



PETER GRÜNBERG

Nobelpreis für Physik
2007

Christoph Buchal
Daniel Bürgler

PETER GRÜNBERG

Nobelpreis für Physik
2007

VORWORT

Das Jahr 2007 war für das Forschungszentrum Jülich und Prof. Peter Grünberg von besonderer Bedeutung. Mit dem vorliegenden Buch wollen wir ihn ehren und ihm danken für seine Entdeckungen, die er hier in Jülich gemacht hat.

Der so genannte GMR-Effekt („Riesenmagnetowiderstand“) wurde von ihm im Jahre 1988 im Rahmen von Grundlagenuntersuchungen zum Magnetismus gefunden. Ein darauf beruhender Lesekopf für Festplatten fand sehr schnell Eingang in die industrielle Anwendung. Seit 1997 wird nahezu ausschließlich der GMR-Effekt zum Auslesen der magnetisch gespeicherten Information auf den Festplatten verwendet. Mit über 5 Milliarden hergestellten Leseköpfen gibt es inzwischen statistisch einen GMR-Sensor für fast jeden Erdenbürger. Tatsächlich nutzen wir diesen quantenmechanischen physikalischen Effekt täglich in Computern und Festplattenrekordern, ohne uns dessen bewusst zu sein. Was wir allerdings wahrnehmen, ist die rasante Entwicklung der magnetischen Datenspeicherung, die immer neue Anwendungen ermöglicht. Die Speicherkapazität der Festplatten ist inzwischen dank der GMR-Leseköpfe gewaltig gesteigert worden und hat 1 Terabyte erreicht. Diese Entwicklung wird anhalten. Wir werden in Zukunft noch kleinere elektronische Geräte benutzen, die noch größere Datenmengen in noch kürzerer Zeit und mit geringerem Energieaufwand bewältigen.

Neben der rasanten Entwicklung im privaten „Consumer“-Bereich beobachten wir parallel eine ungeheure Dynamik im hochspezialisierten Bereich der Supercomputer, wie sie beispielsweise im Jülicher Super-



computing Center (JSC) im Einsatz sind. Nur diese Superrechner ermöglichen uns Einblicke in hochkomplexe Welten, die sich nun zum ersten Mal mit den Methoden der mathematischen Simulation in ihren inneren Zusammenhängen erschließen lassen. Natürlich ist auch im JSC die Entdeckung von Peter Grünberg in Einsatz, denn eine Einheit von 2000 Festplatten bildet den schnellen Speicher für den neuen Parallelrechner JUGENE mit seinen 65 000 Prozessoren, die über ein Hochleistungsnetzwerk miteinander verbunden sind und gemeinsam über 223 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde bewältigen.

Rechner wie JUGENE spielen eine zentrale Rolle bei der wissenschaftlichen Bearbeitung der heutigen und zukünftigen gesellschaftlichen Herausforderungen. Globale Klimamodellierung, Materialforschung, Medizin, Grundlagenforschung und angewandte Wissenschaften sind ohne die Unterstützung durch leistungsfähige Supercomputer nicht mehr denkbar.

So danken wir Peter Grünberg heute für die vielfältigen wichtigen Anwendungen, die seine Arbeiten bereits ermöglicht haben und schauen mit großem Interesse auf die zukünftigen Entwicklungen, die uns sein Forschungsgebiet der „Spintronik“ noch bringen wird.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. Bachem'. The signature is fluid and cursive.

Prof. Dr. Achim Bachem
Vorsitzender des Vorstands

FOREWORD

The year 2007 was a particularly important year for Forschungszentrum Jülich and Prof. Peter Grünberg. With this book, we not only want to honour Grünberg but also to thank him for his discoveries, which he made here in Jülich.

What was to become known as the giant magnetoresistance effect (GMR effect) was discovered by Grünberg in 1988 within the framework of basic research on magnetism. A read head for hard disk drives based on this discovery quickly conquered the world of industrial applications. Since 1997, the GMR effect has been used almost exclusively to read out information stored magnetically on hard drives. With more than five billion read heads produced to date, statistically there is one GMR sensor for almost every member of the human race. We use this quantum-mechanical physical effect every day in computers or hard drive recorders without even realising it. What we are aware of is the rapid development of magnetic data storage, which is continuously opening the way for new applications. The storage capacity of hard drives has increased substantially thanks to GMR read heads and has reached 1 terabyte today. This development is set to continue. In the future, we will be using even smaller electronic devices that will be able to deal with even larger amounts of data in even shorter periods of time with a lower energy demand.

Along with the rapid development in the private consumer sphere, we are also observing a parallel trend of dynamic development in the

highly specialised field of supercomputing. A good example is the supercomputers in the Jülich Supercomputing Centre (JSC). These supercomputers afford us glimpses into highly complex worlds, and their inner relationships can now be revealed for the first time thanks to the methods of mathematical simulation. Needless to say, Peter Grünberg's discovery has also been applied in JSC: one unit consisting of 2,000 hard drives provides fast storage for the new parallel computer JUGENE with its 65,000 processors, which are connected to each other via a high-performance network and are capable of conducting over 223 trillion floating point operations per second.

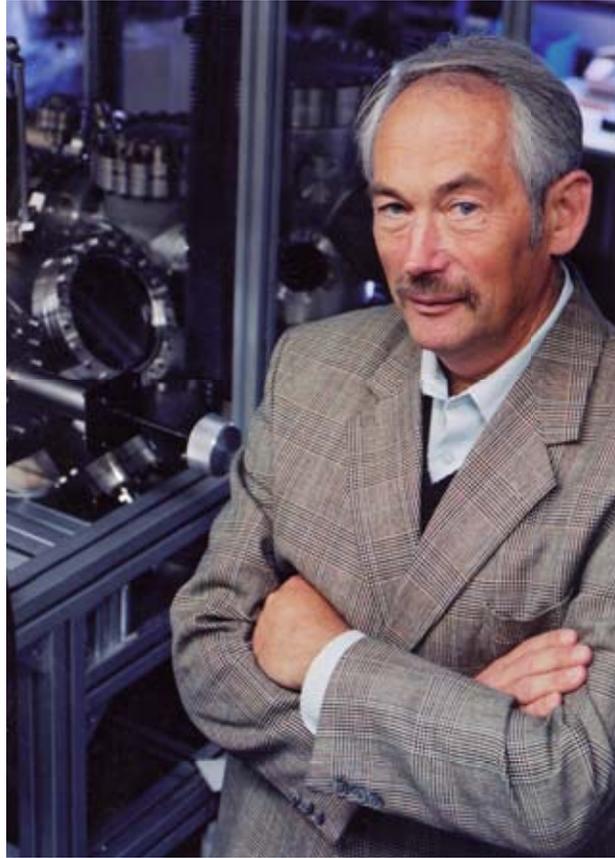


Computers such as JUGENE play a central role in scientifically addressing the grand social challenges of both today and tomorrow. Global climate modelling, materials science, medicine, basic research and applied science are no longer conceivable without the support of powerful supercomputers.

And so we would like to thank Peter Grünberg today for the wide variety of applications that his research has already made possible, and it is with great interest that we look towards future developments that his new field of spintronics has yet to bring us.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. Bachem'. The signature is fluid and cursive.

Prof. Dr. Achim Bachem
Chairman of the Board of Directors

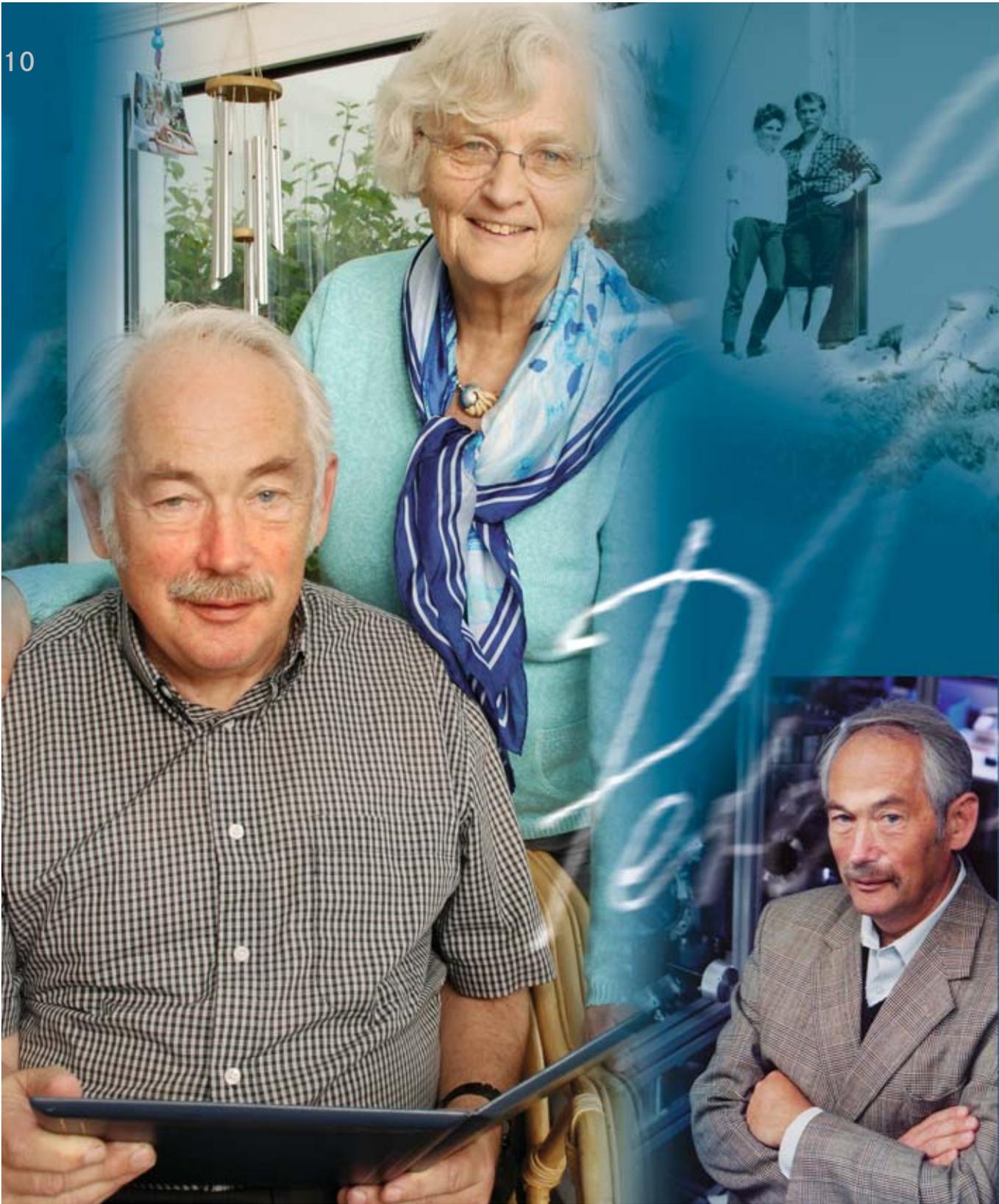


*„Ich möchte meine Freude an der Wissenschaft
gerne an viele junge Menschen weitergeben!“*

Peter A. Grünberg

INHALT / CONTENTS

Ein Besuch bei Peter Grünberg	11
<i>Visiting Peter Grünberg</i>	
Von der Grundlagenforschung zu vielfältigen Anwendungen	23
<i>From Basic Research to a Great Variety of Applications</i>	
Ein Anfang voller Überraschungen	25
<i>A Beginning Full of Surprises</i>	
Die Entdeckung des GMR-Effekts	37
<i>The Discovery of the GMR Effect</i>	
Heureka – Ein neuer Sensor!	43
<i>Eureka – A New Sensor!</i>	
GMR-Sensor und Magnetplatte – ein ideales Paar	45
<i>GMR Sensor and Hard Disk – A Happy Couple</i>	
JUGENE – Geballte Rechenleistung mit 223 Teraflop/s	56
<i>JUGENE – The Concentrated Power of 223 Teraflop/s</i>	
SPINTRONIK – ein neues Feld der Elektronik	66
<i>SPINTRONICS – A New Field of Electronics</i>	
Das Laborbuch (1985)	72
<i>The Lab Notebook – Looking Back to 1985</i>	
Preise, Ehrungen, Lebensdaten	79
<i>Awards, Honours, CV</i>	
Das Forschungszentrum Jülich und das JuLab	93
<i>Forschungszentrum Jülich and JuLab</i>	





Peter Grünberg

EIN BESUCH
BEI PETER GRÜNBERG

EIN BESUCH BEI PETER GRÜNBERG

Seit über 30 Jahren leben Grünbergs in einem Reihenhaus in Jülich – ein bescheidenes, freundliches Anwesen. Im hellen Anbau sind vielerlei Kinderspielsachen zu finden – denn die Enkel wohnen in der Nähe. Wenn sie zu Besuch kommen, bietet sich auch für Peter Grünberg regelmäßig eine gute Gelegenheit, mit den alten Metallbaukästen oder den neueren Fischertechnik- und Lego-Editionen kreative Schöpfungen zu realisieren. Sein Arbeitsplatz ist acht Kilometer entfernt – das Forschungszentrum Jülich. Den Weg dorthin hat er immer am liebsten mit dem Fahrrad zurück gelegt. Nach dem Verlassen der kleinen Stadt führt der Radweg durch Felder und einen alten Buchenwald in Europas größtes Forschungszentrum – ein Mekka für Forscher, die ihr Leben den vielfältigsten wissenschaftlichen Fragen gewidmet haben. „*Es macht Freude, sich mit einem interessanten Problem zu befassen, wenn man eingebunden ist in ein motiviertes Team mit einer leistungsfähigen Infrastruktur und wenn man zudem eine erstklassige Ausrüstung zur Verfügung hat.*“

Peter Grünberg weiß genau, wie Wissenschaft funktioniert: Das vorhandene Wissen einsetzen, um noch unbekannte Fragen zu klären und dabei die Augen weit offen halten, um auch unerwartete, ungeplante Effekte zu erkennen – auf diese Weise können die seltenen echten „Nuggets“ herausgesiebt werden aus der allgegenwärtigen wissenschaftlichen „Datenflut“. Aber dabei muss man kritisch bleiben, denn oft erweisen sich erstaunliche Beobachtungen später als Irrwege, auf die missratene Proben, unerkannte Fehler oder unreproduzierbare Daten gelockt haben.

Er lacht: „*Ich denke dabei noch sehr gern zurück an die Konferenz in Le Creusot in Frankreich. Das war im Jahr 1988. Ich hatte damals meine erstaunlichen Daten zum GMR-Effekt an Fe/Cr immer wieder überprüft und war meiner Sache deshalb ziemlich sicher. Nun wollte ich diese Ergebnisse zum ersten Mal auf einer Konferenz den Fachkollegen öffentlich vorstellen. Ich war ziemlich aufgeregt. Wie würden die anderen meinen Vortrag aufnehmen? Es würde mit Sicherheit heftige Debatten und unangenehme, bohrende Fragen geben. Die Reaktionen waren*

VISITING PETER GRÜNBERG

The Grünbergs have been living in a terraced house in Jülich for more than 30 years – a modest, friendly home. In the well-lit conservatory, we find all sorts of children's toys – the grandchildren live nearby. Their regular visits give Peter Grünberg a good excuse to take out the old metal construction kits or the newer fishertechnik and lego editions and create imaginative structures. His workplace is eight kilometres away – Forschungszentrum Jülich. His favourite way of getting there has always been by bicycle. Once the small town has been left behind, the cycle track winds through fields

and an old beech wood to Europe's largest interdisciplinary research centre – a Mecca for researchers who have dedicated their lives to a wide range of scientific issues. "It's fun to work on an interesting problem when you are part of a motivated team and have an efficient infrastructure at your disposal – not to mention the first-class facilities."

Peter Grünberg knows exactly how science works: using existing knowledge to answer questions that have yet to be asked and keeping your eyes open so that you can spot unex-

pected and unplanned effects. This is how the few genuine nuggets can be panned out of the ever-present flood of scientific data. In doing so, it is important to remain critical because later you often discover that these astonishing observations have put you on the wrong track and that they were caused by badly prepared samples, errors not recognised or data that cannot be reproduced.

He laughs: "I still like to think back to the conference in Le Creusot in France. It was 1988. I had verified my astonishing data on the GMR



dann auch wie erwartet: ungläubig. Misstrauen beherrschte die Diskussionen – doch dann kam der große Knaller! Einige Vorträge später ist Albert Fert aus Paris dran und präsentiert seine Messdaten – mit denselben, höchst erstaunlichen Effekten, zufällig tatsächlich auch an Fe/Cr-Schichten gemessen! Fert hatte sogar noch höhere Werte als ich gemessen, weil er Mehrlagensysteme untersucht hat – aber eben total unabhängig von uns. Wir wussten beide gar nichts voneinander! Das war natürlich eine Sensation ersten Ranges. Nur wir beide verstanden sofort, was der jeweils andere entdeckt und gemessen hatte – und damit verschwanden schlagartig die letzten Zweifel und alle Kritik.

Irgendwie musste die Entdeckung des GMR wohl in der Luft gelegen haben. Jedenfalls verstanden wir beide nicht nur unsere Physik, sondern wir verstanden auch einander in menschlicher Hinsicht hervorragend. An diesem Tag haben wir lange miteinander gefeiert. Es war der Beginn einer wundervollen Freundschaft, die natürlich auch heute noch anhält und durch den gemeinsamen Nobelpreis sozusagen gekrönt wurde!“

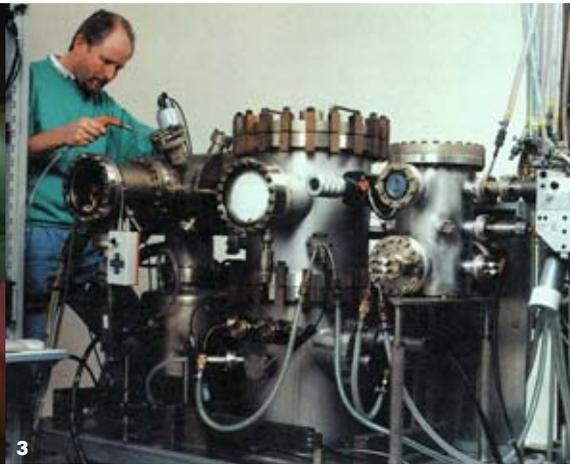
Das war die aufregende Creusot-Konferenz 1988 in Frankreich. Grundlegende Fragen des Magnetismus wurden dort behandelt; niemand hatte damals Sensoren im Sinn – fast nie-

effect on Fe/Cr time and again, and I was fairly confident in my work. I wanted to present my results publicly for the first time at a conference attended by my fellow scientists. I was quite nervous. How would the others react to my presentation? There would probably be vigorous debates and uncomfortable probing questions. The reactions were indeed those that I had expected: incredulity. Disbelief dominated the discussions – and then the biggest surprise of all! A few presentations later, Albert Fert from Paris presented his experimental data – with the very same highly astounding effects,

which he had coincidentally also measured on Fe/Cr layers! Fert had actually measured even higher values than I had because he had conducted his studies on multilayer systems – completely independent from our work. Neither of us knew anything about the other! Naturally this was a sensation of the first order. Only the two of us immediately knew what the other had discovered and measured – and with this, the last doubts and all criticisms promptly vanished. Somehow or other, the discovery of GMR must have been in the air. At any rate, we not only understood each other’s physics but we

also got on like a house on fire. We celebrated with each other until late that day. It was the beginning of a wonderful friendship that is needless to say still going strong today, and which was crowned, so to speak, by the joint Nobel Prize.”

That was the exciting Creusot conference in France in 1988. Basic issues related to magnetism were discussed there. At that time, nobody had even thought about sensors – or at least hardly anybody. The head of institute back then was Werner Zinn, who had come to Jülich from the Siemens research laboratory in



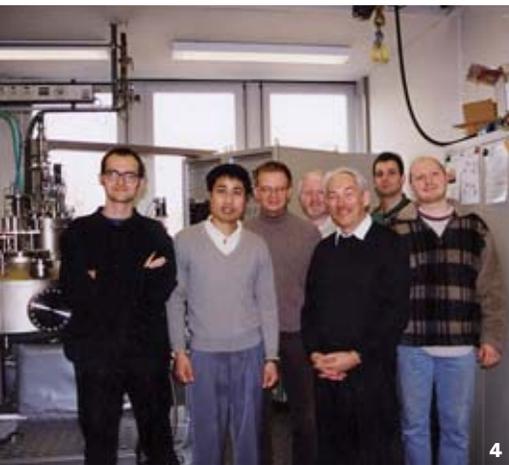
mand. Der Institutsleiter war damals Werner Zinn, der 1970 von den Siemens-Forschungslabors in München gekommen war, um das Institut für Magnetismus an der damaligen „Kernforschungsanlage Jülich (KFA)“ zu gründen. Werner Zinn war ungewöhnlich liebenswürdig und großzügig und hatte die Arbeiten von Peter Grünberg toleriert, obwohl seiner Planung nach der „Magnetismus der Seltenen Erden“ auf dem Institutsprogramm stand. Dazu trug Grünberg eher wenig bei. Oft genug bearbeitete er einige Stunden am Tag die ihm angetragenen Messungen an den isolierenden Seltenen Erden, aber fast regelmäßig nach dem Mittagessen erlahmte sein Interesse am Generalthema des Instituts und er widmete

sich dann bis in die sehr späten Nachtstunden hinein intensiv seinem ganz speziellen Hobby – den magnetischen Wechselwirkungen der Leitungselektronen in Metallen. Mit viel Kreativität und noch mehr Fleiß erzielte er dabei ständig interessante Resultate, so dass Werner Zinn ihm freie Hand ließ – solange er zumindest etwas an den Seltenen Erden arbeitete. Als Grünberg ihm dann aber intern die ersten GMR-Daten an den Dreifachschichten zeigte, erkannte Zinn das Potenzial für eine industrielle Sensoranwendung. Jede Veröffentlichung dieser Daten, alle Konferenzvorträge und Mitteilungen nach außen mussten warten, denn eine Erfindung kann man nicht mehr patentieren, wenn man darüber bereits öffentlich

Munich in 1970 in order to set up the Institute of Magnetism at the “Nuclear Research Centre Jülich (KFA)”, as it was known in those days. Werner Zinn was unusually kind and generous and had tolerated the research conducted by Peter Grünberg although according to his planning schedule, the “magnetism of the rare earths” was on the institute’s programme. Grünberg contributed rather little to this topic. Often enough, he dedicated a few hours every day to the measurements on the insulating rare earths assigned to him, but fairly regularly after lunch, his interest waned in the institute’s main

topic, and he would then focus all of his attention on his very special hobby – the magnetic interactions between conduction electrons in metals – and he would keep working on it right into the early hours of the morning. With a lot of creativity and even more hard work, he generated interesting results one after the other until Werner Zinn eventually gave him carte blanche – with the proviso that he do at least some work on rare earths. When Grünberg then showed him the first GMR data on triple layers, Zinn immediately recognised the potential for an industrial sensor application. Any publica-

tion of these data, related conference papers and communication outside of Jülich were all put on hold because once a discovery has been spoken about in public or once it has been written about, it can no longer be patented. Grünberg therefore drafted a comprehensive text for a patent application as quickly as possible with the help of the patent attorney, Dr. Friedrich Barth, in order to secure all possible rights of exploitation. As head of institute, Werner Zinn was entitled to appear as co-author in what eventually became a very lucrative patent, but he generously and explicitly insisted that Peter



gesprächen oder gar geschrieben hat. Deshalb verfasste Grünberg zusammen mit dem Patentanwalt Dr. Friedrich Barth schnell einen umfassenden Text für ein Patent, um die möglichen Verwertungsrechte zu sichern. Als Institutsleiter hätte Werner Zinn dabei auch Koautor bei diesem im Endeffekt höchst lukrativen Patent werden können, aber er bestand ausdrücklich darauf, dass nur Peter Grünberg als der alleinige verantwortliche, kreative Wissenschaftler bei der Patentanmeldung auftrat. Schließlich, so erklärte Zinn, hatte Grünberg diese Arbeiten nicht nur ganz alleine gestartet, sondern auch eigenständig durchgezogen.

- 1 Eine kleine Feier zum bestandenen Diplom von Gabriele Binasch (1988)
 - 2 Prof. Werner Zinn, ein liebenswürdiger und großzügiger Institutsleiter am Institut für Festkörperforschung
 - 3 Reinert Schreiber, langjähriger Mitarbeiter, betreut die neue Molekularstrahlepitaxieanlage (MBE)
 - 4 Das Team: Michael Breidbach, Shi-Shen Yan, Daniel Bürgler, Reinert Schreiber, P.G., Dominik Olligs, Matthias Buchmeier
 - 5 Die neue MBE liefert erstklassige Proben
 - 6 Werner Zinn (1988)
-
- 1 A small celebration after Gabriele Binasch was awarded her diploma (1988)
 - 2 Prof. Werner Zinn, the kind and generous head of the Institute of Magnetism at the Institute of Solid State Research (IFF)
 - 3 Reinert Schreiber, a long-standing employee, services the new molecular beam epitaxy (MBE)
 - 4 The team: Michael Breidbach, Shi-Shen Yan, Daniel Bürgler, Reinert Schreiber, P.G., Dominik Olligs, Matthias Buchmeier
 - 5 The new MBE yields first-class samples
 - 6 Werner Zinn (1988)

Grünberg appear as the sole creative scientist responsible on the patent application. After all, explained Zinn, Grünberg did not just begin this research alone; he also conducted it completely on his own.

And what happened next?

“Naturally, this gave us a huge head start in Jülich, which allowed us to be the first to conduct a number of basic studies over the next few years. The large industrial laboratories also recognised their chance and IBM in particular began to address the problem of GMR with

huge investments in terms of personnel and technology. Back then nobody could keep up with the all-powerful IBM, at least in terms of funding and the development of technology. In Jülich, we worked mainly with the Philips research laboratory in Eindhoven. It was a very productive period – but the more perfect the industrial GMR sensors for hard drives became, the more their technology distanced itself from the opportunities open to us here in Jülich.

But this didn’t do us any harm because over time other new and interesting problems

cropped up in the area of basic research and these were not directly related to the hard-drive business. What has now developed from this is a completely new field of solid-state research – spintronics. The GMR effect proved itself to be the key to this extended understanding of the electronic properties of metals, semiconductors and insulators. In this field, there is still a vast amount to be discovered – and I believe that we have already succeeded in uncovering a whole range of attractive new “nuggets.” Only in retrospect does success appear to have come so easily.

Und wie ging es danach weiter?

„Wir in Jülich hatten natürlich einen kräftigen Vorsprung und konnten deshalb in den nächsten Jahren viele grundlegende Untersuchungen als Erste machen. Aber auch die großen Industrielabors haben ihre Chance erkannt, und besonders bei IBM wurde das Problem des GMR mit einem gewaltigem Einsatz an Mitarbeitern und technologischen Mitteln angegangen. Mit der mächtigen IBM konnte damals niemand mithalten, zumindest was die finanziellen Mittel und die Technologieentwicklung betraf. Wir in Jülich haben vor allem mit dem Philips-Forschungslabor in Eindhoven zusammen gearbeitet. Das war eine sehr fruchtbare Zeit – aber je perfekter die industriellen GMR-Sensoren für die Festplatten wurden, desto weiter entfernte sich deren Technik von den Möglichkeiten, die wir hier in Jülich zur Verfügung hatten.“

Das hat uns aber nicht geschadet, denn im Laufe der Zeit taten sich für uns ganz neue interessante Probleme aus dem Forschungsbereich der Grundlagen auf, die primär nichts mit dem Festplattengeschäft zu tun haben. Es ist

daraus inzwischen ein ganz neues Gebiet der Festkörperphysik entstanden, die ‚Spintronik‘. Der GMR-Effekt erwies sich als der Schlüssel zu diesem erweiterten Verständnis der elektronischen Eigenschaften von Metallen, Halbleitern und Isolatoren. Auf diesem Feld gibt es noch einen Menge zu beackern – und ich glaube, wir haben schon eine ganze Reihe schöner neuer ‚Nuggets‘ entdecken können.“

Nur in der Rückschau erscheint vieles so leicht und glücklich gefügt. Die Jugend von Peter Grünberg war dies weniger. Nach dem verlorenen Krieg werden sein Vater, ein Ingenieur bei Skoda, und seine Mutter in ein Internierungslager in Pilsen, Tschechien verbracht. Der Vater verliert dort sein Leben; die Mutter wird zur Feldarbeit eingeteilt. Nur die Großmutter kümmert sich um den sechsjährigen Jungen und seine Schwester. Nach einem Jahr wird die kleine Familie schließlich nach Lauterbach in Hessen ausgesiedelt. Die Schule und das Gymnasium dort sind zwar keine große Hürde, aber auch nicht der Ort intensiver Bemühungen und großer Erfolge. Deutliche Freude macht allenfalls der Unterricht bei dem sehr

Peter Grünberg's youth was not as blessed. After the war, his father, who was an engineer with Skoda, and his mother were transferred to an internment camp in Pilsen in the Czech Republic. His father died there. His mother was assigned work in the fields. Only his grandmother was able to look after the six-year-old boy and his sister. After a year, the small family settled in Lauterbach in Hesse. Primary and secondary school there were neither big hurdles nor were they places of intensive endeavours and great successes. What was extremely enjoyable, however, was physics

class with Mr. Röderer, a very motivated physics teacher. Röderer recognised and fostered the young boy's talent: "I see that Grünberg is even interested in astrophysics!" And yet the real fun for him back then began in his free time – playing the guitar, the youth group, and above all else, hiking and climbing in the Alps: "I would have loved to have spent my whole life in the Alps – it is without doubt my favourite landscape. And I still keep in contact with my friends from the Alpine Club, just as I still play the guitar today!"

The decision to study physics at university led him to Frankfurt and Darmstadt instead, where he found intelligent and motivating teachers in Karl-Heinz Hellwege and Stefan Hüfner – and along the way, at Frankfurt University, he also met his wife, Helma.

After receiving his PhD from Darmstadt in 1969, he took up a position as a postdoc at the University of Ottawa in Canada. The three years he spent here proved to be a very productive and particularly happy time in Grünberg's life. The time he spent in the laboratory was



motivierenden Physiklehrer Röderer, der das Talent des Jungen erkennt und fördert: „*Ich sehe, dass sich der Grünberg sogar für die Astrophysik interessiert!*“ Dennoch – der wahre Spaß beginnt für ihn in der Freizeit, beim Gitarrenspiel, in der Jugendgruppe und vor allem beim Wandern und Klettern in den Alpen: „*Gerne hätte ich in den Alpen mein ganzes Leben verbracht – das ist mit Abstand meine liebste Landschaft. Und die Freundschaften aus dem Alpenverein von damals pflege ich heute noch – genau wie das Gitarrenspiel!*“

- 1 Verlobung mit Helma Prausa auf einer Bergtour (1964)
- 2 „Die Berge sind für mich die schönste Landschaft“ (1964)

- 1 *Engagement with Helma Prausa on a mountain hike (1964)*
- 2 *“The mountains are my favourite landscape” (1964)*

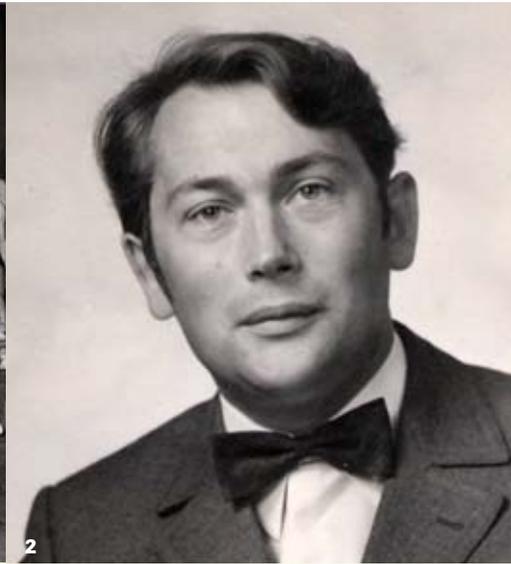
balanced by group canoe trips and hikes in the wilderness.

His by then considerable knowledge of magnetic light scattering smoothed the way for Peter Grünberg to Jülich and the new institute headed by Werner Zinn. In his research, he devoted himself to metallic magnetic layers, particularly iron, chromium and cobalt, and on the magnetism of moving electrons. Not even the very different topics pursued by the institute could change this in the slightest. His everyday life in Jülich was characterised by more and more

time spent at work despite the fact that he had three children at home. Grünberg worked tirelessly on trying to unlock the secret of magnetic interlayer coupling. But progress was not to come quickly. Looking back, the first few years in Jülich were a particularly hard time for him.

