

W

Deutscher Bundestag ■ Wissenschaftliche Dienste

**Das LHC-Projekt am CERN:
Gefahr durch Schwarze Löcher?**

Mögliche Umweltauswirkungen des neuen Beschleuniger-Projekts am CERN

- Ausarbeitung -

Daniel Lübbert

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages

Verfasser: Dr. Daniel Lübbert (Dipl.-Phys.)

Das LHC-Projekt am CERN: Gefahr durch Schwarze Löcher?

Mögliche Umweltauswirkungen des neuen Beschleuniger-Projekts am CERN

Ausarbeitung WD 8 - 3000 - 063/08

Abschluss der Arbeit: 30.06.2008; überarbeitete Fassung vom 05.09.2008

Fachbereich WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit,
Bildung und Forschung

Ausarbeitungen und andere Informationsangebote der Wissenschaftlichen Dienste geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Die Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste sind dazu bestimmt, Mitglieder des Deutschen Bundestages bei der Wahrnehmung des Mandats zu unterstützen. Der Deutsche Bundestag behält sich die Rechte der Veröffentlichung und Verbreitung vor. Beides bedarf der Zustimmung der Leitung der Abteilung W.

- **Zusammenfassung** -

Während die Wissenschaft der in Kürze bevorstehenden Inbetriebnahme des Large Hadron Collider (LHC), eines von Deutschland kofinanzierten neuen Großgeräts für die physikalische Grundlagenforschung am europäischen Forschungszentrum CERN bei Genf, mit Spannung und hohen Erwartungen entgegen blickt, werden in einigen Medien Stimmen laut, die mit dem LHC gravierende Befürchtungen verknüpfen. So wird von manchen prognostiziert, dass im Betrieb kleine Schwarze Löcher entstehen würden, die in der Folge wachsen und schließlich den gesamten Planeten Erde vernichten könnten.

Der vorliegende Beitrag erläutert zunächst die physikalischen Hintergründe und wissenschaftlichen Zielsetzungen der Experimente an dem geplanten Beschleuniger. Er widmet sich dann der allgemein-politischen Frage, welche neutralen Gremien und Institutionen potenzielle Umweltauswirkungen neuer Forschungsgeräte im Vorfeld der Inbetriebnahme systematisch prüfen. Ein stärker fachwissenschaftlich ausgerichteter Anhang geht im Einzelnen auf vier verschiedene Varianten von „Untergangsszenarien“ ein, erläutert die physikalischen Hintergründe und zugehörigen Theorien und unternimmt den Versuch, die tatsächliche Bedrohlichkeit der vier diskutierten Szenarien abzuschätzen. Im Ergebnis zeigt sich, dass aller Voraussicht nach keine konkrete Gefahr besteht.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einleitung	5
2. Elementarteilchenphysik und das Forschungszentrum CERN	6
2.1. Elementarteilchenphysik	6
2.1.1. Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik	7
2.2. Das LHC-Projekt am CERN	8
3. Fachliche und politische Prüfung von Umweltauswirkungen: Verfahren, Gremien, Präzedenzfälle	10
3.1. Interne Prüfungen am CERN	10
3.1.1. Struktur und Gremien des CERN	10
3.1.2. Umwelt- und Sicherheitsprüfungen am CERN	11
3.2. Externe Prüfungen	12
3.3. Präzedenzfälle für gestoppte Forschungsanlagen?	15
4. Fazit	18
5. Physikalischer Anhang: Konkrete Gefahr durch den LHC?	20
5.1. Schwarze Löcher	21
5.1.1. Erzeugung in Teilchenkollisionen	22
5.1.2. Schwarzschild-Radius	23
5.1.3. Verdampfung durch Hawking-Strahlung: Lebenszyklus von Schwarzen Löchern	24
5.1.4. Sonstige Szenarien	25
5.2. „Strangelets“	27
5.3. Magnetische Monopole	30
5.4. Neuer Vakuum-Zustand	33
6. Literatur	34

1. Einleitung

Am europäischen Forschungszentrum CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, dt.: Europäische Organisation für Kernforschung) bei Genf wird derzeit mit deutscher Beteiligung ein neues Großgerät für die Forschung zur Elementarteilchenphysik, der so genannte „Large Hadron Collider“ (LHC), gebaut. Im Vorfeld der Inbetriebnahme, die für Sommer/Herbst 2008 geplant ist, sind Befürchtungen¹ geäußert worden, die Anlage könne unvorhergesehene Umweltauswirkungen haben, die in der Planungsphase nicht ausreichend geprüft worden seien. Insbesondere könnten bei den Kollisionen zwischen Elementarteilchen mikroskopische Schwarze Löcher entstehen, die dann weiter wachsen und im Extremfall möglicherweise die gesamte Erde in sich „aufsaugen“ würden. Im US-Bundesstaat Hawaii wurde mit diesen Argumenten im März 2008 eine Klage² mit dem Ziel eingereicht, die Inbetriebnahme des LHC zu verhindern oder zumindest zu verzögern. Unabhängig von dem prozessualen Argument, dass das CERN als europäisches Gemeinschaftsprojekt mit Sitz in der Schweiz sicher nicht der Rechtsprechung eines US-Bezirksgerichts unterliegt, bleibt die inhaltliche Frage interessant, ob vom LHC-Projekt eine globale Gefahr ausgehen könnte.

Die folgende Darstellung erläutert zunächst die Methoden und Instrumente der Elementarteilchenphysik, die Struktur und Aufgabenstellung des CERN sowie die wissenschaftliche Zielsetzung des LHC-Projekts. Im folgenden Kapitel wird die politisch-institutionelle Frage erörtert, welche Gremien weltweit existieren, die für eine systematische Analyse dieser und ähnlicher Bedrohungsszenarien zuständig sein könnten. Die Darstellung schließt mit einer zusammenfassenden Gesamtschau der Gefährdungslage. Die darin enthaltenen Bewertungen der möglichen Gefährdungen durch Teilchenkollisionen beim LHC sind begründet durch fachliche Details, die in einem physikalischen Anhang offengelegt werden. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Frage, ob bei den Experimenten am LHC tatsächlich Schwarze Löcher entstehen können, und welche Gefahr möglicherweise von ihnen ausgeht. Ergänzend werden drei weitere, erheblich exotischere Gefährdungsszenarien (Strangelets, magnetische Monopole, neuer Vakuumzustand) kurz diskutiert.

1 Ausführliche Diskussionen im Internet z.B. unter <http://www.lhcconcerns.com/>.

2 Pressedarstellungen z.B. unter <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,544088,00.html> oder http://www.nytimes.com/2008/03/29/science/29collider.html?_r=2&oref=slogin&oref=slogin

2. Elementarteilchenphysik und das Forschungszentrum CERN

2.1. Elementarteilchenphysik

Atome bestehen aus einem Kern und einer Hülle. Während die in der Hülle zirkulierenden (elektrisch negativ geladenen) Elektronen nach bisherigem Kenntnisstand der Wissenschaft als praktisch punktförmige, „elementare“ Teilchen aufgefasst werden können, hat der (positiv geladene) Atomkern eine komplexe innere Struktur. Auf der einfachsten Betrachtungsebene besteht jeder Kern aus einer Kombination von Neutronen und Protonen. Die wissenschaftliche Untersuchung des Aufbaus der Kerne aus diesen beiden Teilchensorten sowie der Energieniveaus der Atomkerne, ihrer Stabilität und der Reaktionen, über die verschiedene Kerne ineinander umgewandelt werden können, sind Gegenstand der **Kernphysik**. Auf der Ebene darunter beschäftigt sich die Forschung auf dem Gebiet der **Elementarteilchenphysik**

mit der Frage, aus welchen noch kleineren Teilchen einzelne Protonen und Neutronen aufgebaut sind, welche Kräfte zwischen diesen Teilchen (Quarks, Gluonen u.a.) wirken und durch welche Reaktionen sie erzeugt und vernichtet werden oder miteinander wechselwirken können.

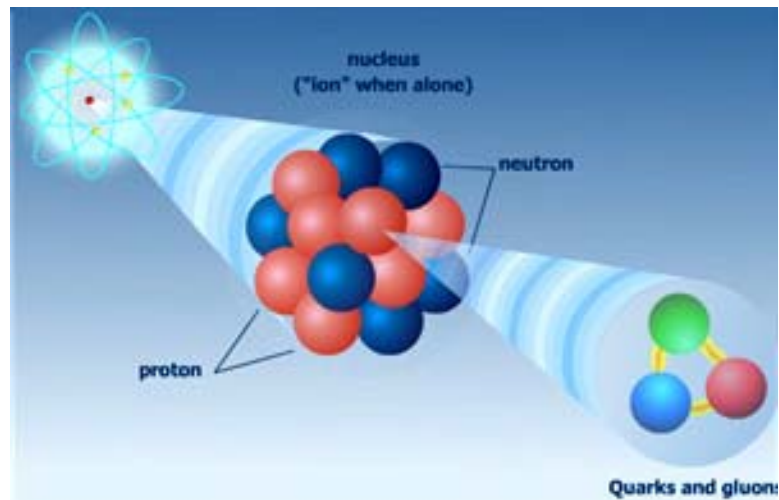


Abbildung 1: Ein Atom (oben links) besteht aus Hülle und Kern. Der Kern setzt sich aus Protonen und Neutronen zusammen. Jedes dieser „Nukleonen“ enthält wiederum drei Quarks („Valenz-Quarks“).

Quelle: <http://gabrielbcn.files.wordpress.com>.

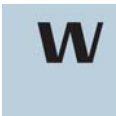
Die Untersuchungsobjekte der Elementarteilchenphysik sind erheblich kleiner als ein einzelnes Atom. Sie sind daher selbst in den modernsten Mikroskopen in keinem Fall direkt sichtbar. Deshalb haben Teilchenphysiker weltweit in den letzten Jahrzehnten eine andere Standardmethodik entwickelt, um die Eigenschaften von Elementarteilchen zu untersuchen: In großen **Beschleunigeranlagen** werden Strahlen von Elementarteilchen bestimmter Sorten (meist Elektronen und/oder Protonen, gelegentlich auch größere geladene Atomkerne (Ionen)) durch elektrische Felder auf sehr hohe Geschwindigkeiten gebracht. Dann lässt man zwei gegenläufige Strahlen miteinander kollidieren. Bei der Kollision wird z.B. ein Proton in seine Bestandteile zerrissen, die dann als „Trümmer“ in alle Richtungen zerstreut werden und in sehr empfindlichen Detektorsystemen, die um den Kollisi-

onspunkt herum angeordnet sind, nachgewiesen werden können. Ihre Verteilung erlaubt Rückschlüsse über die Struktur des Protons vor der Kollision. Außerdem kann die in den beiden kollidierenden Teilchen enthaltene Bewegungsenergie gemäß der Formel „ $E = m c^2$ “ auch in Masse umgewandelt werden und so zur Erzeugung völlig neuer Teilchen bei der Kollision führen. Aus der Art und Größe dieser neuen Teilchen, ihren Austrittsrichtungen und -geschwindigkeiten sowie aus der relativen Häufigkeit ihres jeweiligen Auftretens leiten Teilchenphysiker detaillierte Informationen über den gesamten „Zoo“ aller existierenden Elementarteilchen und deren jeweilige Eigenschaften sowie die zwischen ihnen wirkenden Kräfte ab.

2.1.1. Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik

Die in den letzten 4-5 Jahrzehnten gewonnenen Erkenntnisse der Elementarteilchenphysik lassen sich auf sehr kompakte Weise im so genannten „Standardmodell der Elementarteilchenphysik“ zusammenfassen. Dieses unterscheidet auf der einen Seite die zwischen Teilchen wirkenden Kräfte in vier fundamentale Naturkräfte (starke Kernkraft, schwache Kernkraft, elektro-magnetische Kraft, Gravitation). Auf der anderen Seite werden die subatomaren Teilchen in zwei große Gruppen eingeteilt: die Hadronen bzw. Quarks (die auch die starke Kernkraft spüren) und die sog. Leptonen (die nur den drei übrigen Kräften unterliegen – Beispiel: Elektron). Einzelne Quarks sind bisher nicht in der Natur beobachtet worden; vielmehr treten sie jeweils nur in Kombinationen von 2 oder 3 Quarks auf. Teilchen aus 2 Quarks, die sogenannten Mesonen, sind instabil, können bei Zerfällen oder Kollisionen entstehen und zerfallen in der Regel kurz danach in andere Teilchen. Kombinationen von 3 Quarks, die sogenannten Baryonen, können hingegen stabil sein und bilden die Bausteine der Atomkerne und aller natürlichen Materie. Beispiele sind das Proton (2 *up*-Quarks plus 1 *down*-Quark) und das Neutron (1 *up*-Quark plus 2 *down*-Quarks).

