

# Im Herzen der Materie

Der Elektron-Proton-Beschleuniger HERA und die „wee“-Partonen  
 Allen Caldwell und Günter Grindhammer

Ende Juni 2007 wurde der HERA-Speicherring am DESY in Hamburg nach einem 15-jährigen, sehr erfolgreichen Betrieb abgeschaltet. HERA hat es erstmals erlaubt, die Wolke der virtuellen Teilchen „im Herzen“ aller Materie zu sehen. Eine besondere Rolle spielen dabei sehr kurzlebige, universelle Fluktuationen aus Quarks, Antiquarks und Gluonen, die nur einen kleinen Anteil des Protonenimpulses tragen und von Feynman im Rahmen seines Parton-Modells „wee“-Partonen genannt wurden (*wee*: winzig).

Im Jahr 1911 schossen Hans Geiger und Ernest Marsden in einem bahnbrechenden Experiment Alphateilchen auf eine dünne Goldfolie und beobachteten zu ihrer Verblüffung, dass einige Alphateilchen unter sehr großen Streuwinkeln gestreut wurden, während die meisten praktisch ohne Ablenkung durch die Goldfolie flogen. Ernest Rutherford erklärte diese Beobachtung mit der Annahme, dass Atome aus einem kleinen, positiv geladenen Kern bestehen, um den Elektronen kreisen. Große Streuwinkel treten demnach auf, wenn die Flugbahn eines positiv geladenen Alphateilchens ganz nah an einem Kern vorbeiführt. Dieses Experiment gilt allgemein als Ausgangspunkt für die Erforschung des Aufbaus der Materie.

Später stellte sich heraus, dass der Kern aus positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen besteht. Die Annahme, dass diese Bestandteile punktförmig seien, ließ sich jedoch nicht lange halten. 1956 führte Robert Hofstadter weitere Streuexperimente durch, nun mit Elektronen an Protonen, deren Ergebnisse sich bei ausreichend hoher Energie der Elektronen nicht mehr durch die Rutherford'sche Streuformel beschreiben ließen. Eine Erklärung war jedoch möglich unter der Annahme, dass die Ladung des Protons nicht in einem Punkt konzentriert ist.

Die höhere Energie war entscheidend – sie ermöglichte das „Abtasten“ des Protons mit hinreichend guter Auflösung, sodass sich dessen ausgedehnte Natur offenbarte. Ende der Sechzigerjahre schließlich führten Jerome Friedman, Henry Kendall und Richard Taylor eine Reihe von Experimenten am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) mit Elektronenstrahlen von noch höherer Energie durch. Dabei zeigte sich, dass sich das nach Rutherford erwartete Verhalten wieder einstellt, wenn man drei punktförmige Bestandteile des Protons mit elektronischen Teilladungen postuliert –

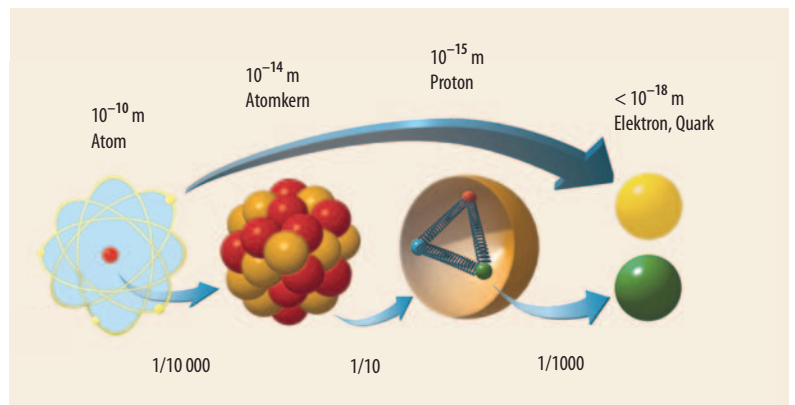


Abb. 1 Die Struktur der Materie (vom Atom zum Quark) und die Größenverhältnisse. Der Atomkern besteht aus Nucleonen, den Protonen und Neutronen, die jeweils aus drei Valenzquarks aufgebaut sind.

jene Quarks, die Murray Gell-Mann und Georg Zweig vorausgesagt hatten. Mit Quarks als Bestandteilen ließen sich die Eigenschaften von Proton, Neutron und viele andere Teilchen erklären (Abb. 1).

Aber auch dieses einfache Bild erwies sich als unvollständig: Weitere Experimente am Europäischen Laboratorium für Teilchenphysik (CERN) und am Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) in den Siebziger- und Achtzigerjahren zeigten, dass die Summe der Impulse der Quarks allein nur die Hälfte des Protonimpulses ergab. Den Rest tragen die von der Theorie der starken Wechselwirkung, der Quantenchromodynamik (QCD), vorhergesagten Gluonen, mit deren Hilfe sich die in verschiedenen Experimenten beob-

## KOMPAKT

- Hadronen wie das Proton bestehen neben den Valenzquarks aus virtuellen Quark-Antiquark-Paaren sowie Gluonen.
- Messungen des Streuquerschnitts bei HERA haben gezeigt, dass die Wolke derjenigen virtuellen Bestandteile, die nur einen geringen Anteil des Protonimpulses tragen (die „wee“-Partonen), universellen Charakter hat. Damit einher geht ein neuartiges, „geometrisches“ Skalenverhalten.
- Diffraktive Ereignisse, bei denen Protonen „unverletzt“ aus dem Stoß hervorgehen, weisen auf die Existenz eines virtuellen, farblosen Teilchens hin: das Pomeron.
- Eines der theoretischen Modelle zur Erklärung dieser Ergebnisse beinhaltet eine überraschende Korrespondenz zwischen diesem Pomeron und dem Graviton.

Prof. Dr. Allen Caldwell und Dr. Günter Grindhammer, Max-Planck-Institut für Physik, Föhringer Ring 6, 80805 München

bachtete Protonenstruktur erklären lassen. Ende der Siebzigerjahre gelang es mit dem Elektronen-Positronen-Speicherring PETRA am DESY in Hamburg, die Existenz von Gluonen direkt nachzuweisen.

