

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

Mikroskope und Fernrohre in der physikhistorischen
Sammlung der Universität Wien

verfasst von / submitted by

Simon Hourmouzis BEd

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Master of Education (MEd)

Wien, 2022 / Vienna 2022

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

UA 199 520 523 02

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Lehramt Sek (AB)
UF Mathematik UF Physik

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf

Mitbetreut von / Co-Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Franz Sachslehner

Inhalt

1 Einleitung.....	5
2 Geschichtliches.....	6
2.1 Allgemeine Entwicklung der Fernrohre.....	7
2.2 Allgemeine Entwicklung der Mikroskope.....	8
2.3 Geräte von Plössl.....	9
3 Grundlagen des menschlichen Sehens.....	11
3.1 Die Lupe.....	13
3.2 Strahlenbegrenzung und Blenden.....	15
3.3 Einfaches Mikroskop als Grenzfall der Lupe.....	16
4 Das Mikroskop.....	17
4.1 Vergrößerung und Auflösungsvermögen.....	19
4.2 Objektiv und Okular.....	21
4.3 Beleuchtungsarten.....	23
4.4 Strahlenbegrenzung.....	27
4.5 Abbildungsfehler.....	29
4.5.1 Sphärische Aberration (Öffnungsfehler).....	29
4.5.2 Sinusbedingung.....	31
4.5.3 Der Astigmatismus und die Bildkrümmung.....	32
4.5.4 Verzeichnung.....	34
4.5.5 Die Koma.....	36
4.5.6 Chromatische Aberration.....	36
4.6 Beugung und Bündelbegrenzung.....	39
5 Fernrohre.....	39
5.1 Vergrößerung, Abbildungsfehler, Beleuchtungsstärke und Auflösungsvermögen.....	40
5.1 Typen von Fernrohren.....	41
5.3.1 Fernrohr ohne reelles Zwischenbild.....	41
5.3.2 Fernrohr mit reellem Zwischenbild.....	42
5.3.3 Prismen-Fernrohr.....	43
6 Experimentiermethodik.....	44
6.1 Eichung des Okularmaßstabes beim Mikroskopieren.....	44
6.2 Dickenmessung und zugehörige Fehlerrechnung beim Mikroskopieren.....	45
6.3 Methode zur Bestimmung der Okularvergrößerung oder Objektivvergrößerung beim Mikroskopieren.....	46
6.4 Bestimmung der Vergrößerung eines Mikroskops und Fernrohres.....	46

7 Historische Mikroskope im Experiment	49
7.1 Reichert-Austria Mikroskop Nr. 14201.....	51
7.2 Reichert-Austria Mikroskop Nr. 18408.....	54
7.3 Reichert-Austria Mikroskop Nr. 95182.....	62
7.4 Reichert-Austria Mikroskop Nr. 208833.....	70
7.5 Reichert-Austria Mikroskop Nr. 259599.....	79
7.6 Reichert-Austria Mikroskop Nr. 274923.....	86
7.7 Carl Zeiss Mikroskop Nr. 57277 (VI 269)	91
7.8 Plössl Mikroskop horizontal	96
7.9 Plössl Mikroskop VI 202 mit Dreikant-Stativ	103
7.10 Plössl Mikroskop VI 203 mit rundem Stativ	114
7.11 Fraunhofer'sches Mikroskop IV 88.....	122
7.12 Fraunhofer'sches Mikrometer IV 89	127
7.13 Teilmaschine IV 206.....	131
8 Historische Fernrohre im Experiment	134
8.1 E. Hartmann und Co. Fernrohr VI 233	134
8.2 Plössl Fernrohr VI 199.....	142
8.3 Lenoir & Forster Fernrohr VI 14	147
8.4 Steinheil Fernrohr VI 4.....	149
8.5 Layser Fernrohr VI 146	154
8.6 Rohrbeck Fernrohr VI 130	156
8.7 Kometensucher von Utzschneider, Reichenbach und Fraunhofer VI 232	159
9 Resümee	163
10 Danksagung	164
11 Literaturverzeichnis.....	165
12 Abbildungsverzeichnis.....	166

Zusammenfassung

Ausgewählte Mikroskope und Fernrohre der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien werden nebst einigen optischen Grundlagen beschrieben und experimentell getestet. Die untersuchten drei Mikroskope von Simon Plössl (vor 1850) erweisen sich als durchaus funktionsfähig und liefern überraschend gute Bilder, ausgenommen das horizontale Mikroskop, wo die Bildqualität wegen eines korrodierten Hohlspiegels leidet. Das dialytische Fernrohr von Plössl mit der Gravur 1832 hat eine getrübbte Objektivlinse, es liefert daher nur mehr undeutliche Bilder. Dagegen vermittelt der Kometensucher von „Utzschneider Reichenbach und Fraunhofer in Benedictbeurn“ (ca. 1820) noch gute Bilder. Drei ältere Mikroskope von Reichert-Austria (um 1900, eines 1929 erworben) sowie eines von Carl Zeiss (um 1900) funktionieren noch recht gut, abgesehen davon, dass manche Okulare und Objektive fehlen oder auch vertauscht worden sind. Falls die Vergrößerungen nicht angegeben sind, werden sie abgeschätzt. Drei Mikroskope von Reichert-Austria aus dem Zeitraum 1950 bis 1962 erweisen sich als durchaus funktionsfähig, wenngleich die Zubehöerteile nicht ganz vollständig sind oder leichte Mängel aufscheinen. Dies trifft vor allem auf das Stereomikroskop aus dem Jahr 1962 zu. Interessant ausgeführt sind ein Fraunhofer'sches Mikroskop und ein Fraunhofer-Mikrometer (1912 erworben) mit einer Auflösung von ca. 1 μm und 2 μm sowie eine Teilmaschine (um 1890) mit 0,01 mm Auflösung. Des Weiteren werden ein terrestrisches Fernrohr von Lenoir & Forster (um 1900) und vier verschiedene Ablesefernrohre (drei um 1900, eines 1856 erworben) untersucht.

Abstract

Selected microscopes and telescopes of the historical physics collection of the University of Vienna are described and experimentally tested. Additionally, some optical basics are described. The three microscopes by Simon Plössl (before 1850) examined prove to be quite functional and provide surprisingly good images, except for the horizontal microscope, where the image quality suffers due to a corroded concave mirror. The dialytic telescope of Plössl with the engraving 1832 has a clouded objective lens, therefore it delivers only indistinct images. In contrast, the comet finder by "Utzschneider Reichenbach and Fraunhofer in Benedictbeurn" (ca. 1820) still provides good images. Three older microscopes from Reichert-Austria (around 1900, one acquired in 1929) and one from Carl Zeiss (around 1900) still work quite well, except that some eyepieces and objectives are missing or have been interchanged. If magnifications are not given, they are estimated. Three

microscopes from Reichert-Austria from the period 1950 to 1962 prove to be quite functional, although the accessories are not quite complete or show slight defects. This is especially true for the stereo microscope from 1962. A Fraunhofer microscope and a Fraunhofer micrometer (both acquired in 1912) with a resolution of approx. $1\text{ }\mu\text{m}$ and $2\text{ }\mu\text{m}$ as well as a dividing machine (around 1890) with a resolution of $0,01\text{ mm}$ are interestingly constructed. Furthermore, a terrestrial telescope by Lenoir & Forster (around 1900) and four different reading telescopes (three around 1900, one acquired in 1856) are examined.

1 Einleitung

Die Optik gehört zu den ältesten Zweigen der Physik. Dennoch werden erst Ende des 16. Jahrhunderts bis Anfang des 17. Jahrhunderts erste Fernrohre und Mikroskope entwickelt. Damit werden die Grenzen menschlichen Sehens überwunden. Großartige Fortschritte in Astronomie, Physik, Biologie und Medizin werden damit eingeleitet. Die ältesten noch vorhandenen Fernrohre und Mikroskope in der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien datieren noch in das sogenannte Physikalische Museum zurück. Von dort sind sie über Generationen von Physikern bis an die heutige Fakultät für Physik übertragen worden. Zu nennen sind hier ein Kometensucher von „Utzschneider Reichenbach und Fraunhofer“ (ca. 1820), ein dialytisches Fernrohr und 3 Mikroskope der optischen Werkstätte von Simon Plössl in Wien (Zeitraum 1832 bis 1850), Fraunhofer-Mikrometer (1912), eine Teilmaschine (ca. 1890), Mikroskope von Reichert-Austria und Carl Zeiss (um 1900 und einige jüngere Geräte) sowie Fernrohre und Ablesefernrohre von verschiedenen Herstellern.

Zunächst wird einiges Geschichtliches zur Entwicklung der Fernrohre und Mikroskope präsentiert, insbesondere wird auch der Wiener Optiker Simon Plössl vorgestellt, dessen optische Geräte europaweiten Ruf genossen haben. Es folgen Grundlagen des Sehens, der Lupe, des Mikroskops und der Fernrohre. Hervorgehoben wird die Bedeutung der Blenden in optischen Systemen. Die Blenden begrenzen die Strahlenbündel und werden in den Bild- und Gegenstandsraum entweder reell oder virtuell abgebildet. Auch die zahlreichen Abbildungsfehler von sphärischen Linsen werden präsentiert.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die eingangs genannten Objekte möglichst genau und untersucht die Funktionstüchtigkeit im Experiment. Bei den älteren Mikroskopen gibt es keine eingebaute

Lichtquelle, sodass die Beleuchtung mittels Reuterlampe und dem meist vorhandenen Plan- oder Hohlspiegel am Gerät realisiert wird. Vielfach fehlen bei Okularen und Objektiven die Angaben der Vergrößerung bzw. des Abbildungsmaßstabes. Die Angaben zu den an den Mikroskopen montiert vorgefunden Okularen und Objektiven stimmen oft nicht mit den teilweise noch vorhandenen Beschreibungstabellen in den Holzkassetten überein. In diesen Fällen und manchmal zum Vergleich von Vergrößerungsangaben wird die Vergrößerung gemäß Kapitel 6.4 abgeschätzt. Auch eine Methode zur Abschätzung der Vergrößerung der Fernrohre wird angegeben.

2 Geschichtliches

Ausgrabungen unter anderem aus Troja und Kreta, bestätigen, dass die ersten Linsen bereits in der Antike angefertigt worden sind, wobei diese laut aktuellem Wissensstand ausschließlich die Funktion von Schmuckstücken innehatten. Obwohl in der Antike Erkenntnisse zur geometrischen Optik, wie etwa der Lichtbrechung, festgehalten wurden, fanden diese zu noch keine praktische Anwendung (vgl. Gerlach 2009, S. 3-6). So dachten die griechischen Gelehrten Epikur und Hipparch, dass die Augen selbst Sehstrahlen aussenden und so die Objekte wahrnehmen (vgl. Wilde 1838, S. 2). Dem Irrtum der aus den Augen ausgehenden Lichtstrahlen unterlag ebenfalls Euklid, welcher jedoch erkannte, dass sich Licht geradlinig ausbreitet (vgl. Wilde 1838, S. 2). Eine Fortsetzung dieser Gedanken zu der Natur des Lichts findet sich in den Aufzeichnungen von Alhazen, welcher um 1100 n. Chr. im heutigen Irak lebte. Alhazen fand heraus, dass Licht für den Sehvorgang von leuchtenden Gegenständen ausgeht und nicht wie von den griechischen Gelehrten angenommen seinen Ursprung in den Augen innehat. Ebenso untersuchte er den Aufbau des Auges und beschäftigte sich mit der Reflexion an gekrümmten Spiegeln (vgl. Wilde 1838, S. 69-73). Europäer, wie Roger Bacon (1214 – 1294), bauten auf das Werk Alhazens, den *Schatz der Optik* – lateinisch *Opticae Thesaurus* – auf (Al-Khalili 2013, S. 254). Das Bestreben, die menschlichen Grenzen des Sehvermögens zu erweitern, hat bei der damaligen arabischen Hochkultur zu den ersten Vorläufern der heutigen Brille geführt. Hierbei handelte es sich um Lesesteine, welche direkt über den Text gelegt wurden (vgl. Gerlach 2009, S. 6). Ende des 13. Jahrhunderts stellte Salvino degli Armati aus Florenz die ersten Brillen her (vgl. Wilde 1838, S. 85). Die aus diesem Kontext resultierenden Erfindungen des Fernrohres und des Mikroskops werden in jeweils eigenen Unterpunkten dieses Kapitels thematisiert.

2.1 Allgemeine Entwicklung der Fernrohre

Die Entdeckung des Fernrohres liegt zeitlich gesehen am Ende des 16. Jahrhunderts. Im Jahr 1655 kam es zu einer Gerichtsverhandlung in Middelburg, bei welcher Zacharias Jansen und Hans Lippershey die Erfindung des Fernrohres für sich deklarierten. Im Gerichtsverfahren konnte aufgrund mangelnder Datenlage keine Entscheidung getroffen werden (Gerlach 2009, S. 17). Galileo Galilei entwickelte am Anfang des 17. Jahrhunderts dank der venezianischen Brillenmacher ein Fernrohr mit einer dreißigfachen Vergrößerung. Als der Nutzen des Fernrohres für Militär und Seefahrt entdeckt wurde, erhöhte die Universität das Professorengehalt von Galilei und ernannte ihn zum Beamten auf Lebenszeit (Gerlach 2009, S. 16-18). Galilei nutzte das Fernrohr für astronomische Entdeckungen, welche er in seinem Werk „Sidereus nuncius“ festhielt. Neben der Entdeckung der vier Jupitermonde hat Galilei ebenfalls erkannt, dass der Mond keineswegs eine glatte Oberfläche hat und dass auf der Sonne Flecken zu sein scheinen. Die Offenbarung, dass das geozentrische Weltbild der katholischen Kirche falsch ist und die Erde um die Sonne kreist, führte zu einer Gerichtsverhandlung, in welcher er seine These des heliozentrischen Weltbildes widerrufen musste, um nicht hingerichtet zu werden (vgl. Wilde 1838, S. 163-167). Die Fernrohre zu dieser Zeit wiesen teils gravierende Mängel auf. Beim holländischen Fernrohr war ein sehr stark reduziertes Gesichtsfeld gegeben und das reelle Zwischenbild lag außerhalb des Tubus, was eine Anbringung im Tubus von Skalen oder Blenden unmöglich machte. Johannes Kepler, welcher von 1571 bis 1630 lebte, beschäftigte sich intensiv mit dem Gebiet der Optik und gilt als Schöpfer des Werkes „Schilderung der Folgen, die sich aus der unlängst gemachten Erfindung der Fernrohre für das Sehen und die sichtbaren Gegenstände ergeben“. Seine Veröffentlichung stellt ein Sammelsurium der wichtigsten Erkenntnisse der Optik mit besonderem Bezug auf Fernrohre und Galileis Verdienste dar. Eine geschwärzte Innenwand des Tubus, um Streulicht zu minimieren und die Anbringung einer Lochblende zur Steigerung der Bildqualität finden ihren Ursprung in diesen Überlegungen. Ebenso verwies Kepler als einer der ersten auf die chromatische Aberration und wie diese durch gezielte Kombination von Linsen minimiert werden kann. Chester Moor Hall gelang es erstmals, ein achromatisches Teleskopobjektiv durch die gezielte Kombination einer Sammellinse aus Kronglas und einer Zerstreuungslinse aus Flintglas herzustellen (Gerlach 2009, S. 19-23).

2.2 Allgemeine Entwicklung der Mikroskope

In den Überlieferungen existieren keine gesicherten Aufzeichnungen über den Entdecker des Mikroskops. Das älteste bekannte Mikroskop gehörte dem Physiker Cornelius Drebbel, welcher von 1572 bis 1633 in den Niederlanden lebte (vgl. Gerlach 2009, S. 24-26). Das erste zusammengesetzte Mikroskop wurde von dem Brillenmacher Hans Janseen und seinem Sohn Zacharias Janseen aus Middelburg gegen Ende des 16. Jahrhunderts erfunden. Realisiert wurde diese Erfindung durch zwei an den Enden eines Tubus befindliche Linsen, wobei für das Okular ein Zerstreuungsglas eingesetzt wurde (vgl. Wilde 1838, S. 138 f.). Galilei beschäftigte sich neben Fernrohren ebenfalls mit Mikroskopen, wobei hierüber nur einzelne Aufzeichnungen erhalten sind, da das Interesse der Gesellschaft am Mikroskop zu dieser Zeit gering war (vgl. Gerlach 2009, S. 27-30). Dies lag unter anderem daran, dass der Aufbau und die technische Realisierung des einfachen Mikroskops mit wesentlich weniger Aufwand und Kosten verbunden waren und die chromatische Aberration beim zusammengesetzten Mikroskop wesentlich stärker zu tragen kam. Im 17. Jahrhundert verdrängte das einfache Mikroskop das zusammengesetzte Mikroskop. Das Mikroskop gewann beträchtlich an Bedeutung, als dieses zur Klärung biologischer Prozesse herangezogen wurde. So konnte die Lehre von der Urzeugung, dass die kleinsten Tierchen direkt aus Schlamm oder anderen Substanzen entstehen, widerlegt werden (vgl. Gerlach 2009, S. 51). Zu Beginn des 19. Jahrhunderts konnte eine gezielte Verbesserung der sphärischen Aberration bei einfachen Mikroskopen herbeigeführt werden, indem eine bikonvexe Linse mit starker Brechkraft durch zwei oder drei hintereinander angeordnete Linsen mit geringerer Brechkraft ersetzt wurde (vgl. Gerlach 2009, S. 139). Vom Beginn des 19. Jahrhunderts bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts wurde das einfache Mikroskop allmählich vom zusammengesetzten Mikroskop verdrängt, da die Erfindung achromatischer Objektive eine Lösung der chromatischen Aberration bei zusammengesetzten Mikroskopen darstellte. Die Verwendung der achromatischen Objektive erfolgte bei Mikroskopen später als bei Fernrohren, da diese aufgrund ihrer geringen Größe schwer anzufertigen waren. Seit dem 20. Jahrhundert wurden die einfachen Mikroskope fortan nur noch zu Präparationszwecken verwendet (vgl. Gerlach 2009, S. 233). Im Jahre 1823 eröffnete Simon Plössl in Wien eine eigene optische Werkstätte. Bis um 1850 gehörten die optischen Geräte der Firma Plössl zu den besten Europas (vgl. Steiner & Schulz 2006, S. 39). In der Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelten sich zwei Hersteller von Mikroskopen und Zubehörteilen zu den Marktführern in Mitteleuropa. Carl Zeiss in Jena und Carl Kellner in Wetzlar begannen

Mikroskope in Serienproduktion und hoher Qualität herzustellen, wobei sich diese an Erkenntnissen von Ernst Abbe orientierten. Ernst Abbe machte den Schritt weg von entdeckerrischem und künstlerischem Tun hin zu kalkulierten Berechnungen, welche für die Qualität von optischen Geräten ein neues Zeitalter einläuteten. Durch die Serienfertigung gab es keine langen Wartezeiten mehr auf die Bestellung von Mikroskopen und die Kosten konnten deutlich reduziert werden. Dieser Umstand machte eine Einführung der Mikroskope in Kliniken zu Routineaufgaben. Ebenso waren sie zur Materialprüfung in Werkstätten oder für wissenschaftliche Bildung in Schulen erschwinglich. Eine weitere bedeutende Firma, die sich ab der Mitte des 19. Jahrhunderts mit der Herstellung und dem Vertrieb von Mikroskopen beschäftigte, war das Unternehmen „Reichert Austria“ von Carl Reichert in Wien (vgl. Gerlach 2009, S. 339).

2.3 Geräte von Plössl

Die Geräte der Firma Plössl gehen auf den österreichischen Optiker Simon Plössl zurück, welcher von 1794 bis 1868 in der Biedermeierkultur lebte. Simon Plössl wurde als Handwerkersohn geboren, wobei er mit 12 Jahren eine Drechslermeisterlehre begann, an welche er eine Optikerlehre bei Friedrich Voigtländer anschloss. 1823 entschied sich Plössl dazu, seine eigene Werkstatt in Wien zu eröffnen, in welcher er aplanatische Lupen, Brillen, Feldstecher und andere optische Geräte anfertigte (vgl. Steiner & Schulz 2005, S. 39 f.). Seine Geräte übertrumpften die der Konkurrenz in Genauigkeit und Vergrößerung um Weiten, was unter anderem daran lag, dass dieser neben seiner beruflichen Tätigkeit in der Werkstatt verschiedenste Optik- und Mathematikurse an der Universität Wien und dem k.k. Polytechnischen Institut belegte (vgl. Steiner & Schulz 2005, S. 40). Seine Geräte wurden von verschiedensten Forschungseinrichtungen und Professoren bestellt. Neben Forschungseinrichtungen und Professoren zählen ebenfalls bekannte Persönlichkeiten wie Baron Rothschild oder Fürst Metternich zu seinen Kunden (vgl. Weber-Unger 2005, S. 34). Plössl litt seit 1836 an einer Nervenkrankheit, welche Schwerhörigkeit und Schwindel verursachte. Dieser Umstand führte dazu, dass sich Plössl nur selten unter Menschen aufhielt, bis er 1868 an den Folgen eines Sturzes mit einer Flintglastafel verstarb (vgl. Steiner & Schulz 2005, S. 43). Der Tod dieses Optikers stellt gleichzeitig einen Wandel in der Herstellung optischer Geräte dar. Während Plössl seine optischen Geräte noch händisch

herstellen ließ, was ihnen den Status von Kunsthandwerken verlieh, ging die Produktion nach dem Ableben von Plössl durch Carl Zeiss und Carl Reichert im Zuge der Industrialisierung zur Massenproduktion in Fabriken über. In den folgenden Punkten sollen einige wichtige Änderungen an seinen optischen Geräten im historischen Verlauf dargestellt werden.

- Ab 1828: Plössl beginnt mit der Herstellung von dialytischen Fernrohren, welche weltweiten Anklang finden.
- Ab 1840: Plössl wechselt zu Okularen, welche direkt auf den Tubussockel aufgesetzt werden können und somit nicht angeschraubt werden müssen.
- Ab 1850: Mikroskop-Stative werden nun mit runden statt mit dreiarbigem Fuß hergestellt. Beleuchtungsspiegel werden mit einer speziellen Halterung am Mikroskop fixiert, sodass diese auch schräge Beleuchtung gewährleisten können. Objektive werden ab diesem Zeitpunkt für eine gewisse Deckglasdicke korrigiert und Kondensorlinsen ergänzen den unteren Teil des Objektivtisches.

(vgl. Steiner & Schulz 2005, S. 42)

Von der Schaffenskraft der Werkstätte Simon Plössl zeugen auch umfangreiche Preislisten (Simon Plössl 1844, S. 120 - 134).

Im Besitz der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien befinden sich Mikroskope und ein Fernrohr der Firma Plössl, welche damals von Christian Doppler vom Physikalischen Museum der Universität Wien in sein Physikalisches Institut bei der Erdbergstraße 15 gebracht wurden, wo sie auch seinen Nachfolgern wie Andreas Ettingshausen, Josef Stefan und Ludwig Boltzmann zur Verfügung standen. Mit der Neuordnung der physikalischen Institute der Universität Wien kamen die Geräte von Plössl an das „II. Physikalische Institut“, welches dann 1977 in „Institut für Festkörperphysik“ und 1996 in „Institut für Materialphysik“ umbenannt wurde. Mit 1. Jänner 2004 wurden die physikalischen Institute der Universität Wien in die Fakultät für Physik übergeführt. Im Jahr 2007 wurde dort die physikhistorische Sammlung etabliert.

3 Grundlagen des menschlichen Sehens

Wollen wir kleine Objekte betrachten beziehungsweise Einzelheiten an diesen wahrnehmen, führen wir diese für gewöhnlich an unser Auge heran, um den Sehwinkel und das damit auf unserer Netzhaut projizierte Bild des Objekts zu vergrößern. In der darunter befindlichen Abb. 1 wird gezeigt, wie der Sehwinkel ε , unter welchem ein Gegenstand gesehen wird, mit der Annäherung des Gegenstandes an das menschliche Auge zunimmt.

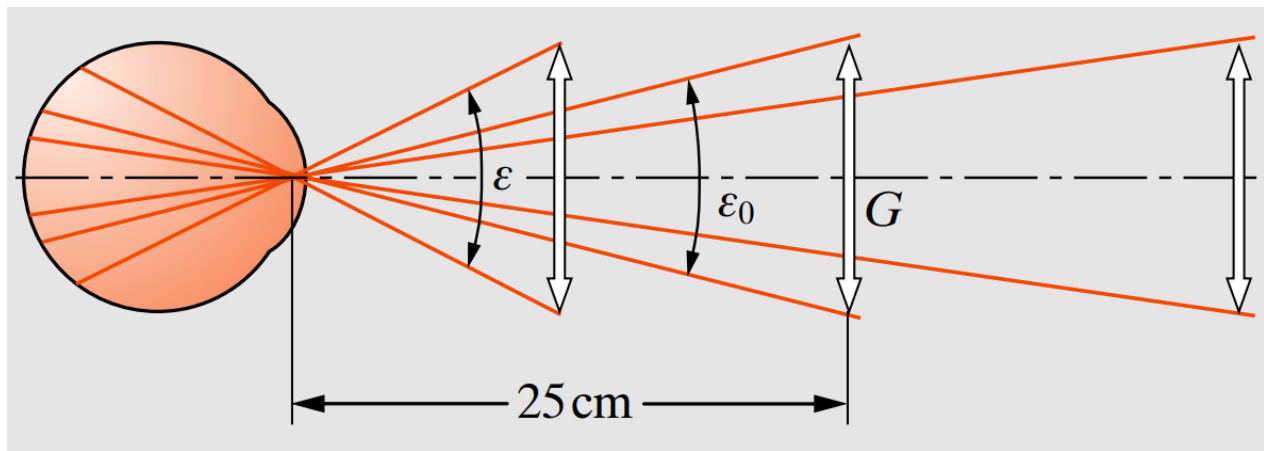


Abb. 1: Der Sehwinkel (vgl. Meschede 2015, S. 510)

Eine Entfernung von 25 Zentimeter zwischen Beobachter und betrachtetem Objekt wird Bezugssehweite oder deutliche Sehweite genannt, wobei der zugehörige Sehwinkel in der Abb. 1 mit ε_0 gekennzeichnet ist. Die Vergrößerung V eines Gegenstandes wird durch das Verhältnis der Sehwinkel definiert:

$$V = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

Theoretisch könnte ein Objekt nun beliebig nahe an das Auge herangeführt werden, um eine scheinbar unbegrenzt vergrößerte Darstellung des betrachteten Objekts zu erzielen. Je näher sich jedoch ein Objekt vor dem betrachtenden Auge befindet, desto stärker müssen die von einem Punkt des Objekts ausgehenden Lichtstrahlen gebrochen werden, um gebündelt an einem einzigen Punkt der Netzhaut aufzutreffen. Eine stärkere Brechung der auf das Auge auftreffenden Lichtstrahlen kann durch eine Verformung der im Auge liegenden Sammellinse gewährleistet werden. Durch

Anspannen des Ziliarmuskels entspannen die Ziliarfasern, was zu einer stärkeren Krümmung der Augenlinse und damit zu einer größeren Brechkraft führt, weshalb auch nahe Gegenstände scharf dargestellt werden können. Die Verformbarkeit der Linse unterliegt jedoch gewissen Grenzen, wodurch Gegenstände ab einer bestimmten Annäherung nicht mehr scharf dargestellt werden können. Eine Darstellung dieser Akkommodationsfähigkeit stellt Abb. 2 dar, wobei im rechten Teil der Abb. 2 die Linse aufgrund des angespannten Ziliarmuskels eine wesentlich stärkere Krümmung aufweist und somit im Vergleich zum linken Teil der Abb. 2 auch sehr nahe Gegenstände scharf darstellen kann. Während junge Menschen teilweise Gegenstände in einer Entfernung von 10 Zentimetern noch scharf sehen können, nimmt die Verformbarkeit der Linse im Alter rapide ab. Menschen ab einem Alter von 40 Jahren verlieren somit zusehends die Fähigkeit der Betrachtung sehr nah befindlicher Gegenstände, wobei die korrekte Bezeichnung hierfür Alterssichtigkeit lautet. Die oben genannte deutliche Sehweite bildet jene Entfernung, unter welcher Gegenstände von den meisten Menschen längere Zeit ohne größere Schwierigkeiten betrachtet werden können. Der mit dem Auge erreichbare Sehwinkel, unter dem ein Gegenstand wahrgenommen werden kann, ist somit durch die Nähe, mit der ein Gegenstand an das Auge herangeführt werden kann, begrenzt. Mit optischen Instrumenten wie Lupe, Mikroskop und Fernrohr lässt sich dieser Sehwinkel jedoch über die Grenzen des menschlichen Sehvermögens hinaus erweitern. Für die Vergrößerung eines optischen Gerätes gilt folgende Beziehung (vgl. Meschede 2015, S. 510 f.):

$$\text{Vergrößerung des optischen Instruments} = \frac{\text{Sehwinkel mit Instrument}}{\text{Sehwinkel ohne Instrument in Bezugssehweite}}$$

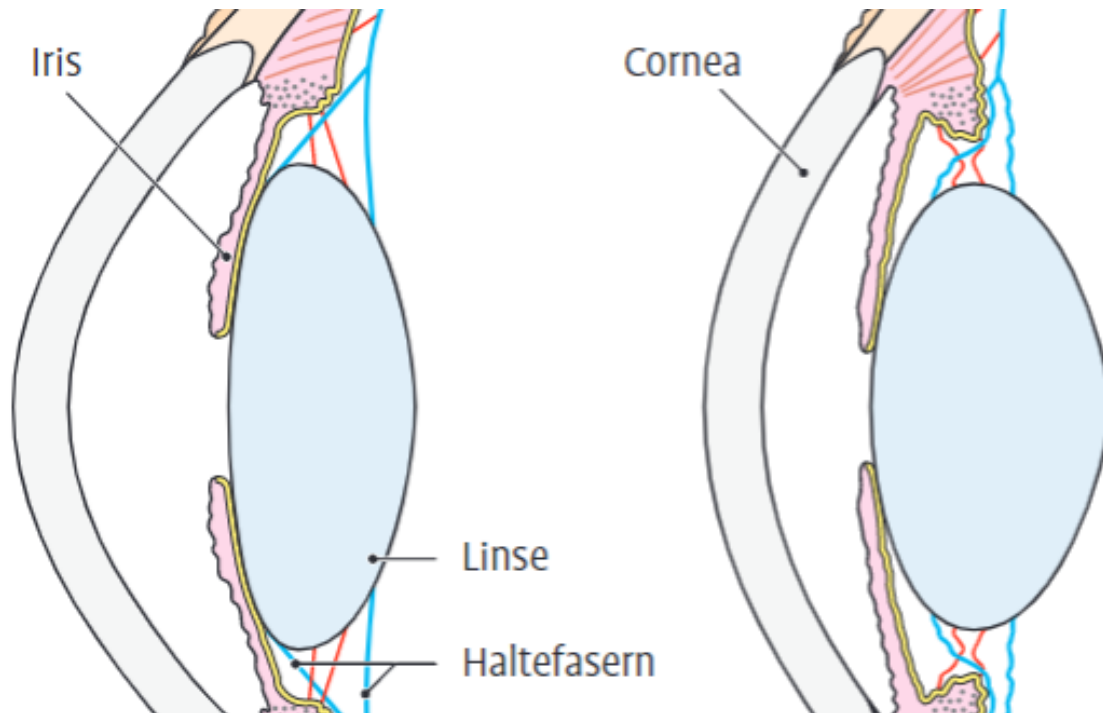


Abb. 2: Akkommodationsfähigkeit des Auges (vgl. Anderhuber & Pera & Streicher 2012, S. 884)

3.1 Die Lupe

Die Lupe, auch als Vergrößerungsglas bezeichnet, kann dazu benutzt werden, Gegenstände unter einem größeren Sehwinkel wahrzunehmen, als dies mit dem menschlichen Auge möglich wäre. Durch den größeren Sehwinkel können Gegenstände oder Details von Gegenständen wahrgenommen werden, welche dem Menschen sonst verborgen geblieben wären (vgl. Stuart & Klages 2010, S. 219 f.). Die Lupe besteht aus einer oder mehreren Linsen, wobei der Abstand der Linsen kleiner als jede Brennweite der im optischen System verwendeten Linsen ist (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 22). Während für kleinere Vergrößerungen bereits eine einzelne Linse zur Realisierung genügt, werden vor allem für Lupen ab einem Vergrößerungsfaktor von acht mehrere Linsen miteinander kombiniert (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 24). Der Strahlenverlauf bei einer Lupe wird durch Abb. 3 dargestellt, wobei die Linse der Lupe durch eine dünne bikonvexe Linse mit einer einzigen Hauptebe H realisiert wird. Zwei Strahlen, die in der Abb. 3 vom Punkt G_1 eines Objekts ausgehen, laufen nach dem Verlassen der Sammellinse auseinander. Die Lupe erzeugt somit kein reelles Bild, welches auf einem Schirm abgebildet werden könnte. Da sich jedoch die Rückverlängerungen der beiden Strahlen im Gegenstandsraum

schneiden, entsteht ein virtuelles Bild $G'G'_1$, welches durch ein menschliches Auge wahrgenommen werden kann. In Abb. 3 befindet sich das Auge im Brennpunkt F' und das virtuelle Bild in der deutlichen Sehweite l . Der Gegenstand ohne Lupe wird unter einem Winkel w gesehen, das Bild unter einem Winkel w' . Damit sind folgende Beziehungen zu finden:

$$\tan \frac{w'}{2} = \frac{y'}{l} \quad \text{und} \quad \tan \frac{w}{2} = \frac{y}{l} \quad \text{sowie} \quad \tan \frac{w'}{2} = \frac{y}{f} = \frac{y}{f}$$

$$\frac{y'}{y} = \tan \frac{w'}{2} : \tan \frac{w}{2} = \frac{y}{f} : \frac{y}{l} = \frac{l}{f}$$

f ist die Brennweite der Lupe. Da die Vergrößerung eines optischen Instruments durch

$$\frac{\text{Sehwinkel mit Instrument}}{\text{Sehwinkel ohne Instrument in Bezugssehweite}}$$

definiert ist, ergibt sich nach Abb. 3 folgende Formel für die von einer Lupe erzielte Vergrößerung (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 22 f.):

$$V_{\text{Lupe}} = \frac{l}{f}$$

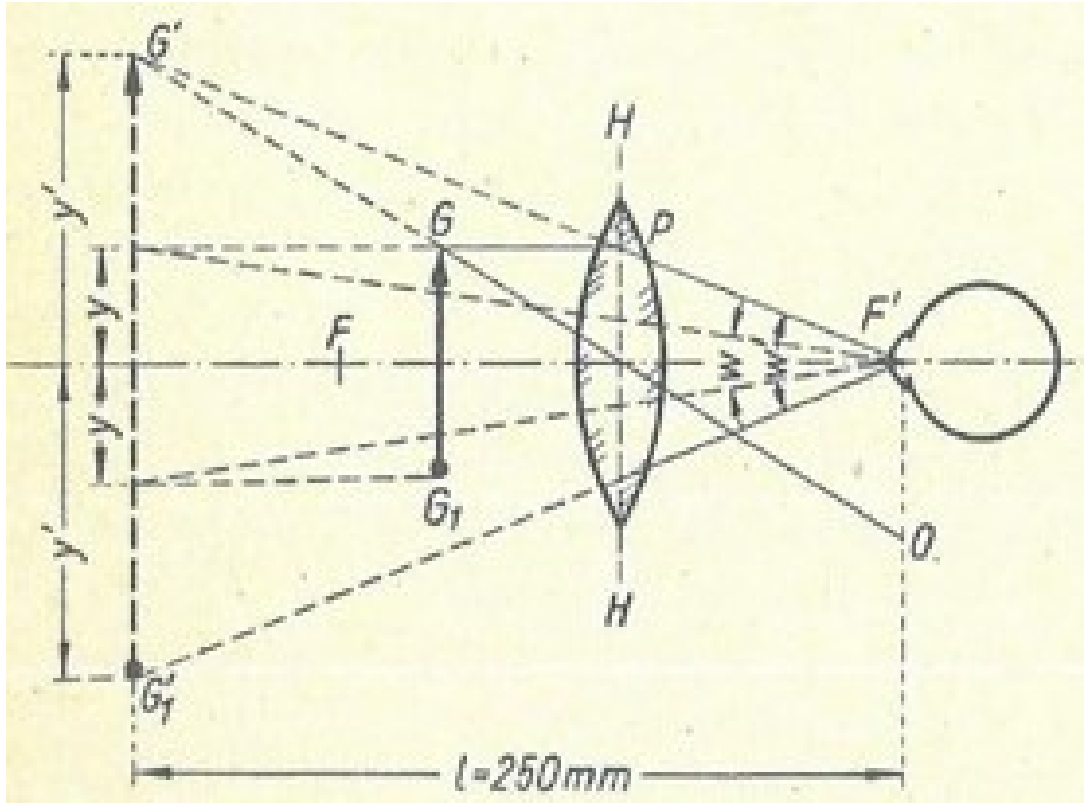


Abb. 3: Strahlengang der Lupe mit im Brennpunkt befindlichen Auge (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 22)

3.2 Strahlenbegrenzung und Blenden

Blenden bestimmen die Helligkeit des Bildes und die Größe des Gesichtsfeldes. Auch die Fassung einer Linse kann als Blende wirken. Blenden werden durch das optische System je nach Lage in den Bildraum und Gegenstandsraum abgebildet. Einer real vorhandenen Blende können immer ein oder zwei Blendenbilder zugeordnet werden. Die reale Blende wird Aperturblende und ihre Bilder werden Pupillen genannt. Das vom Objekt aus gesehene Bild der Aperturblende ist die Eintrittspupille, das vom Bild her gesehene Bild der Aperturblende ist die Austrittspupille (Gobrecht 1987, S. 131). Ist die Gesichtsfeldblende keine körperliche Blende, sondern das Bild einer Blende, wird dieses Luke genannt. Die Eintrittsluke liegt im Allgemeinen im Gegenstandsraum, die Austrittsluke im Bildraum (Gobrecht 1987, S. 136).

In Abb. 4 ist die Betrachtung eines Gegenstandes durch eine als Lupe fungierende dünne Sammellinse dargestellt. Das anguläre Gesichtsfeld wird mit σ' bezeichnet. Vom Objekt ausgehende Lichtstrahlen werden an der Sammellinse gebrochen, wobei die straffierten Lichtstrahlen nicht in die Augenlinse gelangen können. Bei der Lupe ist die Strahlenbegrenzung durch die Augenlinse gegeben. Die Augenlinse bildet somit bei der Betrachtung mit einer Lupe die Aperturblende, auch Öffnungsblende oder körperliche Blende genannt. Die Augenlinse in ihrer Funktion als Aperturblende legt die Helligkeit des erzeugten Bildes fest, während sie auf den dargestellten Bildausschnitt, auch Gesichtsfeld genannt, keine Auswirkung hat. Das vom Objekt aus betrachtete Bild der Aperturblende ist die Eintrittspupille und liegt in der Abb. 4 ganz rechts hinter dem Betrachter. Die Eintrittspupille begrenzt die in ein optisches System einfallenden Lichtstrahlen, wobei die Eintrittspupille bei der Lupe virtuell ist. Das vom Netzhautbild gesehene Bild der Aperturblende ist Austrittspupille und ist bei der Lupe mit der Augenpupille identisch, weil der Strahlenkegel auf das unendlich ferne Lupenbild zielt. Die Austrittspupille legt die minimal als auch die maximal nutzbare Vergrößerung eines optischen Geräts fest (Roth & Stahl 2019, S. 177 f.). Das Gesichtsfeld wird durch die Gesichtsfeldblende, auch Sehfeldblende genannt, bestimmt, wobei das objektseitige Bild der Gesichtsfeldblende als Eintrittsluke und das bildseitige Bild der Gesichtsfeldblende als Austrittsluke bezeichnet wird. Eintrittsluke und Austrittsluke fallen in der Abb. 4 zusammen und entsprechen dem Linsenrand, also der Fassung, in welcher die Sammellinse der Lupe eingebettet ist. Der Halbschatten-Bereich in der Abb. 4 entsteht, da die Apertur von achsenfernen Strahlenbüschel durch den Linsenrand begrenzt ist, wodurch weiter außen gelegene Punkte weniger hell erscheinen (Roth & Stahl 2019, S. 183).

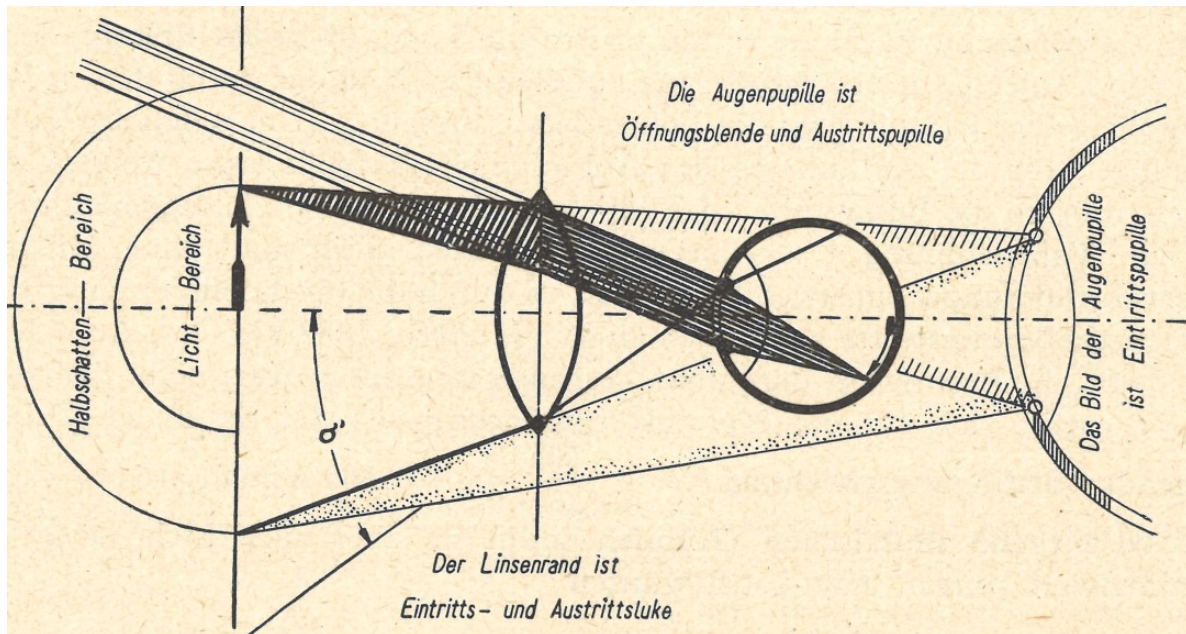


Abb. 4: Strahlenbegrenzung bei der Lupe (vgl. Michel 1950, S. 144)

3.3 Einfaches Mikroskop als Grenzfall der Lupe

Ab einem gewissen Vergrößerungsfaktor der Lupe tritt der Fall ein, dass die Strahlenbegrenzung nicht mehr von der Pupille des Auges, sondern von dem Linsensystem der Lupe gegeben ist. Erfolgt die Strahlenbegrenzung durch die vor das Auge gehaltene Linse, wird die optische Vorrichtung als einfaches Mikroskop und nicht mehr als Lupe bezeichnet. Das einfache Mikroskop kann stärkere Vergrößerungen als die Lupe gewährleisten, wobei das Gesichtsfeld hier stark eingeschränkt wird (vgl. Michel 1950, S. 146-148). Da das einfache Mikroskop heute keinen großen Stellenwert mehr für die Forschung hat und die Theorie des Mikroskops und des Fernrohres keiner genaueren Erläuterung des einfachen Mikroskops bedürfen, wird auf das einfache Mikroskop in dieser Arbeit nicht detaillierter eingegangen.

4 Das Mikroskop

Neben der Lupe und dem einfachen Mikroskop können in der Nähe befindliche Gegenstände durch ein zusammengesetztes Mikroskop vergrößert dargestellt werden. Ein zusammengesetztes Mikroskop ermöglicht im Vergleich zur Lupe wesentlich stärkere Vergrößerungen, wobei das Gesichtsfeld, wie etwa beim einfachen Mikroskop, nicht dermaßen eingeschränkt wird. Der Einfachheit wird das zusammengesetzte Mikroskop in den folgenden Teilen der Arbeit kurzum als Mikroskop bezeichnet.

Das Mikroskop wird von zwei optisch abbildenden Linsensystemen, dem Okular und Objektiv realisiert, wobei deren Abstand voneinander größer als die einander zugewandten Brennpunkte ist (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 25 f.). Okular und Objektiv befinden sich in einer Röhre, dem sogenannten Tubus, welcher auf der Innenseite schwarz lackiert ist. Die schwarze Lackierung hat die Funktion, mögliche auftretende Lichtreflexionen gering zu halten. Das Objektiv erzeugt von einem Gegenstand, welcher sich kurz außerhalb der Brennweite des Objektivs befindet, ein vergrößertes, verkehrtes und reelles Bild. Dieses reelle Bild, auch Zwischenbild genannt, fällt in die dem Objekt zugewandte Brennebene des Okulars. Das Okular hat hier die Funktion einer Lupe und erschafft eine vergrößerte, aufrechte und virtuelle Version des Zwischenbildes. (vgl. Stuart & Klages 2010, S. 220 f.). In Abb. 5 wird der Strahlenverlauf eines Mikroskops dargestellt, wobei hier Objektiv und Okular durch eine bikonvexe Sammellinse realisiert wurden. H_{Ok} und K_{Obj} bezeichnen die Hauptebenen von Okular und Objektiv. GG ist Gegenstand, $G'G'$ ist das vergrößerte reelle Zwischenbild und $G''G''$ ist das vom Auge wahrgenommene Bild. Mit F und F' und den Indices Obj und Ok werden die jeweiligen Brennweiten von Objektiv und Okular angegeben. Die Augenpupille liegt im oberen Brennpunkt des Okulars. T ist die Tubuslänge und gibt den Abstand der einander zugekehrten Brennebenen von Objektiv und Okular an. Mit den Winkeln w , w' , w'' und den Längen y , y' , y'' lässt sich die Vergrößerung des Mikroskops V berechnen:

$$V = \frac{y''}{y} = \frac{\tan w''}{\tan w} = \frac{\tan w''}{\tan w'} \cdot \frac{\tan w'}{\tan w}$$
$$\tan w'' = \frac{y'}{f_{Ok}} \quad \tan w' = \frac{y'}{t} = \frac{y}{f_{Obj}} \quad \tan w = \frac{y}{l}$$

Damit ergibt sich

$$V = \frac{\tan w''}{\tan w} = \frac{y'}{f_{ok}} \cdot \frac{t}{y'} \cdot \frac{y}{f_{obj}} \cdot \frac{l}{y} = \frac{t \cdot l}{f_{obj} \cdot f_{ok}}$$

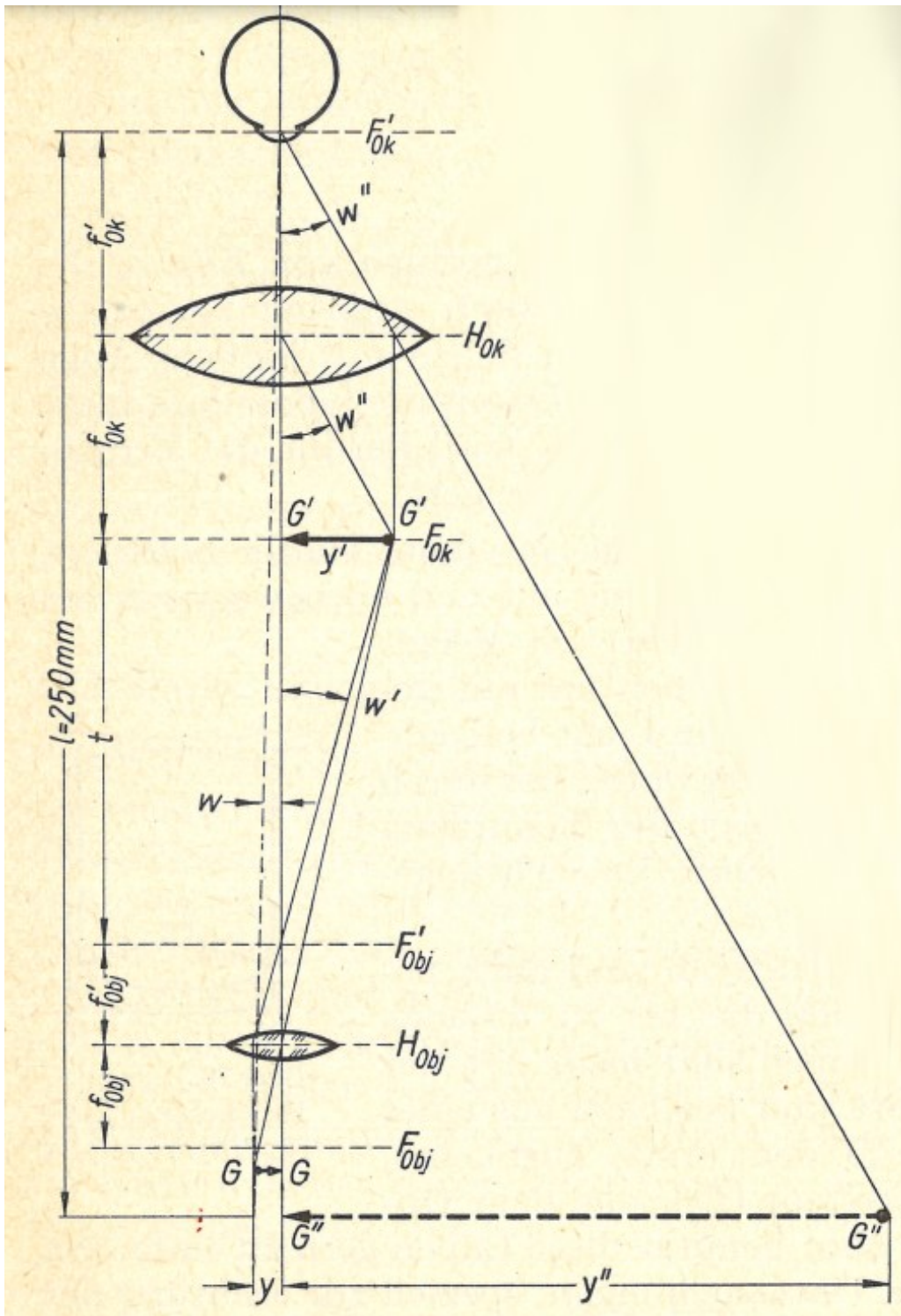


Abb. 5: Strahlengang beim Mikroskop (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 26)

4.1 Vergrößerung und Auflösungsvermögen

Da beim selben Mikroskop oftmals unterschiedliche Objektive und Okulare zum Einsatz kommen, bedarf es geeigneter Kennzahlen der Objektive und Okulare, aus welchen die Gesamtvergrößerung des Mikroskops bestimmt werden kann. Die Vergrößerung des Objektivs wird durch die Formel $\frac{t}{f_{\text{Objektiv}}}$ festgelegt, welche dem Maßstab des vom Objektiv entworfenen Zwischenbilds entspricht. Objektive mit einer nach der obigen Definition gekennzeichneten Maßstabszahl, sind auf eine gleichbleibende optische Tubuslänge t angewiesen. $\frac{l}{f_{\text{Okular}}}$ legt die Vergrößerung des Okulars fest. Die Vergrößerung eines Mikroskops ergibt sich aus der Multiplikation der oben definierten Kennzahlen von Objektiv und Okular (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 26 f.).

$$V = V_{\text{Okular}} \cdot V_{\text{Objektiv}} = \frac{t}{f_{\text{Objektiv}}} \cdot \frac{s}{f_{\text{Okular}}}$$

- V ... Vergrößerung Mikroskop
- V_{Okular} ... Vergrößerung Okular
- V_{Objektiv} ... Maßstab Objektiv
- t ... Optische Tubuslänge
- f_{Objektiv} ... Brennweite Objektiv
- f_{Okular} ... Brennweite Okular
- s ... Deutliche Sehweite (erfordert entspanntes Auge)

Das Austauschen eines Objektivs beim Mikroskopieren ermöglicht unterschiedliche Gesamtvergrößerungen des Mikroskops, wobei die Probe beim Objektivwechsel neu scharf gestellt werden muss. Eine Alternative bietet der Einsatz von abgeglichenen Objektiven mit entsprechenden Fassungen, bei welchem der Tubus beim Objektivwechsel in seiner Position belassen werden kann. Die unterschiedlichen Fassungen der Objektive führend hierbei zu einer Änderung der optischen Tubuslänge (vgl. Michel 1950, S. 134 f.). Abb. 6 zeigt die beiden Varianten eines Objektivwechsels. Beim linken Teil der Abb. 6 muss bei einem Objektivwechsel der Tubus neu eingestellt werden, während es sich beim rechten Teil der Abb. 6 um abgegliche Objektive handelt.

