Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 13 (1922)

Heft: 1

Artikel: Die grundlegenden Massgrössen der Elektrotechnik im Lichte der Relativitätstheorien

Autor: Kummer, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058286

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich, im Januar dazu die Beilage „**Jahresheft**".

Alle den **Inhalt** des „Bulletin" betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins
Seefeldstrasse 301, Zürich 8 — Telephon: Hottingen 7320, welches die Redaktion besorgt.

Alle Zuschriften betreffend **Abonnement, Expedition** und **Inserate** sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.
Stauffacherquai 36/38 Zürich 4 Telephon Selnau 7016

Ce bulletin paraît mensuellement. — „**L'Annuaire**" est distribué comme supplément dans le courant de janvier.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la **matière** du „Bulletin" au

Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens
Seefeldstrasse 301, Zurich 8 — Telephon: Hottingen 7320 qui s'occupe de la rédaction.

Toutes les correspondances concernant les **abonnements, l'expédition** et les **annonces,** doivent être adressées à l'éditeur

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Stauffacherquai 36/38 Zurich 4 Téléphone Selnau 7016

Abonnementspreis (für Mitglieder des S. E. V. gratis) für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft: Schweiz Fr. 20.—, Ausland Fr. 25.— Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 2.— plus Porto.

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire Fr. 20.— pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger. L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 2.—, port en plus.

XIII. Jahrgang
XIIIe Année

Bulletin No. 1

Januar
Janvier 1922

Die grundlegenden Massgrössen der Elektrotechnik im Lichte der Relativitätstheorien.

Von Prof. *Dr. W. Kummer,* Ingenieur, Zürich.

Die in Gebrauch befindlichen Massgrössen der Elektrotechnik stehen einer Naturauffassung nahe, die die Gesamtheit der Naturerscheinungen auf veränderliche Raumverteilung von unveränderlichen Substanzen, d. h. auf Bewegungen von Massenpunkten, zurückzuführen sucht; dabei dienen *Raum, Zeit* und *Masse* als Grundgrössen mit den Grundeinheiten *1 cm, 1 sec, 1 gr.* Für den Uebergang von der Elektrodynamik zur Elektrostatik — in praktischer Hinsicht besonders bei der Nachrechnung der sog. elektrischen Festigkeit der Isolierstoffe — wird als weitere, in ihrer „Dimension" allerdings eine „abgeleitete Grösse" vorstellende, aber immerhin ebenfalls grundlegende, Massgrösse die *Lichtgeschwindigkeit* benutzt und als universelle Konstante betrachtet. Die Massgrössen der Elektrotechnik scheinen also auf dem Boden einer „Massenpunkts-Physik" erwachsen zu sein, während, wie gleich bemerkt werden soll, die neuen Relativitätslehren eine „Feldphysik" begründen, deren Feld-Vorstellungen gerade der Elektrotechnik, bezw. der Ideenwelt von *Faraday* und *Maxwell* entnommen sind. In der „Massenpunkts-Physik" wird den Grundgrössen Raum, Zeit und Masse eine absolute Bedeutung beigelegt, die diesen Grössen von den neuen Relativitätslehren nicht mehr zugebilligt wird. Die Relativierung von Raum, Zeit und Masse erschüttert aufs heftigste sowohl gewisse philosophische Auffassungen, als auch die rein physikalische Naturerkenntnis, die bisher gegolten haben. Es frägt sich also, nicht nur für die „exakte" Wissenschaft, sondern auch für die messende Technik, ob sie sich angesichts solcher Erschütterungen der Grundlagen noch wohl geborgen fühlen.

Der bekannte Forscher *Albert Einstein,* ehemaliger Studierender und später, während kurzer Zeit, auch Lehrer der eidg. Technischen Hochschule, dem wir die Hauptarbeit an den neuen Relativitätslehren, also auch die Relativierung unserer

Grundgrössen verdanken, hat 1905, in einer ersten Darlegung seiner revolutionären Ideen, bereits die Relativität von Raum und Zeit und, indirekt, auch der Masse postuliert, jedoch der Lichtgeschwindigkeit eine absolute Bedeutung noch gelassen. In endgültiger Darlegung seiner Relativitätstheorie hat Einstein im Jahre 1913 dann auch noch die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit fallen lassen und für das Problem der Gravitation eine Lösung in Vorschlag gebracht, durch die der Massenbegriff zur reinen Feldeigenschaft herabgedrückt wird. Diese endgültige Darlegung nennt Einstein die „allgemeine" Relativitätstheorie, zu der die frühere Darlegung, als die „spezielle" Relativitätstheorie, einen Grenzfall bildet.

