

Halbempirische Massenformel (HEMF)

Quantitative Darstellung der Elementarteilchen-Massen

(B 01/1998)

von

V. Balogh und D. Straub

Universität der Bundeswehr München

Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik

Institut für Thermodynamik

1998

Inhalt

I. Mathematische Darstellung der Elementar-Teilchen-Massen, Halbempirische

| | |
|---|--------------|
| Massen-Formel | 3 |
| 1. <i>Halbempirische Massenformel.....</i> | <i>3</i> |
| 2. <i>Berechnete und empirische Massenwerte.....</i> | <i>4</i> |
| <i>Leptonen und Vektorbosonen.....</i> | <i>5</i> |
| <i>Pseudoskalare Mesonen.....</i> | <i>6</i> |
| <i>Vektormesonen.....</i> | <i>7</i> |
| <i>Baryonen.....</i> | <i>8</i> |
| <i>Baryonen.....</i> | <i>9</i> |
| 3. <i>Erste Analyse, mögliche Symmetrie, Vorhersage der Teilchenmassen.....</i> | <i>10</i> |
| 4. <i>Kritische Auswertung und Ausblick</i> | <i>12 13</i> |
| 5. <i>Literatur.....</i> | <i>13 15</i> |

II. Anhang.....16

| | |
|---|-----------|
| 1. <i>Klassifikation der Teilchen und Kräfte.....</i> | <i>16</i> |
| 2. <i>Massen in der Teilchenphysik.....</i> | <i>24</i> |
| 2.1 <i>“Klassische Spekulationen”.....</i> | <i>24</i> |
| 2.2 <i>Theorie von Heisenberg.....</i> | <i>29</i> |
| 2.3 <i>Flavor-Symmetrien und Quarkmassen.....</i> | <i>31</i> |
| 2.4 <i>Mesonen-Massen im Standardmodell</i> | <i>35</i> |
| 2.5 <i>Baryonenmassen im Standardmodell.....</i> | <i>37</i> |
| 2.6 <i>Vorhersage der W- und Z-Massen.....</i> | <i>38</i> |
| 2.7 <i>Ursprung der Masse: der Higgs-Mechanismus.....</i> | <i>38</i> |

**Do quantum mechanics, the theories of relativity and the big-bang, as well as
the standard model mold the four commandments of dogmatism in modern physics ?**

Or, are they formalized maps of a weltanschauung

which inextricably mingles reality and myth ?

Or, are they but mere rules of a gigantic glass bead game ?

- T. S. W. Salomon -

Mathematische Darstellung der Elementar-Teilchen-Massen

Halbempirische Massenformel

Die Absicht der folgenden Darstellung ist:

1. Ausgehend von W.Seeligs zwei Ideen, eine mathematische Formel zur Berechnung der Massen von Elementarteilchen zu entwickeln;
2. Für die bekannten Elementarteilchen Seeligs **erweiterte** Formel **HEMF** zu verwenden;
3. Mittels möglicher Symmetrien (die hier nur als Arbeitshypothese behandelt wird) zu versuchen, die Massen unbekannter Elementarteilchen, bzw. Anzahl und Art der möglichen Elementarteilchen-Massen quantitativ vorherzusagen;
4. Die Ergebnisse der HEMF kritisch zu hinterfragen und für die weitere Forschung aufzubereiten.

1. Halbempirische Massenformel

In seiner Theorie¹ hat W.Seelig angenommen, daß

1. es eine *elementare* Masse gibt, nämlich die der Rydberg-Energie entsprechende Masse, die einen empirischen Wert von $13,65698140 \text{ eV}/c^2$ hat². Diese Masse wird mit m_0 bezeichnet³.
2. an statt α (*Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante*) die *Seelig-Konstante* (ζ) mit folgender Definition verwendet: (1.1)

$$\zeta = \left(\frac{3\pi}{2\pi} \right) (1 - 1/3\pi)^{-1/4} \quad (\zeta = 137,0287448853382)$$

Ein Vergleich mit dem empirischen Wert der Sommerfeldschen Feinstrukturkonstante (genauer gesagt mit ihrem Kehrwert) berechtigt diese Definition. Berücksichtigt man den bekannten Zusammenhang zwischen Rydberg-Energie, Sommerfeldscher Feinstrukturkonstante und der Masse des Elektrons ($E_{\text{Rydberg}} = m_e c^2 \alpha^2 / 2$) sowie die obige Definition von ζ , so erhalten wir für die Masse des *Elektrons*:

$$m_e = 2^{-1} \cdot 3^2 \cdot (3\pi)^4 \cdot ((1 - 1/(3\pi))^{-1/8})^4 \cdot m_0 \quad (1.2)$$

¹Vgl.: V.Balogh, W.Seelig, D.Straub: Bericht über W.Seeligs Methode zu Berechnung der Elementarteilchen-Masse, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Institut für Thermodynamik, Neubiberg, 1997, Kap.2, S.16ff, bzw. Kap.3, S.27ff.

²Alle empirische Angaben wurden entnommen: Physical Review D, 1 July 1996 Part I, Review of Particle Physics, Published by The American Physical Society through the American Institute of Physics, Vol. 54, Third Series, Number 1, S.65.

³Als Einheit für Massen von Elementarteilchen wird in der Regel das kg oder das Elektronenvolt (eV) benutzt mit der Umrechnung $1 \text{ eV} = 1,782662697 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$. Häufig werden die Angaben auch in Mega-Elektronenvolt (= 10^6 eV) gemacht.

Als Arbeitshypothese für die folgenden Ausführungen soll postuliert werden, daß diese Formel für alle anderen Elementarteilchen verallgemeinert werden kann.

Somit hat man die Möglichkeit, die Teilchen-Massen für *alle gegenwärtig empirisch nachprüf-baren (und eventuell existierenden, jedoch nicht nachgewiesenen)* Teilchen-Massen durch die folgende halbempirische Massenformel (HEMF)⁴

$$m_T = 2^p \cdot 3^q \cdot (3\pi)^v \cdot ((1-1/(3\pi))^{-1/8})^w \cdot m_0 \quad (1.3)$$

zu berechnen, wobei p, q, v und w ganze Zahlen sind.

2. Berechnete und empirische Massenwerte

Folgende Tabellen zeigen, daß die aufgrund der Arbeitshypothese gefundene Formel (1.3) mit entsprechenden Exponenten für p, q, v und w in einer sehr guten Näherung (im Mittel unter 0,5 %-iger Abweichung) die empirisch beobachteten Werte liefert.

Tabelle 2.1: Leptonen

| Leptonen | Masse (m) (in MeV/c ²) (empirisch) | Exponenten nach HEMF | | | | Berechnete m nach HEMF (in MeV/c ²) | Abweichung (%) |
|------------------|--|-------------------------|-----|-----|-----|---|-------------------|
| | | p | q | v | w | | |
| Elektron (e) | 0,51099907±0,00000015 | -1 | 2 | 4 | 4 | 0,51094503 | 0,0106 |
| Myon (μ) | 105,658389±0,000034 | -3 | 2 | 7 | 3 | 105,448036 | 0,199 |
| Tauon (τ) | 1777,00±0,30 (-0,27) | 1 | 2 | 7 | 7 | 1784,49 | -0,422 |

Tabelle 2.2: Vektorbosonen

| Vektor-bosonen | Masse (m) (in MeV/c ²) (empirisch) | Exponenten nach HEMF | | | | Berechnete m nach HEMF (in MeV/c ²) | Abweichung (%) |
|----------------|--|-------------------------|-----|-----|-----|---|-------------------|
| | | p | q | v | w | | |
| W [±] | 80330±150 | 0 | 0 | 10 | 5 | 80700,74 | -0,462 |
| Z | 91187±7 | 0 | 0 | 10 | 14 | 91554,41 | -0,403 |

⁴Nach Herrn Seeligs Meinung läßt seine Theorie eine mathematische Verallgemeinerung der Art von Gl. (1.3) nicht zu. Deshalb benutzen wir hier Formel (1.3) als Arbeitshypothese, keineswegs als Ableitung aus, sondern auf Anregung der Seelig-Theorie. Diese HEMF soll die Massen bereits nachgewiesener, jedoch von Herrn Seelig nach seiner Methode zum gegenwärtigen Zeitpunkt (Stand 11. 11. 1997) noch nicht berücksichtigter Elementarteilchen nachrechnen und mit Experimentalwerten vergleichen. Darüber soll die HEMF auch die Massen von bisher experimentell nicht nachgewiesenen, jedoch - aufgrund der in diesem Bericht postulierten Symmetrieregeln - prognostizierten Elementarteilchen ermitteln.

