Andreas Buder und Stefan Wülfert

Herstellung und Auswertung von Dünnschliffen im Rahmen kunsttechnologischer Untersuchungen

Polarisationsmikroskopische Bilder von Dünnschliffen gehören zu den wenigen auch von Laien als faszinierend oder wenigstens schön empfundenen Resultaten materialanalytischer Anstrengungen. Ein Grund dafür mag die Kombination leuchtender Interferenzfarben mit den geometrischen Relikten von Kristallsymmetrie sein. Daß die schönen Bilder gleichzeitig analytisch wertvolle Aussagen über das dünngeschliffene Material portieren, macht sie geradezu unwiderstehlich.

In Petrographie und Geologie, zwei Disziplinen, die sich auf den ersten Blick eher mit grauer Materie befassen, kann die polarisationsmikroskopische Auswertung von Gesteinsdünnschliffen schon auf eine Tradition von mindestens 150 Jahren zurückblicken und hat sich zu einem breit abgestützten Arbeitsstandard entwickelt. Henry Clifton Sorby hat die Dünnschliffmikroskopie nachweislich seit 1849 betrieben und 1886 den Wert der Methode so zusammengefaßt[1].

»*Die Untersuchung von Bruchflächen im Auflicht lehrt uns nur vergleichsweise wenig über die Struktur von Gesteinen und Mineralen. Polierte Anschliffe zeigen schon viel mehr, aber fast alle wichtigen Beobachtungen verdanken wir der Untersuchung von Dünnschliffen im Durchlicht.*«[2]

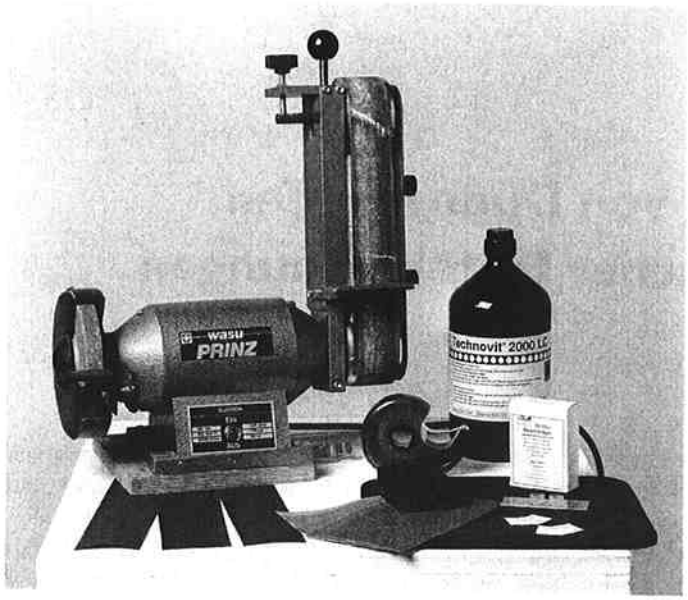
Während die Übertragung des von Sorby propagierten Verfahrens auf Stein und Putzproben aus Baudenkmälern sowie auf keramische Materialien, Gläser, Knochen, etc. auf der Hand liegt und praktiziert wird, kommen Dünnschliff-Untersuchungen an Mikroproben aus Gemälden, textilen Objekten, Skulpturen, Möbeln und Objekten auf Papier weniger häufig vor.[3] Dies mag einerseits mit der Empfindlichkeit solcher Proben gegenüber den flüssigen Schleif- und Polierhilfsmitteln der konventionellen Dünnschliffherstellung zusammenhängen. Andererseits haben sich Anschliffe und Dünnschnitte zur Untersuchung von Schichtenfolgen und weiteren Strukturmerkmalen von weicheren Proben gut etabliert[4]. Dies läßt sich nicht nur an Hand zahlreicher aktueller Publikationen belegen, sondern auch durch einen kurzen Blick auf die Entwicklung kunsttechnologischer Untersuchungsverfahren. Z.B. veröffentlichte W. Ostwald schon 1905 einen Artikel, der u.a. die Mikrotomie an Malschichtproben, d.h. die Herstellung von Dünnschnitten zum Thema hat[5]. Fünf Jahre später beschrieb Raehlmann verschiedene mikroskopische Techniken zur Beurteilung von Proben aus Kulturgut, so z.B. auch das Einklemmen kleiner Probensplitter zwischen Glaswürfelchen zur Untersuchung der frischen Bruchfläche[6]. Es folgten Arbeiten von A.P. Laurie[7] (Mikrotomie) und R. Gettens[8] (Mikrotomie und Anschliffherstellung). Die 1956 datierende Publikation J. Plesters kann auch noch aus heutiger Sicht als beeindruckende Zusammenstellung des Wissensstandes bezüglich der Herstellung und analytischen Auswertung von Dünnschnitten und Anschliffen von Farbproben gelten[9]. 1959 führten Thissen und Mitarbeiter ein Verfahren zur Herstellung von Dünnschliffen auf Kunststoffplättchen ein.[10] Untersuchungsmethoden an Anschliffen sind bis in die neueste Zeit Thema der kunsttechnologisch orientierten Literatur geblieben. Die erweiterten Möglichkeiten der Fluoreszenzmikroskopie an Anschliffen von Proben aus Kunstwerken beschrieb kürzlich N. Bäschlin[11]. Mehr oder weniger neue Lösungsansätze zu bekannten Problemen mit Polyester-Eingießmaterialien wurden von M. Derrick und Mitarbeitern präsentiert, F. Waentig publizierte eine vergleichende Übersicht über Gießharzsysteme und berichtete zusammen mit A. Krupa von Tests mit einem neuen, lichthärtenden Kunstharz[12].

Problemstellung

Das Verständnis der materiellen Struktur von Kunstobjekten ist eine der kaum verzichtbaren Voraussetzungen für deren qualifizierte Beurteilung und wirksame Konservierung.

Die Mikroskopie an Anschliffen, Dünnschnitten und Dünnschliffen dient der Erfassung relevanter Strukturmerkmale an Proben, die dem Kunstwerk nach eingehender, zerstörungsfreier Untersuchung durch Konservatoren-Restauratoren entnommen werden können. Die an den Proben gewonnenen Informationen werden auf das Gesamtobjekt übertragen, um zusätzliche strukturelle und materialbezogene Eigenschaften zu erschließen.

In vielen Fällen erlauben Untersuchungen an Proben eine relativ schnelle und kostengünstige Beantwortung kunsttechnologisch und konservatorisch relevanter Fragestellungen[13]. Insofern Probennahmen vor dem Hintergrund eines möglichst umfassenden Wissensstandes bezüglich des Objektes kontrolliert und professionell durchgeführt werden, sich auf das notwendige Ausmaß beschränken und die Proben eine optimale Auswertung erfahren, läßt sich der Eingriff ins Objekt aus dem Zugewinn an Information und Arbeitsqualität in vielen Fällen



1 Material zur Herstellung von Dünnschliffen.

rechtfertigen. So kommt denn auch kaum eine moderne Publikation, die sich mit der technologischen Untersuchung eines mehrschichtig strukturierten Kunstobjektes befaßt, ohne die Auswertung von Anschliffen aus.

Diese Arbeit soll zeigen, daß es dank neuartiger Arbeitshilfsmittel und -techniken möglich geworden ist, ohne maschinelle Hilfe und ohne den Einsatz von flüssigen Schleif- oder Polierhilfsmitteln auch Dünnschliffe solcher Proben herzustellen und dies bei einem Aufwand, der denjenigen zur konventionellen Herstellung eines Anschliffes nur um einige Minuten übersteigt. Dünnschliffe können demnach ohne Spezialausrüstung und besondere Vorkehrungen, sozusagen ›von Hand‹ und in ausgezeichneter Qualität hergestellt werden. Abb. 1 zeigt das von uns verwendete Arbeitsmaterial. Die einfache Bandschleifmaschine hat sich als nützlich erwiesen, ist aber verzichtbar. Das praktische Vorgehen wird im folgenden Abschnitt detailliert beschrieben.

In diesem Zusammenhang schien uns außerdem die Untersuchung folgender Fragen relevant:

- Lassen sich bei der durchlichtmikroskopischen Charakterisierung von Dünnschliffen Informationen gewinnen, die sich der Anschliff-Mikroskopie entziehen? Wenn ja, welche sind dies?
- Lassen sich bei der Untersuchung von Dünnschliffen zusätzliche Methoden anwenden, die am Anschliff suboptimal arbeiten oder versagen?

Verfahren

Üblicherweise werden analytische Verfahren in sechs Phasen unterteilt, nämlich Probendefinition, Probennahme, Probenvorbereitung (Präparation), Messung, Auswertung und Präsentation der analytischen Information.

Da sich die Probenentnahme aus dem Objekt für Dünn- und Anschliffherstellung nicht unterscheidet, verzichten wir hier auf eine Diskussion dieses wichtigen Arbeitsschrittes[14]. Dagegen erfährt die Probenpräparation eine ausführliche Beschreibung. Die hier angewandten qualitativen und quantitativen mikroskopischen Meßverfahren (vgl. Abb.12) sind lange bekannt, weit verbreitet, in der Literatur gut dokumentiert[15] und bedürfen ebenfalls nicht der Erörterung an dieser Stelle. Dagegen illustrieren einige Beispiele Möglichkeiten zur mikroskopischen Auswertung der Präparate.

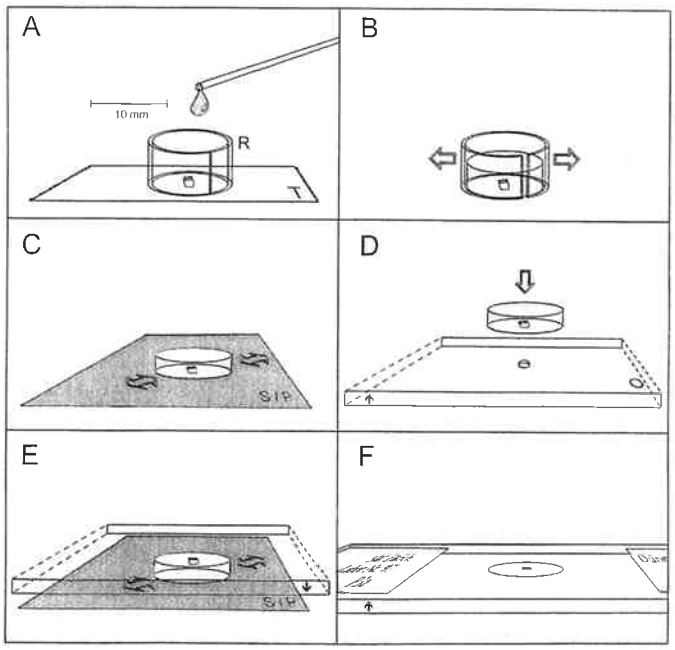
Probenpräparation

Dünnschliffe entstehen im Allgemeinen aus einem polierten Anschliff. Damit liegt in dessen Herstellung ein erhebliches Potential an Arbeitsökonomie. Aus der Vielzahl möglicher Vorgehensweisen scheint uns das im Folgenden beschriebene Verfahren besonders effizient zu sein.

