



**FLUKE®**

# Erklärung des Begriffs der elektrischen Leistung

Grundlagen der Leistungsmessung





**FLUKE**®

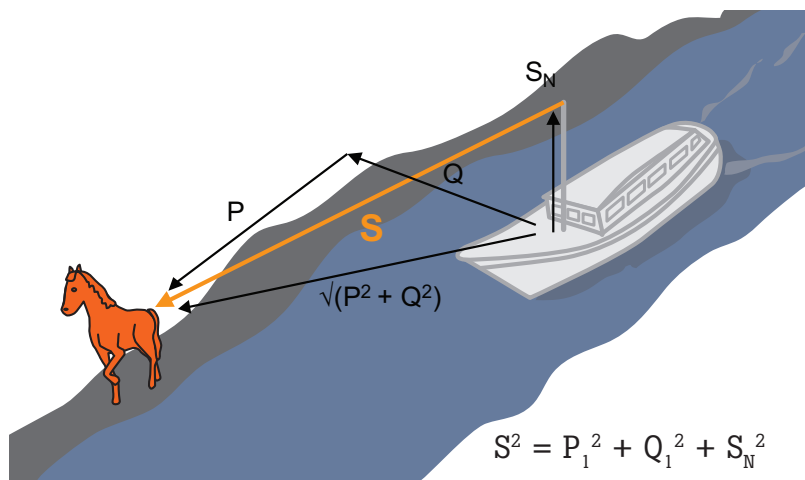


## Einleitung

Die Anwendung elektrischer Energie ist einem raschen Wandel unterworfen. Glühlampen werden durch LED-Beleuchtung ersetzt, Motoren mit Frequenzumrichter ersetzen direkt an die Stromversorgung angeschlossene Elektromotoren und Solaranlagen und Windkraftanlagen erzeugen zusätzliche Energie. Dadurch ändern sich die Lasten im Stromnetz. Es treten mehr Oberschwingungen auf und das Risiko von Unsymmetrien ist höher. Diese „schlechte“ Leistung kostet Geld und ist mit Energievergeudung verbunden.

Zur Beseitigung dieser Probleme benötigen wir ein besseres Verständnis der Störungen im Stromnetz. Und genau darum geht es in diesem Artikel zum Thema „elektrische Leistung“: ein grundlegendes Verständnis dessen, was sich in elektrotechnischen Anwendungen von heute abspielt.





## Scheinleistung

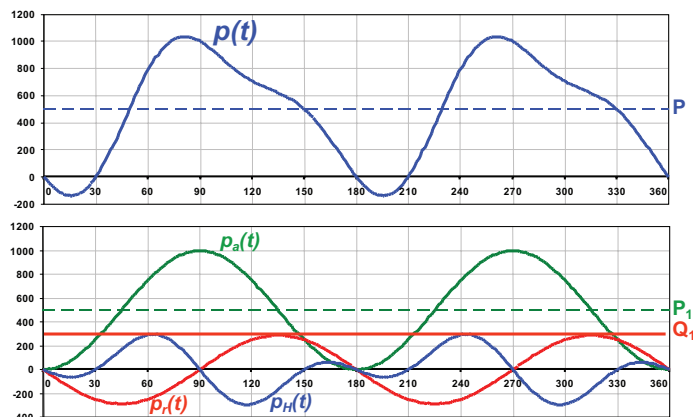
Zum Verständnis der Zusammenhänge zwischen Wirkleistung  $P$ , Blindleistung  $Q$  und Scheinleistung  $S$  betrachten wir den historischen bildlichen Vergleich mit einem Kanalboot. Das Boot steht für die elektrische Last, das Pferd für den Generator und das Seil zwischen dem Pferd und dem Mast für das Stromnetz.

Da das Pferd das Boot nicht exakt von vorn, sondern in einem Winkel zum Boot zieht, hat es mit zwei Kräften zu tun: der gewünschten, nach vorn zeigenden Kraft  $P$  und der unerwünschten, seitwärts gerichteten Kraft  $Q$ . Die auf das Seil wirkende Belastung ist nach dem Satz des Pythagoras die Quadratwurzel der Summe aus  $P^2$  und  $Q^2$ .