Die Gruppen der Quarks einerseits und der Leptonen andererseits enthalten jeweils 6 Teilchen, die sich in Paaren zu jeweils 3 Generationen (bzw. Familien) anordnen lassen (vgl. Abbildung 2). Die Mitglieder verschiedener Generationen haben in vielerlei Hinsicht identische Eigenschaften (z.B. gleiche elektrische Ladung), unterscheiden sich jedoch teils deutlich in ihrer Masse. So ist die Masse des *top*-Quarks grob 100.000-mal höher als die des leichtesten Quarks (*up*-Quark). Seit das lange gesuchte *top*-Quark 1995 experimentell nachgewiesen wurde, scheint das vom Standardmodell gezeichnete Bild des Teilchen-Zoos vervollständigt. Es ist geprägt von starker Symmetrie zwischen Leptonen und Quarks, zwischen den jeweils 3 Generationen, sowie zwischen Teilchen und den jeweils zugehörigen Antiteilchen.



Die Eigenschaften dieser Elementarteilchen sowie ihre Wechselwirkungen untereinander sind sehr genau vermessen und das Standardmodell experimentell vielfach bestätigt worden. Dennoch bleiben einige fundamentale Fragen der Elementarteilchenphysik weiterhin offen³: Gibt es eventuell neben den genannten vier Naturkräften weitere Kräfte („fünfte Kraft“)? Lassen sich alle bekannten Kräfte aus einem gemeinsamen Prinzip herleiten und auf eine einzige, universelle Wechselwirkung zurückführen (sog. Grand Unified Theory, GUT)? Warum gibt es deutlich mehr Materie als Antimaterie? Der Symmetrie des Standardmodells würde es eher entsprechen, wenn beide Arten im Universum in etwa gleichen Mengen vorkämen. Warum haben die verschiedenen Teilchen gerade die Massen, die experimentell gemessen werden? Warum haben sie überhaupt eine Masse und sind nicht alle masselos, wie z.B. die Lichtteilchen (Photonen)? Theorien, die viele andere Eigenschaften von Elementarteilchen korrekt beschreiben, scheitern an der Beantwortung dieser Frage. Erst dem britischen Physiker Peter Higgs und Kollegen gelang es 1964, einen Mechanismus vorzuschlagen, mit dem die Massen der Teilchen in der Theorie berücksichtigt werden können. Falls diese Theorie zutrifft, müsste es aber auch ein zugehöriges „Higgs-Teilchen“ (Higgs-Boson) geben, das seitdem gesucht wird, bisher aber nicht experimentell nachgewiesen werden konnte. Ziel vieler neuerer Beschleunigerprojekte ist es daher unter anderem, das Higgs-Teilchen zu finden.

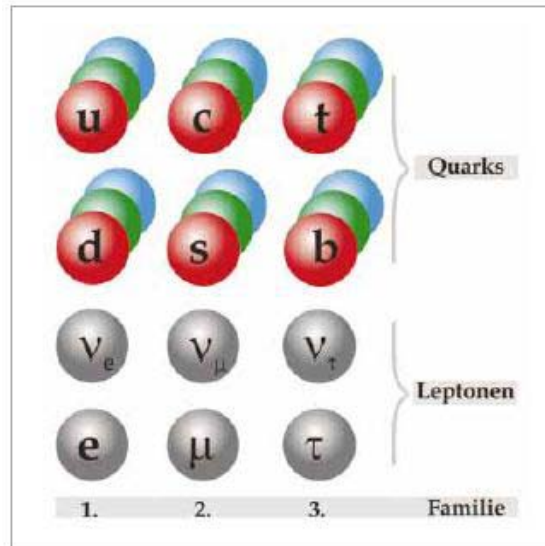


Abbildung 2: Quarks und Leptonen treten in 3 Generationen bzw. Familien auf (Quelle: KET 2002, S. 13).

Viele weitere Details zu den bisherigen Erkenntnissen und den zukünftigen Leitfragen der Elementarteilchenphysik sind in der Studie „Teilchenphysik in Deutschland – Status und Perspektiven“ (KET 2002) enthalten.

2.2. Das LHC-Projekt am CERN

Das Europäische Forschungszentrum CERN wurde Anfang der 1950er Jahre als Projekt der Völkerverständigung zur Bündelung der europäischen Ressourcen auf dem Gebiet der physikalischen Grundlagenforschung gegründet. Unter den 12 Gründungsmitgliedern war auch die Bundesrepublik Deutschland; die UNESCO spielte eine maßgebliche

3 siehe z.B. auch <http://www.bmbf.de/de/1431.php>

Rolle bei den Gründungsverhandlungen. Als Sitz wurde der Ort Meyrin im Schweizer Kanton Genf nahe der französischen Grenze ausgewählt. Entgegen seinem Namen beschäftigte sich das CERN schon sehr bald nicht mehr mit der Erforschung der Atomkerne, sondern mit den noch kleineren Teilchen, aus denen einzelne Atomkerne aufgebaut sind (Elementarteilchen). Der Betrieb des CERN dient also der reinen Grundlagenforschung, dem Streben nach Erkenntnis über die Struktur der Materie, den Aufbau der Atome aus Elementarteilchen und den Wechselwirkungen zwischen ihren Bestandteilen. Technologische Anwendungen zu entwickeln ist nicht das primäre Ziel des CERN, auch wenn im Laufe der Zeit vielfältige technische Innovationen als „Nebenprodukte“ aus dem CERN-Betrieb entstanden sind (Beispiel: World Wide Web, 1993).

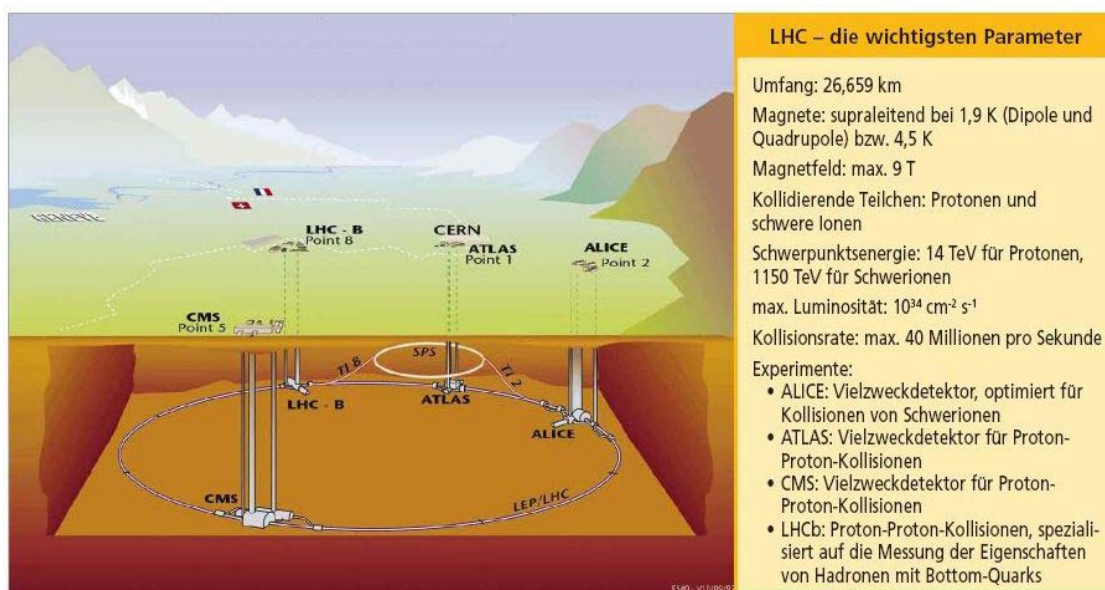


Abbildung 3: Skizze des LHC-Tunnels am CERN (Quelle: KET 2002, S. 31).

Der Erforschung der Struktur der Materie dient vor allem eine Reihe von Teilchenbeschleunigern, die seit 1957 am CERN gebaut und betrieben wurden. Der bisher größte war der „Large Electron-Positron Collider“ (LEP), in dem von 1989 bis 2000 Elektronen und Positronen mit Gesamtenergien bis zu 200 Giga-Elektronenvolt (GeV) aufeinander geschossen wurden. Für den LEP wurde ein 27 km langer kreisförmiger Tunnel am Genfer See im Gebiet zwischen den Schweizer Alpen und dem französischen Jura gegraben (vgl. Abbildung 3). Nachdem der LEP abgeschaltet wurde, wird in demselben Tunnel nun ein neuer Beschleuniger, der „Large Hadron Collider“ (LHC) gebaut, der in der zweiten Jahreshälfte 2008 in Betrieb genommen werden soll. In ihm sollen schwerere Teilchen (Protonen oder Blei-Ionen) bei noch wesentlich höheren Energien (14 Tera-Elektronenvolt für Protonen) miteinander zur Kollision gebracht werden.

3. Fachliche und politische Prüfung von Umweltauswirkungen: Verfahren, Gremien, Präzedenzfälle

Im Vorfeld der Realisierung des LHC-Projekts am CERN sind diverse Befürchtungen laut geworden, dass bei Inbetriebnahme grundsätzlich neue Effekte auftreten könnten, deren Folgen im Extremfall die Existenz des Globus und den Fortbestand der Menschheit in Frage stellen könnten. Daher ist zunächst die Frage von politischem Interesse, in welchen Verfahren diese und ähnliche Fragen bezüglich der Umweltauswirkungen von geplanten Großforschungsanlagen systematisch vorab diskutiert werden, und welche Gremien befugt wären, einen Baustopp notfalls auch gegen den Willen der Projektteilnehmer durchzusetzen. Das CERN stellt aus mehreren Gründen ein gut geeignetes Beispiel dar, anhand dessen diese (hypothetischen) Fragen gerade auch für zukünftige, möglicherweise ähnlich gelagerte Fälle diskutiert werden können.

3.1. Interne Prüfungen am CERN

3.1.1. Struktur und Gremien des CERN

Das CERN wurde in der ersten Hälfte der 1950er Jahre von einer Gruppe von 12 europäischen Staaten per Staatsvertrag gegründet. Bis heute ist die Zahl der Mitgliedsländer auf 20 angewachsen – darunter neben der Schweiz und Norwegen ausschließlich EU-Staaten. Die UNESCO, die in der Gründungsphase eine entscheidende Rolle als „Katalysator“ des Völkerverständigungs-Projekts spielte, hat weiterhin Beobachterstatus innerhalb der CERN-Organisation. Gleiches gilt für die außereuropäischen Länder USA, Russland, Japan, Indien, Türkei, Israel.

Der überwiegend europäische Charakter des CERN bedeutet jedoch nicht etwa, dass es eine Institution der Europäischen Union wäre. Auch die EU-Kommission hat nur Beobachterstatus. Das CERN unterliegt nicht der Rechtsaufsicht oder Organisationsgewalt der EU. Vielmehr hat es den Charakter einer internationalen Organisation und damit eine Art „Diplomatenstatus“. Keine einzelne nationale oder supranationale Regierung kann daher bestimmenden Einfluss auf die Entscheidungen des CERN ausüben. Allein im Rahmen der im Gründungsvertrag festgelegten Mitbestimmungsrechte können die Teilnehmerstaaten in den CERN-Gremien ihren Einfluss geltend machen.

Höchste Autorität in der Gremienstruktur⁴ des CERN kommt dem „CERN Council“ zu: Es trifft alle wichtigen Entscheidungen von übergreifender Bedeutung und trägt die Verantwortung für alle wissenschaftlichen, technischen und administrativen Aspekte des CERN-Betriebs. In ihm ist jeder Mitgliedsstaat mit zwei Personen vertreten, von denen eine die jeweilige nationale Regierung als Geldgeber, die andere die nationale Wissenschaftler-Gemeinde vertritt. Beide können gemeinsam nur eine Stimme abgeben.

