Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 58 (1967)

Heft: 18

Artikel: Elementarteilchen

Autor: Mang, H. J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916280

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: 09.08.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

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

An unsere Leser

Im Januar 1949 führte der SEV eine Umfrage unter seinen Mitgliedern durch, um ihnen die Mitwirkung an den künftigen Aufgaben des Vereins zu ermöglichen. Unter den damals gestellten Fragen bezogen sich einige auch auf die Ausgestaltung des Bulletins des SEV. Die eingegangenen Antworten wurden von der Redaktion so weit als möglich berücksichtigt.

Seither sind mehr als 17 Jahre vergangen; vieles hat sich geändert. Redaktion und Verlag des Bulletins empfinden das Bedürfnis, die Auffassungen und Anregungen der heutigen Leser über unsere Fachzeitschrift kennen zu lernen. Sie haben sich deshalb entschlossen, eine Befragung durchzuführen, welche einerseits der Gestaltung des redaktionellen Teils gilt, anderseits über die Werbewirkung des Anzeigenteils Aufschluss zu geben geeignet ist.

Zahlreiche Firmen benützen seit langem das Bulletin des SEV als Werbeträger für ihre Inserate. Sie tun das im Vertrauen auf das Ansehen der offiziellen Zeitschrift des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke bei den Fachkreisen im In- und Ausland. Genauere Beurteilungsmöglichkeiten für die Stellung des Bulletins des SEV gegenüber anderen Fachschriften und über seinen Werbewert fehlen aber. So weiss man bisher wenig Bestimmtes über die Zirkulation der erschienenen Hefte, über die Struktur der Leserschaft nach Alter, Stellung im Beruf, Einkaufsverantwortung, über die Lesegewohnheiten bezüglich des Textinhaltes wie auch der Anzeigen und Beilagen.

Mit der Befragung, Leserschaftsuntersuchung genannt, haben wir das Marktforschungsinstitut Publitest AG, Zürich, betraut. Neben rein quantitativen Merkmalen des Leserkreises sollen vor allem Feststellungen über die Qualität der Streuung des Bulletins gemacht werden.

Nach mathematisch-statistischen Erkenntnissen ist nicht eine Befragung der gesamten Leserschaft erforderlich. Einige hundert schriftliche Befragungen, ergänzt durch etwa hundert persönliche Interviews genügen, sofern man für die Auswahl der zu befragenden Leser den Zufall frei walten lässt. Jeder Leser muss die gleiche Chance haben, befragt zu werden. So kann der Zufall Sie beehren, und für diesen Fall zählen wir gerne auf Ihr verständnisvolles Mitwirken mit Ihrem persönlichen Urteil zu den gestellten Fragen. Wir danken Ihnen zum voraus für Ihre positive Einstellung zu dieser Umfrage. Die Aussagen werden für die Auswertung der Interviews vom Namen und der Person des Befragten so getrennt werden, dass auf eine völlig anonyme Weiterverarbeitung der Antworten vertraut werden darf. Die Publitest AG wird auf die zeitlichen Möglichkeiten der in die Stichprobe geratenen Firmen und Einzelpersonen Rücksicht nehmen. Sie dankt auch ihrerseits für Ihre Mitarbeit.

Elementarteilchen

Von *H. J. Mang*, München

539.12

Auf die Frage: Was sind Elementarteilchen? wird so ziemlich jeder Physiker antworten: Die Grundbausteine der Materie. Genaueres Befragen wird keine weiteren Aussagen von solch allgemeinem Charakter zu Tage fördern; im Gegenteil man wird zu hören bekommen, dass auch die sog. Elementarteilchen vielleicht und in gewissem Sinn zusammengesetzt sind oder aufzufassen sind als verschiedene Erscheinungsformen einer Grundsubstanz. Im folgenden soll nun dargelegt werden, wie sich diese Vorstellungen entwikkelt haben, auf welchen Tatsachen sie beruhen und warum sich so wenig Endgültiges sagen lässt.

Dazu ist es nötig die Geschichte der Physik der letzten achtzig Jahre in ihren wesentlichen Zügen zu skizzieren. Am Beginn dieses Zeitabschnitts war die klassische Elektrodynamik durch *Maxwell* und *Hertz* zum Abschluss gebracht worden. Elementarteilchen waren die Atome. Dann im Jahre 1897 wurde das Elektron entdeckt, zunächst ein ganz manierliches Teilchen, das sich benahm wie ein geladener Massenpunkt. Schwierigkeiten kamen mit der Frage, welche Kräfte diese Ladung zusammenhalten; elektromagnetische bestimmt nicht. Gleichzeitig war — wie sich herausstellte — die Vorstellung vom «unteilbaren» Atom aufzugeben.

Die folgenden Jahre sahen die Entwicklung von Atommodellen, die schliesslich im Bohrschen Atommodell gipfelten. Danach besteht ein Atom aus einem positiv geladenen Kern und einer Wolke von Elektronen. Die Vorstellungen über den Atomkern waren zunächst noch vage. Erst 1932 nach der Entdeckung des Neutrons konnte *Heisenberg* eine konsistente Beschreibung des Atomkerns formulieren. Ein solcher Kern besteht danach aus ungeladenen Neutronen und positiv geladenen Protonen, die durch starke Kräfte kurzer Reichweite zusammengehalten werden.

Die Liste der Elementarteilchen sah zu Beginn der dreissiger Jahre folgendermassen aus: Neutron und Proton als Kernbausteine mit fast gleicher Masse; das Elektron und sein Anteilteilchen, das Positron, das 1928 von *Dirac* vorausgesagt und 1932 entdeckt wurde. Schliesslich kannte man ja schon lange das Photon. Der Gedanke, dass die elektro-

magnetische Strahlung Teilchencharakter haben könnte, war 1905 von *Einstein* im Zusammenhang mit seiner Deutung des photoelektrischen Effekts wiederbelebt worden. Inzwischen war als weitere experimentelle Stütze der Compton-Effekt, die mit der Streuung von elektromagnetischer Strahlung an Elektronen verbundene Frequenzverschiebung, bekannt und untersucht. Ausserdem hatte die Wellenmechanik *Schrödingers* gelehrt, dass auch materielle Teilchen oder genauer das, was man auf Grund des gesunden Menschenverstandes dafür zu halten geneigt war, sich wie Wellen benehmen konnten. Der Gedanke, die Quanten eines Feldes als Elementarteilchen anzusehen, war von weitreichender Konsequenz.