Heute geht man davon aus, dass Protonen (aber auch Neutronen und viele andere Teilchen) aus Quarks und Gluonen aufgebaut sind. Neben der elektrischen Ladung besitzen die Quarks auch eine sog. Farbladung, die per Konvention nur die „Werte“ rot, blau und grün annehmen kann. Dadurch wird anschaulich gemacht, dass sich durch Kombination dieser Farben aus den farbigen Quarks farblose Protonen oder Neutronen ergeben. So wie zu jedem Teilchen ein Antiteilchen existiert, so gibt es auch zu jedem Quark ein Anti-quark und damit zu jeder Farbe auch eine Anti-Farbe. Gluonen, deren Farbladung aus einer Farbe und einer anderen Anti-Farbe besteht, vermitteln die Kräfte zwischen den Quarks. Im Gegensatz zu den Photonen, die nur Kräfte zwischen elektrischen Ladungen vermitteln, wechselwirken die Gluonen auch noch untereinander. Diese Eigenschaft macht die starke Kraft ganz besonders komplex und von der elektromagnetischen Kraft verschieden.

Die Quarks selbst haben eine sehr kleine Masse, die Gluonen sind masselos wie die Photonen. Die Masse von Protonen und Neutronen, die den Hauptteil der sichtbaren Masse im Universum ausmachen, wird hauptsächlich durch die Energie der Gluonen und Quarks nach Einsteins Gleichung  $m = E/c^2$  erzeugt.

### Das Partonmodell von Feynman

Noch vor der Entdeckung der Quarks und der Entwicklung der QCD präsentierte Richard Feynman 1969 ein Modell, in dem sog. Partonen die grundlegenden Bestandteile aller Teilchen sind, die von der starken Kraft zusammen gehalten werden [1]. Ein sich schnell bewegendes Proton besteht demnach aus vielen Partonen, die sich parallel zur Bewegungsrichtung des Protons bewegen und jeweils einen Bruchteil des gesamten Impulses tragen. Bei der Wechselwirkung zwi-

schen einem Elektron und einem Proton strahlt dann zunächst das Elektron ein Photon ab, welches von einem der Partonen absorbiert wird. In einem Bezugssystem, in dem sich das Proton sehr schnell bewegt, ist die Zeitskala für diese Wechselwirkung sehr kurz verglichen mit den aufgrund der Lorentz-Dilatation langen Wechselwirkungszeiten der einzelnen Partonen untereinander. Daher verhalten sich die Partonen, während der Zeit der Wechselwirkung mit dem Photon, wie freie Teilchen. Feynman gelang es mit seinem Partonmodell, einen Großteil der frühen Elektron-Proton-Streudaten zu beschreiben.

Später erkannte man, dass Feynmans Partonen die Quarks und Gluonen der QCD sind. Die Kombination von Feynmans Modell und der QCD bildet die Grundlage für unser Verständnis vieler Streuexperimente zur starken Wechselwirkung. Feynman warnte jedoch, dass sein Modell nicht für die „wee“-Partonen gelten würde, mit denen er die Partonen meinte, die nur einen sehr kleinen Anteil des Protonenimpulses besitzen. Bei HERA gelang es aufgrund der einzigartigen Kinematik, die der Speicherring ermöglicht, erstmals, diese „wee“-Partonen zu untersuchen.

### Das „Super-Elektronenmikroskop“ HERA

Anfang der Siebzigerjahre brachte der norwegische Physiker Bjørn Wiik die Idee für ein Super-Elektronenmikroskop für Protonen zum Forschungszentrum DESY in Hamburg. Während bei den eingangs erwähnten Experimenten beschleunigte Elektronen auf stationäre Protonen (z. B. ein Wasserstofftarget) geschossen wurden, sollten nun erstmals Elektronen und die fast 2000-mal schwereren Protonen in zwei getrennten Ringen mit einem Umfang von 6,3 km gespeichert, auf höchste Energien beschleunigt und dann frontal zur Kollision gebracht werden. Nach Jahren der Vorbereitung begann 1984 mit großer internationaler Unterstützung der Bau von HERA (Hadron-Elektron-Ring-Anlage), die 1990 in Betrieb ging. Die in diesem Artikel beschriebenen Forschungsergebnisse wurden an den beiden Experimenten H1 und ZEUS gewonnen.

Erst die Kollisionsexperimente bei HERA ermöglichten die zur Untersuchung immer kleinerer Strukturen notwendige hohe Energie (Abb. 2). Das Auflösungsvermögen hängt nämlich vom Impulsübertrag  $Q$  vom Elektron auf das Proton ab, dessen größtmöglicher Wert proportional ist zu  $(E_e E_p)^{1/2}$ , wobei  $E_e$  und  $E_p$  die Energie des einlaufenden Elektrons bzw. Protons ist. Bei einem ruhenden Proton verbessert sich das Auflösungsvermögen nur proportional zu  $E_e^{1/2}$ . Bei HERA hatten die Elektronen eine Energie von 27,5 GeV und die Protonen zunächst 820 und später 920 GeV. Um das maximale Auflösungsvermögen von HERA mit stationären Protonen zu erreichen, müssten die Elektronen eine Energie von 54 000 GeV haben – ein völlig unmögliches Unterfangen.

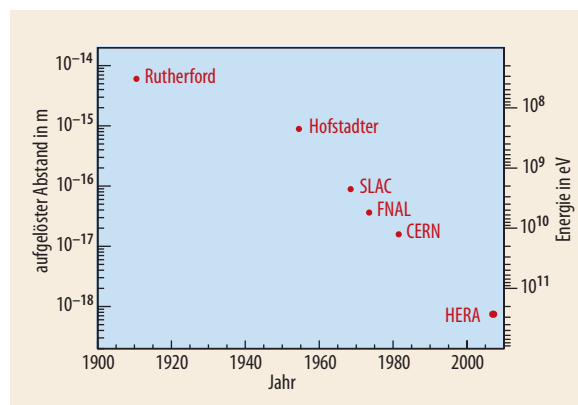


Abb. 2 Seit 1911 wurde das Auflösungsvermögen bei Streuexperimenten enorm gesteigert: von  $6 \cdot 10^{-15}$  m, etwa dem 6-fachen des Protonradius, beim Experiment von Rutherford bis zu  $7 \cdot 10^{-19}$  m, etwa 0,07 % des Protonradius, mit vorläufigen HERA-Daten bis zum letzten Jahr 2007 der Datennahme.