4 <http://public.web.cern.ch/Public/en/About/Structure-en.html>

Entscheidungen werden in der Regel mit einfacher Mehrheit der Mitgliedstaaten getroffen, auch wenn sich der Council nach Möglichkeit um allgemeinen Konsens bemüht.

Selbst wenn nach den so dargestellten Abstimmungsregeln jeder Mitgliedstaat unabhängig von seinem Budget-Beitrag gleiche Rechte hat, kann davon ausgegangen werden, dass Deutschland als maßgeblicher Finanzier (ca. 20% Anteil am CERN-Budget⁵) im Council erheblichen Einfluss auf die grundlegenden Entscheidungen des CERN hat.

Für die Amtsperiode 2009-2013 wurde Prof. Rolf-Dieter Heuer (bisher Forschungsdirektor am DESY, Hamburg) zum designierten Generaldirektor des CERN gewählt. Damit wird nach Herwig Schopper (Amtszeit 1981-1988) zum zweiten Mal ein Deutscher als oberster Chef des CERN amtieren.

3.1.2. Umwelt- und Sicherheitsprüfungen am CERN

Dennoch spielen die Schweiz und – soweit sich die Zugänge zu Tunnelabschnitten und Detektorstandorten auf französischem Staatsgebiet befinden – auch Frankreich als Sitzländer eine gewisse Sonderrolle in Genehmigungsverfahren für neue Forschungsanlagen. Die nach Schweizer und/oder französischem Recht durchgeführten formellen Umweltverträglichkeitsprüfungen können sich jedoch nur auf „konventionelle“ Risiken und potenzielle Beeinträchtigungen der Anwohner (Emission von Luftschadstoffen, Abwasser, Abfall, Lärm, Belästigungen durch LKW-Verkehr in der Bauphase etc.) beziehen.

Die Einbeziehung einer formalisierten Prüfung weitergehender Gefahren in ein strukturiertes Verfahren gemäß nationalen Rechtsrahmen wäre schwierig. Die im Anhang (ab S. 20) einzeln diskutierten Bedrohungsszenarien sind einzigartig und in vieler Hinsicht spezifisch für ein konkretes Beschleunigerprojekt. Ihre Prüfung in einem formellen Verfahren zu kodifizieren erscheint daher auch nicht sinnvoll, da diese Szenarien vermutlich bei keinem zweiten Anlagenprojekt wieder identisch diskutiert werden müssen. Eine Einzelfallbetrachtung bleibt daher unvermeidlich.

Das CERN hat daher – über sein reguläres Umwelt-Management- und Informationssystem⁶ hinaus – nach Bekanntwerden der Bedenken gegen den LHC eine spezielle Kommission⁷ (LHC Safety Study Group) eingesetzt, um diese Bedenken auf ihre physikalische Plausibilität hin zu überprüfen. Mitglieder der Kommission und Koautoren ihres ersten Berichts (Blaizot et al. 2003) sind sechs Teilchenphysik-Experten aus verschiedenen europäischen Ländern, davon fünf von renommierten wissenschaftlichen Institutionen außerhalb des CERN.

5 vgl. z.B. <http://www.bmbf.de/de/1431.php>

6 vgl. <http://environmental-impact.web.cern.ch/environmental-impact/Welcome.html>

7 vgl. <http://public.web.cern.ch/Public/en/LHC/Safety-en.html>

In ihrem ersten Bericht (Blaziot et al. 2003) legt die Kommission die Ergebnisse ihrer Prüfungen dar und geht dabei auf die Szenarien „Schwarze Löcher“, „Strangelets“ und „magnetische Monopole“ ein. Sie kommt für alle drei Szenarien zu dem Schluss, dass keine Grundlage für eine realistische Bedrohung erkennbar sei („does not present a conceivable risk“ / „do not present any conceivable threat“). Der Bericht geht anhand von zahlreichen Formeln und detaillierten Berechnungen sehr in die fachliche Tiefe und dürfte daher, abgesehen von den klaren Schlussworten, nur für ein Expertenpublikum im Einzelnen nachvollziehbar sein.

Ein tragendes Argument ist der Vergleich mit kosmischer Strahlung (vgl. dazu den Anhang ab S. 20), die auf natürlichem Wege zu ähnlichen Kollisionen führt wie im LHC geplant, jedoch bekanntlich bisher keine katastrophalen Folgen ausgelöst hat. Außerdem wurde der Vergleich mit kosmischer Strahlung dahingehend kritisiert, dass nach Kollisionen in der Atomsphäre die Kollisionsprodukte mit hoher Geschwindigkeit weiterfliegen, die Erde sehr schnell durchqueren und evtl. nur deshalb keine Zeit hätten, katastrophale Folgen für den Globus auszulösen. Im LHC könne dies anders sein, da nach einer symmetrischen Kollision der Schwerpunkt der Kollisionsprodukte gegenüber dem Detektor (und der Erde) in Ruhe ist.

Wohl aus diesen beiden Gründen, und um alle zwischenzeitlich geäußerten Bedenken noch einmal intensiv prüfen zu lassen, hat sich das CERN entschlossen, eine neu formierte „LHC Safety Assessment Group“ (LSAG) mit einem zweiten Bericht zu beauftragen. Diesem soll auch kurze Zusammenfassungen für das allgemeine Publikum beigefügt werden. Das Erscheinen dieser Berichte war für das Frühjahr 2008 angekündigt, verzögerte sich dann aber. Auf Anfrage teilte das CERN im Mai 2008 mit, der Grund hierfür sei eine intensive wissenschaftliche Qualitätsprüfung (peer review) des bereits fertig gestellten Berichtsentwurfs, bei der externe Experten jede getroffene Aussage auf Gültigkeit und Robustheit überprüfen sollen. Die endgültige Veröffentlichung erfolgte im Juni 2008 über die Webseite des CERN. Der Bericht geht zusätzlich zu den drei bereits 2003 diskutierten Szenarien auch auf die vierte potenzielle Bedrohung (neues Vakuum, engl: vacuum bubbles) ein. Sein Inhalt bestätigt und verstärkt im Übrigen die Aussagen des Berichts von 2003, dass keinerlei Gefahr von LHC ausgehe (LSAG 2008).

3.2. Externe Prüfungen

Auch wenn die wissenschaftliche Kompetenz der Mitglieder der „LHC Safety study group“ kaum bezweifelt werden kann, so könnte ihnen dennoch wegen ihrer fachlichen Nähe und wegen des organisatorischen Zusammenhangs eine gewisse Nähe zum CERN unterstellt werden. Kritiker des LHC tun dies, halten das Gremium teils für befangen

und wünschen sich eine erneute, „neutrale“ Prüfung aller Vorwürfe durch eine externe Instanz.

So nachvollziehbar dieser Wunsch scheinen mag, so wird er doch allenfalls in Teilen realisierbar sein: In einem hochgradig spezialisierten Teilgebiet der Wissenschaft wie der Teilchenphysik, das zudem von besonders intensiver internationaler Kooperation geprägt ist, wird es weltweit kaum möglich sein, einen hochrangigen Experten zu finden, der nachweisbar keinerlei wissenschaftliche Verbindungen zum CERN hat. Gerade die experimentelle Elementarteilchenphysik kennt seit längerer Zeit einen Trend zu immer größeren und teureren Forschungsanlagen. Vor einigen Jahrzehnten existierte noch eine gewisse Anzahl nationaler Forschungseinrichtungen (z.B. DESY Hamburg), die allein mittels einer Finanzierung durch die jeweilige Regierung mit dem CERN mithalten konnten und in gewisser Weise in Konkurrenz zu ihm standen. Wissenschaftlern an diesen Einrichtungen wäre der Vorwurf einer positiven Befangenheit für CERN schwerer zu machen gewesen. Inzwischen jedoch sind die für weiteren Fortschritt in der Teilchenphysik notwendigen Beschleunigeranlagen so viel komplexer und aufwändiger geworden, dass sie nur noch in internationaler Zusammenarbeit finanzierbar scheinen. Das CERN hat damit zunehmend zumindest eine internationale Leuchtturm-Funktion, wenn nicht gar teilweise eine Monopolstellung in der Wissenschaft. Ein fachlich qualifizierter Wissenschaftler, der die mit LHC verbundenen Fragen kompetent und unabhängig beurteilen kann, ohne je am CERN gearbeitet oder zumindest mit CERN-Wissenschaftlern zusammen publiziert zu haben, dürfte daher schwer zu finden sein. Der Vorwurf der Befangenheit dürfte daher jeder denkbaren Kommission in gewissem Grade zu machen sein. Dies bedeutet nicht, dass er berechtigt wäre und die persönliche Integrität und wissenschaftliche Redlichkeit der Mitglieder tatsächlich angezweifelt werden sollte.

Ein externes Gremium, das die Vorwürfe gegen den LHC schon geprüft hätte oder fachlich kompetent prüfen könnte, ist bisher nicht bekannt. Falls ein solches Gremium trotz der inhärenten Befangenheits-Problematik zukünftig gebildet werden sollte, wäre vorstellbar, dass existierende Gremien der Technikfolgenabschätzung (TA) dabei eine koordinierende Rolle übernehmen könnten. Das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), das analoge Gremium beim Europäischen Parlament (STOA⁸) und das europäische Netzwerk der nationalen TA-Büros (ETAG⁹) beurteilen zwar bisher üblicherweise nur Trends und Risiken von Technologien, die für eine Massen-anwendung in industrieller Größenordnung entwickelt werden. Vorstellbar ist jedoch, dass sie auch mit einer Einzelfallbeurteilung und Risikoabschätzung für einzigartige Großforschungsanlagen beauftragt werden könnten. Die genannten Institutionen

8 vgl. http://www.europarl.europa.eu/stoa/default_en.htm

9 vgl. <http://www.itas.fzk.de/etag/>

dürften hinreichend Erfahrung mit der Vergabe von Unteraufträgen an individuelle Experten, mit einer Klärung von Befangenheitsfragen und mit einer Zusammenführung der Teilgutachten zu einem Gesamtbild haben, um auch zukünftige Aufträge zur „Forschungsfolgenabschätzung“ bewältigen zu können.

In der Wissenschaft existieren einige weitere Gremien, die sich auf internationaler Ebene um Fragen von zukünftigen Großforschungsanlagen kümmern. Ein Beispiel ist das „International Committee on Future Accelerators“¹⁰, in dem Beschleunigerphysiker aus verschiedenen Ländern zusammenarbeiten, um die aussichtsreichsten technologischen Entwicklungen zu identifizieren und Pläne und Finanzierungsmöglichkeiten für zukünftige Beschleunigerprojekte weltweit zu koordinieren. Dass dieses Gremium sich jedoch auch mit Risiken und Umweltauswirkungen von Beschleunigeranlagen beschäftigen würde, ist bisher nicht bekannt. Geographisch enger, aber thematisch weiter gefasst betreibt in Europa das „European Strategy Forum on Research Infrastructures“¹¹ (ESFRI) eine ähnliche Arbeit, indem es die Wünsche der Wissenschaftler-Gemeinde nach neuen Großforschungsanlagen zu koordinieren versucht und der Politik Vorschläge für eine Prioritätensetzung macht. Auch hier ist jedoch nicht bekannt, dass mögliche Umweltauswirkungen systematisch im Vorfeld geklärt würden.

In gänzlich anderem Zusammenhang beschäftigen sich dennoch auch Wissenschaftler ausdrücklich mit Bedrohungsszenarien und Umweltauswirkungen zukünftiger Großforschungsanlagen. Der Philosophie-Professor Nick Bostrom (Univ. Yale, USA / Oxford, GB) beschäftigt sich philosophisch mit der Frage, wie wahrscheinlich der Weltuntergang und wie groß die Bedrohung ist, die von einzelnen Großforschungsanlagen ausgehen könnte (Bostrom 2002). In einem in der Wissenschafts-Zeitschrift „Nature“ veröffentlichten Artikel (Tegmark, Bostrom 2005) vertritt er die Ansicht, das gängige Argument der kosmischen Strahlung sei unzutreffend. Dass die Erde trotz ständigen Beschusses durch kosmische Strahlung noch nicht untergegangen sei, zeige nicht generell die Ungefährlichkeit von Teilchenkollisionen, sondern könne auf Zufall bzw. einen „observation-selection-effect“ zurückzuführen sein. Es sei a priori nicht auszuschließen, dass in anderen Gegenden des Kosmos z.B. alle 1000 Jahre Planeten durch „kosmische Katastrophen“ vernichtet würden. Mit Hilfe veränderter, weniger restriktiver Annahmen, die einen „observation-selection-effect“ ausschließen, kommt Bostrom schließlich dennoch zu der Schlussfolgerung, dass eine Gefährdung durch Beschleunigerprojekte außerordentlich unwahrscheinlich sei.