In ähnlicher Weise treten bei einem Stromnetz zwei Arten von Leistung auf, wenn die Spannung und der Strom einer Last einen Winkel zueinander aufweisen: die Wirkleistung  $P$ , die die Arbeit verrichtet, und die Blindleistung  $Q$ , die Ressourcen des Stromnetzes verschwendet.

Erschwerend kommen Oberschwingungsbestandteile  $S_N$  im Stromnetz hinzu, die durch die kurzen Wellen unter dem Boot symbolisiert werden. Sie beanspruchen das Seil zwischen Pferd und Boot und daher das Stromnetz noch weiter. Ein Teil der vom Pferd erbrachten Leistung kann nicht genutzt werden. Stromkunden bezahlen für vergedetete elektrische Energie.





## Oberschwingungen

Um etwas gegen diese Geld- und Energieverschwendung tun zu können, müssen wir zunächst zwischen Phasenverschiebung und Oberschwingungen unterscheiden können.

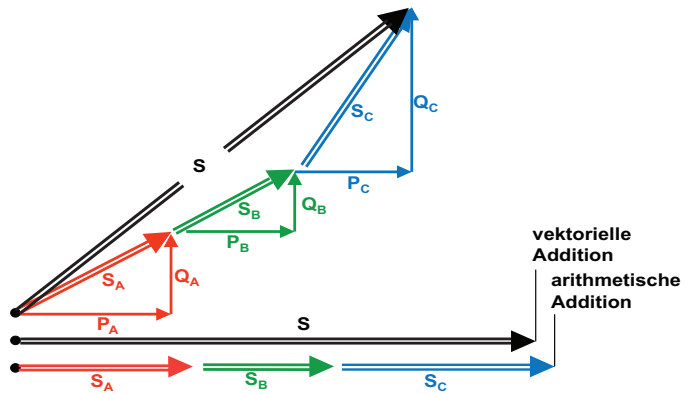
Jeder dieser Störeinflüsse erfordert unterschiedliche Gegenmaßnahmen. Mithilfe der Fourier-Analyse können wir zwischen der Grundschwingungsleistung und der Oberschwingungsleistung unterscheiden. Die Grundschwingungsleistung kann in einen Wirkanteil  $p_a(t)$  und in einen Blindanteil  $p_r(t)$  aufgeteilt werden. Was nach der Aufteilung der Grundschwingungsleistung übrig bleibt, ist die Oberschwingungsleistung  $p_h(t)$ .

Der Wirkanteil leistet die eigentliche Arbeit: er überträgt nutzbare Energie vom Generator zur Last. Der Blindanteil überträgt lediglich Energie zwischen der Last und dem Generator hin und her, belastet dadurch das Stromnetz, trägt aber nicht zur Übertragung nutzbarer Energie bei.

Der Oberschwingungsanteil kann für bestimmte Lasten gelegentlich etwas Energie übertragen, aber das Stromnetz kann Oberschwingungsleistung nicht effizient übertragen. Und bei rotierenden Maschinen und Transformatoren führt diese Energie zu Schäden.

Blindleistung kann mit Kondensatoren und Oberschwingungsleistung mit passiven oder aktiven Filtern kompensiert werden.





