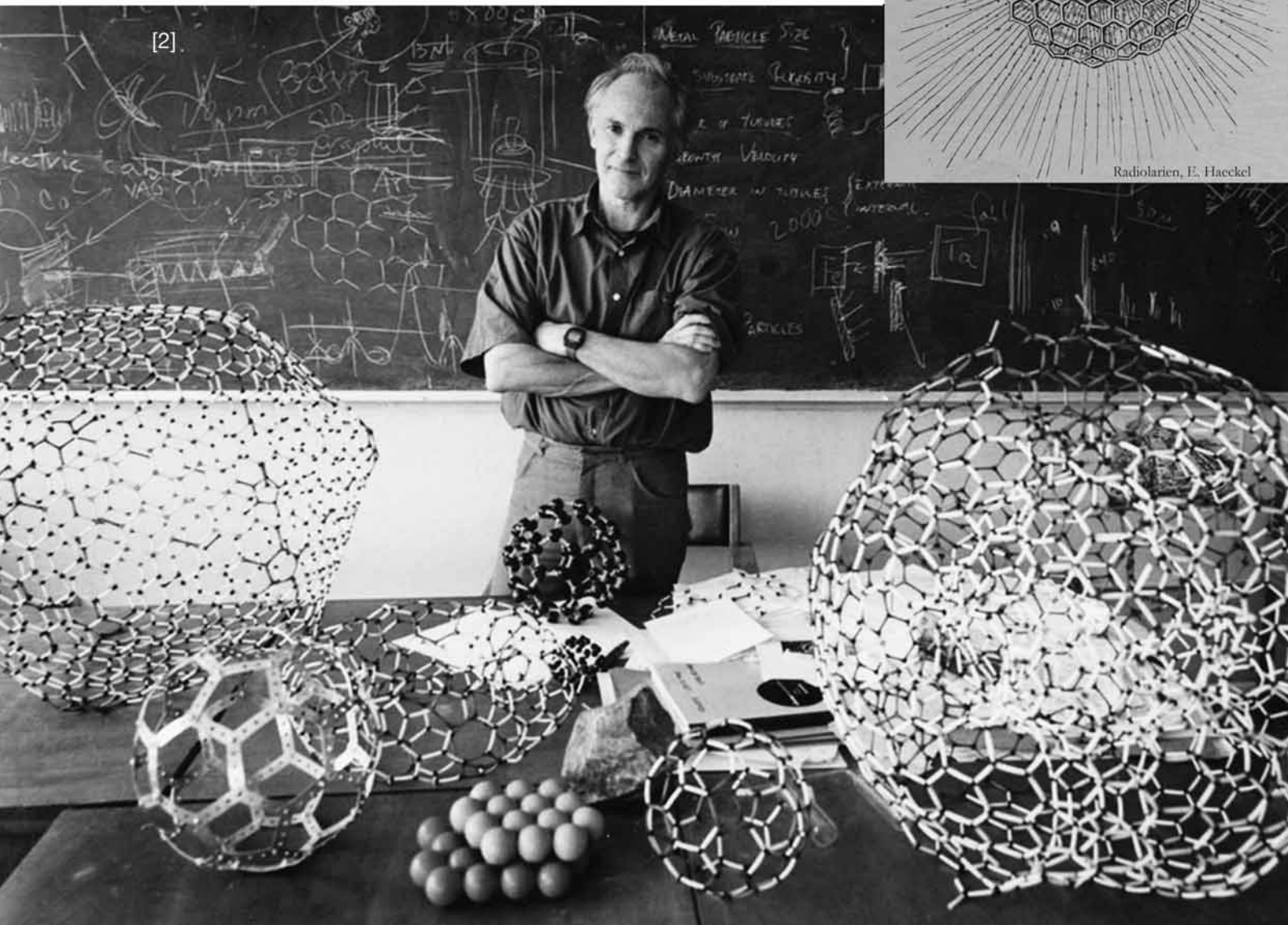
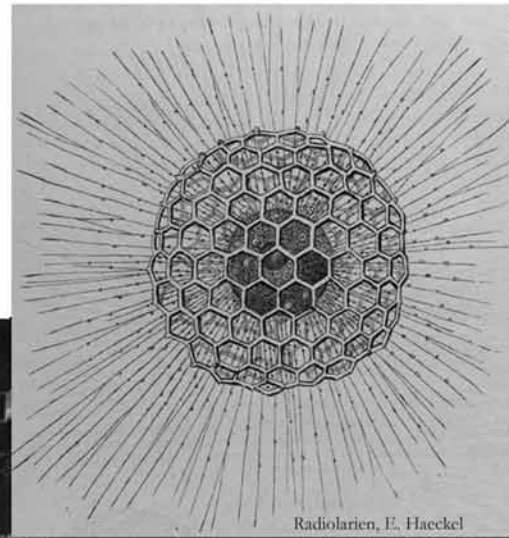