Der Quantenphysiker Adrian Kent (Cambridge University, GB) vertritt in einem weiteren Artikel (Kent 2004) die Auffassung, dass Risikoabschätzungen für zukünftige Groß-

10 vgl. <http://www.fnal.gov/directorate/icfa/>

11 vgl. <http://cordis.europa.eu/esfri/>

forschungsanlagen generell unseriös, da zu unkritisch seien. Nach seiner Darstellung sei z.B. die Entscheidung für die Inbetriebnahme des Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) in den USA auf Grundlage einer Abschätzung gefallen, dass die zuvor diskutierten Katastrophen-Szenarien zu einem „statistisch gemittelten Erwartungswert für die zu erwartende Zahl der Todesfälle“ von „nur“ 120 geführt hätten. Dass solche statistischen Berechnungen in der Tat durchgeführt worden wären, ist ansonsten in der Literatur nicht überliefert; ihr Sinn wäre in der Tat stark anzuzweifeln. Kent kommt auf Grundlage seiner Sichtweise zu dem Schluss, dass die realen Risiken bisher massiv unterschätzt worden seien. Für die Zukunft erhebt er die Forderung, dass eine Obergrenze für maximal akzeptable Risiken im vorhinein quantitativ festgelegt werden müsse, bevor konkrete Großforschungs-Projekte im Einzelnen geprüft und auf ihr Risiko hin bewertet werden. Diese Prüfung müsse – so sein naheliegender weiterer Schluss – von einem neutralen Gremium fachlicher Experten durchgeführt werden. Zu der schwierigen Frage, wie gerade exotische Risiken verlässlich quantifiziert werden könnten, äußert er sich jedoch nicht im Detail.

3.3. Präzedenzfälle für gestoppte Forschungsanlagen?

Im Zusammenhang mit einer Risikobewertung von Großforschungsanlagen ist die Frage von Interesse, ob es Beispiele gibt, in denen Pläne zum Bau von Anlagen in einer späten Phase geändert oder gestoppt wurden.

Das bekannteste Beispiel für ein spät gestopptes Projekt ist der „Superconducting Supercollider“ (SSC), ein in den USA geplanter Teilchenbeschleuniger, der mit 87 km Tunnellänge und 30 TeV Teilchenenergie noch deutlich über die Dimensionen des gegenwärtig im Bau befindlichen LHC hinausgehen sollte. Das Konzept wurde in den 1980er Jahren entwickelt. 1988 fiel die Standortentscheidung zugunsten von Texas, der Bau begann 1991. Die Kostenschätzungen stiegen im Laufe der Zeit auf 12 Mrd. US-Dollar. Im Jahr 1993, als bereits 2 Mrd. US-Dollar verbaut worden waren, stoppte der amerikanische Kongress das Projekt und strich die restlichen Finanzmittel.

Über die ausschlaggebenden Gründe für den späten Stopp des Projekts existieren diverse Theorien (vgl. Jones 1994). Dazu beigetragen haben vermutlich die bedeutsamen Kostensteigerungen, der Wechsel zu einer restriktiveren Finanzpolitik, ein wirtschaftlicher Abschwung und der Wechsel in der US-Präsidentschaft zu Bill Clinton. Auch das Ende des kalten Krieges und der Wegfall der Notwendigkeit für die USA, ihre Technologie-Führerschaft anhand von Großprojekten zu demonstrieren, mag eine Rolle gespielt haben. Ökonomische Analysen weisen darüber hinaus auf grundlegende Probleme der Entscheidungsfindung im Föderalstaat hin (Basuchoudhary 1999): Vertreter vieler Bundesstaaten hätten im US-Kongress zunächst für das Projekt gestimmt, weil sie sich eine Standortentscheidung zugunsten des eigenen Staates erhofften. Nachdem die Ent-

scheidung für Texas gefallen war, hätten die enttäuschten Konkurrenten sich nach und nach ganz gegen das Projekt gewandt.

Während also vermutlich eine ganze Reihe von Gründen zum Stopp des SSC-Projekts beigetragen hat, dürften befürchtete Umweltauswirkungen nicht zu diesen Gründen zählen. Dass Katastrophenszenarien im Zusammenhang mit SSC diskutiert worden wären, ist nicht bekannt. Im Vorfeld eines weiteren US-Beschleunigerprojekts, des „Relativistic Heavy Ion Collider“ (RHIC) in Brookhaven bei New York, wurden hingegen ganz ähnliche Bedrohungsszenarien wie derzeit für den LHC geäußert und in der Öffentlichkeit intensiv diskutiert. Ein vom Brookhaven National Laboratory beauftragtes Komitee untersuchte daraufhin die Befürchtungen und kam zu dem Schluss, dass sie wissenschaftlich nicht haltbar seien (Jaffe, Busza, Wilczek, Sandweiss 2000). Der RHIC-Beschleuniger wurde daraufhin im Jahr 2000 in Betrieb genommen.

Ein weiteres Beispiel für ein möglicherweise endgültig gestopptes wissenschaftliches Großprojekt ist die Europäische Spallations-Neutronenquelle (ESS) (vgl. Lübbert 2006). Nachdem Pläne für den Bau einer Spallationsquelle für die Neutronenforschung als Alternative zu Forschungsreaktoren über mindestens 2 Jahrzehnte – vor allem an den Forschungszentren Jülich und Karlsruhe – entwickelt worden waren, wurde das Konzept im Jahr 2002 vom deutschen Wissenschaftsrat begutachtet. Dieser äußerte sich zurückhaltend, stufte die ESS in eine niedrige Prioritätsstufe ein und empfahl, anderen Projekten den Vorzug bei der Finanzierung zu geben. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) stellte das Projekt daraufhin im Jahr 2003 zurück und gab insbesondere nicht die (von den deutschen Neutronenforschern erhoffte) Finanzierungs-zusage ab. Die zuvor als sehr aussichtsreich eingeschätzte Bewerbung Deutschlands als Sitzland dieses europäischen Projekts war damit praktisch gescheitert, da vom Sitzland ein erheblicher Beitrag zur Finanzierung erwartet wird.

Das Vorhaben, eine Spallationsquelle in Europa zu bauen, ist damit formal noch nicht endgültig gestoppt. In der Wissenschaft wird weiter über die Vorzüge der Neutronenerzeugung per Spallation diskutiert, und das Interesse Großbritanniens, Schwedens, Spaniens und Ungarns an einer Bewerbung als Sitzland ist im Prinzip weiterhin vorhanden. Jedoch sind in den letzten Jahren keine Fortschritte auf dem Weg zu einer praktischen Umsetzung und Realisierung des ESS-Projekts mehr bekannt geworden.

Das Scheitern der oben genannten Forschungsprojekte kann in erster Linie auf ihre hohen Kosten zurückgeführt werden. Der Supercollider sollte mit 12 Milliarden US-Dollar eine finanzielle Dimension erreichen, die für Forschungsprojekte (zumindest in der Physik) zuvor ohne Beispiel war. Die Spallationsquelle hingegen ragte mit geschätzten Gesamtkosten von 1,5 Milliarden Euro finanziell zwar nicht wesentlich über eine ganze Reihe anderer, tatsächlich realisierter Großforschungsanlagen hinaus. Grund für die ab-

lehrende Stellungnahme des Wissenschaftsrats war hier vielmehr eine ungünstige Kosten-Nutzen-Relation; andere Großprojekte schienen bei nicht höheren Kosten einen höheren Nutzen in Form von innovativen Forschungsmöglichkeiten erkennen zu lassen.

Umweltbedenken waren in keinem dieser Fälle ausschlaggebend für die Ablehnung. Zwar gab es gerade beim ESS-Projekt in den 1980er Jahren Kritik wegen einer befürchteten Strahlenbelastung für Anwohner. In fast allen Fällen von Bauprojekten für Großforschungsanlagen äußern auch Anwohner Bedenken z.B. wegen Baulärms, wegen befürchteter seismischer Erschütterungen beim Tunnelbau oder wegen einer vermuteten späteren Strahlenbelastung. Diese Argumente werden von den Genehmigungsbehörden, gelegentlich auch von Gerichten geprüft. Es ist jedoch nicht bekannt, dass solche Auseinandersetzungen um Umweltauswirkungen schon einmal zum endgültigen Scheitern eines großen Forschungsprojekts geführt hätten.

4. Fazit

Die im Vorfeld der LHC-Inbetriebnahme geäußerten Befürchtungen sind durch vom CERN eingesetzte Expertenkommissionen geprüft worden. Es besteht keinerlei Anlass, an der Fachkompetenz und Ehrlichkeit der damit befassten Wissenschaftler zu zweifeln. Will man der – einer solchen Experten-Prüfung fast zwangsweise inhärenten – Befangenheitsproblematik gänzlich entgehen, so kommt man jedoch nicht umhin, sich mit den fachlichen Hintergründen der diskutierten Katastrophenszenarien näher auseinanderzusetzen.

Der physikalische Anhang, in dem dies durchgeführt wird, zeigt, dass die im Fall des LHC öffentlich diskutierten Bedrohungsszenarien allesamt einen hochgradig spekulativen Charakter haben. Die Möglichkeit, dass bei den Teilchenkollisionen am LHC kleine Schwarze Löcher (micro black holes) entstehen könnten, erscheint dabei nicht völlig ausgeschlossen. Viele Physiker setzen wissenschaftliche Hoffnungen auf eine solche einzigartige Möglichkeit, die Eigenschaften Schwarzer Löcher auf diesem Wege erstmals im Labor untersuchen zu können. Bis auf eine gemeinsame Beschreibung durch die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie wäre ein Vergleich mit den supermassiven Schwarzen Löchern im Weltraum jedoch irreführend und die Vorstellung vom „allesfressenden Monster“ völlig unzutreffend: Falls sie überhaupt erzeugt werden können, würden kleine Schwarze Löcher intensive Hawking-Strahlung abgeben und innerhalb kürzester Zeit wieder zerfallen. Selbst für die hochempfindlichen Nachweisgeräte der Teilchenphysiker wären sie deshalb voraussichtlich nur indirekt nachweisbar. Weiter wachsen könnten diese Schwarzen Löcher allenfalls durch das Anziehen weiterer Teilchen aus der unmittelbaren Umgebung. Dafür jedoch scheint ihre Masse erheblich zu gering bzw. ihr Schwarzschild-Radius um viele Größenordnungen zu klein. Der Begriff eines „kleinen Schwarzen Lochs“ ist daher eher als eine Chiffre für einen kurzlebigen Zwischenzustand zu verstehen, bei dem Elementarteilchen sich etwas näher kommen und etwas länger beieinander bleiben als sonst bei Teilchen-Kollisionen üblich.

Während das Szenario „kleine Schwarze Löcher“ also möglicherweise real, aber aller Voraussicht nach ungefährlich ist, ist die Situation im Fall der „Strangelets“ in gewisser Weise umgekehrt gelagert: Sie könnten zwar, falls sie existierten, eine Gefahr darstellen. Dass sie in Kollisionsexperimenten erzeugt werden können, ist nach Expertenmeinung jedoch extrem unwahrscheinlich. Ähnliches gilt auch für weitere, teils noch exotischere Modelle („magnetische Monopole“ bzw. „neuer Vakuumzustand“). Eine detaillierte Gefährdungsanalyse ist in diesen Fällen daher nicht seriös durchführbar. Rein qualitativ erscheint die Bedrohung, die von diesen hypothetischen Szenarien ausgeht, verschwindend gering.

Generell lassen sich immer Theorien konstruieren, nach denen exotische Teilchen existieren müssten, die in Folge ihrer Erzeugung beim LHC auch tatsächlich gefährlich werden könnten. Die Freiheit der physikalischen Theoriebildung ist in diesem Sinne nahezu unbegrenzt, vor allem soweit sich ihre Vorhersagen auf Energiebereiche beziehen, die bisher experimentell nicht zugänglich sind. Außer dem Wunsch vieler Forscher, fundamental neue Effekte zu entdecken, spricht jedoch bisher nur sehr wenig dafür, dass diese „gefährlichen“ Theorien tatsächlich eine zutreffende Beschreibung der physikalischen Realität liefern. Allen diskutierten Gefährdungs-Szenarien kann zudem das generelle Argument entgegen gehalten werden, dass die jeweilige Katastrophe vermutlich auch bei Kollisionen von Teilchen aus der kosmischen Strahlung mit der Erde auftreten könnte und deshalb, wäre sie real, schon vor langer Zeit zur Vernichtung der Erde geführt haben müsste.

