# Der Spannungsfall als Problemfall

*S. Fassbinder,* Düsseldorf

**Nichts auf der Welt ist perfekt, noch nicht einmal elektrotechnische Normen; wie viel Mühe auf deren Erstellung auch immer verwendet wird. Manchmal ist es auch – trotz aller Bemühungen um ein scharf definiertes Vokabular – unklar, was womit gemeint ist. So ist es auch mit der Spannungsfallberechnung nach DIN VDE 0100-520 in der aktuellen Ausgabe vom Juni 2013.**

So erhielt die DKE [1] vor einiger Zeit eine Zuschrift, mit der eine Elektrofachkraft auf eine Unklarheit bei der Formel zur Berechnung des Spannungsfalls aufmerksam machen wollte: „In der neuen Ausgabe von DIN VDE 0100-520 findet sich in Anhang G eine neue Formel zur Berechnung des Spannungsfalls auf Leitungen. In dieser wird als spezifischer elektrischer Widerstand die tatsächliche Temperatur berücksichtigt. Daneben wird der Blindwiderstand je Längeneinheit des Leiters berücksichtigt. Für den cosφ wird – wenn nicht bekannt – ein Wert von 0,8 (sinφ = 0,6) angenommen. Eine Berechnung mit der alten Formel

$$A = \frac{2\ l\ I \cos\varphi\ \mu}{\kappa\ U_V}$$

ergibt für eine Wechselstromleitung, 16 A Nennstrom, 1,5 mm², bei einem Spannungsfall von 3 % ($U_V$ = 6,9 V) bei einem κ von 56 m/(Ω mm²) eine maximale Leitungslänge von etwa 18 m. Bei Berechnung mit der neuen Formel komme ich auf eine Länge von 14,375 m.

Autor
Dipl.-Ing. *Stefan Fassbinder* ist Berater für elektrotechnische Anlagen beim Deutschen Kupferinstitut (DKI), Düsseldorf.

Verändere ich jetzt jedoch den cosφ auf 0,8, so erhalte ich nach der alten Formel eine maximale Leitungslänge von 22,6 m, nach der neuen Formel jedoch nur noch 3,59 m. Hier scheint in der Formel ein Fehler vorzuliegen. Könnten Sie das bitte mal prüfen?“

Dem Anfragenden war hier jedoch selbst ein Fehler unterlaufen – allerdings einer, den die Formulierung des Textes nahe legt. Die in der neuen Fassung der Norm verwendete Formel lautet:

$$u = b\left(\rho_1 \frac{L}{S} \cos\varphi + \lambda L \sin\varphi\right) I_B$$

mit

- *u* Spannungsfall in Volt;
- *b* Koeffizient:
  - 1 bei dreiphasigen Stromkreisen und
  - 2 bei einphasigen Stromkreisen;
- $\rho_1$ spezifischer elektrischer Widerstand der Leiter im ungestörten Betrieb bei der entsprechenden Temperatur: 1,25-mal der spezifische elektrische Widerstand bei 20° C, also 0,0225 Ωmm²/m für Kupfer und 0,036 Ωmm²/m für Aluminium;
- *L* gerade Länge der Kabel- und Leitungsanlage in m;
- *S* Querschnitt der Leiter, in mm²;

Quelle: *Purwin*

**„Oh Mann, lag da unterwegs wieder ein Haufen Spannungsabfall herum...“**

cosφ Leistungsfaktor; falls nicht bekannt, wird der Wert 0,8 (sinφ = 0,6) angenommen;

λ Blindwiderstand je Längeneinheit des Leiters; falls nicht bekannt, wird ein Wert von 0,08 mΩ/m angenommen;

$I_B$ Betriebsstrom (in Ampere);

$U_0$ Spannung zwischen Außen- und Neutralleiter, in Volt.

Bei der Bestimmung des Spannungsfalles insbesondere nach der DIN VDE 0100-520 lauern gleich mehrere **Fallen**, die folgend erläutert werden. Zudem werden Alternativen vorgeschlagen.

## 1 Größen-Wirrwarr

Die erste Falle lauert auf der formalen Ebene. Es werden durchgängig und wild beliebig neue bzw. andere Formelzeichen verwendet als sämtlichen internationalen Festlegungen entspräche. Hier werden Tomaten in Äpfel, Äpfel in Birnen und Birnen in Kürbisse umbenannt. Gemäß SI-Einheiten [2] steht dagegen:

*S* für Scheinleistung; Querschnittsfläche müsste *A* sein (eine Abweichung, die man leider in mehreren elektrotechnischen Normen findet).

*L* für Induktivität; Länge müsste *l* sein.

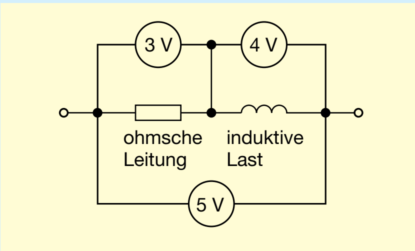
λ für Leistungsfaktor; induktive Reaktanz müsste $X_L$ sein ($x_L$ für längenbezogene Größen, so genannte Beläge).

