

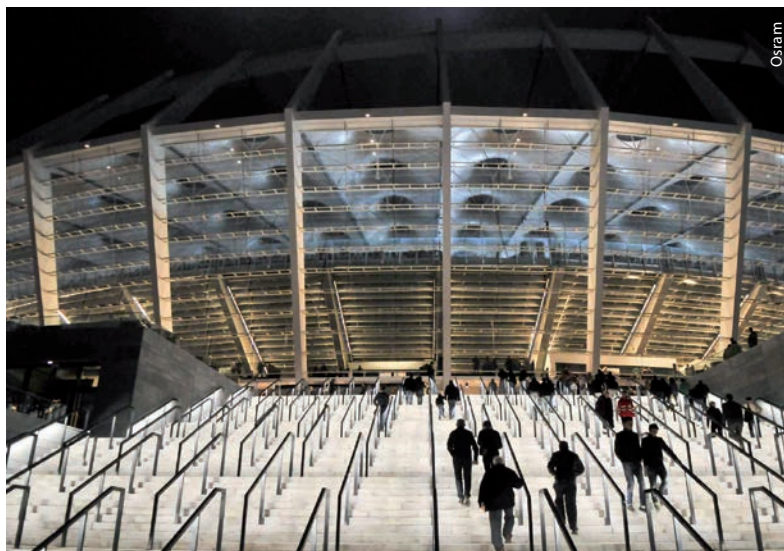
# Ein blaues Wunder

Für die Entwicklung der blauen Leuchtdiode erhalten Isamu Akasaki, Hiroshi Amano und Shuji Nakamura den Physik-Nobelpreis 2014.

Henning Riechert

**B**laue Leuchtdioden waren bis Mitte der Neunzigerjahre exotische Bauelemente. Das einzige dafür verfügbare Festkörper-Material, Siliziumkarbid (SiC), war wegen seiner indirekten Bandlücke eigentlich ungeeignet. Daher blieben die blauen Leuchtdioden (LED) lichtschwach und ineffizient. Immerhin fanden sie sich als Fernlicht-Indikator in jedem Auto, waren anderweitig aber kaum nutzbar. Neue Hoffnung hatte der III-V-Verbindungshalbleiter Galliumnitrid (GaN) versprochen, der schon länger in der Forschung bekannt war. Bereits in den Siebzigerjahren hatte es größere internationale Anstrengungen gegeben, GaN technologisch zu beherrschen. Damals ließen sich viele seiner grundlegenden Eigenschaften bestimmen. Zudem fand man heraus, dass sich GaN wegen seiner direkten Bandlücke sehr gut zur Lichterzeugung eignen sollte. An seiner technischen Beherrschung bissen sich jedoch alle Forscher die Zähne aus – fortan sah alles danach aus, dass GaN nur eine kurze Episode in der Geschichte der Optoelektronik bleiben würde.

Die stürmische Entwicklung dieses Gebietes hatte Anfang der Sechzigerjahre eingesetzt, als es gelungen war, Galliumarsenid (GaAs) und verwandte Halbleiter erfolgreich herzustellen. Technologen und Forscher hatten gelernt, Einkristalle aus GaAs oder Indiumphosphid (InP) zu ziehen, Substrate daraus herzustellen und n- sowie p-dotierte dünne kristalline Schichten von hoher Qualität (epitaktisch) darauf abzuschneiden. Erste Leuchtdioden und Halbleiterlaser entstanden, und rasch entwickelte sich daraus die optische Nachrichtentechnik mit Datenübertragung über Glasfasern. Im Zuge dieser Entwicklung gerieten LEDs etwas aus dem Fokus – Laser und die darin verwendeten



1350 Module mit insgesamt 16 000 Leuchtdioden in den Handläufen leuchten die Stufen des Kiewer Sportstadions hell und sicher aus. Diese Art der kompakten und

Quantenstrukturen waren einfach mehr „sexy“. Dazu kam, dass die verfügbaren Materialien mit direkter Bandlücke nur den Spektralbereich vom nahen Infrarot bis zum Roten abdeckten. Daher war gar nicht daran zu denken, die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau mit effizienten LEDs zu erzeugen – und damit auch weißes Licht.

