

Definition und Bezugssinn der elektrischen Spannung

Autor(en): **Hamburger, Erna / Landolt, Max K.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins :
gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen
Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes
Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **60 (1969)**

Heft 9

PDF erstellt am: **27.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-916141>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Definition und Bezugssinn der elektrischen Spannung

Von *Erna Hamburger*, Lausanne, und *Max K. Landolt* †
2804 - 2814

621.3.015
(Übersetzung)

Von den Konventionen, deren sich die Elektrotechniker bedienen, haben wenige zu so vielen Auseinandersetzungen Anlass gegeben, wie jene des Bezugssinns der Spannung. So hat das Comité d'Etudes 24 der Commission Electrotechnique Internationale erst im Jahr 1967 in Prag einen Entwurf für eine internationale Konvention prüfen können, dem nach einer ausgedehnten Aussprache eine deutliche Mehrheit der vertretenen Länder zustimmte. Noch bevor diese Konvention allen Mitgliedsländern nach der 6-Monate-Regel zur Annahme vorgelegt werden konnte, haben zwei Autoren Artikel veröffentlicht, welche den Standpunkt der Minderheit verteidigen. Im vorliegenden Artikel legen die Verfasser die Argumente dar, die zu Gunsten des in Prag von der Mehrheit angenommenen Konventionentwurfs sprechen, der wesentlich auf der modernen Theorie der Elektrizität beruht, in welcher der Feldbegriff eine grundlegende Rolle spielt.

Parmi les conventions utilisées par les électriciens peu d'entre elles ont donné lieu à autant de controverses que celle du sens de référence d'une tension. Aussi n'est-ce qu'en 1967 à Prague que le Comité d'Etudes 24 de la Commission Electrotechnique Internationale a pu examiner un projet de convention internationale, projet qui, après une discussion nourrie, a rallié une nette majorité des pays représentés. Avant que cette convention n'ait pu être soumise pour approbation sous la Règle des Six Mois aux pays membres, deux auteurs ont publié des articles défendant les points de vue de la minorité. Dans le présent article, les auteurs exposent les arguments en faveur du projet adopté par la majorité à Prague, convention qui tient avant tout compte des théories modernes de l'électricité dans lesquelles la notion de champ joue un rôle primordial.

1. Einleitung

Als das Comité d'Etudes 24 der Commission Electrotechnique Internationale (CEI) im Juli 1959 in Madrid tagte, hat es auf Antrag der schweizerischen Delegation beschlossen, Konventionen betreffend elektrischer Stromkreise und magnetischer Kreise in das Programm der zukünftigen Arbeiten aufzunehmen [6, S. 8, Punkt XII]¹⁾. Während bezüglich der Konventionen über Strom, Leistung und magnetischen Fluss eine ziemlich einheitliche Auffassung besteht, ist dies für die Spannung nicht der Fall. In der Tat bestehen verschiedene Gewohnheiten, um in einem Schema die Vereinbarung betreffend der Bedeutung positiver und negativer Werte einer Spannung anzugeben. Es kommt sogar vor, dass solche Gewohnheiten auf sich widersprechenden Voraussetzungen beruhen; dies erklärt den Wunsch nach Vereinheitlichung, der dem Beschluss zu Grunde liegt.

Im Jahr 1962 hat das Comité d'Etudes 24 in Bukarest einen ersten Entwurf von Konventionen diskutiert und ebenso die Anregungen, die zum Entwurf von verschiedenen Nationalkomitees vorgelegt worden waren. Da die Ansichten betreffend des Aufbaues des Dokumentes und betreffend des Inhaltes der Konventionen weit auseinander gingen, hat das Comité d'Etudes 24 auf Vorschlag seines Sekretärs eine Arbeitsgruppe eingesetzt. Diese wurde beauftragt, die Gesamtheit der eingegangenen Dokumente zu studieren und einen den Nationalkomitees zuzustellenden neuen Entwurf auszuarbeiten, der die Konventionen in bereinigter Form enthalten sollte [7, S. 10 und 11].

Die Arbeitsgruppe begann ihre Tätigkeit und hatte lange Diskussionen, deren überwiegender Teil die Spannung betraf, da die Ansichten der Mitglieder über verschiedene Punkte

auseinander gingen. Eine Vereinheitlichung, die darin bestanden hätte, unter Opferung anderer, ebenfalls möglicher Lösungen, eine Auswahl zu treffen, erschien im ersten Anlauf als unmöglich. Anlässlich der Tagung von Aix-les-Bains, im Juli 1964, wurde das Comité d'Etudes 24 über diese Schwierigkeit informiert. Es beschloss, allenfalls einen Fragebogen verteilen zu lassen [8, S. 9 und 10].

Dieser Fragebogen wurde den Nationalkomitees zugestellt. Er hatte die Folge, der Arbeitsgruppe zu ermöglichen, aus der Sackgasse herauszukommen, und einen Entwurf auszuarbeiten, der den Nationalkomitees vorgelegt wurde. Dieser und die eingegangenen Stellungnahmen diskutierte das Comité d'Etudes 24 anlässlich seiner Prager Tagung im Juli 1967 [9, S. 6...8]. Nach einigen Beschlüssen materieller Art stimmte eine deutliche Mehrheit dem Entwurf zu; die Opposition bildeten mehrere, verschieden gerichtete Minderheiten. Die Arbeitsgruppe wurde beauftragt, die definitive Bereinigung des Entwurfes vorzunehmen und dabei einerseits den während der Tagung gefassten Beschlüssen materieller Art und andererseits den von den Nationalkomitees beantragten redaktionellen Korrekturen Rechnung zu tragen. Das Comité d'Etudes 24 beschloss ferner, das Comité d'Action der CEI zu ersuchen, die Verteilung des von der als Redaktionskomitee amtierenden Arbeitsgruppe bereinigten Dokumentes nach der 6-Monate-Regel zu gestatten.

Die Arbeitsgruppe hat ihre Arbeit fortgesetzt und den Wortlaut des Entwurfs festgelegt; infolge einer Erkrankung ihres Sekretärs hat sich die Verteilung verzögert.

Nun haben *Morren* [17] im Jahr 1967 und *Laurent* [15] im Jahr 1968 in technisch-wissenschaftlichen Zeitschriften die vom Comité d'Etudes 24 in Prag angenommene Lösung kritisiert; sie haben dabei öffentlich einige der Ansichten dargelegt, die von den Minderheiten innerhalb der Arbeitsgruppe und in Prag vertreten worden sind. Es erscheint damit als gerecht-

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

fertigt und sogar als notwendig, der Öffentlichkeit auch die Gedanken und Auffassungen darzulegen, welche die Grundlagen jener Lösung bilden, die in Prag eine deutliche Mehrheit der Stimmen auf sich vereinigt hat.

Die elektrischen Begriffe, die nachstehend verwendet werden, dürfen als bekannt vorausgesetzt werden. Nur die Begriffe der Spannung und ihres Bezugssinns, für die bei weitem keine einheitliche Auffassung besteht, werden nachstehend eingehend dargelegt.

2. Zur Geschichte des Begriffs «elektrische Spannung»

Die Geschichte des Begriffs «elektrische Spannung» hat *Emde* geschrieben [12]. Nach ihm war es *Volta* der zuerst die Ausdrücke «tensione» [22, S. 203], «grado di tensione» [22, S. 204] und «tensione di elettricità» [22, S. 213] verwendet hat, und zwar in einem an den Genfer Naturwissenschaftler *de Saussure* gerichteten Brief vom 20. August 1778 [22, S. 199].

Volta hat die Spannung mittels eines primitiven Elektrometers eher nachgewiesen als gemessen. Er verstand sie als «lo sforzo di spignersi fuori» (die Kraft sich hinauszupressen) [22, S. 213]. Da er seine Spannungen mit einem Elektrometer gemessen hat, stellte er Spannungen fest, die von einer Klemme eines Apparates bis zur Erde bestanden. Man darf sich nicht darüber wundern, dass *Volta* keine genaue Definition des neuen Ausdruckes «Spannung» gegeben hat, sind doch die berühmten Experimente von *Coulomb*, von *Ampère*, von *Ohm* und von *Faraday* erst nachher gemacht worden. Der durch den Ausdruck «elektrische Spannung» wiedergegebene Begriff ist lange unklar geblieben und noch heute sind die Autoren bei weitem nicht der gleichen Auffassung.

Im Jahr 1827 brauchte *Ohm* den Ausdruck «elektrische Spannung» für die heute als «elektromotorische Kraft» benannte Grösse (Ausdruck 05-20-010 des Vocabulaire Electrotechnique International) [18, S. 112; 19, S. 117]. Schliesslich hat *Maxwell*, der die Grundlagen für die moderne Theorie der Elektrizität geschaffen hat, über den Ausdruck «Spannung» in den Jahren 1873 und 1881 geschrieben:

«The word Tension has been used by electricians in several vague senses, and it has been attempted to adopt it in mathematical language as a synonym for Potential; but on examining the cases in which the word has been used, I think it will be more consistent with usage and with mechanical analogy to understand by tension a pulling force of so many pounds weight per square inch exerted on the surface of a conductor or elsewhere. We shall find that the conception of Faraday, that this electric tension exists not only at the electrified surface but all along the lines of force, leads to a theory of electric action as a phenomenon of stress in a medium [16, Art. 48]»²⁾.

