

Das Verhalten von elektronischen Elektrizitätszählern bei verzerrten Spannungen und nichtlinearen Lasten

Dipl.-Ing. Jörg Kirchhof, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE, Königstor 59, 34119 Kassel, joerg.kirchhof@iee.fraunhofer.de

1 Anforderungen und Eigenschaften von Elektrizitätszählern

Im Rahmen der Einführung von elektronischen Elektrizitätszählern stellt sich die Frage, ob diese Geräte den Anforderungen im Haushaltsnetz gewachsen sind und inwieweit das Messergebnis eines elektronischen Elektrizitätszählers mit der Anzeige herkömmlicher Ferrarisähler übereinstimmt. Vor zehn Jahren wurde über die Beeinflussung von elektronischen Elektrizitätszählern durch Photovoltaik-Wechselrichter berichtet [1]. Untersuchungen der Uni Twente haben ergeben, dass bei vielen getesteten Elektrizitätszählern eine Abweichung der gemessenen Energie im Vergleich zu einem Ferrarisähler auftritt, wenn die Lasten nichtlinear und getaktet sind [2]. Die Unterschiede können beispielsweise vom unterschiedlichen Verhalten im Bereich niedriger Lastströme herrühren [3]. Auch eine unterschiedliche Bewertung von transienten Stromkurvenformen kann eine Ursache sein, da der elektromechanische Ferrarisähler auf kurzzeitige Strom-Impulse aufgrund seiner mechanischen Trägheit anders reagiert, als ein digitales Mess-System. Daneben ist denkbar, dass einige elektronische Elektrizitätszähler bisher noch unentdeckte Schwachstellen aufweisen, die durch die bisherigen Prüfverfahren nicht aufgedeckt wurden. Beispielsweise kann eine Prüfung im Frequenzbereich gemäß IEC 61000-4-19, andere Ergebnisse bezüglich der Störfestigkeit liefern, als ein Prüfverfahren, bei dem eine transiente Kurvenform im Zeitbereich zur Prüfung herangezogen wird. Ziel dieser Untersuchung ist daher, durch verschiedene Prüfungen eine Antwort auf die oben genannte Fragestellung zu geben. Die Ergebnisse sollen nach Abschluss der Untersuchungen auch in die Normung einfließen.

2 Eigenschaften von Ferrarisählern

Ferrarisähler sind elektromechanische Messgeräte, bei denen eine Multiplikation von Strom und Spannung durch Erzeugung eines leistungsabhängigen Drehfelds im Mess-System erfolgt. Das Drehfeld bewirkt ein Drehmoment auf die Zählerscheibe. Ein zusätzlicher Bremsmagnet verhindert, dass bei konstantem Drehmoment eine Beschleunigung der Zählerscheibe auftritt. Die Integration der Augenblicksleistung erfolgt über ein Rollenzählwerk, welches von der Zählerscheibe angetrieben wird. Aufgrund des elektromechanischen Aufbaus weist der Zähler eine Reihe von Besonderheiten auf. So bildet die Spannungsfeldspule des Mess-Systems eine große Induktivität, die Spannungsoberschwingungen einen größeren induktiven Widerstand entgegengesetzt, als bei der Grundschwingung. Die Stromfeldspule des Mess-Systems ist dagegen nur aus wenigen Windungen aufgebaut und liefert ein Feld, das auch harmonische Anteile enthält. Der elektromechanische Antrieb besitzt eine Trägheit, die nur bei langsamen Leistungsänderungen dem Verlauf der Leistungsänderung folgen kann. Da das mechanische System mit mechanischer Reibung behaftet ist, gibt es bei Stillstand eine minimale Leistungsgrenze, unterhalb welcher keine Registrierung erfolgt. Ist der Zähler dagegen in Bewegung, so gibt es eine

untere Leistungsgrenze, ab der der Zähler zum Stillstand kommt. Beide Grenzemphindlichkeiten sind unterschiedlich, da Haftreibung (bei Stillstand) größer ist, als Gleitreibung (bei sich bewegender Zählerscheibe).

Auf der Zählerscheibe befindet sich eine schwarze oder rote Markierung, mit deren Hilfe die Bewegung der Zählerscheibe und die entsprechende Energiemenge genau erfasst werden kann. Auf dem Zähler ist der zugehörige Proportionalitätsfaktor, z.B. 75 Umdrehungen pro kWh, angegeben.