## Elektron-Proton-Wechselwirkungen und „wee“-Partonen

Was würde passieren, wenn wir ein einzelnes Quark in ein Vakuum „stellen“ könnten? Nach der Quantenfeldtheorie emittiert das reelle Quark ein virtuelles Gluon und wird selbst zum virtuellen Quark. Die Lebensdauer dieser Quark-Gluon-Fluktuation hängt davon ab, wie groß der Unterschied in Energie/Impuls zwischen dem ursprünglichen Quark und der Fluktuation ist: ein großer Unterschied führt zu einer sehr kurzen Lebensdauer, ein kleiner zu sehr langlebigen Fluktuationen. Schließlich absorbiert das Quark das Gluon wieder. Wenn die Quark-Gluon-Fluktuation jedoch eine hinreichend lange Lebensdauer hat, dann ist sie in der Lage, als Quelle für weitere Fluktuationen zu fungieren. Das Gluon spaltet sich entweder in zwei Gluonen auf oder verwandelt sich in ein Quark-Antiquark-Paar. Das virtuell gewordene „Saatquark“ kann auch ein weiteres Gluon abstrahlen, welches erneut Quelle weiterer Abstrahlung oder Paarerzeugung werden kann. Wenn die resultierenden Partonen lang genug leben, können auch sie Quellen für weitere Fluktuationen sein. Dadurch kann eine Strahlungskette mit einer großen Anzahl virtueller Quarks und Gluonen entstehen, die das anfängliche Quark ausmachen. Diese Quarks und Gluonen sind in einem hoch kohärenten Quantenzustand, der schließlich zum ursprünglichen Quark zurückfallen wird.

Zusätzlich zu den Quarks und Gluonen, die vom Saatquark ausgehen, vermag auch das Vakuum, virtuelle Partonen zu produzieren. So entstehen Quark-Antiquark-Paare, die auch Quelle weiterer virtueller Partonen sein können. Diese Quarks und Gluonen können mit den Quarks und Gluonen von unserem Saatquark wechselwirken. Die Wolke aus virtuellen Quarks und Gluonen und, in viel kleinerer Anzahl, anderen virtuellen Teilchen, die mit Quarks wechselwirken können, so wie Photonen oder schwache Bosonen, erreicht schließlich einen gewissen Gleichgewichtszustand.

Was bedeutet das für unser Bild vom Proton? Wir wissen, dass die drei Valenzquarks die Quantenzahlen des Protons festlegen – zwei u- (oder up-) Quarks und ein d- (oder down-) Quark. Aber die Valenzquarks existieren nicht allein – bei kleinen Abständen bzw. auf sehr kurzen Zeitskalen, bestehen sie aus Wolken von virtuellen Teilchen (Abb. 3). Wieviel dieser Wolke ein Streuexperiment auflöst, hängt von der verfügbaren Energie ab.

Eine ähnliche Situation trifft auch auf das Elektron zu, mit dem Unterschied, dass ein Elektron zuerst ein Photon oder Z-Boson abstrahlt, das dann virtuelle Teilchenpaare (Elektron-Positron-Paare, Quark-Antiquark-Paare usw.) erzeugen kann. Wie oben erwähnt, hängt die Lebensdauer der verschiedenen Fluktuationen vom Unterschied in Energie/Impuls zum jeweiligen Anfangszustand ab. Langlebige, beinahe reelle Photonen werden oft von weiteren virtuellen Teilchen begleitet. Hoch virtuelle Photonen hingegen haben eine sehr

kurze Lebensdauer und produzieren nur wenige Tochterteilchen. Zur weiteren Diskussion führen wir mit der Variable  $q$  den Viererimpuls des virtuellen Photons oder die Differenz im Viererimpuls zwischen dem Elektron vor und nach der Abstrahlung des Photons ein (Abb. 4):

$$q = k - k' .$$

Die Virtualität des Photons ist definiert als  $Q^2 = -q^2$  und ist eine positive Größe. Sie gibt an, wie sehr sich die Masse des ausgetauschten virtuellen Photons von der Masse null eines reellen Photons unterscheidet. Das Auflösungsvermögen bzw. die Größe des Photons  $b$  hängt von seiner Virtualität wie folgt ab:

$$b \text{ [fm]} \approx \hbar c / Q \approx 0,2 / Q \text{ [GeV]} . \quad (1)$$

Die Struktur des Elektrons in Bezug auf seine virtuellen Bestandteile lässt sich viel einfacher berechnen als die Struktur des Protons. Dies liegt daran, dass sich die anfänglichen Schritte der Strahlungskette  $e \rightarrow e\gamma, \gamma \rightarrow q\bar{q}$  oder  $\gamma \rightarrow e^+e^-$  usw. innerhalb der Quantenelektrodynamik (QED) berechnen lassen, die aufgrund der kleinen elektromagnetischen Kopplungsstärke,  $\alpha \approx 1/137$ , sehr genaue Störungsrechnungen erlaubt. Die Protonenstruktur erfordert hingegen Berechnungen im Rahmen der QCD, deren starke Kopplung Störungsrechnungen verhindert. Nur bei kleinen Abständen bzw. hohen Energien, wenn aufgrund der Eigenschaft der „asymptotischen Freiheit“ der QCD die starke Kopplung hinreichend klein wird, sind Störungsrechnungen überhaupt möglich. Der übliche Ansatz ist daher, diejenigen Teile auszuklammern, die sich gut berechnen lassen (die Abstrahlung von Photon, W- oder Z-Boson vom Elektron), und bisher nicht berechnen-

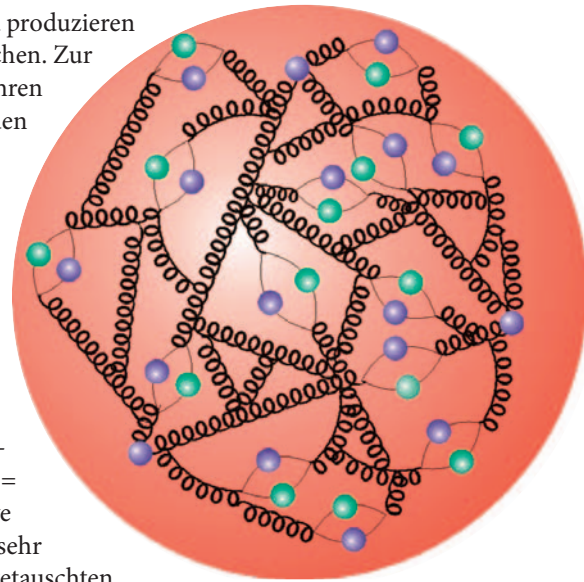


Abb. 3 Die drei Valenzquarks in einem Nukleon sind keine statischen Gebilde, sondern verwandeln sich in Wolken aus Quarks, Antiquarks (farbige Kreise) und Gluonen (Spiralen).