Herstellung des Anschliffes

Die in Abb. 2A übergroß dargestellte mehrschichtige Probe wird unter stereomikroskopischer Kontrolle in der gewünschten Position auf einen Abschnitt gespannten, transparenten Selbstklebebandes (T) fixiert[16]. Dabei ist es sinnvoll, das Klebeband mit der beschichteten Seite nach oben leicht zu spannen, z.B. zwischen zwei Objektträgern oder durch einen Aluminiumring. Sobald die gewünschte Position der Probe auf der Klebefläche erreicht ist, wird um die Probe herum ein Kunststoffring (R) aufgesetzt[17] und ebenfalls auf dem Klebestreifen fixiert. Ring und Klebeband bilden zusammen die Gießform. Damit der fertige Gießling nach der Härtung leicht aus der

2 Wichtige Arbeitsschritte bei der Herstellung von Dünnschliffen. Erläuterungen im Haupttext.



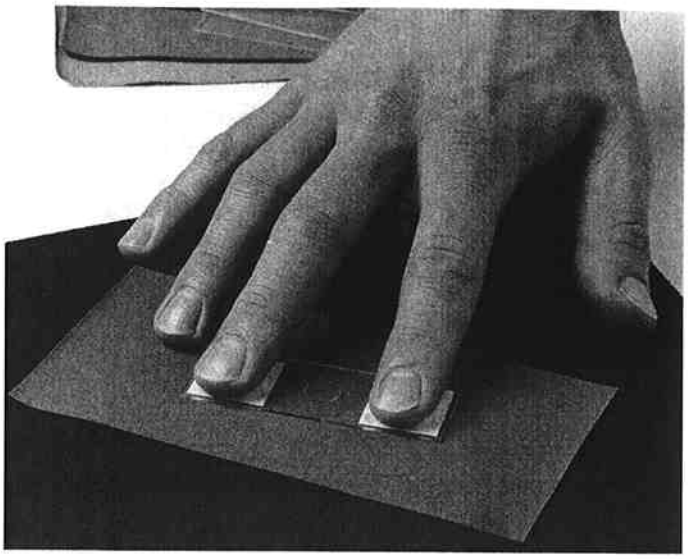
Form zu lösen ist, ist es von Vorteil, den Ring *vor* der Verwendung vertikal aufzuschneiden und die Form beim Eingießen nicht ganz zu füllen (vgl. Abb. 2B). Als Gießharz hat sich »Technovit®2000LC«, ein lichthärtendes Einkomponenten-Kunstharz auf Acrylatbasis bestens bewährt[18]. Die hier geschilderte Methode läßt sich mit kleinen Modifikationen auch für andere Gießharze anpassen. Allerdings zeigten sich während der Arbeit mit Technovit®2000LC im Vergleich mit dem bisher im Labor verwendeten Polyesterharz zahlreiche Vor- und nur wenige Nachteile[19]. Die ersten Tropfen des Harzes werden mit einem Glasstab vorsichtig beidseitig neben der Probe positioniert, so daß diese beim anschließenden Eingießen nicht umfällt. Soll das Gießharz eine poröse Probe festigen, so kann es auf 30°C erwärmt und damit weniger viskos gemacht werden. Außerdem läßt sich die zuweilen erwünschte Penetration des Harzes in die Probe unter einer Vakuumglocke bis hin zur völligen Durchtränkung steuern. Störende Luftblasen, die sich beim Eingießen manchmal unten neben der Probe bilden, lassen sich leicht entfernen: Das flüssige Präparat wird angehoben und die Luftblase mit einer feinen Nadel durch das durchsichtige Klebeband hindurch von unten punktiert. Die Luft wird in der Folge vom Harz durch das kleine Loch im Klebeband herausgedrückt, ohne daß es deshalb auslaufen könnte.

Steht die Probe in der korrekten Position und luftblasenfrei im Harz, so kann dieses durch Einwirkung von Blaulicht gehärtet werden. Die Herstellerfirma bietet zu diesem Zweck ein kleines Belichtungsgerät an[20]. Es hat sich aber herausgestellt, daß die allseitige Blaubelichtung der Probe ohne Weiteres auch mit einem Selbstbau erfolgen kann. Jedenfalls ist es wichtig, daß die Gießform von allen Seiten blaues Licht zum Gießling durchläßt. Nach einigen Minuten ist der Gießling schleiffertig ausgehärtet, ohne daß im Inneren ungewöhnlich hohe Temperaturen zu verzeichnen gewesen wären. Genauere Beobachtungen während des Aushärtens eines ca. 0,5 g schweren Technovit®2000LC-Gießlings sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Nach der Härtung wird das Klebeband abgezogen und der (wiederverwendbare) Ring gelöst (Abb. 2B). Eine beim Härten auftretende, dünne, klebrige Inhibitionsschicht an der Oberfläche des Gießlings läßt sich durch vorsichtiges Abreiben mit einem nur wenig ethanolfeuchten Tuch leicht eliminieren[21]. Der Gießling wird nun trocken, mit eher langsamen, kurzhubigen Bewegungen und unter laufender stereomikroskopischer Zwischenkontrolle angeschliffen (vgl. Abb. 2C)[22]. Da sich die Probe aufgrund der vorher beschriebenen Eingießtechnik ganz unten befindet, muß nicht viel Material abgearbeitet werden. So ist es möglich, sich auf Schleifpapier der Körnung 200 zu beschränken. Nach der sorgfältigen trockenen Reinigung des Schleiflings wird die geschliffene Fläche auf weicher Unterlage trocken poliert. Dies ist bei entsprechend vorsichtiger Handhabung durch spezielle Polierleinen[23] zu bewerkstelligen, bei denen die entstehende Reibungswärme durch einen Spezialkunststoff, in den die Polierkörnchen flexibel eingelassen sind, abgeführt wird. Die polierte Fläche des so entstandenen Anschliffes läßt sich in gewohnter Weise auswerten und ggf. mikrophotographisch dokumentieren.

Tabelle 1:
Aushärtung eines 0,5 g schweren Gießlings im Technotray-Belichtungsgerät. Die Temperaturmessung erfolgte über ein eingegossenes Thermocouple-Element, dessen Masse mit einer Probe einigermaßen vergleichbar schien. Die Raumtemperatur betrug 22°C.

Belichtungszeit	Temperatur im Inneren des Gießlings in °C	Farbe des Gießlings	Konsistenz des Gießlings
30 Sekunden	25	gelb	flüssig
40 Sekunden	27	gelb	geliert
2 Minuten	44	gelb	schnittfest
4 Minuten	38	hellgelb	elastisch erhärtet
6 Minuten	34	hellgelb	fest
15 Minuten	33	farblos	fest
20 Minuten	33	farblos	schleiffest



3 Handhaltung beim Dünnschleifen und Polieren.

Dünnschliffherstellung

Mit der sauberen, polierten Fläche wird der Schleifling nun mit einem sehr kleinen Tropfen des Gießharzes mittig auf einen sauberen Objektträger (O) aufgekittet (Abb. 2D). Dabei sollte darauf geachtet werden, daß die angeschliffene Schichtung parallel zu den längeren Kanten des Objektträgers verläuft, die als bevorzugte Richtung für die spätere Endpolitur des Dünnschliffes anzusehen ist. Ein leichter Andruck läßt die Harzschicht zwischen Schleifling und Glas so dünn wie möglich werden. Nachdem rückseitig kontrolliert ist, ob keine Luftblasen eingeschlossen sind (was korrigiert werden müßte), läßt sich die Verbindung zwischen Schleifling und Objektträger durch kurze Lichthärtung (10 Minuten) dauerhaft machen[24].

Das so gewonnene Präparat wird gewendet und durch Schleifen abgearbeitet (Abb. 2E). U.U. kann eine einfache Bandschleifmaschine helfen, den überschüssigen Gießharzanteil schnell und effizient zu entfernen. Wichtig ist, daß das Präparat dabei weder überhitzt, noch keilförmig abgeschliffen

wird. Dagegen hilft z.B. mehrmaliges Drehen des Objektträgers. Spätestens wenn der zur dünnen Schicht abgearbeitete Schleifling beim Überstreichen mit dem Finger[25] am Übergang Glas-Gießharzfläche kaum noch als ›Kante‹ ertastet werden kann, wird das Präparat trocken gereinigt und auf Polierleinen poliert. Die in Abb. 3 gezeigte Handhaltung hat sich dabei als optimal erwiesen. Durch die verhältnismäßig große Fläche des Objektträgers wird es kaum zu keilförmigen Dünnschliffen kommen.

Das Dünnschleifen und -polieren läßt sich am Durchlichtmikroskop gut an Hand der zunehmenden Transparenz des Dünnschliffes verfolgen. Als Sollstärke des Schliffes können etwa 30 µm gelten. Dieser Wert ist als Norm bei der polarisationsmikroskopischen Bestimmung anorganischer Bestandteile etabliert. Zur Kontrolle bieten sich die bei Normstärke grauen Interferenzfarben des Quarzes an, die sich durch das Polarisationsmikroskop bei gekreuzten Polarisatoren beobachten lassen. Ist zu vermuten, daß die Probe selbst keinen Quarz enthält, so kann das Gießharz mit Quarzpulver gemischt werden. Sollen dünne Bindemittelschichten fluoreszenzmikroskopisch kontrastiert werden, wird ein etwas stärkerer Schliff vorteilhaft sein. Erfordern die Objektive des zur Auswertung eingesetzten Mikroskopes die Verwendung eines Deckgläschens, dann läßt sich dieses entweder reversibel mit Isooktan oder dauerhaft mit einem Tropfen Gießharz auflegen. Dabei sollte die Schicht zwischen Dünnschliffoberfläche und Deckgläschen möglichst dünn, aber vollständig und luftblasenfrei mit dem Medium angefüllt sein. Auf den Objektträger anzubringende Etiketten bieten ausreichend Platz für die Identifikation der Probe und die Dokumentation der Präparation (mindestens Datum, verwendetes Gießharz, dessen Brechungsindex[26] und Name der Institution oder des Präparators resp. der Präparatorin) sowie für weitere relevante Daten (Abb. 2F).

Über die Alterungsbeständigkeit von Dünnschliffen in Technovit®2000LC können aufgrund fehlender Erfahrungen keine endgültigen Aussagen gemacht werden. An Hand erster Resultate von Belichtungsversuchen (sog. ›Lichtalterung‹) an dünnen Schichten und an Gießlingen zeigt sich, daß Technovit eher stabiler als andere Gießharze und Einschlußmittel zu sein scheint.

Mikroskopische Auswertung über Polarisations-, Fluoreszenz- und FTIR-Mikroskopie

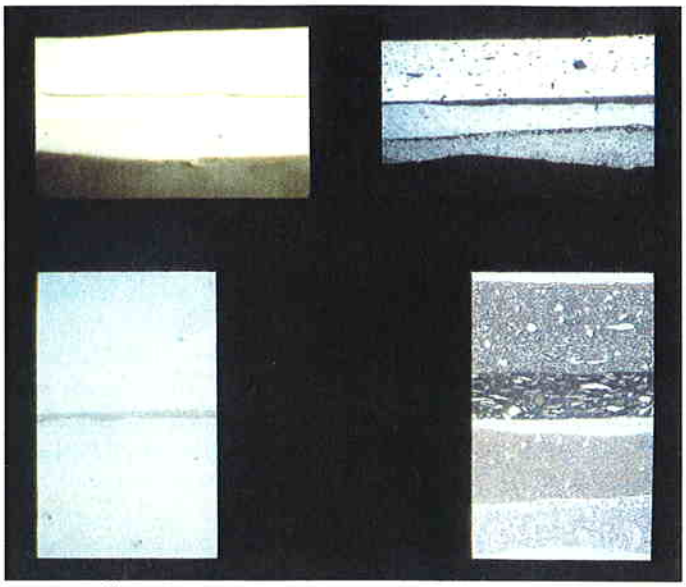
Nichtmetallische Werkstoffe werden in dünnen Schichten transparent und sind somit den vielfältigen Techniken der Durchlichtmikroskopie zugänglich. Die Erfahrung zeigt, daß sich die meisten mikroskopischen Techniken im Durchlicht-Strahlengang wesentlich effizienter einsetzen lassen.[27] Damit hätten Dünnschliffe (und Dünnschnitte) gegenüber Anschliffen den Vorteil potentiell besserer Auswertbarkeit. Die im Folgenden beschriebenen Versuche an Proben aus verschiedenen Anwendungsbereichen konnten dies bestätigen. Die zur Verfügung stehenden mikroskopischen Techniken umfaßten neben der ›normalen‹ Durchlichtmikroskopie auch Dunkelfeld-Auflichtmikroskopie, Polarisationsmikroskopie[28], Fluoreszenzmikroskopie[29] in Durch-und Auflicht sowie FTIR-Mikroskopie[30] (vgl. Abb. 12).