2.1 Erfassung der elektrischen Leistung und Energie

Der zu untersuchende Elektrizitätszähler wird während des gesamten Tests bezüglich der erfassten Energie beobachtet. Beim Ferrariszähler steht eine optische Abtastung der Zählerscheibe zur Verfügung, während beim elektronischen Zähler wahlweise anhand der kalibrierten Blink-LED, aber auch anhand der über die digitale Schnittstelle ausgegebenen Zahlenwerte der aktuelle Messwert ausgelesen wird. Parallel dazu erfolgt eine Aufzeichnung der tatsächlichen Wirk- Blind- oder Scheinleistung mit Hilfe eines Power-Analyzers.

2.2 Zur Verfügung stehende Testmöglichkeiten

Bild 1 zeigt zwei mögliche Konfigurationen für den Test. Einerseits steht eine AC-Spannungsquelle mit Arbitärgenerator zur Verfügung, mit deren Hilfe aufgezeichnete oder in einem Kurvengenerator erzeugte transiente Spannungskurvenformen wiedergegeben werden können. Neben realen Lasten kann auch eine mit transienten Stromkurvenformen programmierbare elektronische Last verwendet werden, die netzsynchrone Laststromkurven erzeugt. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die elektronische Last lediglich Zwei-Quadranten-Betrieb ermöglicht. Bei der Erzeugung von Stromkurven mit einzelnen Harmonischen bedeutet dies, dass Abweichungen und zusätzliche Harmonische auftreten können.

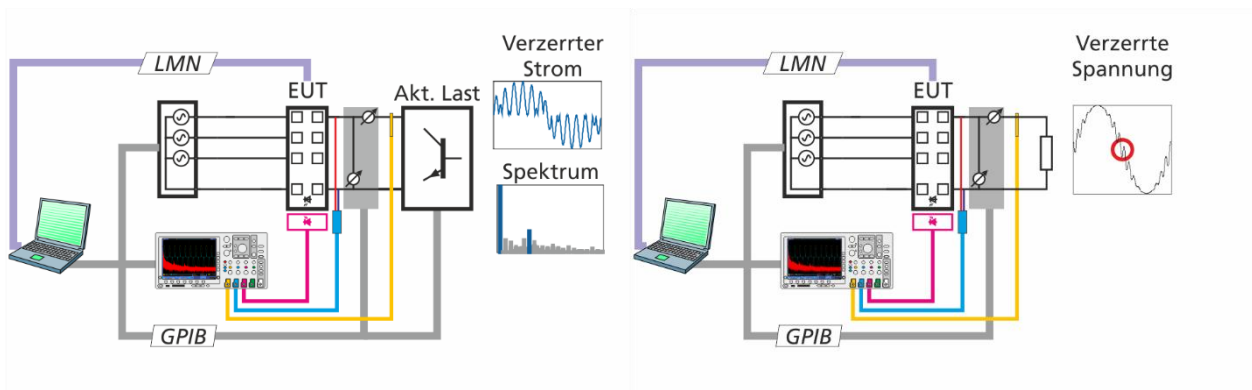


Bild 1 Zwei mögliche Testkonfigurationen. Links: Betrieb an aktiver Last, rechts: synthetische Netzspannung, z.B. mit mehrfachem Nulldurchgang.

3 Untersuchung realer elektronischer Betriebsmittel

Es wurden reale elektronische Lasten wie Schaltnetzteile oder LED-Lampen an verzerrter oder unverzerrter Netzspannung betrieben. Auch Störfestigkeitstests nach IEC 61000-4-19 sind geplant. Ein erstes Ergebnis besteht darin, dass zahlreiche auf dem Markt befind-

liche LED-Lampen bei Betrieb an verzerrter Netzspannung überproportional hohe Stromharmonische erzeugen, im Vergleich zum Betrieb an rein sinusförmiger Netzspannung (siehe Bild 2) [4].