Die Beseitigung des absoluten Charakters von Raum und Zeit erfolgt in der speziellen Relativitätstheorie folgenderweise: Irgend ein Naturereignis werde einerseits von einem ersten, festen Bezugskörper – bezw. in bezug auf ein Cartesisches Koordinatensystem x, y, z und in bezug auf die Zeit t –, anderseits von einem zweiten, geradlinig und gleichförmig mit der Geschwindigkeit v bewegten Bezugskörper – bezw. in bezug auf ein Cartesisches Koordinatensystem x', y', z' und in bezug auf die Zeit t' – beobachtet, wobei sich der zweite Bezugskörper derart bewegen möge, dass die $y'z'$-Ebene seines Koordinatensystems stets parallel der yz-Ebene des ersten festen Körpers bleiben möge. Dann können für die Koordinatensysteme von Raum und Zeit die Transformationsformeln (I):

$$\text{(I)} \quad \begin{cases} x' = x - v \cdot t \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

aufgestellt werden. Eine solche Transformation ergibt für die Naturbeschreibung Resultate, die mit der sog. „klassischen" Mechanik, wie sie durch Archimedes, Galilei, Newton, Lagrange begründet, bezw. entwickelt wurde, in vollem Einklang stehen, und zwar besonders deshalb, weil der Trägheitssatz (das erste „Axiom" von Newton) für das kraftfreie Beharren der Körper keinen Unterschied zwischen absoluter Ruhe und geradlinig-gleichförmiger Bewegung kennt. Wichtige Erfahrungsresultate der Optik, sowie grundlegende Beziehungen der Elektrodynamik zeitlich veränderlicher Felder, lassen sich aber bei Benützung der Transformationsformeln (I) nur dann richtig darstellen, wenn noch weitere, wenig wahrscheinliche Hilfshypothesen mitbenutzt werden; diese Schwierigkeiten verschwinden auf einen Schlag, wenn man, bei Einführung der Lichtgeschwindigkeit c, die folgenden, von *H. A. Lorentz* aufgestellten Transformationsformeln (II) benutzt:

$$\text{(II)} \quad \begin{cases} x' = \dfrac{x - v \cdot t}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \dfrac{t - \dfrac{v}{c^2} \cdot x}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} \end{cases}$$

Indem Einstein die Gleichungen (II) auch für die Mechanik verbindlich erklärt und die Zulässigkeit dieser axiomatischen Behauptung beweist, zerstört er den absoluten Charakter von Raum und Zeit, denn nunmehr unterscheiden sich für die Körper, auf die sich die Koordinaten x, y, z, t, sowie x', y', z', t' stützen, die Längeneinheiten

für x und x' um $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ und die Zeiteinheiten für t und t' um $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Für den hypothetischen Fall, dass die Lichtgeschwindigkeit c unendlich gross sein könnte, müsste der Unterschied den Einheiten von x und x', sowie von t und t' verschwinden, d. h. es müssten die Gleichungen (II) übergehen in die Gleichungen (I). Sein bezügliches spezielles Relativitätsprinzip formuliert nun Einstein in gemeinverständlicher Fassung wie folgt: „Jedes allgemeine Naturgesetz muss so beschaffen sein, dass es in ein Gesetz von genau gleicher Fassung übergeht, wenn man statt der Raum- Zeit-Variablen x, y, z, t des ursprünglichen Koordinatensystems K neue Raum-Zeit-Variable x', y', z', t' eines Koordinatensystems K' einführt, wobei der mathematische Zusammenhang zwischen den gestrichenen und den ungestrichenen Grössen durch die Lorentz-Transformation gegeben ist.“[1]) Neben der Zerstörung der Anschauung vom absoluten Charakter von Raum und Zeit bewirkt die spezielle Relativitätstheorie weiter auch die Umwandlung des Begriffs der Masse m, die nun mit der in einem materiellen Körper enthaltenen potentiellen Energie E und mit der Lichtgeschwindigkeit c in den Zusammenhang:

$$m = \frac{E}{c^2}$$

gebracht wird. Die Trägheit der Körper wird damit zu einer Eigenschaft ihrer Energie und die Unveränderlichkeit der Masse ist deshalb beseitigt, weil die Energie E durch Wärmeänderung, durch elektrische Felder usw. leicht geändert werden kann.