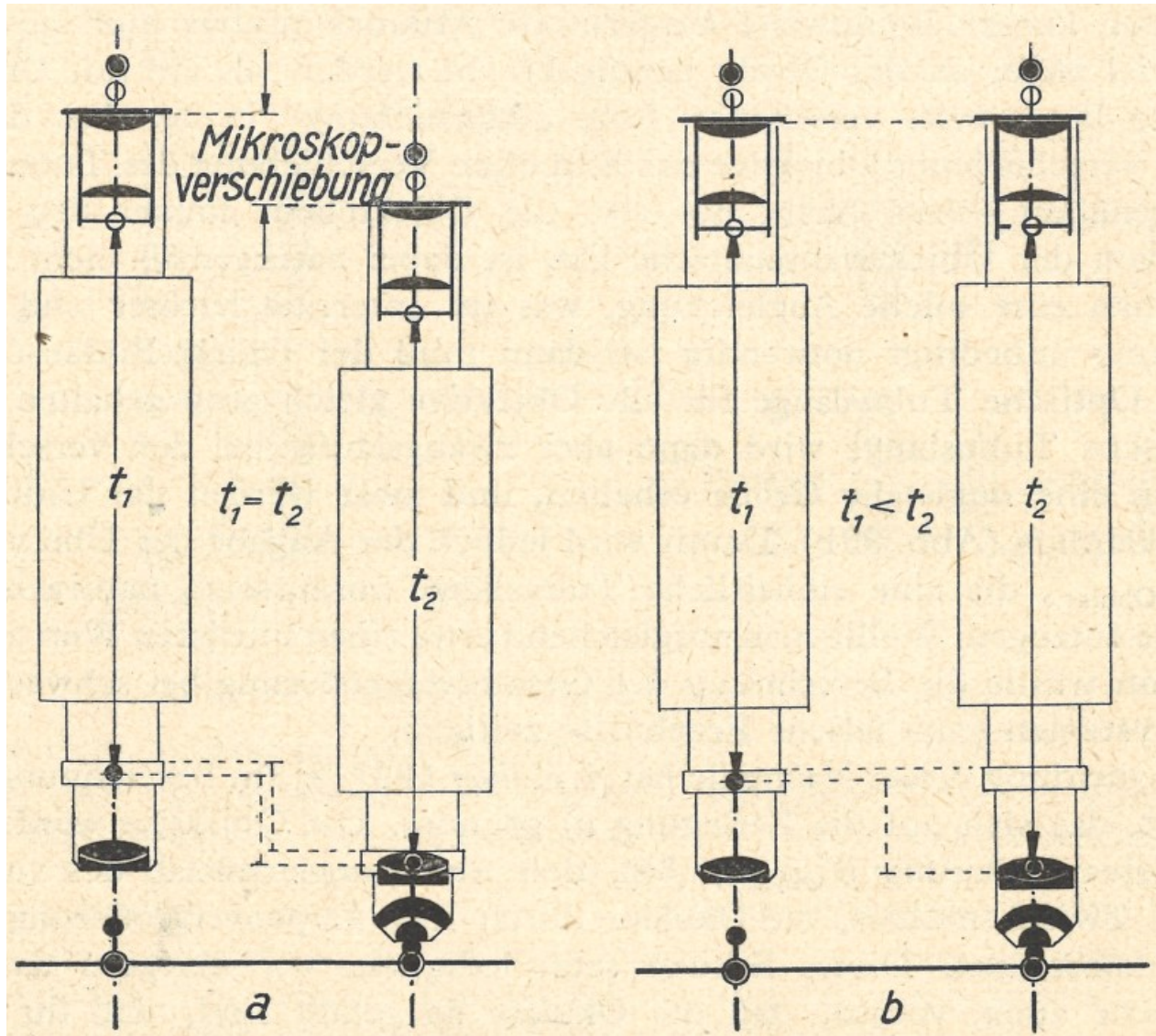


Abb. 6: Abgleichung der Mikroskopobjektive (vgl. Michel 1950, S. 136)

Unter dem Auflösungsvermögen eines Mikroskops versteht man den geringsten Abstand, den zwei Punkte eines Objekts haben dürfen, um noch getrennt voneinander wahrgenommen zu werden. Das theoretische Auflösungsvermögen eines Lichtmikroskops wird durch folgende Formel beschränkt (Pfeiler 2021, S. 142ff):

$$d_{min} = \frac{1,22 \cdot \lambda}{n \cdot \sin(u)}$$

- d_{min} ... Kleinster mit dem Mikroskop darstellbarer Abstand zweier Punkte

- λ ... Wellenlänge des Lichts
- n ... Brechzahl des Mediums zwischen Objekt und Objektiv
- u ... Halber Öffnungswinkel des einfallenden Lichtbündels

Der Term **$n \sin u$** wird numerische Apertur A genannt. Da bei Trockenobjektiven (an Luft) der größte Wert, welchen n und $\sin(u)$ annehmen können, 1 ist, ergibt sich als minimal darstellbarer Abstand für zwei Punkte eines Objekts ca. die Wellenlänge λ des Lichts selbst. Die Wellenlänge des Lichts bildet somit einen beschränkenden Faktor beim Auflösungsvermögen, welcher nicht überschritten werden kann. Gute Immersionsobjektive können eine numerische Apertur von 1,35 erreichen (Pfeiler 2021, S. 230).

4.2 Objektiv und Okular

Das Objektiv stellt den wohl wichtigsten Bestandteil des Mikroskops dar, da Details, die nicht im vom Objektiv erzeugten Zwischenbild sichtbar sind, auch nicht durch die erneute Abbildung vom Okular sichtbar gemacht werden können. Zudem sind die Ansprüche der Behebung von Linsenfehlern beim Objektiv um einiges höher als beim Okular. Die wichtigsten Kenngrößen, die für gewöhnlich am Objektiv vermerkt sind, sind die Maßstabszahl und die numerische Apertur. Die Objektive sind für eine bestimmte Tubuslänge und Deckglasdicke kalibriert, wobei auch diese Werte für gewöhnlich am Objektiv vermerkt sind (vgl. Michel 1950, S. 55). Bei Objektiven existieren zwei unterschiedliche Systeme, nämlich:

- Trockensysteme
- Immersionssysteme

Der Unterschied der beiden Systeme besteht darin, dass bei einem Trockensystem der Raum zwischen Deckglas und Objektiv mit Luft gefüllt ist, während derselbe Raum beim Immersionssystem mit einer Flüssigkeit wie etwa Zedernholzöl gefüllt wird. Durch die Flüssigkeit beim Immersionssystem wird Totalreflexion am Deckglas des Präparats vermieden, was zu einem größeren Einfallswinkel des in das Objektiv treffenden Lichtstrahlen führt. Durch Immersionssysteme kann somit die Helligkeit einer optischen Abbildung erhöht werden (vgl. Meschede 2015, S. 512 f.). Bei den möglichen Abbildungsfehlern müssen beim Objektiv all jene berücksichtigt werden, die bei weit geöffnetem und achsennahem Strahlenbüschel eine tragende Rolle spielen, wie etwa die sphärische Aberration oder der Sinusfehler. Weist das zu untersuchende

Objekt eine gewisse Ausdehnung auf, müssen jedoch auch Abbildungsfehler berücksichtigt werden, die sich bei achsenfernen Strahlenverläufen bemerkbar machen (vgl. Michel 1950, S. 169). Objektive werden nach dem Grad ihrer chromatischen Aberration in Achromate, Apochromate, Semi-Apochromate und Monochromate unterteilt. Auf die einzelnen Abbildungsfehler, wie etwa die chromatische Aberration, wird genauer im Punkt „Abbildungsfehler beim Mikroskopieren“ eingegangen (vgl. Michel 1950, S. 169).

Okulare können gezielt dazu eingesetzt werden, Fehler in der Abbildung, welche durch das Objektiv hervorgerufen werden, zu kompensieren. Die meisten Okulare sind abgeglichen, wodurch das erzeugte Bild bei einem Wechsel des Okulars nicht neu scharf gestellt werden muss. Erreicht wird die Abgleichung der Okulare durch eine vom Tubusrand aus gemessene gleichbleibende Bildlage (vgl. Michel 1950, S. 61 f.). Für die Realisierung des Okulars haben sich verschiedene Kombinationen von Linsensystemen entwickelt, wobei das Huygen'sche Okular den heutzutage am häufigsten verwendeten Aufbau darstellt. Das Huygen'sche Okular, welches in Abb. 7 dargestellt wird, besteht aus zwei Linsen, der Feldlinse (Kollektivlinse) K und der Augenlinse A. Ein wesentlicher Vorteil an diesem Aufbau besteht darin, dass durch die Feldlinse das Gesichtsfeld des Mikroskops wesentlich vergrößert werden kann. Das erzeugte Bild B''C'' in der Abb. 7 ist unwesentlich kleiner als das Bild B'C', welches ohne Feldlinse entstehen würde. Der minimale Verlust der Bildvergrößerung kann problemlos durch ein stärkeres Objektiv kompensiert werden. Neben einem größeren Sehfeld heben die sphärischen Aberrationen der beiden Linsen sich nahezu vollständig auf, da die beiden von B ausgehend gezeichneten Teilbündel nämlich zwischen den Linsen K und A ihre Position tauschen. Der dritte Vorteil des Huygen'schen Okulars besteht in der Minimierung der chromatischen Aberration, da die chromatische Aberration der Augenlinse die chromatische Aberration der Feldlinse kompensiert (vgl. Meschede 2015, S. 511 f.).

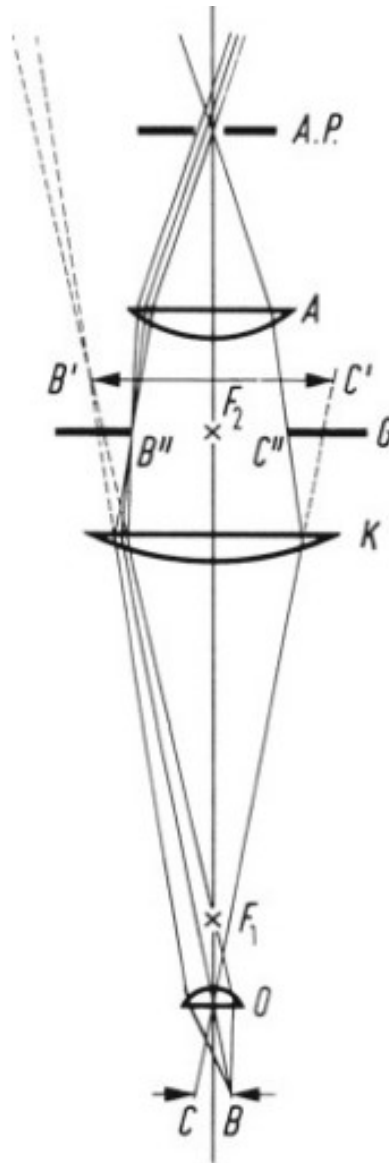


Abb. 7: Aufbau des Huygen'schen Okulars (vgl. Stuart & Klages 2010, S. 221)

4.3 Beleuchtungsarten

Da die meisten Objekte, die näher mit dem Mikroskop untersucht werden, selbst nicht leuchten, müssen diese durch eine Lichtquelle beleuchtet werden. Grundsätzlich lassen sich beim Mikroskopieren zwei unterschiedliche Arten der Beleuchtung unterscheiden:

- Beleuchtung mit auffallendem Licht: Die Lichtstrahlen treffen von der dem Betrachter zugewandten Seite der Probe auf das Objekt und werden durch Reflexion in das Objektiv gelenkt.
- Beleuchtung mit durchfallendem Licht: Die Strahlen treffen von der dem Betrachter abgewandten Seite der Probe in das Objektiv.

Die Lichtstrahlen bei durchfallendem Licht werden mit Hilfe eines Umlenkspiegels durch die Probe gelenkt, wobei sich bei älteren Mikroskopen auf einer Seite des Umlenkspiegels ein Hohlspiegel und auf der anderen Seite ein Planspiegel befindet. Bei Objektiven mit geringerer Vergrößerung wird meist der Hohlspiegel benutzt, welcher eine umlenkende und sammelnde Funktion der Lichtstrahlen innehat. Die parallel auf den Hohlspiegel auffallenden Lichtstrahlen werden in der Objektebene konzentriert. Eine Darstellung für die Beleuchtung mit Hohlspiegel findet sich in Abb. 8. Die in Abb. 8 dargestellten Öffnungen o, m und u stellen Zylinderblenden dar, welche eine Überstrahlung im Objekt ohne die Verwendung eines Kondensors verhindern sollen. In der Abb. 8 ist ersichtlich, dass eine nähere Justierung der Zylinderblende am Präparat eine kleinere einsetzbare Öffnung der Zylinderblende erfordert. In Position m werden die Strahlen 4 ausgeblendet, in Position u auch die Strahlen 3. Die Zylinderblenden sind dabei so eingestellt, dass nur der ins Sehfeld gelangende Teil des Präparats beleuchtet wird. Die Zylinderblenden fungieren hierbei als Leuchtfeldblenden. Neben Zylinderblenden können auch Revolverblenden verwendet werden, wobei die verschieden großen Öffnungen sich auf einer drehbaren Metallscheibe befinden (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 67 f.).

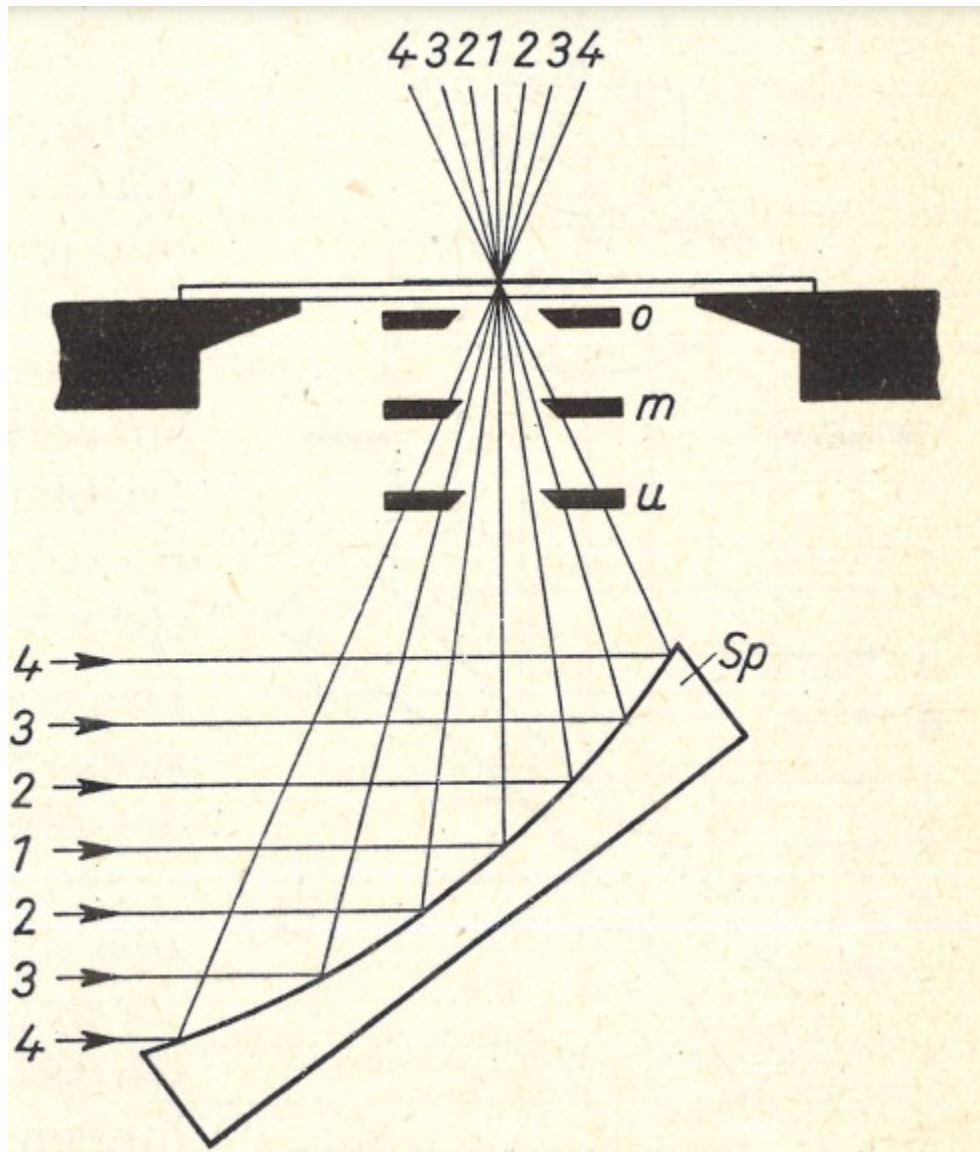


Abb. 8: Beleuchtung mit Hohlspiegel (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 67)

Für Objektive mit einer stärkeren Vergrößerung verwendet man als Umlenkspiegel einen Planspiegel und ergänzt den Beleuchtungsapparat um einen Kondensor. Der Planspiegel wirft das parallele Licht in Richtung des Kondensors, welcher die Lichtstrahlen in der Objektelebene konzentriert. Die Beleuchtung eines Planspiegels mit Kondensor wird durch Abb. 9 dargestellt, wobei in der unteren Brennebene des Kondensors sich eine Irisblende B befindet, mit welcher die Randstrahlen begrenzt werden können. Die Blende des Kondensors hat somit die Funktion einer Aperturblende. m gibt den richtigen Fokuspunkt für den Kondensor an. Bei o wäre der Kondensor zu hoch, bei u zu niedrig eingestellt (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 68).

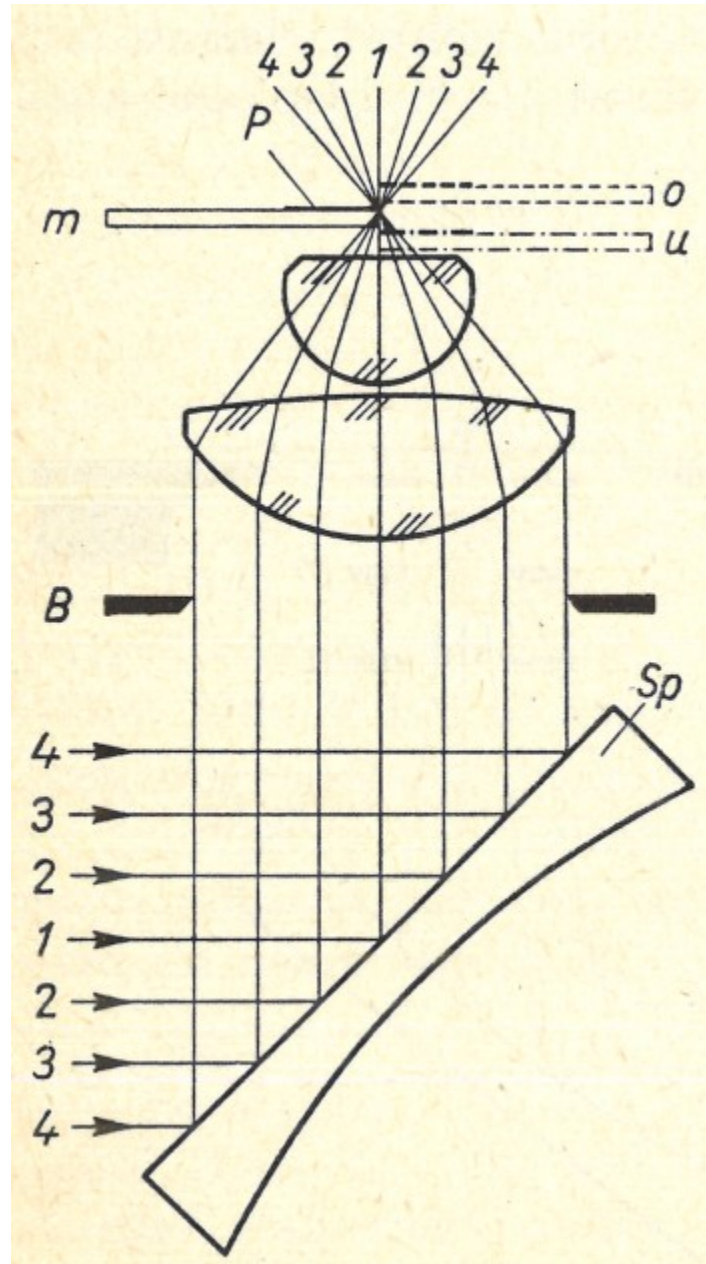


Abb. 9: Beleuchtung mit Planspiegel und Kondensator (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 68)

Wird die Lichtquelle in das Präparat abgebildet, so muss diese in ihrer Ausdehnung vollkommen homogen sein, da es sonst zu einer ungleichmäßigen Beleuchtung der Sehfeldblende kommt. Die daher heutzutage bevorzugte Variante besteht in der Abbildung der Lichtquelle in die untere Brennebene des Kondensors, wobei man hier auch von dem „Köhlerschen Beleuchtungsprinzip“, benannt nach August Köhler, spricht. Bei dem „Köhlerschen Beleuchtungsprinzip“ wird die

Lichtquelle durch einen Kollektor in die untere Brennebene des Kondensors abgebildet, von wo aus eine weitere Abbildung durch das Präparat hindurch in die hintere Brennebene des Objektivs erfolgt. Schließlich wird die in der hinteren Brennebene des Objektivs erzeugte Abbildung durch ein Okular in die Augenpupille abgebildet (vgl. Trapp 1958, S. 76 f.).

4.4 Strahlenbegrenzung

Um ein klares, gleichmäßiges Bild mit dem Mikroskop zu erhalten, sind Nebenlicht und ungewollte Reflexe zu vermeiden. Dies wird durch Blenden erreicht, welche die Strahlenbüschel begrenzen. Abb. 10 stellt die Strahlenbegrenzung beim zusammengesetzten Mikroskop dar (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 31). Neben den jeweils zwei Objektiv- und Okularlinsen (Augenlinse, Feldlinse) sind zwei körperliche Blenden eingezeichnet: Die Okularblende oder Sehfeldblende $\bar{O}K$ am Ort des Zwischenbildes und die Objektivblende OB , welche durch den Fassungsrand einer Linse gegeben ist. Diese beiden Blenden werden durch das Linsensystem sowohl in den Bildraum als auch in den Objektraum abgebildet. Die Okularblende $\bar{O}K$ wird einerseits als Eintrittsluke $K'\bar{O}'$ in die Objektebene abgebildet und andererseits als Austrittsluke $\bar{A}L'$ und als Eintrittsluke des Okulars $\bar{E}L$. Die Objektivblende OB wird als Eintrittspupille des Objektivs EP abgebildet und als Austrittspupille des Objektivs AP' . Die vom Objektiv kommenden Strahlen werden vom Okular so gebrochen, dass sie durch den Kreis $B'O'$ (Augenkreis oder Okularkreis) verlaufen. Der Okularkreis fällt zusammen mit dem Bild, welches das Okular von der Austrittspupille AP' des Objektivs entwirft. Der Okularkreis ist die Austrittspupille des ganzen Mikroskops, während EP die Eintrittspupille des Mikroskops ist. Würde sich die Aperturblende vor dem Linsensystem des Mikroskops befinden, wäre die Aperturblende mit der Eintrittspupille identisch. (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 30-33). Abschließend sei für Abb. 10 bemerkt, dass die Querstriche über E , A und O für Luken stehen, wobei E für Eintritt und A für Austritt stehen.

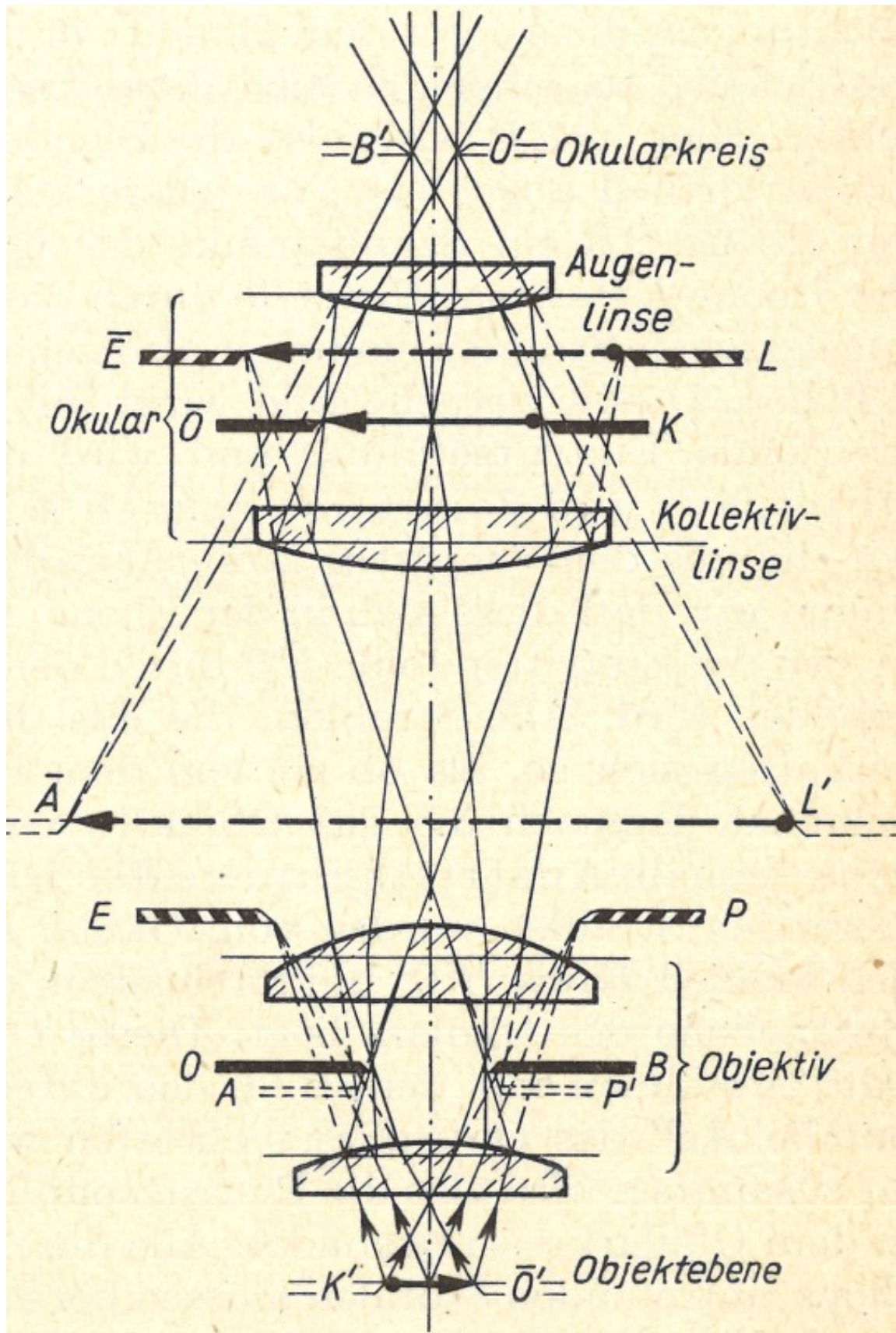


Abb. 10: Strahlenbegrenzung im Mikroskop (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 31)

4.5 Abbildungsfehler

Unter Abbildungsfehlern versteht man ungewollte Erscheinungen in einer optischen Abbildung wie Farbsäume, Verzerrungen oder andere Mängel. Im Kapitel 4.5 wird auf die wichtigsten Abbildungsfehler beim Mikroskopieren eingegangen und wie diese behoben oder zumindest teilweise eingeschränkt werden können.

4.5.1 Sphärische Aberration (Öffnungsfehler)

Treffen Lichtstrahlen auf eine Linse von großer Öffnung, wird ein Gegenstandspunkt nie auf einen einzigen Bildpunkt abgebildet. Es entsteht eine räumlich ausgedehnte Lichtfigur. Abb. 11 zeigt, wie die in verschiedenen Zonen der Linse auftreffenden Strahlen verschiedene Schnittweiten aufweisen. Bei Sammellinsen ist die Schnittweite s der Randstrahlen kleiner als die Schnittweite der Achsenstrahlen. Eine Sammellinse gilt als sphärisch unterkorrigiert. Bei Zerstreuungslinsen ist die Schnittweite s der Randstrahlen größer als die Schnittweite der Achsenstrahlen. Eine Zerstreuungslinse gilt als sphärisch überkorrigiert (vgl. Michel 1950, S. 42 f.).

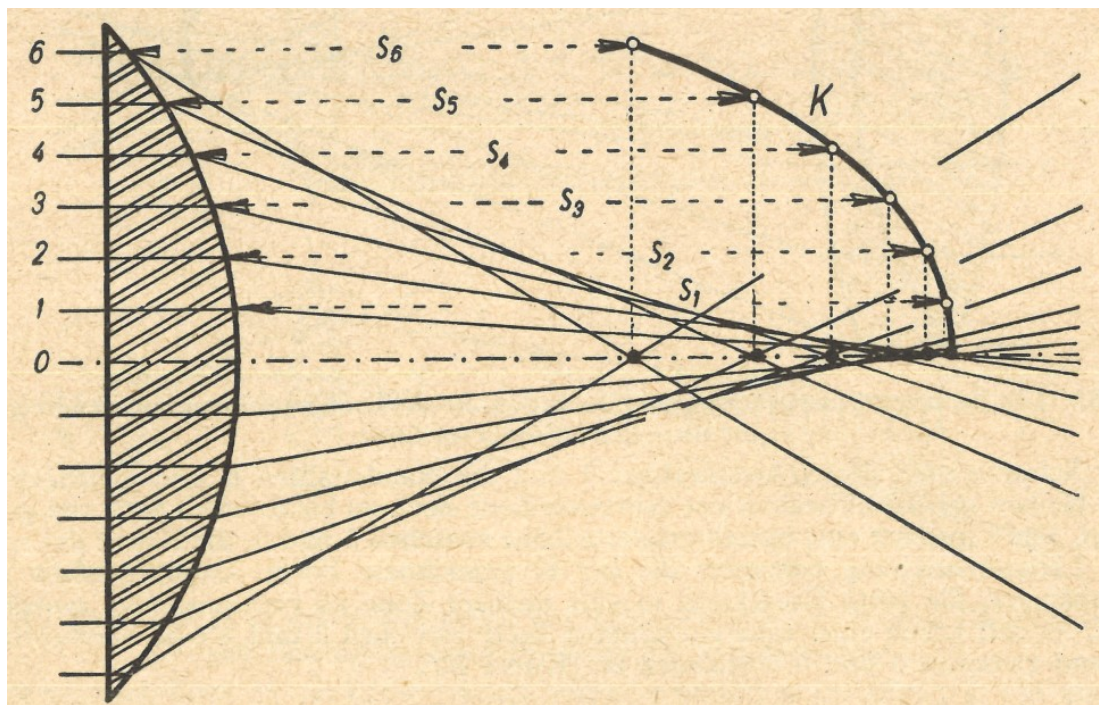


Abb. 11: Sphärische Aberration an einer Sammellinse mit den Schnittweiten s (vgl. Michel 1950, S. 43)

Aus der Kombination von sphärisch überkorrigierten und sphärisch unterkorrigierten Linsen lässt sich die sphärische Aberration minimieren (vgl. Michel 1950, S. 44). Diese Möglichkeit wird in Abb. 12 dargestellt. Eine weitere Option besteht im Ausblenden der äußeren Strahlen durch eine Blende, was aber zu einer geringeren Lichtintensität führt und daher nur eine suboptimale Lösung bietet (vgl. Stuart & Klages 2010, S. 213).

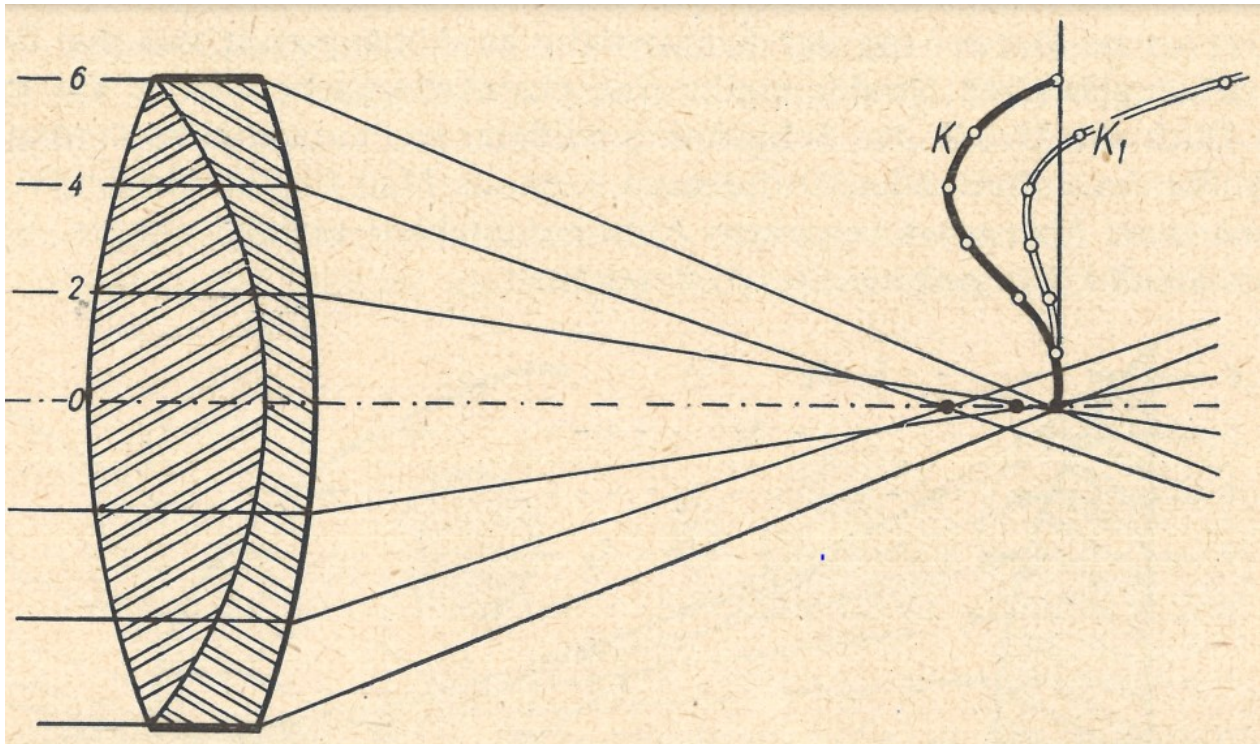


Abb. 12: Minimierung der sphärischen Aberration durch sphärisch über- und unterkorrigierte Linsen (vgl. Michel 1950, S. 44)

Die dritte Alternative, die sphärische Aberration zu minimieren, besteht in der Wahl einer Linse mit einer kleinen Öffnung und dafür größeren Brennweite. Soll die gleiche Brennweite wie bei einer Linse mit großer Öffnung erzielt werden, können mehrere Linsen mit kleiner Öffnung kombiniert werden. Die Konvergenz der Strahlen wird hier an jeder Schnittfläche nur geringfügig abweichen. Eine vierte Möglichkeit, die sphärische Aberration auch bei einer einzigen Linse klein zu halten, besteht in der Wahl einer asphärischen statt einer kugelförmigen Form für die Linse (vgl. Michel 1950, S. 44).

4.5.2 Sinusbedingung

Während durch die Korrektur der sphärischen Aberration weit geöffnete Strahlenbüschel nahezu die gleichen Schnittweiten aufweisen, treten auch bei kleinen Abweichungen der Lichtstrahlen von der optischen Achse bereits unscharfe Bilder auf. Der Grund für diese unscharfe Abbildung besteht darin, dass Lichtstrahlen, welche auf unterschiedliche Zonen einer Linse treffen, zu unterschiedlichen Vergrößerungen führen (vgl. Michel 1950, S. 44 f.).

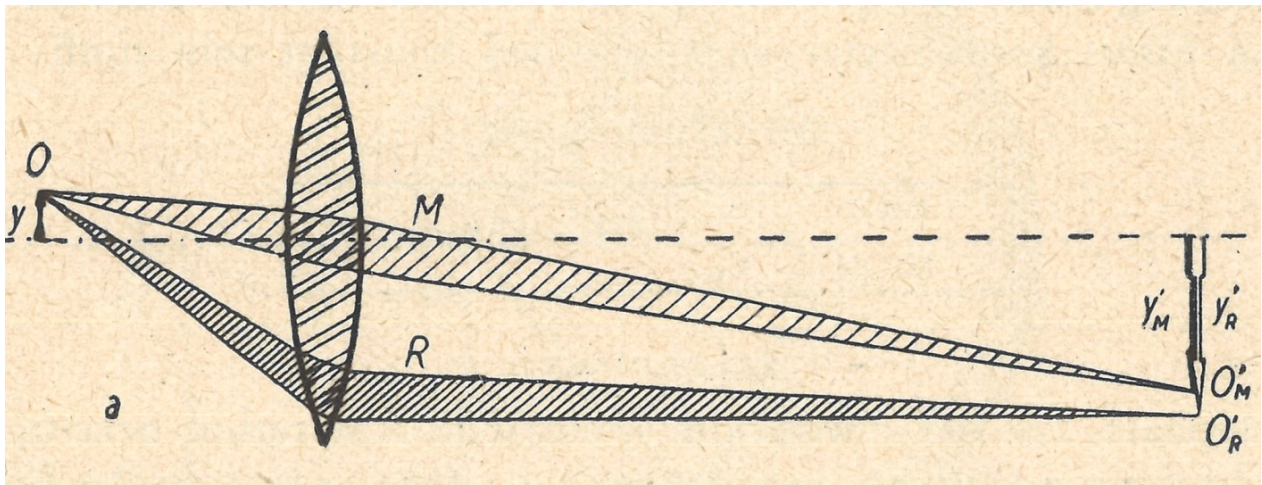


Abb. 13: Unterschiedliche Vergrößerungen durch unterschiedliche Zonen der Linse (vgl. Michel 1950, S. 45)

Um ein scharfes Bild zu erzeugen, müssen die Lichtbündel, welche auf die verschiedenen Zonen der Linse treffen, die Bildebene in der gleichen Größe durchdringen. Neben der Korrektur der sphärischen Aberration muss für die Realisierung eines scharfen Bildes dafür gesorgt werden, dass sämtliche Zonen des abbildenden Systems gleich stark vergrößert werden. Dieser Umstand lässt sich durch die von Abbe definierte Sinusbedingung realisieren (vgl. Michel 1950, S. 45-48):

$$\frac{n \cdot \sin \alpha}{n' \cdot \sin \alpha'} = \beta' = \text{konstant}$$

- $n \dots$ Brechungsindex im Objektraum
- $n' \dots$ Brechungsindex im Bildraum
- $\alpha \dots$ Winkel zwischen Lichtstrahl und optischer Achse im Objektraum
- $\alpha' \dots$ Winkel zwischen Lichtstrahl und optischer Achse im Bildraum

- β' ... paraxialer Abbildungsmaßstab

Die Herleitung der Abbe'schen Sinusbedingung zeigt z.B. W. Pfeiler (Pfeiler 2021, S. 181ff.)

4.5.3 Der Astigmatismus und die Bildkrümmung

Der Astigmatismus wird auch als Punktlosigkeit beziehungsweise Zweischalenfehler bezeichnet. Es handelt sich beim Astigmatismus um einen Abbildungsfehler, welcher bei schräg einfallenden Lichtstrahlen auf eine sphärische Linse zu Tragen kommt. Für die meridionale und die darauf senkrecht stehende sagittale Ebene ergeben sich unterschiedliche Schnittweiten (vgl. Gerhard 2020, S. 128 f.).

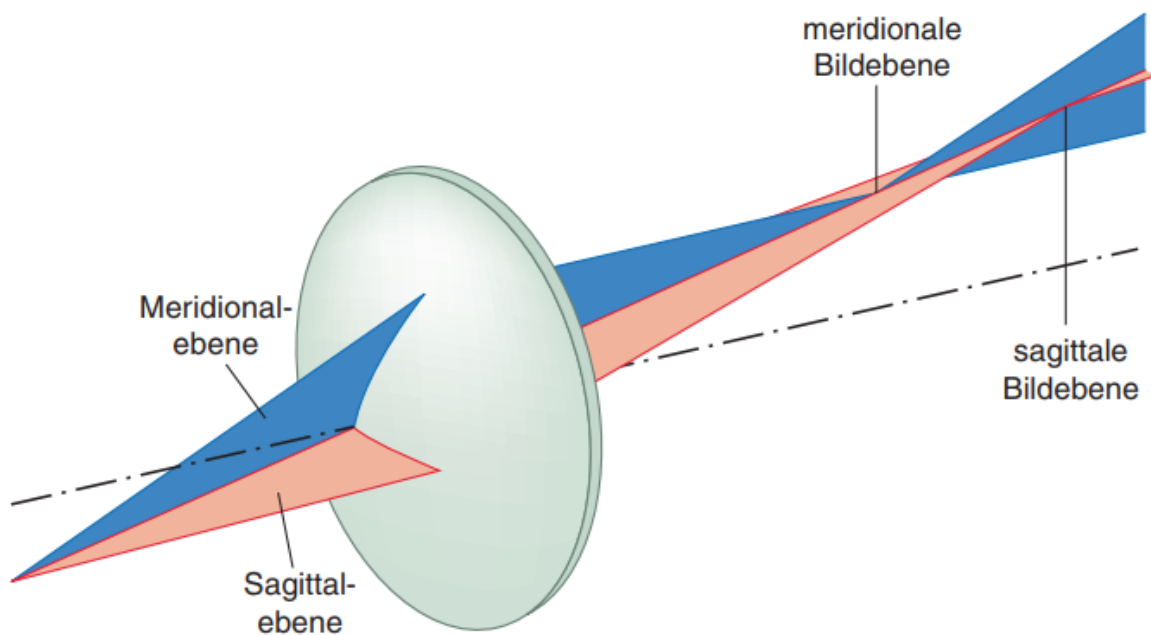


Abb. 14: Entstehung des Astigmatismus durch ein schräg einfallendes Lichtbündel (vgl. Gerhard 2020, S. 128)

Dieser Abbildungsfehler führt dazu, dass, wenn die Mitte des Bildes scharf gestellt wird, die äußeren Teile des Bildes unscharf werden. Aus einer Scharfstellung der äußeren Bildteile folgt, dass entweder nur die radialen oder tangentialen Linien der Bildmitte scharf abgebildet werden. Eine Beseitigung des Astigmatismus kann durch eine gezielte Kombination brechender Flächen

angestrebt werden (vgl. Michel 1950, Seite 48 f.). Optische Linsensysteme, bei welchem der Astigmatismus beseitigt ist, werden als Anastigmaten bezeichnet. Streng abzugrenzen ist der hier verwendete Begriff des Astigmatismus vom alltäglichen Gebrauch des Astigmatismus, welcher sich auf das menschliche Auge bezieht. Der Abbildungsfehler beim menschlichen Auge bezieht sich auf fehlerhafte Unterschiede in der Linsenkrümmung (vgl. Stuart & Klages 2010, S. 214).

Auch wenn der Astigmatismus beseitigt wird, liegt das Bild aufgrund der Krümmung nicht in einer Ebene. Durch die Akkommodationsfähigkeit des Auges und die Einstellvorrichtung des Auges ergeben sich hier weniger Probleme, da bestimmte Teile gezielt scharf gestellt werden können. Eine Projektion des Bildes auf eine Fläche gestaltet sich aber aufgrund der Bildkrümmung als schwierig (vgl. Michel 1950, S. 50).

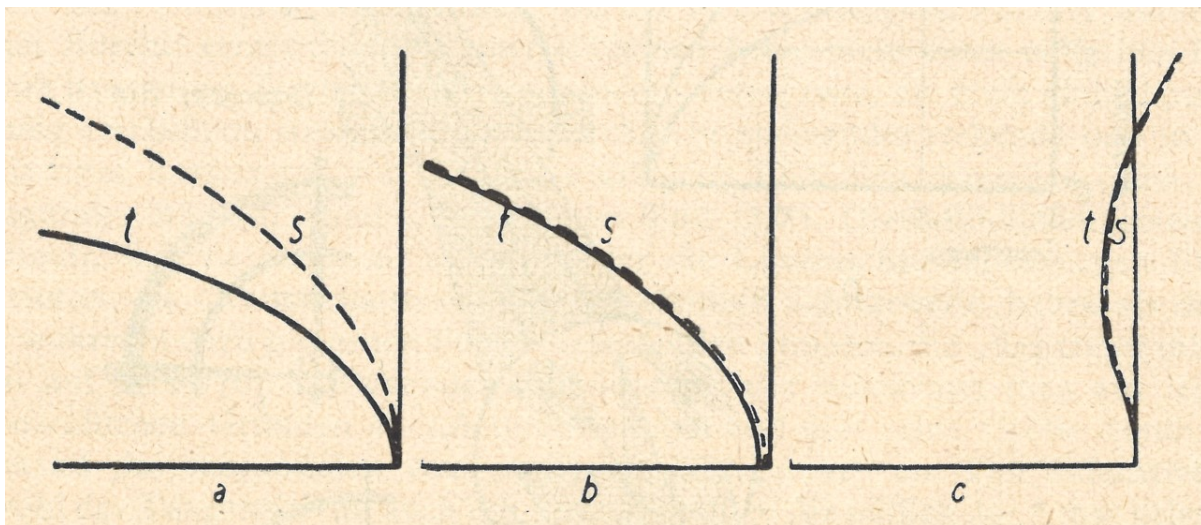


Abb. 15: Astigmatismus und Bildkrümmung (vgl. Michel 1950, S. 50)

In der Abb. sind im Punkt a sowohl Astigmatismus als auch Bildkrümmung vorhanden. Die Linie s steht für die sagittale Ebene und t steht für die meridionale Ebene. Im Punkt b der Abb. 45 zeigt sich, dass zwar der Astigmatismus beseitigt ist, aber eine Bildkrümmung weiterhin besteht. In Punkt c wurden sowohl der Astigmatismus als auch die Bildkrümmung minimiert, wenn auch nicht vollständig eliminiert. Punkt c der Abb. 15 stellt ein anastigmatisch gezeichnetes Bild dar. Um ein

anastigmatisch gezeichnetes Bild zu erhalten, muss die Petzval-Summe über alle Flächen eines Linsensystems gleich null sein (vgl. Michel 1950, S. 50):

$$-\sum_i n_i \cdot f_i = 0$$

- f_i ... Brennweite der Linse i
- n_i ... Brechungsindex der Linse i

4.5.4 Verzeichnung

Bei der Verzeichnung handelt es sich um einen optischen Abbildungsfehler, wobei hier zwei verschiedene Arten von Verzeichnungen auftreten können:

- Tonnenverzeichnung: Lichtstrahlen, die von einem Gegenstandspunkt ausgehen, welcher nicht auf der optischen Achse liegt, sollten sich am Zentralstrahl, der durch die Mitte der Linse verläuft, schneiden. Befindet sich eine Blende im Objektraum, treffen sich die Randstrahlen nicht am Zentralstrahl, sondern liegen näher an der optischen Achse als der Zentralstrahl. Da die Eckpunkte eines erzeugten Bildes sich noch weiter von der optischen Achse entfernt befinden, kommt dieser Effekt hier stärker zu tragen, was zu einer tonnenförmigen Verzeichnung führt (siehe Abb. 16).
- Kissenverzeichnung: Bei der kissenförmigen Verzeichnung gilt ein ähnliches Prinzip wie bei der tonnenförmigen Verzeichnung, nur dass sich die Blende hier im Bildraum befindet. Die Randstrahlen, welche die Blende noch passieren können, befinden sich hier weiter von der optischen Achse entfernt als der Zentralstrahl. Dieser Effekt führt zu einer kissenförmigen Verzeichnung (siehe Abb. 17).

(vgl. Gerhard 2020, S. 129 f.)