Only a long research stay at Argonne near Chicago in 1984 brought Grünberg much closer to realising his goal. Here, he was finally able to prepare samples of sufficiently high quality exhibiting the expected interlayer coupling.

Grünberg had been bitten by the physical interlayer bug and he was not about to quit any time soon. Back in Jülich, with the help of his indispensable technician Reinert Schreiber, he was finally able to make use of a brand new powerful molecular beam facility, which allowed him to prepare top-quality samples just as he had done in Argonne. Once more he invested a lot of time and effort, and eventually he made his breakthrough – he succeeded in regulating interlayer coupling in a systematic and reproducible manner and he could now publish.



Das Studium der Physik führt ihn statt dessen nach Frankfurt und Darmstadt, wo er in Karl-Heinz Hellwege und Stefan Hübner kluge und motivierende Lehrer findet – und so „nebenbei“ findet er an der Universität in Frankfurt auch seine Ehefrau Helma.

Nach Grünbergs Promotion in Darmstadt 1969 ging es an die Universität nach Ottawa, Kanada, zu einer sehr fruchtbaren und besonders glücklichen Zeit, angestellt als Postdoc für drei Jahre. Die Zeit im Labor wurde ergänzt durch gemeinsame Kanufahrten und Wanderungen in

der wilden Natur. Seine nunmehr beachtlichen Kenntnisse in magnetischer Lichtstreuung ebneten Peter Grünberg den Weg nach Jülich an das neue Institut von Werner Zinn. Bei seiner Forschung hängt sein Herz vor allem an den metallischen Magnetschichten, insbesondere Eisen, Chrom und Kobalt, und an dem Magnetismus der beweglichen Elektronen. Daran kann auch die recht unterschiedliche Thematik des Instituts nicht viel ändern. Sein Alltag in Jülich wird dabei durch zunehmenden Arbeitsinsatz gekennzeichnet, obwohl die Familie in dieser Zeit auf fünf Köpfe anwächst. Grünberg

Then unexpectedly, he discovered GMR in the fateful year of 1988.

Following this, his work gained more and more recognition. He is particularly proud of his first big prize, which he, Albert Fert and Stuart Parkin received for “new materials” from the American Physical Society in 1994. In 1998, ten years after the discovery of the GMR effect, he was awarded the German Future Prize by Federal President Roman Herzog as part of a large television gala. After this, the prizes piled up, often jointly awarded to Grünberg and

Albert Fert. The list of all of his prestigious prizes and awards is endless. It must include more than 30 at this stage.

One of the most memorable prize ceremonies along the way was the extremely dignified and yet still warm event when he was awarded the Japanese Science Prize in the presence of the Emperor and Empress of Japan in Tokyo in 2007.

However, nothing in the world is so highly regarded and so steeped in tradition as the awarding of the Nobel Prize by the Swedish King in Stockholm. The Alfred Nobel Foundation publishes the announcement, Nobel lecture and curriculum vitae of each of their Laureates online. In his CV, Peter Grünberg acknowledges each and every one of his scientific collaborations over the years (www.nobelprize.com).



4

19

arbeitet unermüdlich daran, das Geheimnis magnetischer Wechselwirkungen zu verstehen. Aber der Fortschritt lässt auf sich warten. In der Rückschau waren die ersten Jülicher Jahre für ihn eine besonders harte Zeit.

Erst ein langer Forschungsaufenthalt in Argonne bei Chicago 1984 ermöglichte es Grünberg, seinem Ziel deutlich näher zu kommen. Nun endlich kann er ausreichend hochwertige Proben präparieren, die die erwartete Zwischenschichtkopplung zeigen.

Allerdings wird bei Grünberg die Infektion mit dem „physikalischen Zwischenschicht-Virus“ nun unheilbar chronisch. Zurück in Jülich, kann er endlich mit seinem unentbehrlichen Techniker Reinert Schreiber eine brandneue leistungsfähige Molekularstrahlanlage in Betrieb nehmen und Proben höchster Qualität präparieren, so wie in Argonne. Wieder wird sehr viel Fleiß und Zeit investiert – die Zwischenschichtkopplung stellt sich jetzt endlich systematisch und reproduzierbar ein und kann publiziert werden.

Dann folgt überraschend die Entdeckung des GMR im Schicksalsjahr 1988.

- 1 Stolz Mitglied im Turnverein Lauterbach
- 2 Bewerbungsfoto für die Einstellung im Forschungszentrum Jülich, damals „Kernforschungsanlage Jülich, die „KFA“ (1972)
- 3 Werner Zinn freut sich über den Doppelerfolg von Peter Grünberg und Albert Fert in Le Creusot 1988.
- 4 Das Konferenzfoto zeigt alle Teilnehmer an der großen Magnetismus-Konferenz in Le Creusot 1988.

- 1 *A proud member of the Lauterbach gymnastic club*
- 2 *Photo submitted as part of Grünberg's job application to Forschungszentrum Jülich, which was then Nuclear Research Centre Jülich, known as the "KFA" (1972)*
- 3 *Werner Zinn is delighted about the double success of Peter Grünberg and Albert Fert in Le Creusot in 1988*
- 4 *The conference photo shows all of the delegates who attended the magnetism conference in Le Creusot in 1988*

In der Folge erhalten seine Arbeiten zunehmend mehr Anerkennung. Besonders stolz ist er auf den ersten großen Preis, verliehen für „Neue Materialien“ von der American Physical Society im Jahr 1994, den er zusammen mit A.Fert und S.S.P.Parkin erhält. 1998, zehn Jahre nach der Entdeckung des GMR- Effekts, erhält er den Zukunftspreis des Bundespräsidenten Herzog im Rahmen einer großen Fernseh-Gala. Danach häufen sich die Preise, oft gemeinsam entgegen genommen mit Albert Fert. Die Liste aller seiner hohen Preise und



Ehrungen mag er gar nicht aufzählen. Es müssen inzwischen über 30 sein.

Völlig unvergleichlich im Stil war die außerordentlich würdevolle und dennoch herzliche Veranstaltung mit dem japanischen Kaiser und der Kaiserin anlässlich der Verleihung des japanischen Wissenschaftspreises in Tokio 2007.

Aber nichts in der Welt ist im Ansehen so hoch geachtet und in seiner Tradition so ergreifend inszeniert wie die Verleihung des Nobelpreises durch den Schwedischen König in Stockholm. Die Alfred-Nobel-Stiftung veröffentlicht die Laudatio, die Nobel-Lecture und den Lebens-

lauf jedes ihrer Laureaten im Internet. In diesem Lebenslauf hat Peter Grünberg all seine zahlreichen wissenschaftlichen Weggefährten ausführlich gewürdigt (www.nobelprize.org).

Welche Frage, welches Problem liegt Peter Grünberg heute, zwanzig Jahre nach dem Schicksalsjahr 1988, besonders am Herzen? Die Antwort kommt wie aus der Pistole geschossen: „Die Energiefrage! Wie können wir eine umweltverträgliche Energieversorgung für die nachfolgenden Generationen sicher stellen? Was wird mit dem Klima? Wieso ist die Kernenergie in Deutschland keine akzeptierte Alternative mehr? Wir alle wissen, dass es zu diesen

What questions and what problems are most important to Peter Grünberg today, twenty years after that fateful year of 1988? The answer comes like a shot: “The energy question! How can we secure an environmentally-friendly energy supply for future generations? What will happen to the climate? Why is nuclear energy no longer an acceptable alternative in Germany? We all know that there are no ready-made solutions to these difficult questions – however, economy is the order of the day now more than ever. I have always hated waste – and today I see that we have fallen into

the disastrous habit of continuously squandering things. You only have to look at the packaging or used furniture and household items disposed of in our “throw-away society”. All of this involves energy that cannot be recovered.”

And what has changed for you personally after the Nobel Prize? – “With all of the engagements, I have hardly any time left over for myself. It involves a lot of effort but it is also something that I enjoy because it’s now my life, my duty. At the end of the day, nobody receives something as highly regarded and valuable as the Nobel

Prize without having to sacrifice something for it – both beforehand and afterwards. Besides, I have a wonderful wife by my side who looks after the organisation, as well as a very competent secretary in the institute. Together, both of them somehow manage to coordinate all of the requests for my time. And by the way – since I became a Nobel Laureate, I always wear a tie – or at least I always have one in my briefcase ... because you just never know!”

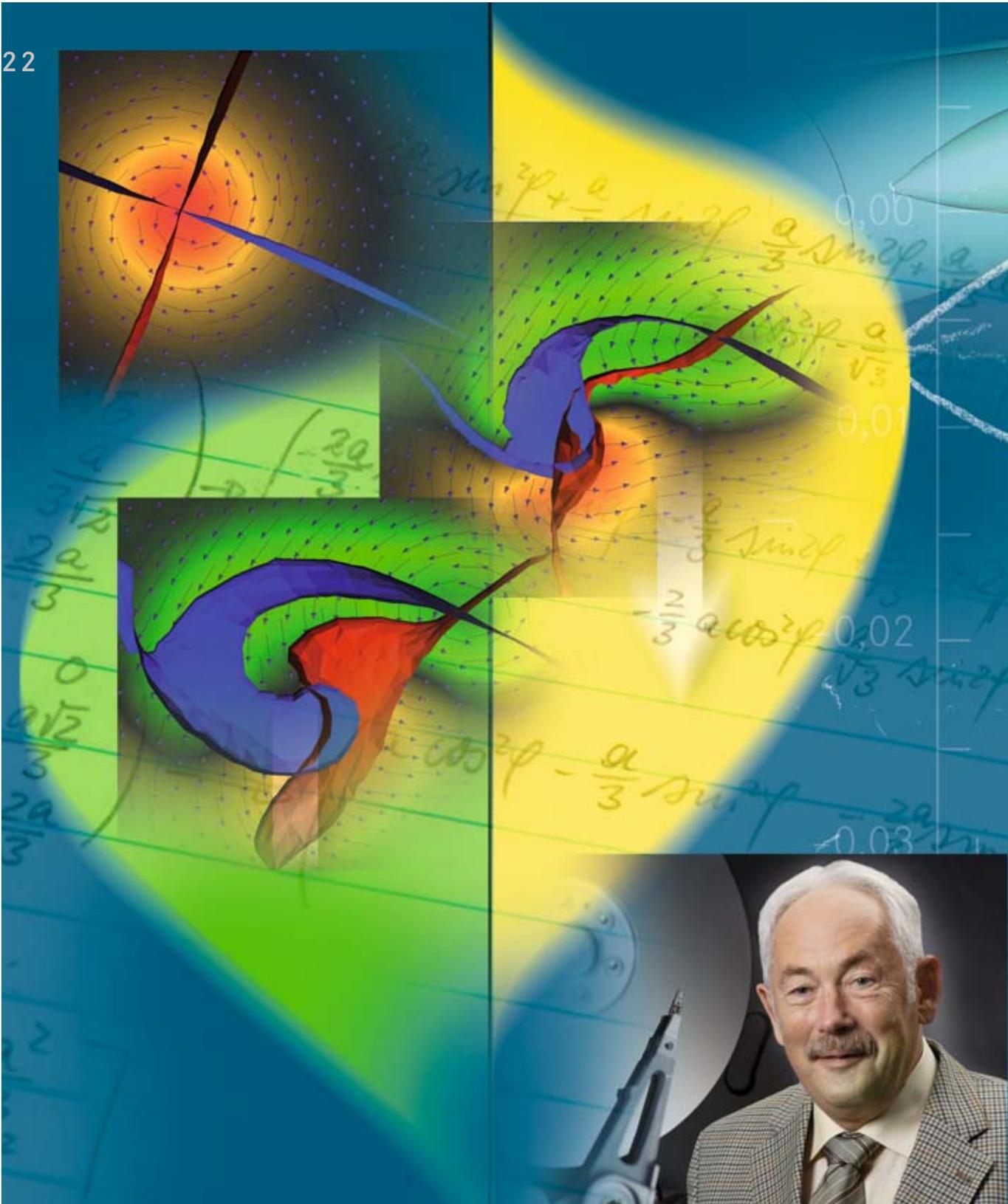


ganz großen Fragen keine Patentlösungen gibt - Sparsamkeit allerdings ist mehr denn je ein Gebot der Stunde. Verschwendung ist mir immer verhasst gewesen - und heute sehe ich, dass wir tief in eine unselige Praxis ständiger Vergeudung hinein geraten sind. Man schaue sich nur den Verpackungsmüll oder den Sperrmüll in unserer ‚Wegwerfgesellschaft‘ an. All das benötigt unwiederbringliche Energiemengen.“

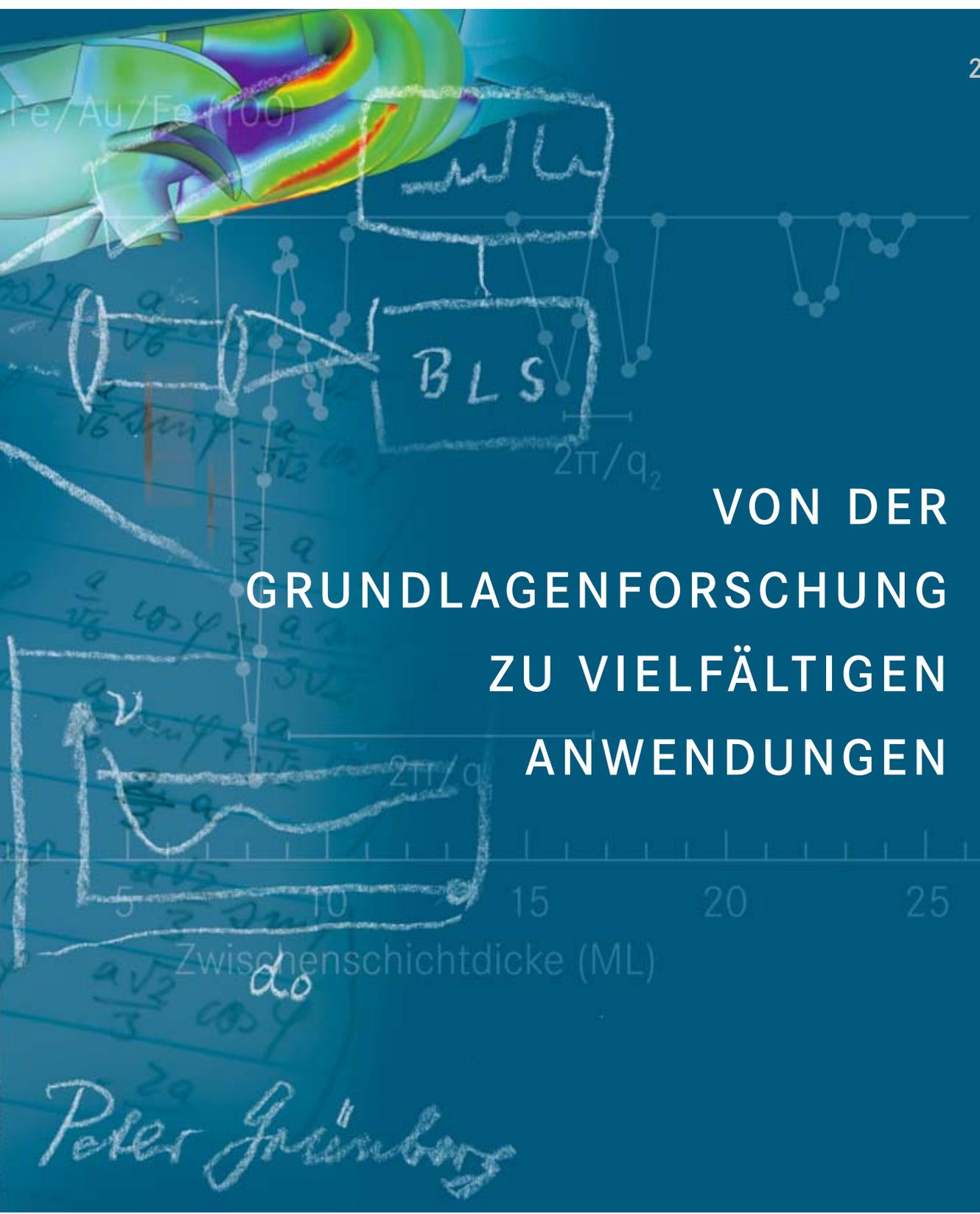
Und was hat sich persönlich geändert nach dem Nobelpreis? - „Ich habe angesichts der vielen Termine kaum noch für mich verfügbare Zeit. Das kostet viel Kraft, aber es ist natürlich auch wunderschön, denn das ist jetzt mein Leben, meine Aufgabe. Letztendlich bekommt niemand etwas so hoch angesehenes und wertvolles wie den Nobelpreis, ohne auch etwas dafür zu opfern - zuvor und danach. Außerdem habe ich eine wundervolle Frau, die mich begleitet und die Organisation übernimmt, sowie eine sehr tüchtige Sekretärin im Institut. Zusammen schaffen die beiden es irgendwie, alle Terminwünsche zu koordinieren. Und seit ich Nobelpreisträger bin, trage ich auch immer eine Krawatte - zumindest in meiner Aktentasche mit mir herum. Man weiß ja nie.“

- 1 Der Bundespräsident Roman Herzog besucht das Labor von Peter Grünberg, begleitet vom Vorstand Prof. Joachim Treusch. Links: Franz-Josef Köhne, IFF (1999)
- 2 Verleihung des Zukunftspreises des Bundespräsidenten im Rahmen einer Fernseh-Gala (1998)
- 3 Japan-Preis 2007: Helma und Peter Grünberg, Albert Fert mit Ehefrau Marie-Josée
- 4 Daheim mit der Urkunde zum Nobelpreis

- 1 *The President of the Federal Republic of Germany Roman Herzog visits Peter Grünberg's laboratory accompanied by the Chairman of the Board of Directors, Prof. Joachim Treusch. Left: Franz-Josef Köhne, IFF (1999)*
- 2 *The awarding of the German Federal President's Future Prize as part of a television gala (1998)*
- 3 *Japan Prize 2007: Helma and Peter Grünberg, Albert Fert with his wife Marie-Josée*
- 4 *At home with the Nobel Prize diploma*



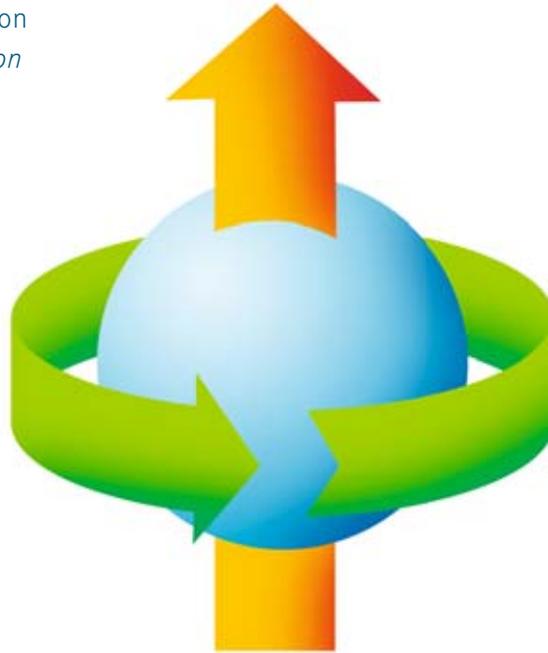
Fe/Au/Fe (100)



VON DER
 GRUNDLAGENFORSCHUNG
 ZU VIELFÄLTIGEN
 ANWENDUNGEN

Peter Grünberg

Das Elektron *The electron*



■ Elektrische Ladung: (eine negative Elementarladung)	- e	■ Charge: (elementary charge unit)	- e
■ Spin: (Eigendrehimpuls)	+ $\hbar/2$	■ Spin: (angular momentum)	+ $\hbar/2$
■ Magnetisches Moment: (Bohrsche Magneton-Einheiten)	-1,00114 μ_B	■ Magnetic moment: (Bohr magnetons)	-1,00114 μ_B

Abb. 1: Alle Elektronen sind negativ geladen, besitzen einen Drehimpuls (Spin) und ein magnetisches Moment. In einem Magnetfeld hat der Elektronenspin nur zwei Einstellmöglichkeiten: parallel oder antiparallel zum Magnetfeld. Viele Elektronen zusammen bewirken mit der Summe ihrer kleinen elementaren Momente den kräftigen Magnetismus, wie er beispielsweise von Eisen oder Kobalt bekannt ist. Elektrischer Strom entsteht durch die Bewegung von Elektronen in Metallen. Beim Stromtransport in Kabeln und Drähten spielt der Spin im Allgemeinen keine Rolle, weil Elektronen mit beiden Spinrichtungen gleich stark zum Stromfluss beitragen. Dagegen kann der Spin in sehr engen Geometrien, etwa in ganz dünnen Schichten oder innerhalb eines Atoms, sehr wichtig werden - insbesondere in der Gegenwart von Magnetfeldern oder magnetischen Materialien.

Fig. 1: All electrons are negatively charged and they possess a spin and a magnetic moment. In a magnetic field, the electron spin has only two alignment options: parallel or antiparallel to the magnetic field. With the sum of their small elementary moments, many electrons together can lead to a strong form of magnetism, called ferromagnetism, as is known for iron and cobalt. Electric current is created by the movement of electrons in metals. In general, the spin does not play a role in transporting electric current in cables and wires because electrons with both spin directions contribute equally to the flow of current. In contrast, the spin can become very important in very narrow geometries, for example in very thin layers or inside an atom - particularly in the presence of magnetic fields or magnetic materials.

Siamesische Zwillinge, einschaltbare Gefängnisse und „Stolperfallen“ für Elektronen

Das Zwillingsparadox des Magnetismus

In den Achtzigerjahren wollte Peter Grünberg einige ungelöste Probleme des Magnetismus dünner Schichten in Angriff nehmen, denn wie so oft in der Geschichte ermöglichten es damals neue technische Entwicklungen, eine altbekannte Frage mit besseren Methoden anzugehen und zu lösen. Er wollte herausfinden, was geschieht, wenn man einen Magneten ganz vorsichtig „in zwei Scheiben schneidet“ - nicht etwa mit einer groben Säge, sondern sozusagen „superfein“, auf atomarer Skala. Bei diesem Gedankenexperiment ergibt sich nämlich sofort das folgende „Siamesische Zwillingsparadox“: Ein unverletzter Ferromagnet besteht aus vielen parallelen atomaren „Elementarmagneten“, die alle eine stabile einheitliche Ausrichtung besitzen (Abb. 2 oben). Ein aufgetrennter Ferromagnet dagegen legt sich mit aller Kraft antiparallel neben seinen Zwilling - Nordpol an Südpol und Südpol an

Nordpol (Abb. 2 unten). Es ist nur mit hohem Energieaufwand möglich, die Zwillinge wieder „Kopf an Kopf“ zusammen zu fügen.

Des Rätsels Lösung muss darin zu finden sein, dass die bekannte magnetische Kraft, die wir bei den getrennten Zwillingen spüren können, durch eine noch viel stärkere Kraft übertroffen wird. Diese Kraft wird aber erst wirksam, wenn die beiden Zwillinge wieder zu einem einzigen Magneten „verschmelzen“. Es war zwar theoretisch klar, dass diese sehr starke Kraft die „quantenmechanische Austauschwechselwirkung“ der beteiligten Elektronen sein muss, aber viele Fragen blieben offen:

- Über welchen Abstand wirkt diese Kraft?
- Wie wird eine dünne unmagnetische Schicht durch magnetische Unterlage beeinflusst?
- Können magnetische Metalle ihren Magnetismus durch unmagnetische Metalle, wie etwa Kupfer oder Gold, hindurch vermitteln?

A BEGINNING FULL OF SURPRISES

SIAMESE TWINS, PRISONS THAT CAN BE SWITCHED ON, AND “STUMBLING BLOCKS” FOR ELECTRONS

The Twin Paradox of Magnetism

In the eighties, Peter Grünberg wanted to address a number of unsolved questions associated with the magnetism of thin layers because, as so often in history, new technological developments made it possible to tackle and solve well-known problems using better methods. He wanted to find out what would happen if you very carefully cut a magnet into two slices - not with a coarse saw but rather extremely thinly on an atomic scale. This

thought experiment immediately results in the following “Siamese twin paradox”. An intact ferromagnet consists of many parallel atomic elementary magnets which all possess a stable uniform orientation (Figure 2, top). A split ferromagnet on the other hand will align itself with all of its strength in an antiparallel direction alongside its twin - north pole to south pole and south pole to north pole (Figure 2, bottom). Only by using a lot of energy is it possible to join the twins “head-to-head” once again.

This mystery can be explained as follows: the known magnetic force that we can feel in the separated twins is overpowered by a much stronger force. This force, however, only becomes effective when both twins are remerged to form a single magnet. Although it was theoretically clear that this very strong force must be the quantum-mechanical exchange interaction of the electrons involved, a number of questions still remained unanswered:

Das Zwillingsparadox des Magnetismus

The twin paradox of magnetism

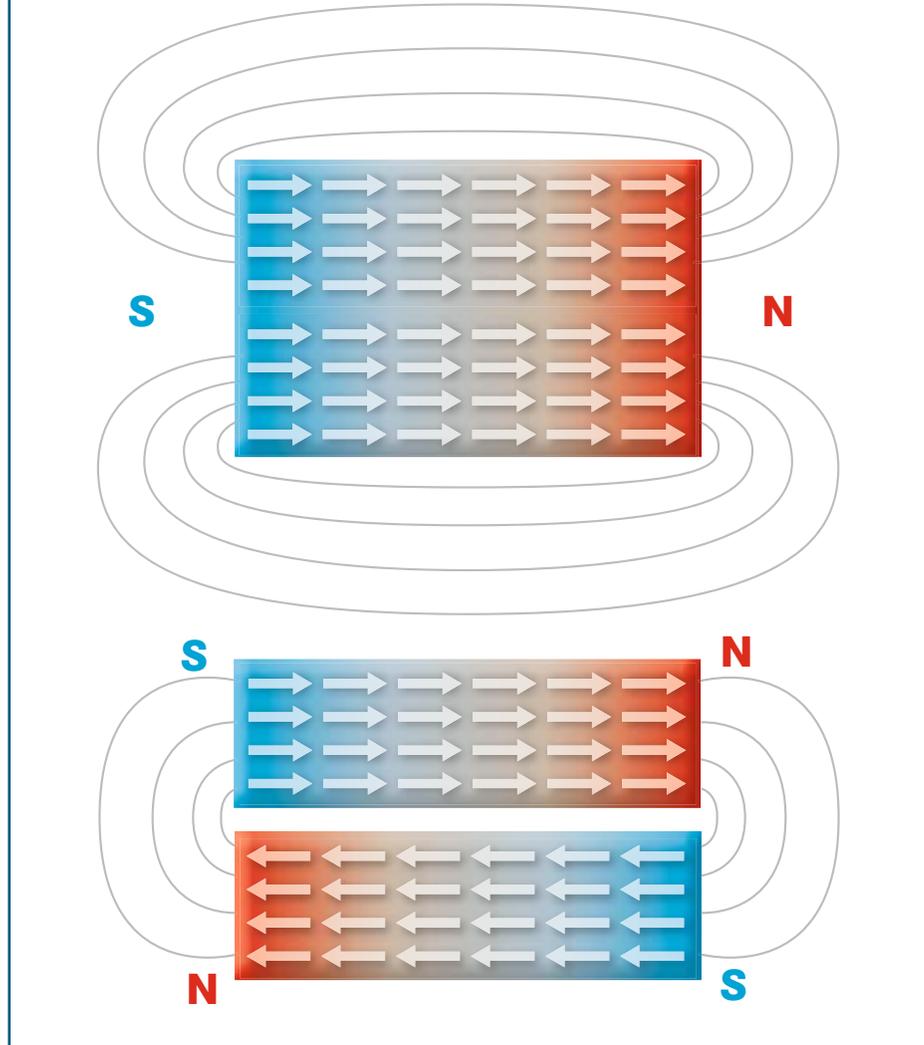


Abb. 2: Innerhalb eines Ferromagneten wirkt eine starke Kraft, die eine parallele Ausrichtung der atomaren Elementarmagnete bewirkt: die elektronische „ferromagnetische Austauschwechselwirkung“. Die Kraft des magnetischen Feldes dagegen möchte die Feldenergie minimieren und deshalb die Magnete möglichst antiparallel, also einander entgegengesetzt, ausrichten. Wird ein Magnet aufgetrennt, so sind die Elektronen nicht mehr direkt im Kontakt. Dadurch wird die Wirkung der elektronischen Austauschwechselwirkung unterbrochen und die magnetische Kraft dominiert. Die antiparallele Einstellung wird mit großer Kraft realisiert.

Fig. 2: Within a ferromagnet the strong electronic exchange interaction is responsible for the parallel alignment of the magnetic moments. This is in contrast to the magnetic field energy, which favours the antiparallel alignment of the moments. If a magnet is cut open, the electronic contact and the corresponding electronic exchange interaction are interrupted. Now, the magnetic forces dominate and antiparallel alignment is forcefully established.

- Können die ferromagnetisch geordneten Metalle, deren Spins ja alle parallel sind, ihren Magnetismus auch durch ein antiferromagnetisches Metall wie Chrom hindurch vermitteln? Im Antiferromagneten wechseln die Spins nämlich Lage für Lage ihre Orientierung, so dass Chrom nach außen hin als unmagnetisch erscheint.

Bei diesen Fragen geht es um das grundlegende Verständnis der Physik von gebundenen oder beweglichen Elektronen in Metallen – an einen Sensor dachte damals niemand. Genau zu dieser Zeit bot die noch ganz junge Nanotechnologie die Möglichkeit, dünne Schichten und Mehrfachsichtungen, also „Schichtpakete“ aus unterschiedlichen Materialien, zuverlässig und reproduzierbar herzustellen und zu untersuchen – und diese brandneue Möglichkeit hatte es Peter Grünberg angetan. Wenn man nämlich Metallschichten lagenweise aufdampft, dann kann man ihre Zusammensetzung auf atomarer Skala variieren und beispielsweise perfekte „Siamesische Zwillinge“ Schicht für Schicht aufbauen – getrennt durch eine oder mehrere Atomlagen von ganz

unterschiedlichen Metallen. Für diese Experimente stand ihm eine neue „Molekularstrahl-Epitaxieanlage“ zur Verfügung. In ihr konnte er unterschiedliche Atomsorten in nahezu perfektem Vakuum aufdampfen und hochreine dünne Metallschichten „aufwachsen“. An den so hergestellten Proben konnte er untersuchen, ob magnetisches Eisen seinen Magnetismus durch antiferromagnetisches Chrom hindurch überträgt. Andere Schichtstrukturen sollten zeigen, ob der Magnetismus des Eisens oder des Kobalts durch eine trennende dünne Kupferschicht hindurch mit Hilfe der im Kupfer frei beweglichen Leitungselektronen auf eine Zwillingschicht einwirken kann.

Bei dicken Zwischenschichten aus Kupfer erwartet man natürlich die antiparallele Ausrichtung des Magnetismus in den Eisenschichten, weil man ja weiß, dass Magnetfelder leicht durch unmagnetische Materialien hindurch wirken (Abb. 3 oben rechts). Die Vorstellung von wirksamen Feldlinien führt aber in die Irre, wenn die Zwischenschicht nur wenige Atomlagen dünn ist (Abb. 3 oben links). Dann wird die direkte Wechselwirkung zwischen frei beweg-

- *Over what distance does this force act?*
- *How is a thin non-magnetic layer influenced by magnetic substrates?*
- *Can magnetic metals pass their magnetism through non-magnetic metals such as copper or gold?*
- *Can ferromagnetic metals, whose spins are all parallel, also pass their magnetism through an antiferromagnetic metal such as chromium?*

In antiferromagnets, the spins change their orientation layer by layer so that chromium, for example, appears to be non-magnetic from the outside.