Für die messende Elektrotechnik, sowie für jede Messtechnik, die auf den Grundgrössen Raum, Zeit und Masse beruht, ist es nun von Wert und gleichzeitig von beruhigendem Ergebnis, festzustellen, dass die quantitativen Veränderungen, die die spezielle Relativitätstheorie an den Massgrössen Länge, Zeit und Masse bewirkt, für die meisten Erscheinungen, insbesondere für alle industriell bedeutungsvollen physikalischen Prozesse, vernachlässigbar klein sind. Es beruht dies hinsichtlich Länge und Zeit darauf, dass im Ausdruck:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

das Glied $\frac{v^2}{c^2}$ neben 1 verschwindet, weil die praktisch vorkommenden Zahlenwerte von v neben:

$$c = 300\,000 \text{ km/sec}$$

bedeutungslos sind. Mit Bezug auf die Masse m ist festzustellen, dass dieser als $\frac{E}{c^2}$, wiederum wegen c, so hohe Werte annimmt, dass die praktisch vorkommenden Wärmezufuhren, elektrische Felder usw., den zahlenmässigen Wert von m ebenfalls nur unmerklich beeinflussen. Die grundsätzlich bestehende Veränderlichkeit der Masse ist übrigens nicht nur ein logisches Ergebnis der Relativitätstheorie, sondern auch eine Erfahrungstatsache der radioaktiven Forschung, der wir, ebenfalls erst in jüngster Zeit, die Umwandlung der sog. chemischen Elemente verdanken. Wenn nun auch auf der einen Seite festzustellen war, dass quantitative Störungen der genauen Zahlenwerte der Grundgrössen praktisch nicht in Betracht kommen, so mussten wir auf der andern Seite einsehen, dass unsere Grundgrössen ihres bisherigen absoluten Charakters, der ihnen die Bedeutung eines sichern Fundaments verlieh, nunmehr entkleidet sind; das sog. absolute Massystem kann jetzt auch nur mehr als ein

[1]) Vergl. *A. Einstein,* Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (Gemeinverständlich). Heft 38 der „Sammlung Vieweg“. Erste Auflage 1917, 11. Auflage 1921.

relatives und konventionelles bewertet werden. Die Frage liegt nahe, ob man sich in logischer Hinsicht mit dieser Sachlage zufrieden geben kann, oder ob ein logisch besser befriedigendes Massystem erwünscht sei; wir werden später hierauf zurückkommen.

Dass der Lichtgeschwindigkeit vorerst noch eine absolute Bedeutung zuerkannt wird, könnte leicht als sonderbare Annahme erscheinen, wenn man bedenkt, dass jetzt der Länge und der Zeit nur noch eine relative Bedeutung zugebilligt werden, da man doch im „Raum" und in der „Zeit" viel ursprünglichere Begriffe zu erkennen gewohnt ist, als in der damit „abgeleiteten Geschwindigkeit". Die philosophische Klärung unseres Erkenntnisvermögens hat aber Raum und Zeit längst nur als *„Formen"* unserer Anschauung hingestellt, denen die messenden Physiker das Prädikat der Absolutheit mehr nur stillschweigend, keinesfalls aber notwendig zwingend beigegeben hatten. Die spezielle Relativitätstheorie, die aus der modernen Elektrodynamik und aus der Optik eine viel tiefere Erkenntnis der Bewegungsvorgänge herauszuholen vermochte, als es der frühern Naturerkenntnis möglich war, liefert nun auch der mathematischen Erkenntnis der Raum-Zeit-Verhältnisse wertvolle Grundlagen, die von *H. Minkowski,* der ebenfalls eine Zeitlang Lehrer an unserer Technischen Hochschule war (sowohl Einstein, als auch der Schreibende haben daselbst Vorlesungen von ihm gehört), in die Synthese der vierdimensionalen „Welt", d. h. in eine organische Raum-Zeit-Verknüpfung gebracht wurden. Diese Synthese kann leicht aus dem Folgenden erfasst werden. Aus den Transformationsgleichungen (II) folgt der quadratische Ausdruck:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 \cdot t'^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 \cdot t^2 .$$

Setzt man nun statt t die imaginäre Grösse $\sqrt{-1} \cdot c \cdot t$ und benutzt die Transformationsformeln:

$$x_1 = x , \qquad x_2 = y , \qquad x_3 = z , \qquad x_4 = \sqrt{-1} \cdot c \cdot t$$

so folgt wiederum ein quadratischer Ausdruck:

$$x'^2_1 + x'^2_2 + x'^2_3 + x'^2_4 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2$$

der dem obenstehenden gleichwertig ist; damit ist die Synthese mathematisch formuliert, deren Bedeutung darin liegt, dass Raum und Zeit für den Schauplatz des Naturgeschehens unlösbar miteinander verbunden sind, während in unserer primitiven Anschauung die „Welt" in Raum und Zeit zerspalten ist.

