

MESS-, STEUER- UND REGELUNGSTECHNIK (MSR) zur Reduzierung der elektrischen Energieverluste im gesamten Niederspannungsnetz

Zusammenfassung der Berichte aus Ausgabe 20.2019 + 21.2019 zum Thema zentrale Energiesparteknik und wie die Einsparung mit dem ECV™-Messverfahren (ECV™ = Energy Comparison Value) nachgewiesen wird.

Autor: Dipl.-Ing. Stefan Fassbinder, Deutsches Kupferinstitut



Energiespartechniken im Praxistest



AUF EINEN BLICK

ENERGIESPARSYSTEM Das hier vorgestellte Energiesparsystem basiert technisch gesehen auf einem Spartrafo mit offenem Sternpunkt

EINSPARUNG Typischerweise erzielte Einsparungen liegen bei 3 % bis 6 %

NETZREINIGUNG Das hier vorgestellte Energiesparsystem reduziert die Oberschwingungen im Netz

PRAXISERFAHRUNGEN Messungen aus der Praxis belegen Einsparungen von 3 % bis 6 %

Als Beispiel soll hier ein Produkt beschrieben werden, das die Firma Livarsa unter der Bezeichnung »EPplus-System« vertreibt. Es verspricht, »die Netzrückwirkungen/Verzerrungen in einem elektrischen Netz zu verbessern.« Ein weiterer Vorteil sei die garantierte Reduzierung des gesamten Bedarfs einer Anlage oder eines Betriebes an elektrischer Energie um etwa 3 % bis 6 %. Das klingt schon mal gut, ohne in die üblichen fantastischen Versprechungen abzugleiten, doch wie geht das?

Die Firma Livarsa GmbH wurde 2010 in der Schweiz gegründet. Im Februar 2013 kamen ein zweiter Geschäftsführer aus Deutschland und ein zweiter Standort in Süddeutschland hinzu. Das »EPplus-System« bildet das Kerngeschäft der Firma. Dabei sehen die Geschäftsführer dieses nicht als Produkt an, sondern als eine Lösung für Gewerbe und Industrieunternehmen. Tatsächlich gebaut werden die Anlagen derzeit in Norditalien, und installiert von Partnerfirmen des Elektrohandwerks mit Erfahrung im Trafostations-

bau und Schaltanlagenbau oder durch Energieversorgungsunternehmen, die über eigene Installationsmitarbeiter verfügen.

Aufbau des Gerätes

Eine 72-seitige Werksbroschüre [2] beschreibt den Aufbau des Gerätes (**Bild 1**) sehr ausführlich. Dabei trifft man teilweise auf etwas merkwürdige Wendungen wie »Die exakte Kombination der [...] Materialien und deren Gewichte sind entscheidend, um die gewünschte Wirkung zu erreichen.« Gemeint ist möglicherweise die Menge an Material. Wenn an diesem Produkt etwas an Esoterik erinnert, dann ist es allenfalls die Beschreibung. Diese vermittelt eine recht genaue Vorstellung vom inneren Aufbau des damit beschriebenen Produkts – womit sich dieses schon wieder deutlich von den früher beschriebenen »Esoterik-Lösungen« abhebt.

Großen Wert legt man bei Livarsa auf die Feststellung, es handle sich hierbei nicht um einen Spartransformator, denn Energiesparanlagen, die einfach nur die Spannung etwas reduzieren, gebe es schon mehr als genug auf dem Markt. Mit diesen möchte man nicht verwechselt werden.

Tatsächlich aber handelt es sich im Wesentlichen um einen Trenntransformator, dem seine trennende Eigenschaft hier genommen wird, indem man auf jedem Schenkel das Ende der Eingangswicklung mit dem Anfang der Ausgangswicklung verbindet. Dadurch entsteht im Effekt ein Spartransformator (**Bild 2**). So liest man auch in der Werksbroschüre, es handle sich um »ein innovatives System, das zentral in der Hauptverteilung eingebaut wird. Dieses regelt, steuert, schaltet, verbessert und verändert alle elektrischen Parameter«, also auch die Spannung. Die Besonderheit ist hier lediglich, dass der Sternpunkt des Transformators nicht angeschlossen ist und auch erst dann zusammengeschaltet wird, wenn das Gerät in Betrieb geht – jedoch auch dann nur als freier, »schwebender« Sternpunkt ohne Verbindung zum Neutralleiter.

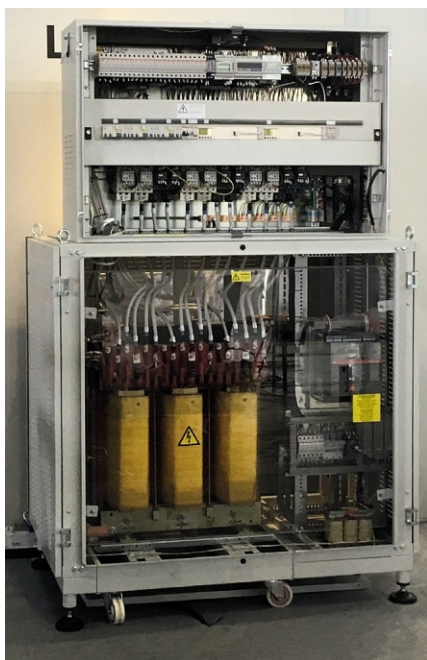


Bild 1: Kernstück ist ein Transformator, der als Trenntrafo zugekauft, aber dann als Spartrafo verschaltet wird

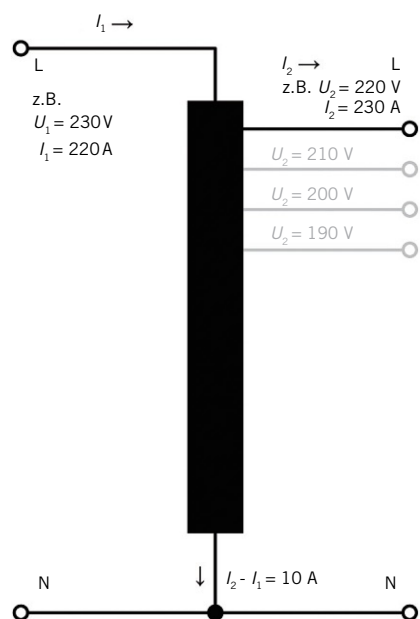


Bild 2: Zum Prinzip des Spartransformators

Was ist eigentlich ein Spartransformator?

