

Andreas Junk

Instrumententwicklung
in der Nanotechnologie
am Beispiel des transmittierenden
Röntgenmikroskops der Universi-
tätssternwarte Göttingen

Berlin 2026



BIBLIOGRAFISCHE INFORMATION DER DEUTSCHEN BIBLIOTHEK

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Der Verlag und der Autor gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch der Autor übernehmen Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

In diesem Buch wird das generische Maskulinum verwendet. Keinesfalls sind damit Diskriminierungen beabsichtigt.

UMSCHLAGABBILDUNGEN

Cover: Abb. 4.27, S. 88; Backcover: Abb. 5.13, S. 123.

VERLAG

GNT Publishing GmbH, Lasiuszeile 2, 13585 Berlin, Germany

►<gnt-verlag.de>

UNVERÄNDERTE AUSGABE DER PRINTAUSGABE

© 2026 GNT Publishing GmbH, Berlin, Germany

ISBN 978-3-86225-592-4 (E-Book/PDF, Version 2/260420)

ISBN 978-3-86225-103-2 (Printausgabe)

►<doi.org/10.47261/1592>

Alle Rechte vorbehalten. ALL RIGHTS RESERVED.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Bedingungen des Scheiterns bei der Etablierung des Röntgenmikroskops in der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Das transmittierende Röntgenmikroskop (TXM) wurde ab 1967 von Günter Schmahl und Dietbert Rudolph zunächst als Feierabendprojekt konzipiert und bis zum Jahr 1974 unter Einsatz einer neuartig gefertigten Optik in einen Prototypen entwickelt.

Das TXM ist ein Beispiel für die gescheiterte Entwicklung eines modernen Instruments, in dem sich aber zeitgleich viele traditionelle Gründe eines Scheiterns widerspiegeln. Exemplarisch sei hier die mangelnde Kommunikation zwischen den aus der Astronomie stammenden Physikern als Entwicklern und der designierten Zielgruppe, den Biologen, genannt. Als Ausnahme stehen die Jahre 1973 – 1976 sowie die Mitte und das Ende der neunziger Jahre in Göttingen und 1996 – 1999 in Berkeley da. Im ersten Zeitraum wurde durch die bewusste Neueinbindung einer Ingenieurin in das Projektlabor, das immer noch Freizeitcharakter hatte, in ein professionelles Arbeitslabor umgewandelt. Darüber hinaus tat es dem Institut für Röntgenphysik offensichtlich gut, dass mit Gerd Schneider ein neuer Außenseiter mit frischen Ideen der Arbeitsgemeinschaft beitrug. Kurz vor der Jahrtausendwende kam der *Nutzen* des Instruments durch die gute Kommunikation mit der designierten *Nutzergruppe* sehr gut zum Vorschein, als die Aufnahme des Zerfalls roter Blutkörperchen nach einer Malaria-Infektion dokumentiert wurde. Doch der strategische Erfolg dieser Aufnahmen, der es dem TXM durchaus erlaubt hätte, ein Stück aus seiner funktionellen Nische heraus zu treten, wurde durch eine Kombination von Unglücksfällen und Desinteresse zunichte gemacht. Die neueren Ansätze zur Abbildung der menschlichen DNA respektive der Abfolge von Gen-Sequenzen erscheinen einem überzogenen und sehr plakativen Anspruch geschuldet zu sein. Die Erweiterung des Spektrums der analysierbaren Proben um *die* Ikone aller modernen Targets ist eher ein Versuch, den vermeintlich noch nicht ausreichend guten Ruf des TXM kräftig aufzupolieren.

Ein immer wiederkehrendes Motiv, das eng mit dem Begriff des *Nutzens* und somit auch der *Wahrnehmung* innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft geknüpft ist, ist das der Akzeptanz des Instrumentes und der entwickelnden Wissenschaftler (im Fleckschen Sinne) durch andere wissenschaftliche Fachgemeinschaften. Zu Beginn der Entwicklung, als Schmahl und Rudolph noch Zonenplatten für ein Röntgenteleskop entwickelten, war ihnen Freiraum innerhalb der Gemeinschaft der Physiker an der Sternwarte Göttingen gegeben, denn sie arbeiteten für ein astronomisches Thema mit experimentalphysikalischen Methoden. Bereits mit der Erstetablierung des Prototypen kamen nach Angaben meiner Interviewpartner Widerstände auf, die sich sowohl auf die vermeintlich industrielle Fertigung wie auch auf das Verlassen des astronomischen Forschungsfeldes gründeten. Es hatten sich sowohl die Arbeitsweise (von der Forschung zur Fertigung) als auch das Forschungsfeld (Mikroskopie statt Astronomie) geändert und somit befand sich die „optisch-holografische Arbeitsgruppe“ außerhalb der forschenden Gemeinschaft der Sternwarte.

