



Andreas Stiller

# Licht ins Dunkel

## CERN startet Run 2 des Large Hadron Colliders

Man schreibt das Jahr des Lichts: 1000 Jahre das Buch der Optik von Ibn Al-Haytham, 200 Jahre Wellentheorie von Augustin-Jean Fresnel, 150 Jahre Elektrodynamik von James Clerk Maxwell und 100 Jahre allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein. CERN will passend dazu den großen Ring wieder anstarten und mit ihm viel Licht ins Dunkle bringen, in die dunkle Materie und dunkle Energie ...

Der Countdown-Zähler auf der CERN-Website lief just am 20. Februar um 12 Uhr MEZ ab und läutete damit symbolisch das Ende der „Long-Shutdown-Phase 1 (LS1) und den Start des Run 2 des Large Hadron Colliders (LHC) ein. In der zweijährigen Pause wurden der Ring, die angeschlossenen Experimente und die IT mächtig aufgerüstet.

Mitte März sollen dann wieder die ersten Protonen im 26 659 Meter langen Rund des LHC ihre Kreise zwischen Frankreich und der Schweiz ziehen. Nach der sogenannten Re-commissioning-Phase, sieht der Terminplan für Mitte Mai stabile Strahlen und Kollisionen vor, sodass es mit der Physik losgehen kann. Darauf haben sich sowohl die teuren vier Großexperimente ATLAS, CMS, Alice und LHCb sowie gut ein Dutzend kleinerer Experimente intensiv vorbereitet, die in der

Pause zum Teil erhebliche Upgrades vollzogen haben.

Das ursprüngliche Hauptziel des LHC, das Higgs Boson, gilt zwar inzwischen als nachgewiesen und mit einem Nobelpreis belohnt, aber es gibt noch eine Fülle von Fragen drum herum, etwa warum es mit  $126 \text{ GeV}/c^2$  so unerwartet leicht ist. Dazu will man weitere von den zahlreichen Zerfallsmöglichkeiten genauer untersuchen. Der Zerfall in Tau Leptonen ( $H \rightarrow \tau\tau$ ) zum Beispiel ist bislang noch recht ungenau vermessend. Insgesamt 1400 Higgs Events haben CMS und ATLAS im Verlauf von Run 1 aus Trillionen von Ereignissen herausgefiltert, bei Run 2 hofft man auf mehrere Millionen Treffer. Gilt das zugrunde liegende Standardmodell der Kernphysik auch noch bei höheren Energien? Theoretiker mutmaßen oder hoffen gar, dass ab etwa

9 TeV aufwärts vielleicht doch eine „Neue Physik“ nötig wird.

Insbesondere aber gibt es eine neue Herausforderung, nämlich das Geheimnis der dunklen Energie und der dunklen Materie zu lüften. Hier sucht man unter anderem nach supersymmetrischen Teilchen (SUSY), die zumindest nach der Stringtheorie existieren müssten. ATLAS hat dazu eine neue Detektorschicht nachgerüstet, die näher am Kollisionszentrum liegt, um so noch kürzer lebende „Trümmer“ auswerten zu können.

### Bleierne Zeiten

Vor fast genau zwei Jahren, Mitte Februar 2013, wurden die letzten Strahlen in den Ring eingeschossen. Bei diesen wagten sich die Wissenschaftler sogar kurz vor dem geplanten Shutdown auf Neuland, denn sie schmetterten einen Strahl mit Bleikernen auf einen entgegenlaufenden mit Protonen. So eine unsymmetrische Beschickung war ursprünglich gar nicht vorgesehen, ließ sich mit einigen Kunstgriffen dann aber doch erfolgreich realisieren und erbrachte zahlreiche neue Erkenntnisse. Die Protonen hatten dabei 4 TeV Energie, die schweren Bleikerne mit ihren 82 Protonen kamen gar auf 328 TeV.