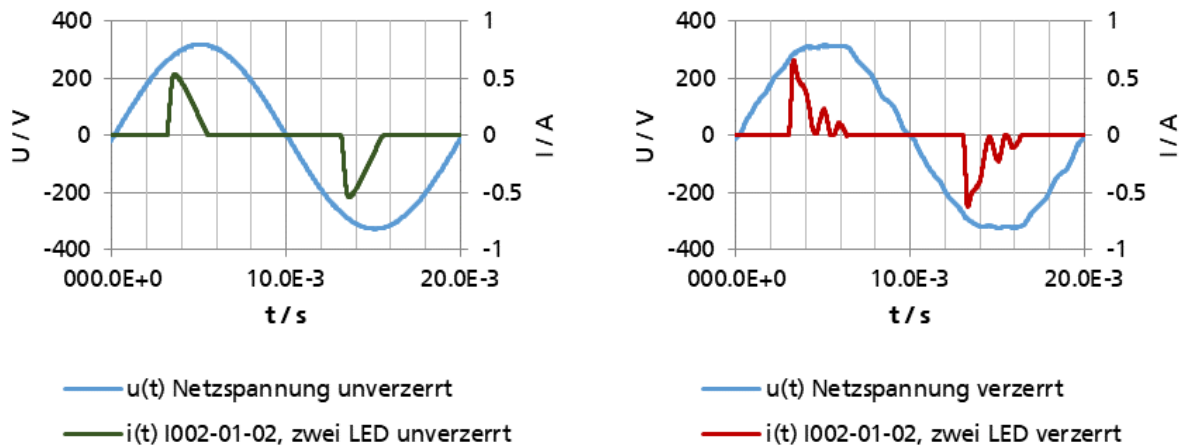


Bild 2 Spannung und Strom von zwei parallel geschalteten LED gleichen Typs. Links: unverzerrte Spannung, rechts: verzerrte Netzspannung und daraus resultierender Lampenstrom.

4 Vergleichsmessungen an Elektrizitätszählern

Bei den Vergleichsuntersuchungen wurden mehrere elektronische Elektrizitätszähler unterschiedlicher Hersteller sowie ein Ferrariszähler den Testsignalen ausgesetzt. Die Zähler sind mit einer individuellen EUT-Nummer (EUT = Equipment under Test) versehen. In den folgenden Diagrammen ist jeweils die ab Messbeginn aufintegrierte Energie von Power Analyzer (Referenz), Ferrariszähler und elektronischem Elektrizitätszähler dargestellt. Da die Ausgangsposition der Drehscheibe beim Ferrariszähler aufgrund der geringen Auflösung von z.B. 96 Umdrehungen pro kWh (also ca. 10 Wh pro Umdrehung) zu einem starken Fehler führen kann, wurde bei der Auswertung der hierdurch entstandene „Offset“ des ersten Messpunkts von der gesamten aufgezeichneten Kurve abgezogen. In der Legende ist dies durch den Hinweis „korrigiert“ erkennbar. Bei den elektronischen Zählern ist diese Korrektur in der Regel nicht erforderlich, da aufgrund der feinen Quantisierung (500 bis 10.000 Pulse pro kWh, also 2 Wh bis 0,1 Wh pro Puls) der Energiestufen sich der Messfehler durch angebrochene Energie-Stufen nicht so stark auswirkt und sich im Verlauf des Tests schnell asymptotisch dem tatsächlichen Messfehler annähert. Die Abweichung zwischen Power Analyzer und Zähler ist ebenfalls im Diagramm dargestellt. Bei einigen Grafiken zeigt eine weitere Linie die wirksame Störgröße, z.B. die Nummer der eingespeisten Harmonischen an. Bei den anderen Tests wird die Störgröße in der zweiten Hälfte der Testzeit zugeschaltet. Bei Tests mit zusätzlichem Dimmer bleibt der Dimmer während der gesamten Zeit eingeschaltet und lediglich die Spannungskurvenform ändert sich.

4.1 Verhalten bei Stromharmonischen

Mit Hilfe einer aktiven programmierbaren Last wurden die Zähler mit Strömen beaufschlagt, die aus einer 50-Hz-Komponente sowie einer harmonischen Komponente bestanden. Bild 3 zeigt, dass die Messgenauigkeit des untersuchten Zählers bei einer Stromstärke von 1 A und 50 % Harmonischen Anteil (4. Bis 11. Harmonische) beeinflusst wird.

Allerdings traten bei höheren Strömen, z. B. bei 4 A keine merklichen Beeinflussungen statt. Auch bei Ferrariszählern machen sich Oberschwingungen als Fehlerquelle bemerkbar.

