

DIE ENTSPIEGELUNG DER AUFLICHTOBJEKTIVE

Von ERICH STACH

In der Auflicht-Hellfeld-Mikroskopie muß bei schwach reflektierenden Anschliffen sehr mit störenden Linsenreflexen gekämpft werden. In den Mikroskopobjektiven entstehen an den Grenzflächen Glas gegen Luft Reflexe, die das Bild stark verschlechtern. Die Reflexe wachsen mit der Zahl der Glas-Luft-Flächen. Je stärker das Objektiv, um so größer wird die Zahl der Linsen und der Glas-Luft-Flächen. Ein stark vergrößerndes Objektiv gibt daher kontrastärmere Bilder als ein schwächeres Objektiv, das in gleicher Weise geometrisch korrigiert ist. Aber auch die schwachen Objektive weisen eine Anzahl Glas-Luft-Flächen auf. An diesen Grenzflächen wird ein Teil des Lichtes reflektiert, so daß einmal ein Lichtverlust und dann eine Bildverschleierung entsteht. Diese Erscheinung wirkt sich weniger bei Objektiven für durchfallendes Licht als für auffallendes Licht aus. Dem Auflichtmikroskopiker ist diese leidige Reflexbildung zur Genüge bekannt. Mit Hilfe der Aperturblende, der Zentralblende und der Gesichtsfeldblende gelingt es, diese Reflexe stark einzuschränken. Allerdings wird diese Bildverschleierung erstens durch Lichtverlust und zweitens durch Verlust an Auflösungsvermögen teuer erkauft. Denn je mehr man die Aperturblende zuzieht, um so schlechter wird die Auflösung des Mikrobildes.

Es gibt nun eine Möglichkeit, die störenden Spiegelungen durch Vergütung der Glas-Luft-Flächen mit reflexmindernden Schichten zu beheben. Wegen der großen Bedeutung dieser „Entspiegelung“ für die Auflicht-Hellfeld-Mikroskopie schwach reflektierender Stoffe soll auf dieses Verfahren hier in Anlehnung an G. ROSENTHAL (5) eingegangen werden.

Die Tatsache, daß auf Glas eine reflexmindernde Schicht möglich ist, wurde bereits 1892 von H. D. TAYLOR (10) erkannt. Dieser beobachtete, daß eine Glasoberfläche, die von der Atmosphäre angegriffen worden war, weniger reflektierte und mehr Licht durchließ als eine gewöhnliche Glasoberfläche. Da er die technische Bedeutung dieser Erscheinung sogleich erkannte, versuchte er, eine solche reflexmindernde Schicht künstlich herzustellen. Er behandelte die Glasoberfläche mit einer verdünnten Lösung von Ammoniumsulfid und danach mit verdünnter Salpetersäure. Das Reflexionsvermögen nimmt bei diesem Verfahren um 33—40 % ab. Da dieses chemische Verfahren auf ganz verschieden zusammengesetzte Gläser angewendet und die Behandlung jedesmal entsprechend geändert werden mußte, so hat es sich in der Praxis nicht eingebürgert.

Mit der Weiterentwicklung der technischen Optik wurde jedoch der Wunsch, den Lichtverlust an den Glas-Luft-Flächen zu vermeiden, immer stärker. Größere Leistungen optischer Systeme sind meist nur durch Erhöhung der Zahl der Glas-Luft-Flächen zu erreichen. Der Gesamtlichtverlust wächst aber exponentiell mit der Zahl dieser Flächen. Ein Mikroskopobjektiv hat etwa zehn solcher Flächen. Ein gutes Auflichtmikroskop mit Vertikalilluminator kann also etwa 18 Glas-Luft-Flächen aufweisen. In der nachfolgenden Zahlentafel ist die Abhängigkeit der Lichtverluste von der Zahl der Glas-Luft-Flächen dargestellt.

Glas mit der niedrigen Brechungszahl 1,5 hat ein Reflexionsvermögen von 4%. Könnte man das Reflexionsvermögen auf den zehnten Teil, also von 4% auf 0,4%, herabsetzen, so würden bei 10 Flächen nicht mehr 33,5%, sondern nur noch insgesamt rund 4% verlorengehen.