Offensichtlich war dies in der alten Version noch richtig gewesen. Überflüssig – ja, sogar falsch – ist auch die Einschränkung, dass für die Größen bestimmte Einheiten vorgegeben werden. Dies ist nur für so genannte „zugeschnittene Größengleichungen“ notwendig, in die bestimmte Faktoren schon eingearbeitet sind. Die vorliegende Formel müsste auch dann korrekte Ergebnisse liefern, wenn man (aber dann alle) Spannungen in Millivolt und (aber wenn, dann alle) Ströme in Kiloampere eingibt. Ein weiterer Widerspruch ergibt sich dadurch, dass man diesen Fehler bzw. diese unnötige Bestimmung nicht konsequent durchzieht, sondern in einem Fall von „Blindwiderstand je Längeneinheit“ spricht. „Blindwiderstand pro Meter“ hätte es dann heißen müssen, wenn man schon damit angefangen hat.

## 2 Dezimalstellen-Wirrwarr

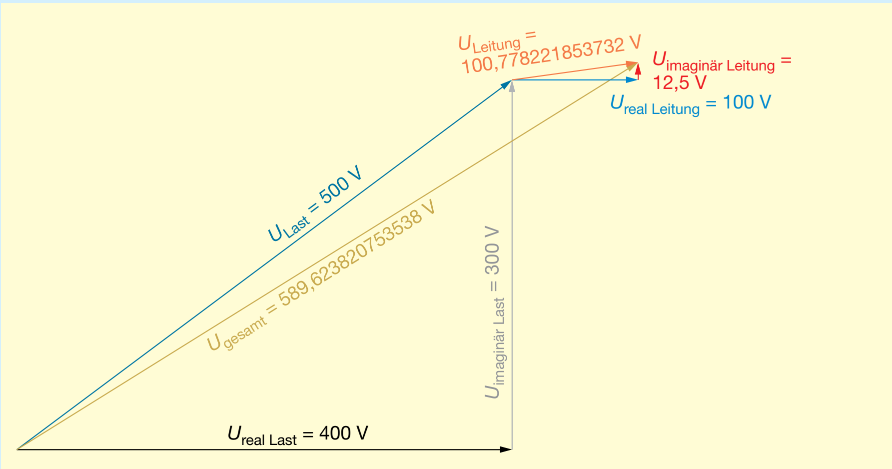
Während dies so ist, legt der Text der Norm nichtsdestoweniger nahe, die Wirkwiderstände der Leitungen in Ohm, die Blindwiderstände aber in Milliohm einzugeben – Falle Nr. 2. Die vordem genannten Zahlen sind beide Male sehr klein (ρ = 0,0225 Ωmm²/m für Kupfer und ρ = 0,036 Ωmm²/m für Aluminium – $x_L$ = 0,08 mΩ/m), was der Verwechslung Vorschub leistet. Besser hätte man alle Werte in Milliohm eingegeben (ρ = 22,5 mΩmm²/m für Kupfer und ρ = 36 mΩmm²/m für Aluminium – $x_L$ = 0,08 mΩ/m, wie gehabt).

So wäre auch gleich aufgefallen, dass die reaktiven Leitungsbeläge sehr viel kleiner sind als die ohmschen. Insbesondere bei kleinen Leiterquerschnitten überwiegt der aktive Anteil den reaktiven um rund drei Größenordnungen – und so gab der eingangs erwähnte Anfrager den Blindwiderstand der Leitung um den Faktor 1000 zu hoch ein. Dem ersten Normungskollegen, der sich der Sache annahm, unterlief der gleiche Irrtum; erst der zweite bemerkte den Fehler.



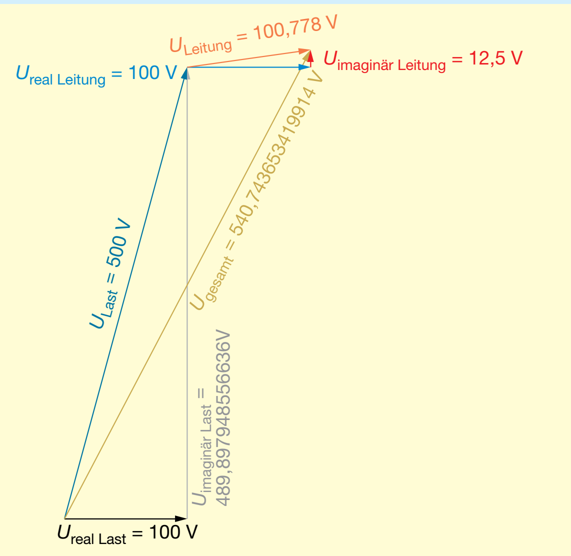

Quelle: S. Fassbinder/ep

**❶ Manchmal ist in der Wechselstromtechnik 3 + 4 = 5**




Quelle: S. Fassbinder/ep

**❷ Eine ohmsch-induktive Last soll mit 500 V versorgt werden – welche Spannung muss am Anfang der Leitung eingespeist werden? Wie hoch ist der Spannungsfall?** ▶