FULLERENE (Buckminster-Fullerene, Bucky-Ball, Fußballmolekül, C-60 Molekül) sind Kohlenstoffmoleküle, die in ihrer besonderen sich wölbenden ballartigen Form auf der Erde nicht vorkommen. Sie wurden jedoch im All bei der Untersuchung von Sternenstaub über ihre eigentümliche Brechung von Licht entdeckt. Nur im Labor unter spezifischen, das Weltall simulierenden Bedingungen, können Fullerene hergestellt werden. Die auf der Erde bekannten Verbindungen aus Kohlenstoff sind Graphit und Diamant. Graphit dehnt sich in seinem Molekülaufbau zweidimensional in der Ebene aus und setzt sich aus Schichten zusammen. Diamant hingegen ist dreidimensional aufgebaut und entspricht in seiner festgefügteten Gitterstruktur einem Kubus. In grober Näherung kann man sich die Fulleren-Bälle als Graphitkugeln vorstellen. Das bienenwabenartige Kristallgitter einer Graphit-Schicht besteht aus lauter aneinandergereihten Sechsecken. Wenn sie nur Sechsecke enthält, ist eine Schicht eben, doch wenn man einige Sechsecke durch Fünfecke ersetzt, beginnt sie sich zu wölben. Es stellt sich heraus, dass man 12 Fünfecke braucht, um eine geschlossene Struktur zu erhalten. Der kleinste und regelmäßige Fulleren-Ball besteht aus 12 Fünfecken und 20 Sechsecken. Er enthält insgesamt 60 Kohlenstoffatome und bildet das Molekül C-60. Der Name Fulleren soll an den Architekten Richard Buckminster Fuller [1] erinnern, der ähnliche Polyederkonstruktionen für seine Kuppelbauten verwandte. Wegen der Krümmung und wegen der geringen Abmessungen ist Fulleren nicht ganz so metallisch wie Graphit, es ist aber auch nicht so isolierend wie Diamant. Für die Synthese dieses Moleküls erhielten Kroto [2], Curl und Smalley 1996 den Nobelpreis für Chemie.



[1]

27.04.2010 Der tagesspiegel

### Fußball aus Kohlenstoff

... Alles begann mit der Beobachtung von Astrophysikern, die sich über ein seltsames Signal aus dem Weltraum wunderten: In den Tiefen des Alls schien der dort vorhandene Staub zwischen den Sternen ultraviolettes Licht mit einer Wellenlänge um 220 Nanometer zu verschlucken. Ähnliche Eigenschaften zeigte bei Laborversuchen auch Kohlenstaub. Der Staub im Kosmos sollte aller Wahrscheinlichkeit nach aus genau dieser Art Kohlenstoff bestehen. Das Problem war, dass Chemiker damals nur zwei Verbindungen aus Kohlenstoff kannten, Graphit und Diamant. Beide absorbierten UV-Licht anders, als der Sternenstaub es offensichtlich tat. Anscheinend fabrizierten die extrem niedrigen Temperaturen, das Fehlen jeglichen Luftdrucks und die hohe Strahlung im Weltraum aus Kohlenstoff eine Form, die es auf der Erde nicht gab. Theoretiker hatten ausgerechnet, dass es sich um Staubpartikel handeln könnte, die mit ungefähr zehn Nanometern (Millionstelmillimetern) rund 7000 Mal dünner als ein menschliches Haar sein müssten. Harry Kroto von der Universität Sussex in Brighton und seine amerikanischen Kollegen Robert Curl und Richard Smalley von der Rice-Universität in Houston versuchten Mitte der 80er Jahre, die Weltraumbedingungen nachzuahmen und die geheimnisvolle Verbindung herzustellen.