Tabelle 2.3: Pseudoskalare Mesonen (Spin 0)

| Meson | Masse (m) (in MeV/c^2) (empirisch) | Exponenten nach HEMF | | | | Berechnete m nach HEMF (in MeV/c^2) | Abweichung (%) |
|----------------------|--|-------------------------|-----|-----|-----|---|-------------------|
| | | p | q | v | w | | |
| π^\pm | $139,56995 \pm 0,00035$ | -1 | 1 | 7 | 2 | 138,63987 | 0,666 |
| π^0 | $134,9764 \pm 0,0006$ | -1 | 1 | 7 | 0 | 134,806 | 0,126 |
| K^\pm | $493,677 \pm 0,016$ | -1 | 0 | 8 | 11 | 494,128 | -0,091 |
| K^0, \bar{K}^0 | $497,672 \pm 0,031$ | -1 | 0 | 8 | 12 | 501,105 | -0,69 |
| η | $547,45 \pm 0,19$ | -1 | -2 | 9 | 15 | 547,299 | 0,0276 |
| η' | $957,77 \pm 0,14$ | 0 | 0 | 8 | 9 | 960,93 | -0,33 |
| D^\pm | $1869,3 \pm 0,5$ | 1 | 0 | 8 | 7 | 1868,716 | 0,0312 |
| D^0, \bar{D}^0 | $1864,5 \pm 0,5$ | 1 | 0 | 8 | 7 | 1868,716 | 0,226 |
| $D_s^\pm (F^\pm)$ | $1968,5 \pm 0,6$ | 1 | 0 | 8 | 11 | 1976,513 | -0,407 |
| B^\pm | $5278,9 \pm 1,8$ | 1 | 1 | 8 | 3 | 5300,396 | -0,401 |
| B^0, \bar{B}^0 | $5279,2 \pm 1,8$ | 1 | 1 | 8 | 3 | 5300,396 | -0,407 |
| B_s^0, \bar{B}_s^0 | $5369,2 \pm 2,0$ | 1 | 1 | 8 | 4 | 5375,235 | -0,11 |
| η_c | $2979,8 \pm 2,1$ | 0 | -1 | 9 | 8 | 2976,818 | 0,1 |

Tabelle 2.4: Vektormesonen (Spin 1)

| Meson | Masse (m) (in MeV/c^2) (empirisch) | Exponenten nach HEMF | | | | Berechnete m nach HEMF (in MeV/c^2) | Abweichung (%) |
|------------|--|-------------------------|-----|-----|-----|---|-------------------|
| | | p | q | v | w | | |
| ρ | $768,5 \pm 0,6$ | 3 | 0 | 7 | 5 | 771,177 | -0,348 |
| $K^{*\pm}$ | $891,59 \pm 0,24$ | 0 | 0 | 8 | 4 | 895,872 | -0,48 |
| K^{*0} | $896,10 \pm 0,28$ | 0 | 0 | 8 | 4 | 895,872 | 0,0254 |
| ω | $781,94 \pm 0,12$ | 3 | 0 | 7 | 6 | 782,066 | -0,0161 |
| Φ | $1019,413 \pm 0,008$ | 0 | 0 | 8 | 13 | 1016,361 | 0,299 |
| J/Ψ | $3096,88 \pm 0,04$ | 0 | -1 | 9 | 11 | 3104,6999 | -0,253 |
| $D^{*\pm}$ | $2010,0 \pm 0,5$ | 1 | 0 | 8 | 12 | 2004,42 | 0,277 |
| D^{*0} | $2006,7 \pm 0,5$ | 1 | 0 | 8 | 12 | 2004,42 | 0,114 |
| Υ | $9460,37 \pm 0,21$ | 0 | 0 | 9 | 12 | 9445,609 | 0,477 |

Tabelle 2.5: Baryonen (Spin 1/2)

| Baryon | Masse (m) (MeV/c^2) (empirisch) | Exponenten nach HEMF | | | | Berechnete m nach HEMF (MeV/c^2) | Abweichung (%) |
|---------------|--|-------------------------|-----|-----|-----|---|-------------------|
| | | p | q | v | w | | |
| p | $938,27231 \pm 0,00028$ | 0 | -2 | 9 | 4 | 938,15544 | 0,01245 |
| n | $939,56563 \pm 0,00028$ | 0 | -2 | 9 | 4 | 938,15544 | 0,150 |
| Λ | $1115,684 \pm 0,006$ | -3 | 2 | 8 | 11 | 1111,789 | 0,349 |
| Σ^+ | $1189,37 \pm 0,07$ | -3 | 2 | 8 | 16 | 1192,526 | -0,265 |
| Σ^0 | $1192,55 \pm 0,08$ | -3 | 2 | 8 | 16 | 1192,526 | 0,002 |
| Σ^- | $1197,436 \pm 0,033$ | -3 | 2 | 8 | 16 | 1192,526 | 0,41 |
| Ξ^0 | $1314,9 \pm 0,6$ | -3 | 2 | 8 | 23 | 1315,501 | -0,045 |
| Ξ^- | $1321,32 \pm 0,13$ | -3 | 0 | 9 | 20 | 1320,847 | 0,036 |
| Λ_c^+ | $2284,9 \pm 0,6$ | -2 | 0 | 9 | 10 | 2296,105 | -0,49 |

Tabelle 2.6: Baryonen (Spin 3/2)

| Baryon | Masse (m) (MeV/c^2) (empirisch) | Exponenten nach HEMF | | | | Berechnete m nach HEMF (MeV/c^2) | Abweichung (%) |
|------------|--|-------------------------|-----|-----|-----|---|-------------------|
| | | p | q | v | w | | |
| Δ | 1230-1234 (≈ 1232) | -3 | 2 | 8 | 18 | 1226,439 | 0,451 |
| Σ^* | $1382,8 \pm 0,4$ (+) | | | | | | -0,35 |
| | $1383,7 \pm 1,0$ (0) | -1 | -1 | 9 | 3 | 1387,641 | -0,285 |
| | $1387,2 \pm 0,5$ (-) | | | | | | -0,032 |
| Ξ^* | $1531,80 \pm 0,32$ (0) | -1 | -1 | 9 | 10 | 1530,737 | 0,069 |
| | $1535,0 \pm 0,6$ (-) | | | | | | 0,277 |
| Ω^- | $1672,45 \pm 0,29$ | 1 | 0 | 8 | 1 | 1670,4395 | 0,120 |

Obwohl die Übereinstimmung zwischen berechneten und empirischen Massendaten durchweg gut ist, gibt es in einigen Fällen mehr oder weniger verdeckte Mehrdeutigkeiten. Die HEMF liefert z. B. für das *Proton* und das *Neutron* übereinstimmende Massenwerte, obwohl das Experiment zweifelsfrei gering verschiedene Werte ausweist. Dieser Sachverhalt wird durch Heisenbergs Vermutung unterstützt, wonach es sich bei diesen beiden Elementarteil-

chen um zwei verschiedene Zustände desselben Teilchens handelt. Dasselbe gilt auch für das Ξ^* -Teilchen. Besonders bemerkenswert ist das Teilchen Σ^* , das sogar drei verschiedene stabile 'Zustände' besitzt.

Um diese 'Mehrfachzustände' zu berücksichtigen, kann man die folgende Modifikation der HEMF heranziehen, die sich sowohl auf den 'Ein-Zustand'-Fall (1), als auch auf die 'Zwei-Zustände'- und sogar die 'Drei-Zustände'-Fälle (2) und (3) bezieht:

$$m_T = 2^p 3^q (3\pi)^v F^{w+v} m_0 \quad ; \quad F := [1 - (3\pi)^{-1}]^{-1/8} \quad (1.4)$$

| | |
|--|--------------------------|
| $v' = 0$ | für 'Ein-Zustand'-Fälle |
| $v' = \{[v(1+\sqrt{(1+v)})^2]^{-1}; v^{-1}\}$ | für 'Zwei-Zustand'-Fälle |
| $v' = \{-[1+\sqrt{(1+v)}]^{-1}; -[2+\sqrt{(1+v)}]^{-1}; 0\}$ | für 'Drei-Zustand'-Fälle |

Mit (1.4) erhält man für das *Proton* den Massenwert 938,24 MeV, während sich für das *Neutron* der Wert 939,62 MeV ergibt. Die Massendifferenz von 1,380 MeV ist gegenüber dem empirischen Wert von 1,293 MeV relativ groß - vor allem hinsichtlich der exzellenten Übereinstimmung zwischen den berechneten und empirischen Daten beider Elementarteilchen. Für die beiden Zustände des Ξ^* -Teilchens ergeben sich die Werte 1530,88 MeV bzw. 1533,12 MeV. Unter Einbeziehung der experimentellen Unsicherheit beträgt die experimentelle Massendifferenz 2,92 MeV gegenüber dem berechneten Wert 2,25 MeV, obwohl die Übereinstimmung zwischen Erfahrung und Theorie bei den Absolutwerten des Ξ^* -Teilchens je im Promille-Bereich 0,04% bzw. 0,08%) liegt.

Die Korrekturformeln liefern für das Driplett des Σ^* -Teilchens die folgenden Werte in MeV: 1382,97, 1383,88 und 1387,64. Wiederum ist die Übereinstimmung mit den Meßwerten verblüffend gut (0,01%, 0,01%, 0,03%). Selbst die Differenzen in den Massenwerten ist in Anbetracht der Meßunsicherheit annehmbar.

3. Erste Analyse, mögliche Symmetrie, Vorhersage der Teilchenmassen

Bei den obigen Tabellen ist es auffällig, daß nur die Werte der Exponenten $p \in \{-3; -2; -1; 0; 1; 3\}$ und $q \in \{-2; -1; 0; 1; 2\}$ auftreten. Diese Erfahrung ermöglicht, die bisher beobachteten Teilchenmassen in einer Tabelle zusammenzufassen (siehe nächste Seite - hinter dem Teilchen-Zeichnen sind die Werte der Exponenten v und w angegeben).

Betrachtet man das grau unterlegte p/q-Kreuz, so erkennt man unmittelbar aus den existierenden und durch die Parameter v und w gekennzeichneten Elementarteilchen, daß um den *Kernbereich* ($p=0; q=0$) eine Symmetrie unter der Voraussetzung fehlender, d. h. bisher unentdeckter Teilchen besteht. Selbstverständlich bezieht sich diese Feststellung auf die Charakterisierung der Teilchen mittels des ganzzahligen Quadrupels $\{p; q; v; w\}$ im Allgemeinen und für den Spezialfall des p-q-Kreuzes im Besonderen. Beispielsweise tritt im Feld $\{p = -3; q = 0\}$ nur das Ξ^- -Teilchen mit der Indizierung $\{v = 9; w = 20\}$ auf, das im 'symmetrischen' Feld $\{p = +3; q = 0\}$ keine Entsprechung besitzt. Umgekehrt treten dort zwei Teilchen $\rho(7; 5)$ und $\omega(7; 6)$ auf, deren Entsprechungen im Feld $\{p = -3; q = 0\}$ fehlen.

gemeinen und für den Spezialfall des p-q-Kreuzes im Besonderen. Beispielsweise tritt im Feld $\{p = -3; q = 0\}$ nur das Ξ -Teilchen mit der Indizierung $\{v = 9; w = 20\}$ auf, das im 'symmetrischen' Feld $\{p = +3; q = 0\}$ keine Entsprechung besitzt. Umgekehrt treten dort zwei Teilchen $\rho(7; 5)$ und $\omega(7; 6)$ auf, deren Entsprechungen im Feld $\{p = -3; q = 0\}$ fehlen.