These questions all deal with a basic physical understanding of bound or moving electrons in metals – sensors were yet to be thought of. At this point in time, the relatively new field of nanotechnology offered the possibility of producing and examining thin layers and multilayers, in other words layered structures, made of different materials in a reliable and reproduc-

ible manner – and this brand new opportunity aroused Peter Grünberg’s interest. If metal layers are vaporised and condensed in layers, then their composition can be varied on an atomic scale and perfect Siamese twins, for example, can be built up layer for layer – separated by one or more atomic layers made of very different metals. For these experiments, he made use of a new molecular beam epitaxy system. Using this system, he vaporised and condensed different types of atoms in an almost perfect vacuum and grew highly pure thin metal layers. He then used the samples

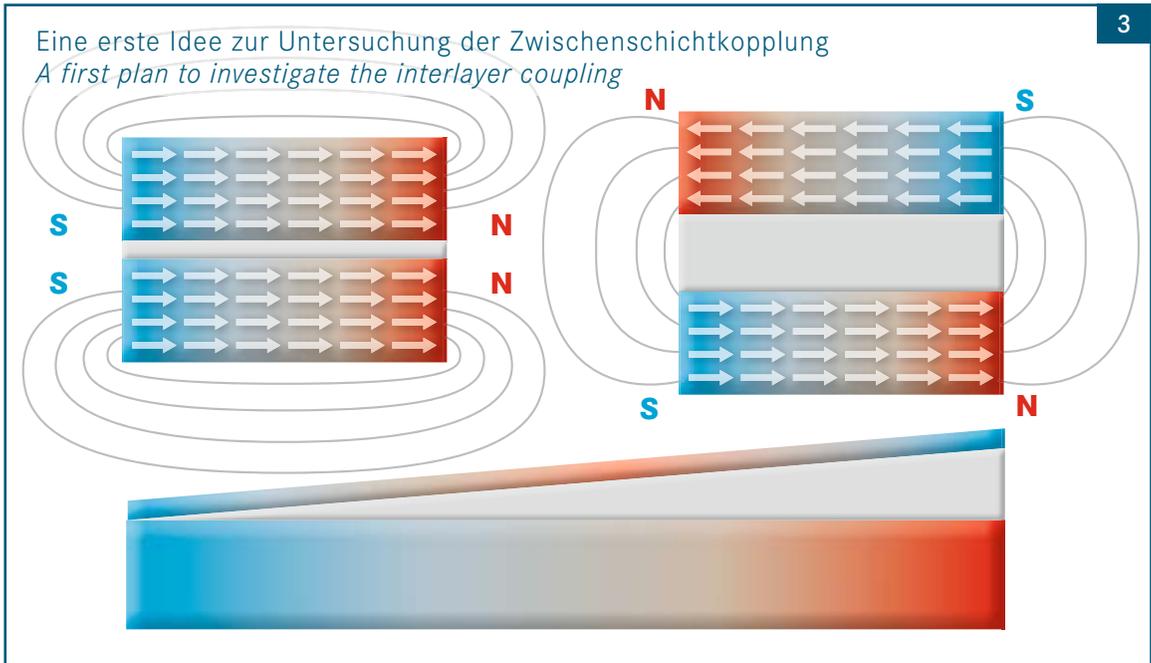


Abb. 3: Oben links: Die Zwischenschichtkopplung durch bewegliche Elektronen muss auch durch eine sehr dünne, unmagnetische leitfähige Schicht hindurch wirksam sein – die beiden ferromagnetischen Zwillinge bleiben dabei parallel ausgerichtet.

Oben rechts: Wird die leitfähige Schicht immer dicker, muss die Stärke der Kopplung sinken und die magnetischen Kräfte werden überwiegen. Die Zwillinge werden antiparallel magnetisiert.

Unten: Eine keilförmige Zwischenschicht ermöglicht eine sehr sorgfältige Untersuchung dieses Verhaltens. Sie könnte einen Umschlagpunkt zwischen der parallelen und der antiparallelen Schichtmagnetisierung zeigen. Wird antiferromagnetisches Chrom als Zwischenschicht benutzt, zeigt sich aber ein viel aufregenderes Ergebnis (siehe S. 34).

Fig. 3: Top left: The interlayer coupling by free electrons should be effective through a thin non-magnetic conducting layer – the twins remain magnetised in parallel.

Top right: If the thickness of the conducting interlayer increases, the coupling strength decreases and the magnetic forces prevail. The twins are magnetised in opposite directions.

Bottom: A wedge-shaped interlayer allows this behaviour to be comprehensively investigated. It can also show the turning point from parallel to antiparallel magnetisation of the layer. If antiferromagnetic chromium is used as the interlayer, a much more exciting result is generated (see page 34).

fabricated in this manner to investigate whether magnetic iron passes its magnetism through antiferromagnetic chromium. Other layer structures should show whether the magnetism of iron or cobalt has an effect on a twin layer when it passes through a thin separating copper layer with the aid of freely moving conduction electrons in the copper.

If thick interlayers of copper are used, then an antiparallel orientation of the magnetism in the iron layers is naturally expected because it is common knowledge that magnetic fields

easily act through non-magnetic materials (Fig. 3, top right). The concept of active field lines is misleading when the interlayer is only a few atomic layers thin (Fig. 3, top left). In this case, the direct interaction between freely moving electrons is much stronger than the influence of the magnetic fields.

A brilliant idea is to grow high-quality homogeneous magnetic layers with a wedge-shaped interlayer. This represents the longed for, well-defined twin sample, which can be used to successively investigate coupling as a function of

the layer thickness in neighbouring locations. In doing so, the bottom layer is often designed to be quite thick so that its direction of magnetisation will remain fairly stable, while the upper layer should be very thin in order to be able to react sensitively to the changeable coupling through the interlayer. These wedge-shaped triple-layer samples led to significant progress in terms of the reliability and reproducibility of results.

lichen Elektronen viel stärker als der Einfluss der magnetischen Felder.

Ein genialer Trick ist es nun, hochwertige gleichförmige Magnetschichten mit einer keilförmigen Zwischenschicht aufzuwachsen. Damit hat man die lang ersehnte wohldefinierte Zwillingsprobe präpariert, an der man die Kopplung als Funktion der Schichtdicke sukzessive an benachbarten Orten untersuchen kann (Abb. 3 unten). Dabei wird die untere Schicht oft recht dick ausgeführt, so dass ihre Magnetisierungsrichtung eher stabil ausgerichtet bleibt, während die obere Schicht sehr dünn sein sollte, um auf die veränderliche Kopplung durch die Zwischenschicht empfindlich zu reagieren. Diese keilförmigen Dreischichtproben führten zu einem gewaltigen Fortschritt im Hinblick auf die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Hier erkennen wir auch zum ersten Mal ein sehr kluges Konzept: Eine relativ dicke Schicht, deren Ferromagnetismus ziemlich fest und unbeweglich ist, wird als „Unterlage“ genommen, um auf ihr eine dünne unmagnetische Kop-

pelschicht und darauf eine dünne, sensible, „umschaltbare“ Magnetschicht abzuscheiden. Noch unerkannt, tat sich schon damals ganz leise ein Tor auf zu einer gewaltigen neuen Entwicklung ...

Kupfer als Zwischenschicht ergibt ein „schaltbares Gefängnis“

Die Leitungselektronen in einer Kupfer-Zwischenschicht folgen den Gesetzen der Quantenmechanik, wobei sie sich relativ frei und mit sehr hoher Geschwindigkeit innerhalb der Metalle bewegen. Obwohl man sich die Elektronen als kleine geladene Teilchen vorstellen kann, zeigen sie auch Eigenschaften, wie man sie sonst nur von Wellen kennt, nämlich Schwingungen (Oszillationen) und insbesondere stehende Wellen, wenn man sie in ein kleines „Gefängnis“ (Potentialtopf) aus unterschiedlichen Materialien steckt. Eine wesentliche Rolle spielt in unseren magnetischen Schichtpaketen der Spin der Leitungselektronen, denn er bewirkt eine unterschiedliche Reflektion an den Grenzflächen vom unmagnetischen Kupfer zum Ferromagneten, abhängig

In addition, a very clever design can be recognised here for the first time:

a relatively thick layer whose ferromagnetism is fairly stable and stationary is used as a substrate on which a thin non-magnetic coupling layer is first deposited before a thin, sensitive, switchable magnetic layer is then deposited on this. It went unnoticed at the time but a gateway opened very quietly that was to lead to an incredible new development ...

A Copper Interlayer Forms a “Prison That Can Be Switched On and Off”

The conduction electrons in a copper interlayer follow the laws of quantum mechanics, whereby they move relatively freely at very high speeds inside metals. Although it is not difficult to imagine electrons as small charged particles, they also exhibit properties that are usually associated with waves, namely oscillations and more interestingly standing waves, when they are placed in a small prison (potential well) made of different materials. In our magnetic layered structures, the spin of the conduction elec-

trons plays a significant role because it causes a different reflection on the interfaces between non-magnetic copper and ferromagnets depending on the relative orientation of the electron spin and layer magnetisations. Figures 4 and 5 illustrate this more clearly.

In the case of antiparallel magnetic layers, each spin orientation is reflected at one of the interfaces (Fig. 4, top). The situation in a symmetrical case is completely different (Fig. 4, bottom).

Die spinabhängige Grenzflächenstreuung *Spin-dependent interface scattering*

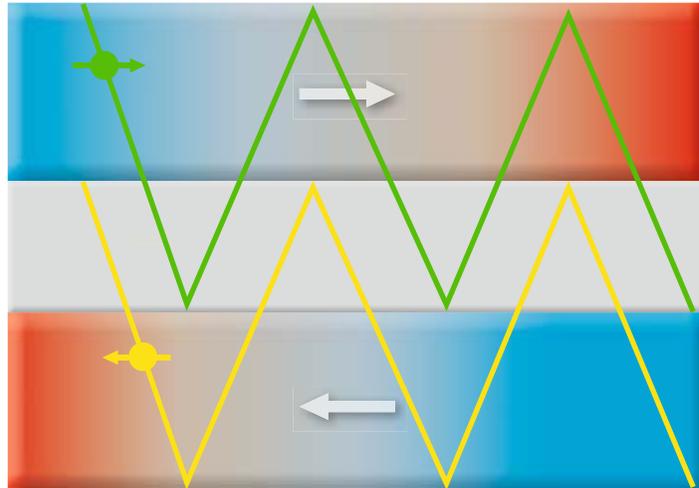


Abb. 4: Die spinabhängige Streuung führt bei antiparalleler Magnetisierung (oben) zu ähnlichem Verhalten für bewegliche Elektronen beider Spinorientierungen. Dagegen bildet sich bei paralleler Magnetisierung (unten) ein völlig unterschiedliches Verhalten aus: Elektronen mit parallelem Spin bewegen sich frei durch die Schicht, während für Elektronen mit antiparallelem Spin an beiden Grenzflächen durch spinabhängige Reflexion eine kleine Barriere entsteht, die zur Bildung eines „Potenzialtopfes“ in der mittleren Schicht führt.

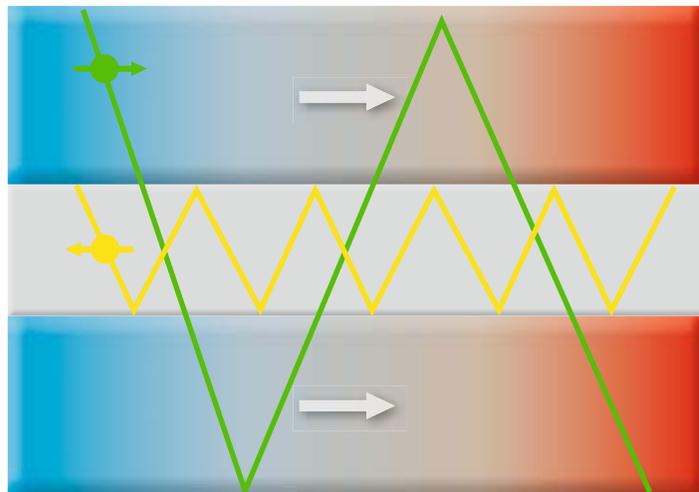


Fig. 4: In antiparallel magnetisation (top), spin-dependent scattering leads to similar behaviour for moving electrons of both spin orientations. In parallel magnetisation (bottom), on the other hand, completely different behaviour is observed: electrons with a parallel spin move freely through the layer, while electrons with an antiparallel spin face a small barrier, which is caused by spin-dependent reflection at both interfaces and leads to the creation of a potential well in the middle layer.

Potenzialtopf-Gefängnis
Potential-well prison

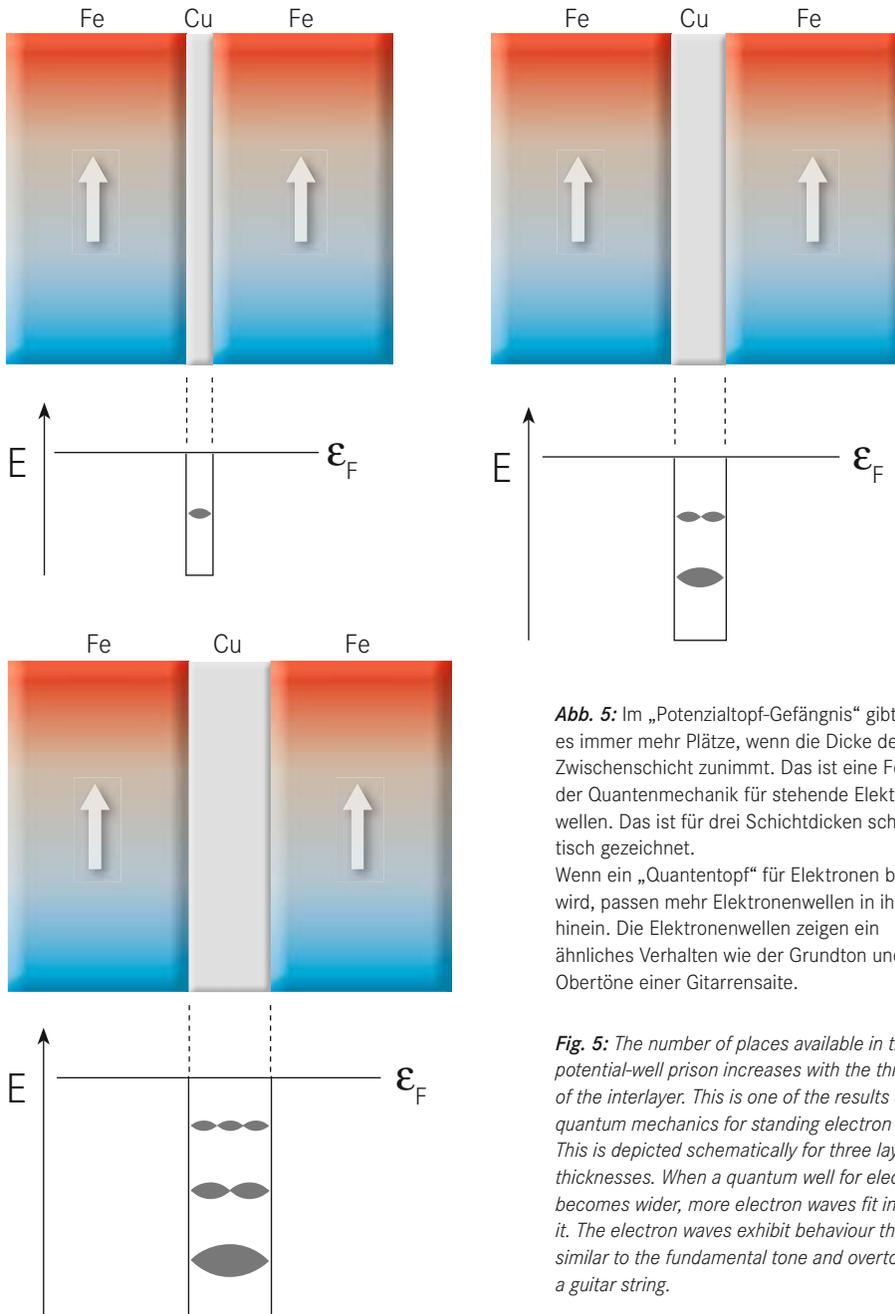


Abb. 5: Im „Potenzialtopf-Gefängnis“ gibt es immer mehr Plätze, wenn die Dicke der Zwischenschicht zunimmt. Das ist eine Folge der Quantenmechanik für stehende Elektronenwellen. Das ist für drei Schichtdicken schematisch gezeichnet.

Wenn ein „Quantentopf“ für Elektronen breiter wird, passen mehr Elektronenwellen in ihn hinein. Die Elektronenwellen zeigen ein ähnliches Verhalten wie der Grundton und die Obertöne einer Gitarrensaite.

Fig. 5: The number of places available in this potential-well prison increases with the thickness of the interlayer. This is one of the results of quantum mechanics for standing electron waves. This is depicted schematically for three layer thicknesses. When a quantum well for electrons becomes wider, more electron waves fit into it. The electron waves exhibit behaviour that is similar to the fundamental tone and overtones of a guitar string.

von der relativen Orientierung von Elektronenspin und Schichtmagnetisierung. Das erkennt man am besten an den beiden Bildern auf Seite 30.

Im Fall der antiparallelen Magnetschichten erleidet jede Spinorientierung an einer der Grenzflächen eine Reflektion (Abb. 4 oben). Ganz anders ist die Situation im symmetrischen Fall (Abb. 4 unten). Dabei sind die Elektronen mit paralleler Spinausrichtung gänzlich frei im Schichtpaket beweglich, aber die Elektronen mit antiparallelem Spin werden geradezu eingesperrt zwischen den beiden magnetischen Schichten. Offensichtlich bewirkt das Umdrehen der Magnetisierung in der einen Schicht weitgehende Freiheit für Elektronen einer Spinorientierung, aber große Einschränkungen für die andere Spinrichtung: Wir haben damit ein „schaltbares Gefängnis“ für die Elektronen einer Spinorientierung entdeckt.

Jedesmal, wenn die Schichtdicke um eine oder mehrere Atomlagen gewachsen ist, sinkt die „Schwingungsenergie“ der Elektronenwellen, und der Potenzialtopf kann eine zusätzliche

Elektronenwelle aufnehmen. Das ist analog einer tieferen Tonlage bei einer längeren Gitarrensaite. Dabei ändert sich auch die durch die Elektronen übertragene Kopplungsstärke zwischen den magnetischen Schichten. Aus diesem Grund oszilliert die Übertragung magnetischer Informationen, wobei das Vorzeichen wechselt und die Stärke der Kopplung periodisch zu- und abnimmt. Die Graphik zeigt Resultate für die Zwischenschichtkopplung durch eine unmagnetische Goldschicht hindurch, gemessen von Grünberg und Mitarbeitern am Schichtsystem Fe/Au/Fe (Abb. 6).

Besonders augenfällig sind die Ergebnisse, wenn eine antiferromagnetische Chromschicht als Zwischenschicht eingesetzt wird. Auch hier variiert die Stärke der Kopplung, und es wechselt das Vorzeichen der übertragenen magnetischen Information. Wenn sich die Chrom-Zwischenschichtdicke um eine einzige Atomlage ändert, wechselt die obere Eisenschicht ihre Magnetisierungsrichtung – abwechselnd parallel oder antiparallel zur unteren Schichtmagnetisierung (Abb. 7).

Electrons with a parallel spin orientation (Fig. 4) are completely free to move in the layered structure, but the electrons with antiparallel spin are virtually imprisoned between the two magnetic layers. Apparently, reversing the magnetisation in the layer on the right leads to a large degree of freedom for electrons of one spin orientation but to huge constraints for those of the other spin orientation: with this, we have discovered a prison that can be switched on and off for electrons of one spin orientation.

Every time the layer thickness grows by one or more atomic layers, the oscillation energy of the electron waves decreases and the potential well can accommodate an additional electron wave. This is analogous to a guitar string with a low pitch. Here, the coupling strength between the magnetic layers transmitted by the electrons also changes. This causes the transfer of magnetic information to oscillate, whereby the signs change and the strength of the coupling periodically increases and decreases. The graphic shows the results of interlayer coupling through a non-magnetic gold layer measured

by Grünberg and his colleagues on the layer system Fe/Au/Fe:

The results generated when an antiferromagnetic chromium layer is used as an interlayer are particularly striking. The strength of the coupling varies here too and the signs of the magnetic information transferred also change. When the chromium interlayer changes by a single atomic layer, the upper iron layer changes its direction of magnetisation – alternately parallel or antiparallel to the lower layer magnetisation.

Zwischenschichtkopplung Interlayer coupling

6

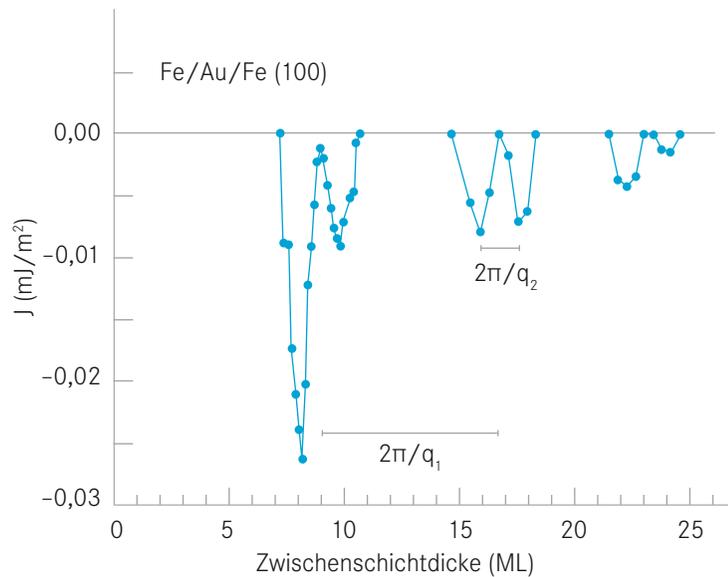


Abb. 6: Zwischenschichtkopplung, gemessen am Schichtsystem $\text{Fe}/\text{Au}/\text{Fe}$. Die Dicke der Zwischenschicht wird variiert. Immer, wenn ein neues Elektron in den „Quantentopf“ eingebaut wird, oszilliert die Kopplung. Der beobachtete „Doppelpeak“ entsteht durch besondere Details der elektronischen Struktur im Gold.

Fig. 6: Interlayer coupling measured on the layer system $\text{Fe}/\text{Au}/\text{Fe}$. The thickness of the interlayer is varied. Whenever a new electron is incorporated into the quantum well, the strength of the coupling oscillates. The double peak observed is produced by details in the electronic structure (Fermi surface) of gold.

Oszillatorische Zwischenschichtkopplung Oscillatory interlayer coupling

7

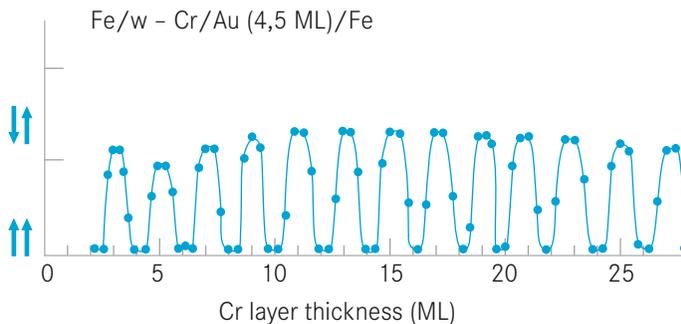


Abb. 7: Oszillatorische Zwischenschichtkopplung im System $\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Au}/\text{Fe}$ als Funktion der Dicke der Chromschicht. Als Ursache für die Oszillationen wird die antiferromagnetische Ordnung innerhalb der Chromschicht vermutet, die bei jeder neuen Atomlage Chrom zu einer Umkehrung der Kopplung führen könnte. Allerdings ergeben sich durch das gleichzeitige Wirken verschiedener Kopplungen komplizierte und noch nicht endgültig geklärte Vorstellungen, die weiter untersucht werden müssen.

Fig. 7: Oscillatory interlayer exchange coupling in an $\text{Fe}/\text{Cr}/\text{Au}/\text{Fe}$ structure as a function of the thickness of the chromium layer. The origin of the oscillation is thought to be the antiferromagnetic order within the chromium layer, which could lead to a reversal of the coupling for every new chromium atomic layer. However, the simultaneous action of different couplings gives rise to complicated interactions that have yet to be properly explained and need further investigation.

Untersuchung der Zwischenschichtkopplung
Investigation of interlayer coupling

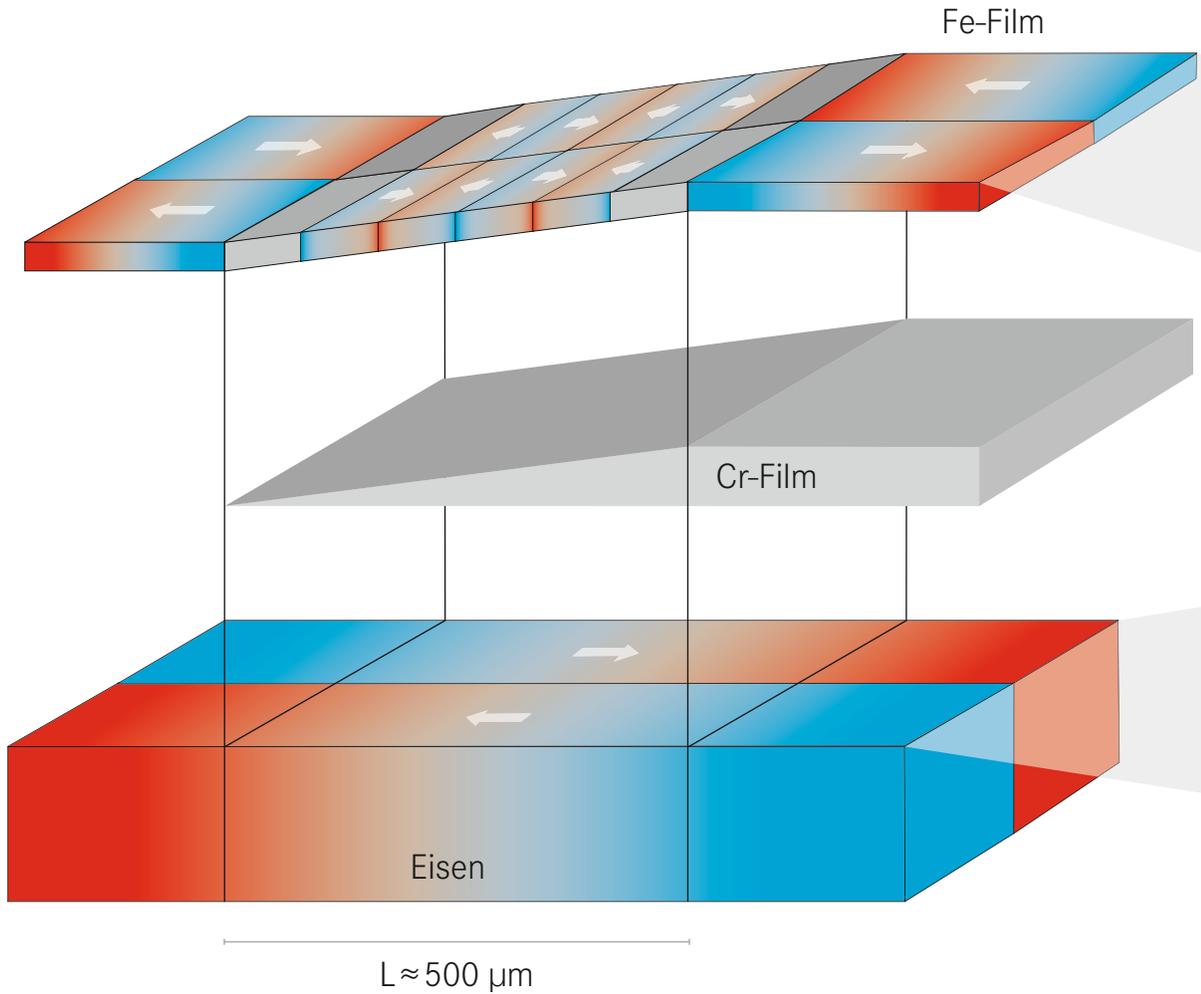


Abb. 8: Untersuchung der Zwischenschicht-Kopplung im System Fe/Cr/Fe mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops mit zusätzlicher Spinanalyse. Die Unterlage hat zwei Magnetisierungsrichtungen, die antiferromagnetische Chrom-Koppelschicht hat Keilstruktur. Durch die gleichmäßige Zunahme des Zwischenschichtabstandes ergibt sich bei oszillierender Kopplung eine abwechselnd parallele oder antiparallele Orientierung der Magnetisierung in der oberen Eisenschicht. Das sehr überzeugende Messergebnis ist rechts oben gezeigt. Es zeigt in Querrichtung auch die inversen Magnetisierungsrichtungen, bewirkt durch die beiden Domänen in der Basisschicht. Die Skala im Bild rechts unten zeigt die zunehmende Dicke des Chromkeils (in atomaren Schichten).

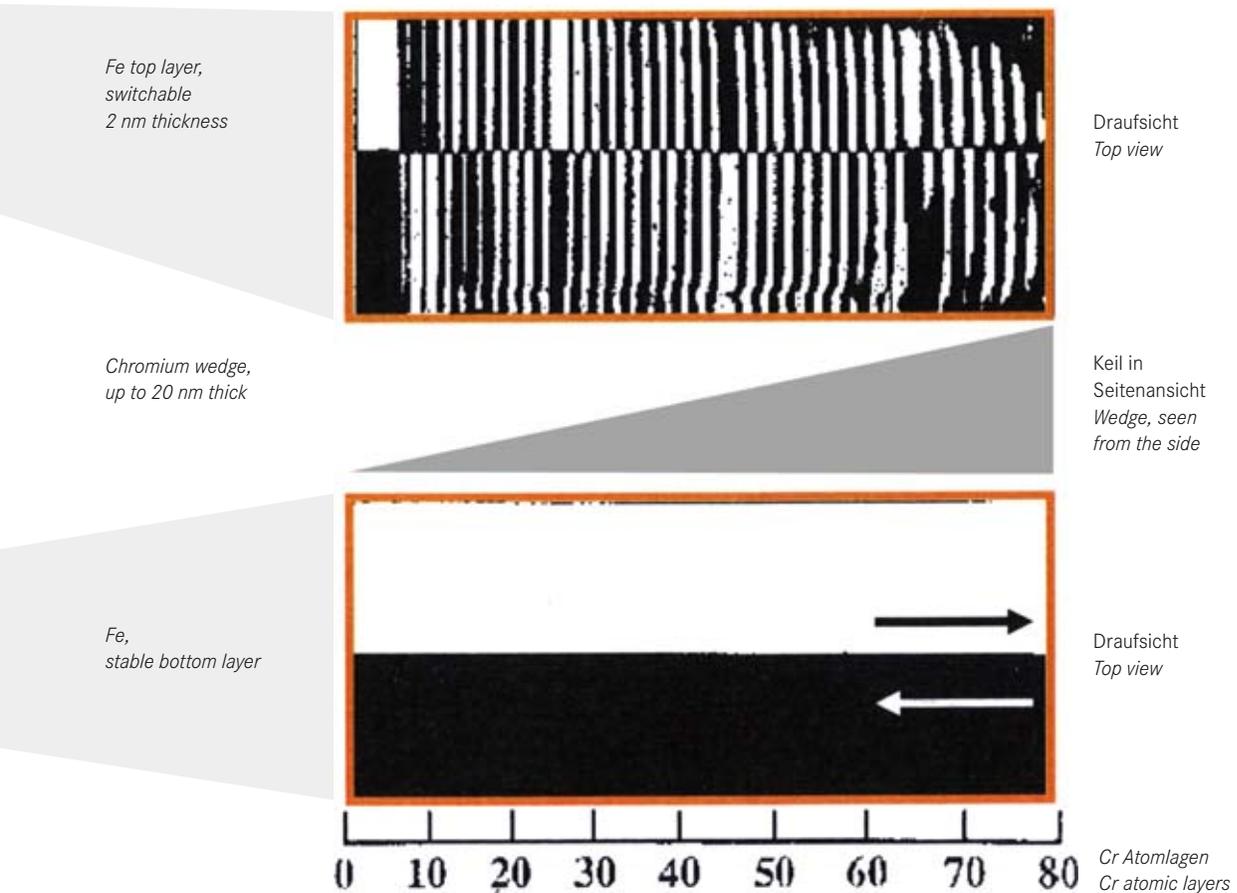


Fig. 8: Investigation of interlayer coupling in the system Fe/Cr/Fe using a scanning electron microscope with a spin analysis option. The stable Fe bottom layer contains two domains with opposite magnetisation. The chromium interlayer is antiferromagnetic and has a wedge shape. The continuously growing chromium interlayer transmits an oscillating interaction. The resulting coupling leads to a parallel or antiparallel magnetisation of the top iron layer. The measured data are very convincing (top right). Across the sample, the inverted orientation of the magnetisation on top of the two domains of the bottom layer is clearly visible. The right-hand bottom scale shows the increasing thickness of the Cr wedge in atomic layers.

Nunmehr ist es an der Zeit, dem erfolgreichen Verfahren den angemessenen Namen zu geben: *Magnetische Zwischenschicht-Austauschkopplung*.

Darin steckt ein Geheimnis der Quantenphysik von Elektronen: Weil Elektronen ihre Plätze wechseln („austauschen“) können, wenn sie frei beweglich sind, tauschen sie beim Platzwechsel immer auch die Information über ihre jeweilige Ausrichtung von Spin und magnetischem Moment aus. Es ist die damit verbundene „Austauschwechselwirkung“, die ausreichend Energie liefert, um viele Elektronenspins parallel zu stellen und damit den Ferromagnetismus zu bewirken. Das etwas schwierige Verständnis der Austauschwechselwirkung ergibt sich aus der elektrostatischen Energie der Elektronen („Coulomb-Energie“) und dem Einfluss des Spins (wegen der „Fermistatistik“ der Elektronen).