Mithilfe eines Laserstrahls verdampften sie Graphit zu einer Wolke aus Kohlenstoffatomen. Als sie diesen Dampf mit einem Puls aus Heliumgas schlagartig abkühlten, entstand Ruß, der unter anderem Substanzen enthielt, die zu der geheimnisvollen Struktur im Weltraum passten. Analysen zeigten, dass alle Verbindungen allein aus Kohlenstoff bestanden. Strukturen mit 60 Atomen waren mit Abstand am häufigsten, aber auch Strukturen mit 70 Atomen hatten die Forscher erzeugt. Aus Papier bastelte Kroto ein mögliches Modell des Moleküls mit 60 Kohlenstoffatomen. Am Ende hatte er ein Gebilde in seinen Händen, das aus 12 Fünfecken bestand, die mit 20 Sechsecken eine Art Kugel bildeten. Als er Mathematiker bat, dieses Gebilde näher anzuschauen, verrieten sie ihm den Trivialnamen dieser Struktur: „Wir wissen ja nicht, wie Sie zu diesem Ding sagen, aber wir nennen es einen Fußball!“

Die Forscher hatten damit eine völlig neue Form des Kohlenstoffs entdeckt. Jahre später, 1996, wurden sie dafür mit dem Chemie-Nobelpreis ausgezeichnet. Zunächst hatte die Entdeckung der Wissenschaftler eher akademischen Wert, denn mit der Lasermethode ließen sich nur sehr wenige Moleküle herstellen. Es sollte noch einige Zeit vergehen, bis es gelang, auch größere Mengen von Fullerenen zu erzeugen. Das gelang schließlich in Heidelberg. [...]

In jener Zeit, Ende der 80er Jahre, erforschten dort Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Kernphysik kosmischen Staub. Sie benutzten jedoch ein anderes Verfahren und erzeugten Kohlestaub mithilfe eines Lichtbogens. Niedriger Druck und niedrige Temperaturen simulierten die kosmischen Bedingungen, als dem Praktikanten Bernd Wagner im Herbst 1988 ein Missgeschick passierte und er versehentlich viel zu viel Helium in den Lichtbogen leitete. Obwohl der so entstandene hohe Druck von Weltraumbedingungen weit entfernt war, zog der Jungforscher das Experiment durch. Am Ende erhielt er kleine Mengen einer Substanz, die offenbar aus den seltsamen Kohlenstoff-Fußbällen bestand. Das Praktikum von Wagner war längst beendet, als Konstantinos Fostiropoulos 1990 in seiner Doktorarbeit dieses schiefgelaufene Experiment wieder aufgriff. Viele Monate lang variierte er die Bedingungen, bis er immer größere Mengen der Substanz erzeugte. [...]

Jetzt hatte Fostiropoulos tatsächlich reines Fulleren hergestellt. An einem Tag erhielt er damals bis zu einem Gramm der Substanz. Seit dieser Entdeckung vor 20 Jahren arbeiten Wissenschaftler an möglichen Anwendungen der runden Moleküle. Sie kommen beispielsweise als Katalysator infrage oder als Schmiermittel. Auch die Herstellung künstlicher Diamanten aus den runden Kohlenstoffmolekülen wird erforscht. Eine andere Anwendung verfolgt Konstantinos Fostiropoulos, der mittlerweile am Helmholtz-Zentrum für Materialien und Energie in Berlin forscht. Dort entwickelt der Wissenschaftler mithilfe der Fullerene Systeme, aus denen sogenannte organische Solarzellen gefertigt werden können. [...]