Wenn man also eine Symmetrie im schraffierten 0/0-Bereich der Parameter p/q derart unterstellt, daß alle um den Kernbereich zueinander symmetrischen Felder je dieselbe Anzahl von Teilchen mit denselben v-w-Parameter-Kombinationen enthalten, dann kann man einige Teilchen-Massen vorhersagen (siehe in der Tabelle 3.2 die mit Fragezeichen versehenen und durch ① bis ⑩ markierten, indes bisher nicht beobachteten Teilchen). Diese Teilchen werden durch das *Quadrupel* $\{p; q; v; w\}$ charakterisiert.

Folgende Teilchen-Massen können dann aufgrund dieser Symmetrie vorhergesagt werden:

| Teilchen | Exponenten | Masse (in MeV/c^2) | Mögliche Klasse |
|----------|------------|-----------------------|-----------------|
| $S_{①}$ | (-3;0;7;5) | 12,05 | Lepton |
| $S_{②}$ | (-3;0;7;6) | 12,22 | Lepton |
| $S_{③}$ | (-1;0;8;7) | 467,18 | Meson |
| $S_{④}$ | (-1;0;8;1) | 429,49 | Meson |
| $S_{⑤}$ | (0;1;9;8) | 26.791,37 | Bosonen? |
| $S_{⑥}$ | (0;1;9;8) | 27.942,30 | Bosonen? |
| $S_{⑦}$ | (0;2;9;4) | 75.990,59 | Bosonen? |
| $S_{⑧}$ | (0;2;9;4) | 75.990,59 | Bosonen? |
| $S_{⑨}$ | (2;0;9;10) | 36.737,69 | Bosonen? |
| $S_{⑩}$ | (3;0;9;20) | 42.267,12 | Bosonen? |

Tabelle 3.1: Vorhergesagte Teilchen-Massen

Was die Größenordnung betrifft, sind die letzten Teilchen (von S_5 bis S_{10}) unter "sehr schwer" einzustufen. In dieser Größenordnung kennen wir heute nur die Massen von *Vektorbosonen*. Ob es sich bei diesen vorhergesagten Teilchen um weitere Eichteilchen handelt, kann derzeit nicht entschieden werden. Die Teilchen S_3 und S_4 haben eine Masse in der Größenordnung der *pseudoskalaren Mesonen* (zwischen *Pionen* und *Kaonen*). Experimentell wären diese Teilchen am leichtesten zu finden. Die ersten zwei Teilchen (S_1 und S_2) hätten ähnliche Massen wie die *Leptonen*. Das könnte ein Hinweis sein, daß wir noch nicht alle Leptonen kennen.

Tabelle 3.2: Darstellung der Massen der Elementarteilchen (mit Vorhersage)

| 3-Potenzen $\Xi (q)$ 2-Potenzen $\Psi (p)$ | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 |
|---|------------------------|---|--|---|--|
| -3 | | | $\Xi(9;20)$ $?(7;5)$ $\textcircled{1}$ $?(7;6)$ $\textcircled{2}$ | | $\Lambda(8;11)$ $\Sigma(8;16)$ $\Xi^0(8;23)$ $\Delta(8;18)$ $\mu(7;3)$ |
| -2 | | | $\Lambda_c(9;10)$ | | |
| -1 | $\eta(9;15)$ | $\Sigma^*(9;3)$ $\Xi^*(9;10)$ <i>Antikall(9;15)</i> | $?(8;1) \textcircled{4}$ $?(8;7) \textcircled{8}$ $K^+(8;11)$ $K^0(8;12)$ | $\pi^+(7;2)$ $\pi^0(7;0)$ | $e(4;4)$ |
| 0 | $p(9;4)$ $n(9;4)$ | $\eta_c(9;8)$ $J/\Psi(9;11)$ | $\eta^+(8;9)$ $K^+(8;4)$ $\Phi(8;13)$ $\Upsilon(9;12)$ $W(10;5)$ $Z(10;14)$ | $?(9;8)$ $\textcircled{5}$ $?(9;11)$ $\textcircled{6}$ | $?(9;4) \textcircled{7}$ $?(9;4) \textcircled{8}$ |
| 1 | <i>Gluonall (9;17)</i> | | $\Omega(8;1)$ $D(8;7)$ $D_s(8;11)$ $D^*(8;12)$ | $B(8;3)$ $B_s(8;4)$ | $\tau(7;7)$ |
| 2 | | | $?(9;10) \textcircled{9}$ | $\rightarrow \uparrow$ | |
| 3 | | | $?(9;20) \textcircled{10}$ $\rho(7;5)$ $\omega(7;6)$ | | |

Weitere Vorhersagen und Extrapolationen werden durch die ganzen Zahlen ermöglicht, die die einzelnen Massen charakterisieren. Angenommen, daß alle möglichen Exponenten in den bisher beobachteten und vorhergesagten Teilchen-Massen vorkommen, kann man eine Abschätzung für die Anzahl der insgesamt möglichen Teilchen vornehmen. Für p gibt es 7 Möglichkeiten, für q 5, für v 6 und für w 18. Damit wäre der obere Grenzwert der Teilchenzahl mit 3150 festgelegt, ohne daß Mehrfachzustände (in Tabelle 3.2 eingerahmt).

4. Kritische Auswertung und Ausblick

Die halbempirische Massenformel (1.3) sowie ihre Modifikation (1.4) ist als Arbeitshypothese aus der Seelig-Theorie motiviert. Berechtigt ist sie in dem Sinne, daß sie alle empirisch gefundenen Massen-Daten von Elementarteilchen⁵ gut beschreibt. Selbsterklärend läßt sie viele Fragen offen:

1. Die von W. Seelig übernommenen Annahmen (Basismasse, bzw. die Definition von ζ) sollten begründet werden. Für die theoretische Begründung wäre möglicherweise eine andere Basismasse als m_0 günstiger (z.B. $M_0=(3\pi)^8 m_0$ oder $M_0=(3\pi)^7 m_0$ oder $M_0=(3\pi)^4 m_0$). Diese Vermutung scheint im Hinblick auf die Zahlenwerte für v in der Darstellung der HEMF erwägenswert. Ausgenommen beim Elektron ($v=4$) und den W-Z-Bosonen ($v=10$), kommen nur die Werte 7, 8 und 9 vor. Es ist nicht auszuschließen, daß für ζ eine geometrische Deutung möglich wird. In diese Richtung zeigen die π -Terme in HEMF.

2. Vermutlich können die auftretenden Werte w -Exponenten reduziert werden.

3. Die "grobe Symmetrie", die uns die Vorhersage von Elementarteilchen-Massen ermöglicht, könnte verfeinert werden, sofern letztere eine Gruppendarstellung (vermutlich mit endlichen Gruppen) gestatten. Andere Symmetrien können nicht ausgeschlossen werden.

4. Es ist offen, ob die unter Punkt 3 angesprochene Symmetrie mit dem Standard-Modell, bzw. den vom Standard-Modell her bekannten Symmetrieeigenschaften zusammenhängt.

Die hier präsentierten Ergebnisse, in erster Linie die Qualität des Vergleichs der berechneten Massenwerte mit den empirischen, erhärten die Vermutung, daß eine einheitliche mathematische Darstellung der Elementarteilchen-Massen auf andere physikalische Prinzipien, als sie bisher für die Elementarteilchenphysik verbindlich sind, zurückgeführt werden kann. Dies ist umso eher zu erwarten, als es derzeit nicht möglich ist, die quantitativ wie qualitativ auf höchst unterschiedlichem Niveau angesiedelten Quantum-, Quark- und Vakkumtheorien vollständig zu harmonisieren. Dazu reichen die im Anhang zusammengestellten Klassifikationen nicht aus. Besonders die Massenwerte stellen im Vergleich zu den elektrischen Ladungen ein offenes Problem dar. Lösungsansätze neueren Datums sind im Anhang 2 erläutert.

⁵ Was man in der modernen Physik unter Elementarteilchen versteht, ist nicht eindeutig festgelegt. Siehe diesbezüglich das Zitat von W. Heisenberg in Fußnote 4.

