

## Gemäldeanalyse als Kontext für den Physikunterricht

Benjamin Ide, Helmuth Grötzebauch, Volkhard Nordmeier

Freie Universität Berlin, Fachbereich Physik, Didaktik der Physik Arnimallee 14, 14195 Berlin  
<http://didaktik.physik.fu-berlin.de>  
[benny\\_ide@web.de](mailto:benny_ide@web.de), [h.groetz@fu-berlin.de](mailto:h.groetz@fu-berlin.de), [nordmeier@fu-berlin.de](mailto:nordmeier@fu-berlin.de)

### Kurzfassung

Die Gemäldeanalyse ist aus physikdidaktischer (und physikalischer) Perspektive sehr interessant, da zur Untersuchung von Gemälden zahlreiche spektroskopische Methoden eingesetzt werden: die Röntgen-, Ultraviolett- oder die Infrarot-Spektroskopie zum Beispiel, aber auch die UV- oder IR-Reflektographie und die UV- und IR-Fotografie. Dabei erfolgt die Gemäldebestrahlung mit IR-, VIS- oder UV-Licht. Absorption oder Streuung können direkt beobachtet werden und lassen Rückschlüsse auf die verwendeten Farbpigmente oder den Bildaufbau zu. Die Methoden beruhen im Wesentlichen darauf, dass die Absorption und die Streuung an den Pigmenten sowohl material- als auch stark wellenlängenabhängig sind. In diesem Beitrag werden einige dieser Methoden und entsprechende Experimente für den Physikunterricht vorgestellt. Diese lassen sich bereits mit einfachen technischen und schulischen Mitteln durchführen. Benötigt werden dazu lediglich eine USB-Kamera und ein Infrarot-Durchlassfilter (Diapositiv) bzw. eine UV-Filterfolie.

### 1. Farbpigmente

Seit ca. 35 000 Jahren verwenden Menschen Pigmente in der Malerei. Die Höhlenbemalungen in den französischen Pyrenäen oder in der Höhle von Lascaux entstanden schätzungsweise 15 000 Jahre vor Christus.

In dieser Zeit wurden als Malfarbe braune, rote und gelbe Erden sowie Ruß bzw. Kohle verwendet. Als Bindemittel dienten bis in das 20. Jahrhundert pflanzliche und tierische Bestandteile wie Ei, Lein-, Mohn- und Walnussöl, Harze, Pflanzengummi und Wachse [1].

Heutzutage kommen außer Pigmenten unterschiedliche Füllstoffe und Füllmengen in der Malfarbe hinzu, um sie zum einen kostengünstiger zu machen und zum andern, um ihre Konsistenz zu beeinflussen. Zusätze zum Binder, die die Trockenzeit, die Transparenz, die Elastizität des Farbauftrags aber auch die Farbsättigung und das 'Tiefenlicht' beeinflussen und verändern, runden die Betrachtung der Zusatzstoffe im Bindemittel ab (vgl. [2, S.17], [3, S.19]). Je nach Art und Zusammensetzung der Zusatzstoffe ist die visuelle Wirkung und insbesondere der Farbeindruck von Pigmenten sehr unterschiedlich. Setzt man ein bestimmtes Pigment in Leinöl an, hat das Gemisch einen anderen Brechungsindex als eine wässrige Lösung dieses Pigments. Die optische Wirkung wird auch durch die Teilchengröße beeinflusst. Ein Pigmentteilchen, das kleiner ist als die halbe Wellenlänge des Lichts, wird transparent'. Als Optimum hat sich für eine gute Deckfähigkeit eines Pigmentes eine Größe von 1/500 bis 2/5000 mm erwiesen (vgl. [3, S. 31]).

Fällt Licht auf ein Pigment, wird es je nach Teil-

chengröße unterschiedlich stark gestreut, reflektiert und absorbiert (Abb. 1). Für den Zusammenhang zwischen Teilchengröße und Absorptionsvermögen ist die Mie-Streuung verantwortlich (vgl. auch [2, S.26]).

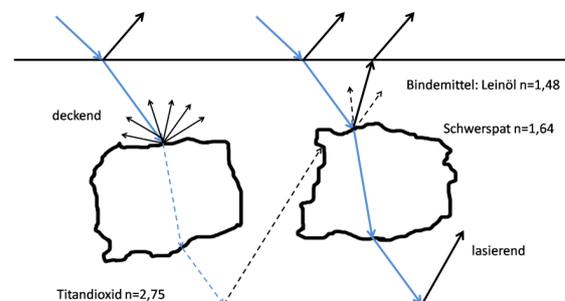


Abb. 1: Titanweiß und Schwerspat in Leinöl: Unterschiedliche Lichtstreuung und Brechung an weißen Pigmenten führt zu unterschiedlicher Deckfähigkeit (nach [2, S. 31]).