Quelle: S. Fassbinder/ep

◀ **❸ Eine stark induktive Last soll mit 500 V versorgt werden – welche Spannung muss am Anfang der Leitung eingespeist werden? Wie hoch ist der Spannungsfall?**

Quelle: S. Fassbinder

**❹ Eine große induktive Prüflast** ▶

Bei größeren Leiterquerschnitten nimmt der Wirkwiderstand naturgemäß umgekehrt proportional ab; der Blind-Anteil nimmt dagegen zu, da der Mittenabstand zwischen Hin- und Rückleiter größer wird.
Die eigentliche Neuerung der Ausgabe 2013 allerdings sollte darin bestehen, dass nun mit dem Warmwert des Widerstands gerechnet wird. Dies ist ein sinnvoller Ansatz, da es darum geht, den Spannungsfall bei maximaler Last zu ermitteln, und bei maximaler Last tritt die höchste dauerhafte Leitertemperatur auf. Außerdem nahm die alte Formel die Leitungsimpedanz aus oben genannten Gründen als rein ohmsch an. Dies ist insbesondere z. B. für den Wohnungsbau eine zulässige Vereinfachung. In der neuen Formel wurde versucht, mit Rücksicht auf industrielle Anlagen die induktiven Reaktanzbeläge der großen Leitungsquerschnitte mit zu berücksichtigen.

## 3 Kein Spannungsfall auf vorhandenem Neutralleiter

Wundern darf man sich bei der Falle 3 über den Faktor *b*: Offensichtlich wird bei einphasigen Stromkreisen zwar der Hin- und Rückweg berücksichtigt, bei dreiphasigen aber verschwindet der Rückstrom ‚irgendwo‘, obwohl doch alle drei Leiter eines Drehstromkreises genauso ständig belastet sind wie die beiden Leiter eines Wechselstromkreises. Bei der Erwärmung wird jeder Strom in jedem Leiter gerechnet; beim Spannungsfall auf einmal nicht mehr, während doch ständig, solange Strom fließt, auf jedem Leiter ein dem Strom und der Impedanz entsprechender Spannungsfall vorhanden sein muss.

## 4 Spannungsfall auf nicht vorhandenem Neutralleiter

Wundern darf man sich erneut, dass stets mit der Strangspannung Außen- gegen Neutralleiter gerechnet werden soll – auch in reinen Drehstromkreisen, in denen der Neutralleiter gar nicht vorhanden ist und die vorgegebene Bezugsspannung von 230 V nirgends auftritt – Falle Nr. 4.
Dass diese wundersamen Erscheinungen beide in der Praxis nicht auffallen, mag auf ihr stets gemeinsames Auftreten zurück zu führen sein, da sie sich so weitgehend gegeneinander kompensieren, bis sie nicht mehr ohne weiteres in Erscheinung treten.
Tatsächlich wird der Spannungsfall gemäß Falle Nr. 3 halbiert, dann aber der Absolutwert (in Volt, Kilovolt, Millivolt; was auch immer) gemäß der hier besprochenen Falle 4 auf fiktive 230 V statt auf die einzig vorhandene Spannung von 400 V bezogen. Der relative Wert in Prozent wird also um den Faktor $\sqrt{3} \approx 1{,}73$ zu groß errechnet. und der gesamte Fehler liegt nur noch bei $\sqrt{3}/2 \approx 0{,}866$. Das liegt nahe bei 1; merkt niemand.

Inzwischen wurde das Thema in mehreren Normungsgremien diskutiert. Zu Anfang hieß es: „Nein, im Drehstromnetz (also zumindest bei symmetrischer Belastung) heben sich doch die Ströme auf! Im Rückleiter fließt doch nichts!“ Nach dem Hinweis darauf, dass hierbei zuerst mit 2, danach mit $1/\sqrt{3} \approx 0{,}577$ multipliziert wird, was die Normer offenbar einsahen, wurde es etwas ruhig im Raum.
Eine weitere Überlegung ist, dass ein ohmscher Spannungsfall Leitungsverluste verursacht – in beiden Leitern, hin und zurück. Es kann jedoch nicht angehen, dass, wenn ein dritter Leiter hinzu tritt, auf einmal nur noch in einem von 3 Leitern Verluste auftreten, während, was niemand bezweifelt, in allen 3 Leitern (gleiche) Ströme fließen.

## 5 Produkt aus Äpfeln und Birnen

Der neuen Formel liegt die Überlegung zu Grunde, dass

$\sin^2\varphi + \cos^2\varphi = 1$ ist.