5. Literaturnachweis

- Berger, C. (1992): *Teilchenphysik*. Springer, Heidelberg.
- Bierhalter, G. (1994): *Ist die Sommerfeldsche Feinstruktur-"Konstante" eine statistische Relation?*, in: B. Kanitschneider, L. Krüger, C. U. Moulines, E. Scheibe (Hrsg.): *Philosophie Naturalis*, Jahrgang 31, Klostermann, Frankfurt am Main, S. 132-149.
- Bohr, N. (1964): *Das Bohrsche Atommodell*, Dokumente der Naturwissenschaft, Abteilung Physik, Band 5, Battenberg, Stuttgart.
- Brown, L. M. (1978): *The idea of the neutrino*, in: *Physics Today*, September, S. 23-28.
- Brown, L. M. (1981): *Yukawa's prediction of the meson*, In: *Centaurus* 25, S. 71-132.
- Brown, L. M. und Hoddeson, L., Hrsg. (1983): *The Birth of Particle Physics*, Cambridge University Press, New York.
- Brown, L. M. Hrsg. (1993): *Renormalization*, Wiley, New York.
- Brown, L. M.; Dresden, M.; Hoddeson, L.; West, M. (1989): *Pions to quarks, Particle physics in the 1950s*, Cambridge University Press, New York.
- Cassidy, D.C. (1992): *Werner Heisenberg, Leben und Werk*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Closes, F. E. (1983): *The Cosmic Onion*, Heinemann Educational Books, London.
- Cohen, E. R. and Taylor, B. N. (1987): *The 1986 adjustment of the fundamental physical constants*, in: *Reviews of Modern Physics*, Vol. 59, No. 4, p. 1121-1148.
- Cohen, E.R. and Taylor, B.N. (1995): *The Fundamental Physical Constants*, in: *Physics Today*, August, Part 2, BG 9.
- Commins, E.D. and Bucksbaum, P.H. (1983): *Weak Interactions of Leptons and Quarks*, University Press, Cambridge.
- Derziński, A. (1992): *Geometry of the Standard Model of Elementary Particles*, Springer, Berlin.
- Farnham, D. L., Van Dyck, R. S., and Schwinberg, P. B. (1995): *Determination of the Electron's Atomic Mass and the Proton/Electron Mass Ratio via Penning Trap Mass Spectroscopy*, In: *Physical Review Letters*, 13. November 1995, p. 3598-3601.
- Feynman, R. (1985): *QED, The Strange Theory of Light and Matter*, University Press, Princeton, N. J.
- Gell-Mann, M. (1987): *Particle Theory from S-Matrix to Quarks*, in: Doncel, M.G. u.a. (Hrsg.): *Symmetrie in Physics (1600/1980)*, Barcelona, S.474-497.
- Gerhosen, K. und Vogel, H. (1995): *Physik*, Springer, Berlin.
- Griffiths, D. (1996): *Einführung in die Elementarteilchenphysik*, Akademie, Berlin.
- Heisenberg, W. (1959): *Grundlegende Voraussetzungen in der Physik der Elementarteilchen*, in: Martin Heidegger zum 70. Geburtstag 26.IX.59. Eine Festschrift, Pfullingen: Neske, 1959, S.291-297, neu gedruckt: in: *Gesammelte Werke - Collected Works*, Abteilung C, Band II, S. 249-262.
- Heisenberg, W. (1976): *Was ist ein Elementarteilchen?*, in: *Die Naturwissenschaften* 63, 1-7, neu gedruckt: in: *Gesammelte Werke - Collected Works*, Abteilung C, Band III, S. 507-513.
- Hilischer, H. (1996): *Elementare Teilchenphysik*, Vieweg, Braunschweig.
- Langacker, P. (1995): *Precision Tests of the Standard Electroweak Model*, ed. P. Langacker, World, Singapore.
- Langacker, P. and Polonsky, G. (1995a): In: *Physical. Review. D*52, p. 3081ff.
- Pickering, A. (1984): *Constructing quarks*. Princeton University Press, New York.

- Schmutzer, E. (1989): *Grundlagen der Theoretischen Physik, Mit einem Grundriss der Mathematik für Physiker*, BI-Wissenschafts-Verlag, Teil 2, Mannheim.
- Schweber, S. S. (1994): *QED and the Men Who Made It*, University Press, Princeton, N. J.
- Simonyi, K. (1990): *Kulturgeschichte der Physik*, Deutsch, Thun, Frankfurt am Main.
- Summerfeld, A. (1922): *Atombau und Spektrallinien*, Dritte umgearbeitete Auflage, Vieweg, Braunschweig.
- Straub, D. (1990): *Eine Geschichte des Glasperlenspiels, Irreversibilität in der Physik: Irritationen und Folgen*, Birkhäuser, Basel.
- Straub, D. (1997): *Alternative Mathematical Theory of Non-equilibrium Phenomena*, Academic Press, San Diego.
- Stückler, M. (1991): *Das Antropische Prinzip*, in: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 4/40 S. 25-27.
- Taylor, B. N. and Cohen, E. R. (1990): *Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: A Status Report*, in: J. Research National Institute Standard Technology. 95, p. 497.
- Trefils, J.S. (1980): *From Atoms to Quarks*, Scribners, New York.
- Tryon, E.P. (1973): *Is the Universe an Vacuum Fluctuation?*, in: Nature 246 (1973), S. 396-397.
- Yang, C.N. (1961): *Elementary Particles*, N.J., Princeton University Press, Princeton.
- Yudisrain, F.J. (1983): *Quantum Chromodynamics: an Introduction to the Theory of Quarks and Gluons*, Springer, Berlin.
- Yukawa, H. (1982): *Tabibito - Ein Wanderer*, Stuttgart.
- Walcschek, P. (1991): *Neuere Teilchenphysik - einfach dargestellt*, Deubner, Köln.
- Weinberg, S. (1983): *Subatomic Particles*, Scientific American Library, New York.
- Weinberg, E. J. and Nordstrom, D. L., (1996): *Physical Review D, Particles and Fields*, Volume 54, Part I. The American Physical Society.
- Weizsäcker, C.F. von, (1992): *Zeit und Wissen*, Hanser, München.
- Wlodarski, K. (1973): *Über die Versuche zur Erklärung der Zahlenwerte der Feinstrukturkonstanten und des Proton-Elektron-Massenverhältnisses*, in: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 6, S. 164-165.

II. Anhang

I. Klassifikation der Teilchen und Kräfte

Aus Sicht der heutigen Schulphysik besteht die gesamte Materie aus drei Sorten elementarer Teilchen: *Leptonen*, *Quarks* und *Austauschteilchen*. Es gibt sechs Leptonen (*Spin* 1/2). Sie gliedern sich in drei Familien (oder *Generationen*):

| Leptonen | Ladung (Q) | Masse (m in MeV/c ²) (empirisch) | Wechselwirkung |
|-------------------------------------|------------|--|-------------------|
| Elektron (e) | -1 | 0,51099907±0,00000015 | elektrom.+schwach |
| Elektron-Neutrino (ν _e) | 0 | 0 | schwach |
| Myon (μ) | -1 | 105,658389±0,000034 | elektrom.+schwach |
| μ-Neutrino (ν _μ) | 0 | 0 | schwach |
| Tauon (τ) | -1 | 1777,00±0,30 (-0,27) | elektrom.+schwach |
| τ-Neutrino (ν _τ) | 0 | 0 | schwach |

Tabelle A 1: Ladungen und Massen der Leptonen

Zudem gibt es noch sechs Antileptonen - mit umgekehrten Vorzeichen. Das Positron hat die Ladung +1 und die Elektronenzahl -1. Ähnlich wie bei den Leptonen, gibt es bei Quarks sechs "Flavors", welche nach Ladung, Seltsamkeit (S), Charm (C), Beauty (B) und Truth (T) klassifiziert werden⁶. Die Quarks nehmen an der starken, elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung teil. Die Quarks mit Spin 1/2 gliedern sich in drei Generationen:

| Flavor | Ladung (in e) | Masse (spekulativ in MeV/c ²) | | |
|-------------|---------------|---|-------------|------------|
| | | "Nackt" | Effektiv | |
| | | | in Baryonen | in Mesonen |
| down (d) | -1/3 | 7,5 | 363 | 310 |
| up (u) | 2/3 | 4,2 | | |
| strange (s) | -1/3 | 150 | 538 | 483 |
| charm (c) | 2/3 | 1100 | 1500 | |
| bottom (b) | -1/3 | 4200 | 4700 | |
| top (t) | 2/3 | | >160000 | |

Tabelle A 2: Nackte und effektive Quarkmassen

⁶Der Vollständigkeit halber sollte man "Upness" (U) und "Downness" (D) erwähnen, obwohl diese Begriffe selten gebraucht werden.

Wie bei den Leptonen wären in der Aufstellung der Antiquarks alle Vorzeichen umgekehrt. Zudem tritt jedes Quark und Antiquark je in den drei Farben *Rot*, *Grün* und *Blau* auf, so daß es insgesamt 36 von ihnen gibt.

Das Quarkmodell (1964) (vorgeschlagen von *Murray Gell-Mann* und *George Zweig*⁷) besagt:

1. Jedes Baryon besteht aus drei Quarks (und jedes Antibaryon aus drei Antiquarks);
2. Jedes Meson setzt sich aus einem Quark und einem Antiquark zusammen.⁸

Mit diesen zwei Regeln kann man den "Quarkinhalt" der bekannten Elementarteilchen auflisten. Folgt man der historischen Entwicklung und berücksichtigt die Spineigenschaft, so ergeben sich die vier Gruppen:

*Baryonen (Spin 1/2), Baryonen (Spin 3/2),
pseudoskalare Mesonen (Spin 0) und Vektormesonen (Spin 1).*

Folgende Tabellen geben neben dem Quarkinhalt auch die Ladung und die Massenwerte an⁹.

| Barvon | Quarkinhalt | Ladung | Masse (MeV/c ²) |
|-------------------------------|---------------------------|---------------|--|
| Delta (Δ) | <i>uuu, uud, udd, ddd</i> | +2; +1; 0; -1 | 1230-1234 (≈ 1232) |
| Sigma-Stern (Σ^*) | <i>uus, uds, dds</i> | +1; 0; -1 | 1382,8 \pm 0,4 (+) 1383,7 \pm 1,0 (0) 1387,2 \pm 0,5 (-) |
| Ksi-Stern (Ξ^*) | <i>uss, dss</i> | 0; -1 | 1531,80 \pm 0,32 (0) 1535,0 \pm 0,6 (-) |
| Omega- (Ω) | <i>sss</i> | -1 | 1672,45 \pm 0,29 |

Tabelle A 3: Baryonen (Spin 3/2)

⁷Eine ausführliche Bibliographie über das Quarkmodell findet sich bei O.W.Greenberg, *Am. J.Phys.* **50**, 1074 (1982). Viele der heute schon 'klassischen' Publikationen (einschließlich der unveröffentlichten von G. Zweig) sind in D. B. Lichtenberg und S. P. Rosen (Hrsg.): *Developments in the Quark Theory of Hadrons* (Newman: Hadronic Press, 1980) nachgedruckt. Eine knappe Zusammenfassung findet man in: Simonyi (1990), p. 527-528.

