

ENERGIEVERBRAUCHSMESSUNGEN IN DER PRAXIS

K. Palkowitz, Fischamend

W. Frey, Leobendorf

1. EINLEITUNG

Der Verbrauch elektrischer Energie auf Kläranlagen stellt einen wesentlichen Anteil der Betriebskosten der Abwasserreinigung dar. Im vorliegenden Beitrag soll der Aufgabenbereich „Messen der elektrischen Leistung“ besprochen werden. Gebräuchliche Antriebe werden mit Drehstrom (400V) angespeist. Die Ausführungen beschränken sich daher auf die Leistungsmessung im Drehstromnetz.

2. MESSORTE

Auf Abwasserreinigungsanlagen ist es wichtig, die Energie an mehreren Stellen zu messen. In der Praxis sollten mindestens in den Hauptverteilern, der mechanischen Stufe, der biologischen Stufe, der Schlammbehandlung und der Schlamm entwässerung, Energiemessungen installiert sein. Wenn Eigenstrom erzeugt wird, sollte auch in diesem Bereich die Energie gemessen werden. Ratsam ist es, vom Errichter der elektrischen Anlage ein Einlinienschema über die Energieverteilung mit deren Messstellen zu verlangen. In solchen Schemata kann man die Stromverteilung übersichtlich verfolgen, sodass es nicht zu einer Doppelzählung kommen kann. Die gemessenen Werte sind im Prozessleitsystem zu registrieren. Auf kleineren Kläranlagen, wo keine Datenregistrierung verfügbar ist, sind die Zählerstände regelmäßig abzulesen und im Betriebsprotokoll zu notieren.

3. BEGRIFFE

Die folgenden Ausführungen sind als kurze Einführung in das Thema zu verstehen. Für ausführliche Darstellungen muss auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen werden.

3.1 SPANNUNG

Das Formelzeichen für die elektrische Spannung ist das U , sie hat die SI-Einheit Volt [V]. Für industrielle und gewerbliche Anwendungen wird vorzugsweise Wechselspannung mit 400 Volt eingesetzt.

Stellt man sich Elektrizität als Fluss vor, so entspricht die Spannung dem Gefälle des Flusses, d.h. je größer das Gefälle, desto größer die Fließgeschwindigkeit.

3.2 STROM

Das Formelzeichen für den elektrischen Strom ist das I , er hat die SI-Einheit Ampere [A].

Stellt man sich Elektrizität als Fluss vor, so entspricht der Strom der Wasserführung des Flusses, d.h. dem Durchfluss.

3.3 WECHSELSPANNUNGSNETZ

Im Wechselspannungsnetz verändern sich Spannung und Strom periodisch in der Höhe und Polarität. Man spricht von Wechselspannung bzw. Wechselstrom. Zur Beschreibung dieser Wechselgrößen

werden die Frequenz, die Kurvenform und die Amplitude (der Maximalausschlag oder Scheitelwert) verwendet.

Eine wichtige Größe zur Beschreibung einer Wechselgröße ist der Effektivwert. Unter dem Effektivwert (englisch: root mean square - RMS) versteht man in der Elektrotechnik den quadratischen Mittelwert eines zeitlich veränderlichen Signals.

Zwischen dem Effektivwert U und dem Maximalwert (Scheitelwert) besteht, bei sinusförmigem Verlauf, folgender Zusammenhang:

$$\text{Effektivwert} = \frac{\text{Scheitelwert}}{\sqrt{2}} = 0,707 * \text{Scheitelwert}$$

Wird bei der Angabe von Wechselspannung keine zusätzliche Angabe gemacht, so ist immer der Effektivwert gemeint. Der Scheitelfaktor $\sqrt{2}$ entspricht in etwa dem Wert 1,41.

3.4 DREIPHASENWECHSELSTROMNETZ (DREHSTROMNETZ)

Dreiphasenwechselspannung besteht aus drei zeitlich versetzten Wechselspannungen, die ihren Maximalwert nacheinander, zu unterschiedlichen Zeitpunkten, erreichen. Dieser zeitliche Versatz wird durch die Phasenlage beschrieben.

Mit Dreiphasenwechselstrom wird ein gleichmäßiges Drehfeld erzeugt. Dieses Drehfeld ist die Basis für die Konstruktion von Drehstrommotoren. Ein typischer Vertreter ist die Drehstrom-Asynchronmaschine.

3.5 LEISTUNG

Das Formelzeichen für die elektrische Leistung ist das P, sie hat die SI-Einheit Watt [W]. In der Praxis ist das Kilowatt [kW] gebräuchlich.

In der Elektrotechnik wird zwischen Blindleistung, Wirkleistung und Scheinleistung (=geometrische Summe aus Wirk- und Blindleistung), unterschieden.