Viele Durchbrüche für das und am Instrument wurden durch Zuarbeitende anderer Forschungsrichtungen initiiert: eine Ingenieurin stabilisierte das Feierabendlabor bis hin zu einem Status, der gezielte Optikfertigung möglich machte. Ein Rückkehrer aus der Industrie brachte das Know-How zur Implementierung der CCD-Technologie mit und ein Chemiker machte sich

um die Adaption von Umgebungstechnologien aus anderen Instrumenten für das TXM und ein grundlegendes Verständnis der *Wechselwirkung* zwischen Strahlung und Probe verdient.

Schließlich muss aber festgestellt werden, dass die Anerkennung und Wahrnehmung aus den *Nutzergemeinschaften*, für die das TXM ursprünglich einmal designat worden war, vollständig ausgeblieben ist. Dies zeigte sich nach der Einführung des Prototypen in der Abkehr der Biologen vom TXM und der Rückkehr zu bewährten Beobachtungsmethoden, als die Hoffnung auf schnell zu machende, hochpräzise Aufnahmen lebendiger Proben zerschlagen wurde. Im Laufe der Entwicklung wurde den Bedürfnissen der Lebenswissenschaften ebenfalls nicht Rechnung getragen und die notwendige Forschung zu physikalischen Fragestellungen dominierte die Forschung. Nachdem der hohe Wechselwirkungsgrad der Strahlung mit den Proben durch Gerd Schneider dokumentiert worden war wurde zeitnah in Berkeley auch die Bildserie der Malaria-infizierten Blutzellen gemacht. Doch ein Propagieren der Messmethode fand auch jetzt noch nicht statt, da die an der Messung beteiligten Biologen den Nutzen für ihre eigene Fachgemeinschaft nicht erkannten oder nicht propagierten. Somit blieb der Bekanntheitsgrad des TXM auf seine eigene (kleine) Forschergemeinschaft beschränkt.

Im ersten Kapitel wurde die Einbettung der Studie in die aktuell stattfindende wissenschaftliche Diskussion von gescheiterten und vermeintlich gescheiterten Forschungsansätzen gestellt. Hierbei wurde die interdisziplinäre Arbeitsweise des Instruments hervorgehoben und die sich hieraus ergebende Notwendigkeit, eine gute Kommunikation zwischen den einzelnen Fachgebieten zu etablieren. Dies ist in der Entwicklungsgeschichte des Instruments nur selten geschehen, die Physiker waren während der Entwicklungszeit zumeist „unter sich“.

Die Verortung im Bereich der Instrumentgeschichte anstelle der klassischen Wissenschaftsgeschichte ist Gegenstand des zweiten Kapitels. Da sich in dem von mir gewählten Interaktionsmodell von Instrument, Experiment und Theorie die beiden letzteren Domänen in einem relativen Ruhezustand befanden und auf der Instrument- und Anwendungsebene nach dem und auch durch den zweiten Weltkrieg substantielle Veränderungen geschahen, konnte die klassische Wissenschaftsgeschichte als Modell hier nicht greifen. Das gewählte instrumentengeschichtliche Modell von Hacking wurde in Kapitel 4 genutzt, um die Entwicklungsschritte aufzuzeigen, die sehr klassisch für die Entwicklung von Instrumenten auch in den Perioden vor der neuesten Geschichte liegen. Da sich die Entwicklung des Röntgenmikroskops im wesentlichen in drei klar voneinander zu trennenden Phasen abgespielt hat, wurde das Modell von Hacking verändert, um der Bedeutung der ersten Phase im Hinblick auf das Gesamtkonzept des TXM gerecht zu werden. Als Zugang zum ansonsten historisch-genetischen Modell wurde eine Serie von Zeitzeugen-Interviews gewählt, von denen je zwei ein historisches Gerüst liefern bzw. dieses Gerüst mit ergänzenden Informationen unterfüttern sollten. Die Einbettung der sogenannten Oral History als Zugang zur neuesten Geschichte wurde ebenso dargelegt, wie auch ein Leitfaden zur Erstellung der Interviews vorgestellt. Der Ansatz der Oral History, der tendenziell die Geschichte von Leuten erzählen soll, die traditionell *nicht* im Rampenlicht stehen, wurde im Rahmen dieser Arbeit erstmalig angewendet, um die Arbeit von Naturwissenschaftlern an der Basis der Forschung aufzuarbeiten.