Unmittelbar nach dieser Textstelle spricht *Maxwell* von der elektromotorischen Kraft. Er versteht sie als Potentialdifferenz, aber unter Vorbehalt der in der Elektrostatik nicht behandelten Fälle [16, Art. 49]. Später behandelt *Maxwell* das Kurvenintegral (früher: Wegintegral) der elektrischen Feldstärke längs des Bogens *AP* einer Kurve und nennt es auch elektromotorische

²⁾ Übersetzung: Das Wort Spannung ist von den Elektrikern in mehreren unklaren Bedeutungen verwendet worden: Man hat versucht, es in der Sprache der Mathematik als Synonym zu Potential anzunehmen; aber nach Prüfung der Anwendungsfälle glaube ich, dass es der allgemeinen Übung und der mechanischen Analogie besser entspricht, unter Spannung eine Zugkraft von soundso viel Pfund Gewicht je Quadrat Zoll, ausgeübt auf die Oberfläche eines Leiters oder sonstwo, zu verstehen. Wir werden finden, dass die Auffassung von Faraday, wonach diese elektrische Spannung nicht nur an der elektrisierten Oberfläche, sondern längs der Kraftlinien existiert, uns zu einer Theorie der elektrischen Wirkung als Erscheinung einer Spannung in einem Medium führen wird.

Kraft. Er versteht sie als die Arbeit, die eine Ladungseinheit leistet, wenn sie längs der Kurve vom Ausgangspunkt *A* bis zum Endpunkt *P* getragen wird [16, Art. 69].

In Deutschland veröffentlichte der «Ausschuss für Einheiten und Formelgrössen (AEF)» im Jahr 1908 einen Entwurf zu Definitionen des Potentials, der Potentialdifferenz, der elektromotorischen Kraft, der Spannungen und der Spannungsdifferenz [1]. Die für die Spannung gegebene Definition deckte sich mit derjenigen, welche nach *Maxwell* für die elektromotorische Kraft galt.

Der AEF hat gründlich beraten. Eine zweite Fassung der Definitionen wurde im Jahr 1920 veröffentlicht, zusammen mit sehr treffenden Erläuterungen [2]. Schliesslich erschien im Jahr 1927 die endgültige Fassung in Form des Normalblatts DIN 1323 [3; 5].

Die Einleitung zur ersten Auflage des Vocabulaire Electrotechnique International der Commission Electrotechnique Internationale beginnt mit der folgenden Textstelle [10]:

«Les questions de nomenclature ont retenu l'attention de la Commission électrotechnique internationale dès les premières années de son existence. En effet, la résolution qui fut adoptée au Congrès international de Saint-Louis en 1904, et qui conduisit à la formation de la Commission électrotechnique internationale, précisait:

«Que des démarches devraient être faites en vue d'assurer la coopération des Sociétés techniques du monde par la constitution d'une Commission représentative, chargée d'examiner la question de l'unification de la nomenclature, et des classifications des appareils et machines électriques»³⁾.

Die erste Auflage des Vocabulaire Electrotechnique International erschien im Jahr 1938 [10]. Sie gab folgende Definition:

05-20-020 **Elektrische Spannung**: Synonym zu elektrischer Potentialdifferenz in einem wirbelfreien Feld.

Diese Definition, die nicht ermöglicht, sich über die Bedeutung positiver und negativer Werte der Spannung Rechenschaft zu geben, und die den Fall des Wirbelfelds nicht umfasst, ist vollständig ungenügend. So ist sie denn in der zweiten Auflage des Vocabulaire Electrotechnique International [11] wie folgt ersetzt worden:

05-20-025 **Elektrische Spannung** (oder Potentialdifferenz): Kurvenintegral der elektrischen Feldstärke von einem Punkt zu einem andern längs eines gegebenen Weges⁴⁾.

Diese Definition gibt in Worten die Formel

$$U = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (1)$$

wieder, in welcher *E* der Vektor der elektrischen Feldstärke ist, *ds* der Vektor des Wegelements, und wo *a* den Anfang und *b* das Ende des gegebenen Weges bezeichnen. Es ist zu beachten, dass die Spannung ein Skalar ist, der sich auf einen gegebenen, in einem bestimmten Richtungssinn durchlaufenen Weg bezieht. Um den Durchlaufsinns deutlich festzuhalten, werden nachstehend *a* Anfangspunkt und *b* Endpunkt genannt.

³⁾ Übersetzung: Die Fragen der Nomenklatur haben die Aufmerksamkeit der Commission Electrotechnique Internationale seit den ersten Jahren ihres Bestehens gefunden. In der Tat hat die vom Congrès international de Saint-Louis im Jahr 1904 angenommene Entschliessung, die zur Gründung der Commission Electrotechnique Internationale geführt hat, folgendes festgelegt: «Es sollten Schritte unternommen werden, um die Zusammenarbeit der technischen Gesellschaften der ganzen Welt zu erreichen, durch Bildung einer repräsentativen Kommission, beauftragt die Fragen der Vereinheitlichung der Nomenklatur und der Klassifikation der elektrischen Apparate und Maschinen zu prüfen.»

⁴⁾ Die englische Fassung ist insofern unrichtig, als der im quantitativen Sinn zu verstehende Ausdruck «champ électrique» der französischen Fassung durch «electric field strength» hätte übersetzt werden müssen.

Nach der Definition 05-20-025 wird die Spannung positiv, wenn das Potential des Anfangspunktes höher ist als das Potential des Endpunktes. Die Spannung ist somit ein «Potentialabfall». Dagegen ist die elektromotorische Kraft ein «Potentialanstieg». Es gibt aber Autoren, welche auch die Spannung, entgegen der Definition 05-20-025, als Potentialanstieg verstehen. In den Vereinigten Staaten von Amerika scheint es üblich zu sein, die beiden gegensätzlichen Auffassungen der Spannung durch die Bezeichnungen «potential drop concept» und «potential rise concept» zu unterscheiden. Es kommt auch häufig vor, dass das Kurvenintegral der elektrischen Feldstärke, also der Potentialabfall, elektromotorische Kraft genannt wird, wie schon von *Maxwell*.

Die moderne Auffassung stützt sich auf den Begriff des elektromagnetischen Felds, wie es *Maxwell* definiert hat. Es ist wenig wahrscheinlich, dass in der zur Zeit in Bearbeitung stehenden 3. Auflage des Hefts 50(05) des Vocabulaire Electrotechnique International in der Definition der Spannung diese Grundlage preisgegeben werden wird.

Abschliessend ist festzuhalten, dass bezüglich der Definition der in der Elektrotechnik wohl am meisten verwendeten Grösse extreme Divergenzen bestehen; ja man darf von einem Chaos sprechen. Es ist höchste Zeit, dass die Commission Electrotechnique Internationale versucht, hier Ordnung zu schaffen. Die Definition 05-20-025 [11] ist erst seit 1954 in Kraft. Sie stimmt überein mit der deutschen Definition aus dem Jahr 1927 [3; 5], und angenähert mit der amerikanischen Definition der elektrischen Potentialdifferenz von 1941 [4, 05.15.025] und von «Voltage (Electromotive Force Deprecated)» von 1966 [13, S. 56]. Die Definition von 1954 gewinnt allmählich Boden, sie ist aber leider noch nicht überall anerkannt.

3. Bezugssinn und Bezugspolarität einer Spannung, Richtungssinn verschiedener Grössen

Eine im Sinn der Definition 05-20-025 der Commission Electrotechnique Internationale (Abschnitt 2) verstandene Spannung, also das Kurvenintegral (Linienintegral) der elektrischen Feldstärke, das von einem Anfangspunkt längs eines gegebenen Weges bis zu einem Endpunkt existiert, kann im konkreten Fall einen positiven oder einen negativen Wert annehmen. Man kommt auf einen positiven Wert, wenn der Vektor der elektrischen Feldstärke im wesentlichen dieselbe Richtung hat wie das Element des Integrationswegs.

Für eine Spannung U wählt man frei einen Richtungssinn, in welchem man bei der Bildung des Kurvenintegrals den gegebenen Weg durchläuft. Diesen Richtungssinn nennt man «Bezugssinn». Auf ihn bezieht sich das Vorzeichen jenes Werts der Spannung, den das Kurvenintegral liefert. Ein positiver Wert drückt aus, dass der in Frage kommende Vektor der elektrischen Feldstärke eine Richtung hat, die wesentlich übereinstimmt mit dem Bezugssinn des gegebenen Weges. Wenn man den Bezugssinn im entgegengesetzten Richtungssinn wählt, würde sich der Wert der Spannung mit einem entgegengesetzten Vorzeichen ergeben. Wenn man z. B. in einem konkreten Fall den Wert -60 V fand, hätte es genügt, den Bezugssinn zu wechseln, um $+60$ V zu erhalten.