⁸Diese Auffassung steht in klarem Widerspruch zur Meinung von W. Heisenberg: "Der Begriff des "Teilens" hatte experimentell seinen Sinn verloren. Der Unterschied zwischen elementaren und zusammengesetzten Teilchen ist damit grundsätzlich verschwunden. ... Es ist ja unvermeidlich, daß wir eine Sprache benötigen, die aus dieser traditionellen Philosophie stammt. Wir fragen: Woraus besteht das Proton? Kann man das Elektron teilen oder ist es unteilbar? Ist das Lichtquant einfach oder ist es zusammengesetzt? Usw. Aber alle diese Fragen sind falsch gestellt, weil die Wörter "teilen" oder "bestehen aus" weitgehend ihren Sinn verloren haben." (Heisenberg, W. (1975), in: *Gesammelte Werke, Abteilung C, Band III, S. 508; bzw. S.511.*)

⁹Die empirischen Werte wurden entnommen vom *Physical Review D*, 1 July 1996, Part I Review of Particle Physics, **54**, Nr. 1.

| Baryon | Quarkinhalt | Ladung | Masse (MeV/c ²) |
|-----------------------------|-------------|--------|-----------------------------|
| Proton (p) | uud | +1 | 938,27231±0,00028 |
| Neutron (n) | udd | 0 | 939,56563±0,00028 |
| Lambda (Λ) | uds | 0 | 1115,684±0,006 |
| Sigma-Plus (Σ^+) | uus | +1 | 1189,37±0,07 |
| Sigma-Null (Σ^0) | uds | 0 | 1192,55±0,08 |
| Sigma-Minus (Σ^-) | dds | -1 | 1197,436±0,033 |
| Ksi-Null (Ξ^0) | uss | 0 | 1314,9±0,6 |
| Ksi-Minus (Ξ^-) | dss | -1 | 1321,32±0,13 |
| Lambda-C+ (Λ_c^+) | udc | +1 | 2284,9±0,6 |

Tabelle A 4: Baryonen (Spin 1/2)

| Meson | Quarkinhalt | Ladung | Masse (MeV/c ²) |
|---------------------------|--|--------|-----------------------------|
| Pion (π^\pm) | $u\bar{d}, d\bar{u}$ | +1; -1 | 139,56995±0,00035 |
| Pion (π^0) | $(u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2}$ | 0 | 134,9764±0,0006 |
| Kaon (K^\pm) | $u\bar{s}, s\bar{u}$ | +1; -1 | 493,677±0,016 |
| Kaon (K^0, \bar{K}^0) | $d\bar{s}, s\bar{d}$ | 0; 0 | 497,672±0,031 |
| Eta-Meson (η) | $(u\bar{u}+d\bar{d}-2s\bar{s})/\sqrt{6}$ | 0 | 547,45±0,19 |
| η' | $(u\bar{u}+d\bar{d}+s\bar{s})/\sqrt{3}$ | 0 | 957,77±0,14 |
| D^\pm | $c\bar{d}, d\bar{c}$ | +1; -1 | 1869,3±0,5 |
| D^0, \bar{D}^0 | $c\bar{u}, u\bar{c}$ | 0; 0 | 1864,5±0,5 |
| $D_s^\pm (F^\pm)$ | $c\bar{s}, s\bar{c}$ | +1; -1 | 1968,5±0,6 |
| B^\pm | $u\bar{b}, b\bar{u}$ | +1; -1 | 5278,9±1,8 |
| B^0, \bar{B}^0 | $d\bar{b}, b\bar{d}$ | 0; 0 | 5279,2±1,8 |
| B_s^0, \bar{B}_s^0 | $s\bar{b}, b\bar{s}$ | 0; 0 | 5369,2±2,0 |
| η_c | $c\bar{c}$ | 0 | 2979,8±2,1 |

Tabelle A 5: Pseudoskalare Mesonen (Spin 0)

| Meson | Quarkinhalt | Ladung | Masse (MeV/c ²) |
|----------------------|--|-----------|-----------------------------|
| Rho-Meson (ρ) | $u\bar{d}, d\bar{u}, (u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2}$ | +1; -1; 0 | 768,5±0,6 |
| K ^{*±} | $u\bar{s}, s\bar{u}$ | +1; -1 | 891,59±0,24 |
| K ^{*0} | $d\bar{s}, s\bar{d}$ | 0; 0 | 896,10±0,28 |
| Omega (ω) | $(u\bar{u}+d\bar{d})/\sqrt{2}$ | 0 | 781,94±0,12 |
| Phi (Φ) | $s\bar{s}$ | 0 | 1019,413±0,008 |
| J/Ψ | $c\bar{c}$ | 0 | 3096,88±0,04 |
| D ^{*±} | $c\bar{d}, d\bar{c}$ | +1; -1 | 2010,0±0,5 |
| D ^{*0} | $c\bar{u}, u\bar{c}$ | 0; 0 | 2006,7±0,5 |
| Υ | $b\bar{b}$ | 0 | 9460,37±0,21 |

Tabelle A 6: Vektormesonen (Spin 1)

Es gibt vier fundamentale Kräfte in der Natur: die *starke*, die *elektromagnetische*, die *schwache* und die *gravitative*. Sie sind in der Reihenfolge der Stärke¹⁰ aufgeführt:

| Kraft | Rel. Stärke | Theorie | Feldquant |
|-------------------|-------------------|-----------------|-----------|
| Stark | 10 | Chromodynamik | Gluon |
| Elektromagnetisch | 10 ⁻² | Elektrodynamik | Photon |
| Schwach | 10 ⁻¹³ | Flavordynamik | W und Z |
| Gravitativ | 10 ⁻⁴² | Geometrodynamik | Graviton |

Tabelle A 7: Die fundamentalen Kräfte und Feldquanten

Zu jeder dieser Kräfte gehört eine physikalische Theorie.

Die klassische Theorie der *Schwerkraft* ist Newtons Gravitationsgesetz. Ihre relativistische

¹⁰Hier folgen wir der Aufstellung von Griffiths, D. (1996), S. 61, eine andere "Stärkeeinteilung" ist angegeben in: Simonyi (1990), p. 514, Abbildung 5.5-17; bzw. in: Gribbin, J. (1996), S. 153-154: "The relative strengths of the four forces cover an enormous range. In units in which the strength of the strong force is 1, the strength of the electromagnetic force is 10⁻² (Just 1 per cent of the strength of the strong force), the strength of weak force is 10⁻⁶ (one-millionth the strength of the strong force) and the strength of gravity is a mere 10⁻⁴⁰. This means, for example, that the electromagnetic force of repulsion between two electrons is 10³⁸ times greater than the gravitational force of attraction between the same two electrons. Gravity is so extraordinarily weak that it plays virtually no part in interactions involving pairs of fundamental particles or a few particles."

Verallgemeinerung ist Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie. Eine befriedigende Quantentheorie der Schwerkraft steht noch aus. Das größte Problem ist dabei, daß die Gravitation relativ einfach zu schwach ist.

Die die **elektromagnetische Kraft** beschreibende Theorie wird Elektrodynamik genannt. Ihre klassische Formulierung gelang Maxwell vor über hundert Jahren. Diese Theorie war bereits mit der Speziellen Relativitätstheorie vereinbar. Die Quantentheorie der Elektrodynamik wurde von *Schinitzchiro Tomonaga*, *Richard Feynman* und *Julian Seymour Schwinger* in den 40er Jahren entwickelt.

Die **schwache Kraft**, die z.B. für den nuklearen Betazerfall verantwortlich ist (ebenso für den Zerfall des Pions, Myons und vieler der sogenannten seltsamen Teilchen), war der klassischen Physik nicht bekannt. Ihre theoretische Beschreibung erfolgte von Anfang an mit Hilfe der relativistischen Quantenmechanik. Die erste Theorie wurde im Jahre 1933 von *E. Fermi* vorgelegt; *Tsung-Dao Lee* und *Chen Ning Yang*, *Murray Gell-Mann* und *R. Feynman* und viele andere verfeinerten diese Theorie in den Fünfzigern¹¹, und in den Sechzigern gaben ihr *Lee Sheldon Glashow*, *Steven Weinberg* und *Abdus Salam* ihre heute bekannte Form (G-W-S-Modell) (Vgl. Simonyi (1990) S.527-528). Das G-W-S-Modell behandelt schwache und elektromagnetische Wechselwirkungen als unterschiedliche Erscheinungsformen einer einzigen **elektroschwachen** Kraft und reduziert in diesem Sinne die vier Kräfte auf drei.

Jede dieser vier Elementarkräfte ist je ein charakteristisches Austauscheteilchen zugeordnet, die die entsprechende Paarwechselwirkung repräsentieren: das Photon für die elektromagnetische Kraft, zwei *W's* und ein *Z* für die schwache Kraft, das Graviton (vermutlich) für die Gravitation.

In *Yukawas* ursprünglicher Theorie (1934) war das Austauscheteilchen der starken Kraft das Pion. Mit der Entdeckung der sogenannten schweren Mesonen konnte dieses Bild nicht weiter aufrecht erhalten werden. Protonen und Neutronen konnten nur *Rhos* und *Etas* und *K's* und *Phi's* u.s.w. austauschen.