So förderlich die spezielle Relativitätstheorie für die Beschreibung und die Fassbarmachung der optischen und der elektrodynamischen Naturerscheinungen ist, so wenig vermag sie noch den schon in der klassischen Mechanik rätselhaft anmutenden Phaenomenen der Zentrifugalkraft und der Gravitation gerecht zu werden; diese Rätselhaftigkeit, auf die wir sogleich eintreten werden, veranlasste Einstein zum weitern Ausbau der Relativitätstheorie, durch den dann der absolute Charakter der Lichtgeschwindigkeit zu Fall kam. Das Wesen der Zentrifugalkraft konnte z.B. auch deshalb als rätselhaft empfunden werden, weil sie als „Kraft", im Sinne der klassischen Mechanik, eine *vor* der Bewegung vorhandene Ursache der Bewegung sein soll und dabei dieselbe „Masse" in sich enthält, die bei Auswirkung jener, radial gerichteten „Kraft", wiederum als Trägheit in die, nun aber tangential verlaufende Bewegung eingeht [1]); schon Newton empfand die der Erfassung der Zentrifugalkraft anhaftende Schwierigkeit, die er ebensowenig, wie die späteren Vertreter der klassischen Mechanik, zu bannen wusste. Die Gravitation wurde in neuerer Zeit noch als besonders rätselhaft empfunden, nachdem man, infolge der experimentellen Untersuchungen von *H. Hertz,* den „Glauben" an die elektrodynamischen Fernkräfte, im Sinne der Anschauungen von *W. Weber* und *F. Neumann,* abgelegt und die Realität von Nahewirkungskräften gemäss den Ideen von *M. Faraday* und *J. C. Maxwell*

[1]) Vergl. *H. Hertz,* Die Prinzipien der Mechanik, 1894, Seite 6.

erkannt zu haben sich berechtigt fühlen durfte; die als einzige Fernkraft der Welt noch übrigbleibende Gravitation musste deshalb besonders rätselhaft erscheinen.

Da die Auffassung der klassischen Mechanik, nach der die Zentrifugalkraft ihren Ursprung im absoluten Raume hat, wobei also der Rotation eine absolute Bedeutung zugeschrieben wird, mit der speziellen Relativitätstheorie nicht in unlösbarem Wiederspruch steht, so ist diese Theorie nicht befähigt, die Rätsel der Zentrifugalkraft und der Gravitation, als einer besondern, mit dem Auftreten einer Zentralbewegung verknüpften Naturerscheinung, zu lösen. In Einsteins „allgemeiner" Relativitätstheorie wird nun auch noch die Relativität der Rotation postuliert und gleichzeitig die Identifizierung der schweren und der trägen Masse begriffsmässig durchgeführt. Dabei setzt Einstein der Kraftdefinition von Newton, nach der die Kraft P mit Hilfe der „trägen" Masse m und der Beschleunigung p gemäss:

$$P = m \cdot p$$

definiert wird, das aus der Physik der Kraftfelder entnommene Gesetz:

$$P = \mu \cdot S$$

gegenüber, in dem μ die „schwere" Masse und S die Intensität des Schwerefeldes bedeuten. Aus den zwei Beziehungen folgt:

$$p = \frac{\mu}{m} \cdot S .$$

Da die zahlenmässige Uebereinstimmung der schweren und der trägen Masse experimentell sichergestellt ist, so gilt:

$$\mu = m$$

Damit folgt:

$$p = S$$

woraus sich ergibt, dass die an einem freien materiellen Körper auftretende Beschleunigung als Feldeigenschaft dargestellt werden kann. Insbesondere ist also die Beschleunigungsgrösse, die mit der Planetenbewegung verknüpft ist, identisch mit der Intensität des Gravitationsfeldes der Sonne, wobei die Planetenbahnen die durch ein Minimum-Prinzip eindeutig bestimmten natürlichen Bahnen in diesem Gravitationsfelde darstellen. Auf Grund dieser neuen Auffassung der Beschleunigung gelangt man nun dazu, für die Beobachtung und Beschreibung eines Naturereignisses einem ersten Koordinatensystem K ein zweites, relativ zu K beschleunigtes Koordinatensystem K' gegenüberzustellen; dabei zeigt es sich, dass ein Körper, der gegenüber K eine geradlinig gleichförmige Bewegung ausführt, dies gegenüber K' nicht mehr tut, sondern eine beschleunigte, im allgemeinen krummlinige Bewegung aufweist; so muss also ein Lichtstrahl, der sich gegenüber K gleichförmig geradlinig bewegt, in bezug auf K' eine abweichende Bewegung erkennen lassen. Deshalb konnte Einstein voraussagen, dass sich Lichtstrahlen in Gravitationsfeldern krummlinig fortpflanzen müssen, welche kühne Behauptung bezüglich des Gravitationsfeldes der Sonne durch die Beobachtungen anlässlich der Sonnenfinsternis vom 29. Mai 1919 eine glänzende Bestätigung ihrer Richtigkeit gefunden hat. Damit sind wir zu einer letzten schwerwiegenden Erschütterung der Massgrössen der Elektrotechnik gelangt, zur Ablehnung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, als einer notwendigen Folge der krummlinigen Lichtstrahl-Fortpflanzung. Erfahrungsgemäss scheint nun bezüglich der Lichtausbreitung die Geschwindigkeit c in terrestrischen Räumen den Charakter eines Konstanten wenigstens näherungsweise zu besitzen, während sie in astronomischen Räumen diesen Charakter nicht allgemein mehr aufweist. Diese, in Uebereinstimmung mit der allgemeinen Relativitätslehre resultierende Sachlage ruft einer neuen begrifflichen Erschütterung der Raum-Zeit-Beziehungen, die schon durch die spezielle Relativitätstheorie eine schwerwiegende Umwandlung erfahren mussten. Diese neue