Für jede Spannung kann man einen Bezugssinn festlegen; aber keine Spannung besitzt an sich einen Richtungssinn oder eine Richtung. Der Grund liegt darin, dass die Grösse «Spannung» nach ihrer Definition ein Skalar ist. Trotzdem wird häufig vom Richtungssinn einer Spannung gesprochen. Wer

sich dieser Ausdrucksweise bedient, denkt nicht an die Grösse «Spannung», sondern an das durch die Spannung ausgedrückte Phänomen, sei es an das elektrische Feld, das die Tendenz hat, in einem leitenden Milieu einen elektrischen Strom hervorzurufen, sei es an die elektromotorische Kraft, welche das elektrische Feld verursacht. Da die Ursache des elektrischen Felds die «actio» und das elektrische Feld die «reactio» sind, haben diese beiden Phänomene entgegengesetzte Richtungen. Die Folge davon ist, dass diejenigen, die vom Richtungssinn der Spannung sprechen, zwei sich widersprechenden Lagern angehören. Es ist deshalb gewagt, vom Richtungssinn einer Spannung zu sprechen.

Wenn für eine Spannung der Anfangspunkt des gegebenen Weges und der Endpunkt Klemmen eines Apparats oder — allgemeiner — eines Zweipols (Element eines Stromkreises) sind, hat die Anfangsklemme für eine positive Spannung das höhere Potential als die Endklemme. Man sagt dann, die Anfangsklemme sei positiv, die Endklemme negativ. In einem wirbelfreien Feld existiert somit eine Polarität eines Zweipols. Man kann eine «Bezugspolarität» einführen, die frei wählbar ist. Ein positiver Wert einer Spannung drückt aus, dass die wirkliche Polarität mit der Bezugspolarität übereinstimmt.

Allen Spannungen, die in einem wirbelfreien elektrischen Feld vorkommen, kann man je eine Bezugspolarität zuordnen; aber die Grösse «Spannung», die ein Skalar ist, besitzt an sich keine Polarität. Nur das Phänomen des elektrischen Felds besitzt eine solche.

Diejenigen, die von der Polarität einer Spannung sprechen, haben den Vorteil, nicht in zwei entgegengesetzte Lager aufgeteilt zu sein: Beide Gruppen, welche die Spannung entweder als Potentialabfall oder als Potentialanstieg verstehen, sind hinsichtlich der Polarität einig. Der grosse Nachteil des Begriffs «Bezugspolarität» liegt darin, dass er für eine Masche nicht existiert.

Die Grösse «Strom» oder — genauer — «Stromstärke» ist ebenfalls ein Skalar und besitzt deshalb weder Richtungssinn noch Richtung. Aber man spricht allgemein vom Richtungssinn eines Stroms. In der Tat besitzt das Phänomen «Strom» eindeutig einen Richtungssinn. Zufolge einer fast überall anerkannten Übereinkunft ist der Richtungssinn eines Stroms der Richtungssinn der Bewegung der positiven Ladungen, also entgegengesetzt demjenigen der Elektronen.

Die Grösse «elektromotorische Kraft» ist ebenfalls ein Skalar und besitzt daher auch weder Richtungssinn noch Richtung. Aber auch für die elektromotorische Kraft spricht man allgemein von einem Richtungssinn. Alle Autoren, ausser denjenigen, die wie *Maxwell* die elektromotorische Kraft als Synonym zu der als Kurvenintegral der elektrischen Feldstärke definierten Spannung verstehen, erachten den Richtungssinn der elektromotorischen Kraft als den Richtungssinn des Stroms, den zu erzeugen sie die Tendenz hat.

4. Die als Potentialabfall verstandene elektrische Spannung

Nach der Definition 05-20-025 der zweiten Auflage des Vocabulaire Electrotechnique International [11] ist die elektrische Spannung eine Grösse, die von einem Anfangspunkt längs eines gegebenen Weges bis zu einem Endpunkt existiert. Wenn man dem Buchstabensymbol (Formelzeichen) U der Spannung als ersten Index das den Anfangspunkt kennzeichnende Symbol a und als zweiten Index das den Endpunkt

kennzeichnende Symbol b beifügt, nimmt die Gl. (1) (Abschnitt 2) die folgende Form an:

$$U_{ab} = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (2)$$

In dieser Gleichung, die eine Identität ausdrückt, setzt sich der Vektor \mathbf{E} der elektrischen Feldstärke aus drei Komponenten zusammen. Die schon von *Maxwell* [16, Art. 599] gegebene Gleichung lautet, mit modernen Formelzeichen geschrieben:

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{B} - \frac{d\mathbf{A}}{dt} - \text{grad } \varphi \quad (3)$$

Darin ist \mathbf{v} der Vektor der Geschwindigkeit, \mathbf{B} der Vektor magnetische Induktion, \mathbf{A} das magnetische Vektorpotential, t die Zeit und φ das elektrische Potential. Das magnetische Vektorpotential und die magnetische Induktion sind durch die Gleichung:

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (4)$$

verbunden. Um die zur Diskussion stehenden Probleme des Bezugssinns klarzustellen, genügt es, hier nur wirbelfreie Felder und Körper in Ruhe zu betrachten. Gl. (3) vereinfacht sich dann:

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi \quad (5)$$

Hieraus lässt sich:

$$U_{ab} = - \int_a^b \text{grad } \varphi \cdot d\mathbf{s} = -\varphi_b + \varphi_a$$

ableiten, und schliesslich wird:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (6)$$

Diese Gleichung drückt mathematisch die früher erwähnte Tatsache aus, dass die Spannung ein Potentialabfall ist. Die Spannung U_{ab} ist positiv, wenn das Potential φ_b des Endpunktes niedriger ist als das Potential φ_a des Anfangspunktes des gegebenen Weges.

Falls der gegebene Weg, der vom Anfangspunkt a zum Endpunkt b führt, durch einen Zweipol verwirklicht ist, der selbst ein Leiter vom Widerstand R ist, in welchem der Strom I_{ab} fliesst, wobei die beiden Indizes den Bezugssinn der Spannung und des Stromes angeben, so gilt:

$$U_{ab} = R \cdot I_{ab} \quad (7)$$

Wenn U_{ab} einen positiven Wert hat, wird der Wert des Stroms auch positiv, und umgekehrt.

Die Spannung U_{ab} spielt die Rolle der lokalen Ursache des Stromes I_{ab} : Der Strom ist der Spannung proportional. Wenn, wie es Fig. 1 darstellt, der die Punkte a' und b' verbindende Leiter eine Spannungsquelle ist, hat es darin inhomogene Stellen: Chemische, photoelektrische, Kontakt-, thermische oder mechanische Effekte haben die Tendenz, die Ladungen verschiedener Polarität zu trennen, derart, dass eine Spannung aufrechterhalten wird. Um die Wirkung der Inhomogenitätsstellen auszudrücken, schreibt man ihnen die elektromotorische Kraft $E_{b'a'}$ zu, welche die Aktion der Trennung der elektrischen Ladungen entgegen der Spannung ausdrückt, die ihrerseits die Reaktion darstellt, die in dem durch die getrennten Ladungen erzeugten elektrischen Feld besteht.

Wenn die Leiter, die den Punkt a' mit dem Punkt a und den Punkt b mit b' verbinden, widerstandslos sind, ist die Spannung $U_{a'b'}$ gleich der Spannung U_{ab} . Die elektromotorische Kraft stellt die «actio» dar, die Spannungen $U_{a'b'}$ und U_{ab} sind die «reactio». Alle drei Grössen haben dasselbe Vorzeichen, aber die elektromotorische Kraft $E_{b'a'}$ ist positiv für den

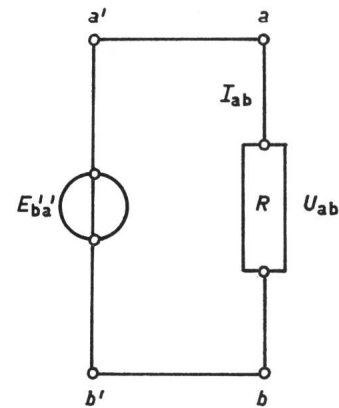


Fig. 1
Schema eines einfachen Stromkreises bestehend aus einer Spannungsquelle mit der elektromotorischen Kraft $E_{b'a'}$ und aus einem Leiter vom Widerstand R , in dem der Strom I_{ab} fliesst und dessen Klemmenspannung U_{ab} ist

Bezugssinn von unten nach oben, wogegen die Spannungen $U_{a'b'}$ und U_{ab} für den Bezugssinn von oben nach unten positiv werden: Die Spannung ist ein Potentialabfall, die elektromotorische Kraft ein Potentialanstieg.