Abhängigkeit der Lichtverluste
durch Reflexion von der Zahl der Glas-Luft-Flächen ($n_g = 1,5$)

Anzahl der reflektierenden Flächen	2	4	6	8	10	20
Verluste in %	7,8	15,0	21,7	27,8	33,5	55,7

Außer dem Lichtverlust treten beim Mikrobild noch andere Störungen auf, die darauf zurückgehen, daß an zwei Linsenflächen reflektiertes Licht unter Umständen eine Blende in der Bildebene abbilden kann.

G. BAUER (2) dampfte (1934) Schichten von NaBr, KBr und KJ auf Quarz auf und stellte fest, daß die Reflexion am Quarz von 4,07% auf 0,38% herabgesetzt werden konnte. A. SMAKULA (6, 7) und I. STRONG (9) dampften CaF_2 auf, später auch andere Fluoride. Für diese Schichten wird ein Reflexionsvermögen von 0,4% bis 0,5% angegeben.

Interessant ist die Überlegung, wie die Reflexminderung derartig aufgedampfter Schichten zustande kommt. Die Reflexion ist um so geringer, je niedriger die Brechzahl der Schicht ist. Je geringer der optische Unterschied zweier Medien ist, desto weniger Energie verliert ein Strahl durch Reflexion, der aus dem geringer brechenden in das stärker brechende Medium eintritt. Würde es möglich sein, auf das Glas eine absorptionsfreie Schicht aufzutragen, deren Brechungsindex von dem der Luft auf den des Glases (von 1 auf 1,5) stetig zunimmt, so wäre der Reflexionsverlust Null. Die Herstellung einer derartigen Schicht ist technisch wohl kaum möglich.

Schon eine dicke Schicht mit niedrigerer Brechzahl auf einer reflektierenden Oberfläche setzt bereits die Reflexion herab. Mit dünnen Schichten ist jedoch eine stärkere Entspiegelung zu erreichen. Hier spielt die Interferenz eine wesentliche Rolle, indem nämlich das an den Grenzflächen der dünnen Schicht reflektierte Licht interferiert, wodurch die Reflexion vernichtet wird. Die dünne Hilfsschicht muß die optische Dicke $\frac{\lambda}{4}$ oder ein ungerades Vielfaches davon haben, und ihr Brechungsindex muß gleichzeitig gleich \sqrt{n} sein, wenn n die Brechzahl des Glases ist. Die Beziehung für die Schichtdicke wird von SMAKULA (6) als Phasenbedingung und für den günstigsten Brechungsindex als Amplitudenbedingung bezeichnet. Wenn man die Phasenbedingung nicht einhält, kann die Reflexion nur unvollkommen vermindert werden, außer man macht die Schicht ungleichförmig, so daß ihre Brechzahl sich fortlaufend von der des Glases auf die der Luft ändert. Eine solche Ungleichförmigkeit ist, wie G. BAUER (2) nachgewiesen hat, bei den von ihm aufgedampften Schichten auch tatsächlich aufgetreten. Er fand nämlich, daß die Schichten porös waren. Infolge dieser Porosität ist die Brechzahl niedriger als die des dichten Schichtmaterials, denn mit der Dichteabnahme eines Stoffes nimmt auch seine Brechzahl ab. Voraussetzung für die Gültigkeit dieses physikalischen Gesetzes ist in unserem Falle nur, daß die Poren klein gegenüber der Wellenlänge des Lichtes sind. Hierdurch erklärt sich auch die bei E. LEITZ festgestellte Erscheinung, daß selbst auf Flußspat aufgedampfte Schichten von Flußspat die Spiegelung erheblich vermindern. Nach G. BAUER ist die Schicht nicht gleichmäßig porös, sondern ihre Dichte nimmt vielmehr von innen nach außen ab. Das heißt also, daß die Porengröße in der gleichen Richtung zunimmt. Er bestimmte sogar den „Inhomogenitätsgradienten“ seiner Schichten. Durch Vergleich der Brechzahl des dichten Schichtmaterials mit der Brechzahl der Schicht kann die Porosität bestimmt werden. BAUER nimmt ein „schuppenförmiges“ Gefüge der Schichten an.

