

Zur Struktur der Materie

Von Markus Eiswirth und Robert J. Schwankner

„Three quarks for Muster Mark“
James Joyce (1882—1941), „Finnegans Wake“

1. Die Atomhypothese

Die Vorstellung, daß die Vielfalt der uns umgebenden materiellen Welt auf einige wenige Urbausteine zurückgeführt werden kann, wurde zuerst in der antiken griechischen Philosophie von *Demokrit* (460—371 v. Chr.) geäußert: „In Wirklichkeit gibt es nur Atome und den leeren Raum“ [1].

Der Gedanke wurde über 2000 Jahre später von dem englischen Chemiker *J. Dalton* (1766—1844) wieder aufgegriffen. Er konnte mit der Annahme, daß jedes chemische Element aus einer Atomsorte besteht, die Gesetze der Konstanten und der multiplen Proportionen in einfacher Weise erklären.

Der endgültige Durchbruch der Atomhypothese kam jedoch erst um die Jahrhundertwende mit der Entdeckung der Radioaktivität. Die Ironie der Geschichte wollte es, daß vor den angeblich unteilbaren Atomen zunächst deren Teile und Trümmer entdeckt wurden [2]. Somit begann fast gleichzeitig mit dem naturwissenschaftlichen Nachweis der Atome die Erforschung ihrer inneren Struktur.

Rutherford beschloß eine dünne Goldfolie mit α -Teilchen [3] (Abb. 1). Aus den erhaltenen Streuungen schloß er auf den Aufbau der Atome. Der winzige Atomkern ($\varnothing \sim 10^{-3}$ pm) ist positiv geladen und besitzt fast die gesamte Masse des Atoms. Er wird von negativ geladenen Elektronen, die zusammen die Atomhülle bilden, umgeben (Abb. 2).

2. Elementarteilchen

Zu Beginn der dreißiger Jahre war bekannt, daß Atomkerne aus positiv geladenen Protonen sowie elektrisch neutralen Neutronen bestehen. Zusätzlich kannte man das Lichtteilchen Photon, außerdem hatte *Pauli* zur Rettung des Energie- und Impulserhaltungssatzes beim β -Zerfall ein weiteres Teilchen, das Neutrino postuliert [4]. Dieses einfache Bild, nach dem sich die Vielfalt der materiellen Welt aus nur drei Bausteinen zusammensetzt, komplizierte sich in der Folgezeit zunehmend durch die Entdeckung zahlrei-

cher weiterer Elementarteilchen. Außerdem wurde Ende der 20er Jahre von *Dirac* zu jedem Teilchen ein Antiteilchen postuliert und später auch entdeckt. Das Antiteilchen des Elektrons etwa ist das Positron, das die gleiche Masse besitzt, aber positive Ladung. Treffen ein Elektron und ein Positron zusammen, so zerstrahlen sie (Annihilierung). Umgekehrt können Elektron/Positron-Paare aus harten γ -Strahlen erzeugt werden (Abb. 3).

Mit Hilfe von Teilchenbeschleunigern [5] und in der kosmischen Höhenstrahlung wurden in rascher Folge zahlreiche weitere Teilchen entdeckt. Von *E. Fermi* stammt der Ausspruch, es existieren so viele Teilchen, daß nur ein Botaniker sich noch die Namen merken könne [6]. Bis heute wurden über 300 Elementarteilchen gefunden. Diese Situation war vielen Theoretikern unbehaglich, so daß nach einfacheren Prinzipien unterhalb dieser Komplexität gesucht wurde [7]. Das wichtigste Kriterium zur Klassifikation der Teilchen sind die grundlegenden Wechselwirkungen von Materie.

Die Kräfte unterscheiden sich in ihrer Stärke und Reichweite. Die starke Wechselwirkung, welche für den Zusammenhalt der Protonen und Neutronen im Atomkern verantwortlich ist, überwiegt. Es folgen, in der Reihenfolge ihrer Stärke, die elektromagnetische und die schwache Kraft, sowie die Gravitationswechselwirkung (Tab. 1).

