



# Digitale NIR-Fotografie spezielle Effekte, physikalische Grundlagen und analytische Anwendungen

Dr. Bernd Neumann

## Einleitung

Digitalkameras werden heute vielfältig eingesetzt und reichen von sehr preiswerten Web-Kameras bis hin zu teuren Foto-, Industrie- und Spezialkameras. Für die meisten Anwendungen sind die entsprechenden Geräte an das Farbeempfinden des menschlichen Auges angepasst. Dieses erstreckt sich jedoch nur über einen recht kleinen Wellenlängenbereich, der im sichtbaren Spektralbereich (VIS) von 380-780 nm liegt.

Von der Sonne hingegen gelangt nach Filterung durch die atmosphärischen Gase wie Wasserdampf (H<sub>2</sub>O), Stickstoff (N<sub>2</sub>), Sauerstoff (O<sub>2</sub>) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) Strahlung in einem deutlich größeren Wellenlängenbereich von ca. 300-2500 nm auf die Erde. Neben 3 % Ultraviolett (UV) empfängt die Erdoberfläche 54 % sichtbare (VIS) und 43 % nahinfrarote (NIR) Strahlung.

Gerade der für Kameras mit Silicium-Sensor zugängliche NIR-Bereich von ca. 780-1000 nm bietet neben interessanten optischen Effekten auch preiswerte analytische Möglichkeiten, die mit entsprechend ausgerüsteten fototauglichen Mobiltelefonen einfach zu realisieren sind.

Der folgende Artikel gliedert sich in zwei Teile. Zunächst werden einige die NIR-Fotografie betreffende physikalische Grundlagen beschrieben und anschließend ausgewählte, besondere Effekte vorgestellt und diskutiert.

## Zwei klassische Lichtquellen

Neben der Sonne dienen auch die aus der Mode gekommenen Halogenleuchtbirnen als Quellen für sichtbare und NIR-Strahlung [1]. Abbildung 1 zeigt hierzu ein normiertes Spektrum der Sonne (Solarspektrum), ein nach Planck [2] für 5500 K berechnetes Spektrum (normiert) sowie ein ebenfalls nach Planck für 2700 K berechnetes und normiertes Spektrum für eine Halogenleuchtbirne.

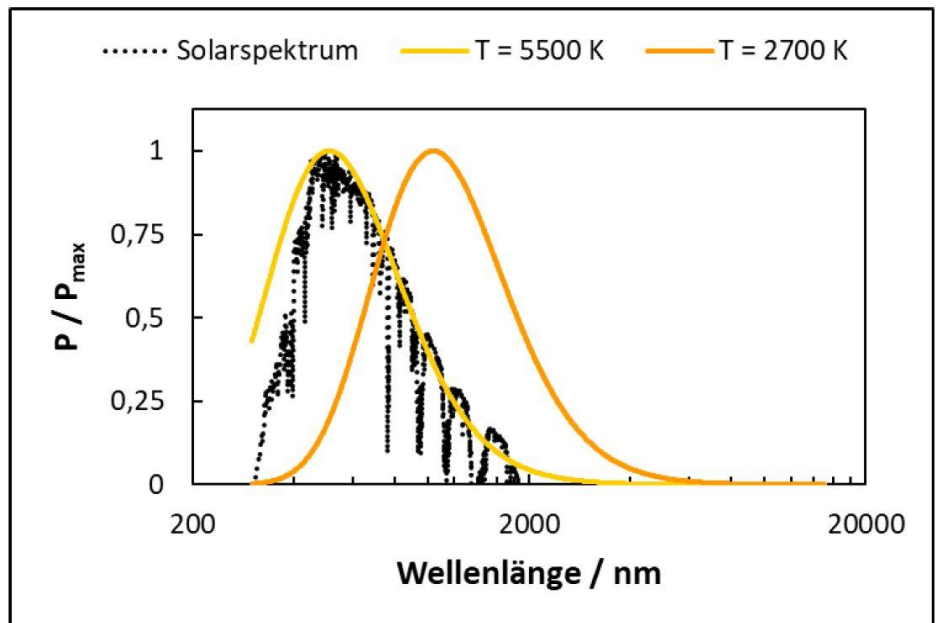


Abb. 1: Normiertes Solarspektrum sowie normierte Planck-Funktionen  $P / P_{\max}$  für  $T = 5500 \text{ K}$  und  $T = 2700 \text{ K}$  in Abhängigkeit der Wellenlänge.