Zur Untersuchung des Feingefüges reflexmindernder Schichten ist das Elektronenmikroskop gut geeignet, was M. v. ARDENNE (1) durch seine Aufnahmen gezeigt hat. Auch SMAKULA (6, 7) hat durch das Elektronenbeugungsbild der Hilfsschicht nachgewiesen, daß die Schicht kristallin ist. Ein von H. RUSKA aufgenommenes Beugungsbild einer Kalziumfluoridschicht zeigt scharfe Ringe, wodurch der kristalline Charakter bewiesen ist. Die Hilfsschicht setzt sich also aus Kristallteilchen zusammen. Der mittlere Durchmesser dieser Kristallteilchen beträgt nach M. v. ARDENNE bei Lithiumfluorid etwa 10 bis 20 m μ , ist also sehr klein gegenüber der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes. Lichtoptisch sieht eine solche Schicht

gefügelos aus. Aus dem Elektronenbilde guter reflexmindernder Aufdampfschichten schließt M. v. ARDENNE, daß die Lagerungsdichte der kristallinen Teilchen (Substanzfüllfaktor) nahe der Unterlage größer ist als in dem von der Unterlage abgekehrten Teil der Schicht. Hierdurch wird die BAUERsche Vorstellung einer Zunahme des Brechungsindex mit Annäherung an die Glasschicht bestätigt. Die Amplitudenbedingung ist übrigens für optisches Glas nur durch poröses Gefüge der Hilfschicht zu erfüllen, da keine durchsichtigen Stoffe bekannt sind, deren Brechzahl im Bereich der Lichtwellen bei porenfreiem Aufbau gleich der Quadratwurzel aus der Brechzahl von optischem Glas wäre.

Die zur Auslöschung erforderlichen Schichtdicken liegen in der Größenordnung von $100\text{ m}\mu$. Fallen die Strahlen mit stärkerer Neigung ein, so nimmt die Reflexion zu, und die Schichtdicke muß größer werden. Bei Objektiven großer Lichtstärke dürfte es sich nach M. v. ARDENNE daher empfehlen, die Linsen mit zunehmendem Abstand von der optischen Achse stärker zu belegen. Für die Belegung können verschiedene Stoffe genommen werden, z. B. Kryolith, das als Mineral gefunden wird und fast chemisch reines Natriumaluminiumfluorid (Na_3AlF_6) ist. Es schmilzt sehr leicht und hat die Brechzahl $n = 1,339$. Auch synthetisch hergestelltes Kryolith kann verwendet werden. Da das Licht, das während der Aufdampfung der Haut von der Linse reflektiert wird, mit zunehmender Dicke ständig seine Farbe ändert, so kann man den Vorgang prüfend verfolgen und im richtigen Augenblick abbrechen.

Diese auf das Glas aufgedampften dünnen Schichten wirken also umgekehrt wie die reflexverstärkenden Schichten aus Silber und Quecksilber, die für das Verspiegeln erzeugt werden. Im Gegensatz zu diesen Verspiegelungsschichten bezeichnet man die für die Auflichtobjektive verwendeten dünnen Schichten als „Entspiegelungsschichten“ und die Vergütung als „Entspiegelung“.

Schon an einer planparallelen Glasplatte setzt nun ein Entspiegelungsbelag auch das Streulicht gegenüber der unbelegten Platte etwas herab. Er vergütet also die Glasoberfläche nicht nur in bezug auf die Entspiegelung, sondern auch in bezug auf die Politur. Von P. H. KECK (1946, 3) sind dann aber auch die Streulichtbeträge an normalen und an entspiegelten Photoobjektiven gemessen worden. Ein normales Sonnar $\tau = 1,5$, $f = 5\text{ cm}$ ergibt 2,1%, ein entspiegeltes Sonnar nur 0,45% Streulicht. Auch an Mikroskopobjektiven hat er die Streulichtverringerung durch Entspiegelung gemessen und kurvenmäßig dargestellt. Aus den Kurven sind die Unterschiede zwischen einem normalen und einem entspiegelten Achromat deutlich zu erkennen.