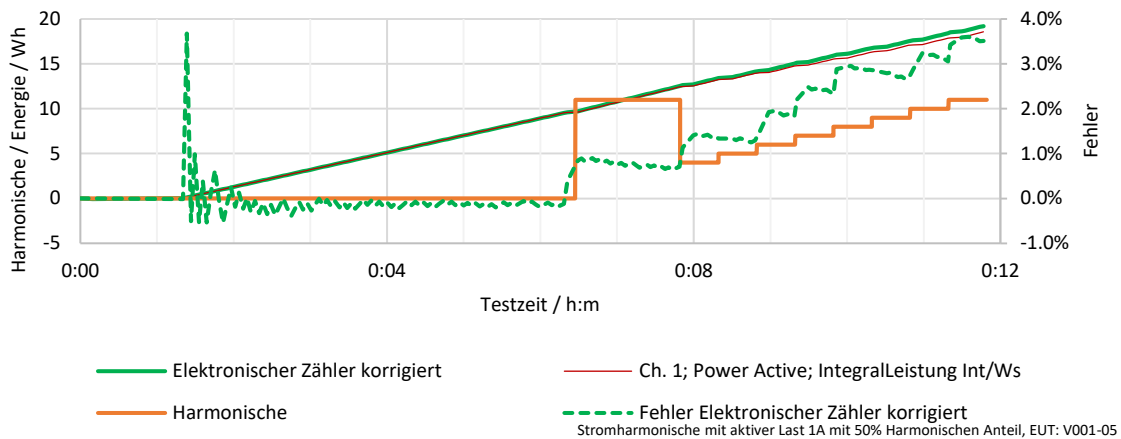


Bild 3 Elektronischer Elektrizitätszähler V001-05 an aktiver Last.

4.2 Verhalten bei verzerrten Netzspannungen

Bei den Zähleruntersuchungen zum Einfluss der Netzspannung wurden zwei Kurvenformen erstellt, die besondere Eigenschaften gegenüber einer rein sinusförmigen Kurvenform aufweisen. Die in Bild 4 links dargestellte Kurve verfügt über mehrfache Nulldurchgänge, die die Erkennung der Netzfrequenz und die Synchronisierung des Zählers stören können. Die zweite Kurve mit abgeflachter Kuppe und zusätzlichen Harmonischen wurde aus einer realen Messung importiert.

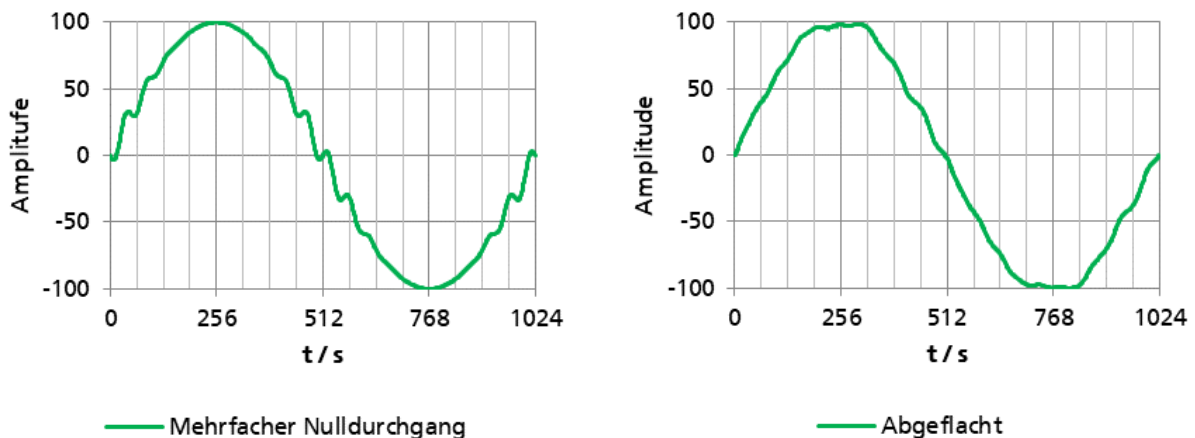


Bild 4 links: Spannungskurve mit mehrfachem Nulldurchgang, rechts: Spannungskurve mit Abflachung und Oberschwingungen.

4.2.1 Mehrfache Nulldurchgänge

Um das Verhalten des Zählers bei mehrfachem Nulldurchgang zu ermitteln, wurde ein 500 W Lastwiderstand als elektrischer Verbraucher angeschlossen. Bild 5 zeigt, dass der

Zähler nicht durch die Kurvenform beeinflusst wurde. Die Zuschaltung erfolgte nach der ersten Hälfte der Messzeit.

