

Messung elektrischer Energie – Grundlagen und Erfahrungen

(Measurement of electrical energy – fundamentals and experiences)

Paetzold, J.¹

¹ TU Chemnitz, Professur für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

Abstract

Die gesellschaftliche Notwendigkeit zum effizienteren Umgang mit der begrenzten Ressource Energie führt zu vielfältigen Aktivitäten zur Verbesserung der Energieeffizienz. Eine Grundlage zur Identifizierung von Energieverlusten sowie zum Nachweis von Effizienzmaßnahmen bildet die Messung energetischer Größen, wobei die elektrische Energie hierbei eine Schlüsselrolle spielt. Der vorliegende Beitrag erläutert die notwendigen theoretischen Grundlagen sowie die Anwendung spezifischer, im Spitzentechnologiecluster eniPROD eingesetzter Messtechnik. Ausgewählte Beispiele von Messungen und Messergebnissen veranschaulichen die Theorie und verdeutlichen, dass die Messung elektrischer Energie einiges an Fehlerpotenzial und sicherheitstechnischem Aufwand birgt.

The growing awareness of the people for a more efficient use of the limited energy resources leads to numerous and various activities seeking for energy efficiency improvements. A basis for the identification of energy losses and energy efficiency improvement potentials is the measurement of energy values, in particular the ones of electrical energy. In this regard, the objectives of this article are the explanation of the theoretical basics of electrical energy and the presentation of techniques used in the Cluster of Excellence eniPROD for electricity measurements. With the help of examples, the theory aspects are described and the potential of errors in and the safety-related efforts for measurements are exemplified.

Keywords:

elektrische Energie, Grundlagen der Messung, eniPROD

electrical energy, basics of measurement, eniPROD

R. Neugebauer, U. Götze, W.-G. Drossel (Hrsg.), *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Tagungsband zum 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD, *Wissenschaftliche Scripten*, Auerbach, 2013.
URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-109067>

1 Einleitung

Ein besonders wichtiges Handlungsfeld zur Verbesserung der Energieeffizienz stellt die Produktionstechnik dar und wird deshalb innerhalb des Spitzentechnologieclusters eniPROD in ihrer Vielschichtigkeit betrachtet. Erst die genaue Kenntnis bestehender Energieflüsse ermöglicht es, Energieverluste zu identifizieren sowie Maßnahmen zu deren Minimierung zu entwickeln und deren Wirksamkeit nachzuweisen. Die Basis dafür bildet die exakte Messung energetischer Kenngrößen, wobei die elektrische Energie in den betrachteten Prozessen und Anlagen eine Schlüsselrolle spielt. Um zu belastbaren Messergebnissen zu gelangen, ist es erforderlich, über die notwendigen theoretischen Grundlagen zu verfügen, die vorhandene Messtechnik richtig anzuwenden sowie mögliche Fehlerquellen und Sicherheitsrisiken zu kennen und zu vermeiden.

Worin bestehen nun die Schwierigkeiten der elektrischen Messung bestehender Maschinen und Anlagen? Ende des 19. Jahrhunderts setzte sich vor allem im Zuge der Elektrifizierung von Städten bzw. ganzen Regionen das Konzept des Wechselstroms (AC) gegenüber dem des Gleichstroms (DC) durch, da Wechselstrom in den damals neuartigen Transformatoren sehr einfach auf verschiedene, auch höhere Spannungsebenen transformiert werden konnte. Es war somit möglich, Strom zentral zu erzeugen, auf hohen Spannungsniveaus verlustarm zu transportieren und ihn anschließend vor Ort auf die benötigte Spannungsebene des jeweiligen Verbrauchers zu transformieren. Dieses Prinzip führte zur weltweiten Verbreitung von Wechselstromnetzen.

Der Wechselstrom unserer Drehstromnetze bringt einige Besonderheiten wie Momentan- und Effektivwerte sowie Phasenverschiebungen oder für Nicht-Elektrotechniker so „mysteriöse“ Größen wie Scheinleistung, Blindenergie oder Oberschwingungen mit sich, welche sowohl bei Messungen als auch bei energetischen Betrachtungen beachtet werden sollten. Zudem kann gerade Blindenergie schnell zum Kostenfaktor werden.

In Abschnitt 2 wird zunächst auf einige Grundlagen wie Begriffe und Berechnungsvorschriften eingegangen, um in Abschnitt 3 die praktische Anwendung und Einsatzgebiete der verwendeten und z. T. speziell entwickelten Messtechnik zu erläutern sowie einige Sicherheitsaspekte aufzugreifen. Abschnitt 4 zeigt einige ausgewählte Messergebnisse, welche die Bedeutung der Aussagen der vorangegangenen Kapitel unterstreichen.

2 Grundlagen zur Messung elektrischer Energie

2.1 Momentan- und Effektivwerte

Vorab sei erwähnt, dass im Projekt eniPROD vorwiegend digitale Messtechnik eingesetzt wird. Die damit gemessenen physikalischen Größen sind die Momentanwerte für Spannung $u(t)$ und Strom $i(t)$ (vgl. Bild 2-1).

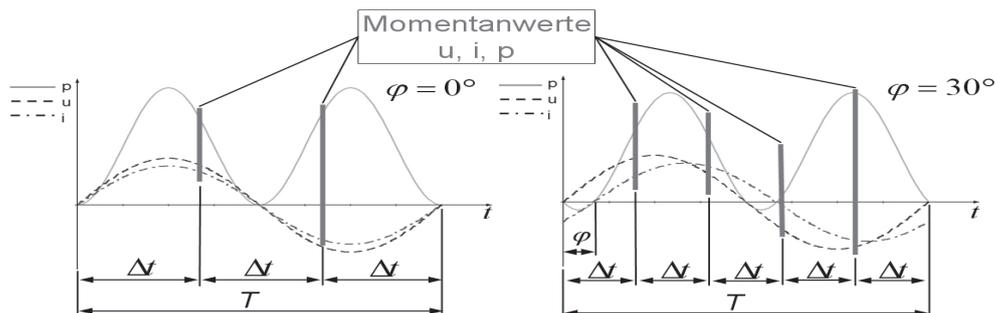


Bild 2-1: Momentanwerte für Spannung, Strom und Leistung

Alle weiteren elektrischen Kenngrößen sind auf diesen Messwerten basierende Rechengrößen. So liefert

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (1)$$

durch Multiplikation von u und i die nur in diesem Augenblick aufgenommene/ abgegebene Momentanleistung p .