In Kapitel 3 werden die hilfreichen Umstände dargelegt, die es Schmahl und Rudolph in der Gründerzeit ihres Freizeitprojektes erlaubten, über einen vergleichsweise ausgedehnten Zeitraum abseits der „ausgetretenen Pfade“ astronomischer Forschung zu wandeln. Mit einer etwas anderen Betonung wäre hier auch eine separierbare Geschichte der „helping hands“ oder „invisible hands“ zu erzählen gewesen, doch die einzige helfende Hand im Sinne des von Stephen Shapin eröffneten Interessenschwerpunktes,^[Shapin1989] die sich noch in diesem Kapitel als Akteur wiederfindet, ist die Ingenieurin der Abteilung, Ortrud Christ. Tatsächlich gab es viele Kontakte, die Schmahl und Rudolph zum Erfolg im Sinne des Baus des Prototypen verholfen

haben, aber ihr Beitrag konnte dem Instrument kaum zum Durchbruch verhelfen. Das Kapitel beschäftigt sich daher nach einer biographisch geprägten Einführung der Protagonisten mit der Entwicklung des neuartigen Zugangs zur Erstellung von Beugungsoptiken, bevor es um die geschickte Einbindung dieser Optiken in ein Raumfahrtprojekt ging. Hierin ist eine klassische Entwicklungsstufe für Mikroskopoptiken zu sehen, denn bereits in der Renaissance wurden Optiken in Teleskopen getestet.[Turner2000] Der Anspruch an eine Perfektion der Optiken ist im Teleskop nicht so hoch, wie sie es im Mikroskop ist, was sich aus den benötigten Brennweiten erklärt, die bei Brechungsoptiken eine extreme Krümmung und bei Beugungsoptiken eine sehr feine Strukturierung voraussetzen. Als wichtige Zeit nach dem Test des Prototypen beleuchtet dieses Kapitel anschließend die Jahre, die die AG Schmahl zur Forschung am ACO in Paris verbrachte. Die hierfür nötige Finanzierung durch die Stiftung Volkswagenwerk machte die AG Schmahl sehr atark innerhalb der Sternwarte, was die ohnehin vorhandenen Spannungen im Personalgefüge sicherlich noch verstärkte. Doch dies bleibt ebenso wie die Motivation der Stiftung das Projekt zu fördern einstweilen im Dunkeln. Vermutlich ist die Unruhe an der Sternwarte nie objektiv aufzuarbeiten, denn das Projekt hatte mit Günter Schmahl an der Spitze die Einrichtung sicher polarisiert und daher würde ich von einer Untersuchung der Personalgeschichte ein sehr emotionales Bild erwarten, das wenig zur Klärung beitragen würde. Die Finanzierungsgeschichte wurde durch Verwaltungsmechanismen während meiner Arbeit so stark behindert, dass ich die von Günter Schmahl präsentierten Ziele nicht mit den verfolgten Zielen in den Folgejahren abgleichen konnte und auch nicht eruieren kann, wie die Stiftung die Förderung, die in drei Stufen dem Projekt weiter half, letztlich bewertet hat.

In den etwa drei Jahren am ACO traten die ersten „Kinderkrankheiten“ am Instrument auf, die eventuell bei einer interdisziplinären Recherche und Beratung vorzeitig hätten umgangen werden können. Rückblickend betrachtet hätte die Entwicklung hier bereits ein vorläufiges Ende finden müssen, denn nach den Jahren in Paris begannen die Röntgenmikroskopiker offenbar, ihr Kernziel, ein Mikroskop für die Zellbiologie zu bauen, aus den Augen zu verlieren. Auch wenn die nachfolgenden Jahre der Entwicklung unbedingt notwendig für den Nachweis der Funktionalität waren, war nach dem Umzug des TXM an das BESSY I in Berlin eine lang andauernde Phase der Grundlagenforschung angesagt, in der das Interesse von designierten Nutzern außerhalb der Physik verloren gehen musste. Abgesehen von der immer weiter getriebenen Perfektionierung der Optiken trat ab hier klar zutage, dass das TXM seine Bilder durchaus nicht „einfach“ machen kann und dass der Anspruch an unterstützende Umgebungstechnologien wie Cryogen-Kühlung, die im Prinzip in anderen Forschungsbereichen als Notwendigkeit erkannt worden war, sehr hoch war. Entsprechende Argumente finden sich auch im Kapitel 4 wieder, wenn über die Beseitigung der auftretenden Anomalien diskutiert wird. Vielleicht war nach den Jahren am ACO und dem Ausbleiben des schnellen Erfolges auch der Standort Göttingen nicht mehr geeignet, um die Erforschung „off-beat“ am Leben erhalten zu können. Auch die Gründung des Instituts für Röntgenphysik konnte nicht mehr bedeuten, dass diese Göttinger Technologie in Göttingen weiter willkommen sein würde.