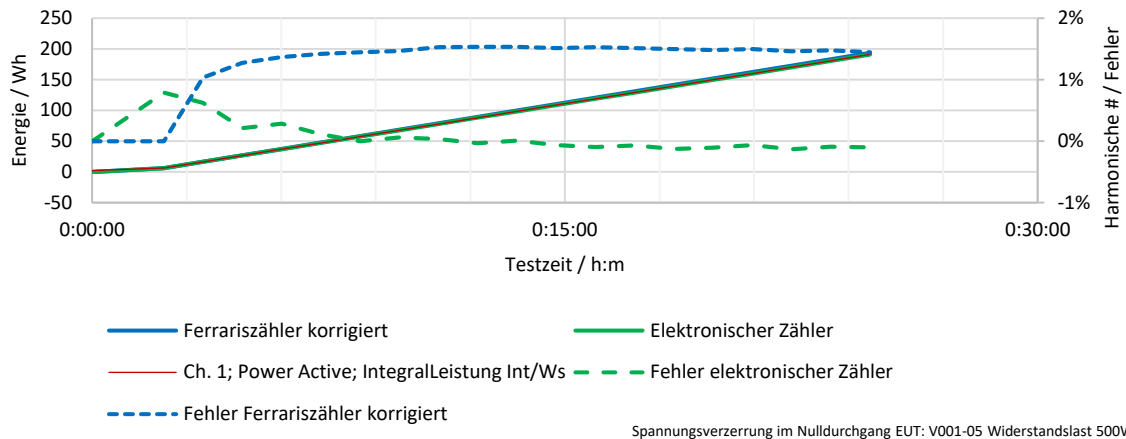


Bild 5 Vergleich von Ferrariszähler, Power Analyzer und elektronischem Elektrizitätszähler (V001-05) bei einer Spannungskurvenform mit mehrfachem Nulldurchgang.

4.3 Verhalten bei realen Lasten

Neben Tests mit aktiver Last und Lastwiderständen wurden auch Untersuchungen an LED-Lampen mit und ohne Dimmer durchgeführt. Im Folgenden werden einige Beispiele gezeigt. Bei einer ersten Versuchsreihe waren 27 LED-Lampen unterschiedlicher Hersteller und mit Leistungsklassen zwischen 4 Watt und 10 Watt als Last parallelgeschaltet. Dabei betrug die elektrische Wirkleistung 190 Watt, während die Scheinleistung bei etwa 270 VA lag. In einer zweiten Phase wurden 8 LED-Lampen wahlweise mit oder ohne Dimmer betrieben. Die Wirkleistungsaufnahme betrug dabei 47 Watt bei einer Scheinleistung von 70 Watt.

4.3.1 LED-Lampen ohne Dimmer

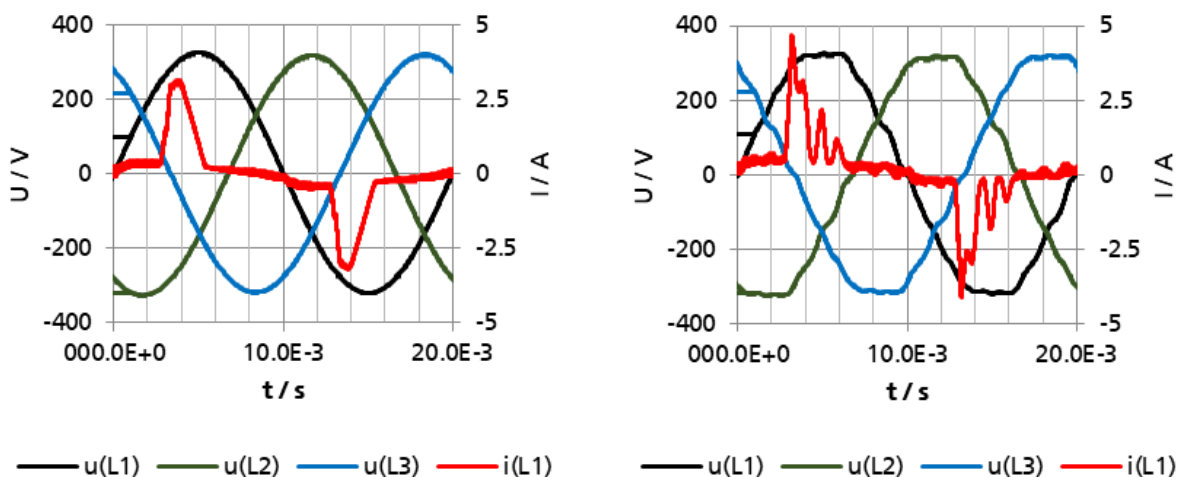


Bild 6 Laststrom von 27 LED-Lampen bei unverzerrter (links) und verzerrter Netzspannung (rechts).