### 2. Methoden der Gemäldeuntersuchung – Theoretischer Hintergrund

Ziel dieses Beitrags ist es aufzuzeigen, inwiefern die Untersuchung von Gemälden im Schulunterricht umsetzbar ist. Dazu werden im Folgenden nur die Untersuchungsmethoden mit ultraviolettem und infrarotem Licht vorgestellt. Diese Methoden sind sowohl kostengünstig als auch relativ gefahrlos durchzuführen.

#### 2.1. Bildaufbau

Schaut man sich verschiedene Gemäldetechniken an, wird einem immer wieder ein ähnlicher Bildaufbau begegnen. Als Trägermaterial dient in der Regel eine

Leinwand, auf die Grundierung aufgetragen wurde, meist aus einem kreideartigem Material wie zum Beispiel *Gesso*. Es folgt eine Unterzeichnung, die teilweise mit einem Kohle- bzw. Grafitstift aufgetragen wurde. Zum Schluss wird die eigentliche Farbe aufgetragen, und abschließend erhält das Bild einen Firnisstrich als Schutz gegen äußere Einflüsse.

Farbaufräge, Übermalungen und Unterzeichnungen – die Technik des Künstlers bei der Herstellung seines Werkes zu entschlüsseln, das ist das Ziel einer Gemäldeuntersuchung.

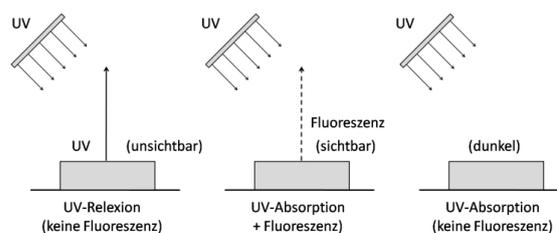
## 2.2. Gemäldeuntersuchung mit ultravioletter Strahlung

Ultraviolette Strahlung hat an der Oberfläche eines Gemäldes nur eine geringe Eindringtiefe. Sie wird, abhängig von der Beschaffenheit der Farbschicht, zum großen Teil reflektiert oder gestreut. Die Untersuchung der Gemäldeoberfläche konzentriert sich daher auf die Beschaffenheit der Farbaufräge: auf Rissbildungen, Abblätterungen und Reparaturstellen. Ist die Farbschicht mit einer Firnissschicht übermalt, kann lediglich die Firnissschicht untersucht werden.

Dieses Phänomen ist aus physikalisch-chemischer Perspektive sehr interessant: Bei der Absorption gelangen die Elektronen der Atome bzw. Moleküle in höhere Energieniveaus und führen zur Verringerung der atomaren Bindungsenergie. Folglich können sich Atome auch aus dem Molekülverband lösen. Dies führt zu einer Veränderung der Moleküleigenschaften in der Firnissschutzschicht – auch Photolyse genannt. Bei dauerhafter Bestrahlung mit UV-Licht vergilbt die Firnissschicht, und manchmal auch die darunter liegende Farbschicht.

Bei kurzzeitiger Bestrahlung mit UV-Licht (365 nm, z. B. Quecksilberdampfampe (vgl. [2, S. 63]) ist mit keiner Beschädigung der Bildoberfläche zu rechnen. Anders sieht es bei einer dauerhaften Bestrahlung mit Sonnenlicht aus: Auch wenn das UV-Licht der Sonne nur teilweise durch Fensterscheiben gelangt, ist dessen Intensität noch zu stark. Die Farben vergilben. Deshalb werden Gemälde in Museen oder Galerien vor dem direkten Sonnenlicht geschützt (vgl. [2, S. 63ff]).

Bei der Untersuchung mit einer Kamera sind zwei Modi interessant (Abb. 2): Reflexionsbilder im UV-Bereich (UV-Reflektographie) und Lumineszenz- bzw. Fluoreszenzbilder (im sichtbaren Bereich). In beiden Fällen erfolgt die Bilderzeugung mit entsprechenden Filtern (vgl. [2, S. 68ff]). Die bedeutendere und interessantere Variante ist die UV-Fluoreszenz, weil sich Farbaufräge, die im sichtbaren Bereich nicht zu unterscheiden sind, im Fluoreszenzbereich gut zu trennen sind (Abb. 3, rechts). Damit lässt sich die strukturelle Beschaffenheit der Oberfläche sehr gut erkennen, wie zum Beispiel Risse oder Abblätterungen im Farbaufrage (vgl. [2, S. 76]), doch auch der Alterungsgrad einer Farbe führt zu Fluoreszenz-Effekten.