Der Begriff »Spartransformator« meint das bei dessen Herstellung eingesparte Material:

Da ein großer Teil der Wicklung gleichzeitig als Primär- und Sekundärwicklung arbeitet, lässt sich der Trafo in dieser Schaltung kleiner bauen als mit getrennten Wicklungen, da ein Teil der Wicklungen doppelt verwendet wird. Wirklich transformiert – d.h. induktiv übertragen – wird nicht die gesamte Leistung, sondern nur der der Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung entsprechende Anteil.

Der Einsatz eines Spartrafos macht somit überall dort Sinn, wo diese Differenz gering ist, und ist überall dort möglich, wo eine galvanische Trennung nicht gefordert ist. Weniger Eisen und Kupfer kosten dann weniger Geld und Platz – und verursachen prinzipiell auch weniger Kupfer- und Eisenverluste, denn die Hauptwicklung, die den größten Teil der gesamten Windungszahl ausmacht, wird nur von der Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsstrom (und vom Magnetisierungsstrom) durchflossen.

Getrennte Wicklungen werden jeweils vom vollen Aufnahme- bzw. Abgabestrom der jeweiligen Seite durchflossen und müssen also hierfür ausgelegt sein. Der Haupt-Wicklungsstrang beim Spartrafo dagegen, der die meisten Windungen umfasst, kann mit sehr dünnem Draht gewickelt werden – umso dünner, je geringer der Unterschied zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung ist.

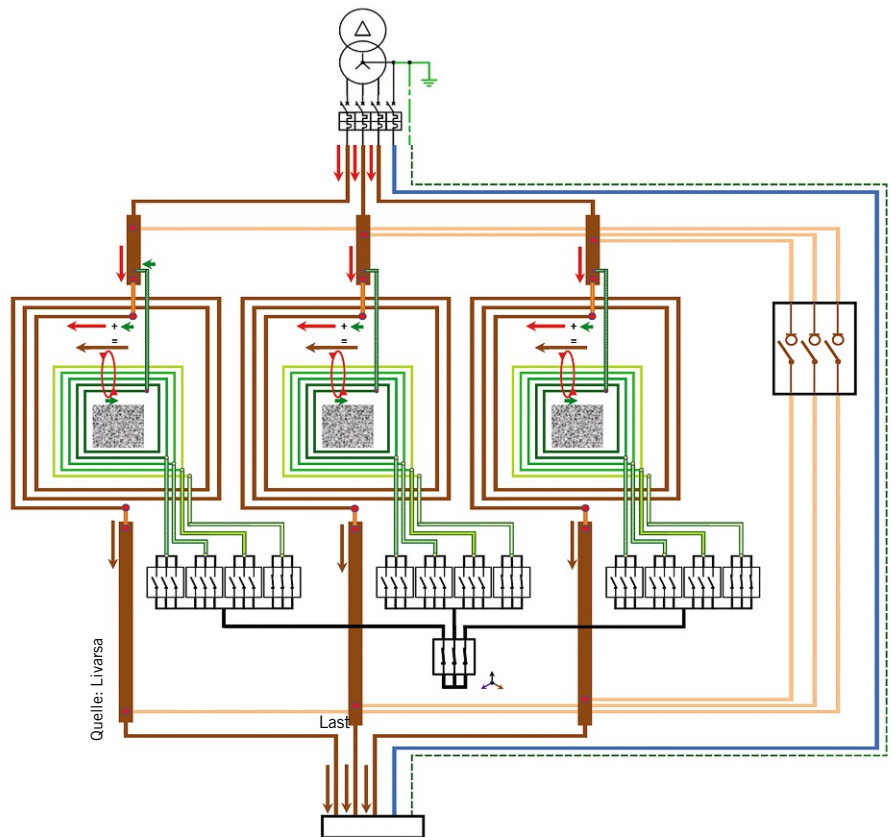


Bild 3: Prinzipschaltbild des EPplus-Systems, hier dargestellt im Betrieb auf Stufe 1 von 4 möglichen

Wirkungsweise des Systems

Trotz aller Transparenz erschließt sich die Wirkungsweise des EPplus-Systems aus der Beschreibung nur mit Mühe. Prinzipiell lässt sich für einen Spartrafo sagen: Wird die Spannung um ein paar Prozent herabgesetzt, erhöht sich der Strom um ein paar Prozent (Bild 2). Für einen Spartrafo gilt auch:

- Der lange Wicklungsteil aus dünnem Draht arbeitet netzparallel.
- Der kurze Wicklungsteil aus dickem Draht liegt in Reihe zur Verbraucheranlage.

Im vorliegenden Fall wird dies an der Prinzipskizze der Anlage besonders deutlich (**Bild 3**). Man könnte auch von einem induktiven Spannungsteiler sprechen. Die dünne Wicklung verfügt hier über drei Anzapfungen, so dass das Übersetzungsverhältnis in vier Stufen (vom Sternpunkt her) eingestellt werden kann. Hierzu sind vier Schütze je Außenleiter vorgesehen (je dreipolig nur der Strombelastbarkeit wegen; die drei Kontakte sind parallel zueinander verdrahtet). Von dort aus geht es dann auf ein weiteres Schütz, das den Sternpunkt bildet.

Das EPplus-System wird am Anfang einer Niederspannungsverteilung eingesetzt, also zwischen Verteiltransformator und Kundenanlage. Hierfür gibt der Hersteller zweierlei günstige Auswirkungen an.

Effekt 1: Energieeinsparung

Zum einen wird eine Energieeinsparung zwischen 2% und 6% geltend gemacht. Dabei weist die Firma selbst darauf hin, dass man durch Absenken der Betriebsspannung unter den Bemessungswert kaum jemals wirklich eine Einsparung erzielen kann. So gibt es heute überwiegend elektronische Geräte, die bei jeder Spannung eben genau die Leistung aufnehmen, die sie gerade benötigen, und bei einer Absenkung der Spannung die Stromaufnahme entsprechend erhöhen.

Auch der Betrieb ohmscher Verbraucher an reduzierter Spannung macht wenig Sinn:

Bei Glühlampen fällt die Leistung im Quadrat mit fallender Spannung, bzw. etwas weniger, da der Widerstand der Glühwendel mit fallender Temperatur ebenfalls fällt. Eine Energieersparnis tritt also sehr wohl ein – je-

doch zum Preis eines noch viel stärker fallenden Lichtstroms. Der Wirkungsgrad (die Lichtausbeute) sinkt »in den Keller«.