Zwar unterliegen alle Elementarteilchen der Gravitation und alle, mit Ausnahme des Photons, der schwachen Wechselwirkung, jedoch zeigen z. B. Elektronen und Neutrinos keine starke, letztere auch keine elektromagnetische Wechselwirkung. Dies bietet nun eine

Tab. 1. Die fundamentalen Wechselwirkungen

Wechselwirkung	relative Stärke	Reichweite
Gravitation	10^{-38}	unendlich
schwache	10^{-11}	10^{-13} cm
elektromagnetische	1	unendlich
starke	15	10^{-13} cm

Abb. 1. Aufbau des Streuversuchs nach *Rutherford*

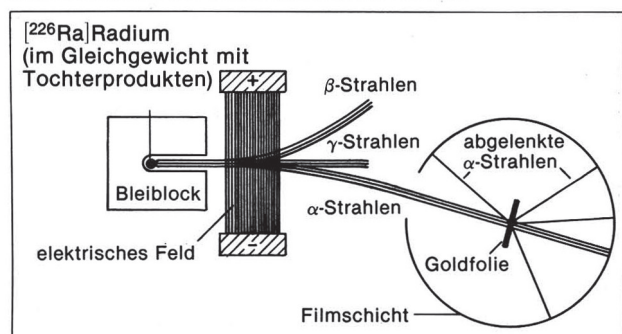


Abb. 2. Zur Deutung des *Rutherford*schen Streuversuchs

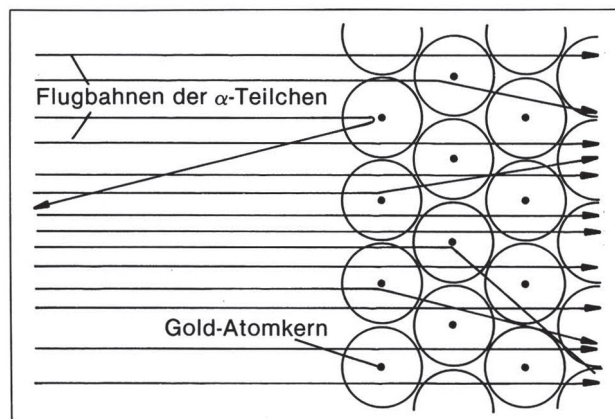


Abb. 3. Erzeugung von Elektron-Positron-Paaren aus hochenergetischen Photonen. Die beiden entgegengesetzt geladenen Teilchen bewegen sich unter dem Einfluß eines Magnetfeldes spiralförmig auseinander.
(Photo DESY, Hamburg)



einfache Möglichkeit, die Elementarteilchen in Gruppen zusammenzufassen (vgl. Tab. 2). Das Photon bildet eine Gruppe für sich. Die weiteren Teilchen, die nicht zur starken Wechselwirkung befähigt sind, wer-

Tab. 2. Elementarteilchen

			Masse in MeV	Spin [h]
Photon	γ		0	1
Leptonen	Elektron	e^-	0,511	1/2
	Myon	μ^-	105,66	1/2
	Tauon	τ^-	1782	1/2
	Elektronneutrino	ν_e	~ 0	1/2
	Myonneutrino	ν_μ	~ 0	1/2
	Tauonneutrino	ν_τ	~ 0	1/2
	Hadronen	π -Mesonen	π^0	134,98
		π^+	139,58	0
K-Mesonen		K^0	497,8	0
		K^+	493,8	0
η -Meson		η^0	548,8	0
Proton		p^+	938,2	1/2
Neutron		n	939,5	1/2
Lambda		Λ^0	1115,6	1/2
Sigma		Σ^+	1189,4	1/2
		Σ^0	1192,5	1/2
Omega		Ω^-	1672,5	1/2

den als Leptonen zusammengefaßt. Zu dieser Abteilung zählen das Elektron e^- und seine schwereren „Verwandten“, das Myon μ^- und das Tauon τ^- . Zu jedem dieser Teilchen existiert eine Sorte von Neutrinos ν , die als Elektron-, Myon- bzw. Tauonneutrino bezeichnet werden. Alle Leptonen haben halbzahligen Spin (sog. Fermionen). Teilchen, die starke Wechselwirkung aufweisen, werden als Hadronen bezeichnet. Diese Gruppe wird weiter zerteilt in Mesonen mit ganzzahligem Spin (Bosonen) und Baryonen mit halbzahligen Spin. Die Anzahl der bekannten Hadronen ist sehr groß, in der Tab. 2 sind nur einige Vertreter aufgeführt.

Zu jedem Teilchen (außer dem Photon, das sein eigenes Antiteilchen ist) existiert außerdem ein Antiteilchen.