**Abb. 2:** Reflexion und Absorption auf einer Gemäldeoberfläche bei UV-Bestrahlung (vgl. [2, S. 65]).



**Abb. 3:** Bildnis aus dem Cranach-Archiv (aus [4]). Links: sichtbares (VIS) Bild. Mitte: Reflexionsbild bei einer Aufnahme mit Infrarotlicht. Rechts: UV-Fluoreszenzbild. Hier sind deutlich Auffälligkeiten bzw. Reparaturstellen im Farbaufrage erkennbar.

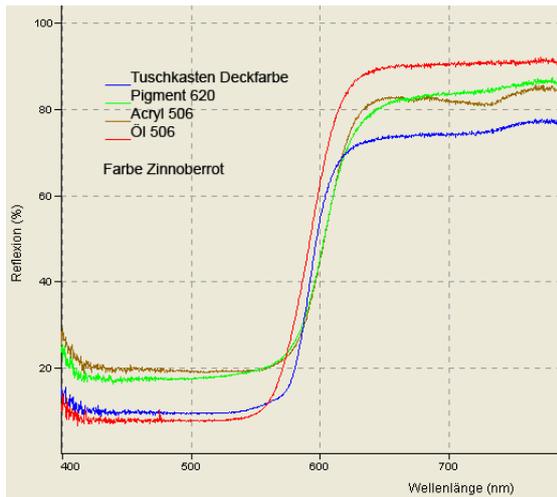
## 2.3. Gemäldeuntersuchung mit Infrarot-Strahlung

Der für die Gemäldeuntersuchung interessante Wellenlängenbereich des thermischen Infrarots befindet sich zwischen 780 nm und 3,5  $\mu\text{m}$  (vgl. [2, S. 90]). Diese Untersuchungsmethode wird auch als IR-Reflektographie bezeichnet und weist im Vergleich zum UV-Licht deutlich geringere Streuungen an Pigmenten auf. IR-Licht kann daher besser in die Farbschichten ein- oder sie sogar durchdringen – bis hin zur Grundierung, auf der im günstigen Fall eine Unterzeichnung zu finden ist. Auf der Grundierung wird dann ein Großteil der Strahlung absorbiert bzw. gestreut.

Die typische IR-Untersuchung erfolgt mit einer Bestrahlung durch Glüh- oder Halogenlicht im 45°-Winkel (um Reflexionen zu vermeiden). Eine weitere Möglichkeit ist die rückseitige Durchstrahlung des Bildes, bei der ein Transmissionsabbild entsteht.

## 2.4. Spektroskopie

Wendet man die Spektroskopie an, kann die Zusammensetzung einer Farbe analysiert werden. So zeigt die Untersuchung in Abbildung 4, dass die Spektren von Malfarben, bei denen das Pigment Zinnoberrot Verwendung findet, auch stark vom Anwendungsmedium (Bindemittel zzgl. Zusatzstoffe) beeinflusst werden. Daher lassen sich in dem Spektrogramm die Verläufe nicht immer eindeutig einem Pigment zuordnen. (Das hängt aber auch mit den unterschiedlichen Pigmentdurchmessern und der Oberflächenstruktur zusammen.)



**Abb. 4:** Reflexionsverhalten unterschiedlicher Malfarben mit dem Pigment Zinnoberrot [5]

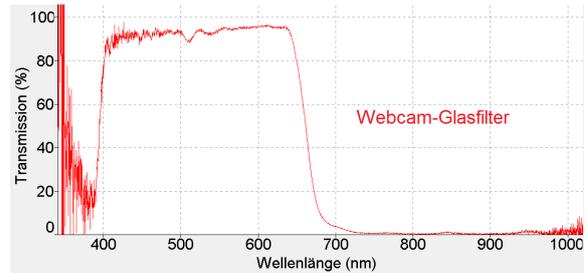
### 3. Gemäldeanalyse mit einem einfachen technischen Materialien und Komponenten

Bildsensoren sind in erster Linie Intensitätssensoren, die zunächst nur die ‚Helligkeit‘ messen. CMOS- und CCD-Sensoren basieren auf Siliziummaterial und unterscheiden sich hauptsächlich durch den Aufbau, das Messprinzip und bei der CMOS-Version durch die geringere Eindringtiefe kurzwelliger Strahlung. Erst die Kombination mit Filterschichten für Rot, Grün und Blau (RGB) auf den einzelnen Sensoren führt zu einem RGB-Farbsignal. Die Sensoren reagieren aber auch wellenlängenabhängig. Insbesondere bei längeren Wellenlängen werden die einzelnen Filterschichten optisch wirkungslos, d. h. im nahen infraroten Spektralbereich sind alle Sensoren gleichermaßen empfindlich für IR-Strahlung.