In Übereinstimmung mit diesen Betrachtungen setzt man:

$$E_{b'a'} = \varphi_{a'} - \varphi_{b'} \quad (8)$$

Werden die Leiter, die den Punkt a' mit a und den Punkt b' mit b verbinden, als widerstandslos vorausgesetzt, so wird:

$$\varphi_{a'} = \varphi_a \quad (9a)$$

$$\varphi_{b'} = \varphi_b \quad (9b)$$

Damit geht Gl. (8) über in:

$$E_{b'a'} = \varphi_a - \varphi_b \quad (10)$$

Vergleicht man Gl. (10) und (6), so findet man als Ergebnis:

$$E_{b'a'} = U_{ab} \quad (11)$$

Für entgegengesetzte Bezugssinne hat man:

$$U_{ab} = -U_{ba} \quad (12)$$

woraus man mit Hilfe von Gl. (11) für denselben, von der unteren Sammelschiene zur oberen Sammelschiene führenden Bezugssinn erhält:

$$E_{b'a'} = -U_{ba} \quad (13)$$

Beachtet man, dass die Spannung U_{ab} die lokale Ursache des Stromes I_{ab} des Widerstandes darstellt und dass der Strom I_{ab} auch der Strom der Masche ist, so ist die elektromotorische Kraft $E_{b'a'}$ die ursprüngliche Ursache des Stromes der Masche, die durch die Folge der Punkte a, b, b', a' gekennzeichnet ist.

5. Die als Potentialanstieg oder als verallgemeinerte elektromotorische Kraft verstandene elektrische Spannung

Trotz der von der Commission Electrotechnique Internationale für die Spannung empfohlenen Definition 05-20-025 hat es in vielen Ländern Autoren, die vorziehen, die Spannung als Potentialanstieg zu verstehen. Dieser Spannungsbegriff wird nachstehend mit φ_{ab} bezeichnet, um nicht das Formelzeichen U_{ab} in zwei entgegengesetzten Bedeutungen zu verwenden.

Die Definition der elektrischen Spannung, als Potentialanstieg verstanden, kann durch die Gleichung:

$$\varphi_{ab} = \int_a^b d\varphi \quad (14)$$

wiedergegeben werden. Hieraus erhält man nach den Regeln der Integralrechnung:

$$\varphi_{ab} = \varphi_b - \varphi_a \quad (15)$$

Daraus gewinnt man in Analogie zu Gl. (8) den Ausdruck:

$$\varphi_{ab} = -E_{ba}$$

Schliesslich wird:

$$\varphi_{ab} = E_{ab} \quad (16)$$

Man kann demnach den Potentialanstieg φ_{ab} identifizieren mit einer fiktiven oder «verallgemeinerten elektromotorischen Kraft» E_{ab} . Diese Art des Vorgehens wird als zweite Variante in einer österreichischen Norm empfohlen [20, Punkt 5,11 bis 5,14].

Verwendet man die verallgemeinerte elektromotorische Kraft, so erhält man für die Klemmen eines Widerstandes statt Gl. (7) den folgenden Ausdruck:

$$E_{ab} = -R I_{ab} \quad (17)$$

Hier ist E_{ab} die fiktive oder verallgemeinerte elektromotorische Kraft, die man dem homogenen Leiter vom Widerstand R zuschreibt.

Unter Beibehaltung des für die im Sinn der Definition 05-20-025 verstandene Spannung verwendeten Formelzeichens wurde dieser Vorschlag anlässlich der Prager Tagung des Comité d'Etudes 24 durch den Delegierten Japans wieder aufgegriffen [15, S. 352].

In der Arbeitsgruppe wurde ein Vorschlag von *Darrieus* diskutiert, nach welchem das Hauptzeichen (Hauptsymbol) U für die im Sinn der Definition 05-20-025 verstandene Spannung und das Ausweichzeichen (Nebensymbol) V für die als Potentialanstieg verstandene Spannung verwendet werden sollten [15, S. 351, Kolonne II].

Der Gedanke, für zwei verschiedene Grössen zwei verschiedene Formelzeichen zu benützen, kann nur begrüsst werden. Aber man kann praktisch nicht das Ausweichzeichen V , das hauptsächlich in den Englisch sprechenden Ländern benützt wird, da es an «voltage» — Übersetzung von «Spannung» — erinnert, auf einen so speziellen Anwendungsbereich einschränken.

Die Arbeitsgruppe wollte nicht einen Sprachgebrauch fördern, der für einen grundlegenden Begriff mehrere Varianten aufweist. Sie hat sich darauf beschränkt, den Ausdruck «Spannung» nur in demjenigen Sinn zu gebrauchen, der ihm durch die Definition 05-20-025 der zweiten Auflage des Vocabulaire Electrotechnique International gegeben wird, und das Comité d'Etudes 24 hat sich diesem Vorgehen angeschlossen.

6. Die Angabe des Bezugssinns einer Spannung durch einen Pfeil, der vom Anfangspunkt zum Endpunkt zeigt

Nach der Bezeichnungsweise, die im Abschnitt 4 benützt wird, gibt man den Bezugssinn einer Spannung vermittelt zweier Indizes an, von denen der erste den Anfangspunkt kennzeichnet und der zweite den Endpunkt des Weges, längs dessen das Kurvenintegral der elektrischen Feldstärke gebildet wird. Sehr häufig zieht man vor, die beiden Indizes des Formelzeichens der Spannung, die den Anfangs- und den Endpunkt im Schema kennzeichnen, durch einen Pfeil im Schema zu ersetzen, der längs des betreffenden Zweipols gezeichnet wird. Ganz natürlich zeichnet man diesen Pfeil so, dass er vom Anfangs- zum Endpunkt zeigt, wie dies die Fig. 2 veranschaulicht.

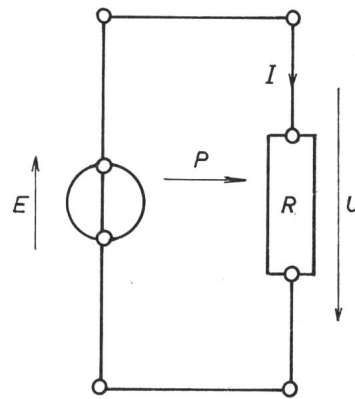


Fig. 2

Schema eines einfachen Stromkreises

Die Pfeilspitze, die den Bezugssinn des Stromes angibt, ist vom Anfangspunkt (oben) gegen den Endpunkt (unten) gerichtet. Der Pfeil, der den Bezugssinn der Spannung angibt, ist ebenfalls vom Anfangspunkt zum Endpunkt gerichtet. Das immer positive Produkt der Spannung und des Stromes, ausgedrückt durch zwei Grössen, bezieht sich auf zwei gleichgerichtete Pfeile

Die Folge hiervon ist, dass für einen positiven Wert einer Spannung zwischen zwei Punkten der Punkt beim Schwanzende des Pfeils positiv ist und der Punkt bei der Pfeilspitze negativ.

Für eine elektromotorische Kraft von positivem Wert befindet sich der positive Punkt bei der Spitze, der negative beim Schwanzende.

Es ist ein fast überall verbreiteter Brauch, den Bezugssinn eines Stromes durch eine Pfeilspitze anzugeben, die in dem Richtungssinn zeigt, in dem die positive Elektrizität transportiert wird, falls der Strom positiv ist (Fig. 2). Dieser Brauch geht zurück auf *Kirchhoff*, der ein Beispiel bringt, nach dem er in einem Anhang die zwei Regeln mitgeteilt hat, die seinen Namen tragen. In der zugehörigen Figur, die das Schema einer Wheatstoneschen Brücke darstellt, sind auf den Leitern Pfeilspitzen gezeichnet [14, Tafel V, Fig. 4]. Diese Pfeilspitzen werden als Bezugssinne der Potentialabfälle RI verwendet, allerdings ohne den Ausdruck «Bezugssinn» oder ein Synonym zu benützen.

Das Beispiel eines Leiters vom Widerstand R ist in Fig. 2 veranschaulicht. Da man jetzt auf Indizes verzichtet, muss man Gl. (7) ersetzen durch:

$$U = R \cdot I \quad (18)$$

Wenn ein Pfeil, der vom Anfangs- zum Endpunkt eines Zweipols zeigt, zur Angabe des Bezugssinns der Spannung dieses Zweipols dient, kann derselbe Pfeil auch dazu benützt werden, den Bezugssinn des Stromes anzugeben. Selbst für weitere Grössen, z. B. für den (magnetischen) Induktionsfluss, kann man denselben Pfeil verwenden. Dann gibt der Pfeil dem Zweipol an sich eine Orientierung, die für alle jene Grössen gilt, die einen Bezugssinn benötigen.