Wenn man eine leistungsfähige neue Untersuchungsmethode erst einmal beherrscht, dann wendet man sie natürlich auch auf alle möglichen unterschiedlichen Schichtsysteme

an – und erhält dabei immer überraschendere Ergebnisse!

Als noch aufregender, aber unübersichtlicher erwies sich zum Beispiel die Zwischenschicht-Austauschkopplung, wenn Übergangsmetalle oder Seltene Erden eingesetzt werden. Nun ergaben sich auch schraubenförmig drehende Austauschkopplungen – für den Physiker ein wahres Eldorado, um die aufregenden Details des Magnetismus zu ergründen. Besonders Keilschichten von Yttrium zwischen Dysprosium oder Gadolinium erwiesen sich als wahre Fundgruben für neue Erkenntnisse. Das wäre Arbeit genug gewesen für viele Jahrzehnte, aber es sollte nicht dabei bleiben, denn weitere, größere Überraschungen taten sich auf. Entscheidend für die weitere Entwicklung wurde das Jahr 1988.

Perhaps we should now refer to the successful procedure by its proper name: magnetic inter-layer exchange coupling.

This holds the secret to the quantum physics of electrons: because electrons can exchange places with each other, when they can move freely, they also exchange information on their spin orientation and the direction of their magnetic moment when they swap places. The exchange interaction associated with this delivers enough energy to arrange a large number electron spins in a parallel direction which causes

ferromagnetism. The somewhat difficult understanding of the exchange interaction results from the electrostatic energy of the electrons (Coulomb energy) and the influence of the spin (due to Fermi statistics of the electrons).

As an individual, once you've managed to master a powerful new experimental technique, you naturally use it on all possible layer systems – and when you do so you always end up with surprising results! Interlayer exchange coupling becomes more exciting and also more involved, for example, when transition metals or

rare earths are used. This also produces helical rotating exchange couplings – a real El Dorado for the physicist trying to understand the exciting details of magnetism. Wedge-like layers of yttrium between dysprosium or gadolinium, in particular, have proven themselves to be real treasure troves of new knowledge. That would have been enough work for many a decade to come but it was not to stop here because other bigger surprises were to come. The decisive point in terms of further development came in 1988.

Spinabhängige „Stolperfallen“

1988 hatten sich zwei Forschergruppen mit der Frage befasst, was wohl geschehen könnte, wenn ein Strom durch diese magnetischen Schichtstrukturen geschickt wird. Schließlich sind es die miteinander wechselwirkenden Elektronen, die sowohl den Stromtransport tragen als auch die Zwischenschichtkopplung bewirken und drittens mit ihren magnetischen Momenten zum Magnetismus der Schichten führen. Da müsste es doch interessante Zusammenhänge geben – so vermuteten ganz unabhängig voneinander Peter Grünberg in Jülich wie auch Albert Fert in Orsay bei Paris. Tatsächlich gelangen beiden Arbeitsgruppen wichtige Entdeckungen, wobei besonders Peter Grünberg das Potenzial zur Entwicklung neuartiger Sensoren erkannte und die entsprechenden Patente einreichte.

Worum geht es beim GMR-Effekt?

GMR (Giant Magneto-Resistance), also „Riesenmagnetowiderstand“, beschreibt die unerwartet starke Beeinflussung des **elektrischen** Widerstandes durch **magnetische** Felder. Dieser Effekt wurde an metallischen

Schichtstrukturen entdeckt, wie wir sie bei der Zwischenschichtkopplung bereits kennen gelernt haben. Wir betrachten deshalb zuerst die ungewöhnliche mikroskopische Situation der Stromleitung in magnetischen Schichtpaketen. Im Anschluss werden wir erkennen, wie damit auch ein hochempfindlicher Sensor realisiert werden kann.

In der Rückschau bietet es sich an, den einfachsten Weg zur Erläuterung des GMR-Effektes zu nutzen – auch wenn die wissenschaftlichen Erkenntnisse damals auf steinigere Wege gefunden wurden.

Wir betrachten wieder eine Anordnung aus drei Schichten (Bild 9), beispielsweise: magnetisches Kobalt – unmagnetisches Kupfer – magnetisches Kobalt.

Dabei wollen wir jetzt aber nicht auf die Zwischenschicht-Kopplung eingehen. Stattdessen untersuchen wir nur die elektrische Leitfähigkeit längs der Schichten. Diese Strom-Geometrie wird auch bei den meisten technischen GMR-Sensoren eingesetzt und mit CIP („Cur-

THE DISCOVERY OF THE GMR EFFECT SPIN-DEPENDENT “STUMBLING BLOCKS”

In 1988, two groups of researchers were looking at the question of what would happen if a current was to be passed through these magnetic layer structures. After all, it is interacting electrons that firstly carry the current, secondly lead to interlayer exchange coupling and thirdly are responsible for the magnetism of the layers with their magnetic moment. There have to be interesting relationships here – or so thought two men independently of each other – Peter Grünberg in Jülich and Albert Fert in Orsay near Paris. Both working groups succeeded in making important discoveries, whereby Peter

Grünberg in particular recognised the potential for developing new types of sensors and filed the necessary patents.

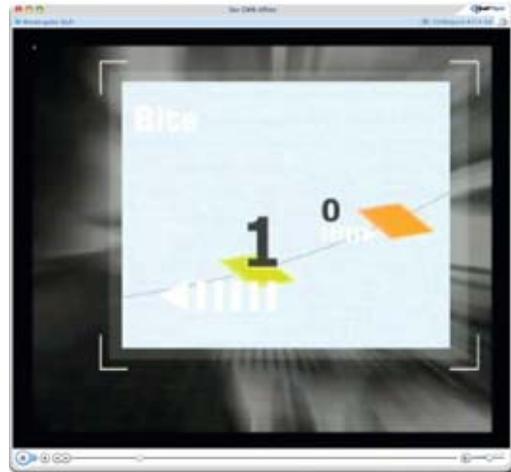
What is the GMR effect?

*GMR or giant magnetoresistance describes the unexpectedly strong influence that **magnetic** fields have on **electrical** resistance. This effect was discovered on metallic layer structures, which are already familiar to us from interlayer coupling. We will therefore look at the unusual microscopic situation of current conduction in magnetic multilayers. Following this, we will be*

able to see how this information can be used to realise a highly sensitive sensor.

Looking back today, we have the advantage of explaining the GMR effect in the easiest possible way – back then, the roads leading to these scientific findings were not quite as smooth. Once more, we will look at an array of three layers (Figure 9), for example, magnetic cobalt – non-magnetic copper – magnetic cobalt. However, we do not want to discuss interlayer coupling here. Instead, we will only investigate the electrical conductivity along the

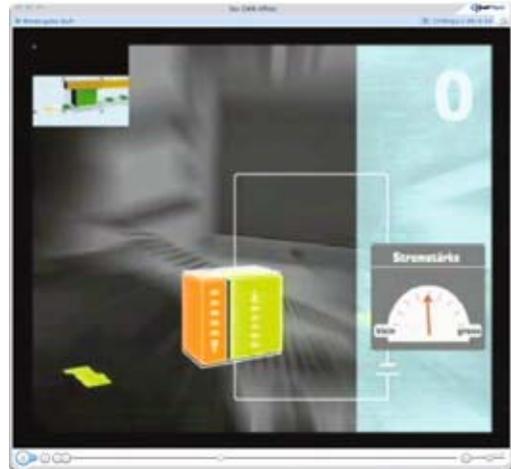
Der GMR-Effekt im Internet *The GMR effect online*



Elektronen in Stolperfallen auch im Internet: Eine anschauliche Erklärung der mikroskopischen Ursache für den GMR-Effekt und dessen Anwendung in Computer-Festplatten gibt es auch als

Computeranimation unter www.fz-juelich.de/portal/forschung/highlights/gmr_effekt

*Electrons at "stumbling blocks" can be seen on the Internet:
A descriptive animation of the GMR effect and its application in hard disks can be found at www.fz-juelich.de/portal/forschung/highlights/gmr_effekt*



rent In Plane“) abgekürzt. Man könnte den Strom auch in kleinen Säulen senkrecht zur Schicht fließen lassen; das ergäbe dann die CPP-Geometrie („Current Perpendicular to Plane“). Ob CIP oder CPP, immer muss solch ein Schichtstapel mithilfe der Nanotechnologie hergestellt und strukturiert werden. Wir bleiben vorerst bei der CIP-Geometrie.

Weil unser Schichtpaket aus drei verbundenen metallischen Lagen besteht, können die Elektronen durch alle drei Schichten hindurchtreten. Wir wissen allerdings schon von unseren Überlegungen zur Zwischenschichtkopplung, dass der Spin der fließenden Elektronen, die den Strom tragen, einen Einfluss auf ihre Beweglichkeit in den magnetischen Schichten hat. Die Streuung mit den dortigen Elektronen ist spinabhängig und hängt deshalb von den Magnetisierungsrichtungen in den Kobaltschichten ab.

Wir betrachten deshalb zuerst den Fall, dass die Magnetisierungsrichtungen der beiden Kobaltschichten parallel zueinander sind. Abb.

9 A zeigt schematisch die hypothetische Bahn eines Elektrons, dessen Spinrichtung parallel zur Magnetisierung ist. Sein Weg verläuft nahezu „ungestört“ durch alle drei Schichten, denn für seine Spinorientierung gibt es im idealisierten Fall keine Streuprozesse. Im Gebiet der Kobaltatome gibt es bereits maximal viele gebundene Elektronen, die diese Spinorientierung besitzen und die die Kobaltatome für andere Elektronen mit dieser Spinrichtung „abschirmen“. (Fachleute, die den Begriff der Bandstruktur benutzen, würden erläutern, dass das d-Band vom Kobalt für diese Spinrichtung vollständig aufgefüllt ist und deshalb keine freien Zustände für einen Streuprozess zur Verfügung stellt; siehe Abb. 9 E, grüne Fläche).

Ganz anders sieht die Situation aus für Elektronen, deren Spin entgegen der Kobaltmagnetisierung orientiert ist (Abb. 9 B). Für diese Elektronen bieten die Kobaltatome zahlreiche freie Zustände, die wie kleine Fallgruben oder Stolperfallen wirken und den Weg der Elektronen immer wieder verzögern. In der Sprache der Physik könnte man sagen, dass die unbe-

layers. This current geometry is also applied in most technical GMR sensors and is shortened to CIP, which stands for current in plane. The current could also be allowed to flow through small pillars perpendicular to the layers, which would form the CPP geometry (current perpendicular to plane). Whether CIP or CPP is applied, this type of layer stack must be fabricated and structured using nanotechnology. We will stick to CIP geometry for the time being.

Since our multilayer is composed of three connected metallic layers, the electrons can flow

through all three layers. However, our study of interlayer coupling has shown us that the spin of the moving electrons, which carry the current, has an influence on their mobility in the magnetic layers. Scattering with the electrons there is spin-dependent and therefore depends on the directions of magnetisation in the cobalt layers.

For this reason, we will first look at the case where the directions of magnetisation of both cobalt layers are parallel to each other. Figure 9 A shows a schematic of the hypothetical track of an electron whose spin direction is parallel

to the magnetisation. It travels through all three layers almost “undisturbed” because there are no scattering processes for its spin orientation in an ideal scenario. In the area containing cobalt atoms, the maximum number of bound electrons possessing this spin orientation has already been reached, and these electrons shield the cobalt atoms for other electrons with this spin direction.

Specialists who are familiar with terminology from the electronic band structure would say that the d-band of cobalt is completely full for

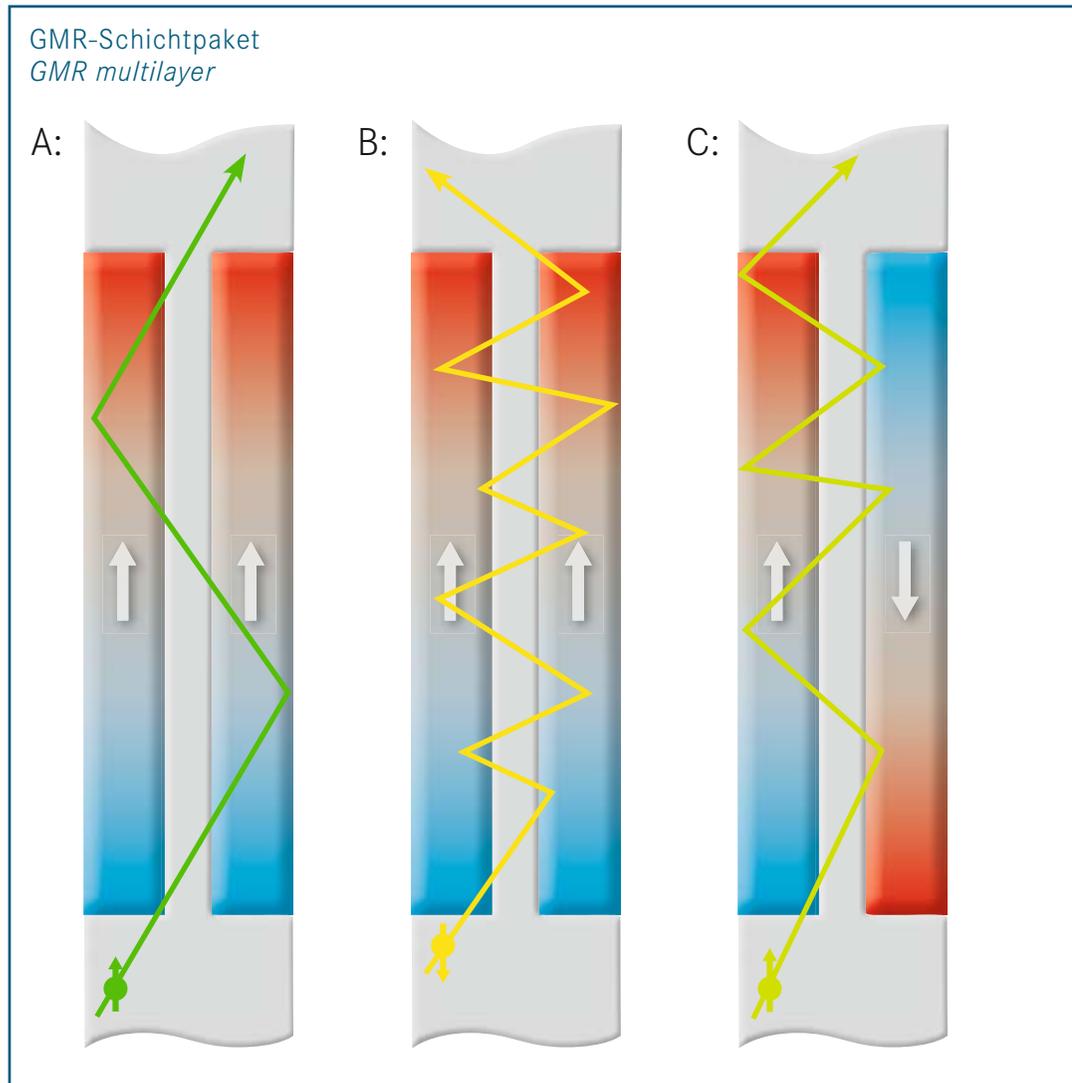


Abb. 9:

A: GMR-Schichtpaket mit paralleler Magnetisierung. Für die Zwischenschicht sind unmagnetische Metalle wie Cu, Au oder antiferromagnetische Metalle wie Chrom möglich. Elektronen mit parallelem Spin durchlaufen die Schichtung ohne Streuprozesse (Idealisierte Darstellung des geringsten Widerstandes; dieser „Kurzschluss“ dominiert das gesamte elektrische Verhalten bei paralleler Magnetisierung).

B: GMR-Schichtpaket mit paralleler Magnetisierung. Elektronen mit antiparallelem Spin durchlaufen die Schichtung mit vielen Streuprozessen in beiden Magnetbereichen (höchster elektrischer Widerstand).

C und D: GMR-Schichtpaket mit antiparalleler Magnetisierung. Alle Elektronen durchlaufen die Schichtung mit zahlreichen Streuprozessen, wenn sie jeweils in das Gebiet mit der ihnen entgegengerichteten Magnetisierung geraten (mittlerer Widerstand).

E: Schematische Darstellung der Zustandsdichte für d-Elektronen. Freie Zustände an der Fermikante (Streuzustände) sind nur für Elektronen mit „spin down“ vorhanden (Minoritätsladungsträger im Co). Elektronen mit „spin up“, also parallel zur Magnetisierung, bewegen sich im s-Band von Cu oder Co und können nicht in d-Zustände hinein gestreut werden. Ihre Streuraten sind deshalb gering und ihre Beweglichkeit ist hoch.

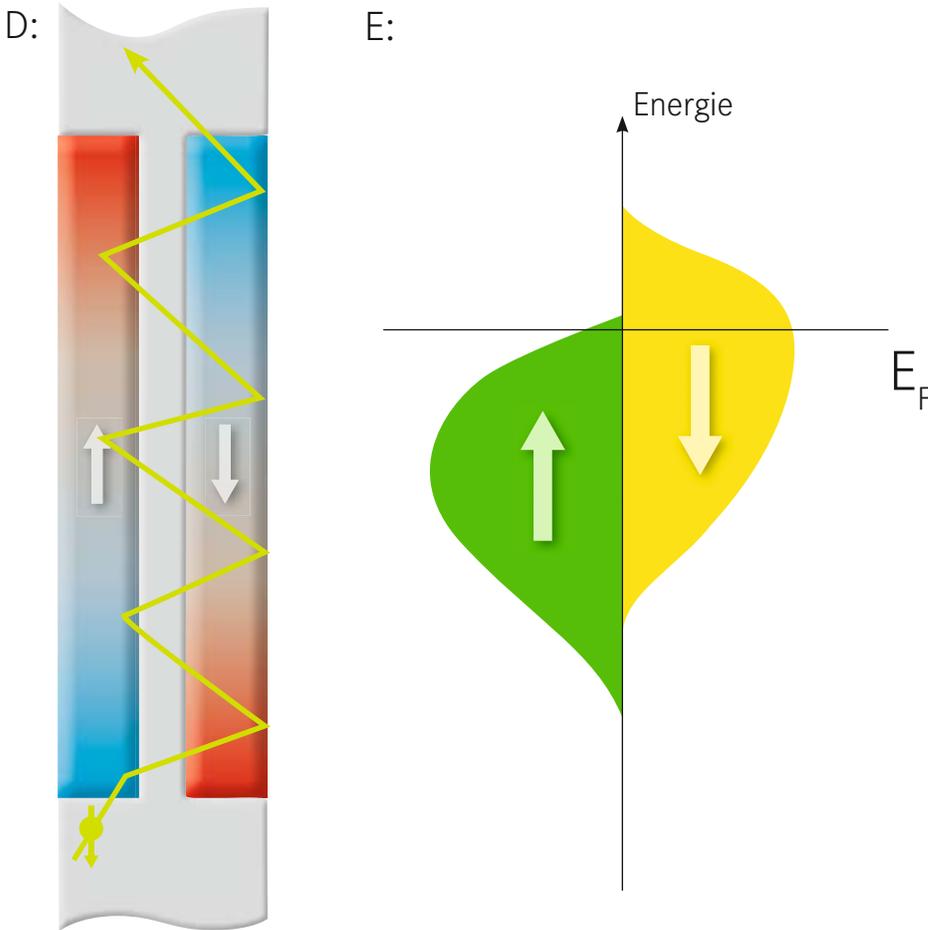


Fig. 9:

A: GMR multilayer with parallel magnetisation. Non-magnetic metals such as Cu, Au or antiferromagnetic metals such as chromium can be used for the interlayer. Electrons with a parallel spin pass through the layering without undergoing scattering processes (idealised representation of the lowest resistance where this “short circuit” dominates the entire electrical behaviour for parallel magnetisation).

B: GMR multilayer with parallel magnetisation. Electrons with antiparallel spins pass through the layering with a lot of scattering processes in both magnetised areas (highest electrical resistance).

C and D: GMR multilayer with antiparallel magnetisation. All electrons pass through the layering with numerous scattering processes when they travel into an area of opposite magnetisation (medium resistance).

E: Schematic representation of the density of states for d-electrons. Free states at the Fermi level (scattering states) are only available for “spin-down” electrons (minority charge carriers in Co). “Spin-up” electrons, i.e. those that are parallel to the magnetisation, move in the s-band in Cu or Co and cannot be scattered into the d-states. Their scattering rates are therefore low and their mobility is high.

setzten Zustände im d-Band mit ihrer hohen Zustandsdichte an der Fermikante zu einer hohen Streurrate für diese Spinorientierung führen, Abb. 9 E, gelbe Fläche.

Das hat spürbare Konsequenzen für den Stromtransport im Schichtpaket: Grundsätzlich liefert eine übliche Stromquelle Elektronen mit beiden Spinorientierungen, und zwar genau gleich viel mit „Spin auf“ und „Spin ab“. Dabei können sich die Elektronen mit Spin parallel zur Magnetisierung innerhalb des GMR-Schichtpakets relativ frei bewegen, denn sie erfahren kaum eine Streuung. Für sie ergibt sich ein sehr geringer elektrischer Widerstand. Dagegen werden die in gleicher Anzahl vorhandenen Elektronen mit antiparallelem Spin durch die zahlreichen Streuprozesse („Fallgruben“) im Kobalt verlangsamt. Für sie ist der elektrische Widerstand höher und ihr Beitrag zum Stromtransport wird entsprechend geringer.

Wir finden damit für einen fließenden Strom unterschiedliche Widerstände für die beiden

Spinrichtungen beim Passieren eines GMR-Schichtpakets mit paralleler Magnetisierung, wobei die Elektronen mit parallelen Spins praktisch einen sehr geringen Widerstand („Kurzschluss“) zeigen. *Dieser „Kurzschluss“, verursacht durch die eine Hälfte der Elektronen, charakterisiert einen GMR-Sensor bei paralleler Magnetisierung beider Schichten (Bild 9 A).*

Wie sieht die Situation aus, wenn die beiden magnetischen Schichten antiparallel magnetisiert sind? Offensichtlich liegt jetzt für die beiden Spinrichtungen des Stroms eine äquivalente, quasi symmetrische Situation vor, denn jede Spinrichtung wird in jeweils einer der Kobaltschichten stark gestreut werden, dagegen in der gegenüber liegenden Schicht eine „freie Bahn“ vorfinden. Das ist in Bild 9 C und 9 D gezeigt. *Weil nun aber die Elektronen beider Spinrichtungen unter „Fallgruben“ (Streuprozessen) leiden, zeigt eine GMR-Schichtstruktur mit antiparallel geschalteter Magnetisierung im Allgemeinen einen höheren Widerstand.*

this spin direction, and there are therefore no available free states for a scattering process; see Figure 9 E, green area.

The situation is completely different for electrons whose spin is oriented opposite to the cobalt magnetisation (Fig. 9 B). For these electrons, the cobalt atoms offer a large number of free states which act like small pitfalls or stumbling blocks and delay the course of the electrons over and over again. In physics speak, we could say that the empty states in the d-band with their high density of states at the

Fermi level lead to a high scattering rate for this spin orientation (Figure 9 E, yellow area). This has significant consequences for current transport in the multilayer. A normal power source delivers electrons with both spin orientations. In fact, it supplies exactly the same number of “spin up” electrons as “spin down”. This allows electrons with a spin parallel to the magnetisation to move relatively freely within the GMR multilayer because they undergo almost no scattering. A very weak electrical resistance exists for them. In contrast, the same number of electrons with an antiparallel spin is slowed down in cobalt as a result of

numerous scattering processes (“pitfalls”). These electrons experience a higher electrical resistivity, and as a result, play a smaller role in transporting current.

For a flowing current, we therefore find different resistances for both spin directions when it is passed through a GMR multilayer with parallel magnetisation, whereby the electrons with parallel spins exhibit a very low resistance (“short circuit”). This “short circuit”, which is caused by half of the electrons, characterises a GMR sensor with parallel magnetisation of both layers (Fig. 9 A).

HEUREKA – EIN NEUER SENSOR!

Die Grundlagenforschung führt zu einer zündenden Idee

Mit den Kenntnissen des vorangehenden Kapitels sind wir nun vorbereitet auf die entscheidende neue Idee.

Dazu nehmen wir:

- Ein Dreischicht-Paket, bestehend aus
 - einer dicken ferromagnetischen Eisen-Basissschicht, die magnetisch relativ „stabil“ ist,
 - einer gleichmäßig dünnen Zwischenschicht, etwa aus Chrom, die antiferromagnetische Kopplung vermitteln muss, und
 - einer dünnen Eisen-Deckschicht, deren Magnetisierung „labil“, also leicht umpolbar ist.
- Diese Anordnung wird kontaktiert, um den Widerstand messen zu können, genau wie im Bild 9.
- Außerdem brauchen wir noch einen Elektromagneten, der ein durchstimmbares magnetisches Feld erzeugt, das stark genug ist, um beide Magnetschichten parallel zu polarisieren – also beide Nordpole im Bild 9 sowohl „nach unten“ wie auch beide Nordpole „nach oben“ auszurichten.

Was können wir beobachten?

Ohne Magnetfeld ist das Schichtpaket wegen der antiferromagnetischen Zwischenschicht-Austauschkopplung antiparallel magnetisiert und damit weniger gut leitend. Das entspricht der Abb. 9 C und 9 D.

Mit einem angelegten Magnetfeld kann das Schichtpaket zur parallelen Magnetisierung gezwungen werden. Das entspricht der Abb. 9 A und 9 B. Damit haben wir den gut leitenden Zustand erreicht.

Die inzwischen „klassische“ erste Messung von Peter Grünberg zeigt, wie der elektrische Widerstand einer solchen Anordnung vom angelegten Magnetfeld abhängt.

Das Umklappen der labilen Schicht könnte man zwar als einen Sensoreffekt nutzen, aber noch ist diese Anordnung keinesfalls für eine Anwendung optimiert. Viele Physiker versuchen in der Folgezeit, immer leistungsfähigere Kombinationen von Metallschichtungen zu finden und erreichen zum Beispiel für das Schicht-

EUREKA – A NEW SENSOR!

What about the situation when both magnetic layers are magnetised in an antiparallel direction? In this case, an equivalent almost symmetrical situation exists for both spin directions of the current. Each spin direction is scattered strongly in one of the cobalt layers, while in the opposite layer, it has free passage. This is shown in Figures 9 C and 9 D. Since electrons of both spin directions now suffer pitfalls (scattering processes), a GMR multilayer with antiparallel magnetisation generally shows a higher resistance.

Basic Research Gives Rise to a Brilliant Idea

Using what we have learned in the previous chapter, we are now ready for a decisive new idea.

We need:

- *A trilayer structure, consisting of*
 - *a thick ferromagnetic iron base layer that is magnetically relatively “stable”,*
 - *a uniformly thin interlayer, made of a material such as chromium, which must mediate antiferromagnetic coupling, and*
 - *a thin iron top layer, whose magnetisation is “unstable” or easily reversible.*

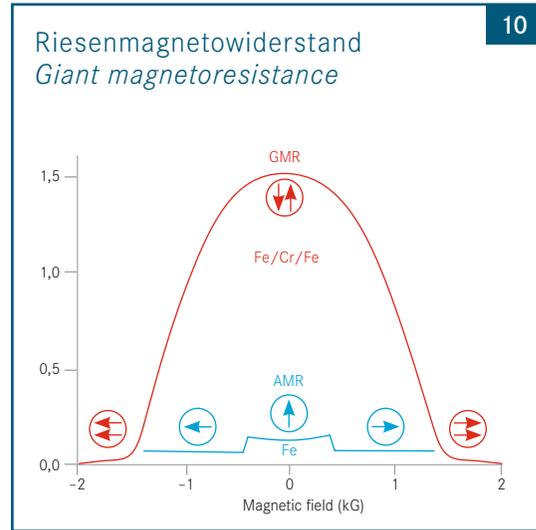
- *Current is passed through this setup in order to measure the resistance, as shown in Figure 9.*
- *Furthermore, we need an electromagnet to generate a variable magnetic field that is strong enough to polarise both magnetic layers parallel to each other – in other words to align both north poles in Figure 9 both “downwards” and “upwards”.*

What do we observe?

Without a magnetic field, the magnetisations in the multilayer are antiparallel because of the

Abb. 10: Erster Nachweis des Riesenmagnetwiderstandes in einer Fe/Cr/Fe-Schichtung. Die gemessene Widerstandsänderung betrug damals nur 1,5%. Dieser Wert ist aber ein Vielfaches der bis dahin bekannten Widerstandsänderung in einem einfachen Ferromagneten (Anisotroper Magnetwiderstand, AMR). Das führte zu recht zu der Bezeichnung „Giant“, also GMR – „Giant Magnetoresistance“.

Fig. 10: First demonstration of giant magnetoresistance in Fe/Cr/Fe layering. The resistance measured back then was only 1.5%. However, this value exceeded the resistance change in a simple ferromagnet known at that time (anisotropic magnetoresistance; AMR) many times over. This rightly gave rise to the word “giant” being used in the term “giant magnetoresistance” – GMR for short.



system Co/Cu/Co Widerstandsänderungen von bis zu 19%. Der Effekt kann sogar noch weiter „gezüchtet“ werden, wenn Schichtpakete mit bis zu 100 Schichtpaaren eingesetzt werden. Bei solchen Co/Cu-Mehrlagensystemen kann der GMR-Effekt dann auf bis zu 65% steigen. Genau diese Mehrfach-Schichtpakete sind eine besondere Spezialität der Gruppe von Albert Fert in Orsay, der ganz unabhängig von Peter Grünberg den GMR-Effekt im gleichen Jahr entdeckt und veröffentlicht hat und der deshalb den Nobelpreis 2007 mit ihm teilt.

Für die Ingenieure vieler Festplattenhersteller beginnt nun eine ununterbrochene Zeit angestrebter technologischer Entwicklungen, denn ein physikalischer Effekt allein macht noch kein Bauelement, keinen nanoelektronischen Sensor aus. Zuverlässige Fertigungsverfahren für immer kleinere Sensoren müssen gefunden werden. Auch diese anwendungsorientierten Arbeiten verdienen hohen Respekt, denn allein der Prozess der Miniaturisierung hat dazu geführt, dass sich die Leistungsfähigkeit der Festplattenlaufwerke Jahr für Jahr wesentlich verbessert hat.

antiferromagnetic interlayer exchange coupling and the structure is therefore not as highly conductive. This is shown in Fig. 9C and 9D. If a **magnetic field is applied**, the multilayer can be forced to align its magnetisations in parallel. This is shown in Fig. 9A and 9B. This gives us a highly conductive mode. Peter Grünberg's now classic first measurement shows how the **electrical resistance** of this type of setup depends on the **magnetic field** applied. Reversing the unstable layer could be used as a sensor effect but this setup was not yet optimised for such an application. Many physicists went on to try to

find even more efficient combinations of metal layers, and for the Co/Cu/Co layer system, for example, they obtained resistance changes of up to 19%. The effect can be “cultured” even further if multilayers of up to 100 pairs of layers are used. In such Co/Cu multilayer systems, the GMR effect can increase to up to 65%. Albert Fert's group in Orsay specialised in exactly these multilayer systems, and completely independently of Peter Grünberg, discovered the GMR effect in the very same year. Fert also published his results and therefore shared the Nobel Prize for Physics with Grünberg in 2007.

This marked the beginning of a period of intensive technological development for engineers working for many hard-drive manufacturers, since a physical effect alone produces neither components nor nanoelectronic sensors. Reliable fabrication methods for smaller and smaller sensors had to be found. These application-oriented activities also deserve great respect because the process of miniaturisation alone has led to significant improvements in the performance of hard disk drives year after year.