Z.B. eine Kaffeemaschine nimmt zwar bei 10% geringerer Spannung eine um 21% geringere Leistung auf, aber dafür dauert es dann 21% länger, bis der Kaffee fertig ist – Energieersparnis gleich null.

Einzig und allein bei Leuchtstofflampen mit induktiven (magnetischen) Vorschaltgeräten ließ sich durch Unterspannungsbetrieb sinnvoll Energie sparen, denn die Leuchtstofflampen weisen unterhalb ihrer Bemessungsleistung sogar eine bessere Lichtausbeute auf als bei voller Leistung. Dazu kommt, dass der Spannungsfall an der Lampe bei geringerem Strom nicht fällt, sondern sogar steigt. Damit fällt die Leistungsaufnahme – und die entsprechende Erzeugung von Licht – unterproportional zur reduzierten Spannung. Die Verluste im Vorschaltgerät (VVG) jedoch hängen vom Quadrat des Stroms ab. Allerdings wird man heutzutage kaum mehr eine Leuchtstofflampenbasierte Bestandsanlage mit Spannungs-Reduziertechnik umrüsten, sondern auf LED umstellen.

Fast alle elektronischen Geräte verhalten sich wie oben angegeben: Da sie unabhängig von der Netzspannung eine bestimmte Leistung benötigen, erhöht sich bei abgesenkter Versorgungsspannung der Strom. Vielfach ist sogar als zulässige Betriebsspannung ein Bereich angegeben, der alle Netzspannungen weltweit umfasst. Stets sind dann die für den Betrieb an geringeren Spannungen angegebenen Eingangsströme im gleichen Verhältnis höher (**Bild 4**). Heute allerdings wird oft nur noch der maximale Strom angegeben (**Bild 5**).

Drehfeldmotoren reagieren ähnlich wie elektronische Lasten – wenn auch aus ganz

sachgemäßem Motorschutz sogar durchbrennt. Bis dahin, also während dieser Zustand des praktisch blockierten Rotors anhält, herrscht außerdem Unterspannung im Netz.

Über leistungselektronische Frequenzumrichter betriebene Drehfeldmotoren verhalten sich ebenfalls ähnlich, denn auch diese Umrichter stellen elektronische Geräte dar, deren Eingangsstrom sich automatisch der geforderten Abgabeleistung anpasst. Prinzipiell wären auch Frequenzumrichter denkbar, die für verschiedene Eingangsspannungen – etwa 400V, 500V und 690V – ausgelegt sind. Üblich ist dies jedoch nicht.

bäuden die Empfehlung eingehalten wird, dass der Spannungsfall vom Hausanschlusspunkt bis zur Steckdose 3 % nicht überschreiten sollte [3], dann kann auch der Verlust innerhalb des Gebäudes nicht über 3 % liegen [4].

Tatsächlich liegt der Wert deutlich niedriger – aber wo? Eine theoretische Untersuchung [5] ergab, dass der Verlust in einer Wohnung im günstigsten Fall, wenn sämtlicher Stromverbrauch des Jahres sich gleichmäßig über das ganze Jahr und über alle Endstromkreise verteilen würde, nur bei knapp 0,5 kWh/a läge. Im ungünstigsten Fall, wenn sämtlicher Stromver-



Bild 4: Das Produkt aus Spannung mal Strom muss näherungsweise gleich bleiben – auch auf dem Leistungsschild des Netzgeräts für einen Laptop (2011)



Bild 5: Es genügt jedoch, den Maximalwert anzugeben – auch wenn dieser nur bei der niedrigsten Eingangsspannung erreicht werden kann (Netzgerät für einen Laptop 2019)

anderen Gründen: Das Drehfeld rotiert in Abhängigkeit von der Frequenz, nicht von der Spannung. Sinkt also die Spannung, während das an der Welle geforderte Drehmoment gleich bleibt, so steigt der Schlupf etwas an – was sich allerdings auf die Drehzahl nur so geringfügig auswirkt, dass sich die mechanische Leistungsabgabe praktisch gar nicht ändert.

Der Motor kann also nicht anders reagieren als mit höherer Stromaufnahme. Sein Stromwärmeverlust steigt dadurch statt zu fallen. Dies kann sogar zu gefährlichen Situationen führen, denn der Anlaufstrom eines solchen Motors ist um ein Mehrfaches höher als sein Nennstrom, für den die Stromversorgung ausgelegt ist.

Ist die Spannung nun so eingestellt, dass sie bei Nennstrom des Motors gerade an der zulässigen Untergrenze von zum Beispiel 360V liegt, kann sie beim Zuschalten des Motors noch deutlich darunter fallen. Da das Anlaufmoment eines solchen Motors ebenfalls vom Quadrat der Spannung abhängt, könnte ein Extremfall eintreten. Es könnte passieren, dass ein lebensnotwendiger Antrieb nicht mehr anläuft – und bei nicht ganz

Theorie und Praxis

Warum lässt sich dann beim EPplus-System, das im Kern auch einen Spartransformator zur Reduktion der Betriebsspannung umfasst, dennoch ein Energiespar-Effekt nachweisen? Der Hersteller begründet dies zum einen mit dem Zusammenspiel vieler verschiedener Lasten, die ein weit verzweigtes Netz alle auf unterschiedliche Weise beanspruchen.

Die beiden Geschäftsführer berichten z. B. von einem Versuch, in dem eine einzelne Last – ein Kompressor (mit Frequenzumrichter) – an einem EPplus-System gemessen wurde. Die Einsparung habe im Vergleich zum Betrieb ohne das System exakt bei Null gelegen. Ein zweiter Versuch in einem Wasserwerk, in dem einige geregelte Pumpen – also zwar mehrere, aber nur gleiche Verbraucher – betrieben wurden, erbrachte das gleiche Ergebnis.

Die Verluste im deutschen Stromnetz, also vom Kraftwerk bis zur Verbraucheranlage, liegen seit langem schon im Bereich um 4,7 %. Wie es hinter dem Anschlusspunkt der Kundenanlage aussieht, weiß aber in der Regel kein Mensch. Wenn in Wohnge-

brauch in kürzest möglicher Zeit über so wenige Endstromkreise wie möglich flösse – diese also für diese Zeitspanne voll ausgelastet wären – läge der Verlust bei 88 kWh/a. Ein Verhältnis von 1:176, das ist eine breite Spanne, aber Genaueres lässt sich nicht sagen. Vermutlich liegt die Wahrheit dazwischen, was also etwa 7 kWh/a oder gut 0,2 % des Jahresverbrauchs entspräche, aber mehr als vermuten kann man nicht.