Yukawa stellte 1935 die Frage nach den Quanten des Kraftfeldes, das die Wechselwirkung zwischen den Nukleonen (Neutron, Proton) vermittelt. Aus der Reichweite der Kräfte konnte er auf die Masse des Quants schliessen und vorhersagen, dass das fragliche Teilchen etwa 200mal so schwer wie das Elektron sein müsse. In der Tat wurde bald (1936) ein solches Partikel entdeckt, das sogenannte μ-Meson heute auch Myon genannt. Jedoch stellte sich im Laufe der Jahre heraus, dass dieses Teilchen, obwohl die Masse die richtige Grösse hatte, nicht das gesuchte «Yukawa-teilchen» sein konnte. 1947 wurde dann endlich das π-Meson entdeckt und von da an nahm die Zahl der Elementarteilchen rapide zu und ein Ende ist kaum abzusehen.

Der Grund für diese rasche Entwicklung liegt im Bau immer leistungsfähigerer Beschleuniger und den stark verbesserten Nachweismethoden (Blasenkammer, Funkenkammer). Auf experimentelle Details soll hier nicht eingegangen werden. Nur soviel sei gesagt, dass geladene Teilchen in elektrischen Feldern in Höchstvakuen beschleunigt werden. Der Nachweis erfolgt für geladene Partikel wieder direkt durch die Spuren, welche diese Teilchen vermöge der Ionisation in Materie hinterlassen. Bei ungeladenen Teilchen ist man auf indirekte Methoden angewiesen. Die Resultate dieser Messung sind in Tabelle I zusammengestellt.

In dieser Situation sieht sich der Physiker vor zwei Probleme gestellt: Das erste ist, ein Schema zu finden, um das Erfahrungsmaterial zu ordnen und die Übersicht zu behalten. Das zweite Problem ist, zu erklären warum es gerade *die* Elementarteilchen gibt mit den Eigenschaften, die sie haben, und keine anderen.

1. Erhaltungssätze und Invarianzen

War in der klassischen Physik das Aufsuchen von Bewegungsgleichungen das zentrale Problem, so ist in den modernen Entwicklungen die Suche nach erhaltenen also zeitlich unveränderlichen Grössen in den Vordergrund getreten.

Der erste Grund liegt in ihrer Einfachheit und Allgemeingültigkeit. Der Energiesatz lässt sich wirklich in einem Satz aussprechen: Bei allen physikalischen Vorgängen bleibt die Energie erhalten. Der Einwand, dass der Satz nicht tiefsinnig sei, weil die Energie gerade so eingeführt wurde, dass ein Erhaltungssatz gilt, ist nicht stichhaltig. Es ist auf jeden Fall eine beachtliche Leistung, eine Grösse zu finden die erhalten bleibt.

Der zweite Grund ist der enge Zusammenhang zwischen Erhaltungssätzen und Invarianzprinzipien. Davon wird gleich die Rede sein. Zum dritten sind Erhaltungssätze

Tabelle I

Sammelname		Name	Symbol	Antiteilchen	Masse M MeV	Spin J ħ	Ladung Q e	Isospin I	Dritte Komponente I_z	Strangeness S	Baryonenzahl B	Parität P	Mittlere Lebensdauer s	Typische Zerfallsweise
Photon		Photon	γ	γ	0	1	0	0	0	0	0	—1	Stabil	—
Leptonen		e-Neutrino	ν_e	$\bar{\nu}e$	0	½	0				0			—
		μ-Neutrino	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	½	0				0			—
		Elektron	e^-	e^+	0,511	½	—1				0	+1	Stabil	—
		Myon (μ-Meson)	μ^-	μ^+	105,7	½	—1				0	+1	$2{,}2\times\cdot 10^{-6}$	$\mu^- \to e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
Mesonen		Pion	π^+	π^-	139,6	0	+1	1	+1	0	0	—1	$2{,}55\cdot 10^{-8}$	$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$
		(π-Meson)	π^-	π^+			—1		—1					$\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
			π^0	π^0	135,0		0		0				$1{,}8\cdot 10^{-16}$	$\pi^0 \to \gamma + \gamma$
		Kaon	K^+	K^-	493,8	0	+1	½	½	+1	0	—1	$1{,}2\cdot 10^{-8}$	$K^+ \to \pi^+ + \pi^0$
							0		—½				$K_1 : 0{,}92\cdot 10^{-10}$	$K^0 \to \pi^+ + \pi^- (K_1)$
		(K-Meson)	K^0	$\bar{K}^0$	498,0								$K_2 : 5{,}6\cdot 10^{-8}$	$K^0 \to \pi^+ + \pi^- + \pi^0 (K_2)$
		η-Meson	η	η	548,6	0	0	0	0	0	0	—1	$\Gamma < 4$ MeV	$\eta \to \gamma + \gamma$
Baryonen	Nukleonen (N)	Proton	P	$\bar{P}$	938,2	½	+1	½	½	0	1	1	Stabil	—
		Neutron	n	$\bar{n}$	939,5		0		—½				$1{,}01\cdot 10^{-3}$	$\eta \to p + e^- + \bar{\nu}_e$
	Hyperonen	Λ-Hyperon	Λ	$\bar{\Lambda}$	1115,4	½	0	0	0	—1	1	1	$2{,}6\cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 \to p + \pi^-$
		Σ-Hyperon	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	1189,4		+1		+1				$0{,}79\cdot 10^{-10}$	$\Sigma^+ \to \eta + \pi^+$
			Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	1192,3	½	0	1	0	—1	1	1	$< 10^{-14}$	$\Sigma^0 \to \Lambda^0 + \gamma$
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	1197,1		—1		—1				$1{,}58\cdot 10^{-10}$	$\Sigma^+ \to \eta + \pi^-$
		Ξ-Hyperon	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	1314,3	½	0	½	+½	—2	1	?	$3{,}1\cdot 10^{-10}$	$\Xi^0 \to \Lambda + \pi^0$
			Ξ^-	$\bar{\Xi}$	1320,8		—1		—½				$1{,}7\cdot 10^{-10}$	$\Xi^- \to \Lambda + \pi^-$
		Ω-Hyperon	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	1675	³/₂?	—1	0	0	—3	1	?	$1{,}5\cdot 10^{-10}$	$\Omega^- \to \Xi^0 + \pi^-$