In dem jetzt beginnenden Run 2 will CERN zügig auf 6,5 TeV pro Protonenstrahl hochfahren, später dann bei gut trainierten Magneten hofft man, vielleicht auch 7 TeV zu erreichen. Diese 7 TeV waren ja das ursprüngliche LHC-Ziel, aber nach dem sogenannten Quench-Unfall im Jahre 2008, nur zwei Wochen nach dem First Beam, wollte man vorsichtshalber

erst einmal kleinere Brötchen backen und hat sich auf maximal 4 TeV beschieden und auf nur ein Protonenbündel alle 50 ns. Das reichte dann aber bereits völlig aus, um das gesuchte Higgsche Boson mit wissenschaftlich fundierter Sicherheit nachzuweisen.

Bei 50 ns Bündelabstand passen unter Berücksichtigung von etwa 20  $\mu$ s Pause zwischen dem ersten und dem letzten Bündel bis zu 1380 Bündel in den Ring. Am Ende von Run 1 schaffte es CERN, gut 170 Milliarden Protonen in einem Bündel unterzubringen. Man kann CERN also als Protonenprovider verstehen, durchaus ähnlich einem Internet-Provider. Statt aktuell ausgelieferte MBit/s hat man hier die sogenannte Luminosität, die Zahl der Kollisionen pro Sekunde und Quadratzentimeter. Diese wurde im Verlauf des Run 1 von 2010 bis 2012 um über Faktor 30 verbessert und kam auf Spitzenwerte von bis zu  $7,7 \cdot 10^{33} \text{ 1/(s} \cdot \text{cm}^2)$ . Wichtig ist aber auch, was insgesamt ausgeliefert wird: Beim Internet-Provider wäre das die Zahl in GByte/Monat. Bei CERN heißt das Maß „integrierte Luminosität“, das in inversen Femtobarn (1/fb) angegeben wird. Beide Protonen-Großexperimente kamen im gesamten Verlauf des Run 1 auf jeweils etwa 25 (1/fb). Für Run 2 hofft man auf das Zehnfache – also 250 (1/fb) – pro Jahr.

Starten will man erst einmal mit dem bewährten Setup 4 TeV/ 50 ns/ 1380 Bündel. Dann aber will man nicht nur schnell auf 6,5 TeV hochfahren, sondern auch die Zahl der Bündel pro Sekunde verdoppeln, also ein Bündel alle 25 Nanosekunden. Die Bündel sind mit 110 Milliarden Protonen allerdings erst einmal ein bisschen kleiner. Dennoch kommen dann viel mehr Daten pro Sekunde an, viel zu viel um abgespeichert und ausgewertet zu werden. Eine ausgeklügelte, mehrstufige Triggertechnik schmeißt die allermeisten Daten weg, um nur die erfolgsversprechenden durchzulassen. Je nach Experiment bleibt dann nur noch ein Bruchteil bis zu einem Millionstel der Daten übrig. Die werden erst einmal in den großen eigenen Rechenzentren der Experimente zwischengespeichert und dann an das CERN-Rechenzentrum weitergeleitet, das dann das weltweite LHC-Grid speist.

### Nur 5 m/s schneller

Viel Aufwand war in der Zwischenzeit nötig, um die Protonengeschwindigkeit im Ring gerade mal um „läppische“ 5 m/s zu erhöhen – das ist lediglich die halbe Geschwindigkeit eines 100-Meter-Sprinters.

Aber man befindet sich ja auch bei 99,999998958 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, da weiß man seit Einsteins Relativitätstheorie, dass es da anders zugeht. Kam man bei den bislang erreichten 4 TeV Protonenenergie bis auf 8,2 m/s an die Lichtgeschwindigkeit heran, bleibt man bei den zunächst geplanten 6,5 TeV nur noch 3,1 m/s unter dem absoluten Grenzwert.

Die Vorbeschleuniger PS/PSB und SPS sind schon seit einigen Monaten aktiv – auch

## Die LHC-Großexperimente

Die Experimente am LHC sind eigenständige Gesellschaften, einige davon über eine Milliarde Euro teuer. CERN ist an ihnen bis zu maximal 20 Prozent beteiligt. 3 Milliarden kostete der Ring ohne die Experimente. Die jährlichen Betriebskosten allein von CERN liegen bei 1,1 Milliarden Schweizer Franken (2014), wobei Deutschland mit über 20 Prozent den größten Beitrag liefert. Der kürzliche Entscheid der Schweizer Nationalbank bringt den in Schweizer Franken bilanzierten Haushalt erheblich durcheinander, da werden die europäischen Staaten die Budgetierung neu planen müssen.