3. Quarks

Die Vielfalt der Hadronen kann jedoch nach *Gell-Mann* und *Zweig* (1963) durch die Annahme weniger Teilchen mit gebrochener Ladung, sog. Quarks, erklärt werden [8]. Die Quarks tragen Ladungen von

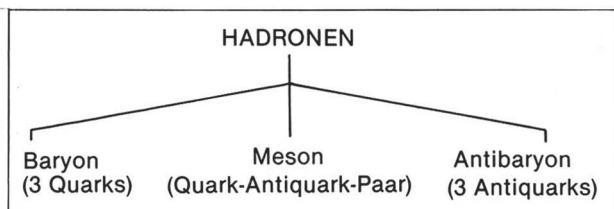


Abb. 4. Einteilung der Hadronen

Tab. 3. Quarks

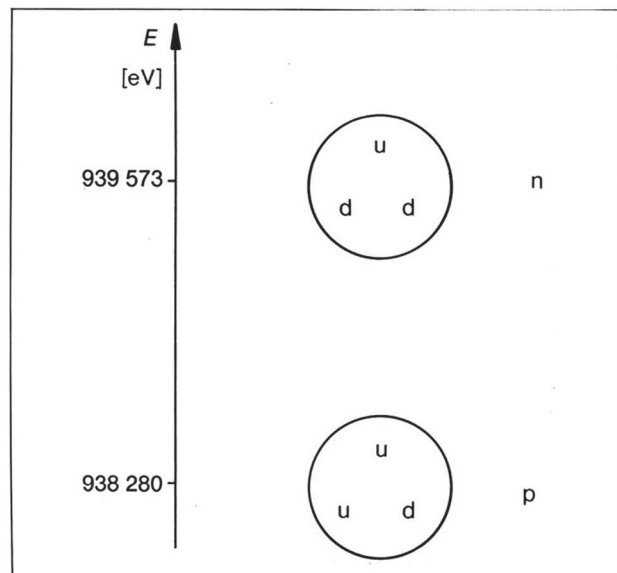
Name		elektrische Ladung
up	u	+2/3
down	d	-1/3
charm	c	+2/3
strange	s	-1/3
top (truth)	t	+2/3
bottom (beauty)	b	-1/3

+2/3 oder -1/3 (in Einheiten der Elementarladung) und Spins von 1/2. Antiquarks haben die entgegengesetzte Ladung. *Gell-Mann* postulierte ursprünglich drei Quarks (die „flavours“ up, down und strange). Mittlerweile werden sechs angenommen; die zusätzlichen tragen die Bezeichnungen charm, beauty und truth (bzw. bottom und top). Vgl. Tab. 3. Ein Baryon besteht nun aus 3 Quarks, ein Meson aus einem Quark und einem Antiquark:

$$\begin{aligned} \text{Baryon} &= q \ q \ q \\ \text{Meson} &= q \ \bar{q} \end{aligned}$$

Allein aus u-, d- und s-Quarks sind somit $3^3 = 27$ Kombinationen möglich. Außerdem sind Baryonen mit Spins bis zu 13/2 bekannt, die hohen Bahndrehimpulswerten der Quarkkonfiguration entsprechen. Es ist also leicht verständlich, wieso Hunderte von Baryonen entdeckt wurden. Beispielsweise entspricht das Proton der Quarkkombination (u u d), das Neutron (u d d)(Abb. 5). Das π -Meson π^+ besteht aus der Kombination (u \bar{d}). Somit enthält etwa das Proton zwei up-Quarks, in offensichtlicher Verletzung des *Pauli-Prinzips*, nach dem sich Fermionen in mindestens einer Quantenzahl

Abb. 5. Aufbau von Proton und Neutron (an der Ordinate ist die Massenenergie in MeV aufgetragen.)



unterscheiden müssen. Um diese Schwierigkeit zu beheben, wurde eine neue Quanteneigenschaft „Farbe“ eingeführt.

Quarks können in drei verschiedenen Farben vorkommen, nämlich rot, grün und blau, Antiquarks tragen entsprechend die Farbladungen antirot, antigrün und antiblau. Freie Farbladungen wurden nie beobachtet. Ein Baryon besteht aus Quarks der drei Grundfarben und ist somit als Ganzes „farblos“ oder „weiß“, ein Meson enthält ein Quark einer Farbe und ein Antiquark der betreffenden Antifarbe [9]. Beim Aufeinandertreffen von hochbeschleunigter Materie und Antimaterie können zwar Quark-Antiquark-Paare entstehen. Diese erzeugen jedoch beim Auseinanderfliegen immer neue Quarks und Antiquarks, die sich zu „weißen“ Partikeln vereinen. Die beiden Teilchenströme („jets“) fliegen in charakteristischer Weise auseinander und verraten so den „Versuch“ der Materie, sich in Quark und Antiquark zu zerlegen [2]. Ein solches Ereignis ($e^- + e^+ \rightarrow q + \bar{q}$) ist in Abb. 6 dargestellt. Analog zu *Rutherfords* Streuexperimenten wurden Protonen mit hochenergetischen Teilchen (bis ca. 100 GeV) beschossen. Die Ergebnisse ließen auf drei punktförmige Konstituenten des Protons schließen, eine überzeugende experimentelle Bestätigung des Quark-Modells.