Sicher ist lediglich, dass die Auslastung der elektrischen Anlage z. B. in einem Büro deutlich höher liegt. Dort führt die obige Betrachtung schon zu einem anzunehmenden Verlust von 1,1 % – und die Spanne zwischen den beiden Extrem-Szenarios ist dort schon viel schmaler (zwischen 0,4 % und 2,8 %). Dieses »Ergebnis« ist also entsprechend genauer – bzw. weniger ungenau.

Für industrielle Anlagen sind ähnliche Werte zu vermuten wie für das Büro. 4,7 % Verlust auf dem 100km langen Weg vom Kraftwerk zum Übergabepunkt und – im Mittel – vielleicht 1,1 % Verlust auf dem 100m kurzen Weg vom Übergabepunkt zum Verbraucher, das ist ein Missverhältnis.

Quelle: Fassbinder

Quelle: Fassbinder

Das EPplus-System kann diese Verluste verringern. Es ist unklar, warum es hilft, denn das EPplus-System »verstärkt« den Strom auf der Ausgangsseite gegenüber der Eingangsseite in genau dem Ausmaß wie sich bei den heutigen Betriebsmitteln – wie oben ausgeführt – auch der Strombedarf bei niedrigerer Betriebsspannung erhöht.

Genau hierauf weist die Produktbeschreibung auch ausdrücklich hin. Dennoch liest man in der Schrift: »Die Induktion und das Windungsverhältnis zwischen der primären und sekundären Wicklung führt automatisch zu einer Absenkung der Nennspannung auf der sekundären Seite.« Zwar kann man den Formfehler kritisieren, dass es sich dann eben nicht um die Nennspannung handelt (die für das Netz genannt wird), sondern um die eingestellte Betriebsspannung, aber es steht hier ganz klar und eindeutig, dass die Spannung am Ausgang niedriger ist als am Eingang, der Einspeiseseite vom Netz her. Ebenso deutlich steht dort, dies sei nicht ursächlich für den ebenso deutlich messbaren Energie-spareffekt.

Eigenbedarf

Bei der Bewertung der Einsparung muss man natürlich noch den Eigenbedarf des EPplus-Systems abziehen. Auch dies wurde gemessen: An einer Anlage mit einem Bemessungsstrom von 800A, die zu 28 % ausgelastet war, wurde eine Verlustleistung von 0,29 % der Durchgangsleistung festgestellt.

Die Verlustleistung setzt sich aus Leerlaufverlust und Lastverlust zusammen, wie bei Transformatoren üblich. Der Leerlaufverlust ist ein Fixbetrag, der nur von Spannung und Frequenz am Eingang abhängt, die konstant sein sollten. Hinzu kommen konstante Hilfsleistungen wie für die Steuerelektronik und die Schützspulen. Der Lastverlust steigt im Quadrat zum Laststrom. Die relative, auf die aktuelle Last bezogene Verlustleistung nimmt damit irgendwo zwischen Leerlauf und voller Last ein Minimum an. Auf jeden Fall aber ist sie so gering, dass sie in der Betrachtung vernachlässigt werden kann.

Effekt 2: Netzreinigung

Gleichzeitig soll das EPplus-System eine umfangreiche »Netzreinigung« bewirken. Tatsächlich bringt ein Transformator – auch in Sparschaltung – immer eine gewisse Induktivität in den damit versorgten Stromkreis ein. Das ist einerseits unvermeidlich, ander-

erseits aber auch gewollt, um Kurzschlussströme innerhalb definierbarer Grenzen zu halten [6]. Auch die schon vielfach diskutierten, durch moderne Geräte verursachten Verformungen der Stromkurven (**Bild 6** – zu finden in Teil 2 des Beitrags in der folgenden »de«-Ausgabe) werden hierdurch abgemildert. Man kann sich dies auf zweierlei Arten veranschaulichen:

Zum einen stellen diese Verläufe recht abrupte Veränderungen der Stromstärken dar. Diese werden durch eingebrachte, mit dem Verbrauchsmittel in Reihe liegende Induktivitäten deutlich stärker abgemildert (»gerundet«) als es bei sinusförmig verlaufenden Strömen der Fall wäre (deren Kurvenformen schon von Natur aus rundlich sind). Flanken werden weniger steil, Spitzen nicht mehr so hoch und weniger spitz – denn es handelt sich schließlich um abrupte Änderungen der Stromstärke, denen Induktivitäten eine höhere »Trägheit« entgegensetzen.

Andererseits lassen sich diese Verformungen mathematisch als Oberschwingungen oder Harmonische beschreiben. Bei diesen handelt es sich um eine unendliche Summe sinusförmiger Verläufe, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Netzfrequenz sind. Die Reaktanz (der induktive Blindwiderstand) einer Induktivität steigt aber linear mit der Frequenz. So treffen diese Oberschwingungsfrequenzen in einer Induktivität auf Blindwiderstände, die um ein Mehrfaches höher sind als sie bei Netzfrequenz wären und gegenüber der Grundschiwingung des

Stroms – dem »eigentlichen« Laststrom – auch sind.

Die Oberschwingungsfrequenzen werden von dem System beträchtlich unterdrückt, während die Grundschiwingung durch das Einbringen des Transformators nur unmerklich gedrosselt wird. Diese Auswirkung hat auch das EPplus-System, dessen Funktionsweise wir in Teil 1 des Beitrags ausführlich vorgestellt hatten. Die Dokumentation zeigt Kurvenformen elektronischer Geräte (wie in Bild 6) mit und ohne Gebrauch des Systems. Demnach kann der Unterschied 10 % betragen, aber auch rund 30 % erreichen.

Gemeint ist damit die Höhe der Stromspitzen (wie beispielsweise in Bild 6) bzw. die Amplituden der höherfrequenten Anteile im Strom (**Bild 7**). Der Scheitelwert der Spitze wird etwas niedriger und dafür die Breite etwas größer. Die Stromkurve bekommt dadurch wieder mehr Ähnlichkeit mit der Sinusform, enthält also nicht mehr so hohe Oberschwingungen (die Amplituden der Teilschwingungen von 150Hz, 250Hz, 350Hz usw. wie in Bild 7 werden geringer).