Die Planck-Funktion (Gleichung 1) hängt von zwei Variablen ab, der Temperatur und der Wellenlänge. Wird die Temperatur vorgegeben, kann die Strahlungsleistung als Funktion der Wellenlänge berechnet werden:

$$P(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\left[ e^{\left(\frac{hc}{\lambda k T}\right)} - 1 \right]} \quad (1)$$

mit

$P(\lambda, T)$ : Planck-Funktion pro Flächen- und Wellenlängenelement in  $\text{W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$

$h$ : Planck-Konstante  
 $6,6260755 \times 10^{-34} \text{ J s}$

$c$ : Lichtgeschwindigkeit  
 $2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

$\lambda$ : Wellenlänge in nm

$T$ : Temperatur in K

$k$ : Boltzmann-Konstante  
 $1,380658 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

Eine Normierung der Planck-Funktion auf ihren Maximalwert  $P_{\max}$  dient dazu, die Wellenlängenverschiebung des

Maximums, die mit der Temperaturänderung einhergeht, deutlicher hervorzuheben als ohne diese.

Als eine Standardeinstellung für die Lichtart kann bei vielen Kameras z.B. „Tageslicht“ gewählt werden, was einer „Farbtemperatur“ von ca. 5500 K entspricht, also etwa der Oberflächentemperatur der Sonne. Der Begriff Farbtemperatur resultiert aus einer Verknüpfung der meßbaren Größe Temperatur mit einem Farbeindruck, der sich aus dem Anteil der Planck-Funktion im sichtbaren Wellenlängenbereich ergibt und mit einem geeigneten Farbmessgerät erfasst werden kann. Mitunter kann auch „Glühlampenlicht“ als eine Lichtart ausgewählt werden, entsprechend einer Farbtemperatur von 2700 K, also der Temperatur des Glühfadens. Wie man Abbildung 1 entnehmen kann, bewirkt eine Absenkung der Temperatur eine Verschiebung des Maximums der Planck-Funktion hin zu einer längeren Wellenlänge. Durch diese Modifikation der Strahlungsverteilung wird der jeweilige Farbeindruck beeinflusst.

### Der Sperrfilter (cut-off-filter)

Moderne Sensorchips für Digitalkameras basieren meist auf dem Halbleiterelement Silicium und sind im Wellenlängenbereich von ca. 200-1000 nm sensitiv. Das menschliche Auge hingegen kann jedoch nur den sichtbaren Wellenlängenbereich wahrnehmen und besitzt seine größte Empfindlichkeit im Grünen bei 555 nm (Abbildung 2).

Erwähnenswert an dieser Stelle ist die Tatsache, dass die Messdaten der spektralen Hellempfindlichkeit wesentlich besser durch eine log-Normalverteilung als durch eine symmetrische Normalverteilung beschrieben werden. Offensichtlich wirken sich die Faktoren, die am Tagessehen beteiligt sind, eher multiplikativ als additiv aus, sofern die Daten keine methodischen Messfehler aufweisen. In der belebten Natur gibt es viele Beispiele für multiplikative Funktionsweisen, deren Merkmale log-Normal verteilt sind, wie z.B. auch die Körpergröße[4]. Diese kann als das Resultat vieler multiplikativer Prozesse wie Zellteilung, Stofftransport und chemischen Reaktionen (Stoffwechsel, Wachstum) betrachtet werden.

Um die Farb-Empfindlichkeit eines Kamerasensors an die des menschlichen Auges anzugleichen, wird ein Sperrfilter (engl. cut-off-filter) verwendet, der auf dem Bildsensor z.B. innerhalb einer Kunststofffassung platziert werden kann (Abbildung 3).