Stratigraphie

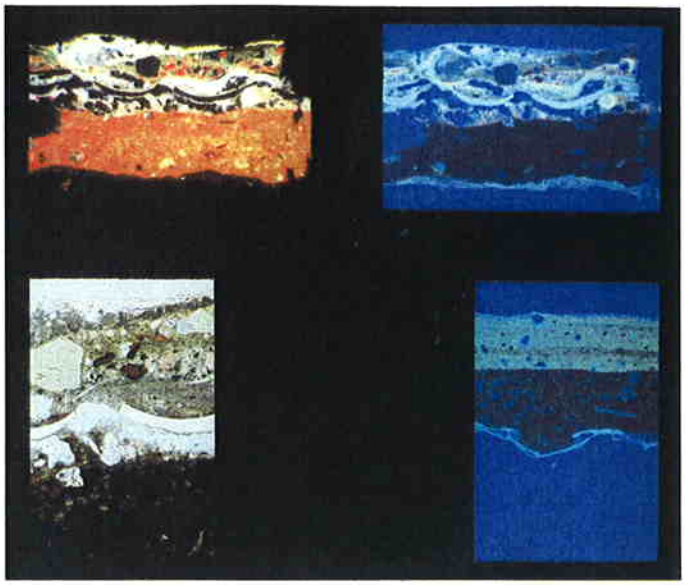
Die Erfassung aller Schichten eines Objektes kann probenfrei in vielen Fällen nicht ausreichend präzise und sicher bewerkstelligt werden. Dagegen lassen sich aus Anschliffen häufig genauere Angaben zu Bildträgern und ihren Vorbehandlungen, zu Grundierungen, Mal- und Zwischenschichten sowie zu Überzügen und Übermalungen erschließen. Wirklich gute Differenzierbarkeit von Schichten wird dabei oft erst durch eine Kombination von Dunkelfeld- und Fluoreszenz-Auflichtmikroskopie erreicht. Ein entsprechend ausgerüstetes Mikroskop ist vergleichsweise teuer. Eine andere Möglichkeit zur Differenzierung von Schichten bieten Anfärbungen am Anschliff oder Dünnschnitt. Allerdings verändern die Färbe- und Spüllösungen das Präparat. Im Rahmen der Materialanalytik an Farbschichten sind Anfärbungen teilweise immerhin als Hinweise auf das Vorhandensein bestimmter Bindemittel zu verstehen. Sollen dagegen analytisch zuverlässigere Verfahren auf Anschliffe angewendet werden, wie z.B. die polarisationsmikroskopische Pigmentbestimmung oder die FTIR-mikroskopische Bindemittelanalyse, so müssen *Sekundärproben* aus einer bestimmten Schicht des Anschliffes entnommen werden. Zwar können dann relativ präzise Aussagen über die Materialzusammensetzung der mikroskopisch differenzierbaren Schichten getroffen werden, aber dieser Erkenntnisgewinn wird probenzerstörend erreicht.

Unsere Versuche haben gezeigt, daß sich durch die Weiterverarbeitung des Anschliffes zu einem Dünnschliff in vielen Fällen die Möglichkeit ergibt, eine verbesserte durchlichtmikroskopische Differenzierbarkeit von Schichten mit nichtprobenzerstörender, zuverlässiger Analytik zu kombinieren (vgl. folgende Abschnitte).

Abb. 4 zeigt die Folge mehrerer Überfassungen eines Möbelstückes aus der zweiten Hälfte des 18. Jhs. (Louis XVI.). An den links im Auflicht[31] gezeigten Anschliffen lassen sich drei weiß pigmentierte Schichten sowie eine oder zwei kaum oder nicht pigmentierte Zwischenschichten differenzieren. Die rechts gezeigten Mikrographien sind an Dünnschliffen derselben Probe entstanden. Oben rechts wurde der Dünnschliff auf schwarzem Hintergrund liegend im Auflicht photographiert. Aufgrund des erheblichen Kontrastgewinnes sind nun fünf weiße Schichten erkennbar. Die im Anschliff homogen weiß scheinende oberste »Schicht« besteht aus deren drei, nämlich einer sehr dünnen obersten und darunter zwei annähernd gleich starken Schichten. Unten rechts ist derselbe Dünnschliff in größerem Abbildungsmaßstab (vgl. Bildlegende) und im Durchlicht dargestellt. Einige der im Auflicht eindeutig weißen Schichten wirken am durchstrahlten Dünnschliff bräunlich bis fast schwarz. Dieses aus der Durchlichtmikroskopie an Streupräparaten[32] bekannte Phänomen ist typisch für sehr feine, hochbrechende Pigmente, wie Zink- oder Titanweiß



4 Weiße Überfassungen eines Möbels.
Oben links: Anschliff, Dunkelfeld Auflicht (0,8 mm)*.
Oben rechts: Dünnschliff auf schwarzem Hintergrund, Dunkelfeld Auflicht (0,8 mm)*.
Unten links: Anschliff, Dunkelfeld Auflicht (0,28mm)*.
Unten rechts: Dünnschliff, Durchlicht (0,35mm)*.
* Die Zahl in Klammer gibt jeweils die Ausdehnung der längeren Kante der Mikrographie in natura an.



5 Kontrastierung an Dünnschliffen.
Oben links: Dünnschliff auf schwarzem Hintergrund, Dunkelfeld Auflicht (0,8 mm)*.
Oben rechts: Dünnschliff, UV-Fluoreszenz im Durchlicht (0,8 mm)*.
Unten links: Dünnschliff, Durchlicht (0,35mm)*.
Unten rechts: Dünnschliff, UV-Fluoreszenz im Durchlicht (0,8 mm)*.
* Die Zahl in Klammer gibt jeweils die Ausdehnung der längeren Kante der Mikrographie in natura an.

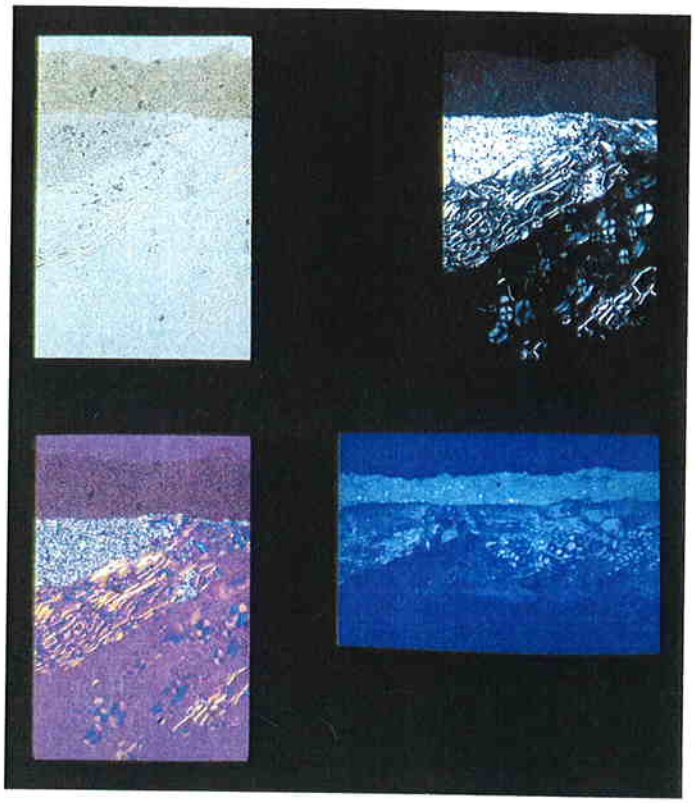
und eine Folge der Lichtstreuung an feinen Teilchen[33] (vgl. auch Abb. 6).

Abb. 5 demonstriert in den Mikrographien oben links, oben rechts und unten rechts, wie sich am gleichen Dünnschliff durch verschiedene mikroskopische Techniken unterschiedliche Informationen gewinnen lassen. Die aus einem Staffeleibild (unbek., 17. Jh., auf textilem Träger) entnommene Probe zeigt im Auflicht vor dunklem Hintergrund (oben links) die rote Grundierung (Eisenoxide/hydroxide) sowie mehrere darauf folgende, stark gestörte Schichten. Über deren Pigmentierung gibt der im Bereich der Grundierung vergleichsweise schlechter lesbare (weil relativ dicke) Schliff (unten links) im Durchlicht Aufschluß. U.a. sind hochbrechende (dunkel, kontrastreich wirkende) und tiefbrechende (heller) rote Pigmente zu erkennen (Zinnober und roter Farblack). Der gleiche Dünnschliff ist oben rechts in Durchlicht-Fluoreszenz gezeigt. Der in Schüsseln aufstehende, wahrscheinlich originale Firnis fällt durch deutliche Fluoreszenz auf. Weitere fluoreszierende Bindemittelanreicherungen sind u.a. am obersten (heutiger Firnis) und untersten Rand des Schliffes (Vorbereitung der Leinwand) zu erkennen. Die simultane Lesbarkeit verschieden stark fluoreszierender Schichten ist ein möglicher Vorteil von Dünnschliffen geeigneter Dicke gegenüber Anschliffen. Bei letzteren kommen zuweilen Überstrahlungen vor[34], die besonders auch die photographische Dokumentation erschweren. Abb. 5 unten rechts zeigt eine Probe aus einem modernen Wandbild (Oscar Lüthy, 1935, Baumwolle auf Gipsgrund maroufliert) in Durchlicht-Fluoreszenz. Gleichzeitig und ohne Überstrahlungen sind die Fluoreszenz der Vorbehandlung (proteinischer Leim) des Malgewebes und diejenige des in den Farbschichten in verschiedener Konzentration verwendeten Zinkweißes dokumentiert.

Zusammenfassend können folgende Vorteile des Dünnschliffes gegenüber dem Anschliff bei der Beurteilung der Probenstratigraphie genannt werden:

- Die durchlichtmikroskopische Differenzierbarkeit einzelner Schichten ist im Dünnschliff oft soweit verbessert, daß meist auf die aufwendige Instrumentation zur Fluoreszenzkontrastierung verzichtet werden kann.
- Als effiziente und kostengünstige Durchlicht-Kontrastierungsmöglichkeit kann am Dünnschliff die Betrachtung zwischen gekreuzten Polarisatoren herangezogen werden. Dabei ergeben sich fast immer zusätzlich analytische Hinweise auf die Pigmentierung von Farbschichten und auf Trägermaterialien (anorganische Malgründe und Naturfasern).
- Erstaunlicherweise sind Dünnschliffe auf einem kontraststeigernden, farbigen (meist schwarzen) Hintergrund sehr gut in Auflicht zu mikroskopieren.
- Die Fluoreszenzkontrastierung ist an Dünnschliffen sowohl im Durch- als auch im Auflicht möglich, Überstrahlungen sind weniger häufig als bei Anschliffen.

Unter möglichen Nachteilen sind der zusätzliche Arbeitsaufwand von ca. 10-15 Minuten pro Probe zu nennen sowie die Möglichkeit, daß bei zu dünn geratenen Schliffen einzelne Schichten zumindest teilweise verloren gehen können. Aus diesem Grund sollten die am Anschliff ablesbaren Informationen noch vor und auch während der Dünnschliffherstellung unbedingt dokumentiert werden.