Da diese Oberschwingungen nichts anderes sind als eine weitere Form der Blindleistung (Verzerrungs-Blindleistung), werden die Kabel und Leitungen innerhalb der Kundenanlage durch diese Maßnahme entlastet, denn die Verzerrungs-Blindleistung sinkt. Insbesondere der Neutralleiterstrom wird reduziert, der ansonsten unter solchen Bedingungen (bei einphasigen Lasten – auch

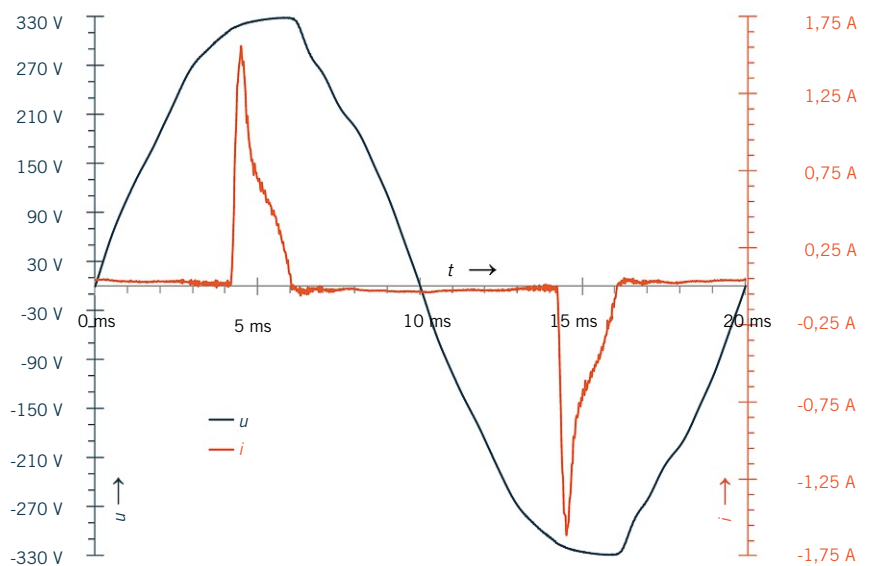


Bild 6: Eingangsstrom (rot) des Netzgeräts aus Bild 5: Keine Ähnlichkeit mehr mit dem Verlauf der Netzspannung (blau)

Quelle: Fassbinder

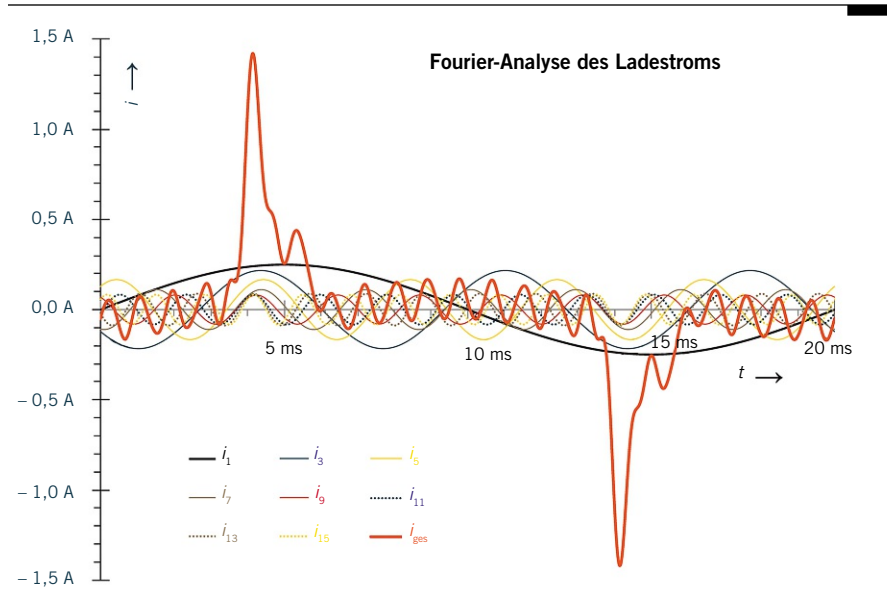


Bild 7: Fourier-Analyse der Kurve (Bild 6) aus Grundschiwingung i_1 (braun) und den Oberschwingungen i_3 bis i_{10} (grafisch dargestellt i_1 bis i_{10} – geradzahlige Oberschwingungen treten hier nicht auf)

Quelle: Fassbinder

bei symmetrischer Aufteilung) bedenkliche Höhen erreichen kann [7].

Dämpfung von Transienten

Wenn dies so ist und schnelle Stromänderungen also, je schneller sie sind, umso stärker gedämpft werden, dann gilt dies natürlich erst recht für die besonders steilen, so genannten Transienten. Es handelt sich dabei um Spitzen im μs -Bereich, die also um rund drei Größenordnungen schneller ablaufen als die »normalen« Wechsel der Wechselspannung und des Wechselstroms, und deren Spitzen die »normalen« Betriebswerte um ein Mehrfaches überschreiten. Wird z.B. ein ungeladener Kondensator ausgerechnet im Bereich des Spannungsscheitels an Netzspannung gelegt, so entsteht eine noch mäßige Stromtransiente, die in diesem Fall durch die Induktivität des Netzes gedämpft wird: Bis der Strom auf wirklich hohe Werte ansteigen kann, ist der Kondensator schon voll; seine Spannung hat sich also der des Netzes angeglichen. Höher als der Stoßkurzschlusswechselstrom des betreffenden Netzes kann diese Transiente nicht werden.

Befindet sich jedoch in der Nähe noch ein anderer – geladener – Kondensator (z.B. eine unverdrosselte Blindstrom-Kompensationsanlage), dann wird der Ausgleichsstrom zwischen den Kondensatoren nur noch durch die Induktivität und den Wirkwiderstand des Stückchens Leitungsweg dazwischen gedämpft. Der Ausgleich der Ladung erfolgt in μs – ähnlich wie beim Kurzschluss

eines geladenen Kondensators. Durch die extrem schnelle Änderung der Stromstärke können in benachbarten Leitungen Spannungstransienten induziert werden, die wiederum elektronische Baugruppen schädigen können.