Teile der vorhergehenden Kapitel finden sich im erkenntnistheoretischen Modell von Hacking[Hacking1988] wieder, das die dem Instrument zugrunde liegenden Theorieansätze mit den ersten praktischen Erfahrungen und den an das Instrument formulierten Ansprüchen in Verbindung bringt. Hervorstechendes Zwischenergebnis dieses Kapitels ist die Einfachheit der instrumentellen Konzeption, die sich praktisch vollständig an Mikroskope für den Bereich sichtbaren Lichts anpassen konnten und auch in der Form ihrer Darstellung einfache Anlehnung an die Darstellung des optischen Mikroskops gehabt hätten. Während die Lichtschwäche der Beugungsoptiken von den Göttinger Astronomen bereits erahnt worden war, stellten die Anforderungen an die zu wählende Quelle und die völlig unterschätzte Interaktion der Röntgenstrahlung

mit den wässrigen Proben die größten Hindernisse dar. Erst die Ergänzung des Teams um einen Chemiker, der dem Thema der Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materie erhöhte Aufmerksamkeit widmete, ebnete den Weg zum Einsatz der Cryogen-Technologie. Es bedurfte also eines fachlichen Außenseiters, der im Denkstil der Physiker nicht gefangen war, um hier einen Sprung vorwärts zu machen. Die Adaptionsgeschichte, die mit der Eliminierung der Anomalien einhergeht, ist ebenfalls ungewöhnlich, denn es wurde nicht nur Umgebungstechnologie eines Vorbildes implementiert, sondern aus mehreren Bereichen „alles Nützliche“ herangezogen, was den Absorptionsquerschnitt der Probe verringerte oder die Zahl der Photonen, die auf die Probe gelangten erhöhte. Die mangelnde Photonendichte der Laborquellen ist seit der Prototypenentwicklung als ungelöstes Problem verblieben. Da es nur sehr wenige physikalische Konzepte zu geben scheint, wie eine Laborquelle für Röntgenstrahlung zu bauen ist, und jeder der in dieser Arbeit vorgestellten Quelltypen für das TXM ungeeignet erscheint, kann dieses Problem von wissenschaftshistorischer Seite zur Zeit nicht aufgearbeitet werden. Die nicht vorhandene Laborquelle für das TXM bleibt zum jetzigen Zeitpunkt als einer der wesentlichen Gründe stehen, warum das TXM den Weg in eine breitere wissenschaftliche Öffentlichkeit nicht bewältigen konnte.

Ein weiterer sehr gewichtiger Grund steht als Ergebnis von Kapitel 5 zu Buche, die geringe Effektivität der vom TXM generierten Bilder, für das Instrument ein Werbefaktor zu sein. Es besteht kein Zweifel daran, dass die Abbildungen von Blut- oder Pflanzenzellen spektakulär sind. Sie sind aber in ihrem Charakter nicht einzigartig genug, um beim Betrachter als *autopoietische* Bilder eine gedankliche Verbindung zwischen dem charakteristischen Bild und dem Instrument zu generieren. Die Analogien, die sich von Bildtyp zu Bildtyp in verschiedenen Bereichen von Naturwissenschaft und Medizin finden lassen, sind zwar typisch für die Nanotechnologie, die mit ihrer Bilddarstellung auf genau solche Analogien setzt. Doch genau hier geht auch der einzigartige Charakter der Bilder verloren, die nun intuitiv vom Betrachter interpretiert werden, *ohne* dass im Bild gleichzeitig das TXM repräsentiert wird. Das Rastertunnelmikroskop bzw. Rastertunnelmikroskop haben in der IBM-Ikone von Don Eigler und Erhard Schweizer[Eigler1989] ein solches Bild hervorgebracht. Hier schließt einer der letzten Schwachpunkte an, warum das TXM als Nischeninstrument seine Fähigkeiten unter Beweis stellen muss. Die Bilder an sich dürften durchaus weniger spektakulär sein und könnten trotzdem eine hohe Wirkung erzielen, wenn unter ihnen implizit eine wichtige wissenschaftlich fundierte Antwort auf eine aktuelle Frage verborgen wäre. Im Falle von Eigers IBM-Ikone ist zum Beispiel klar zu sehen, dass die Xenon-Atome in sehr diskreten Abständen auf der Oberfläche ruhen und ein freies Schreiben mit Atomen eben *nicht* möglich war. Diesen Beweis konnten die IBM-Forscher somit implizit antreten, obwohl die atomare Oberfläche, auf der die Xenon-Atome ruhten, in der gewählten Bilddarstellung vermeintlich „glatt“ war.