Die in der Norm beispielhaft genannten Zahlenwerte bestätigen es – für einen Winkel von $\varphi = 36{,}87°$ ist $\cos\varphi = 0{,}8$ und $\sin\varphi = 0{,}6$. Wir machen die Probe:

$0{,}8^2 + 0{,}6^2 = 0{,}64 + 0{,}36 = 1.$

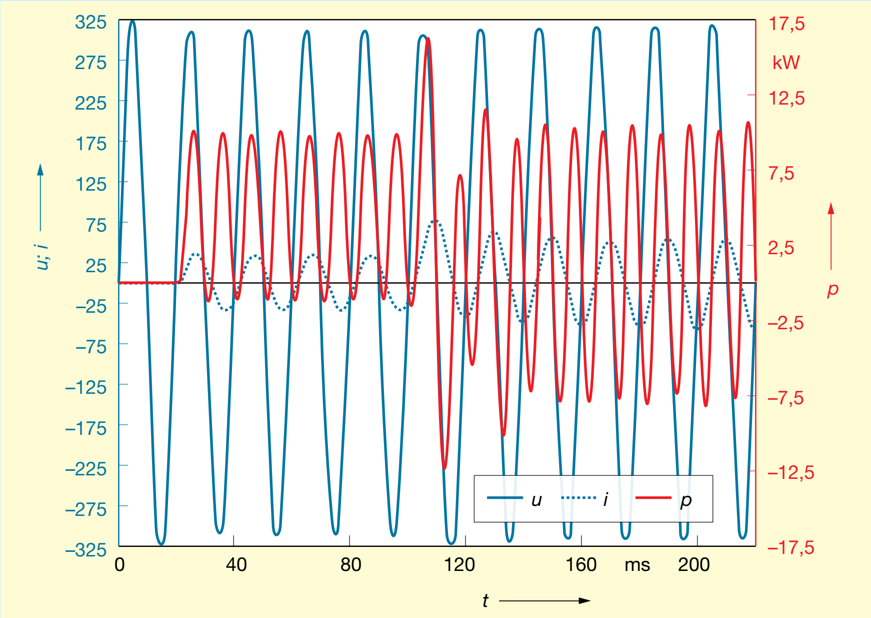
Genauer geht’s nicht. Dies führt zu den für die Wechselstromtechnik typischen und allgegenwärtigen Beziehungen

$$U_R = U \cos\varphi$$

$$U_X = U \sin\varphi$$

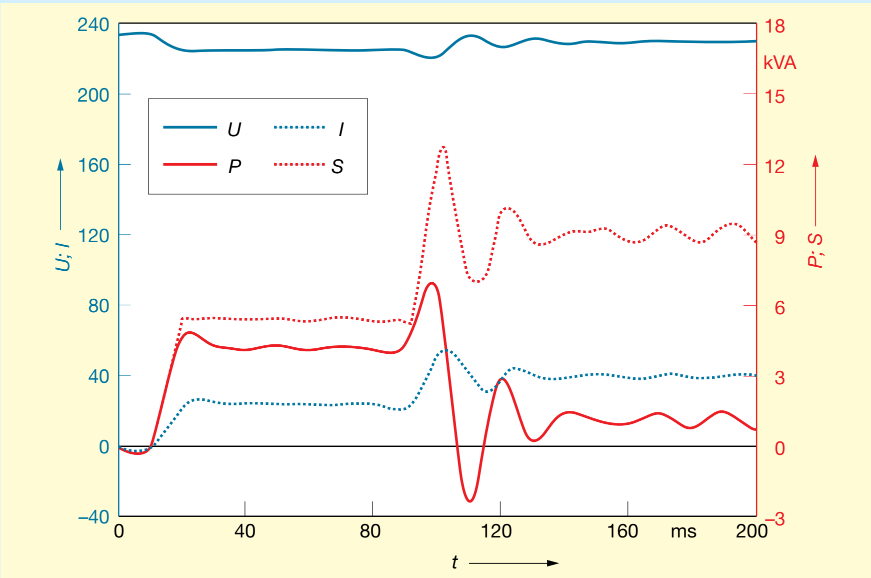
$$U = \sqrt{U_R^2 + U_X^2}$$

Dies jedoch setzt mit einer die Erwähnung erübrigenden Selbstverständlichkeit voraus, dass sich die Größen $U$ und $\varphi$ auf dasselbe Element im Netz beziehen. Welcher Phasenwinkel aber ist mit $\varphi$ in dem Produkt $L \times \lambda \times \cos\varphi$ in der neuen Formel gemeint? Es wird allgemein angenommen, es handle sich um den Phasenwinkel der Last. Multipliziert wird der $\cos\varphi$ der Last aber mit der Reaktanz der Leitung – Falle Nr. 5. Das kann man tun, aber was soll die Erkenntnis hieraus sein? Das ist gerade so, als multipliziere man die Leerlaufspannung einer Anlage mit ihrem Kurzschlussstrom. Was dabei herauskommt, ist keineswegs etwa die Bemessungsleistung der Anlage! Leerlauf und Kurzschluss schließen sich gegenseitig aus. Sie können nicht gleichzeitig vorliegen. Die so errechnete „Kurzschlussleistung“ ist lediglich eine virtuelle Größe, die zur Einschätzung dessen, was im Falle eines Falles eintreten wird, hilfreich sein kann.
Man könnte auch die Transportkapazität eines Ozeanriesen mit der Geschwindigkeit eines Flugzeugs multiplizieren und bekäme eine fabelhafte Jahrestonnage – aber von was? Die eines Luftschiffs, bei dem man zu Gunsten



