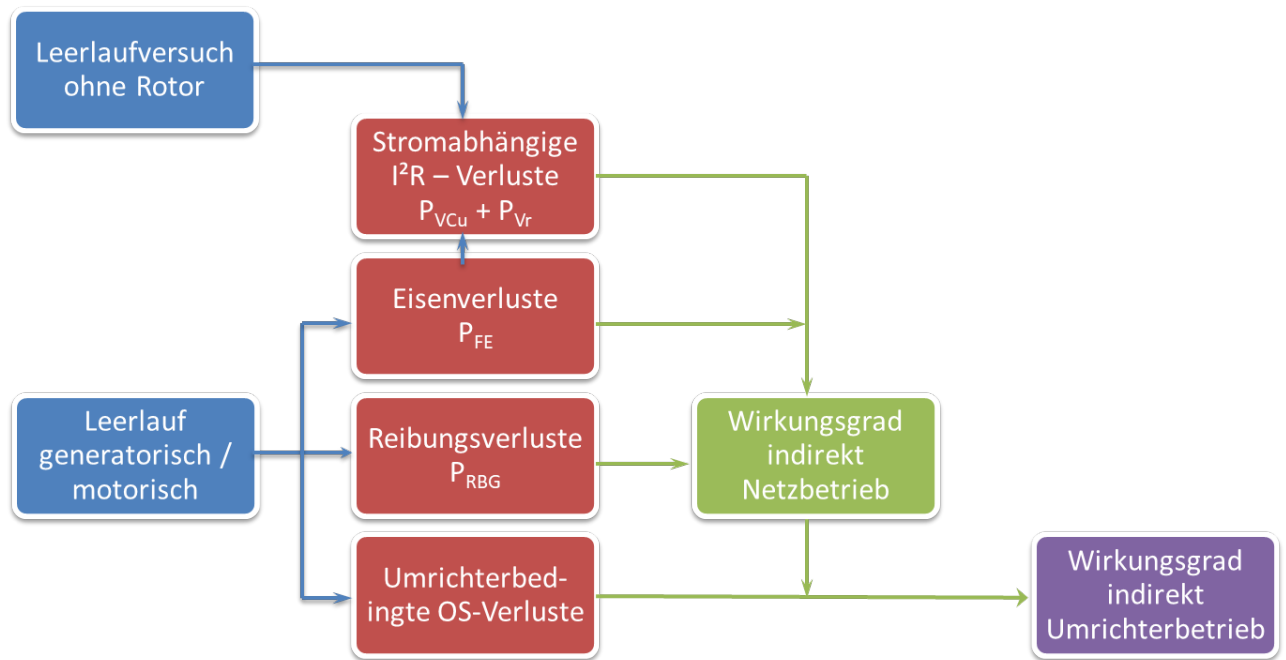


Bild 7: Flussdiagramm zum hier angewandten indirekten Verfahren zur Wirkungsgradmessung

Ergebnisse der durchgeführten Wirkungsgradmessungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der an einer permanentmagneterregten Maschine der Bemessungsleistung $P_2 = 7,5 \text{ kW}$ für die Drehzahlen 1000 1/min, 1500 1/min und 1800 1/min im Motorprüffeld der PTB durchgeführten Wirkungsgradmessungen vorgestellt und die Ergebnisse der direkten Wirkungsgradmessung mit den Ergebnissen der indirekten Messung bei Umrichterbetrieb ohne Sinusfilter am Umrichterausgang verglichen.

Es zeigte sich dabei zum einen wie erwartet ein Anstieg des Wirkungsgrades bei Bemessungsleistung mit steigender Frequenz, zum anderen auch die bei allen elektrischen Maschinen auftretende Abnahme des Wirkungsgrades im Teillastbetrieb.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist hierbei auch die für alle drei untersuchten Drehzahlen und über den gesamten untersuchten Teillastbereich beobachtete gute Übereinstimmung der mittels der direkten und der indirekten Methode ermittelten Maschinenwirkungsgrade.

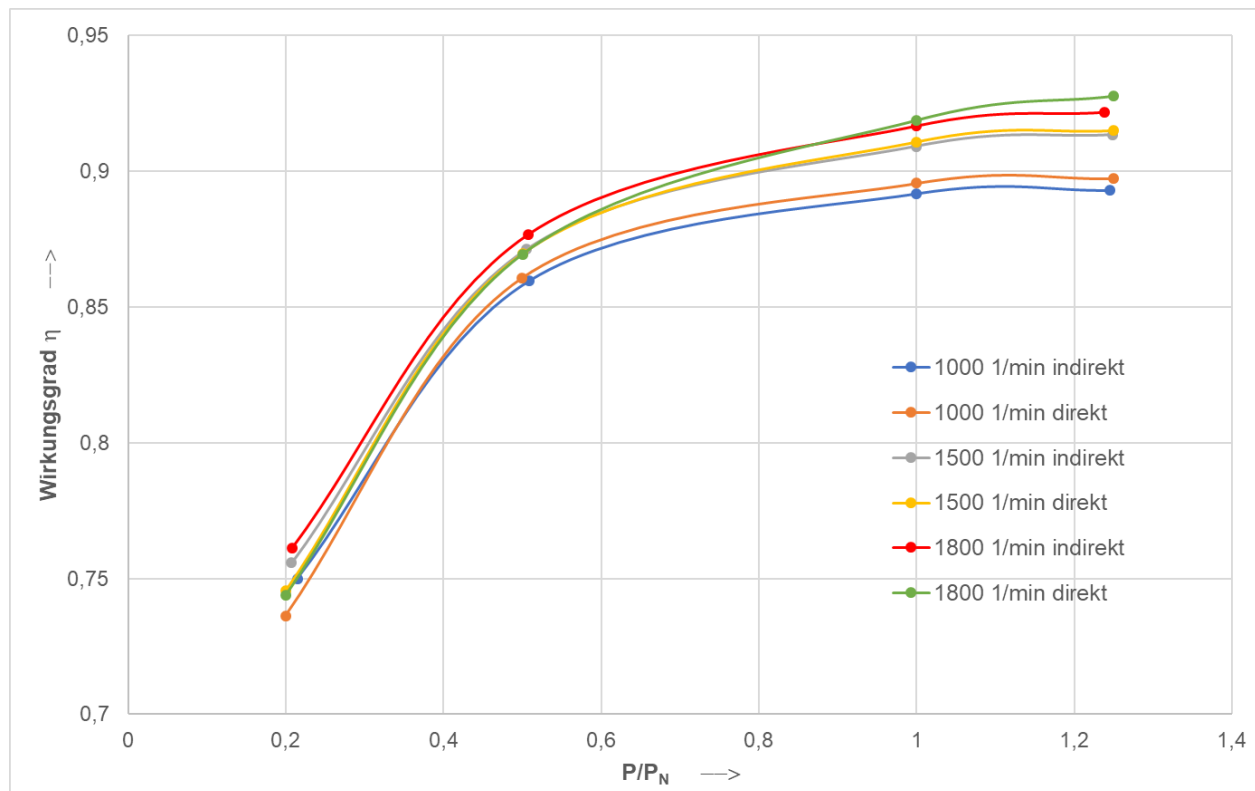


Bild 8: Ermittelter Wirkungsgrad im Drehzahlbereich 1000 1/min – 1800 1/min, direkte und indirekte Messung

Diese zahlenmäßigen Ergebnisse für die Messgröße „Wirkungsgrad“ ist allerdings ohne die Angabe einer Messunsicherheit insbesondere für die Einordnung der Maschine in die IE-Wirkungsgradklassen nur eingeschränkt verwendbar und sagt noch nichts über die Vertrauenswürdigkeit der Messergebnisse aus.

In einem nächsten Schritt wurden dann zunächst die in die Messgröße „Wirkungsgrad“ eingehenden, messunsicherheitsbehafteten Größen identifiziert und für die spätere Analyse mittels der Software GUM Workbench die Unsicherheiten und Verteilungsfunktionen der einzelnen Messgrößen mittels der für die verwendeten Geräte vorhandenen Spezifikationen und Kalibrierprotokolle ermittelt.

Anschließend wurde unter Anwendung des „Guide to the uncertainty of measurement“ /1/ mittels der GUM Workbench die Verknüpfung der einzelnen Messgrößen hergestellt und die Messunsicherheit für die Ergebnisgröße „Wirkungsgrad“ bestimmt. In der folgenden Tabelle 2 ist das Ergebnis der Berechnung für den Wirkungsgrad η und die entsprechenden Zwischenergebnisse für die indirekte Methode dargestellt:

Tabelle 2: Ergebnis der Messunsicherheitsberechnung der indirekten Wirkungsgradbestimmung, Drehzahl = 1500 1/min, Bemessungslast 7,5 kW.

Größe	Wert	Erw.-Mess-unsicherheit	Erweiterungs-faktor	Überdeckungs-wahrscheinlichkeit
P_{Rbg0}	54.00	0.73	2.00	95% (Normal)
P_{Fe0}	366.4	1.8	2.00	95% (Normal)
U_{xB}	30.4070	$4.8 \cdot 10^{-3}$	2.00	95% (Normal)
P_{einB}	267.02	0.36	2.00	95% (Normal)
$P_{cus} P_{ad}$	264.06	0.36	2.00	95% (Normal)
U_x	343.271	0.039	2.00	95% (Normal)
P_{Fe}	376.6	1.8	2.00	95% (Normal)
P_{e1}	8246	11	2.00	95% (Normal)
P_{ein0ad}	59.99	0.45	2.00	95% (Normal)
P_{einrms}	487.67	0.42	2.00	95% (Normal)
P_{einH01}	427.68	0.16	2.00	95% (Normal)
P_{in}	8306	11	2.00	95% (Normal)
P_{out}	7551	11	2.00	95% (Normal)
η_{ind}	0.90914	$240 \cdot 10^{-6}$	2.00	95% (Normal)

Beim Vergleich der beiden Messunsicherheitsbudgets für die direkte und indirekte Wirkungsgradbestimmung, deren detaillierte Betrachtung den Rahmen dieses Beitrages sprengen würde, zeigen sich die folgenden Unterschiede

Tabelle 3: Vergleich der Messunsicherheiten direkten mit der indirekten Wirkungsgradbestimmung

	Direkte Wirkungsgradmessung	Indirekte Wirkungsgradmessung
Wirkungsgrad η	0,910707	0,909143
Messunsicherheit η	$207 \cdot 10^{-6}$, $k = 2$	$122 \cdot 10^{-6}$, $k = 2$
größter MU - Beitrag	M_k (Drehmoment), 33,5 %	M_g (generatorischer Leerlauf), 66,3 %

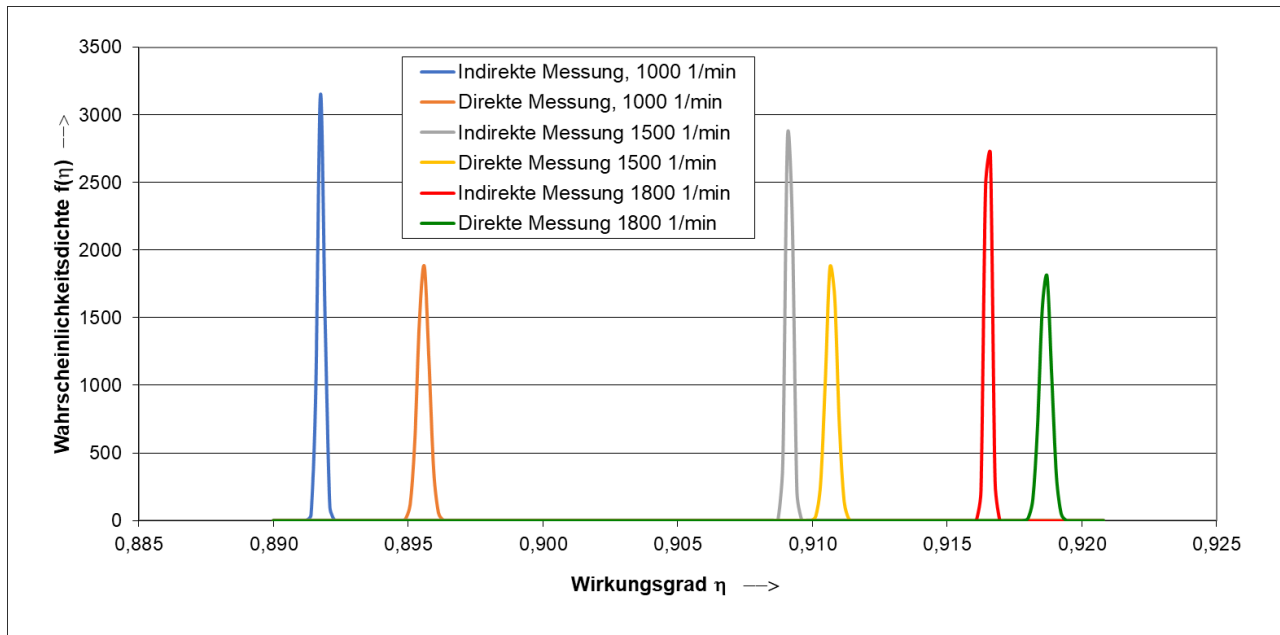


Bild 9: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Messgröße „Wirkungsgrad“ im Vergleich der direkten und der indirekten Messmethode für verschiedene Drehzahlen

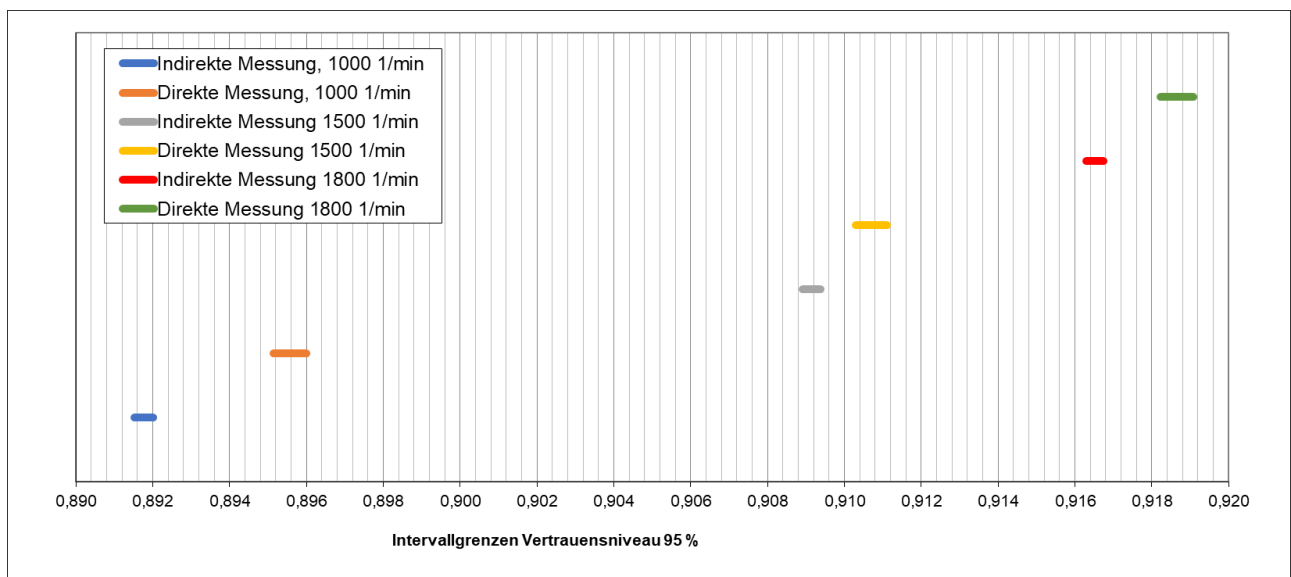


Bild 10: Darstellung der Intervallgrenzen des 95 % Vertrauensniveaus für die in Bild 9 dargestellten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen

Bei der Betrachtung der Ergebnisse des hier durchgeführten Vergleiches der direkten und indirekten Wirkungsgradbestimmung an einer permanentmagneterregten Synchronmaschine konnten gemäß der Tabelle 3 und den Abbildungen 8, 9 und 10 die folgenden Ergebnisse beobachtet werden:

Bei den hier untersuchten Drehzahlen von 1000 1/min, 1500 1/min und 1800 1/min zeigte sich bei der Anwendung der indirekten Methode zur Wirkungsgradbestimmung durchgehend eine geringere Messunsicherheit, was in Bild 9 an den Kurvenverläufen (kleineres Überdeckungsintervall) für die direkte und die indirekte Messung bei allen betrachteten Drehzahlen deutlich sichtbar ist. Dieses schlägt sich gleichermaßen auch in Bild 10 in den

kleineren Intervallgrenzen des 95% Vertrauensniveaus bei der indirekten Messung nieder. Die Intervallgrenzen sagen ja aus, dass sich 95 % der ermittelten Wirkungsgradwerte innerhalb dieser Grenzen befinden, wodurch ein breiteres Intervall somit für eine größere Messunsicherheit steht.

Zusammenfassung

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurde für das in der Literatur unter /3/ beschriebene indirekte Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung an permanentmagneterregten Synchronmaschinen eine detaillierte Messunsicherheitsbetrachtung mittels der Software GUM-Workbench durchgeführt.

Hierbei zeigten sich zum einen eine gute Übereinstimmung der über das indirekte und das direkte Verfahren ermittelten Wirkungsgrade sowie bei dem indirekten Verfahren insgesamt betrachtet eine geringere Messunsicherheit als bei der Anwendung der direkten Messmethode über die elektrische Leistungsaufnahme und die mechanische Leistungsabgabe der Maschine.

Diese Beobachtung entspricht dem in der Veröffentlichung /4/ dargestellten Vergleiches der direkten und der indirekten Messmethode für die Asynchronmaschine. Die Ursache ist bei der permanentmagneterregten Synchronmaschine ebenfalls die Tatsache, dass die im Vergleich zu den elektrischen Messgrößen mit einer größeren Messunsicherheit behaftete Größe „Drehmoment“ bei der indirekten Methode zu einem deutlich geringeren Anteil in die gesamte Messunsicherheit eingeht.

Dieser Gewinn bei der Messunsicherheit wird sich bei der permanentmagneterregten Synchronmaschine jedoch durch einen immens hohen Messaufwand erkauft (Wechsel des Maschinenrotors, Bereitstellung eines zusätzlichen, nicht magnetisierten Rotors), so dass diese Methode für die routinemäßigen Wirkungsgradmessungen im Prüffeld nicht attraktiv ist.

Im Unterschied zu /4/ zeigte sich bei den hier an einer permanentmagneterregten Synchronmaschine durchgeführten Untersuchungen, dass h direkt geringfügig größer als h indirekt ermittelt wurde. Dieses deutet auf einen Offsetfehler bei der Drehmomentmessung hin, der Gegenstand weitergehender Untersuchungen ist.

Zukünftig soll das indirekte Messverfahren auch an Synchronmaschinen anderer Bemessungsleistungen und Maschinen mit „vergrabenen“ Rotormagneten durchgeführt werden.

Literatur

- /1/ Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, First Edition, September 2008, Document produced by Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1)
- /2/ EN 60034-2-1:2015, Drehende elektrische Maschinen - Teil 2-1: Standardverfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades aus Prüfungen (ausgenommen Maschinen für Schienen- und Straßenfahrzeuge) (IEC 60034-2-1:2014); Deutsche Fassung
- /3/ Vortrag „Bestimmung des Wirkungsgrads von permanentmagneterregten Synchronmaschinen im Einzelverlustverfahren“, Björn Deusinger, Andreas Binder, 16. Technischer Tag der VEM-Gruppe, 10. Und 11. Oktober 2017, Wernigerode
- /4/ Efficiency determination on (explosion-protected) electric machines – a survey under measurement uncertainty aspects, C. Lehrmann, U. Dreger, F. Lienesch, ant Journal electric machines, Ausgabe 1 Mai 2015. Seiten 30 - 35

Dreiphasenmessungen nach verschiedenen Methoden im Vergleich

Matthias Schöberle, Yokogawa Deutschland GmbH, Herrsching

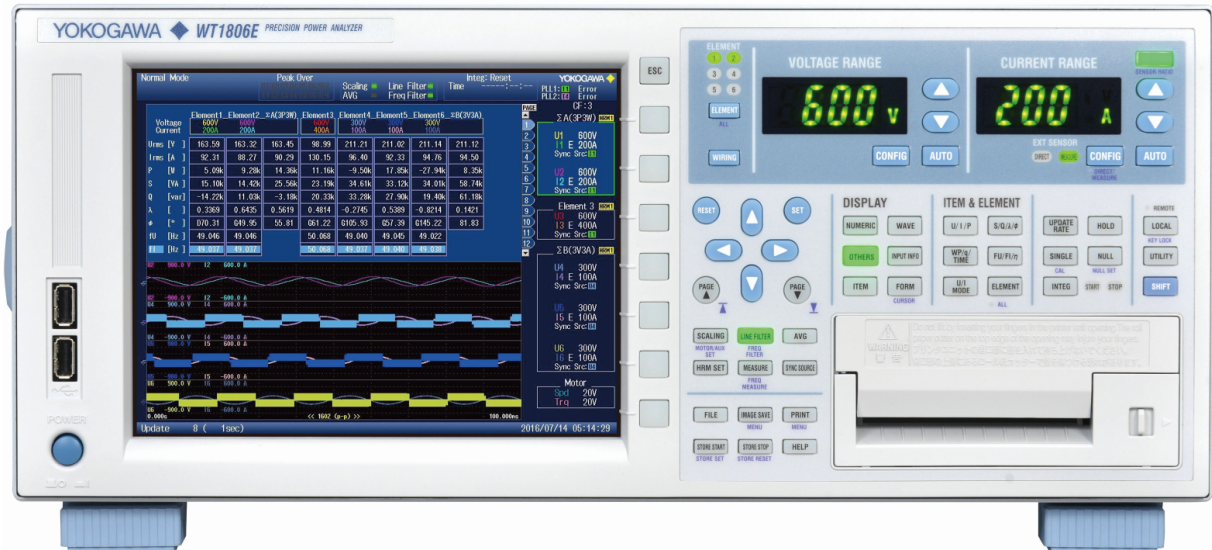


Bild 1: Präzisions Leistungsanalysator Yokogawa WT1800E

Kurzfassung

Der Beitrag zeigt auf, wie elektrische Leistungsmessungen funktionieren. Die verschiedenen Möglichkeiten die Summenleistungen P, S und Q mehrphasiger Systeme zu bestimmen werden verifiziert und diskutiert. Dabei wird insbesondere auf die Frage eingegangen, welchen Einfluss die verschiedenen Methoden auf die Genauigkeitsbetrachtung haben. Ein Genauigkeitsvergleich rundet das Thema ab.