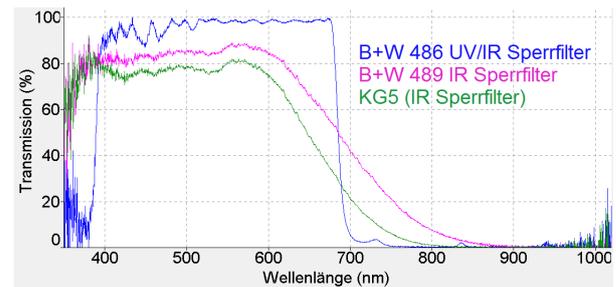
Entscheidender als der Sensortyp ist der optische Filter für die Infrarotaufnahme. Im Idealfall lässt er kein sichtbares Licht passieren, dafür aber Infrarotstrahlung. Bei den in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen wurden Filter für den UV-Bereich, IR-Licht oder für den sichtbaren Bereich (visible [VIS]), eingesetzt.

Für die Untersuchungen musste die Webcam modifiziert werden. Eine Webcam besitzt, wie jede andere Kamera, im Normalfall einen Bandpassfilter, um Strahlung des infraroten und ultravioletten Lichts herauszufiltern, so dass nur das sichtbare Licht „abgebildet“ wird (Abb. 5).

Da der interne Filter der Kamera entfernt wurde, muss für Aufnahmen des sichtbaren Bereichs ein KG5-Filter eingesetzt werden, um möglichst geringe Einflüsse aus dem infraroten und ultravioletten Bereich der Strahlung zuzulassen (Abb. 6).



**Abb. 5:** Transmissionsspektrum des aus der Webcam ausgebauten Infrarot-Sperrfilters (vgl. [6, S. 29])



**Abb. 6:** KG5 Filter für den sichtbaren Bereich. Für den Fotobereich (Schraubfilter) können auch die Filter B+W 486 als Bandpassfilter für den sichtbaren Bereich Verwendung finden bzw. B+W 489 als Sperrfilter des Infraroten, allerdings mit einem stärker ins infrarote hineinreichenden Übergangsbereich. (vgl. [6, S. 30])

Für den Umbau der Webcam wird der interne Bandpassfilter, der sich hinter dem Linsensystem befindet, durch Abschrauben des Objektivs von der Rückseite entfernt (Abb. 7 Mitte und rechts). In der nachfolgenden Tabelle 1 werden die verwendeten Filter mit professionellen bzw. kostspieligen Filtern verglichen. Der Verkaufspreis für einer Leaf-Kamera liegt derzeit bei fast 20.000 €. Die Webcam kostet dagegen nur ca. 20 €.



**Abb. 7:** Links: Objektiv einer Webcam mit abgenommener Objektivkappe. Rechts: Rückseite des Objektivs und entferntem Filter, der noch die Klebestellen aufweist

Einsatzbereich	Professioneller Fotobereich	kostengünstige Alternative
UV-Filter	UG11	Farbfilterfolie Nr. Lee 798
Sichtbares Licht (VIS) Filter	KG5	nicht empfehlenswert, da viele Folien IR-Strahlung durchlassen
IR Filter	Kodak Wratten 87	Diapositiv (nicht belichtet)
Kamera	Leaf-Aptus II 8, 40 MPx	Conrad Webcam 8MPx

Tab. 1: Filtertypen, Kameras und ihre Anwendungsbereiche

#### 4. Experimente für den Unterricht: eigene Untersuchungen an Gemälden

##### 4.1. Ultraviolett-Untersuchung mit der Webcam

Technisch lässt sich die UV-Fluoreszenz einfacher realisieren, da an der Kamera keine Veränderungen vorgenommen werden müssen. Fluoreszenzbilder entstehen durch Bestrahlung im UV-Bereich und Reemission im Sichtbaren, so dass die Effekte auch

ohne Kamera sichtbar sind (Beispiel: ‚Disco Light‘). Dazu wird das Gemälde mit einer UV-Quecksilberdampfampe (365 nm) bestrahlt. In unserem Fall haben wir nur eine Lampe im 45°-Winkel aufgestellt, um die unterschiedliche Wirkung der Strahlung in Abhängigkeit von der Entfernung zu dokumentieren (Abb. 8 und 9).