Vier Großexperimente und etwa 10 kleinere warten auf schnelle Protonen oder Bleikerne für ihre Versuche.

ATLAS: A Toroidal LHC ApparatuS, 7000 t,  $45 \text{ m} \times 22 \text{ m} \times 22 \text{ m}$ , sucht nach Higgs Boson, SUSY, Substrukturen der Materie, Leptonen, Quarks, Neue Physik.

CMS: Compact Muon Solenoid, 12 500t,  $21 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 18 \text{ m}$ , sucht nach Higgs Boson, SUSY, Substrukturen der Materie, Leptonen, Quarks, Neue Physik

ALICE: A Large Ion Collider Experiment, 10 000 t,  $16 \text{ m} \times 16 \text{ m} \times 26 \text{ m}$ , untersucht Quark-Gluon-Plasmen, sucht Neue Physik.

LHCb: Large Hadron Collider beauty, 5600 t,  $21 \text{ m} \times 13 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ , sucht nach Beauty-Quarks, Antisymmetrien, die die Entstehung der Materie erklären und ... Neue Physik.

mit ihren langsameren Protonen von bis zu 650 GeV findet bereits Physik statt.

Sieben der acht Segmente des LHC-Ringes haben derweil ihre Betriebstemperatur von bis hinab zu 1,8 Kelvin erreicht. Nur Sektor s34 hatte Anfang Februar noch leichte Probleme und hinkte etwas hinterher.

140 Tonnen Helium und 10 000 Tonnen flüssiger Stickstoff sind nötig, um die 1232 großen Dipol-Hauptmagnete mit gesamt 36 000 Tonnen Gewicht so weit herunterzukühlen, dass sie die nötige Flusssdichte von über 8 Tesla erreichen. Dazu müssen 11 850 Ampere durch die insgesamt 7600 km supraleitenden Niob-Titan-Drahtbündel fließen.

Ein jedes dieser Kabel beherbergt 36 Adern, jeweils zusammengesetzt aus 6300 kupferummantelten Fäserchen von 6  $\mu$ m Dicke. Die gesamte Faserlänge würde 5-mal zur Sonne und zurückreichen.

Zu den 15 Meter langen Dipol-Hauptmagneten kommen noch insgesamt etwa 8000 kleinere und mittlere Korrektur- und Steuermagnete (di-, quadro-, sexta-, octo und decapolar). 21 Tage dauert es, um ein Segment mit flüssigem Stickstoff auf 80 Kelvin abzukühlen, nach weiteren 7 Tagen kommt man auf 4,5 Kelvin und dann braucht man noch einmal zwei Tage, um die Zieltemperatur von 1,8 bis 1,9 Kelvin zu erreichen.

Mit ähnlichen fantastischen Zahlen können auch die großen Experimente mit ihren viele tausend Tonnen schweren Detektoren aufwarten. Größtes Schwergewicht ist CMS mit 12 500 Tonnen. Die größten Ausmaße hat ATLAS mit 25 m Durchmesser und 40 m Länge.

Derzeit nutzen sie die kosmische Strahlung – vor allem Myonen – für die Kalibration ihrer Anlagen. Diese Myonen entstehen in

**Der gigantische Atlas-Detektor, hier einige der 1200 Myon-Kammern und in der Mitte der Ring und die Kollisionskammer, wo die Protonen mit insgesamt 14 TeV zusammenknallen.**





### CERN-Rechenzentrum in Zahlen

	Meyrin	DCWigner DC
Server	9808	1288
Prozessoren	18 018	2570
CPU-Kerne 93	937	20 544
10G NIC	3708	1211
1G NIC	18 776	2292
Plattenplatz	99,3 PByte	32,5 PByte
Hauptspeicher	344 TByte	83 TByte
Tape	99,4 TB	

Das CERN-Rechenzentrum am Standort Meyrin ist an seinem Energielimit angekommen, das zweite Standbein wird 1200 km entfernt in Budapest aufgebaut.

die Gerichte überzeugte, die über Klagen gegen CERN wegen zu hohen Risikos der Anlage entscheiden mussten.