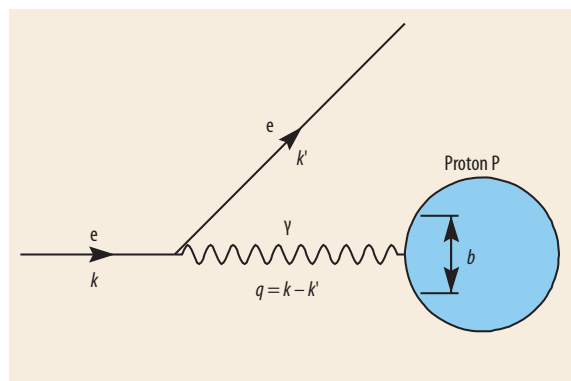


Abb. 4 Die kinematischen Größen, die zur Beschreibung der Elektron-Proton-Streuung verwendet werden, sind die Viererimpulse des Elektrons vor und nach der Abstrahlung eines virtuellen Photons,  $k$  und  $k'$ . Das virtuelle Photon hat daher den Viererimpuls  $q = k - k'$ . Das Proton wird vom Photon mit der Auflösung  $b$  untersucht.

1) In einem früheren Artikel des Physik Journal haben Robert Klanner und Thomas Schörner-Sadenius die HERA-Daten in Bezug auf Strukturfunktionen beschrieben [2].

2) transversal zur Flugrichtung des Photons

bare Teile in sog. „Strukturfunktionen“ zu parametrisieren und experimentell zu bestimmen. In diesem Artikel konzentrieren wir uns auf die Beschreibung der Wechselwirkungen in einer Raum-Zeit-Ansicht, mit dem Schwerpunkt auf den „wee“-Partonen.<sup>1)</sup>

Welche Quarks und Gluonen sichtbar sind, hängt von der verfügbaren Energie ab. Um dies zu sehen, betrachtet man die Elektron-Proton-Streuung im Ruhesystem des Protons. Wie oben diskutiert, kann man sich das Proton vorstellen als aus drei Clustern von virtuellen Teilchen bestehend, welche die bloßen Valenzquarks ausmachen. Wir werden hier nicht überlegen, wie diese Cluster räumlich gruppiert sein könnten; es gibt konkurrierende Vorstellungen zu diesem Thema. Falls das Elektron in seinem „nackten“ Zustand ist, wenn es das Proton kreuzt, dann passiert nichts. Falls das Elektron jedoch ein virtuelles Photon abstrahlt, kann dieses mit einem Parton im Proton wechselwirken.

An dieser Stelle führen wir die Bjorken-Variable  $x$  ein, benannt nach ihrem Erfinder und einem der Begründer unserer modernen Vorstellung von stark wechselwirkender Materie, James Bjorken:

$$x = Q^2 / (2E_\gamma M_P), \tag{2}$$

mit der Energie des Photons  $E_\gamma$  und der Masse des Protons  $M_P$ . Bei HERA kann  $E_\gamma$  bis zu 54000 GeV erreichen, sodass  $x \geq 10^{-5}$  bei  $Q^2 = 1 \text{ GeV}^2$ . Die Bjorken-Variable  $x$  beschreibt zusammen mit  $Q^2$  und den Energien des Elektrons und Protons ein Streueignis. Ihre Bedeutung hängt vom Bezugssystem ab: In einem Bezugssystem, in dem das Proton sehr schnell ist, beschreibt  $x$  den Impulsanteil des wechselwirkenden Partons im Proton. Im Ruhesystem des Protons hängt  $x$  jedoch mit der Lebensdauer von Photon-Fluktuationen zusammen, wie wir gleich sehen werden.

Aufgrund der elektromagnetischen Natur des Photons kann es nur mit Quarks oder Antiquarks, nicht

aber mit Gluonen wechselwirken. Daher ist entweder eine direkte Wechselwirkung mit einem Quark im Proton möglich, oder das Photon erzeugt eine Strahlungskette, und ein Parton dieser Kette interagiert mit einem der Quarks oder Gluonen im Proton. Die Lebensdauer z. B. eines Quark-Antiquark-Paars, das von dem virtuellen Photon erzeugt worden ist, lässt sich durch den Energieunterschied der Systeme vorher und nachher abschätzen. Während dieser Lebensdauer legt die Fluktuation eine Strecke, die sog. Kohärenzlänge, zurück, für die gemäß der Heisenbergschen Unschärferelation gilt:

$$l \text{ [fm]} \approx \hbar c / (2M_P x) \approx 0,1/x. \tag{3}$$

Für  $x < 0,1$  sind die Kohärenzlängen der Photon-Fluktuationen größer als das Ausmaß des Protons von ca. 1 fm. Bei großem  $Q^2$  kann  $x$  bei HERA nicht klein sein, und daher hat das Photon meistens keine oder kaum Zeit, um eine Strahlungskette zu bilden. Bei kleinerem  $Q^2$  und somit kleinerem  $x$  erzeugt das Photon hingegen eine umfangreiche Strahlungskette, die mit dem Proton wechselwirkt (Abb. 5). In einem Bezugssystem, in dem das Proton sehr schnell ist, würde ein Ereignis bei kleinem  $x$  mit einer langen Strahlungskette bzw. umfangreichen Quark-Gluon-Wolken im Proton einhergehen. In beiden Fällen haben wir eine lange Strahlungskette, in denen „wee“-Partonen auftauchen und eine wichtige Rolle spielen. Die Physik dahinter ist unabhängig davon, welches der Teilchen als Quelle der Kette betrachtet wird, und ist Teil unseres Verständnisses der Strahlung in der QCD.