Für den Betreiber ist die Wirkleistung von Interesse, für diese bezahlt er auch. Bei großen Verbrauchern wird zusätzlich die Blindleistung gemessen. Sie belastet das Versorgungsnetz und wird von den Energieversorgungsunternehmen überwacht. Bei zu großer Überschreitung wird auch die Blindleistung vom EVU verrechnet. In solch einem Fall ist eine Kompensationsanlage wichtig. Die weiteren Ausführungen beziehen sich auf die elektrische Wirkleistung.

Im **Gleichspannungsnetz** berechnet man die elektrische Leistung (es gibt nur Wirkleistung) als Produkt aus Spannung mal Strom.

Im **Wechselspannungsnetz** sind die Werte, zufolge der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom, kleiner. Der „Umrechnungsfaktor“ auf die gleichzeitig wirkenden Anteile ist der $\cos \varphi$.

Im **Drehstromnetz** gibt es drei Stränge, von denen jeder einen gewissen Anteil an der Gesamtleistung hat. Die von einem Drehstrommotor aufgenommene elektrische Leistung kann nach folgender Gleichung (1) berechnet werden:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad \text{Glg. (1)}$$

3.6 ENERGIE (=ARBEIT)

Energie kann auch als gespeicherte Arbeit definiert werden. Die Begriffe Energie und Arbeit werden synonym verwendet. Es gibt verschiedene Erscheinungsformen von Energie, z.B.

- mechanische Energie: z.B. potentielle Energie (Lageenergie), Geschwindigkeitsenergie
- thermische Energie: z.B. Heißwasser
- chemische Energie: z.B. Methan im Faulgas
- elektrische Energie

Energie kann von einer Erscheinungsform in andere Formen umgewandelt werden. Typische Anwendung auf der Kläranlage: Eine Pumpe wird von einem Elektromotor angetrieben und fördert Wasser aus dem Kanal auf ein höheres Niveau – es wird elektrische Energie in mechanische Energie (Lage- und Geschwindigkeitsenergie) umgewandelt. Bei der Energieumwandlung treten immer Verluste auf!

Üblicherweise wird für die Energie das Formelzeichen E verwendet. Für mechanische Arbeit wird häufig W und für thermische Energie Q verwendet. Die Energie hat die SI-Einheit Joule [J] (sprich Dschul).

Für die mechanische Energie wird Newtonmeter (Nm) verwendet. Sie setzt sich aus den Einheiten Newton (N) für die Kraft und der Einheit Meter (m) für die Länge zusammen. Es gilt:

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$$

Für die thermische Energie trifft man auch heute noch häufig die Kalorie [cal] bzw. Kilokalorie [kcal] an. Für Umrechnungen gilt:

$$1 \text{ cal} = 4,19 \text{ J} \quad \text{bzw.} \quad 1 \text{ kcal} = 4,19 \text{ kJ}$$

Für die elektrische Energie wird die Maßeinheit Wattsekunde (Ws) verwendet.

$$1 \text{ Ws} = 1 \text{ J}$$

In der Energietechnik ist die Wattsekunde (Ws) eine zu kleine Einheit. Daher wird ein Vielfaches, die Kilowattstunde (kWh), angewendet. Für Umrechnungen gilt:

$$1 \text{ kWh} = 3.600.000 \text{ Ws} = 3.600.000 \text{ J}$$

In der folgenden Tabelle (1) sind die Umrechnungen zusammengefasst.

Tabelle 1: Umrechnung von Energien

Energie	J / Ws / Nm	kWh	kcal
1 J = 1 Ws = 1 Nm	1	$2,78 * 10^{-7}$	$2,39 * 10^{-4}$
1 kWh	$3,6 * 10^6$	1	860
1 kcal	$4,19 * 10^3$	$1,16 * 10^{-3}$	1

Die von einem Elektromotor aufgenommene elektrische Energie ergibt sich aus der Multiplikation der elektrischen Leistung P mit der Laufzeit t. Man berechnet sie mit der Gleichung (2):

$$E = P * t \quad \text{Glg. (2)}$$

Beispiel 1: Auf einer Kläranlage wird ein Gebläse mit einer Leistungsaufnahme von 34 kW pro Tag 11 Stunden betrieben. Der Leistungspreis beträgt €0,08 pro kWh. Wie hoch sind die Betriebskosten in einem Monat (30 Tage)?

Lösung: $E = P * t = 34 \text{ kW} * 11 \text{ h/d} = 374 \text{ kWh/d}$
 $\text{Kosten} = 374 \text{ kWh/d} * 30 \text{ d} * 0,08 \text{ €/kWh} = 897,6 \text{ €}$

Das Gebläse verursacht pro Monat Energiekosten von 897,6 €

Beispiel 2: Am Kilowattstundenzähler des Gebläses wird über einen Beobachtungszeitraum (z.B. ein Tag) ein Energieverbrauch von 120 kWh festgestellt. Das Gebläse hat eine Leistungsaufnahme von 15 kW. Wie viele Stunden ist das Gebläse gelaufen?