das wichtigste Hilfsmittel, um das Erfahrungsmaterial zu ordnen. Dies scheint soweit zu gehen, dass man sagen kann: Alles was ohne Verletzen eines Erhaltungssatzes geschehen kann, geschieht auch wirklich.

Die grundlegenden «klassischen» Erhaltungssätze für Energie, Impuls und Drehimpuls folgen aus den Symmetrien von Zeit und Raum. Der Energiesatz lässt sich herleiten aus der Homogenität der Zeit, der Impulssatz aus der Homogenität des Raumes und der Drehimpulssatz schliesslich aus der Isotropie des Raumes. Die Argumentation verläuft dabei immer so, dass man sagt: Wegen der Homogenität des Raumes z. B. darf die Beschreibung des Naturgeschehens nicht davon abhängen, welcher Raumpunkt als der Ursprung eines Koordinatensystems angesehen wird. Eine Ableitung der Erhaltungssätze auf diese Weise ist im Anhang gegeben.

Nicht alle Erhaltungssätze, die von Wichtigkeit sind, beruhen auf solch «handgreiflichen» Eigenschaften der Welt. Dies zeigt sich schon beim Erhaltungssatz für die elektrische Ladung. Das zugrunde liegende Invarianzprinzip, die Eichinvarianz der Maxwellschen Gleichungen, ist kaum etwas besonders Anschauliches.

Das bisher Gesagte gilt in gleicher Weise für die klassische und die Quantenphysik.

Die Quantenmechanik bringt zwei neue Gesichtspunkte ins Spiel. Zum ersten führen hier diskrete Symmetrien auch zu Erhaltungssätzen im Gegensatz zur klassischen Mechanik. Zum zweiten spielt die Frage der simultanen Messbarkeit zweier Grössen eine Rolle.

Als Beispiel soll die Raumspiegelung erläutert werden. Die bei Invarianz unter Raumspiegelungen erhaltene Grösse heisst Parität. Man betrachte die Wellengleichung für ein skalares Feld. Dieser Fall ist interessant für die Quantenmechanik (Wellenmechanik); der Fall der Elektrodynamik (Vektorfeld) macht nur mehr Schreibarbeit.

$$(\Delta + k^2)\,\Phi = 0$$

Dabei gilt:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Es ist offensichtlich, dass die Gleichungen beim Übergang zu einem Koordinatensystem mit gespiegelten Achsen unverändert richtig bleiben.

Wenn also $\Phi\,(x)$ eine Lösung ist, so ist $\Phi\,(-x)$ ebenfalls eine Lösung. Weil sich Funktionen immer in einen symmetrischen und einen antisymmetrischen Anteil zerlegen lassen, hat man zwei Gruppen von Lösungen:

1. $\Phi\,(-x) = \Phi\,(x)$ positive Parität
2. $\Phi\,(-x) = -\Phi\,(x)$ negative Parität

Die Eigenschaft, zu einer der Gruppen zu gehören (Parität), bleibt selbstverständlich in dem angegebenen Beispiel erhalten.

Allgemein gilt: wenn Raumspiegelungsinvarianz vorliegt, ist die Parität eine Erhaltungsgrösse.

Man stellt nun mit Recht die Frage, welche Grössen sind simultan mit der Parität messbar. Es ist ja wohlbekannt, dass in der Quantenphysik Ort und Impuls nicht gleichzeitig messbar sind. Überlegt man sich, wie sich die Orts- und Impulsvektoren bei Raumspiegelungen verhalten (sie kehren ihr Vorzeichen um), so findet man, dass weder Parität und Ort noch Parität und Impuls gleichzeitig messbar sind, wohl aber Drehimpuls (axialer Vektor) und Parität. So kommt es, dass ganz allgemein jede Invarianz zu einem Erhaltungssatz führt, aber nicht alle erhaltenen Grössen sind simultan messbar. Bei einer Klassifikation quantenmechanischer Objekte wird man also von allen erhaltenen und simultan messbaren Grössen auszugehen haben.

2. Wechselwirkungen

Elementarteilchen existieren durch ihre Wechselwirkung mit anderen Elementarteilchen. Ein Elementarteilchen ohne jegliche Wechselwirkung wäre so gut wie nichtexistent, insbesondere könnte man es nicht nachweisen.

Das direkte Mass für die Stärke der Wechselwirkung ist die Wechselwirkungsenergie oder das Wechselwirkungspotential. Ein Beispiel ist das Coulombpotential zwischen zwei Ladungen. Es sei jedoch bemerkt, dass nicht jede Wechselwirkung durch ein Potential beschrieben werden kann. Die Stärke einer bestimmten Wechselwirkung ist sehr aufschlussreich, wie noch ausführlich diskutiert werden wird.

Zunächst muss jedoch gesagt werden, wie sich mit Hilfe von Elementarteilchenreaktion die Eigenschaften dieser Teilchen bestimmen lassen. Wichtigste dieser Eigenschaften ist die Masse. Sie wird bestimmt aus Energie- und Impulssatz wie die spezielle Relativitätstheorie sie liefert. Insbesondere hat man für ein Teilchen:

$$m\,c^2 = \sqrt{E^2 - c^2\vec{p}^2}$$

Die Ladung eines Teilchens folgt direkt aus der Ladungsbilanz bei einer Reaktion. Ausgangspunkt ist die Ladung des Elektrons und des Protons, die als bekannt angesehen werden.