Fulleren-Forscher Fostiropoulos, Krätschmer: „Die Industrie wird mit dem Zeug Milliarden verdienen“

Patentstreit

## STÖRENFRIEDE IM STAUB

Von den käfigartigen Kohlenstoff-Kugeln, Fullere genannt, versprechen sich die Wissenschaftler eine „völlig neue Chemie“ – die Zahl möglicher Anwendungen ist Legion. Vor drei Jahren wurden die Fullere in einem deutschen Labor erstmals gezielt gezüchtet. Nun streiten die Erfinder um die Rechte an dem Patent.

**K**eine drei Jahre ist es her, da arbeiten die beiden am Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik noch einträchtig zusammen: der abgeklärte Forscher und sein pfiffiger Doktorand.

Jetzt feilschen und fetzen sie gegeneinander, „notfalls vor Gericht“. Es geht um Ruhm und um viel Geld:

▷ Konstatinos Fostiropoulos, 33, frisch promovierter Physiker, hat eine „Stinkwut im Bauch“; er sieht sich um „die Früchte meiner Arbeit betrogen“ und ist „finster entschlossen, für mein Recht an dem verdammten Patent zu kämpfen“.

▷ Wolfgang Krätschmer, 50, Astrophysiker, unter dessen Aufsicht Fostiropoulos seine Doktorarbeit schrieb, klagt, daß ihm „unsere böse Fehde ganz schön an die Nieren geht“, und erklärt: „Kampflos gebe ich das Patent nicht her.“

Das bizarre Objekt, um das es in dem Patentstreit der Forscher geht, sieht wie

ein millionenfach verkleinerter Fußball aus: ein künstlich im Labor geschaffenes, hohlkugelförmiges Molekül, zusammengesetzt aus 60 einzelnen Kohlenstoff-Atomen.

Schon Mitte der achtziger Jahre hatten Wissenschaftler in den USA die Existenz dieser – neben Diamant und Graphit – dritten Form reinen Kohlenstoffs bewiesen und deren kuriose äußere Gestalt vorhergesagt; was fehlte, war ein handfestes Verfahren, mit dem man die „Fullere“ in ausreichender Menge gewinnen konnte\*.

Im Herbst 1990 hatten Krätschmer und Fostiropoulos dann überraschend einen Durchbruch gemeldet. Zusammen mit dem US-Physiker Donald Huffman und dessen Assistenten Lowell Lamb präsentierten sie in dem britischen Wissenschaftsmagazin *Nature* das

\* Benannt nach dem mit freitragenden Kuppelkonstruktionen („Fuller-Domen“) bekanntgewordenen amerikanischen Architekten Richard Fuller.

lang ersehnte Molekül-Rezept – für die Fachwelt damals eine Sensation: Schon mit den simplen Mitteln eines Schullabors können die Kugeln aus Kohlenstoff hergestellt werden.

Wie Fostiropoulos erst später erfuhr, hatten Krätschmer und sein langjähriger Freund Huffman bereits einige Wochen vor der *Nature*-Veröffentlichung in den USA unter ihrem Namen ein Patent auf das bahnbrechende Herstellungsverfahren angemeldet.

Fostiropoulos wirft den beiden Wissenschaftlern nun geistigen Diebstahl vor: „Zu 90 Prozent basiert das Patent auf meiner Doktorarbeit.“

Krätschmer wiederum klagt seinen ehemaligen Doktoranden an: Fostiropoulos „trampelt auf dem geistigen Eigentum anderer herum“, der naßforschende Nachwuchsphysiker habe keineswegs die „zündende Idee“ für das Verfahren gehabt, „und nur die zählt für die Erteilung des Patents“. [...]