1 Leistungsmessung, einphasiges System

Bei rein sinusförmigen Spannungs- und Stromverläufen ist es ausreichend, die Amplituden und den Phasenwinkel zu kennen. Die Wirkleistung ist dann $P = U_{rms} \times I_{rms} \times \cos\phi$. Doch Leistung ist Arbeit pro Zeit, also eine Zeitintervall bezogene Größe. Wo findet man in o.g. Formel die Zeitkomponente? Sie versteckt sich hinter den Anfügungen „rms“ für Root Mean Square, denn die korrekte Effektivwertbildung setzt die Betrachtung kompletter Perioden voraus. In diesem Sinne ist auch die Umrechnung „Effektivwert = $0,707 \times$ Spitzenwert“ nur für komplette Sinusschwingungen korrekt.

Wie messen Leistungsanalysatoren die Wirkleistung beliebiger Kurvenformen? Allgemein lässt sich eine elektrische Leistungsmessung auf die Integration der Leistungskurve zurückführen. Dies ist in Bild 2 dargestellt.

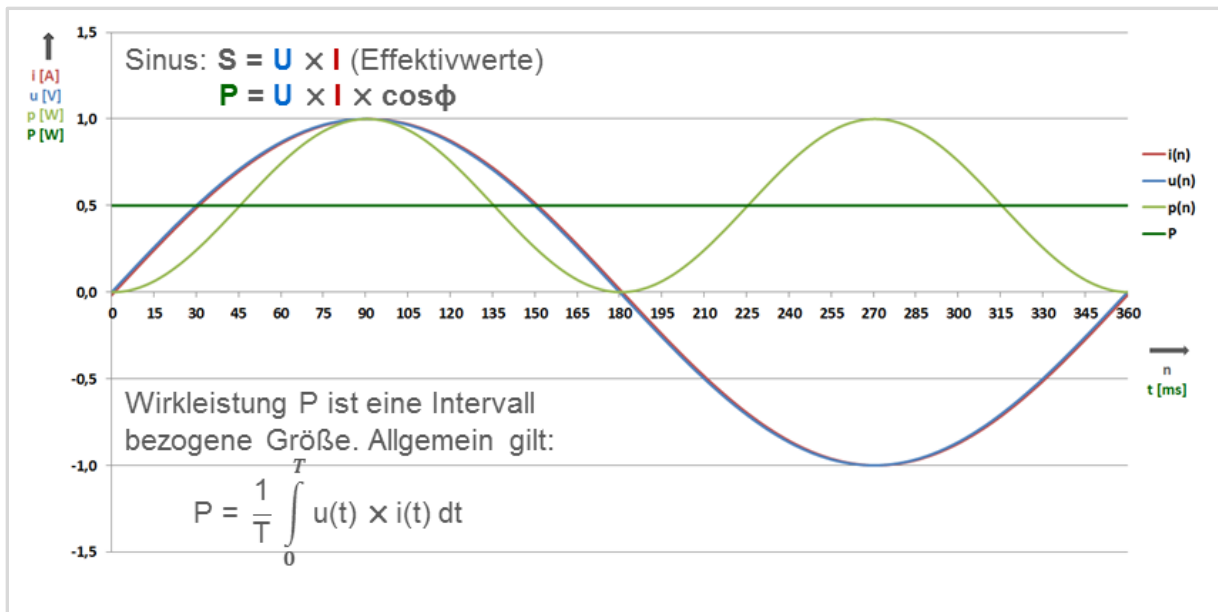


Bild 2: Prinzip der breitbandigen Leistungsmessung, Leistungsfaktor 1

Der zeitliche Verlauf der Leistungskurve resultiert aus der Multiplikation von Spannungs- und Stromverlauf. Das Integral der Leistungskurve ist die breitbandige Wirkleistung. Frequenzanteile und Phasenlagen werden bei der Integration nicht differenziert. Allerdings ist klar: Bei sinusförmigen Verläufen wird das Ergebnis der Integration nur dann dem erwarteten Wert (entsprechend $U \times I \times \cos\phi$) entsprechen, wenn auch hier komplette Perioden erfasst werden. Deshalb werden Leistungsmessungen meist auf die Grundschwingungsfrequenz synchronisiert.

In der praktischen Umsetzung wird aus der Integration eine Mittelwertbildung, siehe Bild 3.

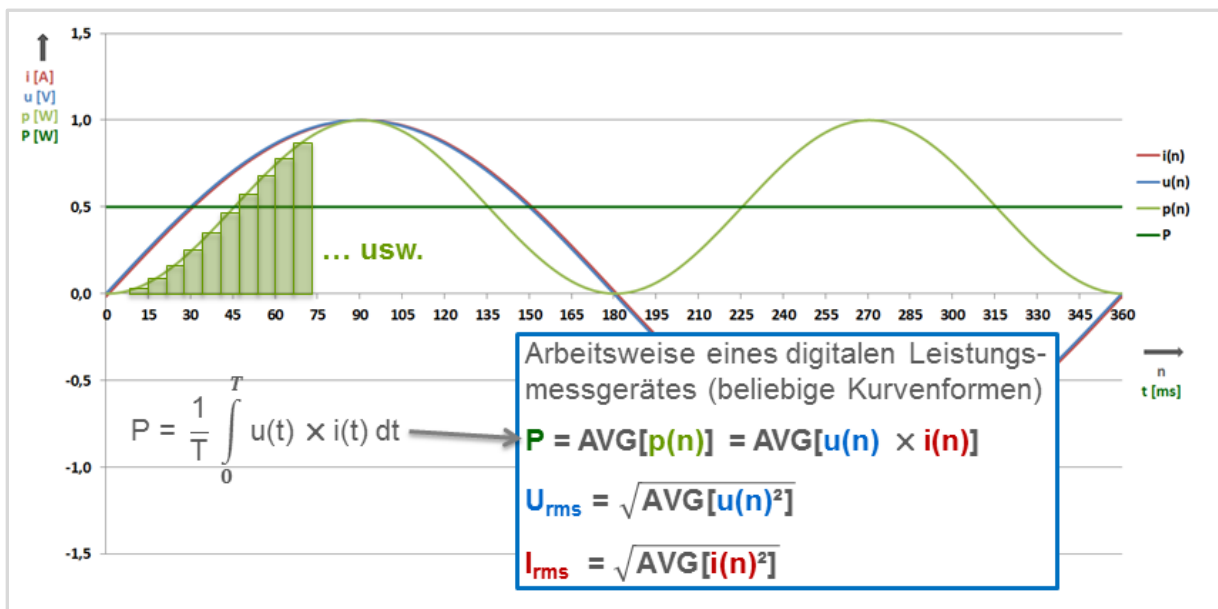


Bild 3: Wirkleistungsmessung durch Mittelwertbildung

Bei ausreichend großer Anzahl von Abtastwerten entspricht der Mittelwert dem Integral und somit der Wirkleistung. Dies gilt auch für Leistungsfaktoren kleiner 1, siehe Bild 4.

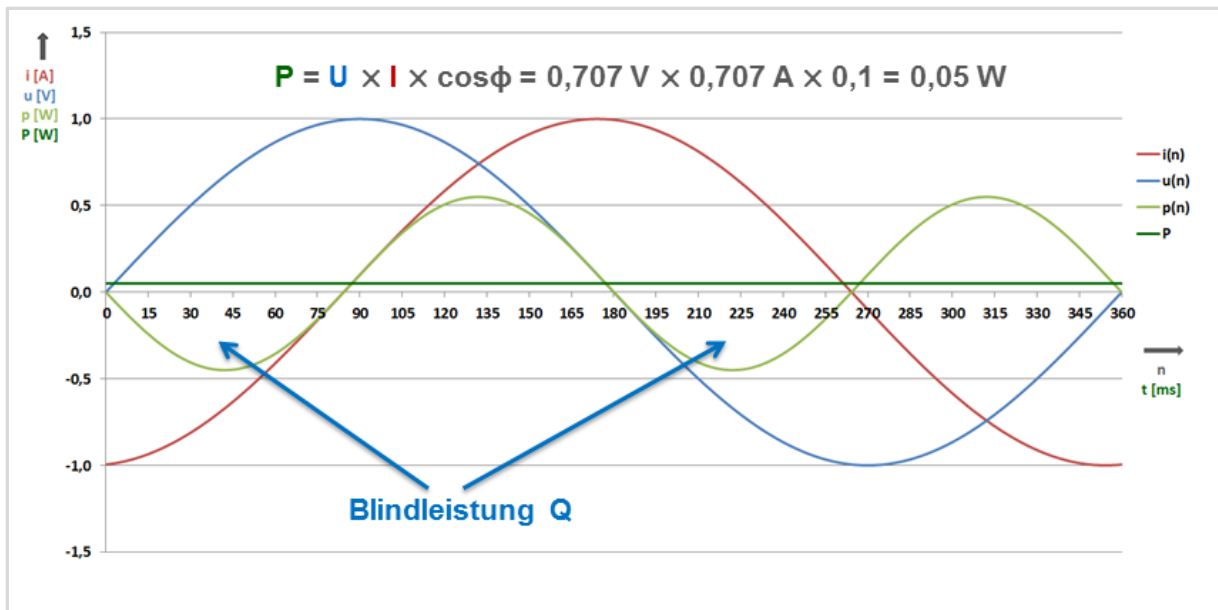


Bild 4: Leistungskurve mit hohem Blindleistungsanteil

Durch die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom ist der Mittelwert nach unten verschoben.

Neben der einfachen Mittelwertbildung über komplette Grundschwingungsperioden gibt es auch exponentiell mittelnde Verfahren, die ohne Synchronisation funktionieren. Dies erfordert aufwendige Rechenoperationen (Yokogawa WT3000E).

Wie werden Schein- und Blindleistung bei einphasiger Leistungsmessung bestimmt?

Bild 5 zeigt die geometrische Darstellung der Schein-, Wirk- und Blindleistungskomponenten im Leistungsdreieck.

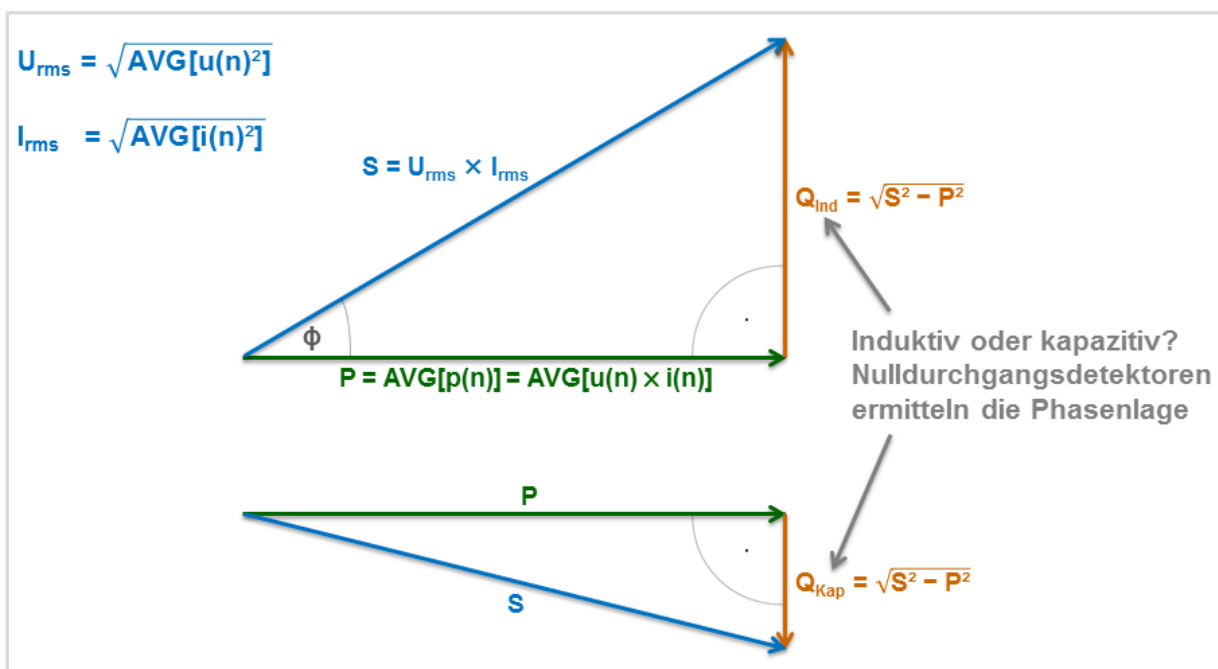


Bild 5: Geometrische Darstellung der Leistungskomponenten S, P, Q

Die Scheinleistung kann einfach durch Multiplikation der Effektivwerte von Spannung und Strom berechnet werden. Die Blindleistungskomponente steht senkrecht zur Wirkleistungskomponente und lässt sich mit Hilfe des Satzes des Pythagoras einfach ermitteln.

Nulldurchgangsdetektoren in den Spannungs- und Strompfaden ermitteln die Phasenlage. Daraus lässt sich ableiten, ob es sich um kapazitive oder induktive Blindleistung handelt.

Meist werden die Effektivwerte durch echte Effektivwertmessung (True rms) bestimmt. Es bestehen aber auch andere Konfigurationsmöglichkeiten. Mit einem Formfaktor von 1,11 multiplizierte Gleichrichtwerte (U_{mn}, I_{mn}) ergeben bei sinusförmigen Kurvenverläufen ebenfalls exakt die gewünschten Effektivwerte (U_{mn}, I_{mn}).

Bild 6 zeigt die verschiedenen Konfigurationsmöglichkeiten der einphasigen Leistungsmessung von Yokogawa Leistungsanalytoren.

Measurement Function	Methods of Computation and Determination For information about the symbols in the equations, see the notes at the end of page App-3.				
	Urms	Umn	Udc	Urmn	Uac
Voltage U [V] True rms value: Urms Rectified mean value calibrated to the rms value: Umn Simple average: Udc Rectified mean value: Urmn AC component: Uac	$\sqrt{\text{AVG}[u(n)^2]}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \text{AVG}[u(n)]$	AVG[u(n)]	AVG[u(n)]	$\sqrt{\text{RMS}^2 - \text{DC}^2}$
Current I [A] True rms value: Irms Rectified mean value calibrated to the rms value: Imn Simple average: Idc Rectified mean value: Irmn AC component: Iac	$\sqrt{\text{AVG}[i(n)^2]}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \text{AVG}[i(n)]$	AVG[i(n)]	AVG[i(n)]	$\sqrt{\text{RMS}^2 - \text{DC}^2}$
Active power P [W]	AVG[u(n) · i(n)]				
Apparent power S [VA] TYPE1, TYPE2 1), TYPE3	Select from Urms · Irms, Umn · Imn, Udc · Idc, Umn · Irms, and Urmn · Irmn.				
Reactive power Q [var] TYPE1, TYPE2 1), TYPE3	$\sqrt{P^2 + Q^2}$ $s \cdot \sqrt{S^2 - P^2}$ s is -1 for a lead phase and 1 for lag phase Q kommt aus HRM! 2)				
Power factor λ	$\frac{P}{S}$				
Phase difference Φ [°]	$\cos^{-1}\left(\frac{P}{S}\right)$ The phase angle can be switched between lead (D)/lag (G) display and 360° display.				

1) Unterschiede bei Verdrahtungssystemen

„rms“ ist default
„mn“ passt nur bei Sinus!

2) Nur Verschiebeblindleistung, keine Verzerrungsblindleistung

Bild 6: Konfigurationsmöglichkeiten der einphasigen Leistungsmessung

Besonders hervorzuheben ist die Formeleinstellung Typ 3. Hier wird die Blindleistung Q über die Harmonischen Analyse ermittelt und anschließend mit der Wirkleistung P zur Scheinleistung S verrechnet. Durch diese Vorgehensweise wird nur die Verschiebeblindleistung berücksichtigt, eventuell vorhandene Verzerrungsblindleistung wird ignoriert.

Selbstverständlich können Verschiebe-, Verzerrungs- und Gesamtblindleistung auch gleichzeitig berechnet werden. Dies ist in Bild 7 dargestellt.

Q „Gesamt“ erhalten wir mit S, Q - Formeln Typ 1 und 2

Q_P Verschiebblindleistung kommt aus der Harmonischen Analyse

Q_D Verzerrungsblindleistung lässt sich einfach rechnen ($Q_D = \sqrt{Q^2 - Q_P^2}$)



Bild 7: Berechnung von Verzerrungsblindleistung

Benutzerdefinierte Funktionseinstellungen lassen sich flexibel einsetzen, um die gewünschten Größen zu ermitteln. In diesem Beispiel berechnen die Funktionen 1 bis 3 die Verzerrungsblindleistungen der drei Phasen. Funktion 4 berechnet die Verzerrungsblindleistung des kompletten Verdrahtungssystems.

2 Von der einphasigen zur dreiphasigen Leistungsmessung

Leistungsmessungen im dreiphasigen System basieren auf zwei oder drei einphasigen Leistungsmessungen. Steht ein Neutraleiter zur Verfügung, so werden die drei Phasen am besten separat gemessen. Dies zeigt Bild 8.

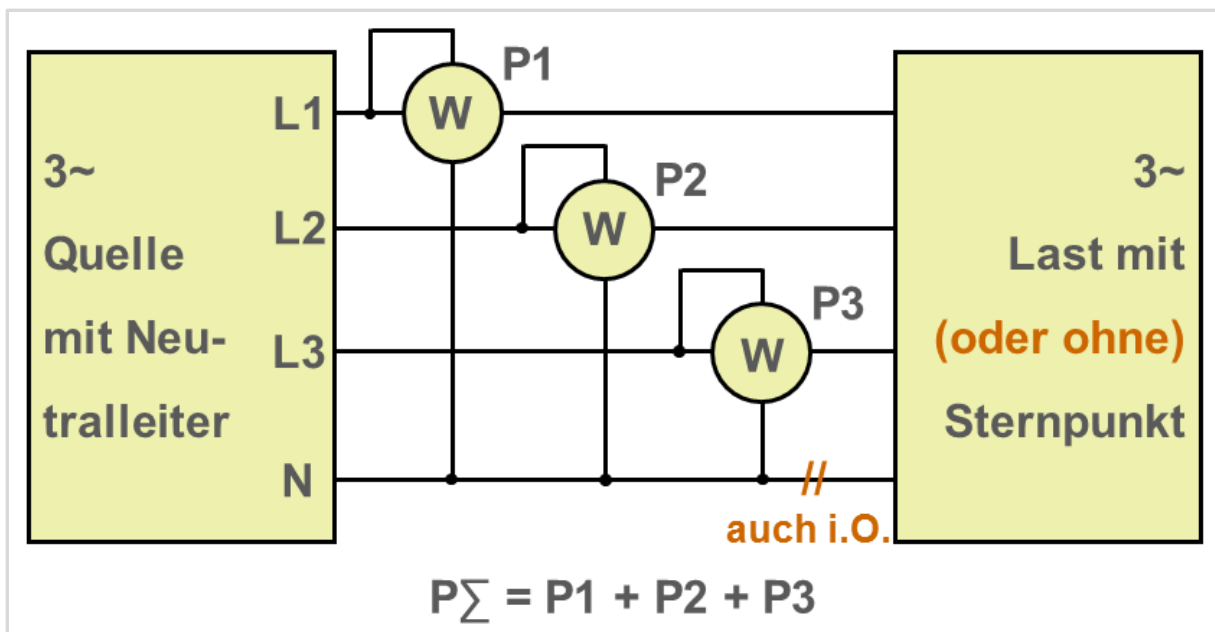


Bild 8: Verdrahtungssystem 3P4W

3P4W steht für „Three Phase Four Wire“. Jede Phase kann, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, konfiguriert werden. Die Ergebnisse der drei Einphasenmessungen werden anschließend zu den Gesamtergebnissen des Verdrahtungssystems kombiniert. Für die Summenwirkleistung ist nur eine Möglichkeit sinnvoll: $P_{\Sigma} = P_1 + P_2 + P_3$.

Zur Berechnung von Schein- und Blindleistung bestehen drei Möglichkeiten:

- (1) Die Leistungswerte der drei einzelnen Phasen werden zu den Summenwerten S_{Σ} und Q_{Σ} addiert.
- (2) Die Scheinleistungen der drei einzelnen Phasen werden zu dem Summenwert S_{Σ} addiert. Anschließend wird Q_{Σ} via Pythagoras aus P_{Σ} und S_{Σ} ermittelt.
- (3) Die Blindleistungen der drei einzelnen Phasen werden zum Summenwert Q_{Σ} addiert. Anschließend wird S_{Σ} via Pythagoras aus P_{Σ} und Q_{Σ} ermittelt.

Bild 9 beschreibt die Möglichkeiten. Im symmetrischen System spielt es natürlich keine Rolle, ob nach (1), (2) oder (3) vorgegangen wird. Die Ergebnisse sind immer gleich.