Die aktuelle Frage, die das TXM in der Folge dieser Diskussion zu beantworten versucht, ist die Entschlüsselung der menschlichen DNA auf der Ebene der Gen-Sequenzen.¹ Hierfür wurde ein kombinierter röntgen- und fluoreszenz-mikroskopischer Ansatz generiert, eine Technik, die sich konzeptionell auch schon in anderen Feldern der Wissenschaften durchgesetzt hat.² Auch eine Bildform wurde bereits vorgestellt, mit der das Ergebnis einen charakteristischen Output bekommen würde. Doch es erscheint, als ob noch ein weiter Weg bis zu den geplanten Aufnahmen zu gehen wäre, denn nicht jeder Zellkern verfügt zu beliebigen Zeitpunkten über die verdichtete X-Form des Genoms. Darüber hinaus könnte auch die Notwendigkeit, ausgerechnet

¹Im Sinne der Genomanalyse wäre dies als eine Meso-Ebene zu betrachten, wobei das Genom die Makro-Ebene und die Basenpaaranalyse die Mikro-Ebene charakterisieren würden.

²Die Markierung zu analysierender Genssequenzen mit fluoreszierenden Markern ist eine weit verbreitete Methode in der sogenannten Immunhistochemie.

das TXM für diese Arbeit einzusetzen in Frage stehen, denn die Biologie arbeitet ebenfalls seit langer Zeit mit quantitativen Methoden an der Aufschlüsselung des menschlichen Genoms und hat hier einen nicht zu negierenden Vorsprung.

Der Vorsprung der Biologie gegenüber der neuen physikalischen Methode war unter Umständen einer der Haupthinderungsgründe für die Biologen, sich nicht auf die Methode TXM einzulassen. Über die Entwicklungsdauer von 1974 an wurden die kurzfristigen Ziele für den neuartigen Mikroskoptyp immer wieder neu gefasst, zumeist jedoch aus Sicht der *physikalischen* Bedürfnisse heraus, nicht aber aus Sicht der designierten *Nutzergemeinschaften*.

Somit verbleibt die Frage, ob die Göttinger Arbeitsgruppe tatsächlich als Erfinder des Instruments gelten kann. Wie bei anderen Instrumenten auch, und wie in dieser Arbeit mehrfach betont, gab es keinen plötzlichen Umschwung in Theorie oder Experiment, der einen exakt festzumachenden Zeitpunkt oder –raum für die Erfindung definierbar erscheinen lässt. Unbestritten hingegen muss die Tatsache bleiben, dass es Schmahl als erstem gelang, ein System zu entwickeln, mit dem außerordentlich fein strukturierte Optiken gefertigt werden konnten. Die holografische Fertigung von Zonenplatten wurde erst im Laufe der achtziger Jahre durch die parallel weiter entwickelte Elektronenstrahl-Lithografietechnik abgelöst.

Angesichts der Tatsache, dass der charakteristische Strahlengang des Mikroskops per se erhalten blieb, die Zonenplatte als abbildende Optik in einem Teleskop und einer Lochkamera bereits eingeführt und das erste Konzept eines Röntgenmikroskops von Wolter für Arbeiten im Wasserfenster bereits veröffentlicht war, neige ich aber dazu, Schmahl und/der seine Mitarbeiter nicht als eigentliche Entdecker oder Erfinder des Röntgenmikroskops zu bezeichnen. Eine Unterteilung in ein „ante TXM“ und „post TXM“ erscheint mir, wie bei vielen anderen Erfindungen und Entdeckungen weder möglich noch angebracht, zumal sich die Dokumentierung der einfließenden instrumentellen Vorläufer und Theorien auf den Zeitraum von 1898 – 1971 erstreckt.