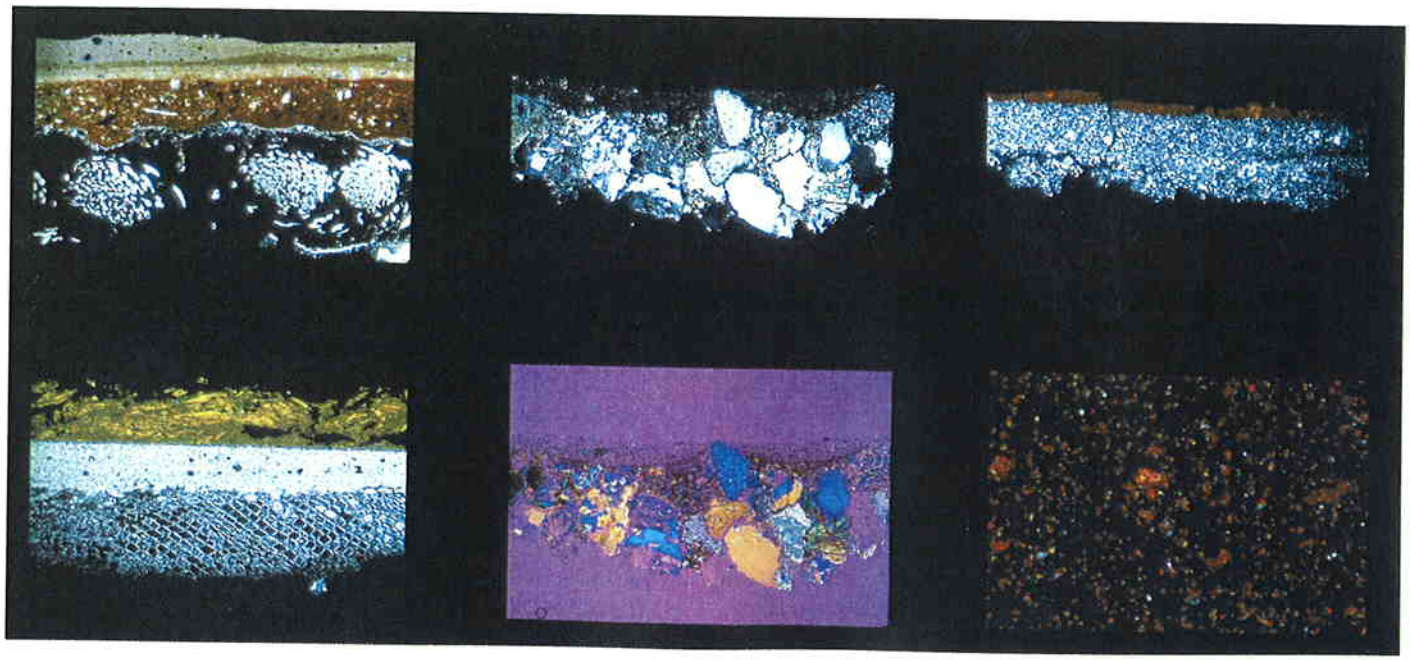


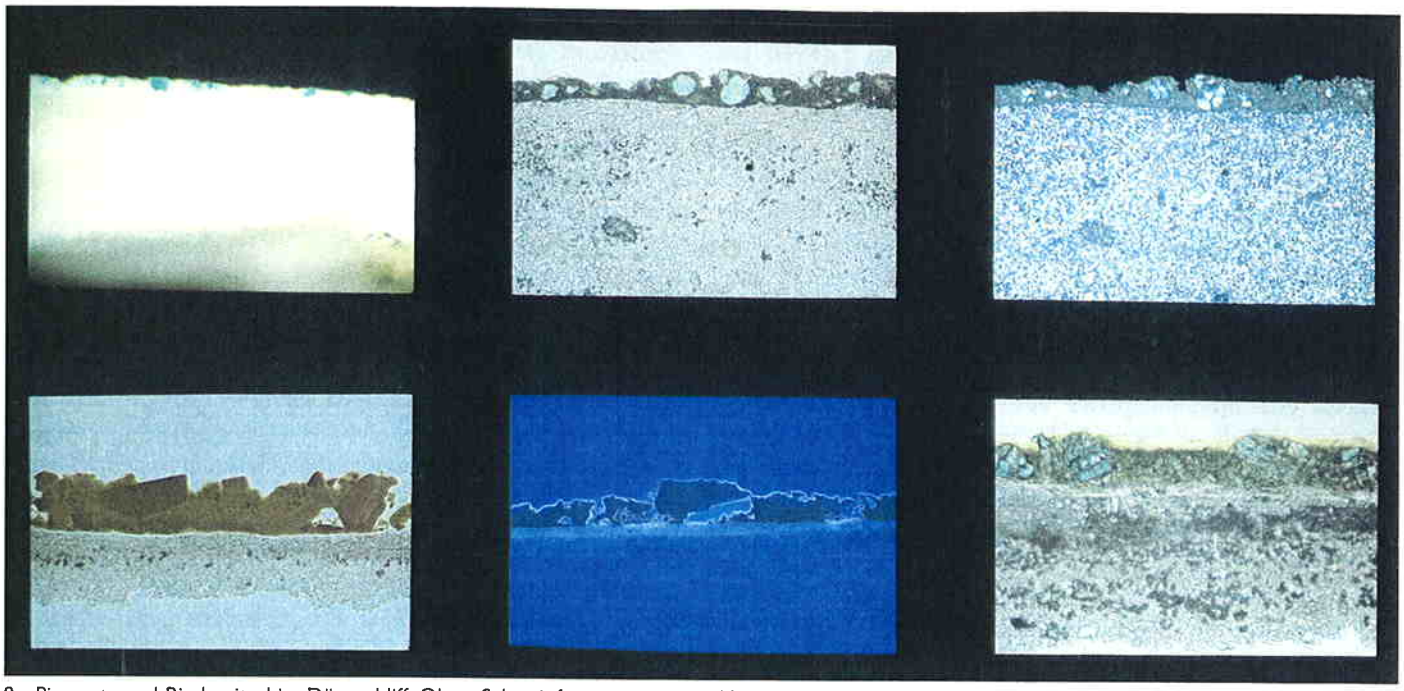
6 Zinkweiss im Dünnschliff.
Oben links: Dünnschliff, Durchlicht (0,35mm)*.
Oben rechts: Dünnschliff, Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren (0,35mm)*.
Unten links: Dünnschliff, Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren/ Kompensator I λ (0,35mm)*.
Unten rechts: Dünnschliff, UV-Fluoreszenz im Durchlicht (0,8 mm)*.
* Die Zahl in Klammer gibt jeweils die Ausdehnung der längeren Kante der Mikrographie in natura an.

Pigmente und Faserstoffe

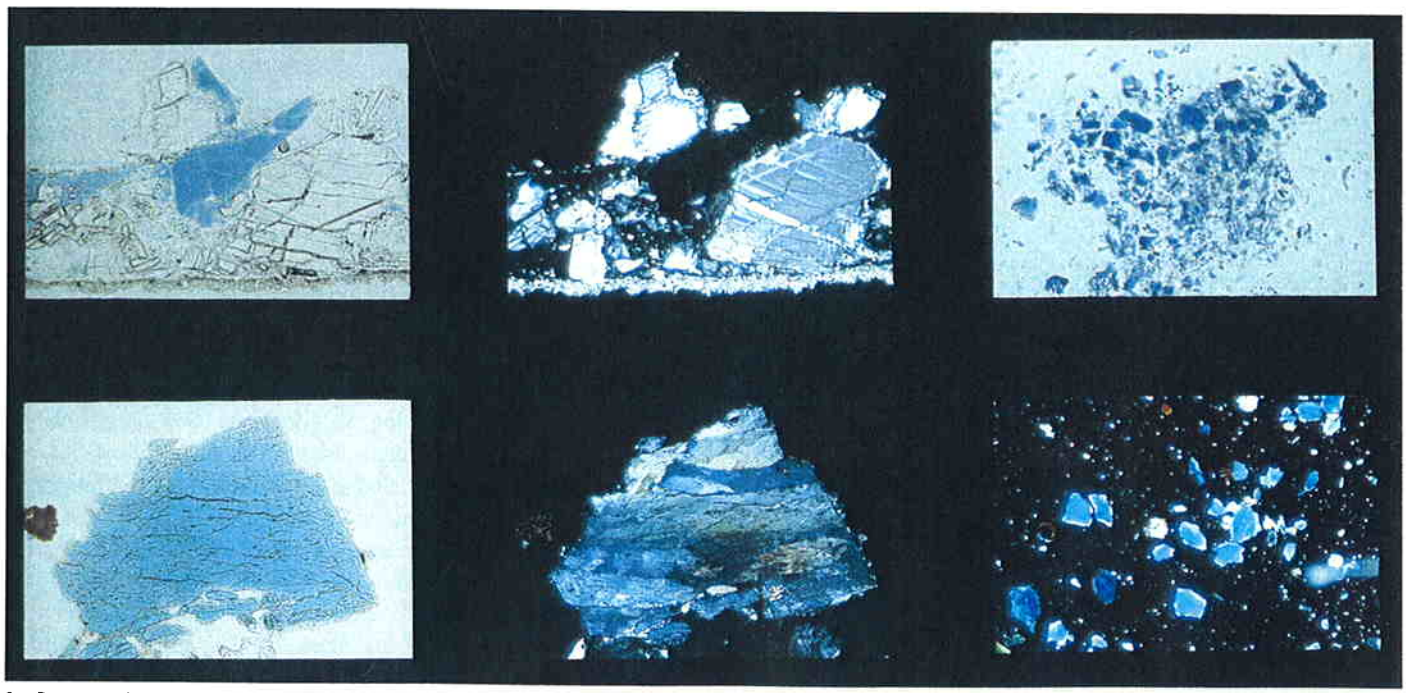
In Hinsicht auf das Verhältnis von Aufwand zu analytischer Erfolgsrate steht die Polarisationsmikroskopie an Pigmenten[35] und Fasern[36] ganz an der Spitze einer Reihe von Methoden. Im Bereich der Analytik an Kunstwerken wird sie durch weitere Verfahren ergänzt, aber nicht ersetzt. Die übliche Vorgehensweise[37] bei der qualifizierten polarisationsmikroskopischen Pigmentuntersuchung beginnt in der Regel mit der Entnahme einiger Nanogramm Material direkt aus der interessierenden Schicht am zu untersuchenden Objekt. Alternativ kann eine Sekundärbeprobung aus einem dem Objekt entnommenen Schichtenpaket erfolgen. Aus der Sekundärprobe wird ein Pigment- oder Faserstreupräparat hergestellt und untersucht[38]. Pigmentproben werden dazu vom Bindemittel abgereichert und in ein geeignetes Medium eingeschlossen. Der Vorteil der Durchlicht-Polarisationsmikroskopie an Streupräparaten liegt in der Erkennbarkeit der großen Mehrzahl der kunsttechnologisch relevanten Pigmente und Fasern, ihr gewichtigster Nachteil ist, daß diese nicht in ihrer objektgegebenen Umgebung beobachtet werden können. Pigmente können auflichtmikroskopisch, von ganz wenigen Ausnahmen abgesehen, weder in der Malschicht noch am Anschliff mit ausreichender Sicherheit erkannt werden. Ähnliches gilt für Fasermaterialien.

7 Polarisationsmikroskopie an Pigmenten und Trägern im Dünnschliff.
Oben links: Dünnschliff, Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren (1,4mm)*.
Oben Mitte: Dünnschliff, Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren (1,4mm)*.
Oben rechts: Dünnschliff, Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren (1,4mm)*.
Unten links: Dünnschliff, Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren (1,4mm)*.
Unten Mitte: Dünnschliff, Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren/ Kompensator I λ (1,4mm)*.
Unten rechts: Streupräparat, Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren (0,35mm)*.
* Die Zahl in Klammer gibt jeweils die Ausdehnung der längeren Kante der Mikrographie in natura an.





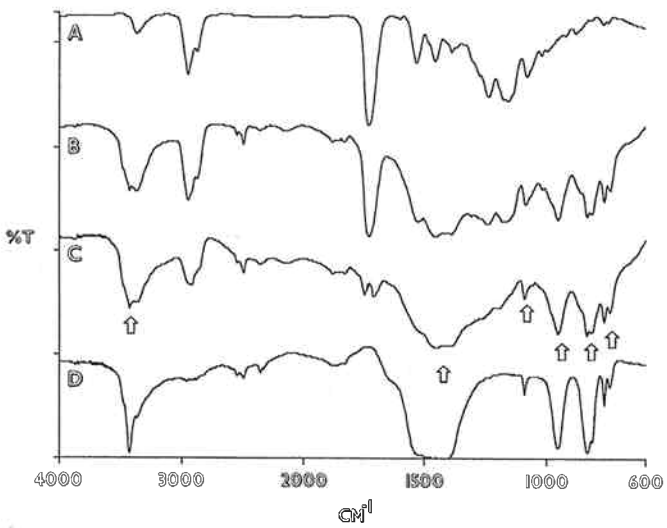
8 Pigmente und Bindemittel im Dünnschliff. Oben: Schweinfurter Grün/Bleiweiss in Leinöl. Unten Asphalt resp. Malachit in Leinöl.
Oben links: Anschliff, Dunkelfeld Auflicht (0,8mm)*.
Oben Mitte: Dünnschliff, Durchlicht (0,35mm)*.
Oben rechts: Dünnschliff, Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren (0,35mm)*.
Unten links: Dünnschliff, Durchlicht (1,4mm)*.
Unten Mitte: Dünnschliff, UV-Fluoreszenz im Durchlicht (0,8mm)*.
Unten rechts: Dünnschliff, Durchlicht (0,8mm)*.
* Die Zahl in Klammer gibt jeweils die Ausdehnung der längeren Kante der Mikrographie in natura an.