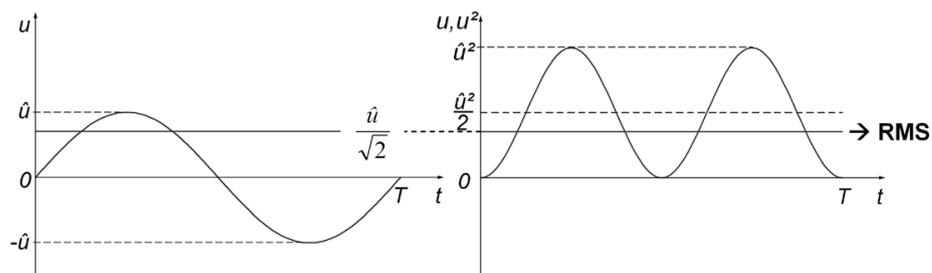


Bild 2-2: quadratischer Mittelwert (RMS) für Spannung

Wechselstrom setzt sich aus zeitlich veränderlichen Größen zusammen, welche sinusförmig periodisch um den Nullwert pendeln. Da eine einfache, arithmetische Mittelwertbildung zwischen den positiven und negativen Werten stets Null ergeben würde, müssen für Strom und Spannung Effektivwerte berechnet werden (vgl. Bild 2-2). Effektivwerte sind quadratische Mittelwerte (RMS, engl. Root Mean Square) und stellen zu Gleichstrom und -spannung äquivalente Werte dar, was eine Vergleichbarkeit ermöglicht. Während einige Messinstrumente aufgrund ihrer Konstruktionsweise diese Effektivwerte anzeigen können, müssen bei der

eingesetzten digitalen Messtechnik n Einzelwerte mit möglichst konstantem Zeitabstand Δt innerhalb einer Periode T aufgezeichnet werden, um daraus Effektivwerte nach der Gleichung

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T (u(t))^2 dt} \quad (2)$$

zu berechnen (nach [1]). Die Berechnung gilt für Spannung (U_{eff}) und Strom (I_{eff}) gleichermaßen. Der Effektivwert für eine beliebige Zeitspanne der Länge $n \cdot \Delta t$ berechnet sich wie folgt

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (3)$$

Diese Zeitspanne bzw. Integrationszeit entspricht dem Aktualisierungsintervall der Messung (ein ausgegebener Messwert je Zeitspanne) und kann an den meisten Messgeräten eingestellt werden. Die Anzahl der aufgenommenen Momentanwerte während einer Zeitperiode entspricht der Abtastrate und ist oft eine gerätespezifische Konstante. Wie Bild 2-1 zudem veranschaulicht, liefert eine höhere Abtastrate ein genaueres Abbild des Strom- bzw. Spannungsverlaufes. Je nach möglicher Abtastrate, d. h. Diskretisierungsintervall des Signals, steht somit eine unterschiedliche Anzahl digitaler Momentanwerte für Strom u und Spannung i zur Berechnung weiterer Größen zur Verfügung. Dabei sollten die Effektivwertberechnung für U und I sowie die Leistungsberechnung im selben, festgelegten Integrationszeitraum erfolgen.

2.2 Wirk-, Blind- und Scheinleistung

Die Wirkleistung P kann nach [1] durch arithmetische Mittelwertbildung

$$P = \overline{p(t)} = \overline{u(t) \cdot i(t)} \quad (4)$$

oder Integration der Momentanleistung p innerhalb einer Zeitperiode T

$$P = \frac{1}{T} \int_T (u(t) \cdot i(t)) dt \quad (5)$$

berechnet werden. Durch Aufsummierung dieser Wirkleistungen P ergibt sich die Wirkenergie eines Zeitraums T_0 bis T_n

$$E = W = \int_{T_0}^{T_n} P(t) dt, \quad (6)$$

welche in den Diagrammen in Bild 2-3 als dunkelgraue Flächen unter der P-Kurve dargestellt ist. Die kleinen, hellgrau dargestellten Flächen sind dabei negative, also rückfließende Energien, welche mathematisch von der Gesamtwirkenergie abziehen sind und deshalb als „Platzhalter“ unter der positiven Wirkleistungskurve dargestellt wurden.

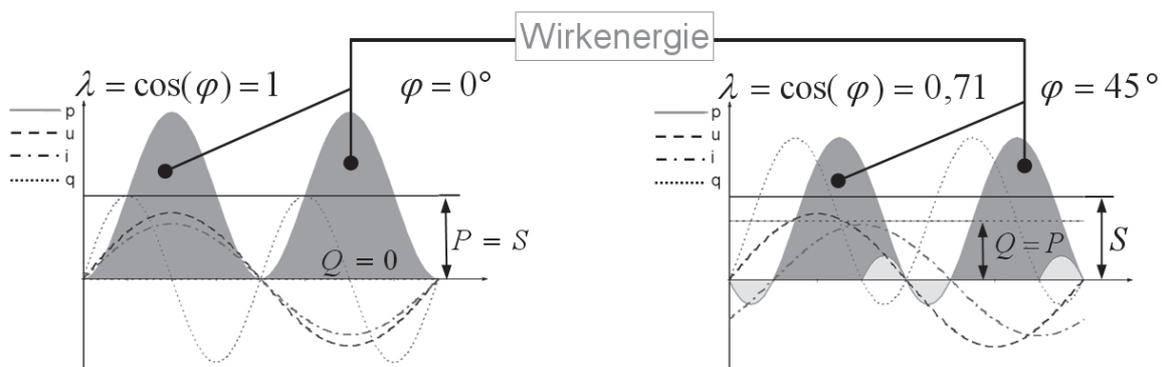


Bild 2-3: Blind- und Wirkenergie bei Phasenverschiebung 0° und 45°

Das Produkt aus U_{eff} und I_{eff} (7) liefert ebenfalls eine Leistung, welche als Scheinleistung S bezeichnet wird:

$$S = U_{eff} \cdot I_{eff} \quad (7)$$

Bei Gleichstromanwendungen entspricht die Scheinleistung der Wirkleistung. Wie die Diagramme in Bild 2-1 und Bild 2-3 bereits andeuten, schwingen in Wechselstromnetzen Spannung und Strom nicht immer in gleicher Phasenlage. Zu dieser Phasenverschiebung φ (vgl. Bild 2-1) kommt es infolge kapazitiver (Spannung eilt Strom nach – negativer Phasenwinkel) oder induktiver (Strom eilt Spannung nach – positiver Phasenwinkel) Lasten, in denen Energie (zwischen-) gespeichert werden kann, ohne in Arbeit umgesetzt zu werden. Diese zwischen Erzeuger und Verbraucher pendelnde Leistung wird als Pendelleistung, Verschiebungsblindleistung (Q_V) oder meist vereinfacht nur als Blindleistung Q bezeichnet und, analog zu P , durch den arithmetischen Mittelwert bestimmt, der sich bei einer Phasenverschiebung um $+90^\circ$ (induktiv) bzw. -90° (kapazitiv) ergeben würde.

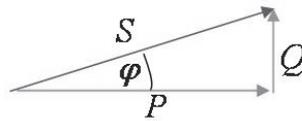


Bild 2-4: Vektordarstellung P , Q , S und φ

Das Verhältnis zwischen P , Q und S ist, wie Bild 2-4 zeigt, ähnlich einem Kräftedreieck darstellbar. Die Vektoren für Blind- und Wirkleistung stehen dabei senkrecht aufeinander (90°), während sich die Scheinleistung aus der geometrischen Summe ergibt. Die Scheinleistung ist demnach immer größer oder gleich der Wirk- oder Blindleistung, weshalb die Netzauslegung auf ihrer Grundlage erfolgt. Als Anschlusswert für Verbraucher in Wechselstromnetzen wird stets die Scheinleistung in der Einheit VA angegeben.