### Messungen des Wirkungsquerschnitts bei HERA

Der Elektron-Proton-Wechselwirkungsquerschnitt lässt sich schreiben als ein Produkt aus dem Fluss  $\Gamma$  virtueller Photonen des Elektrons und dem Wirkungsquerschnitt  $\sigma^{ep}$  für die Wechselwirkung zwischen virtuellen Photonen und Protonen (vgl. Infokasten „Wirkungsquerschnitt“):

$$\sigma^{ep} = \Gamma \cdot \sigma^{\gamma p}.$$

Der Wirkungsquerschnitt  $\sigma^{\gamma p}$  hängt in erster Linie von  $Q^2$  ab (Abb. 6). Dies ist ein geometrischer Effekt – die effektive transversale<sup>2)</sup> Fläche des Photons ist proportional zu  $1/Q^2$ , wie aus Gl. 1 hervorgeht. Diese Fläche des Photons und seiner Wolke aus virtuellen Quarks und Gluonen nimmt mit abnehmendem  $Q^2$  zu, bis sie Dimensionen erreicht, die mit einem hadronischen Teilchen vergleichbar sind. An dieser Stelle hört die Fläche auf, sich mit  $Q^2$  zu verändern (zur Erinnerung:  $Q = 0,2 \text{ GeV}$  entspricht ca. 1 fm). Zusätzlich zu dem geometrischen Effekt spielt auch die sog. Farbtransparenz eine nicht unwesentliche Rolle: Aus Photonen mit zunehmendem  $Q^2$  entstehen virtuelle Quark-Antiquark-Paare, deren Entfernungen voneinander immer weiter schrumpfen, wodurch sie als Paar fast farbneutral werden und das Proton transparent wirkt. Dies führt zu einer abnehmenden Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung mit den Partonen des Protons.

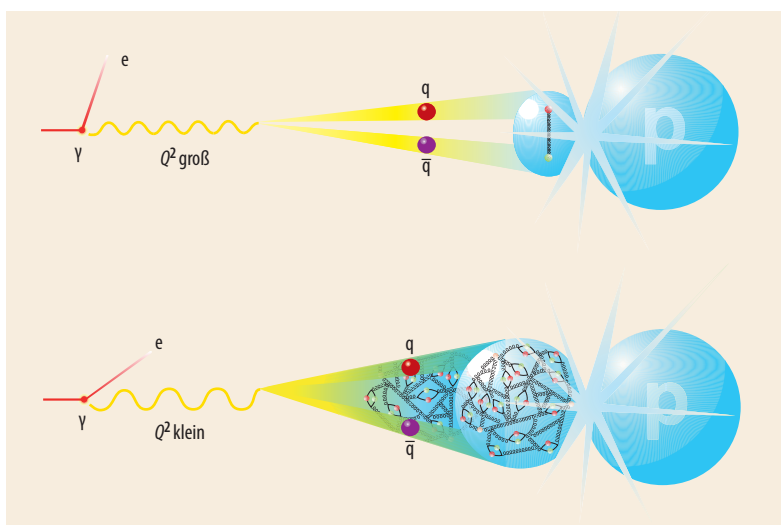


Abb. 5 Betrachtet man die Elektron-Proton-Streuung im Ruhesystem des Protons, so hat das Photon bei großem  $Q^2$  nur Zeit, gerade eben ein Quark-antiquark-Paar zu erzeugen, das mit dem

Proton wechselwirkt (oben), bei kleinerem  $Q^2$  entsteht hingegen eine umfangreiche Strahlungskette (unten). Das Proton spielt in seinem Ruhesystem die Rolle eines Streuzentrums.

Als Funktion der Kohärenzlänge  $l$  zeigen die Daten einen stetig ansteigenden Wirkungsquerschnitt. Die Steilheit dieses Anstiegs hängt von  $Q^2$  ab. Um diese Abhängigkeit deutlicher zu machen, wird der Wirkungsquerschnitt wie folgt parametrisiert:

$$\sigma^{pP} = a \cdot l^\lambda,$$

wobei  $a$  und  $\lambda$  Funktionen von  $Q^2$  sind. Bei den extrahierten Werten von  $\lambda$  fällt auf, dass diese für  $Q^2 \leq 1 \text{ GeV}^2$  mit dem Wert übereinstimmen, den man bei Hadron-Hadron-Streuxperimenten erwartet und auch gemessen hat (Abb. 7). Bei diesen niedrigen Werten von  $Q^2$  verhalten sich demnach Photonen wie Hadronen. In unserer Raum-Zeit-Ansicht der Wechselwirkungen wissen wir, dass bei niedrigem  $Q^2$  die Photon-Lebensdauer sehr lang ist. Das Photon hat dann genügend Zeit, sich „anzuziehen“, d. h. sich in eine Wolke aus Quarks und Gluonen zu verwandeln, ähnlich wie irgendein normales Hadron. Dies weist auf die Tatsache hin, dass die Quark-Gluon-Wolke eine eher universelle Natur hat, und bei ausreichend langen Zeiten unabhängig von dem „nackten“ Teilchen wird, das sie erzeugt hat. Bei höheren Werten von  $Q^2$  steigt der Wert von  $\lambda$  proportional zu  $\ln Q^2$  an. Wie können wir dieses Verhalten verstehen? Dass  $\lambda$  größer als Null ist, bedeutet, dass der Photon-Proton-Wirkungsquerschnitt, bei konstantem  $Q^2$ , mit zunehmender Kohärenzlänge ansteigt. Vladimir Gribov hat dies als ein Resultat des „diffusiven Wachstums“ der Quark-Gluon-Wolke erklärt, die das Photon umgibt [7]. Da das Photon ein Quark-Antiquark-Paar erzeugt und weitere virtuelle Teilchen entstehen, wächst die transversale Fläche des Systems. Der Radius der Quark-Gluon-Wolke sollte dabei, wie typischerweise bei einem diffusiven System, annähernd mit der Quadratwurzel der Zeit zunehmen, und zwar bis zu dem Moment, zu dem das Photon mit dem Proton wechselwirkt. Bei großem  $Q^2$ , d. h.