Lösung: $E = P * t \quad \Leftrightarrow \quad t = \frac{E}{P} = \frac{120 \text{ kWh}}{15 \text{ kW}} = 8 \text{ h}$

Das Gebläse ist im Beobachtungszeitraum 8 Stunden gelaufen.

4. VERBRAUCHER IM DREHSTROMNETZ

Verbraucher im Drehstromnetz können nach der Art der Belastung, der Anzahl der zugeführten Leitungen und der Art der Verschaltung der Leitungen eingeteilt werden. Die jeweilige Konfiguration hat Auswirkungen auf die Möglichkeiten der Leistungsmessung.

4.1 BELASTUNG

Sind in den drei Phasen gleich große Impedanzen (Widerstände) vorhanden liegt ein symmetrisch belastetes Netz vor. Die Strangströme sind gleich groß. Die Leistungsmessung kann in einem Strang erfolgen, durch Multiplikation mit drei erhält man die Gesamtleistung.

4.2 ANZAHL DER LEITUNGEN UND VERSCHALTUNG

Im Dreileitersystem können die drei zugeführten Leitungen (Phasen) als Dreieckschaltung oder Sternschaltung ohne Mittelpunktsteiter ausgeführt werden.

Im Vierleitersystem werden die drei Phasen in Sternschaltung mit herausgeführtem Mittelpunktsteiter (Nullsteiter) ausgeführt.

5. LEISTUNGSMESSUNG IM DREHSTROMNETZ

5.1 THEORIE DER LEISTUNGSMESSUNG

Zur Messung der Wirkleistung P werden Wattmeter verwendet. Zur Messung benötigt das Wattmeter Informationen über den fließenden Strom und über die anliegende Spannung. Wattmeter sind in den Strompfad geschaltet und haben zusätzlich zwei Anschlüsse um die Spannung abzugreifen.

Wird ein **symmetrischer oder ein asymmetrischer dreiphasiger Verbraucher** an ein **Dreileitersystem** angeschlossen, genügen zwei Wattmeter. Der Spannungspfad der beiden Wattmeter wird jeweils mit einem Anschluss an der dritten, nicht mit einem Wattmeter versehenen Phase verbunden. Die gesamte Wirkleistung ist die Summe der beiden Strangleistungen – Vorzeichen sind zu beachten! Diese Anschlussart wird nach dem deutschen Elektrotechniker Hermann Aron als „Aron-Schaltung“ bezeichnet.

Wenn ein **dreiphasiger, symmetrischer Verbraucher** an ein **Vierleitersystem** (also Sternschaltung mit herausgeführtem Mittelpunktsleiter) angeschlossen wird, genügt die Verwendung eines einzigen Wattmeters (mit dem Spannungspfad gegen den Mittelpunktsleiter geschaltet) in einer der drei Phasen. Die gesamte Wirkleistung erhält man, wenn man die Strangleistung mit 3 multipliziert.

Wenn ein **dreiphasiger, asymmetrischer Verbraucher** an ein **Vierleitersystem** (also Sternschaltung mit herausgeführtem Mittelpunktsleiter) angeschlossen wird, sind drei Wattmeter notwendig, welche jeweils mit ihrem Spannungspfad gegen den Mittelpunktsleiter zu schalten sind. Die gesamte Wirkleistung des dreiphasigen Verbrauchers ergibt sich aus der Summe aller drei angezeigten Wirkleistungen.

5.2 STATIONÄRE LEISTUNGSMESSUNG

Für die Energiemessung auf Kläranlagen werden häufig Drehstromzähler (= Kilowattstundenzähler) eingesetzt. Der Begriff Stromzähler ist physikalisch falsch. Diese Messgeräte erfassen die vom Energieversorgungsunternehmen gelieferte elektrische Energie auf Basis der elektrischen Wirkleistung.

Neben den üblichen Haushaltsstromzählern (Nennstrom 10A, Grenzstrom 60A) sind für gewerbliche Nutzung Stromzähler mit Stromwandler verbreitet.

Größere Energieverbräuche in der Industrie werden meist über so genannte Messwandlerzähler gemessen. Die Zähler werden in diesem Fall über Spannungswandler und/oder Stromwandler angeschlossen.

Zähler für technische Anlagen können neben der Wirkenergie auch die aktuelle Wirkleistung anzeigen oder auch die Blindenergie erfassen. Manche Zähler speichern Lastprofile, insbesondere den Betrag und Zeitpunkt einer Lastspitze. Es gibt auch Zähler mit Impulsausgängen zur Weiterverarbeitung der momentanen Leistungsmesswerte oder Energiesummen.

Für industrielle Anwendungen werden Leistungsmessumformer auf elektronischer Basis eingesetzt. Diese komplexen Messinstrumente verfügen über eine Datenschnittstelle zur Weitergabe der Messdaten.