Das **Quarkmodell** bedeutete eine radikale Revision der Ansichten über Elementarteilchen: wenn Protonen, Neutronen und Mesonen komplizierte zusammengesetzte Strukturen wären, dann gibt es keinen Grund für die Annahme, daß ihre Wechselwirkungen untereinander *einfach* seien. (Vgl. Griffiths, D. (1996), S. 51). Um die **starke Kraft** zu studieren, muß man zunächst die typische Wechselwirkung zwischen individuellen Quarks betrachten. Dabei erhebt sich die Frage: Welche Teilchen werden in einem Prozeß der starken Wechselwirkung zwischen zwei Quarks ausgetauscht? Diese hypothetischen Austauscheteilchen werden unter der Sammelbezeichnung *Gluon* zusammengefaßt. Im *Standardmodell* gibt es acht davon. Die Gluonen selbst tragen eine *Farbladung* (wie die Quarks) und existieren daher nicht als isolierte Teilchen. (Vgl. Feynman, R. (1985), S.136-137). Es gibt indirekte experimentelle Hinweise auf die Existenz von Gluonen: Die sogenannten tiefelastischen Streuexperimente zeigen, daß ca. die Hälfte des Impulses des Protons von elektrisch neutralen Bestandteilen getragen wird, d.h. vermutlich (!?) von den Gluonen. Darüber hinaus kann die charakteristi-

¹¹Beiträge zu der geschichtlichen Entwicklung der Theorie findet man in: L.M.Brown et alii (1989) S.359-496.

sche *Jet*struktur der Proton-Streuung bei hohen Energien¹² über den Zerfall von "fliegenden" Quarks und Gluonen erklärt werden.¹³ Glueballs mögen auch beobachtet worden sein.¹⁴ Niemand kann indes mit gutem Gewissen behaupten, daß das experimentelle Beweismaterial heute wirklich zwingend ist.

Was die Theorie der starken Kraft (QCD) betrifft, ist die Anzahl der Objekte, die man zur Zeit tatsächlich *berechnen* kann, eher gering. Es gibt einige Versuche, die die vorhandenen Probleme lösen sollen¹⁵. Aber alle diese Unternehmungen haben "mehr mit der internen Stimmigkeit des Modells als mit den experimentellen Daten zu tun. Wenn die QCD die richtige Theorie der starken Wechselwirkung ist, wo ist dann ihre Lösung *klassischer* Probleme der Hadronphysik? Warum berechnen wir nicht die Massendifferenz von Neutron und Proton oder die Kraft zwischen zwei Protonen oder den Wirkungsquerschnitt für die Pion-Nukleon-Streuung oder die Bindungsenergie des Deuterons? Die Schwierigkeit liegt darin, daß alle diese einfach klingenden Fragen komplizierte Vielkörperprobleme meinen. Ich vermute, daß wir mit der Zeit Wege finden werden, solche Angelegenheiten mit der QCD zu behandeln, genau so, wie physikalische Chemiker gelernt haben, die Quantenmechanik auf große Moleküle anzuwenden. Aber für den Augenblick müssen wir uns mit einfacheren Errungenschaften bescheiden." (Griffiths, D. (1996), S.325).

Zusammenfassend: "All dies ergibt zusammen eine reichlich große Anzahl angeblich "elementarer" Teilchen: 12 Leptonen, 36 Quarks und 12 Austauscheteilchen (das Graviton ist nicht mitgezählt, da die Gravitation nicht im Standardmodell enthalten ist). (...) Die Glashow-Salam-Weinberg-Theorie verlangt nach mindestens einem *Higgs*-Teilchen, so daß wir es mit einem Minimum von 61 Teilchen zu tun haben. Durchdrungen von der Erfahrung zuerst mit Atomen und später mit Hadronen, haben viele Leute vorgeschlagen, daß wenigstens einige dieser 61 Zusammensetzungen aus noch elementareren Subteilchen sein müssen. (...) Solche Spekulationen liegen jenseits des Standardmodells (...) Persönlich denke ich nicht, daß die große Anzahl "elementarer" Teilchen im Standardmodell für sich genommen alarmierend ist, denn sie hängen eng zusammen. Die acht Gluonen sind zum Beispiel abgesehen von ihrer Farbe identisch, und die zweite und dritte Generation ahmen die erste nach." (Griffiths, D. (1996), S.52).

¹²Vgl. *Phys. Rev. D. Particles and Fields, 1 July 1996 Part I, Vol.54 S.186.*

¹³Vgl. M. Jacob und P. Landshoff in: *Scientific American*, März 1980.

¹⁴Vgl. K. Ishikawa in: *Scientific American*, November 1982.

¹⁵Vgl. Griffiths, D. (1996), S.325; bzw. F. Halzen und A. D. Martin: *Quarks and Leptons*, New York, Wiley, 1984, Kap. 10 und 11; C. Quigg: *Gauge Theories of the Strong, Weak and Electromagnetic Interactions*, Reading, MA, Benjamin/Cummings, 1983, Abschn. 8.4 und 8.5.

2. Massen in der Teilchenphysik

Seit der Entdeckung des Elektrons (vor genau 100 Jahren - 1897 von *J. J. Thomson*) und der zwischen 1910 und 1916 ausgeführten Versuchsreihe von Millikan ist klar, daß es eine 'elementare' Einheit für die Ladung gibt, nämlich die *Ladung des Elektrons*.¹⁶ Alle anderen, in der Natur vorkommenden Ladungen sind ganzzahlige Vielfache von dieser Ladung. Etwas ähnliches wurde bezüglich der Masse bisher nicht festgestellt. Diesbezügliche Spekulationen gab es genug.¹⁷ Eine Lösung des Problems hängt vermutlich mit der Lösung der entsprechenden Wechselwirkung, d. h. der Gravitation zusammen.

In diesem Kapitel wird versucht, die neuesten Spekulationen bezüglich der Massen der Elementarteilchen kurz darzustellen.

2.1 "Klassische Spekulationen"

a) Yukawa über die Masse des Pions¹⁸

Die erste bedeutende Theorie der starken Kraft wurde 1934 von Hideki Yukawa vorgelegt. Seine Annahme war, daß Proton und Neutron einander durch eine Art *Feld* anziehen, genau so, wie das Elektron durch den Kern über ein elektrisches Feld angezogen wird. Das Feld sollte quantisiert sein. Analog dem *Photon* würde der Austausch eines Teilchens diese Wechselwirkung charakterisieren. Die Masse dieses Wechselwirkungsteilchens - des sogenannten *Yukawa-Mesons* - kann folgendermaßen abgeschätzt werden. Wenn zwei Protonen in einem Kern ein Meson (mit Masse m) austauschen, müssen sie für eine kurze Zeit die Energieerhaltung um den Betrag mc^2 (die Ruheenergie des Mesons) verletzen. Die Heisenbergsche Unschärferelation besagt nun, daß man sich eine Energie ΔE 'borgen' darf, vorausgesetzt, 'man gibt sie zurück', und zwar in einer Zeit Δt , die durch $\Delta E \Delta t = h/(2\pi)$ gegeben ist. In diesem Fall entspricht der Vorgang einer 'Ausleihe' von $\Delta E = mc^2$, um die Wechselwirkung durch den Austausch des Mesons sicherzustellen. Das Meson muß den Kern durchqueren (Radius r_0), und seine Geschwindigkeit ist ein bedeutender Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit, so daß in etwa gilt: $\Delta t \approx r_0/c$. Damit ergibt sich $m = h/(2\pi r_0 c)$, d.h. für die Masse des Vermittlerteilchens ein Wert von einigen hundert Elektronenmassen (mit den heute bekannten Werten von h und c wäre diese Masse $197,327 \text{ MeV}/c^2$), wenn man als

¹⁶Vgl. Simonyi, K. (1990) S.377-381; bzw. S.385.

¹⁷Besonders abstrus verlaufen solche Spekulationen immer dann, wenn sie im Zusammenhang mit einem persönlichen Affront gegen eine bekannte Persönlichkeit verbunden werden. Albert Einstein ist davon schon seit etwa 80 Jahren bevorzugt betroffen. Die ihm zugeschriebene Ableitung des berühmten Effekts, wonach Lichtstrahlen in Sonnennähe abgelenkt werden, soll ein alter Hut sein: Der Chemiker Henry Cavendish (1731-1810), der die Gravitationskonstante erstmals bestimmt hat, soll diesen Effekt bereits beobachtet haben. Aber es kommt noch schöner: Der Physiker F. von Soldner hat bereits 1801 eine Abhandlung über diesen Gegenstand geschrieben. Er berechnete die Werte dieser Ablenkung und machte dabei - merkwürdigerweise - genau denselben Fehler wie 110 Jahre später Einstein. Hinweise auf Soldners Abhandlung findet man in den Berliner astronomischen Jahrbüchern, Ausgabe von 1804.

¹⁸Vgl. Simonyi, K. (1990) S.506-507; bzw. Griffiths, D. (1996) S. 20; 56-57.

Radius eines typischen Kernes den Wert 10^{-13} cm verwendet. Zwar konnte Yukawa mit dieser Methode das $Pi(\pi)$ -Meson voraussagen und erhielt dafür 1949 den Nobel-Preis¹⁹, trotzdem darf man diese Beweisführung nicht als zwingend betrachten. Wenn wir die gleiche Rechnung für ein Atom durchführen, dann erhält man als Ergebnis, daß die Masse eines Photons ca. $7 \cdot 10^{-30}$ g wäre. D. Griffiths kommentierte den Sachverhalt wie folgt: "Die Unschärferelation erlaubt *keineswegs* die Verletzung der Energieerhaltung. (...) Darüber hinaus handelt es sich um eine *Ungleichheit*, (...), die einem höchstens eine *untere Grenze* für m liefern könnte. Zwar *ist* es typischerweise richtig, daß die *Reichweite* einer Kraft umgekehrt proportional zur Masse des Austauschteilchens ist²⁰, aber die Ausdehnung eines gebundenen Zustands ist nicht immer ein gutes Maß für die Reichweite (deshalb schlägt das Argument für das Photon fehl: Die Reichweite der elektromagnetischen Kraft ist unendlich, aber die Größe eines Atoms ist es nicht)." (Griffiths, D. (1996), S.57).

¹⁹Laut Begründung hat er den Nobel-Preis "für die Vorhersage der Existenz von Mesonen auf Grund theoretischer Untersuchungen der Kernkräfte" erhalten. Vgl. Simonyi, K. (1990) S.474.