Insgesamt ist die Gefährdung, die vom LHC ausgeht, daher zumindest als sehr gering einzuschätzen. Würde der Beschleuniger wegen eines vermeintlichen Restrisikos jedoch nicht in Betrieb genommen, so gäbe es auf absehbare Zeit keine vergleichbare Möglichkeit mehr, die genannten exotischen Theorien experimentell zu überprüfen und möglicherweise zu widerlegen.

5. Physikalischer Anhang: Konkrete Gefahr durch den LHC?

Die Befürchtungen bezüglich möglicher Gefährdungen durch den LHC haben ihren Niederschlag primär in den Medien und in vielfältigen Internet-Foren gefunden, haben jedoch auch eine wissenschaftliche Diskussion in der physikalischen Literatur ausgelöst. Es lassen sich mindestens vier unterschiedliche Katastrophen-Szenarien (engl.: doomsday scenarios) identifizieren: Schwarze Löcher, „Strangelets“, magnetische Monopole und ein „neuer Vakuumzustand“. Auch wenn jedes dieser Szenarien in gewisser Weise exotisch ist, ist doch jedes davon interessant genug, um im Folgenden einzeln dargestellt zu werden.

Zuvor lassen sich jedoch einige allgemeine Gegenargumente anführen, die jedem dieser Untergangs-Szenarien entgegengehalten werden können. Grundlage aller Arten von Befürchtungen ist, dass beim LHC Teilchen mit höherer Energie (zumindest pro Teilchen bzw. pro Masse) aufeinander geschossen werden sollen, als dies jemals zuvor in Beschleunigern der Fall war. Durch diese hohe Energie sollen angeblich bestimmte Reaktionen ausgelöst werden können, die bisher in der Natur allein aus Energiemangel nicht stattgefunden hätten. Das CERN hält dem entgegen, dass die Gesamtenergie der im LHC zirkulierenden Teilchenstrahlen nicht höher liege als die Bewegungsenergie eines normalen Hochgeschwindigkeitszuges bei einer moderaten Geschwindigkeit von 150 km/h.¹² Von den in den Strahlen enthaltenen Millionen Teilchen kollidieren bei jedem Umlauf nur einzelne; deren Energie ist nach CERN-Darstellung nicht höher als die einer fliegenden Mücke. Insofern könne keinesfalls von „bisher unerreichten“ Größenordnungen an Energie die Rede sein.

Auch wenn diese Vergleichszahlen richtig sein mögen und bildlich zur Beruhigung beitragen, so ist dennoch auch der Vorwurf nicht von der Hand zu weisen, dass diese Argumente die Tatsache ignorieren, dass die besagte Energiemenge beim LHC auf einen extrem kleinen Raumbereich konzentriert wird und allein durch diese bisher unerreichte Energie-Dichte neue Effekte auftreten könnten.

Schlagkräftiger erscheint daher ein zweites allgemeines Gegenargument: Die Erde ist ständig einem natürlichen Fluss von Teilchen ausgesetzt, die aus dem Weltraum mit hoher Geschwindigkeit auf die Erde treffen („kosmische Strahlung“). Bei den Kollisionen dieser hochenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung mit Luftmolekülen in der Erdatmosphäre werden teilweise erheblich höhere Energiemengen umgesetzt, als dies in einem Beschleuniger jemals technisch erreicht werden kann – und zwar ebenso konzentriert auf extrem kleine Raumbereiche. Dass die Erde bekanntlich bisher dennoch

12 Siehe <http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/Safety-en.html>, Abschnitt „TGVs and mosquitoes“.

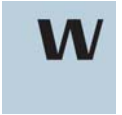
nicht untergegangen ist, könnte als Indiz dafür gewertet werden, dass selbst hochenergetische Teilchenkollisionen im Prinzip unproblematisch sind (vgl. Stenger 2007).

Ein drittes generelles Gegenargument lautet, dass seit gut 50 Jahren an vielen Orten der Welt immer wieder neue Beschleuniger in Betrieb genommen wurden und laufend höhere Energien erreichten. Spätestens beim Bau des „Relativistic Heavy Ion Collider“ (RHIC, New York) wurden gänzlich analoge Befürchtungen geäußert wie nun beim Bau des LHC am CERN (vgl. Dar, de Rújula, Heinz 1999). Nach intensiver Prüfung der Argumente wurde der RHIC dennoch in Betrieb genommen, ohne dass daraufhin die vorhergesagten Probleme eingetreten wären. Mit diesem Argument könnten auch die Befürchtungen im Zusammenhang mit dem LHC erheblich gedämpft werden. Allerdings behält die Vermutung, dass mit Überschreiten einer hypothetischen Energieschwelle grundsätzlich neue Effekte auftreten, dennoch ein geringes Maß an Plausibilität.

5.1. Schwarze Löcher

Schwarze Löcher werden von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorausgesagt. Die meisten Physiker sind überzeugt, dass sie im Weltraum tatsächlich vorkommen – z.B. im Zentrum von Galaxien als sog. supermassive Schwarze Löcher. Dennoch ist ihre Existenz bisher nicht völlig zweifelsfrei nachgewiesen. Die Schwierigkeit eines Nachweises liegt darin begründet, dass Schwarze Löcher nicht nur Materie, sondern auch alles Licht verschlucken und im Unterschied zu Sternen und Planeten weder selber leuchten noch einfallendes Licht reflektieren können. Sie sind daher mit keinem Teleskop beobachtbar. Die einzige unmittelbare Wirkung auf ihre Umgebung, anhand derer ihre Existenz indirekt nachweisbar ist, ist ihre gravitative Anziehungskraft. So werden Schwarze Löcher in der Astronomie dadurch identifiziert, dass ein anderer Stern in engem Abstand um ein offenbar sehr schweres Zentrum rotiert, ohne dass dieses Zentrum selbst sichtbar wäre.

Von der Theorie vorhergesagt wird weiterhin, dass Schwarze Löcher auf dem „üblichen“ Weg (durch Gravitations-Kollaps eines ausgebrannten Sterns) nur dann entstehen können, wenn ihre Masse ein Minimum übersteigt, das beim etwa 2-3fachen der Masse unserer Sonne liegt. Kleinere Schwarze Löcher können demnach im Weltraum nicht neu entstehen, da bei geringerer Masse die Anziehungskräfte durch Gravitation nicht groß genug werden, um die Festigkeit des Sternmaterials zu überwinden. Es wurde jedoch vielfach spekuliert, ob kleinere Schwarze Löcher noch aus Zeiten der Urknalls übrig geblieben sein (sog. primordiale Schwarze Löcher) oder aber durch Beschleuniger-Experimente künstlich erzeugt werden könnten.



5.1.1. Erzeugung in Teilchenkollisionen

Die Existenz Schwarzer Löcher ist wahrscheinlich, wenn auch nicht vollkommen sicher. Falls Schwarze Löcher im Weltall existieren, bedeutet das nicht zwingend, dass auch kleinere Schwarze Löcher erzeugbar sind. Denkbar ist im Prinzip, dass zwei im Beschleuniger aufeinander geschossene Teilchen aufgrund der hohen Energie ihre gegenseitige Abstoßung überwinden und sich so nahe kommen, dass schließlich die gravitative Anziehung überwiegt, sie dauerhaft verschmelzen und ein praktisch punktförmiges, durch Gravitation stabilisiertes Gebilde formen (engl.: micro black hole). Die physikalische Theorie sagt jedoch voraus, dass dies erst ab einer Mindestenergie möglich ist, die als Planck-Energie (bzw. Planck-Skala/Planck-Masse M_P) bekannt ist. Unklar bleibt in der Theorie zunächst, welchen Wert diese Planck-Energie genau hat. Die konventionelle Theorie lokalisiert ihn in einem sehr hohen Bereich (10^{19} Giga-Elektronenvolt), der mit keinem denkbaren Beschleuniger technisch erreichbar wäre. Im Rahmen der String-Theorie, die Elementarteilchen nicht als punktförmige Gebilde, sondern als eine Art Fäden in einem höherdimensionalen Raum auffasst, könnte die Planck-Skala deutlich niedriger liegen und im Extremfall in einen Energie-Bereich (einige Tera-Elektronenvolt) kommen, der mit dem LHC gerade erreichbar wäre (vgl. Dimopoulos und Landsberg 2001; Harris et al. 2005; Kanti 2008). Für diesen Fall wird vorausgesagt, dass der LHC Schwarze Löcher „in Serie“ produzieren würde (etwa eines pro Sekunde nach Cheung 2002).

Wissenschaftlich ungeklärt bleibt im Moment die Frage, ob String-Theorien eine zutreffende Beschreibung der physikalischen Realität zu liefern imstande sind. Viele Physiker halten sie für den bisher aussichtsreichsten Anwärter auf eine „endgültige“ Theorie (theory of everything, TOE), die in der Lage wäre, die noch existierende Unverträglichkeit zwischen Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantentheorie auszuräumen und beide zu vereinen. Diese Anhänger der String-Theorie halten die Existenz verborgener Dimensionen über die drei bekannten Raumrichtungen hinaus, die möglicherweise „aufgerollt“ und deshalb üblicherweise nicht beobachtbar sind, für plausibel. Falls man dies akzeptiert, erscheint auch die Erzeugung von Schwarzen Löchern beim LHC denkbar.

Andere Physiker kritisieren die String-Theorie dafür, dass sie ein reines formal-mathematisches Gedankengebäude sei, das keine experimentell überprüfbareren Vorhersagen macht. Sie sei nicht nur unplausibel, sondern geradezu unwissenschaftlich („not even wrong“). Wenn man in diesem Sinne die Existenz höherer Dimensionen des Raumes für eine Illusion hält, dann wäre in der Folge auch die Produktion Schwarzer Löcher im LHC mit relativ großer Sicherheit auszuschließen.

Die Frage, ob ein Auftreten von Schwarzen Löchern beim LHC überhaupt möglich wäre, kann daher in Ermangelung besserer Theorien im Vorfeld nicht genau geklärt werden. Eine künstliche Erzeugung an Beschleunigern hätte wissenschaftlich gesehen den großen Vorteil, dass damit einerseits Schwarze Löcher definitiv als existent nachgewiesen und ihre Eigenschaften erstmals im Labor untersucht werden könnten, womit auch die Allgemeine Relativitätstheorie ein weiteres Mal experimentell bestätigt wäre. Andererseits könnte gleichzeitig auch die Existenz höherer Raumdimensionen nachgewiesen und so die String-Theorie vom Vorwurf der Unwissenschaftlichkeit befreit werden.

Aus diesen Gründen ist es tatsächlich der Wunsch und die Hoffnung vieler Physiker, bei LHC kleine Schwarze Löcher künstlich erzeugen zu können. Auch wenn die Erfolgsaussichten für dieses Nebenziel des LHC-Projekts vermutlich als eher gering einzuschätzen sind, bleibt die interessante Frage zu klären, ob davon eine Gefahr für die Umwelt ausgeht.

5.1.2. Schwarzschild-Radius

Ein gewichtiges Argument gegen jegliche Gefahr entspringt aus der Formel für den sogenannten Schwarzschild-Radius eines Schwarzen Lochs. Dieser Radius gibt die minimale Größe an, auf die eine Masse komprimiert werden muss, um anschließend zu einem Schwarzen Loch kollabieren zu können. Für ein bereits existierendes Schwarzes Loch beschreibt der Schwarzschild-Radius gleichzeitig die minimale Entfernung, bei deren Unterschreitung kein Körper und kein Lichtstrahl einem Schwarzen Loch mehr entkommen kann. Eine imaginäre Kugeloberfläche um das Schwarze Loch herum mit einem Radius gemäß der Schwarzschild-Formel wird auch als „Ereignis-Horizont“ des Lochs bezeichnet. Ein außerhalb angesiedelter Beobachter kann keinerlei Information von jenseits dieses Horizonts, d.h. von innerhalb der Kugeloberfläche erhalten. Er wird aber ansonsten durch das Schwarze Loch nicht weiter beeinträchtigt, sondern von diesem nur ebenso per Gravitation angezogen, wie es auch bei gewöhnlichen astronomischen Objekten (z.B. Sternen) der Fall wäre. Verfügt er über einen entsprechenden Antrieb, so kann er der anziehenden Wirkung wieder entkommen, solange er dem Schwarzen Loch nicht zu nahe kommt. Erst wenn ein Objekt durch den Ereignishorizont hindurchtritt, ist es unwiederbringlich verloren.