Zur Messung des Eigendrehimpulses oder Spins wird der Drehimpulssatz ausgenutzt sowie die aus der Quantenmechanik folgende Tatsache, dass Drehimpulse nur ganzzahlige Vielfache der Grösse

$$\frac{\hbar}{2} = \tfrac{1}{2} \cdot 1{,}05 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{erg\,s}$$

sein können.

Die Wirkungsweise der Erhaltungssätze bei solchen Messungen sei an einem Beispiel erläutert. Man betrachte den Zusammenstoss zweier Protonen bei hinlänglich hoher Energie, so dass π-Mesonen erzeugt werden können.

$$\mathrm{p} + \mathrm{p} \longrightarrow \begin{array}{ll} \mathrm{p} + \mathrm{p} + \pi^0 & \text{(I)} \\ \mathrm{p} + \mathrm{n} + \pi^+ & \text{(II)} \end{array}$$

Energie, Impuls und Ladung des Systems sind durch die Anfangsbedingungen festgelegt. Eine Analyse des Endzustandes zeigt zunächst, dass zur Erfüllung des Energie- und Impulssatzes ein weiteres Teilchen nötig war, dessen Masse aus den gemessenen Energien und Impulsen der zwei Protonen (bzw. des Protons und Neutrons) zu berechnen ist. Die Ladung des erzeugten Teilchens muss null im Fall I und gleich der Ladung des Protons im Fall II sein. Es soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass über die Bestimmung von Masse und Ladung in solchen Experimenten die Erhaltungssätze selbst nachgeprüft werden.

Neben diesen Eigenschaften der Elementarteilchen ist eine weitere der Messung zugängliche Grösse die Häufigkeit der Reaktion; das Mass ist der Wirkungsquerschnitt.

Die Definition ist wie folgt:

$$\sigma = \frac{\text{Zahl der Reaktionen pro s}}{\text{Zahl der einfallenden Teilchen pro s und pro cm}^2}$$

oder wenn man mit Strahlungsleistung rechnet:

$$\sigma = \frac{\text{Ausgestrahlte Leistung (gestreut)}}{\text{Eingestrahlte Leistung pro cm}^2}$$

Es ist direkt einzusehen, dass eine Reaktion um so häufiger sein wird, je stärker die Wechselwirkung ist. Aus dieser Erkenntnis heraus lassen sich die vorkommenden Kräfte in vier Gruppen einteilen:

1. Die starke Wechselwirkung; (Ein Beispiel ist die π-Nukleon-Wechselwirkung)
2. Die elektromagnetische Wechselwirkung;
3. Die schwache Wechselwirkung (Zerfall von Teilchen);
4. Die Gravitation.

Jede Wechselwirkung lässt sich charakterisieren durch eine sog. Kopplungskonstante, eine dimensionslose Zahl, die die Stärke dieser Wechselwirkung misst. Diese Zahlen sind 1, 1/137, 10^{-15}, 10^{-40}.

Am anschaulichsten werden die Verhältnisse, wenn man sie sich anhand eines Zerfalls klarmacht. Das π-Meson zerfällt mit einer mittleren Lebensdauer von 10^{-6} s und verantwortlich ist die schwache Wechselwirkung. Falls es durch elektromagnetische Wechselwirkung zerfiele, wäre die Lebensdauer nur 10^{-18} und für starke Wechselwirkung sogar nur 10^{-20}. Die Gravitationswechselwirkung hingegen würde eine Lebensdauer von 10^{19} s ergeben, das π-Meson wäre praktisch stabil.

3. Klassifikation von Elementarteilchen

Eine Klassifikation der Elementarteilchen wird auszugehen haben von den Reaktionen der Teilchen (Zerfälle eingeschlossen) und den Wechselwirkungen, die diese Reaktionen ermöglichen. Dabei ist die Möglichkeit im Auge zu behalten, dass über die schon bekannten Erhaltungssätze hinaus noch weitere wirksam sind. In der Tat hat sich das Prinzip als sehr fruchtbar erwiesen, dass jede Reaktion, die nicht durch einen Erhaltungssatz verboten ist, auch wirklich vorkommt. Es wird sich ferner zeigen, dass in gewisser Weise die Klassifikation der Teilchen mit der Klassifikation der Wechselwirkung parallel geht.

Eine Analyse des Erfahrungsmaterials zeigt nun folgendes Bild: Es gibt zwei Gruppen von Teilchen, die in starker Wechselwirkung stehen, die Baryonen (p, n, Λ, Σ, Ξ, Ω) und die Mesonen (π, κ, η) (vgl. Tabelle I). Ferner gibt es die Leptonen (μ, e, ν), die mit Baryonen und Mesonen nur in schwacher Wechselwirkung stehen und schliesslich das γ-Quant, das wie schon erwähnt die elektromagnetische Wechselwirkung vermittelt. Dieser unterliegen selbstverständlich alle Teilchen, die eine Ladung oder ein magnetisches Moment haben. Bei genauerer Betrachtung der Reaktionen und Zerfälle fällt auf, dass z. B. die Reaktionen:

$$\pi^- + p \longrightarrow \begin{matrix} \Lambda + K^0 \\ \Sigma^- + K^+ \end{matrix}$$

über die starke Wechselwirkung ablaufen, während z. B. der Zerfall:

$$\Lambda \longrightarrow \pi^- + p$$

über die schwache Wechselwirkung erfolgt. Man fragt sich mit Recht warum das so ist.