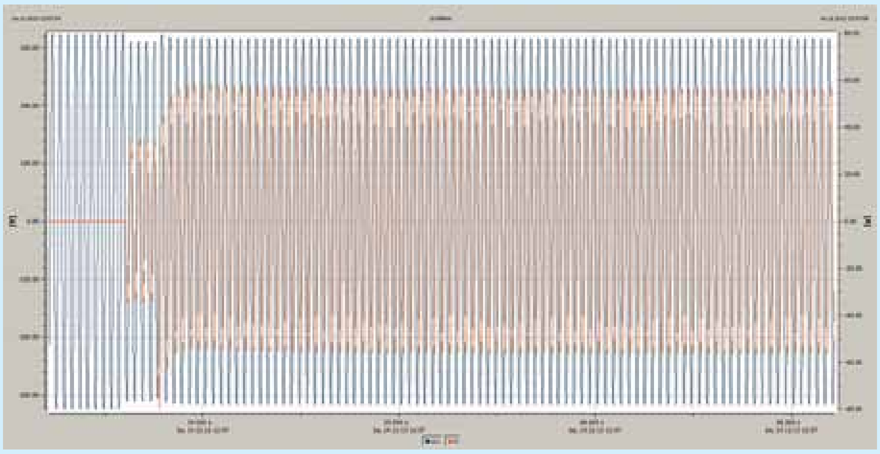

Quelle: S. Fassbinder/ep

**❺ Einschalt-Vorgang der Prüflast nach Bild 4 im Detail**




Quelle: S. Fassbinder/ep

**❻ Einschalt-Vorgang der Prüflast nach Bild 4 in über jeweils eine Periode ermittelten Effektivwerten**



Quelle: S. Fassbinder/ep

**❼ Einschalt-Vorgang der Prüflast nach Bild 4 in der Totale**

des Frachtraums auf 100 000 m³ Helium verzichtet hat? Ebenso gut könnte man das Brutto-Inlandsprodukt Frankreichs durch die Einwohnerzahl Spaniens teilen, und niemandem würde etwas auffallen – wegen des korrekten Ergebnisses auch nicht, dass der Rechnung ansonsten Inhalt, Sinn und Ziel fehlt. Teilt man das Brutto-Inlandsprodukt Deutschlands durch die Einwohnerzahl von Liechtenstein, dann gehen die ersten Augenbrauen hoch. Eine **Beispielrechnung** verdeutlicht, dass die Formel so, wie sie jetzt in der Norm steht, nicht richtig sein kann:

Schließen wir doch einmal eine Blindstrom-Kompensationsanlage 3 x 230 V/3 x 16 A an; macht 11 kvar. Der Leiterquerschnitt sei 2,5 mm², die Verlustleistung der Anlage betrage 175 W (was kein berauschend niedriger Wert ist). Dann ist φ = 89° und cosφ = 0,0175. Damit ergäbe sich eine zulässige Leitungslänge von über 2 km – sehr erstaunlich schon allein deshalb, weil dann der Kurzschlussstrom am Ende der Leitung nur noch gut 6 A wäre, also sprich, der ohmsche Spannungsfall an der Leitung betrüge bei einem Strom von nur 6 A schon 230 V, entsprechend 100 %.

Kaum teilt jemand durch Liechtenstein, schon fällt’s auf.

Als die Angelegenheit im Unterkomitee 221.2 der DKE diskutiert wurde, wurde verschiedentlich das Argument vorgebracht, diese Formel sei eben für extreme Fälle nicht anwendbar. Dem wurde entgegen gehalten, dass eine Formel, die in Extremsituationen extrem falsche Werte liefert, in der Regelsituation nur mäßig falsche Werte liefert – aber eben keine richtigen. Dann ist es besser, mit Schätzwerten zu arbeiten als mit einer prinzipiell falschen Formel, die im fraglichen Bereich – so hofft man – durch Zufall ungefähr richtige Werte liefert. Eine Formel, in der ein Term „cosφ“ vorkommt, die aber nur dann richtige Werte liefert, wenn z. B. cosφ = 0,8 ist, sollte an Stelle dieses Terms besser den Wert 0,8 enthalten. Eine Uhr, die steht, geht auch zweimal am Tag richtig, aber ehe man eine solche benutzt, ist es doch wohl besser, die Tageszeit nach dem Sonnenstand abzuschätzen. Warum soll eine Division durch die Einwohnerzahl Liechtensteins ungültig sein? Liechtenstein ist ein gültiges Land.

Um die beabsichtigte Wirkung zu erzielen, nämlich nicht nur den Phasenwinkel der Last, sondern auch den der Leitung bei der Berechnung des Spannungsfalls zu berücksichtigen, ist eine aufwändigere Methode erforderlich:

- Beide Spannungsfälle zunächst jeweils in ihre Wirk- und Blindanteile zerlegen.
- Die beiden Wirkanteile addieren.
- Die beiden Blindanteile addieren.
- Nun lässt sich aus der Summe der Wirkanteile und der Summe der Blindanteile wieder der Gesamt-Betrag und der resultierende Phasenwinkel der Reihenschaltung errechnen.