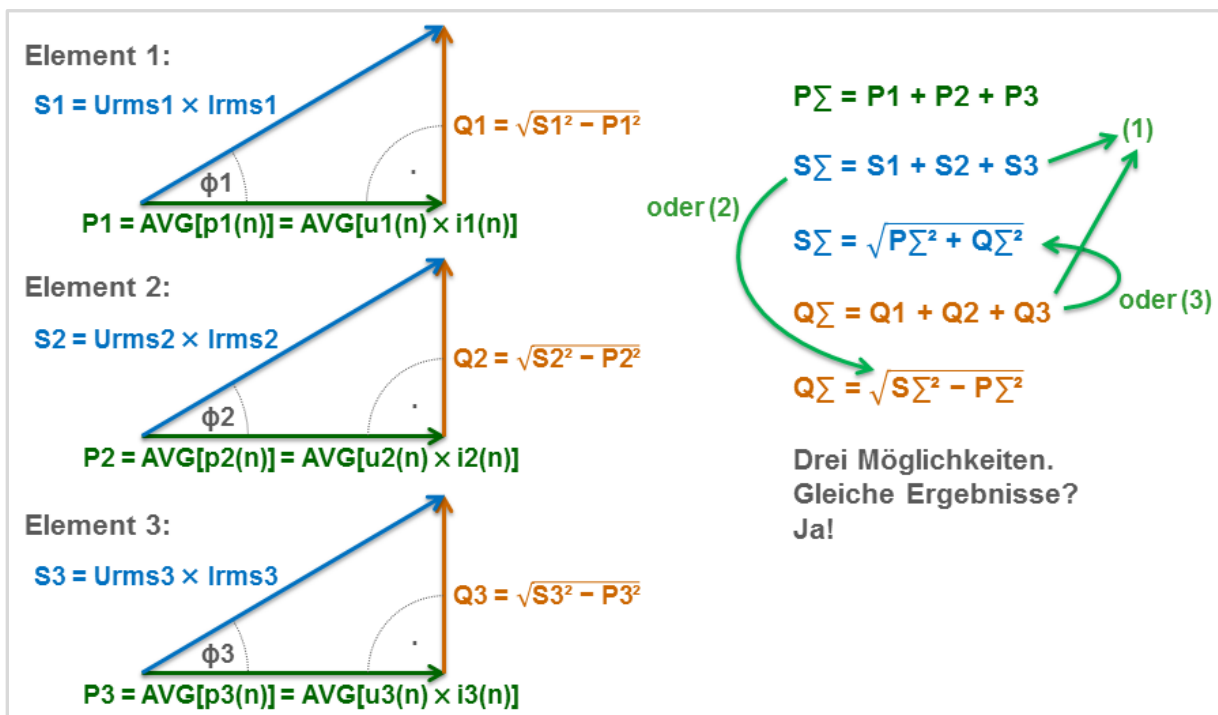


Bild 9: Scheinleistung, Wirkleistung, Blindleistung im symmetrischen System

Doch wie sieht es bei unsymmetrischen Systemen aus, bei denen z. B. die Blindleistungsanteile unterschiedlich groß sind? Dies ist in Bild 10 dargestellt.

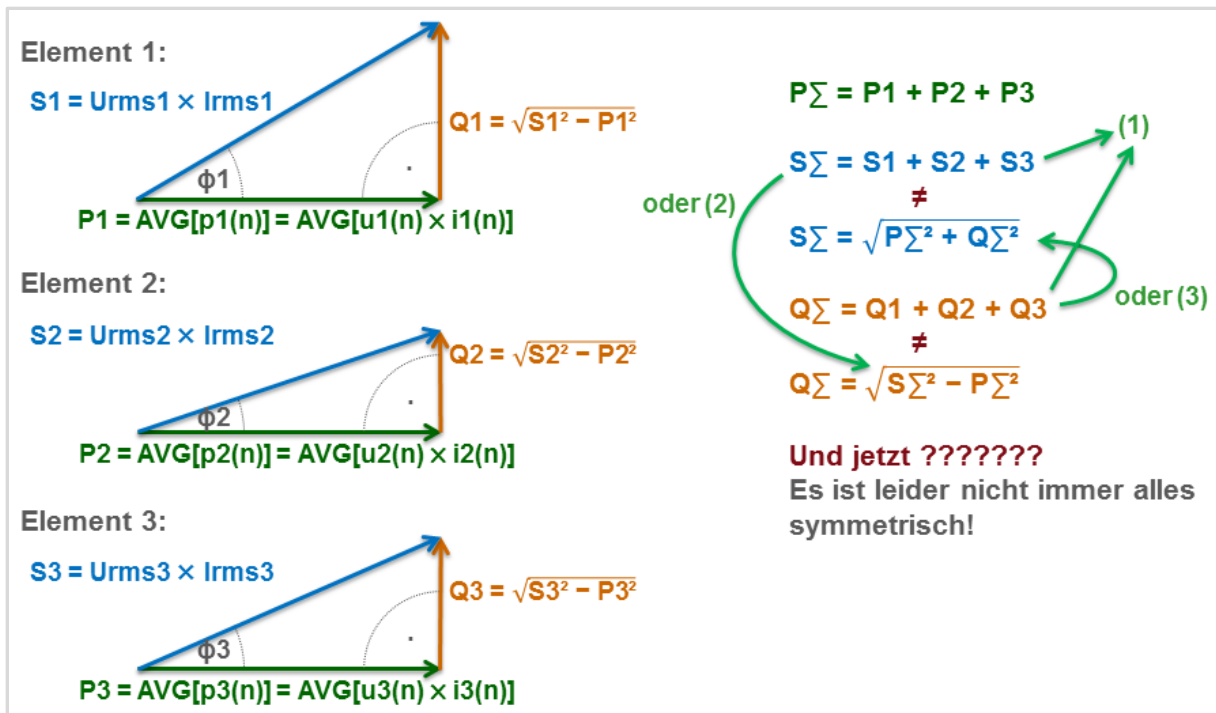


Bild 10: Scheinleistung, Wirkleistung, Blindleistung bei Unsymmetrie

Im unsymmetrischen System werden die drei Berechnungsmöglichkeiten prinzipbedingt zu etwas unterschiedlichen Ergebnissen für die Scheinleistung sowie breitbandig ermittelte Blindleistungswerte führen.

Die kombinierten Wirkleistungswerte P_{Σ} sowie die kombinierten Blindleistungswerte Q_{Σ} (Total) aus der Harmonischen Analyse (wie bereits erwähnt, reine Verschiebblindleistung) werden jedoch auch im unsymmetrischen System eindeutig bestimmt.

Bild 11 zeigt die Konfigurationsmöglichkeiten für das Verdrahtungssystem 3P4W.

Wiring system		Single-phase, three-wire 1P3W	Three-phase, three-wire 3P3W	Three-phase, three-wire with three-voltage, three-current method. 3P3W(3V3A)	Three-phase, four-wire 3P4W	
Σ functions	UΣ [V]	(U1 + U2) / 2		(U1 + U2 + U3) / 3		
	IΣ [A]	(I1 + I2) / 2		(I1 + I2 + I3) / 3		
	PΣ [W]	P1 + P2			P1 + P2 + P3	
	SΣ [VA]	TYPE1, TYPE2	S1 + S2	$\frac{\sqrt{3}}{2} (S1 + S2)$	$\frac{\sqrt{3}}{3} (S1 + S2 + S3)$	S1 + S2 + S3
		TYPE3	$\sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}$		Q's kommen aus HRM 3)	
	QΣ [var]	TYPE1	Q1 + Q2			Q1 + Q2 + Q3
		TYPE2	$\sqrt{S_{\Sigma}^2 - P_{\Sigma}^2}$			
	TYPE3	Q1 + Q2		Q's aus HRM 3)		Q1 + Q2 + Q3
PcΣ [W]	Pc1 + Pc2		Pc1 + Pc2 + Pc3			

3) Nur Verschiebblindleistung

Blindleistung aus der Harmonischen Analyse ist grundsätzlich Verschiebblindleistung.

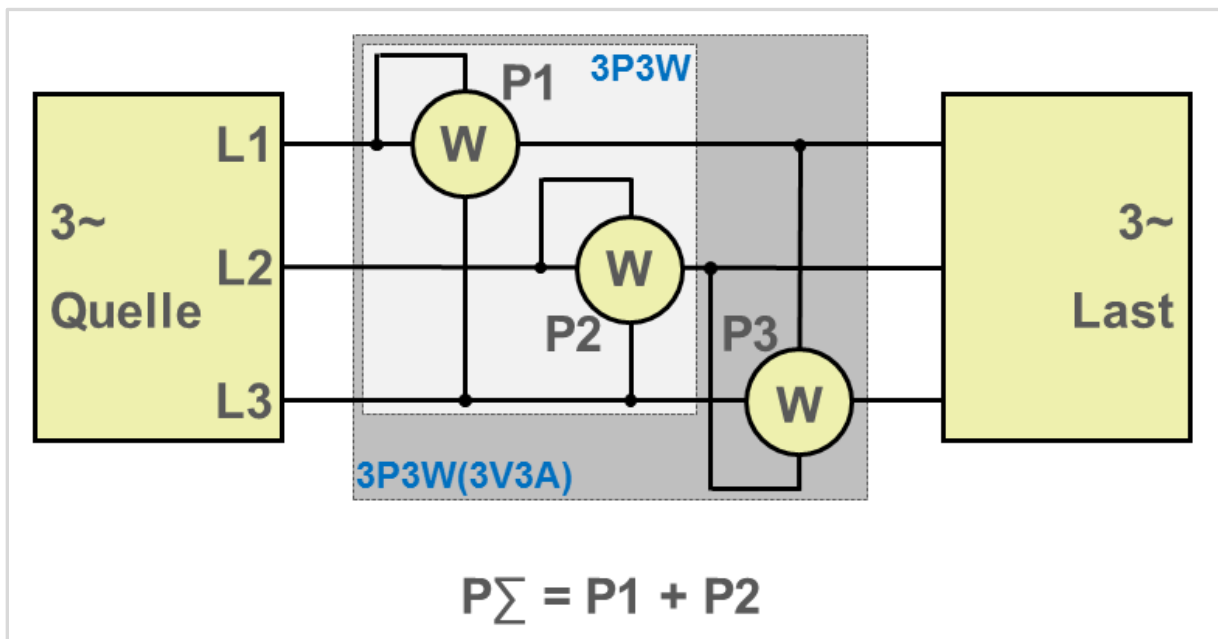
Blindleistung aus der breitbandigen Messung kann Verschiebblindleistung und Verzerrungsblindleistung enthalten ($S = U_{rms} \times I_{rms} \rightarrow Q = \sqrt{S^2 - P^2}$).

Bild 11: Konfigurationsmöglichkeiten bei 3P4W

Mit den im vorhergehenden Kapitel beschriebenen, benutzerdefinierten Funktionseinstellungen lässt sich das Verdrahtungssystem 3P4W leicht für fünf- oder sechshephasige Systeme erweitern. Für ein fünfphasiges System addiert man beispielsweise die Wirkleistungen P_4 und P_5 der Leistungselemente 4 und 5, um die Summenwirkleistung zu erhalten. Ein sechshephasiges System lässt sich messtechnisch einfach realisieren, indem zwei Dreiphasenmessungen durchgeführt und deren Ergebnisse durch benutzerdefinierte Funktionseinstellungen addiert werden. Ist kein Neutralleiter bzw. Sternpunkt vorhanden, bietet sich die Kombination von zwei dreiphasigen künstlichen Sternpunktadaptern an. Künstliche Sternpunktadapter werden im übernächsten Kapitel ausführlich beschrieben.

3 Zweiwattmetermethode (Aronschtaltung)

Im dreiphasigen System ohne Sternpunkt können die Summenleistungen prinzipiell auch durch Messung von zwei Außenleiterspannungen (Dreiecksspannungen, verkettete Spannungen) und zwei Strömen ermittelt werden. Somit sind zwei Leistungselemente zur Leistungsmessung ausreichend. Dies ist in Bild 12 dargestellt. Die Gesamtwirkleistung des Verdrahtungssystems 3P3W ist die Summe der Einzelleistungen der Leistungselemente 1 und 2.

**Bild 12: Zweiwattmetermethode mit zwei oder drei Leistungselementen**

Daran ändert sich auch nichts, wenn der Aufbau mit einem dritten Leistungselement zu dem Verdrahtungssystem 3P3W(3V3A) ergänzt wird. Auch hier ist die Wirkleistung des Gesamtsystems die Summe der zwei Einzelleistungen der Leistungselemente 1 und 2. Das dritte Leistungselement ist kaum von Nutzen und in beiden Fällen ist kein Rückschluss auf die Leistungen der drei Phasen möglich.

Ein ernstzunehmendes Problem ist die Tatsache, dass nur zwei Ströme in die Wirkleistungsmessung eingehen. Bei Herleitung der Aronschtaltung wird davon ausgegangen, dass es sich um ein Dreidrahtsystem handelt und die Summe der drei Ströme zu jedem Zeitpunkt null ist. Anders ausgedrückt: Der dritte Strom ergibt sich aus den beiden

gemessenen Strömen. Er lässt sich anhand nachfolgender Formel für jeden Zeitpunkt berechnen.

$$i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = 0 \rightarrow i_3(t) = -i_1(t) - i_2(t)$$

In der Praxis ist die Summe der drei Ströme jedoch meistens nicht null. So muss man bei Inverterbetrieb mit Ableitströmen (Leckströmen) rechnen, die das Messergebnis verfälschen.

Welche Vorteile hat 3P3W(3V3A) gegenüber 3P3W?

(1) Die Messung aller drei Phasenströme ermöglicht die Berechnung des Ableitstroms und weiterer nützlicher Größen (Delta-Berechnungen)

(2) Die Scheinleistung wird genauer berechnet

(3) Die Messung aller Außenleiterspannungen und der drei Ströme ermöglicht eine Beurteilung der Symmetrie

Leistungsfaktoren bei der Zweiwattmetermethode

Neben einem eventuellen Messfehler durch Ableitströme gibt es bei der Aronschaltung ein weiteres, etwas unangenehmes Thema zu berücksichtigen. Wie bereits erwähnt werden zur Leistungsmessung keine Phasenspannungen (Sternspannungen, Strangspannungen) sondern Außenleiterspannungen verwendet. Phasenspannungen und Außenleiterspannungen haben jedoch unterschiedliche Phasenlagen. Die Leistungsdreiecke in Bild 13 zeigen das Beispiel einer Wirkleistungsmessung bei einem Leistungsfaktor von 1 für das Gesamtsystem. Trotz Leistungsfaktor 1 müssen die beiden für die Wirkleistungsmessung relevanten Leistungselemente bei Phasenwinkeln von $\pm 30^\circ$ messen. Leistungsmessungen bei Phasenwinkeln ungleich 0 sind jedoch prinzipiell nicht so genau wie Leistungsmessungen bei Leistungsfaktor 1.

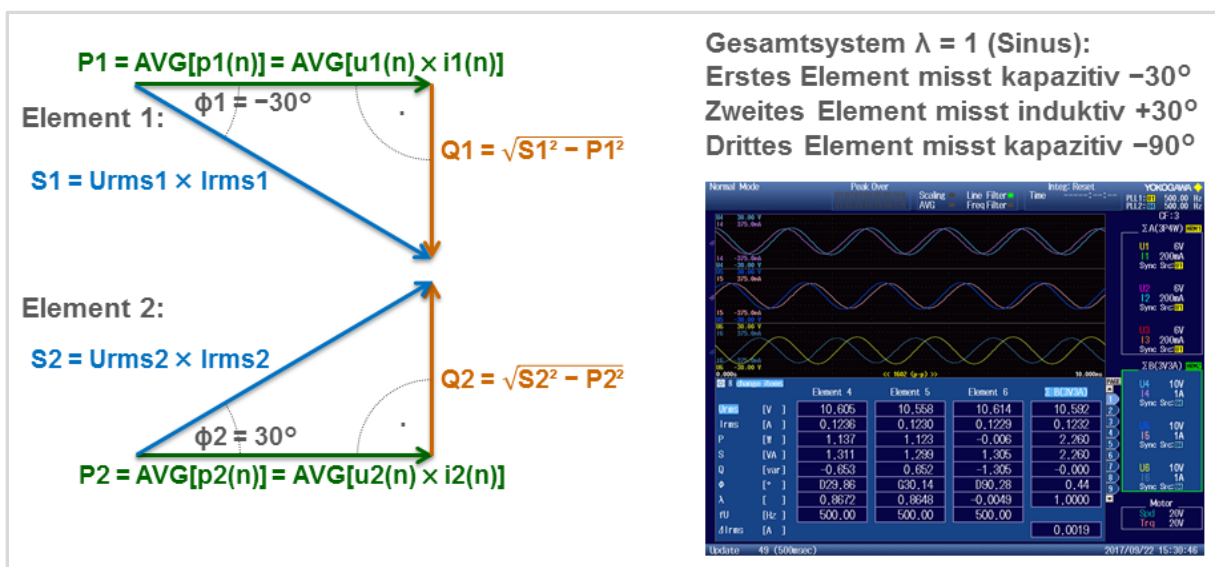


Bild 13: Links die geometrische Darstellung der Leistungskomponenten bei 3P3W

In Bild 13 kann man auch erkennen, dass die Blindleistungsanteile der Leistungselemente 1 und 2 unterschiedliche Richtungen aufweisen. Element 1 misst bei -30° kapazitiv, Element 2 jedoch bei $+30^\circ$ induktiv. Warum das so ist zeigt der zeitliche Verlauf der Spannungen und

Ströme in Bild 14. Z. B. Leistungselement 2 misst die Außenleiterspannung u_{23} sowie den Strom i_2 und bildet daraus die Leistungswerte.

Was passiert wenn das Gesamtsystem induktiv wird, z. B. um 10° ? In diesem Fall verschieben sich die Winkel beider Elemente 1 und 2 um 10° in induktive Richtung. Aus den -30° des Leistungselements 1 werden somit -20° , aus den $+30^\circ$ des Leistungselements 2 werden $+40^\circ$. Da der Phasenwinkel die Genauigkeit einer Wirkleistungsmessung beeinflusst, müssen die Ergebnisse der Leistungselemente 1 und 2 nun separat betrachtet werden. Aus diesem Grund ist die Genauigkeitsberechnung für das Gesamtsystem bei der Zweiwattmetermethode mit zusätzlichem Aufwand verbunden.

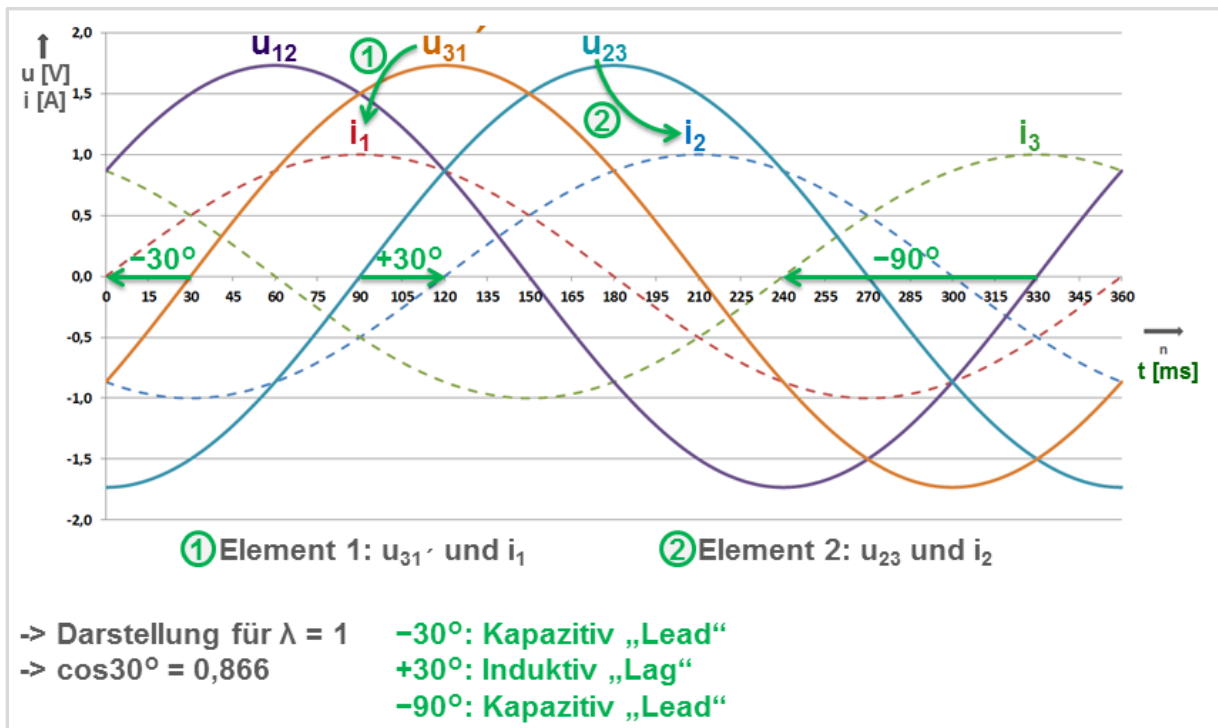


Bild 14: Phasenbeziehungen der Spannungen und Ströme bei 3P3W(3V3A)

Die Konfigurationsmöglichkeiten bei Verdrahtungssystemen 3P3W und 3P3W(3V3A) zeigt Bild 15. Wie bei Verdrahtungssystem 3P4W gibt es auch hier verschiedene Möglichkeiten, um die Summenwerte der Schein- und Blindleistungen für das Gesamtsystem zu bestimmen. Die einfache Addition der Blindleistungswerte von Element 1 und Element 2 kann nur bei sinusförmigen Verhältnissen und symmetrischem System empfohlen werden.

Wiring system		Single-phase, three-wire 1P3W	Three-phase, three-wire 3P3W	Three-phase, three-wire with three-voltage, three-current method. 3P3W(3V3A)	Three-phase, four-wire 3P4W	
Σ functions	UΣ [V]		(U1 + U2) / 2		(U1 + U2 + U3) / 3	
	IΣ [A]		(I1 + I2) / 2		(I1 + I2 + I3) / 3	
	PΣ [W]		P1 + P2		P1 + P2 + P3	
	SΣ [VA]	TYPE1, TYPE2	S1 + S2	$\frac{\sqrt{3}}{2} (S1 + S2)$ 1)	$\frac{\sqrt{3}}{3} (S1 + S2 + S3)$ 2)	S1 + S2 + S3
		TYPE3		$\sqrt{P\Sigma^2 + Q\Sigma^2}$	Q' s kommen aus HRM 3)	
	QΣ [var]	TYPE1	nur bei Sinus Q1 + Q2 und Symmetrie			Q1 + Q2 + Q3
		TYPE2		$\sqrt{S\Sigma^2 - P\Sigma^2}$		
		TYPE3		Q1 + Q2	Q' s aus HRM 3)	Q1 + Q2 + Q3
PcΣ [W]			Pc1 + Pc2		Pc1 + Pc2 + Pc3	

3) Nur Verschiebeblindleistung

Std.-Formel (Tabellenbücher): $S_{3\sim} = \sqrt{3} \times U_{AL} \times I$ (eine Spannung, ein Strom)

1) Mit zwei Elementen gemessen: $S\Sigma = \frac{\sqrt{3}}{2} (S1 + S2)$

2) Mit drei Elementen gemessen: $S\Sigma = \frac{\sqrt{3}}{3} (S1 + S2 + S3)$

} bei Symmetrie

Bild 15: Konfigurationsmöglichkeiten bei 3P3W und 3P3W(3V3A)

4 Künstlicher Sternpunkt

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen, dass eine Messung mit Verdrahtungssystem 3P4W einige Vorteile gegenüber der Zweiwattmetermethode bietet. Doch was tun, wenn es keinen Sternpunkt gibt? Dies ist z. B. am Ausgang eines Inverters der Fall. Hier wird gerne ein künstlicher Sternpunkt eingesetzt. Er lässt sich sehr einfach bilden, indem die Low-Buchsen der drei Spannungseingänge des Leistungsanalysators miteinander verbunden werden, siehe Bild 16.