GMR-SENSOR UND MAGNETPLATTE – EIN IDEALES PAAR

Eine Entdeckung kommt genau zur richtigen Zeit

Zu Beginn der 90er-Jahre war die Datendichte (Speicherkapazität) einer Festplatte nicht primär durch ihre magnetische Beschichtung oder durch den Schreibkopf begrenzt, sondern vor allem durch die magnetische Feldempfindlichkeit und die räumliche Auflösung der verfügbaren Leseköpfe. In diese Zeit fiel die Entdeckung des GMR-Effekts, der sich für bessere Leseköpfe anbot. Die Kombination aus hoher Empfindlichkeit und höchster räumlicher Auflösung bildete den entscheidenden Vorteil der insbesondere von IBM entwickelten neuen Technik und führte zu ihrem schnellen Siegeszug. In der Folge wurden die aus Nanostrukturen aufgebauten GMR-Sensoren immer winziger und zugleich empfindlicher, so dass auch der Magnetwerkstoff der Festplatten ständig verbessert und verfeinert werden konnte. Ein regelrechtes Wettrennen zwischen Kopf- und Plattenentwicklern setzte ein. Dieser Wettlauf hält noch immer an. Zurzeit wird die Speicherdichte auf den Platten weiter erhöht durch eine Umstellung des magnetischen

Speichermodus vom longitudinalen Einschreiben der Magnetisierung zur senkrechten Form (PMR, „Perpendicular Magnetic Recording“, Abb. 14). Auch dafür sind GMR-Leseköpfe im Einsatz. Im folgenden wird der prinzipielle Aufbau von heutigen Magnetplatten, Schreibköpfen und GMR-Leseköpfen erläutert.

Wunderwerk Festplatte

In jedem PC ist mindestens eine Festplatte eingebaut, aber nur die wenigsten Benutzer ahnen, welches Wunderwerk der Mechanik, Nanotechnologie und Physik die riesigen Datenmengen verwaltet und speichert. Nur wenn die Festplatte „abstürzt“, wird ihre Unentbehrlichkeit schlagartig und unangenehm klar. Dabei ist der Ausdruck „Absturz“ durchaus wörtlich gemeint.

Die Festplatte (engl. HDD „hard disc drive“, im Gegensatz zu den veralteten weichen „floppy discs“) speichert die Daten in Form von win-

GMR SENSOR AND MAGNETIC DISK – A HAPPY COUPLE

A Discovery Right on Time

At the beginning of the 1990s, the data density (storage capacity) of a hard drive was not limited primarily by its magnetic coating nor by its write head, but rather by its magnetic field sensitivity and the spatial resolution of the read heads available. It was at this point in time that the GMR effect, which lent itself to improved read heads, was discovered. The combination of increased sensitivity and much higher spatial resolution constituted the decisive advantage of the new technology, which was developed above all by IBM, and led to its quick triumph on

the market. GMR sensors assembled from nanostructures subsequently became even tinier and also more sensitive, which meant that the magnetic materials used for hard drives could be continuously improved and refined.

A full-on race developed between head and hard disk developers and it is still going strong today. At the moment, the storage density of hard disks is being increased even further by switching the magnetic storage mode from longitudinal recording to perpendicular magnetic recording (PMR; see Fig. 14). GMR read heads

are also used for this purpose. In the following, the basic construction of today's magnetic disks, write heads and GMR read heads will be explained.

Marvellous Hard Disk Drives

Almost every PC has at least one hard disk drive if not more built into it, but only very few users have any idea of the miracle made possible by mechanics, nanotechnology and physics, which allows the storage and administration of huge volumes of data. Only when the hard drive crashes does it suddenly become crystal clear



1



2

46

zigen magnetischen Bereichen (Bits) auf einer oder mehreren Metall- oder Glasplatten, die auf derselben Achse rotieren. Die Oberflächen der Platten sind mit besonders feinkörnigem Magnetmaterial beschichtet, beispielsweise CoCrPtB. Der geringe Zusatz von Chrom stabilisiert die Bildung von sehr kleinen magnetischen Domänen („Körnern“), da es sich an den Korngrenzen abscheidet. Rund 100 dieser Domänen gehören zu einem Bit und müssen gemeinsam umgepolt werden, um statistische Fehler zu minimieren, die durch die Körnigkeit der Datenaufzeichnung und thermisch bedingte Fluktuationen auftreten. Die Orientie-

rung der Magnetisierung der einzelnen Datenbits wird von einem Schreibkopf eingepägt und kann auch wieder gelöscht oder überschrieben werden. Diese Datenbits sind auf der mit 7000 bis 15000 Umdrehungen pro Minute rotierenden Scheibe auf konzentrischen Kreisen angeordnet – in etwa wie die Rillen auf einer Schallplatte. Nur wird auf einer Festplatte keine spiralförmige aufgewickelte, sehr lange „Rille“ geschrieben, sondern zehntausende in sich geschlossene „Einzelkreise“ nebeneinander.

Auf jedem einzelnen Kreis sind wiederum Millionen von Bits untergebracht. Eine schnelle

just how indispensable it actually is. The term “crash” is meant quite literally here.

The hard disk drive (HDD), in contrast to the now obsolete floppy disks, saves data in the form of tiny magnetic bits on one or more metal or glass disks which rotate on the same axis. The surfaces of the disks are coated with extremely fine-grained magnetic material, for example CoCrPtB. The addition of a small amount of chromium stabilises the formation of very small magnetic domains (grains) because it is deposited at the grain boundaries. Around 100

of these domains make up a bit and the polarity of all domains must be reversed at the same time in order to minimise random errors which are caused by the granularity of data recording as well as by thermal fluctuations. The orientation of the magnetisation of individual data bits is impressed by a write head and can also be deleted or overwritten. These data bits are arranged in concentric circles on the disk – similar to the grooves on a record.

However, very long spiral-shaped coiled grooves are not written on a hard disk. Instead,

tens of thousands of self-contained individual circles are written alongside each other. The disk rotates at 7,000 to 15,000 revolutions per minute.

Each individual circle in turn contains millions of bits. Fast administration and control electronics with a cache are an essential component in hard drives because they organise the writing and retrieval of data.

With a record player, the needle and the groove can be seen by the naked eye. With a music CD or a DVD, the inscribed data pattern is so small that it can only be seen with a microscope – but at



„Verwaltungs- und Steuerungselektronik“ mit Zwischenspeicher (Cache) ist ein wichtiger Teil jeder Festplatte, denn sie organisiert das Schreiben, Auffinden und Lesen der Daten.

Bei einem Plattenspieler kann man die Abspielnadel und die Rille noch mit bloßem Auge erkennen. Bei einer Musik-CD oder einer DVD sind die eingeschriebenen Datenmuster schon so klein, dass sie nur noch unter dem Mikroskop zu sehen sind – aber eine CD oder DVD darf man immerhin noch in die Hand nehmen. Bei einer modernen Festplatte ist das alles nicht mehr möglich. Sie ist so fein strukturiert

- 1 Festplatteneinheiten enthalten unterschiedlich viele Platten auf einer gemeinsamen Achse. Pro Platte gibt es zwei GMR-Sensoren, je einen auf der Ober- und Unterseite.
- 2, 3 Nicht nur die großtechnische Festplattenproduktion, sondern auch die Probenpräparation für die Experimente zur Spintronik benötigt staubfreie Reinräume.
- 4 Der IBM-Microdrive, eine besonders kompakte Festplatte.

- 1 *Hard drive units contain a number of disks on a shared axis. Each disk has two GMR sensors – one on the upper surface and one on the lower surface.*
- 2, 3 *Dust-free clean rooms are not just needed for commercial hard-drive production; they are also essential for the preparation of samples for spintronics experiments*
- 4 *The IBM Microdrive – a particularly compact hard drive*

least you can hold a CD or DVD in your hand. With a modern hard drive, this is no longer possible. Its structure is so fine and so sensitive that it must be fabricated in clean rooms and immediately encased there in order to protect it from dust in any form. If you hold an open hard drive in your hands in a normal environment, you render it useless. A modern magnetic storage disk is much more powerful (and much more sensitive) than an optical CD or DVD.

In order to achieve a higher storage density, each development must shrink the magnetic bits on

the hard drive even further. At the moment they are only around 200 nanometres (nm) wide and 30 nm long. This allows approximately 340,000 bits to fit one after the other on a centimetre of track length, and around 53,000 tracks lie side by side – with a safety margin – in one centimetre. This means that almost 20 gigabits fit into one square centimetre.

Over the past few decades, the storage capacity of GMR hard drives has practically doubled every year. When they are in operation, the read-write heads “fly” at high speeds over the

surface of the magnetic disk that rotates beneath them. The relative speed can reach up to 200km/h – and this at an “altitude” of only 10 nm above the magnetic layer. If the distances were increased, the GMR sensor would no longer be able to reliably resolve the pattern of magnetic lines. The magnetic bits rush past underneath the read-write head at a speed of up to 10⁹ bits per second. The head is only carried by the aerodynamic lift of the thin air film swept along by the racing disk. The viscosity of air means that a thin boundary layer of air constantly adheres to the surface of the disk.

Schematische Darstellung eines GMR-Lesekopfes Schematic of a GMR read head

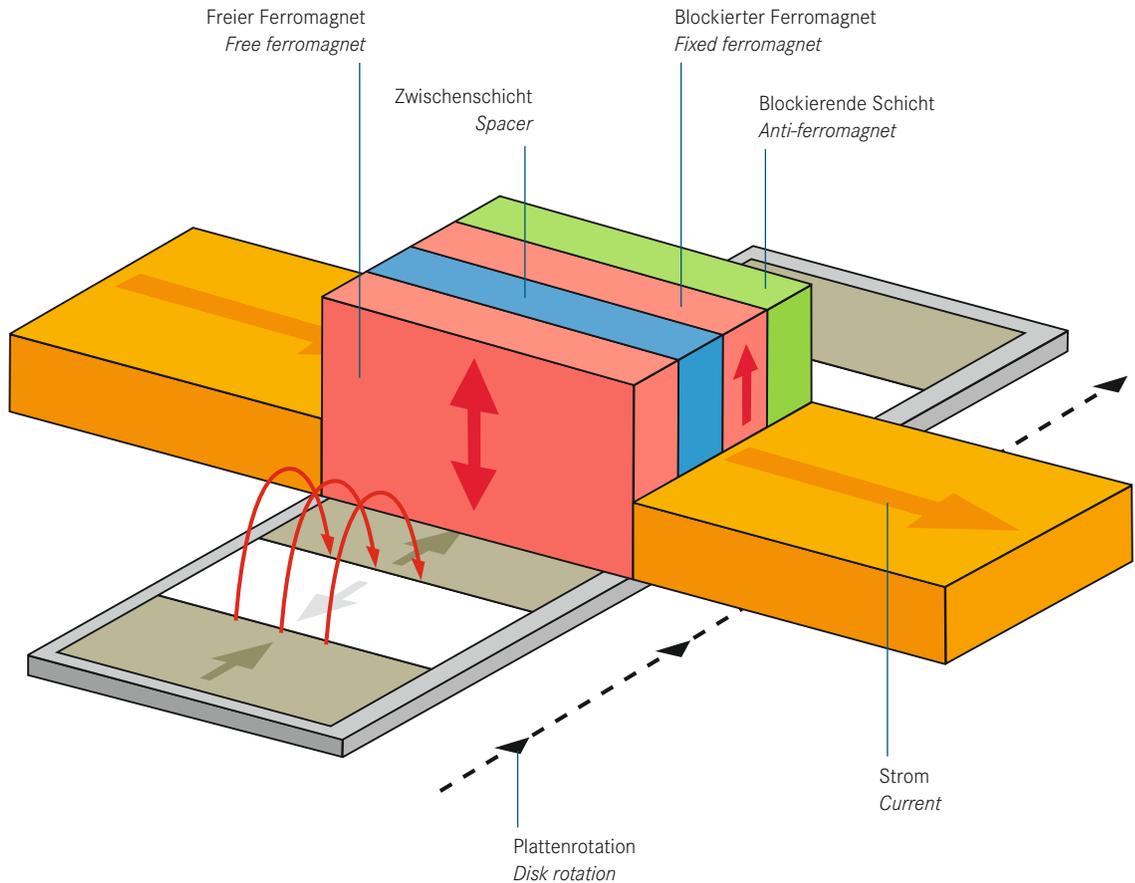


Abb. 11: Die blockierende dicke Basisschicht sorgt dafür, dass das wechselnde Feld der magnetisierten Bereiche auf der Festplatte nur die dünne freie ferromagnetische Schicht des Sensors ummagnetisieren kann. Durch die parallele oder antiparallele Magnetisierung im Schichtpaket und den GMR-Effekt ergeben sich im Sensor unterschiedlich leitfähige Zustände, die den Stromfluss steuern.

Fig. 11: The thick base layer acts as a blockade and ensures that the changing field of the magnetised areas on the hard drive can only reverse the magnetism of the thin free ferromagnetic layer of the sensor. The parallel or antiparallel magnetisation in the multilayer and the GMR effect give rise to different conductive states in the sensor, which control the flow of current.

und so sensibel, dass sie in Reinräumen hergestellt wird und dort sofort vollständig eingekapselt werden muss, um jeglichen Staub fernzuhalten. Wenn man in normaler Umgebung eine geöffnete Festplatte in den Händen hält, so ist sie zwangsläufig bereits unbenutzbar geworden. Eine moderne magnetische Speicherplatte ist nämlich viel leistungsfähiger und wesentlich empfindlicher als die optisch auszulesenden CD oder DVD.

Um eine hohe Speicherdichte zu erzielen, mussten die magnetischen Bits auf der Festplatte im Laufe der Entwicklung ständig weiter „geschrumpft“ werden. Sie sind derzeit weniger als 200 Nanometer (nm) „breit“ und 30 nm „lang“. Damit passen hintereinander ca. 340 000 Bit auf einen Zentimeter Spurlänge, während nebeneinander – mit Sicherheitsabstand – etwa 53 000 Spuren auf einem Zentimeter liegen. So kommen fast 20 Gigabit auf einen Quadratzentimeter. Im Laufe der letzten Dekaden hat sich die Speicherkapazität der GMR-bestückten Festplatten pro Jahr nahezu verdoppelt – das ist eine eindrucksvolle Leistung der Entwickler.

Im Betrieb rasen die Schreib- und Leseköpfe im „Tiefflug“ über die Oberfläche der Magnetplatte, die unter ihnen rotiert. Die Relativgeschwindigkeit kann dabei über 200 km/h erreichen – und das bei einer „Flughöhe“ von nur 10 nm über der Magnetschicht. Bei größerem Abstand könnte der GMR-Sensor das Muster der Magnetlinien nicht mehr sicher auflösen. Die Magnetbits sausen dabei mit einer Geschwindigkeit von bis zu 10^9 Bit pro Sekunde unter dem Lese- und Schreibkopf vorbei. Der Kopf wird dabei nur durch den aerodynamischen Auftrieb eines von der rasenden Platte mitgerissenen dünnen Luftfilms getragen, denn wegen der Zähigkeit (Viskosität, „Klebrigkeit“) der Luft haftet ständig eine dünne Luftgrenzschicht an der Oberfläche der Platte.

Zum Vergleich: Ein feines Menschenhaar ist typisch zwar nur ein Zwanzigstel Millimeter dick – aber selbst das sind enorme 50 000 Nanometer. Für einen störungsfreien Flug des Lesekopfes in 10 nm Höhe muss die Festplattenoberfläche unbedingt perfekt staubfrei bleiben – ansonsten kommt es unweigerlich

For comparison: a strand of fine human hair is typically only one twentieth of a millimetre thick – but even this is equal to a huge 50,000 nanometres. In order to ensure that the read head can fly without any problems at an altitude of 10 nm, the surface of the hard disk drive must remain completely free of dust – otherwise, a crash is inevitable. As an aside, alpinists should refrain from using their hard drives once they reach 3,000 metres because the air film becomes too thin at this altitude to support the read head, and it is therefore bound to crash.

Fascination of the Nanoworld

In order to get a better idea of all of this, we will imagine that the hard drive is bigger than it actually is so that we can work with dimensions we are used to.

For example, take a page in a book: a full stop on a page could be considered the smallest unit of information that we can still easily recognise. A full stop is therefore a quantum of information for our eyes, a bit. You can fit a maximum of nine full stops in one square millimetre, and 900 in one square centimetre.

How can the capacity of a hard drive be realised with this density of data?

In a modern PC, a hard disk drive has a capacity of one terabyte (= 8 terabits) and it saves 4 terabits on its upper surface and 4 terabits on its lower surface – in other words 4×10^{12} bits (“full stops”).

If we were to print this pattern on paper using 900 full stops/ cm^2 , we would require a page with an area of 440,000 m^2 or 0.44 km^2 . If we were to take a circular page, it would have a

Schichtaufbau in einem realen GMR-Sensor Layers in a real GMR sensor

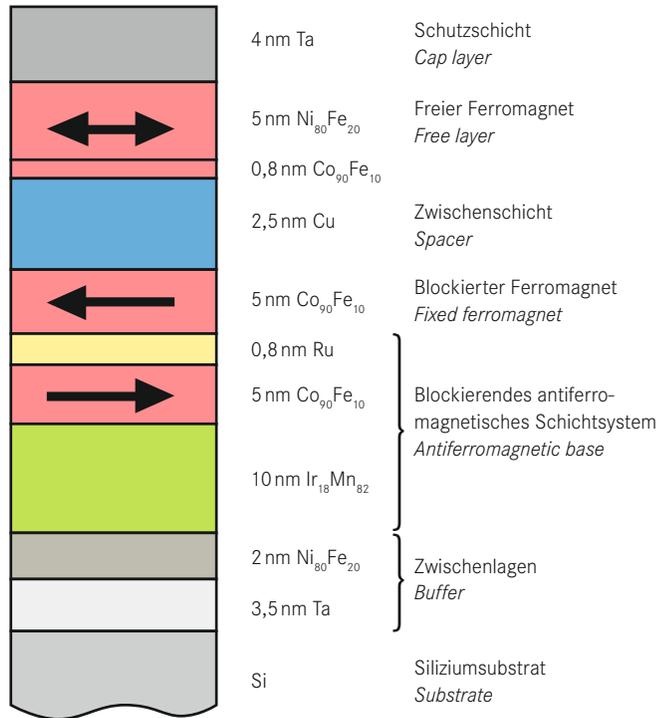


Abb. 12: Um einen möglichst hohen GMR-Effekt bei möglichst geringer Sensorabmessung zu erhalten, werden sehr komplizierte Schichtabfolgen von Materialien eingesetzt. Man erkennt an diesem Beispiel auch den großen Unterschied zwischen einem optimierten nanoelektronischen Bauteil und der anfangs untersuchten physikalischen Struktur, wie sie in Bild 11 dargestellt ist.

Fig. 12: In order to obtain as high a GMR effect as possible for as small a sensor as possible, a very complicated layered structure of materials is used. This example also makes clear the big difference between an optimised nanoelectronic component and the physical structure initially investigated as shown in Figure 11.

zum „Crash“. Alpinisten sollten übrigens auf den Betrieb ihrer Festplatte oberhalb 3000 Meter ganz verzichten, denn in dieser Höhe wird der Luftfilm zu dünn für den Auftrieb des Lesekopfes, und so droht auch deshalb ein „Absturz“ des Lesekopfes.

Faszination Nanowelt

Zur besseren Anschauung vergrößern wir den Maßstab einer Festplatte im Geiste nun so weit, dass wir in vertrautere Dimensionen gelangen.

Betrachten wir beispielsweise eine Buchseite: Ein „Pünktchen“ ist dort in etwa die kleinste Informationseinheit, die wir noch bequem erkennen können. Ein Punkt ist damit für unser Auge ein Informationsquantum, ein „Bit“. Auf einen Quadratmillimeter kann man höchstens 9 Punkte platzieren, auf einen Quadratzentimeter immerhin schon 900 Punkte.

Wie könnte man die Kapazität einer Festplatte mit dieser Datendichte realisieren?

Eine moderne PC-Festplatte hat eine Kapazität von einem TeraByte (= 8 TBit) und speichert 4 TBit auf ihrer Ober- und 4 TBit auf ihrer Unterseite, auf jeder Seite also 4×10^{12} Bit („Punkte“).

Als Punktmuster mit 900 Punkten/cm² auf Papier gedruckt würde dieser Speicher ein Blatt von 440 000 m², also 0,44 km², erfordern. Als runde Scheibe hätte das Papierblatt einen Durchmesser von 750 Metern; seine Fläche entspräche der von 62 Fußballfeldern. Diese gigantische Fläche müsste dicht mit 900 Punkten auf jedem Quadratzentimeter beschrieben werden.

Die Schreib- und Leseraten der Festplatte liegen bei bis zu 1 Gigahertz, also 10^9 Bit pro Sekunde. In unserem Vergleich würden auf dem Papier drei Punkte pro Millimeter Strecke geschrieben. Wenn wir 10^9 Punkte pro Sekunde von unserem Papier „ablesen“ wollten, müssten wir in jeder Sekunde das Muster von einer 333 km langen Punktmusterstrecke korrekt ablesen. Dazu müsste sich der Schreib- und Lesekopf mit tausendfacher Schallge-

diameter of 750 metres and its area would be equal to that of 62 football pitches. 900 full stops to every square centimetre would then have to be “written” close together over this huge area.

The read-write rates in a hard drive can reach up to 1 gigahertz, which is equal to 10^9 bits per second. In our comparison, three full stops are written on every millimetre of paper. If we want to “read” 10^9 full stops per second from our piece of paper, then we must correctly read the pattern of full stops contained in a 333 km

stretch every second. In order to do so, the read-write head must move a thousand times faster than the speed of sound over our “paper hard drive”...

We encounter a problem here that arises time and again when the performance of the nanoworld is compared to that of the macroworld: although a comparison can help us gain a better understanding, it also leads us away from the reality of the actual nanoworld with its astonishing characteristics into a completely fictitious and unimaginable unreal “every-day world”.

Hard disk drives of this magnitude are also used nowadays in personal computers. The biggest files in the private sector are constituted by high-resolution videos, pictures and films.

schwindigkeit über unsere „Papier-Festplatte“ bewegen ...

Wir begegnen hier einem Problem, das immer wieder auftritt, wenn die Leistungsfähigkeit der Nanowelt mit Vergleichen aus der Makrowelt erläutert werden soll: Obwohl ein Vergleich unserer Anschauung helfen kann, führt er doch zwangsläufig von der Wirklichkeit der realen Nanowelt mit ihren erstaunlichen Eigenschaften in eine völlig unwirkliche und nicht vorstellbare „Alltagswelt“ hinein.

Festplatten dieser Größenordnung werden inzwischen auch in privaten Rechnern eingesetzt. Die größten Dateien im privaten Bereich ergeben sich beim massenhaften Abspeichern von hoch aufgelösten Videos, Bildern und Filmen.

Schreib- und Lesekopf

Wenn wir in den folgenden Schemazeichnungen die Komponenten einer Festplatte betrachten, so müssen wir uns immer wieder die tatsächlichen, extrem kleinen Dimensi-

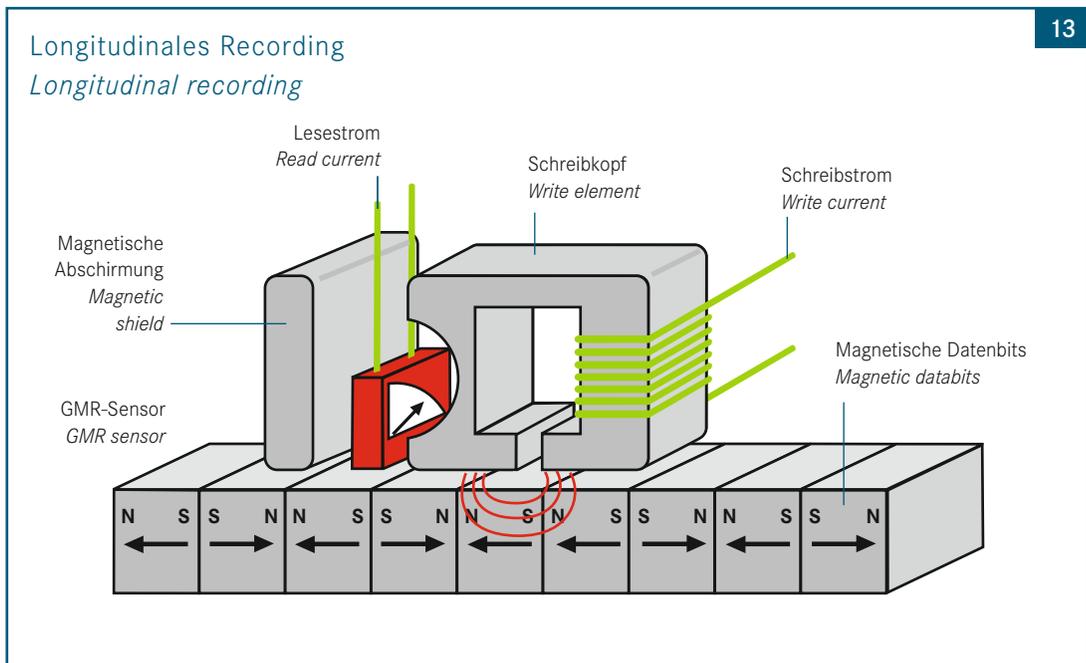


Abb. 13: Das Joch des Schreibkopfes erzeugt ein Magnetfeld, das parallel zu der Oberfläche der Speicherplatte liegt. Der GMR-Sensor liegt zum Schutz vor Streufeldern zwischen zwei magnetischen Abschirmungen. Alle Dimensionen sind im Nanometerbereich und alle Komponenten werden in lithographischer Dünnschichttechnik erzeugt.

Fig. 13: The yoke of the write head generates a magnetic field that lies parallel to the surface of the storage disk. The GMR sensor is located between two magnetic shields in order to protect it from scattering fields. All dimensions are in the nanometre range and all components are generated using lithographic thin-film technology

onen vor Augen halten, denn moderne Festplatten sind Wunderwerke der Nanotechnologie. Abbildung 13 zeigt das Prinzip eines Schreib- und Lesekopfes. Man erkennt rechts den Schreibmagneten, der ein magnetisches Feld im Speichermedium erzeugt und damit das Magnetisierungsmuster einschreibt. Der rot eingezeichnete GMR-Sensor liegt vor dem Schreibkopf und wird durch das Joch des Schreibkopfes und einer weiteren Magnetplatte von Streufeldern abgeschirmt. Die hier plastisch gezeigten Bauteile sind in der Realität

winzige, lithografisch hergestellte Nanostrukturen, die in Dünnschichttechnik gefertigt werden. So wird die Spule nur aus aufgedampftem und lithografisch strukturiertem Kupfer hergestellt, die Magnete aus aufgedampften Magnetwerkstoffschichten. Die winzige Kupferspule muss dennoch die notwendige hohe Stromtragfähigkeit besitzen, um die Magnetfelder zum Schreiben blitzschnell aufzubauen und umzupolen, denn das Schreiben erfolgt im hohen Megahertzbereich. Abbildung 14 zeigt die veränderte Geometrie für das derzeit mo-

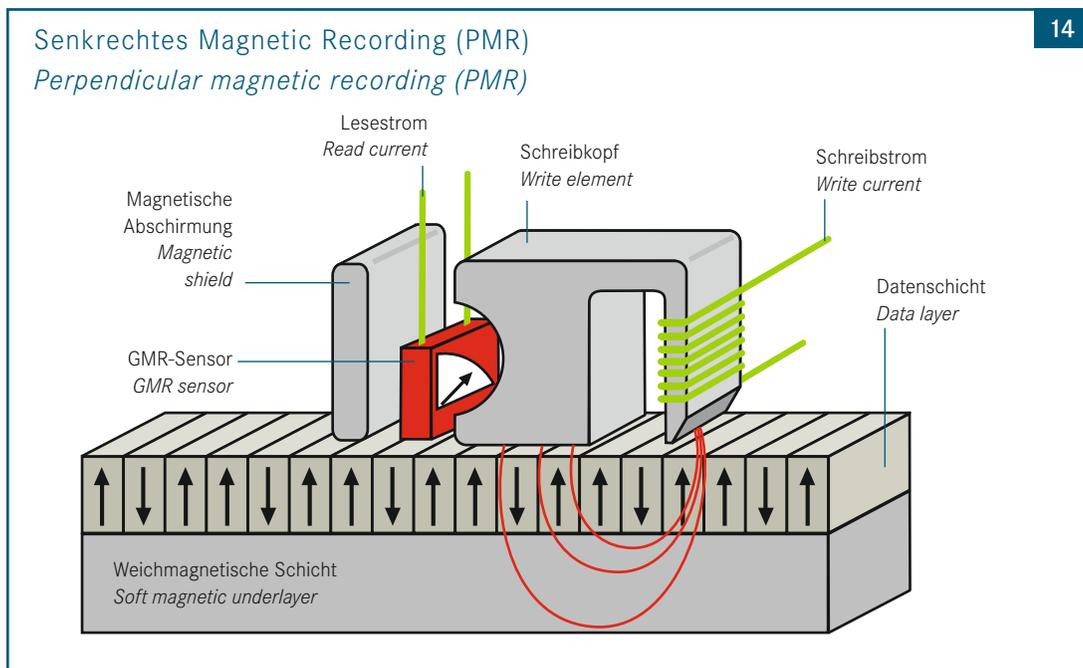
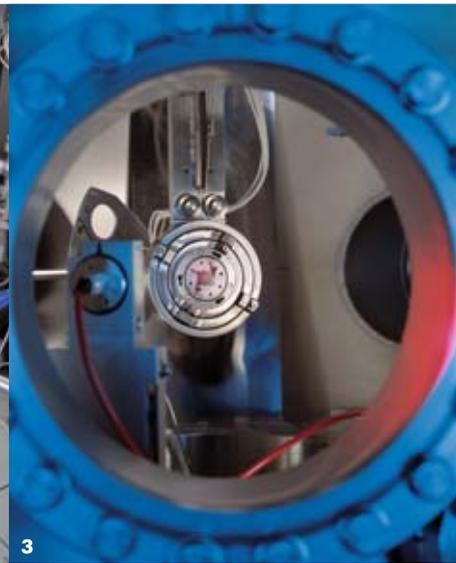


Abb. 14: Das Joch des Schreibkopfes erzeugt ein Magnetfeld, das die Oberfläche der Speicherplatte senkrecht durchdringt. Eine zusätzliche weichmagnetische Zwischenschicht führt den Fluss zurück. Das Bitmuster kann mit dieser Methode enger geschrieben werden. Der GMR-Sensor liegt zum Schutz vor Streufeldern auch hier zwischen zwei magnetischen Abschirmungen.

Fig. 14: The yoke of the write head generates a magnetic field that penetrates the surface of the storage disk vertically. An additional soft magnetic interlayer feeds the flux back. The bit pattern can be written closer together using this method. The GMR sensor is also located between two magnetic shields here in order to protect it from scattering fields.



derne „Perpendicular Magnetic Recording“ (PMR). Dabei wird eine noch höhere Speicherdichte erreicht, denn die Bitgröße kann weiter verkleinert werden. Eine Schlüsselrolle spielt dabei die neuartige Lagenstruktur der Speicherplatte, die zusätzlich eine weichmagnetische Schicht unter der Speicherschicht enthält. Dadurch kann man einen besonders engen, konzentrierten Feldlinienverlauf im Bereich der Speicherschicht erzielen. Auch bei der PMR-Technik wird ein GMR-Sensor im Lesekopf eingesetzt.

Eine Schemazeichnung des GMR-Sensors zeigt die Abbildung 11. Der Strom fließt in CIP-Geometrie (CIP: „Current in Plane“) durch die GMR-Sandwichstruktur mit den beiden ferromagnetischen Schichten. Die Magnetisierung der einen ferromagnetischen Schicht ist durch die relativ dicke antiferromagnetische Basischicht blockiert, während die zweite, dünne Schicht durch das Magnetfeld der Bits auf der Speicherplatte umgepolt werden kann. Der GMR-Effekt überträgt nun das magnetische Bitmuster in ein Strommuster, das in der Ausleselektronik decodiert wird. Wie aus Abbil-

Read-Write Heads

When we take a closer look at the components in a hard drive, as illustrated in the previous diagrams, we must bear in mind the extremely small dimensions that exist in reality because modern hard drives are a miracle made possible by nanotechnology.

Figure 13 shows the principle of a read-write head. On the right-hand side, we can see the write magnet, which generates a magnetic field in the storage material and thus records the magnetisation pattern. The red-coloured

GMR sensor lies in front of the write head and is shielded from stray fields by the yoke of the write head and other magnetic disks. The components, which are so easy to see here, are actually tiny lithographically fabricated nanostructures produced using thin-film technology. The coil is fabricated using only vapour-deposited and lithographically structured copper, and the magnetic yoke using vapour-deposited layers of magnetic material. Despite this, the tiny copper coil must still possess the high current capacity needed to construct and reverse the polarity of the magnetic fields

required for writing within seconds. After all, the writing process occurs in the high megahertz range.

Figure 14 shows the changed geometry for modern perpendicular magnetic recording (PMR). PMR allows an even higher storage density to be achieved because the size of a bit can be reduced even further. A key role is played in this process by the novel layered structure of the storage disk, which includes the addition of a soft magnetic layer under the storage layer. This allows a particularly close and concen-



dung 12 ersichtlich, umfasst der Aufbau eines empfindlichen Sensors nicht nur die vier prinzipiell notwendigen Schichten (Abb. 11), sondern besteht aus einer komplizierten Abfolge von zehn unterschiedlichen Schichten. Deren Gesamtdicke liegt in diesem Beispiel noch unter 40 nm – das ist nur ein Tausendstel des Durchmessers eines dünnen Haares.