Wird die Blindleistung über die geometrische Subtraktion aus Wirk- und Scheinleistung berechnet

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (8)$$

ist keine Aussage über ihren Charakter (kapazitiv oder induktiv) möglich. Mit dem Wissen um die Phasenverschiebung sinusförmig schwingender Wechselströme und -spannungen vorausgesetzt, ist auch eine Berechnung von P (9) und Q (10) über die Effektivwerte von U und I möglich (nach [1]):

$$P = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi \quad (9)$$

$$Q = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \sin \varphi \quad (10)$$

Weitere wichtige Kennwerte sind die Leistungsfaktoren λ und $\cos(\varphi)$, welche das Verhältnis von Wirk- zu Scheinleistung angeben, wobei

$$\lambda = \frac{|P|}{S} \quad (11)$$

allgemein gilt, und für sinusförmige Spannungen und Ströme

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S}, \quad (12)$$

da in diesem Fall der Leistungsfaktor dem Cosinus des Phasenwinkels entspricht. Da die Scheinleistung nach Bild 2-4 nie kleiner als die Wirkleistung sein kann, sind Leistungsfaktoren nie größer als 1.

Die Auswirkungen von Phasenverschiebungen auf P und Q sowie deren zeitliche Verläufe p und q verdeutlichen ebenfalls die Diagramme in Bild 2-3. Liegen u und i in Phase, so sind Wirk- und Scheinleistung gleich groß und die Blindleistung Null. Eine Phasenverschiebung von 30° entspricht einem Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ von 0,87 (mittleres Diagramm in Bild 2-3) und ist durchaus normal für kleine bis mittlere, industriell eingesetzte Elektromotoren. Dabei erreicht die Blindleistung (gepunktete Linien) ca. 58 % der Wirkleistung. Bei einem $\cos(\varphi)$ von 0,7 ($\varphi = 45^\circ$) sind Wirk- und Blindleistung bereits gleich groß (rechtes Diagramm in Bild 2-3) und bei kleinen Elektromotoren nicht ungewöhnlich. Bei einer (theoretischen) Phasenverschiebung von 90° gibt es nur noch Blindleistung und keine Wirkleistung mehr.

Blindleistung belastet das Netz ohne Nutzarbeit zu verrichten. Sie erfordert dadurch teurere, leistungsstärkere Stromnetze, führt zu höheren Wärmeverlusten in den Leitungen und kann vom Energieversorger in Rechnung gestellt werden. Blindleistung kann jedoch kompensiert werden, indem bspw. der durch Elektromotoren erzeugten induktiven Last eine durch Kondensatoren produzierte kapazitive Last entgegenwirkt.

2.3 Oberschwingungen und Verzerrungsblindleistung

Neben den allgemeinen Eigenschaften elektrischer Energie soll auf ein weiteres Merkmal verwiesen werden, welches in der Praxis durch den zunehmenden Einsatz von Frequenzumrichtern an Bedeutung gewinnt. Bild 2-5 zeigt ein Beispiel für die Messung in zwei Leitern am Hauptanschluss einer Werkzeugmaschine (WZM). Während das Spannungssignal einen fast perfekten Sinus zeichnet, ist der Strom deutlich verzerrt. Diese von der Grundschiwingung abweichenden Frequenzanteile werden als Oberschwingungen bezeichnet und können per Fourier-Analyse ermittelt werden. Das sich daraus ergebende Frequenzspektrum ist ebenfalls dargestellt. Die mit jeweils etwa 5,5 A größte Amplitude liegt erwartungsgemäß bei der Grundschiwingung (50 Hz).

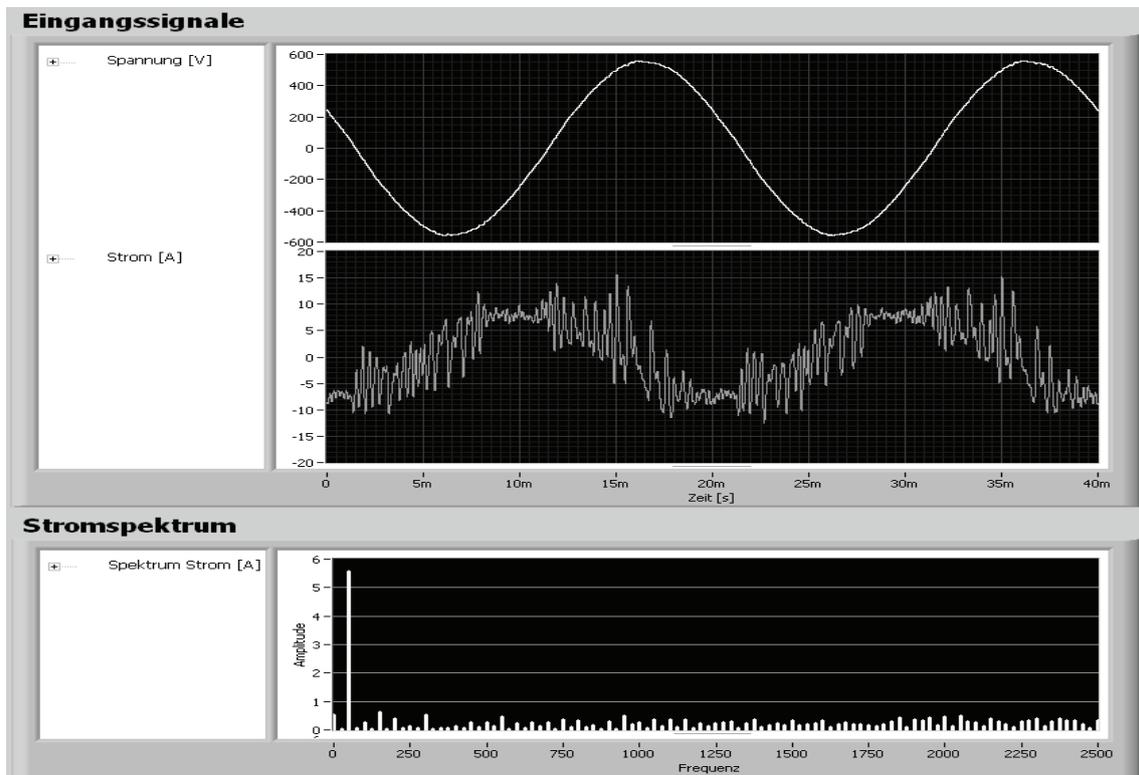


Bild 2-5: Verzerrungsströme und Stromspektrum

Die Vielfachen dieser Netzfrequenz (100, 150, 200, ... Hz) werden als „Harmonische“ der Grundschwingung bezeichnet und sind in Bild 2-5 deutlich an der erhöhten Amplitude erkennbar. Frequenzen dazwischen stellen „Zwischenharmonische“ dar. Der Anzeigewert bei 0 Hz ist der Gleichstromanteil. Oberschwingungen führen zur Verzerrungsblindleistung Q_D , die wie folgt berechnet werden kann:

$$Q_D = U_{eff} \cdot I_{verzerr} = U_{eff} \cdot \sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2} \quad (13)$$

Sie erweitert die Berechnung der Scheinleistung S um eine weitere Größe, führt zur Gleichung

$$S = \sqrt{P^2 + Q_V^2 + Q_D^2} \quad (14)$$

und ist mittels dreidimensionalem Vektorbild darstellbar (vgl. Bild 2-6), wobei S_V für die Scheinleistung der reinen Verschiebungsblindleistung Q_V der Grundschwingung steht, weshalb letztere auch als Grundschwingungsblindleistung bezeichnet wird.