Diese Rechenschritte alle in einer einzigen Formel zusammenfassen zu wollen führt jedoch zu einer Formel von Dimensionen, wie man sie in einer Doktorarbeit der Physik oder der Volkswirtschaft erwarten würde, in einer elektrotechnischen Norm aber nicht sehen möchte.

## 6 Zweideutigkeit des Spannungsfalls

Den Spannungsfall darf man schon seit geraumer Zeit nicht mehr „Spannungsabfall" nennen – wahrscheinlich, um dem alten Laborspruch „Spannungsabfälle nicht in den Papierkorb werfen – Brandgefahr!" den Garaus zu machen (vergleiche auch Karikatur). Letztendlich aber ist noch nicht einmal klar, was mit „Spannungsfall" überhaupt gemeint ist. Normalerweise lautet die Frage:

- Um wie viel knickt die Spannung am Ende der Leitung ein, wenn ich die Last anschließe?

Ansonsten aber, wenn von anderen Reihenschaltungen als denen von Leitung und Last die Rede ist, lautet die Frage nach dem „Spannungsfall":

- Welche Spannung kann ich zwischen Anfang und Ende eines Elementes abgreifen?

Dies ist nicht das gleiche, solange beide in Reihe liegenden Elemente nicht gerade zufällig gleiche Phasenwinkel aufweisen! Im Extremfall, wenn eine Leitung mit rein ohmschem Charakter eine reine Blindlast speist (Bild ❶) oder umgekehrt, ist scheinbar 0,8 + 0,6 = 1 wie in obigem Beispiel, da sich diese Größen nun wie senkrecht zueinander stehende Vektoren bzw. die Seiten in einem rechtwinkligen Dreieck zueinander verhalten. Schon vor Jahrzehnten titelte ein Fachbuch zum Thema: „3 + 4 = 5?". Da die Spannung in unserem Netz nur deswegen sinusförmig verläuft, weil sie (immer noch zum größeren Teil) aus rotierenden Maschinen stammt, hat diese Spannung derart viel mit Winkelfunktionen zu tun.

### 6.1 Begrifflichkeit des Spannungsfalls in der Theorie

Zur Veranschaulichung soll hier ein erdachtes Beispiel mit möglichst runden Zahlen gerechnet werden: Eine ohmsch-induktive Last muss mit 500 V versorgt werden, bestehend aus dem Realteil (ohmschen Anteil) von 400 V und dem Imaginärteil (reaktiven Anteil) von 300 V ($\varphi \approx 36{,}87°$). Der imaginäre Anteil der Leitungsimpedanz ist nur schwach induktiv – wenn auch nicht so schwach wie in der Realität, damit man im Bild überhaupt noch etwas sieht. Der Spannungsfall der Leitung habe bei dem geforderten Strom einen Realteil von 100 V und einen Imaginärteil von 12,5 V ($\varphi \approx 7{,}125°$). Das ergibt einen Spannungsfall von etwa 100,8 V insgesamt. Auch dieser Wert wurde im Vergleich zur Lastspannung unverhältnismäßig groß gewählt, damit man im Zeigerdiagramm (Bild ❷) noch etwas davon erkennt. Am Anfang der Leitung muss nun eine Spannung von ≈589,6 V eingespeist werden, damit an der Last noch 500 V ankommen. Der Spannungsfall beträgt damit ≈ 89,6 V. Oder doch 100,8 V?

Der Unterschied ist schon auffällig, wird aber umso erheblicher, je niedriger der Leistungsfaktor der Last wird. Reduziert man den Realteil der Lastspannung auf 100 V, steigt der Imaginärteil auf ≈ 489,9 V, um die Gesamtspannung auf 500 V zu halten ($\varphi \approx 78{,}46°$). Die Leitung bleibt dieselbe, aber an ihrem Anfang muss nun nur noch eine Spannung von ≈ 540,74 V eingespeist werden, macht nun nur noch einen Spannungsfall von 40,74 V zwischen ein- und ausgeschalteter Last. Derweil beträgt der Spannungsfall zwischen Anfang und Ende der Leitung nach wie vor 100,8 V.

**Also was ist das denn nun eigentlich, der Spannungsfall? Es ergibt sich die Notwendigkeit zur Definition eines zweiten Begriffes. Die Differenz zwischen Leerlauf und Volllast sollte man vielleicht Spannungsschwund, Spannungsverlust oder am besten Spannungsrückgang nennen.**

### 6.2 Überprüfung in der Praxis

Wer einmal in der Transformatoren-Industrie gearbeitet hat, hat möglicherweise noch eine große induktive Prüflast auf Lager. Das Gerät (Bild ❹) nimmt bei 230 V und 50 Hz einen Strom von rund 40 A auf und weist einen Leistungsfaktor von $\cos\varphi \approx 0{,}1$ auf. Es lässt sich nur über einen Einschaltstrom-Begrenzer an eine Haussteckdose anschließen. Selbst dann sollte man den Versuch zeitlich in engen Grenzen halten und nicht auf die nach einigen Sekunden unausweichlich erfolgende Auslösung des Leitungsschutzschalters B 16 A warten, denn dieser ist für Leistungsfaktoren von $\cos\varphi > 0{,}6$ bemessen!