7 Summary

In my thesis, I presented the conditions under which the Transmission X-ray Microscope (TXM) was inaugurated in the scientific community and the reasons for the failure of the efforts to promote the instrument. The concept of the TXM based on Fresnel zone plates was developed as from 1967 by Günter Schmahl and Dietbert Rudolph and brought to life in 1974 by the presentation of the instrument's prototype, which used the newly developed holographic zone plate lenses.

The TXM is an example of failure in developing a modern instrument, showing nonetheless many traditional reasons for a failure, for instance the lack of communication between the physicists, who developed the instrument, and the biologists, for whom the instrument was developed. An exception to this lack of communication could be seen during the periods 1973 – 1976 at the „Universitätssternwarte Göttingen“ and the mid-nineties at the „Institut für Röntgenphysik“ (IRP) Göttingen and also from 1996 – 1999 at the Advanced Light Source (ALS) in Berkeley. In the earliest period named above, the leisure-time laboratory in which holographic zone plates were manufactured was turned into a professional laboratory environment by hiring an experienced laboratory engineer. Furthermore, the IRP stood to benefit remarkably from the input of an outsider such as the chemist Gerd Schneider, who joined the IRP in the early nineties and who provided plenty of off-beat ideas to improve the instrument. The developments made in Berkeley from 1996 to 1999 clearly proved the usefulness of the TXM when collaborating with the instrument's designated user groups at a time when an image series of the deteriorating red cells, which were infected with malaria parasites, was made. But the envisaged strategic success of these images, which would have allowed the TXM to step out of its functional niche, was annihilated by a combination of misfortunes and ignorance. The most recently developed concepts of imaging human DNA and the sequences of genes therein seem to have been due to hyperbolic self-expectations. The enlargement of the spectrum of samples which could be analysed in the instrument with the icon of modern targets was more of an attempt at enhancing the reputation of the instrument than an actual approach to obtaining scientific results.

A constantly recurring motive, which is closely linked to the terms of use and hence to reception, is the one of acceptance of the instrument and its developers by other scientific communities. When Schmahl and Rudolph initiated the development of zone plates, they did so for an X-ray telescope. This gave them room to operate at the University Observatory at Göttingen, because they were working with experimental methods towards an aim in the field of solar astronomy. But, according to my interview partners, when the prototype of the microscope was presented, the resistance among scientists at the observatory strengthened. Their claim was that Schmahl and Rudolph had entered the field of „production“, which was more an industrial matter than one appertaining to a university. More importantly, Schmahl and his co-workers had obviously left the research field of astronomy. The character of their work had changed (from science to production), as had their focus of interest (microscopy development instead of astronomy). Thus the „optical holographic research group“ had manoeuvred itself out of the observatory's research community.

Many break-through developments were realised by members of scientific communities outside

the realm of physics. An engineer improved the operational status of the darkroom in which the first zone plates were made. A trained physicist, who had returned from the optics industry, brought with him the knowledge of how to implement digital cameras in the set-up. And finally, a chemist rendered considerable results in adapting environmental techniques from various sources and fitting them to the microscope and also provided sound knowledge in enhancing the theory on basic interaction between targets and radiation.

But, as a summary, it has to be concluded that there was a complete lack of signs of acknowledgement and reception by the user communities for whom the original design of the TXM had been generated. This could be observed after the prototype had been introduced. Biologists returned to their established methods, which also provided enhanced results, when the promise to make high resolution images of living cells could not be kept. The requirements and necessities of life sciences had not been adequately taken into account during the course of the on-going development. Instead, the necessary research on questions of physics dominated research on the TXM. After the high interaction of the X-rays with wet targets was proven, the potentially high impact of the TXM on biology was documented by making a series of images of malaria-infected red blood cells. But the usefulness of the new instrument was not forwarded to the life sciences community. Whether the biologists involved were not able to see the potential use of the instrument, or did not want to propagate the results, no one knows. Thus the reputation of the TXM remained restricted to its own (small) scientific community.

Chapter one deals with the embedment of this study into the recent scientific discussion about successful and unsuccessful developments in science. In particular, the stress was put on the instrument's interdisciplinary mode of operation, as was the necessity of maintaining excellent communication between the disciplines involved. This did not happen regularly during the TXM's history of development, because most of the time the physicists at the Universitätssternwarte worked amongst themselves.