Alles in allem ergibt sich durch die Entspiegelung eine erhebliche Verbesserung der Auflichtobjektive. Diese Vergütung wirkt sich in jedem Falle aus. Sie bewirkt zunächst eine Entschleierung des mikroskopischen Bildes, dann aber auch eine Verstärkung der Helligkeit und eine bessere Bildauflösung. Diese bessere Auflösung des Bildes wird einmal dadurch erzielt, daß keine Gefügeeinheiten mehr durch die Verschleierung unendlich oder unerkennbar bleiben. Zweitens aber vor allem dadurch, daß es bei einem schleierfreien Bilde ohne weiteres möglich ist, die Apertur- und Halbblende weitgehend zu öffnen. Da durch Zuziehen der Aperturblende und Halbblende zur Reflexverringerung die Objektivapertur und mithin die Bildauflösung verringert wird, so ist man im Allgemeinen bestrebt, diese Blenden so wenig wie möglich zu schließen. Die entspiegelten Objektive befreien von dem Zwang zur kleinen Blende und zur Beeinträchtigung der Auflösung.

Diese wichtigen Tatsachen seien genauer erläutert. Es gibt zwei Gründe, aus denen man im durchfallenden Licht die Aperturblende bis zu einem gewissen Grade zuzieht. Einmal soll dadurch die Schärfentiefe bei dickeren Präparaten erhöht werden. Als Schärfentiefe bezeichnet man den Tiefenbereich, den ein Objektiv mit einer für das Auge oder für die photographische Aufnahme hinreichenden Schärfe abzubilden vermag. Die Schärfentiefe ist abhängig von der numerischen Apertur des Objektivs. Schärfen-

tiefe und Apertur stehen im umgekehrten Verhältnis zueinander, das heißt, große Apertur ergibt kleine Schärfentiefe, kleine Apertur große Schärfentiefe. Ist einem also an großer Schärfentiefe gelegen, so muß man stark abblenden; man vermindert jedoch dadurch die Auflösung. Ist einem umgekehrt weniger an der Schärfentiefe und mehr an der Auflösung einer mittleren Stelle des Gesichtsfeldes gelegen, so muß man die Aperturblende möglichst weit öffnen. Schwache Objektive, die eine geringe Apertur haben, haben auch eine große Schärfentiefe und kleines axiales Auflösungsvermögen, starke Objektive mit großer Apertur haben eine geringe Schärfentiefe und großes axiales Auflösungsvermögen. Je geringer das axiale Auflösungsvermögen wird, um so geringer ist auch das seitliche und umgekehrt. Ein gutes Mikrophoto soll nun sowohl eine gute Auflösung als auch eine genügende Schärfentiefe zeigen. Infolgedessen müssen beide Werte so abgestimmt werden, daß ein bestmöglicher Mittelwert entsteht, was einmal schon durch die Wahl des Objektivs, zum andern aber durch das Einstellen der Irisblende erreicht werden muß. Kommt es unbedingt auf die beste Auflösung an, so muß man auf das Zuziehen der Aperturblende verzichten und gegebenenfalls Überstrahlungen in Kauf nehmen. Zieht man andererseits die Blende zu stark zu, so gehen zahlreiche Feinheiten verloren, und außerdem treten von einer bestimmten Öffnungsverkleinerung ab störende Beugungsinterferenzen auf, die das Bild fälschen.