Ein anderer grosser Vorteil besteht darin, dass für die Leistung P , die der Widerstand aufnimmt, gilt:

$$P = RI^2 = RI \cdot I = UI \quad (19)$$

Es erscheint als natürlich, die Bezugssinne von zwei Grössen, denen dasselbe Vorzeichen zukommt, durch Pfeile von übereinstimmendem Richtungssinn anzugeben.

Zusammenfassend sind die Vorteile der Angabe des Bezugssinnes einer Spannung durch einen Pfeil, der vom Anfangspunkt zum Endpunkt des Weges des Kurvenintegrals zeigt, folgende:

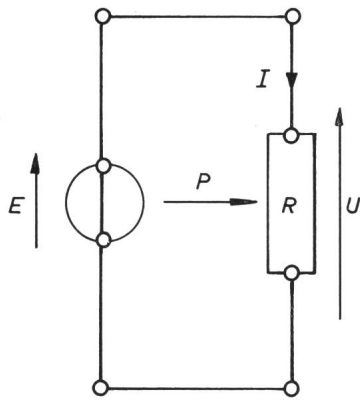


Fig. 3
Schema eines einfachen Stromkreises

Die Pfeilspitze, die den Bezugssinn des Stromes des Widerstandes angibt, zeigt vom Anfangspunkt (oben) zum Endpunkt (unten). Der Pfeil, der den Bezugssinn der Spannung des Widerstandes angibt, zeigt vom Endpunkt zum Anfangspunkt. Die Leistung ist positiv, wobei die beiden Pfeile einander entgegengesetzt gerichtet sind

1. Vorteil Es ist natürlicher und unmittelbarer, den Pfeil, der den Bezugssinn angibt, in jenem Richtungssinn zu zeichnen, in welchem das Kurvenintegral gebildet wird und auf welchen sich der positive oder negative Wert bezieht, den dieses Integral annimmt.
2. Vorteil Der den Bezugssinn einer Spannung angegebene Pfeil zeigt im wesentlichen in der Richtung der elektrischen Feldstärke, deren Ausdruck die Spannung ist, nämlich in der Richtung, in der die positive Elektrizität unter der Wirkung dieses Feldes transportiert wird.
3. Vorteil Um zur üblichen Form des Ohmschen Gesetzes zu gelangen, die in Gl. (18) gegeben ist, erscheint es als natürlich und unmittelbar, dass der Pfeil, der den Bezugssinn des Stroms angibt, und der Pfeil des Bezugssinns der Spannung, die diesen Strom aufrechterhält, in demselben Richtungssinn zeigen.
4. Vorteil Ein einziger Pfeil kann dazu dienen, einen Zweipol zu orientieren und damit einen einheitlichen Bezugssinn für alle Größen dieses Zweipols anzugeben, die einen Bezugssinn benötigen.
5. Vorteil Ein einziger Bezugssinn kann für eine Masche dienen.
6. Vorteil Die von einem Widerstand aufgenommene Leistung, die nach Konvention stets positiv ist, und die durch das Produkt UI ausgedrückt werden kann, entspricht zwei Pfeilen von übereinstimmendem Richtungssinn.

7. Die Angabe des Bezugssinns einer Spannung durch einen Pfeil, der vom Endpunkt zum Anfangspunkt zeigt

Eine Spannung U , welche von einem Anfangspunkt a , entlang eines gegebenen Weges, bis zu einem Endpunkt b existiert, ist gemäss der Gl. (2) definiert als das Kurvenintegral der elektrischen Feldstärke, zu bilden vom Anfangspunkt längs des gegebenen Weges bis zum Endpunkt. Man kann nun vereinbaren, den Durchlaufsinne, der vom Anfangs- zum Endpunkt gerichtet ist und welcher der Bezugssinn ist, durch einen Pfeil anzugeben, der vom End- zum Anfangspunkt zeigt. Dieses ziemlich überraschende Vorgehen gestattet, einen Vorteil zu erreichen, der später dargelegt wird. Die Folge dieser Vereinbarung ist, dass für einen positiven Wert einer Spannung zwischen zwei Punkten der Punkt bei der Pfeilspitze positiv ist und der Punkt beim Schwanzende negativ.

Das Beispiel eines Leiters vom Widerstand R ist in Fig. 3 veranschaulicht. Wie im Abschnitt 6 ist die Gl. (7) durch die Gl. (18) ersetzt, ungeachtet der Tatsache, dass der Richtungssinn des Pfeils, der den unveränderten Bezugssinn der Spannung angibt, dem entsprechenden Pfeil der Fig. 2 entgegen-

gesetzt gerichtet ist. Wenn man die zweite Kirchhoffsche Regel anwendet, kann man deren übliche Form (05-20-150), nach welcher für eine Masche die algebraische Summe der elektromotorischen Kräfte (Potentialanstiege) gleich ist der algebraischen Summe der Spannungen (Potentialabfälle), ersetzen durch eine algebraische Summe von elektromotorischen Kräften und Spannungen, die gleich Null ist. In diese algebraische Summe sind die elektromotorischen Kräfte und die Spannungen mit dem Pluszeichen (+) oder dem Minuszeichen (—) einzusetzen, je nachdem die Pfeile der elektromotorischen Kräfte und der Spannungen mit dem für die Masche angenommenen Bezugssinn übereinstimmen oder nicht. Man kann also die elektromotorischen Kräfte und die Spannungen auf gleiche Weise behandeln, da der Pfeil, der den Bezugssinn einer Spannung angibt — für Werte gleichen Vorzeichens —, gegen denselben Punkt zeigt wie für die elektromotorischen Kräfte.

Der Vorteil, der nach der Vereinbarung, den Bezugssinn einer Spannung durch einen Pfeil anzugeben, der vom Endpunkt des Weges des Kurvenintegrals der elektrischen Feldstärke zum Anfangspunkt zeigt, ist demnach der folgende:

Wenn man die zweite Kirchhoffsche Regel durch eine aus elektromotorischen Kräften und Spannungen gemischte algebraische Summe ausdrückt, die gleich Null ist, wird für die Wahl der Vorzeichen Plus (+) oder Minus (—) ein Automatismus erreicht zwischen dem Aufschreiben der aus elektromotorischen Kräften und Spannungen gemischten algebraischen Summe und den zugehörigen Pfeilen, ohne dass die physikalische Natur (elektromotorische Kraft oder Spannung) der Zweipole, welche die Potentialdifferenz verursachen, berücksichtigt werden muss.

Dieser Vorteil, dem nicht viel Gewicht zukommt, muss durch eine Reihe von Nachteilen erkauft werden:

1. Nachteil Der Pfeil, der den Bezugssinn der Spannung angibt, zeigt im wesentlichen in der dem elektrischen Feld, also der Ursachen der Spannung, entgegengesetzten Richtung.
2. Nachteil In einer Masche muss man von einem Bezugssinn, den ein Pfeil angibt, besonders erklären, ob er sich auf die Ströme oder auf die Spannungen bezieht, da beide einander entgegengesetzt sind.
3. Nachteil Eine Leistung, Produkt einer Spannung und eines Stromes von positiven Werten, ist positiv, wenn die Pfeile, welche die Bezugssinne der beiden Faktoren angeben, in entgegengesetzten Richtungssinnen zeigen. Diese Tatsache erscheint als besonders stossend.

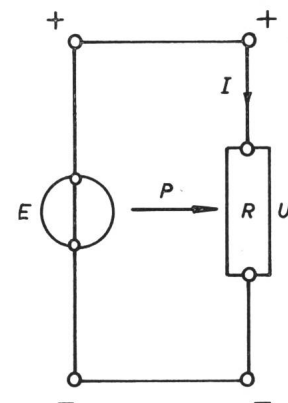


Fig. 4
Schema eines einfachen Stromkreises

Die Pfeilspitze, die den Bezugssinn des Stromes angibt, zeigt vom Anfangspunkt (oben) zum Endpunkt (unten). Die Zeichen Plus (+) und Minus (—) geben die Bezugspolarität der Spannung und der elektromotorischen Kraft an

8. Die Angabe der Bezugspolarität durch die Zeichen Plus (+) und Minus (—)

In der Definition 05-20-025 der 2. Auflage des Vocabulaire Electrotechnique International wird der Ausdruck «(elektrische) Spannung» auf englisch durch das Wort «voltage» wiedergegeben. Aber in den Englisch sprechenden Ländern scheint die Praxis zu zeigen, dass mehr und mehr unter dem Wort «voltage» auch der Begriff «elektromotorische Kraft» verstanden wird. Dieser Ausdruck scheint allmählich zu verschwinden. Eine solche Praxis verunmöglicht die Verwendung der Pfeile im Sinn von Abschnitt 6, die für denselben Wert von «voltage» in entgegengesetzten Richtungssinn zeigen müssten, je nachdem mit «voltage» eine «Spannung» oder eine «elektromotorische Kraft» gemeint ist. Aus diesem Grunde sah

schon der erste Entwurf der Konventionen, der vom Comité d'Etudes 24 im Jahr 1962 in Bukarest behandelt worden ist, die Angabe der Bezugspolarität in einem Schema mittelst der Zeichen Plus (+) und Minus (—) vor. Diese Konvention ist unabhängig davon, ob unter «voltage» eine Spannung oder eine elektromotorische Kraft verstanden wird. Fig. 4 veranschaulicht diese Art des Vorgehens. Im Beispiel des Leiters mit dem Widerstand R ist Gl. (17) gültig für die in Fig. 4 angegebene Bezugspolarität der Spannung U und den angegebenen Bezugssinn des Stromes I .