5.2.1 Drehstromzähler nach dem Ferraris-Prinzip

Weit verbreitet sind die Ferraris-Zähler nach dem Induktionsprinzip, benannt nach dem Italiener Galileo Ferraris. Hierbei wird durch den Ein- oder Mehrphasenwechselstrom sowie die Netzspannung in einem Ferrarisläufer (Aluminiumscheibe) ein magnetisches Drehfeld induziert, welches in ihr durch Wirbelströme ein Drehmoment erzeugt. Dieses ist proportional zum Vektor-Produkt aus Strom und Spannung, also der Wirkleistung. Die Scheibe läuft in einer aus einem Dauermagnet bestehenden Wirbelstrombremse, die ein geschwindigkeitsproportionales Bremsmoment erzeugt. Die Scheibe, deren Kante durch ein Fenster von außen sichtbar ist, hat eine Drehgeschwindigkeit, welche zur elektrischen Leistung proportional ist. Die Anzahl der Umdrehungen ist zur elektrischen Energie proportional.

Ferraris-Zähler zählen, wenn sie als Wirkverbrauchszähler aufgebaut sind, bei hohen Oberwellen- oder Blindstromanteilen der Verbraucher nur den Wirkenergieanteil. Es gibt ähnlich aufgebaute Blindverbrauchszähler, welche die induktive bzw. kapazitive Arbeit zählen.

Mit der Aluminiumscheibe ist ein Rollenzählwerk verbunden, sodass der Energiedurchsatz als Zahlenwert in kWh abgelesen werden kann. Ist der kWh-Zähler über Spannungs- und/oder Stromwandler angeschlossen, sind die Wandlerverhältnisse bei der Berechnung der Energieaufnahme zu berücksichtigen.

In der Abbildung (1) ist ein Drehstromzähler mit den aufgedruckten Informationen für den Nennstrom und den Maximalstrom sowie die Zählerkonstante mit 75 Umdrehungen/kWh zu sehen.



Abbildung 1: Drehstromzähler (kWh Zähler)

Beispiel 3: Der Testlauf einer Pumpstation wird mit einer Leistungsmessung überwacht. Die Pumpstation verfügt über einen eigenen Drehstromzähler. An diesem wurde ein Zählerstand von 3452,4 kWh und nach 4 Stunden Testlauf ein Zählerstand von 3463,6 kWh abgelesen. Es sind Stromwandler 50A/5A eingebaut. Wie groß ist die verbrauchte elektrische Energie? Welche mittlere elektrische Leistungsaufnahme hat die Pumpstation?

Lösung: Anzeigedifferenz = 3463,6 – 3452,4 = 11,2 kWh $\Rightarrow E = 11,2 \text{ kWh} * \frac{50\text{A}}{5\text{A}} = 112 \text{ kWh}$

Die aufgenommene elektrische Energie betrug 112 kWh.

$$E = P * t \quad \Rightarrow \quad P = \frac{E}{t} = \frac{112 \text{ kWh}}{4 \text{ h}} = 28 \text{ kW}$$

Die mittlere Leistungsaufnahme des Pumpwerkes betrug 28 kW.

Bei **kurzer Messdauer** ist eine genaue Ablesung des Rollenzählwerkes nicht möglich. Trotzdem kann man mit Hilfe der am Zähler aufgedruckten Gerätekonstante (= Angabe der Umdrehungen, die einer Kilowattstunde entsprechen) die aktuelle Leistung berechnen. Dazu ist die Anzahl der Umdrehungen der Aluminiumscheibe in einem Zeitintervall zu ermitteln. Die Berechnung der elektrischen Leistung erfolgt nach Gleichung (3):

$$P = \frac{n}{t} * \frac{cw}{cg} * f \quad \text{Glg. (3)}$$

Darin bedeutet:

n [U] Umdrehungen der Scheibe während der Messdauer

t [s] Messdauer

cw [-] Wandlerkonstante (Produkt aus Spannungswandlerverhältnis und Stromwandlerverhältnis)

cg [U/kWh] Gerätekonstante (aufgedruckt auf dem Drehstromzähler)

f [s/h] Umrechnungsfaktor von Sekunde auf Stunde (1 Stunde hat 3600 Sekunden)

Beispiel 4: Im Rahmen einer Sauerstoffzufuhrmessung wurde die Leistungsaufnahme eines Gebläses gemessen. Die Zeit für 5 Umdrehungen der Aluscheibe wurde mehrfach gestoppt und betrug im Mittel 65 Sekunden. Die Gerätekonstante war mit 75 U/kWh aufgedruckt und es waren Stromwandler mit 50A/5A eingebaut. Welche elektrische Leistungsaufnahme hatte das Gebläse?

Lösung:
$$P = \frac{n}{t} * \frac{cw}{cg} * 3600 \frac{\text{Sekunden}}{\text{Stunde}} = \frac{5}{65} * \frac{10}{75} * 3600 = 36,9 \text{ kW}$$

Die Leistungsaufnahme des Gebläses betrug rund 37 kW.