- 1 Unverzichtbare Analytik: „Titan“, das leistungsstärkste Elektronenmikroskop des Ernst-Ruska-Zentrums für Elektronenmikroskopie, liefert subatomar aufgelöste Bilder von Kristallstrukturen und inneren Grenzflächen (Auflösung: 0,08 Nanometer)
- 2, 3 Die Ionenstrahltechnik am Tandetron-Beschleuniger dient der Analyse dünner Schichtsysteme: Bernd Holländer (IBN-1)
- 4 Am „Titan“: Karsten Tillmann, Andreas Thust, Knut Urban, Chunlin Jia, Lothar Houben

- 1 *Indispensable analytical techniques: “Titan”, the most powerful electron microscope in the Ernst Ruska Centre for Electron Microscopy, provides subatomically resolved images of crystal structures and inner interfaces (resolution: 0.08 nanometres)*
- 2, 3 *The ion beams at the Tandetron accelerator are used to analyse thin layered systems: Bernd Holländer (IBN-1)*
- 4 *At the “Titan”: Karsten Tillmann, Andreas Thust, Knut Urban, Chunlin Jia, Lothar Houben*

trated distribution of field lines in the storage layer. PMR technology also makes use of a GMR sensor in the read head.

Figure 11 shows a schematic of the GMR sensor. The current flows in CIP geometry (CIP: current in plane) through the GMR sandwich structure with the two ferromagnetic layers. The magnetisation of one of the ferromagnetic layers is blocked by the relatively thick antiferromagnetic base layer, while the polarity of the second thin layer is reversed by the magnetic field of the bits on the storage

disk. The GMR effect now transfers the magnetic bit pattern into a current pattern which is decoded by the read electronics.

As can be seen in Figure 12, the design of a sensitive sensor does not simply consist of the four layers required in principal (Fig. 11) but rather of a complicated sequence of ten different layers. Their combined total thickness in this example measures less than 40 nm, which is about a thousandth of the diameter of a thin hair.

JUGENE – GEBALLTE RECHENLEISTUNG MIT 223 TERAFL0P/S

JUGENE vereint 65 536 Prozessoren, ein Hochleistungsnetzwerk und greift auf 2000 Festplatten zu

JUGENE heisst der modernste Supercomputer, mit dem das Jülicher Supercomputing Center (JSC) in der Spitzenliga der weltweit leistungsfähigsten Rechner vertreten ist. JUGENE (Jülicher Blue Gene/P) wird in einem europäischen Verbund genutzt. Seine gigantische Rechenkapazität verdankt JUGENE nicht etwa einigen hyperschnellen Prozessoren, sondern der vereinten Anstrengung einer ganzen Armee von zuverlässigen PC-artigen Prozessoren, verbunden über ein Hochleistungsnetzwerk und unterstützt durch ein Großaufgebot an Festplatten. Damit seine über 65 000 Prozessoren gemeinsam ein Problem abarbeiten können, sind allerdings höchst spezielle Programmformen (Algorithmen) notwendig, die zuerst eine effektive Zerlegung des Grundproblems in Tausende parallel zu bearbeitende Teilaufgaben ermöglichen. Man spricht dann von „Massiv parallelem Rechnen“.

Dahinter verbirgt sich der zur Zeit leistungsfähigste Ansatz, um umfangreiche Probleme von nahezu überwältigender Komplexität anzugehen und effektiv zu lösen. Die zu Grunde liegende Idee erscheint auf den ersten Blick recht einfach: Wenn eine extrem umfangreiche Aufgabe auf viele Prozessoren aufgeteilt wird und jeder Prozessor selbständig einen Beitrag zur Lösung des Problems liefern kann, dann wird diese Aufgabe viel schneller gelöst als es ein einzelner Prozessor könnte: Wenn jeder Prozessor pro Sekunde 3,4 Milliarden Rechenoperationen (Flop/s, Floating Point Operations per Second) bearbeiten kann, was ein PC-vergleichbares Pensum ist, und wenn gleichzeitig über 65 000 Prozessoren vereint an einem Problem arbeiten, dann erhält man tatsächlich 223×10^{12} Operationen, also 223 Teraflop/s. Das ist die maximal mögliche Rechenleistung für JUGENE.

JUGENE – THE CONCENTRATED COMPUTING POWER OF 223 TERAFL0P/S

JUGENE UNITES 65,536 PROCESSORS, A HIGH-PERFORMANCE NETWORK, AND HAS ACCESS TO 2,000 HARD DISK DRIVES

JUGENE is the name of the state-of-the-art super-computer, which has put the Jülich Supercomputing Centre (JSC) in the premier league of the most powerful computers in the world. JUGENE (Jülich Blue Gene/P) is used within the framework of a European consortium. Its huge computing capacity is not simply due to a few hyper-fast processors, but rather to the combined efforts of an entire army of reliable PC-type processors that are connected together via a high-performance network and supported by a large number of hard

drives. Highly specialised forms of programs (algorithms) allow its more than 65,000 processors to work on the same problem simultaneously. To begin with, these algorithms effectively break the basic problem down into thousands of subtasks, which are then completed in parallel.

This is known as massively parallel computing. This represents the most powerful approach currently available for tackling and solving extremely complex problems in an effective manner. The

idea behind it looks simple at first glance: if an extremely difficult task is divided up between a large number of processors and each of these processors can work independently on part of the problem, then this task will be solved much faster than if an individual processor was working on it. If every processor is capable of solving 3.4 billion floating point operations per second (flop/s) – a workload that can also be expected of a PC – and if more than 65,000 processors are working together on the same problem at the same time, then

Wenn man aber diese eher theoretische Betrachtung genauer unter die Lupe nimmt, dann erkennt man eine der damit verbundenen großen Herausforderungen:

Wie schafft man es, eine physikalisch-technische Aufgabe in so viele Teilaufgaben zu zerlegen, dass diese tatsächlich gleichzeitig bearbeitet werden können von den 65 000 „individuellen Rechnern“, die alle über ein Hochleistungsnetzwerk miteinander kommunizieren? Offensichtlich benötigen die schwierigsten Teilaufgaben die längste Zeit und bestimmen damit das Gesamttempo, während die „schnellsten Teilergebnisse“ immer eine Zeit lang im Zwischenspeicher warten müssen. Dort werden sich nur „allmählich“ die Zwischenlösungen einfinden und nacheinander die „Mosaiksteinchen“ eines großen Bildes formen. Erst wenn alle beteiligten Prozessoren ihre Ergebnisse abgeliefert haben, ist das Gesamtbild komplett. Es kann erst dann die Ausgangsbasis für die nächste Runde, etwa einen neuen Iterationsschritt, bilden. Deshalb bedarf es großer Erfahrung und hoher Kompetenz bei

der Erstellung der Algorithmen (Rechenprogramme), um ein so mächtiges Werkzeug wie JUGENE effektiv betreiben zu können. Große Programme umfassen bis zu 300 000 Programmzeilen und werden für ein zu lösendes Problem entwickelt, müssen aber gleichzeitig optimiert werden für die parallele Architektur von JUGENE. Diese höchst anspruchsvolle Aufgabe wird von den Mitarbeitern des JSC in Zusammenarbeit mit den Anwendern bewältigt. Dabei ist die Weiterentwicklung der Supercomputer selbst durch ein atemberaubendes Tempo gekennzeichnet. Das wird am Beispiel von JUGENE und seinem direkten Vorgänger JUBL deutlich:

Im Jahr 2006 wurde JUBL, ein IBM Blue Gene/L, im JSC in Betrieb genommen. Hochmodern und mit 16 384 PowerPC440-Prozessoren ausgerüstet, leistete JUBL 46 Teraflop/s.

Nur drei Jahre später, im Februar 2008, wurde er bereits durch den neuentwickelten JUGENE abgelöst. JUGENE ist wie JUBL ein Produkt von IBM. Mit JUGENE stehen nun 65 536 parallele

we get 223×10^{12} operations per second, which is the same as 223 teraflop/s. This is the maximum possible performance for JUGENE.

If we take a closer look at this somewhat theoretical analysis, it becomes obvious that there is a grand challenge associated with this. How can we break down a physicochemical task into enough subtasks so that they can actually be solved simultaneously by the 65,000 "individual computers" which communicate with each other via a high-performance network? The most difficult subtasks obviously require the most time and

therefore determine the overall tempo, while the "quickest results" must be saved in the cache for a certain period of time. The interim solutions appear gradually here, and the tesserae will then be put together bit by bit to form one large picture. Only when all of the processors involved have delivered their results can the picture be completed. The starting basis for the next round, a new iteration step, can then be created. If a powerful tool, such as JUGENE, is to be effectively operated, the algorithms (computer programs) must be developed by an extremely experienced and highly competent mathematician. Large pro-

grams are comprised of 300,000 program lines and are developed to solve a problem. At the same time however, they also have to be optimized for JUGENE's parallel architecture. This highly challenging task is dealt with by the staff at JSC in cooperation with the users. The speed at which the supercomputer is further developed is breathtaking. This is obvious if we take JUGENE and its direct predecessor JUBL as an example.

In 2006, JUBL, an IBM Blue Gene/L, went into operation in JSC. A state-of-the-art computer



Prozessoren zur Verfügung. Sie bewältigen 223 Teraflap/s und benötigen dabei im Mittel etwa acht Watt elektrischer Leistung pro Prozessor, die sich allerdings zu beachtlichen 560 kW Abwärme addieren. Diese Wärme wird von einer großen Klimaanlage abgeführt. Der schnelle Hauptspeicher von JUGENE umfasst 32 Terabyte, also nur 500 MByte pro Prozessor. Große Datenvolumina werden auf über zweitausend schnellen Festplatten gespeichert, deren Kapazität zusammen mehr als ein Petabyte (10^{15} Byte) beträgt. Weil es bei der hohen Zahl von Prozessoren und Festplatten immer wieder zu einzelnen Ausfällen kommt, kontrolliert sich

JUGENE ständig selbst und speichert alle Daten redundant an verschiedenen Orten. Als defekt erkannte Komponenten werden automatisch abgeschaltet und umgangen. Sie können bei nächster Gelegenheit vom Personal sehr einfach durch Auswechseln von kompletten Einschüben ausgetauscht zu werden.

Zusammen mit JUGENE steht dem JSC noch der Supercomputer JUMP zur Verfügung. JUMP wurde 2004 in einem neuen Gebäude teil des JSC in Betrieb genommen und repräsentiert den damaligen Stand der Technik. Seine 1312 „Power4+“-Prozessoren laufen bei

equipped with 16,384 PowerPC440 processors, JUBL operated at 46 teraflop/s.

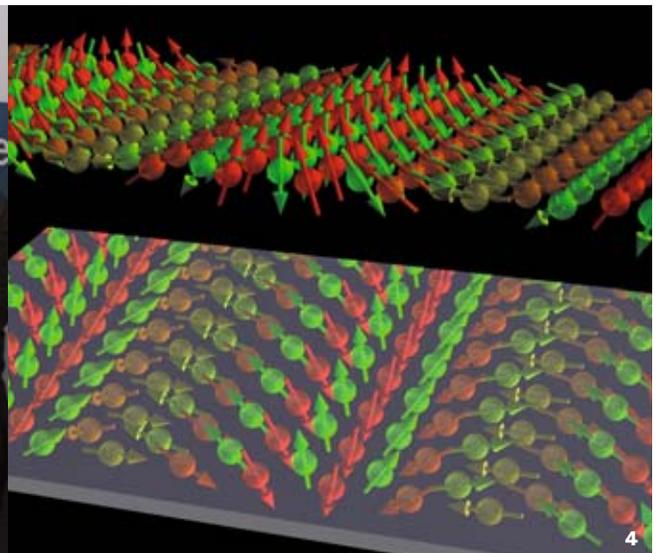
A mere three years later, in February 2008, it was replaced by the newly developed JUGENE. Like JUBL, JUGENE is an IBM product. JUGENE made 65,536 parallel processors available. It operates at 223 teraflop/s and requires an average of around 8 watts of electrical power per processor, which adds up to a considerable 560 kW of heat. This heat is removed by a large air conditioning system. The fast main memory in JUGENE comprises 32 terabytes, which represents

500 Mbytes per processor. Large volumes of data are saved on more than two thousand fast hard drives whose total shared capacity is more than one petabyte (10^{15} bytes). Due to the fact that a large number of processors and hard drives crash time and again, JUGENE monitors itself continuously and saves all data redundantly in a number of locations. Components that are recognised as damaged are automatically switched off and taken out of operation. They can then be exchanged very easily at the next opportunity by staff who replace whole drawers.

As well as JUGENE, JSC also have another supercomputer at their disposal - JUMP. JUMP was put into operation in 2004 in a new section of the JSC building and it represents the state of the art at that time. Its 1,312 "Power4+" processors run at a clock frequency of 1.7 GHz and together they run at 9 teraflop/s. The 1,312 processors are housed in 41 cabinets. At the moment, JUGENE, which is 25 times more powerful than JUMP but only needs 16 cabinets for its 65,000 processors, works directly with JUMP. However, the days of JUMP are numbered - it is to be replaced by a new cluster system.



3



4

einer Taktfrequenz von 1,7 GHz und leisten zusammen neun Teraflop/s. Die 1312 Prozessoren sind in 41 Schränken installiert. Derzeit arbeitet JUGENE, der 25-mal leistungsfähiger ist als JUMP und für seine 65 000 Prozessoren dennoch nur 16 Schränke benötigt, direkt mit JUMP zusammen. Allerdings sind die Tage von JUMP bereits gezählt, und seine Ablösung durch ein neues Clustersystem steht bevor.

Unser heutiges naturwissenschaftliches Wissen beruht derzeit auf drei großen „Säulen der Erkenntnis“:

- 1 Prof. Thomas Lippert, der Leiter des Jülich Supercomputing Centre
- 2 Die vier Schränke (vorn) mit je vier Racks beherbergen JUGENE. Dahinter erstreckt sich JUMP mit seinen 41 Schränken über ein viel größeres Areal.
- 3 Feierliche Einweihung von JUGENE am 22.2.2008: Prof. Bachem, Ministerpräsident Dr. Jürgen Rüttgers, Staatssekretär Thomas Rachel, MdB, Martin Jetter, CEO IBM Deutschland.
- 4 Grundlagenforschung mit Computern: Komplexe Spinstrukturen an magnetischen Oberflächen (Zusammenarbeit mit der Uni Hamburg).

- 1 Prof. Thomas Lippert, Head of the Jülich Supercomputing Centre
- 2 The four cabinets (front), each containing four racks, house JUGENE. Behind them, JUMP spans a much bigger area with its 41 cabinets
- 3 The official inauguration of JUGENE on 22.02.2008: Prof. Bachem, Prime Minister of North Rhine-Westphalia Dr. Jürgen Rüttgers, State Secretary Thomas Rachel, MdB, and Martin Jetter, CEO IBM Germany.
- 4 Basic research with computers: complex spin structures on magnetic surfaces (Cooperation with the University Hamburg)

Our scientific knowledge today is based on three great “pillars of knowledge”: on experimental research, on theoretical descriptions, and also on mathematical simulations of complex systems.

Today, computers have become indispensable everywhere – in everyday life and technology, the construction of cars, airplanes and engines, and in the semiconductor industry. They are seen as willing helpers everywhere who take over laborious tasks from engineers, draftsmen, and accountants, and perform them quickly and accurately. This simple fact, however, only provides

us with part of picture of how important the computer actually is.

The development of the supercomputer has now become so advanced that its incredible operational performance enables it to perform tasks that not even a man of Einstein’s calibre could have attempted. The magnitude of these problems, the sheer number of individual equations and the reciprocal interrelations go beyond all human capabilities. Supercomputers offer us an insight into highly complex hidden worlds for the first time.

With the aid of JUGENE, research is currently being conducted on the following key topics at Forschungszentrum Jülich:

- *Materials science, in other words the physical and chemical characteristics of complicated materials and their surfaces. This includes the magnetic spin structures of spintronics.*
- *Geoscience with a focus on weather, climate, and the physics and chemistry of the upper atmosphere.*
- *Chemical reactions.*
- *The behaviour of biological proteins that lead to Alzheimer’s and Parkinson’s disease.*

- auf der experimentellen Erforschung,
- auf der theoretischen Beschreibung und inzwischen auch
- auf der mathematischen Simulation komplexer Systeme.

Inzwischen sind Computer in Alltag und Technik, im Fahrzeug-, Flugzeug- und Maschinenbau und in der Halbleiterindustrie völlig unverzichtbar geworden. Sie dienen überall als willige Helfer, die die mühevollen Arbeit von Ingenieuren, Zeichnern und Buchhaltern schnell und genau übernehmen.

Diese einfache Erkenntnis spiegelt nur einen Teil der Bedeutung der Computer wider. Inzwischen ist die Entwicklung der Supercomputer so weit fortgeschritten, dass durch ihre gewaltige Leistungsfähigkeit Aufgaben angegangen werden können, die auch von einem Heer von „Einsteins“ niemals hätten gelöst werden können. Die Größenordnung dieser Probleme, die schiere Zahl der Einzelgleichungen und der wechselseitigen Zusammenhänge übersteigt alle menschlichen Möglichkeiten. Hier ermög-

lichen uns Supercomputer zum ersten Mal Einblicke in „hochkomplexe verborgene Welten“.

Zurzeit werden mit Hilfe von JUGENE folgende Themenschwerpunkte im Forschungszentrum Jülich erforscht:

- Materialwissenschaften, also physikalische und chemische Eigenschaften von komplizierten Materialien und deren Oberflächen. Dazu zählen auch die magnetischen Spinstrukturen der Spintronik
- Geowissenschaften, insbesondere Wetter, Klima, und die Physik und Chemie der hohen Atmosphäre
- Chemische Reaktionen
- Das Verhalten biologischer Proteine, die zu Alzheimer- und Parkinson-Erkrankungen führen

Zu diesen Themen kommen viele Fragestellungen, die von externen Nutzern mit Hilfe von JUGENE bearbeitet werden. Dazu zählen:

- Elementarteilchenphysik
- Vielteilchenprobleme

In addition to these topics, external groups also use JUGENE to address the following issues and more:

- elementary particle physics
- many-particle problems

Simulations from both of these fields represent the most extensive use made by external users of JUGENE. This includes projects from these fields:

- theoretical chemistry
- soft matter, polymers
- astrophysics (star formation)

- life sciences (incl. flow calculations for medical engineering)
- biological membranes
- environmental sciences

Materials science as an example

A very wide range of programs, which are currently processed using JUGENE, come from the field of materials science in Jülich. The reason for this is easy to understand. The materials that surround us – from ceramic hot plates to computer chips, from DVDs to telescopes – are all fabricated in a complicated manner so that very spe-

cific characteristics can be obtained. The macroscopic characteristics of the materials, in other words their electrical and optical characteristics, their structural stability, hardness, elasticity, and thermal conductivity result from the type and order of the atoms inside them. Our understanding of physics today is so advanced that we can actually derive the expected characteristics from the principal order of different atoms in a material and their chemical bonds with each other. The more precisely we want to understand the atomic world, the more carefully we must consider the huge number of “actors in the nanoworld”,

Simulationen aus diesen beiden Themenfeldern stellen die umfangreichsten Anwendungen externer Nutzer auf JUGENE dar. Dazu kommen Arbeiten aus diesen Gebieten:

- Theoretische Chemie
- Weiche Materie, Polymere
- Astrophysik (Sternentstehung)
- Lebenswissenschaften (u.a. Strömungsrechnungen für die Medizintechnik)
- Biologische Membranen
- Umweltwissenschaften

Beispiel Materialwissenschaften

Recht umfangreiche Programme, die zurzeit mit Hilfe von JUGENE bearbeitet werden, kommen aus dem Bereich der Materialwissenschaften im Forschungszentrum. Der Grund dafür ist leicht verständlich. Die uns umgebenden Werkstoffe, von der Keramikochplatte bis zum Computerchip, von der DVD bis zum Weltraumteleskop, sind alle auf komplizierte Weise hergestellt worden, um ganz spezielle Eigenschaften zu erzielen. Die makroskopischen Eigenschaften der Materialien, also

ihre elektrischen, magnetischen und optischen Eigenschaften, ihre Festigkeit, Härte, Elastizität und Wärmeleitfähigkeit ergeben sich aus der Art und Anordnung der in ihnen vorhandenen Atome. Unser Verständnis der Physik ist inzwischen so weit fortgeschritten, dass wir tatsächlich aus der prinzipiellen Anordnung der verschiedensten Atome im Material und ihrer chemischen Bindungen untereinander auf die zu erwartenden Eigenschaften schließen können. Je genauer man die atomare Welt verstehen will, desto sorgfältiger muss man die riesige Zahl der „Akteure der Nanowelt“, der Elektronen und Atome, berücksichtigen. Es ist das Zusammenwirken sehr vieler Atome und mehrerer Elektronenbindungen pro Atom, die in eine Berechnung einbezogen werden müssen, um zuverlässige Resultate zu erzielen. Ein winziger Würfel von einem Millimeter Kantenlänge enthält etwa 10^{20} Atome und ein vielfaches an Elektronen. Selbst JUGENE, der 2×10^{14} Operationen pro Sekunde durchführen kann, würde 10 Tage brauchen, um diese Atome auch nur einfach „durchzuzählen“. Wird der Würfel aber weiter verkleinert, wird

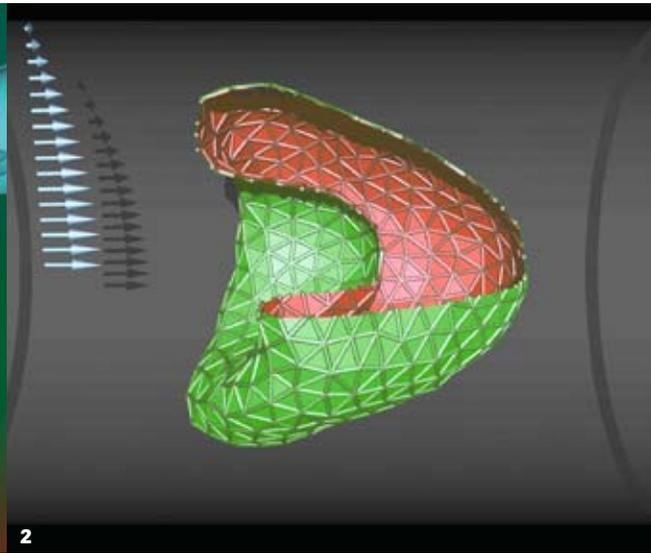
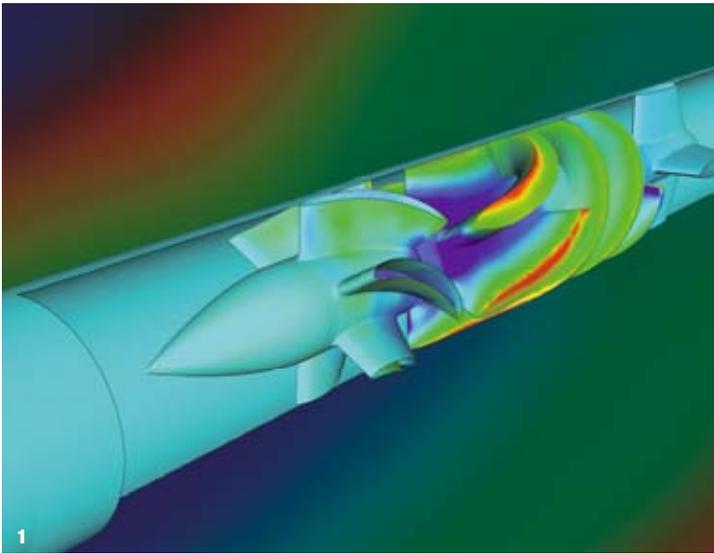
electrons and atoms. The interaction between a very large number of atoms and several electron bonds per atom must be accounted for in a calculation if reliable results are to be generated. A tiny cube with an edge length of one millimetre contains around 1020 atoms and a multitude of electrons. Even JUGENE, which can conduct 2×10^{14} operations per second, would require 10 days simply to count these atoms. If the cube was made any smaller, the situation would improve considerably. If we take a micrometre cube, the atomic number shrinks to 1011, and a cube with an edge measuring 30 nanometres in length only

contains around a million atoms – this magnitude scale would allow JUGENE to deal with each and every individual atom.

However, if we want to calculate the basic quantum-mechanical characteristics of all of the electrons involved using density functional theory, then we must take yet another step to reduce the size of the ensemble under investigation. With the aid of JUGENE, it is possible to trace and understand the behaviour of all of the electrons from around 1,000 atoms over a period of around one nanosecond.

By contrast, if we are content with the physical approximation of a classical force field, which is often adequate and useful when dealing with many issues, then the behaviour of some 100,000 atoms can be calculated for a period of one microsecond.

It has been shown that this type of nanoscale ensemble reflects the characteristics of a macroscopic body in most cases. In this way, the expansion of special glass ceramics can be very accurately calculated “ab initio” for large telescope mirrors or for common ceramic fields in electric hobs. Another project that scientists in the Jülich



die Lage wesentlich günstiger. Im Bereich von Mikrometer-Würfeln ist die Atomzahl bereits auf 10^{11} geschrumpft, und ein Würfel von 30 Nanometern Kantenlänge enthält nur noch etwa eine Million Atome – auf dieser Größenskala könnte sich JUGENE bereits mit jedem einzelnen Atom befassen.

Will man jedoch die grundlegenden quantenmechanischen Eigenschaften aller beteiligten Elektronen mit Hilfe der „Dichtefunktionaltheorie“ berechnen, so muss man das betrachtete Ensemble noch um einen weiteren Schritt verkleinern. Mit Hilfe von JUGENE ist es mög-

lich, das Verhalten aller Elektronen von etwa 1000 Atomen über einen Zeitraum von etwa einer Nanosekunde nachzuvollziehen und zu verstehen. Wenn man sich dagegen mit der physikalischen Näherung eines klassischen Kraftfeldes zufrieden gibt, wie es für viele Fragestellungen oft ausreichend und nützlich ist, so kann man das Verhalten von einigen 100000 Atomen über einen Zeitraum von einer Mikrosekunde berechnen.

Es zeigt sich, dass solch ein nanoskaliges Ensemble in vielen Fällen bereits die Eigenschaften eines makroskopischen Körpers wi-

Institute of Solid State Research are working on deals with optimum chemical reactions for the fabrication of particularly stable synthetic materials from the polycarbonate group, which are used for airplane windows or CDs and DVDs. Here too, the use of the supercomputer JUGENE has led to very useful results and products.

The climate as an example

Scientists in the Institute of Chemistry and Dynamics of the Geosphere use the Jülich supercomputers to model complex physical and chemical reactions that cause changes in the

composition of the atmosphere. These include long-distance transport and chemical reaction processes of anthropogenic and biogenic trace substances, as well as the formation and depletion of the ozone layer in the upper atmosphere. Comparing measurement data from ground stations, airplanes and balloon sondes provides successively more precise descriptions and predictions on the development of the atmosphere.

In order to be able to describe the physics and chemistry of the atmosphere globally, a map grid is laid over the earth and a set of equations es-

tablished for each of the hundreds of thousands if not millions of grid cells. If slower changes and interactions are also to be recorded over a period of decades, then a grid resolution with a mesh width of around 100 - 300 km can be set thanks to today's supercomputers. For detailed investigations in a region such as North Rhine-Westphalia (NRW) in contrast, a simulation with narrow mesh widths of only a few kilometres can be created. Vertically, such a model would normally comprise between 20 and 100 layers.



3



4

63

derspiegelt. Auf diese Weise konnte tatsächlich die Ausdehnung spezieller Glaskeramiken für große Teleskopspiegel oder allgegenwärtiger „Ceran“ Glaskeramik Kochfelder in Elektroherden sehr genau „ab initio“ berechnet werden. Ein anderes Projekt der Wissenschaftler im Jülicher Institut für Festkörperforschung befasst sich mit der optimalen chemischen Reaktionsführung für die Herstellung besonders stabiler Kunststoffe aus der Polycarbonat-Gruppe, wie sie etwa für Flugzeugfenster oder CDs und DVDs eingesetzt werden. Auch hier hat der Recheneinsatz von JUGENE bereits zu sehr nützlichen Erkenntnissen und Produkten geführt.

- 1 Eine implantierbare Blutpumpe in Turbinenbauweise bedarf der genauen mathematischen Simulation, um ihren Einfluss auf die Blutkörperchen vorher zu bestimmen (M. Behr, RWTH Aachen).
- 2 Ein rotes Blutkörperchen wird unter dem Einfluss einer kräftigen Strömung sehr stark deformiert (G. Gompper, Jülich).
- 3 Eine „Ceran“ Glaskeramik Kochfläche mit Ceran-Feld als allgegenwärtiges Beispiel für eine besonders optimierte Keramik mit extrem geringer thermischer Ausdehnung.
- 4 Spiegel für Teleskope sind die größten und wertvollsten Objekte der Glasherstellung. Ihr thermisches Verhalten und ihre Form werden mit Großrechnern bestimmt.

- 1 Accurate mathematical simulations are needed in order to predetermine the influence that an implantable blood pump with a turbine construction has on blood corpuscles (M. Behr, RWTH Aachen)
- 2 A red blood corpuscle is very strongly deformed under the influence of a strong current (G. Gompper, IFF Jülich)
- 3 A hot plate with a ceramic field as an everyday example of an optimised ceramic with extremely low thermal expansion
- 4 Mirrors for telescopes are the biggest and most valuable objects manufactured in glass production. Their thermal behaviour and their shape are calculated using supercomputers.

The atmosphere model first calculates the temporal development of different physical and chemical variables such as temperature, moisture, pressure, radiation, wind and the concentration of trace elements in each grid cell. In doing so, the vertical exchange processes must also be taken into account. The amount of incident solar radiation on soil, for example, depends on the concentrations of trace elements and aerosols in the grid cells above it and on whether clouds are present. Furthermore, grid cells are also connected horizontally because the wind transports the air masses and trace elements from one cell

into the cell beside it. Once a full computing cycle has been completed for all cells, the changed overall situation can be used as a starting basis for the next time step.

Using the modern procedure of data assimilation, it is even possible to incorporate observational data from satellites, airplanes or ground measuring stations directly into model calculations. "Parallel computing" is therefore particularly suitable for dealing with a wide range of problems connected with climate and weather calculations, as well as the chemistry of the atmosphere.

The exchange processes between grid cells mean that it is essential for processors to communicate with each other very effectively. Furthermore, atmosphere models require very large hard-drive storage spaces.

The long-term goal is a regional prediction of the "chemical weather" and the global climate development with a resolution of a few kilometres. If this goal is to be realised, much more powerful computers will be required because, in the light of the expected consequences of climate change, reliable predictions have become particularly important.



64

Beispiel Klima

Mithilfe der Jülicher Supercomputer modellieren die Wissenschaftler im Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre komplexe physikalische und chemische Reaktionen, die zu Veränderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre führen. Hierzu gehören der Ferntransport und die Umwandlungsprozesse von anthropogenen und biogenen Spurenstoffen, aber auch der Auf- und Abbau der Ozonschicht in der hohen Atmosphäre. Durch den Vergleich mit Messdaten, die von Bodenstationen, Flugzeugen und Ballonsonden stammen, werden sukzessiv genauere Beschreibungen und Vorhersagen für die Entwicklung der Atmosphäre gewonnen.

Um die Physik und Chemie der Atmosphäre global beschreiben zu können, wird ein Gitternetz über die Erde gelegt und ein Satz von Gleichungen für jede der hunderttausende bis Millionen Gitterzellen aufgestellt. Will man dabei auch langsamere Veränderungen und Wechselwirkungen erfassen, die sich über Jahrzehnte erstrecken können, so erlauben die gegenwärtigen Superrechner eine Gitterauflösung von etwa 100–300 km Maschenweite. Für detailliertere Untersuchungen in einer Re-

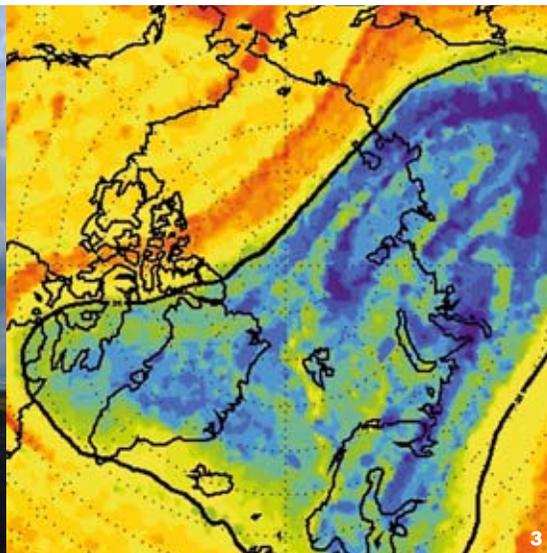
gion wie NRW dagegen kann man eine Simulation mit engen Maschenweiten von nur wenigen Kilometern erstellen. In der Vertikalen enthält ein solches Modell normalerweise zwischen 20 und 100 Schichten.