Dieser schneidet sowohl den kurzwelligen UV-Bereich bis ca. 400 nm als auch den langwelligen NIR-Bereich ab ca. 700 nm ab. Als Sperrfilter dienen dünne Glasplatten, die mit in der Brech-

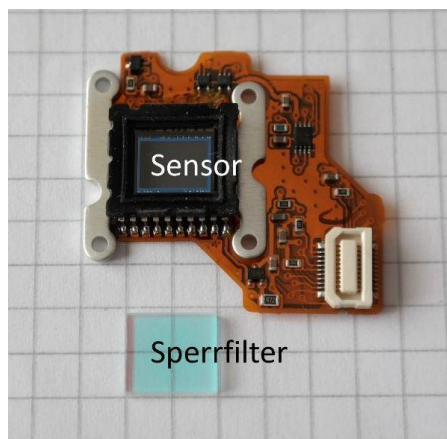


Abb. 3: Kamerasensor mit ausgebautem Sperrfilter, der je nach Beobachtungswinkel eine grünliche oder rötliche Oberflächenreflexion zeigt.

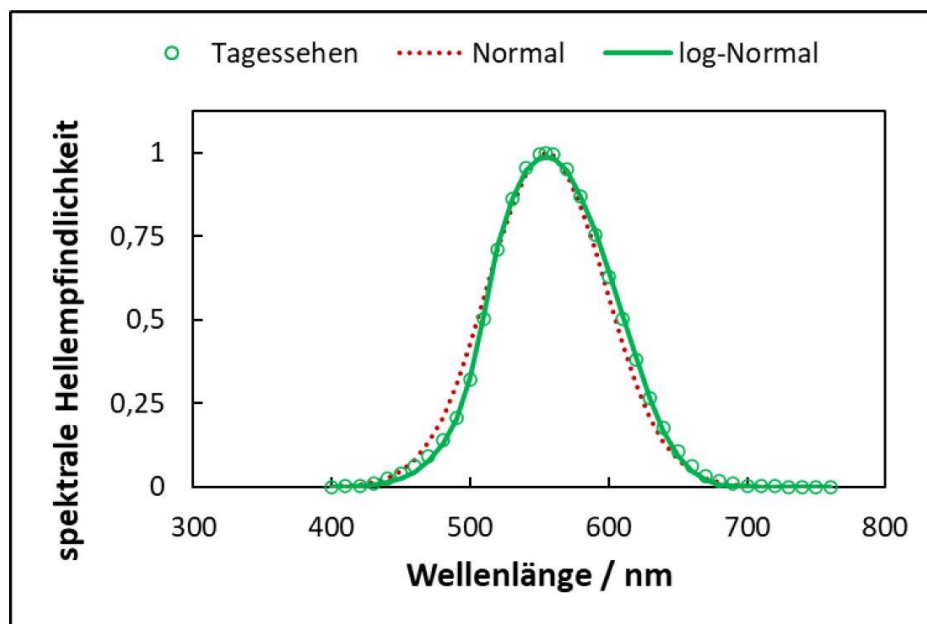


Abb. 2: Normierte spektrale Hellempfindlichkeitsdaten (grüne Kreise) eines standardisierten menschlichen Auges bei Tageslicht nach [3].

zahl variierenden Schichten beaufschlagt werden, so dass ein optisches Durchlässigkeitsfenster im sichtbaren Spektralbereich wie z.B. in Abbildung 4 gezeigt, erreicht wird.

Um den Kamerasensor an die hohe Grünempfindlichkeit des Auges anzupassen, besitzt dieser i.d.R. doppelt so viele grüne Pixel wie rote bzw. blaue.

Entfernt man den Sperrfilter oder wird er werkseitig bewusst bei dem Zusammenbau einer Digitalkamera weggelassen, dann steht praktisch ein Wellenlängenbereich von ca. 380-1000 nm mit einer veränderten Farbgebung zur Verfügung. Solche Kameras werden auch als

Vollspektrum-Kameras bezeichnet und finden Einsatz z.B. in der Kriminalistik oder Forensik, in der kunsthistorischen Bildanalyse sowie in der Profi- und Hobbyfotografie.