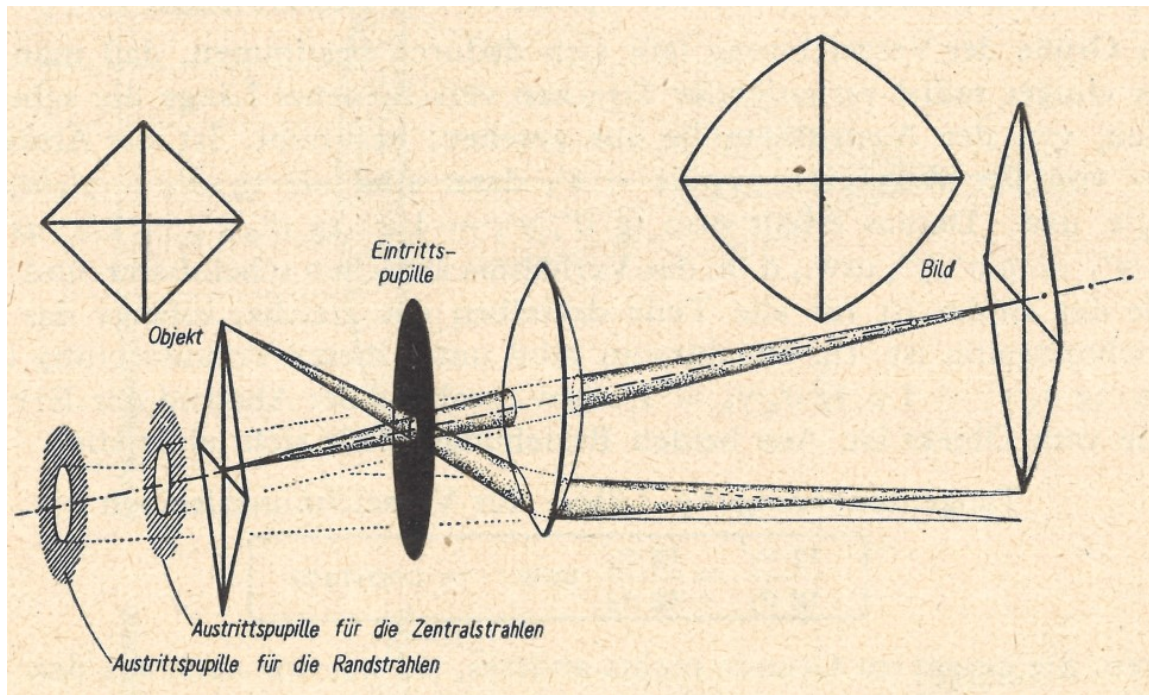


Abb. 16: Tonnenförmige Verzeichnung (vgl. Michel 1950, S. 51)

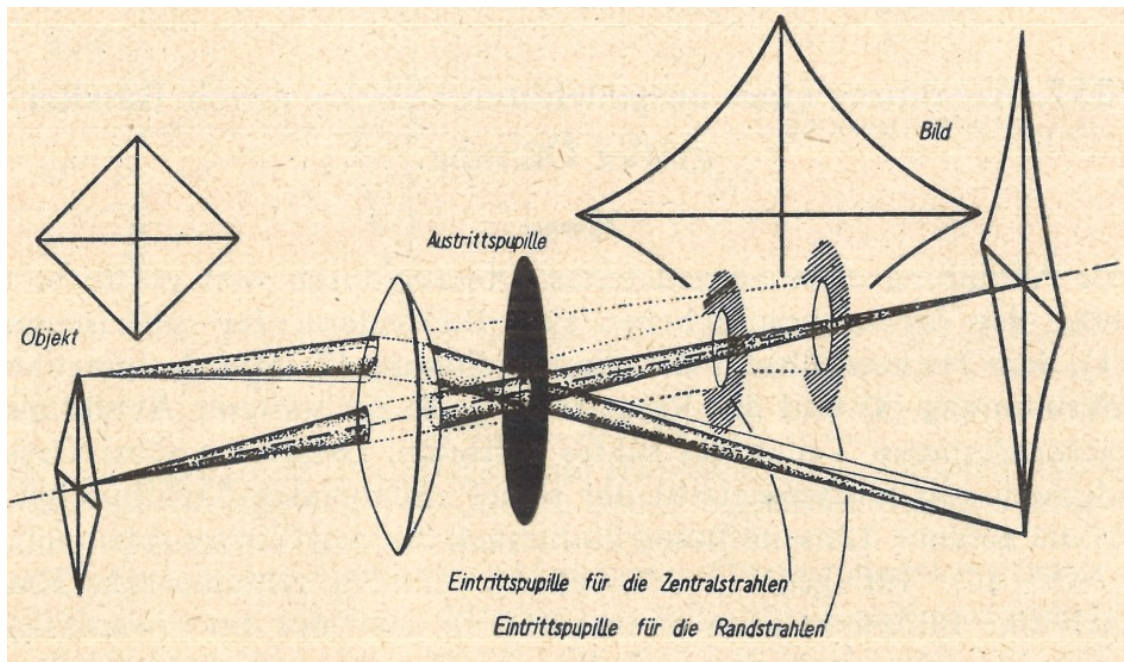


Abb. 17: Kissenförmige Verzeichnung (vgl. Michel 1950, S. 51)

4.5.5 Die Koma

Wird ein Objekt durch weit geöffnete Büschel abgebildet, kann es in achsenfernen Teilen des Bildes zu Abbildungsfehlern kommen, wenn die Korrektur der sphärischen Aberration nicht für die gesamte Linsenöffnung durchgeführt wurde. Treten Lichtstrahlen in einem schrägen Winkel auf die Linse auf, wo diese nicht vollständig korrigiert ist, kommt es durch die zusätzliche Asymmetrie der Lichtstrahlen zu schweifähnlichen Mustern am Abbildungsschirm (siehe Abb. 18). Diese schweifähnlichen Muster prägen auch den Namen dieses Abbildungsfehlers, nämlich Koma (vgl. Michel 1950, S. 52 f.).

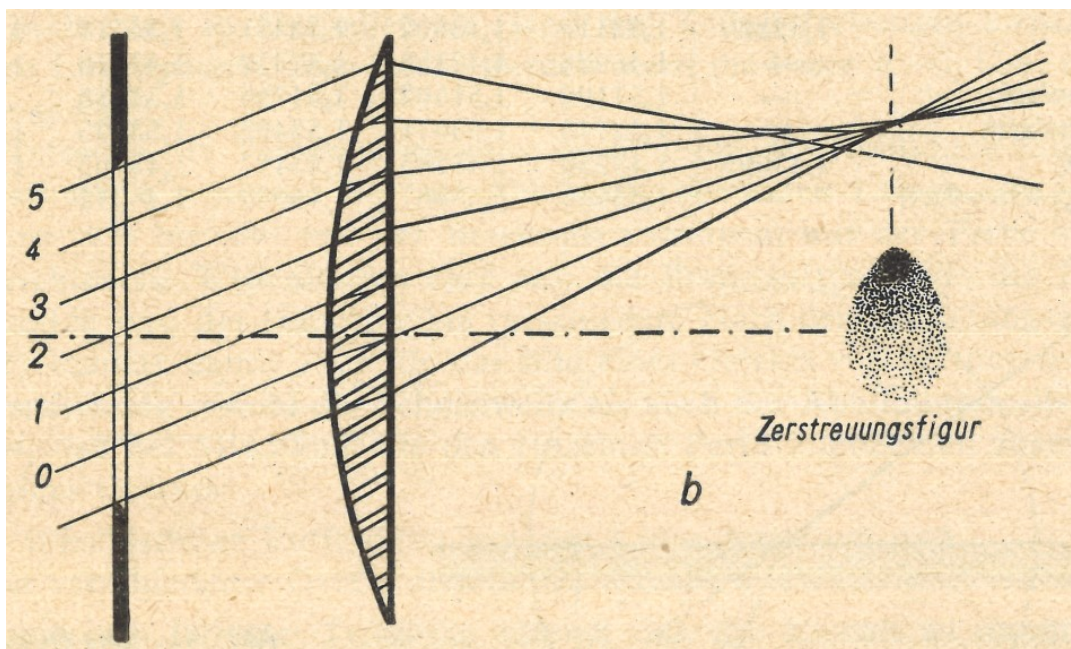


Abb. 18: Koma (vgl. Michel 1950, S. 53)

4.5.6 Chromatische Aberration

Die chromatische Aberration ergibt sich als Konsequenz der Dispersionseigenschaften von optischen Medien. Die chromatische Aberration lässt sich in folgende Untergruppen unterteilen:

- Chromatische Längsaberration
- Chromatische Queraberration

Die chromatische Längsaberration wird auch als Farblängsfehler bezeichnet. Der Farblängsfehler beschreibt die Abhängigkeit der Schnittweite von der Wellenlänge. Neben dem Farblängsfehler tritt auch eine chromatische Queraberration, Farbquerfehler genannt, auf. Der Farbquerfehler zeigt sich bei Experimenten anhand eines Farbsaums um das abgebildete Objekt. Es lässt sich hier festhalten, dass es neben einer wellenlängenabhängigen Schnittweite auch eine wellenlängenabhängige Vergrößerung und Bildverzerrung gibt, die sich bei Experimenten mit polychromatischem Licht bemerkbar machen. Durch die Kombination von zwei Linsen mit unterschiedlicher Dispersionseigenschaft, sogenannte Achromate, lässt sich die chromatische Aberration für zwei unterschiedliche Wellenlängen stark reduzieren. Für die Kombination der beiden Linsen muss die Achromasiebedingung erfüllt sein (vgl. Gerhard 2020, S. 124-127):

$$f_1 \cdot v_1 = -f_2 \cdot v_2$$

- f_1 ... Brennweite von Linse 1
- f_2 ... Brennweite von Linse 2
- v_1 ... Abbezahl von Linse 1
- v_2 ... Abbezahl von Linse 2

Die Abbezahl ist eine Kennzahl für das Dispersionsverhalten einer Linse (vgl. Gerhard 2020, S. 59). Aus dem Vorzeichen in der obigen Gleichung ergibt sich, dass eine der beiden Linsen eine Sammellinse darstellt, während die dazu passende Linse durch eine Zerstreuungslinse realisiert werden muss. Die beiden Grenzflächen der beiden Linsen werden verkittet, wodurch sich folgende Beziehung ergibt (vgl. Gerhard 2020, S. 124-127):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f_1} \cdot \frac{v_1 - v_2}{v_1}$$

- f ... Brennweite des Achromats (Kombination der beiden Linsen)

Während mit Achromaten nur die achromatische Aberration für zwei bestimmte Wellenlängen beseitigt werden kann, ist es durch kompliziertere Systeme von mehreren Linsen, den sogenannten

Apochromaten, auch möglich, mehrere Wellenlängen zu korrigieren (vgl. Gerhard 2020, S. 124-127).

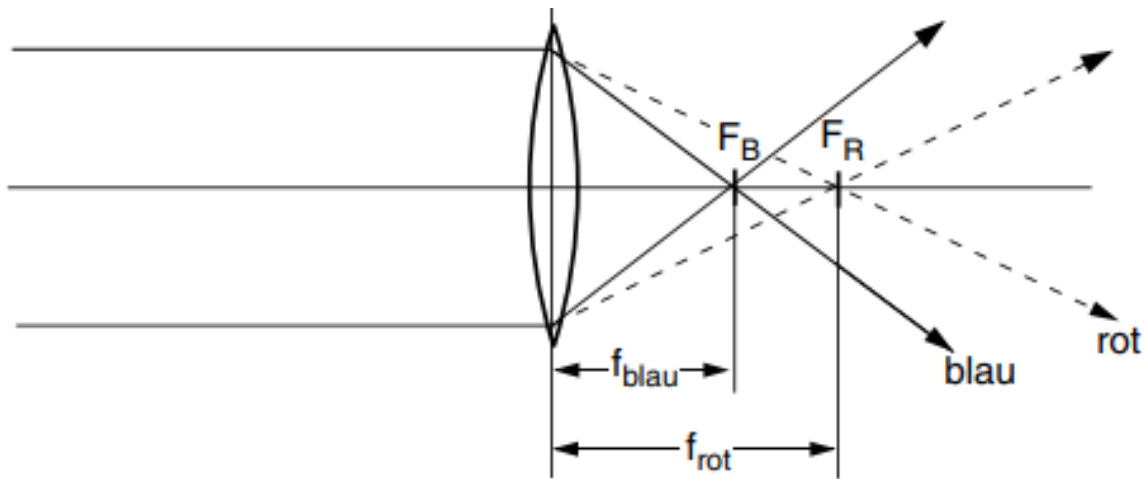


Abb. 19: Chromatische Längsaberration (vgl. Zinth & Zinth 2008, S. 106)

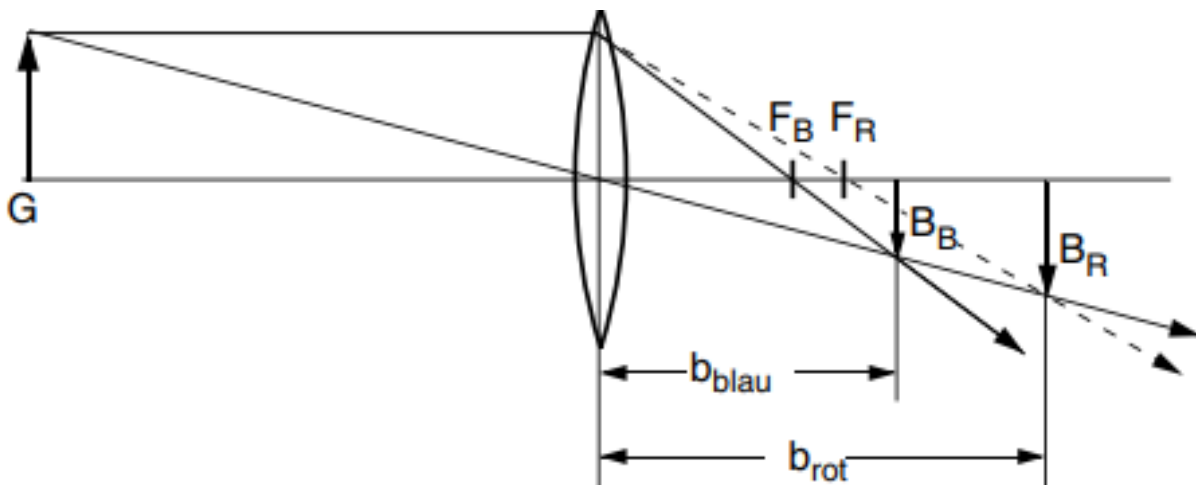


Abb. 20: Chromatische Queraberration (vgl. Zinth & Zinth 2008, S. 106)

Objektive werden nach dem Grad ihrer chromatischen Aberration in folgende Gruppen unterteilt:

- Achromate: Die chromatische Korrektur ist hier nicht für den Rand des sekundären Spektrums durchgeführt, weshalb gerade bei stärkeren Vergrößerungen ein grüngelblicher oder purpurner Saum erkennbar sind.

- Apochromate: Im Gegensatz zu den Achromaten ist hier auch das sekundäre Spektrum nahezu vollständig korrigiert. Bei Apochromaten werden nahezu alle Farben in einem Punkt vereinigt. Nachteile der Apochromate im Vergleich zu den Achromaten sind die höheren Herstellungskosten und die im Verhältnis zur Brennweite sehr großen Apertur, wodurch sich Krümmungen der Bildfläche bei der Abbildung stärker bemerkbar machen.
- Semiapochromat: Semiapochromate werden durch Flussspaltlinsen realisiert, wobei diese in der Korrektur ihrer chromatischen Aberration zwischen den Achromaten und Apochromaten einzuordnen sind. Für die meisten praktischen Untersuchungen stellen Semiapochromate jedoch eine genügend ausreichende Korrektur her.
- Planachromate und Planapochromate: Die Vorsilbe „Plan“ bezieht sich hier darauf, dass diese Objektive zusätzlich eine Verbesserung der Ebnung aufzeigen, wobei die Herstellung dieser Objektive mit großem Aufwand und Kosten verbunden ist.

(vgl. Michel 1950, S. 58-60)

4.6 Beugung und Bündelbegrenzung

Um die Bildentstehung bei optischen Instrumenten zu verstehen, müssen neben einer geometrischen Betrachtung der Bilderzeugung auch Beugungseffekte und Bündelbegrenzungen durch Blenden, Linsenfassungen und das menschliche Auge berücksichtigt werden. Durch die Wellennatur des Lichts kommt es an Öffnungen und Linsen zu Beugungserscheinungen. Durch die Beugungserscheinungen entsteht kein scharfer Punkt in der Brennebene der Linse, sondern eine Beugungserscheinung (vgl. Stuart & Klages 2010, S. 213). Die Bündelbegrenzung durch Blenden, Linsenfassungen und das menschliche Auge hat neben einer Beugung des Lichts auch direkt Einfluss auf die Helligkeit, das Gesichtsfeld und die Schärfe des erzeugten Bildes, wobei hierauf bereits näher in Kapitel 3.2 eingegangen wurde (vgl. Stuart & Klages 2010, S. 214 f.).

5 Fernrohre

Bei zusammengesetzten optischen Geräten haben wir neben dem Mikroskop das Fernrohr zur Verfügung. Während mit dem Mikroskop kleine Gegenstände in der unmittelbaren Nähe vergrößert dargestellt werden, dient das Fernrohr dazu, Gegenstände zu betrachten, die sich in sehr

großen Abständen vom Betrachter entfernt befinden. Der Sehwinkel, welcher mit der Entfernung zwischen Betrachter und Objekt abnimmt, kann durch ein Fernrohr gezielt vergrößert werden. Im Gegensatz zum Mikroskop fallen bei einem Fernrohr die einander zugewandten Brennpunkte von Objektiv und Okular für gewöhnlich zusammen. Ein Fernrohr mit dieser Eigenschaft wird als teleskopisches beziehungsweise brennpunktloses Fernrohr bezeichnet. Die Länge eines Fernrohres ergibt sich durch folgende Formel (vgl. Michel 1950, S. 122 f.):

$$L = f_{\text{Objektiv}} + f_{\text{Okular}}$$

- L ... Länge des Fernrohres
- f_{Objektiv} ... Brennweite Objektiv
- f_{Okular} ... Brennweite Okular

5.1 Vergrößerung, Abbildungsfehler, Beleuchtungsstärke und Auflösungsvermögen

Die Vergrößerung, die mit einem Fernrohr erreicht werden kann, lässt sich mit folgender Formel bestimmen (vgl. Michel 1950, S. 128 f.):

$$V_{\text{Fernrohr}} = \frac{f_{\text{Objektiv}}}{f_{\text{Okular}}}$$

Da die Öffnungswinkel beim Fernrohrobjektiv klein ausfallen, müssen Bildfehler für achsenferne Punkte meist nicht beachtet werden. Bei Fernrohrobjektiven kommen vorwiegend nur die sphärische Aberration, die chromatische Aberration und die Abweichung von der Sinusbedingung zu tragen (vgl. Michel 1950, S. 170).

Die Helligkeit des Netzhautbildes kann prinzipiell durch optische Geräte wie dem Fernrohr nicht erhöht werden. Beim Fernrohr treten zwar vermehrt Lichtbündel in das menschliche Auge ein, wobei diese aber einen entsprechend größeren Fläche auf der Netzhaut einnehmen und die wahrgenommene Helligkeit mit Fernrohr der Helligkeit bei der Betrachtung mit dem bloßen Auge entspricht (vgl. Stuart & Klages 2010, S. 224).

Der kleinste Abstand zweier Punkte, der aufgelöst werden kann, beträgt

$$d_{min} = 1,22 \cdot \frac{f_{obj} \cdot \lambda}{D}$$

und ist damit abhängig von der Brennweite des Objektivs, dem Eingangsblendendurchmesser D (Objektivdurchmesser) und der Wellenlänge λ (vgl. Pfeiler 2021, S. 236).

5.1 Typen von Fernrohren

Fernrohre können ihrem Aufbau entsprechend in drei verschiedene Typen unterteilt werden, wobei in diesem Kapitel auf die Unterschiede und die damit verbundenen Vorteile und Nachteile eingegangen wird.

5.3.1 Fernrohr ohne reelles Zwischenbild

Bei Fernrohren ohne reelles Zwischenbild wird das Okular durch eine Linse mit negativer Brennweite (Zerstreuungslinse) realisiert. Bekannte Fernrohre dieses Typs stellen das holländische oder das galileische Fernrohr dar (vgl. Michel 1950, S. 122 f.). Bei Fernrohren ohne reelles Zwischenbild erhalten wir im Gegensatz zur Betrachtung mit Fernrohren mit reellem Zwischenbild ein aufrechtes Bild zur Betrachtung, weshalb diese Art des Fernrohres oft auch als Opernglas verwendet wird. Die Länge dieser Fernrohre ergibt sich aus der Differenz von Objektivbrennweite und Okularbrennweite, weshalb sie insgesamt kürzer ausfallen und handlicher in der Anwendung sind. Ein weiterer Vorteil liegt in der geringen Anzahl von benötigten Glasflächen, was Lichtverluste durch Reflexion geringhält. Ein Nachteil dieses Typs besteht jedoch in einem kleineren Sichtfeld, da außerhalb der optischen Achse liegende Strahlen nicht wie beim astronomischen Fernrohr zur Augenpupille hin abgelenkt werden. (vgl. Stuart & Klages 2010, S. 225). Da das Gesichtsfeld mit steigender Vergrößerung abnimmt, weisen diese Fernrohre Vergrößerungen meist unter dem Faktor 4 auf (vgl. Michel 1950, S. 148 f.). Abb. 21 stellt den Strahlenverlauf eines galileischen Fernrohres dar. Bevor das Objektiv in der Abb. 21 von einem unendlich weit entfernten Gegenstand ein reelles Bild der Größe y_1' erzeugt, wird das Licht durch eine bikonvexe Linse, welche als Okular fungiert, zerstreut. Die Linsen werden hierbei so positioniert, dass die Brennpunkte F_1' des Objektivs und F_2 des Okulars zusammenfallen, was dazu

führt, dass der Gegenstand im Unendlichen erscheint. Für die Vergrößerung V gilt folgende Formel:

$$V = \frac{f_1}{|f_2|}$$

(vgl. Eichler et al. 2016, S. 290 f.).

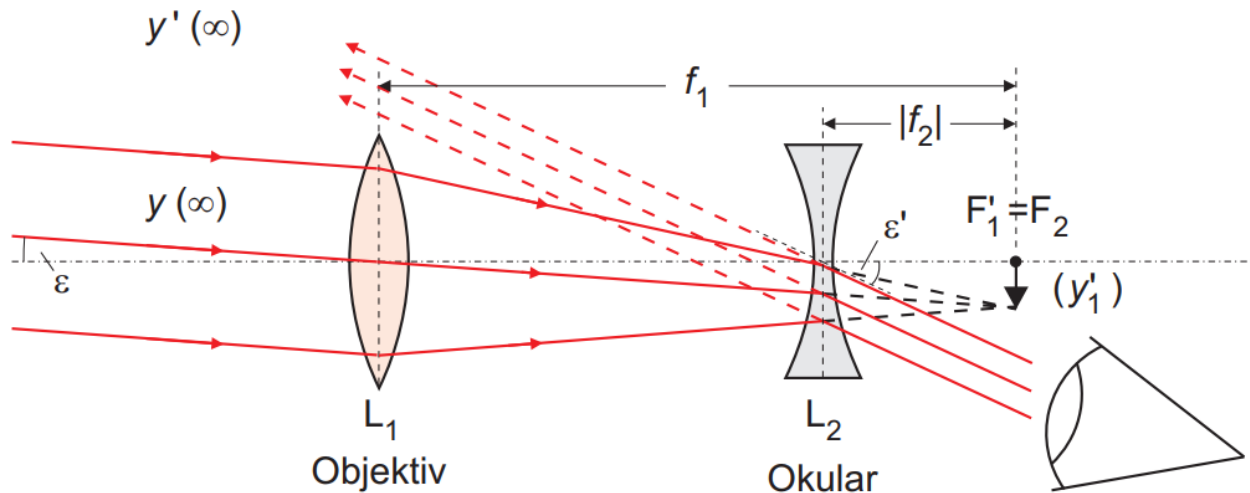


Abb. 21: Strahlenverlauf beim galileischen Fernrohr (vgl. Eichler et al. 2016, S. 290)

5.3.2 Fernrohr mit reellem Zwischenbild

Bei einem Fernrohr mit reellem Zwischenbild werden als Okular und Objektiv zwei Linsen mit positiver Brennweite verwendet. Bekannte Fernrohre dieses Typs stellen das astronomische oder das keplersche und das terrestrische Fernrohr dar. Das Objektiv muss eine verhältnismäßige große Brennweite aufweisen, damit das erzeugte reelle Zwischenbild keine zu kleine Größe aufweist. Die Aufgabe des Okulars besteht hierin, vom reellen Zwischenbild ein weiter vergrößertes virtuelles Bild zu erzeugen, welches vom menschlichen Auge betrachtet werden kann. Okular und Objektiv verfügen über eine geringe Verschiebbarkeit im Vergleich zur Gesamtbrennweite des Fernrohres. Eine Folge dieser geringen Akkommodationsfähigkeit zeigt sich darin, dass mit einem Fernrohr Gegenstände in der Nähe nicht scharf dargestellt werden können. Um mit dem Fernrohr nahe Gegenstände darzustellen, muss eine zusätzliche Sammellinse vor dem Fernrohr angebracht werden (vgl. Michel 1950, S. 122 f.). Abb. 22 zeigt den Strahlenverlauf bei einem astronomischen

Fernrohr. Das Objektiv L_1 entwirft von einem unendlich weit entfernten Gegenstand in seiner Brennebene ein umgekehrtes reelles Bild der Größe y_1' . Da in der Abb. 22 die einander zugewandten Brennpunkt F_1' und F_2 zusammenfallen, entwirft das Okular L_2 ein virtuelles Bild des reellen Zwischenbildes, welches im Unendlichen betrachtet wird. Für die Vergrößerung des Fernrohres gilt folgende Formel:

$$V = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{\frac{y_1'}{f_2}}{\frac{y_1'}{f_1}} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{f_{\text{Objektiv}}}{f_{\text{Okular}}}$$

(vgl. Eichler et al. 2016, S. 290).

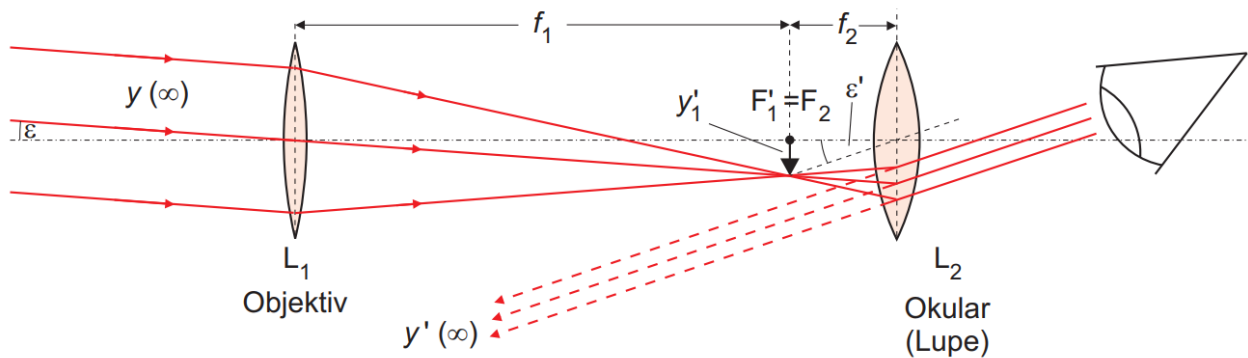


Abb. 22: Strahlenverlauf beim astronomischen Fernrohr (vgl. Eichler et al. 2016, S. 290)

5.3.3 Prismen-Fernrohr

Das Prismen-Fernrohr wird, wie auch das astronomische Fernrohr durch zwei Linsensysteme mit positiver Brennweite, dem Objektiv und Okular, realisiert. Zwischen Okular und Objektiv werden hier im Gegensatz zum astronomischen Fernrohr zwei rechtwinklige Prismen angebracht, an welchen die durch das Objektiv eintreffenden Lichtstrahlen zweimal umgelenkt werden, bevor diese auf das Okular treffen. Ein Vorteil dieses Typs besteht darin, dass durch die gezielte gegenüberliegende Anordnung der Prismen ein für den Betrachter aufrechtes und seitenrichtiges Bild erzeugt werden kann. Die Länge vom Tubus des Prismen-Fernrohres kann auf ein Drittel der Länge des astronomischen Fernrohres verkürzt werden. Wird für jedes der beiden Augen eines Betrachters eine solche Vorrichtung realisiert, können die Objektive durch eine geschickte

Anordnung der Prismen weiter als die Okulare, welche hier den Abstand der Augen einnehmen, auseinander liegen, was ein breites räumliches Sehen ermöglicht (vgl. Stuart & Klages 2010, S. 225). Abb. 23 zeigt den Strahlenverlauf bei einem Prismenfernrohr, welches hier in der Form eines klassischen Feldstechers vorliegt.

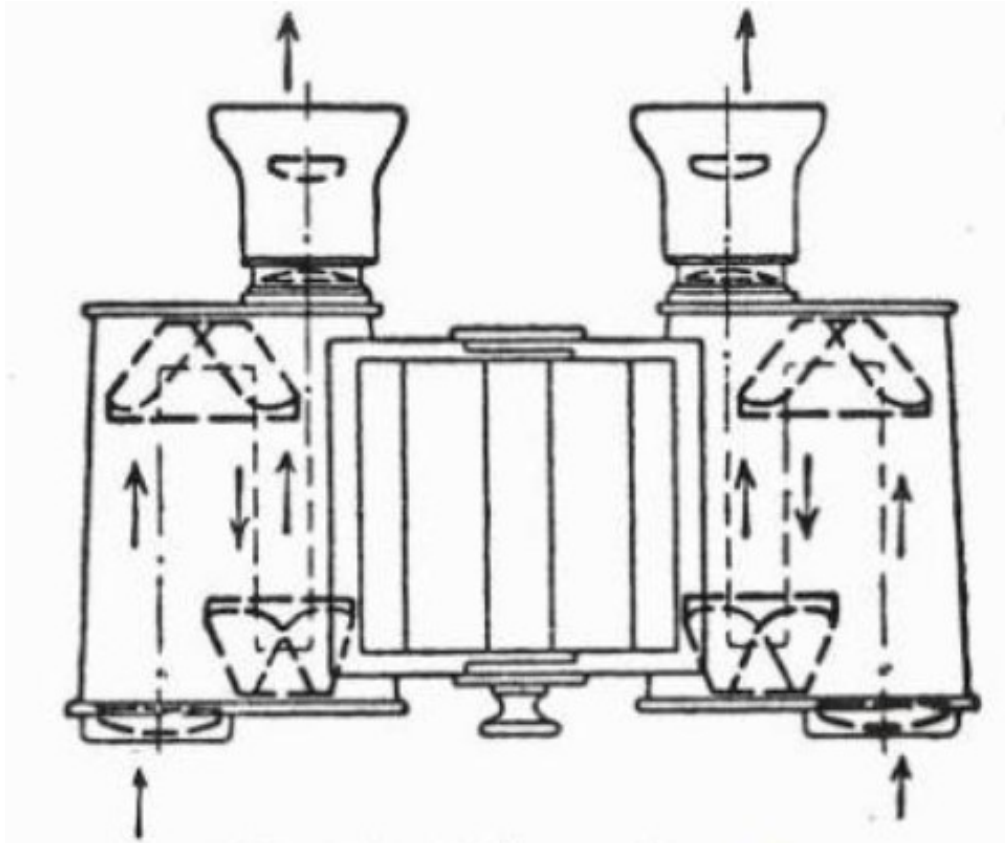


Abb. 23: Prismen-Fernrohr (vgl. Westphal 1970, S. 495)

6 Experimentiermethodik

In diesem Kapitel werden experimentelle Verfahren zur Bestimmung optischer Kenngrößen von Mikroskopen und Fernrohren geschildert.

6.1 Eichung des Okularmaßstabes beim Mikroskopieren

Beim Okularmikrometer handelt es sich um ein durchsichtiges Glasplättchen, auf welchem eine sichtbare Skala angebracht ist. Da das Okularmikrometer sich jedoch am Ort der Sehfeldblende

des Mikroskops befindet, misst das Okularmikrometer nicht das Objekt selbst, sondern das vom Objektiv entworfene Zwischenbild. Die am Okularmikrometer abgelesene Strecke muss daher mit einem speziellen Wert, dem Mikrometerwert m multipliziert werden. Für die Bestimmung des Mikrometerwerts wird ein Objektmikrometer mit bekannter Skalierung verwendet, welches am Mikroskopiertisch angebracht wird. Sieht ein Betrachter durch das Mikroskop, erkennt dieser, dass eine bestimmte Anzahl von k Strichen am Okularmikrometer auf einer bestimmten Anzahl von b Strichen am Objektmikrometer zu liegen kommt. Wird berücksichtigt, dass der Abstand der Striche vom Objektmikrometer, welches in den Untersuchungen verwendet wurde, 0,01 Millimeter beträgt, ergibt sich folgende Formel für den Mikrometerwert m (vgl. Trapp 1958, S. 111 f.):

$$m = \frac{b}{k} \cdot 0,01 \text{ mm}$$

Bei einem Objektivwechsel muss das Okular neu geeicht werden.

6.2 Dickenmessung und zugehörige Fehlerrechnung beim Mikroskopieren

Die Dicke einer Probe kann mit einem geeichten Okularmikrometer bestimmt werden, von welchem der Mikrometerwert m bestimmt wurde. Eine Probe wird am Mikroskopiertisch präpariert und kommt bei der Betrachtung durch das Mikroskop auf einer bestimmten Anzahl von n Strichen am Okularmikrometer zu liegen, wodurch sich für die Dicke d der Probe folgende Formel ergibt (vgl. Trapp 1958, S. 113):

$$d = n \cdot m$$

Das in den Experimenten verwendete Okularmikrometer und Objektmikrometer verfügen über eine 100-teilige Skala. Unter der Annahme, dass mindestens 30 dieser jeweiligen Striche zur Deckung gebracht werden können und sich hier ein halber Strich Fehlertoleranz durch das Ablesen ergibt, entsteht für den Mikrometerwert m folgende Unsicherheit:

$$\Delta m \approx 1,7\%$$

Auch n ist aufgrund der Skalierung des Okularmikrometers und Abbildungsfehlern mit einer Unsicherheit versehen:

$$\Delta n = \pm 1$$

Unter Berücksichtigung der beiden Fehler, welche sich bei der Bestimmung der Dicke einer Probe ergeben, kann die Dicke der Probe mit einem möglichen Fehlerintervall Δd angegeben werden:

$$\Delta d = \pm[(n + 1) \cdot 1,017 \cdot m - n \cdot m]$$

6.3 Methode zur Bestimmung der Okularvergrößerung oder Objektivvergrößerung beim Mikroskopieren

Aus der in Kapitel 4.1 gegebenen Formel

$$V = V_{Okular} \cdot M_{Objektiv} = \frac{t}{f_{Objektiv}} \cdot \frac{s}{f_{Okular}}$$

folgt, dass wenn von der Mikroskopvergrößerung V , der Okularvergrößerung V_{Okular} und vom Maßstab des Objektivs $M_{Objektiv}$, zwei dieser Größen gegeben sind, bequem die dritte fehlende Größe bestimmt werden kann. Es ergeben sich folgende Formeln:

- $V_{Okular} = \frac{V}{M_{Objektiv}}$
- $M_{Objektiv} = \frac{V}{V_{Okular}}$

Bei einer bekannten Brennweite, kann die Vergrößerung eines Okulars wie folgt bestimmt werden:

$$V_{Okular} = \frac{s}{f_{Okular}}$$

6.4 Bestimmung der Vergrößerung eines Mikroskops und Fernrohres

Die Bestimmung der Vergrößerung eines Mikroskops beruht bei der folgenden Methode auf der Tatsache, dass die Vergrößerung eines optischen Geräts als das Verhältnis des Schwinkels, unter welchem ein Objekt in dem Gerät und dem Schwinkel, unter welchem dasselbe Objekt mit bloßem Auge in in Bezugssehweite, gesehen wird, definiert ist. Abb. 24 zeigt den Aufbau der hier

verwendeten Methode zur Bestimmung der Vergrößerung eines Mikroskops. Mit einem Auge wird ein Objektmikrometer durch das Mikroskop betrachtet, während das andere Auge einen Vergleichsmaßstab in 250 mm Entfernung betrachtet, welcher parallel neben dem Objektmikrometer ausgerichtet ist. Eine Strecke s_2 am Vergleichsmaßstab entspricht bei der Betrachtung einer bestimmten Strecke s_1 am Objektmikrometer, wodurch sich folgende Beziehung ergibt (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 118 f.)

$$V_{Mikroskop} = \frac{s_2}{s_1}$$

Zur ungefähren Abschätzung der Vergrößerung kann an Stelle eines Objektmikrometers auch ein Objekt bekannter Abmessung (z.B. ein dünner Draht mit bekanntem Durchmesser) verwendet werden.

Zur Abschätzung der Vergrößerung eines Fernrohres wird in der vorliegenden Arbeit in zwei Schritten vorgegangen. Die Vergrößerung des Fernrohrs ist durch das Verhältnis des Seh winkels ε_1 mit Fernrohr zu Seh winkel ohne Fernrohr ε_0 gegeben. Für die Seh winkel ε_1 und ε_0 gilt:

$$\arctan(\varepsilon_1) = \frac{B}{s} \quad \text{und} \quad \arctan(\varepsilon_0) = \frac{G}{d}$$

B ist die Bildgröße im Okular in der deutlichen Sehweite $s = 25$ cm, G ist die reale Gegenstandsgröße in der realen Entfernung d. Der Einfachheit halber wurden hier zwei Lineale mit einer Millimeterskala verwendet: eines als zu betrachtender Gegenstand G, das andere zur Bestimmung von B in 25 cm Entfernung. Ein Auge sieht ins Okular, das andere Auge beobachtet auch das Lineal in der deutlichen Sehweite und sieht somit die Größe des Okularbildes in Millimeter, welche die Bildgröße B darstellt. In einem zweiten Schritt können nun B/s und G/d und damit die Seh winkel ε_1 und ε_0 berechnet werden. Die abgeschätzte Vergrößerung V des Fernrohres ergibt sich zu $V = \varepsilon/\varepsilon_0$.

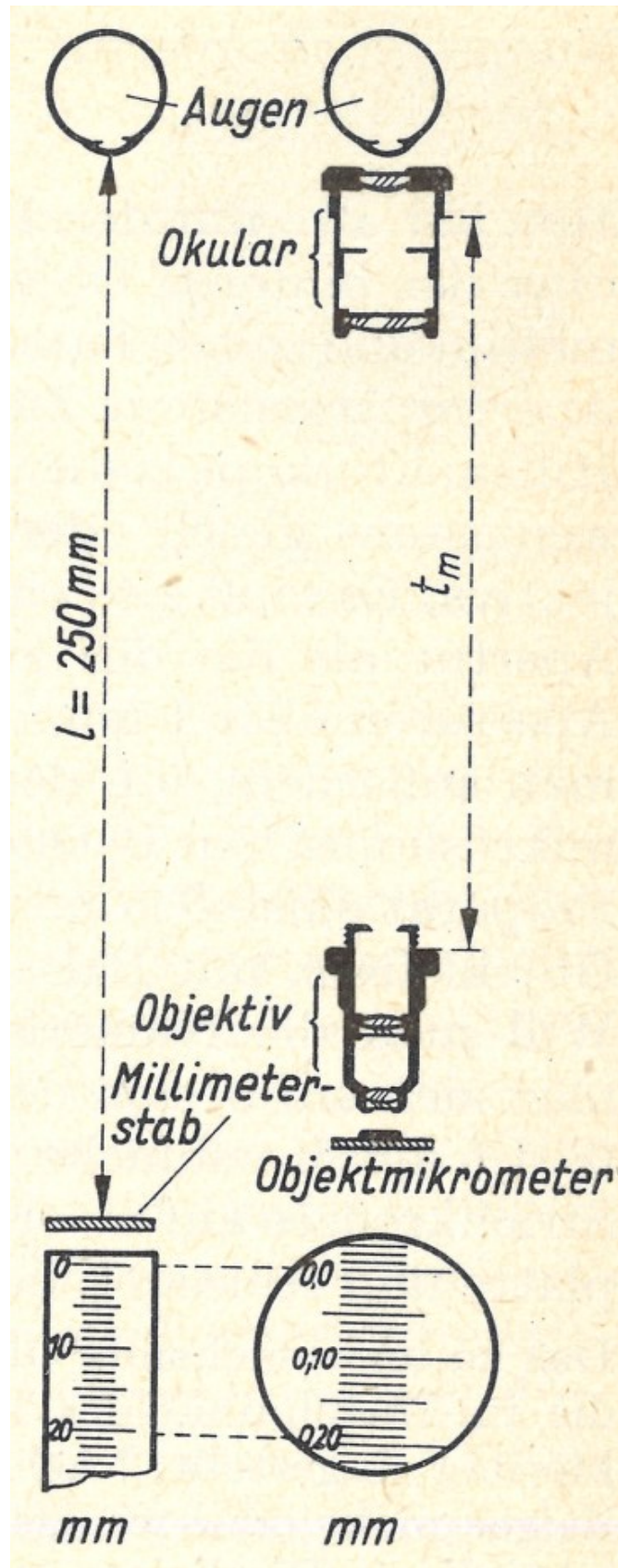


Abb. 24: Bestimmung der Vergrößerung eines Mikroskops (vgl. Ehringhaus & Trapp 1958, S. 119)

7 Historische Mikroskope im Experiment

Tab. 1 gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit beschriebenen und untersuchten Mikroskope. Die Mikroskope von Reichert-Austria sind nach der Seriennummer und damit zeitlich gelistet. Die Metallteile der frühen Mikroskope wurden in (zaponiertem) Messing ausgeführt. Ab ca. 1929 sind bei den untersuchten Geräten nicht nur Stativteile, sondern auch Mikroskopteile schwarz gestrichen. Die Objektivfassungen bestehen ab ca. 1950 aus verchromten Messing. Manche Teile jüngerer Mikroskope bestehen aus Aluminiumlegierungen oder Edelstahl.

Tab. 1: Übersichtstabelle der Mikroskope

Hersteller	Vitrinen-Nummer	Inventarnummer	Seriennummer	Erwerbsjahr
Reichert-Austria	51	VI 19	14201	~1900
Reichert-Austria	93	VI 21	18408	~1900
Reichert-Austria	224	VI 270	95182	1929
Reichert-Austria	96	VI 243	208833	1950
Reichert-Austria Stereomikroskop	-	62/8 bzw. 30010250	259599	1962
Reichert-Austria	-	Pv 26	274923	1960
Carl Zeiss	95	VI 269	57277	~1900
Plössl	28	-	-	~1840
Plössl	62	VI 202	-	1846-1850
Plössl	32	VI 203	-	1846-1850
Fraunhofer	53	IV 88	-	1912
Fraunhofer	39	IV 89	-	1912
Teilmaschine	-	VI 206	-	ca. 1890

Grundsätzlich ist zu bemerken, dass die gelisteten Mikroskope oft nicht in kompletter Ausstattung vorzufinden sind. Okulare von Zeiss und Reichert-Austria sind manchmal vertauscht worden. Listen der Okulare und Objektive in den zugehörigen Holzkassetten, falls überhaupt vorhanden, zeigen eine ursprünglich bessere Ausstattung als noch vorhanden. Zunächst wird

immer mit der am Gerät vorgefundenen Ausstattung experimentiert. Wenn möglich, wird mit vorhandenen Angaben verglichen oder Ergänzungen werden beschrieben. Auffällig ist, dass in viele Okulare und Objektive, egal ob von Zeiss oder Reichert-Austria, eine provisorische Zählnummer geritzt ist. Ziel ist es offensichtlich gewesen, den Okularen und Objektiven eindeutige (institutsinterne) Nummern zuzuordnen. Da vielfach keine Angaben der Vergrößerung der Mikroskope vorliegen, wird diese mit dem in Kapitel 6.4 angegebenen Verfahren (nach Trapp) bestimmt oder überprüft. Die Genauigkeit dieses Verfahrens liegt bei ca. 3 - 5 %, bei sehr großen Vergrößerungen oder unförmigen Geräten wird das Verfahren schwieriger und der Fehler ist mit ca. 10 % anzusetzen.

Experimentierhilfen

Verfügbar war ein Objektmikrometer von ZEISS (2 mm in 0,01 mm Schritten geteilt), das Etui dazu ist in Abb. 25 zu sehen. Ebenso war ein Okularmikrometer verfügbar, das für die Reichert-Austria-Mikroskope von 1960 und 1962 verwendet werden konnte. Das Reichert-Mikroskop von 1950 hat ein eingebautes Okularmikrometer. Beim Stereomikroskop von 1960 wurde für die Bildaufnahme neben dem Smartphone auch eine Okularkamera (HDMI Industrial Camera HAYEAR HY-3307) verwendet. Grundsätzlich war das Smartphone bei allen Geräten eine gute Wahl, wobei durch das Weitwinkelobjektiv eine geringfügige Bildverzerrung auftritt. Andererseits lieferte verschiedentlich eine Digitalkamera (Canon EOS RP mit 35 mm Makroobjektiv und Blende 1,8) dank Stativ bessere Bilder. Des Weiteren stand ein goldbeschichtetes Kreuzgitter (Replika, Scheibchen mit 3,0 mm Durchmesser) mit 2160 Linien/mm zur Verfügung (gedacht für Kalibrierung in der Rastertunnelmikroskopie). Diese Linien konnten auch mit dem Stereomikroskop nicht sichtbar gemacht werden, wohl aber das grobe Gitter (Seitenlänge ca. 60 μm), mit welchem das Scheibchen unterteilt ist. Der Durchmesser des Kreuzgitterscheibchens beträgt 50 Kästchen zu ca. 60 μm , womit sich $60 \mu\text{m} \times 50 \approx 3,0 \text{ mm}$ ergibt.



Abb. 25: Objektmikrometer

Fehlerangaben

Für die Kontrolle der Dickenmessung der Drähte stand eine spezielle Mikrometerschraube mit einer Auflösung von $1\text{ }\mu\text{m}$ zur Verfügung. Damit liegen die Fehler der mechanisch gemessenen Durchmesser im Bereich von $\pm 1\text{ }\%$ bis $\pm 2\text{ }\%$. In gleicher Größenordnung liegen die Fehler der optischen Dickenmessung. Der Fehler für die Abschätzung der Vergrößerung nach Kapitel 6.4 liegt bei 5% bis $10\text{ }\%$. Die Fehler für die Distanzmessungen bei den Fernrohren (gemessen von der Objektivlinse) betragen $\pm 1\text{ cm}$ für Distanzen bis 5 m und $\pm 3\text{ cm}$ für größere Distanzen bis ca. 15 m . Die Masse der Objekte wurde auf $\pm 200\text{ g}$ genau bestimmt, die Abmessungen (Stellmaße) auf ca. $\pm 1\text{ cm}$. Der Übersichtlichkeit halber werden die Messfehler meist nicht angegeben.

7.1 Reichert-Austria Mikroskop Nr. 14201

Das Reichert-Austria Mikroskop Nr. 14201 mit der Inventarnummer VI 19 ist um das Jahr 1900 zu datieren und ist in Abb. 1 zu sehen. Masse und Abmessungen zeigt Tab. 1.

Tab. 1: Grunddaten zum Mikroskop

Masse	Höhe	Breite	Tiefe
2 kg	26 cm	10 cm	9 cm

Für das Mikroskop existiert eine Holzkassette, welche in Abb. 27 abgebildet ist. Das Stativ (6) ist auf einem u-förmigen Standbein (5) fixiert. Durch ein Gewinde kann der obere Teil des Stativs gedreht werden, wodurch der Tubus ebenfalls mitbewegt wird. Dieser Umstand ermöglicht eine einfachere Anbringung des Objektivs. Der Spiegel (7) besteht aus zwei Seiten, wobei auf einer Seite ein Hohlspiegel und auf der anderen Seite ein Planspiegel angebracht ist. Der Probestisch (2) kann über eine Schraube auf der Rückseite des Stativs gelockert und so in der Ebene gedreht werden, was eine Anbringung von Objektiven am Tubus (4) erleichtert. Die Probe kann durch zwei am Probestisch angebrachten Klammern fixiert werden. Die beiliegenden Objektive (1) können zunächst unten am Tubus nicht fixiert werden, wobei diese in Abb. 28 samt zugehörigen Dosen abgebildet sind. Für das Anbringen der Objektive fehlt ein Zwischenteil, welches eine Anbringung der Objektive am Gewinde des Tubus ermöglicht. Das benötigte Zwischenteil kann bei Bedarf einem anderen Reichert Mikroskop (z.B. Reichert Nr. 95182) entnommen werden. Der Tubus kann an der großen Schraube (9) in der Höhe verstellt werden, wobei die kleinere Rändelschraube darüber den Feintrieb (9) des Mikroskops bildet. Wie Abb. 28 zeigt, sind die Dosen für die Objektive mit Nr. 6 und Nr. 8a bezeichnet. Dose Nr. 6 ist außerdem mit „19“ gekennzeichnet, „19“ ist auch auf das darin befindliche Objektiv eingraviert. Dose 8a ist zusätzlich mit „22“ gekennzeichnet und auch das zugehörige Objektiv hat diese Zahl eingraviert.



Abb. 27: Mikroskop Nr. 14201 in der Holzkassette



Abb. 28: Objektive mit Dosen

Fazit zum Mikroskop

Das Mikroskop ist bis auf kleinere kosmetische Abnützungen gut erhalten, wobei jedoch ein Zwischenteil zum Befestigen der Objektive fehlt und somit keine genaueren Untersuchungen zur Bilderzeugung angestellt werden konnten. Es handelt sich bei diesem Gerät um das älteste Reichert-Austria Mikroskop in der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien.

7.2 Reichert-Austria Mikroskop Nr. 18408

Das Reichert-Austria Mikroskop Nr. 18408 hat die Inventarnummer VI 21 und ist in Abb. 29 dargestellt. Abb. 30 zeigt die Rückseite des Mikroskops, wobei auf der unteren Seite die Seriennummer des Mikroskops ersichtlich ist. Masse und Abmessungen sind in Tab. 1 angegeben.

Tab. 1: Grunddaten zum Mikroskop

Masse	Höhe	Breite	Tiefe
3,6 kg	32 cm	11 cm	17 cm

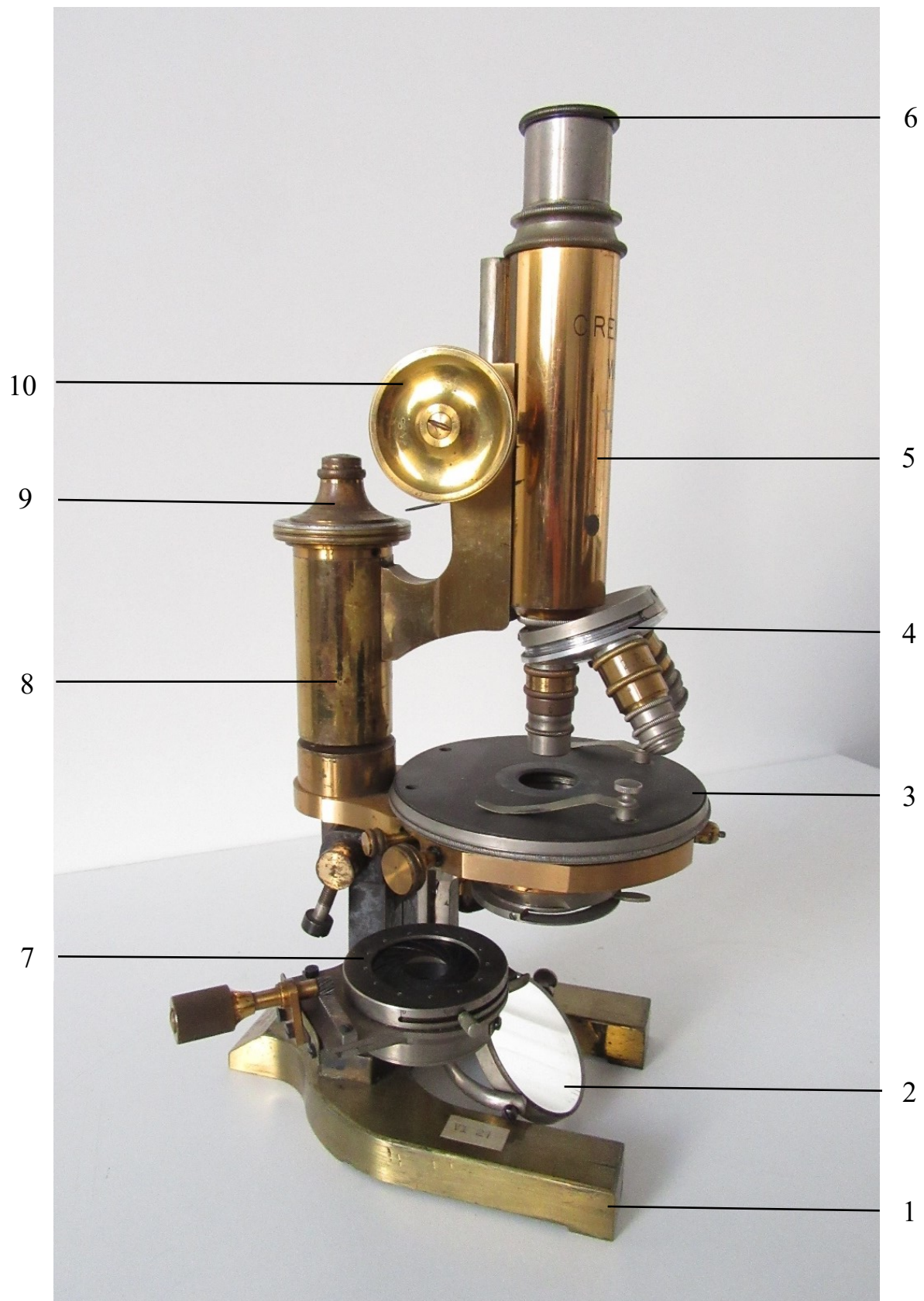


Abb. 29: Aufbau des Mikroskops: 1 Zweiarmiges Standbein, 2 Planspiegel oder Hohlspiegel, 3 Proben­
tisch, 4 Dreifach-Revolver, 5 Tubus, 6 Okular, 7 Irisblende, 8 Stativ, 9 Feintrieb, 10 Grobtrieb

Das Stativ (8) ist auf einem zweiarmigen Standbein (1) fixiert. Das Mikroskop wird mit Durchlicht betrieben, wobei hier eine externe Lichtquelle gewählt werden muss, da das Mikroskop über keine eigene Lichtquelle verfügt. Das Licht der externen Lichtquelle kann sowohl über einen arretierbaren Hohlspiegel als auch Planspiegel (2) in Richtung Probe gelenkt werden. Der eingestellte Spiegel für das Durchlicht kann hierbei durch eine seitlich am Spiegel angebrachte Schraube fixiert werden. Die Menge des Lichts kann über eine Irisblende (7) reguliert werden. Abb. 32 zeigt die Irisblende samt der zugehörigen Vorrichtung. Zusätzlich wurde die Irisblende mit zugehöriger Vorrichtung zur besseren Betrachtung herausgeklappt. Auf dem Probentisch (3) befinden sich zwei Klammern zum Fixieren der Probe. Die optische Tubuslänge kann durch Herausziehen des Tubus verändert werden. Der Abstand vom Tubus (5) zum Probentisch kann sowohl über einen Grobtrieb (10) als auch einen Feintrieb (9) eingestellt werden. Der Feintrieb mit zugehöriger Skalierung wird in Abb. 33 dargestellt. Am Tubus ist ein Dreifach-Revolver (4) angebracht, auf welchem drei verschiedene Objektive zum Darstellen unterschiedlicher Proben angebracht sind. Das montierte Okular und die montierten Objektive sind in Tab. 2 beschrieben. In der Aufbewahrungskassette des Mikroskops (Abb. 31) gibt es noch ein Okular mit Nr. 4 und der Gravur „12“. Abb. 34 und 35 zeigen, mit welchen Okularen und Objektiven das Reichert Mikroskop Nr. 18408 ursprünglich ausgestattet war und welche Vergrößerungen erzielbar waren.