5.2.2 Elektronische Energiezähler

Die seit einigen Jahren gebräuchlichen elektronischen Energiezähler enthalten keine mechanisch bewegten Elemente. Der Strom wird durch Stromwandler erfasst und registriert. Neben dem Stromverbrauch wird noch eine Vielzahl an weiteren Parametern gemessen. Die Zählung der Energie erfolgt mit einer elektronischen Schaltung. Das Ergebnis wird vor Ort angezeigt (meist Flüssigkristallanzeige). Die gemessenen Daten können über genormte Schnittstellen z.B. (4-20mA oder Bussignal) an ein Prozessleitsystem übertragen werden.

Elektronische Energiezähler haben statt der drehenden Aluscheibe ein blinkendes Lämpchen auf der Frontplatte. Zählt man die Lichtblitze pro Zeiteinheit kann man, ebenso wie in Beispiel (4), die aktuelle elektrische Wirkleistung errechnen.

5.2.3 Zweitarifzähler (Mehrtarifzähler)

Da die Nachfrage nach elektrischer Energie tagsüber größer ist als nachts (z.B. zwischen 22 und 6 Uhr), ist elektrische Energie nachts oft günstiger als tagsüber. Gleiches gilt auch für Wochenenden und ggf. für Feiertage, etc. Man spricht in diesem Zusammenhang von Hoch- und Niedertarifzeiten (HT und NT). Ein Zweitarifzähler (auch Doppelzähler genannt) ist ein Stromzähler, der den Stromverbrauch zu Hoch- und Niedertarifzeiten getrennt aufzeichnet.

Die Zeiträume für die Haupt- und Nebenzeit werden vom Netzbetreiber festgelegt. Die Umschaltung zwischen den Tarifen erfolgt durch den Netzbetreiber mit einem Rundsteuerempfänger. Das Steuerungssignal ist der Netzspannung überlagert. Der Rundsteuerempfänger wertet das Signal aus und sendet den Befehl an den Mehrtarifzähler den Tarif umzuschalten.

5.2.4 Wandler

In der Abbildung (2) ist der Aufbau eines Stromwandlers zu sehen (N ist die Wicklungszahl).

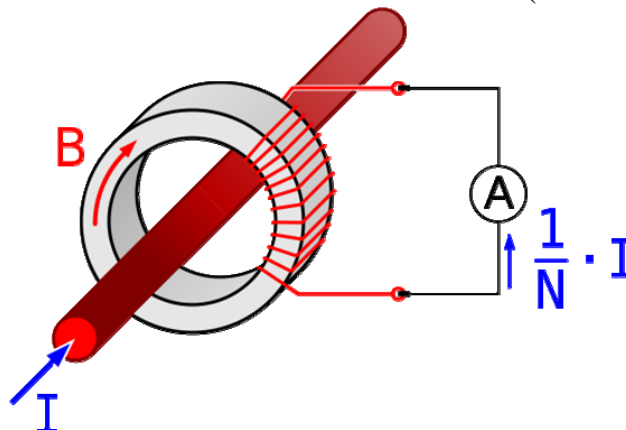


Abbildung 2: Aufbau eines Stromwandlers

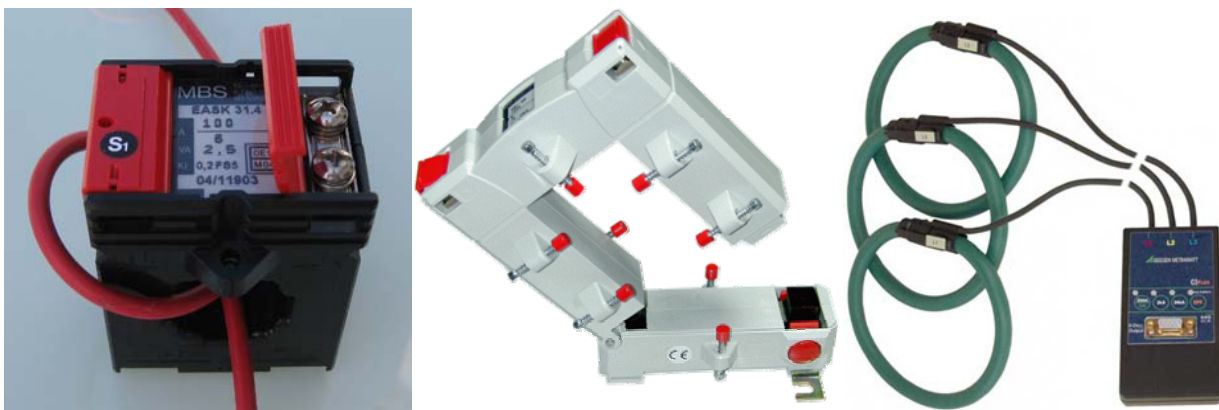
Wandler werden benötigt, wenn die tatsächlichen elektrischen Größen (Spannung und Strom) größer als der Messbereich der Messgeräte sind. In der Praxis trifft man häufig auf Stromwandler. Diese

dienen zur Umformung eines hohen Wechselstromes in einen galvanisch getrennten Wechselstrom von 5 A oder 1 A. Stromwandler arbeiten wie Transformatoren.