Ein solcher Strom verursacht natürlich einen entsprechenden Spannungsfall entlang der Leitung, aber der Spannungsrückgang an der Anschlussstelle beim Einschalten hält sich, wie die zuvor dargebrachte Theorie es fordert, in engen Grenzen, wie die Verläufe der Augenblickswerte (Bild ❺) ebenso wie die der Effektivwerte (Bild ❻) zeigen:

Der Strom wird zunächst durch den Einschaltstrom-Begrenzer (ein Serien-Widerstand, der nach etwa 4 Perioden gebrückt wird) auf ≈ 25 A (Scheitelwert) begrenzt. Dabei bricht der Spannungsscheitel um etwa 13,5 V (Effektivwert ≈ 9 V) ein. Die Verläufe der Augenblickswerte der Leistungsaufnahme (Bild ❺) und der gemittelten Leistungsaufnahme (Bild

**Tafel ❶ Berechnung des Spannungsfalls unter Berücksichtigung des Phasenwinkels der Leitung bei ohmscher Last**

| **Berechnung des Spannungsfalls in Kabel- und Leitungsanlagen alternativ zu VDE 0100-520, Anhang G** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ρ | Spezifischer Widerstand (warm) | für Cu: | 0,0225 µΩm | 0,0225 µΩm |
| | | für Al: | 0,0360 µΩm | |
| $I_B$ | Stromkreis | Betriebsstrom | | 16,00 A |
| $U_0$ | | Bemessungsspannung | | 230,00 V |
| $l$ | Leitung | Länge | | 14,38 m |
| $A$ | | Leiterquerschnitt | | 1,5 mm² |
| $x_L$ | | Reaktanzbelag | | 0,08 Ω/km |
| $U_{R\ Leitung}$ | | Ohmscher Fall | | 6,90 V |
| $U_{X\ Leitung}$ | | Induktiver Fall | | 0,02 V |
| $\cos\varphi_{Leitung}$ | | | | 1,00000 |
| $\sin\varphi_{Leitung}$ | | | | 0,00267 |
| $\varphi_{Leitung}$ | | | | 0,15° |
| $\cos\varphi_{Last}$ | Last | | | 1,00000 |
| $\sin\varphi_{Last}$ | | | | 0,00000 |
| $\varphi_{Last}$ | | | | 0,00° |
| $\Delta U_{Leitung}$ | Spannungsfall | absolut | entlang der Leitung | 6,90 V |
| $\Delta U_{Leitung}/U$ | | relativ | | 3,00 % |
| $\Delta U_{Steckd.}$ | | absolut | an der Steckdose | 6,90 V |
| $\Delta U_{Steckd.}/U$ | | relativ | | 3,00 % |

**Tafel ❷ Berechnung des Spannungsfalls unter Berücksichtigung des Phasenwinkels der Leitung bei induktiver Last**

| **Berechnung des Spannungsfalls in Kabel- und Leitungsanlagen alternativ zu VDE 0100-520, Anhang G** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ρ | Spezifischer Widerstand (warm) | für Cu: | 0,0225 µΩm | 0,0225 µΩm |
| | | für Al: | 0,0360 µΩm | |
| $I_B$ | Stromkreis | Betriebsstrom | | 16,00 A |
| $U_0$ | | Bemessungsspannung | | 230,00 V |
| $l$ | Leitung | Länge | | 14,38 m |
| $A$ | | Leiterquerschnitt | | 1,5 mm² |
| $x_L$ | | Reaktanzbelag | | 0,08 Ω/km |
| $U_{R\ Leitung}$ | | Ohmscher Fall | | 6,90 V |
| $U_{X\ Leitung}$ | | Induktiver Fall | | 0,02 V |
| $\cos\varphi_{Leitung}$ | | | | 1,00000 |
| $\sin\varphi_{Leitung}$ | | | | 0,00267 |
| $\varphi_{Leitung}$ | | | | 0,15° |
| $\cos\varphi_{Last}$ | Last | | | 0,80000 |
| $\sin\varphi_{Last}$ | | | | 0,60000 |
| $\varphi_{Last}$ | | | | 36,87° |
| $\Delta U_{Leitung}$ | Spannungsfall | absolut | entlang der Leitung | 6,90 V |
| $\Delta U_{Leitung}/U$ | | relativ | | 3,00 % |
| $\Delta U_{Steckd.}$ | Spannungsrückgang | absolut | an der Steckdose | 5,53 V |
| $\Delta U_{Steckd.}/U$ | | relativ | | 2,40 % |

❻) zeigen, dass diese weit überwiegend positiv, die Last also vorwiegend ohmsch ist. Nach dem Brücken des Vorwiderstands geht fast so viel Leistung zurück ins Netz wie eine Viertelperiode vorher aufgenommen wurde (Bild ❺). Deren Mittelwert fällt drastisch (Bild ❻), obwohl die Stromstärke nun von 25 A auf ungefähr 40 A – und die Scheinleistung entsprechend – angestiegen ist. Die Überraschung ist, dass trotz des gestiegenen Stroms die Spannung ebenfalls wieder um etwa 5 V im Scheitelwert (effektiv ≈ 3 V) ansteigt. Die Ansicht in der Totale, wie sie vom Messgerät kommt (Bild ❼), zeigt dies besonders deutlich. Im ersten Moment vielleicht überraschend, steht dieser Effekt jedoch, wie zuvor dargelegt, im Einklang mit der Theorie sich quadratisch addierender Spannungsfälle.