Zweitens erreicht man aber durch die Aperturblende noch eine andere Verbesserung des Mikrobildes. Macht man die Beleuchtungsapertur gerade so groß wie die Objektivapertur, so daß man nach Herausnehmen des Okulars beim Einblick in den Tubus die ganze Hinterblende des Objektivs gleichmäßig mit Licht erfüllt sieht, so werden bei dieser vollen Beleuchtungsapertur nur diejenigen Objekteinheiten gut sichtbar, die Absorptionsunterschiede aufweisen. Diese Einzelheiten werden aber bei voller Beleuchtungsapertur am besten abgebildet und haben für das dann sichtbare Gefüge das bestmögliche Auflösungsvermögen. Nun gibt es aber in fast jedem Präparat auch Gefügeeinheiten, die nicht durch Absorptionsunterschiede, sondern nur durch geringe Lichtbrechungsunterschiede gegenüber der Umgebung verschieden sind. Um auch diese Gefügeeinheiten sichtbar zu machen, schließt man die Aperturirisblende allmählich. Dadurch treten immer mehr die vorher gegenüber der Umgebung wenig unterschiedlichen Gefügeeinheiten sichtbar hervor und ergänzen und vervollkommen das zuvor gesehene reine Absorptionsbild. Das Bild wird also dadurch inhaltsreicher. Die Auflösung des reinen Absorptionsbildes wird jedoch, wie erwähnt, durch die Abblendung schlechter, nur die Tiefenschärfe wächst. Für die Einzelheiten, die lediglich durch Lichtbrechungsunterschiede sichtbar gemacht werden, bleibt auch beim Zuziehen der Aperturblende das der vollen Beleuchtungsapertur entsprechende Auflösungsvermögen erhalten. Diese Überlegungen gelten nach M. BEREK (4) in erster Linie für die Untersuchung durchsichtiger Präparate im durchfallenden Licht. Bei der Betrachtung opaker ebener Präparate (Anschliffe) im auffallenden Licht liegen die Verhältnisse etwas anders. Bei gut plangeschliffenen Anschliffen spielt die Verbesserung der Tiefenschärfe keine Rolle, da nur eine Ebene vorliegt. Das Gefügebild ist vielfach nur ein Absorptionsbild und wird relativ seltener als im durchfallenden Licht durch Gefügeeinheiten ergänzt, die auf der Sichtbarmachung für Lichtbrechungsunterschiede beruhen. Daher bleibt im wesentlichen der Nachteil der Verminderung der Auflösung bestehen. Das Zuziehen der Aperturblende bietet also in den erwähnten Punkten nur geringe Vorteile und ist vielmehr bei der Untersuchung von Anschliffen in dieser Hinsicht im allgemeinen nachteilig.

Wenn trotzdem nicht nur die Aperturirisblende, sondern auch die Zentralblende oder die Halbblende eingeschaltet werden, so nur deshalb, um die Überstrahlungen und die Reflexe einigermaßen einzuschränken. Dies ist der Hauptgrund, weshalb man in der Anschliffmikroskopie bei Benutzung des Planglases nicht ohne Blenden auskommt. Durch die Abblendung verliert man immer an Auflösungsvermögen. Durch die Objektiv

entspiegelung werden die Reflexe und Überstrahlungen weitgehend eingeschränkt, und man ist infolgedessen nicht mehr gezwungen, die Aperturblenden so stark zuzuziehen. Die Halbblende kann dann jedenfalls ganz ausgeschaltet und nur auf Sonderfälle beschränkt bleiben, während man die Aperturblende, je nachdem, nur wenig oder gar nicht zuzuziehen braucht. Da man dadurch nicht nur ein helleres, sondern auch ein besser aufgelöstes Bild erhält, so ist es praktisch dasselbe, als ob man mit einem Objektiv höherer Apertur arbeitet. In dieser unbestreitbaren Tatsache liegt der Hauptvorteil der Entspiegelung der Auflichtobjektive.