### Unsymmetrie

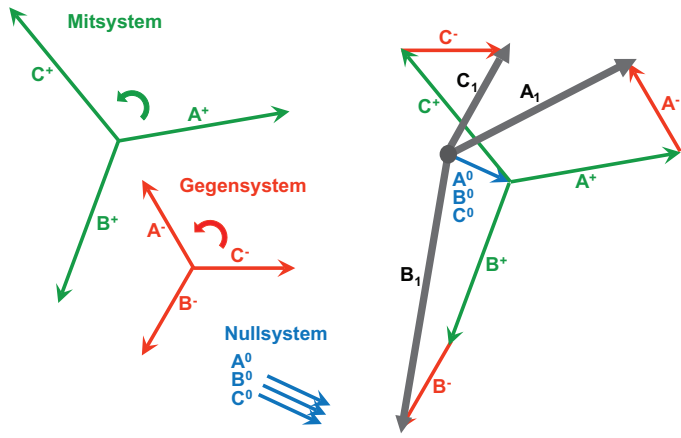
Die Energieübertragung bei Dreiphasensystemen ist oftmals komplizierter als nur einfach die Addition der Leistungen der einzelnen Phasen.

Die Abbildung zeigt die Leistungsarten P, Q und S eines unsymmetrischen Dreiphasensystems. Die Abbildung veranschaulicht, wie wir die falsche Antwort erhalten, wenn wir die gesamte Scheinleistung S eines unsymmetrischen Dreiphasensystems berechnen, indem wir einfach die Scheinleistungen der einzelnen Phasen addieren. Wir bezeichnen dies als arithmetische Summe.

Obwohl wir oftmals die Wirkleistungen P und die Blindleistungen Q der drei Phasen addieren können, ist die Addition der Scheinleistungen S nur zulässig, wenn das System perfekt symmetrisch ist und keine Oberschwingungen auftreten. Wenn dies nicht der Fall ist, ist die Berechnung des richtigen Wertes der Scheinleistung S in einem Dreiphasensystem nicht so einfach.

Obwohl bei dieser vereinfachten Grafik der Eindruck entsteht, dass die Vektorsumme das korrekte Antwort für S liefert, wird sich herausstellen, dass selbst das eine zu stark vereinfachende Sichtweise ist. Die Unsymmetrie verursacht eine Unsymmetrieleistung, die den Wert von S erhöht.





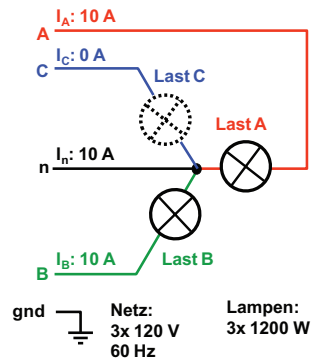
### Symmetrische Komponenten

Wenn wir die Auswirkung von Unsymmetrien in einem Dreiphasensystem untersuchen wollen, benötigen wir ein mathematisches Hilfsmittel. Die von C. L. Fortescue im Jahr 1918 entwickelte Theorie der symmetrischen Komponenten ist ein solches Hilfsmittel.

Verkürzt ausgedrückt besagt diese Theorie, dass man ein unsymmetrisches Dreiphasensystem aus 3 symmetrischen Systemen aufbauen kann: einem Mitsystem mit der Reihenfolge A, B, C, einem Gegensystem mit der Reihenfolge A, C, B, und einem Nullsystem, bei dem A, B und C in dieselbe Richtung zeigen.

Die Abbildung zeigt dies in grafischer Form. Zu beachten ist, dass das Mitsystem und das Gegensystem symmetrisch sind.

Das Nullsystem ist eine Art gemeinsames Einphasensystem. Das Mitsystem ist das einzige System, in dem nutzbare Energie transportiert wird. Diese Energie treibt einen Motor in der gewünschten Laufrichtung an. Das Gegensystem hat eine gegenläufige Richtung zum ursprünglichen System und wirkt auf einen Motor wie eine Bremse, und das Nullsystem erzeugt lediglich Wärme. Die Addition von Gegensystem und Nullsystem ergibt die Unsymmetrieleistung. Diese Unsymmetrieleistung erhöht bei einer Unsymmetrie die Scheinleistung des Systems. Deswegen ist eine Unsymmetrie in einem Dreiphasensystem gleichbedeutend mit Energieverschwendung!