Erschütterung der Raum-Zeit-Beziehungen folgt dadurch, dass der Inhalt der allgemeinen Relativitätstheorie offenbar die Aussage enthalten soll, es seien die allgemeinen Naturgesetze so formulierbar, dass sie beim Uebergang von einem ersten Koordinatensystem K zu einem zweiten Koordinatensystem K' auch dann noch dieselbe mathematische Fassung erhalten können, wenn die Relativbewegung zwischen K und K' nicht nur eine Translation, sondern auch eine Rotation aufweist. Die nunmehr erforderlichen Raum-Zeit-Beziehungen können allgemein nicht mehr durch einen quadratischen Ausdruck:

$$x'_1{}^2 + x'_2{}^2 + x'_3{}^2 + x'_4{}^2 = x_1{}^2 + x_2{}^2 + x_3{}^2 + x_4{}^2$$

befriedigt werden, da ein solcher eben viel speziellere Raum-Zeit-Relationen bedingt, als sie mit der allgemeinen Relativitätstheorie – also auch mit der Erfahrung der unkonstanten Lichtgeschwindigkeit – verträglich sind. Indem wir den oben genannten, also nicht mehr zutreffenden quadratischen Ausdruck, vektoranalytisch als Quadrat eines Linienelements ds schreiben, lautet er:

$$ds^2 = dx_1{}^2 + dx_2{}^2 + dx_3{}^2 + dx_4{}^2 .$$

Auf die der allgemeinen Relativitätstheorie zugrunde liegenden Raum-Zeit-Relationen gelangt man nun, indem man das Quadrat des Linienelements auf die Form:

$$ds^2 = \sum_{ik} g_{ik}\, dx_i\, dx_k$$

bringt, worin die Grössen g_{ik} Funktionen von x_1, x_2, x_3, x_4 sind. Die Allgemeinheit dieses Ausdrucks, der eine quadratische Differentialform mit variablen Koeffizienten darstellt, ist bei Darstellung der Grössen g_{ik} als physikalische Zustandsgrössen gerade gleichwertig der Allgemeinheit der Raum-Zeit-Relationen, von denen das allgemeine Relativitätsprinzip beherrscht wird.[1]) Die exakte Formulierung dieses Prinzips besagt nun, dass die, die allgemeinen Naturgesetze ausdrückenden Gleichungen bei beliebigen stetigen Transformationen der Argumente x_i stets von derselben Form (d. h. kovariant) sind. Die dadurch bedingte Mathematik (Methode des absoluten Differentialkalküls) ist seitens der Mathematiker schon vor einem halben Jahrhundert entwickelt worden, insbesondere von *E. B. Christoffel* (während 7 Jahren ebenfalls Lehrer an unserer Eidg. Technischen Hochschule), und ist seit 1913 zunächst von *M. Grossmann* (derzeitiger Lehrer an unserer Eidg. Technischen Hochschule) und dann, ganz besonders, von *H. Weyl* (ebenfalls zurzeit Lehrer an unserer Eidg. Technischen Hochschule) nach den besondern Bedürfnissen der Relativitätstheorie Einsteins weiter entwickelt worden.