## Dem Trend zum Trotz

Einen ersten „Lichtblick“ in diese Richtung boten erfolgreiche Arbeiten auf der Basis von Zinkselenid. Dieses Material ließ sich in guter Qualität auf GaAs-Substraten abscheiden. In der ersten Hälfte der Neunzigerjahre entstanden damit grüne LEDs und sogar Laser. Auch große Industriefirmen setzten auf dieses Materialsystem und beteiligten sich aktiv an der Forschung zu Grün emittierenden Lichtquellen.

Weitgehend unbemerkt und unbeirrt durch diesen Trend arbeitete die Gruppe von Isamu Akasaki in Nagoya weiterhin an GaN. Akasaki

effizienter Beleuchtung wurde durch die in diesem Jahr mit dem Nobelpreis ausgezeichneten Arbeiten ermöglicht.

hatte schon in den Siebzigerjahren damit begonnen, war zwischenzeitlich in der Industrieforschung tätig und wurde 1981 als Professor an die Universität von Nagoya berufen. Er ist der einzige, von dem wir wissen, dass er kontinuierlich an GaN gearbeitet hat. Dabei hat er sehr viel Erfahrung in der Epitaxie erworben und schließlich die damals noch ganz neue Technik der metallorganischen Gasphasen-Epitaxie aufgebaut. Er widmete sich zuerst der wichtigsten Herausforderung, kristalline GaN-Schichten von hoher Qualität herzustellen.

Der große und relativ schnell erreichte Erfolg der GaAs-Technologie beruhte zu einem guten Teil darauf, dass dafür Substrate in hoher Qualität für die Epitaxie zur Verfügung standen. Beim GaN war die Lage ganz anders: Es hat einen so hohen Schmelzpunkt, dass es nur mit größtem Aufwand möglich war und ist, GaN-Kristalle aus der Schmelze zu züchten. Akasaki musste also auf Fremdsubstrate zurückgreifen und verwendete dazu das gut verfügbare Aluminiumoxid

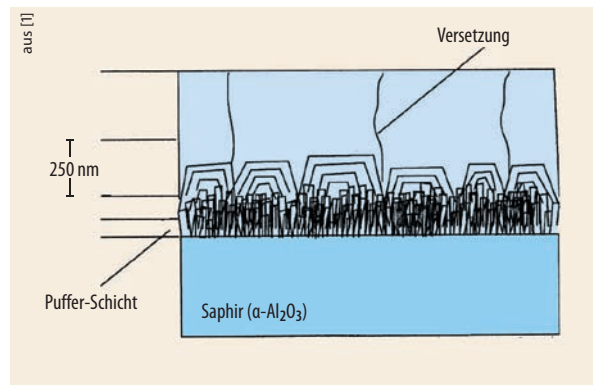
Prof. Dr. Henning Riechert, Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Hausvogteiplatz 5–7, 10117 Berlin

(Saphir). Saphir hat zwar auf seiner Oberfläche dieselbe Kristallsymmetrie wie GaN, die beiden Gitterkonstanten unterscheiden sich aber um rund 16 Prozent. Das Substrat kann daher zwar die Orientierung der aufwachsenden Schicht vorgeben, diese muss aber in der Anfangsphase des Wachstums ihre eigene Gitterkonstante erst finden, was mit einer hohen Dichte von Versetzungen (Kristallbaufehlern) verbunden ist. Ein derartig großer Unterschied der Gitterkonstanten galt daher als quasi unüberwindbares Hindernis. Obendrein wusste man bereits, dass die Versetzungen die Effizienz der Lichterzeugung in einer LED massiv begrenzen würden.

So erhielt Akasakis Gruppe zunächst auch nur raue GaN-Schichten, die zudem aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien Risse zeigten. Doch Akasaki ließ sich nicht entmutigen und arbeitete hartnäckig mit seinem damaligen Studenten Hiroshi Amano weiter, teilweise rund um die Uhr im Labor. Nach fünf Jahren hatten sie Erfolg: Durch ein gezieltes „Vorglühen“ und das Aufwachsen einer dünnen Schicht aus Aluminiumnitrid (AlN) als „Puffer“ auf dem Saphir-Substrat, gelang es, eine geschlossene und glatte GaN-Schicht abzuscheiden

(Abb. rechts). Dies war ein entscheidender erster Schritt auf dem Weg, das Materialsystem beherrschen zu können. Schnell fanden Akasaki und Kollegen heraus, dass ihr neues Wachstumsverfahren nicht nur die Qualität der Oberfläche entscheidend verbesserte, sondern auch die Dichte an Versetzungen und den ungewünschten Einbau von Verunreinigungen stark reduzierte. Ihre Schichten hatten daher eine bislang unerreichte Reinheit und zeigten hervorragende optische Eigenschaften.