### NIR-Filter (cut-on-filter)

Bei einer Kamera ohne Sperrfilter lässt sich mit Hilfe eines NIR-Filters (engl. cut-on filter), der vor ein Objektiv geschraubt werden kann, der sichtbare Bereich des Spektrums weitgehend blockieren und somit nahezu nur der Nahinfrarotbereich erfassen. In diesem Spektralbereich ergeben sich einige interessante Effekte, die im Folgenden beschrieben werden.

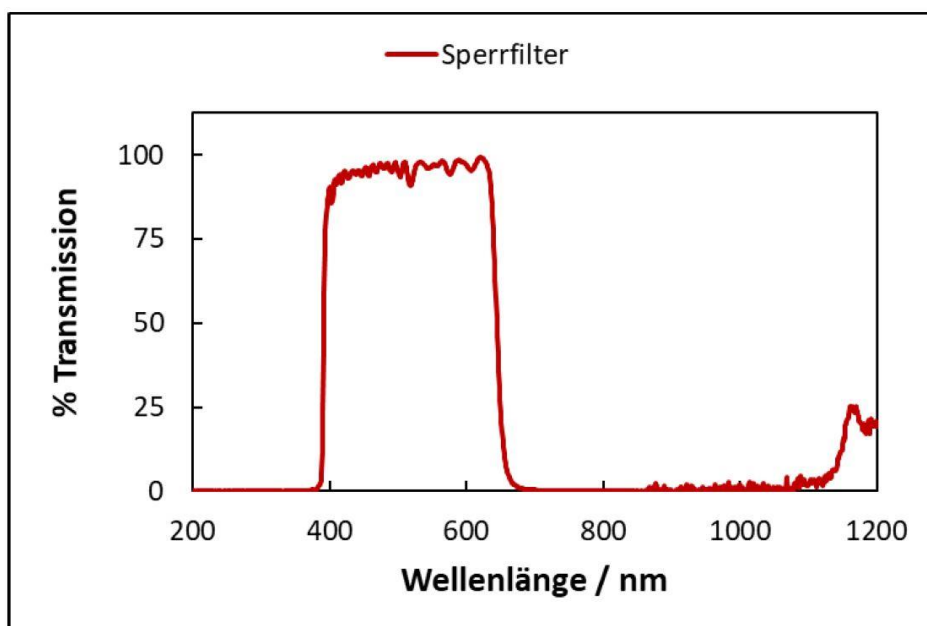


Abb. 4: Transmissionskurve eines NIR-Sperrfilters.



Abb. 5a: (links) 695 nm Filter auf Buchtitel im Sichtbaren aufgenommen mit Sperrfilter nach Umwandlung in Schwarz-Weiß.

Abb. 5b: (rechts) 695 nm Filter auf Buchtitel im NIR mit 830 nm Filter aufgenommen nach Umwandlung in Schwarz-Weiß.