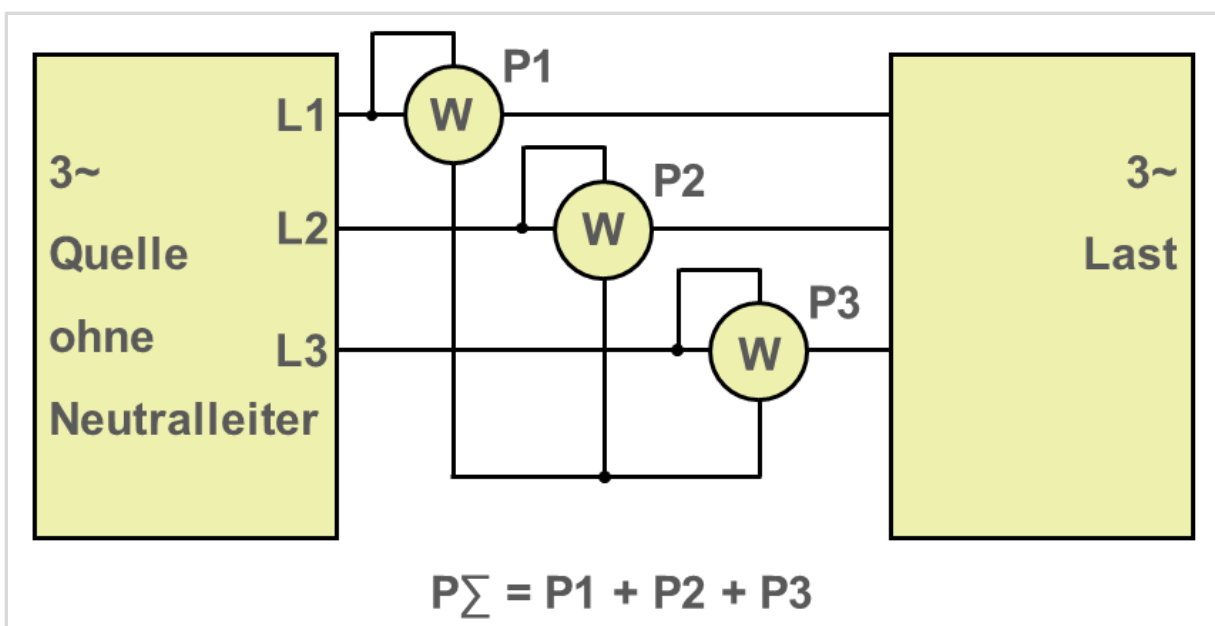


Bild 16: Künstliche Sternpunktbildung über die Low-Buchsen des Leistungsanalysators

Man sollte sich allerdings im Klaren darüber sein, dass ein solcher Sternpunkt ein sehr hochohmiges Gebilde ist, da die Eingangsimpedanzen der Spannungseingänge eines Yokogawa Leistungsanalysators $2\text{ M}\Omega$ (z. B. WT1800E, WT500) oder sogar mehr betragen (WT3000E). Selbst kurze Verbindungskabel zwischen den Low-Buchsen können in EMV-gestörter Umgebung Probleme bereiten. Deshalb ist ein künstlicher Sternpunktadapter entsprechend Bild 17 zu bevorzugen.

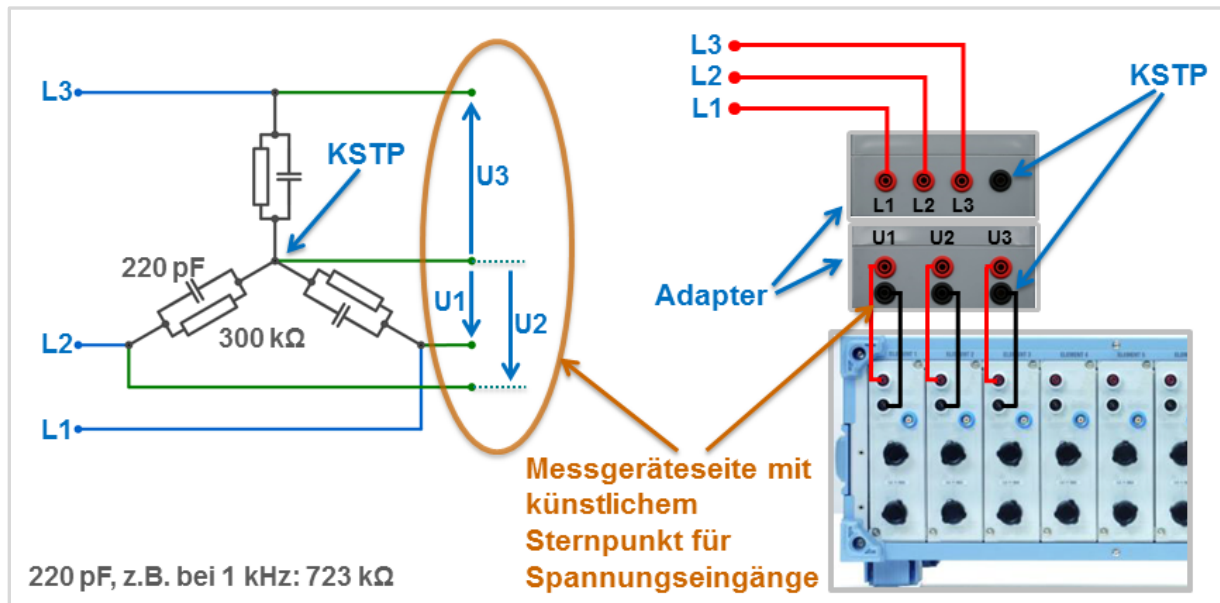


Bild 17: Künstlicher Sternpunkt mit Sternpunktadapter

Die im Vergleich zu den Spannungseingängen deutlich niedrigeren Impedanzen des künstlichen Sternpunktadapters sorgen für stabile Verhältnisse.

Welchen Einfluss hat ein künstlicher Sternpunktadapter auf die Messung? Kann man dem Messergebnis vertrauen?

Der künstliche Sternpunkt bildet das Bezugspotential für die drei Spannungsmessungen. Es wird durch die drei Außenleiterspannungen und die Symmetrie des Sternpunktadapters bestimmt. Der künstliche Sternpunktadapter (zusammen mit den parallelen Eingangsimpedanzen der Spannungseingänge) wirkt wie ein Spannungsteiler, der durch drei Eingangsgrößen gespeist wird. Wo genau sich dieses Sternpunktpotential befindet ist für die Messung der Gesamtleistung des Dreiphasensystems allerdings nicht relevant. Und auch wenn die Last über einen eigenen, nicht zugänglichen Sternpunkt verfügt, werden die Leistungswerte des Gesamtsystems mit einem künstlichen Sternpunktadapter korrekt gemessen.

Was bewirkt die Belastung des Messaufbaus durch den Sternpunktadapter?

Hohe Motorleistungen erfordern sowohl hohe Spannungen als auch hohe Ströme. Die pulswertenmodulierten Spannungen des Inverters weisen hohe Flankensteilheiten auf. Demzufolge sind auch hohe Frequenzanteile an der Pulsweitenmodulation beteiligt. In Bild 18 sind die Impedanzen, Ströme und Leistungswerte für einen einzelnen Strang des Sternpunktadapters nach Bild 17 für verschiedene Frequenzen dargestellt.

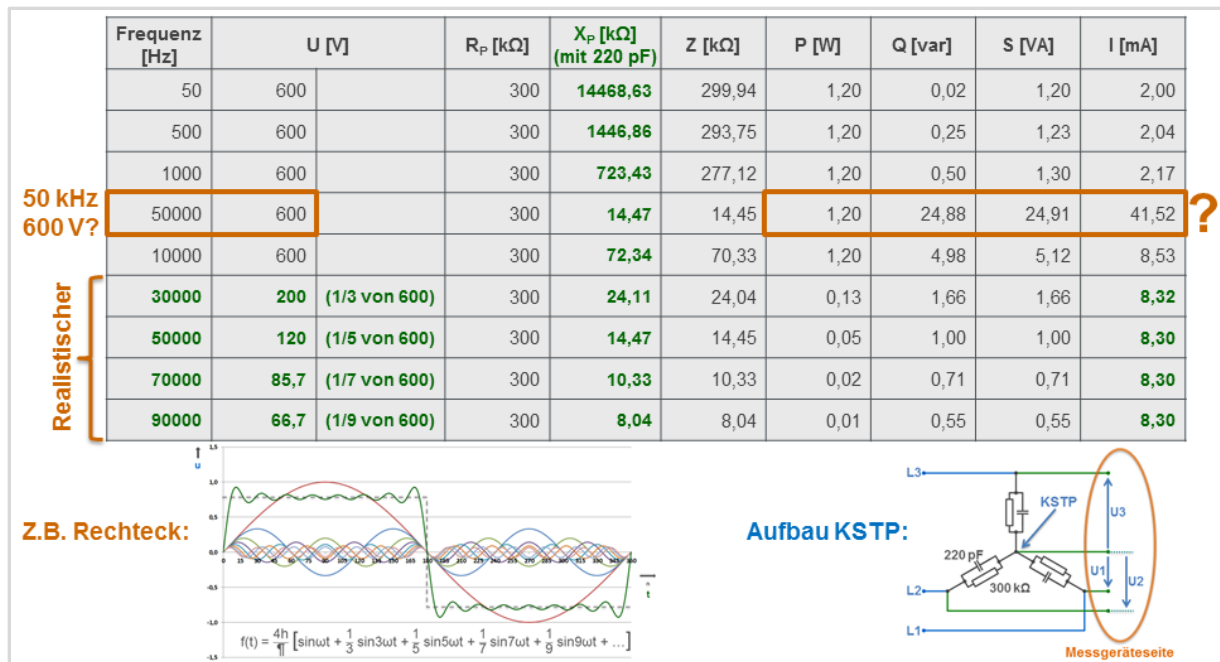


Bild 18: Belastung durch einen KSTP (z. B. Rechteck)

Aufgrund der parallelen Kapazität von 220 pF würde der Strom im Frequenzbereich von 50 Hz bis 50 kHz bei 600 V auf 41,5 mA ansteigen. Doch ist das realistisch? Nein. Denn die Amplituden nehmen zu höheren Frequenzanteilen hin ab. Wenn wir beispielhaft ein rechteckförmiges Signal mit einer Grundschwingung von 600 V bei 10 kHz betrachten, so findet man nach Fourier z. B. bei 9-facher Frequenz eine Oberschwingung mit 1/9 der Grundschwingungsamplitude.

Hier wirken also zwei Effekte gegenläufig: Mit höher werdender Frequenz nehmen die Impedanzen der Kapazitäten des künstlichen Sternpunktadapters ab. In gleichem Maße reduzieren sich jedoch auch die Amplituden der Oberschwingungen, sodass die Ströme nicht ansteigen. Die Tabelle zeigt die Berechnungen für einzelne Frequenzen. In der Praxis handelt es sich um ein Frequenzgemisch, der Gesamteffektivwert des Stroms ergibt sich durch die geometrische Addition der Harmonischen. Auf die Wirkleistungsmessung selbst haben diese Ströme praktisch keinen Einfluss, weil sie vorwiegend kapazitiven Ursprungs sind. Im Vergleich zu den meist hohen Ausgangsströmen des Inverters sind sie ohnehin vernachlässigbar.

Die Vorteile einer Messung mit künstlichem Sternpunktadapter gegenüber der Zweiwattmetermethode:

- (1) Es wird mit Verdrahtungssystem 3P4W gemessen
- (2) Alle drei Ströme gehen in die Wirkleistungsberechnung ein, es gibt kein Problem mit Ableitstrom
- (3) Es werden drei Strangleistungen ermittelt, dies hat mehr Aussagekraft
- (4) Genauigkeitsberechnungen sind einfacher

Die Verwendung eines künstlichen Sternpunktadapters am Ausgang eines Inverters ist sehr weit verbreitet und führt i.d.R. zu genaueren Ergebnissen als die Zweiwattmetermethode.

5 Delta-Berechnungen, Umrechnung Dreieck -> Stern

Delta-Berechnungen haben, je nach eingestelltem Verdrahtungssystem, etwas unterschiedliche Funktionen. Bei 3P3W(3V3A) können aus den drei gemessenen Dreiecksspannungen drei Sternspannungen gegen einen virtuellen Sternpunkt berechnet werden, siehe Bild 19.

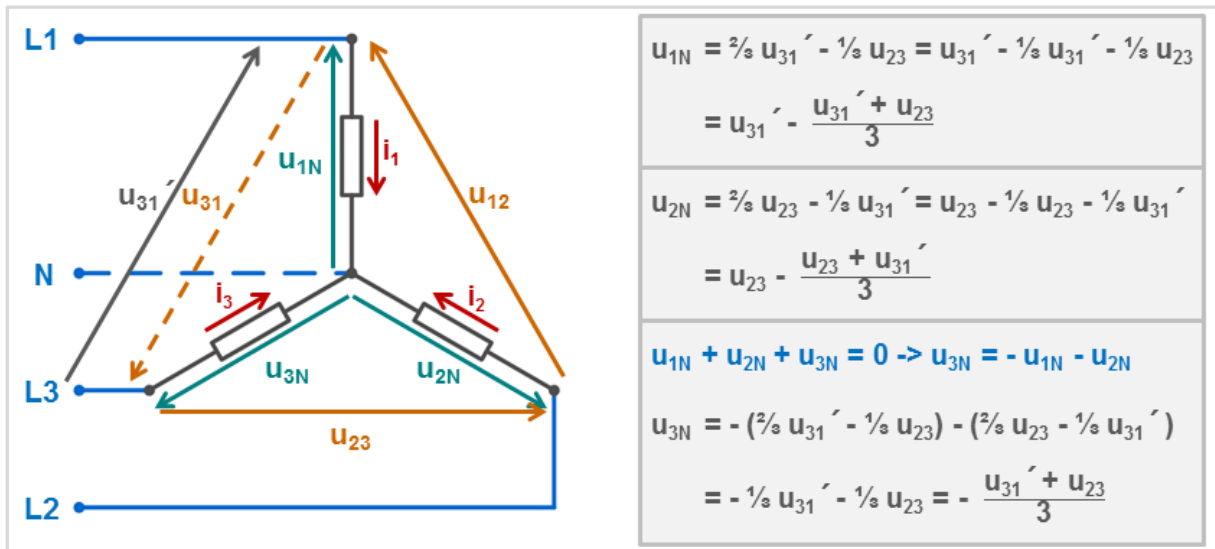


Bild 19: Berechnung der Sternspannungen aus den Dreiecksspannungen

Die Delta-Berechnungen basieren auf Augenblickswerten (Abtastwerten). Zeitgleich und kontinuierlich werden alle Augenblickswerte der Dreiecksspannungen zu Sternspannungen umgerechnet. Als Ergebnis erhält man die Spannungsverläufe u_{1N} , u_{2N} und u_{3N} in Bild 20. Sie entsprechen den Spannungsverläufen an einem idealen Sternpunktadapter. Durch die Multiplikation dieser Spannungen mit den Strömen und der anschließenden Mittelwertbildung wird die Wirkleistung des Dreiphasensystems in bereits beschriebener Art und Weise ermittelt.

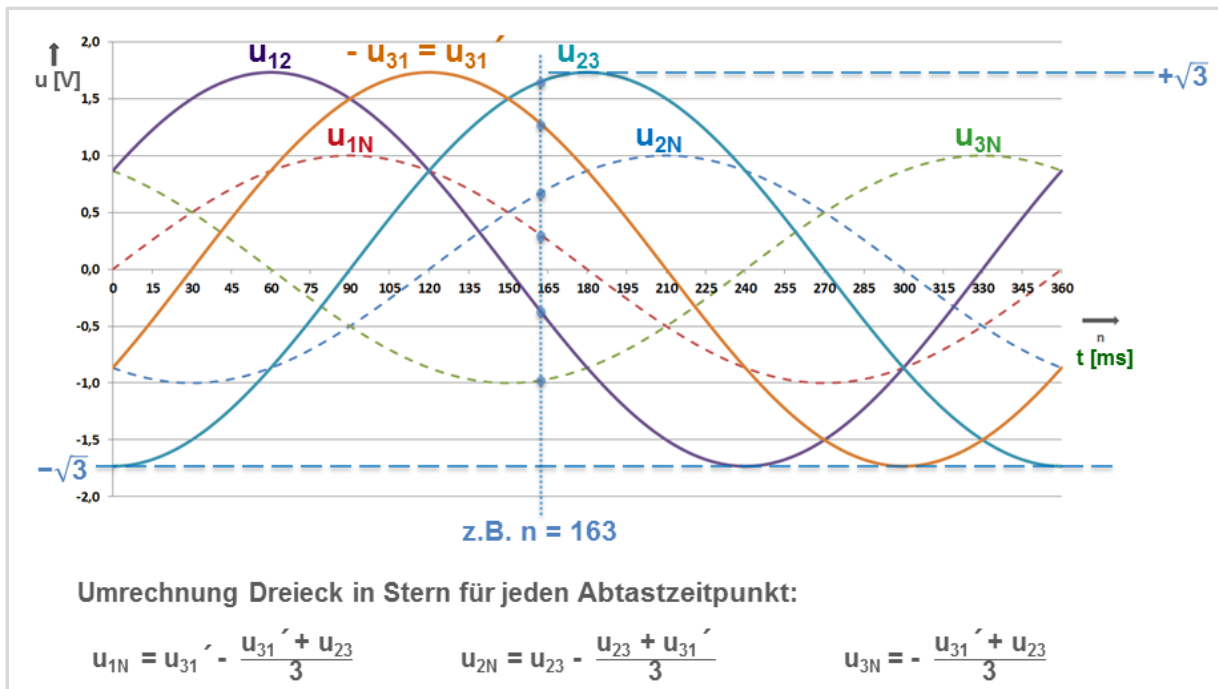


Bild 20: Spannungsverläufe für Dreieck und Stern (Sinus)

Obwohl die Sternspannungen aus den Außenleiterspannungen berechnet werden ist die Wirkleistungsbestimmung so genau wie bei direkter Messung der Sternspannungen. Die von der Zweiwattmetermethode bekannte Fehlerquelle durch Ableitströme gibt es hier nicht.

Apropos Ableitstrom: Die Berechnung des Ableitstroms ist eine weitere wichtige Funktion der Delta-Berechnungen. Hierbei wird die Summe aus den drei in 3P4W- oder (3P3W)3V3A-Verdrahtung gemessenen Strömen aus den Augenblickswerten (Abtastwerten) gebildet. Im Idealfall wäre die Summe null.

6 Die Messmethoden im praktischen Vergleich

Verdrahtung der Leistungselemente

Für den Vergleich werden je drei Leistungselemente des Leistungsanalysators WT1800E für Verdrahtungssystem 3P4W und 3P3W(3V3A) konfiguriert. Alle Spannungseingänge sind auf der Lastseite verdrahtet, um eventuelle Einflüsse der Shuntwiderstände auf den Vergleich auszuschließen, siehe Bild 21.

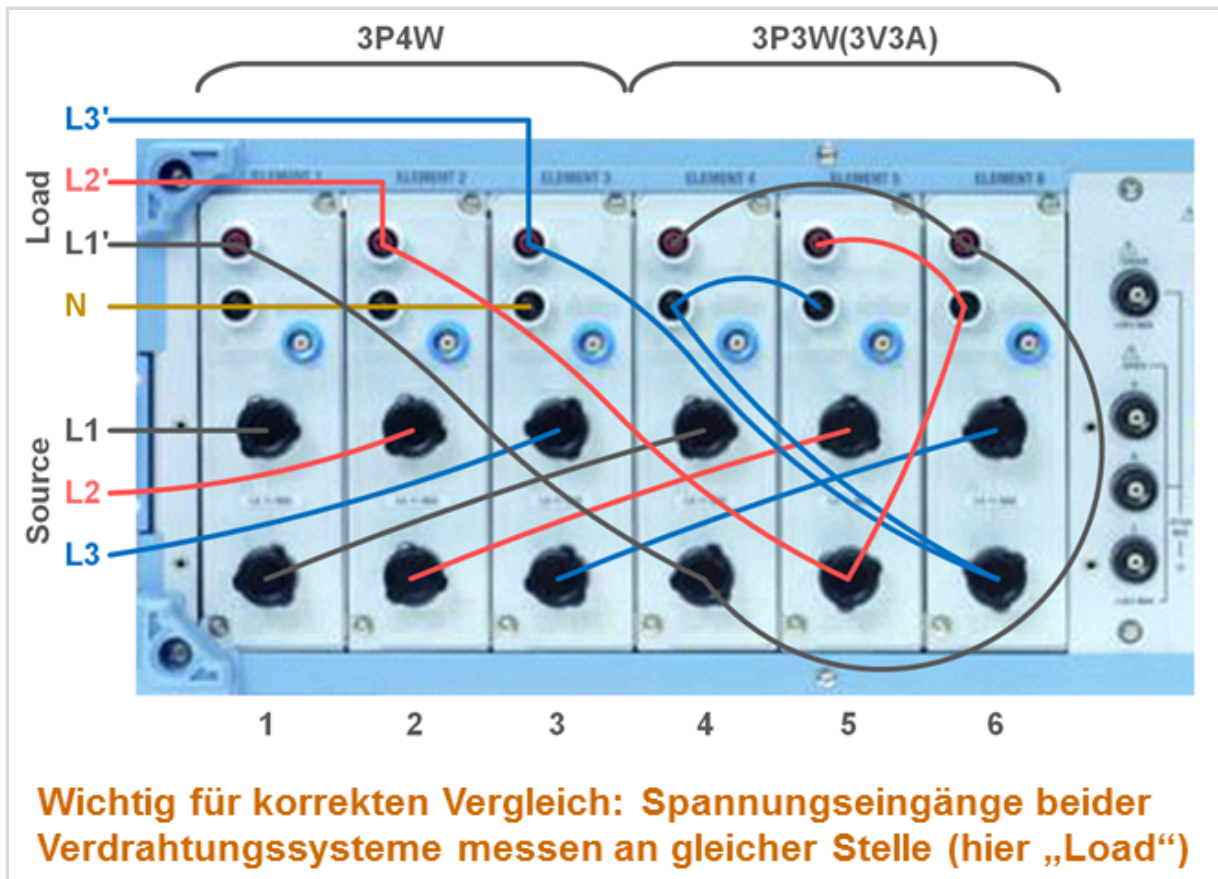


Bild 21: Verdrahtung für vergleichende Messungen

Der verwendete Messaufbau verfügt über einen Neutralleiter. Somit können die drei Phasenleistungen in 3P4W-Verdrahtung direkt gemessen werden. Da dies den „Best Case“ darstellt ist es sinnvoll, die Messergebnisse des 3P4W-Verdrahtungssystems als Referenz zu betrachten.