9 Pigmente Lapislazuli (oben) und Azurit (unten) im Dünnschliff und Streupräparat.
Oben links: Dünnschliff, Durchlicht (0,35mm)*.
Oben Mitte: Dünnschliff, Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren (0,35mm)*.
Oben rechts: Streupräparat, Durchlicht (0,35mm)*.
Unten links: Dünnschliff, Durchlicht (0,14mm)*.
Unten Mitte: Dünnschliff, Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren (0,14mm)*.
Unten rechts: Streupräparat, Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren (0,35mm)*.
* Die Zahl in Klammer gibt jeweils die Ausdehnung der längeren Kante der Mikrographie in natura an.

Wie die folgenden Beispiele verdeutlichen, lassen sich bei Dünnschliffuntersuchungen analytisch wertvolle Kriterien aus der Durchlichtbetrachtung am Streupräparat mit der für Anschliffe typischen probenstrukturerhaltenden Präparationstechnik kombinieren.

Abb. 6 zeigt oben links durchlichtmikroskopische Aufnahmen einer Probe aus einem Versuchsaufstrich. Eine Preßspanplatte ist kalkkreidegrundiert und mit einem leinölgebundenen Zinkweißanstrich versehen worden. Die Mikrographie links entstand im linear polarisierten Durchlicht und entspricht einem ›normalen‹ durchlichtmikroskopischen Bild. Trägermaterial, Grundierung und Farbschicht sind durch Kontrastunterschiede und morphologische Merkmale gut differenzierbar. Die typische, durch Streuung bedingte gelbbraune Farbe des Zinkweißes fällt sofort auf. An den größeren Calcitkristallen der Kalkkreide läßt sich beim Drehen des Polarisators ein markanter Kontrastwechsel[39] beobachten. Zwischen gekreuzten Polarisatoren[40] läßt sich (Abb. 6 oben rechts) die starke Doppelbrechung des Calcites gut erkennen, während Zinkweiß den typischen und diagnostisch genauso wertvollen ›Nebeleffekt‹ zeigt. Zwischen den Holzbruchstücken der Spanplatte sind gerundete Gebilde zu erkennen, die eine besondere Form von Auslöschung, nämlich das sog. Sphäritenkreuz aufweisen. Wird am Polarisationsmikroskop der Kompensator 1 λeingeschoben (Abb. 6 unten links), so zeigt sich, daß ein positives Kreuz vorliegt, wie es für Stärkekörner oder für Sphäruliten aus den Kristalliten einiger synthetischer Polymere typisch ist (im Gegensatz zum negativen Kreuz der Hoftüpfel in Hölzern). Um die typisch grüngelbliche Fluoreszenz des Zinkweißes (Abb. 6 unten rechts) zu erzeugen, ist übrigens kein Fluoreszenzmikroskop mit Quecksilberdampfleuchte notwendig, sondern es genügt Blauanregung durch eine 100W Halogenlampe und geeignete Filterung[41].



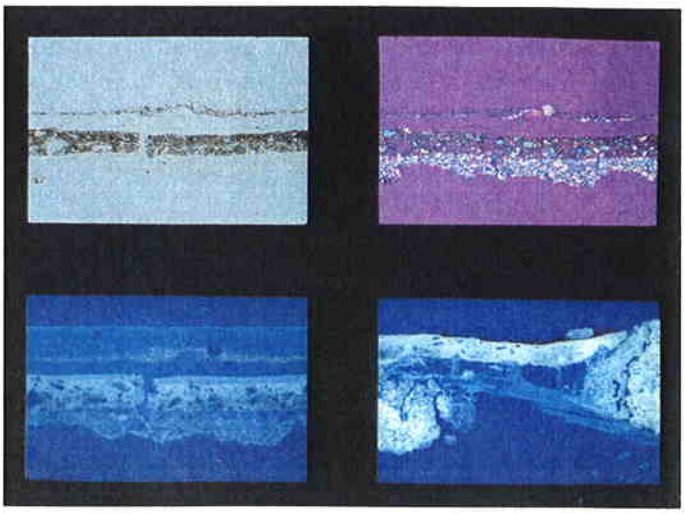
10 FTIR-Mikrospektrometrie am Dünnschliff.
A: FTIR-Spektrum von Technovit®2000LC.
B: FTIR-Spektrum eines Azuritkornes in einem Technovit®2000LC Dünnschliff.
C: Spektrum A rechnerisch aus Spektrum B eliminiert. Es resultiert das Spektrum von Azurit. Die Pfeile markieren die diagnostisch wichtigen Signale.
D: FTIR-Spektrum von reinem Azurit als Vergleichsspektrum zu C.

Abb. 7 zeigt eine Reihe von Mikrographien, die ausnahmslos zwischen gekreuzten Polarisatoren aufgenommen wurden: Der oben links abgebildete Dünnschliff ist bereits in der Fluoreszenzaufnahme aus Abb. 5 (unten rechts) beschrieben. Die gut erkennbaren Faserquerschnitte des textilen Trägers sind typisch für unmercerisierte Baumwollgewebe. Die rote Farbe der Grundierung kann auf Eisenoxid/hydroxid-Pigmente zurückgeführt werden. Die folgenden Schichten sind zu fein pigmentiert (u.a. Lithopone und Zinkweiß), um klare Aussagen aus dem Dünnschliff abzuleiten. Der Dünnschliff unten links zeigt eine Auripigment-Farbschicht auf kalkkreidegrundiertem Holzträger. Hier sind alle drei erwähnten Materialien unmittelbar zu erkennen. Die Auripigmentplättchen weisen die typischen Spaltflächen und ein anormales Interferenzfarbenspektrum auf, in welchem ein helles Braun das Rot der ersten Ordnung ersetzt. Die Plättchen haben sich parallel zur Oberfläche ausgerichtet. Während die starke Doppelbrechung bei vergleichsweise geringem Brechungsindex sowie der Reliefwechsel beim Drehen der Kristalle der hellen Schicht Kalkkreide anzeigen, können die unten sichtbaren Pflanzenzellen aufgrund morphologischer Argumente einem Holzträger zugewiesen werden.

Auf beiden mittleren Mikrographien von Abb. 7 ist der Dünnschliff einer Sandsteinprobe von der Oberfläche eines Bausteines aus dem 19. Jh. zu sehen, oben zwischen gekreuzten Polarisatoren, unten zusätzlich mit Lambdaplatte. Gut differenzierbar sind zwei wichtige Schichten: Unten sog. Berner Sandstein[42], ein eher schlecht calcitisch gebundenes und an Bauwerken schnell abwitterndes Material, oben eine Schicht aus einem früheren Festigungsversuch. Gerade bei Steinen scheint es uns bedenkenswert, daß die üblichen nassen Präparationsmethoden petrographisch orientierter Untersuchungen nicht ohne Weiteres auf Proben aus Steindenkmälern übertragen werden sollten, insofern ein Interesse an möglicherweise vorhandenen Oberflächenbehandlungen, Fassungsresten, etc. besteht. Dies, weil solche oft nur in Resten vorhandene Bearbeitungsspuren durch die Naßpräparation aus der Probe ausgewaschen werden können.

Schließlich ist am Schliff oben rechts eine Zinnoberschicht auf Kalkkreide-Grundierung zu erkennen. Die typischen, gegenüber Eisenoxidpigmenten erkennbar ›feurigeren‹ Interferenzfarben des Zinnobers sind die gleichen, die am Streupräparat (unten rechts) auftreten.

Abb. 8 oben rechts zeigt den Anschliff einer Probe, die Schweinfurter Grün enthält. Dieses zählt zu den wenigen Pigmenten, die am Anschliff einigermaßen sicher zu erkennen sind. Trotzdem beweist der oben in der Mitte abgebildete Dünnschliff der gleichen Probe, daß die runden, vermeintlich scheibenförmigen Pigmentteilchen hier viel deutlicher als solche erkennbar sind. Und nur am Dünnschliff läßt sich eine auf rein morphologischen Kriterien beruhende und somit hypothetische Zuweisung ›Schweinfurter Grün‹ polarisationsoptisch bestätigen, indem der typische, polykristalline Aspekt deutlich



11 Bindemittelschichten und Bindemittelverteilung im Dünnschliff
Oben links: Dünnschliff, Durchlicht (0,35mm)*.
Oben rechts: Dünnschliff, Durchlicht, gekreuzte Polarisatoren/ Kompensator I λ (0,35mm)*.
Unten links: Dünnschliff, UV-Fluoreszenz im Durchlicht (0,28mm)*.
Unten rechts: Dünnschliff, UV-Fluoreszenz im Durchlicht (0,8 mm)*.
* Die Zahl in Klammer gibt jeweils die Ausdehnung der längeren Kante der Mikrographie in natura an.

wird, die zugehörigen Interferenzfarben und die typischen Auslöschungsphänomene auftreten. Die in Abb. 8 unten gezeigten Dünnschliffe von Asphalt- und Malachit-Malschichten werden im Abschnitt über Bindemittel genauer diskutiert.

Die oberen drei Mikrographien in Abb. 9 zeigen das als Blaupigment bekannte Mineralgemenge Lapislazuli (natürlicher Ultramarin), die unteren zeigen Azurit. Am im normalen Durchlicht aufgenommenen Dünnschliff links oben läßt sich ablesen, daß Lapislazuli nicht nur aus den tiefbrechenden, isotropen mehr oder weniger intensiv blau gefärbten Lasuritkristalliten mit eher muscheligem Bruch besteht, sondern in Kristallaggregaten, die weitere Mineralien wie Calcit oder Pyrit enthalten. Im Transmissions- und Reflexionsspektrum des Lasurits kommen zusätzlich zu den blauen auch rote Spektralanteile vor. Bei entsprechender Filterung[43] des Beleuchtungslichtes wirkt Lasurit daher intensiv rot. Zwischen gekreuzten Polarisatoren (Abb. 9 oben Mitte) bestätigt sich die Zuweisung, indem der isotrope Lasurit dunkel bleibt, während die hohen Interferenzfarben des Calcites die hellen Bildpartien dominieren. Schließlich ist oben rechts zum Vergleich ein Streupräparat von Lapislazuli dargestellt.

Werden Dünnschliffe mit einem Deckglas geschützt, so können auch starke bis stärkste Objektive verwendet werden. So entstanden die Mikrographien von Abb. 9 unten links (im polarisierten Durchlicht) und unten Mitte (zwischen gekreuzten Polarisatoren) durch ein 100:1 abbildendes Ölimmersionsobjektiv. Wieder zum Vergleich ist unten rechts ein Azurit Streupräparat zwischen gekreuzten Polarisatoren gezeigt. Azuritkristalle können im Streupräparat und auch im Dünnschliff (jedoch nicht am Anschliff) ohne Weiteres über ihren ausgeprägten Pleochroismus, die deutliche Spaltbarkeit, das relativ ausgeprägte, beim Drehen wechselnde Relief sowie über die relativ starke Doppelbrechung als solche erkannt werden. Außerdem ist auf den Dünnschliffen ein für natürlichen Azurit typisches Begleitmineral in Form des kleineren, braunroten, optisch isotropen Cupritkristalles zugegen.