Auf der Basis dieser Ergebnisse konnte die Gruppe daran gehen, die Dotierung kontrolliert einzustellen und so gezielt die Leitfähigkeit des Materials zu beeinflussen. Die kontrollierte n-Leitung mit Überschusselektronen gelang recht schnell durch Dotierung mit Silizium. Durch fehlende Elektronen p-leitendes Material herzustellen, bedeutete allerdings erneut große Herausforderungen. Die theoretisch dafür geeigneten Elemente wie Zn oder Mg haben einen so hohen Dampfdruck, dass ihr Einbau in GaN bei den hohen Prozesstemperaturen nur schwer möglich ist. Überdies war nicht klar, welches Element eine elektronische Störstelle dicht an der Valenzbandkante erzeugen würde. Akasakis Gruppe untersuchte den Einbau von sowohl Zn als auch Mg und fand durch op-



Beim Aufwachsen von GaN auf dem Saphir-Substrat ist die Versetzungsdichte zunächst sehr hoch, sinkt aber dank der Pufferschicht rasch ab, sodass nach rund 250 nm eine Schicht hoher Qualität entsteht. Damit wird es möglich, dünne Mehrschicht-Strukturen mit begrenzter Versetzungsdichte wachsen zu lassen.

tische Untersuchungen heraus, dass sich beide prinzipiell eignen sollten. Die entscheidenden elektrischen Messungen zeigten jedoch nicht die erwartete p-Leitung. Hier kam der Arbeitsgruppe ein glücklicher Zufall zu Hilfe: Akasaki und Amano bemerkten, dass ihre Mg-dotierten Schichten nach einer längeren Untersuchung im Elektronenmikroskop plötzlich p-leitend waren. Wenn die Behandlung im Elektronenstrahl auch aufwändig war, so war doch damit die prinzipielle Machbarkeit der p-Leitung nachgewiesen. Nach diesem zweiten wesentlichen Schritt war es nun nicht mehr weit, p-n-Übergänge herzustellen und Leuchtdioden zu bauen. Ihre entscheidenden Ergebnisse stellten Akasaki und Amano 1992 erstmals vor und überraschten damit die Fachwelt. Damit lösten sie einen Boom an Arbeiten über GaN und verwandte Materialien aus.

## Vorsprung durch Vertrauen

Während dieser Jahre arbeitete in der kleinen Chemiefirma Nichia Chemical Corporation ein junger Elektroingenieur namens Shuji Nakamura daran, seiner Firma den Einstieg in den Markt der Halbleiter-Bauelemente zu ermöglichen. Nach einigen Jahren der Entwicklung von GaAs-Substraten sahen er und sein Firmenchef ein, dass sie gegen die Konkurrenz der etablierten großen Firmen nicht bestehen konnten. Sie gingen daher

picture alliance / Kyodo



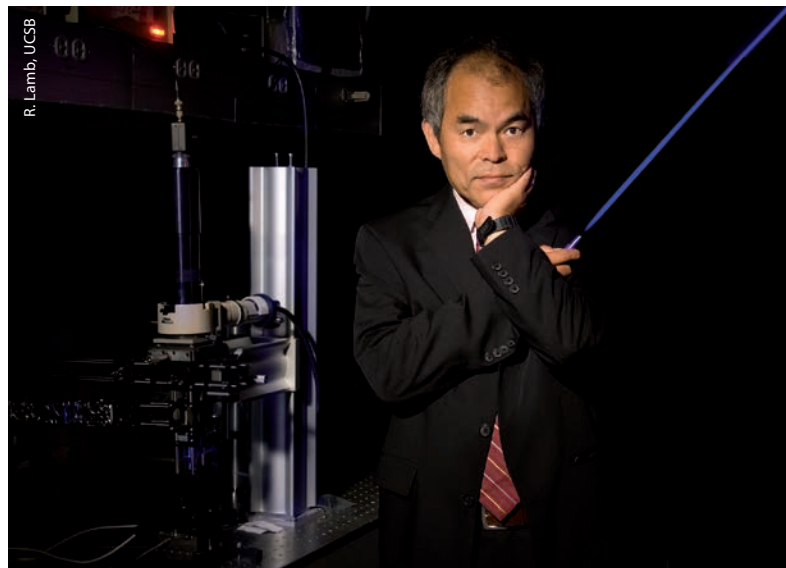
Isamu Akasaki (85, links) und Hiroshi Amano (54) präsentieren sich stolz nach