Der Schwarzschild-Radius für ein Schwarzes Loch von der Masse der Erde liegt bei ca. 9 Millimetern. Erst wenn die gesamte Masse der Erde künstlich auf diese Größe zusammengestaucht würde, könnte sie zu einem Schwarzen Loch werden. Sie würde dann nur solche Objekte unwiderstehlich stark anziehen, die ihr auf diese Distanz nahe kommen. Für deutlich weiter entfernte Objekte würde sich praktisch kein Unterschied zum bisherigen Schwerefeld der Erde ergeben. Künstliche Satelliten ebenso wie der Mond würden beispielsweise weiterhin auf ihren bekannten Bahnen um den bisherigen Erd-

mittelpunkt rotieren (auch wenn ein Beobachter von der Mondoberfläche aus dort keinen blauen Planeten mehr erkennen würde, sondern nur ein Schwarzes Loch).

Gemäß der Schwarzschild-Formel ist die Größe des Schwarzschild-Radius proportional zur Masse des Schwarzen Lochs: je schwerer, desto ausgedehnter ist der Ereignishorizont. Dies bedeutet für den Fall zweier Elementarteilchen, die am LHC aufeinander geschossen werden, dass der Schwarzschild-Radius des hypothetisch dabei entstehenden Schwarzen Lochs um sehr viele Größenordnungen kleiner wäre als im Falle der Erde. Die genaue Rechnung ergibt für eine Masse, die der Teilchenenergie des LHC von 14 Tera-Elektronenvolt entspricht, einen Radius von $3,7 \cdot 10^{-50}$ Meter. Diese unmessbar kleine Größe ist erheblich kleiner als die meisten Elementarteilchen, und viele Millionen Mal kleiner als beispielsweise der Abstand zweier benachbarter Atomkerne in normaler Materie. Das so gebildete Schwarze Loch wäre also voraussichtlich nicht in der Lage, weitere Materie zu schlucken, weil es zu leicht wäre. Nichts könnte ihm auf natürlichem Wege nahe genug kommen, um in den Bereich seiner starken Anziehung zu gelangen. Allenfalls indem man danach mit dem Beschleuniger weitere Teilchen gezielt in das Schwarze Loch hinein schießen würde, könnte man dessen Masse eventuell weiter vergrößern.

5.1.3. Verdampfung durch Hawking-Strahlung: Lebenszyklus von Schwarzen Löchern

Ein Schwarzes Loch, das keine weitere Materie an sich zieht, bleibt nicht stabil, sondern muss im Laufe der Zeit schrumpfen und am Ende durch „Verdampfung“ (engl: evaporation) ganz verschwinden. Dies besagt die Theorie der Hawking-Strahlung, die vom britischen Physiker Stephen Hawking 1974 ausgearbeitet wurde. Sie kombiniert die allgemein-relativistische Beschreibung eines Schwarzen Lochs mit Elementen der Quantentheorie: Im luftleeren Raum in der Nähe des Ereignishorizonts eines Schwarzen Lochs bilden sich im Rahmen so genannter Vakuum-Fluktuationen ständig Paare aus Teilchen und Antiteilchen, die sich kurz danach wieder gegenseitig vernichten und in reine Energie zurückwandeln. Es ist jedoch möglich, dass ein Paar gerade so entsteht, dass der eine Partner durch den Ereignishorizont des nahe gelegenen Schwarzen Lochs durchtritt und in diesem verschwindet, während der andere Partner in entgegengesetzter Richtung entweichen kann. Aus einer Vielzahl solcher einzelnen Zufälle entsteht im Mittel ein Fluss von Teilchen, der vom Ereignishorizont aus nach außen gerichtet ist und dem Schwarzen Loch auf Dauer Energie entzieht.

Einige Details dieses Prozesses sind noch Gegenstand von Diskussionen unter Theoretikern, was auch daran liegt, dass Allgemeine Relativitätstheorie und Quantentheorie, die in diesem Falle beide eine Rolle spielen, bisher teilweise unvereinbar sind. Ein gemeinsamer theoretischer Rahmen, in dem beide miteinander kombiniert werden könnten

(Quantengravitation), wird weiterhin gesucht. Experimentell nachgewiesen ist die Hawking-Strahlung bis heute nicht. Dies ist maßgeblich darauf zurückzuführen, dass Schwarze Löcher bisher nicht im Labor untersucht werden konnten. Aus allen diesen Gründen ist die Theorie der Hawking-Strahlung als zwar sehr plausibel, aber nicht vollkommen abgesichert einzuschätzen.

Akzeptiert man sie dennoch als gültig, so besagt die aus ihr folgende Formel, dass die Rest-Lebensdauer eines schrumpfenden Schwarzen Lochs, das keine neue Materie mehr aufsaugen kann, proportional zur dritten Potenz seiner verbleibenden Masse ist. Große Schwarze Löcher schrumpfen demnach nur sehr langsam und strahlen sehr wenig Energie ab – auch aus diesem Grund ist die Hawking-Strahlung im Weltraum schwer nachweisbar. Ist ein Schwarzes Loch jedoch bereits relativ klein, so schrumpft es immer schneller weiter zusammen und löst sich schließlich in einer Art „Feuerwerk“ von Hawking-Strahlung vollständig auf. Die quantitative Rechnung für den Fall eines Schwarzen Lochs, wie es beim LHC eventuell entstehen könnte, ergibt eine erwartete Lebensdauer in der Größenordnung von 10^{-85} Sekunden. Diese Zeitspanne ist erheblich kürzer als eine einzelne Schwingungsperiode einer Atomuhr; sie könnte mit keinem existierenden Messgerät jemals gemessen werden. Ein vermeintlich von dem Schwarzen Loch angezogenes äußeres Objekt könnte sich in dieser Zeit nicht einmal um einen Atomdurchmesser darauf zubewegen, bevor die Gefahr schon wieder gebannt wäre.

5.1.4. Sonstige Szenarien

Das bisher entwickelte, „ungefährliche“ Bild eines kleinen Schwarzen Lochs kann unter abweichenden theoretischen Annahmen gewisse Veränderungen erfahren. So führen beispielsweise theoretische Modelle, in denen dem Raum mehr als die bekannten drei Dimensionen zugeschrieben werden, zu veränderten Voraussagen für die Lebensdauer Schwarzer Löcher (vgl. Kanti 2008). Im Falle des LHC könnte die Lebensdauer nach diesen Theorien bei ca. 10^{-26} Sekunden liegen – deutlich länger als 10^{-85} sec, aber noch immer unvorstellbar kurz, so dass selbst in diesem Falle keine diesbezügliche Gefahr vom LHC ausgehen könnte.

Besonders interessant scheint die Frage, wie das Gesamtbild sich verändern würde, falls sich herausstellen sollte, dass Hawking-Strahlung trotz aller theoretischen Vorhersagen nicht real existiert. In diesem Fall könnte selbst ein kleines Schwarzes Loch nicht schrumpfen, sondern hätte praktisch unbegrenzt Zeit, um weitere Materie zu schlucken. Jedoch behielte auch unter diesen Bedingungen das Argument des zu kleinen Schwarzschild-Radius Gültigkeit. Ein hypothetisches, beim LHC erzeugtes Schwarzes Loch könnte demnach zwar nicht verdampfen, aber aller Voraussicht nach auch nicht weiter wachsen, da keine weitere Materie nahe genug an es herankommen könnte, um verschluckt zu werden.

Auf ähnlichen Überlegungen basiert ein Bedrohungsszenario, das im Sommer 2008 einige Aufmerksamkeit in den deutschen Medien erfahren hat: Der Tübinger Biochemiker Otto E. Rössler bezweifelt die Existenz von Hawking-Strahlung. Die theoretische Herleitung durch Hawking enthält nach Rösslers Darstellung einen Fehler. Dieser könne allein durch Verwendung der ursprünglichen Gleichungen der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie korrigiert werden. Seiner Meinung nach würden demnach die evtl. am LHC erzeugten Schwarzen Löcher nicht zerfallen, sondern zunächst langsam, dann immer schneller wachsen und nach wenigen Jahren zur Zerstörung des Globus führen¹³.

Die diesbezügliche Kritik wurde daraufhin vom deutschen „Komitee für Elementarteilchenphysik (KET)“, der Vertretung der auf dem Gebiet der Elementarteilchenphysik arbeitenden deutschen Physiker, geprüft¹⁴. In einer fachlichen Stellungnahme führt H. Nicolai, Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam, die Rösslersche Argumentation auf „elementare Missverständnisse“ der Allgemeinen Relativitätstheorie zurück¹⁵. Darüber hinaus weist das KET darauf hin, dass die Katastrophen-Theorie inkonsistent sei: Falls der Zerfall Schwarzer Löcher aus den von Rössler angeführten Gründen unmöglich wäre, dann könnten sie aus den gleichen Gründen am LHC auch gar nicht erst erzeugt werden.

13 Vgl. „Das jüngste Gerücht“, Süddeutsche Zeitung vom 6.8.2008, S. 1.

14 Vgl. http://www.ketweb.de/pressemitteilungen/20080801_PM_Der_LHC_ist_sicher.pdf

15 Vgl. http://www.ketweb.de/stellungnahmen/20080730_Antwort_von_Prof_Dr_Hermann_Nicolai_und_Prof_Dr_Domenico_Giulini.pdf

5.2. „Strangelets“

Im Standardmodell der Elementarteilchenphysik existieren 6 verschiedene Quarks, von denen nur die zwei leichtesten (*up* und *down*) als Bausteine in der natürlich existierenden Materie vorkommen. Die vier schwereren Quarks sind zwar ebenfalls experimentell nachgewiesen, treten jedoch nur in kurzlebigen Zwischenzuständen als Produkte von Teilchenkollisionen (natürlich bei kosmischer Strahlung, künstlich in Teilchenbeschleunigern) auf und können mittels der schwachen Wechselwirkung in die leichteren Quark-Sorten zerfallen. Das leichteste dieser vier schwereren Quarks, das so genannte *strange quark*, tritt dabei am häufigsten auf und wurde historisch als erstes nachgewiesen. Es hat eine elektrische Ladung von $-1/3$ (bezogen auf die Elementarladung) und ähnelt – bis auf seine höhere Masse – dem *down*-Quark.