An diesem Pigment wurde eine weitere mikroanalytische Methode getestet, indem mit Hilfe eines FTIR-Mikroskopes das Schwingungsspektrum des Azuritkornes im Dünnschliff aufgezeichnet wurde. Dies ist möglich, da sich die dünnen Technovitfilme mit den dünngeschliffenen Proben vorsichtig vom IR-undurchlässigen Glasträger abziehen lassen. In eine feine Lochblende montiert, kann der Film direkt, d.h. ohne weitere Präparationsschritte vermessen werden. Dies, indem (unter visueller Kontrolle durch das Spiegelmikroskopteil des Spektrometers) die Probe unter Beleuchtung mit sichtbarem Licht in den IR-Fokus des Meßstrahles bewegt wird[44]. Abb. 10 zeigt die notwendigen Arbeitsschritte bei der Auswertung eines so registrierten Spektrums: Zuerst wurde in der Nähe eines Loches im Dünnschliff ein FTIR-Spektrum einer möglichst dünnen Schicht des verwendeten Gießharzes (Technovit®2000LC) gemessen (Spektrum A). Die zweite Messung (Spektrum B) an der Stelle des Azuritkristalles zeigt die Überlagerung der Spektren einer dünnen Gießharzschicht (ursprünglich zwischen Azurit und Glasträger) und des dünngeschliffenen Azuritscheibchens. Indem das vorher getrennt registrierte Spektrum A der Gießharzschicht vom Kobinationsspektrum B subtrahiert wird, entsteht Spektrum C. Wie der Vergleich mit einem reinen Azurit-Referenzspektrum (Spektrum D) deutlich macht, zeigt Spektrum C alle diagnostisch wichtigen Signale des Azurites ausreichend deutlich (mit Pfeilen markiert) und ist somit problemlos auszuwerten. Reflexions-FTIR-Spektrometrie an Anschliffen ist zwar ebenfalls möglich, aber nach Erfahrung unseres Labors mit erheblich höherem Aufwand und wesentlich geringerer Erfolgsrate verbunden.

Die an Anschliffen durchführbaren naßchemischen Nachweisreaktionen, wie z.B. die Bildung von Bleiiodid unter Iod/ Iodkaliumlösung[45], lassen sich am Dünnschliff genau so gut durchführen, wie am Anschliff.

Unsere Resultate zur Pigmentuntersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Morphologische Aspekte gröberer Pigmente und typischer Fasern sind durchlichtmikroskopisch am Dünnschliff wesentlich klarer zu erkennen als am Anschliff.
- Aus der Polarisationsmikroskopie an Streupräparaten bekannte kristalloptische, diagnostisch wertvolle Eigenschaften wie Relief, Pleochroismus, Auslöschung und Doppelbrechung können nur am Dünnschliff, nicht aber am Anschliff erfaßt werden.
- Ein Gehalt der Farbschichten an modernen, feinen Pigmenten kann am Dünnschliff wenigstens als solcher erkannt werden (z.B. Zinkweiß in Bleiweiß-Schichten), während er sich der Anschliffmikroskopie völlig entzieht.
- Dünnschliffe können auch unter Verwendung sehr starker Objektive, d.h. bei Sehfeldvergößerungen bis zu 1200 x mikroskopiert werden.
- Die FTIR-Mikrospektrometrie läßt sich am intakten

Dünnschliff viel effizienter einsetzen als an Anschliffen.

- Die Produkte naßchemischer Nachweisreaktionen können am Dünnschliff *in situ* polarisationsmikroskopisch charakterisiert werden, was zu einer höheren Nachweissicherheit führt.

Bindemittel

Die Bindemittelanalytik an Anschliffen stützt sich häufig auf die fluoreszenzmikroskopische Differenzierbarkeit von Bindemittelanreicherungen[46] sowie auf kontrastierende Anfärbereaktionen, denen zuweilen auch ein materialanalytischer Wert zugeschrieben werden kann[47]. Beide Verfahren lassen sich direkt auf Dünnschliffe übertragen. Unsere diesbezüglichen Versuche ergaben, daß Färbungen an Dünnschliffen rationeller durchgeführt werden können und eher differenzierter ausfallen, als bei den entsprechenden Anschliffen[48]. Wie bereits erwähnt, lassen sich bei der Beurteilung von Fluoreszenzen am Dünnschliff durch Kontrolle der Schliffdicke Überstrahlungen besser vermeiden als bei Anschliffen.

Abb. 11 demonstriert einmal mehr die Überlegenheit des Dünnschliffes am Beispiel einer Mikroprobe aus einem Tafelbild (Kreuzigungsszene, unbek., Schweiz um 1480) im Bereich einer Übermalung. Links oben sind im Durchlicht die Grundierungsschicht, die Farbschichten mit einem Riß sowie ein erster Firnis sichtbar, der durch eine feine Schutzschicht abgeschlossen wird. In Kombination mit der unten links gezeigten Fluoreszenzaufnahme läßt sich aussagen, daß die Farbschichten vermutlich nicht identisch gebunden sind und daß der darauf folgende, hell fluoreszierende, also eher ältere Firnis aufgrund der Schmutzschicht über längere Zeit die oberste Schicht darstellte. Einem darauf liegenden Zwischenfirnis folgt eine pigmentierte Schicht (Übermalung) sowie ein Abschlußfirnis, der seinerseits eine Schmutzschicht trägt. Interessanterweise fluoresziert der obere Firnis von der Oberfläche her etwas stärker, möglicherweise aufgrund der dort weiter fortgeschrittenen Oxidation des Bindemittels[49]. Rechts oben ist das polarisationsmikroskopische Bild des gleichen Dünnschliffes zwischen gekreuzten Polarisatoren und unter Verwendung eines Kompensators gezeigt. Wurden eben noch die Bindemittelschichten beurteilt, so kann hier am gleichen Mikroskop die Pigmentierung des Dünnschliffes untersucht werden. Schließlich ist unten rechts ein kleines Fragment aus einem Leinwandgemälde dargestellt. Aus der Durchlicht-Fluoreszenz kann auf die Bindemittelverteilung geschlossen werden. Es ist gut zu erkennen, daß der textile Träger ganz von der Vorleimung umschlossen ist und daß diese die Gewebefäden gut durchtränkt hat. Auch in Abb. 8 (untere Reihe) lassen sich im Dünnschliff interessante Bindemittelphänomene beobachten: Der im sichtbaren Durchlicht betrachtete Aufstrich (links, Asphalt in Leinöl auf Kalkgrundierung) zeigt ein ungewohnt differenziertes Bild dieses Pigmentes. Der gleiche Schliff in Durchlicht-UV-Fluoreszenz (Mitte) zeigt eine eigenartig fluoreszierende Oberflächenschicht. Möglicherweise handelt es sich um eine Wechselwirkung zwischen Pigment und Bindemittel. Schließlich ist unten rechts der Dünnschliff eines weiteren Probeaufstriches (Malachit/Bleiweiß in Leinöl auf Kalkkreide) zu sehen. Ursache für die dunkelgelbe Deckschicht ist nicht etwa ein (tatsächlich nicht vorhandener) Überzug, sondern eine Auftrennung der überfett gebundenen Farbschicht beim Trocknen. Dieses letzte Beispiel mag als Hinweis gelten, daß, obwohl Dünnschliffe sicher differenziertere und genauere Beobachtungen an Schichtstrukturen zulassen, die Interpretationsversuche solcher Beobachtungen aber lediglich als Hypothesen zu sehen sind. Diese sind – bevor sie den Charakter gültiger Schlußfolgerungen annehmen können – durch anderweitige Untersuchungen zu verifizieren oder zu verwerfen.

Bindemittel lassen sich an Dünnschliffen auch FTIR-mikroskopisch erfassen, insofern die entsprechend quergeschliffenen Schichten eine Dicke von mindestens 10 µm aufweisen. Obwohl Technovit®2000LC im IR-Bereich starke Absorptionen aufweist (vgl. Abb. 10A), lassen sich die wichtigsten Bindemittelgruppen (Wachse, Öle, Harze, Proteine, Kohlenhydrate) nachweisen. Die durch die minimale Meßfläche von ca. 15x15 µm gegebene Raumauflösung der FTIR-Mikroskope reicht aber oft nicht aus, um systematische Veränderungen der Bindemittelzusammensetzung z.B. über Schichten oder in der Umgebung bestimmter Pigmentkörner zu erfassen. Damit drängt sich die *in situ*-Messung am Dünnschliff nicht unbedingt auf. Wegen des extrem geringen Materialbedarfs der Methode, wird die Messung an einer professionell aus dem Anschliff entnommenen, z.B. auf eine Diamantzelle präparierten Sekundärprobe also in den meisten Fällen zweckmäßiger sein als die Messung am Dünnschliff.

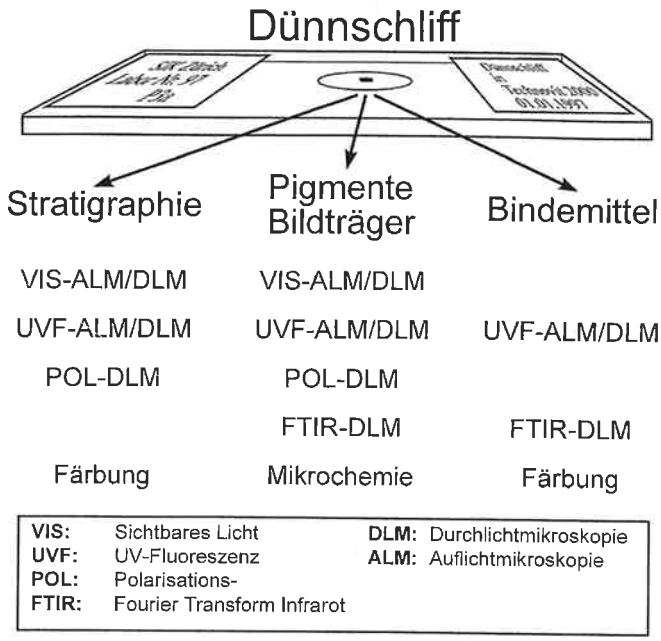
Zusammenfassend läßt sich aus unseren Versuchen zur Erkennung von Bindemitteln und typischen Bindemittelphänomenen aussagen, daß Dünnschliffe hierzu mindestens so geeignet sind wie Anschliffe.

- Die bereits mehrfach erwähnten Kontrastvorteile der Durchlichtmikroskopie kommen auch hier zum Tragen.
- Die etablierten Färbungen können an Dünnschliffen sehr effizient durchgeführt werden und lassen sich eher besser differenzieren als bei Anschliffen.
- Dünnschliffe eignen sich außerdem für FTIR-mikroskopische Untersuchungen an Bindemitteln.

Schlußfolgerungen

Wir konnten im Rahmen dieser Arbeit eine einfache praktikable Methode vorstellen, die die Herstellung von Dünnschliffen bei minimalem Aufwand an Arbeit und Material erlaubt. Obwohl bei der Präparation zugunsten möglichst nur minimaler Veränderung der Proben auf flüssige Schleif- und Polierhilfsmittel ganz verzichtet wurde, kann sich die optische Qualität der so hergestellten Dünnschliffe durchaus mit solchen messen, die unter erheblichem Aufwand an teuren Maschinen (Diamantsäge, Schleif- und Poliermaschine) hergestellt wurden.

Da Anschliffe ein präparativer Zwischenschritt auf dem Weg zum Dünnschliff sind, kann es kaum darum gehen, er-



12 An Dünnschliffen im Rahmen dieser Arbeit erprobte Untersuchungsmethoden.

stere durch letztere zu ersetzen. Vielmehr können die demonstrierten, weiterreichenden Möglichkeiten als Motivation gelten, nach der Auswertung eines Anschliffes dessen Weiterbearbeitung zu einem Dünnschliff zu erwägen.

Bezüglich der mikroskopischen Auswertbarkeit ergaben sich deutliche Verbesserungen gegenüber der traditionellen Mikroskopie an Anschliffen. Abbildung 12 zeigt schematisch die dabei getesteten Methoden.

Es dürfte nur wenige Konservierungsateliers und Laboratorien geben, die sich mit der Untersuchung von Mikroproben aus Kulturgut befassen und trotzdem über kein Durchlicht- oder sogar Polarisationsmikroskop verfügen. Genau dieses Instrument eignet sich für Untersuchungen an Dünnschliffen. Die an Streupräparaten gewonnene, im Rahmen der Faser- oder Pigmentanalytik gewonnene mikroskopische Seherfahrung läßt sich wenigstens teilweise auf die Dünnschliffmikroskopie übertragen. Es ist ein nicht zu unterschätzender Erkenntnisgewinn damit verbunden, Fasern und Pigmente in ihrem objektgebundenen Kontext in einem Dünnschliff beobachten zu können und trotzdem nicht auf die Meßmöglichkeiten der Polarisationsmikroskopie verzichten zu müssen. Unserer Ansicht nach bestätigt sich hier einmal mehr die These Walter McCrones[50], daß dem Polarisationsmikroskop nach dem Stereomikroskop der Rang als zweitwichtigstes apparatives Arbeitshilfsmittel bei der technologischen Untersuchung von Kulturgut zukommt.