Die Messergebnisse des 3P3W(3V3A)-Verdrahtungssystems werden mit dieser Referenz verglichen.

Simultan zu den Messungen in 3P4W und 3P3W(3V3A)-Verdrahtung werden Delta-Berechnungen durchgeführt, die aus den Abtastwerten (2 MS/s) der 3P3W(3V3A)-Konfiguration Phasenleistungen, die Summenleistung und den Neutralleiterstrom ermitteln.

Beispiel für die Darstellung der Ergebnisse

Bild 22 zeigt links oben die Ergebnisse des Verdrahtungssystems 3P4W. Die Summenwirkleistung beträgt 1,1288 W. Rechts oben sind die Ergebnisse des Verdrahtungssystems 3P3W(3V3A) dargestellt. Hier ist die angezeigte Summenwirkleistung 1,4 % kleiner. Warum ist das so?

Im unteren Bereich sehen wir die Ergebnisse der Delta-Berechnungen. Die Delta-Berechnungen beider Verdrahtungssysteme zeigen einen Neutralleiterstrom von ca. 5 % der Leiterströme. Dieser Neutralleiterstrom verfälscht das Ergebnis der Messung in 3P3W(3V3A)-Verdrahtung und ist die Ursache für die Abweichung von 1,4 %.

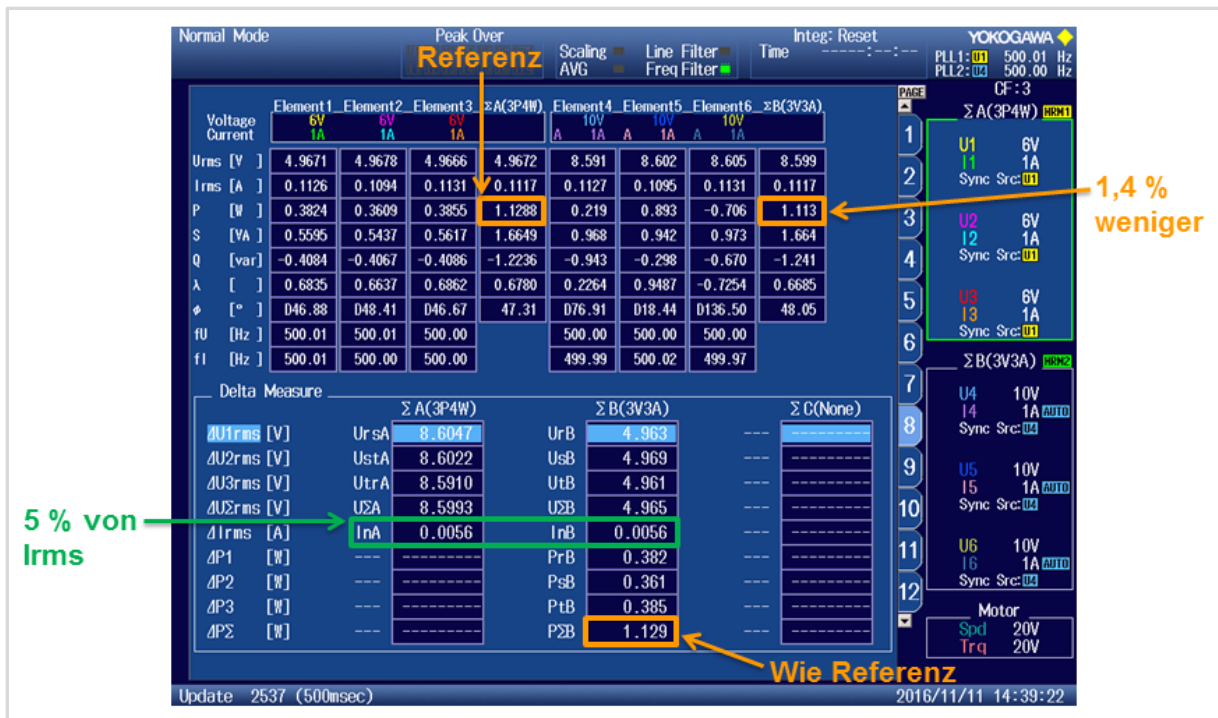


Bild 22: Wirkleistung aus der Delta-Berechnung im Vergleich zu direkten Messungen

Bei Inverterbetrieb mit hohen Spannungen ist mit Ableitströmen zu rechnen. Deren Einfluss ist mit dem hier dargestellten Einfluss des Neutraleiterstroms vergleichbar (andere Ursache, gleiche Wirkung).

Die Delta-Berechnungen für das Verdrahtungssystem 3P3W(3V3A) liefern u. a. auch die gegen einen virtuellen Sternpunkt gerechneten Sternspannungen. Darauf wiederum basieren die drei gerechneten Phasenleistungen sowie die Summenwirkleistung. Die Summenwirkleistung stimmt exakt mit der Referenz überein. Es wird zwar mit Verdrahtungssystem 3P3W(3V3A) gemessen, eventuelle Neutraleiter- und Ableitströme verfälschen die Wirkleistungen aus den Delta-Berechnungen jedoch nicht.

Genauigkeitsbetrachtungen

Bild 23 stellt die Genauigkeiten der Messmethoden gegenüber. Die Messunsicherheiten wurden entsprechend den Spezifikationen des Leistungsanalysators WT1800E für die Messergebnisse aus Bild 22 berechnet.

WT1800E bei 500 Hz, 12-month, 23 ± 5°C: ±(0,3 % of reading + 0,1 % of range), λ-Einfluss 0,095 %

Element bzw. System		Leistungsbereich	Gemessen			λ	Messunsicherheit		Bereichsausnutzung (P/Leistungsbereich)
							Absolut	Relativ	
1) Sternschaltung									
3P4W	ΣA	3 × 6 V × 1 A = 18 W	1,129 W	1,665 VA	0,68	0,0168 W	1,48 %	6,3 %	
2) Aronschaltung (mehr Aufwand, da unterschiedliche P und λ)									
3P3W(3V3A)	Element 4	10 V × 1 A = 10 W	0,219 W	0,968 VA	0,23	0,0038 W	1,74 %	2,2 %	
	Element 5	10 V × 1 A = 10 W	0,893 W	0,942 VA	0,95	0,0124 W	1,39 %	8,9 %	
	ΣB	(2 × 10 W = 20 W)	1,113 W	1,664 VA	0,67	0,0162 W	1,46 %	5,6 %	
3) Delta-Berechnung									
Delta-Messung aus 3P3W(3V3A)		$\sqrt{3} \times 10 \text{ V} \times 1 \text{ A} = 17,3 \text{ W}$	1,129 W	1,664 VA	0,68	0,0163 W	1,44 %	6,5 %	
4) Vergleichsrechnung zu 1), Elemente separat betrachtet (gleiches Ergebnis)									
3P4W	Element 1	6 V × 1 A = 6 W	0,382 W	0,560 VA	0,68	0,0056 W	1,47 %	6,4 %	
	Element 2	6 V × 1 A = 6 W	0,361 W	0,544 VA	0,66	0,0055 W	1,51 %	6,0 %	
	Element 3	6 V × 1 A = 6 W	0,386 W	0,562 VA	0,69	0,0057 W	1,47 %	6,4 %	
	ΣA	3 × 6 W = 18 W	1,129 W	1,665 VA	0,68	0,0168 W	1,49 %	6,3 %	

1) Ohne eventuellen Fehler durch Ableitströme

Bild 23: Messunsicherheiten für 3P4W, 3P3W(3V3A) und Delta-Berechnungen

Die Genauigkeitsberechnung nach 1) für Verdrahtungssystem 3P4W ist recht einfach. Da die drei Leistungselemente gleich angesteuert werden und auch die Leistungsfaktoren gleich sind ist eine einzige Berechnung für das Verdrahtungssystem ausreichend. Die Wirkleistung wird mit einer Messunsicherheit von 1,48 % gemessen.

Rechnet man das separat für jedes Leistungselement, so erhält man selbstverständlich bis auf eine eventuelle Rundungsabweichung das gleiche Ergebnis. Diese Vergleichsrechnung ist in 4) dargestellt.

Für 2) Verdrahtungssystem 3P3W(3V3A) muss etwas mehr Aufwand betrieben werden. Da die Leistungselemente 4 und 5 unterschiedliche Wirkleistungen bei unterschiedlichen Leistungsfaktoren messen sind die Messunsicherheiten separat zu berechnen. Die daraus resultierenden absoluten Messunsicherheiten werden anschließend addiert und in einen Prozentwert umgerechnet.

Ebenso einfach wie bei 3P4W ist die Genauigkeitsberechnung für die Ergebnisse der Delta-Berechnungen unter 3), weil auch dieses System symmetrisch ist. Der Leistungsbereich 17,3 W entspricht einer 100 %-Aussteuerung der Strom- und Spannungsbereiche und somit auch 100 % des Wirkleistungsbereichs.

Die berechneten Messunsicherheiten betragen in diesen Beispielen 1) bis 4) in etwa 1,5 %. Hier kommt vor allem zu tragen, dass die Strombereiche nur zu etwa 11 % angesteuert werden. Die Bereichskomponente der Genauigkeitsspezifikation ist bei Yokogawa Leistungsanalytoren grundsätzlich der eingestellte Bereichsnennwert und entspricht 100 % Effektivwertaussteuerung. Bei einer Bereichsausnutzung von 11 % geht der Bereichsanteil deshalb mit Faktor 100/11 = 9,1 in die Messunsicherheitsberechnung ein. Dies zeigt wie wichtig es ist, die Spannungs- und Strombereiche möglichst gut auszusteuern.

Typisch erreichen Yokogawa Leistungsanalytoren deutlich bessere Genauigkeiten. Dies lässt sich sehr einfach anhand der Ströme aufzeigen, weil sie in diesem Messaufbau immer doppelt gemessen werden. Leistungselemente 1 und 4, 2 und 5 sowie 3 und 6 messen jeweils gleiche Ströme. In Bild 22 ist zu sehen, dass die Abweichungen nur ein Digit betragen. Bezogen auf 112 mA entspricht dies einer Differenz von nur 0,09 %. Laut Spezifikation ist bei dieser geringen Bereichsaussteuerung eine Genauigkeit von 1,04 % garantiert.

7 Zusammenfassung

Im Dreiphasensystem lässt sich Wirkleistung und Verschiebblindleistung (letztere via Harmonischen Analyse) prinzipiell mit hoher Genauigkeit messen. Für die Summenscheinleistung und die Summenverzerrungsblindleistung gilt das nur bei Symmetrie des Dreiphasensystems.

Die Zweiwattmetermethode (Aronschtaltung) erfordert keinen Sternpunkt, hat allerdings ihre Tücken. Bei Vorhandensein von Ableitströmen sind die gemessenen Wirkleistungen und Verschiebblindleistungen mit Fehlern behaftet, die quantitativ kaum greifbar sind. Dies gilt sowohl für das Verdrahtungssystem 3P3W als auch 3P3W(3V3A). Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass Genauigkeitsberechnungen bei der Zweiwattmetermethode mit zusätzlichem Aufwand verbunden sind.

Mit künstlichem Sternpunkt lassen sich viele Messaufgaben einfacher lösen als ganz ohne Sternpunkt. Falschmessungen müssen durch einen künstlichen Sternpunktadapter nicht befürchtet werden. Für die Messung der Gesamtwirkleistung ist es unerheblich, wo sich das Sternpunktpotential genau befindet.

In vielen Fällen ist es sinnvoll, das gewählte Verdrahtungssystem mit den Möglichkeiten der Delta-Berechnungen zu kombinieren. In Verbindung mit Verdrahtungssystem 3P3W(3V3A) sind Delta-Berechnungen in der Lage, die Wirkleistung des Gesamtsystems exakt zu bestimmen. Zusätzlich geben die Delta-Berechnungen Aufschluss über eventuell vorhandene Neutralleiter- bzw. Ableitströme.

Die standardmäßig in einen Leistungsanalysator implementierten Verdrahtungssysteme können über benutzerdefinierte Funktionseinstellungen einfach und flexibel für vielphasige Verdrahtungssysteme erweitert werden.

Normenkonforme Wirkungsgradmessung an Drehstromasynchronmaschinen kleiner Leistung

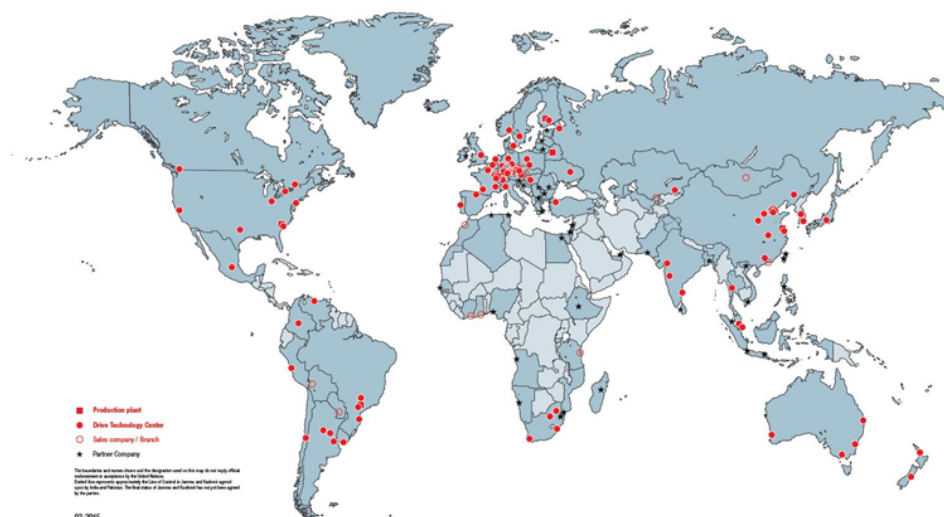


Familien-Weltunternehmen

- SEW-EURODRIVE, ein führender Antriebstechnologie-Spezialist
- SEW-EURODRIVE, ein international erfolgreiches Familienunternehmen.
- SEW-EURODRIVE, Erfahrung in Sachen Antriebstechnik seit mehr als 85 Jahren.



International denken, national handeln



Über 16.000
Mitarbeiter

15 Fertigungswerke
77 Drive Technology Center

Standorte in
51 Ländern

2,8 Mrd. €
Umsatz GJ 2016/2017

Vielfalt aus dem Baukasten

Produktportfolio: Ein Baukastensystem mit unendlich vielen Kombinationsmöglichkeiten

- Asynchron- und Synchrontriebmotoren
- Industriegetriebe
- Dezentrale Antriebstechnik
- Hochwirkungsgradantriebe und explosionsgeschützte Antriebe
- Schaltschränke
- Motion Controller und PLC
- Automatisierungs- und Softwarelösungen
- Systemkomponenten und Dienstleistungen





Unsere Branchenkompetenz

- Transport und Logistik
- Automobilindustrie
- Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie
- Bau- und Baustoffindustrie
- Chemie und Pharma
- Holzindustrie, u.v.a.m.



Entwicklungs- und Test Know-How

Entwicklungsbereiche und Testmöglichkeiten für

- Elektromotoren (M_N : 0,4Nm – 1400Nm oder P_N : 0,06kW - 225kW)
- Getriebe und Industriegetriebe (M_{ab} : 5Nm – 500000Nm)
- Frequenzumrichter, PLC und Motion Control
- Automatisierungslösungen

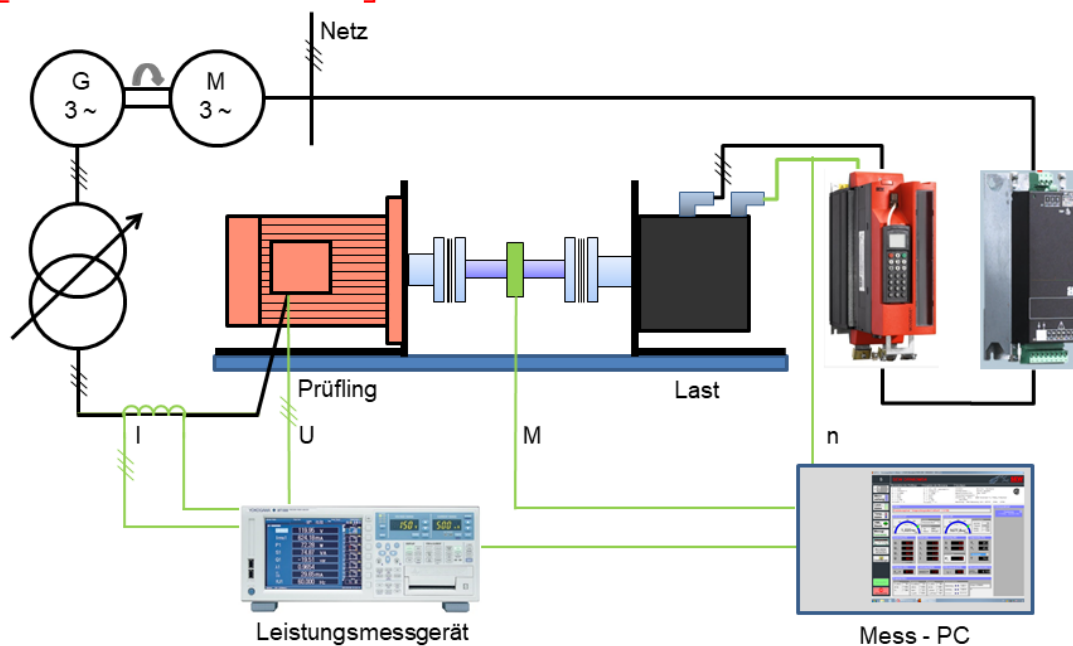


Motorenprüfstände

- 10 Prüfstände für Elektromotoren
- M_{\min} : 0,25 Nm – M_{\max} : 2000 Nm bis zu 6000 min⁻¹
- Je Prüfstand ein Transformator
- Mehrere rotierende Umformer zur Erzeugung einer qualitativ hochwertigen Speisespannung bei typischen Netzfrequenzen
- Weitgehend automatisierte Prüfläufe zur Erreichung von hoher Vergleichbarkeit und großem Durchsatz



Motorprüfstandskonzept





Entwicklung des Prüf-Know-Hows

- Leistungsdatenvermessung der Motoren seit Mitte der 1970er Jahre
- CSA-akkreditiert seit 1991
- ISO 9001 Zertifizierung seit 1992
- Ex-akkreditiert seit 1994

Notwendigkeit des Wirkungsgradnachweises von immer effizienteren Maschinen:

- Steigerung von Anforderungen an die Prüftechnik
- Anpassen des Messprozesse an aktuelle internationale Normenlagen
- Auswertung der Messdaten gemäß geltenden Vorgaben



Anforderungen an Messeinrichtungen - Elektrische Größen

Anforderungen gemäß EN 60034-2-1:2014

- **Normative Vorgaben**
 - Direkte Prüfungen: Genauigkeitsklasse 0,2
 - Indirekte Prüfungen: Genauigkeitsklasse 0,5
 - **Insgesamt: 0,2 % des Anzeigewertes bei Leistungsfaktor 1,0**
- **Zahlenbeispiel**
 - Aufgenommene Leistung: $P_{in} = 166 \text{ W}$, zulässige Unsicherheit 0,24 W
 - Aufgenommener Strom: $I_{in} = 0,4 \text{ A}$, zulässige Unsicherheit 0,8mA
 - Verwendeter Leistungsmesser: Genauigkeitsklasse 0,2
Spezifikation: 0,1% Reading + 0,1% Range
Passt nur, wenn Range = Reading!!!

Lösung: Betrachtung der Kalibrierdaten über mehrere Kalibrierzyklen,
Gerät besser als spezifiziert, oder höherwertigeren Leistungsmesser verwenden.

Anforderungen an Messeinrichtungen - Drehmomentmessung

Anforderungen gemäß EN 60034-2-1:2014

• Normative Vorgaben

- Genauigkeitsklasse 0,2 oder besser
→ Minimal zulässiger Messwert ist 10 % des Bemessungsdrehmomentes
- Bei Benutzung von Aufnehmern höherer Genauigkeitsklasse
→ Messbereich darf entsprechend erweitert werden

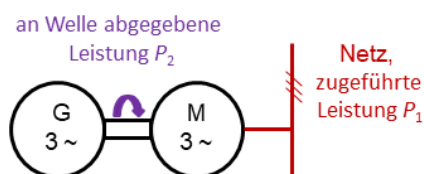
• Zahlenbeispiel:

- mechanische Leistungsdaten: $P_{ab} = 120 \text{ W}$; $n = 1380 \text{ min}^{-1}$
- Drehmoment: $M_{ab_nenn} = 0,83 \text{ Nm}$; $M_{ab_min} = 0,2 \text{ Nm}$;
- Gewählter Aufnehmer: $M_{nenn} = 5 \text{ Nm}$, Genauigkeitsklasse 0,2
- Kleinstes zul. Drehmoment: $M_{min} = 0,5 \text{ Nm}$
- Lösung: Betrachtung der Kalibrierdaten über mehrere Kalibrierzyklen, Gerät deutlich besser als spezifiziert!