2 - Lampen (Phase)			
	A	B	C
P	1200	1200	0
Q	0	0	0
S	1200	1200	0

2 - Lampen (System)			
	Klassisch	IEEE	UPM
P	2400	2400	2400
Q	0	0	0
S	2400	3600	2939
$S_{UV}$	-	2683	1697

## Leistungsmessung nach klassischem Verfahren, IEEE und UPM (Unified Power Measurement)

Dieses Beispiel veranschaulicht, wie sich Unsymmetrieleistung  $S_{UV}$  auf die Scheinleistung S auswirkt.

Drei 1200-W-Scheinwerfer sind an ein Dreiphasensystem angeschlossen. Im symmetrischen Zustand bedeutet dies eine Wirkleistung von 3600 W und eine Scheinleistung von 3600 VA. Es besteht keine Phasenverschiebung, daher entsteht keine Blindleistung Q. Nun brennt einer der Scheinwerfer durch. Die verbleibende Wirkleistung P beträgt 2400 W, aber die entstehende Scheinleistung hängt vom angewendeten Berechnungsverfahren ab.

Beim klassischen Verfahren wird die Unsymmetrie vollkommen außer Acht gelassen. Dies ist offensichtlich falsch, da Unsymmetrieleistung vorhanden sein muss! Das IEEE-Verfahren kommt zu dem überraschenden Schluss, dass sich die Scheinleistung S wegen einer hohen Unsymmetrieleistung  $S_{UV}$  nicht ändert. Das UPM-Verfahren führt zu niedrigeren Werten für Scheinleistung und Unsymmetrieleistung.

Welches der beiden Berechnungsverfahren ist besser? Schwer zu sagen! Die akademische Debatte über die Definition der Scheinleistung unter extremen Bedingungen ist noch nicht beendet. Glücklicherweise liegen die Ergebnisse der miteinander konkurrierenden Theorien bei weniger extremen Bedingungen näher beieinander.



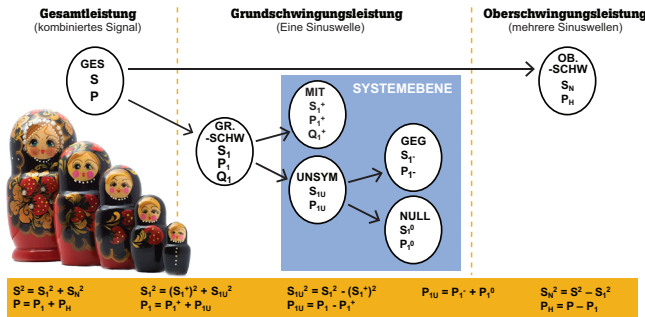


### Leistung

Diese Abbildung zeigt, wie die Gesamtleistung in kleinere Komponenten mit jeweils typischen Eigenschaften zerlegt werden kann. Dies erleichtert die Untersuchung von Leistungsproblemen.

Die Leistungskomponenten passen wie die russischen Matroschka-Puppen ineinander. Wir beginnen mit der Gesamtleistung und trennen zunächst die Grundschwingungskomponenten ab. Der Rest bildet die nicht zur Grundschwingung gehörenden Komponenten einschließlich der Oberschwingungen.

Die Grundschwingungskomponenten können in einen Mitsystemanteil und in einen Anteil, der durch Unsymmetrie erzeugt wird, aufgeteilt werden. Der Unsymmetrieanteil enthält die Gegensystem- und die Nullsystemkomponente. Mithilfe der Zerlegung der Leistung in einzelne Komponenten können wir die Auswirkungen von Unsymmetrie und Oberschwingungen auf ein Energieversorgungssystem analysieren. Dies wiederum ermöglicht uns, bei „schlechter“ Leistung wirksame Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