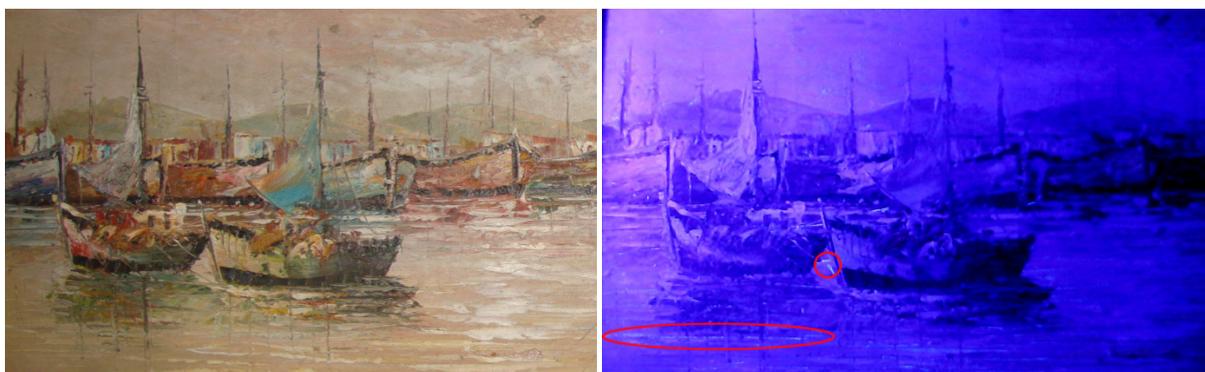


Abb. 8: Links: Älteres Gemälde vom Flohmarkt: Aufnahme mit Sony Cyber-shot DSC W215 im sichtbaren Bereich ohne Modifikation. Rechts: Aufnahme mit Webcam nicht modifiziert und mit direkter UV-Bestrahlung auf der linken Bildseite.

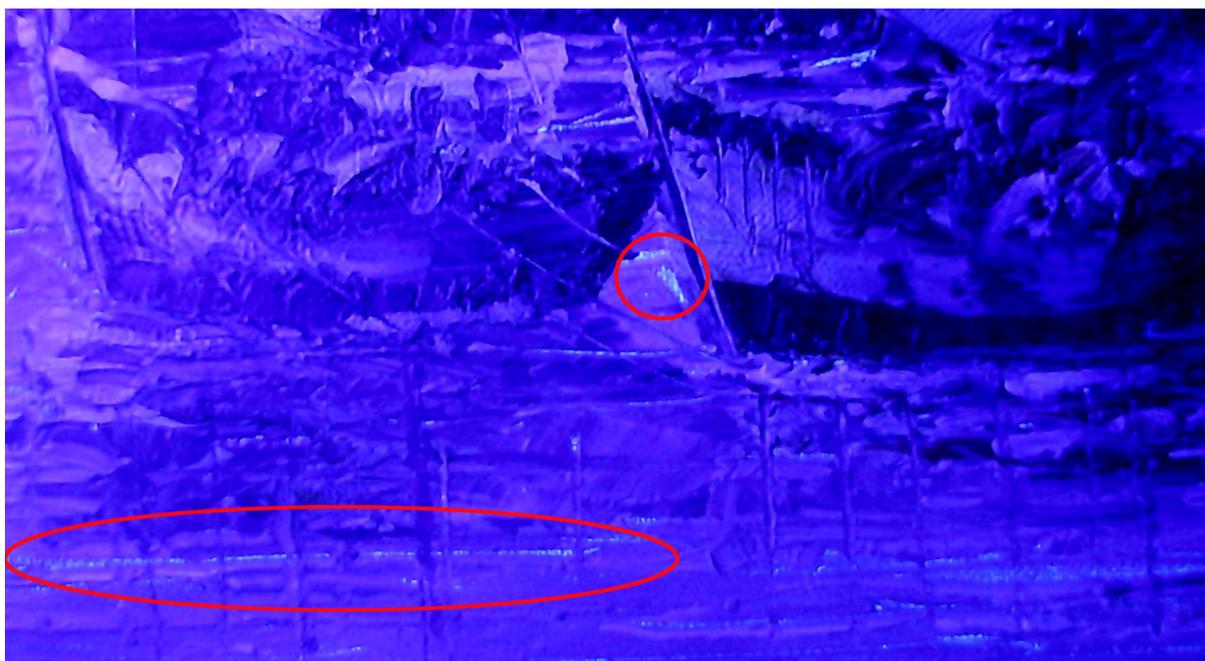


Abb. 9: Ausschnitt aus Abbildung 8. Die hellen, fast weißen Striche sind Fluoreszenzbereiche