Wirkungsgradbestimmung bei Asynchronmotoren

Direkte und indirekte Bestimmung des Wirkungsgrades

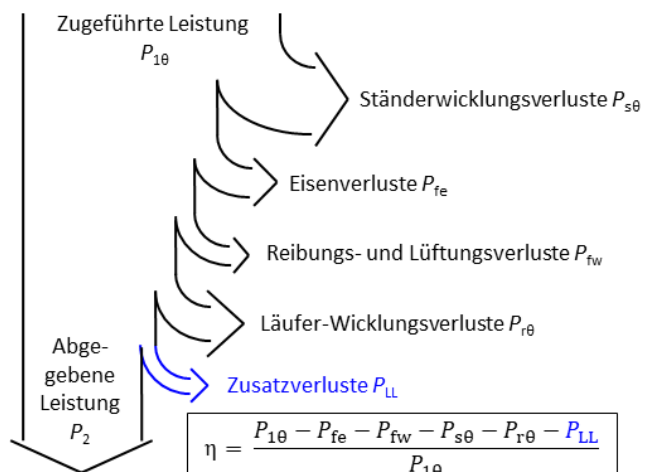
Verluste insgesamt bestimmt:
direktes Verfahren



Eventuell Temperaturkorrektur auf
25 °C Umgebungstemperatur

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Aufteilung der Verluste:
indirektes Verfahren



$$\eta = \frac{P_{1\theta} - P_{fe} - P_{fw} - P_{s\theta} - P_{r\theta} - P_{LL}}{P_{1\theta}}$$



Regulatorische Situation

Asynchronmaschinen mit **Leistungen $\geq 0,75$ kW/1 HP bis 375 kW:**

- EU, Wirkungsgradklasse IE3 ist i. allg. für 3~ Netzmotoren vorgeschrieben
 - Verordnung Nr. 640/2009 und 4/2014 zur Ökodesignrichtlinie 2005/32/EG
 - Wirkungsgrad-Klassifizierung auch EN 60034-30-1:2014
 - Wirkungsgradmessung nach EN 60034-2-1:2014, Verfahren 2-1-1 B
 - In vielen anderen Ländern und Regionen ähnliche/angelehnte Regelungen, z. B. Südamerika, Südkorea, Japan
- Nordamerika, Premium-Wirkungsgrade (IE3) i. allg. für 3~ Netzmotoren erforderlich
 - USA: Department of Energy (DOE) 10 CFR Part 431 und NEMA MG 1
 - USA: Wirkungsgradmessung nach IEEE 112 Methode B oder CSA C390-10
 - Kanada: CSA C390-10
 - Die Verfahren weisen Unterschiede auf. Ergebnisse nach C390-10 werden auch in den USA anerkannt.
- **Alle Verfahren zur Wirkungsgradmessung beruhen auf Trennung der Einzelverluste.**



Regulatorische Situation

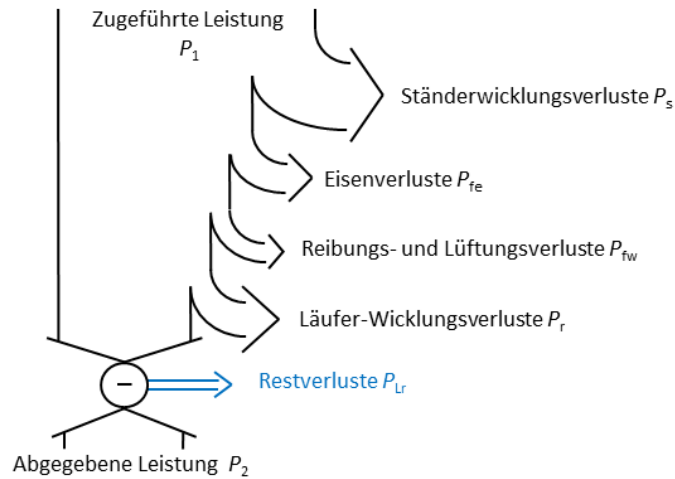
Asynchronmaschinen mit **Leistungen $< 0,75$ kW/1 HP:**

- EU, derzeit keine Vorschrift
 - Regulierung in der EU ist vorerst gescheitert, vorgesehen war IE2 für 3~ Motoren von 0,12 kW bis kleiner 0,75 kW ab 1. Januar 2018
 - Wirkungsgrad-Klassifizierung dafür ist vorgesehen in EN 60034-30-1:2014
 - Wirkungsgradmessung nach EN 60034-2-1:2014, Verfahren 2-1-1 B
→ **Trennung der Einzelverluste** (im Gegensatz zur Vorgängernorm)
- USA, Premium-Wirkungsgrade (IE3) für *offene* 3~ Netzmotoren ab 0,18 kW
 - Department of Energy (DOE) 10 CFR Part 431 und NEMA MG 1
 - Wirkungsgradmessung nach IEEE 112 Methode A oder CSA C747-09
→ **Keine Trennung der Einzelverluste, direkte Verfahren**
 - Ergebnisse nach C747-09 werden auch in den USA anerkannt.
- Eine Regulierung für 3~ Asynchronmotoren kleiner Leistung wird für die kommenden Jahre erwartet.

Anforderungen an Messung

Wichtiges Gütekriterium gemäß EN 60034-2-1 ist die Restverlustkorrelation

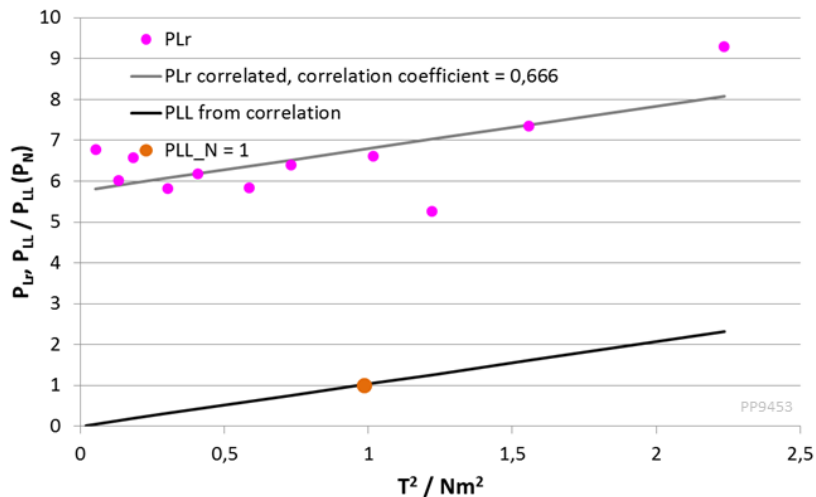
- Die Restverluste P_{Lr} sind der Teil der Verluste, der übrigbleibt, wenn von der zugeführten Leistung die leicht bestimmbareren Einzelverluste abgezogen werden:



Messergebnis vor Optimierungen

Forderung EN 60034-2-1: Restverlustkorrelation $\geq 0,95$ für $P_{Lr} = f(M^2)$

- Messung vor Optimierung, 6-poliger Motor mit 0,09 kW bei 50 Hz:



Prüfstands-Optimierung 1 - Strommessung

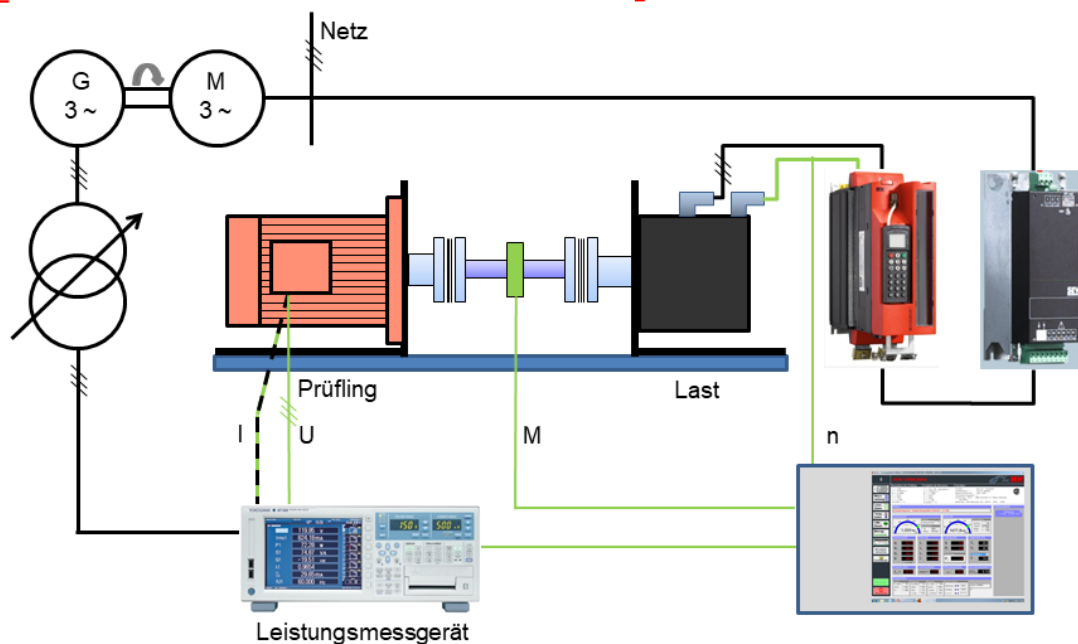
Idee: Aufgrund relativ kleiner Motorströme nur sehr kleine Aussteuerungen der Stromwandler (LEM IT-150S zur Bauzeit des Prüfstandes kleinster Zero-Flux-Wandler)

- ⇒ Laut Kalibrierung bis 5% Nennstrom vernachlässigbarer Amplituden- und Winkelfehler, jedoch
- ⇒ Aussteuerung von nur 1/150 oder 0,66% bei Nennstrom des Prüflings
- ⇒ Kalibrierlabor rät vom mehrmaligen Durchschleifen der Messleitungen wegen der entstehenden Störfelder dringend ab!

Lösung:

- ⇒ Messtrom klein genug für direkte Messung im Leistungsmessgerät (Eingang max. 5 A)
- ⇒ Entfernen der Wandler aus der Messkette

Prüfstands-Optimierung 1 - Strommessung





Prüfstands-Optimierung 1 - Strommessung

Ergebnis: keine signifikante oder wiederholbare Verbesserung hinsichtlich der Korrelation

Besteht Einfluss durch Strom- und Spannungsfehlerschaltung?

Die vorhandene Verdrahtung war eine Spannungsfehlerschaltung:

Eingangsimpedanz des Leistungsmessersstrompfades: ca. $0,1\Omega$

⇒ bei 0,4A Messstrom ca. 0,011W ⇒ ca. 0,05W „Strompfadverluste“

Verhalten in der Stromfehlerschaltung:

Eingangsimpedanz des Leistungsmessersspannungspfad: ca. $2M\Omega$

⇒ bei 230V-Strangspannung ca. 0,026W ⇒ ca. 0,08W „Spannungspfadverluste“

Differenz: 0,03W entsprechen 0,02% der aufgenommenen Wirkleistung

⇒ Vernachlässigbar

Zukünftig Betrieb mit 50A Zero-Flux-Wandlern, um die Sicherheit bei Überlast oder im Fehlerfall zu gewährleisten.



Prüfstands-Optimierung 2 - Zeitsynchronität

Idee: Durch Torsionsschwingungen kein quasistationärer Zustand

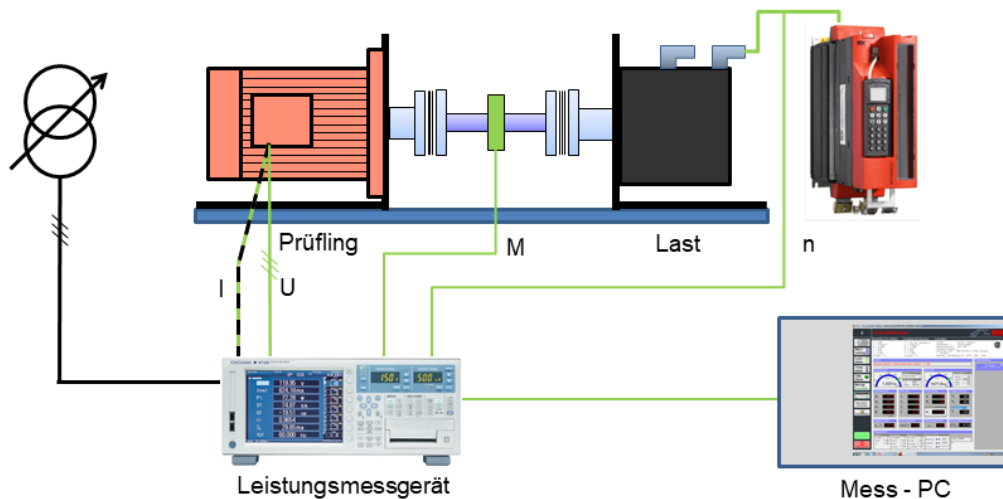
⇒ Aufgrund nicht synchroner Messdatenerfassung ungenügende Korrelation zwischen Drehzahl-, Drehmoment- und Leistungsmesswerten

Lösung: Zeitsynchrone Erfassung im Leistungsmessgerät mit Zusatzeingängen für Drehzahl und Drehmoment

Ergebnis: Sehr deutliche, wiederholbare Verbesserung hinsichtlich der Korrelation

Der Korrelationskoeffizient der Zusatzverluste stieg auf stabil > 90%!

Prüfstands-Optimierung 2 - Zeitsynchronität



Prüfstands-Optimierung 3 – Wellentorsion

Beobachtung:

Das gemessene Drehmomentsignal schwingt mit annähernd gleichbleibender Frequenz, die sich nicht einer Anregung zuordnen lässt \Rightarrow Eigenfrequenz?

Idee 1: Eigenfrequenz verändern durch Messwelle anderen Typs

- \Rightarrow Messwelle mit integrierter Drehzahlerfassung, dadurch kein Drehzahlmessfehler durch Wellentorsion

Ergebnis: Keine Verbesserung des Korrelationskoeffizienten

Idee 2: Verstimmung des Torsionsschwingers durch Verändern der Rotationsmassen

Ergebnis: Versuche mit „schweren Lüftern“; Umbau von ASM auf PSM-Lasteinheit

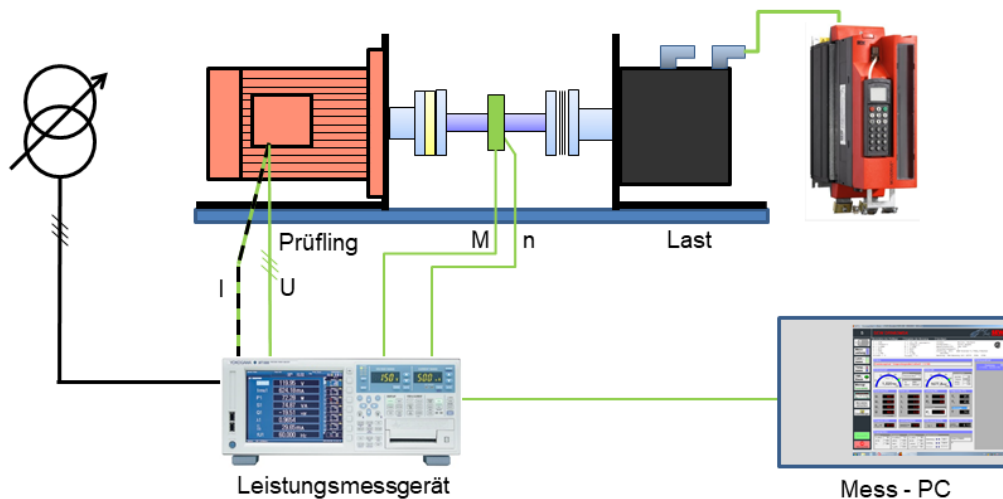
- \Rightarrow „Schwere Lüfter“ führen zu keiner Änderung der Schwingneigung
- \Rightarrow Neue Lasteinheit reduziert Schwingneigung deutlich (Maschinentyp, Massenträgheit, Regelverfahren?)
- \Rightarrow **Keine signifikante Verbesserung des Korrelationskoeffizienten**

Idee 3: Harte Lamellenkupplungen mit hoher Schwingneigung ersetzen

Ergebnis: Einsatz einer drehweichen Elastomerkupplung prüflingsseitig

- \Rightarrow Dämpfung hochfrequenter Torsionsschwingungsanteile
- \Rightarrow messwellenfreundlicheren Montage des Wellenstrangs, speziell beim Abkuppeln
- \Rightarrow **Keine Verbesserung des Korrelationskoeffizienten**

Prüfstands-Optimierung 3 – Wellentorsion



Prüfstands-Optimierung 4 - Messwertmittelung

Idee: Um einen Einfluss durch kleine Schwankungen der zu messenden Größen zu minimieren, sollen in der Belastungsreihe mehrere Datensätze aufgenommen werden (vgl. DIN EN 60034-2-1:2014, 5.5.1)

Je nach Bemessungsleistung des Motors und seines Betriebsverhaltens kann die Anzahl variieren.

Lösung: Anpassung der Prüfsoftware

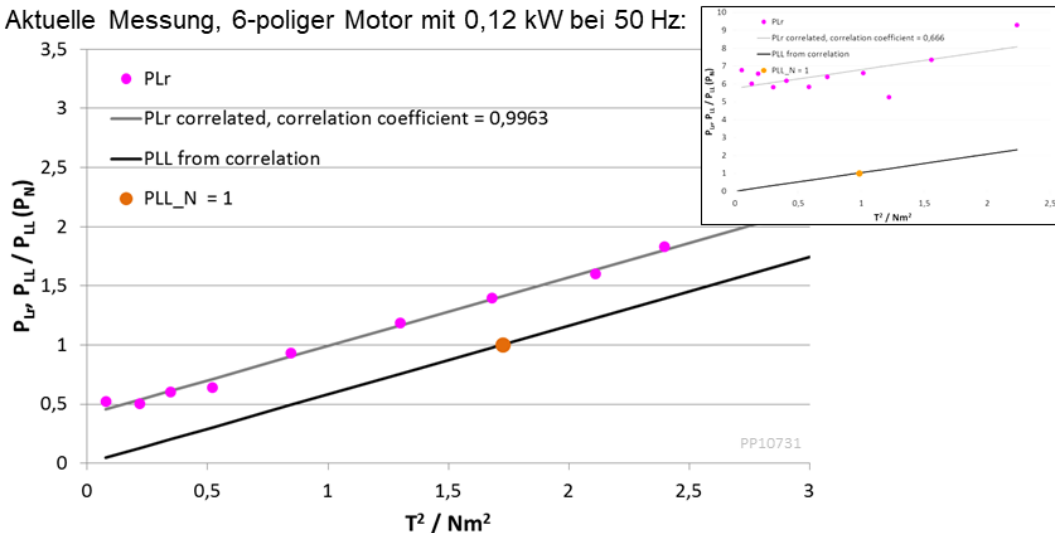
Ergebnis: Nochmalige Steigerung des Korrelationskoeffizienten.

Der Korrelationskoeffizient der Zusatzverluste liegt jetzt bei stabil > 95%!

Messergebnis nach Optimierungen

Forderung EN 60034-2-1: Restverlustkorrelation $\geq 0,95$ für $P_{Lr} = f(M^2)$

- Aktuelle Messung, 6-poliger Motor mit 0,12 kW bei 50 Hz:



Prüfstands-Optimierung – Übersicht

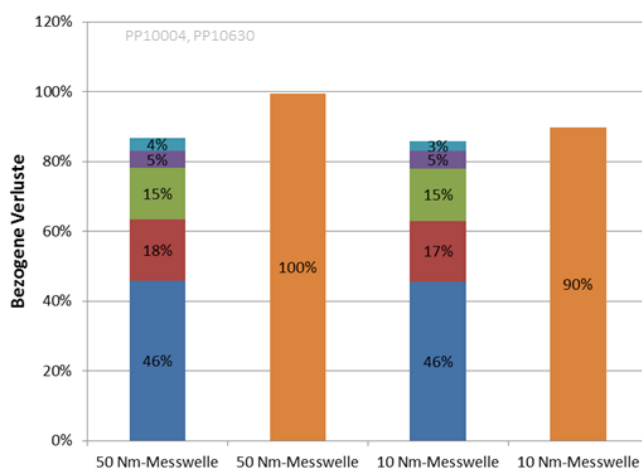
Verbesserung in Bezug auf die Korrelation der Restverluste?