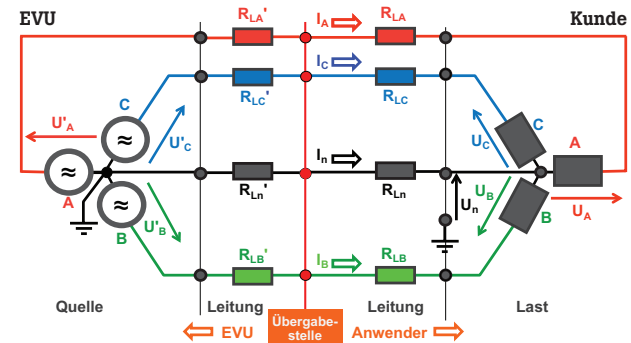


### Energieversorgungsunternehmen und Stromkunde

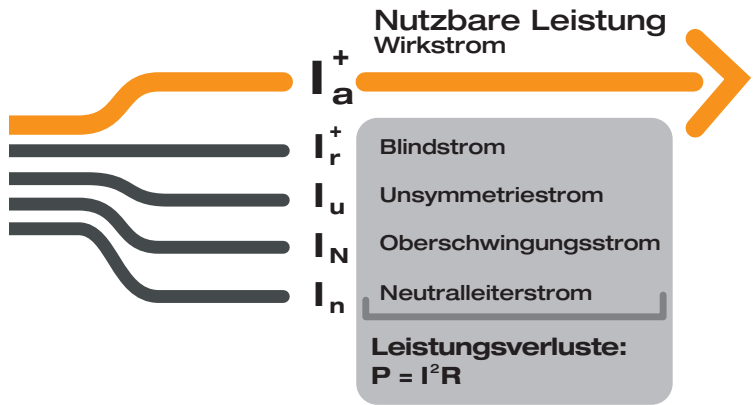
An der Übergabestelle vom Energieverteilungsnetz des EVU zur Energieeinspeisung beim Stromkunden liegt der Messpunkt für die abgenommene Energie. An dieser Stelle wird die dem Kunden gelieferte Energiemenge gemessen, die ihm in Rechnung gestellt wird.

Es wird nicht die gesamte Energie effizient genutzt, für die der Kunde zahlt. Ströme, die beim Kunden durch die Leitungen mit endlichem Widerstand fließen, verursachen Verluste in Höhe von  $I^2R$ , die sich in Form von Wärme bemerkbar machen. Diese Verluste werden an der Übergabestelle als gelieferte Wirkleistung registriert, gelangen jedoch nicht als Energie bis zur Last. Sie zahlen daher dafür, dass sich Leitungen erwärmen!

Das EVU stellt Ihnen den Betrag für die in ihrem Energieverteilungsnetz vergeudete Energie mit in Rechnung. Zur Minimierung dieser Vergeudung benötigen Sie einen Einblick in die Zusammensetzung der in den Leitungen fließenden Ströme, um effektive Gegenmaßnahmen ergreifen zu können.







### Strom

Durch Aufteilung der Ströme in Komponenten, die einzelnen Erscheinungen zugeschrieben werden können, lassen sich die Stromkomponenten am besten analysieren.

Es sind 5 Haupt-Stromkomponenten erkennbar, von denen jede zu einer bestimmten Art von Verlusten führt. Der Wirkstrom ist der einzige Anteil, der den Transport nutzbarer Energie ermöglicht. Blind-, Unsymmetrie- und Oberschwingungsströme tragen nicht dazu bei, Energie effizient zur Last zu übertragen. Unsymmetrien und Oberschwingungen führen zu Strömen im Neutralleiter und somit zu Verlusten im Neutralleiter.

Da wir den Strom jetzt in seine Bestandteile zerlegt haben, können wir uns einzeln mit den unerwünschten Komponenten beschäftigen. Blindströme können mit Kondensatoren an der Last verringert werden, Unsymmetrieströme durch die Herstellung symmetrischer Verhältnisse an der Last oder durch die Verwendung aktiver oder passiver Kompensationschaltungen und Oberschwingungsströme mithilfe aktiver oder passiver Filterung.

Bei einer Verringerung von Unsymmetrien und Oberschwingungen nimmt auch der Strom im Neutralleiter ab. Im Idealfall fließt nur der Wirkstrom  $I_a$  und es entstehen Verluste durch Spannungsabfall in Leitungen gemäß der Formel  $I^2 R$ . Außer der Verwendung von Leitungen mit geringerem Widerstand bestehen nur wenige Möglichkeiten zur Erzielung von Verbesserungen.