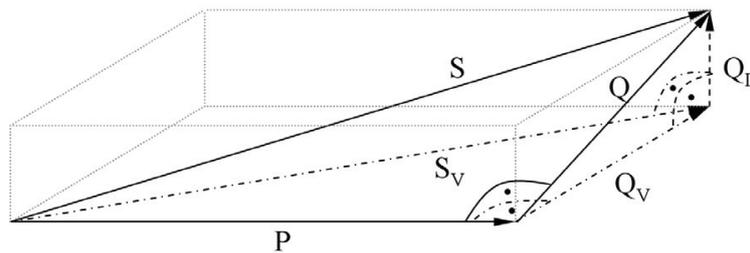


Bild 2-6: Vektordarstellung Scheinleistung S mit Verzerrungsblindleistung Q_D nach [2]

Das Verhältnis zwischen den aufsummierten Leistungen der Oberschwingungen Q_D (nach EN 50160 [3] werden die 2. bis 40. Harmonische berücksichtigt) und der Leistung der Grundschwingung P wird als Total Harmonic Distortion (THD) bezeichnet und oft in Prozent angegeben. Wie die Verschiebungsblindleistung Q_V der Grundschwingung (50 Hz) ist auch die Verzerrungsblindleistung keine Wirkleistung. Sie verringert die leistbare Arbeit und verursacht zusätzliche Wärmeverluste in den Leitern. Darüber hinaus können Oberschwingungen das Laufverhalten und den Wirkungsgrad von Elektromotoren negativ beeinflussen und elektronische Schaltungen stören.

2.4 3-phasiges Niederspannungsdrehstromnetz

Bild 2-7 zeigt den grundlegenden Aufbau eines normalen Niederspannungsdrehstromnetzes. Das Leitungsnetz (in Bild 2-7 links) besteht aus den drei Strom führenden Leitern L1, L2, L3 (auch Phasen genannt), einem Nullleiter N (Nullleiter) und einem Schutzleiter PE. Dies sind die 5 Pole einer Drehstromsteckdose. Die maximale Spannung \hat{u} zwischen den Leitern L1, L2 und L3 beträgt jeweils 565 V, was einem Effektivwert U_{eff} von 400 V entspricht. Zwischen L1, L2, L3 und dem Nullleiter gilt jeweils $\hat{u} = 325$ V und $U_{eff} = 230$ V. Die Phasenlage der drei Leiter ist dabei um jeweils 120° versetzt.

Wie die Darstellung in Bild 2-7 rechts veranschaulicht, bildet der Nullleiter N den Sternpunkt. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit einer Dreieckschaltung, bei der es keinen Sternpunkt gibt. In dieser Schaltungsart können aufgrund des höheren Spannungsniveaus (400 V zu 230 V) größere Leistungen übertragen werden, weshalb größere Maschinen oft auf diese Weise betrieben werden. Leitungssysteme mit Nullleiter werden auch als 4-Leiter-Systeme, ohne Nullleiter als 3-Leiter-Systeme bezeichnet. Der Schutzleiter PE sollte stets vorhanden sein.

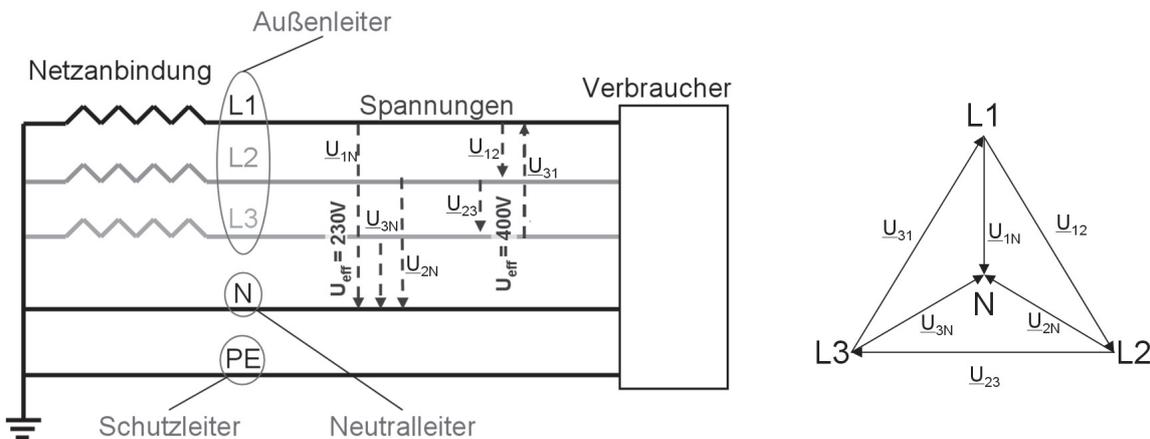


Bild 2-7: 3-phasiges Niederspannungsdrehstromnetz

Die oben aufgeführten Gleichungen zur Leistungs- und Energieberechnung beziehen sich jeweils nur auf einen spannungsführenden Leiter. Die Gesamtleistung in einem mehrphasigen Netz ergibt sich durch Summation der Einzelleistungen der Leiter. Dies gilt gleichermaßen für P , Q , und S .

3 Anwendung der elektrischen Messtechnik

3.1 Spannungsmessung

Die Messung der Spannung ist nur durch einen direkten Abgriff möglich, d. h., es muss ein Kontakt mit der unisolierten Ader des zu messenden Kabels hergestellt werden. Deshalb ist es notwendig, sich mit dem Gefährdungspotenzial elektrischer Spannungen auseinander zu setzen. Spannungen kleiner als 42 V werden als Kleinspannungen bezeichnet und als ungefährlich eingestuft. Höhere Spannungen bergen bereits gesundheitliche Risiken. Die in unseren normalen Niederspannungsdrehstromnetzen¹ vorkommenden Spannungen von fast 600 V können tödlich sein. Deshalb ist im Allgemeinen zum Anschluss der Spannungsmessung eine autorisierte Elektrofachkraft hinzuzuziehen. Sind die zu untersuchenden Objekte per CEE-Stecker an das Drehstromnetz angeschlossen, stehen jedoch Lösungen zur Verfügung, mittels dazwischen gestecktem „Messkoffer“ die Messungen (Strom und Spannung) gefahrlos durchzuführen.

Spannung führende Messkabel werden meist mit Sicherheitssteckern an das Messgerät angeschlossen und sollten zusätzlich mit einem FI-Schutzschalter für sehr kleine Auslöseströme abgesichert werden. Ist ein Messabgriff mit Krokodil-

¹ Der Begriff „Niederspannung“ umfasst Spannungen zwischen 42 V und 1.000 V.

klemmen oder Abgriffsklemmen (Prinzip „Zuckerzange“) nicht möglich und müssen deshalb Messkabel bspw. am Hauptanschluss einer WZM verschraubt werden, ist u. U. eine gesonderte Klemmleiste anzubringen, da Kabel verschiedener Querschnitte aus Sicherheitsgründen nicht gemeinsam geklemmt werden dürfen.