- Entfernen der Stromwandler aus der Messkette**
⇒ Keine erkennbare Verbesserung der Korrelation, minimale Differenz zwischen Strom- und Spannungsfehlerschaltung
- Zeitsynchronität**
⇒ Sehr deutliche Verbesserung
- Einsatz einer vergleichbaren Messwelle eines anderen Herstellers mit integrierter Drehzahlerfassung**
⇒ Keine erkennbare Verbesserung der Korrelation
- Austausch der Lasteinheit, Umbau von ASM auf PSM**
⇒ Verbesserung des Schwingungsverhaltens des Wellenstrangs, kein Einfluss auf Korrelation
- Austausch der harten Lamellenkupplungen gegen Elastomerkupplung**
⇒ Dämpfung der hochfrequenten Schwingungsanteile im Signal, messwellenfreundlicheren Montage des Wellenstrangs, kein Einfluss auf Korrelation
- Mittelung über mehrere Datensätze in der Belastungsreihe**
⇒ deutliche Verbesserung der Korrelation

Wirkungsgradbestimmung: Direkt vs. indirekt

- Prüfling: Motor mit Bemessungsleistung $P_N = 0,55 \text{ kW}$ bei 60 Hz
 \Rightarrow Bemessungsdrehmoment $M_N \approx 3 \text{ Nm}$
- Kleinstes zu messendes Drehmoment $M_{\min} = 0,25 \cdot 3 \text{ Nm} = 0,75 \text{ Nm}$
- Drehmomentmesswelle mit Nennwert 50 Nm und Genauigkeitsklasse: 0,1
 \Rightarrow kleinstes zulässiges Drehmoment: $(50 \text{ Nm} \cdot 10\%) / 2 = 2,5 \text{ Nm}$
 \Rightarrow nach DIN EN 60034-2-1:2014 Drehmomentmesswelle nicht zulässig
- Maximal zulässige Messwelle bei Genauigkeitsklasse 0,1:
 $\Rightarrow 0,75 \text{ Nm} / 0,1 \cdot 2 = 15 \text{ Nm}$
- Gewählte Messwelle: Nennwert 10 Nm;
 \Rightarrow Unsicherheiten: $M_{U_{0,75 \text{ Nm}}} \approx 2,5 \text{ mNm}$
 $M_{U_{3 \text{ Nm}}} \approx 4,1 \text{ mNm}$
(Werte aus Kalibration)

Wirkungsgradbestimmung: Direkt vs. indirekt



- Unzulässige 50 Nm-Messwelle und direkte Wirkungsgradbestimmung
 \Rightarrow Entspricht 100% Verluste
- Mit zulässiger 10 Nm-Messwelle und direkter Wirkungsgradbestimmung
 \Rightarrow 10% (!) geringere Verluste
- Berücksichtigung des Drehmomentoffsets bei beiden Messungen
 \Rightarrow annähernd gleiche Verluste (!)
 \Rightarrow Offsetbestimmung jedoch schwierig
- Indirekte Auswertungen
 \Rightarrow nur geringe Differenzen (ca. 1%)
 \Rightarrow robustes Bestimmungsverfahren

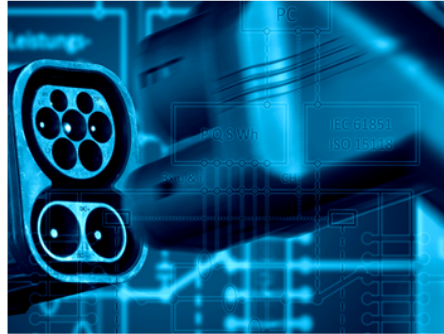


Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Herr Dr. Simon Hoffmann,
Motorenentwicklung, Leiter Technologiekreis Berechnung & Simulation

Herr Tobias Bleif,
Qualitätsmanagement, Test-Center Elektromechanik

Herausforderungen für die elektrische Leistungsmesstechnik im Umfeld der Elektromobilität



Matthias Schmidt, 2.33



Überblick



- Überblick über die verschiedenen Ladeverfahren
- Zu erfassende Parameter und Grenzwerte
- Laufende Entwicklungen der PTB

Was nicht behandelt wird!



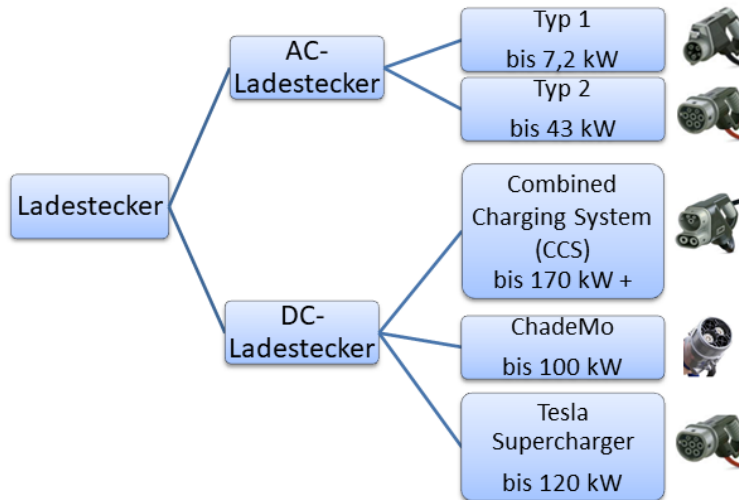
- Fragen zur Mess- und Eichverordnung und dem Mess- und Eichgesetz
 - Hierfür wenden Sie sich bitte an den Fachbereichsleiter des FB 2.3

Überblick



- Überblick über die verschiedenen Ladeverfahren
- Zu erfassende Parameter und Grenzwerte
- Laufende Entwicklungen der PTB

Überblick Ladeverfahren PKW konduktiv



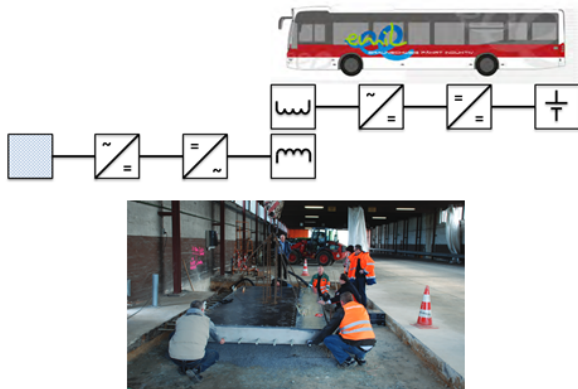
(Quellen: chademo.com ; phoenixcontact.com)

Überblick Ladeverfahren sonstige



Induktiv bis 250 kW

Pantograph bis 300 kW



(Quellen: Volvobuses.com ; www.verkehr-bs.de)

Überblick



- Überblick über die verschiedenen Ladeverfahren
- Zu erfassende Parameter und Grenzwerte
- Laufende Entwicklungen der PTB

Parameter und Grenzwerte: Größen



Parameter aktuell:

- AC
 - Stromstärke bis 63 A
 - Spannung bis 400 V
- DC
 - Stromstärke bis 125 A
 - Spannung bis 850 V

Parameter zukünftig:

- AC
 - Stromstärke bis 63 A
 - Spannung bis 1000 V
 - Ein- und Dreiphasig
- DC
 - Stromstärke bis 500 A
 - Spannung bis 1500 V

Ladeleistung beim Tanken von Benzin



- Ladeleistung beim Tanken konventioneller Kraftstoffe (Abschätzung)

Energiedichte Benzin	10 kWh/Kg	Wirkungsgrad Ottomotor ca.	0,3
Dichte	0,75 kg/dm ³	Nutzbare Energiemenge	112,5 kWh
Tankmenge	50 dm ³	Ladeleistung	1350 kW
Gesamte Energiemenge	375 kWh		
Benötigte Zeit	5 min		

Renault ZOE* 15 kWh für 100 km bei 100 Km/h
9 kWh für 100 km bei 50 Km/h

*Quelle: Prof. Dr.-Ing. Peter Marx, Berlin, Okt. 2013 Berechnung der Energie, die ein durchschnittliches E-Auto auf ebener Strecke für $s = 100$ km bei $v = 100$ km/h zur Überwindung des Luft- und Rollwiderstandes benötigt.

Parameter und Grenzwerte: Energie



Anforderungen an die Energiemessung

- AC : Genauigkeitsklasse A gemäß MID
- DC : Genauigkeitsklasse A sinngemäß MID

Fehlgrenzen in Prozent unter Nennbetriebsbedingungen und bei definiertem Laststrom und definierter Betriebstemperatur												
	Betriebs-temperaturen			Betriebs-temperaturen			Betriebs-temperaturen			Betriebs-temperaturen		
	+ 5 °C ... + 30 °C			- 10 °C ... + 5 °C oder + 30 °C ... + 40 °C			- 25 °C ... - 10 °C oder + 40 °C ... + 55 °C			- 40 °C ... - 25 °C oder + 55 °C ... + 70 °C		
Zählerklasse	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Einphasenzähler; Mehrphasenzähler bei symmetrischer Last												
$I_{\min} \leq I < I_{tr}$	3,5	2	1	5	2,5	1,3	7	3,5	1,7	9	4	2
$I_{tr} \leq I \leq I_{\max}$	3,5	2	0,7	4,5	2,5	1	7	3,5	1,3	9	4	1,5

(Quelle: 2014_32_EU_MID; REA Dokument 6a)

Parameter und Grenzwerte: DC Ladung



- **Strom geregelter Ladevorgang (CCC)**
Die Gleichstromladestation regelt den Ladevorgang in Abhängigkeit des vom Fahrzeug angeforderten Ladestroms
- **Spannung geregelter Ladevorgang (CVC)**
Die Gleichstromladestation regelt den Ladevorgang in Abhängigkeit der vom Fahrzeug angeforderten Ladespannung
- **DC Ladetyp**
 - Typ A CHAdeMO-Stecker (Japan)
 - Typ B GB/T-Stecker (China)
 - Typ C CCS-Stecker (Europa/USA)

(Quelle: DIN EN 61851-23)

Parameter und Grenzwerte: DC Ladung CVC

Ausgangsspannungsregelung (CVC): DC Typ C (CCS Europa/USA)

- Spannungshöhe $\text{max. } \pm 5 \% * U$
- Anstiegsgeschwindigkeit $\text{max. } \pm 20 \text{ V/ms}$
- Spannungswelligkeit $\text{max. } \pm 5 \text{ V}$

(Quelle: DIN EN 61851-23)

Parameter und Grenzwerte: DC Ladung CCC

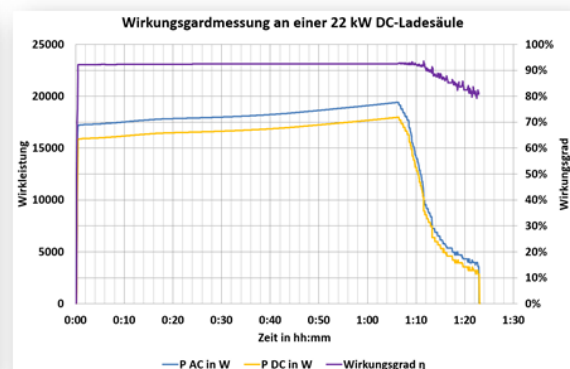
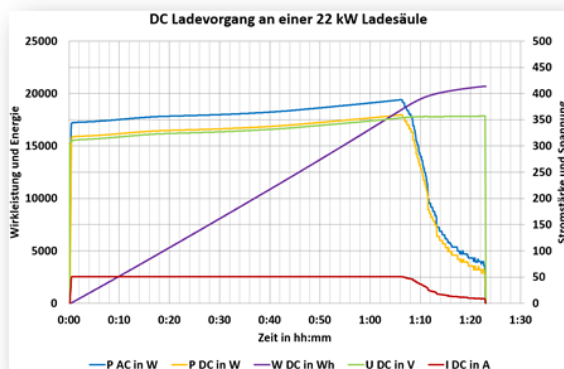
Ausgangsstromregelung (CCC): DC Typ C (CCS Europa/USA)

- Stromstärke
 - $\pm 150 \text{ mA}$ für $I_n \leq 5 \text{ A}$
 - $\pm 2,5 \text{ A}$ für $5 \text{ A} > I_n \leq 50 \text{ A}$
 - $\pm 3 \% \cdot I_n$ für $I_n > 50 \text{ A}$
- Einschaltstrom max. 2 A
- Stromänderung beim Starten
 - min. 20 A/s
- Stromänderung beim Beenden
 - min. 100 A/s
 - max. 200 A/s

(Quelle: DIN EN 61851-23)

Parameter und Grenzwerte: Ladevorgang

- DC Ladevorgang



Überblick



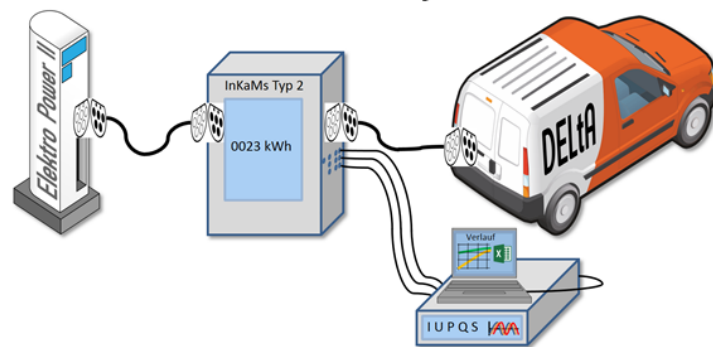
- Überblick über die verschiedenen Ladeverfahren
- Zu erfassende Parameter und Grenzwerte
- Laufende Entwicklungen der PTB

Laufende Entwicklungen: InKaMs



DELTA

InKabelMesssystem



Gefördert durch:

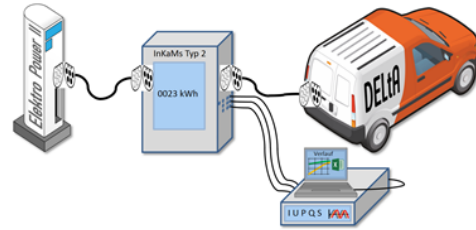


aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Laufende Entwicklungen: InKaMs



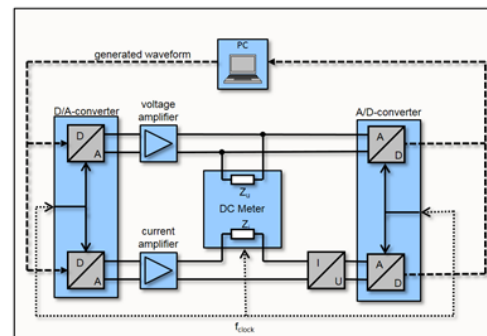
- Messung der übertragenen Energiemenge.
- Aufzeichnung der zeitlichen Verläufe der Stromstärke und der Spannung.
- Messung der zeitlichen Verläufe der Wirk-, Blind- und Scheinleistung.
- Ermittlung des Frequenzspektrums für U und I bis 150 kHz.
- Zeitliche Zuordnung der Kommunikation zwischen Ladesäule und Fahrzeug zu den ermittelten analogen Messwerten (DIN EN 61851 und ISO 15118).



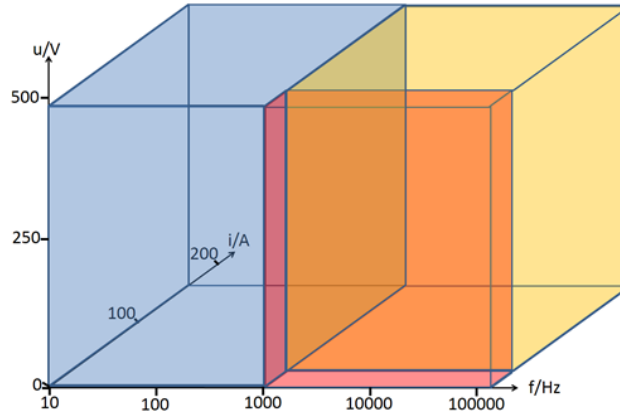
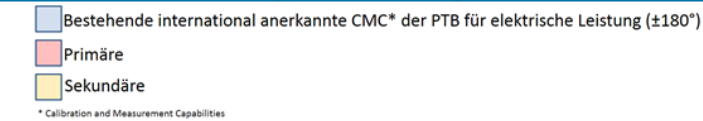
Laufende Entwicklungen: DC Messplatz



- Strombereich 5 mA bis 2400 A
- Spannungsbereich 5 mV bis 1000 V
- Leistungsbereich bis 2,4 MW (virtuelle Leistung)
- Ripple max. 50 V / 14 A bis 150 kHz
- Unsicherheit $< 5 \cdot 10^{-4}$
- CMC ab Ende 2018



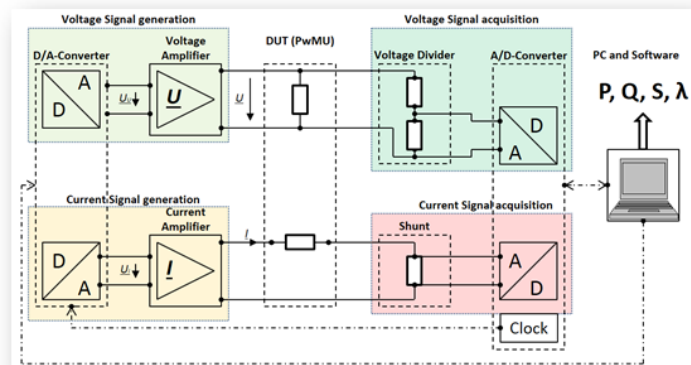
Laufende Entwicklungen: Möglichkeiten



Laufende Entwicklungen: HFPS



- Strombereich bis 14 A
- Spannungsbereich bis 500 V
- Frequenz 10 Hz – 150 kHz
- Leistungsbereich bis 7,0 kW (virtuelle Leistung)
- Nahezu beliebige Signalformen



Laufende Entwicklungen: HFPS Software



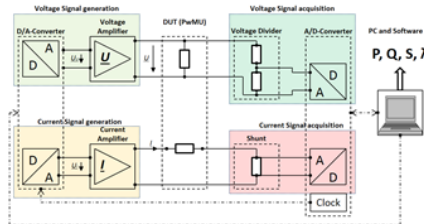
Signalerzeugung

- Flexible und unabhängige Signalverläufe für Strom und Spannung
- Synthetisierung und Wiedergabe aufgezeichneter Signale
- Berücksichtigung der Hardwareeigenschaften des Systems

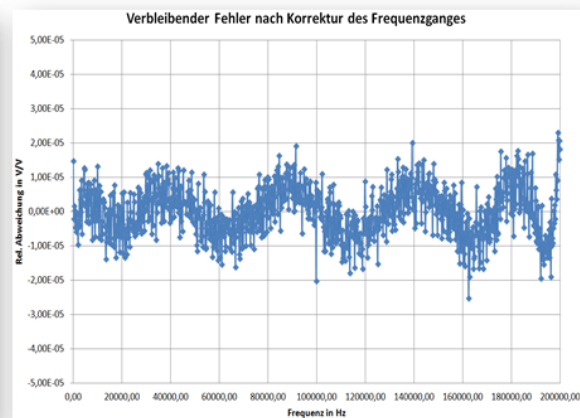
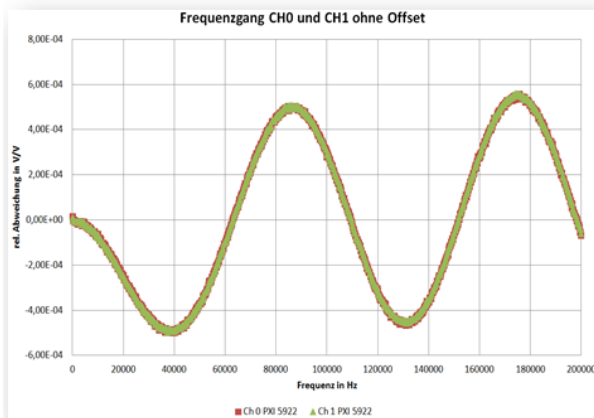


Signalaufnahme und Verarbeitung

- Korrektur der bekannten Hardwareeigenschaften
- Berechnung von: i , u , S , P , Q , FFT
- Auslesen und vergleichen mit den Werten des DUT
- Anzeige und Speicherung der Messwerte