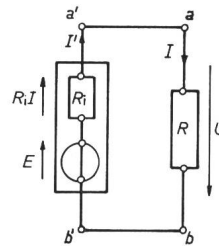
Dieser Art des Vorgehens haften aber auch erhebliche Nachteile an:

1. Nachteil Für die (Umlauf-) Spannung einer Masche gibt es keine Polarität.

Beispiel für die Anwendung der verschiedenen Methoden, in einem Schema die Grundlagen der Vorzeichen-Vereinbarung anzugeben. Tabelle I

Fall I

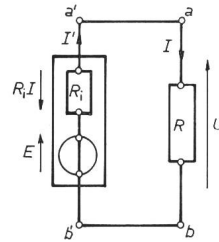
Im Sinne von Abschnitt 4 ist die Spannung als Potentialabfall verstanden. Nach Abschnitt 6 ist der Bezugssinn der Spannung durch einen Pfeil angegeben, der vom Anfangspunkt zum Endpunkt des Weges des Kurvenintegrals zeigt.



- (A) $U = \varphi_a - \varphi_b$
- (B) $I' - I = 0$
 $I' = I$
- (C) $U = RI$
- (D) $E = R_i I' + U$
 $U = E - R_i I$
- (E) $P = UI = RI^2$

Fall II

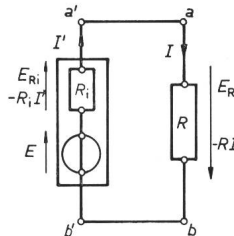
Im Sinne von Abschnitt 4 ist die Spannung als Potentialabfall verstanden. Nach Abschnitt 7 ist der Bezugssinn der Spannung durch einen Pfeil angegeben, der vom Endpunkt zum Anfangspunkt des Weges des Kurvenintegrals zeigt.



- (A) $U = \varphi_a - \varphi_b$
- (B) $I' - I = 0$
 $I' = I$
- (C) $U = RI$
- (D) $E - R_i I' - U = 0$
 $U = E - R_i I$
- (E) $P = UI = RI^2$

Fall III

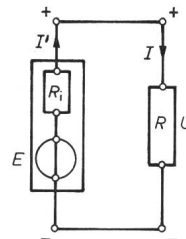
Im Sinne von Abschnitt 5 ist die Spannung als Potentialanstieg oder als verallgemeinerte elektromotorische Kraft verstanden. Der Bezugssinn ist angegeben durch einen Pfeil, der für positive Werte vom tieferen zum höheren Potential zeigt.



- (A) $-E_R = \varphi_b - \varphi_a$
- (B) $I' - I = 0$
 $I' = I$
- (C) $E_R = -RI$
- (D) $E + E_{Ri} + E_R = 0$
 $E + (-R_i I') + (-RI) = 0$
 $RI = E - R_i I$
- (E) $P = -E_R I = RI^2$

Fall IV

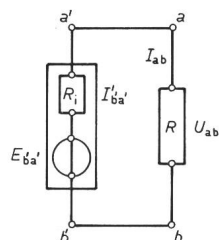
Im Sinne von Abschnitt 8 ist die Bezugspolarität einer Spannung und einer elektromotorischen Kraft durch die Zeichen Plus (+) und Minus (—) angegeben.



- (A) $U = \varphi_+ - \varphi_-$
- (B) $I' - I = 0$
 $I' = I$
- (C) $U = RI$
- (D) $-E + R_i I' + U = 0$
 $U = E - R_i I$
- (E) $P = UI = RI^2$

Fall V

Im Sinne von Abschnitt 4 ist die Spannung als Potentialabfall verstanden. Der Bezugssinn der Spannung ist durch einen Doppelindex angegeben, wobei der erste Index den Anfangs- und der zweite Index den Endpunkt des Weges des Kurvenintegrals kennzeichnet.



- (A) $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$
- (B) $I'_{b'a'} - I_{ab} = 0$
 $I'_{b'a'} = I_{ab}$
- (C) $U_{ab} = RI_{ab}$
- (D) $E_{b'a'} = R_i I'_{b'a'} + U_{ab}$
 $U_{ab} = E_{b'a'} - R_i I_{ab}$
- (E) $P = U_{ab} I_{ab} = RI_{ab}^2$

2. Nachteil Falls es nötig ist, die Polaritäten für eine Gleichstromkomponente anzugeben, sind besondere Mittel erforderlich, um den Unterschied anzudeuten zwischen den Zeichen, welche die Bezugspolarität angeben und jenen, welche die Polarität der Gleichstromkomponente festlegen.

9. Anwendungsbeispiel für die verschiedenen Arten, in einem Schema die Grundlagen der das Vorzeichen betreffenden Konventionen anzugeben

Um die Unterschiede zu verdeutlichen, die zwischen den verschiedenen Arten bestehen, nach welchen man in einem Schema die Grundlagen der Vorzeichen-Konventionen angeben kann, wird in der Tabelle I eine Spannungsquelle behandelt, die den inneren Widerstand von R_1 aufweist und durch den Widerstand R geschlossen ist. Die beiden horizontalen Verbindungen können sich auf Punkte reduzieren. Für jeden Fall sind die fünf Gleichungen (A) bis (E) aufgeführt. Gl. (A) drückt die Spannung — im Fall III die verallgemeinerte elektromotorische Kraft —, die längs des Leiters vom Widerstand R besteht, durch die Potentiale der beiden Verbindungen aus. Gl. (B) ist eine Anwendung der ersten Kirchhoffschen Regel [11, 05-20-115]. Gl. (C) formuliert das Ohmsche Gesetz [11, 05-20-145], wobei die Potentialdifferenz durch die Spannung — im Fall III durch die verallgemeinerte elektromotorische Kraft — ausgedrückt ist. Gl. (D) wendet die zweite Kirchhoffsche Regel an [11, 05-20-150], nach welcher die algebraische Summe der elektromotorischen Kräfte in einer Masche gleich ist der algebraischen Summe der an den Widerständen bestehenden Potentialabfälle. Schliesslich drückt die Gl. (E) die vom Widerstand R aufgenommene Leistung aus. Im vorliegenden Text ersetzt der Ausdruck «Potentialabfälle» den im Vocabulaire benützten Ausdruck «chutes de tension», um die Übereinstimmung mit dem englischen Text zu erreichen.

Es ist selbstverständlich, dass sich die Ergebnisse nicht widersprechen, die man nach den verschiedenen Arten der Angabe der Bezugssinne in einem Schema — den Grundlagen der Vorzeichen-Konventionen — erhält; sie werden zwangsläufig alle richtig, wenn man die Vereinbarungen fehlerfrei befolgt.

10. Gründe zur Rechtfertigung der vom Comité d'Etudes 24 angenommenen Lösung

Die Angabe der Bezugspolarität einer Spannung oder einer elektromotorischen Kraft in einem Schema durch die Zeichen Plus (+) und Minus (—), also der Fall IV in Tab. I, hat den Vorteil, vom Entscheid über die Definition der Spannung als Potentialabfall oder Potentialanstieg unabhängig zu sein (Abschnitt 3). Deshalb war sich die Arbeitsgruppe des Comité d'Etudes 24 sofort einig, diese Art des Vorgehens im Konventionsentwurf zu empfehlen. Wenn auch diese Konvention keine Mehrdeutigkeit enthält, so ist sie doch bei einem komplizierten Schema in der Anwendung äusserst unbequem; sie konnte deshalb nicht allein empfohlen werden.

Der Gebrauch des dem Formelzeichen beizufügenden Doppelindex, also der Fall V, ist von der schon angenommenen Verwendung der Zeichen Plus (+) und Minus (—) vollständig unabhängig; er wurde deshalb von der Arbeitsgruppe ebenfalls ohne Zögern in den Konventionsentwurf aufgenommen. Die angenommene Variante der Methode des Doppelindex ist jene, bei welcher für positive Werte der erste Index für eine Spannung (Potentialabfall) den Punkt höheren Potentials und für

eine elektromotorische Kraft (Potentialanstieg) den Punkt tieferen Potentials kennzeichnet. Die empfohlene Konvention entspricht somit der Vereinbarung I eines Artikels von *Reed* und *Lewis*, in welchem eine andere Variante als besser beurteilt wird [21, S. 42, Kolonne II].