Das Atmosphärenmodell berechnet zunächst die zeitliche Entwicklung verschiedener physikalischer und chemischer Größen wie Temperatur, Feuchte, Druck, Strahlung, Wind und Spurengaskonzentrationen in jeder Gitterzelle. Dabei müssen auch die Austauschprozesse in Vertikalrichtung berücksichtigt werden. So hängt zum Beispiel die Menge der einfallenden Sonnenstrahlung am Boden davon ab, welche Spurengas- und Aerosolkonzentrationen in den Gitterzellen darüber enthalten sind und ob es dort Wolken gibt. Zudem stehen die Gitterzellen natürlich auch horizontal miteinander in Verbindung, da der Wind die Luftmassen und Spurenstoffe von einer Zelle in die Nachbarzellen transportiert. Nachdem ein kompletter Rechenzyklus für alle Zellen abgeschlossen ist, kann man die veränderte Gesamtsituation als Ausgangsbasis für den nächsten Zeitschritt benutzen.

Mit dem modernen Verfahren der Datenassimilation ist es sogar möglich, Beobachtungs-



2



3



4

daten von Satelliten, Flugzeugen oder Bodenmessstationen direkt in die Modellrechnung einfließen zu lassen.

Ganz offensichtlich ergeben sich bei der Klima- und Wetterberechnung sowie der Chemie der Atmosphäre umfangreiche Problemstellungen, bei denen sich das „parallele Rechnen“ ganz besonders anbietet. Aufgrund der Austauschprozesse zwischen den Gitterzellen ist man dabei auf besonders effektive „Kommunikation“ zwischen den Prozessoren angewiesen. Zudem verlangen Atmosphärenmodelle ganz erhebliche Mengen an Festplattenspeicherplatz.

Das langfristige Ziel ist eine regionale Vorhersage des „chemischen Wetters“ und der globalen Klimaentwicklung mit einer Auflösung von wenigen Kilometern. Dazu werden zukünftig noch deutlich leistungsfähigere Rechner benötigt, denn wegen der zu erwartenden Folgen des Klimawandels sind zuverlässige Vorhersagen besonders wichtig.

- 1 Das Hochleistungsflugzeug Geophysica fliegt auch für das Forschungszentrum Jülich in extreme Höhen von bis zu 22 000 Meter und misst dort die Spurengaskonzentrationen, wie etwa Ozon und FCKWs (Hier auf der Südhalbkugel in Darwin, Australien).
- 2 Die Geophysika vor dem Start. Ihre Flüge in hoch reichende gewaltige Tropengewitter haben bewiesen, dass diese Gewitter einen unerwartet effektiven vertikalen Transport von Spurengasen in der Atmosphäre bewirken.
- 3 Supercomputer sind weltweit unverzichtbar für die Klimamodellierung.
- 4 Ballonstart der Jülicher Messkampagne in Kiruna, Nordschweden, zur Untersuchung der nördlichen Stratosphäre. Ein Ballon erreicht sogar bis zu 40 000 Meter Höhe, kann aber nicht kontrolliert gesteuert werden, um das Innere von Wolken zu erforschen.

- 1 *The high-performance aircraft Geophysica flies at extremely high altitudes of up to 22,000 metres for Forschungszentrum Jülich and measures the concentrations of trace elements found there such as ozone and CFCs (here in the southern hemisphere in Darwin, Australia)*
- 2 *The Geophysica before take-off. Its flights into formidable tropical storms at high altitudes have proven that these storms unexpectedly but effectively transport trace elements vertically in the atmosphere.*
- 3 *Supercomputers are indispensable worldwide for climate modelling*
- 4 *Balloon take-off as part of the Jülich measurement campaign in Kiruna, northern Sweden, which is investigating the northern stratosphere. A balloon can reach altitudes of up to 40,000 metres but it cannot be navigated in a controlled manner to examine the interior of clouds.*

SPINTRONIK – EIN NEUES FELD DER ELEKTRONIK

Vielfältige Sensoren, strominduziertes Schalten und ferromagnetische MRAMs

Inzwischen haben GMR-Sensoren sehr viele Anwendungen gefunden. Am bedeutendsten ist die Anwendung in Festplatten – von der Unterhaltungselektronik über PCs bis zu den Supercomputern.

Auch das Internet wäre ohne die GMR-bestückten Festplatten lahmgelegt, denn sehr große Datenvolumina müssen ständig bei den Servern und Netzknoten zwischengespeichert werden. So ist es kein Wunder, dass die Zahl der produzierten GMR-Sensoren bereits viele Milliarden erreicht hat.

Auch in der Steuerungstechnik haben empfindliche Magnetfeldsensoren viele Anwendungen gefunden. Weil übliche Eisen- oder Stahlteile magnetisch sind, liefern GMR-Sensoren Signale, wenn sich solche Objekte am Sensor vorbei bewegen. Daraus ergeben sich vielfältige Anwendungen. Beispiele sind

Drehzahlmesser oder Drehwinkeldecodierer in Fahrzeugen, die Einspritz- und Zündsteuerung, die ESP- und ABS-Sensoren sowie entsprechende Anwendungen bei Maschinen und Robotern.

Inzwischen wird mit Hilfe der GMR-Technik auch ein ganz neues Feld im Bereich der Datenspeicher erschlossen. Dahinter steckt eine überraschende neue Entdeckung.

Dazu betrachten wir zuerst den CPP-GMR-Effekt. Die Abkürzung CPP steht für „current perpendicular to plane“, also Stromfluss senkrecht zum Schichtpaket (Abb. 15). Seine Erklärung ist vollständig analog zu den bekannten Erläuterungen, die sich auf die CIP-Geometrie („Current in plane“) beziehen. Wiederum zeigt die Anordnung mit parallelen Magnetisierungsrichtungen einen wesentlich geringeren Widerstand für den Elektronenstrom, weil

SPINTRONICS – A NEW FIELD OF ELECTRONICS

A VARIETY OF SENSORS, CURRENT-INDUCED SWITCHING, AND FERROMAGNETIC MRAMS

GMR sensors are used in a wide variety of applications today, the most important of which is its use in hard drives – from consumer electronics and PCs to supercomputers. Even the Internet would be paralysed without GMR hard drives because very large volumes of data must be buffered continuously on servers and network nodes. It is therefore no surprise that the number of GMR sensors produced to date has already exceeded a billion many times over. Sensitive magnetic field sensors are also used in many applications in control engineering. Since common iron or steel parts are magnetic, GMR sen-

sors deliver signals when such objects move past the sensor. This is the basis for a variety of applications. Examples include revolution counters or angle-of-rotation decoders in vehicles, injection and ignition controls, ESP and ABS sensors, and appropriate applications in machines and robots. GMR technology has also helped pave the way for a completely new field in the area of data storage. Behind this new field lies a rather unexpected new discovery.

First of all, we will take a look at the CPP-GMR effect. CPP stands for “current perpendicular to plane”,

in other words a flow of current perpendicular to the multilayer (Fig. 15). It can be explained in a similar manner to the description we are familiar with of CIP geometry (“current in plane”). Once more, the arrangement with parallel directions of magnetisation shows a significantly lower resistance for the flow of electrons, because in effect, it represents a “short circuit” for a spin orientation.

However, there is one important difference: in CPP geometry, the electrons pass through the separating interlayer in a perpendicular direction, i.e.

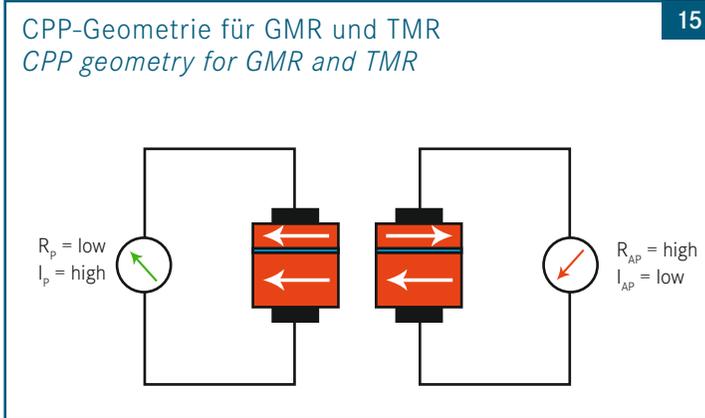


Abb. 15: In der CPP- Geometrie („current perpendicular to plane“) durchquert der Strom das GMR-Schichtpaket in senkrechter Richtung. Als Zwischenschicht kann sogar ein sehr dünner Isolator eingesetzt werden, der dann von den Elektronen „durchtunnelt“ wird: TMR, Tunnel- Magnetowiderstandseffekt. Auch dabei führt der parallele Zustand zu geringem Widerstand, der antiparallele Zustand zu hohem Widerstand. Die TMR-Widerstandsänderung kann bis zu 500% betragen.

Fig. 15: In CPP geometry (“current perpendicular to plane“) the electrons cross the GMR layers in a vertical direction. Even a thin insulator can be used as a spacer, since electrons can tunnel through it: TMR – tunnel magnetoresistance. Parallel alignment of the magnetisation leads to low resistance; antiparallel alignment to high resistance, as known from GMR. TMR resistance changes can reach 500%.

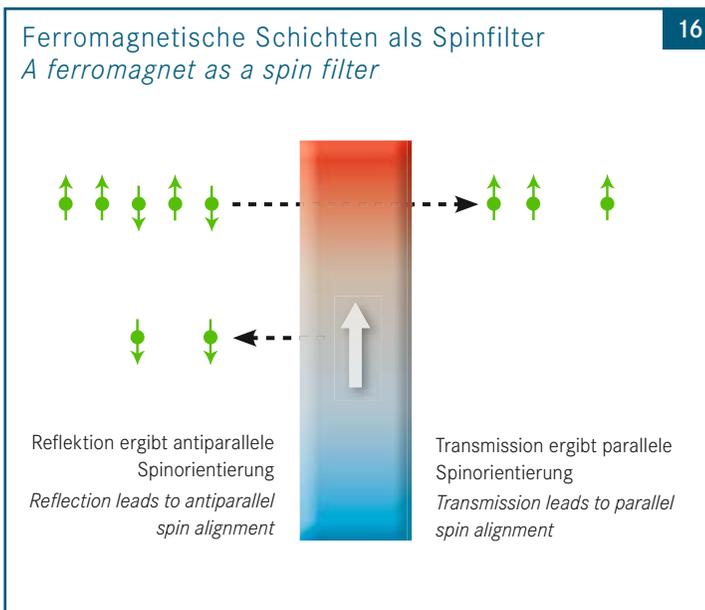


Abb. 16: Eine dicke ferromagnetische Schicht wirkt auf durchtretende Elektronen als Spinfilter. In Transmission treten vorzugweise Elektronen mit parallelem Spin durch die Schicht. Für die zurück gestreuten, „gespiegelten“ Elektronen ergibt sich ebenfalls eine Vorzugsrichtung für die Polarisation – allerdings sind die reflektierten Elektronen nun antiparallel polarisiert.

Fig. 16: A thick ferromagnetic layer is a spin filter for passing electrons, which predominantly become polarised parallel to the magnetisation. Reflected electrons show a spin polarisation that is generally antiparallel to the layer magnetisation.

sie für eine Spinorientierung praktisch einen „Kurzschluss“ darstellt.

Allerdings gibt es einen wichtigen Unterschied: In der CPP- Geometrie durchlaufen die Elektronen die trennende Zwischenschicht senkrecht, also auf kürzestem Wege. In dieser Anordnung kann man die metallische Zwischenschicht sogar durch einen sehr dünnen Isolator ersetzen, weil Elektronen diesen senkrecht durchdringen können. Dieses erstaunliche Verhalten der

Elektronen auf der Nanometerskala ist eine Folge der Quantenmechanik und wird „Tunnel-effekt“ genannt. Man spricht dann nicht mehr vom GMR, sondern vom TMR, dem Tunnel-Magnetowiderstandseffekt.

Weil beim TMR der Stromfluss genau wie beim GMR-Effekt durch die magnetische Orientierung im Schichtpaket gesteuert wird, funktioniert ein TMR-Sensor prinzipiell wie ein GMR-Sensor.

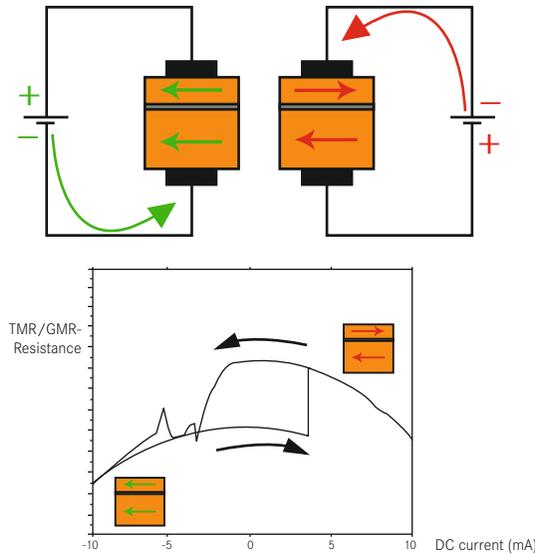
Abb. 17: Strominduziertes magnetisches Schalten ist ein völlig neu entdeckter Effekt. Wie im oberen Bild gezeigt, führt die Änderung der Stromrichtung zu einem kontrollierten Umschalten der Magnetisierung in der dünnen, leicht ummagnetisierbaren Schicht eines TMR-Pakets. Die ferromagnetische Hysterese bewirkt, dass beide Magnetisierungszustände auch ohne Strom stabil erhalten bleiben, wie es auch bei einer Festplatte der Fall ist. Das zeigt die untere Messkurve.

Fig. 17: *Current-induced magnetic switching has been discovered recently. Top: Changing the direction of the moving electrons through a TMR system leads to a switching of the thin magnetic layer whose magnetisation can be easily reversed. Bottom: Ferromagnetic hysteresis stabilises both states, as we are familiar with from data storage on hard disks.*

Strom-induziertes Schalten

Current-induced magnetisation switching

17



Magnetische Nanosäule

Magnetic nanopillar

18

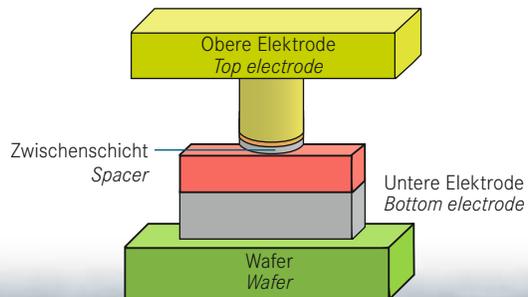


Abb. 18: Aufnahme einer freistehenden magnetischen Nanosäule mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops. Der geringe Durchmesser von 70 Nanometern erlaubt eine hohe Stromdichte, die notwendig ist, um die Dynamik des Spintransports (Spin-Transfer) zu untersuchen.

Fig. 18: *Image of a free-standing magnetic nanopillar using a scanning electron microscope. The small diameter of 70 nanometres permits a high current density, which is required to investigate the dynamics of the spin transfer.*

Ø 70 nm

Doch haben Experimente mit TMR-Sensoren einen sehr überraschenden neuen Effekt gezeigt. Unter bestimmten Bedingungen kann der Elektronenstrom durch ein CPP-Schichtpaket dazu führen, dass die freie ferromagnetische Schicht durch den fließenden Elektronenstrom umgeschaltet wird - und zwar in parallele Richtung als auch zurück in die antiparallele Orientierung. Dieser Effekt heißt „strominduziertes magnetisches Schalten“.

Zur Erklärung wird zuerst das Verhalten von Elektronen betrachtet, die eine magnetische Schicht durchqueren oder aber an ihr reflektiert werden:

In Transmission wirkt eine dicke magnetische Schicht wie ein polarisierendes Filter - die Spins werden überwiegend parallel zur Magnetisierung gestellt. Das zeigt Abb. 16 oben. Das Verhalten entspricht der Transmission von Licht durch einen optischen Polarisator.

Weil gleichzeitig für Spins mit antiparalleler Ausrichtung der Durchtritt erschwert ist, wer-

den diese vorzugsweise zurück gestreut, Abb. 16 unten. Das entspricht der Spiegelung an einem optischen Polarisator.

Mit diesem Wissen können wir das strominduzierte Schalten der Magnetisierung verstehen. Dazu betrachten wir das Paket beispielsweise in einem Schaltzustand, in dem die Magnetisierungen antiparallel anordnet sind. Dieser Zustand zeigt einen hohen TMR-Widerstand.

Fließt aber ein kräftiger Strom zuerst durch die dicke, geblockte Magnetisierung hindurch und danach durch die dünne, freie Schicht, so tragen die Elektronen die überwiegende Spinorientierung aus der dicken Schicht hinüber in die freie Schicht (Transport der Spin-Polarisierung). Die fließenden Elektronen können dabei mit ihrem Spin, also ihrer Magnetisierung, die freie, leicht ummagnetisierbare Schicht umpolen in den parallelen Zustand (Abb.17).

Auf Grund der magnetischen Hysterese bleibt diese Orientierung auch erhalten, wenn der Strom abgeschaltet wird. (Zur Erinnerung: die

they take the shortest route. In this arrangement, the metal interlayer can even be replaced by a very thin insulator because electrons can pass through this in a perpendicular direction. This astonishing behaviour of the electrons on a nanometre scale is one of the results of quantum mechanics and is known as the "tunnel effect". This is then no longer referred to as GMR but as TMR - tunnel magneto-resistance.

Since for TMR the flow of current is controlled by the magnetic orientation in the multilayer just as it is in the GMR effect, the principles behind how

a TMR sensor works are the same as those of a GMR sensor.

However, experiments with TMR sensors have revealed a very surprising new effect. Under certain conditions, the flow of electrons through a CPP multilayer can cause the free ferromagnetic layer to switch its direction of magnetisation - in both a parallel direction as well as back into an antiparallel orientation. This effect is known as "current-induced magnetic switching".

In order to explain this, we will first consider the behaviour of electrons that pass through a magnetic layer or are reflected by it. In transmission, a thick magnetic layer works like a polarising filter - the spins are generally oriented parallel to the magnetisation. This is shown in Fig. 16, top. The behaviour is the same as the transmission of light through an optical polariser.

Since passage is simultaneously more difficult for spins with an antiparallel orientation, these are mainly scattered back (Fig. 16, bottom). This is equivalent to reflection by an optical polariser.

magnetische Hysterese beschreibt die Stabilität einer Magnetisierungsrichtung. Nur auf Grund der Hysterese kann man zum Beispiel auf einer Festplatte Bits in Form von magnetischen Bereichen einschreiben und danach immer wieder auslesen. Erst wenn sehr starke Magnetfelder eingesetzt werden, wird der Stabilitätsbereich der Hysterese überschritten, und die Magnetisierung kann umgepolt werden. Dadurch wird die alte Information gelöscht und die neue Information eingeschrieben).

Der parallele Zustand kann mit einem kleinen Strom ausgelesen werden und zeigt den geringen TMR-Widerstand.

Wird nun die Stromflussrichtung umgekehrt und ein kräftiger Strom direkt in die freie Schicht geschickt, so kehrt die freie Schicht in ihren antiparallelen Ausgangszustand zurück. Die Ursache liegt in dem Einfluss der an der dicken Schicht reflektierten Elektronen, die einen überwiegend antiparallelen Spin zeigen. Es ergibt sich wieder der hohe TMR-Widerstand.

Ein CPP-TMR-Element zeigt damit zwei stabile Zustände, die durch externe Ströme geschaltet werden können. Ähnlich wie auf einer Festplatte wird damit Information magnetisch gespeichert und ist damit „nicht-flüchtig“, bleibt also auch ohne Stromzufuhr erhalten. Auch das Auslesen der gespeicherten Information ist wie bei einer Festplatte mehrfach möglich und „nicht-destruktiv“ für die eingespeicherte Information. Dazu wird ein schwacher Strom eingesetzt, der die eingespeicherten Zustände nicht verändert.

Ein nanoskaliges Speicherelement (Abb. 18) ist wie geschaffen für eine Anwendung in einer großen Matrix (Feld) mit Tausenden oder Millionen von Knoten. Angesteuert und ausgelesen oder geschaltet wird immer nur das Element, das sich im Kreuzungspunkt einer horizontalen und einer vertikalen Leitung befindet (Abb. 19). Die Gesamtanordnung stellt damit einen nicht-flüchtigen magnetischen Massenspeicher dar, ein MRAM („Magnetic Random Access Memory“). Solche MRAMs befinden sich bereits in der industriellen Erprobung.

We can use this knowledge to understand the current-induced switching of magnetisation. For this purpose, we will examine a stack in a switching state in which the direction of magnetisation is antiparallel. This state exhibits a high TMR resistance.

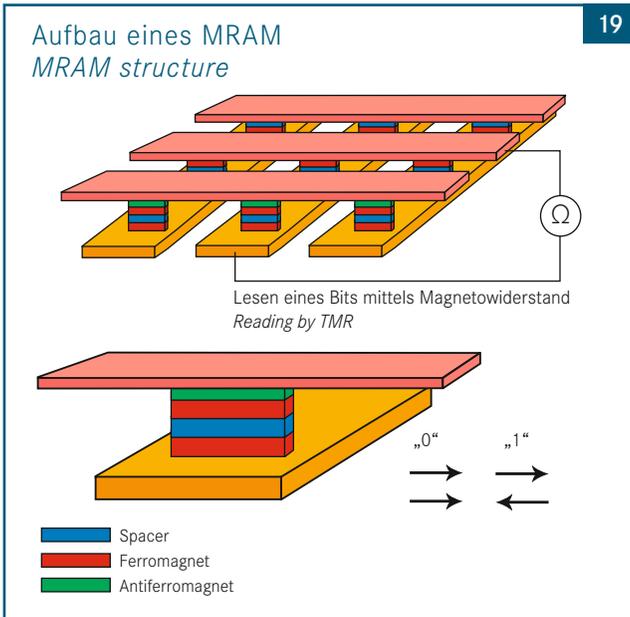
However, if a strong current first flows through the thick blocked magnetisation and then through the thin free layer, electrons carry the main spin orientation from the thick layer with them into the free layer (transport of spin polarisation). In this way, the spin of the moving electrons, in other words

their magnetisation, can reverse the polarity of the free layer whose magnetisation can be easily changed and orient it in a parallel direction (Fig. 17).

Magnetic hysteresis ensures that this orientation is maintained even when the current is switched off. (Remember: magnetic hysteresis describes the stability of the direction of magnetisation. Based on the hysteresis alone, for example, we can write bits in the form of magnetic areas to a hard drive and then read them time and again. Only when very strong magnetic fields are applied is the stability domain of the hysteresis exceeded and the direction of

magnetisation can then be reversed. This allows old information to be deleted and new information to be written). The parallel state can be selected with a small current and shows low TMR resistance.

If the direction of current is reversed and a strong current is sent directly into the free layer, then the free layer will return to its original antiparallel state. The reason for this lies in the influence of the electrons reflected by the thick layer, which exhibit mainly antiparallel spins. This results in a high TMR resistance once more.



19

Abb. 19: Schematischer Aufbau eines MRAM (Magnetic Random Access Memory) aus gekreuzten Leiterbahnen, gelb und rot gezeichnet. An jedem Kreuzungspunkt befindet sich zwischen den Leiterbahnen ein Schichtpaket, das als TMR-Speicherezelle für je ein Bit dient. Es enthält zwei ferromagnetische Schichten, die durch eine dünne Isolatorschicht getrennt sind. Zum Einschreiben der Information wird ein kräftiger Strom benutzt. Das Auslesen erfolgt mit Hilfe des TMR- Effekts.

Fig. 19: MRAM (magnetic random access memory) with a crossbar structure. A TMR storage cell is located at each crossing point between a red and a yellow conductor. Each cell stores one bit and consists of two ferromagnetic layers, separated by a thin insulating spacer. Information is stored by a relatively high TMR writing current. The TMR reading current is much lower.

Die „Spintronik“, das ist die Elektronik mit besonderer Funktionalität des Elektronenspins, wird vermutlich noch andere aufregende Effekte zu Tage fördern und weitere Anwendungen erobern. Die Entdeckungen von Peter Grünberg und Albert Fert haben den Weg zu diesen neuen Möglichkeiten eröffnet.

Weil eine Entdeckung prinzipiell nicht planbar ist, sondern immer auf wissenschaftlicher

Neugier, präziser Arbeit, einer sorgfältigen Betrachtung der Resultate sowie meistens auch auf großem Fleiß und einer Portion Glück beruht, sei abschließend ein Zitat angefügt, das Max Planck zugeschrieben wird:

„Es gehört der Blick eines begnadeten Forschers dazu, um die vielleicht zuerst unscheinbaren Effekte zu erkennen und zu deuten, die später einmal die Basis für ein weites, fruchtbares Feld bilden können.“

A CPP-TMR element therefore shows two stable states which can be switched using external current. Similar to a hard drive, information is saved magnetically and is therefore “non-volatile” and remains saved even without an electric power supply. The reading of saved information is also possible time and again just as in a hard drive and it is non-destructive for the saved information. A weak current is used for this purpose because it does not change the saved states. A nanoscale storage element (Fig. 18) is perfect for use in a large matrix (field) with thousands or even millions of nodes. Only the element located at the crossover

point between a horizontal and a vertical wire is activated, read out or switched. The general arrangement therefore provides a non-volatile magnetic mass storage system – a magnetic random access memory (MRAM). Such MRAMs are already undergoing industrial tests.

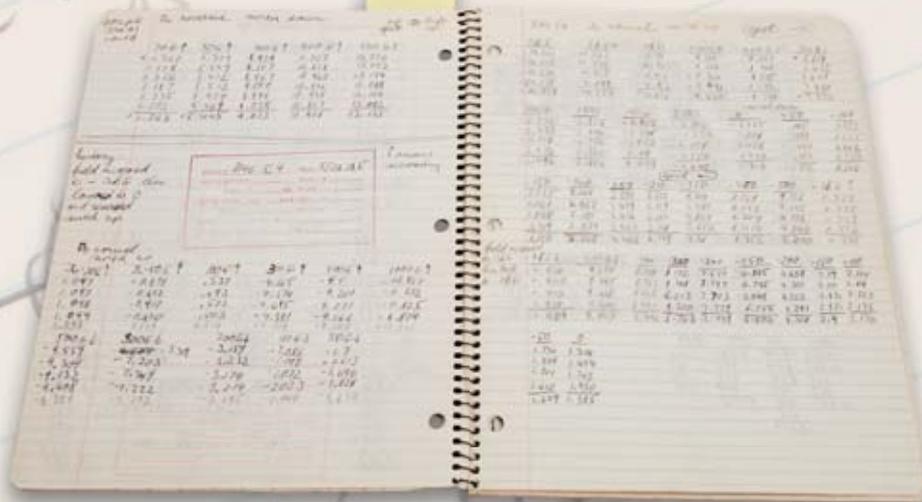
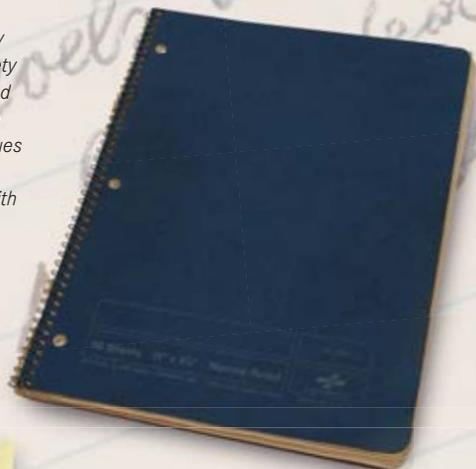
Spintronics – a form of electronics which exploits the functionality of an electron spin – will most likely bring other exciting effects to light and take over other applications. The discovery made by Peter Grünberg and Albert Fert has paved the way for these new opportunities.

Since a discovery can rarely be planned, and tends to arise out of scientific curiosity, precise research and a thorough evaluation of the results combined with a lot of hard work and a bit of luck, it is perhaps fitting to quote Max Planck here:

“It takes the eye of a gifted scientist to recognise and interpret those tiny effects, which are weak and blurred at first glance, but later on they may form the basis of an extensive and productive new field.”