Bevor diese Frage beantwortet werden kann, sind einige Eigenschaften der starken Wechselwirkung zwischen Nukleonen (Nukleon: Sammelname für Neutron und Proton) zu besprechen. Schon früh hat man erkannt, dass diese Wechselwirkung ladungsunabhängig ist, was bedeutet, dass die Kräfte zwischen zwei Neutronen die gleichen sind wie zwischen zwei Protonen, abgesehen natürlich von der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen den geladenen Protonen. *Wigner* hat die adäquate mathematische Formulierung dieses Sachverhalts angegeben. Er geht davon aus, dass Neutron und Proton Zustände eines Teilchens des Nukleons sind, und sieht zunächst von der elektromagnetischen Wechselwirkung völlig ab. Dann setzt er die zwei Zustände des Nukleons in Analogie zu den zwei Spineinstellungen eines Elektrons z. B. und führt den sog. Isospin ein. Dies ist ein Vektor in einem abstrakten Raum, dessen *quantisierte* Einstellmöglichkeiten die Ladungszustände eines Teilchens beschreiben. Gerechnet wird mit dem Isospin wie mit einem quantisierten Drehimpuls. Ganz wesentlich für die Elementarteilchenphysik sind folgende Eigenschaften des Isospins I:

Der Isospin kann die Werte I = 0, 1/2, 1, 3/2, 2 usw. annehmen. Zu jedem Wert I gibt es 2I+1 «Einstellmöglichkeiten» sprich Ladungszustände, die durch I_3 = —I bis +I gekennzeichnet sind.

Die Nützlichkeit und damit der Erfolg der Isospinhypothese beruht auf zwei experimentell gut gesicherten Fakten:

a) Bei Prozessen, die über die starke Wechselwirkung ablaufen, bleibt der Isospin erhalten.
b) Die Elementarteilchen lassen sich in Isospinmultipletts einordnen (vgl. Tabelle I).

Die wichtigsten Beispiele seien genannt. Die Nukleonen bilden ein Dublett, die π-Mesonen und die Σ-Hyperonen je ein Triplett, das Λ-Hyperon ein Singulett, die Ξ-Hyperonen wieder ein Dublett, ebenso die K-Mesonen.

Über die Massenunterschiede in einem Multiplett wird noch zu reden sein.

Auf Grund des «Erhaltungssatzes für den Isospin» kann man nun leicht einsehen, dass eine ganze Reihe von Zerfällen nicht über die starke Wechselwirkung erfolgen können.

Z. B.: $\Lambda \longrightarrow p + \pi^-$

Das Λ hat Isospin null und aus den Isospins ½ des Protons und 1 des π-Mesons lässt sich nun einmal nicht null machen.

Dagegen sind die Erzeugungsreaktionen:

$$p + \pi^- \longrightarrow \begin{matrix} \Lambda + K^0 \\ \Sigma^0 + K^0 \\ \Sigma^- + K^+ \end{matrix}$$

mit der Erhaltung des Isospins verträglich. Der Isospin ist jedoch nicht die vollständige Lösung. Es gibt nämlich Zerfälle und Reaktionen, die verboten sind, obwohl der Isospin stimmt.

Z. B.:

$$\left.\begin{matrix} \Xi^0 \longrightarrow \begin{matrix} n + \pi^0 \\ p + \pi^- \end{matrix} \\ p + \pi^- \longrightarrow \Sigma^+ + K^- \end{matrix}\right\} \text{nicht beobachtet}$$

Wenn man daran festhalten will, dass nur auf Grund von Erhaltungssätzen Reaktionen verboten sein können, muss

man eine neue Erhaltungsgrösse einführen. Genau dies haben *Gell-Mann* und *Nishijima* 1953 getan. Sie postulieren eine neue Erhaltungsgrösse bei starken Wechselwirkungen, die sog. «Strangeness» S. Sie soll additiv sein wie z. B. die Ladung und nur ganzzahlige Werte annehmen können. Die Zuordnung ist wie folgt:

π — Mesonen	$S = 0$
$K^+ \overline{K}_0$ — Mesonen	$S = +1$
$K^- K_0$ — Mesonen	$S = -1$
Nukleonen	$S = 0$
Λ, Σ — Hyperonen	$S = -1$
Ξ — Hyperon	$S = -2$

Nun sind die beanstandeten Reaktionen verboten, weil sich S um zwei Einheiten ändern müsste. Darüber hinaus hat die Einführung der Grösse S und ihre Erhaltung bei starken Wechselwirkungen weitere experimentell nachprüfbare Konsequenzen, und es steht ausser Zweifel, dass sie richtig eingeführt wurde, d. h. mit geringen Annahmen können viele experimentelle Tatsachen beschrieben werden.

An dieser Stelle ist es nützlich, einmal alle Erhaltungssätze für starke Wechselwirkungen zusammenzustellen.

a) Energie und Impuls;
b) Drehimpuls;
c) Ladung;
d) Parität;
e) Baryonenzahl;
f) Isospin;
g) Strangeness.

Wegen der mit den Erhaltungssätzen a) bis d) verknüpften Invarianzen sei auf den Abschnitt über Erhaltungssätze und Invarianzien verwiesen. Bei e), f) und g) lassen sich zwar Invarianzprinzipien konstruieren — Drehinvarianz der Wechselwirkung im Isospinraum bei f) z. B. — jedoch fehlt die handgreiflich anschauliche Bedeutung.

Von der Baryonenzahl (B) war bislang noch nicht die Rede. Sie wird eingeführt, um die Stabilität des Protons zu garantieren. Denn der Zerfall über die schwache Wechselwirkung

$$p \longrightarrow \pi^0 + e^+$$

ist durch nichts sonst verboten. Aus dem Gesagten geht hervor, dass B eine absolute Erhaltungsgrösse sein muss im Gegensatz zu Isospin und Strangeness, die in den Reaktionen, die über die schwache Wechselwirkung ablaufen nicht erhalten sein müssen. Es sei betont, dass die Erhaltung der Baryonenzahl noch viele weitere Konsequenzen hat, d. h. es sind noch viel mehr Prozesse verboten als der eine, der die Einführung verlangte. Schliesslich sei bemerkt, dass, wie ein Blick auf Tabelle I zeigt, alle in starker Wechselwirkung stehenden Elementarteilchen eindeutig durch die Angabe von Spin, Ladung, Isospin, Strangeness und Baryonenzahl gekennzeichnet werden können. Es sei auch noch auf eine Beziehung zwischen Ladung und der dritten Komponente des Isospins hingewiesen. (Q in Einheit der Elementarladung e)

$$Q = I_3 + \frac{B + S}{2}$$

Von den nicht an starken Wechselwirkungen beteiligten Elementarteilchen erledigt sich das Photon am schnellsten. Es unterliegt nur der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Beziehungen zwischen Quantenzahlen von Teilchen A und Antiteilchen $\overline{A}$