Tab. 2: Objektive und Okulare

Optik	Gravur	Beschreibung	Durchmesser der Linse
Okular 2		CARL ZEISS JENA	
Objektiv 8a	2. P.I. 23.	Leere Dose in Kassette: 8a, 23; 5-teilig	Ca. 1 mm
Objektiv 9	2. P.I. 18.	Leere Dose in Kassette hat Nr. 18, 5-teilig, Linsen sind in den vorderen 2 Teilen	Ca. 2 mm
Objektiv 8	2. P.I. 6	3-teilig, Linse ist in jedem Teil	Ca. 6 mm

Das Mikroskop Nr. 18408 im Experiment

Interessanterweise ist dieses Reichert-Mikroskop mit einem Zeiss-Okular versehen (s. Tab. 2). Wie in Abb. 36 und 37 zu sehen ist, liefert dieses Mikroskop qualitativ recht gute Bilder. Tab. 3 zeigt

die Überprüfung der Vergrößerung nach Kapitel 6.4 mit Hilfe eines Drahtes von 0,200 mm Durchmesser. Für die verwendeten Objektive der Aufnahmen in Abb. 36 wird die Bezeichnung laut Angaben für Okular 2 in Abb. 34 verwendet, denn hier zeichnet sich weitgehende Übereinstimmung zwischen Experiment (Abb. 36 und Tab. 3) und Abb. 37 ab.

Tab. 3: Bestimmung der Mikroskopvergrößerung nach Kapitel 6.5

Reale Dicke der Probe	Objektiv	Vergrößerte Dicke der Probe	Mikroskopvergrößerung
0,200 mm	Objektiv 8a	80 mm	400 x



Abb. 30: Mikroskop Rückseite



Abb. 31: Mikroskop Nr. 18408 mit Holzkassette

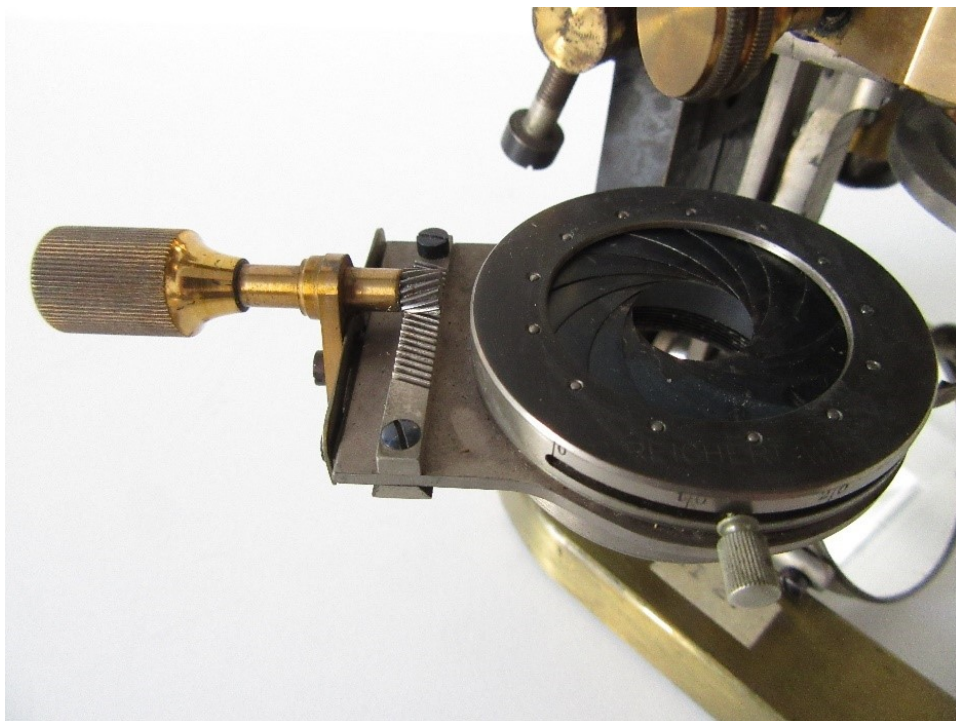


Abb. 32: Irisblende mit seitlichem Verstelltrieb



Abb. 33: Feintrieb mit Skala

Okulare Objektive	Nr. 2 (5x)	Nr. 3 (7x)	Nr. 4 (10x)
3 (10x)	50x	70x	100x
6 (40x)	200x	280x	400x
8a (70x)	350x	490x	700x

für Tubuslänge 160 mm.

Abb. 34: Gesamtvergrößerung bei Tubuslänge 160 mm

Okular:		Mikrometerokular	
		2	4
Objektiv:	Tubus nicht herausg.		
	6 45 fach	175 fach	285 fach
	Vollendung: 1 Teilstrich = 2,25 μ		
	Tubus nicht herausg.		
8a 70 fach	Tubus nicht herausg.	460 fach	400 fach
	Tubus herausgezogen	750 fach	650 fach
		1 Teilstrich = 1,42 μ	

Abb. 35: Gesamtvergrößerung bei nicht herausgezogenem und herausgezogenem Tubus

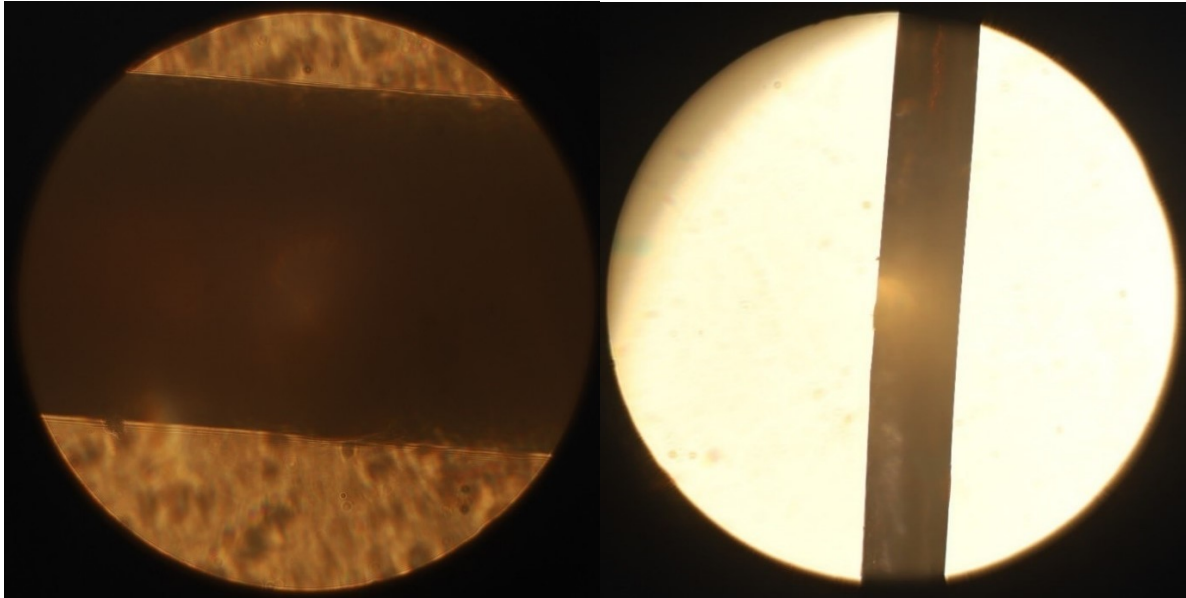


Abb. 36: Darstellung eines Kupferdrahtes

- a) Links: 0,340 mm Kupferdraht mit Objektiv 6 und Okular 2 bei 160 mm Tubuslänge
- b) Rechts: 0,340 mm Kupferdraht mit Objektiv 3 und Okular 2 bei 160 mm Tubuslänge

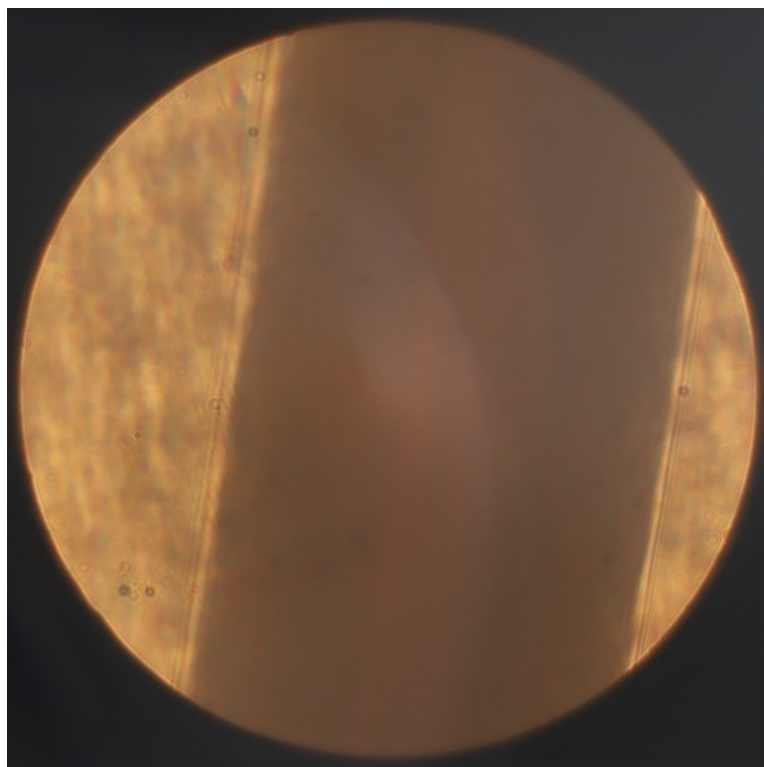


Abb. 37: 0,200 mm Kupferdraht mit Objektiv 8a und Okular 2 bei Tubuslänge 160 mm ($V \approx 400 \times$ laut Tab. 3)

Fazit zum Mikroskop

Das in diesem Kapitel untersuchte Mikroskop stellt das zweitälteste Reichert-Austria Mikroskop der physikhistorischen Sammlung der Universität Wien dar, wobei es im Vergleich zu seinem Vorgänger über verschiedene Ergänzungen verfügt. Ein Objektivrevolver erleichtert hier das Wechseln zwischen einzelnen Vergrößerungen und mit Hilfe einer Irisblende kann die Apertur angepasst werden. Für das Mikroskop existieren in der Aufbewahrungskassette ergänzende Utensilien wie etwa leere Dosen für die Objektive und ein zusätzliches Okular. Die Bilderzeugung verschiedener Kupferdrähte verlief in den Experimenten problemlos, wobei bei Verwendung eines 10x-Okulars (das fehlt) bis zu 700-fache Vergrößerung erzielt werden könnte.

7.3 Reichert-Austria Mikroskop Nr. 95182

Das Reichert-Mikroskop Nr. 95182 (Abb. 38) hat die Inventarnummer VI 270. Masse und Abmessungen sind in Tab. 1 angegeben.

Tab. 1: Grunddaten zum Mikroskop

Masse	Höhe	Breite	Tiefe
3,6 kg	32 cm	20 cm	12 cm

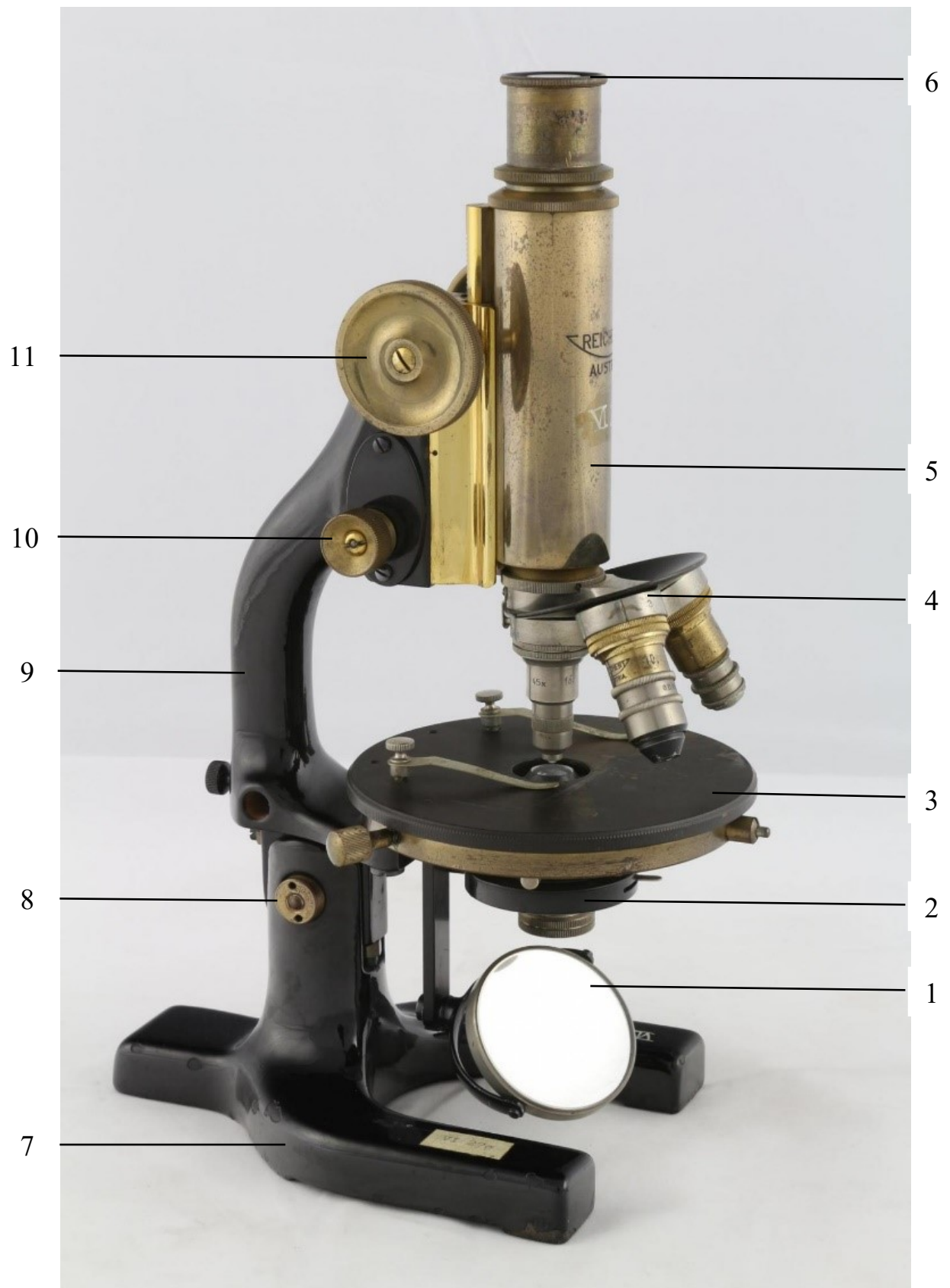


Abb. 38: Aufbau des Mikroskops: 1 Planspiegel und Hohlspiegel, 2 Irisblende und Kondensor, 3 Probentisch, 4 Dreifach-Revolver, 5 Tubus, 6 Okular, 7 Dreiarmiges Standbein, 8 Kippgelenk, 9 Stativ, 10 Feintrieb, 11 Grobtrieb

Das Stativ (9) ist auf einem dreiarmigen Standbein (7) fixiert, wobei das Stativ durch ein angebrachtes Gelenk (8) gekippt werden kann. Das Mikroskop wird mit Durchlicht betrieben, wobei eine externe Lichtquelle gewählt werden muss, da das Mikroskop über keine eigene Lichtquelle verfügt. Das Licht der externen Lichtquelle kann sowohl über einen arretierbaren Hohlspiegel als auch Planspiegel (1) in Richtung Probe gelenkt werden. Unterhalb des Probestisches befindet sich eine Irisblende mit Kondensor (2). Auf dem Probestisch (3) befinden sich zwei Klammern zum Fixieren der Probe. Der Abstand vom Tubus (5) zum Probestisch kann sowohl über einen Grobtrieb (11) als auch einen Feintrieb (10) eingestellt werden. Abb. 39 zeigt den Grobtrieb und zugleich die Seriennummer. Die Holzkassette des Mikroskops ist in Abb. 40 ersichtlich, wobei der an der Kassettentür angebrachte Zettel besser in Abb. 41 zu sehen ist. Die angegebenen Vergrößerungen beziehen sich hierbei auf eine Tubuslänge von 160 Millimeter. Am Tubus ist ein Dreifach-Revolver (4) angebracht, auf welchem drei verschiedene Objektive zum Darstellen unterschiedlicher Proben angebracht sind. Die drei Objektive sind in Abb. 42 dargestellt. Tab. 2 zeigt die Beschreibung von Okular und Objektiven, wie sie am Gerät vorgefunden worden sind. Während die Vergrößerungen von Objektiv 5 (34x) und dem Objektiv ohne Nummer (45x) bekannt sind, wurden die Vergrößerungen von Objektiv 8 und dem Okular 1 in Tab. 4 und 5 ermittelt. Die ermittelten Vergrößerungen von Okular 1 und Objektiv 8 stehen in Tab. 3.



Abb. 39: Grobtrieb und Seriennummer

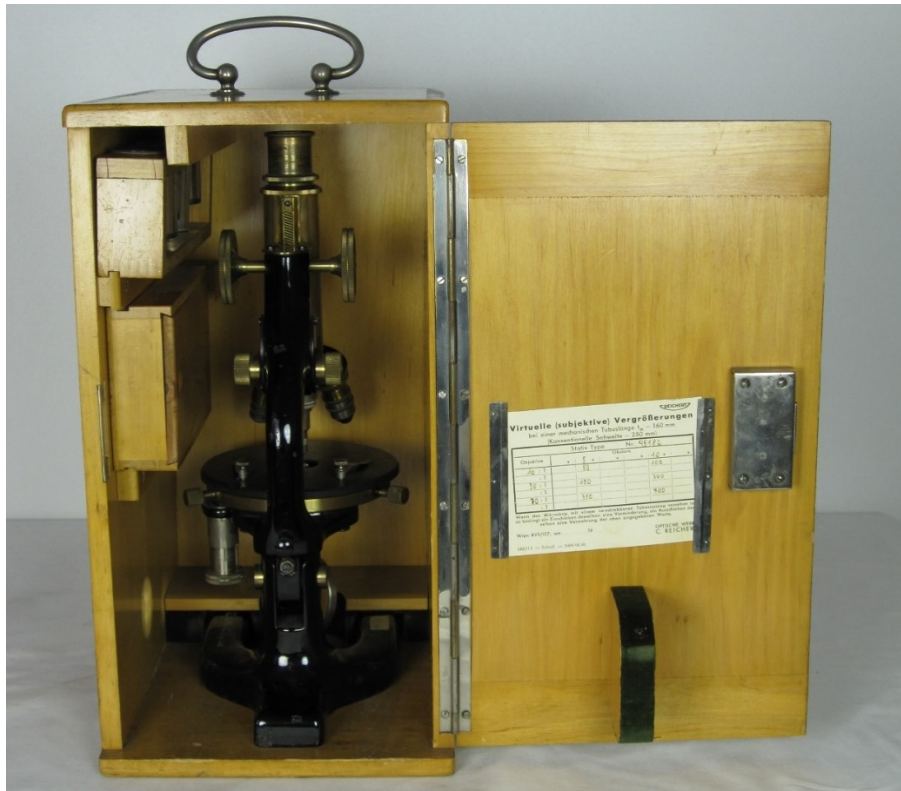


Abb. 40: Mikroskop mit Holzkassette

Tab. 2: Okular und Objektive

Optik	Gravur	Beschreibung
Okular 1 Carl Zeiss Jena		
Objektiv 5 REICHERT AUSTRIA 34x O.D. 190 mm	2.P.I.	4-teilig, nur vorne befindet sich eine Linse
Objektiv 8 REICHERT WIEN	2.P.I.	5-teilig, nur vorne befindet sich eine Linse
Objektiv Nr. unbekannt REICHERT AUSTRIA 45x	2.P.I. 16	3-teilig, nur vorne befindet sich eine Linse

Experimente mit dem Mikroskop Nr. 95182

In den Untersuchungen wurde ein 0,200 mm breiter Kupferdraht durch Verwendung aller drei am Mikroskop angebrachten Objektive vergrößert dargestellt, wobei diese vergrößerten Darstellungen mit einer Canon EOS RP festgehalten wurden und in Abb. 45 betrachtet werden können. Abb. 43 zeigt den für die gemachten Aufnahmen durchgeführten Versuchsaufbau. Das Licht der Reuterlampe wird mit Hilfe des am Mikroskop angebrachten Hohlspiegels zugeführt. Unter der Lichtquelle sind in Abb. 43 einzelne Holzbrettchen ersichtlich, welche dazu dienen, die Lichtstrahlen mittig auf den Spiegel treffen zu lassen. Die Bilder wurden alle mit der Canon EOS RP erstellt, wobei diese für eine möglichst genaue Darstellung auf einem Stativ montiert wurde, um Bewegungen der Kamera während der Bildaufnahme zu verhindern. Abb. 44 zeigt den Versuchsaufbau für die Bestimmung der Mikroskopvergrößerung, wobei hier stets das Okular 1 verwendet wurde. Die sich in Abhängigkeit des verwendeten Objektivs ergebenden Mikroskopvergrößerungen sind in Tab. 4 eingetragen. Tab. 4 gibt darüber hinaus die ermittelte Vergrößerung von Okular 1 nach der Methode aus Kapitel 6.3 an, wobei die Vergrößerungen von Objektiv 5 und dem Objektiv ohne bekannte Nummer bereits vorlagen. In Tab. 5 wurde mit den Methoden aus Kapitel 6.3 und 6.4 die Vergrößerung von Objektiv 8 ermittelt, da diese wie die Vergrößerung des Okulars 1 nicht bekannt war.

Tab. 4: Berechnung der Mikroskopvergrößerung und der Okularvergrößerung nach Kapitel 6.3 und 6.4

Reale Dicke der Probe	Objektiv	Vergrößerte Dicke der Probe	Mikroskopvergrößerung	Vergrößerung Okular 1
0,200 mm	Objektiv 5	30 mm	150 x (= 34 x 4,4)	4,4 x
0,200 mm	Objektiv Nr. unbekannt	40 mm	200 x (= 45,5 x 4,4)	4,4 x

Tab. 5: Berechnung der Vergrößerung von Objektiv 8 nach Kapitel 6.3

Reale Dicke der Probe	Objektiv	Vergrößerte Dicke der Probe	Gesamtvergrößerung	Vergrößerung Objektiv 8
0,200 mm	Objektiv 8	58 mm	290	66 x

REICHERT

Virtuelle (subjektive) Vergrößerungen

bei einer mechanischen Tubuslänge $t_m = 160 \text{ mm}$
(Konventionelle Sehweite = 250 mm)

Objektive	Stativ Type		Nr. 95182			
	x	5 x	x	x	10 x	x
10 : 1		50			100	
: 1						
30 : 1		150			300	
: 1						
70 : 1		350			700	
: 1						

Wenn das Mikroskop mit einem verschiebbaren Tubusauszug versehen ist, so bedingt ein Einschieben desselben eine Verminderung, ein Ausschieben desselben eine Vermehrung der oben angegebenen Werte.

Wien XVII/107, am 19

OPTISCHE WERK
C. REICHERT

132/II d — Schod. — 1000 06 40

Abb. 41: Vergrößerungstabelle



Abb. 42: Objektive

- Bild links: Objektiv 5
- Bild Mitte: Objektiv Nr. unbekannt
- Bild rechts: Objektiv 8



Abb. 43: Versuchsaufbau für die Bildaufnahme eines Kupferdrahtes

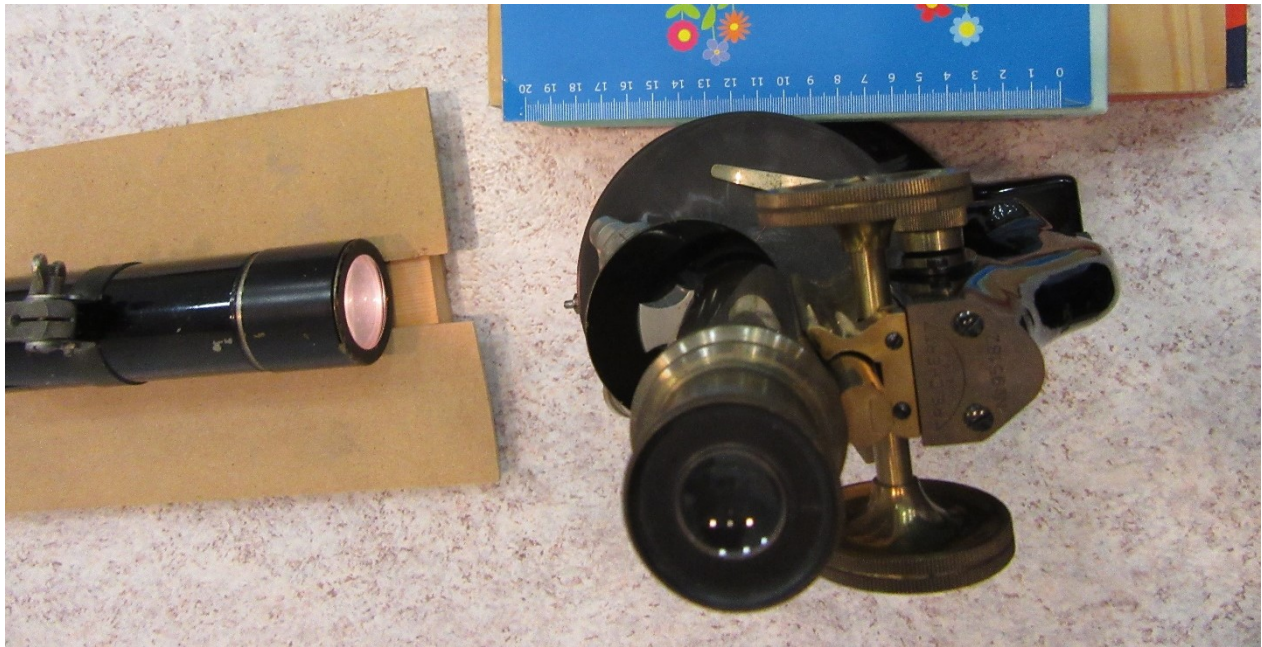


Abb. 44: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Vergrößerung des Mikroskops

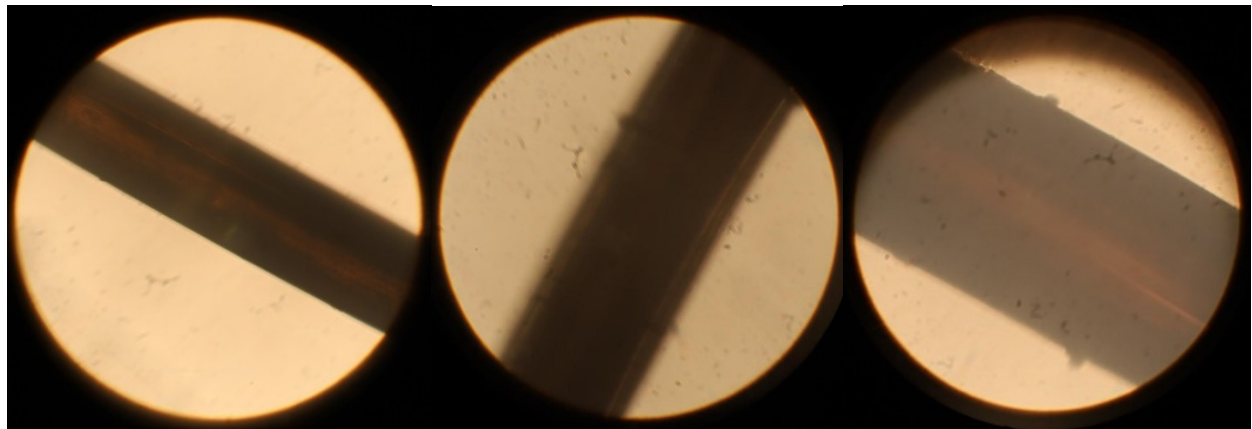


Abb. 45: Darstellung eines 0,200 mm breiten Kupferdrahtes

- Links: Objektiv 5
- Mitte: Objektiv Nr. unbekannt
- Rechts: Objektiv 8

Fazit zum Mikroskop

Das Mikroskop ähnelt vom Aufbau dem Mikroskop aus Kapitel 7.2, wobei dieses Mikroskop um einen Kondensor ergänzt wurde. Das Stativ verfügt statt eines drehbaren Gewindes über ein Kippgelenk. In den Experimenten wurde mit dem Mikroskop ein 0,200 mm breiter Kupferdraht

dargestellt. Es konnte maximal eine knappe 300-fache Vergrößerung erzielt werden. Der Vergleich von der Vergrößerungstabelle in Abb. 41 mit Tab. 4 und 5 zeigt, dass (unter Bedachtnahme des Fehlers der abgeschätzten Vergrößerung) nur mehr ein Objektiv laut Abb. 41 vorhanden ist. Die Objektive mit dem Abbildungsmaßstab 10:1 und 30:1 und das 10x-Okular sind offensichtlich nicht mehr vorhanden.

7.4 Reichert-Austria Mikroskop Nr. 208833

Abb. 46 zeigt das Reichert-Mikroskop Nr. 208833. Es ist im Inventar mit der Nummer VI 243 als Polarisationsmikroskop eingetragen. Leider ist der Polarisatoreinschub nicht mehr vorhanden. Auffallend ist, dass dieses Mikroskop (erworben 1950) nicht mehr in Messing natur, sondern schwarz gestrichen und mit verchromten Teilen ausgeführt ist. Tab. 1 zeigt die groben Abmessungen.

Tab. 1: Grunddaten zum Mikroskop

Höhe	Breite	Tiefe
34 cm	16 cm	22 cm

Für das Mikroskop existiert eine Aufbewahrungskassette, die Abb. 47 zeigt. Auf der inneren Seite der Tür der Holzkassette findet sich ein Zettel, welcher die Gesamtvergrößerungen bei einer Tubuslänge von 160 mm zeigt. Der Zettel kann in vergrößerter Darstellung in Abb. 50 betrachtet werden. Das Stativ (8) ist auf einem zweiarmigen Standbein (1) fixiert. Das Mikroskop wird mit Durchlicht betrieben, wobei das Mikroskop über keine eigene Lichtquelle verfügt. Das Licht kann sowohl über einen arretierbaren Hohlspiegel (2) in Richtung der Probe gelenkt werden. Die Menge des Lichts kann über eine Irisblende (3) reguliert werden, wobei sich oberhalb der Linse ein Kondensor befindet. Auf dem Probentisch (4) befinden sich zwei Klammern zum Fixieren der Probe. Am Rand des drehbaren Probentisches findet sich eine zugehörige Skala, welche in Abb. 48 dargestellt ist. Der Abstand zwischen Tubus (6) und Probentisch kann sowohl über einen Grobtrieb (10) als auch einen Feintrieb (9) eingestellt werden. Der Feintrieb mit zugehöriger Skala kann in Abb. 49 betrachtet werden. Der Tubus verfügt über einen Dreifach-Revolver (5), auf welchem drei verschiedene Objektive angebracht sind. In Tab. 2 sind die Informationen vermerkt, welche direkt von den Objektiven und dem Okular abgelesen werden können.

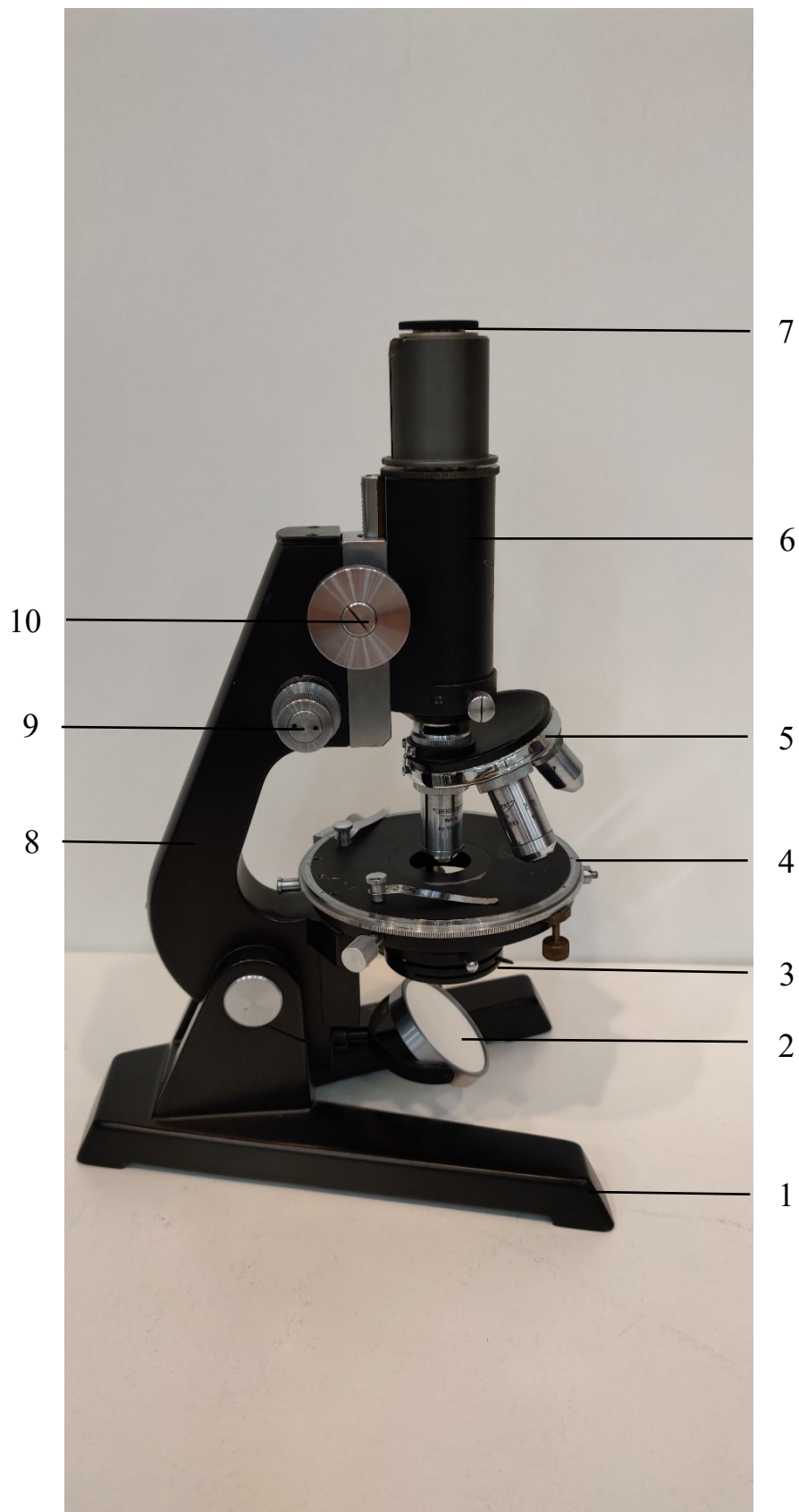


Abb. 46: Aufbau des Mikroskops: 1 Zweiarmiges Standbein, 2 Hohlspiegel, 3 Irisblende, 4 Proben­
tisch, 5 Dreifach-
Revolver, 6 Tubus, 7 Okular, 8 Stativ, 9 Feintrieb, 10 Grobtrieb

Das Mikroskop Nr. 208833 im Experiment

Während die Vergrößerung des Okulars auf dem Bauteil selbst vermerkt ist, wurden die Vergrößerungen der Objektive durch die Methoden aus Kapitel 6.3 und 6.4 bestimmt und können in Tab. 3 betrachtet werden. Eine bildliche Darstellung der Objektive und des Okulars ist in Abb. 51 und 52 gegeben. In Tab. 4 wurde die Dicke unterschiedlicher Kupferdrähte nach der Methode aus Kapitel 6.2 bestimmt. Abb. 54 bis 57 zeigen die für die Bestimmung der Drahtdicke aufgenommenen Bilder.

Tab. 2: Auflistung der Objektive und Okular wie am Gerät vorgefunden

Optik	Seriennummer	Numerische Aperatur	Beschreibung	Gravur
Objektiv 15 REICHERT WIEN	114383	A=0,65	45:1 np	2. P.I. 15.
Objektiv 11 REICHERT WIEN	120663	A=0,65	30:1	2. P.I. 11.
Objektiv 8 REICHERT WIEN	-	A=0,25	10:1	2. P.I. 8
Okular VI 243 10 6x	-	-	-	2. P.I.

Tab. 3: Ermittelte Vergrößerung der am Mikroskop angebrachten Objektive nach Kapitel 6.3 und 6.4

	Objektiv 15	Objektiv 11	Objektiv 8
Vergrößerung	56x	35x	11x



Abb. 47: Mikroskop mit Holzkassette und Zubehör



Abb. 48: Skala des Probentisches

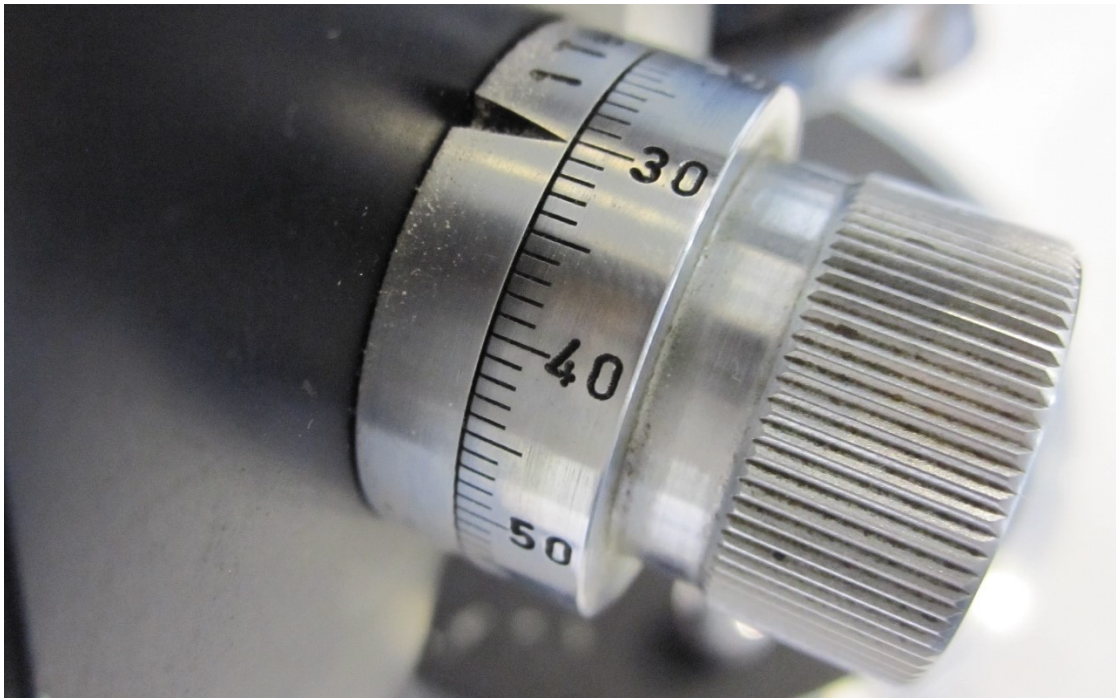


Abb. 49: Feintrieb

Subjektive Vergrößerungen
Mechanische Tubuslänge $t_m = 160$ mm

Stativ Nr. 208833

Objektive	Okulare						
	×	5×	×	6×	×	10×	×
: 1							
4,4 : 1		22		26		44	
: 1							
10 : 1		50		60		100	
: 1							
30 : 1		150		180		300	
: 1							
45 : 1		225		270		450	
: 1							
: 1							

OPTISCHE WERKE C. REICHERT
WIEN, XVII.

Mikro 589/II d. - 2000 - 11 48 - Schodl

Abb. 50: Gesamtvergrößerungen bei Tubuslänge 160 mm



Abb. 51: Objektive (Links 15, Mitte 11, Rechts 8)



Abb. 52: Okular VI 243|10



Abb. 53: Bestimmung der Gesamtvergrößerung nach Methode aus Kapitel 6.4

Tab. 4: Bestimmung der Dicke eines Drahtes nach Kapitel 6.2

Objektive	Okularmikrometer: Objektivmikrometer	Okularmikrometer mit Draht (Striche)	Berechnete Dicke Draht	Dicke Draht (Mikrometerschraube)
Objektiv 15	90:34	53	0,200 mm	0,20 mm
Objektiv 11	83:47	56	0,317 mm	0,34 mm
Objektiv 8	60:100	19	0,317 mm	0,34 mm

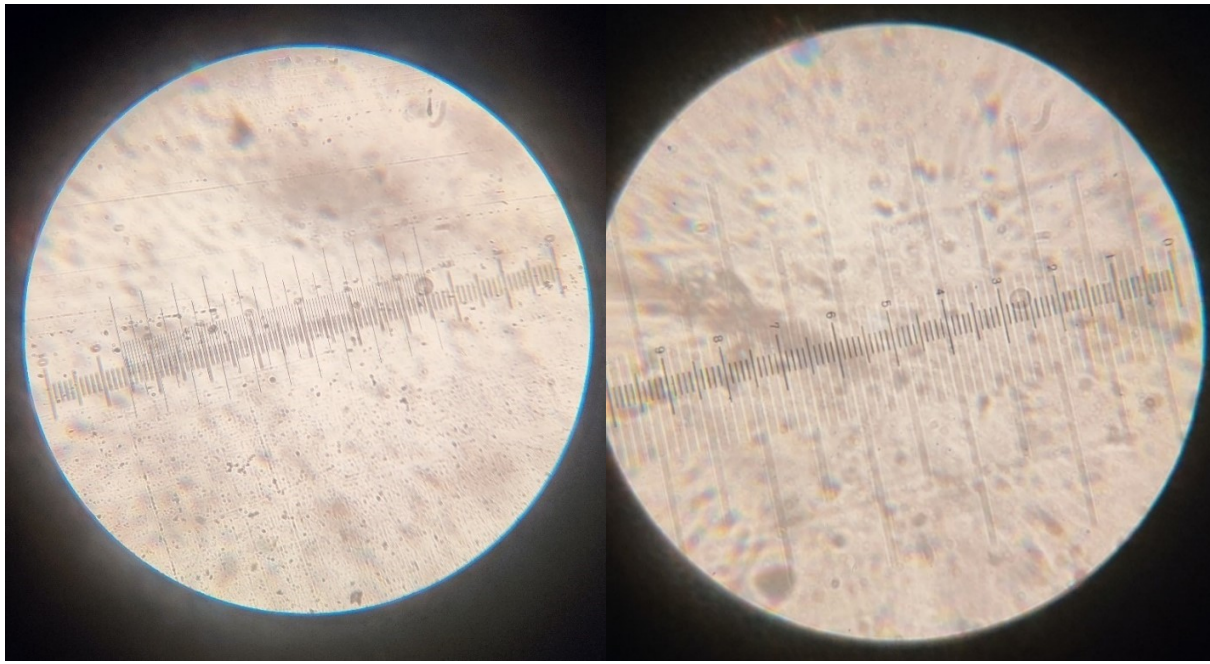


Abb. 54: Vergleich von Okularmikrometer und Objektivmikrometer: Links Objektiv 8, Rechts Objektiv 11

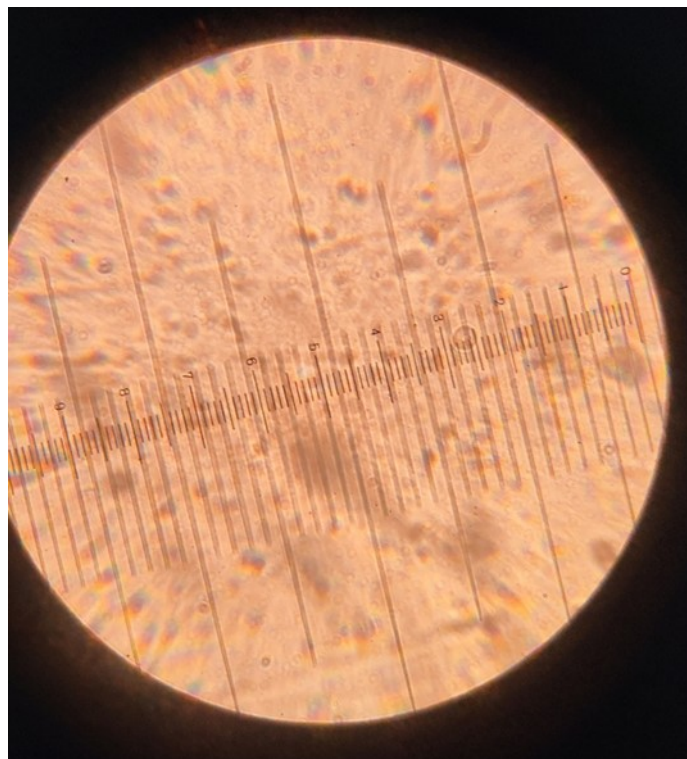


Abb. 55: Vergleich von Okularmikrometer und Objektivmikrometer mit Objektiv 15

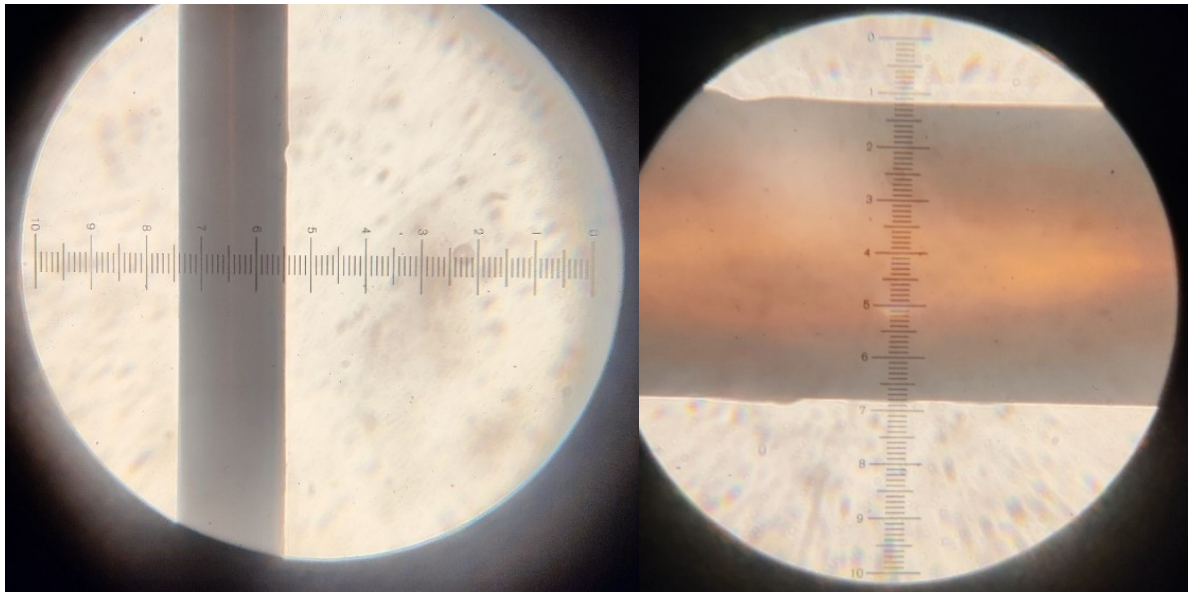


Abb. 56: Darstellung eines 0,340 mm Kupferdraht: Links Objektiv 8, Rechts Objektiv 11

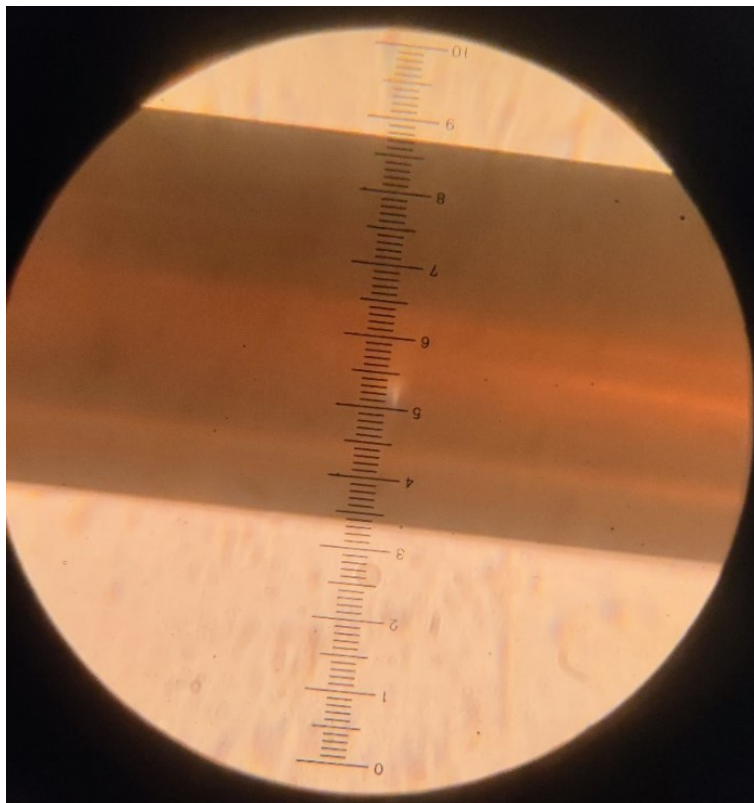


Abb. 57: Darstellung eines 0,200 mm Kupferdraht mit Objektiv 15

Fazit zum Mikroskop

Das Mikroskop ähnelt in seinen Details dem Mikroskop mit der Seriennummer 95182. Es bestehen bei genauerer Betrachtung jedoch feine Unterschiede beziehungsweise Ergänzungen. Der Probentisch ist am Rand mit einer Skalierung versehen und kann gedreht werden. Materialmäßig ist kein Messing mehr sichtbar, sondern das Mikroskop ist schwarz gestrichen, nur Bedienteile und Objektivfassung sind verchromt. Das Okular hat ein eingebautes Okularmikrometer, welches in den Abb. 54 bis 57 ersichtlich ist und für die Bestimmung der Dicke eines Drahtes verwendet wurde. Generell ist das Mikroskop in einem sehr guten Zustand und weist kaum Abnützungserscheinungen auf, abgesehen davon, dass der Polarisator- bzw. Analysatoreinschub fehlt.