Obwohl das *strange*-Quark bisher nur in kurzlebigen Kombinationen experimentell gefunden wurde, wurde in der Theorie vielfach spekuliert, dass es möglich sein könnte bzw. müsste, auch stabile (langlebige) Teilchen aus einer Kombination von *strange*- und anderen Quarks zu bilden (siehe z.B. Madsen 1999 sowie Jaffe et al. 2000). So könnte etwa ein *strange* an die Stelle eines *down*-Quarks in einem Proton oder Neutron treten und auf diese Weise ein *strange*-Baryon bilden, das die Grundlage für „seltsame Materie“ (strange matter) sein könnte. Entscheidend für die Frage, ob dies überhaupt möglich wäre, ist das Energieniveau, das diese Kombination hätte. Dabei spielen zwei gegenläufige Tendenzen eine Rolle: Einerseits ist das *strange*-Quark schwerer als das *up*-Quark; daher ist für seine Erzeugung in Teilchenkollisionen mehr Energie nötig als beim *up*-Quark. Andererseits gilt zumindest in der Atomphysik das generelle Prinzip, dass Kombinationen aus verschiedenartigen Teilchen energetisch günstiger sind als Kombinationen von mehreren identischen Teilchen (sog. Pauli-Prinzip). Daher könnte z.B. ein „strange“ Neutron (aus je einem *up*-, *down*- und *strange*-Quark) gegenüber dem „normalen“ Neutron (aus einem *up*- und zwei *down*-Quarks) energetisch bevorzugt sein. Welcher Effekt in der Realität überwiegt, ist sowohl theoretisch als auch experimentell bisher ungeklärt. Dass „strange matter“ bisher nicht beobachtet wurde, könnte ein Hinweis darauf sein, dass sie eben nicht energieärmer als normale Materie ist, sondern energiereicher und daher instabil¹⁶. Es könnte jedoch umgekehrt auch sein, dass sie doch energieärmer (stabiler) ist, jedoch dem Prozess der Umwandlung zunächst praktische Hürden im Weg stehen (z.B. eine Barriere in Form von notwendiger Aktivierungsenergie). Dass diese vermeintlichen Hürden durch die besonders hohe Kollisionsenergie beim LHC erstmals überwunden werden könnten, ist a priori nicht grundsätzlich auszu-

16 Manche Astrophysiker glauben, dass „seltsame Sterne“ (strange stars), die aus „strange matter“ unter Beteiligung einer großen Zahl von *strange*-Quarks bestehen, im Weltraum existieren. Sie seien erkennbar an ihrer sehr großen Dichte, die noch über die außerordentlich hohe Dichte von „normalen“ Neutronen-Sternen hinausgeht. Die Frage der Existenz von „seltsamen Sternen“ ist jedoch nicht wissenschaftlich geklärt (vgl. Madsen 1999).

schließen. Die Literatur weist überwiegend darauf hin, dass es für die Frage der Stabilität entscheidend darauf ankommt, wie viele Quarks sich zu einem *strange*-Teilchen zusammenschließen. Kleine Kombinationen, angefangen bei nur 3 Quarks, wären mit Sicherheit weniger stabil als größere (vgl. Madsen 1999). Wo genau die Grenze hinreichender Größe für Stabilität liegt, ist jedoch aus den gegenwärtigen theoretischen Modellen nicht genau vorherzusagen. In Beschleunigerexperimenten können kleine Kombinationen mit sehr viel höherer Wahrscheinlichkeit erzeugt werden als größere. Nur falls es einen Überschneidungs-Bereich gibt, in dem „strange matter“ noch klein genug ist, um in Kollisionen erzeugt zu werden, aber schon groß genug, um stabil zu sein, ist das folgende Szenario überhaupt relevant (vgl. Jaffe 2000, Anhang C).

Angenommen also, ein erstes *strange*-Baryon aus einem *strange* und zwei anderen Quarks könnte in einer Kollision erzeugt werden und wäre hinreichend lange (meta-) stabil, um mit anderen Teilchen in Wechselwirkung zu treten, bevor es selbst wieder zerfällt. Dann ist von entscheidender Bedeutung, ob dieses *strange*-Teilchen elektrisch positiv oder negativ geladen wäre. Falls es positiv wäre, würde es sich mit benachbarten Atomkernen gegenseitig elektrisch abstoßen, ähnlich wie dies unter normalen Atomkernen der Fall ist, die deshalb normalerweise in angemessener Distanz voneinander bleiben¹⁷. Falls es hingegen negativ wäre, könnte es einen benachbarten Atomkern elektrisch anziehen und mit diesem auf Grundlage der starken Kernkraft verschmelzen. Das sich so bildende, größere *strange*-Teilchen wäre dann zunächst elektrisch positiv, könnte aber die umgebenden Elektronen mit in sich hineinziehen (electron capture) und so wieder negativ werden. Dann würde der Prozess von vorne beginnen und der nächste Atomkern „verschluckt“ werden können. Jaffe et al. (2000) stellen fest, dass keine „Bremse“ für diesen Prozess bekannt ist. Kommt er erst einmal in Gang, so könnte er alle umgebende Materie einbeziehen und schließlich die gesamte Erde in ein einziges, im Vergleich zu regulären Atomen sehr großes Kernteilchen verwandeln. Der Endzustand würde einem Schwarzen Loch relativ ähnlich sehen – mit einigen Unterschieden im Detail: Das Gebilde würde nicht durch die Schwerkraft, sondern durch die starke Kernkraft zusammengehalten. Es wäre auch nicht unendlich klein (punktförmige Singularität), sondern hätte eine endlich große räumliche Ausdehnung. Diese läge jedoch maximal im Bereich von Millimetern bis Zentimetern.

17 Dieses elektrische Abstoßung zwischen positiv geladenen, normalen Atomkernen zu überwinden ist die wesentliche Schwierigkeit bei der Energiegewinnung aus Kernfusion: Sobald geeignete Atomkerne einander so nahe kommen, dass sie die starke Kernkraft spüren, können sie miteinander verschmelzen. Auf dem Weg dahin steht jedoch die elektrische Abstoßung als „Hürde“ im Weg. Deshalb sind für einen technisch zu realisierenden Prozess (Fusionskraftwerk, vgl. ITER) sehr hohe Temperaturen von ca. 100 Millionen Grad nötig. Ähnlich schwierig wäre eine Reaktion von „strange matter“ mit weiteren Atomkernen, falls beide positiv geladen wären.

Der Endzustand eines solchen Prozess wäre also mit Sicherheit für menschliches Leben nicht mehr geeignet. Ob der Prozess überhaupt in Gang kommen kann, hängt neben der grundlegenden Frage der Stabilität „seltsamer Materie“ primär an ihrer elektrischen Ladung. Jaffe et al. (2000) stellen deshalb fest, dass es „in der Tat ein glücklicher Umstand“ sei, dass stabile „strange matter“ nur positiv sein könne und ein Katastrophen-Szenario deshalb an Teilchenbeschleunigern nicht Realität werden könne. Dieses Ergebnis wird von anderen Fachartikeln weiter erhärtet (vgl. Madsen 2000).

Zusammengefasst stellt sich die Situation in der Frage der „Strangelets“ genau umgekehrt dar wie bei den hypothetischen Schwarzen Löchern: Zwar wären stabile, negativ geladene „Strangelets“ tatsächlich hochgradig gefährlich. Experten sind sich jedoch sehr sicher, dass diese niemals erzeugt werden können. Zu dieser Meinung tragen nicht nur theoretische Berechnungen, sondern auch experimentelle Beobachtungen bei: So ist auch in astrophysikalischen Observatorien noch nie beobachtet worden, dass im Welt- raum ein Stern sich in einen „seltsamen Stern“ umwandelt, wie dies von LHC-Kritikern nun für die Erde befürchtet wird. Ein solches Ereignis müsste aufgrund einer starken Abgabe von Energie und Strahlung deutlich sichtbar sein, wurde aber noch nie beobachtet.

Mehrere Autoren weisen darauf hin, dass die Suche nach jedweder Art von „strange matter“ dringend weiter vorangetrieben werden muss – sowohl im Weltraum als auch in der kosmischen Strahlung in der Erdatmosphäre (Madsen 2000). Dies könnte wesentliche neue Erkenntnisse über die Natur der starken Kernkraft ebenso fördern wie evtl. einen ersten Einblick in die Grundlagen der rätselhaften „dunklen Materie“ geben (vgl. Witten 1984). Dass vom Szenario der seltsamen Materie jedoch irgendeine echte Gefahr ausgeht, die sich am LHC konkret realisieren könnte, ist nach übereinstimmender Meinung aller Experten praktisch ausgeschlossen.

5.3. Magnetische Monopole

Ein weiteres Gefährdungsszenario besagt, dass bei Kollisionen im LHC so genannte magnetische Monopole entstehen könnten. Diese neue, bisher noch nie beobachtete Teilchensorte könnte in der Folge mit der umgebenden Materie in Kontakt treten und insbesondere dazu führen, dass Protonen zerfallen (vgl. Waldrop 1982; Walsh, Weisz, Wu 1984). Protonen sind neben Neutronen der maßgebliche Baustein der Atomkerne aller Materie auf der Erde und vermutlich im gesamten Universum. Bisher gelten sie als stabil; zumindest wurde ein spontaner Zerfall bei einem Proton – im Unterschied zu vielen anderen, instabilen Teilchensorten – noch nie beobachtet. Die Befürchtung geht nun dahin, dass ein solcher Protonen-Zerfall in Gegenwart eines magnetischen Monopols doch möglich würde. Gravierend kommt hinzu, dass der Monopol selbst an der Reaktion nicht teilnimmt, sondern diese nur auslöst und selbst unbeschadet aus ihr hervorgeht (als „Katalysator“ des Protonenzerfalls). Er könnte daher in der Folge weitere Protonen zum Zerfall veranlassen und so eine „Spur der Verwüstung“ hinterlassen. Im Extremfall sagt dieses Szenario voraus, dass selbst eine kleine Zahl von Monopolen eine spürbare Menge irdischer Materie quasi „zerbröseln“ lassen könnte.

Ob Monopole tatsächlich existieren oder erzeugt werden können, ist bisher nicht wissenschaftlich geklärt. Die Vermutung der Existenz magnetischer Monopole geht auf eine theoretische Spekulation des britischen Physikers Paul Dirac (einer der Väter der Quantentheorie und Nobelpreisträger 1933) zurück. Er hatte nach Erklärungen gesucht, weshalb elektrische Ladung nur in diskreten Portionen vorkommt. Dass elektrische Ladungen in der Natur nur in ganzzahligen Vielfachen der Elementarladung e (Ladung eines Elektrons) auftreten, ist eine unumstößliche experimentelle Tatsache. Aus der etablierten Theorie ist aber nicht schlüssig erklärbar, weshalb Ladung nicht auch in beliebigen Zwischenmengen existieren sollte, wie dies bei anderen physikalischen Größen (z.B. Masse, Länge, Zeit) der Fall ist. Dirac zeigte nun – ausgehend von den Gleichungen der Quantenphysik – mit einem theoretischen Argument, dass die beobachtete Quantisierung der elektrischen Ladung sich einfach herleiten ließe, wenn man nur die Existenz magnetischer Monopole annähme (Dirac 1931). Sein Vorschlag hätte außerdem die interessante „Nebenwirkung“, dass auf diesem Wege die vollkommene Symmetrie zwischen elektrischen und magnetischen Feldern in den Grundgleichungen der Elektrodynamik (Maxwell-Gleichungen) hergestellt würde. Die Monopol-Dichte wäre dann das magnetische Äquivalent der bekannten elektrischen Ladungsdichte.

Begrifflich ist ein Monopol als Gegenteil eines Dipols zu verstehen. Die in der Natur bisher beobachteten Magnetfelder lassen sich immer auf magnetische Dipole, d.h. auf ein Paar aus Nord- und Südpol, als Quelle zurückführen. Dies gilt für kleine Permanentmagneten (z.B. in den Kupplungen einer Spielzeugeisenbahn) genauso wie für die

Elektromagneten in Großforschungsanlagen oder etwa für den Planeten Erde als Erzeuger des Erdmagnetfelds. Diese Eigenschaft des Magnetfelds (kurz: B-Feld) steht in scharfem Kontrast zum Fall des elektrischen Feldes (kurz: E-Feld), bei dem es ohne Mühe gelingt, positive und negative Ladungen als die beiden Pole räumlich voneinander zu trennen. An diesem Aspekt der Ungleichheit stören sich viele Physiker, weil er eine im Übrigen fast vollkommene Analogie zwischen E-Feldern und B-Feldern trübt. Beide Feldsorten verhalten sich ansonsten in vielfacher Hinsicht physikalisch sehr ähnlich und werden durch gemeinsame Grundgleichungen (Maxwell-Gleichungen) gut beschrieben. Die Analogie wäre aber erst dann wirklich perfekt, wenn als Gegenstück zu den Ladungen (elektrischen Monopolen) auch magnetische Monopole gefunden würden.

Die Vorstellung von magnetischen Monopolen entspringt also in erster Linie einer Form von Wunschdenken theoretischer Physiker, die hoffen, damit die Symmetrie und formale Eleganz eines Gleichungssystems sicherstellen zu können. Nach theoretischen Fortschritten (Goddard 1978), vor allem aber mit dem Fortschritt der technischen Möglichkeiten, begann spätestens seit den frühen 1980er Jahren auch eine intensive experimentelle Suche nach magnetischen Monopolen in der Natur. Trotz massiver Anstrengungen über mindestens 2 Jahrzehnte ist es jedoch bis heute nicht gelungen, Hinweise auf ihre tatsächliche Existenz zu finden (vgl. Milton 2006). Eine hypothetische Möglichkeit liegt darin, dass Monopole zwar existieren, jedoch zu ihrer Erzeugung mehr Energie benötigt würde, als bisherige Teilchenbeschleuniger zur Verfügung stellen konnten. Dass eine solche Energieschwelle zwar hoch, aber doch noch hinreichend niedrig liegen könnte, um mit dem LHC nun erstmals überwunden zu werden, ist theoretisch nicht auszuschließen. Diese Theorie scheint jedoch nur ein relativ geringes Maß an Plausibilität aufzuweisen.