²⁰ In dieser Richtung hat M. Born zahlreiche Überlegungen mit seiner 'Reziprozitätstheorie' angestellt. Ausführlich berichtet er davon in seinem Briefwechsel mit A. Einstein: "A. Einstein-Hedwig und Max Born: *Briefwechsel, 1916-1955*" (Reinbek bei Hamburg, Februar 1972). *Brief Nr. 74* (datiert vom 11. 4. 38; S. 137-140): Ausführlich berichtete Born über Überlegungen bezüglich einer 'Übermechanik' mit einer neuen Naturkonstanten (H - mit unrichtiger Dimensionsangabe!) - "Manuscript von den 'Proc.Roy.Soc.' angenommen" - charakteristisch ist. Die Reziprozitätstheorie geht von einer Symmetrie-Forderung aus, wonach die letzten Naturgesetze ungeändert bleiben, wenn man die vier Größen (Raumkoordinaten und Zeit) mit den vier Größen (Impulskoordinaten und Energie) vertauscht. "Inzwischen hat die experimentelle Erforschung der Elementarteilchen große Fortschritte gemacht, und zu meiner Überraschung und Freude spielt nun mein altes Reziprozitätsprinzip eine gewichtige Rolle in der Deutung der Erscheinungen." (S.140). *Brief Nr. 75*. (datiert vom 2.9.38; S.141-142): "Meine Reziprozitäts-Idee verfolgt mich dauernd, obwohl sonst kein Mensch sie ernst nimmt." *Brief Nr. 77*. (datiert vom 10.4.40; S.144-145, kommentiert S.146): "My chief interest is concentrated on my 'reciprocity' idea; Fuchs and I have made nice progress, and Pauli, the super-critical man, wrote to me the other day: "I think, you are one on the right track.". Bemerkung über A. Landé: "thought with very primitive methods and rather unclear ideas". ... "I am sure you will be interested in the thing because it is proper way of unifying wavemechanics and relativity." Kommentar (S.146): "Der Fortschritt in den Reziprozitäts-Untersuchungen mit Fuchs, der hier gemeldet wird, war wohl, trotz der Zustimmung Paulis, bloß formalistisch; wie schon erwähnt, ist erst in jüngster Zeit (1965) wirkliche Physik daraus geworden." (Eben in Elementarteilchenphysik, vgl. Yukawa.). *Brief Nr. 92*. (datiert vom 23.1.49; S.182-183): "Die Lagrange-Funktion L selber, nicht die Lösung des zugehörigen mechanischen Problems, ist die wahre Unbekannte. ... Das liefert in der Tat unendlich viele L's, und die Massen der bekannten Mesonen kommen richtig heraus." (Hier gibt es einen konkreten Hinweis auf einen Artikel in "Nature"!); *Brief Nr. 96*. (datiert vom 3.9.50, bzw. 4.9.50; S.186-188, kommentiert S.189): "Aus den Zeitungen sah ich, daß Blackett bei der British Association in Birmingham wieder ein paar neue kurzlebige Mesonen angekündigt hat. In der Dir gewidmeten Nummer der "Rev.of Modern Physics" steht eine Arbeit, in der ich das Vorhandensein von Mengen solcher kurzlebiger Teilchen plausibel gemacht habe. Die Einzelheiten dieser Rechnungen sind wahrscheinlich falsch, aber das Prinzip scheint sich zu bestätigen." Kommentar: "Die Nachricht über die Existenz vieler kurzlebiger Teilchen hat mich erfreut, weil unsere Reziprozitätstheorie so etwas vorhersagte. Heute sieht es so aus, als ob sie auch einen Beitrag zu ihrer Klassifizierung und zum Verständnis ihrer Eigenschaften liefert." *Kommentar zum Brief Nr. 117*. (datiert vom 29.1.55; S.232-233): "Hideki Yukawa ist ein glänzender theoretischer Physiker, der einzige japanische Träger des Nobelpreises, den er 1949 für seine Vorhersage einer neuen Art von Teilchen, Mesonen genannt (an Masse 'zwischen' Elektronen und Protonen), erhalten hat. Ich bin mit ihm in brieflichem Verkehr und sehe ihn gelegentlich, ... er hat mein Reziprozitätsprinzip als leitenden heuristischen Gedanken in der Theorie der Elementarteilchen anerkannt."

b) Die Gell-Mann/Okubo-Massenformel über die Massen der Baryonen und der Mesonen

Im Jahre 1961 hat Murray Gell-Mann den sogenannten *Achtfachen Weg* eingeführt. Im wesentlichen wurde das gleiche Modell von Ne'eman vorgeschlagen.²¹ Der Achtfache Weg ordnet die Baryonen und Mesonen in geometrische Schemata, je nach Ladung und Seltsamkeit. Die acht leichtesten Baryonen passen in eine hexagonale Aufstellung mit zwei Teilchen in der Mitte:

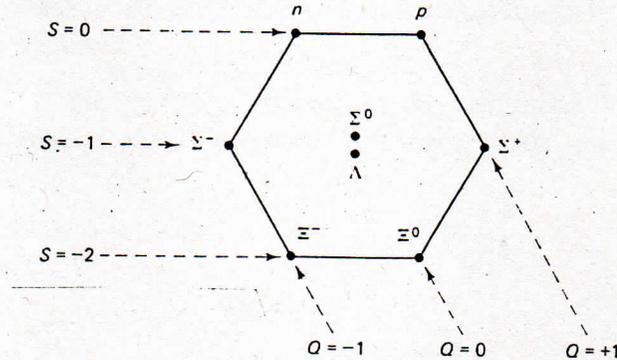


Abbildung (Griffiths, D. (1996), S.37)

Diese Gruppe ist unter der Bezeichnung *Baryonoktett* bekannt. Teilchen gleicher Ladung liegen auf den nach rechts unten abfallenden *Diagonalen*. *Horizontalen* verbinden Teilchen mit gleicher *Seltsamkeit*. Die *Gell-Mann/Okubo-Massenformel* verbindet die Massen von Mitgliedern des Baryonoktetts (wobei die kleinen Massendifferenzen zwischen *p* und *n*, zwischen Σ^+ , Σ^0 und Σ^- und zwischen Ξ^0 und Ξ^- unberücksichtigt bleiben) gemäß

$$2(m_N + m_{\Xi}) = 3m_{\Lambda} + m_{\Sigma} . \tag{A2-1}$$

Verwendet man diese Formel zusammen mit den bekannten Massen des Nukleons *N* (mit einer Masse, die dem Mittelwert von *p* und *n* entspricht) und Baryons Ξ (wiederum den Mittelwert genommen), so lässt sich für Λ ein Massenwert von 1106,6 MeV/c² (empirisch: 1115,684 MeV/c²) vorhersagen.

Die acht leichtesten Mesonen füllen ein zum Baryonoktett ähnliches hexagonales Muster und formen das (*pseudoskalare*) *Mesonoktett*:

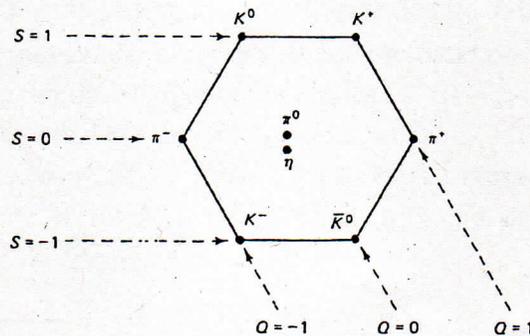


Abbildung (Griffiths, D. (1996), S.37)

²¹Eine Zusammenfassung der Originalartikel findet man in: M. Gell-Mann und Y. Ne'eman: *The Eightfold Way*, New York, Benjamin, 1964.

Genau wie beim Baryonoktett bestimmen die Diagonalen die Ladung und die Horizontalen die Seltsamkeit; aber dieses Mal ist die obere Linie dem Parameterwert $S=1$ zugeordnet, die mittlere $S=0$ und die untere $S=-1$. Diese Diskrepanz ist ein historischer Zufall. Dieselbe *Gell-Mann/Okubo-Massenformel* läßt sich auch auf die Mesonen anwenden (mit $\Sigma \rightarrow \pi$, $\Lambda \rightarrow \eta$ etc.); allerdings: "aus Gründen, die ein wenig mysteriös sind" (Griffiths (1996), S.57), muß man in diesem Fall die *Quadrate* der Massen nehmen. Ähnlicherweise wie beim Baryonoktett kann man eine 'Vorhersage' für die Masse des η -Mesons machen: es wäre $566,238 \text{ MeV}/c^2$ (empirisch: $547,45 \text{ MeV}/c^2$). $m_\eta^2 = \frac{1}{3}(4m_\pi^2 - m_\rho^2)$ vgl. Phys. Rev. 98.0

Sechsecke waren nicht die einzigen Figuren, die der Achtfache Weg erlaubte. Es gab auch eine dreieckige Anordnung, die 10 schwere Baryonen enthält - das *Baryondekuplett*:

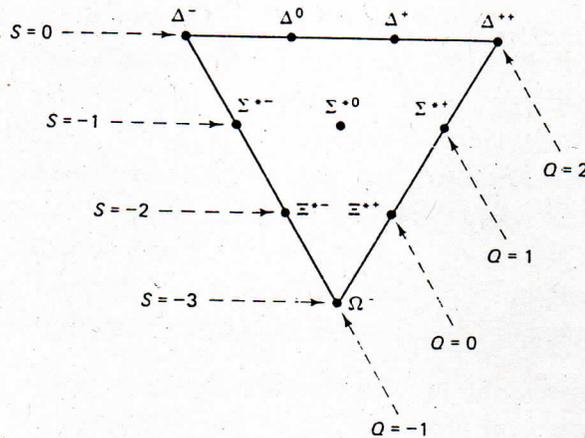


Abbildung (Griffiths, D. (1996), S.38)

Als Gell-Mann diese Teilchen in das Dekuplett einfügte, waren schon neun der Teilchen experimentell bekannt. Das zehnte Teilchen (mit einer Ladung von -1 und einer *Seltsamkeit* von -3) fehlte zu jener Zeit ²². Gell-Mann sagte voraus, wie es zu erzeugen sei. Darüber hinaus rechnete er seine Masse folgenderweise aus. Er nahm eine Massenformel für Dekupletts an, die durch die sukzessiven Massendifferenzen der entlang einer Dreieckseite markierten Teilchen

$$M_\Delta - M_{\Sigma^*} = M_{\Sigma^*} - M_{\Xi^*} = M_{\Xi^*} - M_\Omega \tag{A2-2}$$

definiert ist.