7.5 Reichert-Austria Mikroskop Nr. 259599

Beim Reichert-Mikroskop Nr. 259599 (Abb. 58) mit der Inventarnummer 62/8 bzw. 30010250 handelt es sich um ein Stereomikroskop mit einer umfangreichen Ausstattung. In Tab. 1 sind Masse und Abmessungen ersichtlich.

Tab. 1: Grunddaten zum Mikroskop

Masse	Höhe	Breite	Tiefe
15,7 kg	50 cm	26 cm	39 cm

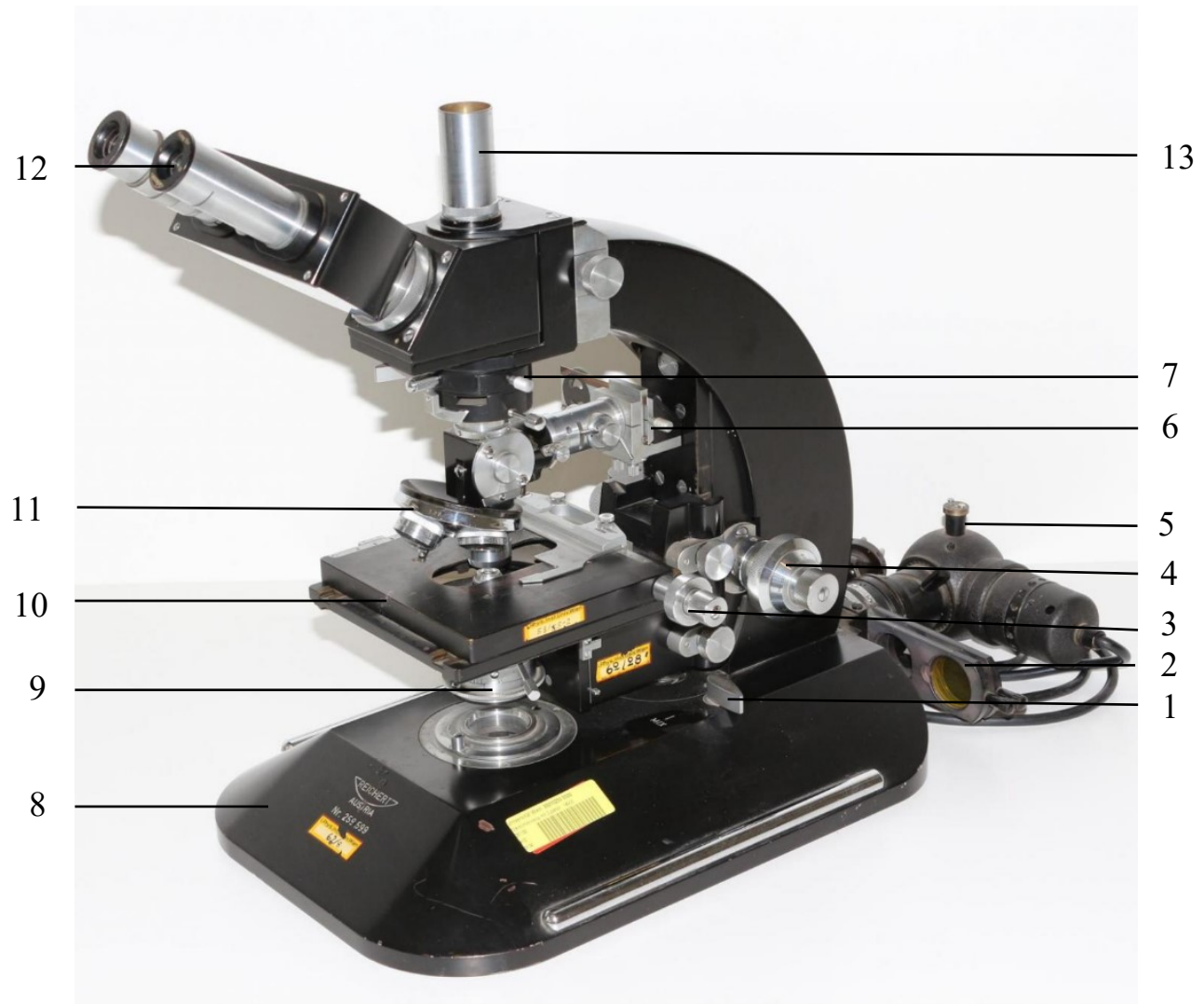


Abb. 58: Aufbau des Mikroskops: 1 Schalter für Durchlicht oder Auflicht, 2 Farbfilter, 3 Trieb für x-y-Tisch, 4 Grobtrieb und Feintrieb, 5 Lichtquelle, 6 Blenden, 7 Farbfilter, 8 Standfläche, 9 Kondensor mit Irisblende, 10 Probenstisch, 11 Vierfach-Revolver mit Objektiven, 12 Binokular, 13 Kameraanschluss

Auf der Standfläche (8) befindet sich ein Schalter (1), mit welchem zwischen Durchlicht und Auflicht gewechselt werden kann. Zur Betrachtung der Proben stehen unterschiedliche Farbfilter (2, 7) zur Verfügung. Die Lichtmenge kann durch Blenden (6) reguliert und gezielt gesteuert werden. Auf der Unterseite des Probenstisches (10) befindet sich ein Kondensor mit einer Irisblende (9). An der gekrümmten Stativsäule befinden sich Grobtrieb und Feintrieb (4). Die Dicke einer Probe kann mit Hilfe des Triebs für den Kreuztisch (3) ermittelt werden. Bei dem Mikroskop handelt es sich um ein Binokular. Weiteres gibt es einen Anschluss für eine Fotokamera (13), wo an Stelle der Kamera auch die normalen Okulare verwendet werden können. Die Okulare haben

die Vergrößerung 16x. Durch einen Vierfach-Revolver (11) kann zwischen verschiedenen Objektiven gewechselt werden, die jedoch nicht konfokal sind. Die vier montierten Objektive sind in der Abb. 59 dargestellt, wobei das messingfarbene Gewinde dieser Objektive gut sichtbar ist. Die wichtigsten Kennwerte der montierten Objektive sind in der Tab. 2 aufgelistet. Die Vergrößerung ist nur für das Objektiv 3 (13/0,25) angegeben. Mit dem Objektiv Nr. 318134 wird nur dann die Probe sichtbar, wenn der Umschalthebel (1) leicht nach links gedrückt wird. Das Mikroskop verfügt über eine integrierte Lichtquelle (5) auf der Hinterseite des Mikroskops, welche vom Regeltransformator aus Abb. 60 versorgt wird. Die durch die Lampe fließende Stromstärke kann mit Hilfe des zum Mikroskop gehörigen Regeltransformators zwischen 0 und 6 Ampere eingestellt werden. Es empfiehlt sich bei längerem Betrieb eine Stromstärke von 5 Ampere nicht zu überschreiten, um eine Überhitzung der Lampe zu vermeiden. Der Transformator bzw. der Lampenkreis hat einen Wackelkontakt, weshalb die Beleuchtung zeitweise unterbrochen wird.

Das Mikroskop Nr. 259599 im Experiment

Zunächst wurde die Vergrößerung der vier Objektive nach Kapitel 6.4 überprüft. Die Werte sind in Tab. 2 eingetragen. Unter der Annahme, dass Objektiv 3 um den Faktor 13 vergrößert, können aus den Bildern aus Abb. 61 und 63, die jeweils mit der Okularkamera aufgenommen worden sind, die Vergrößerungen der restlichen drei Objektive bestimmt werden. Die erhaltenen Werte sind in der Tab. 3 als fette Zahlen in Klammer eingetragen. Entfernt man eines der Okulare aus dem Sockel (oder wird Anschluss (13) benutzt, kann eine Okularkamera angeschlossen werden Abb. 61 zeigt das Objektmikrometer fotografiert mit der Okularkamera und jeweils einem der angebrachten Objektive. Abb. 63 stellt das erwähnte Kreuzgitter dar, welches mit den vier Objektiven und der Okularkamera aufgenommen wurde. Abb. 62 stellt das Grid für jedes der vier montierten Objektive dar, wobei hier statt Okularkamera das Handy vor die Linse eines 16x-Okulars gehalten wurde. Vergleicht man Abb. 62c und Abb. 63b erkennt man, dass die Aufnahmen mit dem Handy ein circa 2,5-fach größeres Gesichtsfeld haben. Das liegt eben daran, dass der rechteckige Sensor der Okularkamera nur einen Ausschnitt des gesamten Zwischenbildes darstellt. Abb. 64 zeigt die Gleitlinien eines um 3 % verformten Gold-Einkristalls (hergestellt im Februar 1997 von Franz Sachslehner), wobei hier das Objektiv 5np und die Okularkamera verwendet wurden.

Tab. 2: Auflistung aller Objektive und Okulare

Objektiv	Seriennummer	Beschriftung	Abgeschätzte Vergrößerung
Ca. 19 mm lang	---	3np, Gravur 9-89/99	12x (13x)
Ca. 17 mm lang	198745	13/0,25 3	12x (13x)
Ca. 12 mm lang	317186	5np C. REICHERT AUSTRIA	36x (35x)
CA: 6 mm lang	318134	6bnp	47x (50x)



Abb. 59: Objektive (a: 5np, b: 6bnp, c: 3, d: 3np)



Abb. 60: Regeltransformator für den Lampenstrom

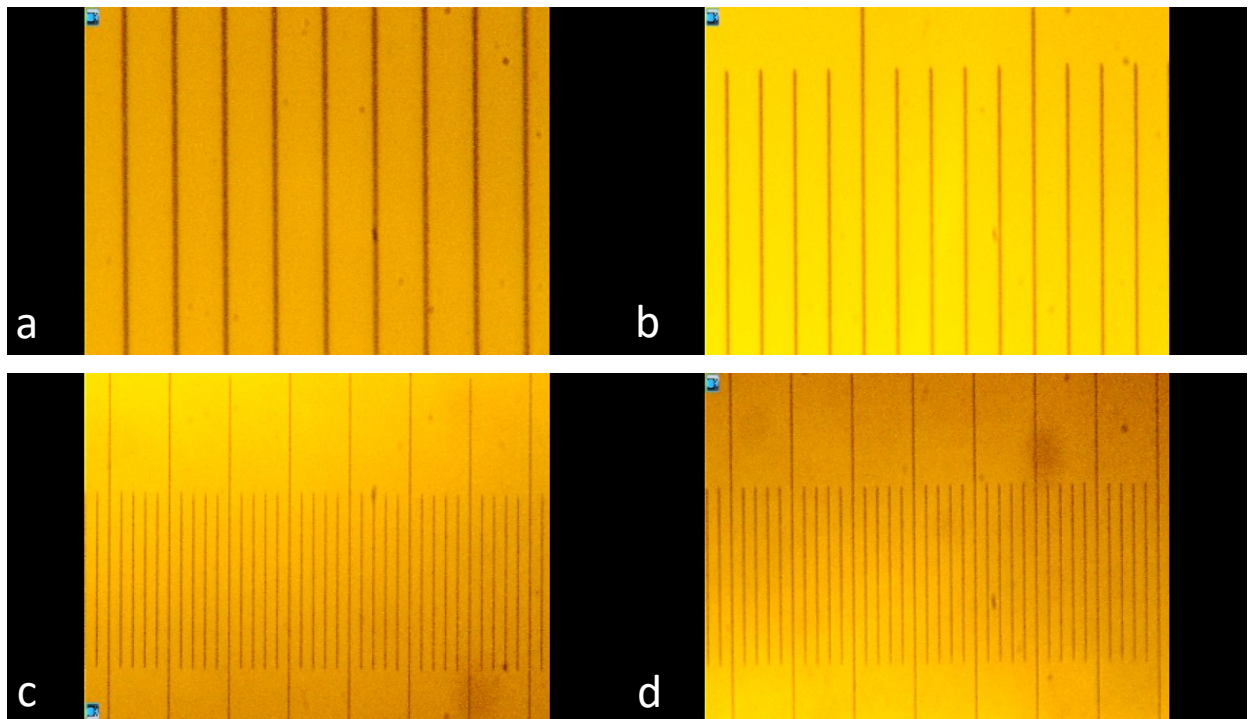


Abb. 61: Darstellung eines Objektmikrometers mit Okularkamera (mit Objektiv a: 3, b: 3np, c: 5np, d: 6bp)

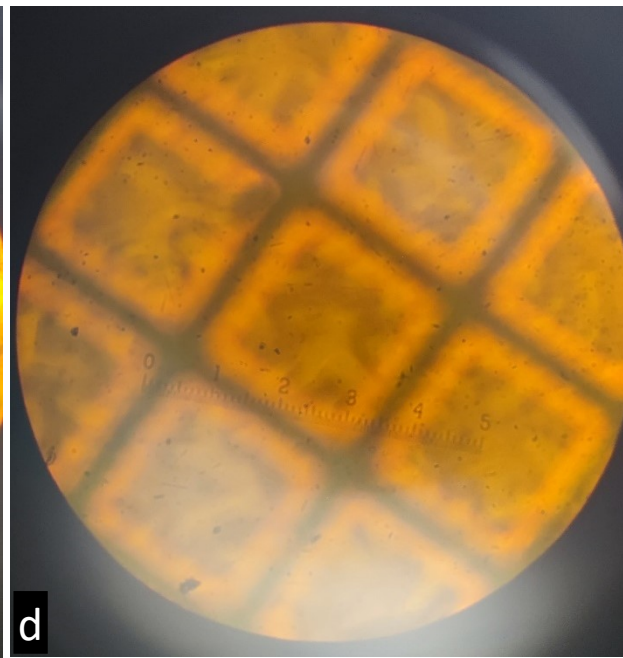
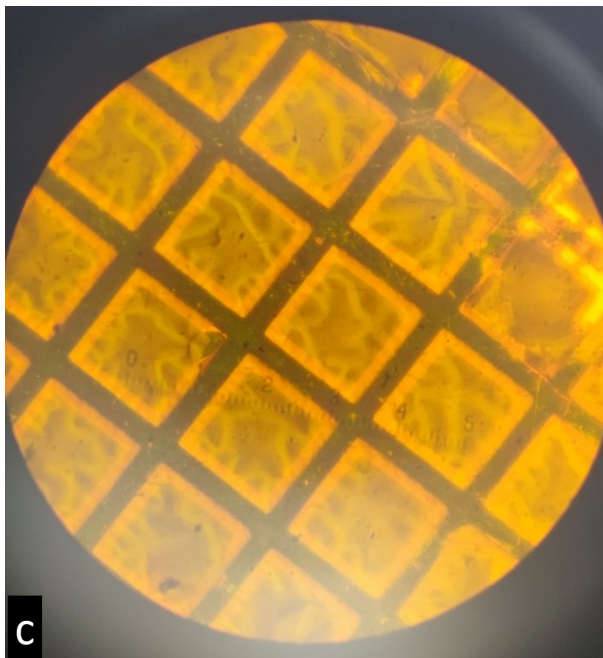
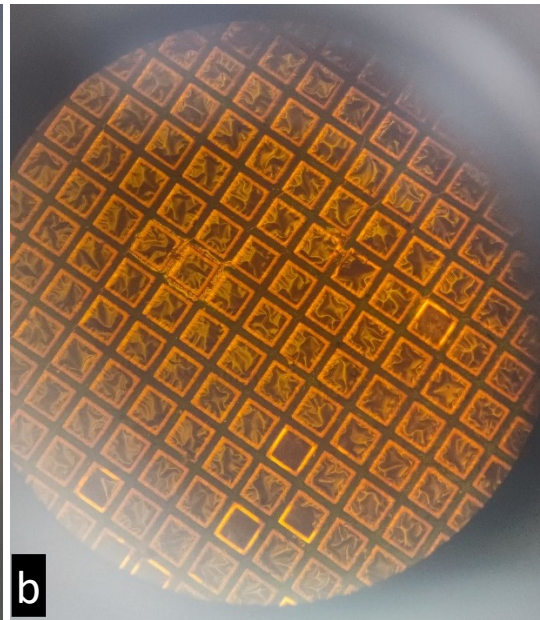
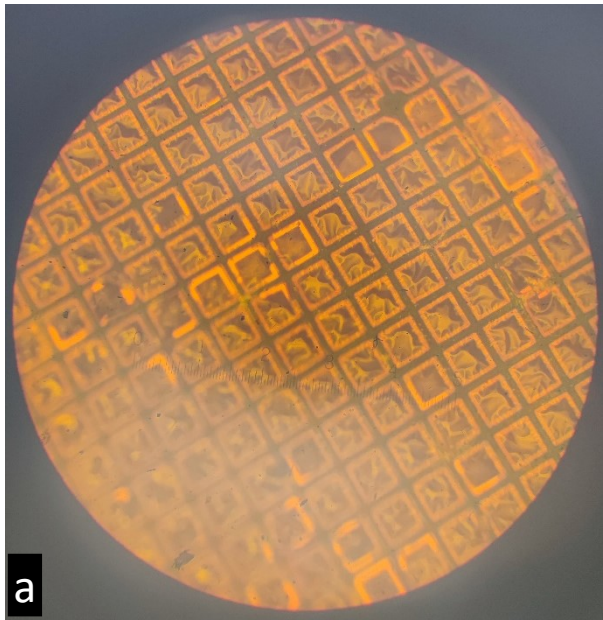


Abb. 62: Grid mit Handy und Okular 16x (mit Objektiv a: 3, b: 3np, c: 5np, d: 6bp)

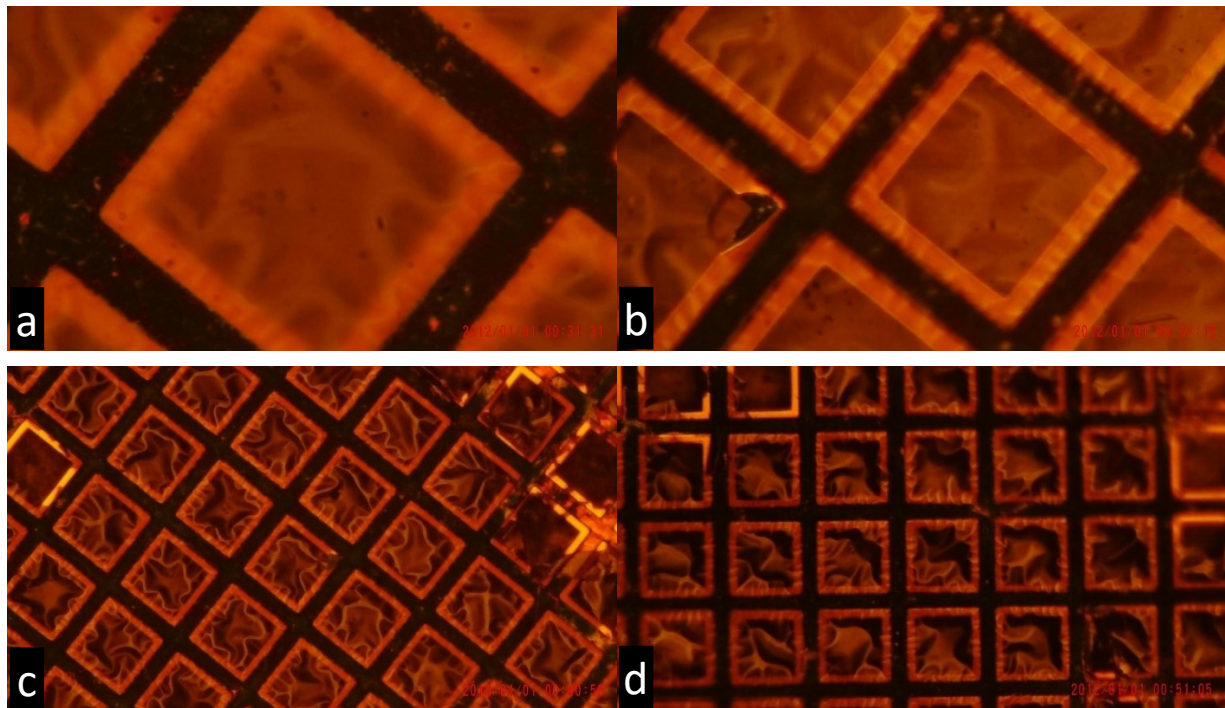


Abb. 63: Grid mit Okularkamera (Objektiv a: 6bnp, b: 5np, c: 3np, d: 3)

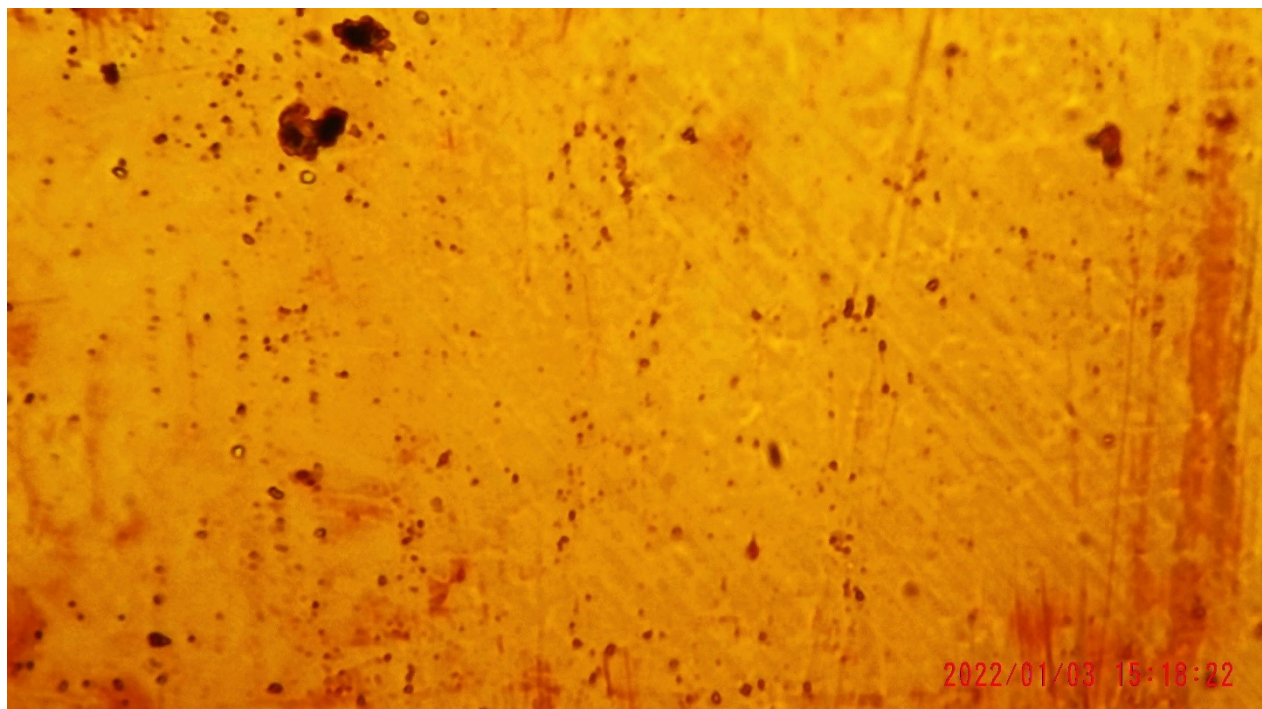


Abb. 64: Einkristall mit Gleitlinien mit Objektiv 5np und Okularkamera

Fazit zum Mikroskop

Bei dem Mikroskop handelt es sich um ein Binokular, welches über diverse Einstellungsmöglichkeiten wie Farbfilter und Blenden verfügt. Außerdem gibt es einen eigenen Kameraanschluss, der hinsichtlich Durchmesser und Vergrößerung den beiden anderen Okularanschlüssen exakt entspricht. Die 16x-Okulare passen auch genau in den Anschluss (13). Eine besondere Neuerung zeigt sich hier in einer eigenen verbauten Lichtquelle auf der Rückseite des Mikroskops. Die Lichtquelle ermöglicht sowohl eine Beleuchtung mit Durchlicht als auch Auflicht. Mittels Okularkamera können die erzeugten Bilder gespeichert und nachträglich bearbeitet werden. Abschließend sei erwähnt, dass es in der Zubehörkassette für das Stereomikroskop noch einige weitere Okulare gibt, die folgende Vergrößerungen haben: 5x (zwei Stück), 8x (zwei Stück) und 12,5x (ein Stück).

7.6 Reichert-Austria Mikroskop Nr. 274923

Abb. 65 zeigt das Reichert-Mikroskop Nr. 274923 (Inventarnummer Pv 26). Laut Inventarbuch wurde es 1960 angeschafft und viele Jahrzehnte im Anfängerpraktikum verwendet. Die Abmessungen gibt Tab. 1 an.

Tab. 1: Grunddaten zum Mikroskop

Höhe	Breite	Tiefe
36 cm	24,5 cm	35,1 cm

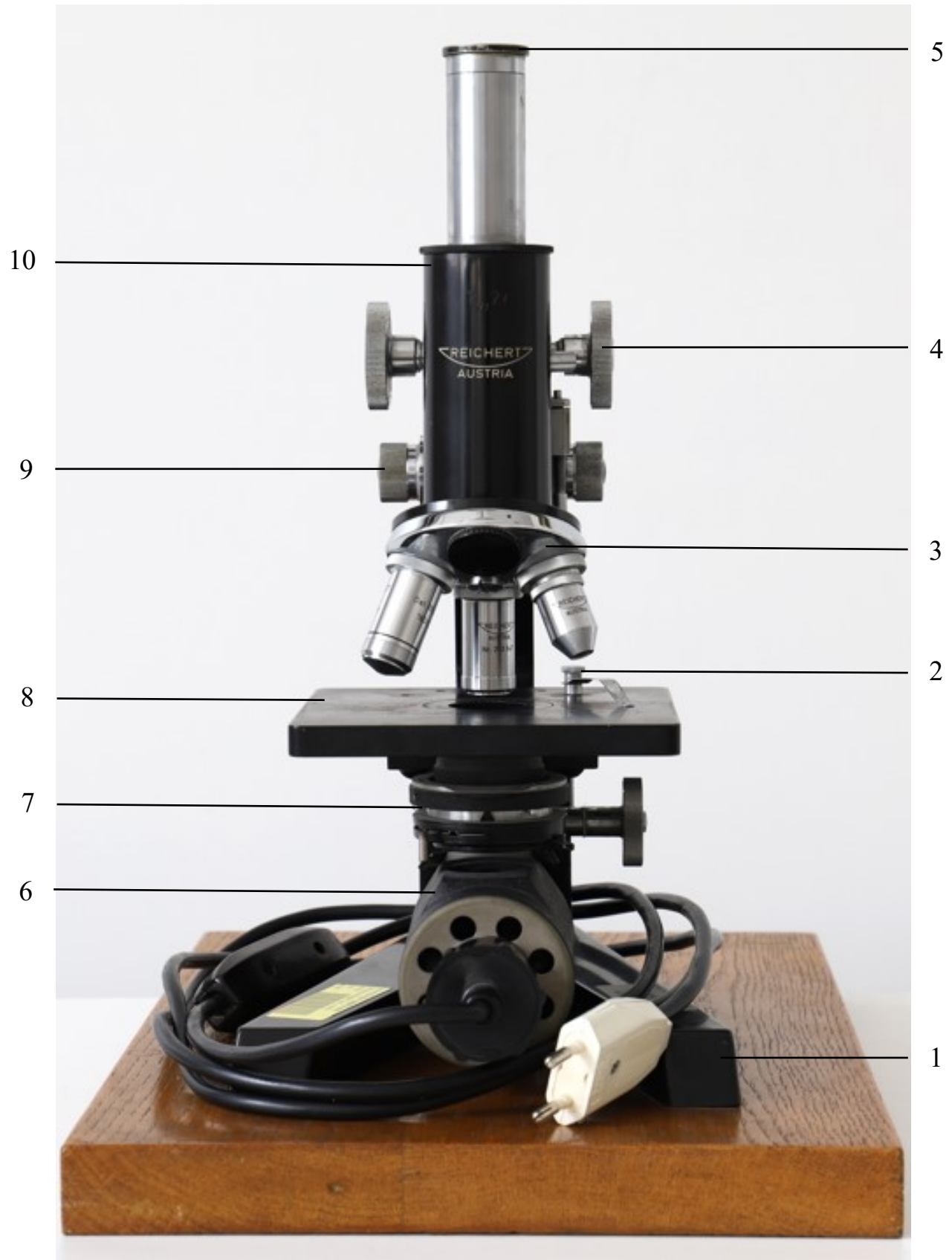


Abb. 65: Aufbau des Mikroskops: 1 Zweiarmiges Standbein, 2 Fixierklammern, 3 Vierfach-Revolver mit Objektiven, 4 Grobtrieb, 5 Okular, 6 Lichtquelle, 7 Irisblende, 8 Probenstisch, 9 Feintrieb, 10 Tubus

Das Mikroskop von Reichert-Austria besitzt ein v-förmiges Standbein (1), welches auf einer Holzplatte angebracht ist. Eine in einem Lampenhaus integrierte Lichtquelle (6) ermöglicht verschiedene Proben mit Durchlicht zu untersuchen, wobei durch eine Irisblende (7) die Menge des Lichts, welches auf die Probe trifft, gesteuert werden kann. Die zu untersuchenden Proben können durch eine Fixierklammer (2) am Probentisch befestigt werden, wobei die Probe dank eines Vierfach-Revolvers (3) in unterschiedlichen Vergrößerungen betrachtet werden kann, ohne dafür Objektive auszutauschen (es gibt allerdings nur drei Objektive). Tab. 2 zeigt die wichtigsten Daten der Objektive und des Okulars, wobei die Vergrößerungen direkt abgelesen werden konnten. Die Höhe des Tubus (10), auf dem das Logo der Firma angebracht ist, kann durch einen Grobtrieb (4) und einen Feintrieb (9) eingestellt werden. Der Feintrieb ist in Abb. 66 zu sehen. Es gibt auch einen Fokusanschlag. Ein Strich bei der Skala der Feintriebtrommel bedeutet 2 μm , eine volle Umdrehung 200 μm . Tab. 2 zeigt die wichtigsten Daten der Objektive und des Okulars, wobei die Vergrößerungen direkt abgelesen werden konnten.

Das Mikroskop Nr. 274923 im Experiment

In Tab. 3 wurde die Dicke eines Drahtes nach der Methode aus Kapitel 6.2 bestimmt. Die für diese Methode verwendeten Bilder sind in Abb. 67 und 68 dargestellt.

Tab. 2: Objektive und Okular

Linsen	Okular 51	Objektiv 33	Objektiv 34	Objektiv 35
Vergrößerung	16 x	10 x/0,25	40 x/0,65	Oel 100 x/1,25
Besonderheiten	-	Trockenobjektiv	Trockenobjektiv	Immersionsobjektiv (Öl)
Seriennummer	-	-	253847	244828
Numerische Apertur	-	0,25	0,65	1,25



Abb. 66: Feintrieb

Tab. 3: Dickenbestimmung eines Drahtes nach Kapitel 6.2

Objektive	Okularmikrometer: Objektivmikrometer	Okularmikrometer mit Draht (Striche)	Berechnete Drahtdicke	Dicke Draht (Mikrometerschraube)
Objektiv 33	99:55	35	0,194 mm	0,20 mm
Objektiv 34	75:11	83	0,122 mm	0,12 mm

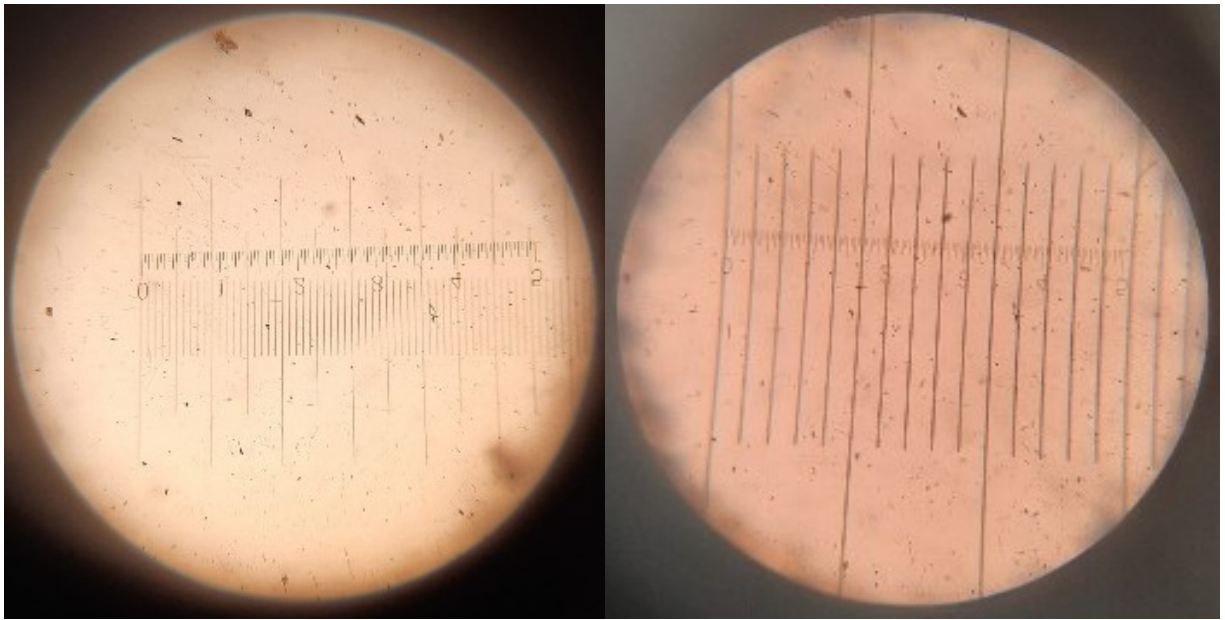


Abb. 67: Vergleich von Okularmikrometer und Objektmikrometer

- a) Links: 160-fache Vergrößerung
- b) Rechts: 1640-fache Vergrößerung

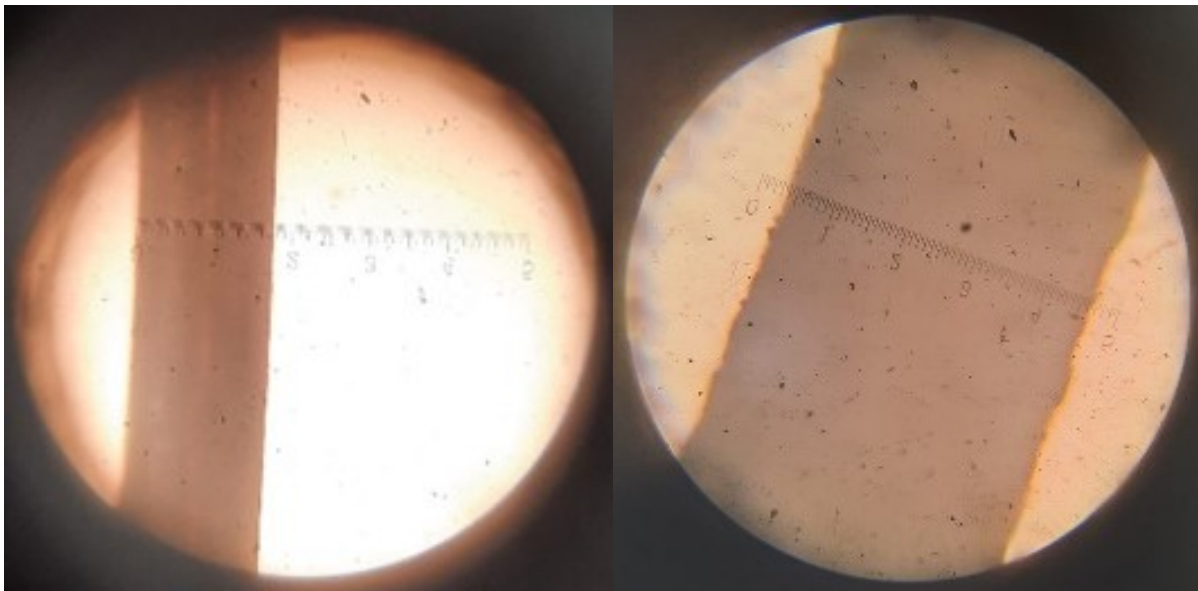


Abb. 68: Darstellung eines Kupferdrahtes

- a) Links: 0,200 mm dicker Kupferdraht bei 160-facher Vergrößerung
- b) Rechts: 0,120 mm dicker Kupferdraht bei 1640-facher Vergrößerung

Fazit zum Mikroskop

Abschließend sei erwähnt, dass das Reichert-Mikroskop Nr. 274923 ein relativ einfaches, aber solides Mikroskop ist, denn es hat viele Jahrzehnte im Anfängerpraktikum überstanden. Die Objektive sind konfokal, was ein bequemes schrittweises Einstellen der höchsten Vergrößerung ermöglicht.

7.7 Carl Zeiss Mikroskop Nr. 57277 (VI 269)

Das Zeiss-Mikroskop Nr. 57277 hat die Inventarnummer VI 269 und ist in Abb. 69 dargestellt. Die Abmessungen zeigt Tab. 1.

Tab. 1: Grunddaten zum Mikroskop

Höhe	Breite	Tiefe
30 cm	16 cm	13 cm

Für das Mikroskop existiert eine Holzkassette zur Aufbewahrung, welche in Abb. 70 gezeigt wird. Auf dem Stativ (4) mit u-förmigen Fuß (1) sind der Tubus (11) und der Probestisch (8) angebracht. Abb. 71 zeigt den Tubus mit Seriennummer und Grobtrieb. Eine Großaufnahme des Feintriebs stellt Abb. 72 dar. Am oberen Ende des Tubus befindet sich ein auswechselbares Okular (6). Abb. 73 zeigt die am Zweifachrevolver (9) montierbaren Objektive. In Tab. 2 sind alle Vergrößerungen der angebrachten Objektive und des Okulars aufgelistet. Ebenso gelistet ist das Objektiv mit Brennweite 4 mm aus der Holzkassette, das auch eingesetzt wird. Während die Vergrößerung des Okulars bekannt ist, wurden die Vergrößerungen der am Mikroskop angebrachten Objektive in der Tab. 3 nach den Methoden aus den Kapiteln 6.3 und 6.4 bestimmt. In der Holzkassette befinden sich zwei weitere Okulare (Orthoskop. Okular $f = 20$ mm mit der Gravur „2. P.I. 19.“ und ein Okular mit der Gravur „33.“) und Aufbewahrungsdosen für die Objektive. Die Probe kann durch einen Hohlspiegel oder Planspiegel (7) mit Durchlicht beleuchtet werden, wobei sich die Silbersicht bei den beiden am Mikroskop angebrachten Spiegeln bereits teilweise aufgelöst hat. Eine Darstellung eines 1,36 mm breiten Kupferdrahtes war dennoch möglich, wobei die Aufnahmen in Abb. 74 gezeigt werden. Das Mikroskop verfügt über keine eigene Lichtquelle. Der Probestisch kann durch eine Stellschraube (2) in der Ebene verschoben werden, auf welchem die Probe durch Fixierklammern (3) befestigt werden kann.



Abb. 69: Aufbau des Mikroskops: 1 Zweiarmiges Standbein, 2 Stellschraube für Probentisch, 3 Fixierklammern für Probe, 4 Stativ, 5 Feintrieb, 6 Okular, 7 Hohl- und Planspiegel, 8 Probentisch, 9 Zweifachrevolver mit Objektiven, 10 Grobtrieb, 11 Tubus



Abb. 70: Zeiss-Mikroskop Nr. 57277 mit Zubehör



Abb. 71: Tubus mit Seriennummer und Grobtrieb



Abb. 72: Feintrieb

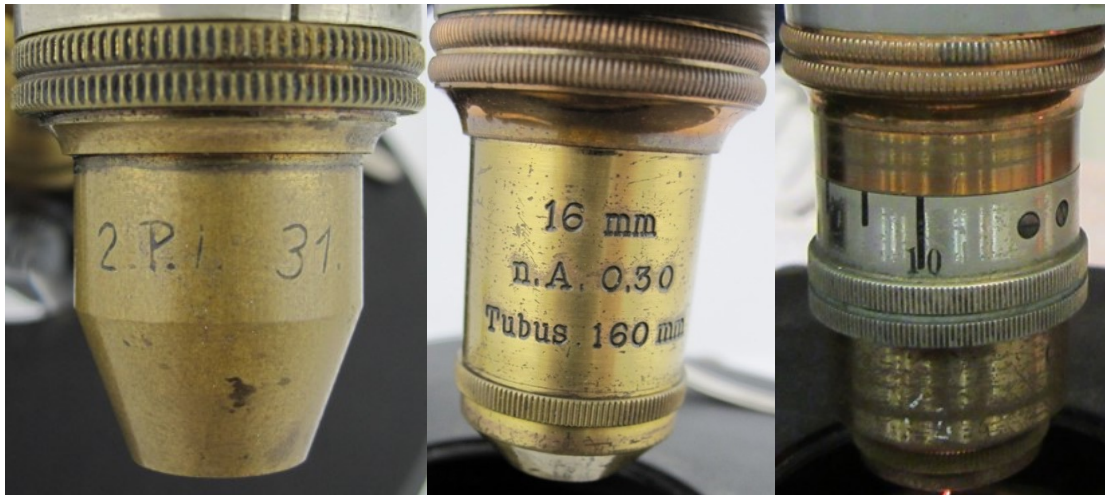


Abb. 73: Objektive (Links Objektiv 31, Mitte Objektiv 12, Rechts Objektiv $f = 4 \text{ mm}$)

Tab. 2: Objektive und Okulare

Optik	Gravur	Beschreibung
Objektiv 12	2. P.I. 12	Serien-Nr. 4641, $f = 16 \text{ mm}$, n.A. 0,3, Tubus 160 mm, Durchmesser vorne: ca. 8 mm, hat zwei Linsen, vordere Linse ist abschraubbar
Objektiv 31	2. P.I. 31	Durchmesser vorne ca. 6 mm
Objektiv $f = 4 \text{ mm}$		CARL ZEISS JENA, 4.0 mm, Apert. 0,95, Tubuslänge 160 mm (auf 100 – 200 verstellbar), vierteilig, Durchmesser vorne ca. 2 mm,
Okular 34	-	Vergrößerung 5x

Das Zeiss-Mikroskop Nr. 57277 im Experiment

Tab. 3: Bestimmung der Mikroskopvergrößerung und Okularvergrößerung nach Kapitel 6.3 und 6.4

Reale Dicke der Probe	Objektiv	Vergrößerte Dicke der Probe	Gesamtvergrößerung	Vergrößerung Objektiv
1,36 mm	Objektiv 12, vordere Linse abgeschraubt	60 mm	44 x	8 x
0,34 mm	Objektiv 12 komplett	28 mm	82 x	16 x
1,36 mm	Objektiv 31	44 mm	32 x	6 x
0,34 mm	Objektiv 4mm	120 mm	382 x	76 x

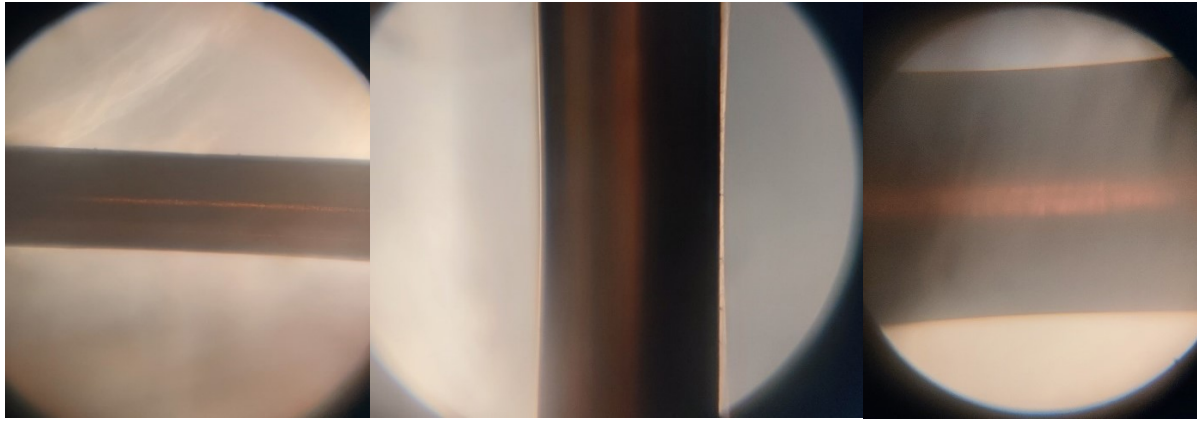


Abb. 74: Darstellung eines Kupferdrahtes

- Links: 1,36 mm Kupferdraht bei ca. 32-facher Vergrößerung (Objektiv 31)
- Rechts: 1,36 mm Kupferdraht bei ca. 44-facher Vergrößerung (Objektiv 12, vordere Linse abgeschraubt)
- Mitte: 0,34 mm Kupferdraht bei ca. 82-facher Vergrößerung (Objektiv 12 komplett)

Fazit zum Mikroskop

Das Mikroskop ist gut erhalten, wobei hierfür ebenfalls eine Holzkassette samt diversen Zubehör zur Verfügung stehen. Einzig allein der angebrachte Hohl- bzw. Planspiegel zeigt bereits Mängel auf, da die aufgedampfte Silberschicht hier bereits teilweise korrodiert ist. Dennoch erzeugt dieses Zeiss-Mikroskop gute Bilder, wie Abb. 74 zeigt.

7.8 Plössl Mikroskop horizontal

Das horizontale Plössl Mikroskop (Abb. 75), das ca. 1840 zu datieren ist, hat die Vitrinen-Nr. 28 zugeordnet. Gewicht und Abmessungen zeigt Tab. 1.

Tab. 1: Grunddaten zum Mikroskop

Masse	Höhe	Breite	Tiefe
1 kg	20 cm	23 cm	40 cm

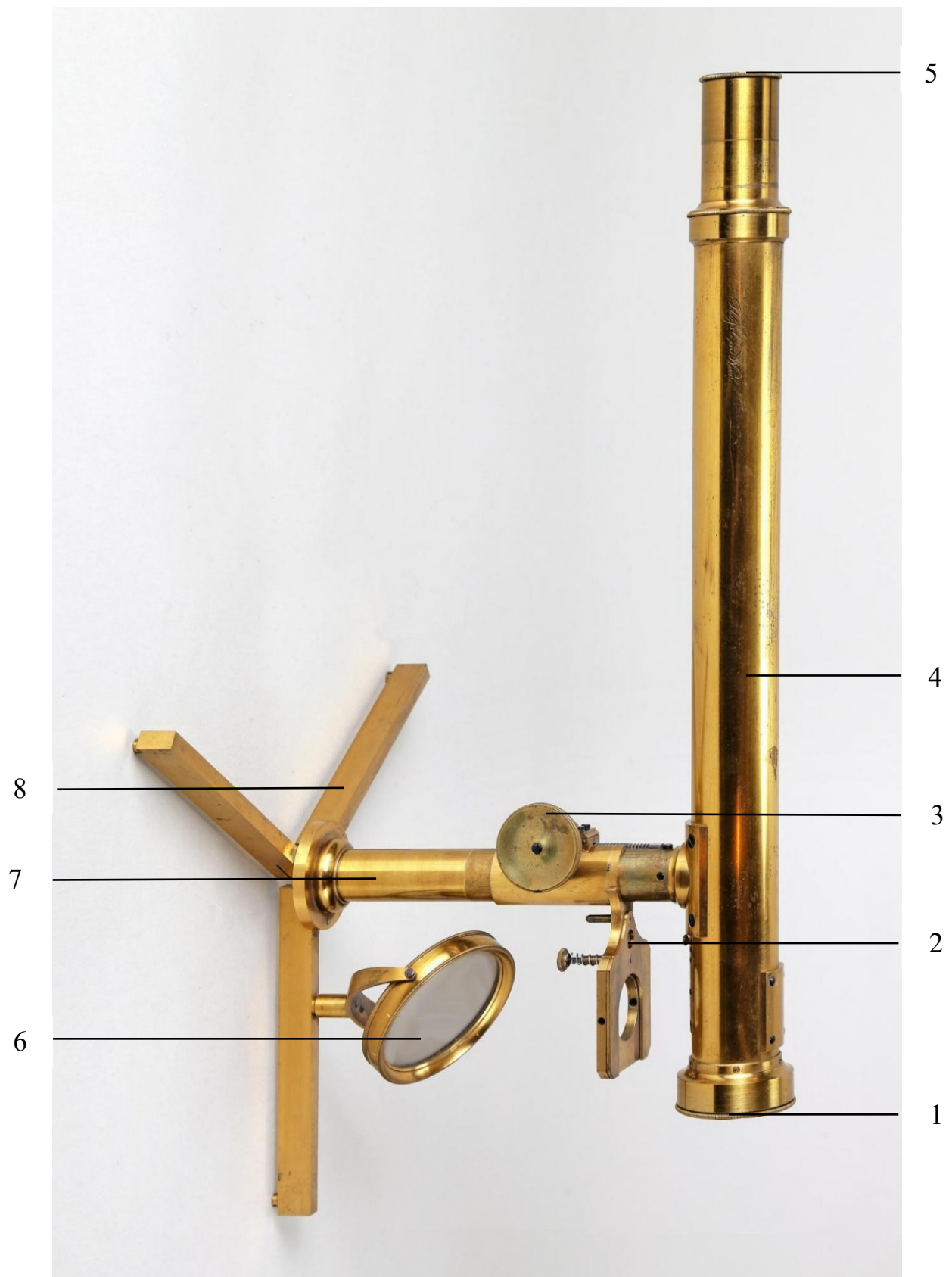


Abb. 75: Aufbau des Mikroskops: 1 Verschlusskappe, 2 Probenstisch, 3 Grobtrieb, 4 Tubus, 5 Okular, 6 Spiegel, 7 Stativ, 8 Dreiarmiges Standbein

Das Mikroskop besteht aus einem dreiarmligen Standbein (8), welches über eine vertikale Stativsäule (7) mit einem horizontal liegenden Tubus (4) verbunden ist. Am Tubus selbst befindet sich die Gravur des Herstellers, welche in Abb. 78 betrachtet werden kann. Abb. 76 zeigt, wie Abb. 75 ebenfalls das Mikroskop, wobei hier die optisch abbildenden Komponenten abgenommen wurden. Die Verschlusskappe drückt auf eine dreiarmlige Anpressfeder, die einen Hohlspiegel in Position hält. Das Durchlichtmikroskop verfügt über keine eigene Lichtquelle. Ein justierbarer (korrodiert) Hohlspiegel (6), welcher in Abb. 79 und 82 dargestellt wird, lenkt die auf ihn treffenden Lichtstrahlen durch die Probe in ein Loch im Tubus, wo sich ein schräger, flacher Spiegel befindet. Durch den schräg eingebauten Flachspiegel, welcher in Abb. 77 gezeigt wird, wird das Licht auf einen dahinter liegenden Hohlspiegel geworfen, welcher sich vor der Verschlusskappe (1) befindet. Der Hohlspiegel fungiert hier als Objektiv, welcher die auf ihn auftreffenden Lichtstrahlen an das andere Ende des Tubus zum Okular (5) weiterleitet. Die Höhe des Tubus kann durch einen Grobtrieb (3) eingestellt werden, wodurch der Abstand zwischen Probe und Spiegel verändert werden kann, was eine Scharfstellung der zu untersuchenden Probe ermöglicht. Die Darstellung von Objekten erweist sich als schwierig, da der im Tubus als Objektiv fungierende Hohlspiegel bereits stark korrodiert ist. Am Stativ befindet sich ein Probestisch (2), wobei die Probe durch eine dünne u-förmige Platte am Probestisch mit Hilfe einer Federschraube fixiert werden kann. Die Federschraube zur Fixierung der Probe stellt ein typisches Merkmal der Plössl Mikroskop dar, wobei diese in Abb. 80 dargestellt wird.