Viele Fluoreszenzmikroskope neuerer Bauart sind ausschließlich zur Auflichtbetrachtung für sichtbares Licht und für UV-Fluoreszenz gedacht. Wir konnten an unseren Proben durchgängig feststellen, daß Dünnschliffe ohne Nachteil auch im Fluoreszenz-Auflichtstrahlengang betrachtet werden können. Wenn Dünnschliffe geschickt mit geeigneten Materialien (z.B. farbige Pappen) hinterlegt werden, können zuweilen auch im sichtbaren Auflicht-Dunkelfeld erstaunliche Kontrastierungserfolge gegenüber der konventionellen Auflichtmikroskopie am Anschliff erzielt werden.

Vom Glasträger abgelöste Dünnschliffe in Technovit®2000LC sind außerdem als Präparate für die Durchlicht-FTIR-Mikrospektrometrie geeignet[51].

Natürlich sind zahlreiche weitere Meßverfahren an Dünnschliffen nützlich. Da das verwendete Gießharz nicht ausgast, können Technovit®2000LC Präparate elektronenmikroskopisch charakterisiert werden. Wir planen, u.a. auch Heiztischmethoden[52] an unseren Dünnschliffen zu testen.

Literatur

[Bäschlin 1994] Bäschlin, N., Fluoreszenzmikroskopie - Möglichkeiten und Grenzen dieser Untersuchungsmethode bei der Auswertung von Schichtquerschliffen. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 8 (1994), S. 318-339.

[Baier/Müller-Skjold 1939] Baier, E. und Müller-Skjold, F., Das Polarisationsmikroskop als analytisches Hilfsmittel bei der Lösung maltechnischer Fragen. In: Angewandte Chemie 52 (1939), S. 533-535.

[Becker o.J.] Becker, E., Fluoreszenzmikroskopie - Grundlagen, Instrumente und Anwendungen, Werksschrift Nr. 923036 der Ernst Leitz Wetzlar GmbH (heute LEICA AG), Wetzlar (o.J.).

[Coremans/Thissen 1959] Coremans, P. und Thissen J., L'introduction des lames minces dans l'examen des peintures, IRPA Bulletin 2 (1959), S. 41-46.

[Derrick 1994] Derrick, M.R. et al, Embedding Paint Cross-Section Samples in Polyester Resin: Problems and Solutions. In: Journal of the American Institute for Conservation 33 (1994), S. 227-245.

[Derrick 1995] Derrick, M.R., Infrared Microspectroscopy in the Analysis of Cultural Artifacts. In: Practical Guide to Infrared Microsprectroscopy, H. Humecki (ed.), New York 1995.

[Feller/Bayard 1986] Feller, R.L. und Bayard, M., Terminology and Procedures Used in the Systematic Examination of

Pigment Particles with the Polarizing Microscope. In: Artists' Pigments, Vol. 1, R.L. Feller (ed.), S.285-298, Washington 1986.
[Gay 1970] Gay, M.-C., Essais d'identification et de localisation des liants picturaux par des colorations spécifiques sur coupes minces. In: Annales du Laboratoire de recherche des Musées de France 1 (1970), S. 8-24.
[Gettens 1936] Gettens, R.J., The Cross-Sectioning of Paint Films. In: Technical Studies in the Field of Fine Arts 5 (1936), S. 18-22.
[Gettens 1940] Gettens, R.J., The Use of Methyl Methacrylate in the Preparation of Polished Specimen of Friable Material. In: Technical Studies in the Field of Fine Arts 9 (1940), S. 113-116.
[Hartshorne/Stuart 1970] Hartshorne, N.H. und Stuart, A., Crystals and the Polarising Microscope, 4th ed., London 1970.
[Herzog 1955] Herzog, A., Mikrophotographischer Atlas der technisch wichtigen Pflanzenfasern, Textband, 2. Aufl., Berlin 1955.
[Humphries 1994] Humphries, D.W., Methoden der Dünnschliffherstellung. Stuttgart 1994.
[Johnson/Packard 1971] Johnson, M. und Packard, E., Methods for the Identifcation of Binding Media in Italian Paintings of the Fifteenth and Sixteenth Centuries. In: Studies in Conservation 16 (1971), S. 145-164.
[Jörg 1991] Jörg, F., Präparative und mikroskopische Verfahren in der Materialprüfung. Landsberg 1991.
[Laurie 1914] Laurie, A.P., The Pigments and Mediums of the Old Masters, London 1914.
[Krupa/Waentig 1995] Krupa, A. und Waentig F., Zur Untersuchung von Holzoberflächen mit transparenten Überzügen, Einbettungen mit dem neuen Kunstharz Technovit®2000LC. In: Restauro 101 (1995) S. 244-24.
[Mactaggart 1994] Mactaggart, P. und Mactaggart, A., A Pigment Microscopist's Notebook, 6th ed., Chard 1994.
[Martin 1977] Martin, E., Some Improvements in Techniques of Analysis of Paint Media. In: Studies in Conservation 22 (1977), S. 63-67.
[McCrone 1982] McCrone, W.C., The Microscopical Identification of Artists' Pigments. In: Journal of the International Institute for Conservation - Canadian Group 7 (1982), S. 11-33.
[McCrone 1991] McCrone, W.C., Light Microscopy. In: Microscopy, 2nd ed., Physical Methods in Chemistry, Vol. 4, B.W. Rossiter, J.F. Hamilton (eds), New York 1991.
[McCrone 1994] McCrone, W.C., Polarized Light Microscopy in Conservation – A Personal Perspective. In: Journal of the American Institute for Conservation 33 (1994), S. 101-114.
[MacKenzie/Adams 1995] MacKenzie, W.S. und Adams A.E., Minerale und Gesteine in Dünnschliffen, Stuttgart 1995.
[Ostwald 1905] Ostwald, W., Ikonoskopische Studien. In: Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, Jg. 1905 (1905), S. 167-174.
[Patzelt 1985] Patzelt, W. J., Polarisationsmikroskopie – Grundlagen, Instrumente, Anwendungen, 2. Aufl., Werksschrift Nr. 923021 der Ernst Leitz Wetzlar GmbH (heute LEICA AG), Wetzlar 1985.
[Pichler/Schmitt-Riegraf 1993] Pichler, H. und Schmitt-Riegraf, C., Gesteinsbildende Minerale im Dünnschliff, 2. Aufl., Stuttgart 1993.
[Plesters 1956] Plesters, J., Cross-Sections an Chemical Analysis of Paint Samples. In: Studies in Conservation 2 (1956), S. 110-157.
[Puhan 1994] Puhan, D., Anleitung zur Dünnschliffmikroskopie, Stuttgart 1994.
[Raehlmann 1910] Raehlmann, E., Über die Maltechnik der Alten mit besonderer Berücksichtigung der römisch-pompejanischen Wandmalerei – nebst einer Anleitung zur mikroskopischen Untersuchung der Kunstwerke, Berlin 1910.
[Reedy 1994] Reedy, Ch.L., Thin-Section Petrography of Cultural Materials. In: Journal of the American Institute for Conservation 33 (1994), S. 115-129.
[Rinne/Berek 1973] Rinne F. und Berek M., Anleitung zur allgemeinen Polarisationsmikroskopie der Festkörper im Durchlicht, Stuttgart (1973).
[Rinuy/Gros 1989] Rinuy A. und Gros L., Liants dans les peintures anciennes: méthodes d'identification et étude du vieillissement. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 3 (1989), S.9-27.
[Rosenbusch/Wülfing 1924] Rosenbusch, H. und Wülfing, E.A., Mikroskopische Physiographie der petrographisch wichtigen Mineralien, 5. Aufl., Band I, Erste Hälfte, Stuttgart 1924.
[Rost 1992] Rost, F.W.D., Fluorescence microscopy Vol. I, Cambridge 1992.
[Schramm/Hering 1995] Schramm, H.-P. und Hering, B., Historische Malmaterialien und ihre Identifizierung, Reprint der Ausgabe von 1988, Bücherei des Restaurators, U. Schießl (Hrsg.), Band 1, Stuttgart 1995.
[Sorby 1882] Sorby, H.C., Preparation of Transparent Sections of Rocks and Minerals. In: The Northern Microscopist 2 (1882), S.101-140.
[Stoney 1990] Stoney, D.A., The Use of the Chelsea Filter and Alternative Dichromatic Effects in the Microscopical Characterisation of Paint Pigments. In: The Microscope 38 (1990), S. 67-81.
[Waentig 1993] Waentig, F., Gießharzsysteme zum Einbetten von Proben. In: Restauro 99 (1993), S. 195-199.
[Wülfert 1996] Wülfert, S., Materialbezogene Untersuchungen an vier Tüchleinmalereien. In: Riggisberger Berichte 4 (1996), S. 158-178.
[Wülfert o.J.] Wülfert, S., Mikroskopie an Kunst und Kulturgut, in Vorbereitung.

Anmerkungen

1 Einen kurzen Abriß der Geschichte geben z.B. Rosenbusch und Wülfing [Rosenbusch/Wülfing 1921]. Sorby hat sein Verfahren erst 1882 ausführlich publiziert [Sorby 1882], aber vorher schon über dreißig Jahre lang mit beachtlichem Erfolg angewandt. Es ist – nur unwesentlich modifiziert – bis heute im Einsatz. Kompakte und gut illustrierte Werke zur Dünnschliffmikroskopie sind auch in jüngster Zeit herausgegeben worden, z.B. diejenigen von Pichler und Schmitt-Riegraf [Pichler/Schmitt-Riegraf 1993], Puhan [Puhan 1994], MacKenzie und Adams [MacKenzie/Adams 1995] sowie die deutschsprachige Übersetzung des Standardwerkes 'The Preparation of Thin Sections of Rocks, Minerals and Ceramics' von Humphries [Humphries 1994].

2 Zitiert über [Humphries 1994], S. V.

3 Eine frühe Arbeit ist [Baier/Müller-Skjold 1939]. Eine Übersicht gab kürzlich Reedy [Reedy 1994].

4 Dünnschnitte kleiner Proben werden –im Gegensatz zu Dünnschliffen – durch wiederholtes Überschneiden der imprägnierten und/oder eingegossenen Probe mit einem scharfen Messer hergestellt. Zur Herstellung eines Anschliffes wird die Probe zuerst eingegossen und der erhärtete Gießling dann bis auf die Probe angeschliffen und poliert. Verläuft die Ebene des Schliffs senkrecht zu den Schichten einer entsprechenden Probe, wird auch von 'Querschliff' gesprochen. Eine Übersicht über verschiedene Präparationstechniken in der Materialprüfung gibt das Buch von Jörg [Jörg 1991].

5 Die 1905 entstandene Arbeit [Ostwald 1905] erlangte erst 1936 in der englischsprachigen Übersetzung allgemeine Bekanntheit.

6 Raehlmann wandte dabei Vergrößerungen bis 200 x an [Raehlmann 1910].

7 Laurie zeigte 1914, wie kleine Malschichtproben in Paraffin eingegossen und danach angeschnitten werden konnten [Laurie 1914].

8 Bereits 1940 benutzte Gettens die bis heute übliche Methode der Probenpräparation bei Anschliffen: Er verwendete ein Kunstharz (Methyl-Metacrylat) zum Einschluß, fertigte Anschliffe des Gießlings an und polierte diese [Gettens 1940].

9 [Plesters 1956].

10 [Coremans/Thissen 1959].

11 [Bäschlin 1994].

12 [Derrick 1994], [Waentig 1993], [Krupa/Waentig 1995]. Das von Waentig in der jüngeren Publikation vorgestellte Gießharzsystem Technovit®2000LC wird auch in dieser Arbeit verwendet.