Verwendet man diese Formel, kann man die Masse des im Jahre 1964 entdeckten *Omega-minus* berechnen.²³ Seit der Entdeckung des Ω hat niemand mehr ernsthaft daran gezweifelt, daß der Achtfache Weg richtig ist. Wertet man indes Gl. (A2-2) hinsichtlich M_Ω mit Hilfe der betreffenden Meßwerte (vgl. Tabelle 2.6) bzw. der nach Gl. (1.4) berechneten Massendaten aus, so erhält man je in MeV: $M_\Omega = 1680,8$ (aus den Experimenten) bzw. $1678,79$ (aus Gl. (1.4)) über die Differenz $M_{\Sigma^*} - M_{\Xi^*}$, sowie $M_\Omega = 1832$ (aus den Experimenten) bzw. 1837 (aus Gl. (1.4)) über die Differenz $M_\Delta - M_{\Sigma^*}$.

²²Möglicherweise wurde es 1954 in einem Experiment mit kosmischer Strahlung beobachtet (Vgl. Y. Eisenberg, *Phys. Rev.* **96**, 541 (1954)), aber die Identifizierung war nicht eindeutig.

²³Vgl. V. E. Barnes et al., *Phys. Rev. Lett.* **12**, 204 (1964), bzw. W. B. Fowler und N. P. Samios, *Sci. Am.* (Oktober 1964).

c) *Coleman-Glashow-Beziehung*²⁴

Im selben Jahr 1964 wurde eine weitere Massenformel für Baryonen veröffentlicht. Diese Beziehung lautet:

$$M_{\Sigma^+} - M_{\Sigma^-} = M_p - M_n + M_{\Xi^0} - M_{\Xi^-} . \quad (\text{A2-3})$$

Mit den heute bekannten empirischen Werten gibt es eine Massendifferenz in der Größenordnung von $1 \text{ MeV}/c^2$ zwischen den zwei Seiten der Gleichung. Dieses Ergebnis wird durch Gl. (1.4) bestätigt.

2.2 Theorie von Heisenberg ²⁵

Die neuere Entwicklungen während und kurz nach dem Zweiten Weltkrieg waren für Heisenberg Anlaß, seine Quantenfeldphysik für die Teilchenphysik zu reaktivieren. Das führte in den Fünfzigern zur Entwicklung von neuen Theorien und gipfelte 1958 in seinem Vorschlag einer neuen einheitlichen Feldtheorie, die für Heisenberg trotz aller damit verbundenen begrifflichen und mathematischen Schwierigkeiten gleichbedeutend mit einer Revolution der Physik war, obwohl sie von den meisten Physiker nie akzeptiert wurde. Er stellte in den späten vierziger und den frühen fünfziger Jahren in einer Reihe von Aufsätzen, die er der Göttinger Akademie vorlegte und in *der Zeitschrift für Naturforschung* veröffentlichte, die Situation in der Quantenfeldtheorie dar und entwarf sein Programm für deren Entwicklung.²⁶

In der Feldtheorie, so stellte er fest, würden Teilchen und deren Wechselwirkungen durch Felder dargestellt, die eine oder mehrere relativistisch invariante Differentialgleichungen erfüllen. Aber immer, wenn diese Gleichungen quantisiert würden, divergieren die physikalischen Eigenschaften der Felder gegen unendlich. Zur Darstellung der dramatischen Entwicklungen der Theorie zitieren wir den Biographen C. D. Cassidy: "Diese Divergenzen waren offenbar die Folge von sogenannten lokalen Wechselwirkungen, d. h. von Wechselwirkungen bei beliebig kleinen Entfernungen. Sie ließen sich entweder durch Abschneiden der Funktionen bei kurzen Wellenlängen vermeiden, oder aber mit der von Heisenberg bevorzugten Methode - der Einführung einer *Mindestlänge* als untere Grenze. 1951 entdeckte er jedoch, daß bei diesem Lösungsvorschlag infolge der speziellen Relativitätstheorie eine Verletzung des Kausalgesetzes resultierte. Zu einer Mindestentfernung Δr gehörte eine Mindestzeit $\Delta t = \Delta r/c$, die zwischen einer Ursache und ihrer Wirkung vergehen muß (c ist die Lichtgeschwindigkeit). Umgekehrt bedeutete die Existenz einer Mindestzeit, daß zwischen dem Ort, wo eine Ursache auftritt, und der Stelle, wo ihre Wirkung in Erscheinung tritt, eine

²⁴Vgl. *Phys. Rev.* **B134**, 671 (1964).

²⁵Folgende Darstellung basiert auf Cassidy, D.C.(1992); S.655-660.

²⁶Heisenbergs Arbeiten über die Feldtheorie werden zusammenfassend dargestellt in Hans-Peter Dürr, "Heisenbergs einheitliche Feldtheorie der Elementarteilchen", Manuskript für Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina in Halle (Saale), 1981 (Privatbesitz Hans-Peter Dürr, München) - Information in: Cassidy, D.C.(1992), S.776, Fußnote 56.

gewisse Entfernung bestehen muß.²⁷ Örtliche Kausalität war offenbar unvereinbar mit der Quantisierung relativistischer Gleichungen. (...).

Für Heisenberg befand sich die Physik in einer ähnlichen Situation wie in den frühen zwanziger Jahren, den Jahren vor der Entstehung der Quantenmechanik. (...) In den bisherigen Feldtheorien wurden Elementarteilchen und die zwischen ihnen auftretenden Kräfte als eigene Feldgrößen aufgefaßt. Die Dissipation des turbulenten Feldes in einem buchstäblichen Schauer aus unzähligen, eng benachbarten Teilchen brachte Heisenberg auf den Gedanken, daß es in der neuen Feldtheorie überhaupt nicht um einzelne Teilchen und Felder gehe, sondern um *ein* allgemeines, überall vorhandenes Materiefeld, für das er das Symbol $\Psi(x)$ einführte. *Einzelne Elementarteilchen sollten dann als stationäre Energiezustände dieses allgemeinen Materiefeldes in Erscheinung treten.* Wie eine Flüssigkeit sollte das Feld turbulent werden, wenn es in eine 'Flasche' eingeschlossen wird, die kleiner ist als die universelle Mindestlänge. Im Gegensatz zur QED mußten die Differentialgleichungen dieses Feldes nichtlinear sein, um die Turbulenzen erzeugen zu können. Eine Potenz der universellen Länge l mußte die Nichtlinearität bewirken, die Länge selbst sollte die Masse der aus dem Materiefeld herauskondensierten Elementarteilchen bestimmen, und Auswahlregeln sowie Erhaltungssätze sollten sich aus den Symmetrieeigenschaften der Feldgleichungen ergeben." (Cassidy, C.D. (1992), S. 656-657).

Heisenberg beschäftigte sich mehr als acht Jahre mit den Problemen und Möglichkeiten seiner neuen, nichtlinearen Theorie. "1957 war Heisenberg so weit vorangekommen, daß er sein Materiefeld in die Form eines aus acht Komponenten bestehenden Spinorfeldes gebracht hatte, das als *Isospinor* bezeichnet wird. Aber welche Art von Feldgleichung würde dazu passen? Wie in den frühen zwanziger Jahren suchte Heisenberg zunehmend Rat und Kritik bei seinem alten Freund Wolfgang Pauli. (...) Im Februar 1957 (...) In der "Schlacht von Ascona" stritten Heisenberg und Pauli um die mathematischen Subtilitäten der relativistischen Gleichungen der einheitlichen Feldtheorie. (...) Nach einem sechswöchigen Gefecht, das Heisenberg als sehr unangenehm in Erinnerung blieb, kapitulierte Pauli schließlich. (...).

Neun Monate später kam er (Heisenberg) noch einmal in die Schweiz, um in Genf an Besprechungen im CERN teilzunehmen. Bei einem Zwischenaufenthalt in Zürich traf er sich mit Pauli. Heisenberg erinnerte sich später, wie er wenige Wochen nach diesem anregenden Besuch plötzlich auf eine einfache Feldgleichung stieß, die anscheinend jeder von ihr erwarteten Symmetrieeigenschaft genügte, d.h., sie enthielt sowohl die Lorentz-Gruppe als auch die Isospingruppe. Pauli war begeistert; ein gemeinsamer Artikel über eine *Heisenberg-Pauli-Gleichung* als Grundlage für eine einheitliche Feldtheorie schien in Sicht, sobald die mathematischen Konsequenzen geklärt wären. (...) Der Artikel wurde nie geschrieben. (...) Ohne die mathematischen Probleme gelöst zu haben, beschlossen die beiden Physiker, die Gleichung nur in einer vorläufigen Mitteilung, einem sogenannten Preprint, der an speziell ausgewählte Kollegen geschickt werden sollte, zu veröffentlichen. Das 14 Seiten starke, auf englisch verfaßte Typoskript wurde vervielfältigt, und am 27. Februar 1958 sollten die

²⁷Vgl. W.Heisenberg: *Zur Frage der Kausalität in der Quantentheorie der Wellenfelder*" (1951); in: *Gesammelte Werke/Collected Works* Hrsg. W.Blum u.a. (Berlin: Springer-Verlag; München:Piper-Verlag, 1985 Abteilung A, Band 3, S.166.