Tab. 4 zeigt eine Zusammenstellung der nach heutiger Kenntnis fundamentalen Bausteine der Materie. Auffallend ist, daß sowohl Quarks als auch Leptonen paarweise auftreten. So bilden das u- und d-Quark sowie das Elektron und das Elektronenneutrino jeweils eine Familie.

Man beachte, daß nur diese ersten Familien zum Aufbau der uns umgebenden materiellen Welt erforderlich sind. Welche Rolle die weiteren spielen, ist bisher nicht geklärt.

4. Die fundamentalen Wechselwirkungen

Nach der *Heisenbergschen* Unschärferelation

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx h$$

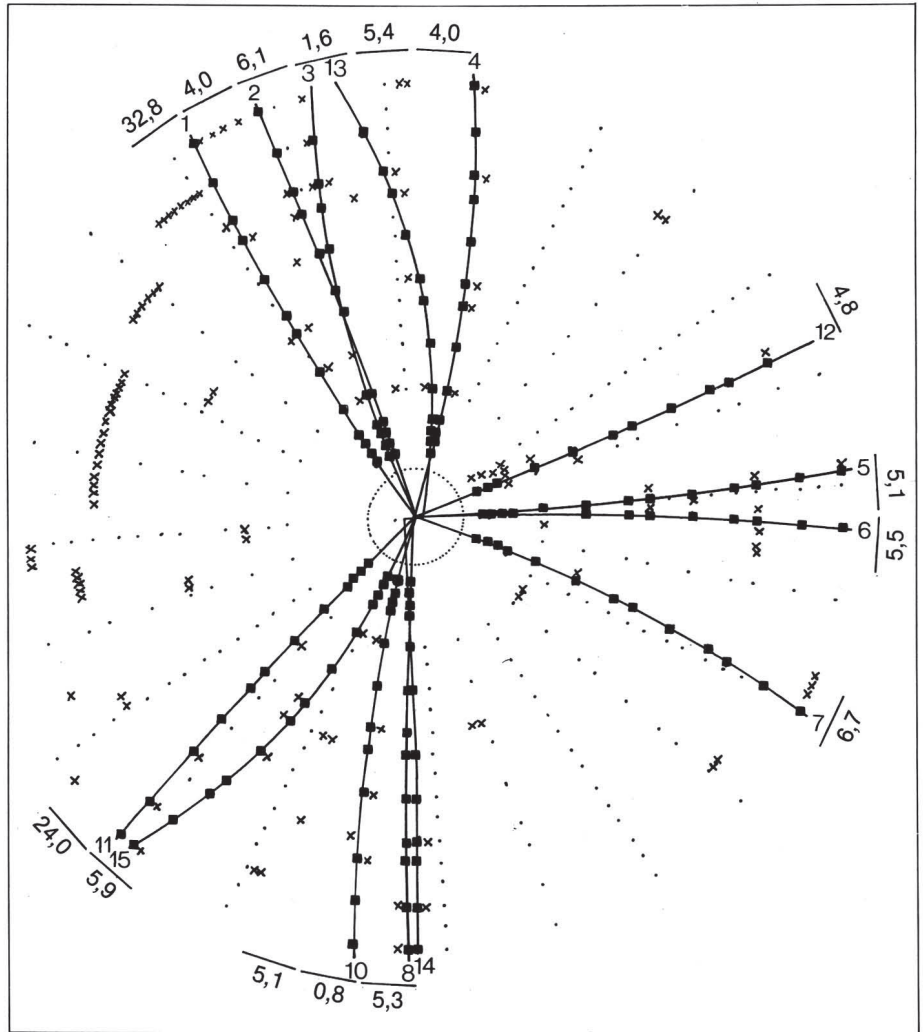
kann sich ein System für kurze Zeit Δt Energie „borgen“, solange der Energiebetrag so klein ist, daß er in der betreffenden Zeit nicht detektiert werden kann. Diese Energie äußert sich im kurzzeitigen Auftreten eines Teilchens, das als virtuell bezeichnet wird [10]. Kräfte zwischen zwei Teilchen werden nun durch Übertragung eines virtuellen dritten Teilchens (Feldquant) bewirkt. Hat dieses Teilchen die Ruhemasse m , so beträgt die notwendige Energie zu seiner Erzeugung nach *Einsteins* Äquivalenzformel mc^2 . Da es sich höchstens mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen kann, hat es die Reichweite