Placing the TXM's development history within the sphere of instrumental history instead of within the classical history of science is discussed in chapter two. Because of the character of interaction in the chosen model formed by instrumentation, experiment and theory, and due to the fact that theory and experiment had been stable at the time of the development, the changes in instrumentation and application after World War II made development possible. Hence, the classical history of science could not serve as a role model for my case study. Hacking's taxonomy was chosen to depict the single steps of development, which are also characteristic of instrumental development for non-recent periods of history. Because the history of development can easily be divided into three characteristic periods, the model was modified to allow for the development of zone plates in the first period, which was crucial to the development of the TXM. In order to have access to the historic genetic approach, a number of interviews with contemporary witnesses was conducted, two of which were to contribute to the historical backbone of the development history and the other two to provide complementary information. The use of so-called „Oral History“ as an access to recent history was introduced and a guideline of how to prepare and evaluate the interviews was presented. Oral History, which is used to tell the story of those people who do not usually take centre stage, was applied for the first time to reprocess the work of the natural scientists working on the basics of research.

Chapter three sheds light on the variety of help available to Schmahl and Rudolph when these two were striving to establish their leisure-time project, and this allowed them to „walk off the beaten tracks of astronomy“ over an extended period of time. The facts of the chapter could have also been turned into a „helping hands“ or „invisible hands“ history, yet the only helping hand mentioned in the sense of the focus of interest opened up by Steven Shapin in chapter three was the engineer Ortrud Christ. As a matter of fact, Schmahl and Rudolph had

many personal contacts who were of great help whilst building and developing the prototype of the TXM, however, apart from the engineer, their contributions did not lead to any real breakthrough of the instrument's reputation as such.

After the biographic introduction of major players, who were active throughout any given period in the TXM development, the chapter deals with the holographic approach as an improvement in manufacturing diffraction optics and the implementation of the optics in the European space research programs. Using telescopes as a test environment for „new” optic elements is a highly traditional way of research on optics and was known way back in the Renaissance Age. The requirements for perfection in optical elements are not as stringent for optics in telescopes as they are for those in a microscope. This is mostly due to the short focal length of the optics, which requires short radii of curvature for the refraction lenses or fine structures for the diffraction lenses.

The rest of the chapter deals with the years following the prototype testing, when Günter Schmahl's work group moved to the Paris ACO with the microscope. The necessary funds were raised by applying to the „Stiftung Volkswagenwerk”, which rendered the group very self-sustaining within the Universitätssternwarte; and this was most likely the cause of increasing tension in Göttingen, even though the exact reasons or motivation for the Volkswagenwerk to support Schmahl remain unknown. It is very likely that the reasons for the disconcertment there will never fully come to light; the TXM project leader, Günter Schmahl, seems to have been a highly polarising person. Hence, I would suppose that the reasons for the disconcertment would tell a story of personal interaction between Schmahl and various other members of the Universitätssternwarte, and such a story is unlikely to grind out any new information. My research into the story of funding, and especially into Volkswagenwerk's funding, was so obstructed by the administrative policies of Volkswagenwerk itself that I was unable to determine which points of Günter Schmahl's original application to Volkswagenwerk – which three times provided finances for Schmahl's group – succeeded or failed in attaining the money.

The three years at ACO brought the instrument's teething troubles to light, something which could probably have been avoided had interdisciplinary research been applied. In retrospect, work on the development must have come to an end after the years at ACO, because, after their return to Germany, the physicists no longer had the construction of a microscope for microbiological purposes in view. Even though the years of development were important in terms of the instrument's functionality, the experiments done at BESSY I were fundamental research in physics and, consequently, the other natural sciences were no longer of any particular interest. Apart from bringing the TXM closer to perfection, the years at BESSY I showed clearly that the TXM was not able to produce images easily. The requirements to surrounding techniques such as high vacuum or cryogenic cooling were undeniably stringent. Parts of the arguments to prove this point can be found in chapter 4, where I discuss eliminating the anomalies. Probably the location at Göttingen was no longer suitable for continuing the „off-beat” development there. Not even the newly founded „Institut für Röntgenphysik” could cover up the fact that this Göttingen technology was no longer welcome at Göttingen.

Fractions of the foregoing chapters can be found again within Hacking's theoretical approach, which links the underlying theories of the instrument with the first practical experiences and the claims raised in connection with the TXM. The result of this chapter demonstrates the outstanding simplicity of the construction. The TXM's set-up could be copied from any microscope with refractive lenses for the visible region. Furthermore, the images to be made were characterised in advance, because the TXM is an imaging instrument and therefore its images should be magnified look-alikes of the images one would expect to be produced by a Visible Light Microscope. Whilst the low system effectiveness of diffraction of the zone plates

was well known to the experimenters, the requirements made on the X-ray source and the interaction of the radiation with the aqueous samples had been grossly underestimated and proved to be major obstacles for quite a long time. The trained chemist Gerd Schneider, who had contributed substantially towards calculating the interaction of ionising radiation with water, cleared the way for the establishment of cryogenic cooling.