## Neue Dimension

Zukunftsaussichten der Fullere

**V**iele Fachleute, wie etwa der Chemie-Nobelpreisträger Donald Cram, gehen davon aus, daß aus den fußballförmigen Molekülen eine „völlig neue Chemie entstehen“ könnte. Sie erwarten von den Fullerenen eine chemische Revolution – ähnlich wie im letzten Jahrhundert, als die ringförmige Kohlenstoffverbindung Benzol zum Ausgangsstoff für Farben, Arzneimittel und Kunststoffe wurde.

Während der Benzolring aber nur ein flaches, scheibchenförmiges Molekül ist, füllen die hohlen Kohlenstoffkugeln den ganzen Raum aus; die Chemiker stoßen so in eine völlig neue Dimension vor.

Entsprechend unübersichtlich ist selbst für Experten inzwischen das Feld möglicher Anwendungen der Moleküle. So gelten Fullere unter anderem als ideales Schmiermittel für Präzisionsmaschinen; aber auch als Halb- und Supraleiter in der Mikroelektronik sind sie rekordverdächtig.

Weil die fußballförmigen Moleküle sogar mit mehr als 27 000 km/h gegen eine Metallwand geschossen werden können und unbeschadet wie Pingpongballen zurückprallen, sind sie auch für Anwendungen unter hohem Druck im Gespräch, etwa als eine Art molekulares Kugellager oder als ein Super-Raketentreibstoff. Zudem sollen sich aus den Hohlkugeln Transportbehälter für Arzneistoffe, federleichte Batterien und neuartige Kunststoffe fertigen lassen.

Aufgrund ihrer besonderen optischen Eigenschaften eignen sich die Riesenmoleküle offenbar hervorragend für den Bau farbiger Flachbildschirme. Auch als Schalter zukünftiger optischer Computer und als Grundstoff für leistungsstarke Solarzellen der übernächsten Generation könnten sie Anwendung finden.

Von der neuesten Masche berichteten kürzlich japanische Forscher: Sie füllten zylindrisch geformte Fullere mit Blei – und gewannen so die dünnsten jemals von Menschenhand geschaffenen Drähte: Ihr Durchmesser beträgt nur wenige Atome.