Diese Auswirkungen werden durch eine irgendwie geartete Induktivität zwischen dem Leitungsstück, in dem eine Spannung induziert wird, und dem hiergegen empfindlichen Betriebsmittel verhindert. Weil diese empfindlichen Betriebsmittel stets hinter dem Anschlusspunkt einer elektrischen Anlage angeordnet sind, jedoch die der Blitzeinwirkung zu nahe liegenden Leitungsabschnitte eher davor liegen, ergibt es sich ganz von selbst, dass ein EPplus-System, wo vorhanden, stets dazwischen angeordnet sein wird. Da es sich im Wesentlichen um einen Transformator handelt, bringt dieser zwangsläufig einige Induktivität – mit der entsprechenden heilsamen Wirkung – in den Stromkreis ein: Spannungs- und Stromtransienten werden beträchtlich gedämpft. Der Spartrafo innerhalb des EPplus-Systems selbst ist hiergegen relativ unempfindlich.

Symmetrierung

Eine besondere Raffinesse des EPplus-Systems liegt in dem nicht angeschlossenen Sternpunkt. Wäre er gar nicht vorhanden, so wäre ein Betrieb nicht möglich. Die dicke Wicklung mit ihren wenigen Windungen läge dann in Reihe zum Verbraucher, ohne dass der durch den Betriebsstrom erzeugte mag-

netische Fluss im Kern den nötigen Gegenfluss erführe. Der Trafo würde betrieben wie eine Drossel, verfügt jedoch über den Eisenkern eines Transformators mit wechselseitig geschichteten Kernblechen (statt mit einem Luftspalt, wie es für eine Drossel erforderlich wäre), so dass die gegebene magnetische Feldstärke einen möglichst hohen magnetischen Fluss im Kern erzeugt.

Damit geriete der Kern aber in die magnetische Sättigung, wenn der magnetische Fluss nicht durch einen entgegen gesetzten Stromfluss in der zweiten Wicklung kompensiert würde. Die Drosselwirkung brähe mehr oder weniger zusammen, und die Drossel wäre nicht mehr linear. Wie der Hersteller bestätigt, brummt das Gerät dann sehr laut, und der Kern wird zu warm. Dieser Betriebszustand, sollte er denn jemals auftreten, würde daher von der Selbstüberwachung als Fehler erkannt, und der Bypass würde eingeschaltet.

Deswegen ist der Sternpunkt im Betrieb stets zugeschaltet. Dass er aber nicht mit dem Neutralleiter verbunden wird, führt bei einphasiger oder unsymmetrischer Belastung dazu, dass der auf dem stärker belasteten Schenkel in der dicken Wicklung fließende Strom über den Sternpunkt der dünnen Wicklung teilweise erst auf die dünne und damit induktiv auf die dicke Wicklung der anderen Schenkel übertragen wird. So werden unsymmetrische Lasten zu einem gewissen Teil symmetriert. Auch die Spitzen der nicht sinusförmigen Ströme verteilen sich von einem auf drei Außenleiter und werden dadurch noch einmal entsprechend niedriger, nachdem sie es durch die mit dem Trafo eingebrachte Längs-Induktivität schon einmal geworden sind. Entsprechend reduziert sich auch der Neutralleiterstrom in der Anlage.

Zuverlässigkeit – keine Unterbrechungen

Bei jeder Störung geht das Gerät in den Bypass-Betrieb. Dazu wird es über ein Schütz gebrückt. Das Schütz ist mit drei Ruhekontakten ausgestattet, so dass beim Abfallen stets der Bypass eingeschaltet wird, das Gerät also niemals eine Versorgungsunterbrechung verursachen kann. Der Sternpunkt der dünnen Wicklung wird vor der Umschaltung in den Bypass-Modus geöffnet (was für diesen kurzen Moment unbedenklich ist). Dies hat damit zu tun, dass das EPplus-System sich bei jedem Zuschalten von unten her an die richtige Anzapfung heran tastet.

Die praktisch unterbrechungsfreie Schaltung wird erreicht, indem während

des Umschaltvorgangs – so zu sagen – beide Schaltzustände je zur Hälfte vorliegen: Beide Zugänge, derjenige über das System und derjenige über den Bypass, sind für wenige ms über Widerstände und Drosselspulen mit dem Abgang verbunden. So sind die beiden Zugänge nicht »starr« gebrückt, aber die Versorgung des Abgangs auch nicht unterbrochen – eine Technik, wie sie auch in den Stufenschaltwerken von Großtransformatoren zum Einsatz kommt.

Messungen in der Praxis

Die Leistungsaufnahme komplexer Anlagen unterliegt ständigen Schwankungen, die weit über der Differenz liegen, die sich zwischen dem Betrieb mit und ohne Spartechnik ergibt. Um die Wirksamkeit eines solchen Systems nachweisen zu können, muss man zwei Zeiträume des Betriebs jeweils mit und ohne Spartechnik miteinander vergleichen, die ansonsten wirklich gleiche Verbräuche aufweisen müssten. Ein entsprechendes Messverfahren,

um Energiesparsysteme auf ihre Wirksamkeit zu prüfen, wurde von der Hochschule Offenburg und der Universität Florenz geprüft und für tauglich befunden, und das funktioniert so:

Die Messung erfolgt über einen Zeitraum von 24h (zukünftig 72h), wobei das EPplus-System immer für jeweils 5min in Betrieb geht und dann wieder für 5min ausgeschaltet (gebrückt) wird. Dies ergibt also 144 Zeitabschnitte zu je 5min im Sparbetrieb und 144 Zeitabschnitte zu je 5min im Bypass-Zustand. Alle 2s wird die augenblickliche