Die höherenergetischen „galaktischen“ Myonen können dann durchaus ein paar Hundert Meter durch den Fels dringen. Im Schnitt kommen sie 100 Meter unter Tage mit 60 GeV an. Mit ihren Bahnen lassen sich die Detektoren hochpräzise ausrichten. In diesem Punkt sind die Wissenschaftler ausgesprochen pingelig.

Auf 30 µm genau will man zum Beispiel die Abstände zwischen den 1200 Myon-Kammern im ATLAS-Koloss positioniert haben. Bei seinen gigantischen Ausmaßen machen sich aber bereits minimale thermische Schwankungen stark bemerkbar. Hier helfen hochpräzise, fast 10 Meter lange Lineale (Alignment Bars) und diverse optische Vermessungssysteme, insbesondere das Alignment-System RASNIK, das mit durchleuchteten Kodierscheiben und CCD-Kameras funktioniert. Über einen Framegrabber wertet dann ein PC das Bild aus. Aber was heißt hier ein PC – es gibt bei ATLAS insgesamt 13 000 CCD-Kameras und allein dafür eine große PC-Farm.

### Trigger

Die IT-Abteilungen der Experimente, von CERN und dem angeschlossenen weltweiten LHC-Grid hatten im Long Shutdown nicht etwa Pause, sondern liefen auf Hochtouren. Zum einen führten sie Simulationen und Monte-Carlo-Berechnungen durch zum anderen aber berechneten sie die alten Daten neu. Mit optimierten Parametern, nachträglich verbesserten Kalibrierungen und unter Berücksichtigung weiterer Zerfallskanäle konnten sie damit ältere Messergebnisse zum Teil deutlich nachschleifen, beispielsweise die Masse des Higgs Boson dreimal so genau auf nunmehr 125,36(41) (ATLAS) beziehungsweise 125,02(30) (CMS) GeV/c<sup>2</sup> bestimmen und sogar neue Teilchen finden. So entdeckte das LHCb ein exotisches Hadron zusammengesetzt aus vier Quarks und meldete erst Ende letzten Jahres auch den Nachweis von zwei bislang nur theoretisch existierenden Barionen.

Alle Großexperimente besitzen große Rechenzentren mit zahlreichen hierarchisch strukturierten Rechnersystemen: Mehrstu-

figes Trigger Systeme, Data Acquisition, Maschinensteuerung, Post Processing...

Am Beispiel von ATLAS soll das verdeutlicht werden, bei den anderen sieht es ähnlich aus. Bei ATLAS setzt ein dreistufiges Triggersystem die bei 25 ns Bündelabstand mit 40 MHz anfallenden Datenmassen (1,5 MByte pro Event) durch Verwerfen der meisten Daten auf letztlich etwa 200 bis 300 Hertz herunter, also um Faktor 1:200 000. Direkt an den Detektoren sitzt strahlensharte analoge Hardware, die die Signale über 7200 analoge Links an die durch 2 Meter dicke Mauern geschützte Trigger-1-Kaverne (USA15) schickt. Dort digitalisieren dann zahlreiche Präprozessoren die Signale und schicken sie über serielle Links mit 400 MBit/s an die aus FPGAs und ASICs aufgebauten Spezialprozessoren zur Jet- und Clustererkennung weiter. Über einen guten alten VME-Bus kommen sie schließlich zum Central Trigger Prozessor CTP. Der hat nun nicht gerade viel Zeit, um zu entscheiden, ob er diese Daten gebrauchen kann oder nicht. Das muss er in Echtzeit schaffen, bevor das nächste Bündel ankommt. Für den Run 2 wurde er dazu erheblich erweitert. Unter anderem haben Wissenschaftler der Uni Mainz noch einen Topologie-Prozessor aus Xilinx Virtex-7-FPGAs gebastelt, der den CTP mithilfe eines Topologie-Algorithmus unterstützt.