Der zweite Gedanke hinter der neuen Formel in der VDE 0100-520 Anhang G war wahrscheinlich, dass z. B. Drehstrom-Asynchronmotoren einen hohen Hochlaufstrom aufweisen. Etwa mit dem 7-fachen Nennstrom muss man rechnen. Dieser Strom ist jedoch stark induktiv. Der Leistungsfaktor ist wesentlich kleiner als der auf dem Leistungsschild angegebene Leistungsfaktor im Nenn-Betriebspunkt. Dieser überhöhte Strom zieht die Spannung am Anschlusspunkt des Motors durch den weit überwiegend ohmschen Spannungsfall der Leitung viel weniger ‚in den Keller' als eine ohmsche Last es bei gleicher Stromstärke täte. Die Erwärmung der Leitung erreicht ebenfalls während der begrenzten Hochlaufdauer des Motors nicht unbedingt unzulässige Grenzen, auch wenn der zulässige Dauerstrom dabei überschritten wird. Diesen Effekt wollte man ausnützen und in diesen Fällen den Einsatz kleinerer Querschnitte ermöglichen, doch das ist daneben gegangen – wie so oft beim Versuch des Knauserns an Kupfer.

## 7 Die Frage nach den Konsequenzen

Bei Endstromkreisen, die Steckdosen speisen, ist die Methode, ob funktionierend oder nicht, ohnehin nicht anwendbar, da der Planer den Phasenwinkel der Last nicht kennt. Er muss also stets vom ungünstigsten Fall ausgehen, also sowohl Leitung als auch Last als rein ohmsch oder aber die Last mit dem gleichen Leistungsfaktor wie die real existierende Leitung ansetzen. Dies führt zu gleichen Ergebnissen für den Spannungsfall zwischen Anfang und Ende der Leitung und dem hier vorläufig so genannten Spannungsrückgang am Anschlusspunkt – und das mit einer einfachen, zur Wiedergabe in einer Norm geeigneten Formel (Tafel ❶).

Ändert man aber in dem hier aufgeführten Beispiel den Phasenwinkel der Last auf 0,8, so ist dieser Phasenwinkel schon erheblich größer als der der Leitung, was sich in einem deutlichen Unterschied zwischen dem Spannungsfall und dem hier eigentlich gesuchten Spannungsrückgang äußert (Tafel ❷). Nichts anderes wurde vom einen Beispielfall zum anderen geändert. In den beiden Tafeln sind mehrere Neben- und Zwischenrechnungen zu Gunsten der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Ratsam wäre es also, wenn diese Norm wieder auf den Prüfstand kommt, was leider erst 2017 der Fall sein wird, sowohl zu normgerechten Formelzeichen wie auch zu einem vereinfachten Rechenverfahren zurück zu kehren. Eine entsprechende Stellungnahme befindet sich bei der DKE in Vorbereitung. Außerdem wird ein weiterer Begriff für den ‚Spannungsfall an der Steckdose' gegenüber dem ‚Spannungsfall über der Leitung' benötigt. Es sollte im Prinzip zu der eingangs als erste wiedergegebenen Formel zurückgekehrt werden, jedoch unter Verwendung der Warmwerte für die Leitungswiderstände. Diese Neuerung sollte beibehalten werden. Der Faktor κ sollte entfallen und für $U_V$ stets die tatsächlich vorhandene/verwendete Spannung eingesetzt werden. Sinnvoll ist auch der damalige, nach *A* aufgelöste Aufbau der Formel, denn was gesucht ist, ist der Querschnitt. Die anderen Parameter sind gegeben. Allenfalls könnte man noch das Gleichheitszeichen durch „≥" ersetzen, da nicht jeder beliebige Leiterquerschnitt verfügbar ist, sondern der nächstgrößere gewählt werden muss.

Der Faktor cosφ sollte ebenfalls entfallen. Die komplexe Rechnung schießt hier weit über das Ziel hinaus und führt unter Umständen in die Irre. Sinus und Cosinus sollte man hier ausnahmsweise zwei römische Räuber [3] bleiben lassen und lieber eine hässliche „Asinus-Rechnung" [4] einsetzen, wie sie ein Zyniker nannte, die jeder Esel bewältigen kann.

### Literatur

[1] Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de).
[2] Internationales Einheitensystem (frz. Système international d'unités)
[3] Großer Asterix-Band VI, „Tour de France", S. 40, www.khalisi.com/comics/asterix/personae/nomines.html
[4] lat. sinus = der Busen; asinus = der Esel