der Bekanntgabe des Nobelpreises.

das Wagnis ein, auf einem ganz anderen Sektor zu arbeiten. Die Firma stellte 1,5 Prozent des jährlichen Umsatzes zur Verfügung, und Nakamura begann mit der Entwicklung von GaN-Bauelementen. Nach den gängigen Maßstäben war dies ein enormes Risiko. Welche Förderagentur würde ein solches Projekt unterstützen, vor allem im Hinblick auf die weiteren Voraussetzungen? Denn Nakamura hatte nur einen Masterabschluss, wenig Erfahrung mit Epitaxie und noch nie eine Publikation oder einen Konferenzbericht veröffentlicht. Er schilderte später, dass die Erfolgsfaktoren wesentlich darin bestanden, dass er in direkter Absprache mit dem Firmenchef ohne umständliche Entscheidungswege agieren konnte und dass er hierbei alle Handlungsfreiheit und komplettes Vertrauen genoss.

Dank Nakamuras geschickten Vorgehens gingen die Hoffnungen von Nichia in vollem Umfang auf. Die Epitaxietechnik von Akasaki konnte er nicht nur übernehmen, sondern auch verbessern. Er entwickelte schließlich ähnliche, aber patentrechtlich gesehen eigenständige Verfahren zum Wachstum von GaN auf Saphir. Hierüber schrieb er die ersten Publikationen seiner Laufbahn. Kurz darauf erkannte er die Ursache der Aktivierung der p-Leitfähigkeit von Mg-dotierten GaN-Schichten und beantwortete damit eine lange bestehende wissenschaftliche Frage. Er zeigte, dass die Bestrahlung mit Elektronen in Akasakis Experimenten im Wesentlichen das Material lokal erwärmt und damit den während des Epitaxieprozesses eingebauten Wasserstoff thermisch aus dem Material austreibt. Konsequenterweise entwickelte er ein entsprechendes thermisches Verfahren, das sich direkt nach Abschluss der Epitaxie auf einfache Weise einsetzen lässt und es erlaubt, die p-Leitfähigkeit technisch leicht zu realisieren.

Die singulären Erfolge von Akasaki, Amano und Nakamura veränderten die Welt der Halbleiter grundlegend: Sie hatten zum einen Verfahren erfunden, mit denen sich Halbleiterschichten in hoher



Shuji Nakamura (60) konnte seine erfinderische Kreativität dank des großen Vertrauens seines Arbeitgebers voll ent-

folden. Er überraschte die Fachwelt mit immer neuen Bestleistungen.

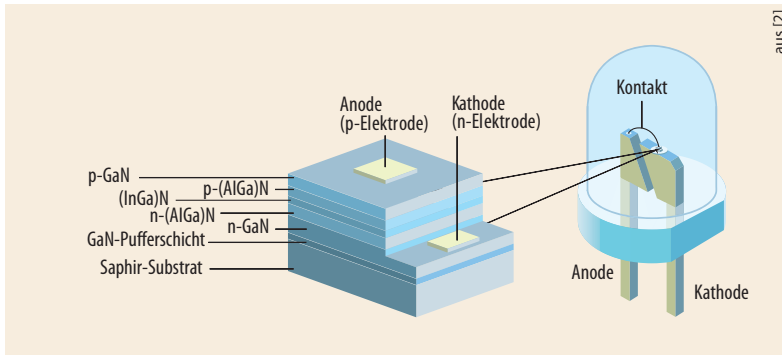
Qualität auch ohne ideal gitterangepasste Substrate herstellen lassen. Für die Epitaxie stellte dies einen grundlegenden Paradigmenwechsel dar, der einen wahren Boom an Forschungsarbeiten zur Folge hatte. Zum anderen stand mit der Beherrschung von n- und p-Leitfähigkeit der Weg für optoelektronische Bauelemente offen, wobei GaN und seine Legierungen mit AlN und Indiumnitrid (InN) nicht nur den gesamten Bereich sichtbaren Lichts überspannen, sondern prinzipiell den Spektralbereich vom nahen Infraroten bis zum Ultravioletten abdecken können. Damit wurden die Gruppe-III-Nitride zum derzeit wichtigsten Materialsystem der Halbleiterwelt neben Silizium.