Stromwandler sind mit verschiedenen Wandlerverhältnissen, in unterschiedlichen Bauformen und Genauigkeitsklassen verfügbar. Übliche Wandlerverhältnisse reichen von 10 bis 1000, d.h. der Sekundärstrom beträgt nur ein Zehntel bzw. ein Tausendstel des Primärstromes. Standardmäßig werden die Stromwandler in der Klasse 1 bzw. 0,5 gefertigt. Für gesteigerte Güteanforderungen sind auch Wandler der Güteklasse 0,2 verfügbar (nicht als offene Kabelwandler).

An Bauformen werden Aufsteckwandler, Wickelwandler und Umbauwandler (mit einem Klickverschluss) eingesetzt. Die Öffnung für die Durchführung des Leiters ist für Rund- und Flachprofile ausgelegt. Für Überprüfungs-zwecke sind Kabelwandler verfügbar.

In der Abbildung (3) sind Bauformen von Stromwandlern dargestellt.



Aufsteckwandler

Umbauwandler

Kabelwandler

Abbildung 3: Bauformen von Stromwandlern

5.3 MOBILE LEISTUNGSMESSUNG

Für Abnahmemessungen, Garantienachweise und laufende Kontrollen werden mobile Leistungsmessgeräte eingesetzt.

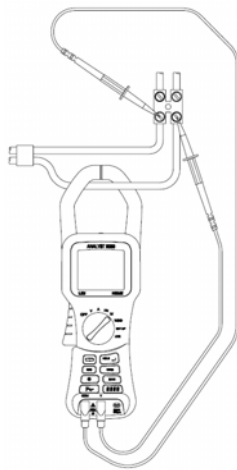
Die einfachsten Messgeräte sind **Multimeter** für die Messung der Spannung sowie **Stromzangen**. Im einfachsten Fall eines symmetrisch belasteten Drehstromnetzes genügt es, die Spannung zwischen zwei Phasen (z.B. mit einem Multimeter) und einen Strangstrom (z.B. mit einer Strommesszange) zu messen. Der $\cos \varphi$ kann für Vollast vom Typenschild des Elektromotors abgelesen werden. Die Berechnung der Leistung erfolgt dann nach Gleichung (1).

Beispiel 5: Am Klemmkasten des Antriebsmotors einer trocken aufgestellten Pumpe wird eine Spannung zwischen den Leitern von 399 V und ein Strangstrom von 21 A gemessen. Auf dem Typenschild ist der $\cos \varphi$ mit 0,9 angegeben. Welche elektrische Leistung nimmt der Motor auf?

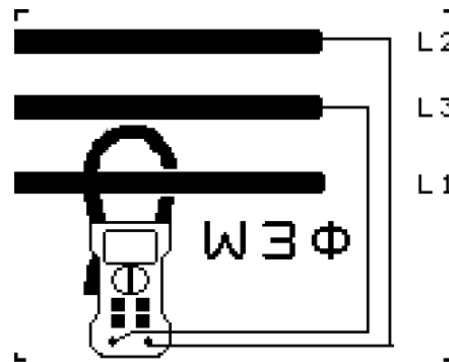
Lösung: $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = 1,73 \cdot 399 \cdot 21 \cdot 0,9 = 13.061,5 \text{ W} \approx 13,1 \text{ kW}$

Der Antriebsmotor nimmt eine elektrische Leistung von 13,1 kW auf.

Für genauere Messungen bieten sich **Leistungsmesszangen** an. Diese Geräte bieten die Möglichkeit, den Strom mittels einer Stromzange (Hall-Effekt), die Spannung, den $\cos \varphi$ und viele andere Parameter gleichzeitig zu messen. Bei entsprechendem Anschluss kann auch direkt die elektrische Wirkleistung eines Stranges oder bei symmetrischer Belastung auch die Drehstromleistung abgelesen werden. In der Abbildung (4) sind Anschlussmöglichkeiten einer Leistungsmesszange dargestellt.



einphasig



dreiphasig (symmetrische Last)

Abbildung 4: Anschluss einer Leistungsmesszange

Für komplexe Messaufgaben kommen **Leistungsanalysatoren** zum Einsatz. Mit diesen Geräten können (ein- bis dreiphasig) praktisch alle elektrischen Größen im Wechselstromnetz erfasst werden. Sie werden häufig dann eingesetzt, wenn Probleme mit „unsauberen Netzen“ (starke Oberwellen, Verzerrung der Sinusform von Spannung und Strom) auftreten. Unsaubere Netze werden manchmal durch Eigenstromerzeugung verursacht.