Bild 6 zeigt, wie sich der von 27 LED-Lampen aufgenommene Strom ändert, je nach Form der Netzspannung. Bei sinusförmiger Netzspannung (Bild 6 links) tritt eine einzelne relativ breite Stromspitze auf, die zusätzlich mit Taktungsresten überlagert ist. Bei verzerrter und welliger Netzspannung (Bild 6 rechts) nehmen die LED-Lampen einen stärker verzerrten Strom mit mehreren Maxima auf. Zusätzlich ist eine Modulation der Taktungsreste zu sehen. Untersuchungen des Laststroms haben gezeigt, dass bei einzelnen LED-Lampen bei geringer Erhöhung des Harmonischenanteils der Netzspannung einzelne Harmonische des Lampenstroms überproportional ansteigen. Die untersuchten Elektrizitätszähler weisen bei derartigen Stromkurven einen Messfehler von etwa 1,3 % bzw. 0,7 % auf (siehe Bild 7 und Bild 8), wobei der Ferrariszähler die etwas höhere Abweichung zeigt, als der im Vergleich getestete elektronische Zähler. Ein Einfluss der verzerrten Netzspannung, die nach Ablauf der halben Prüfzeit zugeschaltet wurde, ist nicht erkennbar.

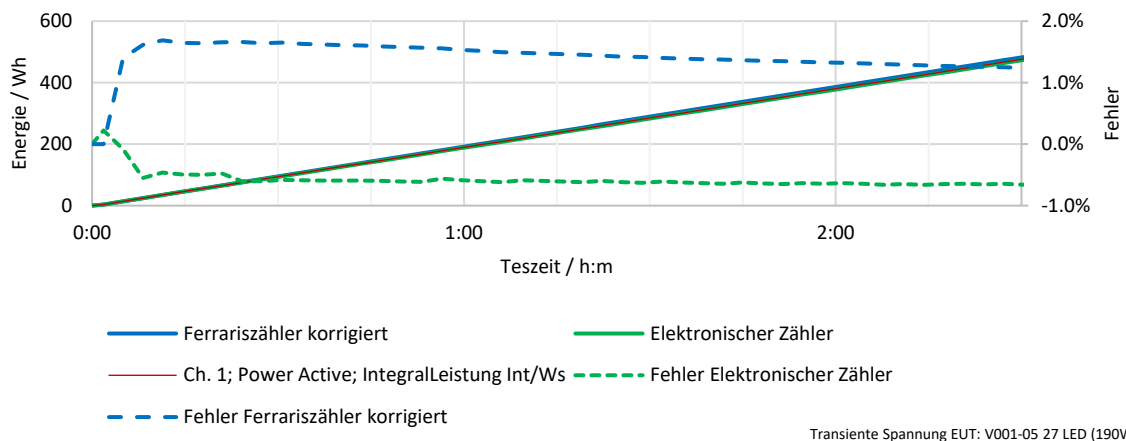


Bild 7 Die Zähler wurden während der ersten Hälfte des Tests an der unverzerrten Kurvenform betrieben. Die Umschaltung der Spannungskurvenform hat keine Auswirkungen auf die Messgenauigkeit der Zähler.

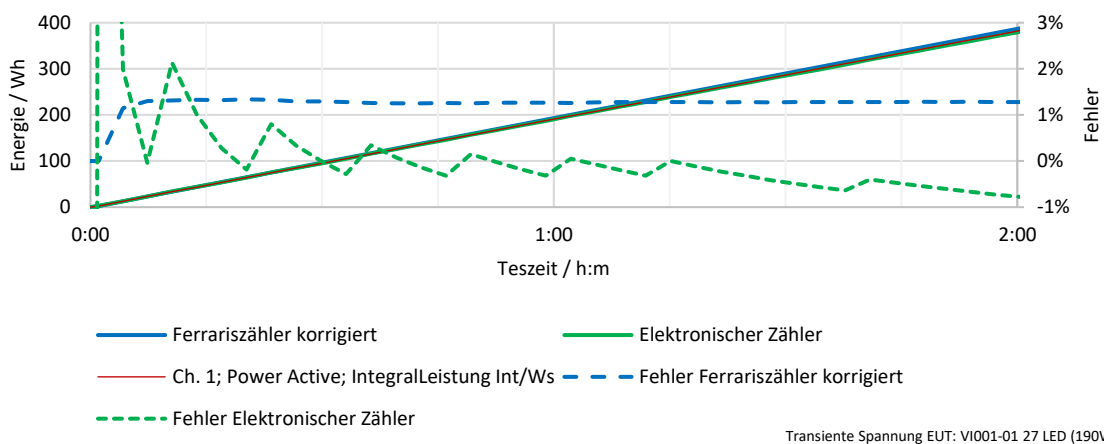


Bild 8 Eine Wiederholung des gleichen Tests mit dem elektronischen Elektrizitätszähler VI004-01 zeigt, dass auch hier beide Zähler etwa den gleichen Messfehler aufweisen.