Eine Alternative zum Spannungsabgriff ist eine CEE-Steckdose, da in einem Stromkreis die Spannung an jeder Stelle (annähernd) gleich ist. Dabei muss sichergestellt sein, dass sich die CEE-Steckdose und die zu untersuchende Anlage im gleichen Stromkreis (Unterverteilung) befinden. Zu beachten ist zudem die Phasenlage, d. h., dass Spannung und Strom am jeweils selben Leiter gemessen werden (sonst + oder - 120° Phasenverschiebung). Deshalb wurde innerhalb des Projektes eniPROD ein Messkoffer zum einfachen Spannungsabgriff entwickelt und hergestellt. Er zeichnet sich aus durch:

- 16- und 32-Ampere-CEE-Stecker und -buchsen inkl. Leitungsschutzschalter,
- eine 230-V-Steckdose (z. B. zur Stromversorgung der Messgeräte),
- Sicherheitsbuchsen für Messspannungen,
- einen integrierten FI-Schalter für Messspannungen und
- die integrierte Phasenlageprüfung mittels berührungslos arbeitenden Sensors.

Dieses Equipment soll es ermöglichen, Messungen ohne langwieriges Abschalten von Produktionsanlagen und ggf. sogar ohne Elektrofachkraft durchführen zu können.

Eine weitere Alternative wäre, auf die Spannungsmessung ganz zu verzichten und stattdessen 230 V bzw. 400 V Netzspannung und einen idealen Leistungsfaktor von $\cos(\varphi) = 1$ anzunehmen. Messungen haben jedoch gezeigt, dass Leistungsfaktoren unerwartet stark davon abweichen und die Spannungen in verschiedenen Betriebsnetzen um mehr als 10 V schwanken können, was große Messunsicherheiten mit sich bringen würde.

3.2 Strommessung

Die direkte Strommessung, bei der das Messgerät zum Verbraucher in Reihe geschaltet wird, sei der Vollständigkeit halber erwähnt, hat aber für die anstehenden Messaufgaben praktisch keine Bedeutung. Vielmehr werden indirekte Stromwandler eingesetzt, welche den stromführenden Leiter umschließen.

Die Messung von Wechselströmen nutzt das magnetische Feld des Leiters. Dies induziert im ringförmigen Messwandler eine Spannung, welche je nach Wandlertyp als auswertbare(r) Messspannung oder -strom ausgegeben wird. Sollen Wechselspannungen mit sehr hohen und/oder sehr niedrigen Frequenzen (oder auch Gleichspannungen) gemessen werden, so sind Messwandler mit anderen

physikalischen Messprinzipien erforderlich, welche meist eine eigene Stromversorgung benötigen.

Eine Auswahl an Messwandlern wie Strommessschlaufen, Stromzangen sowie geschlossene Stromwandler (von links nach rechts) ist in Bild 3-1 dargestellt. Die oft genauer messenden Stromwandler (in Bild 3-1 rechts) haben jedoch den Nachteil, dass der zu messende Leiter erst aufgetrennt bzw. ab- und wieder angeklemt werden muss.



Bild 3-1: Strommessschlaufen, Stromzange und geschlossener Stromwandler [4, 5, 6]

Stromwandler dürfen – mit Ausnahme sehr ungenauer Duplex-Stromzangen – immer nur eine Leitungsader umfassen, da sich die Magnetfelder mehrerer Leiter in einem Kabelstrang zu null aufheben. Darüber hinaus ist beim Anschluss auf die Stromrichtung zu achten (meist aufgedruckter Pfeil). An einem Verbraucher sollte die Leistung P positiv angezeigt werden, andernfalls ist der Stromaufnahme um 180° zu drehen.

Messzangen (vgl. Bild 3-1, Mitte) sind leicht zu handhaben und erfordern kein Auftrennen der Leitungen. Es ist jedoch stets auf die Genauigkeit der eingesetzten Messwandler im zu messenden Bereich zu achten. Eine Stromzange mit einem Messbereich bis 1.000 A wird bei Strömen von 2 A nicht mehr sehr genau sein. Kalibrierungsmessungen haben zudem gezeigt, dass mit verschiedenen Messsystemen erzielte Ergebnisse leicht um bis zu 10 % abweichen und somit bereits in der Größenordnung anvisierter Energieeinsparungen liegen können. Auch ist zu beachten, dass Messzangen eine eigene Phasenverschiebung verursachen, folglich das Messergebnis mit nicht vorhandenen Blindströmen verfälschen können. So hatten bspw. hochwertige Messzangen bei Kalibrierungsmessungen im mittleren bis oberen Messbereich weniger als 1° und am Messbereichsbeginn ca. 8° Phasenabweichung. Als ungünstigster Wert an einer minderwertigen Zange wurden 20° Phasenabweichung gemessen. Stehen keine Daten aus dem Kalibrierungsblatt zu Verfügung, kann eine einfache Überprüfung an einem rein ohmschen Verbraucher (Widerstand, Wasserkocher) durchgeführt werden.

3.3 Anschlussprinzipien und Messsysteme

Bild 3-2 zeigt einige Anschlussschemata. 1P1W (1 Leistung, 1 Leiter) und 3P4W (3 Leistungen, 4 Leiter) zeigen Beispiele für Messungen mit Nullleiter. 3 – Leiter-systeme ohne Nullleiter können mit der Methode 3P3W (3 Leistungen, 3 Leiter) oder in Aronschaltung gemessen werden, bei der aus zwei gemessenen Strangströmen und den jeweiligen Leiter-Leiter-Spannungen die dritte Phase errechnet wird. Einer der drei Leiter fungiert dann jeweils als „virtueller“ Nullleiter. Vor jeder Messung ist genau zu prüfen, um welche Anschlussart es sich handelt (gibt es einen Nullleiter bzw. fließt in diesem Strom?).

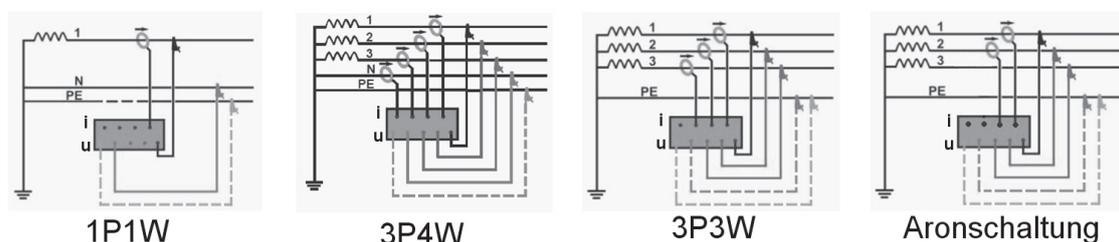


Bild 3-2: Anschluss- und Messprinzipien nach [6]

Eine weitere, nicht gesondert dargestellte Möglichkeit besteht darin, bei bekannter symmetrischer Last (vorab zu prüfen!) nur eine Phase zu messen und daraus die anderen beiden hochzurechnen. Dies ermöglicht theoretisch die Messung von drei Verbrauchern mit nur einem Drehstrom-Messgerät.