Tabelle II

Masse:	$M_{\overline{A}} = M_A$	Isospin:	$I_{\overline{A}} = I_A$
Ladung:	$Q_{\overline{A}} = -Q_A$	Dritte Komponente des Isopins:	$I_{3\overline{A}} = -I_{3A}$
Spin:	$J_{\overline{A}} = J_A$	Parität: $P_{\overline{A}} =$	P_A für Bosonen (J ganzzahl.) $-P_A$ für Fermionen (J halbzahl.)
Baryonenzahl:	$B_{\overline{A}} = -B_A$		
Strangeness:	$S_{\overline{A}} = -S_A$	Lebensdauer:	$\tau_{\overline{A}} = \tau_A$

Von dieser Wechselwirkung ist noch zu sagen, dass sie den Isospin nicht erhält, weil sie ihrer Natur nach ladungsabhängig ist. Alle anderen Erhaltungssätze sind wie bei der starken Wechselwirkung.

Die sog. Leptonen (leichte Teilchen), Elektronen, Myonen und Neutrinos unterliegen der schwachen und natürlich die geladenen davon der elektromagnetischen Wechselwirkung. Die schwache Wechselwirkung ist wesentlich weniger «symmetrisch» (weniger Invarianzen) als die starke, und eine Reihe von Erhaltungssätzen, die für die starke Wechselwirkung gelten, werden durch die schwache Wechselwirkung verletzt. Isospin, Strangeness und Parität bleiben nicht mehr erhalten. Ausserdem bestehen einige Invarianzen, die für die starke und elektromagnetische Wechselwirkung gelten, nicht mehr; nämlich die Invarianz unter Bewegungsumkehr (Zeitspiegelung) und Ladungskonjugation (Übergang von Teilchen zu Antiteilchen). Über Antiteilchen braucht hier nur soviel gesagt zu werden, dass sie existieren und der Zusammenhang zwischen den Grössen, die ein Antiteilchen beschreiben und denen eines Teilchens in Tabelle II zusammengestellt sind.

Es mag nützlich sein, an dieser Stelle die Frage der Invarianz des Naturgeschehens nochmals von einem etwas anderen Standpunkt zu betrachten. Invarianz unter einer Transformation heisst ganz allgemein, dass der transformierte Zustand eine Lösung derselben Bewegungsgleichung ist wie der ursprüngliche Zustand. Diesen Sachverhalt macht man sich am besten an einem Beispiel klar; hier der Spiegelung. Das betrachtete System sei ein Elektron zwischen zwei Kondensatorplatten (Fig. 1):

Es ist evident, dass beide Situationen Lösung der Bewegungsgleichung für ein Elektron in einem elektrischen Feld sind. Ausgeschrieben ist die Transformation:

$\vec{x} \longrightarrow -\vec{x}$	Ortsvektor
$t \longrightarrow t$	Zeit
$\vec{v} \longrightarrow -\vec{v}$	Geschwindigkeitsvektor

Ein analoges Bild lässt sich für die Bewegungsumkehr zeichnen

$$\vec{x} \longrightarrow \vec{x}$$
$$t \longrightarrow -t$$
$$\vec{v} \longrightarrow -\vec{v}$$

und ebenso für die Ladungskonjugation, wobei zu beachten ist, dass alle Ladungen auch die der Kondensatorplatten ihr Vorzeichen wechseln. Das physikalische System besteht aus dem Kondensator plus Elektron.

Jetzt ist zu bemerken, dass wir die Parität zur Klassifikation von Zuständen oder Teilchen benutzen, weil sie simultan mit dem Spin (Drehimpuls) messbar ist. Der Spin muss

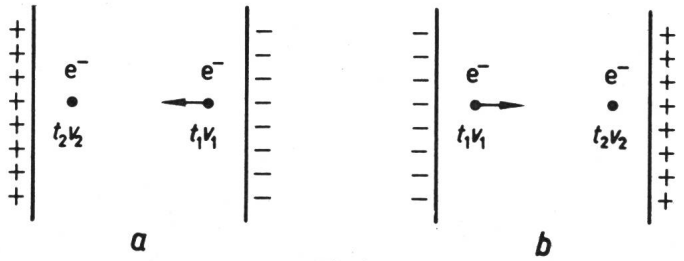

Fig. 1
Ein Elektron zwischen zwei Kondensatorplatten
a ursprünglich; *b* gespiegelt
t und *v* seien Zeit und Geschwindigkeit am Orte 1 bzw. 2

benutzt werden, weil er nun eben in der Natur bei Teilchen fest vorgegeben ist. Bei Bewegungsumkehr dagegen ändert u. a. der Drehimpuls sein Vorzeichen und man kann keine der Parität analoge Grösse mit dem Spin zusammen einführen. Was die Ladungskonjugation angeht, so macht die Ladung, für die ein absoluter Erhaltungssatz gilt, die Schwierigkeit, dass sie ihr Vorzeichen bei Ladungskonjugation ändert.

Die physikalischen Konsequenzen in der Elementarteilchenphysik von Invarianz unter Bewegungsumkehr sind also nicht so einfach zu formulieren wie die Paritätserhaltung, sie sind etwas subtilerer Natur. Anderseits scheint es a priori sicher zu sein (gesunder Menschenverstand), dass die Natur diese Invarianzen besitzt. Es war also die Einsicht ein ganz bedeutender Fortschritt, dass die schwache Wechselwirkung diese Invarianzen nicht zeigt.