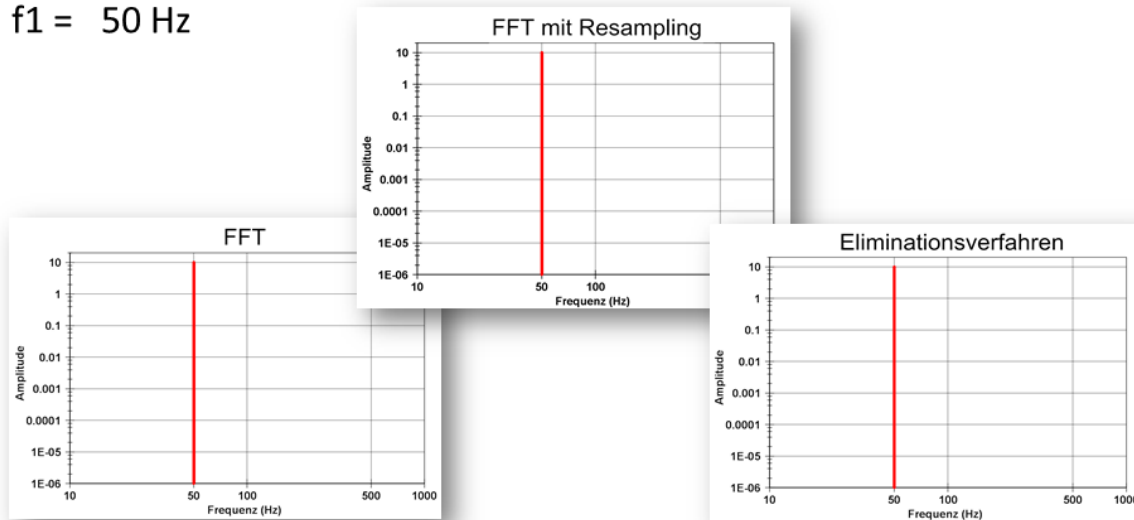


Laufende Entwicklungen: HFPS Hardware



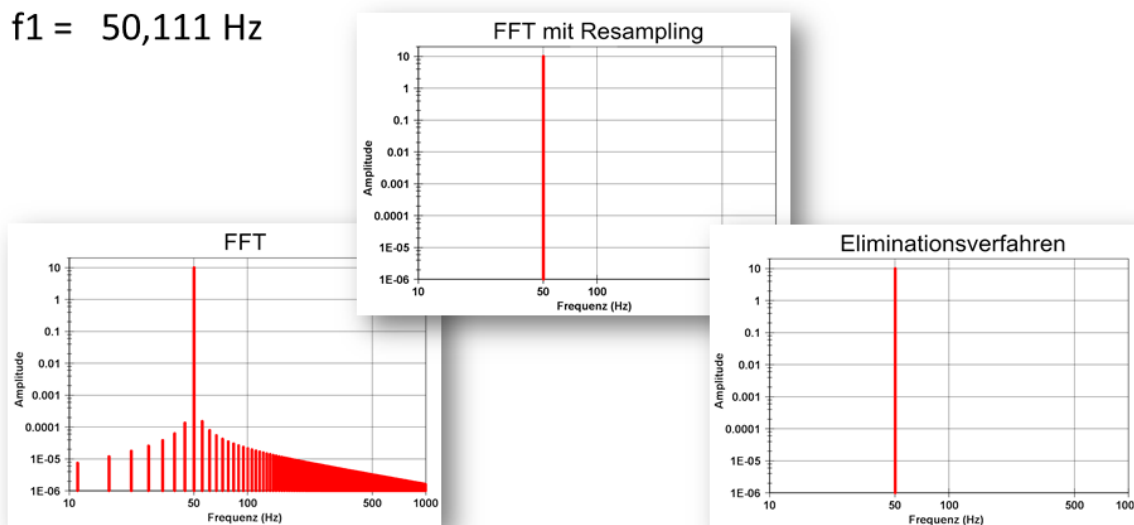
Laufende Entwicklungen: HFPS Berechnung

$f_1 = 50 \text{ Hz}$



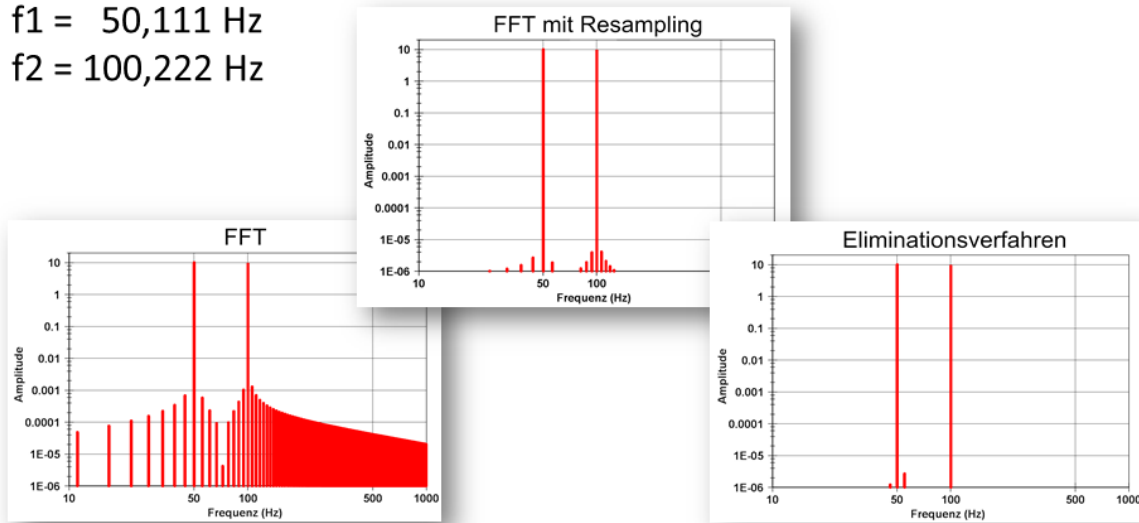
Laufende Entwicklungen: HFPS Berechnung

$f_1 = 50,111 \text{ Hz}$



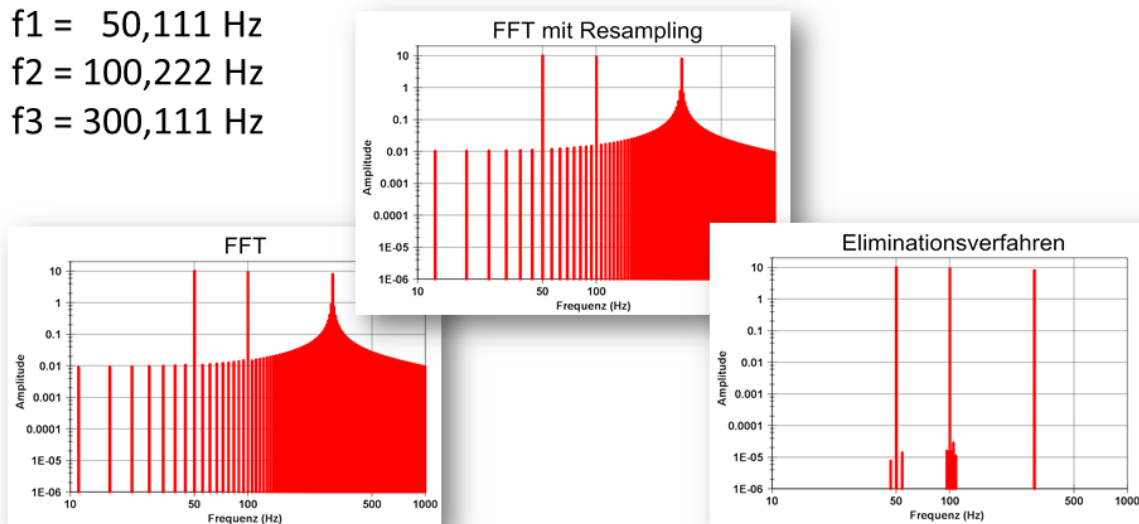
Laufende Entwicklungen: HFPS Berechnung

f1 = 50,111 Hz
f2 = 100,222 Hz



Laufende Entwicklungen: HFPS Berechnung

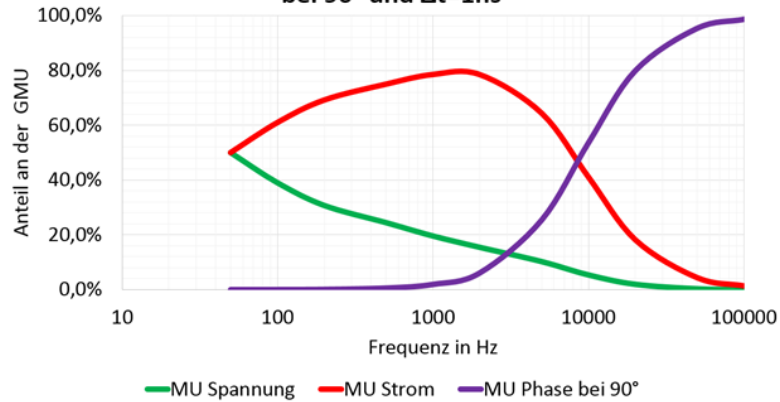
f1 = 50,111 Hz
f2 = 100,222 Hz
f3 = 300,111 Hz



Laufende Entwicklungen: HFPS Messuns.



Einfluss der einzelnen Unsicherheitsanteile auf die Gesamtunsicherheit der Wirkleistungsmessung bei 90° und $\Delta t=1\text{ns}$



Laufende Entwicklungen: HFPS Messuns.



Fragen Bitte!



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100

38116 Braunschweig



Matthias Schmidt

Telefon: 0531 592-2330

E-Mail: Matthias.Schmidt@ptb.de



www.ptb.de

Stand: 01/18

Test&Measurement

Meeting the challenges of high-frequency power measurement

Erik Kroon
Manager European Standards Laboratory

PTB-Seminar Leistungsmesstechnik 2018

YOKOGAWA ◆



Precision Making

Test&Measurement

YOKOGAWA ◆

Who is Erik Kroon?



Avionics Engineer at Fokker Aircraft N.V.
at Schiphol (1984-1990)



YOKOGAWA

Calibration/Test Engineer at Yokogawa
Europe HQ. Setting up the Calibration
facility (1990-2000)



Dutch
Metrology
Institute

All-round Metrology Engineer Responsible for
Time & Frequency, High Voltage 140 kV, DCLF,
LF Power, RF Power, Galileo GPS Project.
(2000-2008)



YOKOGAWA

Returned to Yokogawa in 2008 as Manager Standards
Laboratory.

Test&Measurement

YOKOGAWA ◆

Who is Erik Kroon?



3

Copyright© Yokogawa Meters & Instruments Corporation

Precision Making

Test&Measurement

YOKOGAWA ◆

Yokogawa European Standards Laboratory Start of Calibration 1990

Laboratory 1994



Present

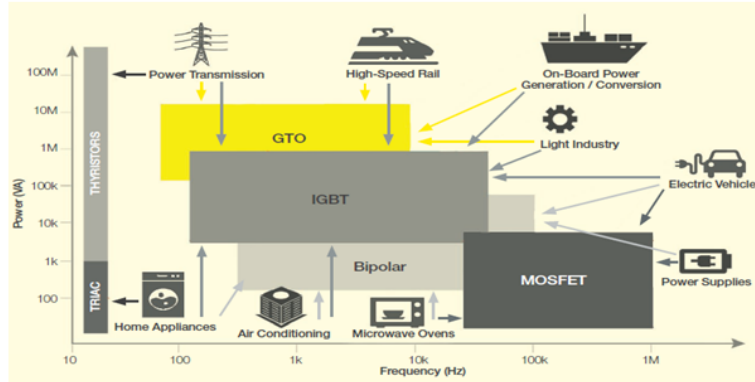
4

Copyright© Yokogawa Meters & Instruments Corporation

Precision Making

High-frequency in power measurements

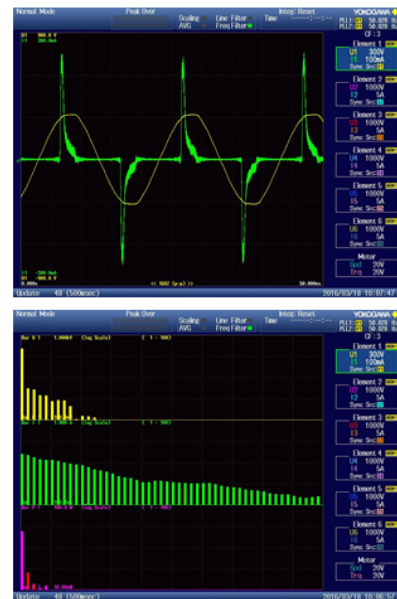
- The bandwidth of a power measurement is determined by the highest harmonic component of voltage or current which ever is the least distorted
- For example in home and office appliances the grid voltage has less distortion then the current drawn by switching power supplies



High-frequency in power measurements

Home and office appliances

- Home and office appliances are mostly powered by a switching power supply.
- When the grid is used as power source during test the amount of frequencies on the grid determine the required bandwidth
- Due this standards for home and office appliances have a minimum bandwidth for the used measurement instrument:
 - For example: EN50564 standby power consumption requires a frequency response of 10kHz.



Test&Measurement

YOKOGAWA 

High-frequency in power measurements

Inverters

- Inverters are used to increase the efficiency electric motors and to have better control on the speed and torque of the motor via pulse width modulation.
- To capture a the amplitude Voltage square wave correctly up to 99.95% one would need to have a frequency response of at least 400 times switching frequency (f_{sw})
- The effect on the Current waveform is triangular, as it cannot response fast enough to follow the square
- To capture the amplitude of a triangular wave correctly up to 99.95% one would need to have a frequency response of at least 5 times f_{sw}
- There for the requirement for power measurement would be 5 or more* times f_{sw}

* Depending on the required accuracy



7

Copyright© Yokogawa Meters & Instruments Corporation

Precision Making

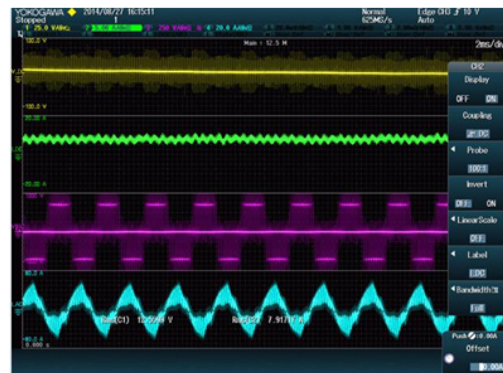
Test&Measurement

YOKOGAWA 

High-frequency in power measurements

DC

- For power measurement only constant DC can be considered as DC signal.
- As soon as there is a ripple on it phase becomes important.
- On DC busses in inverters or DC input into inverters often contain a significant AC component
- For example, this observation from and an electrical vehicle where both DC voltage and DC current contain a 57 kHz frequency component. (yellow and green waveforms)
- For the current waveforms this is 5 A peak to peak triangular wave on a 10 A DC signal.



8

Copyright© Yokogawa Meters & Instruments Corporation

Precision Making

Test&Measurement

YOKOGAWA ◆

High-frequency power measurements

High frequency fundamental applications

- Wireless charging low power applications (phones, tablets etc.) 100 kHz – 300 kHz
- Wireless charging electrical vehicles standardized US and Japan at 200 kW approx. 80 A at 85 kHz
- Inductive cooking
- Industrial inductive ovens
- Electronic components



Transformer in DC-DC converter

- 40 kHz fundamental



9

Copyright© Yokogawa Meters & Instruments Corporation

Precision Making

Test&Measurement

YOKOGAWA ◆

High frequency Power calibration?

Most power meter Calibrations are performed on 50 - 60 Hz only.

Is that adequate for present day applications?

If you measure a light bulb, that will be fine!



All others application that have power with distorted waveforms or fundamentals > 50 Hz, maybe not!

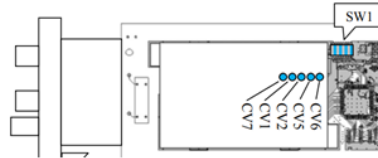
10

Copyright© Yokogawa Meters & Instruments Corporation

Precision Making

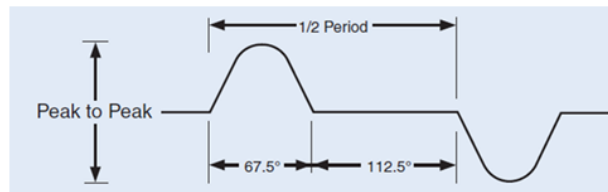
How not to calibrate for distorted power waveforms

- Assuming 50 Hz calibration is good enough, the instrument will be still good at 5 kHz, isn't it?



No, Frequency compensation circuits can be wrong on different frequencies.

- Using a known distorted signal.



Only traceability for this particular waveform.

Calibration for power with Distorted waveforms

Yokogawa method to get traceability for distorted waveforms:

Calibration of:

- Gain (Voltage, Current) DC and AC up to higher frequencies for each range
- Linearity of Voltage, Current (DC and AC)
- Power at power factor 1 up to higher frequencies for each range (gives amplitude response)
- Linearity of Power (DC and AC)
- Power at power factor 0 (inductive and capacitive) up to higher frequencies. (gives phase response)
- Harmonic Analysis Function (PLL synchronization circuit) (Voltage, Current and Power)
- Time base for frequency measurement

This includes up to 170 calibration points for one element.

High frequency Power calibration system



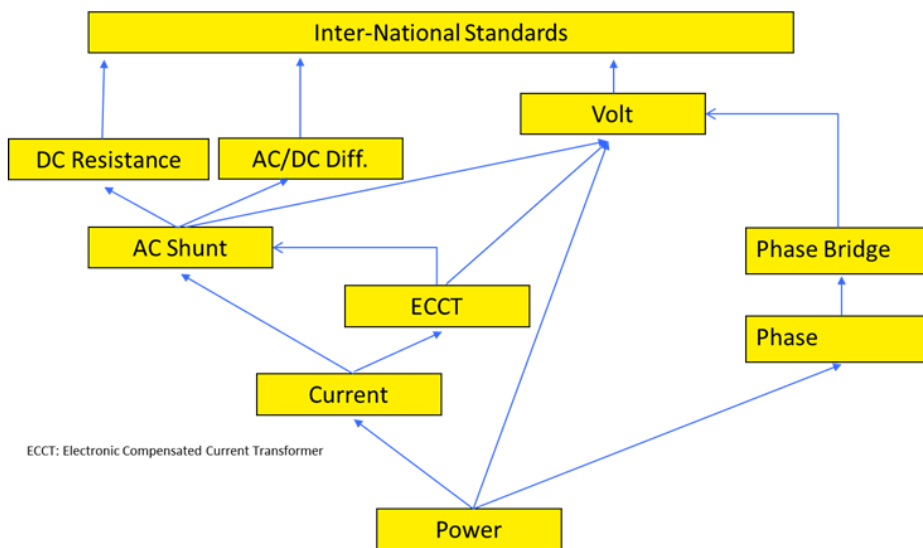
13

Copyright© Yokogawa Meters & Instruments Corporation

Precision Making

High frequency Power calibration system

Yokogawa Power Traceability 100 KHz



14

Copyright© Yokogawa Meters & Instruments Corporation

Precision Making

Test&Measurement

YOKOGAWA ◆

Yokogawa European Standards Laboratory

Accreditation granted by the Dutch Accreditation Council (RvA) in 2015.
Including power calibration up to 100 kHz!

Download the scope from: <https://www.rva.nl/scopes/details/K164>



15

Copyright© Yokogawa Meters & Instruments Corporation

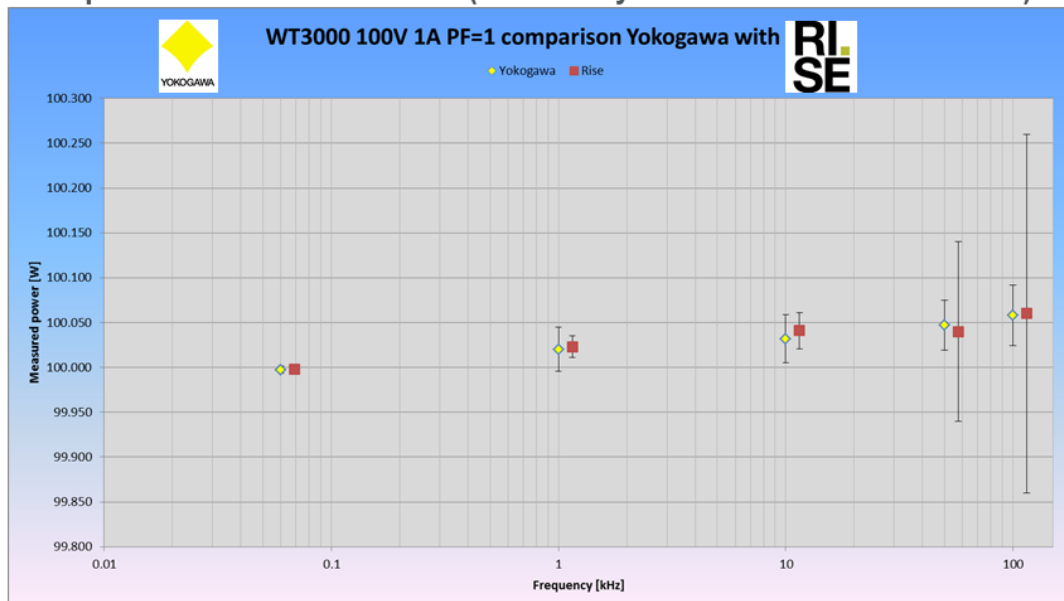
Precision Making

Test&Measurement

YOKOGAWA ◆

Yokogawa European Standards Laboratory

Comparison Power Calibration (mandatory for accredited laboratories)



16

Copyright© Yokogawa Meters & Instruments Corporation

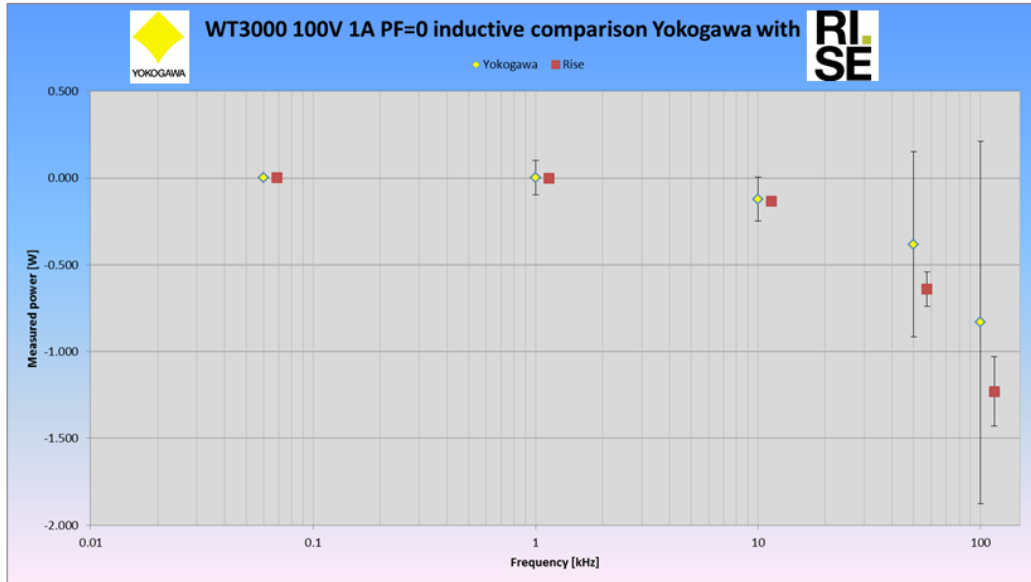
Precision Making

Test&Measurement

YOKOGAWA ◆

Yokogawa European Standards Laboratory

Comparison Power Factor 0 up to 100 kHz World First!



17

Copyright© Yokogawa Meters & Instruments Corporation

Precision Making

Test&Measurement

YOKOGAWA ◆

Conclusion

- Check carefully if 50 – 60 Hz power Calibration is adequate for your application.
 - Select a Calibration laboratory that have the correct capability for your application. (amplitudes, phase and uncertainties)
 - Check for an accredited laboratory.
- The European Standards Laboratory of Yokogawa in Amersfoort has proven their capability at DC, 10Hz to 100 kHz power calibrations.

**The
Precision
Makers**

18

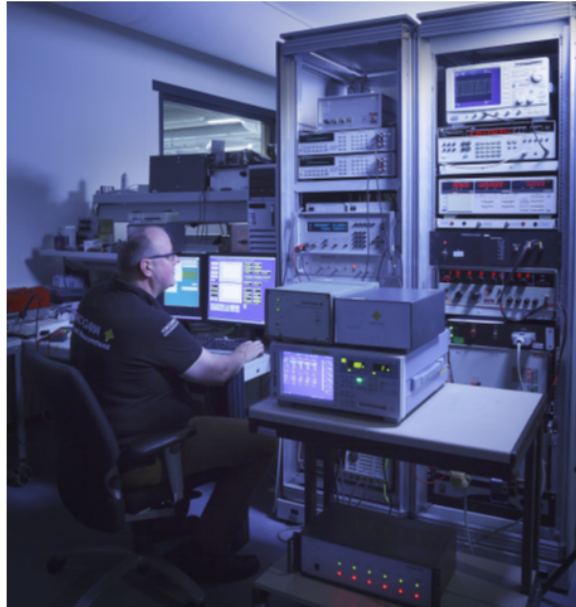
Copyright© Yokogawa Meters & Instruments Corporation

Precision Making

Test&Measurement

YOKOGAWA ◆

Questions?





Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**
Nationales Metrologieinstitut

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: (0531) 592-93 21
Fax: (0531) 592-30 08
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de

Vertrieb:

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH

Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen

Telefon: (04 21) 369 03-0
Fax: (04 21) 369 03-63
www.schuenemann-verlag.de