6. HINWEISE ZUR LEISTUNGSMESSUNG

6.1 ALLGEMEINE PRÜFUNGEN

Durch aufzeichnen der Zählerstände der jeweiligen Messstellen kann überprüft werden, ob die Summe der verbrauchte Energie mit der gelieferten Energie vom EVU (Vergleich mit der Stromrechnung) übereinstimmt.

Sind mehrere Zähler (Gesamtzähler und Subzähler) vorhanden, ist (für längere Zeiträume, z.B. einige Wochen) zu prüfen, ob die Summe der Subzähler-Differenzen mit der Zählerdifferenz am Gesamtzähler übereinstimmt. Die Summe aller Messstellen sollte mit dem Verbrauch am Gesamtzähler nahezu gleich sein. Abweichungen je nach Genauigkeit der einzelnen Messgeräte sind die Regel. Bei großen Abweichungen zum gesamten Energieverbrauch, sind die Messungen je Stromverteiler über die angeschlossenen Verbraucher mittels der vorgenannten Methoden zu überprüfen.

Als häufige Fehlerursache sind meist Einstellungen (fehlerhafte Parametrierung) in den Energiezählern, z.B. falsches Wandler Verhältnis, festzustellen. In der Praxis hat es sich, speziell bei großen Verbrauchern, bewährt den Strom mit einer Strommesszange zu messen und mit dem Typenschild des Motors und der Anzeige am Energiezähler bzw. im Prozessleitsystem zu vergleichen.

Bei Anlagen mit Prozessleitsystemen kommt es auch in der Verarbeitung von Zählimpulsen zu Abweichungen. Eine mögliche Fehlerursache können die Impulswertigkeit oder schlechte Kontakte an Koppelrelais sein.

Zur Plausibilitätsprüfung von stationären Leistungsmessungen ist es sinnvoll, den fließenden Strom und die anliegende Spannung, mittels Voltmeter und Amperemeter zu ermitteln. Unter Zuhilfenahme Gleichung (1) kann die Leistung errechnet werden. Besteht der Verdacht, dass Oberschwingungen und/oder verzerrte Signalformen auftreten, sind Leistungsanalysatoren einzusetzen.

Mobile Leistungsmessgeräte sind periodisch überprüfen zu lassen (z.B. Hersteller, Kalibrierdienst). Bei sachgemäßer Anwendung und sorgsamer Handhabung sind Multimeter, Stromzangen, Leistungsmesszangen, etc. langzeitstabil und robust.

6.2 VORSCHRIFTEN UND NORMEN

Die in Europa gültigen Normen für elektronische Energiezähler sind: EN 62053-21 bis -23. Für die Datenschnittstellen haben EN62056-21 sowie EN62056-46 (DLMS) Gültigkeit.

6.3 WANDLER

Werden zu kleine Wandler eingesetzt, wird im schlimmsten Fall das Messgerät beschädigt. Bei zu großen Wandlerverhältnissen treten sekundärseitig kleine Ströme auf. Wird die Leistung über einen Zähler erfasst, treten sehr kleine Zählerstandsänderungen in langen Zeiträumen auf. Die Ergebnisse sind ungenau und im schlimmsten Fall unbrauchbar. Als Faustregel gilt, der normale Tagesenergieverbrauch sollte sich auf dem Zähler mit drei wertenden Stellen bemerkbar machen.

Beispiel 6: Die elektrische Energie der biologischen Stufe wird gesondert über einen elektronischen Leistungsmessumformer erfasst. An diesem wurde ein Zählerstand von 8742,12 kWh und nach 24 Stunden ein Zählerstand von 8744,55 kWh abgelesen. Es sind Stromwandler 1000A/5A eingebaut. Wie groß ist die verbrauchte elektrische Energie?

Lösung: Anzeigedifferenz = 8744,55 – 8742,12 = 2,43 kWh (drei wertende Stellen)

$$E = 2,43 \text{ kWh} * \frac{1000\text{A}}{5\text{A}} = 486 \text{ kWh}$$

Die aufgenommene elektrische Energie betrug 486 kWh.

6.4 GENAUIGKEIT UND GENAUIGKEITSKLASSEN

Die Genauigkeitsklasse ist auf den Zählern und den Messwandlern angegeben. Ein Beispiel für eine solche Angabe: ein Kreis, in dem sich eine Zahl befindet, oder Kl. 2 oder 1, wobei die Zahl immer die Verkehrsfehlergrenze in Prozent angibt.

Die Genauigkeit der Zähler (Verkehrsfehlergrenze) liegt im Haushaltsbereich bei $\pm 2\%$. Bei hoher zu zählender elektrischer Arbeit sind auch Zähler der Genauigkeitsklassen 1, 0,5 und 0,2 (meist in Verbindung mit Messwandlern) auf Abwasserreinigungsanlagen im Einsatz. Geräte der Genauigkeitsklasse 0,2 kosten deutlich mehr als Geräte der Klasse 0,5 oder 1. Alle in einer Messeinrichtung enthaltenen Komponenten sollten die gleiche Genauigkeitsklasse haben. Das Messergebnis wird von dem Gerät mit der größten Messunsicherheit dominiert.