### Der Weg zur Anwendung

Die kommerzielle Nutzung dieser Materialien nahm in geradezu atemberaubender Geschwindigkeit ihren Lauf. Dabei stand über viele Jahre Nakamura mit seiner mittlerweile aufgebauten Arbeitsgruppe bei Nichia im Mittelpunkt. In schneller Folge stellte er immer wieder verbesserte Leuchtdioden vor: beständig höhere Wirkungsgrade, Emissionswellenlängen vom Violett über Blau bis zu Grün und schließlich sogar Gelb und Rot. Bereits 1996 konnte er den ersten Halbleiterlaser mit diesem

Material präsentieren. Nakamuras Vorsprung schien uneinholbar, und er wurde quasi zu jeder bedeutenden Konferenz eingeladen. Mit den anderen Konferenzteilnehmern wartete auch ich jedesmal mit Spannung darauf, welche neuen Bestleistungen er vorstellen würde. Allen war klar, dass hier ein genialer Entwickler seinen Lauf hatte. Offensichtlich war er in der Lage, jedes technologische Hindernis zu überwinden oder zu umgehen, und das bei bestenfalls rudimentärem wissenschaftlichen Verständnis.

So war lange Zeit unklar, warum die hohe Dichte von Versetzungen die Lichtemission nicht verhin-derte – ein aus der Sicht von GaAs geradezu unerhörter Befund, denn GaN-LEDs arbeiten bei Versetzungsdichten, die um den Faktor 10 000 höher sind als die, welche in GaAs auch nur annähernd zulässig ist. Nakamura war es auch, der zuerst dünne Schichten von (InGa)N wachsen konnte, mit denen sich die Ladungsträger quasi „einsperren“ ließen, was die Effizienz der Lichterzeugung wesentlich steigert (Abb. 5. 31). So war es bereits Anfang der Neunzigerjahre möglich, blaue und grüne LEDs zu verwirklichen, die einen Wirkungsgrad der Lichterzeugung von einigen Prozent hatten. Gegenüber gefiltertem Licht von Glühlampen ermöglichten diese LEDs bereits eine Energieeinsparung überall dort, wo einfarbiges



Eine heutige blaue LED besteht aus mehreren p- und n-dotierten Schichten

aus GaN, (AlGa)N und (InGa)N, die auf ein Saphir-Substrat aufgewachsen sind.

Licht gefordert war. Obendrein haben sie eine Lebensdauer von mehreren 10 000 Stunden, also ein Vielfaches der Lebensdauer von Glühlampen.

Mit der schnell einsetzenden Verwendung in Verkehrsampeln und großen Displays eröffneten GaN-LEDs einen neuen Markt, auf dem Nichia bis heute einer der Weltmarktführer ist. Shuji Nakamura jedoch, der zu diesem Erfolg so entscheidend beigetragen hatte, wurde zunehmend unzufrieden damit, wie wenig in Japan solche Leistungen finanziell honoriert wurden. Er äußerte öffentlich, dass Entwickler oder Erfinder für herausragende Produktentwicklungen ähnlich hoch bezahlt werden müssten wie prominente Baseball-Spieler. Er hatte für Nichia immerhin weit über 100 Patente gesichert und forderte daher – zunächst erfolglos – einen angemessenen Anteil am kommerziellen Erfolg der GaN-LEDs ein. Beide Schritte waren in Japan einzigartig. Schließlich beschloss er, ein Exempel zu statuieren: Er rief seine japanischen Kollegen auf, ebenfalls ihre Erfolgsanteile einzufordern, und verließ ohne Ankündigung Nichia und Japan. Seit 1999 hat er eine Professur an der UC in Santa Barbara inne, wo er weiterhin an GaN arbeitet. Nach langen Rechtsstreitigkeiten wurden ihm schließlich vor einigen Jahren mehrere Millionen Dollar als Anteil für die Nutzung der Patente zugesprochen, mit denen er Nichias Marktposition gesichert hatte – die höchste jemals in Japan gezahlte Lizenzprämie. Seine Beharrlichkeit hat damit nicht nur technisch einen Durchbruch erreicht, sondern

auch die japanische Industriekultur exemplarisch verändert.