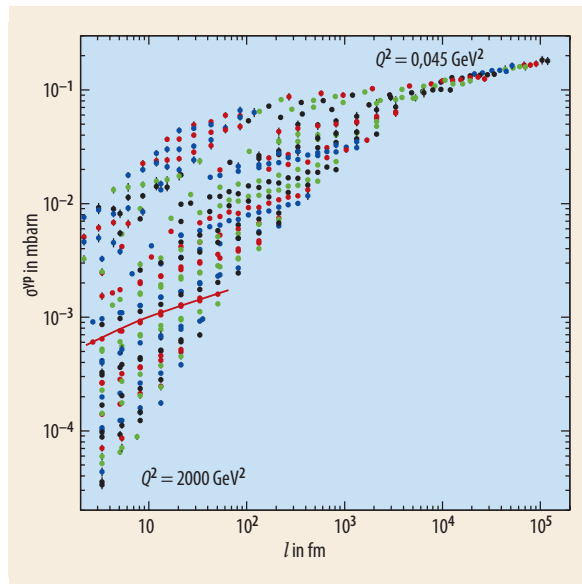


Abb. 6 Der Photon-Proton-Wirkungsquerschnitt als Funktion der Kohärenzlänge  $l$ . Die unterschiedlichen Farben repräsentieren verschiedene Bereiche von  $Q^2$  zwischen 0,045 und 2000  $\text{GeV}^2$  (exemplarisch durch die rote Linie angedeutet). Die Daten stammen von den Experimenten BCDMS [3] und E665 [4] sowie den HERA-Experimenten H1 [5] und ZEUS [6].

wenn das Photon anfangs sehr klein ist, verändert sich der Wirkungsquerschnitt aufgrund dieses Wachstum rapide. Bei kleinerem  $Q^2$  erscheint das Wachstum langsamer, weil der Wirkungsquerschnitt schon groß ist. Für  $Q^2 \approx 1 \text{ GeV}^2$  gibt es einen Übergang zu einem hadronischen Verhalten, und das Wachstum erreicht den Wert, der in Hadron-Hadron-Streuxperimenten zu sehen ist.

Zwei Faktoren beeinflussen demnach den Photon-Proton-Wirkungsquerschnitt: die effektive transversale Fläche des Photons mit seiner Wolke aus virtuellen Quarks und Gluonen, die von  $Q^2$  abhängt, und die Kohärenzlänge  $l$ , über die dieses System sich entwickeln konnte. Wenn  $l$  zunimmt, dehnt sich die Wolke transversal aus und wird dichter. Wie Abb. 6 zeigt, wächst  $\sigma^{pP}$  bei festem  $Q^2$  mit  $l^\lambda$ . Diese beiden Beobachtungen lassen sich zusammenfügen, wenn man den Photon-Proton-Wirkungsquerschnitt als eine Funktion von

$$\kappa = \frac{(l/R_p)^\lambda}{(Q^2 + M_p^2)}$$

darstellt. Dabei ist  $M_p$  die Masse des leichtesten Hadrons, das das Photon bilden kann. Da seine Ausdehnung proportional zur Compton-Wellenlänge und damit umgekehrt proportional zur Masse ist, erzeugt das leichteste Hadron die größtmögliche transversale Fläche. Die Kohärenzlänge  $l$  ist durch den Protonradius  $R_p$  dividiert, damit die Größe  $(l/R_p)^\lambda$  dimensionslos wird. Bei einer doppel-logarithmischen Darstellung von  $\sigma^{pP}$  als Funktion von  $\kappa$  ergibt sich eine wunderschöne lineare Abhängigkeit, sodass  $\sigma^{pP}$  nur von dieser einen Variable abhängt. Da diese eine geometrische Interpretation besitzt, ist dieses Verhalten des Wirkungsquerschnitts als „geometrisches Skalenverhalten“ bekannt. Eine neue Art von Skalenverhalten ist damit gefunden, die in der „wee“-Parton-Gegend einsetzt. Ein anderes Skalenverhalten, beobachtet bei höheren

### WIRKUNGSQUERSCHNITTE

Der Wirkungsquerschnitt hängt ab von der Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung bei einem Streuexperiment. Er entspricht der effektiven Fläche, die von einem Teilchen getroffen werden muss, um eine Wechselwirkung auszulösen. In der Teilchenphysik werden Wirkungsquerschnitte üblicherweise in Einheiten von barn gemessen, wobei  $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$ . Wenn z. B. zwei Protonen zusammenstoßen und sie sich dabei überschneiden, dann erwartet man als Wirkungsquerschnitt  $\sigma^{pp} \approx \pi \cdot (2R_p)^2 \approx 4\pi (0,9 \text{ fm})^2 \approx 0,1 \text{ barn}$ . Bei einer Schwerpunktsenergie von 1 TeV hat man  $\sigma^{pp} \approx 0,06 \text{ barn}$  gemessen, was verständlich ist, da das Proton am Rand nicht notwendigerweise völlig undurchlässig ist.

In diesem Artikel konzentrieren wir uns auf den Photon-Proton-Wirkungsquerschnitt, wobei der Photonstrahl von dem Elektronstrahl erzeugt wird. Man findet Wirkungsquerschnitte in der Größenordnung von 0,2 mbarn für  $Q^2 \leq 0,1 \text{ GeV}^2$ . Dies ist viel kleiner als  $\sigma^{pp}$ , da ein „Preis“ von der Größenordnung der elektromagnetischen Kopplungsstärke zu zahlen ist, damit das Photon ein Quark-Antiquark-Paar erzeugt. Der Elektron-Proton-Wirkungsquerschnitt ist noch ungefähr zwei Größenordnungen kleiner, da das Elektron erst einmal das Photon abstrahlen muss.

3) Eine Rapiditätslücke ist definiert als ein Intervall in der Rapidität, in dem keine Teilchen vorkommen.

4) Die Protonen von HERA haben eine Rapidität von etwa +8 und die Elektronen von etwa -11.

Werten von  $x$ , diente vor mehr als 30 Jahren als Beweis für Quarks. Worauf weist dieses neue Verhalten hin? Im letzten Abschnitt skizzieren wir einige Vorstellungen dazu. Doch zuvor beschreiben wir noch eine unerwartete Facette der HERA-Daten.

### Diffraktion und Confinement

Bei den großen Energien, mit denen das Elektron auf das Innere des als stationär betrachteten Protons trifft, ist zu erwarten, dass dieses zerstört wird und eine große Anzahl von Teilchen entstehen. Umso größer war die Überraschung, als HERA-Daten zeigten, dass bei kleinen  $x$ -Werten in etwa 10 % dieser Prozesse das Proton heil bleibt bzw. sich nach dem gewaltigen Stoß wieder aus den vorhandenen, irgendwie kohärent agierenden Quarks und Gluonen zusammensetzt und nur relativ wenige Teilchen in Richtung des Impulsübertrags  $Q^2$  entstehen. Man stelle sich vor, aus 10 % aller Frontalzusammenstöße würde ein Auto vollkommen intakt hervorgehen. Solche Prozesse, bei denen das Proton unter einem kleinen Winkel gestreut wird, heißen diffraktiv. Sie sind vom Typ



wobei  $X$  einen Endzustand mit relativ wenigen Hadronen repräsentiert.