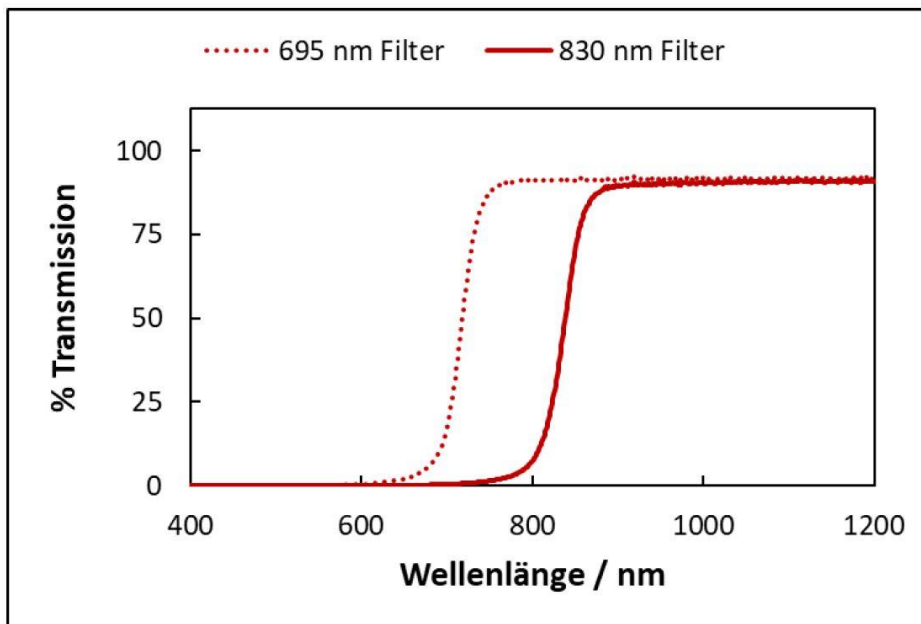


Abb. 6: Transmissionskurven zweier NIR-Filter.

Abbildung 5a zeigt einen NIR-Filter, der erst ab 695 nm Strahlung durchlässt. Im sichtbaren Spektralbereich verdeckt er daher teilweise den schwarzen Buchtitel. Abbildung 5b zeigt den gleichen Filter mit einer Kamera ohne Sperrfilter jedoch

mit einem 830 nm Filter fotografiert, um den NIR-Bereich abzubilden. Der 695 nm Filter wird nun transparent, da er die NIR-Strahlung der Umgebung durchlässt, wodurch der nicht-transparente Buchtitel vollständig lesbar wird.

Die Durchlässigkeitskurven zweier NIR-Filter für 695 nm und 830 nm sind in Abbildung 6 dargestellt. Während der 695 nm Filter noch etwas sichtbares Licht im roten Spektralbereich abgeschwächt hindurchlässt, lässt der 830 nm Filter nur noch NIR-Strahlung passieren.

Weitere Informationen zu den Grundlagen der NIR-Fotografie und deren spezielle Effekte findet man z.B. in [5].

### Regenbogen und NIR-Bogen

Bei Regen und gleichzeitigem Sonnenschein lässt sich je nach Tropfengröße ein doppelter Regenbogen beobachten. Der intensivere der beiden ist der Hauptregenbogen und resultiert aus einmaliger Reflexion des Sonnenlichts innerhalb der Regentropfen. Der schwächere ist der Nebenregenbogen und ist etwa doppelt so breit wie der Hauptregenbogen. Er resultiert aus zweimaliger Reflexion des Lichts innerhalb der Tropfen. Seine Farbfolge ist zudem umgekehrt zu der des Hauptregenbogens [6].

Abbildung 7a zeigt einen doppelten Regenbogen im Sichtbaren. In Abbildung 7b ist der gleiche doppelte Regenbogen wie in Abbildung 7a fotografiert, allerdings mit einer Vollspektrum-Kamera mit 695 nm Filter, so dass fast nur die Nahinfrarotstrahlung den Sensor erreicht. Vom Hauptregenbogen ist nur das sich an das Rot anschließende Nahinfrarotband zu erkennen sowie einige innenliegende Interferenzbögen.

Vom Nebenregenbogen ist nur noch ein sehr schwaches Band zu sehen. Der Abstand von Haupt- zu Nebenregenbogen ist bei der NIR-Aufnahme (Abbil-



Abb. 7a: (links) Doppelter Regenbogen im Sichtbaren aufgenommen mit Sperrfilter. Der schwarze Doppelpfeil markiert den Abstand beider Regenbögen etwa in der Mitte (Brennweite: 24 mm).

Abb. 7b: (rechts) Doppelter Regenbogen im NIR mit 695 nm Filter nach Umwandlung in Schwarz-Weiß. Der weiße Doppelpfeil markiert den Abstand beider NIR-Bögen etwa in der Mitte (Brennweite: 22 mm).





Abb. 8a: (links) Landschaft (Roche de Vergisson) im Sichtbaren aufgenommen mit Sperrfilter (Brennweite: 55 mm).

Abb. 8b: (rechts) Landschaft (Roche de Vergisson) im NIR aufgenommen mit 695 nm Filter nach Umwandlung in Schwarz-Weiß. Der rote Pfeil markiert eine Reihe von Nadelbäumen in ferner Distanz (Brennweite: 70 mm).

dung 7b) gegenüber der Farbaufnahme mit Sperrfilter verkürzt. Diese Verkürzung resultiert hauptsächlich aus der Innenlage der NIR-Bänder sowie zu einem geringen Anteil aus kleinen Brennweitenunterschieden zwischen dem Foto im Sichtbaren zu dem im NIR-Bereich.