Here again, a member of a non-physics community had brought into the group new ideas in helping to improve the instrument, added to which the history of the adaptation of „foreign” technologies, which goes along with the elimination of what Hacking calls „anomalies”, is also an unusual one. One would expect the physicists to have chosen a single role-model to copy their advancements from, but instead they picked a variety of techniques stemming from astronomy, holography and electron microscopy. Thus the number of photons for the image formation was increased and at the same time the radiation dose of the samples was reduced. The lack of suitable laboratory sources remained a problem, though. As it seems, there are no sufficiently effective radiation sources for the use of a TXM in a laboratory set-up. But the question of possible success due to the realisation of an effective laboratory X-ray source is a question of actual developments and thus no answer can be found within the history of science. The fact remains that the TXM is not even well-known amongst the community of physicists, because there is no laboratory microscope of this kind which could be used, for example, for graduate studies.

Another reason for the TXM not taking centre stage is that the images produced by the TXM could not be used for „direct marketing”. The images of deteriorating blood cells or the tomography of plant cells are doubtlessly spectacular, but simply not enough. Their character is not sufficiently unique, therefore the image could not work as a link from the scientific result presented in the image to the machine by whose means the image had been taken. The analogies, which can be found in TXM images as well as in a number of images from other fields of science, certainly show characteristics of nanotechnological set-ups, and nanotechnology aims at presenting such images. But this is also the point at which, in the case of the TXM, the link from the image to the instrument is lost. The Scanning Tunnelling Microscope (STM) and also the Electron Microscope (EM) provide a vast number of images which can easily be linked to the instrument due to several unique characteristics. Furthermore, Don Eigler and Erhard Schweizer have produced one of the icons of modern physical sciences with an Atomic Force Microscope, a variation of the STM: the letters I-B-M written by means of single atoms on a crystalline surface. The IBM logo image „works” for two reasons: its presentation is spectacular and, more importantly, shows an underlying scientific result as the answer to an actual question in modern science. In the case of the IBM logo it is a fact that one is not able „to write with single atoms the way we want”, because the atoms which form the letters are embedded in pits on the crystal’s surface and these pits can no longer be seen in the image. This is the reason why the image was not rejected, for its means of illustrating the result did show an important result. As a consequence, the scientists working with the TXM are trying to find an answer to one of the questions located within the „human genome project”, the sequence of the genes within the human genome. To do so, they are endeavouring to combine fluorescence microscopy and standard TXM imagery. Fluorescence Microscopy has been applied before for medical purposes and has proven effective. The TXM scientists have also presented a possible image type, the results of which are presentable and which are fully capable of becoming a real „framework” (see g. 5.19) for the scientific output. But it seems to me that the physicists are taking a „long shot” in order to bring this idea to a successful end, because the cell’s nucleus does not necessarily have the DNA packed into the x-shaped chromosomes. Furthermore, there is doubt as to whether the TXM should be used for this kind of analysis, because biologists have already

been working on decoding the sequences of genes by quantitative methods for a longish period of time and so probably have a substantial lead over the physicists – a problem not unknown to the researchers working with the TXM. The head start of biologists or other clients interested in working with the TXM might be a reason for these clients not to have seen any good reason to give the TXM a trial run. Ever since the presentation of the prototype, the developing physicists have constantly been redefining their short-term aims, and these are mostly aimed at the needs of the physicists and not at the needs of the designated user communities.

A last question remains as to whether or not Schmahl's working group can be considered to be the inventors of the instrument described. As it is the case with many other instruments – and I have stressed this point in my thesis – there was no tremendous change in physical theory or in experimental lab procedures which would pin-point the specific date this invention was made. Doubtlessly Schmahl had come up with the first idea of generating diffraction optics by means of holography, an idea by which optics with extraordinarily fine structures could be produced. The holographic approach had dominated the field of diffraction optics for some twenty years before it was replaced by electron beam lithography.

Given the fact that the characteristic optical path of microscopes was maintained, the optical properties of zone plates was already known, and that the first concept of an X-ray microscope was introduced shortly after World War II, I would say that Schmahl and his co-workers were not the sole inventors of the microscope. A division of time into „ante TXM” and „post TXM” seems inappropriate to me, particularly when taking into account that their predecessors' discoveries in the spheres of physical theory and instrumentation had been made over a period of time from at least 1898 to 1971.