Im Experiment zeigte sich die Diffraktion in Ereignissen mit großen Rapiditätslücken<sup>3)</sup> bei den erzeugten Hadronen. Die Rapidität eines Teilchens ist definiert als

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \frac{E+P_z}{E-P_z},$$

wobei  $E$  die Energie des Teilchens ist und  $P_z$  sein Impuls entlang der Bewegungsrichtung  $z$ . Im Gegensatz zu Geschwindigkeiten, für die das relativistische Ad-

ditionstheorem gilt, lassen sich Rapiditäten einfach addieren.<sup>4)</sup> Daher geben Rapiditätsdifferenzen einen vom Bezugssystem unabhängigen Unterschied von Teilchengeschwindigkeiten an.

In der QCD ist es aufgrund des Confinement nicht möglich, zwei farbige Teilchen zu trennen, ohne dass weitere Quarks und Gluonen aus dem Vakuum entstehen. Da die bei einer Wechselwirkung angestoßenen Quarks und Gluonen Quellen der beobachteten Teilchen in den Detektoren sind, sollte es daher keine großen Rapiditätslücken zwischen zwei beliebigen Partonen geben, da dies bedeuten würde, dass Partonen im Raum auseinanderlaufen können. Stattdessen sollten die Rapiditätslücken zwischen den erzeugten Teilchen exponentiell unterdrückt sein. In den frühesten HERA-Daten fanden sich jedoch Ereignisse, die eine große Rapiditätslücke bei den erzeugten Hadronen aufwiesen.

Die Ergebnisse von ZEUS und H1 zeigten darüber hinaus, dass der Bruchteil der diffraktiven Ereignisse für feste  $Q^2$  als Funktion der Kohärenzlänge  $l$  konstant ist (Abb. 8). Dieses sehr überraschende Ergebnis war von keiner Rechnung vorhergesehen worden und bleibt im Rahmen der QCD bislang unverstanden.

Bislang existieren verschiedene Modelle, die Teilaspekte der bisherigen Messungen beschreiben. Eines davon nimmt an, dass bei kleinem  $x$  ein farbloses Objekt mit dem Namen Pomeron existiert, benannt nach dem russischen Physiker Isaak Pomerantschuk. Wir stellen uns vor, dass dieses Pomeron aus einer farbneutralen Kombination von Quarks und Gluonen besteht, und zwar entweder im Proton oder im Photon. Die Daten legen nahe, dass das Pomeron zumeist aus Gluonen besteht. Da das Pomeron ein virtuelles, farbloses Objekt ist, koppelt es sich vom Rest der Quarks und Gluonen in der Wolke ab, und dies kann zu großen Rapiditätslücken zwischen den beobachteten Hadronen führen. Obwohl die genaue Natur des Pomerons mysteriös bleibt und es sich in QCD-Rechnungen bislang nicht finden lässt, ist eine Sache klar – wer die Natur der Materie verstehen möchte, kommt um ein Verständnis des Pomerons nicht umhin.

### Modelle der „wee“-Partonen

Inzwischen existieren zahlreiche theoretische Modelle, um die faszinierenden Ergebnisse von HERA zu den „wee“-Partonen zu beschreiben. Einige dieser Modelle haben weitreichende Konsequenzen.

Das sog. Farbdipolmodell führt unsere Betrachtung der Elektron-Proton-Wechselwirkungen im Ruhesystem des Protons weiter. Es behandelt das virtuelle Quark-Antiquark-Paar, das das Photon emittiert, als Farbdipol und macht die Annahme, dass der Wirkungsquerschnitt für die starke Wechselwirkung dieses Dipols mit dem Proton bei kleinem  $x$  konstant wird, d. h. das Phänomen der Sättigung aufweist [8]. Die wenigen Parameter des Dipolmodells lassen sich erfolgreich an den gemessenen totalen Wirkungsquerschnitt

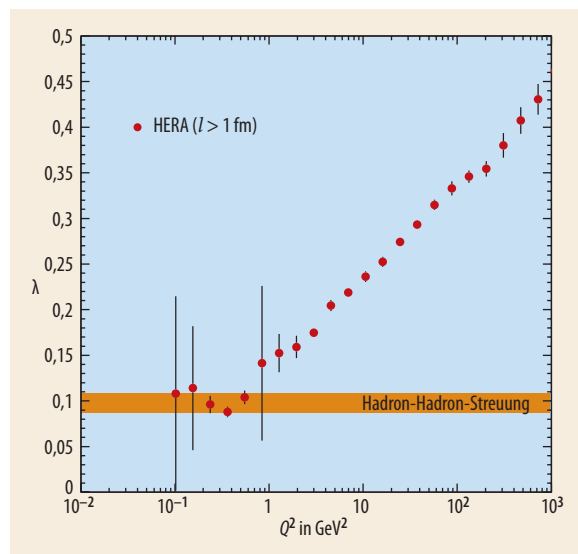


Abb. 7 Bei niedrigen Werten von  $Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$  verhalten sich Photonen ähnlich wie Hadronen, da die Potenz  $\lambda$  der Kohärenzlängenabhängigkeit  $l^\lambda$  des Photon-Proton-Wirkungsquerschnitts mit der Erwartung für die Hadron-Hadron-Streuung (orangenes Band) übereinstimmt. Die Daten wurden bei den Experimenten H1 und ZEUS für  $l > 1 \text{ fm}$  gemessen.

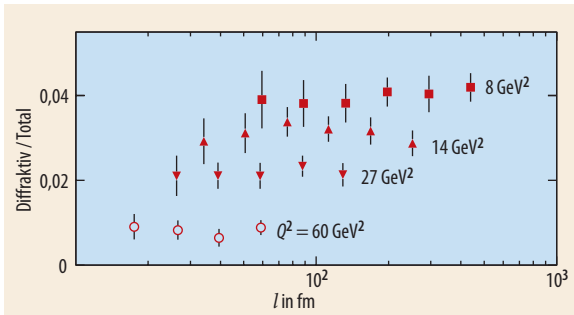


Abb. 8 Der Bruchteil diffraktiver Ereignisse bezogen auf die Gesamtzahl der Elektron-Proton-Streuereignisse hängt nicht von der Kohärenzlänge  $l$  ab. Gezeigt sind Daten für vier feste Werte zunehmend besserer Auflösung  $Q^2$  [6].

anpassen. Das Dipolmodell reproduziert dann das in Abb. 8 gezeigte Verhalten, enthält die Eigenschaft des geometrischen Skalenverhaltens und erlaubt eine einheitliche Beschreibung der Physik bei „kleinem  $x$ “.