Eine weitere Besonderheit der NIR-Aufnahme in Abbildung 7b besteht darin, dass die ursprünglich grüne Vegetation weiß erscheint (Wood-Effekt) [7] und der Himmel sehr dunkel. Der grüne Blattfarbstoff Chlorophyll sowie die anderen gelben und roten Blattfarbstoffe absorbieren nur im sichtbaren Spektralbereich und nicht im nahinfraroten. Sie sind daher NIR-transparent.

Die inneren Blatt- bzw. Pflanzenstrukturen weisen jedoch viele Grenzflächen mit variierenden Brechzahlen auf, so dass sie die NIR-Strahlung besonders stark an diesen streuen [8, 9].

### Trübung und verbesserte Fernsicht

Je nach Staub- und Feuchtegehalt der Luft wird durch Streuung, besonders im kurzwelligen Wellenlängenbereich, die Fernsicht negativ beeinträchtigt. Dies führt dazu, dass Objekte in Richtung Horizont unscharf werden, verblässen und einen bläulichen Farbstich bekommen. In Abbildung 8a erkennt man dies deutlich an den entfernt liegenden Waldstreifen, die zum Horizont hin mehr blass-blau als grün erscheinen.

Bei der NIR-Aufnahme in Abbildung 8b sieht man diesen atmosphärischen Dunst nicht mehr. Fernsicht und Kontrast sind hier deutlich verbessert. Zudem lassen sich noch in großer

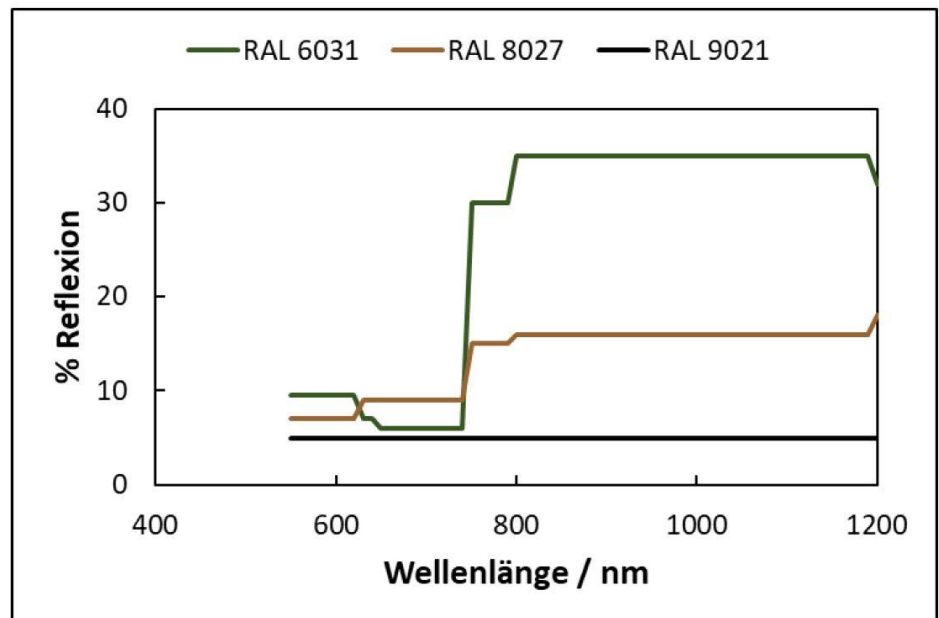


Abb. 9: Reflexionsprofile der drei Bundeswehr Tarnfarben RAL 6031-F9, RAL 8027-F9 und RAL 9021-F9 nach [11].

Entfernung Laub- von Nadelbäumen unterscheiden, was im Sichtbaren nur schwer möglich ist.