Die Messsignale der Spannungs- und Stromaufnehmer müssen von geeigneten Messgeräten aufgezeichnet, ausgewertet und gespeichert werden. Bild 3-3 zeigt dafür links einige prinzipielle Möglichkeiten der Messdatenerfassung am Beispiel einer spannenden WZM und rechts Messgeräte für den mobilen Einsatz. Das direkte Auslesen von Leistungsdaten (Reglerdaten) aus der Maschinensteuerung ist zwar eine sehr elegante Lösung mit wenig gerätetechnischem Aufwand, jedoch werden nur Daten der geregelten Antriebe geliefert (kein Gesamtanschluss, keine Hilfsaggregate). Zudem liest die Software Steuerungsdaten nicht nur aus, sondern kann diese in einigen Fällen auch verändern, weshalb von einem Einsatz in der Praxis eher abgesehen und diese Möglichkeit der Datenerfassung derzeit nur als Ergänzung in Laborversuchen eingesetzt wird.

Der Leistungsanalysator Yokogawa WT3000 ist das Messgerät mit der höchsten Genauigkeit, welches zur Verfügung steht, und wird deshalb u. a. zum Kalibrieren der Messwandler (z. B. Stromzangen) verwendet. Die minimale Integrationszeit beträgt 50 ms, welche zwar für viele Anwendungen ausreicht, jedoch nicht für hochdynamische Beschleunigungsvorgänge in kleineren WZM. Die drei verfügbaren Messkanäle ermöglichen zwar eine exakte Messung, jedoch nur an einer Messstelle (mit drei Phasen).

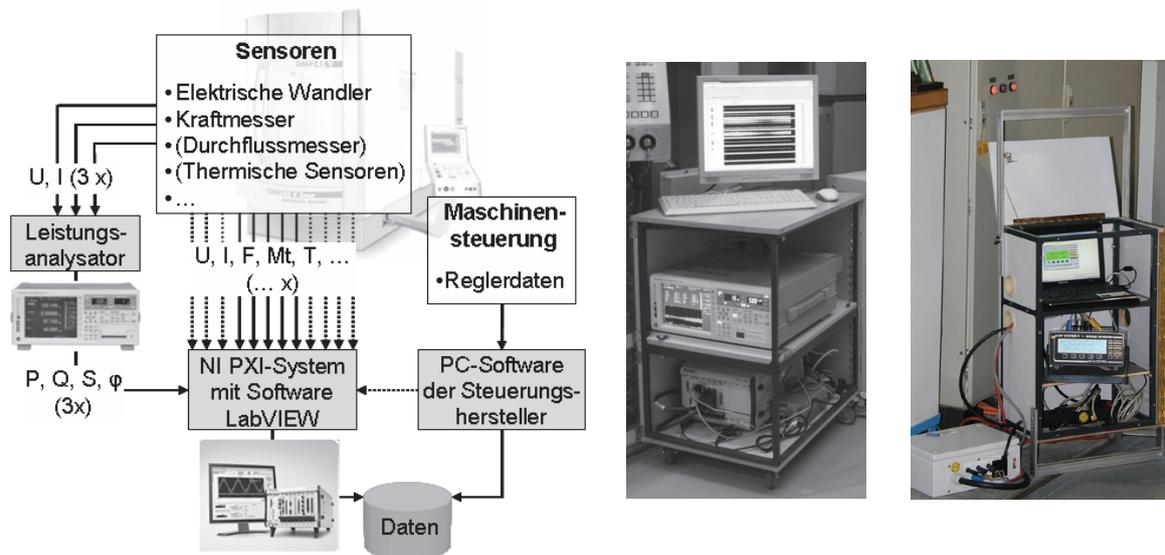


Bild 3-3: Einige Möglichkeiten und Geräte zur mobilen Messdatenerfassung [8, 9, 10]

Es wird deshalb weiterhin ein PXI-System mit Messkarten und der Software LabVIEW der Firma National Instruments eingesetzt. Es ermöglicht die zeitsynchrone Messung mit sehr hohen Abtastraten (bis 2,5 MS/s) an derzeit bis zu vier Messstellen in Aronschaltung sowie an bis zu vier weiteren Messstellen mit jeweils drei Stromaufnehmern. Zudem bietet das System beliebig programmierbare Integrationszeiten sowie ein Maximum an Flexibilität bei der Speicherung und Auswertung der Messdaten und ist auf weitere Sensoren bspw. zur Prozesskraft- oder Temperaturmessung erweiterbar.

Darüber hinaus stehen zusätzlich zwei kleinere, mobile und einfach handhabbare Messgeräte mit Integrationszeiten von minimal 1 s bzw. 3 s zu Verfügung, welche sich sehr gut für Langzeitmessungen über Tage und Wochen eignen.

4 Ausgewählte Messergebnisse

Bild 4-1 zeigt den Screenshot einer Messung mit dem PXI-System und der Software LabVIEW. Bei einer Abtastrate von 500.000 Samples pro Sekunde wurden 50.000 Werte über eine Zeitperiode von 0,1 s integriert, welche bei 50 Hz Netzfrequenz genau fünf Schwingungsperioden entspricht. Es wurden zwei Leiter in Aronschaltung gemessen.