4.3.2 LED-Lampen mit vorgeschaltetem Dimmer

Elektronische Dimmer mit Phasenanschnittsteuerung sind in vielen Haushalten zu finden. Es kann nicht garantiert werden, dass die Bewohner bei Umstellung auf LED-Beleuchtung

auch den Dimmer tauschen. Umgekehrt sind im Handel zahlreiche LED-Lampen verfügbar, die nicht eindeutig gekennzeichnet sind, oder wo zwar „Dimmbar“ auf der Verpackung angegeben ist, jedoch hiermit lediglich die Funktion der Helligkeitssteuerung gemeint ist.

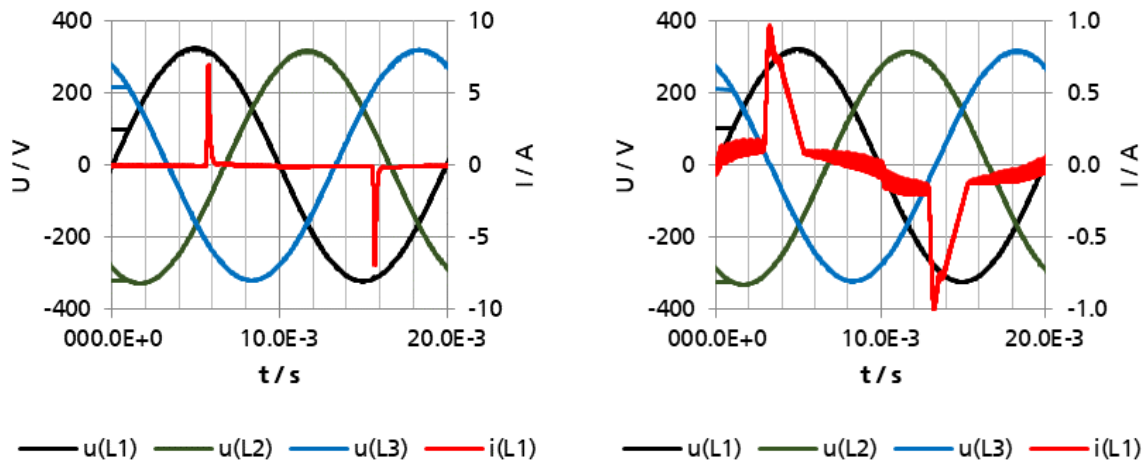


Bild 9 Stromkurvenform bei Betrieb von 8 LED-Lampen an einem Dimmer (links). Rechts ist die Stromkurvenform ohne Dimmer zu sehen.

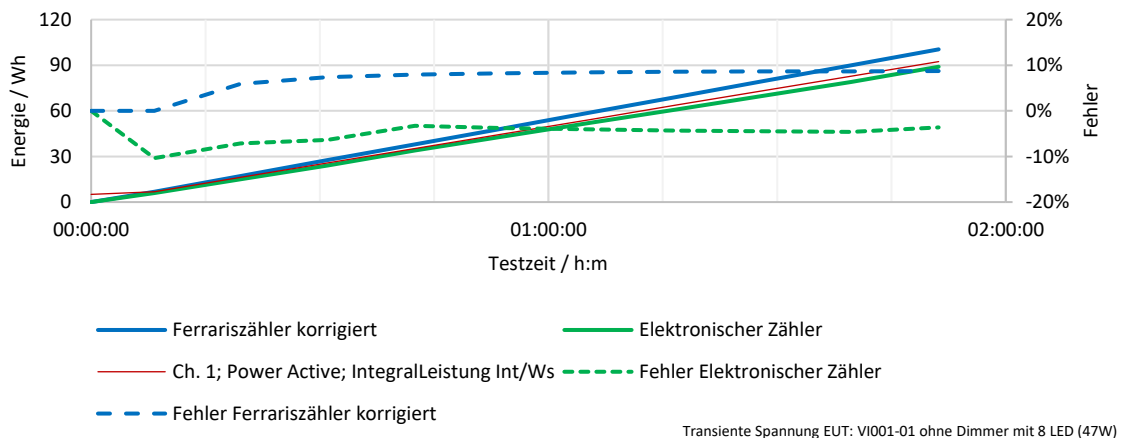


Bild 10 Bei Betrieb ohne Dimmer und einer Leistung von 45 Watt weisen der Ferrariszähler einen Fehler von 9 % und der elektronische Zähler VI001-01 einen Messfehler von ca. 5 % auf.