Das bisher Gesagte lässt sich also wie folgt zusammenfassen.

Die Elementarteilchen lassen sich auf Grund ihrer Wechselwirkungen in Gruppen zusammenfassen (Baryonen, Mesonen, Leptonen, Photon). Die Wechselwirkungen sind umso «symmetrischer» (mehr Invarianzen) je stärker sie sind.

4. Resonanzen oder instabile Elementarteilchen

In den letzten Jahren ist eine grosse Zahl von «Elementarteilchen» entdeckt worden, die durch starke Wechselwirkung zerfallen können. Die Lebensdauern sind daher von der Grössenordnung von 10^{-23} bis 10^{-22} s. Solche Lebensdauern äussern sich in einer Unschärfe der Ruheenergie gemäss:

$$\Delta E \cdot \Delta t = \hbar$$

$$\Delta m c^2 = \frac{\hbar}{\Delta t}$$

Diese wird zur Messung der Lebensdauer benutzt.

Es ist klar, dass wegen der kurzen Flugstrecke — 10^{-13} bis 10^{-12} cm bei Lichtgeschwindigkeit — nur indirekte Nachweismethoden möglich sind, im Gegensatz zu dem direkten Nachweis in einer Blasenkammer oder photographischen Platte bei den quasistabilen Teilchen.

Die Nachweismethode beruht auf dem Energie- und Impulssatz und sei hier an einem Beispiel erläutert. Es gibt z. B. das sog. angeregte Nukleon N *. Es kann erzeugt werden beim Zusammenstoss von π-Mesonen und Nukleonen und zerfällt seinerseits sofort in ein Nukleon und ein π-Meson.

Also z. B.:

$$p + \pi^+ \longrightarrow N^* + \pi^0 \longrightarrow p + \pi^+ + \pi^0$$

Der relativistische Energie-Impulssatz besagt:

$$c^2 m_{N^*} = \sqrt{E_{N^*}^2 - c^2 p_{N^*}^2}$$

Ferner gilt, weil das N * in $p + \pi^+$ zerfällt:

$$E_{N^*} = E_P + E_{\pi^+}$$

$$\vec{P}_{N^*} = \vec{P}_P + \vec{P}_{\pi^+}$$

Aus den gemessenen Impulsen und Energien der Endprodukte kann man also zunächst die Existenz des «Zwischenzustandes» N* erschliessen und sodann die Masse M_{N^*} und die Breite der Massenverteilung aus der dann die Lebensdauer folgt. Die Existenz des N* zeigt sich auch in der einfachen Reaktion:

$$p + \pi^+ \longrightarrow p + \pi^+$$

Diese Reaktion zeigt eine Resonanz des Wirkungsquerschnitts bei der Ruheenergie des N*. Wenn die Energie gerade so gross ist, dass sich das N* bilden kann, ist die Streuung besonders gross, eine aus der Kernphysik wohlbekannte Tatsache.

Ob man diese kurzlebigen Teilchen nun als Teilchen oder Resonanzen bezeichnen soll, ist ein müssiger Streit.

Es sei noch erwähnt, dass die instabilen Teilchen eine grosse Rolle spielen in Theorien, die auf eine Verallgemeinerung des Isospinformalismus beruhen mittels der Theorie der unitären Gruppen von drei und sechs Dimensionen. Dabei werden Isospinmultipletts zu grossen unitären Multipletts zusammengefasst. Z. B. die acht Mesonen und die acht Baryonen (p, n, Λ, Σ^+, Σ^0, Σ^-, Ξ^0, Ξ^-) von Tabelle I. Das Ω^- hingegen gehört zu einer Gruppe von zehn Teilchen. Die neun übrigen sind instabil und das zweifach geladene N* ist eines davon.

5. Wie elementar sind Elementarteilchen

Die Frage erhebt sich nun, ob sich die Vielzahl der Teilchen, die als elementar bezeichnet werden, nicht doch noch auf etwas einfacheres zurückzuführen lassen, die wahre «Ursubstanz» sozusagen.

Es ist nicht möglich, hier detailliert auf die mathematisch sehr komplizierten Versuche einzugehen, solche Theorien zu konstruieren. Jedoch können die Forderungen angegeben werden, die an solche Theorien zu stellen sind. Sie müssen gestatten, die Massen und Quantenzahlen der Teilchen zu berechnen und ferner aufzeigen, welche Wechselwirkungen zwischen welchen Teilchen bestehen. In einer Theorie dieses Typs lassen sich also Teilchen und Wechselwirkungen nicht trennen. Eine Tatsache, die natürlich erscheint, wenn man bedenkt, dass Quanten von Kraftfeldern als Teilchen auftreten (z. B. Photon, π-Mesonen).

An dieser Stelle mag es nun gestattet sein, einige Bemerkungen über den Zusammenhang von Massen und Wechselwirkungen zu machen. Betrachtet man die acht Baryonen, so findet man, dass innerhalb der Isospinmultipletts die Massenunterschiede ($\delta\ mc^2$) von der Grössenordnung MeV sind. Die Abstände der einzelnen Multipletts hingegen sind von der Grössenordnung 100 MeV. Auch die Massendifferenz zwischen den Mesonen einerseits und den Baryonen anderseits beträgt einige 100 MeV. Man argumentiert also: Die starke Wechselwirkung erhält den Isospin, also erfahren alle Mitglieder eines Isospinmultipletts die gleiche starke Wechselwirkung (Wechselwirkungsenergie!), müssten also die gleiche Masse haben, wenn es nicht die elektromagnetische Wechselwirkung gäbe, die also diese Massendifferenzen von einigen MeV erzeugt. Die starke Wechselwirkung

ihrerseits verursacht Massendifferenzen von einigen hundert MeV, kann also ohne weiteres für die gesamten Massen der Baryonen und Mesonen verantwortlich gemacht werden. Sieht man sich nach diesen Überlegungen die Leptonen an, die keine starke Wechselwirkung haben, so wird man erwarten, dass die Massen allenfalls einige MeV betragen und das stimmt auch, wenn es das Myon nicht gäbe. Trotz aller Suche hat aber das Myon ausser seiner Masse keine Eigenschaft gezeigt, die vom Elektron abweicht. Es scheint, als ob mindestens ein ganz wesentlicher Punkt noch unverstanden wäre, abgesehen von vielen anderen Fragen, die hier nicht berührt werden konnten.