Das Modell des Farb-Glas-Kondensats („color-glass-condensate“ oder kurz CGC) basiert auf dem Argument, dass bei den kleinsten Werten von  $x$  die Phasenraumdichte der Gluonen so hoch ist, dass Wechselwirkungen („Gluonrekombination“) weiteres Wachstum der Gluondichte begrenzen, d. h. es kommt zur Sättigung [9]. Da alle verfügbaren Quantenzustände besetzt werden, bilden die virtuellen Quarks und Gluonen ein Kondensat. Außerdem verhalten sie sich aufgrund der Zeitdilatation glasartig. Materie kann demnach bei den kleinsten Werten von  $x$  als ein Farb-Glas-Kondensat gesehen werden. Das CGC-Modell enthält die Eigenschaft des geometrischen Skalenverhaltens und scheint ein attraktiver Weg, um die Physik der „wee“-Partonen zu verstehen.<sup>5)</sup>

In dem Abschnitt über diffraktive Ereignisse haben wir gesehen, dass farbneutrale Cluster von Quarks und Gluonen bei einem großen Anteil der Elektron-Proton-Wechselwirkungen bei kleinem  $x$  eine wichtige Rolle spielen. Zwischen diesen farbneutralen Clustern und den Gravitonen besteht möglicherweise eine Verbindung! Juan Maldacenas Hypothese einer Dualität zwischen Stringtheorie und einer supersymmetrischen Version der QCD (die sog. AdS/CFT-Korrespondenz [10]) hat zu einer Vielzahl von Artikeln über die Verknüpfung von Pomeron und Graviton geführt. In der starken Wechselwirkung ist das Pomeron das Objekt, das bei der Streuung von Hadronen hoher Energie ausgetauscht wird. In der Stringtheorie steht das Pomeron mit dem Graviton über die AdS/CFT-Korrespondenz in Verbindung, und die Quanteneigenschaften des Gravitons sind verknüpft mit dem weiter oben diskutierten Wert von  $\lambda$  [11]. Messungen dieses Wertes bei sehr hohen Energien könnten offenbaren, ob die Verknüpfung von Pomeron und Graviton rein mathematisch bleibt oder ob sich darin interessante Physik verbirgt. Zugleich könnten sie ein Weg sein, um die Stringtheorie zu testen.<sup>6)</sup>

Zu den andauernden theoretischen Entwicklungen kommen derzeit ernsthafte Diskussionen über Ideen zu weiterführenden Experimentierprogrammen [12]

hinzu. Angesichts der beschriebenen interessanten, aber noch nicht hinreichend verstandenen Entwicklungen wäre zu erwarten, dass diese die Tragweite der HERA-Daten erweitern könnten und uns damit womöglich noch dichter an ein neues Paradigma im Verständnis der Materie heranführen.

**Acknowledgments**

One of us (A. C.) would like to thank Andrea Haftel and Franziska Rudert for their help in translating passages of this article.

**Literatur**

- [1] R. P. Feynman, Photon-Hadron Interactions, W. A. Benjamin Inc., New York (1972)
- [2] R. Klanner und T. Schörner-Sadenius, Physik Journal Mai 2006, S. 41
- [3] A. C. Benvenuti et al., BCDMS Collaboration, Phys. Lett. B **223**, 485 (1989)
- [4] M. R. Adams et al., E665 Collaboration, Phys. Rev. D **54**, 3006 (1996)
- [5] C. Adloff et al., H1 Collaboration, Nucl. Phys. B **497**, 3 (1997); Eur. Phys. J. C **13**, 609 (2000); Eur. Phys. J. C **19**, 269 (2001); Eur. Phys. J. C **21**, 33 (2001)
- [6] J. Breitweg et al., ZEUS Collaboration, Phys. Lett. B **487**, 53 (2000); Eur. Phys. J. C **11**, 427 (1999); Eur. Phys. J. C **6**, 43 (1999); S. Chekanov et al., Eur. Phys. J. C **21**, 443 (2001)
- [7] V. N. Gribov, arXiv:hep-ph/0006158
- [8] K. Golec-Biernat und M. Wüsthoff, Phys. Rev. D **59**, 014017 (1999); Phys. Rev. D **60**, 114023 (1999)
- [9] L. D. McLerran und R. Venugopalan, Phys. Rev. D **59**, 094002 (1999)
- [10] J. Maldacena, Adv. Theor. Math. Phys. **2**, 231 (1998)
- [11] R. C. Brower, J. Polchinski, M. J. Strassler und C. I. Tan, arXiv: hep-th/0603115; A. V. Kotikov, L. N. Lipatov, A. I. Onishchenko und V. N. Velizhanin, Phys. Lett. B **595**, 521 (2004) [Erratum-ibid. B **632**, 754 (2006)]
- [12] Proceedings of the 15th International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, DIS 2007, München, April 2007, hrsg. von G. Grindhammer und K. Sachs, in paper: DESY-PROC-2007-01 und online unter ATLANTIS Press: www.sciencewisepublishing.com/publications/DIS07

5) Dieses Modell erlaubt es auch, viele Merkmale der Schwer-Ionen-Streuxperimente vorherzusagen.

6) Weitere Informationen zu diesen aufregenden Entwicklungen sind in [12] zu finden.

**DIE AUTOREN**

**Allen Caldwell** hat an der Rice University Physik studiert und 1987 an der University of Wisconsin-Madison promoviert. Anschließend war der US-Amerikaner zunächst Post-Doc, später Assistant, Associate und Full Professor an der Columbia University, bevor er 2002 einem Ruf als Direktor an das Max-Planck-Institut für Physik in München folgte. Caldwell war über viele Jahre Mitglied der ZEUS-Kollaboration an HERA und 1997 und 1998 auch deren Sprecher.



**Günter Grindhammer** ist Österreicher und arbeitet seit fast 30 Jahren als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Physik in München. Er hat in Innsbruck und der Wesleyan University in Middletown (Connecticut, USA) studiert und 1972 an der Cornell University promoviert, bevor er 1972 als Post-Doc an die Universität Hamburg ging. Seither war er bei DESY Mitglied mehrerer Kollaborationen an den Beschleunigern DORIS, PETRA und HERA (H1-Experiment).