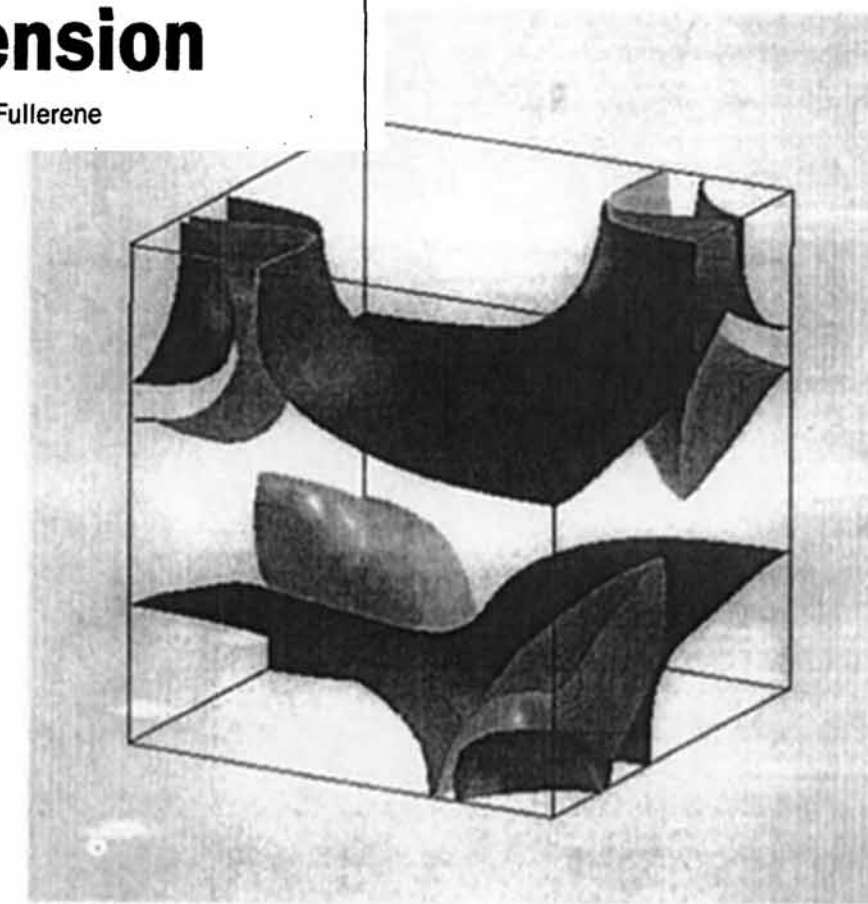


Figure 9.13 Theoretical Fermi surface of  $K_3C_{60}$ . Four tetrahedrally related corners of the cube correspond to Brillouin-zone centers in a repeated-zone scheme.

230

BUCKMINSTERFULLERENES

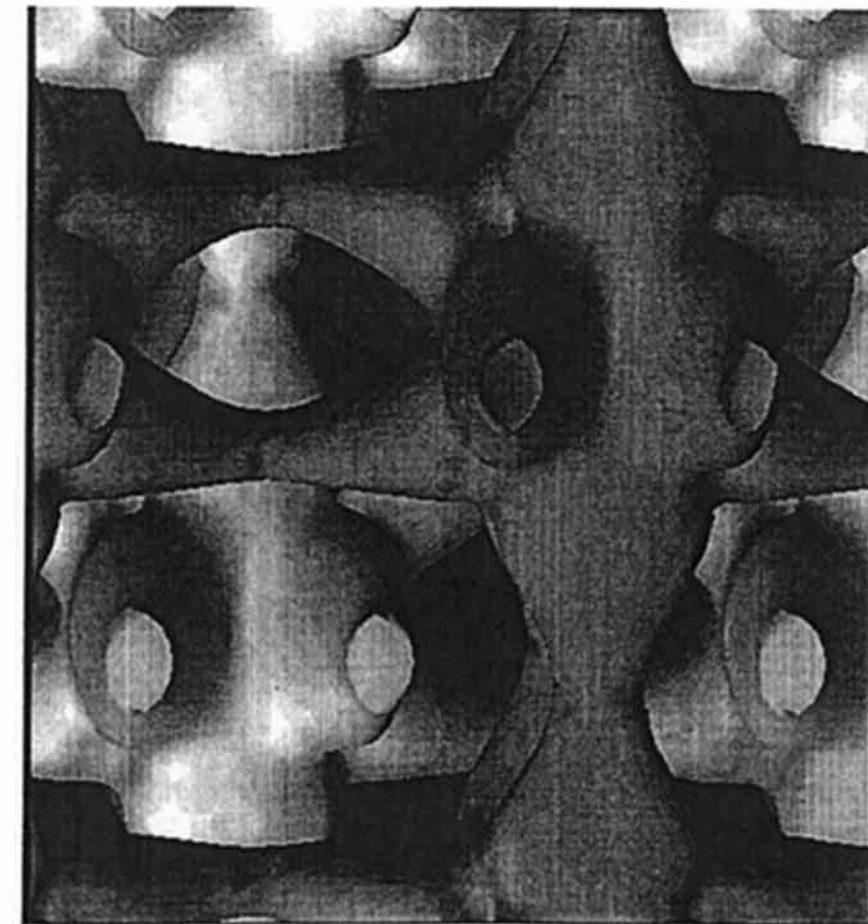


Figure 9.8 Repeated-zone representation for the second sheet of the  $K_3C_{60}$  Fermi surface. The two symmetry-equivalent pieces are multiply connected along Cartesian axes; although interpenetrating, they never touch.