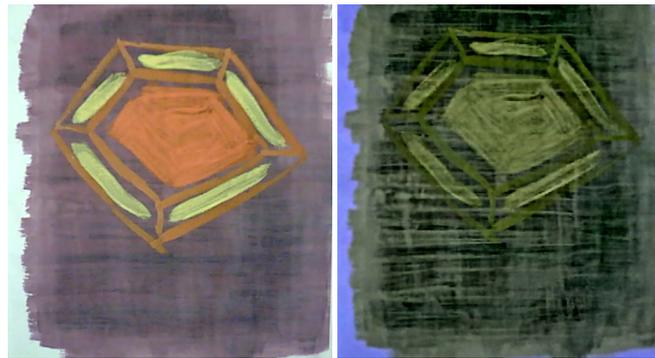
Deutlich sichtbar werden die Effekte der Fluoreszenz, wenn Leuchtpigmente für ein selbst erstelltes Bild verwendet werden. Diese gibt es als Fluoreszenz-, UV-aktive und phosphoreszierende Pigmente. Wegen der farbigen Darstellung wurde das Bild „Harlekin“ genannt und ist der Mechano-Fakturschwarz (1924) von Henryk Berlewski nachempfunden (Abb. 10).

Anders sieht es bei der UV-Reflektanz aus. Sie kann nur durch entsprechende UV-Durchlass-Filter realisiert werden, die möglichst kein sichtbares Licht

und Infrarotstrahlung passieren lassen. Das führt bei einer geringen Sensorempfindlichkeit der Silizium-Chips im Fotoapparat zu sehr langen Belichtungszeiten, so dass mit der Webcam streng genommen keine ‚echten‘ Reflektanz-Aufnahmen gemacht werden können. Es fehlt die Möglichkeit einer Langzeitbelichtung. In Näherung gibt es einen Kompromiss, der zwar nicht alle störenden Wellenlängen wie z. B. IR herausfiltert, doch trotzdem brauchbare Ergebnisse liefert, indem eine einfache Filterfolie benutzt wird (Abb. 11).



**Abb. 10:** Kohlezeichnung „Harlekin“ als Toner-Farbkopie. Links: Die blauen und gelb-weißen Farbtöne sind Leuchtpigmente, Aufnahme mit der Sony Cyber-shot DSC W215. Rechts: Fluoreszenzbild, aufgenommen mit Sony Cyber-shot DSC-F828. Der Hintergrund besteht aus der Leinwandgrundierung.

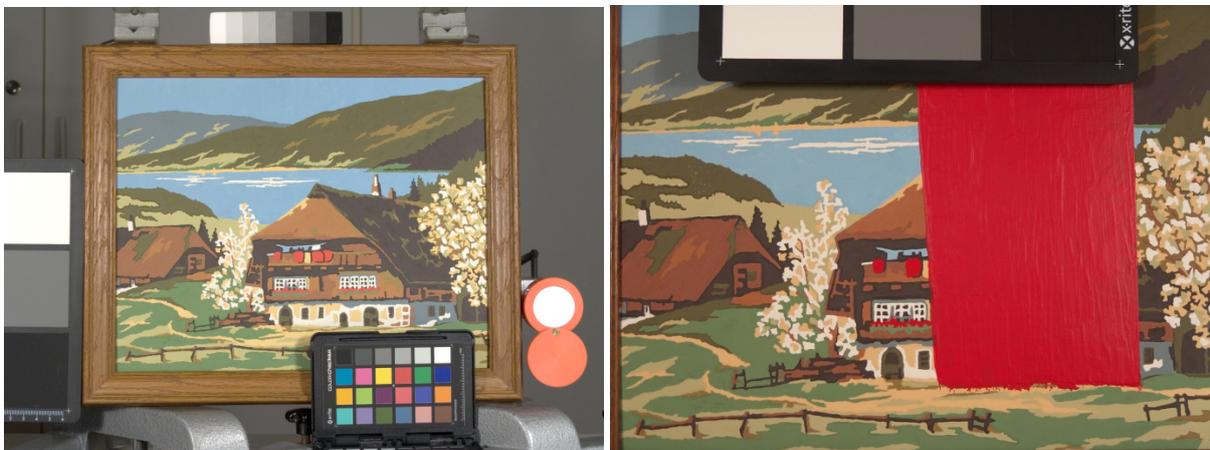


**Abb. 11** Links: Aufnahme mit Webcam (nicht modifiziert) im sichtbaren Bereich (VIS). Rechts: Aufnahme mit modifizierter Webcam mit Filterfolie „Lee 798“. (Ein Teil der IR-Strahlung passiert ebenfalls die Filterfolie.)[7]

#### 4.2. Infrarot-Reflektografie – Vergleichsuntersuchungen

Zur Untersuchung im infraroten Bereich wurde ein Bild teilweise mit Acrylfarbe (Zinnoberrot) übermalt (Abb. 12). Für eine Abgleich der korrekten Dar-

stellung der Farben in der Fotografie wird eine Farbreferenztafel im Bild positioniert und mit aufgenommen. Damit kann in der Nachbearbeitung ein korrekter Weißabgleich durchgeführt werden.