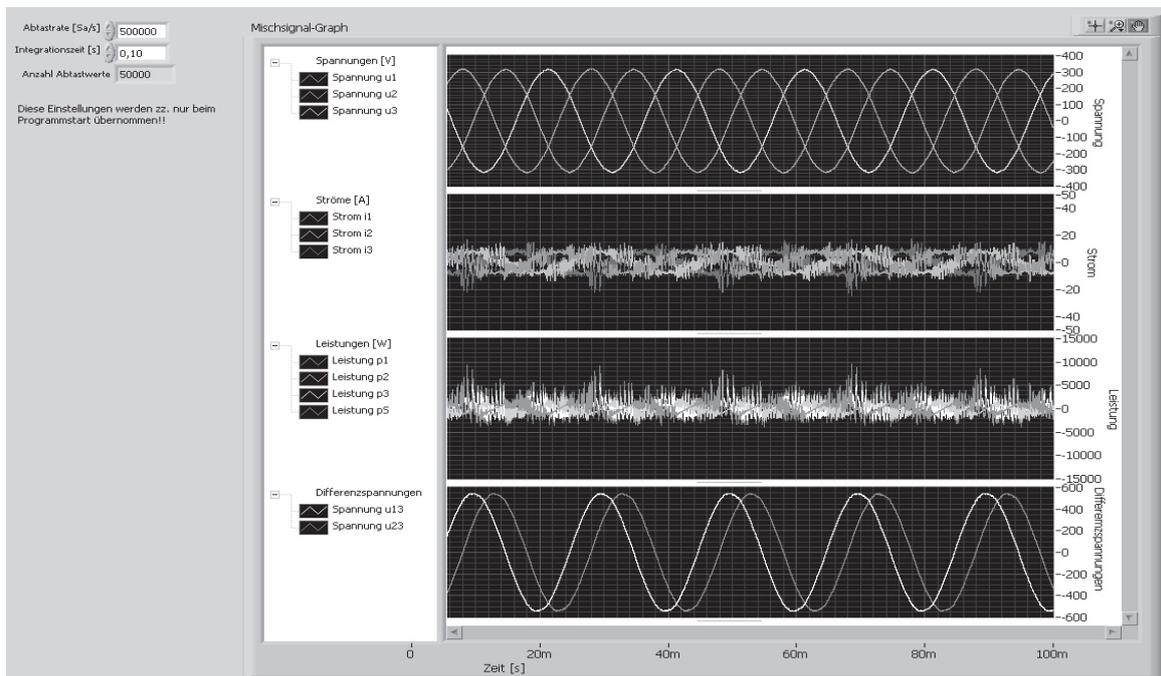


Bild 4-1: Oszillogramm u , i und p

Das untere Diagramm zeigt dafür die sinusförmigen Spannungsverläufe der Differenzspannungen L1-L3 und L2-L3 mit $\hat{u} = 565 \text{ V}$ (entspricht $U_{\text{eff}} = 400 \text{ V}$) über die Zeitspanne von 100 ms. Die beiden Phasen sind hier nur um 60° verschoben, da die Spannungszeiger zum Sternpunkt die 120° -Phasenwinkel halbieren (vgl. Bild 2-7 rechts). Im Folgenden wurden die Spannungen, dargestellt im obersten Diagramm, zu einem virtuellen Sternpunkt (Nulleiter) mit $\hat{u} = 325 \text{ V}$ (entspricht $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$) berechnet. Die sich aus der Berechnung ergebende Phasenlage von 120° ist dabei gut erkennbar. Die Stromverläufe u_1 bis u_3 weisen wieder hohe Anteile an Oberschwingungen auf, was sich auf die Wirkleistungsverläufe p_1 bis p_3 sowie die Summenleistung p_s auswirkt (mittlere Diagramme).

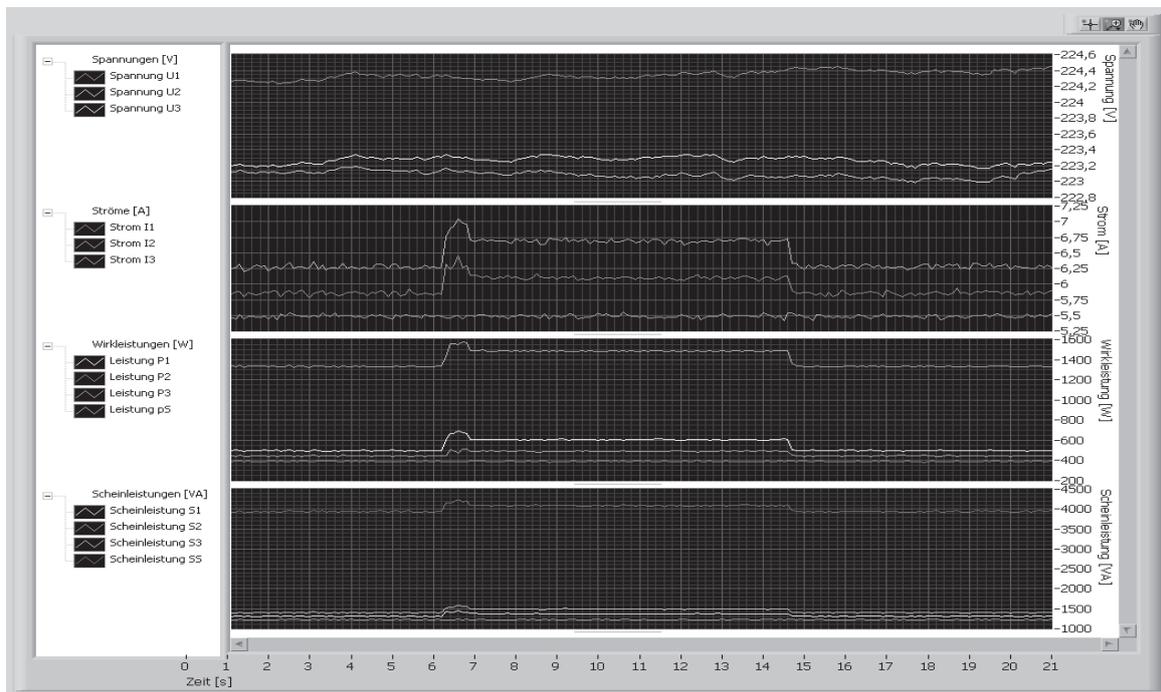


Bild 4-2: Einsatzgrenzen der Aronschaltung

Im Folgenden soll anhand eines Beispiels auf die Bedeutung der Wahl der richtigen Messmethode für ein belastbares Ergebnis bei der Leistungsmessung eingegangen werden. Bei der in Bild 4-2 abgebildeten Messung wurde während des Betriebszustandes Stand-by die Arbeitsraumbeleuchtung aus-, an- und wieder ausgeschaltet. Die Maschine ist prinzipiell in Dreieckschaltung (ohne Nullleiter) angeschlossen. Eine Ausnahme bildet nachweisbar die Arbeitsraumbeleuchtung, welche von einem Leiter gegen den Nullleiter (230 V) verschaltet ist. Es floss deshalb bei eingeschalteter Beleuchtung ein nicht erfasster Strom durch den Nullleiter und es kam zu einer fehlerhaften Berechnung des Stromes im dritten Leiter. Wie im Bild erkennbar ist, wurde für einen zweiten Leiter ein erhöhter Strom berechnet, obwohl nur ein Leiter belastet wurde. Eine Messung mit zwei Stromwandlern in Aronschaltung ist demnach am Gesamtanschluss dieser Maschine nicht zulässig. Selbst bei ausgeschalteter Maschinenbeleuchtung kann eine exakte Messung nicht gewährleistet werden, da möglicherweise weitere Verbraucher gleichermaßen angeschlossen sind.