### Mit Blau zum Weiß

Der wesentliche Schritt zur breiten Anwendung von GaN-LEDs in der Beleuchtungstechnik bestand darin, blau emittierenden LED-Chips in ihrem Gehäuse einen Leuchtstoff beizugeben, der einen Teil des blauen Lichtes absorbiert und als gelbes Licht wieder reemittiert. Die Mischung der beiden komplementären Farben empfindet das menschliche Auge als weiß. Die ersten Weißlicht-LEDs gaben zwar „kaltes“ bläuliches Licht ab, aber inzwischen gelang es, diese Technik so weit zu verbessern, dass sie sich heute für anspruchsvollste Beleuchtungsaufgaben eignet. Parallel dazu wurden neue Chiptechniken entwickelt, die eine hocheffiziente Auskopplung des Lichts aus dem Halbleiterchip ermöglichen. Damit erreichen GaN-LEDs heute Wirkungsgrade von bis zu 75 Prozent im Labor und sicherlich bald auch in kommerziellen Bauelementen. Die Industrie arbeitet weltweit mit größten Anstrengungen daran, die Kosten dieser Beleuchtungsquellen zu reduzieren. Allgemein wird davon ausgegangen, dass auf diese Weise Halbleiter-Bauelemente bis zum Ende unseres Jahrzehnts den Markt der Weißlichtquellen dominieren werden, wodurch nach Schätzungen 10 bis 15 Prozent des weltweiten Energieverbrauchs einzusparen wären – das würde allein in den USA rund 50 Kernkraftwerke überflüssig machen.

Die Spanne der Anwendungen reicht aber viel weiter: GaN-LEDs finden sich heute auch in der Hinterleuchtung von vielen Handy- und TV-Bildschirmen. Laser auf der Basis von GaN mit Emission bei ca. 410 nm ermöglichen eine stark erhöhte Informationsdichte in optischen Speichermedien und sind das Herzstück der Blu-ray-Technologie. Mittlerweile erobert die GaN-Technologie auch andere Gebiete wie die Leistungselektronik für das elektronische Schalten hoher Spannungen bei geringster Verlustleistung. Die enorme praktische Bedeutung der blauen LEDs hat sicher dazu geführt, dass der Physik-Nobelpreis in diesem Jahr erstmals für eine stark materialwissenschaftlich-technologische Leistung vergeben wurde. „Alfred Nobel hätte seine Freude daran gehabt“, betonte ein Mitglied des Nobelpreiskomitees, wollte der Preisstifter doch Entdeckungen honorieren, die ganz besonders zum Wohle der Menschheit beigetragen haben.

#### Weiterführende Literatur

- [1] S. Nakamura und G. Fasol, *The Blue Laser Diode*, Springer, Heidelberg (1997)
- [2] The Nobel Prize in Physics 2014, Advanced Information – Scientific Background: Efficient Blue Light, Nobel Media AB 2014, [www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2014/advanced.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/advanced.html)

#### DER AUTOR

**Henning Riechert** (FV Halbleiterphysik) ist seit Ende 2007 Direktor des Paul-Drude-Instituts für Festkörperelektronik in Berlin und Professor für Experimentalphysik und Materialwissenschaften an der Humboldt-Universität. Nach dem Physikstudium in Bonn arbeitete er am Forschungszentrum Jülich und an der Ecole Polytechnique in Palaiseau und promovierte im Jahr 1986 an der Universität zu Köln. Anschließend ging er in die Industrieforschung zu Siemens und Infineon. 1996 realisierte er die erste InGaN-LED in Europa. 2005 wechselte er zu Qimonda, wo er „Senior Principal Scientist for Materials“ war, bevor er nach Berlin ging.