Die Arbeitsgruppe wollte nicht eine Methode empfehlen, die auf dem als Potentialanstieg oder als verallgemeinerten elektromotorischen Kraft verstandenen Begriff der Spannung beruht, weil ein solcher der von der Commission Electrotechnique Internationale unter der Definition 05-20-025 der zweiten Auflage des Vocabulaire Electrotechnique International angenommenen Auffassung widerspricht. Aus diesem Grund wurde der Fall III nicht in den Konventionsentwurf aufgenommen.

Die Fälle I und II der Tab. I veranschaulichen die beiden Methoden, den Bezugssinn einer Spannung durch einen Pfeil anzugeben, der entweder vom Anfangspunkt des Weges des Kurvenintegrals der elektrischen Feldstärke zum Endpunkt oder im entgegengesetzten Richtungssinn zeigt. Diese beiden Methoden schliessen sich gegenseitig aus, denn sie beruhen auf sich widersprechenden Grundannahmen. Deshalb ist in der Arbeitsgruppe die Tendenz aufgetaucht, zur Angabe des Bezugssinns einer Spannung auf Pfeile ganz zu verzichten. Aber die Arbeitsgruppe musste der Tatsache Rechnung tragen, dass die Benützung von Pfeilen zur Angabe des Bezugssinns einer Spannung schon weit verbreitet ist und dass die Nationalkomitees sehr wünschten, eine die Pfeile betreffende Empfehlung zu haben; dieser Wunsch ist um so eher zu verstehen, als einige Nationalkomitees die Methode der Angabe der Bezugspolarität durch die Zeichen Plus (+) und Minus (—) wegen der damit verbundenen Nachteile (Abschnitt 8) verwerfen. Die Arbeitsgruppe hat der Methode von Fall I den Vorzug gegeben; sie ist damit bei jener Lösung geblieben, die schon im ersten Entwurf enthalten war. Um jedoch der Minderheit Rechnung zu tragen, verlangt ein vom Comité d'Etudes 24 in Prag gefasster Beschluss zu erwähnen, dass die andere Methode oft benützt werde, aber verlange, dass ein Autor, der sie anwende, dies in seinem Text ausdrücklich erwähnen sollte [9, S. 8]. — Die Bevorzugung der Methode, die Pfeile im Sinn von Fall I zu orientieren, ist durch die in den Abschnitten 6 und 7 aufgeführten Vorteile gut begründet.

Der Vorteil des Automatismus der Wahl der Vorzeichen der Spannungen und der elektromotorischen Kräfte, welcher der Methode von Fall II zugeschrieben wird, kann auch nach der Methode von Fall I erreicht werden, wenn man wie folgt vorgeht: Man ersetzt alle elektromotorischen Kräfte der Quellen (Aktionen) durch die Spannungen der Quellen (Reaktionen) und kommt so zu einer algebraischen Summe von Spannungen, die gleich Null zu setzen ist. Der Automatismus ist dann derselbe wie bei der Methode nach Fall II.

Morren schliesst in seine Betrachtungen auch die Darstellung von Wechselfspannungen durch Zeiger ein [17, S. 311]. Aber die Zeiger sind keine Vektoren im wahren Sinn des Wortes; sie stellen mit der Zeit veränderliche Grössen dar. Sie haben nur eine physikalische Bedeutung, wenn sie von einem gemeinsamen Nullpunkt — dem Rotationszentrum der zeitliche Sinusfunktionen darstellenden Zeiger — aus gezeichnet werden. Ihre Richtung hat keinen unmittelbaren Zusammenhang mit dem Bezugssinn ausser demjenigen, dass eine Phasenverschiebung von π einem Vorzeichenwechsel entspricht.

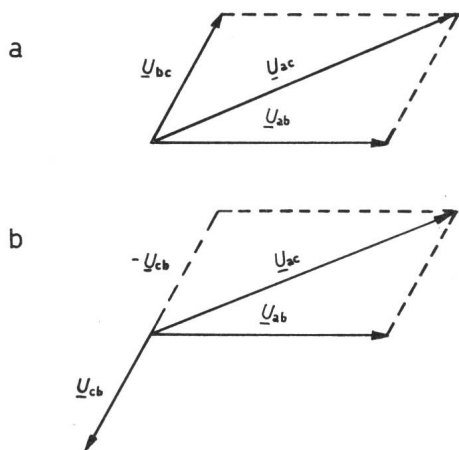


Fig. 5

Zusammensetzung der Spannungen, die zwischen drei Punkten a , b und c von verschiedenem Potential bestehen

Was auch immer der Richtungssinn des angenommenen Pfeils sei, für die komplexen Werte gilt stets die Beziehung:

$$\underline{U}_{ac} = \underline{U}_{ab} + \underline{U}_{bc} \quad (20)$$

(Fig. 5) oder, wenn man den Punkt b als gemeinsamen Endpunkt hervorheben will:

$$\underline{U}_{ac} = \underline{U}_{ab} - \underline{U}_{cb} \quad (21)$$

Es genügt, diese Beziehung systematisch anzuwenden, um in allen Fällen eine korrekte Darstellung zu erhalten und um z. B. für ein Dreiphasensystem keinen Zweifel offen zu lassen über die Phasenverschiebung einer Spannung oder bei einem Transformator über die Schaltgruppennumerierung nach dem Zifferblatt.

Um sein Zeigerdiagramm zu vereinfachen, identifiziert *Morren* das Rotationszentrum der Figur mit dem Sternpunkt. Vom didaktischen Standpunkt aus erscheint diese Art des Vorgehens als gefährlich und als geeignet, zur Verwirrung der Geister beizutragen, selbst wenn es in einem Sonderfall gestattet, die Überlegungen zu vereinfachen. Wenn man das Vorgehen von *Morren* für ein Schema anwendet, muss das System der verketteten Spannungen U_{RS} , U_{ST} , U_{TR} , das in der zitierten Reihenfolge ein Mitsystem ist, mit Bezugspfeilen gezeichnet werden, die der Reihenfolge der Aufzählung entgegengesetzt aufeinanderfolgen, wogegen man nach der Methode von Fall I die Pfeile in der Folge $R-S-T$ zeichnet (Fig. 6).

Es folgt daraus, dass man die von *Morren* am Schluss seiner Betrachtungen über die Zeiger-Darstellung von Wechselspannungen gestellten zwei Fragen mit «nein» beantworten kann, und zwar im Hinblick auf die Vorteile der Methode nach Fall I der Tab. I.

Die von *Laurent* vorgebrachte Kritik kann man nur unterstützen, wenn er auf die Unverträglichkeit der Benennungen «tension (ou différence de potentiel) électrique» in Französisch und «voltage (potential difference)» auf Englisch, für welche die Definition 05-20-025 gilt, mit den Benennungen «chute de potentiel ou de tension» und «voltage (potential) drop», für welche die Definition 05-20-030 gilt, hinweist [15, S. 351, Kolonne II]. Um diesen Mangel zu beheben, genügt es, die Definition 05-20-030 aufzuspalten, was der zuständigen Arbeitsgruppe des Comité d'Etudes I vorgeschlagen werden soll, und folgendes festzulegen:

05-20-030

Potentialabfall

Verringerung des Potentials längs eines stromdurchflossenen Leiters oder Apparates.

05-20-031

Spannungsabfall

Unterschied der Spannungen des Eingangs und des Ausgangs einer elektrischen Leitung oder eines Apparates.

Mit den in der zweiten Auflage des Vocabulaire Electrotechnique International definierten Begriffen und mit den Konventionen, die das Comité d'Etudes 24 in Prag angenommen hat, kann der «mittlere Verbraucher» (consommateur moyen), den *Laurent* mehrfach heranzieht, zu Recht in seiner Sprache weiterhin «die Auffassung der Spannung als Ursache des Stromes in einem Leiter» [15, S. 353, Kolonne II] benützen; denn nichts hat sich an der grundlegenden Auffassung geändert, nach der in einem leitenden Stoff die elektrische Feldstärke die Ursache der Stromdichte ist. Die Verwendung von Pfeilen, die vom Anfangspunkt des Weges des Kurvenintegrals der elektrischen Feldstärke zum Endpunkt zeigen, ändert hier nichts. Das Gefühl des «mittleren Verbrauchers» stimmt überein mit dem «offiziellen Elektrotechnisch» [15, S. 350, Kolonne II].

Entgegen andern elektrotechnischen Begriffen ist der Begriff der Spannung nicht eindeutig gewesen (Abschnitt 2). Es bestehen Unterschiede zwischen den Auffassungen von Ländern verschiedener Sprache, ja selbst zwischen verschiedenen Autoren desselben Landes. Es geht weniger darum, der Fachsprache «mehr Reichhaltigkeit und Geschmeidigkeit zu verleihen» [15, S. 353, Kolonne I], als vielmehr darum, eine Ungenauigkeit zu beseitigen, die eine einwandfreie Verständigung über die Landesgrenzen hinweg beeinträchtigt.