Im Tierreich wurde bei manchen Fischarten eine evolutionäre Anpassung ihrer Augen an die Gewässertrübung beobachtet [10]. Da Streueffekte von der Wellenlänge abhängen – kurzwelliges Licht wird am stärksten gestreut, langwellige Strahlung weniger stark – bringt es Sichtvorteile, wenn die Empfindlichkeit im Nahinfrarot jenseits der 800 nm erhöht werden kann.

### Tarnfarben

Die Bundeswehr hat in ihren technischen Lieferbedingungen Anforderungen definiert, die bestimmte Tarnfarben erfüllen müssen [11]. Für die drei Tarnfarben

Bronzegrün (RAL 6031-F9), Lederbraun (RAL 8027-F9) und Teerswarz (RAL 9021-F9) sind die Reflexionsdaten für einen Teil des sichtbaren sowie des nahinfraroten Spektralbereichs festgelegt. Die Reflexionseigenschaften von RAL 6031-F9 sind denen von grüner Vegetation nachempfunden. Mit knapp 10% Reflexion um 550-620 nm erscheint die Farbe dunkelgrün. Im Roten, also um 700 nm, zeigt der Farbton ein Reflexionsminimum um 6% und im NIR, also ab 750 nm, besitzt er mit ca. 35% die höchste Reflexion. RAL 8027-F9 weist eine leicht erhöhte Reflexion im NIR-Bereich gegenüber dem sichtbaren auf. Nur Teerswarz zeigt eine konstante Reflexion von 5% sowohl im sichtbaren als auch im NIR-Bereich bis

1200 nm. RAL 9021-F9 ist somit keine NIR-reflektierende Farbe.

Tarnfarben für Objekte oder Textilien sollen sowohl im sichtbaren als auch im nahinfraroten Bereich weitgehend mit der Umgebung verschmelzen [12]. Der NIR-Bereich ist von Bedeutung, da Nachtsichtgeräte mit Restlichtverstärkern oder NIR-Kameras eingesetzt werden, die in diesem Wellenlängenbereich empfindlich sind.

Auch bei kommerziell erhältlichen Textilien mit Tarnmuster werden mitunter NIR-reflektierende Farben verwendet, wie die Abbildungen 10a und 10b demonstrieren.

Im sichtbaren Bereich verschmelzen die dunkelgrünen Farbflächen am besten mit dem grünen Pflanzenbewuchs. Im NIR-Bereich sind dies die hellgrünen Farbflächen, während die dunkelgrünen sowie die braunen Flecken dem Ast- und Rindenmaterial des Baumes am ähnlichsten sind.

Das dunkelgrüne Nylon-Gurtband in Abbildung 10a erscheint in der NIR-Aufnahme (Abbildung 10b) sehr hell. Der Grund hierfür liegt in den Polymerfasern. Diese werden z.T. mit Titandioxid-Partikeln versponnen, um die transparenten Fasern einerseits opak zu machen und ihnen andererseits den Glanz zu nehmen [13]. Organische Pigmente, mit denen die Fasern eingefärbt werden, sind i.d.R. im NIR-Bereich transparent, so dass das Titandioxid mit seiner hohen Reflexion in diesem Bereich voll zur Geltung kommt.

Als Tarnmuster werden häufig unregelmäßige Muster verwendet, die in drei bis sechs verschiedenen Farbtönen kombiniert werden. Die Tarnfarben werden z.T. auf Basis NIR-reflektierender Pigmente formuliert und auf das Textilgewebe aufgedruckt. Seit den 1991er Jahren verwendet die Bundeswehr zwei Tarnmuster, ein Dreifarb-Flecktarn für waldarme sowie ein Fünffarb-Flecktarn für waldreiche Gebiete. Aufgrund mehrerer Auslandseinsätze in wüstenartigen sowie urbanen Regionen entstand die Notwendigkeit, die bisherigen Tarnmuster weiter zu optimieren. Hierzu wurde 2016 ein sechsfarbiger Multitarn eingeführt, der insgesamt eine höhere NIR-Reflexion zeigt als der bisherige Fünffarb-Flecktarn und zusätzlich einen Grauton enthält [14].