**Abb. 12:** Testbild, auf Faserplatte aufgemalt. Weißabgleich mit mehreren Farbreferenztafeln zum Vergleich. Links: X-Rite und in der Mitte SpyderCheckr für den sichtbaren Bereich und Spektralon weiß (rund) auf der rechten Seite für IR- bis UV-Bereich. Rechts: Bild nach teilweiser Übermalung mit der Acrylfarbe ‚Zinnoberrot‘ von boesner.



**Abb. 13:** Links: Gemäldeuntermalung sichtbar gemacht mit der Kamera Leaf-Aptus 40 MPx und Wratten87-Filter. Rechts: Aufnahme mit modifizierter Webcam 8 MPx, Fuji (M) Diapositiv als Filter. Beide Fotos wurden leicht nachbearbeitet (Kontrastverstärkung). [7]

Werden statt der Acrylfarbe die beiden Farben Blaugrün und Violett eines Standard-Tuschkastens mit 12 Farben (Firma Metro) bis zur vollständigen optischen Deckung im sichtbaren Bereich auf eine Leinwandfotokopie (Kopie Center) eines Keilrahmens (Schwarzer Toner) aufgebracht und das Bild von hinten durchstrahlt, können die Ergebnisse noch

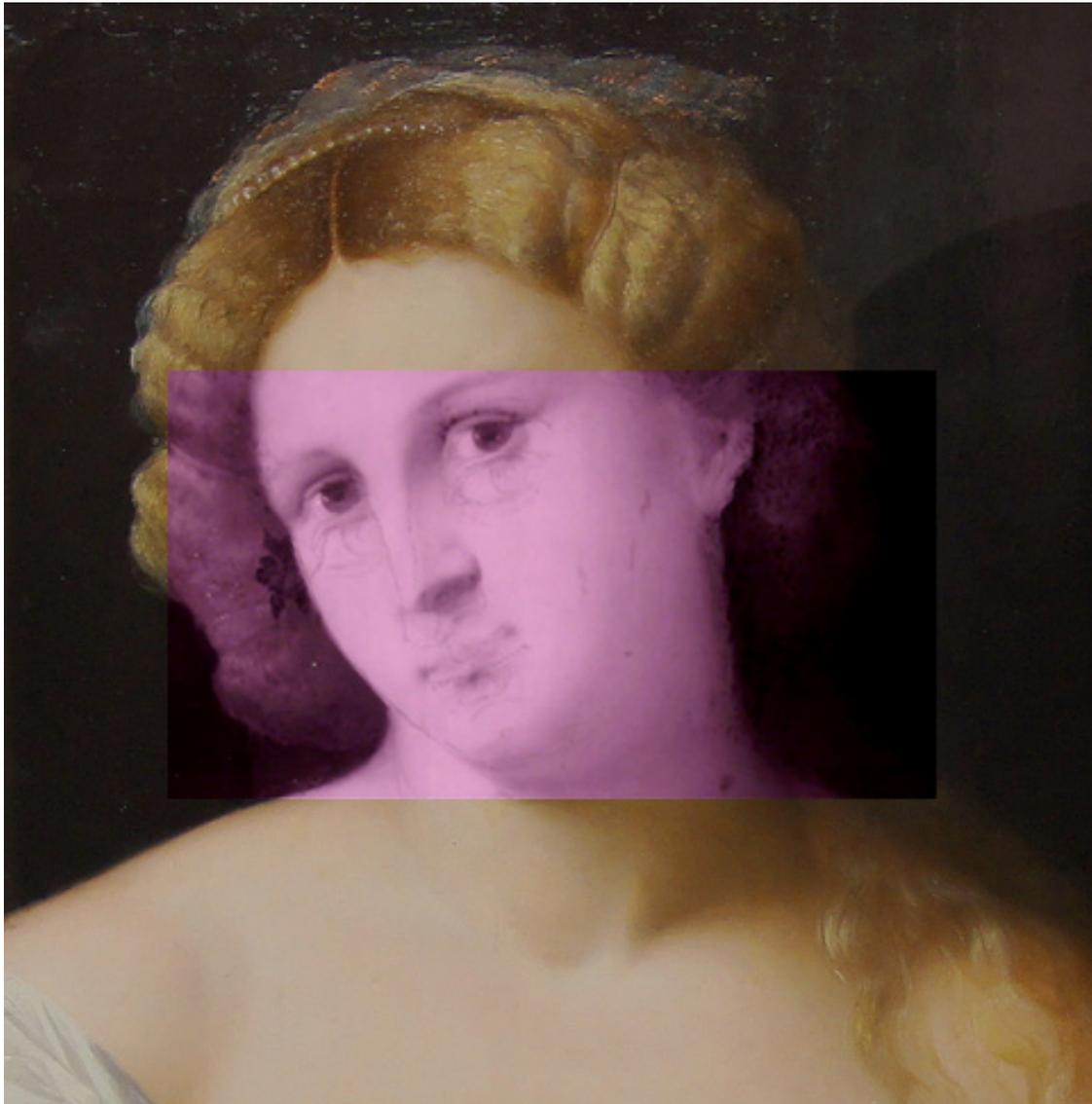
wesentlich verbessert werden (Abb. 14). Allerdings kann diese Transmissionsmethode nur bei dünnen Trägermaterialien wie Leinwand und Papier Anwendung finden. Bei den auszuwählenden Farben sollten vorab Tests durchgeführt werden, weil je nach Hersteller die Farben unterschiedliches Verhalten bei IR-Strahlung aufweisen.