Betrachten wir nun im Zusammenhang die Wandlungen der Raum-Zeit-Beziehungen, denen wir begegnet sind. Auf dem Boden der klassischen Mechanik sind sowohl Raum als Zeit Formen unserer Anschauungen, denen von den Physikern bisher ein absoluter Charakter zuerkannt wurde; angesichts der durch den Trägheitssatz gegebenen Sachlage, dass die geradlinig gleichförmige Bewegung einen physikalisch ausgezeichneten Bewegungszustand darstellt, kommen als Transformationsformeln die durch (I) bezeichneten Beziehungen in Betracht. Die Addition und Quadrierung dieser Beziehungen liefert den reduzierten quadratischen Ausdruck:

$$y'^2 + z'^2 = y^2 + z^2$$

da $v = \dfrac{x - x'}{t}$, sowie t, identisch herausfallen. Dieser quadratische Ausdruck besagt, dass die Verbindungslinie eines Punktes A, dem die Koordinaten x, y, z im System K, bezw. x', y', z' im System K' entsprechen, mit den Koordinaten-Ursprungspunkten O bezw. O' in den Systemen K, bezw. K' stets dieselbe gleichbleibende Projektion

[1]) Vergl. *B. Riemann* und *H. Weyl*, Ueber die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen. Berlin 1921 (Zweite Auflage).

auf jeder Ebene senkrecht zur Bewegungsrichtung aufweist. Auch bei geradlinig beschleunigter oder verzögerter Bewegung von K' gegenüber K kann der Ausdruck:

$$y'^2 + z'^2 = y^2 + z^2$$

noch bestehen bleiben, da eben Raum und Zeit für sich, absolut und unabhängig vorausgesetzt sind.

Auf dem Boden der speziellen Relativitätstheorie Einsteins gelten die Beziehungen (II) anstelle der Beziehungen (I) und gilt der quadratische Ausdruck:

$$x'_1{}^2 + x'_2{}^2 + x'_3{}^2 + x'_4{}^2 = x_1{}^2 + x_2{}^2 + x_3{}^2 + x_4{}^2 = s^2$$

wo $s = OA$ selbst invariant bleibt, aber nicht etwa in einem dreidimensionalen Raum – das wäre ja gegen alle Erfahrung, – sondern in der vierdimensionalen „Welt" Minkowskis; beim Uebergang auf unendlich kleine Grössen schreibt sich dieser invariant bleibende quadratische Ausdruck:

$$ds^2 = dx_1{}^2 + dx_2{}^2 + dx_3{}^2 + dx_4{}^2$$

wie wir gesehen haben. Raum und Zeit sind nun miteinander verbunden und relativiert, wobei aber die geradlinig gleichförmige Bewegung immer noch einen physikalisch ausgezeichneten Bewegungszustand darstellt, der in der Fortpflanzung des Lichtstrahls seinen vornehmsten Ausdruck findet.

Begeben wir uns endlich auf den Boden der allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins, so gelangen wir in eine Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit, in der das invariant bleibende Linienelement ds im allgemeinen nicht mehr nach dem Pythagoreischen Lehrsatz – d. h. nicht mehr nach den Regeln der sog. Euklidischen Geometrie – aus Koordinatenelementen dx_1, dx_2, dx_3, dx_4, sondern in viel allgemeinerer Weise – d. h. nach Regeln, die auch in der Nicht-Euklidischen Geometrie Geltung haben – zu formulieren ist, wofür die Form:

$$ds^2 = \sum_{ik} g_{ik}\, dx_i\, dx_k$$

gewählt wurde. Um uns den Unterschied des Raum-Zeit-Schauplatzes der Naturereignisse in der speziellen und in der allgemeinen Relativitätstheorie zum Bewusstsein zu bringen, machen wir uns ein physikalisches Bild dieses Schauplatzes, wie ja übrigens prinzipiell der Raum-Zeit-Schauplatz der allgemeinen Relativitätstheorie nur physikalisch erfasst werden kann. In der speziellen Theorie lässt sich ds als Diagonale in einem vierdimensionalen Parallelepiped mit den Koordinatenelementen als Kanten deuten, das wir uns einem absolut starren Körper gleich denken können. So wie es aber in der Physik keinen absolut starren Körper gibt, haben wir nun auch die Form des Parallelepipeds zu relativieren, bezw., im Sinne der allgemeinen Relativitätstheorie, seine Kanten und Winkel verrückbar anzunehmen. Diese Verrückungen sind indessen nicht unbeschränkt willkürlich, sondern im Einklang mit dem Naturgeschehen, wobei dann ein ausgezeichnetes Linienelement ds invariant bleibt. Unser ehemaliges Parallelepiped der vierdimensionalen euklidischen „Welt" ist nunmehr ein verformter Weltausschnitt in einer vierdimensionalen, nicht euklidischen „Welt". Das erkenntnistheoretische Ergebnis unseres Uebergangs in den Raum-Zeit-Schauplatz der allgemeinen Relativitätslehre ist die Verneinung einer von der Physik unabhängigen Geometrie.