Die Grundlage des Textes der Konventionen, die in erster Linie als Empfehlung zur Befolgung in Veröffentlichungen der Commission Electrotechnique Internationale dienen und in zweiter Linie internationale Empfehlungen sein sollen, muss der Begriff des elektrischen Feldes sein, der nicht nur für den Physiker, sondern auch — insbesondere heutzutage — für den

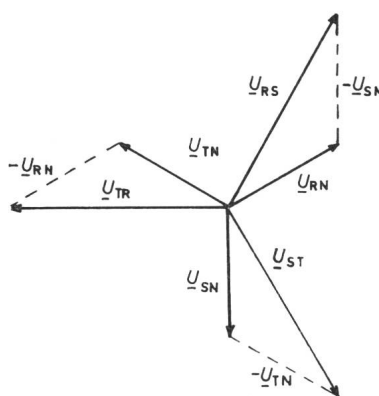
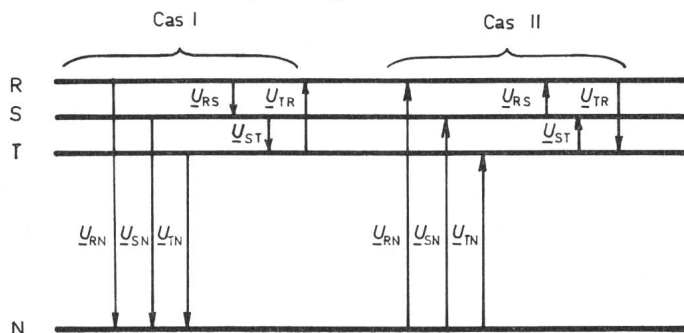


Fig. 6

Angabe der Bezugssinne der Sternspannungen und der verketteten Spannungen eines Dreiphasen-Netzes nach Fall I (cas I) und Fall II (cas II)



Elektroingenieur wesentlich ist [17, S. 306, Kolonne II]: Diese Grundlage ist international anerkannt.

Die Hauptursache der langen Diskussionen bildet die Tatsache, dass der Begriff der Spannung sich seit dem Jahr 1778 nur langsam entwickelt hat. Noch heute bestehen verschiedene Auffassungen nebeneinander. Die Definition 05-20-025 der zweiten Auflage des Vocabulaire Electrotechnique International, die erst aus dem Jahr 1954 stammt, ist ein Kristallisationskern. Diese Definition macht Fortschritte und gewinnt dauernd an Verbreitung. Will man «die gegenwärtige Laxheit der Sprache» [15, S. 353, Kolonne II] und «die gegenwärtige Mehrdeutigkeit des Begriffes der Spannung» [15, S. 353, Kolonne I] bewahren in Anbetracht dessen, dass «sie den Fortschritt der Elektrotechnik nicht gehindert haben und bei Fachleuten und Studenten nicht mehr Beachtung finden als die Luft, die sie einatmen»? Die in den Schulen gemachten Erfahrungen beweisen das Gegenteil. Die entscheidenden Fragen sind folgende: Soll die Commission Electrotechnique Internationale in ihren Empfehlungen eine vielfarbige und unpräzise Sprache pflegen oder muss sie versuchen, sich eindeutig und präzise so auszudrücken, dass selbst ein Leser, für den keine der offiziellen Sprachen der Commission Electrotechnique Internationale die Muttersprache ist, die Texte genau verstehen kann? Ist man bereit, um dieses Ziel zu erreichen, einige Gewohnheiten zu opfern, die der Preis jeder Vereinheitlichung und Normung sind? In Anbetracht des Lebenszweckes der Commission Electrotechnique Internationale, die anlässlich ihrer im Jahr 1904 beschlossenen Einsetzung beauftragt worden ist, die Frage der Vereinheitlichung der Nomenklatur zu prüfen und die nach dem Artikel 2 ihrer Statuten den Zweck hat, die Koordination und die Vereinheitlichung nationaler elektrotechnischer Normen zu erleichtern, kann die Antwort nicht zweifelhaft sein.

Literatur

- [1] *AEF (Ausschuss für Einheiten und Formelgrößen)*: Begriffsbestimmung für Potential, Potentialdifferenz, Elektromotorische Kraft, Spannung, Spannungsdifferenz — Definitionen und Leitsätze; Elektrotechnische Zeitschrift 29(1908)31, pp. 745, 746.
- [2] *AEF (Ausschuss für Einheiten und Formelgrößen)*: Spannung, Potential und elektromotorische Kraft, Elektrotechnische Zeitschrift 41(1920)32, pp. 641, 642, 643, 660.
- [3] *AEF (Ausschuss für Einheiten und Formelgrößen)*: Satz V — Elektrische Größen — Spannung, Potential, Potentialdifferenz und elektromotorische Kraft, Elektrotechnische Zeitschrift 48(1927)16, p. 552.

- [4] *American Standards Association*: American Standard Definitions of Electrical Terms (American Institute of Electrical Engineers, New York 1942 [Standard C42-1941]).
- [5] *Ausschuss für Einheiten und Formelgrößen (AEF) im Deutschen Normenausschuss (DNA)*: Elektrische Größen — Spannung, Potential, elektromotorische Kraft (Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin 30 und Köln 1926 [DIN 1323]).
- [6] *Commission Electrotechnique Internationale, Comité d'Etudes N° 24*: Grandeurs et unités électriques et magnétiques: Compte rendu de la réunion tenue à Madrid les 6, 7 et 8 juillet 1959 (Bureau Central de la CEI, Genève 1959 [document R. M. 547/C. E. 24]).
- [7] *Commission Electrotechnique Internationale, Comité d'Etudes N° 24*: Grandeurs et unités électriques et magnétiques: Compte rendu de la réunion tenue à Bucarest les 2, 3 et 4 juillet 1962 (Bureau Central de la CEI, Genève 1962 [document R. M. 719/CE 24]).
- [8] *Commission Electrotechnique Internationale, Comité d'Etudes N° 24*: Grandeurs et unités électriques et magnétiques: Procès-verbal de la réunion tenue à Aix-les-Bains les 27, 28 et 29 mai 1964 (Bureau Central de la CEI, Genève 1964 [document PV 860/CE 24]).
- [9] *Commission Electrotechnique Internationale, Comité d'Etudes N° 24*: Grandeurs et unités électriques et magnétiques: Procès-verbal de la réunion tenue à Prague les 21, 22 et 24 juillet 1967 (Bureau Central de la CEI, Genève 1967 [document PV 1075/CE 24]).
- [10] *Commission Electrotechnique Internationale*: Vocabulaire Electrotechnique International (Bureau Central de la CEI, Londres (à présent: Genève) 1938 [Fascicule 50]).
- [11] *Commission Electrotechnique Internationale*: Vocabulaire Electrotechnique International (2° édition), Groupe 05, Définitions fondamentales (Bureau Central de la CEI, Genève 1954 [Publication 50 (05)]).
- [12] *F. Emde*: Die Geschichte des Spannungsbegriffs (Die Bedeutungswandlungen des Wortes Spannung in der Elektrizitätslehre), Elektrotechnische Zeitschrift 42(1921)8, pp. 169...173.
- [13] *Institute of Electrical and Electronics Engineers*: (Proposed Standard:) Definitions of General (Fundamental and derived) Electrical and Electronics Terms (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York 1966 [IEEE No. 270]).
- [14] *G. Kirchhoff*: Über den Durchgang eines Stromes durch eine Ebene, insbesondere durch eine kreisförmige, Annalen der Physik (und Chemie) 64(1845)4, pp. 497...514.
- [15] *P.-G. Laurent*: L'ambivalence de la notion de tension électrique et la figuration de la tension sur les schémas, Revue générale de l'électricité 77(1968)4, pp. 349...353.
- [16] *J. C. Maxwell*: A treatise on electricity and magnetism, second edition (At the Clarendon Press, Oxford 1881).
- [17] *L. Morren*: La représentation graphique de la polarité d'une tension — Une question controversée (Bulletin de la Société Royale Belge des Electriciens — Bulletin van de Koninklijke Belgische Vereniging der Electrotechnici 83(1967)4, pp. 307...311).
- [18] *G. S. Ohm*: Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet (T. H. Riemann, Berlin 1827).
- [19] *G. S. Ohm*: Gesammelte Abhandlungen von G. S. Ohm — Herausgegeben und eingeleitet von Dr. E. Lommel (Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1892).
- [20] *Österreichischer Normenausschuss*: Elektrische Feldstärken und Spannungsgrößen (Österreichischer Normenausschuss, Wien 1955 [ÖNORM A 6445]).
- [21] *M. B. Reed et W. A. Lewis*: Voltage Notation Conventions, Electrical Engineering 67(1948)1, pp. 41...48.
- [22] *A. Volta*: Le opere di Alessandro Volta — Edizione Nazionale, Volume terzo (Ulrico Hoepli, Milano 1926).

Adresse des Autors:

Frl. Prof. Dr. Erna Hamburger, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.