Zeit	Status	Spannung L1-N [V]	cos PHI induktiv	Blindleistung [VAR]	Wirkleistung [W]	Energie [kWh]	
10:59:52		217,8	0,933	91890	238664	70654,1	
10:59:54		217,11	0,939	95325	260978	70654,3	
10:59:56		217,33	0,935	92365	244528	70654,4	
10:59:58		217,24	0,929	88540	221981	70654,5	
11:00:00		217,21	0,937	88166	235667	70654,7	
11:00:02		217,22	0,936	87403	232702	70654,8	
11:00:04		217,3	0,939	90210	246267	70654,9	
11:00:06		217,32	0,932	94714	242682	70655,1	
11:00:08		217,71	0,931	89940	230132	70655,1	
11:00:20		217,39	0,951	93845	289205	70656	
11:00:22		217,52	0,946	88396	257767	70656,1	
11:00:24		217,8	0,935	87599	230559	70656,2	18,4 kWh, 280s
11:00:26		217,7	0,944	87051	249377	70656,4	
11:05:02		217,77	0,926	94254	231862	70674,5	
11:05:04	Sparen	217,68	0,918	96147	221931	70674,6	0,2 kWh, 2s (Schaltmoment)
11:05:06	Bypass	231,65	0,894	119630	238121	70674,8	20 kWh, 280s
11:05:08		233,54	0,886	122771	234951	70674,8	
11:09:44		234,71	0,931	98481	251573	70694,6	
11:09:46	Bypass	234,84	0,937	91724	245598	70694,8	2,5 kWh, 38s (Schaltzyklus)
11:09:48	Schaltzykl.	234,65	0,941	96405	237461	70694,9	
11:09:50		234,64	0,953	80071	252591	70695	
11:10:20		222,99	0,95	77876	236462	70697,1	18,5 kWh, 280s
11:10:22		221,75	0,959	72115	242738	70697,2	
11:10:24	Sparen	221,64	0,965	63866	233750	70697,4	
11:10:26		221,84	0,958	73846	247299	70697,6	0,1 kWh, 2s (Schaltmoment)
11:15:02		217,71	0,941	91877	255221	70715,7	
11:15:04	Sparen	217,64	0,945	83223	241389	70715,9	
11:15:06	Bypass	232,77	0,932	95673	245118	70716	19,4 kWh, 280s
11:15:08		233,76	0,901	121559	253129	70716,1	
11:19:44		234,47	0,933	103379	267220	70735,3	
11:19:46	Bypass	234,38	0,937	101152	270682	70735,4	2,6 kWh, 38s (Schaltzyklus)
11:19:48	Schaltzykl.	234,3	0,932	100828	258995	70735,5	
11:19:50		234,54	0,925	107064	261236	70735,7	
11:20:20		221,83	0,959	72536	245400	70737,8	18,5 kWh, 280s
11:20:22		221,36	0,961	77985	270387	70738	
11:20:24	Sparen	221,23	0,959	78975	268664	70738,1	
11:20:26		221,77	0,952	79091	246236	70738,3	0,2 kWh, 2s (Schaltmoment)
11:25:02		219,04	0,946	79159	230086	70756,5	
11:25:04	Sparen	218,8	0,947	77899	229525	70756,6	
11:25:06		233,04	0,918	107113	247394	70756,8	
11:25:08		235,21	0,903	116589	240293	70756,9	
11:33:06		219,07	0,943	77017	218594	70788,4	
11:33:08		218,81	0,934	74734	195786	70788,6	

Tabelle 1: Verkürzte Ansicht aus einem (im Original über 1000 Zeilen umfassenden) Prüfprotokoll des Herstellers

Tag	Wert A [kWh]	Wert B [kWh]	Zeitfenster A	Zeitfenster B	Abweichung A zu B [kWh]	Abweichung A zu B [%]
Montag	4915,7	4935,2	144	144	19,5	0,39
Dienstag	4736,8	4698,8	144	144	-38	-0,81
Mittwoch	4646,7	4645,5	144	144	-1,2	-0,03
Donnerstag	4580,7	4582,9	144	144	2,2	0,05
Freitag	4132	4138,8	144	144	6,8	0,16
Samstag	2301,9	2307,3	144	144	5,4	0,23
Sonntag	2750,5	2766,4	144	144	15,9	0,57
Montag	5038,3	5042,5	144	144	4,2	0,08
Dienstag	5051,4	5060,3	144	144	8,9	0,18
Mittwoch	5079,9	5034,9	144	144	-45	-0,89
Donnerstag	4839,1	4865,9	144	144	26,8	0,55
Freitag	4408,9	4390,7	144	144	-18,2	-0,41
Samstag	2358,2	2344,6	144	144	-13,6	-0,58
Sonntag	2807	2776	144	144	-31,5	-1,13
Montag	4730,1	4719	144	144	-11,1	-0,24
Dienstag	4638,8	4608,5	144	144	-30,3	-0,66
Mittwoch	4922,5	4938,5	144	144	16	0,32
Donnerstag	5203,6	5176,4	144	144	-27,3	-0,53
Freitag	4464,5	4401,9	144	144	-62,6	-1,42
Samstag	2184,4	2169,3	144	144	-15,1	-0,70
Sonntag	2702	2726,4	144	144	24,4	0,89
Ergebnis der 21 Tage	89050,3kWh	88874,56kWh	302x280s	3024x280s	-5,15kWh	-0,20%

Tabelle 2: Beispiel einer »Energievergleichsmessung« zur Bestimmung des »Energievergleichsfaktors«

Wirkleistung erfasst. Am Ende werden jeweils alle 2-s-Werte der Abschnitte mit aktivem Sparsystem und alle 2-s-Werte der Abschnitte mit gebrücktem Sparsystem gemittelt. Diese Werte stellen dann die beiden 24-h-Mittelwerte der Leistungsaufnahme mit bzw. ohne Spartechnik dar. Wie das Protokoll (**Tabelle 1**) zeigt, wird zur Kontrolle auch die Energie fortlaufend gezählt und alle 2s protokolliert.

Dann kommt natürlich ein Skeptiker an und fragt, ob denn nun die häufigen Augenblicke der Umschaltungen in die Abschnitte mit oder ohne Spartechnik fallen, denn dies kann einen Unterschied machen, der das Ergebnis verfälscht. Denken wir nur an die vielen Glättungskondensatoren, die beim Absinken der Netzspannung einen Moment lang die Versorgung der Geräte übernehmen, in denen sie eingebaut sind, und beim Anstieg der Netzspannung wieder auf die höhere Spannung aufgeladen werden. Dies kann eine Verschiebung des Energieverbrauchs vom einen in den anderen Abschnitt bewirken.

Doch nein – das hat man sehr wohl bedacht. Um die Messgenauigkeit bei der Vergleichsmessung gewährleisten zu können, wird die Umgebung des Schaltvorgangs nicht mit einbezogen: Nach Einschaltung des Sparmodus startet die Erfassung der Messwerte erst mit einer Verzögerung von 20s, weil das Gerät sich nicht nur einschalten, sondern auch in die richtige Stufe

hochsetzen muss. Beim Ausschalten reicht dann ein Aussatz von 2s. Die Werte aus diesen »Karenzzeiten« werden im Prüfbericht separat ausgewiesen und fließen in die Auswertung nicht mit ein (**Tabelle 2**).