So gewaltig die Umwälzungen auch sind, die unsere Anschauungen über Raum und Zeit, zunächst beim Uebergang von der Ideenwelt der klassischen Mechanik auf die Ideenwelt der speziellen Relativitätstheorie, und hernach beim Uebergang von der Ideenwelt der speziellen auf diejenige der allgemeinen Relativitätstheorie, durchzumachen hatten, so geringfügig und vernachlässigbar sind die dabei resultierenden Korrekturen an den Massgrössen von Länge und Zeit, bezw. an Masstäben und Uhren. Was die aus der speziellen Relativitätstheorie resultierenden Korrekturen

angeht, so erwähnten wir bereits, dass sie wegen der Grösse des Zahlenwerts der Lichtgeschwindigkeit praktisch belanglos seien. Was nun die aus der allgemeinen Relativitätstheorie möglicherweise abzuleitenden Korrekturen betrifft, so sind in der dabei geltenden Infinitesimalgeometrie Längeneinheiten und Zeiteinheiten zunächst undefinierbar; nichts hindert aber, in einer „Welt"-Stelle ein Koordinatensystem zu errichten und die Umgebung dieser Stelle darauf zu beziehen, wobei gewisse Masseinheiten eingeführt und sinngemäss benutzt werden können, sobald man den Begriff der infinitesimalen Parallelverschiebung eines Vektorkreuzes beibehält; die die Verschiebung bestimmende Funktion ist jedoch physikalischer Natur, eine Feldeigenschaft. In ausgedehnten Feldern von wenig veränderlichen Feldeigenschaften bleiben die Masseinheiten relativ bestehen und zeigen keine neue Ungenauigkeit gegenüber der speziellen Relativitätstheorie. In dieser glücklichen Lage befinden wir uns bezüglich der Messung von Länge und Zeit auf unserer Erdoberfläche, so dass also dabei keine neuen Korrekturen an Masstäben und Uhren erwartet werden müssen. Auch im Lichte der allgemeinen Relativitätstheorie bleiben daher die grundsätzlich zu erwartenden Korrekturen geringfügig und vernachlässigbar. Da wir, wie schon erwähnt, auf dem Boden der allgemeinen Relativitätstheorie auch die Lichtgeschwindigkeit in terrestrischen Räumen weiterhin als Konstante betrachten dürfen, so haben wir auch für den Uebergang von der Elektrostatik zur Elektrodynamik keinerlei Korrektur unserer Formeln in Betracht zu ziehen.

Endlich haben wir uns noch mit der Unkonstanz der Masse in der allgemeinen Relativitätstheorie zu befassen. In der speziellen Relativitätstheorie lernten wir die Masse im Zusammenhang:

$$m = \frac{E}{c_2}$$

grundsätzlich bereits als veränderlich erkennen; grundsätzlich kann dieser Ansatz auch in der allgemeinen Relativitätstheorie bestehen bleiben, obwohl eine befriedigendere Formulierung die Masse als Äusserung des metrischen Feldes der „Welt" darstellt, wie dies *H. Weyl*[1]) durchgeführt hat. Für uns genügt die Feststellung, dass die Masse, als grundlegende Massgrösse der Elektrotechnik, in der allgemeinen Relativitätstheorie in praktischer Hinsicht keine weitergehende Relativierung erfährt, als sie schon in der speziellen Relativitätstheorie festgelegt wurde; es sind weder auf dem Boden der speziellen, noch auf dem Boden der allgemeinen Relativitätstheorie zahlenmässig angebbare Korrekturen praktisch erforderlich.

Wir sehen also im Lichte der allgemeinen Relativitätstheorie kein wesentlich anderes Bild der grundlegenden Massgrössen der Elektrotechnik, als wir es im Lichte der speziellen Relativitätstheorie kennen lernten. *Bei quantitativ durchaus belanglosen Störungen der genauen Zahlenwerte verlieren die Grundgrössen allerdings den früher von den Physikern vorausgesetzten absoluten Charakter.*

Nochmals erhebt sich vor uns die Frage, ob zum Aufbau eines Massystems nicht Grundgrössen gewählt werden könnten, die der logischen Forderung einer Invarianz eher zu entsprechen vermöchten. Eine besonders wichtige physikalische Grösse, die für jede Naturauffassung, also auch für jedes Relativitätsprinzip den Charakter der Invarianz beanspruchen darf, ist die *„Energie"*, die deshalb zur Begründung eines Massystems sehr wohl als eine der grundlegenden Massgrössen geeignet wäre. Prüfen wir nun, welche weiteren Massgrössen der „Energie" als Grundgrössen beizugesellen wären, so führen uns, aller Relativität zum Trotz, praktische Erwägungen wiederum auf die Anschauungsformen *„Raum"* und *„Zeit"*, bezw. auf die Grundgrössen „Länge" und „Zeit". Es bildet nämlich der Differentialquotient:

$$\frac{d\,(\text{Energie})}{d\,(\text{Länge})}$$

[1]) Vergl. *H. Weyl*, Raum, Zeit, Materie. Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie. Erste Auflage 1918; vierte Auflage 1921. Verlag von Julius Springer, Berlin.