Die Entspiegelung der Auflichtobjektive wirkt sich um so mehr aus, je schwächer reflektierend ein Anschliff ist (8), da bei schwach spiegelnden Stoffen die Lichtschleier besonders stark zur Geltung kommen. Zu den sehr schwach reflektierenden Stoffen gehören beispielsweise die Kohlen. Für die Untersuchung von Kohlenanschliffen sind entspiegelte Objektive von großem Vorteil. Das gilt besonders für die niedrig inkohlten und daher schwach reflektierenden Steinkohlen (Gasflammkohlen und Flammkohlen) und die Braunkohlen, sofern man, wie das ratsam ist, die mikroskopische Untersuchung mit dem verspiegelten Planglas und mit Ölimmersion durchführt. Ganz außerordentlich viel klarer und kontrastreicher aber werden die Mikrobilder von Braunkohlenanschliffen. Der Unterschied gegenüber gewöhnlichen Objektiven ist so groß, daß man sagen kann, die Auflichtmikroskopie der Braunkohlen ist durch die entspiegelten Objektive im Zusammenhang mit dem belegten Planglas überhaupt erst einwandfrei möglich geworden. Die Steinkohlenmikroskopie ist jedoch nur ein Anwendungsbeispiel. Es ist sicher, daß sich noch zahlreiche andere opake Stoffe finden werden, deren Untersuchung mit entspiegelten Auflichtobjektiven in hohem Maße verbessert werden wird.

Summary

When microscopically investigating objects with surfaces of small reflecting quality by means of bright field illumination by incident light, the reflexes of the lenses prove very disturbing. The microscope objectives have a number of glass air surfaces reflecting a part of the light. These disturbing reflexes diminish very considerably by covering the glass with thin layers of cryoth (Na_2AlF_6). As a good microscope with illumination by incident light has about 18 glass air surfaces, the prevention of reflexes becomes very effective. The result is first of all a greater distinction of the microscopic picture and beyond it, the increase of brightness and a strong resolution of the picture also. Because the influence of a "light veil" is extremely high with weakly reflecting substances the result of covering with non-reflecting layers is especially favourable when examining such reflecting surfaces. The main advantage of the prevention of reflexes when using incident light objectives is the fact that with a clearer and more distinct microscopic picture it is not necessary to close the aperture diaphragm so much as would otherwise be necessary for the prevention of indistinctness; by this it is possible to work to a certain extent with an objective of higher aperture. The non-reflecting, incident light objectives are of great advantage, e. g. for the microscopy polished coal surfaces.

Literatur

1. *Ardenne M. v.*, Über eine elektronenmikroskopische Untersuchung der Struktur reflektierender Schichten und über die Benennung solcher Schichten. *Z. angew. Photogr.* **3** (1941), I: 13—16. — 2. *Bauer G.*, Absolutwerte der optischen Absorptionskonstanten von Alkalihalogenidkristallen. *Ann. Physik* **5** (1934): 434—464. — 3. *Keck P. H.*, Streulichtmessungen an optischen Grenzflächen. *Optik* **1** (1946), 2 I: 144—162; 3 II: 169—187. — 4. *Rinne F.* und *Berek M.*, Anleitung zu optischen Untersuchungen mit dem Polarisationsmikroskop. Jänecke, Leipzig 1934. — 5. *Rosenthal G.*, Die reflexvermindernden Schichten auf Glas. Ein Übersichtsbericht. *Mitt. Leitz-Werke* **63**, Sonderheft (1941): 73 bis 82. — 6. *Smakula A.*, Über die Erhöhung der Lichtstärke optischer Geräte. *Z. Instrumentenkunde* **60** (1940): 33. — 7. Derselbe, Über die Reflexionsminderung an Grenzflächen zwischen durchsichtigen Körpern. *Glastechn. Ber.* **19** (1941), 12: 377—386. — 8. *Stach E.*, Vervollkommnungen der Kohlen-Auflichtmikroskopie. *Glückauf* **85** (1949) 7/8: 117—122. — 9. *Strong J.*, On a method of decreasing the reflection from nonmetallic substances. *J. Opt. Soc. Amer.* **26** (1936): 73—74. — 10. *Taylor H. D.*, The adjustment and testing of telescope objectives. T. Cock, York, England, 1896.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mikroskopie - Zentralblatt für Mikroskopische Forschung und Methodik](#)

Jahr/Year: 1950

Band/Volume: [5](#)

Autor(en)/Author(s): Stach Erich

Artikel/Article: [Die Entspiegelung der Auflichtobjektive. 225-229](#)