Mit rund 75 kHz gelangen dann die „Regions of Interest“ (ROI), an die zweite Triggerstufe. Das ist eine x86-Serverfarm mit etwa 500 Dual-CPU-Knoten, die ebenfalls das Meiste verwirft und nur das Erfolgsversprechende mit 2 bis 3 kHz an die nächste Stufe, den Event-Filter (1600 Knoten, zumeist Dell-C6100-Blades) verschickt. Der schaut sich das genau an, verwirft seinerseits noch mal bis zu 90 Prozent, speichert die verbleibenden Daten lokal ab und schickt sie parallel dazu mit 1 bis 2 GByte/s an das zentrale Rechenzentrum von CERN weiter. Für Run 2 ist hinter dem High Level Trigger

(HTL) eine etwa doppelt so hohe Rate vorgesehen wie vorher für Run 1.

Es gibt aber auch einen Bypass: Zwischenzeitlich werden zufällig ausgewählte Rohdaten an allen Triggern vorbei durchgewunken und abgespeichert. Die kann man dann gelegentlich darauf durchsuchen, ob die Trigger korrekt funktionieren und ob es nicht doch noch interessante unerwartete Events gibt, die „weggetriggert“ werden.

Beim CMS sind gut 3000 Server im Einsatz. Hier sind es zwei Triggerstufen die ähnlich, wie ATLAS hinunter auf etwa 100 Events/s reduzieren. 2012 wurde die IT-Infrastruktur für Run 2 erheblich umgestaltet. In der Kontroll-Plattform kommt immer noch Windows zum Einsatz, das von Windows XP (32 Bit) auf Windows 7 (64 Bit) aufgerüstet wurde. Sonst läuft hier wie fast überall bei CERN der wissenschaftliche Red-Hat-Ableger Scientific Linux. Von deutscher Seite aus arbeitet Desy intensiv bei CMS mit, stellt unter anderem auch die stellvertretende Sprecherin und auch der uns bei unserem Besuch im November betreuende CMS-Computing Experte kam von Desy in Hamburg.

ALICE hat bei den Bleikollisionen ungleich mehr Trümmer zu untersuchen, als die anderen Experimente. Jedes Event liefert daher gleich 50 MByte an Daten. Hier muss bereits der dreistufige Hardware-Trigger das allermeiste verwirfen, er setzt die Datenrate auf etwa 500 Hz herunter. Der High-Level-Trigger ist auch hier eine PC-Farm, die letztlich auf 100 Hz reduziert. Jeweils 300 Racks stehen bei ALICE ober und unter Tage. Hier sind auch zahlreiche GPUs im Einsatz (64 Knoten mit NVIDIA GTX 480/580 waren es 2012, inzwischen dürften es deutlich mehr sein). ALICE lauscht allerdings auch bei den Protonenkollisionen mit, dann aber mit anderen Trigger-Setups.

Eng angekoppelt an ALICE ist das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt. Die Online-Tracking-Algorithmen mit GPU-Unterstützung zum Beispiel hat David Rohr vom Frankfurter

### Top 5 im WLCG in CPU-Leistung

Tier	Land	Einrichtung	CPUs (phys)	CPUs(log)	HEPSPEC06	CPU Zugesichert
Tier 0	Schweiz	CH-CERN	39,216	41,308	302,081	356,000
Tier 2	Italien	INFN T2 Federation	3,067	17,866	159,595	131,300
Tier 1	Deutschland	DE-KIT	1,230	16,144	183,880	111,075
Tier 1	UK	UK-T1-RAL	746	5,760	59,641	95,230
Tier 1	Italien	IT-INFN-CNAF	2,744	19,208	211,864	98,950

Institute for Advances Studies (FIAS) beigesteuert. Rohr hat mit seiner hocheffizienten Linpack-Software für AMD-GPUs nebenbei mit dafür gesorgt, dass eine kleine Vorstufe des L-CSC-Rechners die Spitzenposition der Green500-Liste der Supercomputer erklimmen konnte. Dieser besonders auf Energieeffizienz getrimmte Rechner der GSI ist vor allem für den 1,2-Milliarden-Euro-teuren eigenen Schwerionen-Beschleuniger FAIR gedacht, der sich neben dem GSI-Gebäude noch im Aufbau befindet.