die wichtige physikalische Grösse „Kraft", deren Evidenz uns z. B. in der „Festigkeit" der Materialien bewusst wird, während der Differentialquotient:

$$\frac{d(\text{Energie})}{d\,(\text{Zeit})}$$

die ebenso wichtige physikalische Grösse „Effekt" ergibt, deren Evidenz uns z. B. in den äussern Abmessungen rein elektrischer Energiewandler (Transformator) verdeutlicht wird. Ein System der Grundgrössen „Energie, Länge, Zeit" scheint somit in logischer Hinsicht dem in Kraft befindlichen System „Masse, Länge, Zeit" überlegen zu sein. Da indessen, und zwar auch durch die Relativitätstheorie, „Masse" und „Energie" in sehr enger Beziehung stehen [1]), und da die aus praktischen Gründen unentbehrlichen Grössen „Länge" und „Zeit" nicht weniger relativ sind als die Masse, so kommen wir aber endgültig zur Einsicht, dass das System der Grundgrössen „Masse, Länge, Zeit", logisch doch nicht so unbefriedigend ist, als wir es unter dem Drucke des überwältigenden Erkenntnis-Ausblicks, den die Relativitätstheorien vermitteln, zunächst halten mussten.

Ueber die magnetischen Felder in elektrischen Maschinen und ihre Untersuchung mittels des Durchflutungsdiagramms.

Von *Dr. Ing. Wilhelm Stiel.*

1. Allgemeines über die Felder in elektromagnetischen Maschinen.

Die Felder, welche in magnetelektrischen Maschinen auftreten, sind räumlich bestimmt durch den mechanischen und elektrischen Aufbau der Maschinen, zeitlich durch die magnetisierenden Ströme und die Arbeitseigenschaften der Maschinen.

Vereinfachend auf die räumliche Ausbildung der Felder wirkt bei der Mehrzahl der Maschinen der Umstand, dass (von den Lüftungsschlitzen abgesehen) alle senkrecht zur Wellenmittellinie gelegten Schnitte kongruente Figuren ergeben. Damit wird sich bei allen derartig gebauten Maschinen die Frage nach der räumlichen Verteilung des Feldes in der Maschine reduzieren auf die Frage der Verteilung der Induktion in *einem* einzigen Querschnitt der Maschine. Daneben ist die Frage nach dem Einfluss der nicht im Eisen an den beiden Stirnseiten der wirksamen Eisenkörper sowie in etwaigen Luftkanälen des Ankers verlaufenden Kraftlinien von untergeordneter Bedeutung (vergl. Fig. 1). Es soll daher hier von der näheren Untersuchung dieser Feldteile abgesehen werden.

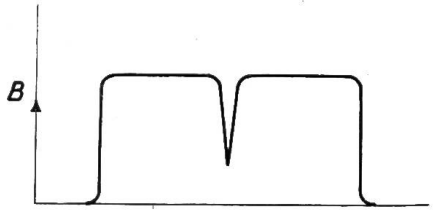

Fig. 1
Achsiales Kraftlinienbild eines Ankers mit einem Ventillationsschlitz.

In den Fällen, in denen der magnetische Aufbau von dem gewohnten abweicht, wird die Untersuchung sich selbstverständlich auch mit der achsialen Verteilung der Felder zu befassen haben. Dies wird z. B. der Fall sein bei Gleichstrommaschinen, welche Pole von verschiedener achsialer Länge besitzen (z. B. kurze Wendepole), oder welche unsymmetrische Polschuhe haben, wie die Gleichpoltypen für Wechselstrom u. a. m.; ferner bei Maschinen mit statt achsial schräg (in Schraubenlinien) angeordneten Nuten im feststehenden oder beweglichen Teil. Diese Fälle sollen hier ausser Betracht gelassen werden.

Hiernach kann sich die Betrachtung des Feldes einer magnetelektrischen Maschine und insbesondere einer solchen vom Typus des normalen Induktionsmotors mit Recht

[1]) Dass auf dem Boden der klasischen Mechanik eine enge Beziehung zwischen den Begriffen „Energie" und „Masse" besteht, zeigt ein Hinweis von *E. Mach,* gemäss dem das Massenverhältnis zweier Körper auch durch das umgekehrte Verhältnis der durch dieselbe Arbeit erzeugten Geschwindigkeitsquadrate dargestellt werden kann. (Vergl. *E. Mach,* Die Mechanik in ihrer Entwicklung, Seite 250 der achten Auflage von 1921).