So weit, so gut. Nun kann aber immer noch ein weiterer Skeptiker auftauchen und argwöhnen, die Last könne aus irgendwelchen Gründen einem 5-min-Rhythmus folgen. Das ist unwahrscheinlich, aber möglich. Um zu zeigen, dass dies nicht der Fall ist, wird nun die Leistungsmessung unter den gleichen Bedingungen – aber ohne wirkliche Schaltungen – über einen Zeitraum von mindestens 21 Tagen durchgeführt. Nach Abschluss lassen sich – so zu sagen – die »geradzahligen« 5-min-Fenster (in denen die Spartechnik eigentlich eingeschaltet gewesen wäre – Wert A in Tabelle 1) und die »ungeradzahligen« 5-min-Fenster (in denen die Spartechnik auf jeden Fall ausgeschaltet gewesen wäre – Wert B in Tabelle 1) jeweils addieren. Ein Vergleich der beiden Summen erwies in einem Praxisfall eine Abweichung von 0,2%. Dies nennt man bei Livarsa den »Energievergleichsfaktor«. Weitere Praxisfälle werden im Internet aufgelistet [8]. Dort findet sich auch die Begründung, wie man auf das Intervall von 5min kam:

- Je kürzer das Intervall, desto stärker werden bei der tatsächlichen Messung die Schützkontakte des EPplus-Systems beansprucht. Die Vergleichs-Messzyklen

ohne wirkliche Umschaltung müssen aber genau dem gleichen Muster folgen, sonst ist eine Vergleichbarkeit nicht gegeben.

- Je länger das Intervall, desto größer ist jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass eben doch eine Periodizität gefunden wird und der Schaltzyklus somit untauglich ist. Ein Extrem-Beispiel als Gedanken-Experiment: Würde man einen Zyklus von 24h wählen, so geriete bisweilen ein Werktag in den einen und ein Sonntag in den anderen Zyklus. In der Praxis hat sich ein Zyklus von 5min am besten bewährt, wie ein Vergleich der Daten aus 16 verschiedenen stromintensiven Unternehmen über jeweils 31 Tage zeigen konnte [8]. Die Abweichungen lagen im Mittel bei 0,069 % und im Extremfall bei 0,24 %. Dies entspricht der Ungenauigkeit, mit der man leben muss – und kann.

So wird dies bei jedem Kunden nach jeder Neuinstallation durchgeführt, und damit ist das Messverfahren »wasserdicht«. Eine wirklich schlüssige theoretische Erklärung für die Einsparung fehlt weiterhin, jedoch die Wirksamkeit des Systems ist hiermit nachgewiesen – bei jedem Kunden wieder.

Finanzierung, Beispiele und Referenzen

Die Bandbreite des Typenspektrums reicht von 80A bis 4000A. Bei den kleinen Baugrö-

ßen ist die Finanzierung eher »schwierig«. Hier muss die (zuvor vom Anbieter in einem Gutachten eingeschätzte) Einsparung schon groß sein, damit sich der Einbau lohnt. Bei den größeren Typen lohnt sich die Investition fast immer ohne Schwierigkeiten. Dies liegt am Wachstumsgesetz, also der mit der Größe zunehmenden Leistungsdichte elektrischer Maschinen: Ein Transformator von z.B. 100 kVA leistet zwar 1000 Mal so viel wie ein Transformator von 100VA, bringt es aber bei Masse und Volumen, also auch beim Materialbedarf, »nur« auf das 100-Fache.

Wer ein EPplus-System kauft, geht kein Risiko ein. Der Hersteller bietet ein Finanzierungsmodell an, bei dem das System aus der hiermit erzielten Ersparnis finanziert wird. Zuvor wird die Anlage des Kunden begutachtet, ob die Ersparnis möglich ist. Falls ja, so wird hierfür auch garantiert. Ist dies nach Einschätzung von Livarsa nicht möglich oder fraglich, lehnt man den Einbau ab. Man berichtet z.B. von einem Fall einer großen Fabrikanlage mit einem Stromschienensystem für 2500A, an dem jedoch durchgängig nur Frequenzrichter betrieben wurden. Die Erfahrung lehrt, dass hier keine Ersparnis zu erzielen ist.

Livarsa hat aber in Deutschland, der Schweiz und Österreich mittlerweile über 150 EPplus-Systeme im Einsatz. Weltweit sind es über 700 Anlagen. Davon werden 53 namentlich als Referenzen genannt [9]. Bei diesen muss die Rechnung also schon mal aufgegangen sein.

Kann man den Einbau eines EPplus-Systems also empfehlen? Offensichtlich ist dies der Fall, selbst wenn die theoretische wissenschaftliche Begründung dahinter un schlüssig ist und auch der einfache elektro-technische Verstand nicht dahinterkommt, warum es eigentlich wirkt, doch der Nachweis der Wirksamkeit wird bei jeder Installation erbracht.

Ob andere ähnliche Anlagen diesen Effekt dann auch erbringen? Möglicherweise nur dann, wenn sie auch über den offenen Sternpunkt verfügen. Hier könnte das Geheimnis liegen – der jedoch nach bisherigen Erkenntnissen nur von Livarsa angeboten wird.

AUTOR

Dipl.-Ing. Stefan Fassbinder
Deutsches Kupferinstitut

Literatur

- [1] Stefan Fassbinder: »Energiespartechniken im Grenzbereich zur Esoterik«. »de« 5 und 6.2013
- [2] »Livarsa – Das EPplus-System – Technischer Hintergrund«, www.livarsa.ch/wp-content/uploads/Technik_EPplus-System_Gesamtbroschuere.pdf
- [3] DIN VDE 0100-520 (VDE 0100-520): 2013-06, Anhang G
- [4] Komplette Berechnung eines Lichtbands, »de« 13-14.2019, S. 24
- [5] <https://de.slideshare.net/sustenergy/energy-efficiency-in-low-voltage-building-wire>
- [6] Stefan Fassbinder: »Transformatoren erzeugen sinnvolle Spannungsebenen«, »de« 19.2001, S. 30, und »Aufbau und Betrieb von Verteiltransformatoren«, »de« 8 und 10.2002
- [7] DIN VDE 0100-520 Beiblatt 3 (VDE 0100-520 Beiblatt 3):2012-10
- [8] www.livarsa.ch/wp-content/uploads/PDF_Ermittlung_des_Energievergleichsfaktors-1.pdf
- [9] www.livarsa.ch/referenzen/referenzen.html