Anhang

Als einfaches Beispiel soll die klassische Mechanik betrachtet werden. Am durchsichtigsten wird die Ableitung, wenn man vom Hamiltonschen Prinzip und der Lagrangefunktion ausgeht.

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(q_i \dot{q}_i t)\, dt$$

$$\delta S = 0; \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

Invarianz gegen Zeittranslation der Lagrangefunktion.

$t \to t + \Delta t$ infinitesimale Transformation

$$L(q_i \dot{q}_i t + \Delta t) = L(q_i \dot{q}_i, t) + \frac{\partial L}{\partial t} \Delta t = L(q_i \dot{q}_i, t)$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = 0$$

L hängt nicht explizit von der Zeit ab.

Es folgt:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt}\left[\sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i - L\right] =$$

$$= \sum_i \dot{q}_i \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i - \frac{\partial L}{\partial q_i} \dot{q}_i - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i = 0$$

Man beachte hier, dass es nicht nötig ist, die Funktion L wirklich zu kennen.

Literatur

Da Vollständigkeit bei der Flut von Publikationen nicht angestrebt werden kann, sind nur einige relativ leicht zu lesende Bücher und Arbeiten zitiert.

[1] *K. W. Ford:* Die Welt der Elementarteilchen. Heidelberger Taschenbücher Bd. 9. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer, 1966.

[2] *C. N. Yang:* Elementary Particles; a short History of some Discoveries in Atomic Physics. Princeton, University Press, 1961.

[3] *A. H. Rosenfeld* et al.: Data on Elementary Particles and Resonant States. Reviews of Modern Physics 36(1964)4, S. 977...1004.

[4] *A. Zichichi:* Symmetries in Elementary Particle Physics. New York/London, Academic Press, 1965.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. *H. J. Mang,* Physik-Departement der Technischen Hochschule München, Theoretisches Teilinstitut, Arcisstrasse 21, D - 8 München 2.

Über Wellenspannungen bei Asynchronmaschinen mit ungeteilten Blechen

Von *E. Andresen,* Berlin

1. Einleitung

Das Problem der Wellenspannungen und der Lagerströme gilt bei elektrischen Maschinen als hinreichend erforscht. Ursache, Wirkung, Berechnung und Abhilfe wurden in einem Zeitraum von 60 Jahren in etwa 40 Literaturstellen beschrieben [1][1]).

Für die Bildung von Lagerströmen gibt es bekanntlich zwei Ursachen:

a) Magnetisierung der Welle durch einen umschlingenden Gleich- oder Wechselstrom mit der Folge, dass sich in den Lagern eine Unipolarspannung ausbildet.

b) Induzierung einer «Wellenspannung» in der Welle durch ein umschlingendes Wechselfeld.

Die zweite Ursache ist bei allen Wechselstrommaschinen bekannt, die eine Unsymmetrie des Stator- oder Rotorrückens, z. B. in Form von Teilfugen, aufweisen.

Die vorliegende Arbeit beschreibt im Gegensatz hiezu das Auftreten von Wellenspannungen bei Asynchronmaschinen mit ungeteilten Blechen, also mit symmetrischem, ungestörtem Aufbau des Stator- und Rotorrückens. Bei solchen Maschinen können ebenfalls Unsymmetrien im magnetischen Kreis auftreten. Diese liegen jedoch vornehmlich in den Bereichen, in denen der Fluss radial gerichtet ist, also im Luftspalt und in den Stator- und Rotorzähnen. Exzentrische Lagerung der Rotorwelle, magnetische Vorzugsrichtung der Bleche, Anzahl der Rotornuten und der achsialen Kühlkanäle sind hier die Kriterien. Die magnetische Vorzugsrichtung und die achsialen Kühlkanäle können zusätzlich in den Bereichen wirksam werden, in denen der Fluss in Umfangsrichtung verläuft, nämlich in den Rückenpartien.

Die Maschinen sind besonders dann gefährdet, wenn niederfrequente Wellenspannungen infolge Exzentrizität der Rotorwelle oder magnetischer Textur der Bleche und mittelfrequente Spannungen als Folge bestimmter Rotornutzahlen gleichzeitig auftreten. Dann kommt es mit Sicherheit zu einer Zerstörung der Lager, da die mittelfrequente Spannung als Dauerzündung den isolierenden Schmierfilm durchschlägt und somit niederfrequente Wellenströme schädlicher Grösse zum Fliessen bringt.

2. Wie es zur Bildung von Wellenspannungen bei Unsymmetrie im radialen Feldbereich kommt

Unsymmetrien im radialen Feldbereich werden in der Literatur kaum behandelt. Bei verschiedenen Verfassern findet sich lediglich das Beispiel der zweipoligen Maschine mit exzentrischer Rotorachse, entsprechend einem zweipoligen magnetischen Widerstand im Bereich radialer Flussrichtung. Man weiss, dass in diesem Fall eine Wellenspannung induziert wird. Eindeutige Erklärungen liegen jedoch nicht vor. Vernachlässigt man den magnetischen Widerstand des Eisens, so könnte sich eine Flussverteilung entsprechend Fig. 1a einstellen, die jedoch keinen die Welle umschlingenden Anteil enthält.

Wird der magnetische Widerstand des Eisens einbezogen, so ergibt sich die bei verschiedenen Autoren gezeigte Fig. 1b. Hier umschlingt ein Teil des Flusses die Welle als Folge einer gleichmässigen Flussdichte im Rotorrücken. Unterstellt man ebenso richtig, dass im Statorrücken auch eine gleichmässige Flussdichte angestrebt wird, so ergibt sich die Flussverteilung

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.