$$\Delta x = c \cdot \Delta t \approx \frac{h}{mc}$$

Tab. 4. Die fundamentalen Fermionen: Quarks und Leptonen

Elektrische Ladung	Quarks	Leptonen
+2/3	u c t	e^- ν_e
-1/3	d s b	μ^- ν_μ
-1		τ^- ν_τ
0		

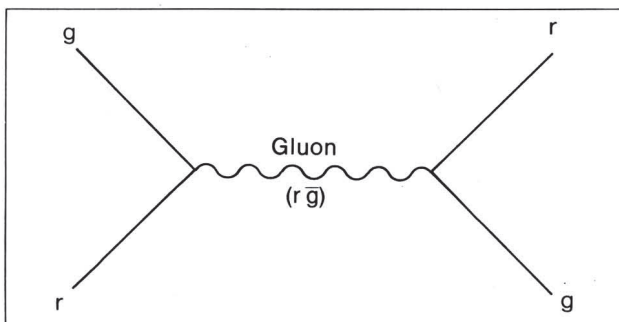
Abb. 9. Teilchen-Jets von Quark und Antiquark. Der dritte Jet rührt von einem abgestrahlten Gluon her. (DESY, Hamburg)



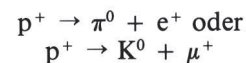
te dieser Wechselwirkung nur kurz. Als Überträger der starken Kraft gelten die Gluonen. Sie bilden einen Satz von 8 Teilchen, entsprechend 8 verschiedenen Farbe-Antifarben-Kombinationen. Obwohl man annimmt, daß Gluonen masselos sind, ist die Reichweite der Wechselwirkung begrenzt, da die Gluonen wegen des Nichtauftretens freier Farbladungen in den Hadronen gefangen sind. Gluonen können über Teilchenjets nachgewiesen werden (Abb. 9). Abb. 10 zeigt die starke Wechselwirkung zwischen zwei farbigen Quarks (rot und grün), das betreffende Gluon trägt die Farbladung rot und antigrün.

Die Kernkräfte kommen durch Austausch von virtuellen π -Mesonen zwischen den Nukleonen zustande (Abb. 9). Die Reichweite wird begrenzt durch die Masse der Mesonen (ca. 1/7 der Protonenmasse).

Abb. 10. Feynman-Diagramm zur starken Wechselwirkung (Farbkraft)

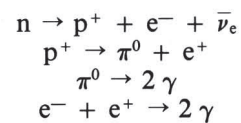


Die theoretischen Bestrebungen der modernen Physik gehen heute dahin, eine einheitliche Theorie aller Wechselwirkungen zu entwerfen, d. h. die Kräfte werden bei hohen Energien ununterscheidbar. *L. Glashow, A. Salam* und *S. Weinberg* erhielten 1979 den Nobelpreis für ihre Theorie der „elektroschwachen“ (vereinheitlichte schwache und elektromagnetische) Wechselwirkung [14–16]. Hinzunahme der starken Kraft in den „grand unified theories“ führt zu einer dramatischen Konsequenz: Das Proton ist nicht stabil, sondern zerfällt mit einer Halbwertszeit von mehr als 10^{31} Jahren nach



Nach diesem Protonenzerfall wird z. Z. intensiv gesucht [17].

Damit bietet sich theoretisch die Möglichkeit, Materie vollständig „aus der Welt verschwinden“ zu lassen:



5. Noch kleinere Teilchen?

Auf der Suche nach den Bausteinen der Materie sind die Physiker in immer kleinere Mikrowelten vorgezogen. Es ist durchaus möglich, daß nun die

Quarks und Leptonen nicht weiter zerlegt werden können. Andererseits wurden bereits Modelle vorgeschlagen, in denen diese Teilchen aus noch kleineren Einheiten, genannt Präonen oder Rischonen, zusammengesetzt sind [18]. Eine in sich widerspruchsfreie Theorie aufzustellen, ist bisher nicht gelungen. Auch wurden bis zu einer Größenordnung von 10^{-18} m experimentell keine Abweichungen vom punktförmigen Verhalten der Elektronen gefunden.