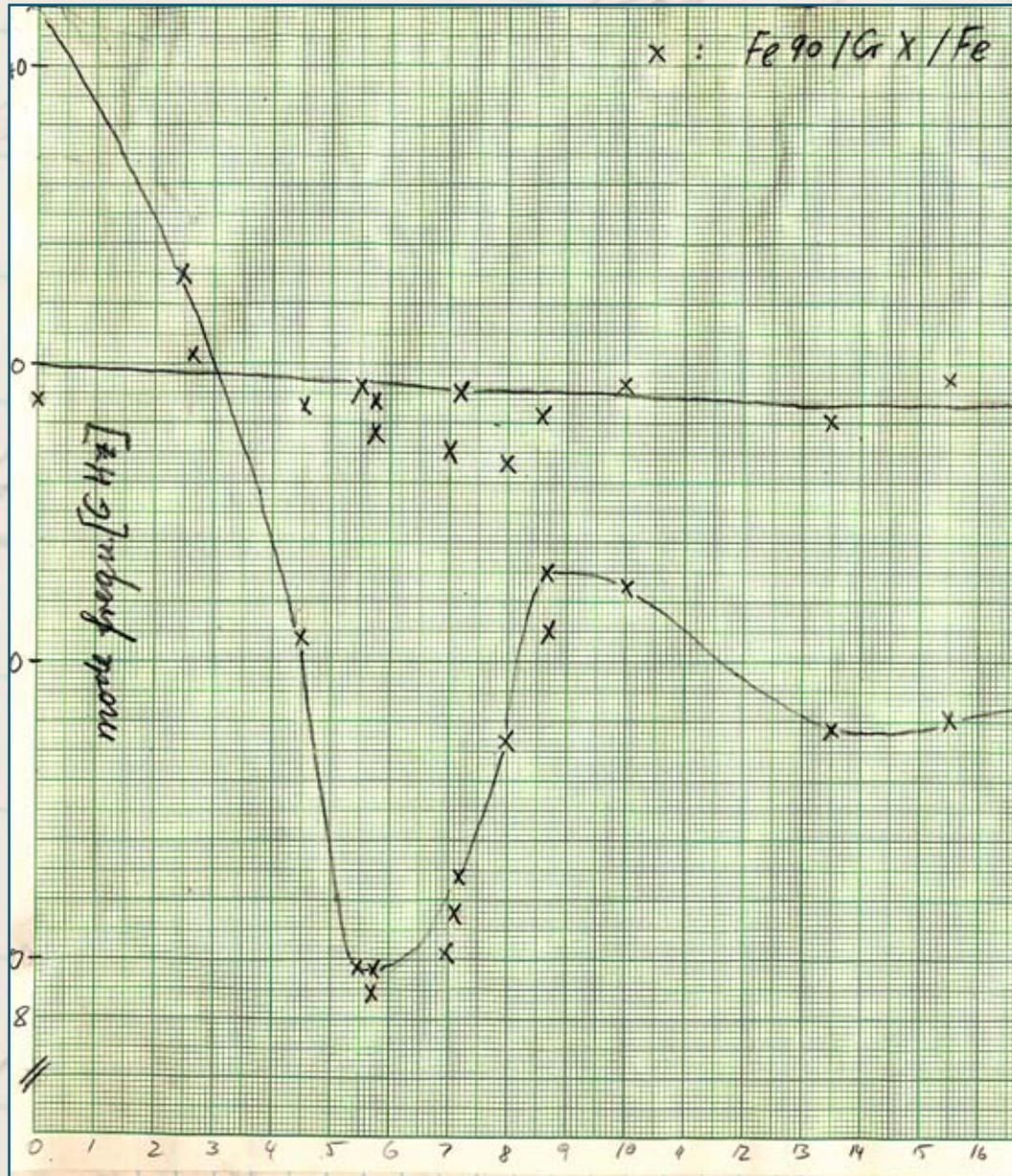
Röntgenspektren, Rocking-Kurven und andere Daten wurden damals mit analogen Mess-Schreibern (Plottern) auf Millimeterpapier aufgezeichnet und dann ins Laborbuch eingeklebt. Andere Messreihen wurden Zahl für Zahl mit Hand eingetragen und später ausgewertet. Das dicke Laborbuch zeigt eine Vielfalt von experimentellen Tätigkeiten, denn damals stellte Peter Grünberg seine Proben selbst her und analysierte sie auch selbst: „Die ersten Hinweise auf die Details der Zwischenschichtkopplung und auf den GMR waren so mickrig, dass meine Kollegen nur verständnislos mit den Schultern gezeit haben. Aber weil ich die Präparation und das Messen in Eigenregie und mit großer Sorgfalt alleine bewerkstelligt habe, fielen mir auch die winzigen unerwarteten Details auf, die ich dann im Laufe der Zeit immer deutlicher herausarbeiten konnte.“

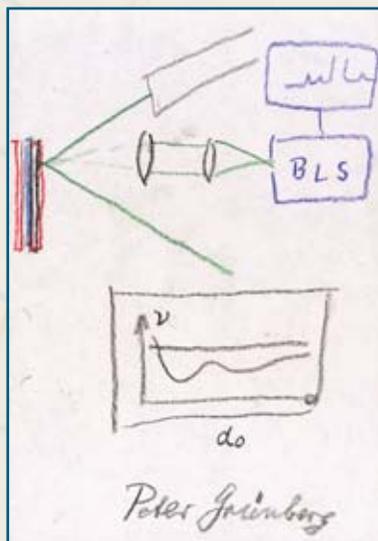
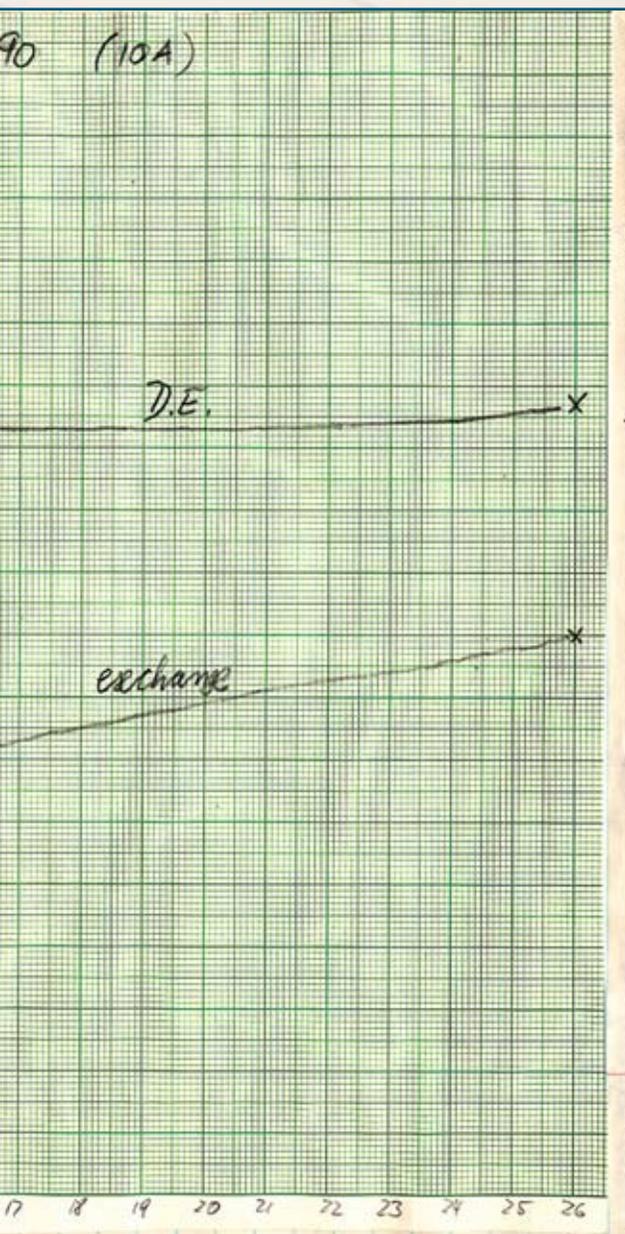
Back then, X-ray spectra, rocking curves and other data were drawn using analogue plotters on millimetre paper and then stuck into the lab notebook. Other series of measurements were entered by hand figure by figure and then evaluated later. The thick lab notebook testifies to a variety of experimental activities because in those days Peter Grünberg prepared his own samples and also analysed them himself: “The first notes on the details of interlayer coupling and on GMR were so lousy that my colleagues just shrugged their shoulders with incomprehension. But because I had conducted the preparation and the measurements independently and with great care and attention, I noticed the tiniest unexpected details which I could then look at in more depth over time.”



EINE ENTSCHEIDENDE MESSREIHE ZUR ZWISCHENSCHICHTKOPPLUNG AN FE/CR/FE

A DECISIVE SERIES OF MEASUREMENTS ON
INTERLAYER COUPLING OF FE/CR/FE





Monate langer Arbeit waren nötig, um diese eine Messreihe zu vollenden. Jeder Messpunkt zur optisch analysierten Zwischenschichtkopplung von Eisen als Funktion der Chromdicke wurde damals an einer einzeln präparierten Probe erhalten und das Endergebnis als ein kleines Kreuzchen auf Millimeterpapier festgehalten. Die entscheidend wichtige „Austauschkopplung“ ist mit „exchange“ gekennzeichnet, „D. E.“ zeigt „Damon-Eschbach-Oberflächen-Spinwellen“. Im Mai 1985 war dieses Datenblatt komplett. Erst später konnte Peter Grünberg die Probenpräparation und die Datenerfassung wesentlich verbessern durch seine Idee, bereits bei der Probenpräparation eine keilförmige Zwischenschicht herzustellen, wie in Bild 8 auf Seite 35 gezeigt. Dadurch wurden die Messungen schneller und zugleich genauer.

Months of work were required to complete this series of measurements alone. Every measurement point for the optically analysed interlayer coupling of iron as a function of the thicknesses of chromium was obtained back then from an individual prepared sample and the final result recorded as a small "x" on millimetre paper. The decisively important "exchange coupling" is labelled "exchange"; "D. E." stands for "Damon-Eschbach surface spin waves". This data sheet was completed in May 1985. At a later date, Peter Grünberg succeeded in considerably improving the preparation of samples and data acquisition by deciding to use a wedge-shaped interlayer at the sample preparation stage, as shown in Fig. 8 on page 35. This made the measurements both faster and more accurate.



Deutscher Zukunftspreis 1998

Peter

enbu

Die Stadt
...rechend dem Besch
... 13.

NAT
MDC
XXX
OB
MDC
XC



PREISE UND EHRUNGEN



Gerrecht

JAPAN PRIZE 2007





Der Japan-Preis ist ein außerordentlich prestigeträchtiger internationaler Preis, der jährlich an hochverdiente Persönlichkeiten aus aller Welt ohne Ansehen der Nationalität verliehen wird. Die Preisverleihung findet immer in Gegenwart des japanischen Kaisers, der Kaiserin, des Premierministers und höchster politischer und diplomatischer Würdenträger in einem feierlichen Rahmen statt. Die gesamte Woche, in der der Preis verliehen wird, steht als „Japan Prize Week“ im Zeichen der Würdigung der Laureaten im Rahmen von zahlreichen Veranstaltungen. Am 19. April 2007 wurde der Preis verliehen an Peter Grünberg und Albert Fert für „Eine technische Innovation, die ermöglicht wurde durch eine Entdeckung aus der Grundlagenforschung“. Der dritte Preisträger, Dr. Peter Shaw Ashton, erhielt den Japan-Preis 2007 für seine Leistungen „Zur Bewahrung der Tropenwälder und der Biodiversität“. Peter Grünberg war oft in Japan und liebt die Menschen sehr, ihre Höflichkeit, ihre zupackende Tatkraft und ihren Glauben an den technischen und wissenschaftlichen Fortschritt.



The Japan Prize is an exceptionally prestigious international prize that is awarded on an annual basis to highly deserving personalities from all over the world regardless of their nationality. The prize is presented within the framework of an official award ceremony, which is always presided over by the Emperor and Empress of Japan, the Prime Minister, and the most important political and diplomatic dignitaries. The week in which the prize is awarded is known as “Japan Prize Week” and numerous events are organised in honour of the prize winners.

On 19 April 2007, the prize was awarded to Peter Grünberg and Albert Fert for “innovative devices inspired by basic research”. The third 2007 Japan Prize Laureate, Dr. Peter Shaw Ashton, received the Japan Prize for his contribution to the “conservation of tropical forest”.

Peter Grünberg is a regular visitor to Japan and loves the people, their politeness, their enterprising resourcefulness, and their belief in technical and scientific progress.

DER NOBELPREIS FÜR PHYSIK 2007





Der Anruf aus Stockholm erreicht Peter Grünberg am 9. Oktober 2007 in seinem Arbeitszimmer im Institut für Festkörperforschung. Die Nachricht verbreitet sich wie ein Lauffeuer. Natürlich sind die Gratulanten aus seinem Institut und dem Forschungszentrum am schnellsten, doch auch die Medien lassen nicht lange auf sich warten. Ein großer Tag – nicht nur für Peter Grünberg, sondern auch für das Forschungszentrum und die Stadt Jülich. Ob Peter Grünberg schon ahnt, dass er demnächst in feierlicher Atmosphäre mit der charmanten Prinzessin Madeleine von Schweden dinieren wird?

The call from Stockholm was taken by Peter Grünberg on 9 October 2007 in his office in the Institute of Solid State Research. The news spread like wildfire. Naturally the first people to congratulate him came from his institute and Forschungszentrum Jülich but the media were not far behind. A big day, not just for Peter Grünberg but also for Forschungszentrum Jülich and the city of Jülich. Whether Peter Grünberg had ever imagined that he would be dining with the charming Princess Madeleine of Sweden before long as part of the celebrations is another matter!

Immer am 10. Dezember, dem Todestag von Alfred Nobel, werden die Preise in Stockholm verliehen. Das würdevolle Zeremoniell entführt die Preisträger und Gäste in eine unvergleichlich zauberhafte Atmosphäre: König Carl XVI Gustaf von Schweden überreicht die Urkunde und die Medaille. Über zehntausend Blumen schmücken die Tische und den Festsaal für das feierliche Banquet für mehr als tausend geladene Gäste.

The prizes are always awarded in Stockholm on 10 December, the anniversary of the death of Alfred Nobel. The grand ceremony sweeps the prize laureates and guests away in a magical atmosphere that is beyond comparison: King Carl XVI Gustaf of Sweden awards the diplomas and medals. More than ten thousand flowers decorate the tables and the hall for the celebratory banquet for more than a thousand guests.





Seine Nobelpreis-Vorlesung über „Spinwellen, den GMR und zukünftige Entwicklungen“ hielt Peter Grünberg am 8. Dezember in der Aula der Universität zu Stockholm. Diese Vorlesung sowie viele Bilder und Informationen finden sich unter www.nobelprize.org.

Peter Grünberg held his Nobel lecture on “Spin waves, GMR and beyond” on 8 December in the Aula Magna in Stockholm University. The lecture together with a number of pictures and other information can be found at www.nobelprize.org.

Honours and Awards



Bundespräsident Horst Köhler ehrt Peter Grünberg am 8. April 2008 mit dem Großen Verdienstkreuz mit Stern. Die nunmehr fünf Ehrendokortitel führen zu der korrekten Anrede: Herr Professor Dr. Dr. h.c. mult. Peter Andreas Grünberg.

The President of the Federal Republic of Germany Horst Köhler honoured Peter Grünberg on 8 April with the Cross of the Order of Merit. With now more than five honorary doctorates, his correct title is: Professor Dr. Dr. h.c. mult. Peter Andreas Grünberg.

Die Universität Bochum verleiht ihm die Ehrendoktorwürde bereits im Jahr 2002

The University of Bochum was the first to award him an honorary PhD (2002).



Der Preis für „Neue Materialien“ der hoch angesehenen American Physical Society im Jahr 1994 war für Peter Grünberg besonders wichtig, denn er lenkte zum ersten Mal die Aufmerksamkeit einer breiteren Öffentlichkeit auf seine Arbeiten. Im Jahr 2007 dagegen ist Grünberg bereits weltweit bekannt. So wird er u.a. vom Economist, einer britischen Wirtschaftszeitung, geehrt.

The prize for “new materials” awarded by the highly regarded American Physical Society in 1994 was particularly important for Peter Grünberg because it was the first time his research was acknowledged by a wider audience. In 2007 by contrast, Grünberg was already well-known worldwide. He was recognised, for example, by the Economist, a British economic newspaper.

Seine Heimatuniversität Köln ehrt ihn 2008 mit Ehrendoktorwürde, Universitätsmedaille und Ehrenmitgliedschaft im Kreis der Alumni.

His home university of Cologne awarded him an honorary doctorate, a medal and honorary membership of the university’s alumni.





Das Stadtsiegel seiner
Geburtsstadt Pilsen

*The city seal of the town
where he was born, Pilsen*



Die besonders wertvolle Stern-Gerlach-
Medaille, die höchste Auszeichnung
der Deutschen Physikalischen Gesell-
schaft.

*The highly valuable Stern Gerlach Medal
- the highest accolade of the German
Physical Society (DPG)*



Der Deutsche Zukunftspreis wurde
1998 von Bundespräsident Roman
Herzog an Peter Grünberg verliehen

*The German Future Prize was awarded
to Peter Grünberg by the President of
the Federal Republic of Germany Roman
Herzog in 1998*



Der Europäische Erfinderpreis 2006
wird durch die Europäische Union
verliehen.

*The European Inventor Prize 2006 was
awarded by the European Union*



Das Indian Institute of Technology an
der Universität Kanpur, Indien, ehrt
Peter Grünberg 2008

*The Indian Institute of Technology at
Kanpur University, India, honoured Peter
Grünberg in 2008*

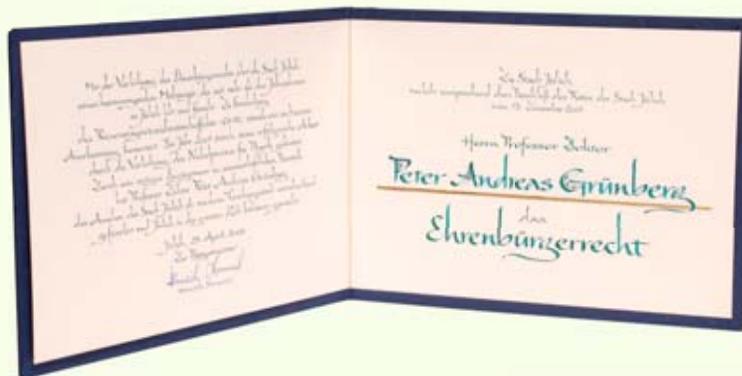


Die Tischtennispieler der Betriebssportgemeinschaft des Forschungszentrums sind natürlich ganz besonders stolz auf ihr Mitglied Peter Grünberg und haben für ihn eine wunderschöne Auszeichnung gefertigt (2007)

The table tennis players from Forschungszentrum Jülich Sports Association are naturally more than proud of their team member Peter Grünberg and commissioned this striking award for him (2007)

Die Stadt Jülich verleiht das Ehrenbürgerrecht 2008

This city of Jülich granted Grünberg freedom of the city in 2008



Der Preis der IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics), verliehen bereits im Jahr 1994

The prize awarded back in 1994 by the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP)



Die Ehrendoktorwürde der Universität des Saarlandes wurde mit einer ganz speziellen Trophäe verbunden, die dem alten Doktorhut von Peter Grünberg (Darmstadt 1969) nachempfunden ist - allerdings symbolisch ergänzt und modernisiert durch eine zusätzliche Festplatte.

The honorary doctorate from Saarland University was awarded in combination with a very special trophy, the design of which was based on Peter Grünberg's old "mortarboard" worn when he received his PhD from Darmstadt in 1969 - although it was symbolically amended and modernised with the addition of a hard disk drive



Medaille der Ben-Gurion Universität, Beerscheba, Israel

Medal of the Ben-Gurion University, Beersheba, Israel

90 LEBENS LAUF, PREISE UND EHRUNGEN

18. Mai 1939 geboren in Pilsen (jetzt Tschechien)
- 1946 Aussiedlung nach Lauterbach in Hessen, Einschulung
- 1950-1959 Besuch des Realgymnasiums Lauterbach
- 1959-1963 Physikstudium an der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität in Frankfurt (Main), Vordiplom 1962
- 1963-1969 Fortsetzung des Physikstudiums an der Technischen Hochschule Darmstadt, Diplom 1966, Promotion 1969
- 1966 Heirat mit Helma Prausa. Drei Kinder: Andreas (1973), Sylvia (1974) und Katharina (1981)
- 1969-1972 Postdoctoral Fellow des National Research Council of Canada an der Carleton Universität in Ottawa, Canada
- seit 1972 Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Festkörperforschung im Forschungszentrum Jülich
- 1984 Habilitation an der Universität zu Köln, Privatdozent
- 1984-1985 Forschungsaufenthalt am Argonne National Laboratory, Illinois, USA.
- 1986 Arbeiten zur Antiferromagnetischen Kopplung in Fe-Cr-Fe-Schichten
- 1988 Arbeiten zum GMR-Effekt in Jülich
- 1992 Ernennung zum Außerplanmäßigen Professor an der Universität zu Köln
- 1998 Halbjähriger Forschungsaufenthalt an der Universität von Sendai und im Forschungszentrum Tsukuba, Japan
- 2004 Nach 32 Jahren im Forschungszentrum tritt Peter Grünberg in den „Unruhestand“
- 2008 Verleihung der ersten Helmholtz-Professur durch das Forschungszentrum Jülich
- 1994 APS International Prize for New Materials (mit A. Fert und S.S.P. Parkin)
- 1994 IUPAP Magnetism Award (mit A. Fert)
- 1996 Technologie-Preis des „Vereins der Freunde und Förderer des Forschungszentrums Jülich“
- 1997 Hewlett-Packard Europhysics Prize (mit A. Fert und S.S.P. Parkin)
- 1998 Deutscher Zukunftspreis des Bundespräsidenten
- 2002 Ehrendoktorwürde der Fakultät für Physik und Astronomie der Ruhr-Universität Bochum
- 2003 Auswärtiges Wissenschaftliches Mitglied der Max-Planck-Gesellschaft
- 2004 Manfred von Ardenne-Preis für Angewandte Physik der Europäischen Forschungsgemeinschaft Dünne Schichten (EFDS)
- 2006 Auszeichnung als „Europäischer Erfinder des Jahres“ durch die Europäische Kommission und das Europäische Patentamt
- 2007 Stern-Gerlach-Medaille der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)
- 2007 Japan-Prize der Science and Technology Foundation of Japan (JSTF) (mit A. Fert)
- 2007 Wolf-Foundation-Prize in Physik (mit A. Fert)
- 2007 Ehrendoktorwürde der RWTH, Aachen
- 2007 Nobelpreis für Physik (mit A. Fert)
- 2008 Ehrendoktorwürde der Universität zu Köln und der Universität des Saarlandes, Saarbrücken und der Tohoku Universität, Sendai, Japan
- 2008 Ehrenbürger der Stadt Jülich

CV, PRIZES AND AWARDS

- 18 May 1939 *born in Pilsen (now Czech Republic)*
- 1946 *Resettlement to Lauterbach in Hesse, starts school*
- 1950-1959 *Secondary school in Lauterbach*
- 1959-1963 *Studies physics at Johann Wolfgang Goethe University in Frankfurt (Main), intermediate diploma 1962*
- 1963-1969 *Continues to study physics at Darmstadt University of Technology, diploma 1966, PhD 1969*
- 1966 *Marries Helma Prausa. Three children: Andreas (1973), Sylvia (1974) and Katharina (1981)*
- 1969-1972 *Postdoctoral fellow of the National Research Council of Canada at Carleton University in Ottawa, Canada*
- since 1972 *Research scientist at the Institute of Solid State Research at Forschungszentrum Jülich*
- 1984 *Habilitation at the University of Cologne, "Privatdozent"*
- 1984-1985 *Research stay at Argonne National Laboratory, Illinois, USA*
- 1986 *Research in the field of antiferromagnetic coupling in Fe/Cr/Fe layers*
- 1988 *Research on the GMR effect in Jülich*
- 1992 *Appointment as adjunct professor at the University of Cologne*
- 1998 *Six-month research stay at the University of Sendai and at Tsukuba Research Center, Japan*
- 2004 *After 32 years at Forschungszentrum Jülich, Peter Grünberg reaches retirement age but continues working*
- 2008 *Conferral of the first Helmholtz professorship by Forschungszentrum Jülich*
- 1994 *APS International Prize for New Materials (with A. Fert and S.S.P. Parkin)*
- 1994 *IUPAP Magnetism Award (with A. Fert)*
- 1996 *Technology Prize of the "Association of Friends and Benefactors of Forschungszentrum Jülich"*
- 1997 *Hewlett-Packard Europhysics Prize (with A. Fert and S.S.P. Parkin)*
- 1998 *German Future Prize awarded by the President of the Federal Republic of Germany*
- 2002 *Honorary doctorate from the Faculty of Physics and Astronomy of Ruhr University Bochum*
- 2003 *External Scientific Member of the Max Planck Society*
- 2004 *Manfred-von-Ardenne Prize for Applied Physics of the European Society of Thin Films (EFDS)*
- 2006 *"European Inventor of the Year" awarded by the European Commission and the European Patent Office*
- 2007 *Stern Gerlach Medal of the German Physics Society (DPG)*
- 2007 *Japan Prize of the Science and Technology Foundation of Japan (JSTF) (with A. Fert)*
- 2007 *Wolf Foundation Prize in Physics (with A. Fert)*
- 2007 *Honorary doctorate from RWTH Aachen University*
- 2007 *Nobel Prize for Physics (with A. Fert)*
- 2008 *Honorary doctorates from the University of Cologne and Saarland University, Saarbrücken, as well as Tohoku University, Sendai, Japan*
- 2008 *Freedom of the city of Jülich*



JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM

DAS
FORSCHUNGSZENTRUM
JÜLICH



Das Forschungszentrum Jülich betreibt interdisziplinäre Spitzenforschung zur Lösung großer gesellschaftlicher Herausforderungen in den Bereichen Gesundheit, Energie und Umwelt sowie Informationstechnologie. Kombiniert mit den beiden Schlüsselkompetenzen Physik und Supercomputing werden in Jülich sowohl langfristige, grundlagenorientierte und fächerübergreifende Beiträge zu Naturwissenschaften und Technik erarbeitet als auch konkrete technologische Anwendungen. Mit rund 4400 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern gehört Jülich, Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft, zu den größten Forschungszentren Europas. Immer mehr Menschen werden immer älter. Ziel Jülicher Gesundheitsforschung ist es, die Diagnose und Therapie von altersbedingten Erkrankungen des Gehirns mit biophysikalischen Methoden und bildgebenden Verfahren zu verbessern. Jülich ist außerdem Partner am neugegründeten „Deutschen Zentrum für Neurodegenerative Erkrankungen“ in Bonn. Für zukünftige Generationen eine umweltfreundliche, bezahlbare und zuverlässige Energieversorgung zu sichern, ist ein weiterer Schwer-

punkt in Jülich. Photovoltaik, Brennstoffzelle, verbesserte Kraftwerkstechnik und Kernfusion – das sind die Arbeitsfelder der Jülicher Energieforscher. Umgekehrt arbeiten die Umweltforscher in Jülich an den Auswirkungen technischer Prozesse auf Umwelt und Klima. Sie untersuchen, wie Pflanzen auf sich ändernde Umweltbedingungen reagieren und wie die Ernährung der Weltbevölkerung gewährleistet werden kann.

Nanoelektroniker untersuchen und entwickeln neue Materialien und Herstellungsverfahren für die übernächste Computergeneration. Eine herausragende Rolle in Jülich spielt die Simulationsforschung an einem der größten Supercomputer weltweit. Jülicher Forscher sind kompetente Ansprechpartner zu allen Aspekten der Simulationswissenschaften und stellen etwa für die Themen Plasmaphysik, Biologie, Erdsystem- und Nanowissenschaften das wissenschaftliche Simulations-Know-How bereit.

FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

Forschungszentrum Jülich pursues cutting-edge interdisciplinary research on solving the grand challenges facing society in the fields of health, energy and the environment, and information technologies. In combination with the two key competencies – physics and supercomputing – work at Jülich focuses on both long-term, fundamental and multidisciplinary contributions to science and technology as well as on specific technological applications. With a staff of about 4,400, Jülich – a member of the Helmholtz Association – is one of the largest research centres in Europe. More and more people are living longer and longer. Jülich health research

aims to improve the diagnosis and treatment of age-related diseases of the brain using biophysical methods and imaging techniques. Furthermore, Jülich is a partner of the newly founded “German Centre for Neurodegenerative Diseases” in Bonn. Reliably supplying future generations with environmentally friendly, affordable and secure energy is another research priority at Jülich. Photovoltaics, fuel cells, improved power plant technology and nuclear fusion – these are the fields of work to which Jülich energy researchers dedicate themselves. Conversely, environmental researchers at Jülich are working on the impacts that technological processes have on the

environment and the climate. They are investigating how plants react to changing environmental conditions and how food can be provided for the global population. Nanoelectronic engineers investigate and develop new materials and manufacturing processes for the computer generation after next. Of major significance in Jülich is simulation research on one of the largest supercomputers in the world. Jülich researchers are experts on all aspects of the simulation sciences, and they put their simulation know-how into practice in fields such as plasma physics, biology, earth system science and the nanosciences.



Zahlen und Fakten *Facts and Figures*

Gesellschafter / Partners

Bundesrepublik Deutschland 90%
 Nordrhein-Westfalen 10%
 jährlich 360 Millionen Euro (einschließlich Sonderaufgaben)
 € 360 million per annum (incl. special projects)

Beschäftigte / Staff

Gesamt / Total	4399
Wissenschaftler / Scientists	1278
davon Doktoranten und Stipendiaten / PhD students and scholarship holders	377
Technisches Personal / Engineers and technicians	1460
Auszubildende / Trainees	348
Gastwissenschaftler / Visiting scientists	jährlich über 800 aus mehr als 50 Ländern more than 800 from over 50 countries per annum



JULAB – DAS SCHÜLERLABOR IM FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

Jungen Menschen Freude an der Wissenschaft vermitteln

Das Schülerlabor JuLab will Schülerinnen und Schülern zeigen, dass naturwissenschaftliche Themen Spaß machen und interessant sein können. Unsere jungen Gäste bekommen hier die Möglichkeit, durch eigenes Experimentieren die Spielregeln und Gesetze der Natur und der Umwelt zu erforschen.

Manche der Experimente erstrecken sich über einen ganzen Tag. Zusätzlich werden Wochenkurse in den Ferien angeboten. Sie sind thematisch auf die Sekundarstufe I oder die Sekundarstufe II abgestimmt.

In Projektwochen können die jungen Forscher einzelne Themen vertiefen. Außerdem werden Workshops und Fortbildungen für Erzieherinnen und Lehrer angeboten. Dort werden Vorschläge für Experimente zum Nachmachen und neue Arbeitsmaterialien vorgestellt.

Themenfelder aus dem JuLab

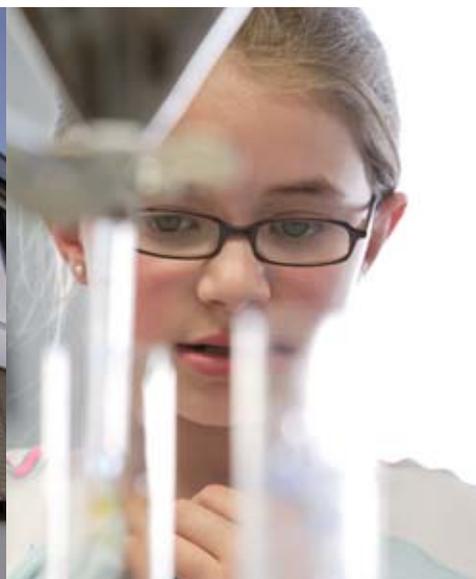
- DNA – auf der Spur der Doppelhelix
Im JuLab kann man DNA „sichtbar machen“ und lernt dabei das molekularbiologische Arbeiten kennen.
- Außerdem gibt es Experimente zur Enzymtechnik und zur Fermentation

- Informationsverarbeitung und -vermittlung hat vielfältige Formen. Im JuLab lernt man etwas über
 - GMR-Sensoren, die uns aus diesem Buch bestens vertraut sind, oder über
 - Kryptologie, also die Verschlüsselung von Informationen, oder die
 - elektrophysiologische Signalleitung in Nervenzellen
- Mit Hilfe einer Lysimeteranlage kann man einen Blick in die Biologie, Chemie und Physik des Erdbodens werfen, um die Umwelt besser zu verstehen.
- Ozon ist ein weiteres wichtiges Thema.
- Interessante Physik aus dem Bereich Energietechnik wird an drei Beispielen präsentiert:
 - Supraleitende schwebende Eisenbahnen
 - Grundlagen einer Brennstoffzelle
 - Experimente zur Elektrotechnik

Man findet Informationen über das JuLab leicht über die Homepage (www.fz-juelich.de) oder direkt über die vollständige Adresse www.fz-juelich.de/projects/schuelerlabor. Natürlich kann man das JuLab auch direkt anrufen: 02461 61-1428.

Das JuLab wurde am 11.11.2005 von der nordrhein-westfälischen Schulministerin Barbara Sommer eingeweiht.





JULAB – THE SCHOOLS LABORATORY OF FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

Teaching young people that science is fun ...

The JuLab Schools Laboratory wants to show school-children and young adults that scientific topics can be fun and interesting. Our young visitors are given an opportunity to research the laws of nature and the environment and the rules of the game for both by creating and conducting their own experiments. Some of our experiments last an entire day. We also offer week-long courses during the school holidays. The topics are grouped according to secondary school level: Level I is for students aged between 10 and 15, and Level II is for fifth and sixth years. During project weeks, the young researchers can extend their knowledge on individual topics.

Furthermore, we offer workshops and training courses for primary and secondary school teachers. Suggestions for experiments in school and new teaching materials are presented at these events.

Examples of the topics looked at in JuLab

- DNA – On the track of the double helix. In JuLab, we make DNA “visible”, and in doing so, students learn about molecular-biological research.
- We also offer experiments on enzymology and fermentation.
- Information processing and transmission appear in many guises. In JuLab, you can learn about
 - GMR sensors, with which we are now more than familiar having read this book, or about
 - cryptology, in other words how information is encrypted, or about
 - electrophysiological signal lines in nerve cells
- With the aid of a lysimeter facility, you can take a look into the biology, chemistry and physics of soil and use what you learn to understand the environment better.
- Ozone is another important topic.

- Interesting physics from the field of energy technology is presented using three examples:
 - Superconducting floating model railways
 - Fuel cell basics
 - Experiments on electrical engineering
 The most important information on JuLab can be found easily by following the links on Forschungszentrum Jülich’s homepage (www.fz-juelich.de) or by entering our direct address <http://www.fz-juelich.de/projects/julab/>.

You can, of course, also contact JuLab by phone: +49 2461 61 1428.

JuLab was officially opened on 11.11.2005 by the Minister for Schools and Further Training of the state of North Rhine-Westphalia, Barbara Sommer.



Prof. Dr. Christoph Buchal

arbeitet seit 1972 am Forschungszentrum Jülich und lehrt Physik an der Universität zu Köln, unterbrochen durch mehrjährige Forschungsaufenthalte in den USA am Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, und bei den AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey. Er hat vielfältige Arbeiten auf dem Gebiet der Festkörperphysik veröffentlicht, insbesondere über Magnetismus, Physik bei ultratiefen Temperaturen, Supraleitung, Ionenimplantation, Analytik mit Ionen, Optokommunikation, Integrierte Optik sowie Nanoelektronik. Neben den Fachveröffentlichungen verfasst er allgemein verständliche Schriften, insbesondere für Schüler und interessierte Leser:

Faszination Nanowelten (2005)

Energie (2007)

Zur Zeit arbeitet er an einem unterrichtsbegleitenden Arbeitsbuch für Schulen zum Thema Wetter und Klima.



PD Dr. Daniel Bürgler

habilitierte im Jahr 1999 an der Universität Basel (Schweiz) und ist seit 2005 Privatdozent an der Universität zu Köln, wo er Physik lehrt. Er trat 1999 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in das Forschungszentrum Jülich ein und arbeitet seither eng mit Peter Grünberg zusammen, dessen Arbeitsgruppe er seit 2004 leitet. Er forscht auf dem Gebiet der Festkörperphysik und hat zahlreiche Arbeiten veröffentlicht, insbesondere über Rastersondenmethoden, Oberflächenphysik, Magnetismus, Spintronik, Struktur und Wachstum dünner Filme und Vielfachschichten. Sein derzeitiges Interesse gilt der Spintronik und dem Magnetismus auf der Nanometerskala.