LHCb ist trotz seiner 5600 Tonnen das kleinste Experiment unter den großen, hat aber immerhin auch 1600 Rechnerknoten in seiner zweistufigen Triggerfarm „unter Waffen“. Die Events sind hier mit 30 KBytes/Event deutlich kleiner. Das bedeutet aber keine Entlastung für die Rechnerfarm, denn die wird eingangsseitig mit 1 MHz Bündelrate kräftig gefordert. Rund 100 Hz bleiben am HLT-Ausgang übrig.

## LHC-Grid

CERN ist nicht nur Protonen- und Blei-Provider, sondern nimmt den Experimenten auch die Daten von bis zu 30 PByte/Jahr (geplant für Run 2) ab, speichert sie und schickt sie zur Weiterverarbeitung ins weltweite LHC-Grid (WLCG). Über 100 PByte an Daten lagern im CERN-Rechenzentrum derzeit auf Band. Mit nahezu 100 000 Rechenkernen gehört das CERN-Rechenzentrum zu den ganz großen Supercomputern der Welt jenseits der Petaflops-Marke. Es nimmt aber nicht an dem Linpack-Wettbewerb der Top500-Liste teil. Es würde in dieser Disziplin auch nicht so toll aussehen, denn schnelle Interconnects per InfiniBand braucht die CERN-Software nicht, hier reichen zumeist preiswerte GbE-Verbindungen aus, sodass man ganz oben im Linpack-Zirkus nicht mitspielen kann.

Der Energieverbrauch von CERN liegt allerdings bei eingeschaltetem LHC am oberen Limit, das Rechenzentrum konnte daher am Standort Meyrin nicht weiter ausgebaut werden. Eine europaweite Ausschreibung gewann die Wigner-Gesellschaft in Budapest. Dort wurde die erste Ausbaustufe 2012 in Betrieb genommen, die aktuell 2570 CPUs mit über 20 000 Kernen und 32 Petabyte Plattenplatz anbietet. Über zwei 100-Gbit-Leitungen (DANTE und T-Systems) quer über Deutschland, Österreich, Tschechien ist das Wigner Data Centre an CERN angebunden.

An diesem sogenannten Tier 0 hängen hierarchisch in Tier 1,2,3 geordnet über 170 Rechenzentren weltweit in 40 Ländern, um die etwa 30 PByte pro Jahr an Daten auszuwerten. In Deutschland ist das Gridka in Karlsruhe als Tier 1 für die weitere Verteilung zuständig. Die restlichen Rechenzentren eines Landes machen dann auf Tier-2-Ebene mit. Tier 3 ist für kleinere Abteilungen und sogar für Privatpersonen gedacht, das wird aber dann nicht mehr vom WLCG verwaltet, sondern obliegt auf lokaler Basis den Tier-2-Teilnehmern. Die Rechenleistung im Grid stammt zu etwa 20 Prozent von CERN, 35 Prozent von den Tier-1-Knoten und 45 Prozent von den restlichen. Wie viele MByte im Grid gerade unterwegs sind, kann man hübsch in Echtzeit auf der WLCG-Website verfolgen, im Moment (Anfang Februar) flutet vor allem CMS das Grid mit Daten.

## Pledges

Als Teilnehmer am WLCG verpflichtet man sich, eine bestimmte Rechen- und Speicherleistung (kostenlos) zur Verfügung zu stellen, die sogenannten Pledges. Als Maß für die jeweilige Rechenleistung sieht man auch heutzutage überall noch kSI2K, was für Kilo-SPECint-CPU2000 steht. Seit 2009 soll man

stattdessen den HEPSPC06 verwenden, eine Untermenge von SPEC CPU2006, die in C++ codierte Benchmarks der Integer und Gleitkomma-Suiten, insgesamt 9 Einzelbenchmarks umfasst. Gemessen wird mit einer vorgegebenen Konfiguration unter Linux mit dem gcc. Mehr zum HEPSPC06 und den anderen bei CERN verbreiteten Benchmarks, die zum Teil auch schon auf AMR64-Architekturen gelaufen sind, ist für eine spätere Ausgabe geplant.