Das horizontale Plössl-Mikroskop im Experiment

Abb. 81 zeigt eine mit dem Mikroskop gemachte Aufnahme eines 1,36 mm breiten Kupferdrahtes. Das Mikroskop liefert eine 45-fache Vergrößerung, welche nach der Methode aus Kapitel 6.4 bestimmt wurde.



Abb. 76: Horizontales Plössl-Mikroskop zerlegt

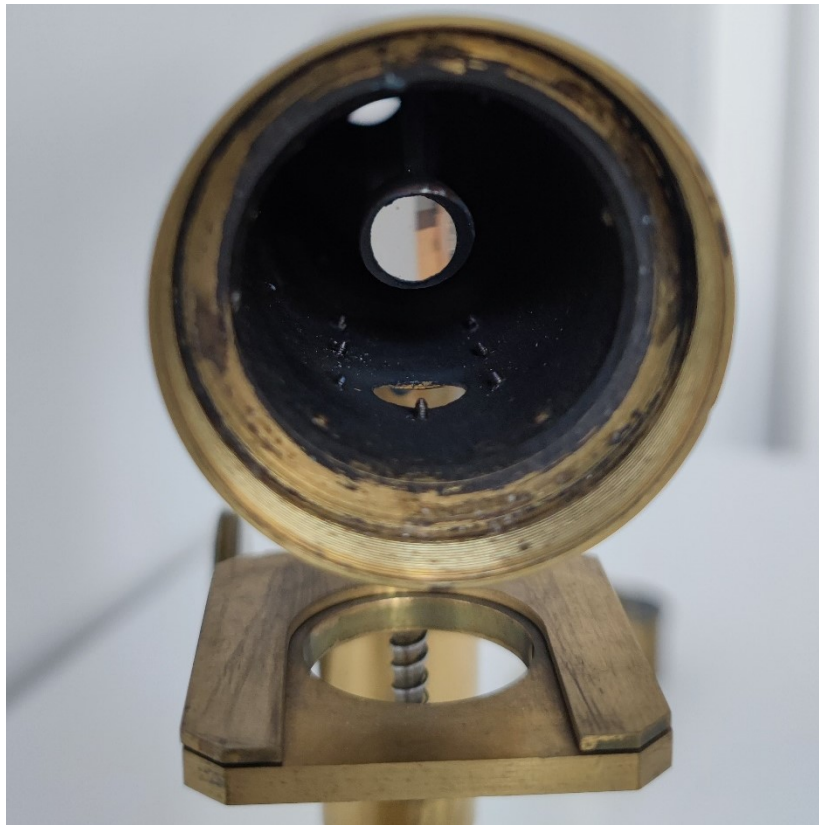


Abb. 77: Tubus Innenseite mit schrägem Spiegel



Abb. 78: Gravur am horizontalen Plössl-Mikroskop



Abb. 79: Hohlspiegel für Durchlicht



Abb. 80: Zweiteiliger Probestisch

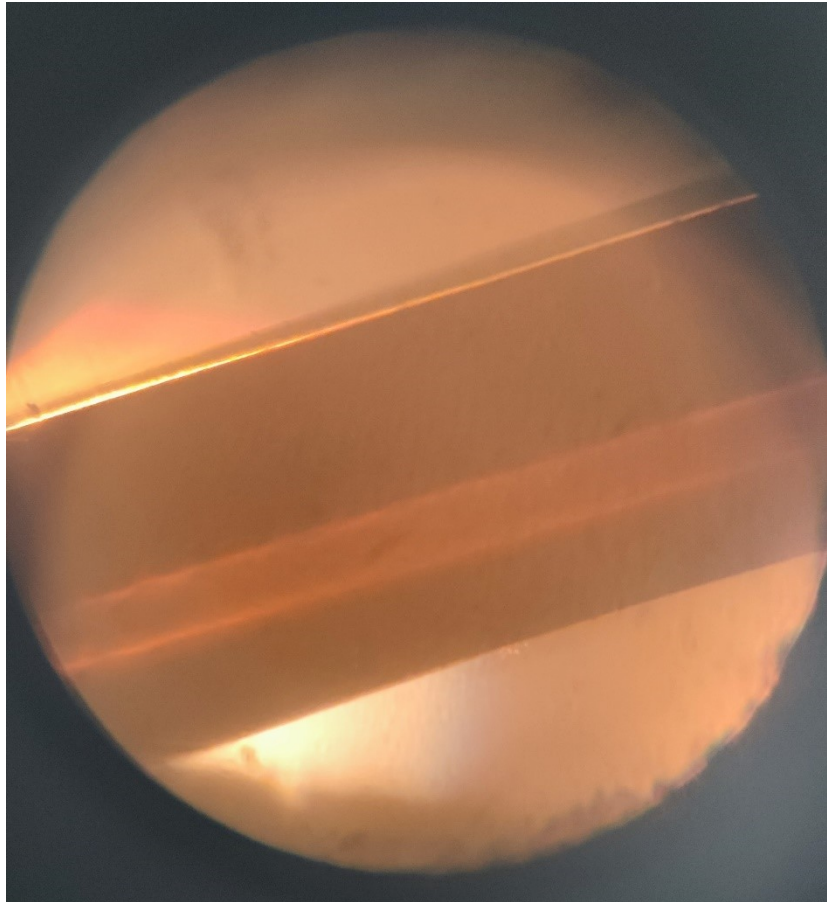


Abb. 81: 1,36 mm Kupferdraht bei 45-facher Vergrößerung



Abb. 82: Leicht schadhafter Hohlspiegel für Durchlicht

Fazit zum horizontalen Plössl-Mikroskop

Die Besonderheit dieses Plössl Mikroskops liegt im waagrechten Tubus und einem darin befindlichen Hohlspiegel, welcher hier als Objektiv fungiert. Hier ist anzumerken, dass die Silberschicht des Hohlspiegels (des Objektivs) bereits beträchtlich oxidiert ist und eine Bildwiedergabe hier zwar möglich ist, wie Abb. 81 zeigt, aber diese einer guten Beleuchtung bedarf. Eine weitere Eigenheit des Mikroskops besteht in einer abnehmbaren Platte am Tubus, welche durch zwei Schrauben befestigt ist und für Wartungsarbeiten am Spiegel im Tubus, welcher die Lichtstrahlen auf das Objektiv werfen soll, entfernt werden kann. Das Mikroskop verfügt über eine für Plössl Mikroskope typische Schraubenfeder, mit welcher eine Probe am Probenstisch zwischen den beiden Platten, aus welcher der Probenstisch besteht, befestigt werden kann.

7.9 Plössl Mikroskop VI 202 mit Dreikant-Stativ

Das Plössl Mikroskop mit der Inventarnummer VI 202 ist ca. im Zeitraum 1846-1850 zu datieren. Es ist in Abb. 83 dargestellt. Die Abmessungen zeigt Tab. 1.

Tab. 1: Grunddaten zum Mikroskop

Höhe	Breite	Tiefe
47 cm	31 cm	25 cm



Abb. 83: Aufbau des Mikroskops: 1 Hohlspiegel, 2 Probenstisch, 3 Zweiter Probenstisch, 4 Objektive, 5 Prisma, 6 Tubus, 7 Okular, 8 Dreiarmiges Standbein, 9 Schraubenfeder, 10 Rad mit Skalierung, 11 Dreikantstativ aus Stahl, 12 Grobtrieb, 13 Feintrieb

Für das Mikroskop und das Zubehör existiert eine mit grünem Samt ausgekleidete Holzkassette, welche in Abb. 84 dargestellt ist. Das Stativ (11) ist auf einem dreiarmigen Standbein (8) befestigt. Auf dem Stativ ist ein Probenstisch mit Aufsatz (2) angebracht. Abb. 87 zeigt den Probenstisch mit darauf montiertem Messtisch mit Skalentrommel, während Abb. 88 den aufgesetzten Messtisch selbst und Abb. 89 den Probenstisch zeigt. Die Skalentrommel des Messtisches (10), welche zur Dickenmessung einer Probe verwendet werden könnte, steckt leider fest und ist daher nicht verwendbar. Auf der Unterseite des Probenstisches befindet sich eine verstellbare Scheibe mit verschiedenen großen Lochblenden, welche in Abb. 90 dargestellt ist. Ebenso ist in Abb. 90 auf der Unterseite des Probenstisches eine federbelastete Schraube zu sehen, welche für das Einklemmen der Probe verwendet werden kann. Das Mikroskop wird durch einen Hohlspiegel (1) mit Durchlicht oder durch ein Prisma (5) mit Auflicht betrieben, wobei das Mikroskop über keine eigene Lichtquelle verfügt. Der Feintrieb (13) ist defekt, während der Grobtrieb (12) voll funktionstüchtig ist. Die Höhenlage des Tubus wird mit Hilfe des Grobtriebes am Stahl-Stativ über einen Zahntrieb eingestellt, welche in Abb. 86 gezeigt wird. Das Okular (7) besitzt ein Fadenkreuz und es liegen dem Mikroskop sieben verschiedene Objektive (4) bei, welche einzeln oder kombiniert verwendet werden können. Die beiliegenden Objektive werden in Abb. 92 gezeigt. Weitere, dem Mikroskop beiliegende Okulare werden in Abb. 85 dargestellt. Abb. 91 zeigt ein Zubehör für die Beleuchtung: es handelt sich hier um zwei normale Gläser (ohne Vergrößerung), wobei das untere Glas fix montiert ist und das obere relativ zum unteren gekippt werden kann. Dadurch kann (z.B. bei Verwendung von Sonnenlicht) ein Teil des Lichtes reflektiert werden und so der Kontrast des Bildes beeinflusst werden.

Das Plössl-Mikroskop mit Dreikantstativ im Experiment

In Tab. 2 sieht man die möglichen Gesamtvergrößerungen des Mikroskops, welche jeweils unter Verwendung eines der beiliegenden Objektive erzielt werden können. Die Gesamtvergrößerungen wurden nach der Methode aus Kapitel 6.4 bestimmt, da die Vergrößerungen von den Objektiven und dem Okular unbekannt waren. Abb. 93 zeigt den Versuchsaufbau für die Bestimmung der Gesamtvergrößerung. Abb. 94 veranschaulicht die typische Einstelldistanz für die Betrachtung eines Kupferdrahtstückes mit 1,36 mm Durchmesser. Die drei Bilder in Abb. 95 stellen den Kupferdraht bei verschiedenen Vergrößerungen dar. Die Bildqualität ist überraschend gut, obwohl dieses Mikroskop ungefähr 175 Jahre alt ist und vor diesem Experiment auch nicht gereinigt wurde.

In Abb. 96 wird das Kreuzgitter bei 35-facher Vergrößerung dargestellt, wobei hier in der Abb. ebenfalls das Fadenkreuz des Okulars sichtbar ist.





Abb. 85: Okulare des Plössl-Mikroskops mit Dreikantstativ

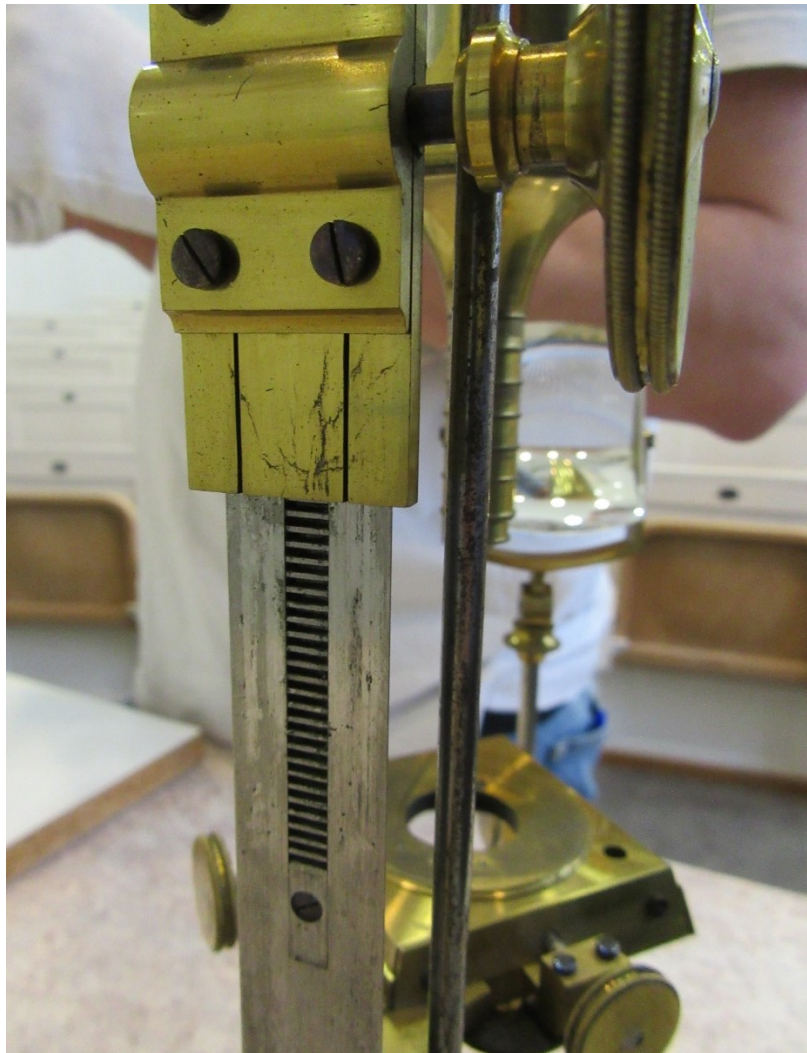


Abb. 86: Zahntrieb am Dreikantstativ

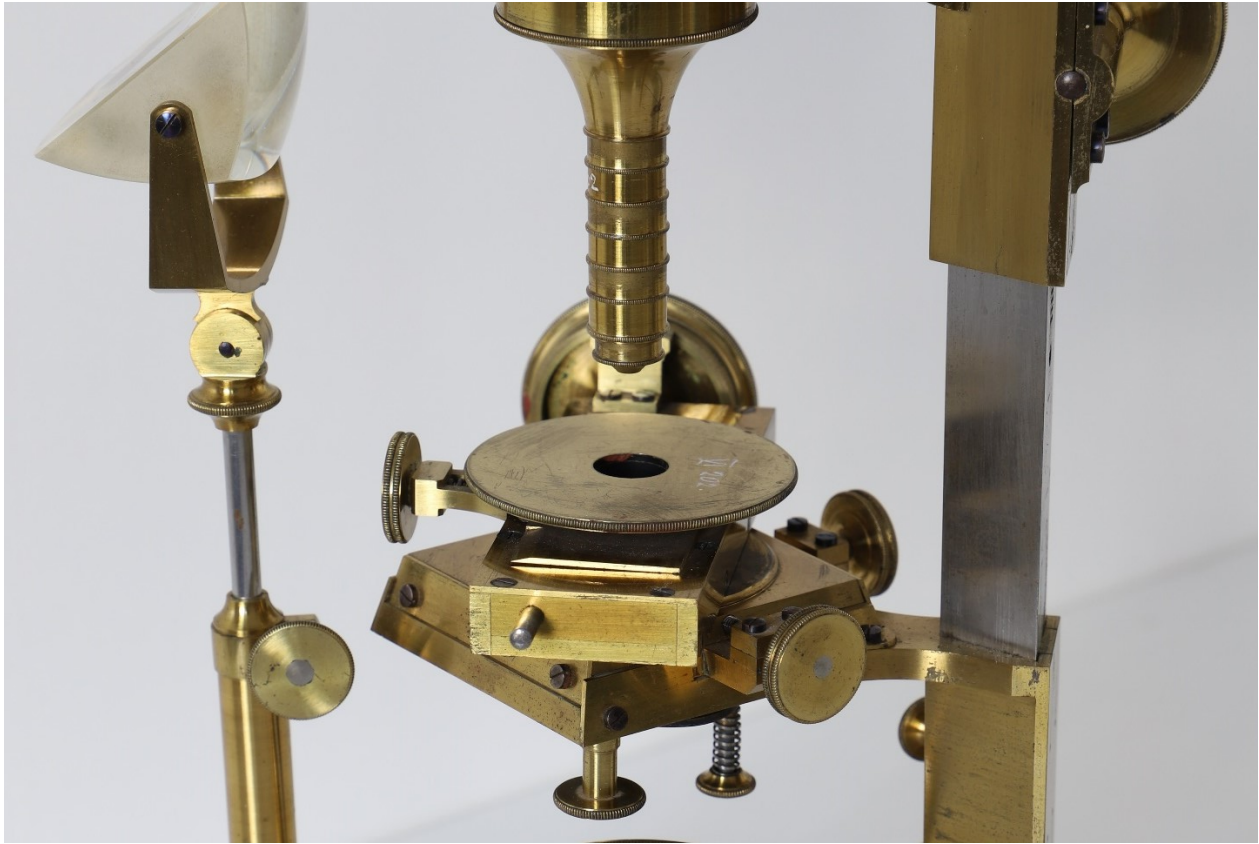


Abb. 87: Probestisch mit Aufsatz

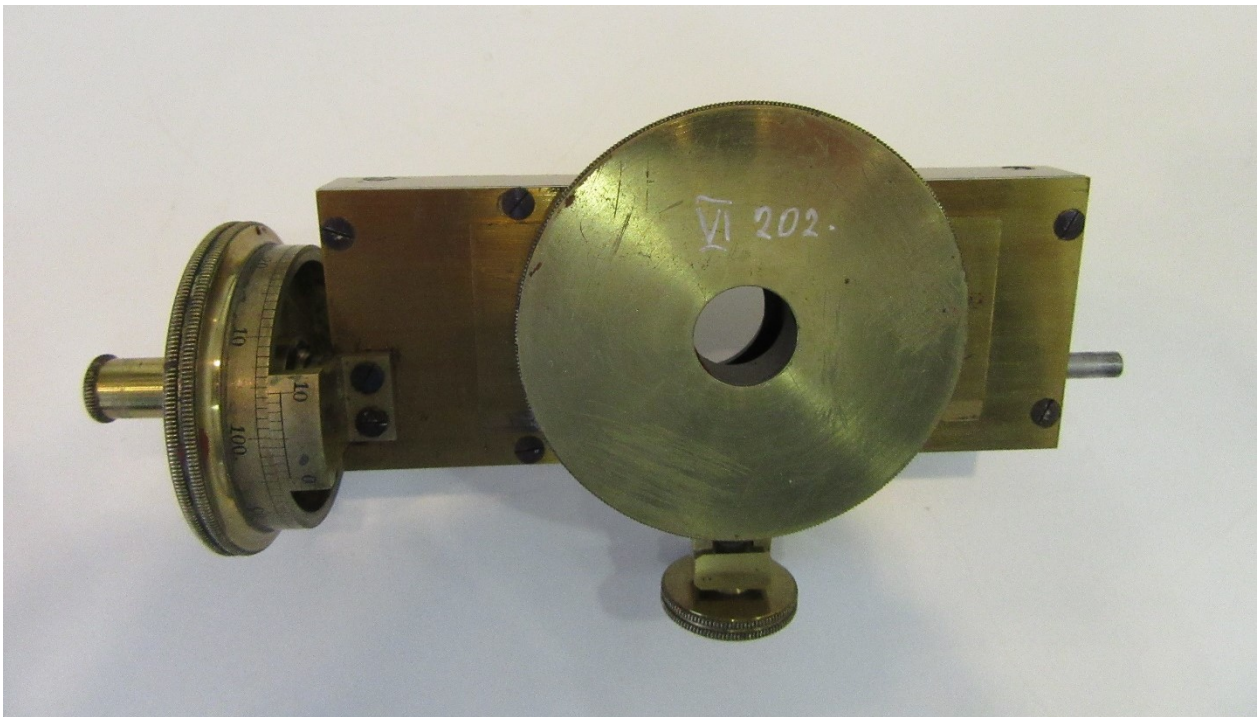


Abb. 88: Aufsatz für Probestisch

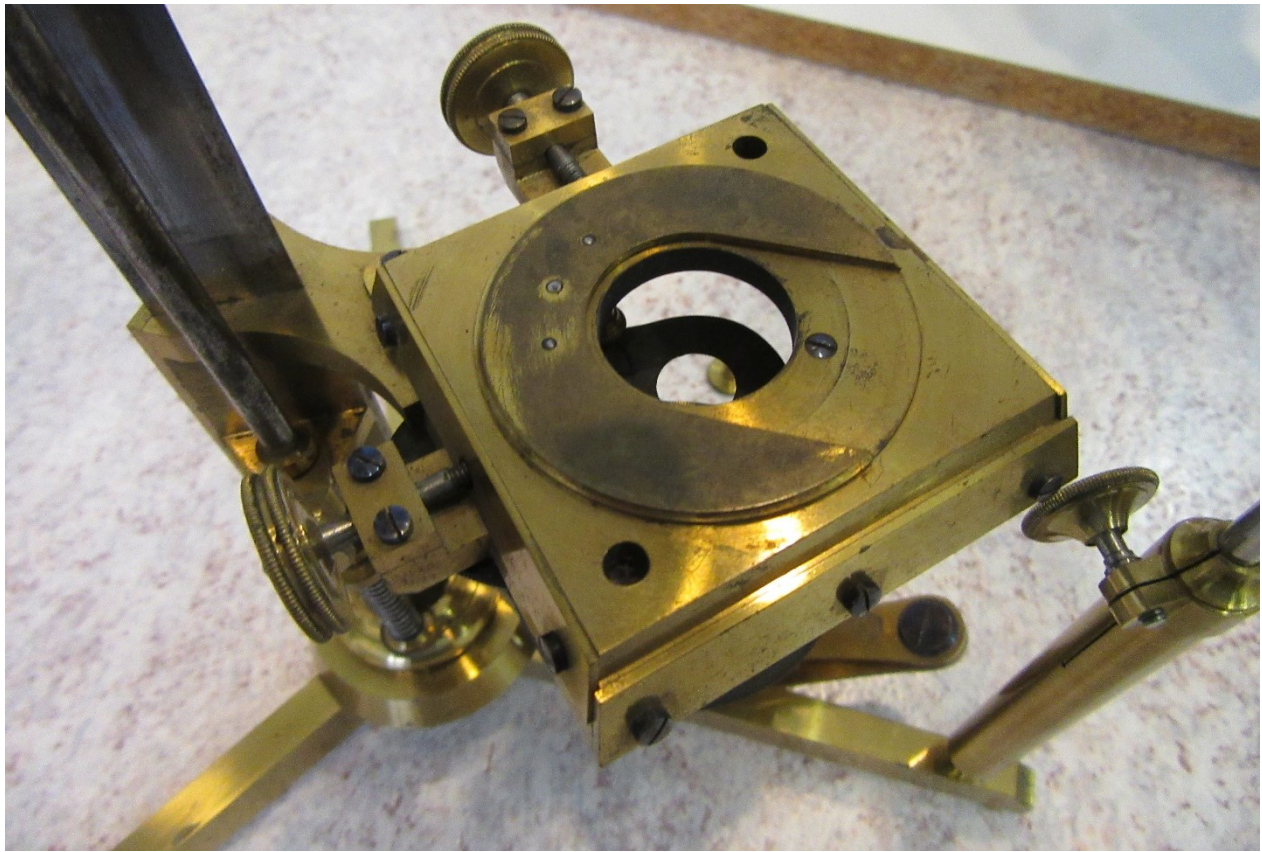


Abb. 89: Probentisch

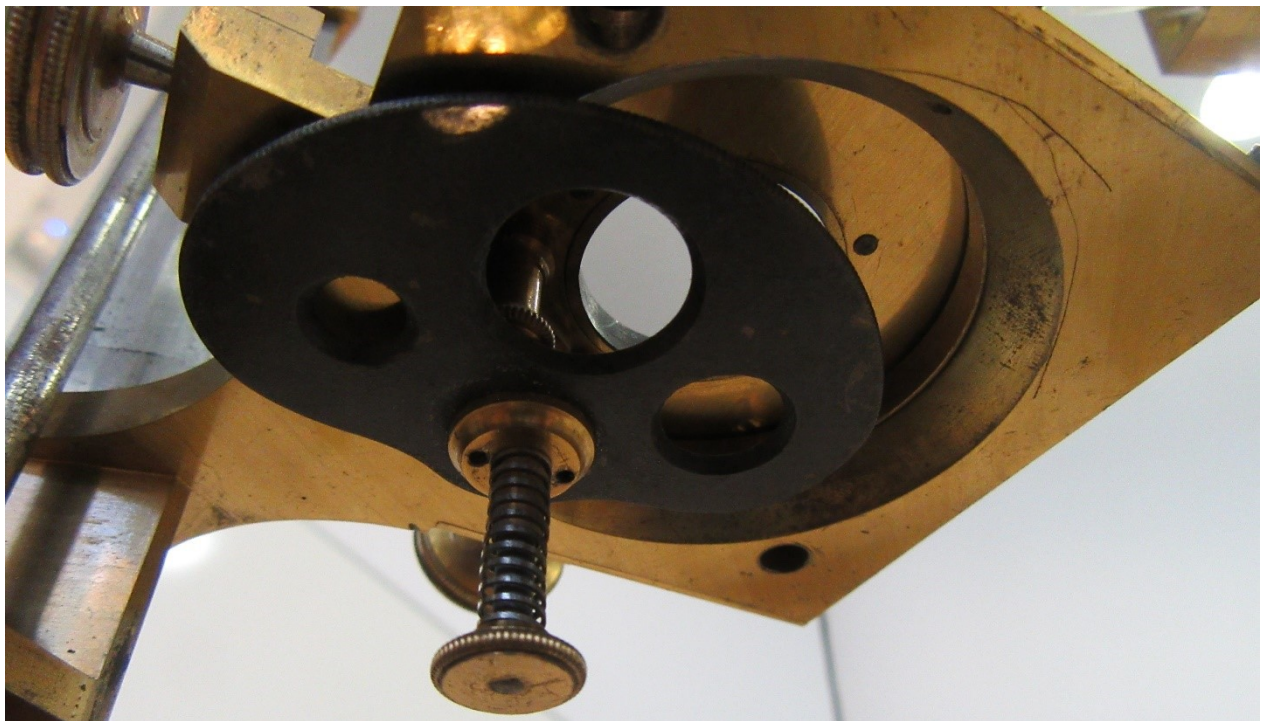


Abb. 90: Schraubenfeder und Lochblenden auf Unterseite des Probentisches



Abb. 91: Zwei Gläser, das obere ist kippbar, zur Manipulation der Beleuchtung

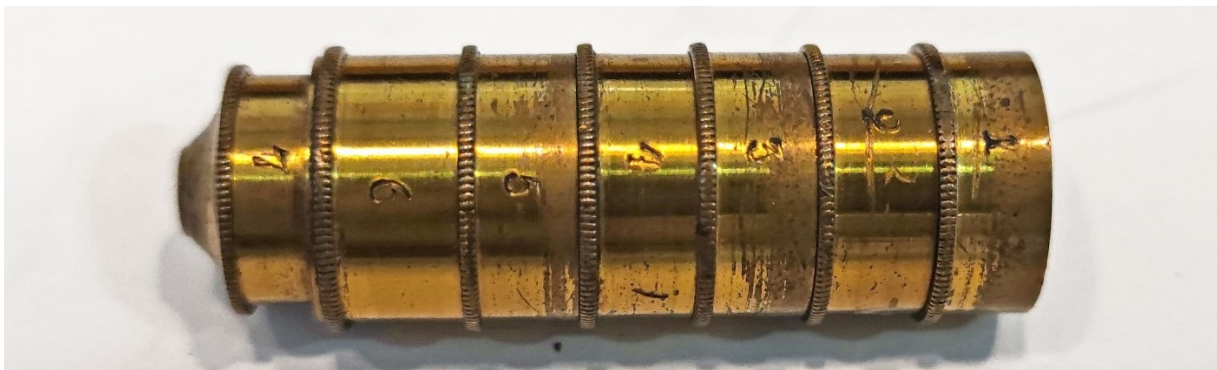


Abb. 92: Objektiv 1 bis 7

Tab. 2: Bestimmung der Gesamtvergrößerung nach Kapitel 6.4

Reale Dicke der Probe	Objektiv	Vergrößerte Dicke der Probe	Gesamtvergrößerung
1,360 mm	Objektiv 1	48 mm	35 x
1,360 mm	Objektiv 2	50 mm	35 x
1,360 mm	Objektiv 3	68 mm	50 x
1,360 mm	Objektiv 4	96 mm	70 x
1,360 mm	Objektiv 5	90 mm	66 x
0,340 mm	Objektiv 6	51 mm	150 x
0,340 mm	Objektiv 7	135 mm	397 x



Abb. 93: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Gesamtvergrößerung nach Methode 6.4

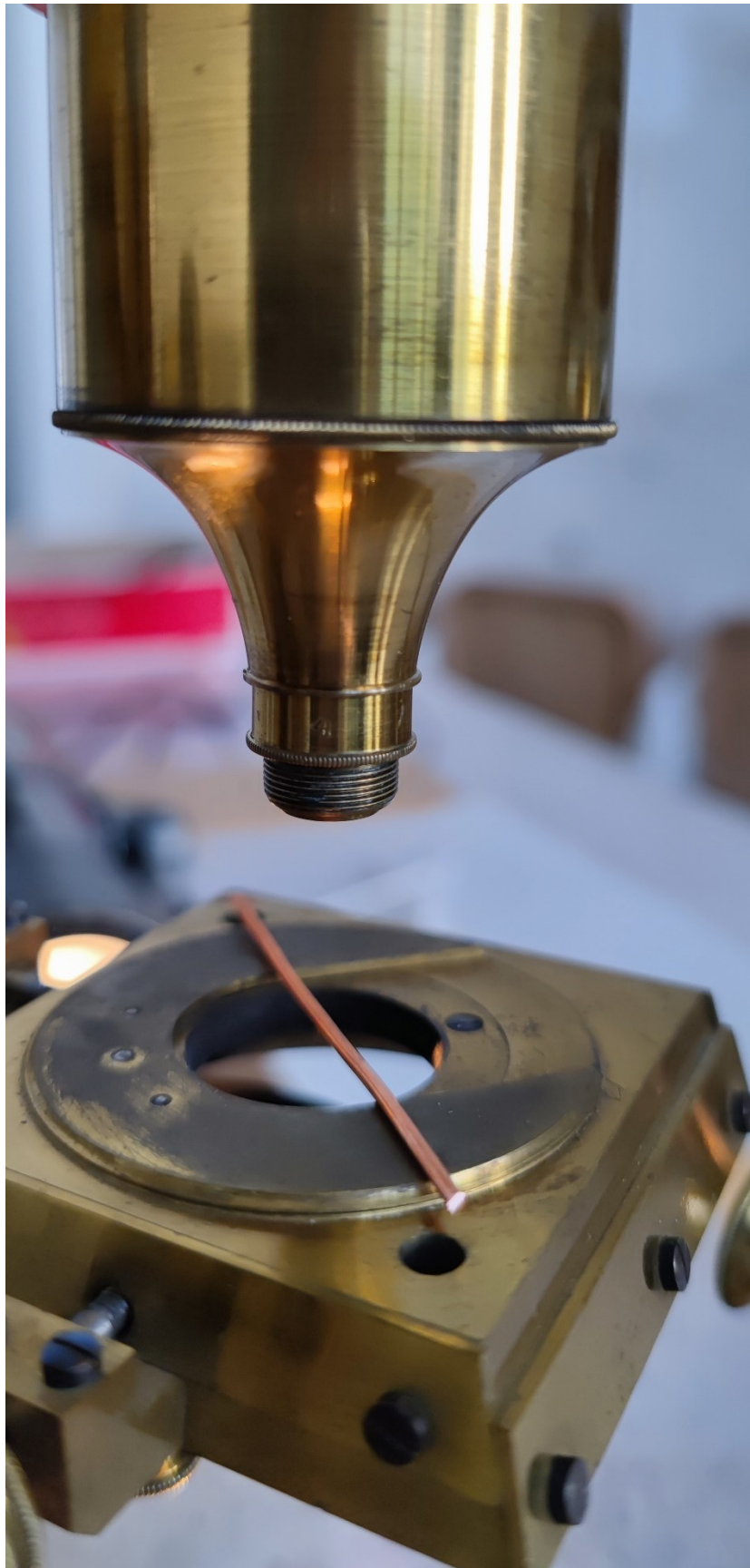


Abb. 94: Kupferdraht auf Probentisch

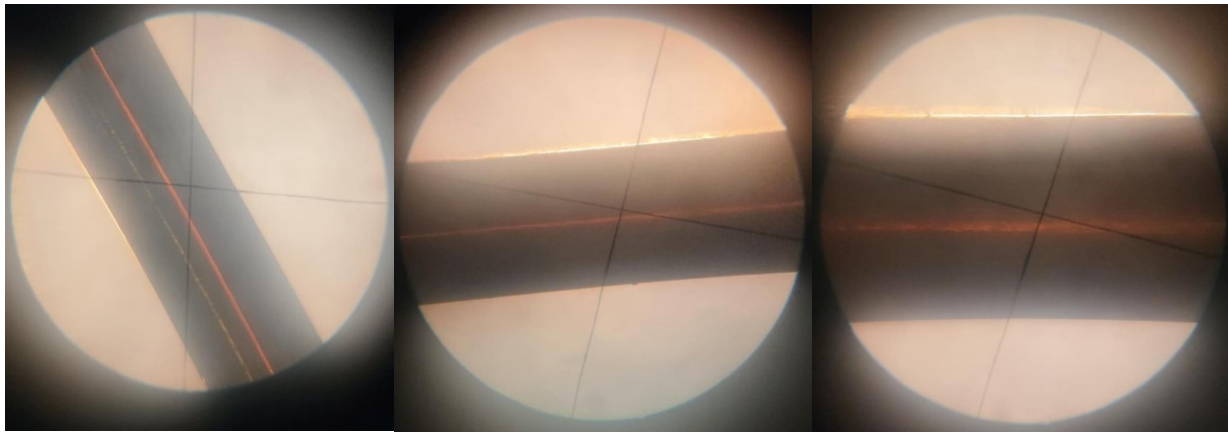


Abb. 95: Darstellung eines 1,36 mm breiten Kupferdrahtes: Objektive (Links 1, Mitte 2, Rechts 3)



Abb. 96: Kreuzgitter mit 3,0 mm Durchmesser bei 35-facher Vergrößerung

Fazit zum Mikroskop

Das Mikroskop VI 202 verfügt über eine umfangreiche Ausstattung wie verschiedengroße Lochblenden auf der Unterseite des Probentisches oder sieben verschiedene Objektive, welche einzeln oder in Kombination, verwendet werden können. Eine belastete Schraubenfeder ermöglicht auch bei diesem Gerät von Plössl ein Einklemmen der Probe. Eine Skalentrommel zur Dickenmessung und der am Mikroskop angebrachte Feintrieb sind nicht mehr funktionstüchtig. Trotz der Mängel sind die optischen Komponenten gut erhalten und es können gute Bilddarstellungen in verschiedensten Vergrößerungen erzeugt werden, wie Abb. 95 zeigt. Dazu ist anzumerken, dass die Handfotos von Abb. 95 oder 96 (Kreuzgitter bei 35-facher Vergrößerung)) nicht die Brillianz zeigen, die mit dem Auge sichtbar ist. Verglichen mit den Mikroskopen von Reichert-Austria und von Zeiss zeigt sich hinsichtlich der untersuchten Drähte kaum eine geringere Bildqualität. Damit ist verständlich, dass die Plössl-Mikroskope um 1850 einen ausgezeichneten Ruf hatten (Steiner & Schulz 2006, S. 39).

7.10 Plössl Mikroskop VI 203 mit rundem Stativ

Das Plössl Mikroskop mit der Inventarnummer VI 203 (Abb. 97) ist ebenfalls ca. im Zeitraum 1846 bis 1850 zu datieren. Tab. 1 zeigt Gewicht und Abmessungen.

Tab. 1: Grunddaten zum Mikroskop

Masse	Höhe	Breite	Tiefe
2,45 kg	47 cm	31 cm	25 cm

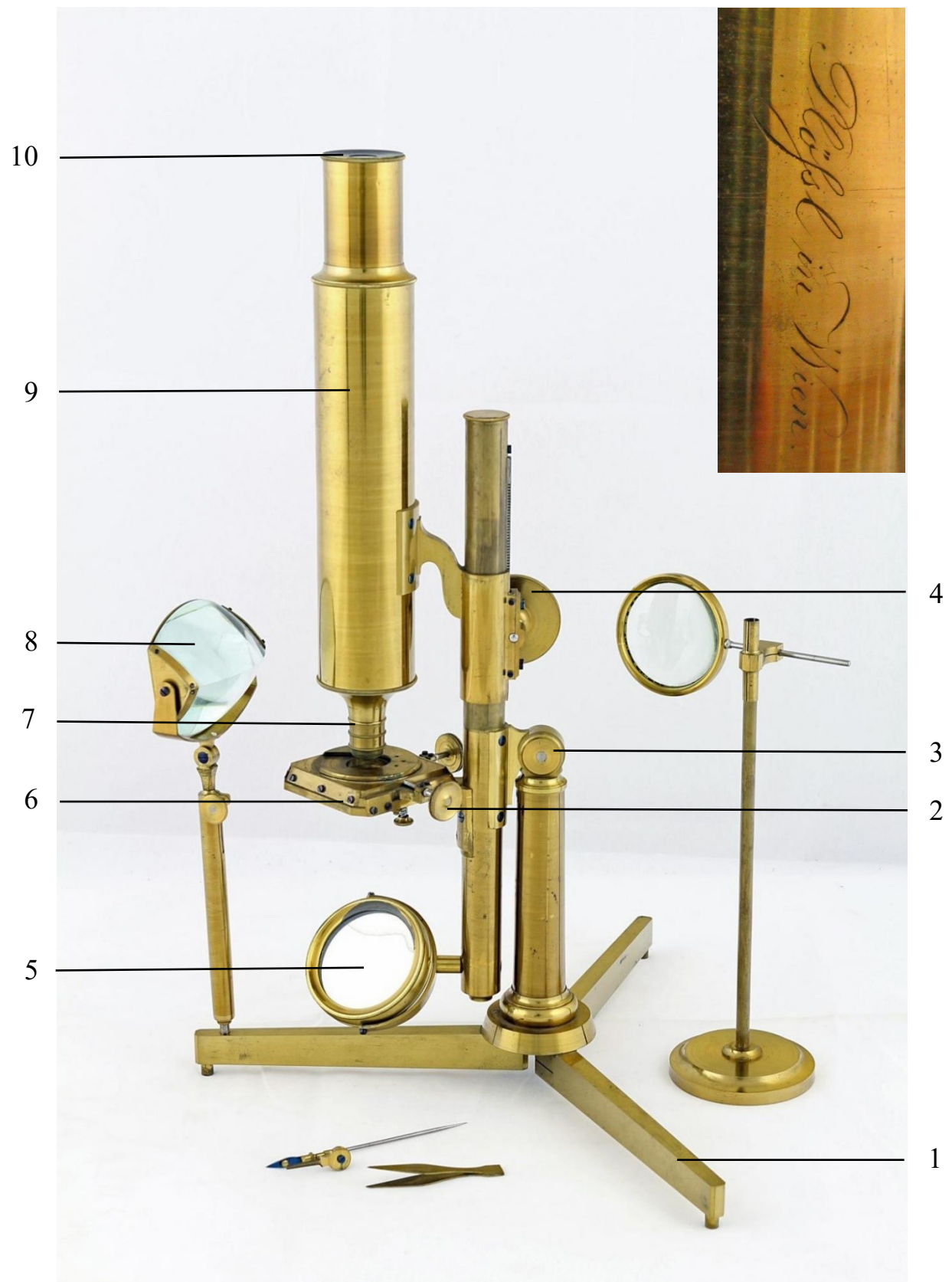


Abb. 97: Aufbau des Mikroskops: 1 Dreiarmliges Standbein, 2 Justierschrauben für Probe, 3 rundes Stativ mit Kippgelenk, 4 Grobtrieb, 5 Hohlspiegel, 6 Probentisch, 7 Objektiv, 8 Prisma, 9 Tubus, 10 Okular

Für das Mikroskop samt Zubehör existiert eine mit grünem Samt ausgekleidete Holzkassette für die Aufbewahrung. Sie ist in Abb. 98 dargestellt. Das Mikroskop verfügt über ein dreiarmliges Standbein (1). Durch ein Gelenk (2) am Stativ kann der Tubus, der über eine runde Stativstange verstellbar ist, samt Probentisch (6) gekippt werden. Eine Verschiebung des Probentisches in der Ebene wird durch zwei Justierschrauben (2) ermöglicht. Der Probentisch samt zugehörigen Justierschrauben wird in Abb. 99 gezeigt. Zusätzlich verfügt der Probentisch über eine Federschraube, mit deren Hilfe ein Objekt mittels u-förmiger Platte am Probentisch befestigt werden kann. Am Mikroskop ist ein Objektiv montiert, welches aus zwei einzelnen Objektiven besteht, welche auch für sich allein genommen verwendet werden können. Abb. 101 stellt die beiden gemeinsam am Tubus angebrachten Objektive dar. Gleichzeitig ist in der Abb. 101 zu sehen, wie weit die Probe vom Objektiv entfernt angebracht werden muss, um eine scharfe Darstellung zu realisieren. Das Mikroskop kann mit Hilfe eines Hohlspiegels (5) mit Durchlicht oder durch ein Prisma (8) mit Auflicht betrieben werden. Eine in das Mikroskop integrierte Lichtquelle ist nicht vorhanden, wobei unter anderem auch die Darstellung von Objekten bei gewöhnlichem Tageslicht möglich ist. Der Tubus ist über einen Grobtrieb (4) verstellbar, ein Feintrieb existiert nicht.

Das Plössl-Mikroskop mit rundem Stativ im Experiment

Das Mikroskop erzeugt bei gleichzeitiger Verwendung der beiden Objektive und dem beiliegenden Okular (10) eine 50-fache Gesamtvergrößerung, welche nach der Methode aus Kapitel 6.4 bestimmt wurde. Der Versuchsaufbau für die verwendete Methode zur Bestimmung der Gesamtvergrößerung wird in Abb. 102 gezeigt. In der Tab. 2 sind die dabei ermittelten Werte festgehalten. Abb. 103 zeigt die Darstellung eines 1,36 mm breiten Kupferdrahtes bei der bereits oben erwähnten 50-fachen Vergrößerung.

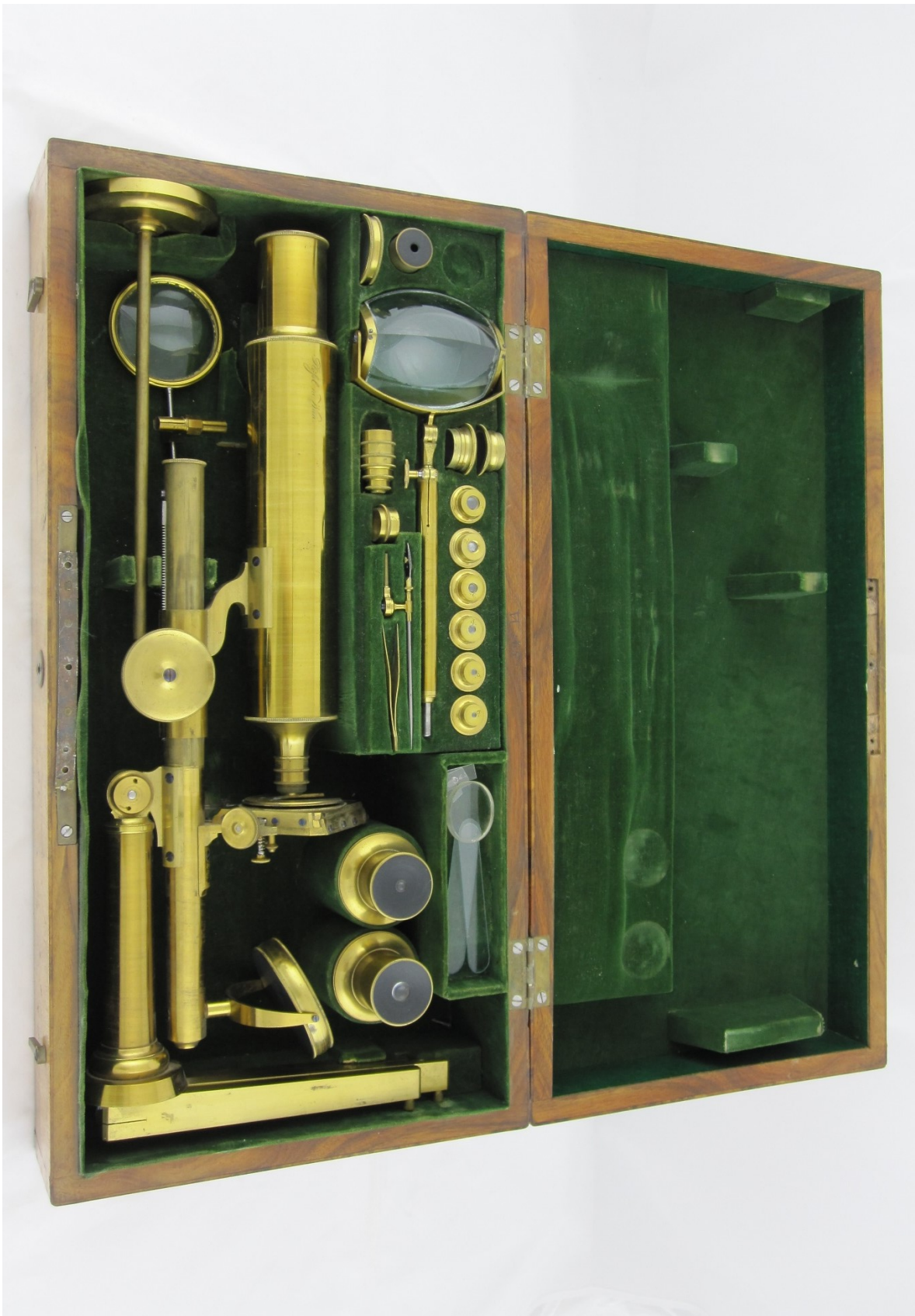


Abb. 98: Das Plössl-Mikroskop VI 203 samt Zubehör in der Original-Holzkassette



Abb. 99: Probentisch des Plössl-Mikroskops VI 203



Abb. 100: Hohlspiegel für Durchlicht



Abb. 101: Objektive des Plössl-Mikroskops VI 203



Abb. 102: Bestimmung der Mikroskopvergrößerung für VI 203 nach Kapitel 6.4

Tab. 2: Bestimmung der Mikroskopvergrößerung nach Kapitel 6.4

Reale Dicke der verwendeten Probe	Vergrößerte Dicke verwendeter Probe	Mikroskopvergrößerung
1,36 mm	70 mm	50 x

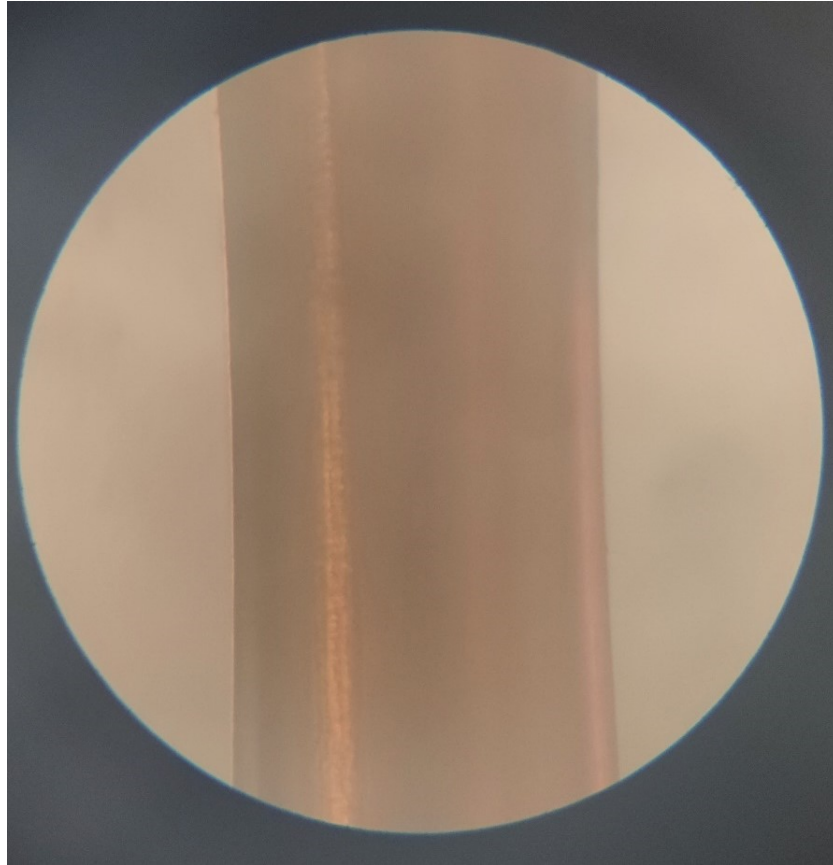


Abb. 103: 1,36 mm Kupferdrahtes bei 50-facher Vergrößerung

Fazit zum Mikroskop

Das Mikroskop VI 203 ähnelt vom Aufbau stark dem Mikroskop VI 202, wobei einzelne kleine Unterschiede erkennbar sind, welche hier angemerkt werden sollen. Das Stativ verfügt über ein integriertes Kippgelenk, durch welches der Tubus in eine Schiefelage gebracht werden kann. Zwei Justierschrauben ermöglichen ein Arretieren der Probe in der x-y-Ebene. Ein Feintrieb und eine Skalentrommel zur Dickenmessung wurden bei diesem Mikroskop im Vergleich zum Vorgänger nicht integriert. Dies ist ein Hinweis, dass es sich hier um ein Vorgängermodell zum Plössl-Mikroskop mit dem Dreikantstativ handelt. Die Objektive können, wie vom Mikroskop VI 202 bereits bekannt, kombiniert werden, wobei nur zwei einzelne Objektive beiliegen, welche bei den

Experimenten kombiniert eingesetzt wurden. Mit den beiden kombinierten Objektiven und dem angebrachten Okular ist eine 50-fache Vergrößerung erzielbar, wobei Abb. 103 einen 1,36 mm breiten Kupferdraht bei dieser eben genannten Vergrößerung zeigt.

7.11 Fraunhofer'sches Mikroskop IV 88

Abb. 104 zeigt das Fraunhofersche Mikrometer mit der Inventarnummer IV 88. Es wurde vom II. Physikalischen Institut der Universität Wien im Jahre 1912 erworben. Masse und Abmessungen sind in Tab. 1 ersichtlich.

Tab. 1: Grunddaten zum Mikroskop

Masse	Höhe	Breite	Tiefe
2,1 kg	27 cm	10 cm	12 cm

Das Stativ (5) verfügt über eine solide rechteckige Standfläche (1) ohne Einstellungsmöglichkeiten für schiefe Untergründe. Der untere Teil des Tubus (3) ist am Stativ fix angebracht. Die Höheneinstellung des oberen Teils des Tubus wird per Hand vorgenommen, indem die Klemmschraube gelockert wird. Im Inneren des Tubus befindet sich eine Skala aus 26 Zacken, welche zur Dickenmessung einer Probe dient (siehe Abb. 106 und 107). Zur besseren Orientierung ist jede fünfte Zacke etwas länger ausgeführt. Die Zacken können durch das Okular (4) gesehen werden wie auch ein Fadenkreuz und der verstellbare Messbalken bestehend aus 2 feinen schwarzen Linien (siehe Abb. 106). Der Messbalken kann durch eine seitlich am Tubus angebrachte Skalentrommel (6) verschoben werden. Es gibt keinen Nonius. Sowohl das Okular als auch das Objektiv (2) können vom Tubus abgenommen werden.