13 Hintergrund und Motivation der Beprobung an Kunstobjekten diskutierte kürzlich Wülfert [Wülfert 1996].

14 Wülfert erörtert die Probenentnahme aus Kunstwerken an anderer Stelle [Wülfert o.J.].

15 Vgl. z.B. [Rinne/Berek 1973], [McCrone 1991], [Rost 1992].

16 Besonders geeignet ist das weit verbreitete, durchscheinende Scotch MagicTape® der Firma 3M. Dies u.a. weil das hochviskose Bindemittel der Klebeschicht die Proben ausreichend gut fixiert, ohne in sie hinein zu diffundieren.

17 Wir verwenden durchsichtige Ringe aus Polypropylen mit 10 mm Durchmesser und ca. 5-7 mm Höhe für eine Füllmenge von ca. 0,5 g Gießharz. Zur Herstellung der Ringe können entsprechende PP-Rohre in kurze Abschnitte geschnitten werden.

18 Hersteller / Vertrieb: Heraeus Kulzer GmbH, Philipp-Reis-Str. 8/13, D-61273 Weinheim.

19 Die Verwendung dieses Harzes zur Herstellung von Anschliffen und Dünnschnitten ist kürzlich von Krupa und Waentig beschrieben worden [Krupa/Waentig 1995]. Als Einkomponentensystem weist es lange Stand- und (bei normaler Raumlichtbeleuchtung) fast beliebig lange Tropfzeiten auf. Durch den entfallenden Anmischschritt wird Arbeitszeit gespart und es verbleiben keine Reste. Technovit®2000LC kann durch Blau-Belichtung auf verschiedene Endhärte polymerisiert werden. Seine Viskosität kann im Bereich zwischen 20 und 30C leicht variiert werden. Die uns bekannten Nachteile von Technovit®2000LC sind die (allerdings schwache) blaue Primärfluoreszenz des erhärteten Produktes bei UVA-Anregung und die Empfindlichkeit gegenüber Isopropanol (vgl. später).

20 Es handelt sich um das sog. Technotray®CU Lichtpolimerisationsgerät. Vertriebsadresse wie beim Kunstharz. Das Gerät verfügt über einen ventilierten und damit relativ kühlen Belichtungsraum.

21 Derartige klebrige, dünne Oberflächenschichten entstehen auch bei der Arbeit mit ungesättigten Polyestergießharzen. Sie sind die Folge sauerstoffbedingter Konkurrenzreaktionen zu den Vernetzungsreaktionen beim Aushärten des Gießharzes in Luft.

22 Bei Malschichtproben verbietet sich der Einsatz flüssiger Schleifhilfs- oder Kühlmittel. Diese könnten die Probe verquellen resp. Komponenten ausspülen. Hier liegt einer der großen Unterschiede zur Präparation von An- und Dünnschliffen an Gesteinen, Mineralien oder Keramiken.

23 Wir verwenden Micro Mesh® Polierleinen, die die Firma Dick Feinwerkzeuge, Donaustr. 49-51 in D-94523 Mettlen z.B. als Kleinset mit 10 Gradationen und einer weichen Unterlage liefert.

24 Ist die angeschliffene und polierte Probe sehr porös, so kann der Tropfen mit dem Gießharz auf die Probe aufgesetzt und im Vakuum die eventuell überdeckte Luft abgesaugt werden, bevor der gleiche Tropfen zum Aufkitten auf den Objektträger verwendet wird.

25 Dieser Test beinhaltet wenigstens theoretisch die Möglichkeit, Schleifling und Polierleinen mit Handfett zu verunreinigen. Er sollte also mit entsprechender Zurückhaltung und wenigstens ohne Berührung der Probenfläche angewendet werden. Eine über den Finger gespannte, dünne Kunststofffolie schließt die Möglichkeit einer Kontamination ganz aus.

26 Technovit®2000LC hat im ausgehärteten Zustand den Brechungsindex $n(D)^{20} = 1{,}527$.

27 Einen Überblick präparativer und mikroskopischer Techniken zur Charakterisierung von Proben aus Kulturgut gibt Wülfert [Wülfert o.J.].

28 Informationen zu Instrumentation und Vorgehensweise bei der Polarisationsmikroskopie vermittelt z.B. das kompakte Werk von Patzelt [Patzelt 1985]. Wir arbeiten mit einem Olympus BH2-Pol bei Sehfeldvergrößerungen zwischen 60 und 1200 x.

29 Informationen zu Instrumentation und Vorgehensweise bei der Fluoreszenzmikroskopie vermittelt z.B. das kompakte Werk von Becker [Becker o.J.]. Eine moderne Übersicht gibt Rost [Rost 1992]. Wir arbeiten mit einem Leitz Orthoplan mit Ultropak Dunkelfeld-Auflicht für sichtbares Licht (100 W Halogenlampe) oder für UVA- (HBO100 Quecksilberdampfbrenner mit Anregungsfilter Schott Ultraviolettglas UG11) bei Sehfeldvergrößerungen zwischen 100 und 500 x. Das Mikroskop verfügt auch über einen simultan verwendbaren Hellfeld-Durchlichtstrahlengang (VIS oder UVA). Als Sperrfilter für UVA-angeregte VIS-Fluoreszenz verwenden wir ein Schott Gelbglas GG455.

30 Fourier Transform Infrarot Spektrometrie. Eine neuere Übersicht über die Leistungsfähigkeit dieser Methode bei der Analytik an Kulturgut gibt z.B. Derrick [Derrick 1995]. Das Labor verfügt über ein Perkin Elmer FTIR-Mikroskop der i-Serie (Spiegeloptik, Fixvergrößerung 200 x) mit MCT-Detektor. Beim zugehörigen Spektrometer handelt es sich um das Perkin Elmer System 2000.

31 Im Rahmen dieses Beitrages ist mit 'Auflicht' immer Dunkelfeld-Auflichtbeleuchtung gemeint.

32 Ein Streupräparat entsteht, indem das zu mikroskopierende Material in einem Tropfen Einschlußmittel möglichst homogen dispergiert und in dünner Schicht zwischen Objektträger und Deckglas präpariert wird.

33 Ein vergleichbares Phänomen läßt sich an Zigarettenrauch beobachten. Der im 'Auflicht' blaue Dunst wirkt im Durchlicht eher rötlich. Dies hängt damit zusammen, daß blaue Strahlen an feinen Teilchen effizienter gestreut werden als rote.

34 Vgl. z.B. die Diskussion bei [Bäschlin 1994], S. 327ff.

35 Vgl. die Arbeiten von McCrone und MacTaggart, z.B. [McCrone

1982], [McCrone 1994], [Mactaggart 1994].

36 Die Polarisationsmikroskopie an Fasern beschreiben z.B. A. Herzog [Herzog 1955] oder Hartshorne und Stuart [Hartshorne/Stuart 1970].

37 Eine Möglichkeit beschreibt McCrone [McCrone 1982].

38 Eine kurze Zusammenfassung der Fachterminologie und der Vorgehensweise geben McCrone [McCrone 1982] sowie Feller und Bayard [Feller/Bayard 1986].

39 Dieser sog. Reliefwechsel beim Drehen des Kristalles gegen den Polarisator (oder beim Drehen des Polarisators gegen den Kristall) hängt mit den in verschiedenen Kristalllagen relevanten Brechungsindizes des Calcites zusammen, welcher je nach relativer Position der Kristallachsen zur Durchlaßrichtung des Polarisators im Bereich zwischen $n(\omega)=1{,}658$ und $n(\varepsilon)=1{,}486$ liegt. Bei unpolarisierter Beleuchtung (ohne Polarisator) zeigt Calcit in allen Lagen einen konstanten, sog. mittleren Brechungsindex und natürlich keinen Reliefwechsel beim Drehen.

40 Ein Polarisator im Beleuchtungsstrahlengang (z.B. auf der Lichtaustrittsöffnung), ein weiterer (der sog. Analysator) mit um 90° gedrehter Durchlaßrichtung oberhalb der Probe im Abbildungsstrahlengang des Mikroskopes (z.B. in oder über einem Okular). Die preisgünstigen Folienpolarisatoren aus Photobedarfssortimenten reichen zu Kontrastierungszwecken aus. Polarisationsmikroskope verfügen ohnehin über einen hochwertigen, einschwenkbaren Polarisator und einen drehbaren Analysator.

41 Als Anregungsfilter hat sich dazu die Kombination der Schott Blaugläser BG38 und BG3 (jeweils 3mm stark) bewährt. Als Sperrfilter dient ein Orangeglas OG530 (2mm). Die Anregungsfilter können z.B. einfach auf die Lichtaustrittsöffnung des Mikroskopes gelegt werden. Der Sperrfilter kann zwischen Auge und Okular gehalten, oder besser in die Sehfeldblende des Okulares oder der Okulare eingelegt werden. Rund zugeschnittene Schott-Glasfilter liefert z.B. die Firma Göke in D-58095 Hagen.

42 Ein Molasse-Sandstein mit Quarz-, Albit-, Kalifeldspat-, Calcit- und Glauconit-Körnern, letztere hier farbgebend. Die Carbonate (hauptsächlich Calcit) bilden den allerdings nicht lückenlosen Zement.

43 Der entsprechende Filter (sog. Chelsea-Filter) wurde von Peter Mactaggart, Chard, in die analytische Pigmentmikroskopie eingeführt. Seine Anwendung und sein Nutzen wird in der späteren Publikation Stoneys [Stoney 1990] ausführlich erläutert.

44 Der Vorteil eines FTIR-Mikroskopes liegt darin, daß sich wegen der Verwendung von Spiegeloptik der Fokus für sichtbares Licht und Infrarot (IR) entsprechen. Eine visuell scharfgestellte und unter die Meßblende gefahrene, mikroskopisch kleine Probe wird daher während der Messung auch optimal vom IR-Licht durchstrahlt. Durch einen Spiegel wird während der Messung das IR-Licht, welches die Probe durchstrahlt hat, noch vor den Okularen des Mikroskopes auf einen IR-empfindlichen Detektor umgeleitet. Dieser erfaßt die von der Probe absorbierten Schwingungsfrequenzen, wodurch von einer eben noch betrachteten Mikroprobe in wenigen Sekunden ein IR-Absorptionsspektrum aufgenommen werden kann.

45 Z.B. beschrieben von M.-C. Gay [Gay 1970].

46 Vgl. [Bäschlin 1994].

47 Anleitungen geben z.B. [Plesters 1956], [Gay 1970], [Johnson/Pakkard 1971], [Martin 1977] oder [Schramm/Hering 1995].

48 Gute Differenzierungen für Proteine konnten in Ponceau S (CI 42053) und Fast Green FCF (CI 42053) erreicht werden. Zur Färbung wurden jeweils mehrere Objektträger in konventionelle Färbetröge eingestellt. Bei Färbungen auf Öle ergaben sich lediglich Schwierigkeiten mit dem Isopropanol-Anteil der Lösungsmittel für Sudan-Schwarz (CI 26150) und Ölrot O (CI 26125). Alle Färbungen erfolgten nach [Martin 1977] und [Schramm/Hering 1995].

49 Daß diese Erscheinung dem aus der Dunkelfeld-Auflichtmikroskopie bekannten Phänomen der am Objektrand auftretenden sog. Pseudofluoreszenz entspricht, halten wir für unwahrscheinlich. Dies, weil die Erscheinung sich auf eine bestimmte Grenzlinie beschränkt und durch die Aperturblende in ihrer relativen Intensität nicht variierbar ist.

50 Vgl. [McCrone 1994].

51 Hier konnten wir durch leichte Modifikationen am Verfahren den Gießharz-Anteil im FTIR-Spektrum noch weiter reduzieren. Die Arbeiten sind hier noch im Gang.

52 Diese Methode wird im Rahmen der Bindemittelanalytik z.B. von A. Rinuy und Mitarbeitern auf Dünnschnitte angewendet [Rinuy/Gros 1989].

Abbildungsnachweis

Abb. 1 und Abb. 3 von J.P. Kuhn, Photograph am Schweizerischen Institut für Kunstwissenschaft, Zürich. Alle anderen Abbildungen von den Autoren.