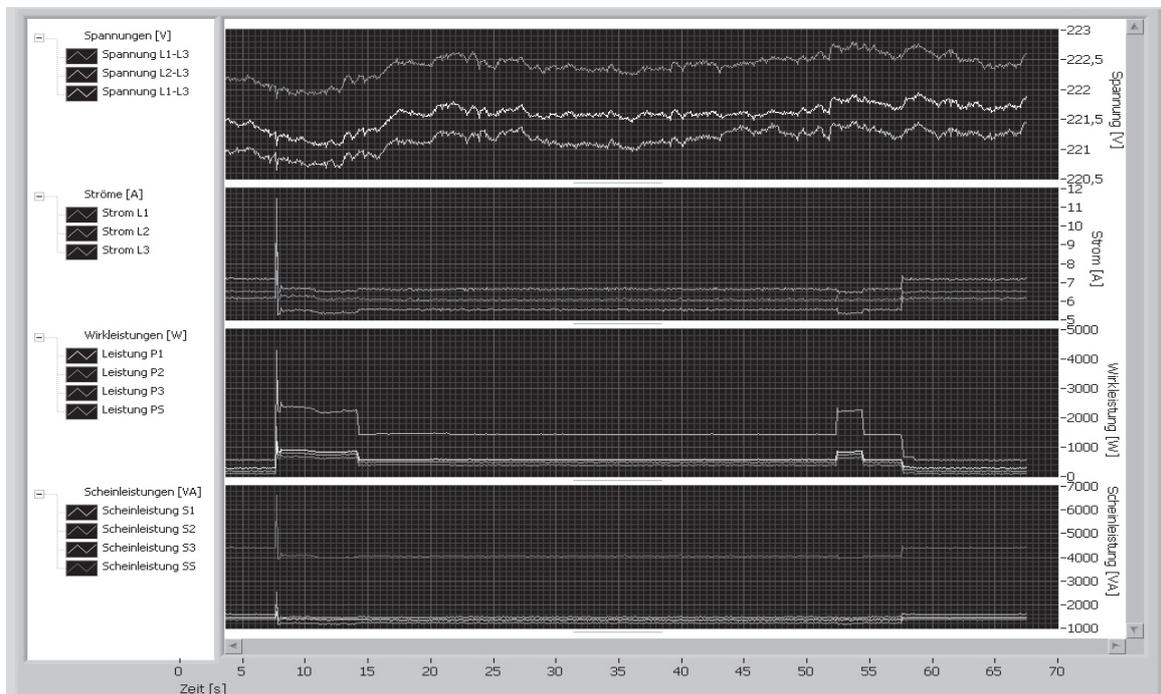


Bild 4-3: Steigende Wirkleistung bei sinkender Scheinleistung

Bild 4-3 verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen P , Q und S am Beispiel der Gesamtleistungsaufnahme einer WZM. Dabei wurden nacheinander die Betriebszustände Stand-by, Fertigungsbereit und wieder Stand-by durchfahren. Der Netzfilter am Ein-/Rückspeisemodul der geregelten Haupt- und Vorschubantriebe produziert so viel kapazitive Blindleistung, dass im Stand-by einer Scheinleistung von ca. 4,4 kVA eine Wirkleistungsaufnahme von ca. 600 W gegenübersteht. Wird der Betriebszustand Fertigungsbereit hergestellt, steigt die Wirkleistungsaufnahme auf ca. 1,4 kW, während die Scheinleistung auf ca. 4,0 kVA sinkt. Die im Betriebszustand Fertigungsbereit zugeschalteten Verbraucher, vor allem Elektromotoren der Pumpen und Lüfter, erzeugen so viel induktive Last, dass die kapazitive Blindleistung kompensiert wird und die Scheinleistung sinkt.

Es wird zum einen deutlich, wie unerwartet hoch die Blindleistungsbelastung des Netzes trotz relativ geringer Wirkleistungsaufnahme sein kann, und zum anderen, dass durch eine bewusste Auswahl oder gar Steuerung von Komponenten Blindlasten bereits auf Maschinenebene wirksam kompensiert werden können.

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden einführend wichtige Grundlagen der elektrischen Leistungs- und Energieberechnung zusammengestellt und dabei zentrale Begriffe wie Wirk-, Schein- und Blindleistung sowie Verzerrungsblindleistung anhand praktischer Messergebnisse an einer WZM veranschaulicht. Des Weiteren wurden die zur Verfügung stehende Messtechnik vorgestellt und Gefährdungspotenziale sowie Fehlerquellen bei deren Anwendung aufgezeigt. So birgt insbesondere die Spannungsmessung gesundheitliche Gefahren, welche das Hinzuziehen einer Elektrofachkraft und geeignete Sicherheitsmaßnahmen wie Sicherheitsstecker und FI-Schutzschalter erfordern. Eine Möglichkeit zur gefahrlosen Spannungsmessung stellt der speziell entwickelte Spannungsmesskoffer für 16- oder 32-A-CEE-Steckdosen dar, in welchen Sicherheitseinrichtungen sowie ein berührungslos und somit sehr sicher zu handhabender Phasenfinder integriert wurden. Bei der Auswahl der richtigen Stromwandler ist das Kalibrierdatenblatt unbedingt zu beachten. Stromwandler müssen über einen für die Messaufgabe passenden Messbereich und die entsprechende Genauigkeit verfügen, da anderenfalls Messfehler in der Größenordnung der nachzuweisenden Effizienzziele auftreten können.

Der Leistungsanalysator Yokogawa WT3000 arbeitet sehr genau, verfügt jedoch nur über eine minimale Integrationszeit von 50 ms. Das PXI-System in Verbindung mit der Software LabVIEW ermöglicht die gleichzeitige Messung sehr dynamischer Vorgänge an einer Vielzahl von Messstellen. Es wird hinsichtlich Bedienbarkeit und Performance laufend optimiert und um weitere Sensorik erweitert. Zusätzlich stehen zwei kleine Messgeräte (Integrationszeit 1 bis 2 s) für Langzeitmessungen zur Verfügung.

Ausgewählte Messergebnisse zeigen die praktische Anwendung des PXI-Systems und LabVIEW. Es werden die Messung und Berechnung eines Dreileitersystems mittels Aronschaltung und mögliche Fehlerquellen bei deren Einsatz aufgezeigt. Das dargestellte Zusammenspiel von Wirk- und Scheinleistung am Beispiel verschiedener Betriebszustände einer WZM verweist auf die mögliche Netzbelastung durch Blindleistung sowie Potenziale zu deren Kompensation.

Das Ziel dieses Aufsatzes war es, grundlegendes Wissen der elektrischen Energiemessung aufzubereiten und anhand von Beispielen für die Gefährdungspotenziale und Fehlerquellen zu sensibilisieren. Es ist somit ein praktischer Beitrag zum erfolgreichen Nachweis energieeffizienter Produktionssysteme und -prozesse geleistet worden.

Acknowledgment

Die Autoren danken der europäischen Union (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) und dem Freistaat Sachsen für die Förderung des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®).



Literaturangaben

- [1] Mühl, T.: *Einführung in die elektrische Messtechnik*, Verlag B.G. Teubner, Wiesbaden, 2006
- [2] Fischer, H. D.: *Bemerkungen zu Leistungsbegriffen bei Strömen und Spannungen mit Oberschwingungen*, *Archiv für Elektrotechnik* 64, Springer Verlag, Erlangen, 1982, S. 289-295
- [3] EN 50160:2010 + Cor. :2010: *Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen*, Beuth Verlag, Berlin, 2011
- [4] Chauvin-Arnoux Group. URL: www.chauvin-arnoux.com/ [11.04.2011]
- [5] Yokogawa Deutschland GmbH: URL: <http://tmi.yokogawa.com/de/products/digitale-leistungsanalysatoren/zubehr-fr-digitale-leistungsanalysatoren/751574-current-transducer/n> [11.04.2011]
- [6] GMC-I Messtechnik GmbH: URL: www.gossenmetrawatt.com/gmc/deutsch/produkte/zangenstromwandler.htm [11.04.2011]
- [7] HT Instruments GmbH: *PQA400 – PQA823 – PQA824 Betriebsanleitung*, 2007
- [8] Yokogawa Deutschland GmbH: URL: <http://tmi.yokogawa.com/de/products/digitale-leistungsanalysatoren/digitale-leistungsanalysatoren/wt3000-precision-power-analyzer/> [11.04.2011]
- [9] National Instruments: URL: <http://digital.ni.com/worldwide/germany.nsf/main?freadform> [17.03.2010]
- [10] Deckel Maho Seebach GmbH: *Prospekt Vertikale Bearbeitungszentren DMP 45 V linear und DMP 60 V linear*, 2005