Schließlich sind ja schon Quarks so stark aneinander gebunden, daß bei dem Versuch, sie durch Energieeinstrahlung zu trennen, nur Quark-Antiquark-Paare erzeugt werden, eine Isolation also nicht möglich ist. Vielleicht behält *Werner Heisenberg* recht, der in seinen autobiographischen Aufzeichnungen die fundamentalen Eigenschaften der Materie nicht in deren kleinsten Bausteinen, sondern in den zugrunde liegenden Symmetrien sah:

„Das will ich sicher nicht ausschließen“, antwortete ich. „Aber ich möchte für den Augenblick das Einmalige dieser ersten Entscheidungen noch etwas unterstreichen. Diese Entscheidungen legen Symmetrien fest, einmal und für immer; sie setzen Formen, die das spätere Geschehen weitgehend bestimmen. ‚Am Anfang war die Symmetrie‘, das ist sicher richtiger als die demokritische These. ‚Am Anfang war das Teilchen‘. Die Elementarteilchen verkörpern die Symmetrien, sie sind ihre einfachste Darstellungen, aber sie sind erst eine Folge der Symmetrien. In der Entwicklung des Kosmos kommt später der Zufall ins Spiel. Aber auch der Zufall fügt sich den zu Anfang gesetzten Formen, er genügt den Häufigkeitsgesetzen der Quantentheorie. In der späteren, immer komplizierter werdenden Entwicklung kann sich dieses Spiel wiederholen. Es können wieder durch einmalige Entscheidungen Formen gesetzt werden, die das folgende Geschehen weitgehend bestimmen.“

Literatur

- [1] *W. Capelle*, Die Vorsokratiker. Kröner, Stuttgart 1968
- [2] *R. U. Sexl*, Was die Welt zusammenhält: Physik auf der Suche nach dem Bauplan der Natur. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1982
- [3] *E. Rutherford*, The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom. Philosophical Magazine **21**, 669–688 (1911)
- [4] *H. Fraas*, Neutrinos. Physik in unserer Zeit **11**, 136–144 (1980)
- [5] *E. Lohrmann*, Die Erforschung der Elementarteilchen mit Speicherringen. Physik in unserer Zeit **12**, 116–124 (1981)
- [6] *M. Whitman*, Updating the Atomic Theory in General Chemistry. J. Chem. Education **61** (11), 952–956 (1984)
- [7] *R. Peierls*, Particles and Forces. In: *J. H. Mulvey* (Hrsg.), The Nature of Matter. Clarendon Press, Oxford 1981
- [8] *D. H. Perkins*, Inside the Proton. In: *J. H. Mulvey* (Hrsg.), The Nature of matter. Clarendon Press, Oxford 1981
- [9] *Y. Nambu*, The Confinement of Quarks. Sci. Amer. **235**, 6 (1977)
- [10] *G. L. Wick*, Elementarteilchen. Physik Verlag GmbH, Weinheim 1974
- [11] *P. Joos*, Die Elementarteilchen. Physik in unserer Zeit **1**, 9–15 (1970)
- [12] *M. Böhm*, Zur Entdeckung des W-Bosons. Physik in unserer Zeit **14**, 92–95 (1983)
- [13] *M. Böhm*, Physik Nobelpreis 1984. Physik in unserer Zeit **15**, 191–192 (1984)
- [14] *W. Hollik*, Nobelpreis für Physik 1979. Physik in unserer Zeit **11**, 3 (1980)
- [15] *S. L. Glashow, A. Salam und S. Weinberg*, Nobel Lectures in Physics 1979. Reviews of Modern Physics **52**, 515 (1980)
- [16] *M. Böhm und W. Hollik*, Eichtheorien der starken, elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkungen. Physik in unserer Zeit **10**, 18–26 (1979)
- [17] *H. Fritzsch*, Die Große Vereinheitlichung. Bild der Wissenschaft **6**, 78 (1983)
- [18] *H. Harari*, Wie elementar sind Quarks und Leptonen? Spektrum der Wissenschaft **54**, Juni 1983
- [19] *W. Heisenberg*, Der Teil und das Ganze — Gespräche im Umkreis der Atomphysik. München 1979

Anschriften der Verfasser:

Dipl. Chem. *Markus Eiswirth* und
Dipl. Chem. *Robert J. Schwankner*, Institut für Physikalische Chemie der Universität München, Sophienstraße 11, 8000 München 2