Abb. 104: Aufbau des Mikroskops: 1 Standfläche, 2 Objektiv, 3 Tubus, 4 Okular, 5 Stativ, 6 Skalentrommel für Dickenmessung

Experiment und Diskussion



Abb. 105: Aufbau zur Ermittlung der Kalibrierung

Da das Mikroskop über keine integrierte Lichtquelle verfügt, wurde durch eine externe Lichtquelle, welche mit einer Spannung von 8 V betrieben wurde, ein Auflicht für die folgenden Untersuchungen realisiert. Sowohl die Lampe als auch das Handy wurden, wie in Abb. 105 zur Fotodokumentation auf einem Stativ angebracht und arretiert. Da das Mikroskop eine kurze Brennweite aufweist, wurde eine Unterlage von 6 mm gewählt, um die zu untersuchende Probe im richtigen Abstand vom Objektiv zu justieren.

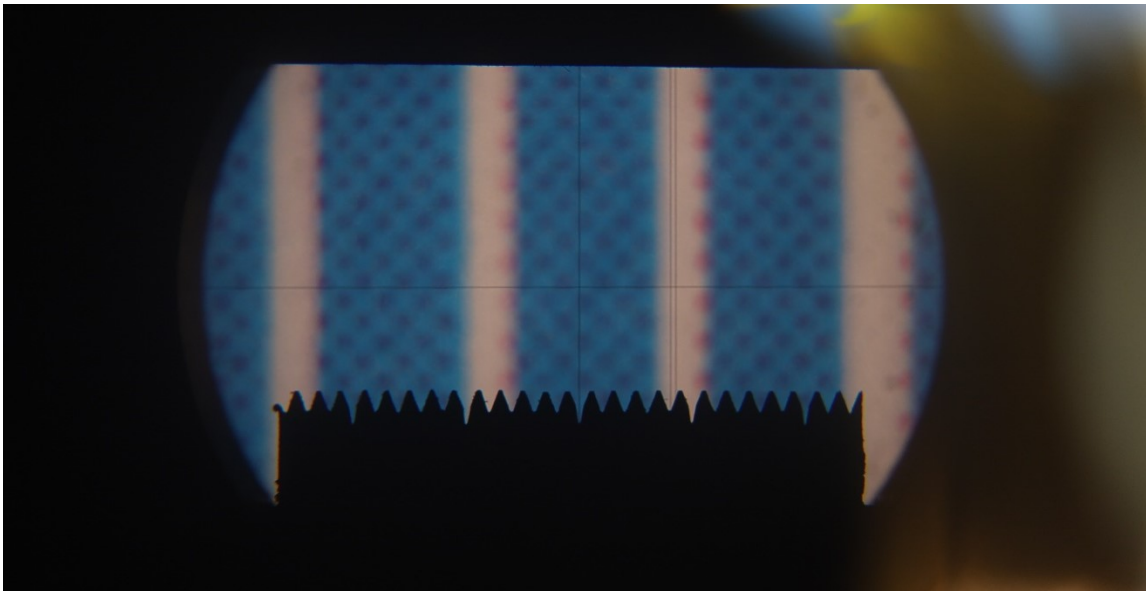


Abb. 106: Vergleich der im Tubus angebrachten Skala mit einem Lineal

Abb. 106 zeigt, dass die gezackte Skala im Tubus eine Länge von 3 Millimetern abdeckt. Da die Skala des Tubus aus 26 Zackenabschnitten besteht, ergibt der Abstand zwischen zwei Zacken ungefähr 0,1154 Millimeter. Ursprünglich hatte die Skala 27 Zacken, wobei einer dieser Zacken am Rand stark deformiert ist und somit nicht zum Ablesen von Längen herangezogen werden kann (siehe Abb. 107).

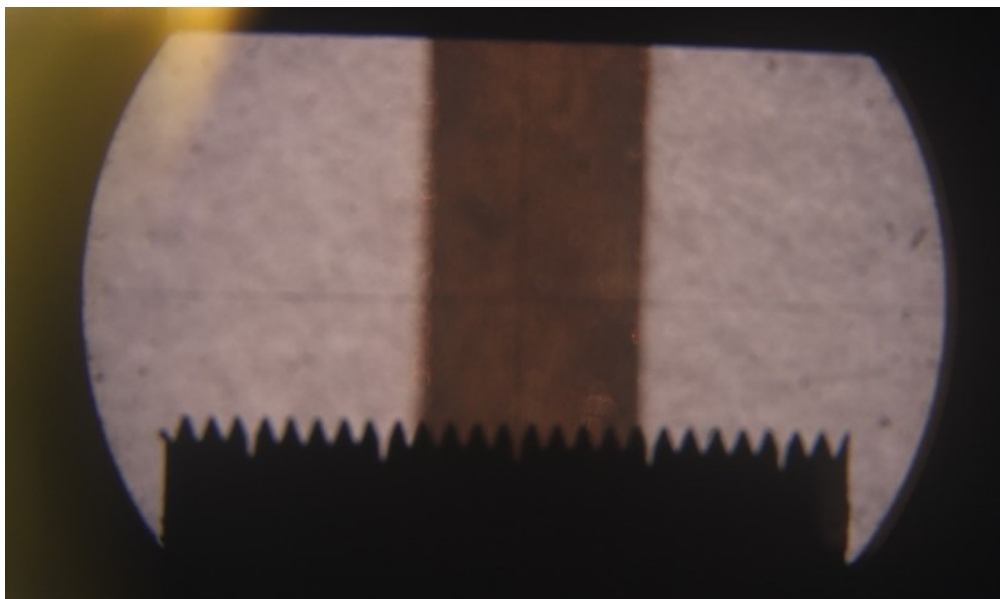


Abb. 107: Darstellung eines Kupferdrahtes

Abb. 107 zeigt, dass der Kupferdraht auf 8 Zacken zu liegen kommt, weshalb sich zunächst folgende Dicke für den Kupferdraht ergibt:

$$\text{Dicke } d \text{ des Kupferdrahtes} = 0,1154 \text{ mm} \cdot 8 = 0,9232 \text{ mm}$$



Abb. 108: Skalentrommel zur Justierung der im Tubus angebrachten Skala

Die Dicke einer Probe kann sogar mit einer Genauigkeit von ca. 1 Mikrometer bestimmt werden, da eine Umdrehung der Skalentrommel einer Verschiebung um einen Zacken entspricht und die Skala der Trommel aus 100 Teilen besteht. Die nach Kapitel 6.4 festgestellte Vergrößerung des Fraunhofer-Mikroskops IV 88 wurde mit ca. 60-fach festgestellt.

Fazit zum Fraunhofer-Mikroskop

Beim Mikroskop IV 88 handelt es sich um ein sehr schlichtes aber solide angefertigtes Mikroskop, welches auf diverse Einstellungsmöglichkeiten wie eine Vorrichtung für Feintrieb oder Grobtrieb verzichtet. Die Einstellung des Tubus muss hier per Hand vorgenommen werden. Eine Besonderheit des Mikroskops liegt in einer im Tubus angebrachten zackigen Skala, welche mit Hilfe einer dafür vorgesehenen Skalentrommel verschoben werden kann und so zur Dickenmessung einer Probe dient.

7.12 Fraunhofer'sches Mikrometer IV 89

Das Fraunhofer'sche Mikrometer mit der Inventarnummer IV 89 wurde ebenfalls im Jahr 1912 erworben und ist in Abb. 109 dargestellt. Wie Abb. 110 zeigt, kann das Mikrometer in einer Holzkassette aufbewahrt werden. Masse und Abmessungen des Geräts zeigt Tab. 1.

Tab. 1: Grunddaten zum Mikroskop

Masse	Höhe	Breite	Tiefe
4,05 kg	34 cm	23 cm	16 cm

Das Stativ (9) wird von einem dreiarmligen Standbein (1) gestützt, wobei die zwei seitlichen Arme mit Justierschrauben ausgestattet sind. Das Stativ verfügt über eine Schwalbenschwanznut, durch welche sowohl der flache Spiegel (2), der Probenstisch (3) als auch der Tubus (6) in der Höhe verstellt werden können. Sollten die durch die Schwalbenschwanznut möglichen Einstellungen nicht ausreichen, kann der Tubus zusätzlich per Hand durch Lösen der Fixierschraube (5) in der Höhe verstellt werden. Das Okular (8) ist herausnehmbar, wobei sich hier ein Fadenkreuz befindet, welches durch Schrauben (7) eingestellt werden kann. Mittels Drehung der Skalentrommel (4) kann die Dicke einer Probe ermittelt werden. Eine vollständige Umdrehung der Trommel setzt sich aus 50 Teilumdrehungen zusammen und bewirkt eine Verschiebung um 0,5 mm, womit eine Auflösung von 0,01 mm erzielt wird. Mittels Nonius kann die Auflösung um einen Faktor 5 auf 2 µm verbessert werden. Die in Abb. 111 sichtbare Längenskala ist 27,5 mm lang und mit Strichen in 0,5 mm Abständen geteilt. Mit dem Mikrometer IV 89 kann somit eine Länge oder Dicke von bis zu 27,5 Millimetern mit einer Auflösung von 2 µm ermittelt werden. Die Plattform, auf welcher der Tubus befestigt ist, kann gedreht werden. Am Probenstisch befindet sich eine Halterung für einen Kondensor, wobei dem Mikroskop kein zugehöriger Kondensor beiliegt.

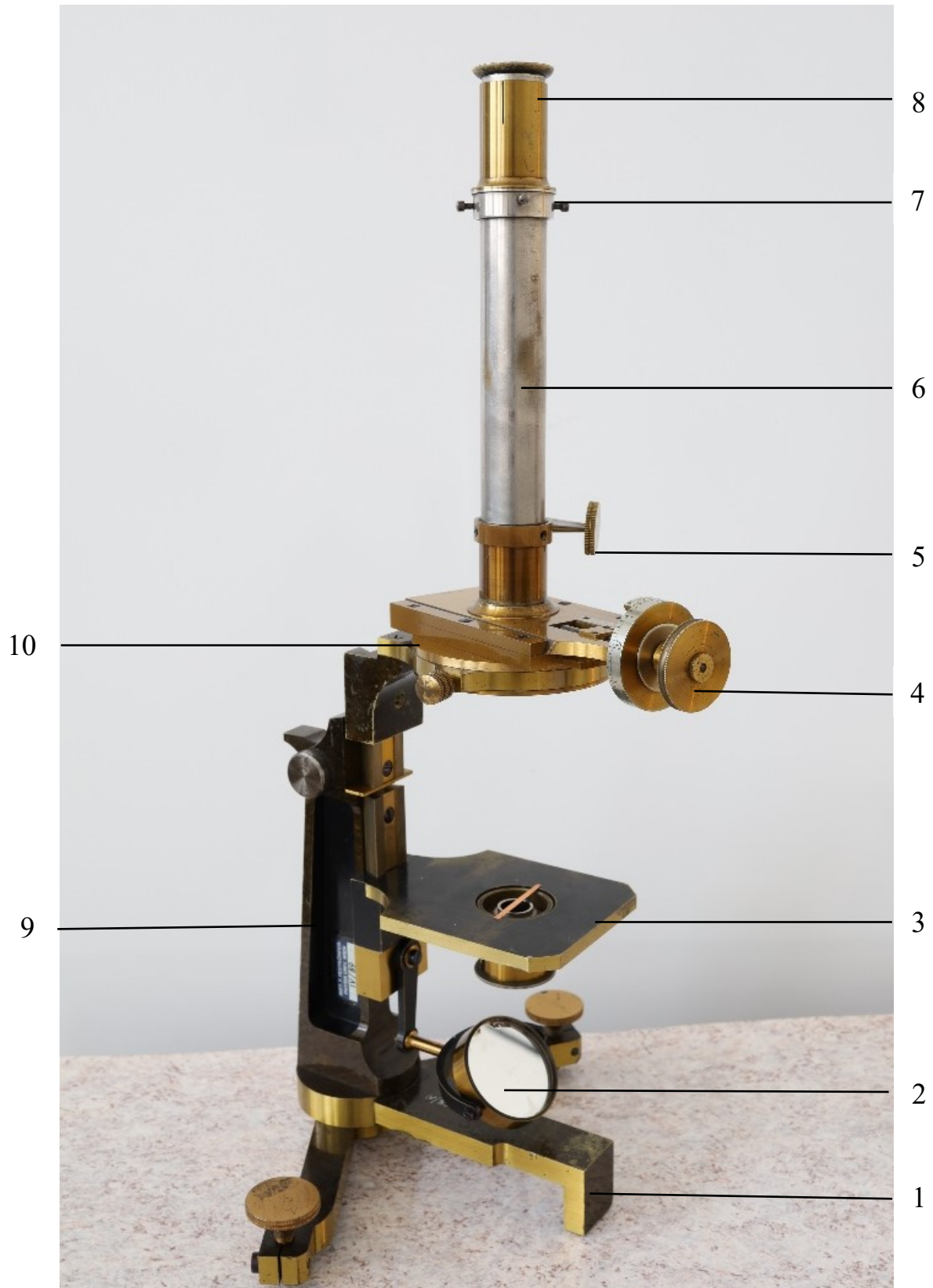


Abb. 109: Aufbau des Mikroskops: 1 Dreiarmliges Standbein, 2 Flacher Spiegel, 3 Probentisch, 4 Rad mit Skala zur Dickenmessung, 5 Fixierschraube des Tubus, 6 Tubus, 7 Schrauben zur Justierung des Fadenkreuzes, 8 Okular, 9 Stativ, 10 Drehbare Plattform



Abb. 110: Fraunhofer Mikrometer IV 89 in Holzkassette

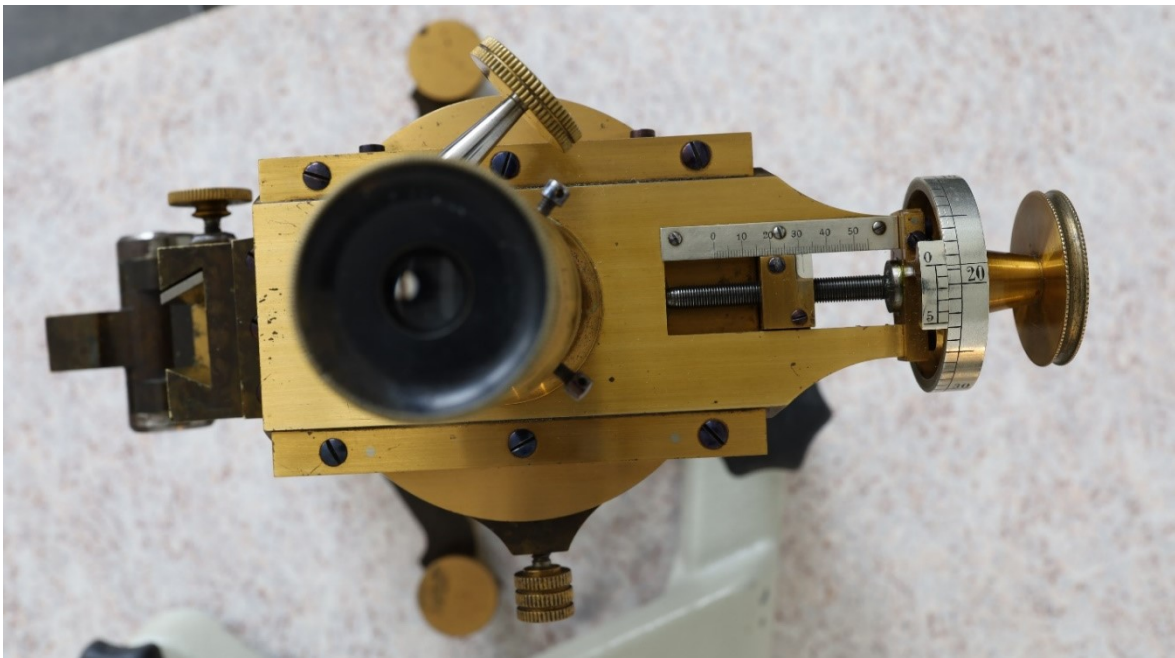


Abb. 111: Skalenrad und Skala zur Längen- und Dickenmessung

Experiment und Diskussion

Beim angebrachten Objektiv handelt es sich möglicherweise nicht um das ursprünglich dafür vorgesehene Objektiv, wodurch der Tubus für eine Scharfstellung der Probe kaum auf die ausreichende Distanz nach oben justiert werden kann (siehe Abb. 109). Andererseits ließe sich der Beleuchtungsspiegel unter dem Probentisch demontieren, dann wäre auch ein Betrieb mit Auflicht und gut justierbarer Distanz zwischen Probe und Objektiv möglich.

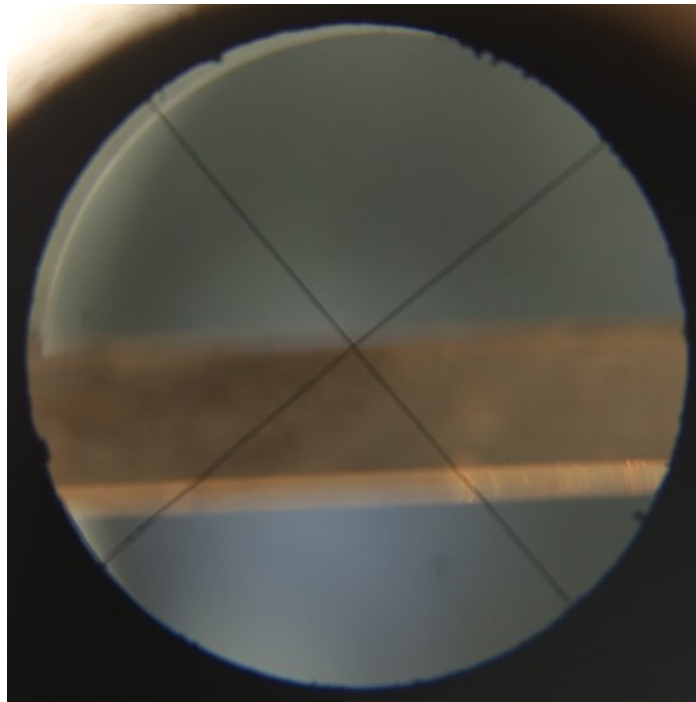


Abb. 112: Darstellung eines Kupferblechstreifens

Die Breite des in Abb. 112 dargestellten Kupferblechstreifens beträgt ungefähr $2,69 \mu m$. Das sind fünf ganze Umdrehungen des Skalenrades und 19 Teilstriche. Eine optimale Scharfstellung der Probe war leider nicht möglich, da das eingebaute Objektiv im Durchlichtbetrieb einen noch etwas größeren Abstand zwischen Probe und Objektiv benötigen würde. Die Vergrößerung wurde nach Kapitel 6.4 mit 8-fach festgestellt.

Mit dem Mikrometer IV 89 können im Vergleich zum Mikroskop IV 88 größere Längen gemessen werden. Dafür ist die Genauigkeit nur ca. halb so groß.

7.13 Teilmaschine IV 206

Abb. 113 zeigt die Teilmaschine IV 206. Sie ist ca. 1890 zu datieren. Masse und Abmessungen gibt Tab. 1 an.

Tab. 1: Grunddaten zur Teilmaschine

Masse	Höhe	Breite	Tiefe
15,7 kg	14,5 cm	58 cm	15,5 cm

Der eigentliche Probestisch (3) ist eine Glasplatte, die mit 2 Fixierklammern gehalten wird. Eine weitere kleine Glasplatte ist vorgesehen, um mit dieser die Probe zu fixieren. Das zu betrachtende Bild wird scharf gestellt, indem zunächst das Fadenkreuz im Okular und dann der sich über dem Probestisch befindliche Tubus (2) händisch in der Höhe eingestellt wird. Okular und Objektiv dieses Ablesemikroskops funktionieren einwandfrei. Die Teilmaschine verfügt über eine Skala (5) von 430 Millimetern. Mittels Nonius ist auf dieser Skala eine Ablesung auf 1/20 mm möglich. Die Skala mit Nonius wird in Abb. 114 dargestellt. Mittels Skalentrommel (1) kann das kleine Mikroskop entlang der Dicke, Breite oder Länge der Probe bewegt werden. Die Skalentrommel ist in 100 Teile geteilt, wobei eine volle Umdrehung des Rades laut angebrachter Kalibrierung einer Verschiebung von 0,9986 mm entspricht. Damit ist eine Auflösung auf 0,01 mm möglich. Eine genauere Darstellung der Skalentrommel und der zugehörigen Skala findet sich in Abb. 115 und 116 wieder. Die Dicke einer Probe kann somit durch eine der beiden an der Teilmaschine angebrachten Skalen abgelesen werden. Eine Rändelschraube (4) ermöglicht eine Verschiebung des Messmikroskops senkrecht zur Längsrichtung, dafür ist jedoch keine Messskala vorgesehen. Die Teilmaschine ist noch voll funktionstüchtig.

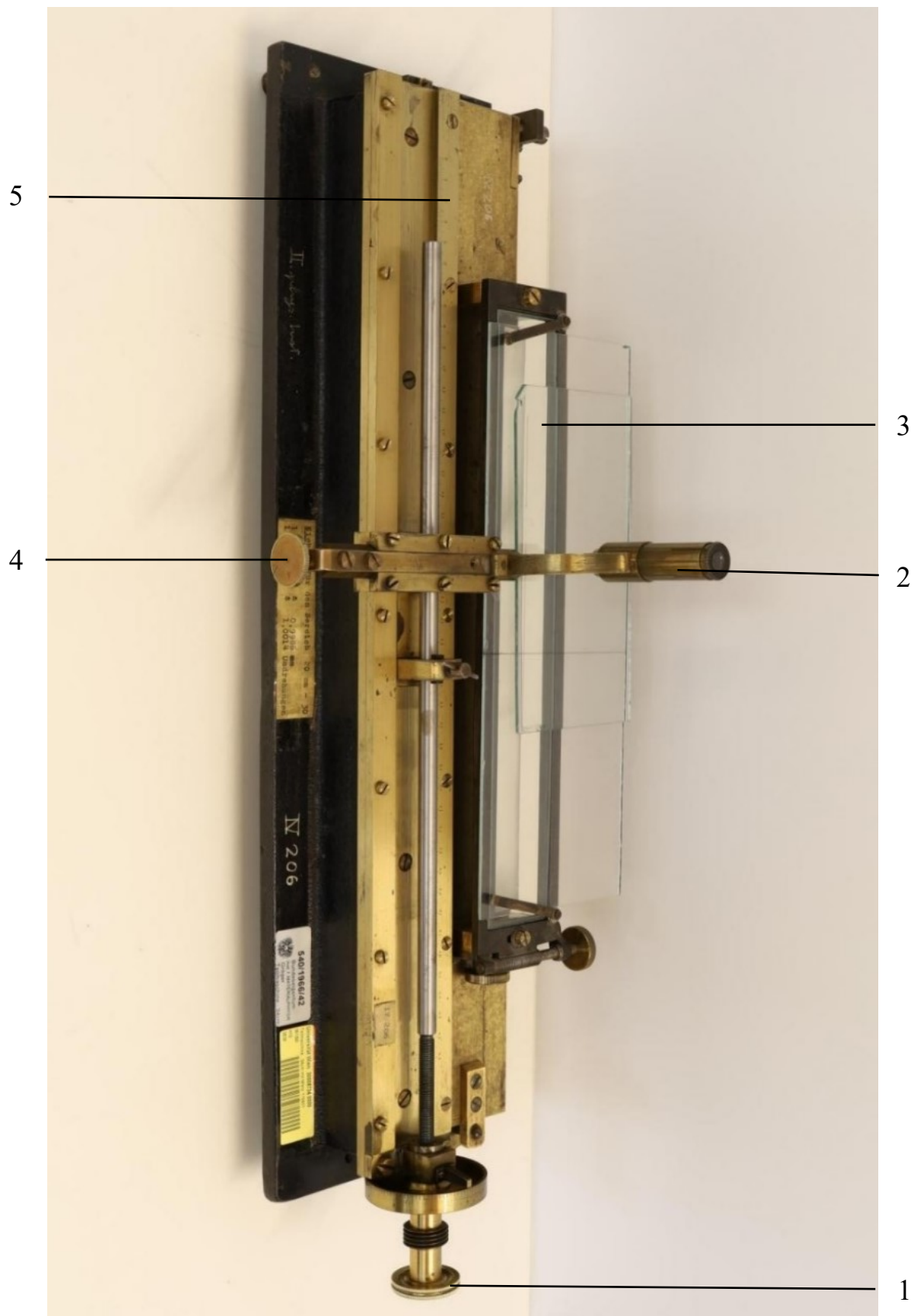


Abb. 113: Aufbau der Teilmaschine: 1 Rad zur Dickenmessung, 2 Tubus, 3 Probentisch, 4 Rändelschraube, um Tubus senkrecht zur Dicke der Probe zu bewegen, 5 Skala in Millimeter

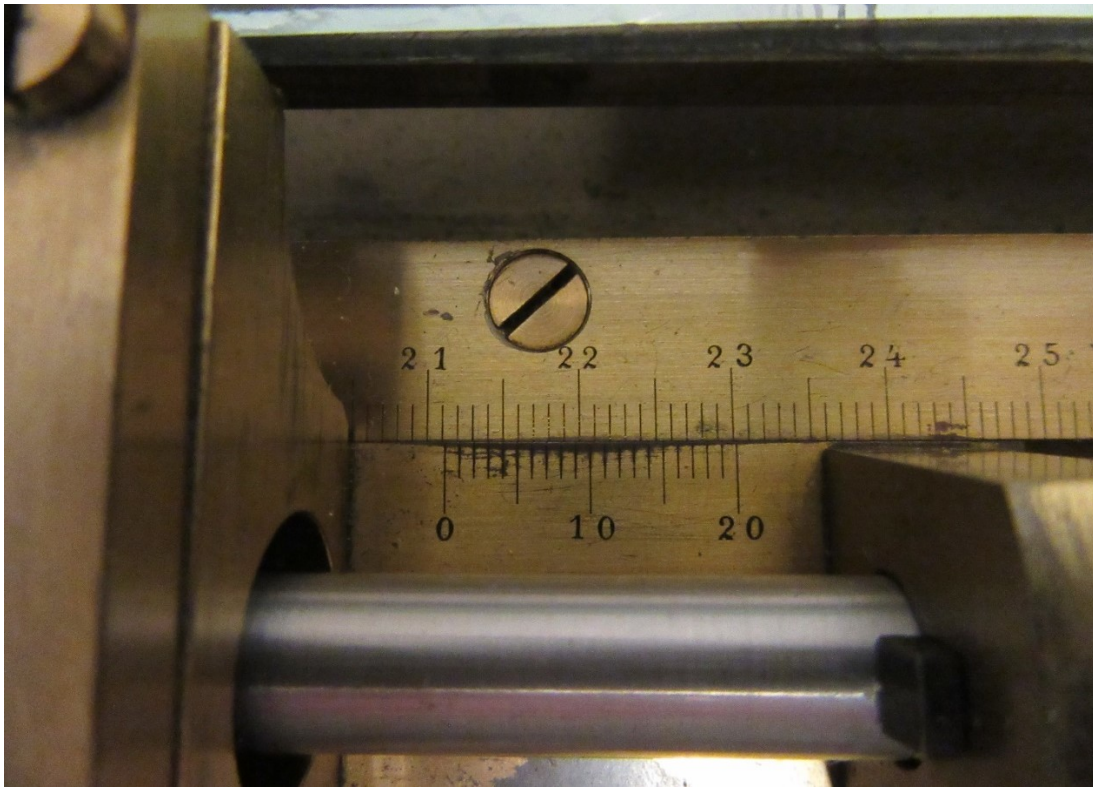


Abb. 114: Skala mit Nonius

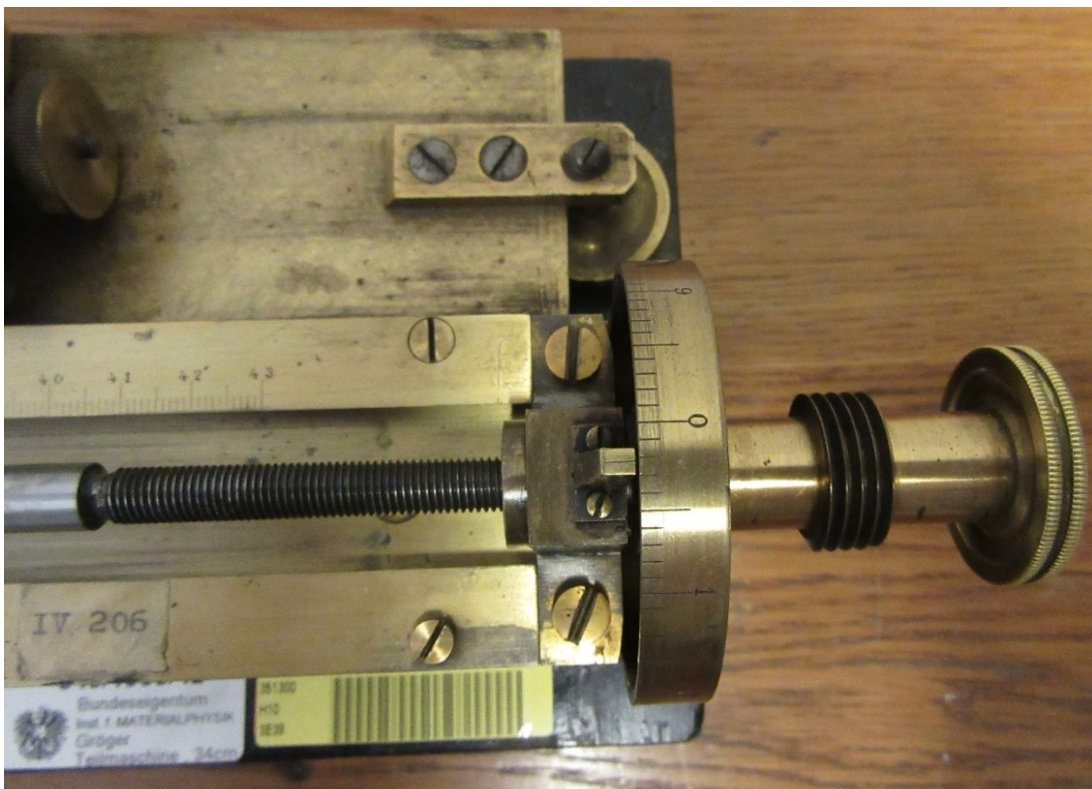


Abb. 115: Skalenrad zur Längen- und Dickenmessung

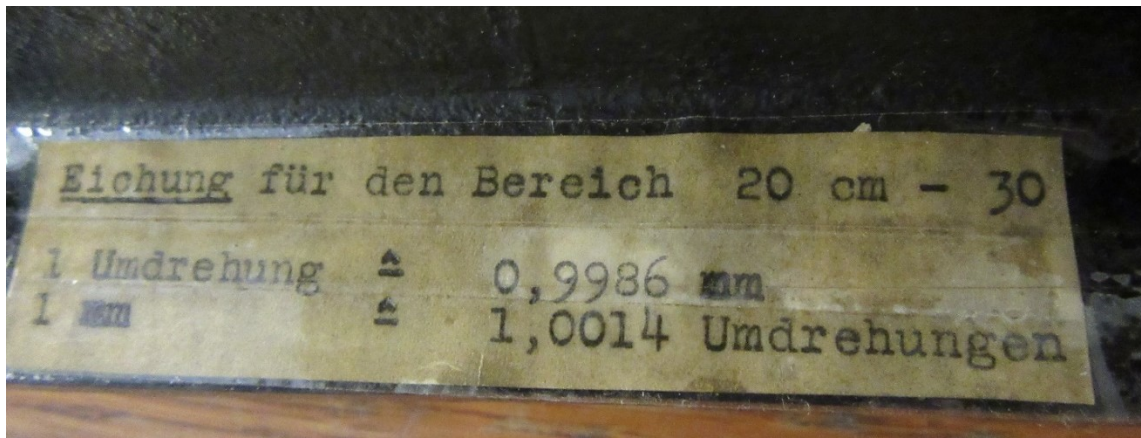


Abb. 116: Angaben zur Schraubenkonstante der Teilmaschine

8 Historische Fernrohre im Experiment

Tab. 1: Übersichtstabelle der Fernrohre

Hersteller	Vitrinen-Nummer	Inventarnummer und Bezeichnung laut Inventarbuch	Erwerbsjahr
E. Hartmann und co.	235	VI 233 Ablesefernrohr	~ 1900
Plössl	30	VI 199 Großes Fernrohr in Kassette	1832
Lenoir & Forster	31	VI 14 Großes Fernrohr auf Dreifußstativ	~1900
Steinheil	45	VI 4 Großes Ablesefernrohr	~1900
Layser	36	VI 146 Ablesefernrohr	1856
Rohrbeck	58	VI 130 Ablesefernrohr	~1900
Utschneider, Reichenbach und Fraunhofer	27	VI 232 Kometensucher	~1820

8.1 E. Hartmann und Co. Fernrohr VI 233

Abb. 117 zeigt das große Ablesefernrohr (Inventarnummer VI 233) der Firma E. Hartmann und Co., Seriennummer ist – wie auch bei den anderen untersuchten Fernrohren – keine vorhanden.

Tab. 1 zeigt die Abmessungen des Fernrohrs.

Tab. 1: Grunddaten zum Fernrohr

Höhe	Länge	Breite
45 cm	36 cm	24 cm

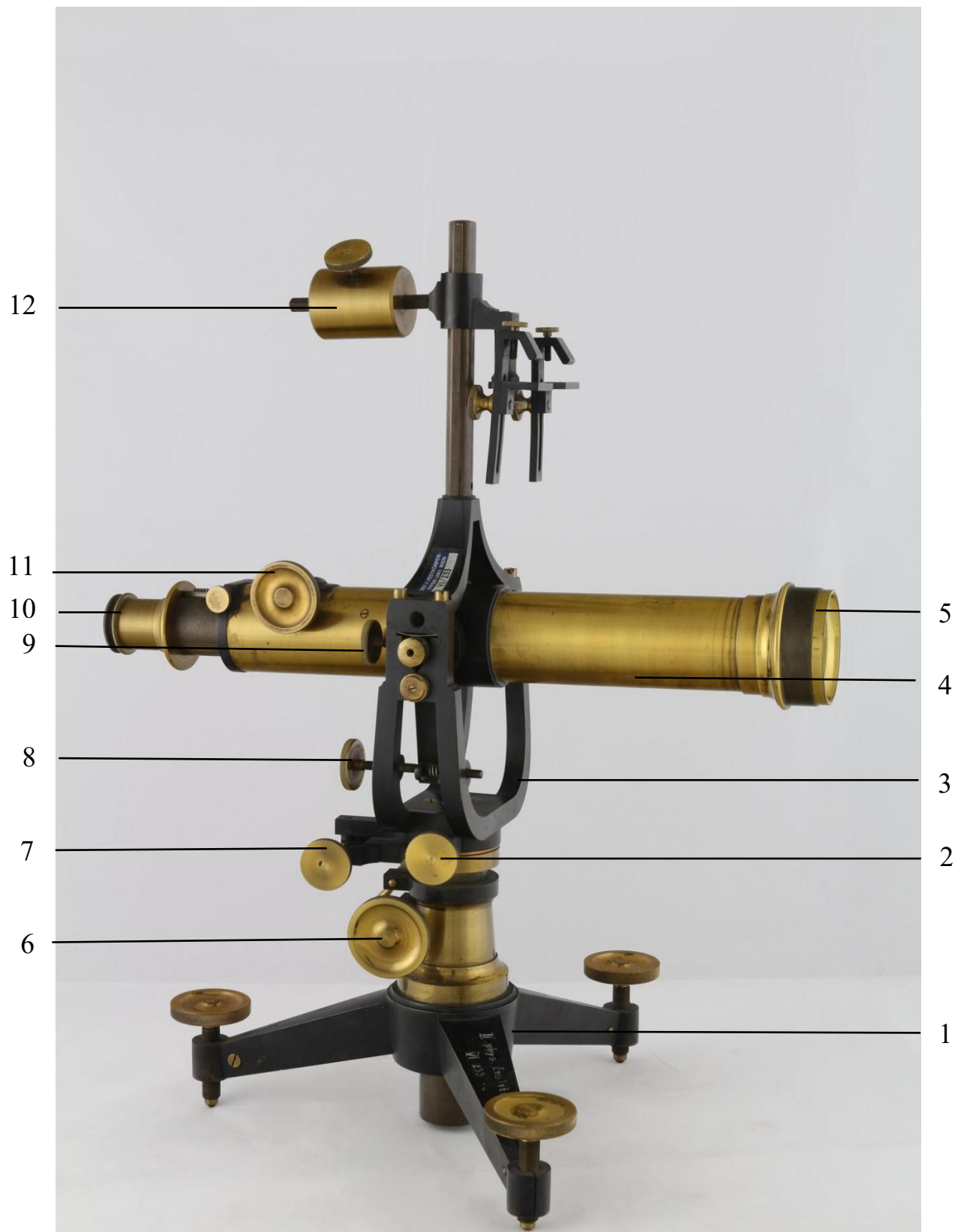


Abb. 117: Aufbau des Fernrohres: 1 Dreibein, 2 Fixierung des horizontalen Winkels, 3 Stativ, 4 Tubus, 5 Objektiv, 6 Einstellung der Höhe des Stativs, 7 Einstellung des horizontalen Winkels, 8 Einstellung des vertikalen Winkels, 9 Fixierung des vertikalen Winkels, 10 Okular, 11 Trieb zur Einstellung, 12 Massestück

Das Stativ (3) ist auf einem Dreibein (1) fixiert, wobei jedes Standbein mit einer Justierschraube versehen ist. Am Tubus befindet sich eine Plakette des Herstellers, welche in Abb. 118 gezeigt wird. Der Tubus kann durch die in der Abb. 117 aufgelisteten Stellschrauben (7, 8) sowohl im vertikalen als auch im horizontalen Winkel gedreht werden, wobei zwei weitere Rändelschrauben (2, 9) die Fixierung dieser Winkel ermöglichen. Die Höhe des Stativs und damit die Höhe, in welcher sich der Tubus befindet, kann durch eine angebrachte Stellschraube (6) ebenfalls angepasst werden. Das Okular (10) und das Objektiv (5) sind am Tubus angebracht und können ausgewechselt werden. Der Durchmesser des Objektivs beträgt 41 mm. Abb. 119 zeigt eine Großaufnahme des Objektivs. Der Durchmesser des Okulars beträgt 4 mm. Am oberen Ende des Stativs befindet sich ein Massestück (12), welches zur Anpassung des Schwerpunktes des Fernrohres dient.

Experiment und Diskussion

Den Versuchsaufbau zur Bestimmung der Vergrößerung des Fernrohres ist in Abb. 120 zu sehen. Es sind zwei Schritte nötig, wie es im Kapitel 6.4 erwähnt ist. Es wird einerseits der Sehwinkel des entfernten Gegenstandes ohne Fernrohr bestimmt, andererseits der Sehwinkel des Bildes bezogen auf die deutliche Sehweite von 25 cm. Das Verhältnis des Sehwinkels für das Bild zum Sehwinkel für den Gegenstand ergibt die Vergrößerung. Als Gegenstand wurde das in Abb. 121 gezeigte Lineal verwendet. In Tab. 2 befinden sich die ermittelten Daten für die Abschätzung der Vergrößerung in Abhängigkeit des Abstandes. Abb. 122a zeigt das Verhältnis von Bildgröße zur Gegenstandsgröße in Abhängigkeit des Abstandes während Abb. 122b die Vergrößerung in Abhängigkeit des Abstandes grafisch veranschaulicht. Aus Abb. 122a wird klar, dass ein Fernrohr für große Entfernungen das Objekt nicht vergrößert, sondern nur das perspektivisch verkleinerte Bild des Objekts unter einem deutlich größeren Sehwinkel zeigt als das Auge ohne Instrument. Üblicherweise werden die Fernrohre in den Lehrbüchern nur für ein unendlich entferntes Objekt dargestellt. Im Falle des Keplerfernrohres entsteht für ein unendlich entferntes Objekt das reelle Zwischenbild in der Brennebene. Ist die Entfernung des Objekts zum Objektiv des Fernrohres relativ nahe – so wie beim Ablesefernrohr VI 233 – entsteht gemäß dem Abbildungsverhalten einer Sammellinse das Zwischenbild erst etwas hinter der Brennebene des Objektivs und ist damit auch etwas größer. Dies erklärt den Verlauf der Vergrößerung in Abb. 122b. Wie auch experimentell gefunden wurde, ist das Okular des Ablesefernrohres umso mehr auszuziehen, je näher das Objekt ist. Bei 155 cm Entfernung wurde die Scharfstellung bei einem Auszug von 100 mm erreicht,

während bei 1290 cm Entfernung der Okularteil nur 27 mm ausziehen war, wie das etwa für die Betrachtung der Hörsaal-Uhr in Abb. 123 und 124 der Fall ist.



Abb. 118: Plakette des Herstellers



Abb. 119: Objektiv



Abb. 120: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Fernrohrvergrößerung nach Methode aus Kapitel 6.4

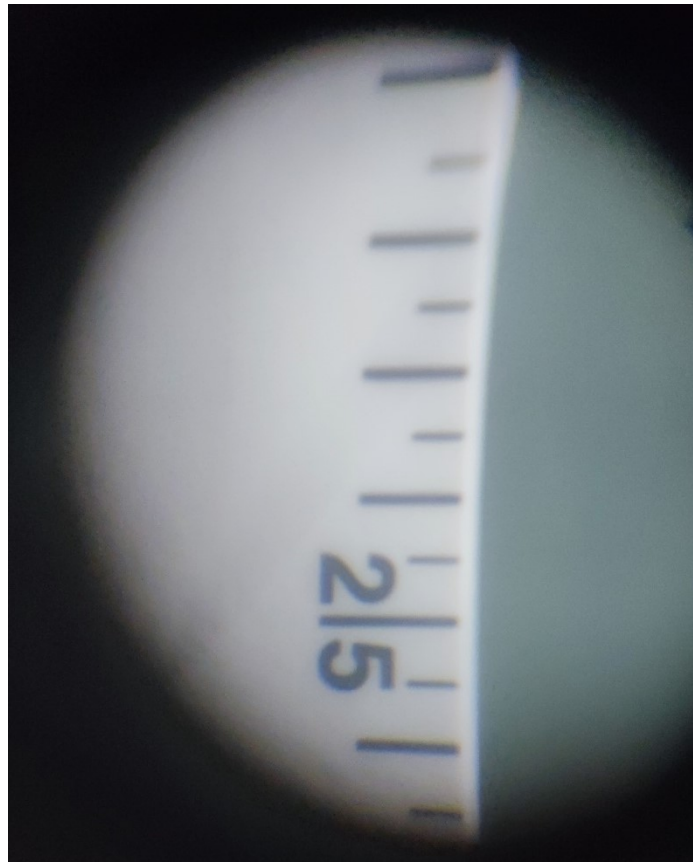


Abb. 121: Lineal bei 7-facher Vergrößerung

Tab. 2: Vergrößerung in Abhängigkeit des Abstandes

Datenpunkt	Abstand Objekt zu Objektiv	Bildgröße (cm)	Gegenstandsgröße (cm)	Bildgröße/ Gegenstandsgröße	Vergrößerung
A	155 cm	3,5	0,5	7 x	43
B	240 cm	3,5	1	3,5 x	34
C	351 cm	2,5	1	2,5 x	35
D	827 cm	3	3,6	0,83 x	28
E	1290 cm	3	5	0,6 x	31

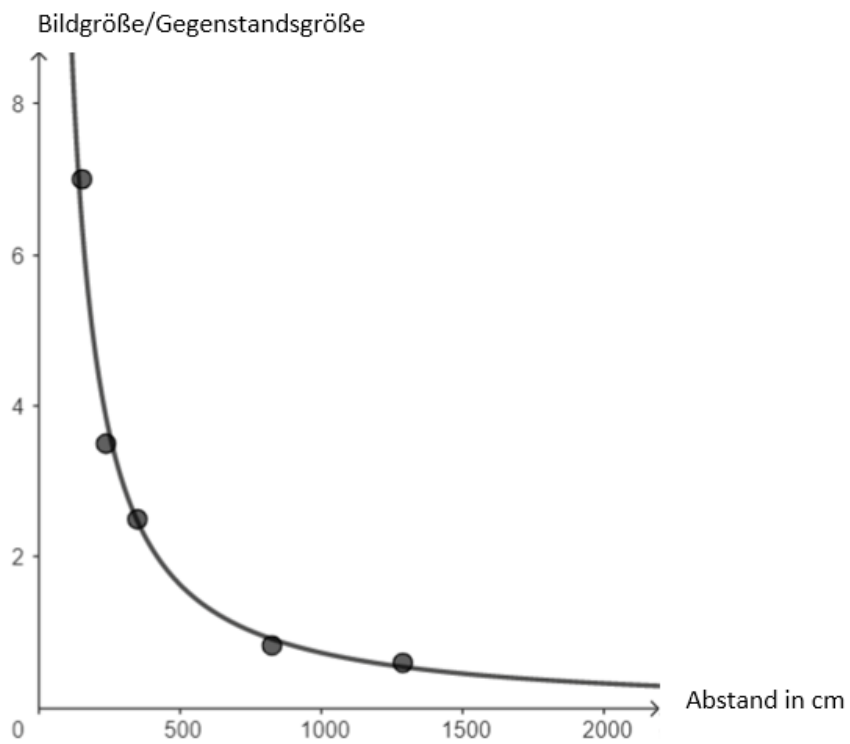


Abb. 122a: Verhältnis Bildgröße zu Gegenstandsgröße in Abhängigkeit des Abstandes

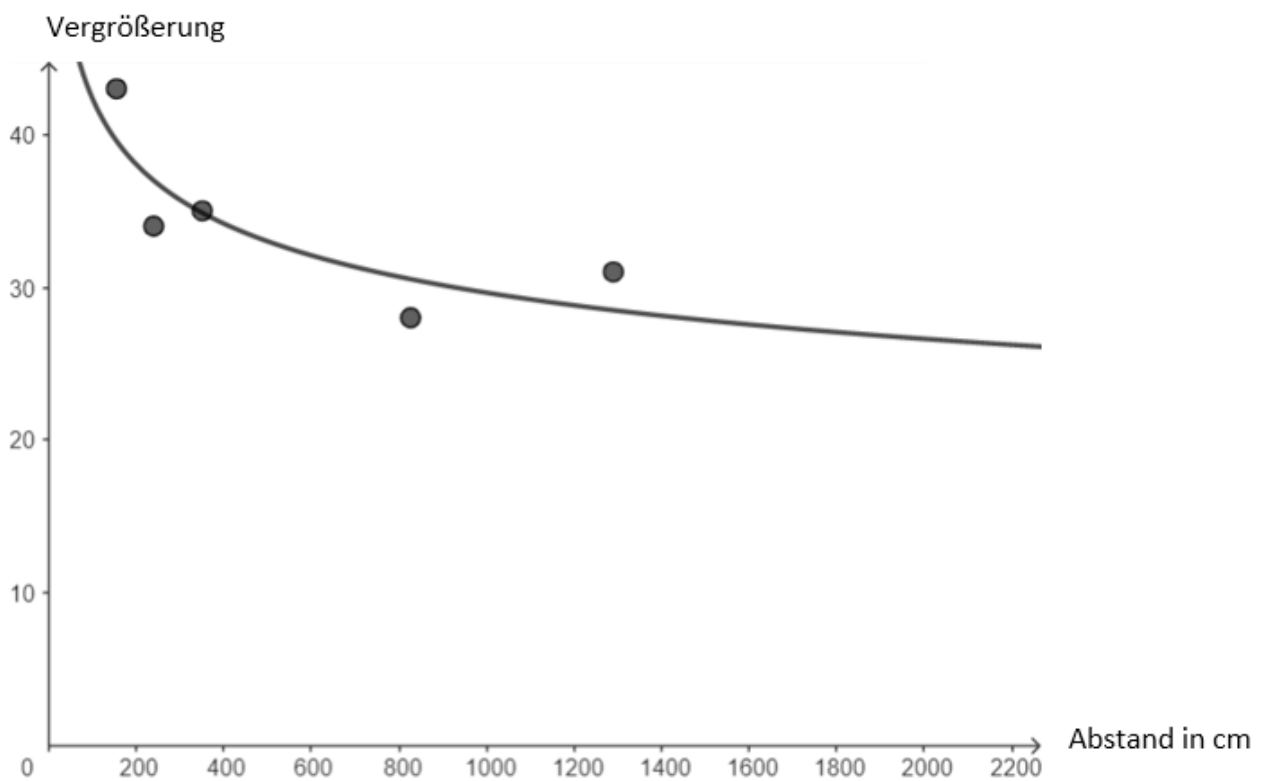


Abb. 122b: Vergrößerung in Abhängigkeit des Abstandes



Abb. 123: Versuchsaufbau zur Darstellung der Hörsaal-Uhr



Abb. 124: Versuchsaufbau zur Darstellung der Hörsaal-Uhr, seitliche Perspektive

8.2 Plössl Fernrohr VI 199

Das dialytische Fernrohr aus dem Jahre 1832 der Firma Plössl hat die Inventarnummer VI 199 und ist in Abb. 125 zu sehen. Der Begriff dialytisch bedeutet, dass mit einer speziellen Linsenkombination zweier Gläser mit unterschiedlichem Brechungsindex die chromatische Aberration korrigiert worden ist. Tab. 1 zeigt die Abmessungen des Fernrohrs. Abb. 126 und 127 zeigen die Gravur des Herstellers am Tubus.

Tab. 1: Grunddaten zum Fernrohr VI 199

Höhe	Länge	Breite
46 cm	63 cm	26 cm



Abb. 125: Plössl-Fernrohr: 1 Stativ, 2 Kippgelenk, 3 Objektiv, 4 Standbein, 5 Okular, 6 Einstelltrieb, 7 Tubus

Für das Fernrohr existiert eine Holzkassette zur Aufbewahrung, welche in Abb. 129 dargestellt ist, und zusätzliche Okulare enthält. Auf der Innenseite der Holzkassette befindet sich eine Gebrauchsanweisung für das Auszugsrohr in Abhängigkeit des verwendeten Okulars. Die Gebrauchsanweisung kann in Abb. 128 näher betrachtet werden. Wie dort beschrieben, ist der Gebrauch dieses Fernrohrs mit astronomischen und terrestischen Okularen zu unterscheiden. Gemäß Abb. 129 sind insgesamt vier Okulare vorhanden. Das Stativ (1) des dialytischen Fernrohres wird von einem dreiarmligen Standbein (4) gestützt. Am oberen Ende des Stativs befindet sich ein Kippgelenk (2), an welchem der Tubus (7) angebracht ist. Durch das Kippgelenk kann der vertikale Winkel des Tubus angepasst werden. Die Scharfstellung erfolgt über den Grobtrieb (6), wobei der Tubus zusätzlich händisch ausgezogen werden kann (je nach Okular). Das Okular hat einen Durchmesser von 3 mm und das Objektiv hat einen Durchmesser von 58 mm.