Wer selber auf eigene Faust mitrechnen möchte, kein Problem. Zum einen gibt es diverse über BOINC verteilte Internet-Projekte wie Atlas@home, zum anderen bietet CERN seit Kurzem eine Kollektion von Datensätzen und Tools der Experimente auf [opendata.cern.ch](http://opendata.cern.ch) an – sei es zum Lernen oder zum Forschen. Vielleicht findet ja irgendein Pfiffikus etwas, das die Wissenschaftler übersehen haben.

## Wie geht's weiter.

Run 2 ist bis Ende 2017 mit einer bis dahin ausgelieferten integrierten Luminosität von 75 bis 100 1/fb geplant. Dann soll mit LS2 die nächste Upgrade-Stufe beginnen, nicht mit höherer Energie oder kleinerem Bündelabstand, aber mit höherer Luminosität. Bis 2022 ist Run 3 vorgesehen, man hofft dann etwa 350 1/fb liefern zu können. Langfristiges Ziel ist es, bis 2030 auf etwa 3000 1/fb zu kommen. Der ehemalige Forschungsdirektor von DESY, Rolf-Dieter Heuer, betreut den Start des Run 2 noch als CERN-Generaldirektor. Anfang 2016 übernimmt dann Fabiola Gianotti das CERN-Ruder, die erste Frau an der Spitze in der 60-jährigen CERN-Geschichte. Der italienischen Physikerin war es auch schon vergönnt, am 4. Juli 2012 den großen Erfolg, den Nachweis des Higgs Boson, zu verkünden. (as@ct.de)

## Licht im Tunnel

Leonard Leakey Hoftstadter hat es in Season 3 Episode 15 der Big Bang Theory geschafft und Sheldon Lee Cooper träumte davon, seit er neun war – ein Besuch des Large Hadron Collider von CERN. Und klar, da wollten wir nicht hintanstehen und nutzten die letzte Chance vor dem Neustart des Rings für einen Besuch, um uns die Rechenzentren und einen der großen Detektoren vor Ort anzuschauen. Bis Ende November konnte man bei ATLAS noch 100 Meter hinunter fahren, um Ring, Detektor und die unter Tage sitzende IT anzuschauen. Danach begannen auch hier wie bei den anderen Experimenten die Kalibrierungsmessungen und Gäste kommen nicht mehr hinunter. Kollege Martin Holland hatte über unseren Besuch einen ausführlichen Report dazu auf c't online veröffentlicht „Ein Ring sie zu finden“. Hier eine kurze Zusammenfassung.



Da wird Sheldon neidisch: Die Physiker Markus Elsing (mitte) und Rolf Seuster (rechts) samt c't-Redakteur Andreas Stiller vor dem ATLAS-Detektor (nein, kein Selfie, sondern ein Foto vom Kollegen Martin Holland)

DESY-Physiker Dr. Christoph Wissing, bei CMS für das Computing verantwortlich, führte uns durch das CMS-Kontrollzentrum auf dem riesigen CERN-Campus. CMS hat insgesamt gleich vier Kontrollzentren: eins am Experiment, eins bei CERN, ein etwas kleineres bei DESY in Hamburg und insbesondere eins bei den Fermi Labs in Chicago. Alle vier sind ständig mit Video-Livestreams verbunden.

Das ATLAS-Experiment befindet sich auf der anderen Seite von CERN. Hier führten uns ATLAS Gruppenleiter Dr. Markus Elsing und CERNs ATLAS-Beauftragter Dr. Rolf Seuster durch das Kontrollzentrum und die Computing Farm. Insbesondere aber fuhren sie mit uns 100 m unter Tage zum Detektor. Das Riesending mit seinen 1200 Myon-Messkammern und den gigantischen Magneten muss man einfach mal gesehen haben ...