**Abb. 14:** Webcam-Ausschnittsaufnahmen eines Leinwandkeilrahmens mit übermalter Fotokopie einer Kohlezeichnung (links). Bei einer rückseitigen Beleuchtung mit einer 60-W-Glühlampe wird das Bild durchstrahlt (rechts).

Für eine Praxistauglichkeit der Webcam durften wir in der Gemäldegalerie in Berlin Aufnahmen von der Unterzeichnung „Bildnis einer jungen Frau mit entblößter Brust“ (Jacomo di Antonio) machen. Die

Aufnahmen entstanden bei Halogenbeleuchtung, doch auch bei geringem indirektem Licht waren die Unterzeichnungen noch zu sehen (Abb. 15).



**Abb. 15:** Eine Unterzeichnung kann mit der modifizierten Webcam sichtbar gemacht werden (violetter Bildbereich). Ausschnitt des Gemäldes von Jacomo di Antonio: „Bildnis einer jungen Frau mit entblößter Brust“, um 1524/26, Gemäldegalerie Berlin

### 5. Kostenaufstellung

Zum Abschluss folgt eine Kostenaufstellung für die Experimente:

Komponente	Bezeichnung	Kosten in Euro (ca.)
Webcam Firma Conrad	Bestell-Nr. 971975	20
Lee-Filter im Musterheft mit Lee 798	LFM	3
Filter für Tageslichtaufnahme, Firma Edmund Optics	KG5	65
2 Quecksilberdampf lampen, Firma Envirel	3004+LM	120
Glühlampe/geregelte Halogenlampe ohne Trafo		3
Acrylfarben oder Tusche (Deckfarben)		10
Gesamtkosten		221

**Tab. 2:** Kostenaufstellung zu den Versuchen

## 6. Literatur

- [1] Riederer, J. (1982): Die Pigmente der antiken Malerei. In: Naturwissenschaften, Volume 69, Issue 2, Seiten 82-86
- [2] Mairinger F. (2003): Strahlenuntersuchung an Kunstwerken. 1. Aufl. Leipzig: Seemann, E. A., Kunstverlagsgesellschaft in Verlagsgruppe Dornier GmbH.
- [3] Doerner M, Hoppe T (2010): Malmaterial und seine Verwendung im Bilde. 1. Aufl. Englisch Verlag.
- [4] Lucas Cranach the Elder: „The Portrait of a woman“. In: Cranach Digital Archive . Url: <http://www.lucascranach.org/digitalarchive.php> (Stand: 05/2012)
- [5] Brüggemann, V. (2012): Spektrale und fotografische Analysen im nahinfraroten und ultravioletten Bereich am Beispiel der Gemäldeuntersuchung. Bachelorarbeit, Freie Universität Berlin (unveröffentlicht).
- [6] Ide, B. (2012): Gemäldeanalyse als Kontext für den Physikunterricht –und fotografische Untersuchungen an Farbproben. Masterarbeit, Freie Universität Berlin (unveröffentlicht).
- [7] Grötzebauch H., Nordmeier V. (2013): Untersuchung von Gemälden. Experimente für den Unterricht. In: Praxis der Naturwissenschaften, 3/62, S.13–24.