Die Gesamte Messunsicherheit kann aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz hergeleitet werden. Für eine Wirkleistungsmessung mit einem Drehstromzähler und Stromwandlern gilt die Gleichung (4):

$$\text{Gesamtfehler} = \sqrt{(\text{Fehler1})^2 + (\text{Fehler2})^2} \quad \text{Glg. (4)}$$

Es macht also wenig Sinn, einen Drehstromzähler Klasse 2 mit Stromwandlern für Prüfzwecke der Klasse 0,2 anzuschließen. Mit der Gleichung (4) berechnet man den

$$\text{Gesamtfehler} = \sqrt{2^2 + 0,2^2} = 2,01\%,$$

d.h. die Messunsicherheit für die Leistungsmessung beträgt $\pm 2,01\%$. Werden deutlich billigere Wandler der Klasse 1 eingesetzt, beträgt der

$$\text{Gesamtfehler} = \sqrt{2^2 + 1^2} = \pm 2,24\%.$$

6.5 OBERSCHWINGUNGEN

In europäischen Leitungsnetzen ist eine Netzfrequenz von 50 Hz üblich. Drehstromzähler (z.B. Ferraris-Zähler) ermitteln die elektrische Energie auf Basis der Netzfrequenz von 50 Hz. Elektrische Signale sind mit Oberschwingungen behaftet. Sehr gute Messgeräte haben eine hohe Abtastrate für das zu messende Signal, daher werden auch Anteile dieser Oberschwingungen mit gemessen (echt Effektivwert). In ungünstigen Fällen sind die mit einem echt effektiv Messgerät ermittelten Werte daher größer als die mit einem Drehstromzähler gemessene elektrische Energie.

6.6 FREQUENZUMRICHTER

Die Theorie der Leistungsmessung basiert auf sinusförmigen elektrischen Größen (Strom und Spannung). Für die Veränderung der Antriebsdrehzahl einer Arbeitsmaschine (z.B. Pumpe, Gebläse) werden die Elektromotoren über Frequenzumrichter angespeist. Frequenzumrichter haben einen großen Einfluss auf das Versorgungsnetz. Die elektrischen Größen weichen erheblich von der idealen Sinusform ab. Auf der Anspeisungsseite eines Frequenzumrichters weicht der Verlauf des Stromes erheblich ab. Auf der Abgangsseite ist das Spannungssignal verzerrt. In der Regel ist es nicht möglich, mit den beschriebenen Methoden (z.B. Aron-Schaltung) die von einem Frequenzumrichter abgegebene elektrische Leistung zu messen. Die Ausnahme bilden Frequenzumformer, die durch spezielle elektronische Schaltungen den Spannungsverlauf auf der Abgangsseite wieder auf eine Sinusform bringen.

Eine praktikable Methode der Leistungsmessung an einem Elektromotor, der von einem Frequenzumrichter angespeist wird ist es, die Anspeiseleistung des FU zu messen und den Verlust des FU in Abzug zu bringen (aus dem Datenblatt, typischer Wert für den Verlust sind ca. 4% der aufgenommenen Leistung). **Die Anspeiseleistung des Frequenzumrichters wird für jede Phase einzeln gegen Erde gemessen und die Summe gebildet.**

7. LITERATUR

- [1] EN 62053-21 (2003) Elektronische Wirkverbrauchszähler der Genauigkeitsklassen 1 und 2
- [2] EN 62056-22 (2003) Elektronische Wirkverbrauchszähler der Genauigkeitsklassen 0,2 S und 0,5 S
- [3] EN 62056-23 (2003) Elektronische Blindverbrauchszähler der Genauigkeitsklassen 2 und 3
- [4] EN 62056-21 (2002) Messung der elektrischen Energie - Zählerstandsübertragung, Tarif- und Laststeuerung - Teil 21: Datenübertragung für festen und mobilen Anschluss
- [5] EN62056-46 (2002) Messung der elektrischen Energie - Zählerstandsübertragung, Tarif- und Laststeuerung - Teil 46: Anwendung des HDLC-Protokolls in der Verbindungsschicht
- [6] Europa Lehrmittel Fachkunde Elektrotechnik 26.Auflage Österreich ISBN: 9783808531594
- [7] Europa Lehrmittel Elektrotechnik Grundbildung 7.Auflage ISBN: 9783808531471

Karl Palkowitz
KaPaSystems
Dr. Karl Rennerstraße 1/6
2401 Fischamend
Email: k.palkowitz@kapasystems.at

Dipl.-Ing. Dr. Wilhelm Frey
Ingenieurkonsulent für Maschinenbau
Abwassertechnische Ausbildung und Beratung
Leobendorf / Hofgartenstraße 4/2
2100 Leobendorf
Email: aab.frey@aon.at