Experiment und Diskussion

Während das montierte Okular (5) noch gut erhalten scheint, ist das Objektiv (3) rekristallisiert, wodurch eine Bilddarstellung durch das Fernrohr kaum noch möglich ist. Das Objektiv wird in Abb. 130 gezeigt. Bei genügender Helligkeit können Objekte hingegen noch annähernd dargestellt werden, wobei das Fernrohr mit dem montiert vorgefundenen Okular sowohl die Richtungen oben und unten als auch die Richtungen rechts und links vertauscht. Das Bild einer vierflamigen Fotoleuchte (die auch bei den noch folgenden Fernrohren verwendet wurde) in 15,7 m Entfernung, welches mit dem Fernrohr VI 199 gemacht wurde, zeigt Abb. 131. Von der Betrachtung dieser Fotoleuchte leitet sich gemäß Kapitel 6.4 eine 36-fache Vergrößerung des Schwinkels ab.

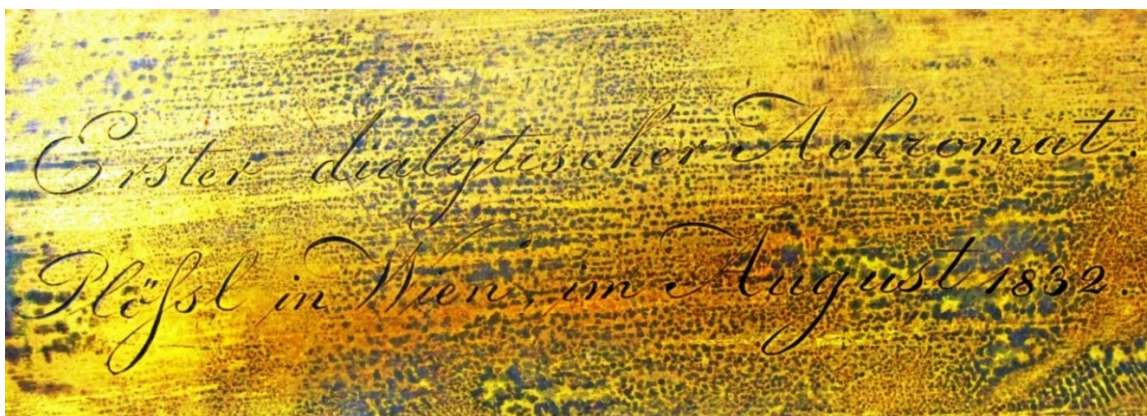


Abb. 126: Gravur des Herstellers am Tubus (Bild bearbeitet)



Abb. 127: Gravur des Herstellers am Tubus (unbearbeitet)

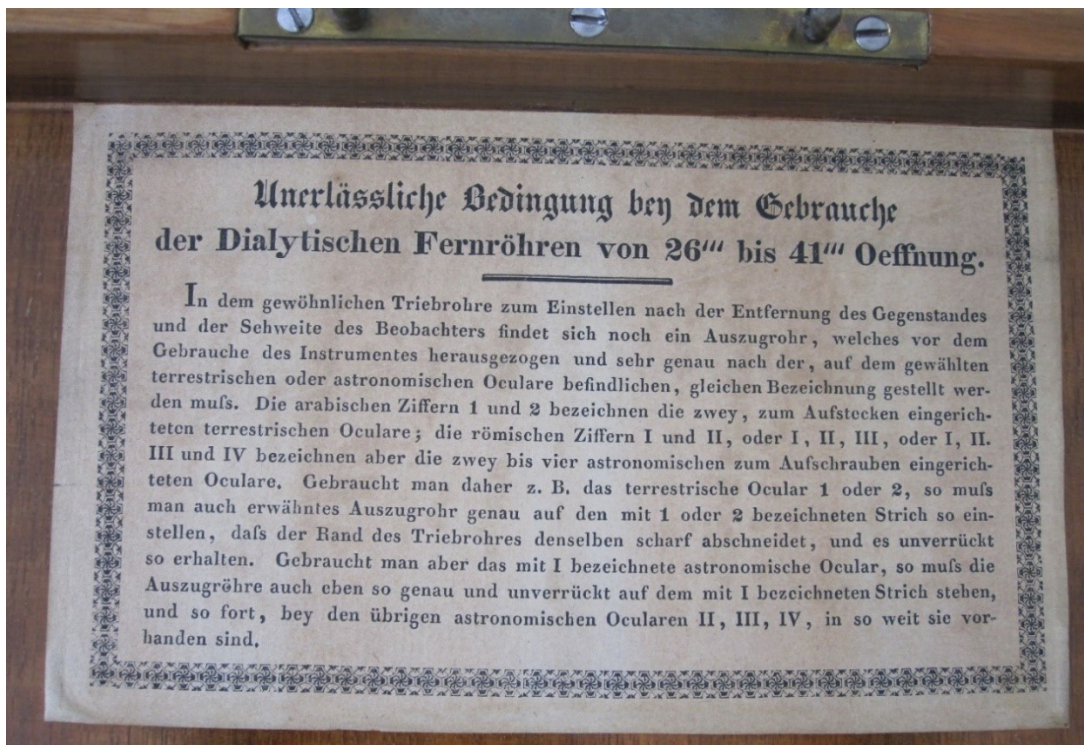


Abb. 128: Gebrauchsanweisung für das Auszugsrohr beim Einsatz verschiedener Okulare



Abb. 129: Plössl-Fernrohr in Holzkassette



Abb. 130: Objektiv

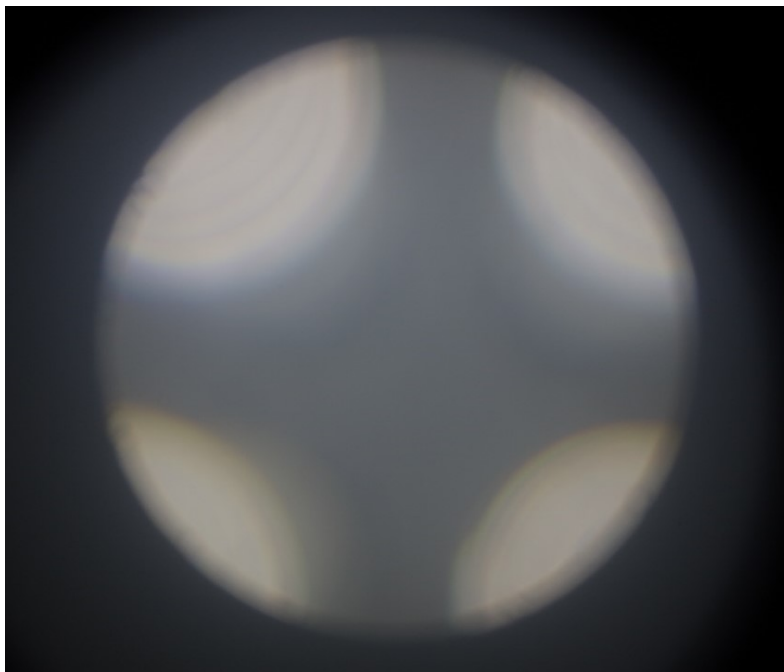


Abb. 131: Darstellung eines Fotoleuchte

8.3 Lenoir & Forster Fernrohr VI 14

Dieses Fernrohr (Abb. 132) mit der Inventarnummer VI 14 ist um 1900 zu datieren und wurde von der Firma Lenoir & Forster gebaut. Im Inventarbuch wird es als großes Fernrohr mit Dreifußstativ bezeichnet. Wie es sich im Experiment herausgestellt hat, handelt es sich um ein terrestrisches Fernrohr. Tab. 1 zeigt die Abmessungen.

Tab. 1: Grunddaten zum Fernrohr

Höhe	Länge	Breite
41 cm	76 cm	27 cm



Abb. 132: Aufbau des Fernrohres: 1 Okular, 2 Tubus, 3 Dreiarmliges Standbein, 4 Stativ, 5 Kippgelenk, 6 Objektiv mit Kappe

Das Stativ (4) des terrestrischen Fernrohrs wird von einem dreiarmigen Standbein (3) gestützt. Der vertikale Winkel des Tubus (2) kann durch ein Kippgelenk (5) verändert werden. Das Fernrohr besitzt ein Rad für den Einstelltrieb, wobei dieses aber bereits teilweise durchrutscht. Die Länge des Tubus kann durch händisches Ausziehen verändert werden. Abb. 133 zeigt das Auszugsrohr, das Okular und die abschließende Blende. Das Okular (1) nutzt einen Durchmesser von 8 mm und das Objektiv (6) hat einen Durchmesser von 55 mm, wobei eine Abdeckkappe zum Schutz des Objektivs vorhanden ist.

Experiment und Diskussion

Für die Aufnahme von Bildern mit dem Fernrohr wurde eine Sammellinse mit einer Brennweite von 110 mm direkt vor dem Objektiv positioniert, da die Entfernung der betrachteten Objekte ohne Zusatzlinse über 30 Meter betragen muss. Abb. 134 soll zeigen, dass dieses Fernrohr – im Gegensatz zu allen anderen untersuchten Fernrohren – ein aufrechtes Bild liefert. Dazu wurde die Fotoleuchte von oben mit beiden Händen abgedeckt. Die Finger zeigen eindeutig nach unten.

Zur Kontrolle wurden vom 4. Stock der Zentralbibliothek für Physik auch weit entfernte Kirchtürme betrachtet (wie die Votivkirche), die im Fernrohr eindeutig aufrecht erschienen.



Abb. 133: Auszugsrohr mit Okular

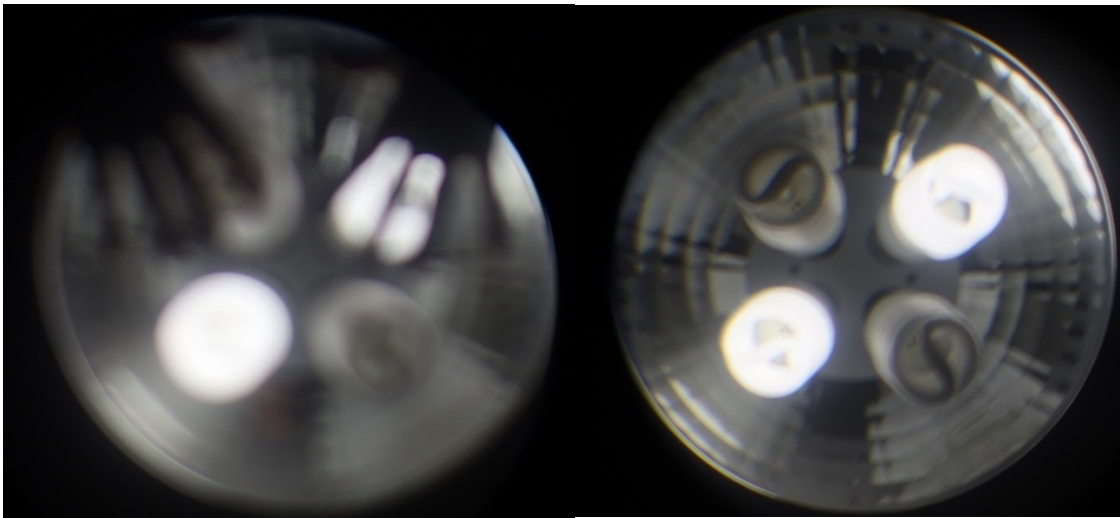


Abb. 134: Darstellung einer Fotoleuchte in 13 m Entfernung mit in linker Abbildung von oben hereingehaltenen Händen

8.4 Steinheil Fernrohr VI 4

Abb. 135 zeigt das große Ablesefernrohr (Inventarnummer VI 4) Firma Steinheil. Es ist um das Jahr 1900 zu datieren. Tab. 1 informiert über Masse (inklusive Stativ) und Abmessungen.

Tab. 1: Grunddaten zum Fernrohr

Masse	Höhe	Länge	Breite
8,15 kg	60 cm	50 cm	26 cm

Das Fernrohr der Firma Steinheil verfügt über ein solides Stativ (2), welches von einem Dreibein (7) gestützt wird. Drei am Standbein befestigte Schrauben können Bodenunebenheiten kompensieren. Der Tubus (5) kann sowohl im vertikalen Winkel (8) als auch im horizontalen Winkel (3) gedreht werden. Die Höhe des Tubus ist händisch einstellbar. Der Einstelltrieb ist in Abb. 137 abgebildet. Das am Fernrohr angebrachte Okular (10) verfügt über einen Durchmesser von 6 mm. Das Objektiv (4) hat einen Durchmesser von 40 mm. Dem Fernrohr liegen noch zwei zusätzliche Okulare (1, 6) bei. Alle drei Okulare sind mit einem Fadenkreuz ausgestattet. Abb. 138 zeigt die drei für das Fernrohr vorhandenen Okulare, wobei hiervon zunächst das rechte Okular für die Experimente verwendet wurde. Eine Scharfstellung des betrachteten Objekts erfolgt über den Einstelltrieb (9), wobei beim erzeugten Bild die Richtungen oben und unten beziehungsweise die Richtungen links und rechts vertauscht sind.

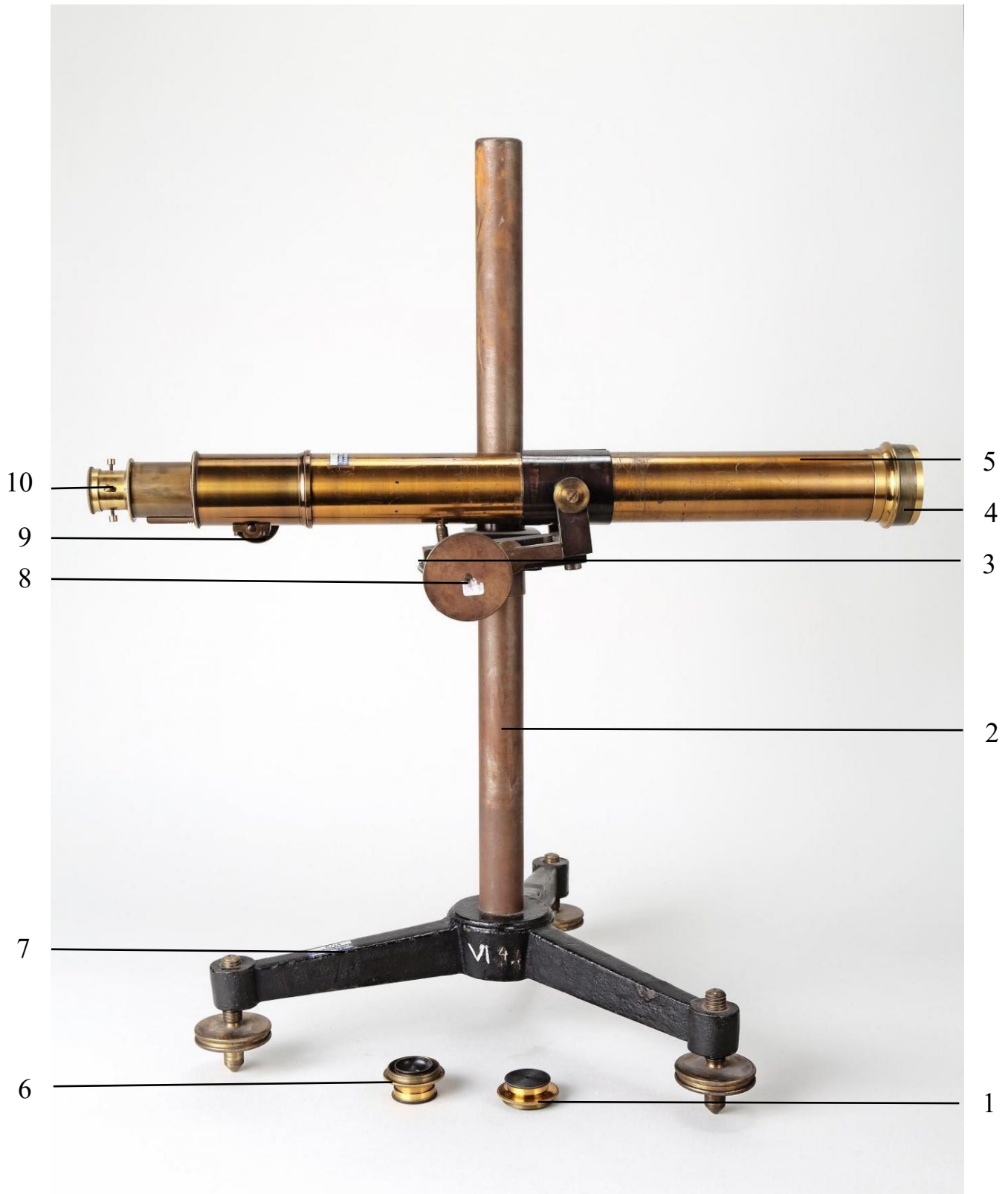


Abb. 135: Aufbau des Fernrohres: 1 zweites Okular, 2 Stativ, 3 Einstellung des vertikalen Winkels, 4 Objektiv, 5 Tubus, 6 drittes Okular, 7 Dreiarmiges Standbein, 8 Einstellung des horizontalen Winkels, 9 Einstelltriebtrieb, 10 Okular

Experiment und Diskussion

Abb. 139 zeigt den Versuchsaufbau zur Bildaufnahme und Abb. 140 zeigt das durch das Fernrohr mit Okular 3 aufgenommene Bild einer Fotoleuchte in 13 m Entfernung. Mit dem gleichen Okular ist auch die Hörsaal-Uhr (Abb. 142) aufgenommen. Okular 1 hat die kürzeste Brennweite. Mit ihm liefert das Ablesefernrohr von Steinheil die maximale Vergrößerung und eine ausgezeichnete Bildqualität, wie das Bild des einzelnen spiraligen Leuchtmittels zeigt.



Abb. 136: Einstelltrieb



Abb. 137: Okulare (Links 1, Mitte 2, Rechts 3)



Abb. 138: Versuchsaufbau zur Bildaufnahme



Abb. 139: Darstellung der Fotoleuchte mit Okular 3 wie in Abb. 138 anvisiert

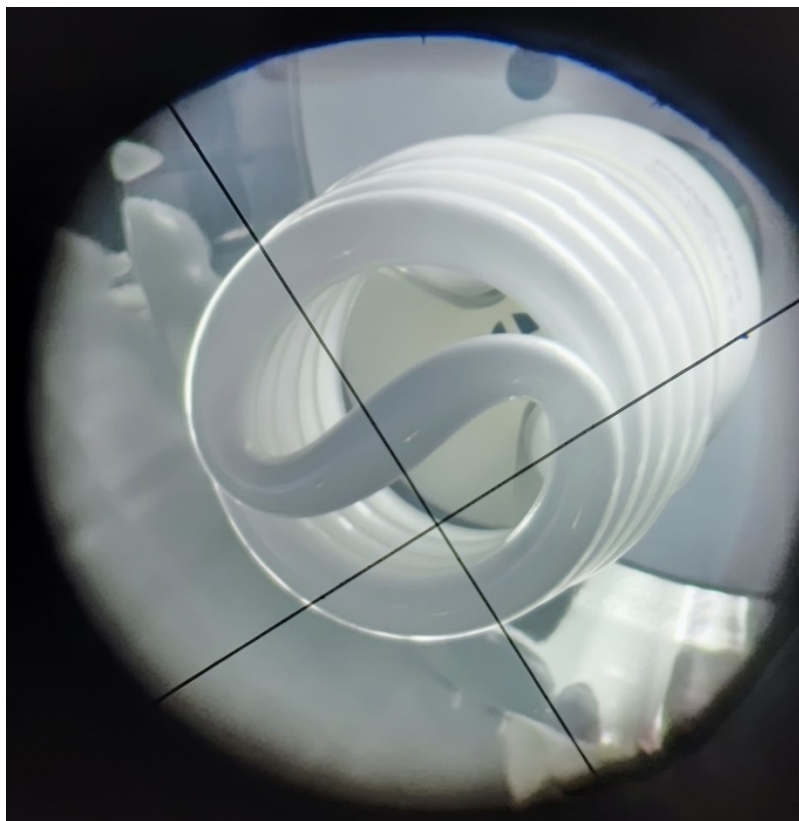


Abb. 140: Darstellung einer Fotoleuchte mit Okular 1



Abb. 141: Darstellung der Hörsaal-Uhr mit Okular 3

8.5 Layser Fernrohr VI 146

Dieses kleine Ablesefernrohr (Inventarnummer VI 146) der Firma Layser wurde bereits 1856 im Physikalischen Institut der Universität Wien erworben und ist in Abb. 142 dargestellt. Tab. 1 zeigt die Abmessungen.

Tab. 1: Grunddaten zum Fernrohr

Höhe	Länge	Breite
17 cm	22 cm	19 cm



Abb. 142: Aufbau des Fernrohres: 1 Stativ, 2 Objektiv, 3 Dreiarmliges Standbein, 4 Okular, 5 Ausziehbares Okularstück, 6 Tubus

Bei dem Fernrohr der Firma Layser handelt es sich um ein kleines handliches Fernrohr. Das Stativ (1) wird von einem dreiarmligen Standbein (3) gestützt, wobei das Standbein auch auf schiefen Ebenen ausgerichtet werden kann. Der Tubus (6) kann in seiner vertikalen Ausrichtung händisch eingestellt werden. Durch ein ausziehbares Okularstück (5) am Tubus erfolgt die Scharfstellung des anvisierten Objekts. Das Okular (4) hat einen Durchmesser von 5 mm, während das Objektiv (2) einen Durchmesser von 21 mm hat. Bei den erzeugten Bildern sind sowohl die Richtungen oben und unten als auch die Richtungen links und rechts vertauscht. Abb. 143 zeigt die Darstellung eines

Lampenschirmes in 15,7 m Entfernung. Die Qualität des Bildes für dieses sehr alte Fernrohr ist beeindruckend.

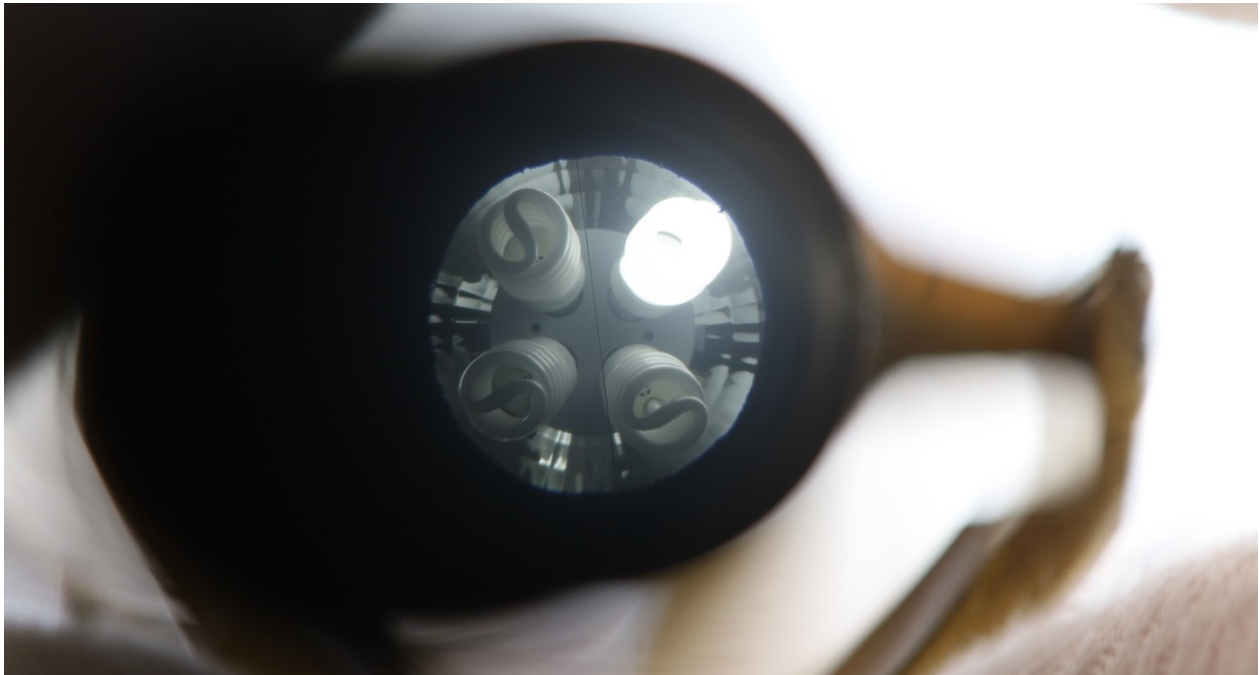


Abb. 143: Darstellung eines Lampenschirms in 15,7 m Entfernung

8.6 Rohrbeck Fernrohr VI 130

Abb. 144 zeigt das Ablesefernrohr (Inventarnummer VI 130) der Firma Rohrbeck. Es ist um das Jahr 1900 zu datieren. Tab. 1 zeigt die Abmessungen.

Tab. 1: Grunddaten zum Fernrohr

Höhe	Länge	Breite
38 cm	28 cm	11 cm

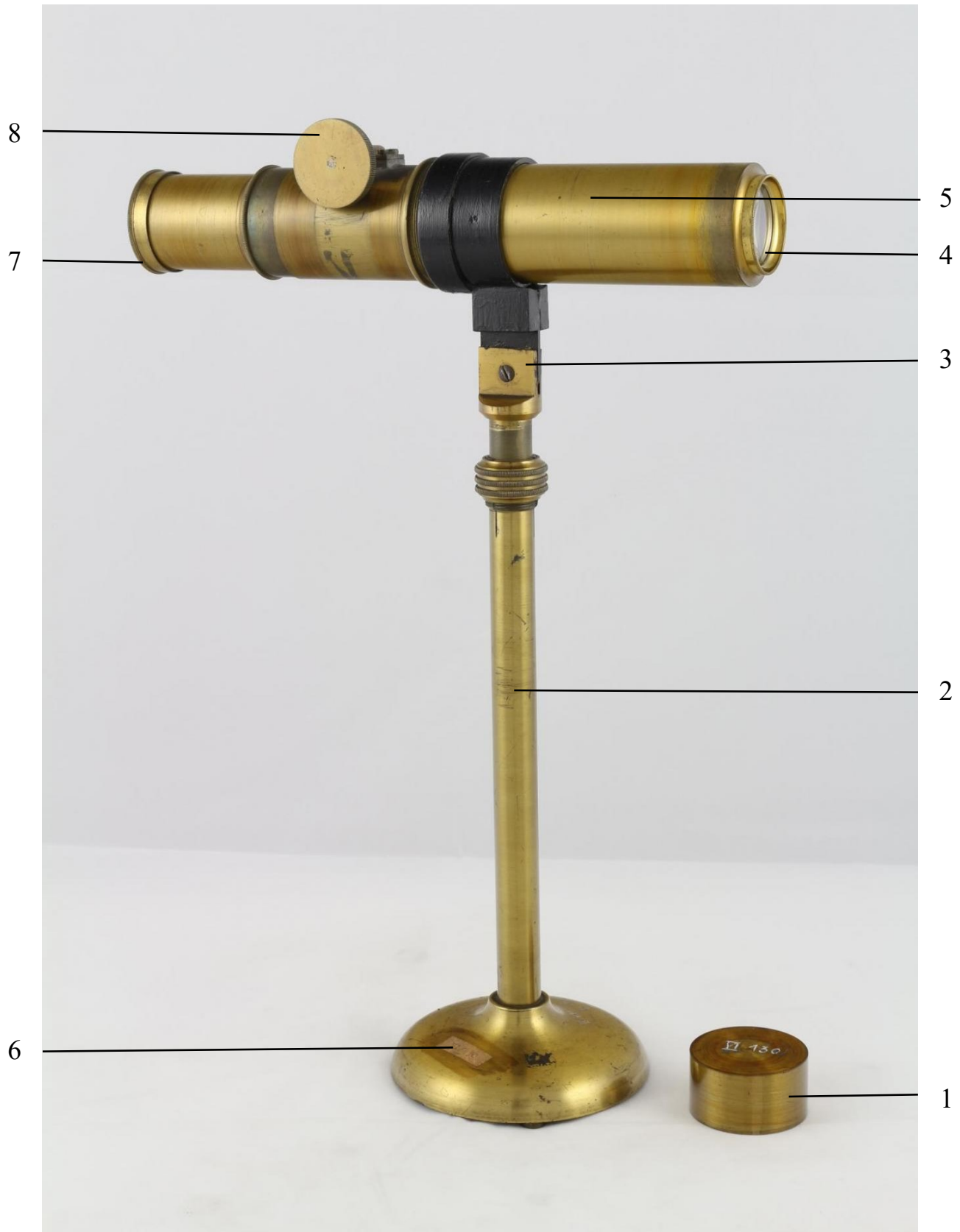


Abb. 144: Aufbau des Fernrohres: 1 Abdeckung Objektiv, 2 Stativ, 3 Kippgelenk, 4 Objektiv, 5 Tubus, 6 Standbein, 7 Okular, 8 Einstelltrieb

Das Stativ (2) des Fernrohrs verfügt über ein Kippgelenk (3), durch welches die vertikale Ausrichtung des Tubus (5) eingestellt werden kann. Das Standbein (6) hat die Form einer kreisförmigen Scheibe. Eine Scharfstellung des betrachteten Objekts erfolgt über einen Einstelltrieb (8). Das Okular (7) hat einen Durchmesser von 16 mm. Das Objektiv (4) hat einen Durchmesser von 27 mm, wobei dem Objektiv eine Abdeckung (1) zum Schutz beiliegt. Bei den erzeugten Bildern des Fernrohrs, die exzellenten Kontrast zeigen, sind sowohl die Richtungen oben und unten als auch die Richtungen links und rechts vertauscht. Abb. 146 zeigt die Fotoleuchte in ca. 15,7 m Entfernung.



Abb. 145: Darstellung einer Fotoleuchte in 15,7 m Entfernung

8.7 Kometensucher von Utzschneider, Reichenbach und Fraunhofer VI 232

Abb. 146 zeigt den Kometensucher (Inventarnummer VI 232), welcher von Utzschneider, Reichenbach und Fraunhofer in Benedictbeurn um 1820 (oder ein paar Jahre früher) hergestellt wurde. Leider fehlt das ursprünglich dazugehörige Stativ. Die Abmessungen sind in Tab. 1 ersichtlich.

Tab. 1: Grunddaten zum Fernrohr

Höhe	Länge	Breite
9,5 cm	67 cm	9,5 cm

Das Fernrohr besteht aus Tubus (2), einem ausziehbaren Okular (1) und einem Objektiv (3). Abb. 147 zeigt die Gravur der Hersteller am Fernrohr: „Utzschneider Reichenbach und Fraunhofer in Benedictbeurn“. Mit Hilfe des ausziehbaren Okulars erfolgt die Scharfstellung des betrachteten Objekts, wobei eine Mindestentfernung zwischen Objektiv und Objekt von 3 Metern benötigt wird. Das Okular hat einen Durchmesser von 13 mm und das Objektiv hat einen Durchmesser von 75 mm.

Experiment und Diskussion

Bei den erzeugten Bildern des Fernrohres sind sowohl die Richtungen oben und unten als auch die Richtungen links und rechts vertauscht. Mit dem Fernrohr lassen sich Gegenstände bis zu einer minimalen Entfernung von 3 Metern scharf abbilden. Abb. 149 stellt ein mit dem Fernrohr erhaltenes Bild einer 15,7 m entfernten Uhr dar. Abb. 148 zeigt eine mit dem Kometensucher dargestellte Wandlampe, während Abb. 150 den Versuchsaufbau zur Bilddarstellung zeigt, welcher eine Fixierung des Tubus beinhaltet, da das originale Stativ für den Kometensucher fehlt. In Abb. 148 und 149 läßt sich eindeutig das größere Gesichtsfeld des Kometensuchers im Vergleich zu den üblichen Fernrohren erkennen. Somit kann am Nachthimmel ein Komet leichter gefunden werden als mit einem Fernrohr mit kleinem Gesichtsfeld.



Abb. 146: Kometensucher: 1 Okular, 2 Tubus, 3 Objektiv



Abb. 147: Gravur der Hersteller



Abb. 148: Darstellung einer Wandlampe in ca. 17 m Entfernung



Abb. 149: Darstellung der Hörsaal-Uhr in 15,7 m Entfernung



Abb. 150: Versuchsaufbau zur Bilddarstellung

9 Resümee

Im Fokus dieser Arbeit stehen drei Plössl Mikroskope, sechs Mikroskope von Reichert-Austria und eines von Zeiss. Des Weiteren werden 7 verschiedene Fernrohre untersucht, darunter ein Kometensucher von „Utzschneider Reichenbach und Fraunhofer in Benedictbeurn“ (ca. 1820), ein dialytisches Plössl Fernrohr von 1832, ein Ablesefernrohr von 1856, ein terrestrisches Fernrohr (um 1900) und drei weitere Ablesefernrohre (um 1900). Weiters werden zwei Fraunhofer Mikrometer und eine Teilmaschine beschrieben. Die theoretischen Grundlagen zu Mikroskopen und Fernrohren sowie Abbildungsfehler werden dargelegt.

Die genannten Geräte werden detailliert beschrieben und im Experiment getestet. Für die Mikroskope werden je nach Gerät ein Objektmikrometer, Okularmikrometer, dünne Drähte mit bekanntem Durchmesser oder auch ein Kreuzgitter verwendet. Die Vergrößerung der Geräte wird abgeschätzt, wenn sie nicht angegeben ist. Bei den Mikroskopen von Reichert-Austria ist meist nicht mehr die gesamte ursprüngliche Ausstattung vorhanden. Gelegentlich befinden sich Okulare von Zeiss in einem Reichert-Austria Mikroskop. Grundsätzlich funktionieren die drei älteren Reichert-Austria-Mikroskope und das Zeiss-Mikroskop, welche um 1900 (eines um 1929) zu datieren sind, recht gut. Verglichen werden kann mit drei jüngeren Reichert-Austria-Mikroskopen,

die im Zeitraum 1950 bis 1962 angeschafft worden sind. Darunter befindet sich auch ein Stereomikroskop mit bereits moderner und umfangreicher Ausstattung, welches noch durchaus funktionsfähig ist, so wie auch die beiden anderen jüngeren Reichert-Mikroskope.

Auch das horizontale Plössl-Mikroskop (ca. 1840) gibt noch brauchbare Bilder, wenngleich der als Objektiv verwendete versilberte Hohlspiegel schon deutlich korrodiert ist. Durchaus überzeugen können die beiden späteren Plössl-Mikroskope (ca. 1846 – 1850), wobei eines eine runde Stativsäule hat und das andere, umfangreicher ausgestattete, eine dreieckige Stativsäule besitzt.

Das Fraunhofer'sche Mikroskop gestattet Dicken und Längen bis ca. 3 mm mit ca. 1 μm Auflösung zu messen. Das Fraunhofer'sche Mikrometer gestattet Längen bis ca. 27 mm mit ca. 2 μm Auflösung festzustellen. Mittels Teilmaschine können Längen bis 430 mm mit 0.01 mm Auflösung festgestellt werden.

Als nicht mehr gut funktionsfähig erweist sich das dialytische Plössl-Fernrohr von 1832, weil die Objektivlinse rekristallisiert und damit nicht mehr voll durchsichtig ist. Der deutlich ältere Kometensucher, hergestellt um 1820, erweist sich dagegen als voll funktionsfähig, allerdings fehlt das Stativ dazu.

Das terrestrische Fernrohr (um 1900, Lenoir & Forster), welches als einziges der untersuchten Fernrohre ein aufrechtes Bild liefert, ergibt erst von Objekten in ca. 30 Meter Entfernung ein scharfes Bild. Durch Vorsetzen einer Sammellinse werden auch im Hörsaal scharfe Bilder erhalten.

Die untersuchten Ablesefernrohre (Hartmann & Co., Steinheil, Layser, Rohrbeck), die für Distanzen von typisch 5 m bis 15 m gedacht sind, funktionieren einwandfrei und liefern überzeugend gute Bilder, die auf dem Kopf stehen. Die Vergrößerung des Schwinkels für das Ablesefernrohr von Hartmann & Co. hat je nach Entfernung den Wert von ca. 40 (1,55 m Entfernung) bis ca. 30 (12,9 m Entfernung) ergeben.

10 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Ass.-Prof. Mag. Dr. Franz Sachslehner bedanken, welcher mich im Rahmen dieser Arbeit betreut und unterstützt hat. Ebenso gilt Herrn Ing. Walter Urbanek, einem ehemaligen Mitarbeiter der Firma Zeiss, meine Dankbarkeit. Er hat auf die Bücher von Ehringhaus & Trapp und Kurt Michel verwiesen und bestätigt, dass die jüngeren Mikroskopobjektive aus verchromtem Messing bestehen.

11 Literaturverzeichnis

- Al-Kahalili, Jim. (2013): Im Haus der Weisheit. Die arabischen Wissenschaften als Fundament unserer Kultur. Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch.
- Anderhuber, Friedrich; Pera, Franz; Streicher, Johannes und Waldeyer, Anton Johannes. (2012): Waldeyer: Anatomie des Menschen: Lehrbuch und Atlas in einem Band. 19. Auflage, Berlin: De Gruyter
- Eichler, Hans Joachim; Kronfeldt, Heinz-Detlef und Sahm, Jürgen. (2016): Das neue physikalische Grundpraktikum. Berlin, Heidelberg: Springer
- Gerlach, Dieter (2009): *Geschichte der Mikroskopie*. Frankfurt am Main: Deutsch.
- Gerhard, Christoph. (2020): Tutorium Optik. Göttingen: Springer Spektrum
- Gobrecht, Heinrich. (1987): Bergmann Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik Band III Optik. 8. Auflage, Berlin: Walter de Gruyter
- Michel, Kurt. (1950): Die Grundlagen der Theorie des Mikroskops. Stuttgart: Wissenschaftl. Verl.-Ges.
- Meschede, Dieter. (2015): Gerthsen Physik. Berlin, Heidelberg: Springer
- Pfeiler, Wolfgang. (2021): Experimentalphysik, Band 4: Optik, Strahlung, 2. Auflage. Berlin: Walter de Gruyter.
- Plössl, Simon (1844): Verzeichnis der optischen Apparate, in: Annalen der K.K. Sternwarte in Wien, vol. 23, pp.126-134. Online: <https://adsabs.harvard.edu/full/1844AnWie..23..126>. (Zugriff 21.11.2022).
- Roth, Stefan und Stahl, Achim. (2019): Optik: Experimentalphysik – anschaulich erklärt. Berlin: Springer
- Steiner, Erich und Schulz, Peter. (2006): Plössl-Mikroskope – ein Vergleich mit modernen Geräten. Wien: Ann. Naturhis. Mus. Wien 107 B, 39-55.
- Stuart, Herbert und Klages, Gerhard. (2010): Kurzes Lehrbuch der Physik. Heidelberg: Springer
- Ehringhaus, Artur und Trapp, Lothar. (1058): Das Mikroskop. Stuttgart: B.G. Teubner Verlagsgesellschaft.
- Weber-Unger, Simon. (2005): Das Mikroskop. PARNASS 01/2005, 32-36.
- Westphal, Wilhelm H. (1970): Physik. 25./26. Auflage, Berlin: Springer
- Wilde, Emil. (1838): Geschichte der Optik: Von Aristoteles bis Newton vom Ursprunge dieser Wissenschaft bis auf die gegenwärtige Zeit. Berlin: Rücker und Püchler
- Zinth, Wolfgang und Zinth Ursula (2008): Optik: Lichtstrahlen, Wellen, Photonen, 2. Auflage. Berlin: Oldenbourg Wissenschaftsverlag

12 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Der Sehwinkel (vgl. Meschede 2015, S. 510)

Abb. 2: Akkommodationsfähigkeit des Auges (vgl. Anderhuber & Pera & Streicher 2012, S. 884)

Abb. 3: Strahlengang der Lupe mit im Brennpunkt befindlichen Auge (vgl. Ehrlinghaus & Trapp 1958, S. 22)

Abb. 4: Strahlenbegrenzung bei der Lupe (vgl. Michel 1950, S. 144)

Abb. 5: Strahlengang beim Mikroskop (vgl. Ehrlinghaus & Trapp 1958, S. 26)

Abb. 6: Abgleichung der Mikroskopobjektive (vgl. Michel 1950, S. 136)

Abb. 7: Aufbau des Huygen'schen Okulars (vgl. Stuart & Klages 2010, S. 221)

Abb. 8: Beleuchtung mit Hohlspiegel (vgl. Ehrlinghaus & Trapp 1958, S. 67)

Abb. 9: Beleuchtung mit Planspiegel und Kondensator (vgl. Ehrlinghaus & Trapp 1958, S. 68)

Abb. 10: Strahlenbegrenzung im Mikroskop (vgl. Ehrlinghaus & Trapp 1958, S. 31)

Abb. 11: Sphärische Aberration an einer Sammellinse mit den Schnittweiten s (vgl. Michel 1950, S. 43)

Abb. 12: Minimierung der sphärischen Aberration durch sphärisch über- und unterkorrigierte Linsen (vgl. Michel 1950, S. 44)

Abb. 13: Unterschiedliche Vergrößerungen durch unterschiedliche Zonen der Linse (vgl. Michel 1950, S. 45)

Abb. 14: Entstehung des Astigmatismus durch ein schräg einfallendes Lichtbündel (vgl. Gerhard 2020, S. 128)

Abb. 15: Astigmatismus und Bildkrümmung (vgl. Michel 1950, S. 50)

Abb. 16: Tonnenförmige Verzeichnung (vgl. Michel 1950, S. 51)

Abb. 17: Tonnenförmige Verzeichnung (vgl. Michel 1950, S. 51)

Abb. 18: Koma (vgl. Michel 1950, S. 53)

Abb. 19: Chromatische Längsaberration (vgl. Zinth & Zinth 2008, S. 106)

Abb. 20: Chromatische Queraberration (vgl. Zinth & Zinth 2008, S. 106)

Abb. 21: Strahlenverlauf beim galileischen Fernrohr (vgl. Eichler et al. 2016, S. 290)

Abb. 22: Strahlenverlauf beim astronomischen Fernrohr (vgl. Eichler et al. 2016, S. 290)

Abb. 23: Prismen-Fernrohr (vgl. Westphal 1970, S. 495)

Abb. 24: Bestimmung der Vergrößerung eines Mikroskops (vgl. Ehrlinghaus & Trapp 1958, S. 119)

Abb. 25: Objektmikrometer

Abb. 26: Aufbau des Mikroskops

Abb. 27: Mikroskop Nr. 14201 in der Holzkassette

Abb. 28: Objektive mit Dosen

Abb. 29: Aufbau des Mikroskops

Abb. 30: Mikroskop Rückseite

Abb. 31: Mikroskop Nr. 18408 mit Holzkassette

Abb. 32: Irisblende mit seitlichem Verstelltrieb

Abb. 33: Feintrieb mit Skala

Abb. 34: Gesamtvergrößerung bei Tubuslänge 160 mm

Abb. 35: Gesamtvergrößerung bei nicht herausgezogenem und herausgezogenem Tubus

Abb. 36: Darstellung eines Kupferdrahtes

Abb. 37: 0,200 mm Kupferdraht mit Objektiv 8a und Okular 2 bei Tubuslänge 160 mm ($V \approx 400$ x laut Tab. 3)

Abb. 38: Aufbau des Mikroskops

Abb. 39: Grobtrieb und Seriennummer

Abb. 40: Mikroskop mit Holzkassette

Abb. 41: Vergrößerungstabelle

Abb. 42: Objektive

Abb. 43: Versuchsaufbau für die Bildaufnahme eines Kupferdrahtes

Abb. 44: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Vergrößerung des Mikroskops

Abb. 45: Darstellung eines 0,200 mm breiten Kupferdrahtes

Abb. 46: Aufbau des Mikroskops

Abb. 47: Mikroskop mit Holzkassette und Zubehör

Abb. 48: Skala des Probenstisches

Abb. 49: Feintrieb

Abb. 50: Gesamtvergrößerungen bei Tubuslänge 160 mm

Abb. 51: Objektive (Links 15, Mitte 11, Rechts 8)

Abb. 52: Okular VI 243|10

Abb. 53: Bestimmung der Gesamtvergrößerung nach Methode aus Kapitel 6.4

Abb. 54: Vergleich von Okularmikrometer und Objektivmikrometer: Links Objektiv 8, Rechts Objektiv 11

Abb. 55: Vergleich von Okularmikrometer und Objektivmikrometer mit Objektiv 15

Abb. 56: Darstellung eines 0,340 mm Kupferdraht: Links Objektiv 8, Rechts Objektiv 11

Abb. 57: Darstellung eines 0,200 mm Kupferdraht mit Objektiv 15

Abb. 58: Aufbau des Mikroskops

Abb. 59: Objektive (a: 5np, b: 6bnp, c: 3, d: 3np)

Abb. 60: Regeltransformator für den Lampenstrom

Abb. 61: Darstellung eines Objektmikrometers mit Okularkamera (mit Objektiv a: 3, b: 3np, c: 5np, d: 6bnp)

Abb. 62: Grid mit Handy und Okular 16x (mit Objektiv a: 3, b: 3np, c: 5np, d: 6bnp)

Abb. 63: Grid mit Okularkamera (Objektiv a: 6bnp, b: 5np, c: 3np, d: 3)

Abb. 64: Einkristall mit Gleitlinien mit Objektiv 5np und Okularkamera

Abb. 65: Aufbau des Mikroskops

Abb. 66: Feintrieb

Abb. 67: Vergleich von Okularmikrometer und Objektmikrometer

Abb. 68: Darstellung eines Kupferdrahtes

Abb. 69: Aufbau des Mikroskops

Abb. 70: Zeiss-Mikroskop Nr. 57277 mit Zubehör

Abb. 71: Tubus mit Seriennummer und Grobtrieb

Abb. 72: Feintrieb

Abb. 73: Objektive (Links Objektiv 31, Mitte Objektiv 12, Rechts Objektiv $f = 4$ mm)

Abb. 74: Darstellung eines Kupferdrahtes

Abb. 75: Aufbau des Mikroskops

Abb. 76: Horizontales Plössl-Mikroskop zerlegt

Abb. 77: Tubus Innenseite mit schrägem Spiegel

Abb. 78: Gravur am horizontalen Plössl-Mikroskop

Abb. 79: Hohlspiegel für Durchlicht

Abb. 80: Zweiteiliger Probenstisch

Abb. 81: 1,36 mm Kupferdraht bei 45-facher Vergrößerung

Abb. 82: Leicht schadhafter Hohlspiegel für Durchlicht

Abb. 83: Aufbau des Mikroskops

Abb. 84: Plössl-Mikroskop und Zubehör in mit Samt ausgekleideter Holzkassette

Abb. 85: Okulare des Plössl-Mikroskops mit Dreikantstativ

Abb. 86: Zahntrieb am Dreikantstativ

Abb. 87: Probentisch mit Aufsatz

Abb. 88: Aufsatz für Probentisch

Abb. 89: Probentisch

Abb. 90: Schraubenfeder und Lochblenden auf Unterseite des Probentisches

Abb. 91: Zwei Gläser, das obere ist kippbar, zur Manipulation der Beleuchtung

Abb. 92: Objektiv 1 bis 7

Abb. 93: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Gesamtvergrößerung nach Methode 6.4

Abb. 94: Kupferdraht auf Probentisch

Abb. 95: Darstellung eines 1,36 mm breiten Kupferdrahtes: Objektive (Links 1, Mitte 2, Rechts 3)

Abb. 96: Kreuzgitter mit 3,0 mm Durchmesser bei 35-facher Vergrößerung

Abb. 97: Aufbau des Mikroskops

Abb. 98: Das Plössl-Mikroskop VI 203 samt Zubehör in der Original-Holzkassette

Abb. 99: Probentisch des Plössl-Mikroskops VI 203

Abb. 100: Hohlspiegel für Durchlicht

Abb. 101: Objektive des Plössl-Mikroskops VI 203

Abb. 102: Bestimmung der Mikroskopvergrößerung für VI 203 nach Kapitel 6.4

Abb. 103: 1,36 mm Kupferdrahtes bei 50-facher Vergrößerung

Abb. 104: Aufbau des Mikroskops

Abb. 105: Aufbau zur Ermittlung der Kalibrierung

Abb. 106: Vergleich der im Tubus angebrachten Skala mit einem Lineal

Abb. 107: Darstellung eines Kupferdrahtes

Abb. 108: Skalentrommel zur Justierung der im Tubus angebrachten Skala

Abb. 109: Aufbau des Mikroskops

Abb. 110: Fraunhofer Mikrometer IV 89 in Holzkassette

Abb. 111: Skalenrad und Skala zur Längen- und Dickenmessung

Abb. 112: Darstellung eines Kupferblechstreifens

Abb. 113: Aufbau der Teilmaschine

Abb. 114: Skala mit Nonius

Abb. 115: Skalenrad zur Längen- und Dickenmessung

Abb. 116: Angaben zur Schraubenkonstante der Teilmaschine

Abb. 117: Aufbau des Fernrohres

Abb. 118: Gravur des Herstellers

Abb. 119: Objektiv

Abb. 120: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Fernrohrvergrößerung nach Methode aus Kapitel 6.4

Abb. 121: Lineal bei 7-facher Vergrößerung

Abb. 122a: Verhältnis Bildgröße zu Gegenstandsgröße in Abhängigkeit des Abstandes

Abb. 122b: Vergrößerung in Abhängigkeit des Abstandes

Abb. 123: Versuchsaufbau zur Darstellung der Hörsaal-Uhr

Abb. 124: Versuchsaufbau zur Darstellung der Hörsaal-Uhr, seitliche Perspektive

Abb. 125: Plössl-Fernrohr

Abb. 126: Gravur des Herstellers am Tubus (Bild bearbeitet)

Abb. 127: Gravur des Herstellers am Tubus (Bild unbearbeitet)

Abb. 128: Gebrauchsanweisung für das Auszugsrohr beim Einsatz verschiedener Okulare

Abb. 129: Plössl-Fernrohr in Holzkassette

Abb. 130: Objektiv

Abb. 131: Darstellung eines Fotoleuchte

Abb. 132: Aufbau des Fernrohres

Abb. 133: Auszugsrohr mit Okular

Abb. 134: Darstellung einer Fotoleuchte in 13 m Entfernung mit in linker Abbildung von oben hereingehaltenen Händen

Abb. 135: Aufbau des Fernrohres

Abb. 136: Einstelltrieb

Abb. 137: Okulare (Links 1, Mitte 2, Rechts 3)

Abb. 138: Versuchsaufbau zur Bildaufnahme

Abb. 139: Darstellung der Fotoleuchte mit Okular 3 wie in Abb. 138 anvisiert

Abb. 140: Darstellung einer Fotoleuchte mit Okular 1

Abb. 141: Darstellung der Hörsaal-Uhr mit Okular 3

Abb. 142: Aufbau des Fernrohres

Abb. 143: Darstellung eines Lampenschirms in 15,7 m Entfernung

Abb. 144: Aufbau des Fernrohres

Abb. 145: Darstellung einer Fotoleuchte in 15,7 m Entfernung

Abb. 146: Kometensucher

Abb. 147: Gravur der Hersteller

Abb. 148: Darstellung einer Wandlampe in ca. 17 m Entfernung

Abb. 149: Darstellung der Hörsaal-Uhr in 15,7 m Entfernung

Abb. 150: Versuchsaufbau zur Bilddarstellung

Hinweis:

Folgende Fotos (Abbildungen) wurden von Franz Sachslehner aufgenommen:

25-29, 31-35, 38-41, 43-44, 47, 50, 53, 58-60, 65, 69-71, 76, 78-80, 82, 84-86, 88-91, 93, 97-102, 104-105, 108-111, 113-117, 123-138, 141-144, 146-147, 150.

Folgende Fotos stammen von W. Blaschnek (CC BY 4.0 International):

75, siehe auch <https://phaidra.univie.ac.at/o:725561>

83 (ohne Insert), siehe auch <https://phaidra.univie.ac.at/o:725613>