Der LHC-Sicherheitsbericht aus dem Jahr 2003 (LHC Safety Study Group; Blaizot et al. 2003) führt ein weiteres Argument gegen das Bedrohungsszenario Protonen-Zerfall an: Selbst wenn magnetische Monopole existierten und auch zu einem Protonenzerfall führen könnten, würde ein einzelner Monopol maximal den Zerfall von etwa 10^9 Protonen auf der Erde auslösen können, bevor er voraussichtlich in den Weltraum entweichen würde. Diese Menge entspräche deutlich weniger als z.B. einem Milliardstel Gramm Wasserstoff. Selbst Monopole in größerer Zahl könnten demnach keine spürbaren Mengen an Materie „vernichten“.

Das CERN nannte auf Anfrage ein weiteres Argument gegen das Monopol-Szenario¹⁸: Sollten Monopole überhaupt erzeugbar sein, müssten sie auch in der kosmischen Strahlung entstehen. Aufgrund ihrer „magnetischen Ladung“ würden sie stark mit jeglicher

18 Auskunft der Theorie-Abteilung des CERN vom 9.5.2008.

Materie wechselwirken und daher im Erdinneren schnell gestoppt werden. Dort hätten sie sich im Laufe der Jahrtausende ansammeln und sich zu einer „magnetischen Gesamtladung“ des Planeten Erde aufsummieren müssen, die auch experimentell messbar sein müsste – es aber nicht ist. Dieses Argument steht in teilweisem Widerspruch zu dem im vorangehenden Abschnitt genannten Argument eines schnellen Entweichens der Monopole in den Weltraum. Es kann dennoch für sich als überzeugend betrachtet werden und dann deutlich zur Klärung beitragen, weil in diesem Falle gar nicht mehr relevant wäre, ob Monopole überhaupt einen Protonen-Zerfall katalysieren könnten oder nicht.

Zusammenfassend wirkt das Szenario „Protonen-Zerfall durch magnetische Monopole“ zwar theoretisch denkbar, aber doch hinreichend exotisch, um als wenig bedrohlich eingestuft zu werden.

5.4. Neuer Vakuum-Zustand

Ein viertes Katastrophen-Szenario beinhaltet die Befürchtung, dass durch Kollisionen im Teilchenbeschleuniger der Übergang des Vakuums in einen neuen, noch energieärmeren Zustand ausgelöst werden könnte. Der luftleere Raum (Vakuum) spielt in vielen physikalischen Theorien eine wichtige Rolle. Er ist zwar frei von (stabiler) Materie, hat aber dennoch eine komplexe innere Struktur. Obwohl das Vakuum den energieärmsten (bisher) bekannten Zustand darstellt, wird ihm im Rahmen einer quantenphysikalischen Beschreibung dennoch eine endliche, positive Energie zugeschrieben. Aus dieser „Rest-Energie“ können sich u.a. Paare von Teilchen und Antiteilchen bilden, die sich im Regelfall kurz danach wieder gegenseitig vernichten und in Energie zurückverwandeln¹⁹.

Einige Theoretiker haben die Hypothese geäußert, dass das so beschriebene Vakuum eventuell doch nicht der energieärmste mögliche Zustand sein könnte, sondern dass darunter ein weiterer, bisher unbekannter Zustand existiere (Hut und Rees 1983). Wie dieses „wahre Vakuum“ genau aussehen könnte, wird nicht näher erläutert; teilweise wird es nur vage als etwas „völlig Anderes“ („something quite different“ – Jaffe et al. (2000)) beschrieben. Auch zu dem Mechanismus, mit dessen Hilfe eine Teilchenkollision diesen Übergang in ein tieferes Vakuum auslösen könnte, existieren offenbar keine genauen Beschreibungen. Klar scheint aber, dass der einmal angestoßene Übergang sich vom Kollisionspunkt mit Lichtgeschwindigkeit in alle Richtungen ausbreiten würde. Dabei würde dann nicht nur der luftleere Raum im Weltall, sondern auch alle Materie – d. h. zunächst die gesamte Erde und im weiteren Verlauf sämtliche andere Planeten, Sterne und Galaxien – von dem neuen Zustand „angesteckt“. Die Vermutungen gehen dahin, dass in diesem Zustand jegliches Leben unmöglich wäre und das Universum quasi in einem „schockgefrorenen“ Status zurückbliebe.

Vermutungen dieser Art mit präzisen Gegenargumenten wissenschaftlich zu widerlegen ist nicht einfach. Umgekehrt sind jedoch bisher keinerlei konkrete Indizien bekannt geworden, die darauf hindeuten würden, dass ein solcher Übergang tatsächlich stattfinden oder dass ein tieferer Vakuumzustand real existieren könnte. Aus diesen Gründen kann die potenzielle Gefährdung durch ein „tiefes Vakuum“-Szenario hier nicht weiter analysiert werden. Generell kann nur wiederum auf das Argument der kosmischen Strahlung verwiesen werden, das in diesem Fall besonders stark greift: Wenn ein „neues Vakuum“ sich derart schnell und ungehindert ausbreiten könnte, würde eine einzige Teilchenkollision irgendwo im Weltall genügen, um das ganze Universum „umkippen“ zu lassen. Dass dies bisher nicht passiert ist, deutet stark auf die extreme Unwahrscheinlichkeit des Effekts hin.

19 Dass diese Rekombination am Rande von Schwarzen Löchern u.U. nicht möglich ist, führte zur Theorie der Hawking-Strahlung.

6. Literatur

- Basuchoudhary, Atin; Pecorino, Paul; Shughart, William F, II (1999). Reversal of fortune: the politics and economics of the superconducting supercollider. In: Public Choice, Bd. 100, S. 185-201. Heidelberg: Springer. Im Internet: <http://www.springerlink.com/content/k6726t7653x2t11n/>
- Blaizot, Jean-Paul; Iliopoulos, John; Madsen, Jes; Ross, Graham G.; Sonderegger, Peter; Specht, Hans-Joachim (2003). Study of potentially dangerous events during heavy-ion collisions at the LHC: Report of the LHC Safety Study Group. Genf: CERN Scientific Information Service. Im Internet: <http://doc.cern.ch/yellowrep/2003/2003-001/p1.pdf>
- Bostrom, Nick (2002). Existential Risks - Analyzing Human Extinction Scenarios and Related Hazards. Oxford University. Journal of Evolution and Technology, Bd. 9. Im Internet: <http://www.nickbostrom.com/existential/risks.pdf>
- Cheung, Kingman (2002). Black Hole Production and Large Extra Dimensions. Physical Review Letters, Bd. 88, S. 221602. Im Internet: <http://prola.aps.org/abstract/PRL/v88/i22/e221602>
- Dar, Arnon; De Rújula, A; Heinz Ulrich (1999). Will relativistic heavy-ion colliders destroy our planet? Physics Letters B, Bd. 470, S. 142-148. Im Internet: [http://dx.doi.org/10.1016/S0370-2693\(99\)01307-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0370-2693(99)01307-6)
- Dimopoulos, Savas; Landsberg, Greg (2001). Black Holes at the Large Hadron Collider. Physical Review Letters, Bd. 87, S. 161602. Im Internet: <http://prola.aps.org/abstract/PRL/v87/i16/e161602>
- Dirac, P. A. M. (1931). Quantised singularities in the electromagnetic field. Proceedings of the Royal Society, Bd. A 133, S. 60.
- Goddard, P.; Olive, D.I. (1978). Magnetic monopoles in gauge field theories. Reports on Progress in Physics, Bd. 41, S. 1357-1437. Im Internet: <http://www.iop.org/EJ/abstract/0034-4885/41/9/001/>
- Harris, C. M.; Palmer, M. J.; Parker, M. A.; Richardson, P.; Sabetfakhri, A.; Webber, B. R. (2005). Exploring Higher Dimensional Black Holes at the Large Hadron Collider. Journal of High Energy Physics, Bd. 05, S. 053. Im Internet: <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0411022>
- Hut, P.; Rees, M.J. (1983). How stable is our vacuum? Nature, Bd. 302, S. 508-509. Im Internet: <http://www.nature.com/nature/journal/v302/n5908/abs/302508a0.html>
- Jaffe, R.L.; Busza, W.; Wilczek, F.; Sandweiss, J. (2000). Review of Speculative "Disaster Scenarios" at RHIC. Review of Modern Physics, Bd. 72, S. 1125-1140. Im Internet: http://prola.aps.org/abstract/RMP/v72/i4/p1125_1; ähnlich im Volltext unter <http://www.bnl.gov/RHIC/docs/rhicreport.pdf> bzw. <http://arxiv.org/abs/hep-ph/9910333>
- Jones, Bryan D. (1994). A change of mind or a change of focus? A theory of choice reversals in politics. Journal of public administration research and theory, Bd. 4, S. 141-178. Im Internet: <http://jpart.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/4/2/141>
- Kanti, Panagiota (2008). Black holes at the LHC. Im Internet: <http://arxiv.org/pdf/0802.2218>
- Kent, Adrian (2004). A critical look at risk assessments for global catastrophes. In: Risk Analysis, Bd. 24, S. 157-168. Im Internet: <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0009204>
- KET – Komitee für Elementarteilchenphysik (2002). Teilchenphysik in Deutschland – Status und Perspektiven. Im Internet: <http://www.ketweb.de/ketStudie/ketStudie.html>
- LSAG – LHC Safety Assessment Group at CERN (2008). Review of the Safety of LHC Collisions. Im Internet: <http://lsag.web.cern.ch/lsag/LSAG-Report.pdf>. Deutschsprache

chige Kurzfassung unter <http://environmental-impact.web.cern.ch/environmental-impact/Objects/LHCSafety/LSAGSummaryReport2008-de.pdf>

- Lübbert, Daniel (2006). Die Europäische Spallationsquelle (ESS) – Geschichte und Stand des Projekts. Info-Brief der Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages. Im Bundestags-Intranet: http://www.bundestag.btg/ButagVerw/Abteilungen/W/Ausarbeitungen/Einzelpublikationen/Ablage/2006/Die_Europaeische_Spallations-Neu.pdf
- Madsen, Jes (1999). Physics and Astrophysics of Strange Quark Matter. In: 'Hadrons in Dense Matter and Hadrosynthesis', Lecture Notes in Physics, Bd. 516, S.162-203. Berlin: Springer. Im Internet: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9809032>
- Madsen, Jes (2000). Intermediate Mass Strangelets are Positively Charged. Physical Review Letters, Bd. 85, S. 4687 – 4690. Im Internet: http://prola.aps.org/abstract/PRL/v85/i22/p4687_1
- Milton, K.A. (2006). Theoretical and Experimental Status of Magnetic Monopoles. Reports on Progress in Physics, Bd. 69, S. 1637-1712. Im Internet: <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0602040>
- Stenger, Victor J. (2007). Will the LHC destroy earth? In: Skeptical Briefs, Juli 2007. Im Internet: <http://www.colorado.edu/philosophy/vstenger/Briefs/LHC.pdf>
- Tegmark, Max; Bostrom, Nick (2005). Astrophysics: Is a doomsday catastrophe likely? Nature, Bd. 438, S. 754. Im Internet: <http://www.nature.com/nature/journal/v438/n7069/full/438754a.html>
(ausführlichere Version unter <http://ieet.org/archive/bostromtegmark.pdf>)
- Waldrop, M. Mitchell (1982). Do Monopoles Catalyze Proton Decay? Science, Bd. 218, S. 274-275. Im Internet: <http://www.sciencemag.org/cgi/reprint/218/4569/274.pdf>
- Walsh, T. F.; Weisz, P.; Wu, T. T. (1984). Monopole catalysis of proton decay. Nuclear Physics, Bd. B 232, S. 349.
- Witten, Edward (1984). Cosmic Separation of Phases. Phys. Rev. D, Bd. 30, S. 272. Im Internet: http://prola.aps.org/abstract/PRD/v30/i2/p272_1