Nur wenige als dimmbar gekennzeichnete LED-Lampen sind über eine Phasenanschnittsteuerung dimmbar. Aus diesem Grund sind Ströme und Spannungen bei phasenanschnitt gesteuerten LED-Lampen ein Betriebszustand, der zwar nicht vorgesehen, aber in der Realität anzutreffen ist. Ein Elektrizitätszähler sollte auch bei dieser Konstellation ordnungsgemäß messen. In Bild 9 sind die auftretenden Stromkurven bei gedimmten acht Lampen (links) sowie ohne Dimmer (rechts) zu sehen. Es tritt im gedimmten Zustand eine Stromspitze mit einem Spitzenwert von ca. 7 Ampere auf, obwohl die LED-Lampen nur 47 Watt Leistungsaufnahme haben. Ohne Dimmer erreicht die Stromspitze mit 1 A nur ein Siebtel des Stroms. Tests mit den Zählern VI001.01 mit ungedimmten LEDs (siehe Bild 10) und gedimmten LEDs (Bild 11) zeigen, dass sowohl beim Ferrariszähler als auch beim elektronischen Zähler sehr starke Messunsicherheiten auftreten. Bei einer Vergleichsmessung mit Dimmer stieg der Fehler des elektronischen Zählers von 5 % auf 15 %, während der Fehler des Ferrariszählers nur von ca. 9 % auf 11 % anstieg.

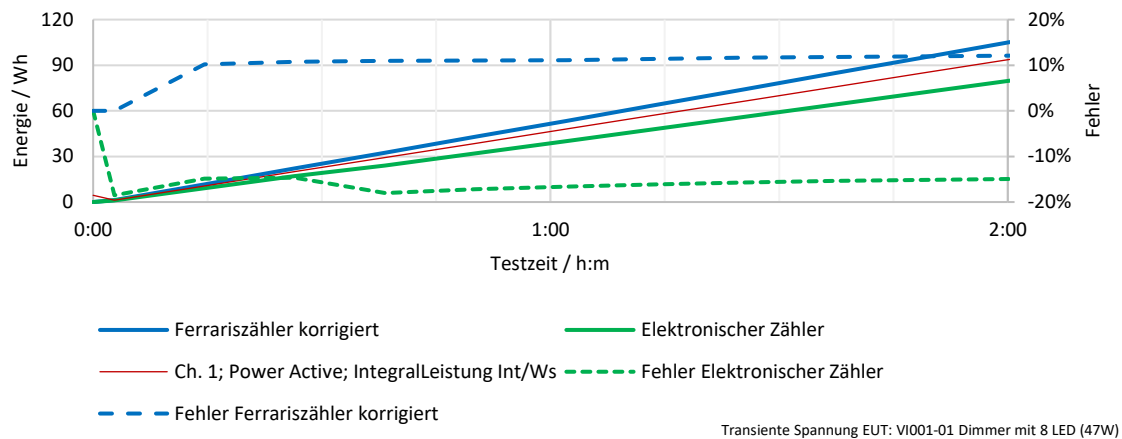


Bild 11 Test mit 8 gedimmten LED Lampen. Der elektronische Zähler hat am Ende des Versuchs einen Fehler von ca. 15 % zugunsten des Kunden erreicht.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl elektronische, als auch Ferrariszähler bei niedriger Last und transienten Stromkurvenformen große Messfehler aufweisen. Gerade bei stärkerer Nutzung von energiesparender hoch effizienter Elektronik auf der Verbraucherseite ist dies ungünstig.

Die im Test bisher untersuchten Spannungskurvenformen haben vor allem einen Einfluss auf die Stromkurvenform der elektronischen Verbraucher.

Die Untersuchungen des IEE zeigten außerdem, dass bei verzerrter Netzspannung der Anteil an Oberschwingungen und Supraharmonischen bei den untersuchten LED-Lampen überproportional ansteigt. Gemäß den gültigen Normen werden Messungen der Stromharmonischen an perfekter Sinusspannung durchgeführt. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen jedoch, dass diese Praxis nicht realistisch ist und zu Ergebnissen führt, die in der Realität nicht erreichbar sind.

6 Danksagung

Dieser Beitrag basiert auf Ergebnissen des Verbundprojektes Reactive Power Control II (FKZ 0350003A). Der Autor dankt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Projekts. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Literatur

- [1] Kirchhof: Grenzwertlücke – Wechselrichter stört Elektrizitätszähler. In: *EMV-Konferenz* (2010)
- [2] Leferink: Conducted Interference on Smart Meters. In: *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity*. (2017), S. 608 – 611
- [3] Masnicki: Some Remarks on the Accuracy of Energy Meters. In: *IEEE International Conference on Environment und Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe* (2018)
- [4] Kirchhof: Beeinflussung von Elektrizitätszählern durch elektronische Lasten und Erzeuger. In: *34. PV-Symposium, Kloster Banz, Bad Staffelstein* (2019). S. 629 – 639