Due to Load Current	Loss	Cost/yr
Effective 25.6 kW	197 W	293.08 Eur
Reactive 9.6 kvar	28 W	41.66 Eur
Unbalance 20.5 kVA	126 W	187.45 Eur
Distortion 25.1 kVA	348 W	517.74 Eur
Neutral 95.7 A	439 W	653.10 Eur
<b>Line loss</b>	<b>1138 W</b>	<b>1695.03 Eur</b>

06/01/16 11:59:52 230V 50Hz 3Ø WVE ENS 60

SETUP GRAPH METER



## Energiekosten

Der Energieverlustrechner der Netzanalysatoren der Fluke 430 Serie II zeigt auf einem Bildschirm alle oben erörterten Erscheinungen auf einen Blick an.

Die 5 wichtigsten Stromkomponenten Wirkstrom, Blindstrom, Unsymmetrie-, Oberschwingungs- und Neutralleiterstrom werden zusammen mit der Gesamtleistung und den Verlusten im Zusammenhang mit jeder einzelnen Komponente angezeigt. Dadurch kann sich der Anwender schnell einen Überblick über den Zustand des Stromnetzes im Unternehmen oder des zu prüfenden Gerätes verschaffen.

Im Idealfall sollten nur Wirkstromverluste auftreten. Das Verhältnis der verschiedenen Verluste weist auf die Art der am dringendsten notwendigen Gegenmaßnahmen hin.

Außerdem wird zu jeder der Stromkomponenten der Geldbetrag für die jeweils verschwendete Energieart extrapoliert. Der finanzielle Gesamtverlust im Laufe eines Jahres liefert einen Hinweis darauf, ob Gegenmaßnahmen wirtschaftlich realisierbar sind.

Alle diese Informationen erhalten Sie mit einem leistungsstarken Handmessgerät, das internationalen Normen entspricht!



**FLUKE®**

**Fanden Sie diesen Artikel interessant?  
Informieren Sie sich bei Ihrem  
Fluke-Vertriebspartner über das  
gesamte Programm und werden Sie zu  
einem Experten in Sachen elektrische  
Leistung und Energie.**

**Fluke.** *Damit Ihre Welt intakt bleibt.*

**Fluke Deutschland GmbH**

In den Engematten 14  
79286 Glottertal  
Telefon: (07684) 8009 420  
Telefax: (07684) 8009 410  
E-Mail: [info@de.fluke.nl](mailto:info@de.fluke.nl)  
Web: [www.fluke.de](http://www.fluke.de)

**Technischer Beratung:**

Beratung zu Produkteigenschaften,  
Spezifikationen, Messgeräte und  
Anwendungsfragen  
Tel.: +49 (0) 7684 8 00 95 45  
E-Mail: [techsupport.dach@fluke.com](mailto:techsupport.dach@fluke.com)

**Fluke Vertriebsgesellschaft m.b.H.**

Liebermannstraße FO1  
A-2345 Brunn am Gebirge  
Telefon: (01) 928 95 00  
Telefax: (01) 928 95 01  
E-Mail: [info@as.fluke.nl](mailto:info@as.fluke.nl)  
Web: [www.fluke.at](http://www.fluke.at)

**Fluke (Switzerland) GmbH**

Industrial Division  
Hardstrasse 20  
CH-8303 Bassersdorf  
Telefon: 044 580 75 00  
Telefax: 044 580 75 01  
E-Mail: [info@ch.fluke.nl](mailto:info@ch.fluke.nl)  
Web: [www.fluke.ch](http://www.fluke.ch)

©2016 Fluke Corporation. Alle Rechte vorbehalten.  
Anderungen vorbehalten.  
04/2016 6007320a-ger

**Dieses Dokument darf nicht ohne die schriftliche Genehmigung der  
Fluke Corporation geändert werden.**