Abb. 10a: (links) Vierfarb-Flecktarn aufgenommen im Sichtbaren mit Sperrfilter. Der rote Pfeil markiert das dunkelgrüne Gurtband.



Abb. 10b: (rechts) Vierfarb-Flecktarn im NIR aufgenommen mit 695 nm Filter nach Umwandlung in Schwarz-Weiß. Der rote Pfeil markiert das im Sichtbaren dunkelgrüne Gurtband.

### NDVI

Der normierte Differenzen-Vegetationsindex, NDVI, ist definiert als [15]:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_R}{R_{NIR} + R_R} \quad (2)$$

mit

$R_{NIR}$ : Reflexionsgrad im NIR-Bereich (z.B. ab 830 nm bis 1000 nm)

$R_R$ : Reflexionsgrad im Rotbereich (z.B. ab 590 nm bis 700 nm)

Der NDVI stellt eine dimensionslose Kennzahl mit Werten zwischen -1 und 1 dar. Mit Hilfe dieser Werte lassen sich z.B. unzureichend getarnte Objekte auch automatisiert erkennen, unterschiedliche Bodenbedeckungsarten ermitteln sowie auch der Gesundheitszustand von grüner Vegetation erfassen und kartieren. Gesunde Vegetation zeigt nach [16] einen NDVI > 0,5. Multi- oder Hyperspektralkameras sind für solche Aufgaben jedoch besser geeignet als einfache Digitalkameras, sie sind dafür allerdings auch wesentlich teurer.

Mit Hilfe einer „normalen Kamera“ mit Sperrfilter sowie einer ohne diesen lassen sich näherungsweise auf etwas umständliche Art ebenfalls NDVI-Werte bestimmen, wie am folgenden Beispiel gezeigt werden soll.

Aus den in Schwarz-Weiß umgewandelten Fotos der Abbildung 11c und d lassen sich die Reflexionswerte bzw. Helligkeiten z.B. über kostenlose Softwareprogramme als Pixelwerte von 0-255 für ausgewählte Teilbereiche wie z.B. Gras, Laub, Kalkstein und Boden als gemittelte Werte bestimmen. Reines Schwarz würde einem Pixelwert von 0 entsprechen und reines Weiß dem Maximalwert von 255.

Mit den in dieser Arbeit verwendeten Kameras ergibt sich somit effektiv für den Rotbereich im Sichtbaren ein Wellenlängenband von ca. 590-700 nm und für den NIR-Bereich ein etwas breiteres von 830-1000 nm, wenn man die Abbildung 4 und 6 mit in Betracht zieht. Aus den jeweiligen Pixelwerten ausgeschnit-

Tab. 1: Reflexionswerte in Pixelwerten und NDVI-Werte für verschiedene Oberflächen.

Oberfläche	$R_R$ /Pixelwert	$R_{NIR}$ /Pixelwert	NDVI
Gras	71	239	0,54
Laub	14	206	0,87
Boden	143	117	0,08
Kalkstein	149	194	0,13





Abb. 11a: (oben links) Schloss Saint Aignan sur Cher aufgenommen im Sichtbaren mit Sperrfilter.

Abb. 11b: (oben rechts) Schloss Saint Aignan sur Cher aufgenommen im Sichtbaren mit Sperrfilter und 590 nm Filter.

Abb. 11c: (unten links) Schloss Saint Aignan sur Cher aufgenommen mit Sperrfilter und 590 nm Filter nach Umwandlung in Schwarz-Weiß.

Abb. 11d: (unten rechts) Schloss Saint Aignan sur Cher aufgenommen im NIR mit 830 nm Filter nach Umwandlung in Schwarz-Weiß.

tener Teilbereiche für Gras, Laub, Kalkstein und Boden lassen sich die NDVI-Werte dann nach Gleichung 2 berechnen, die in Tabelle 1 zusammengefasst sind.

Der NDVI-Wert für Gras erscheint mit 0,54 etwas niedrig, was vermutlich auf zwei Effekte zurückzuführen ist. Zum einen ist das Gras sehr kurz, weshalb der Boden mit einem Wert von 0,08 wahrscheinlich zum Teil zu dem von Gras beiträgt und diesen so etwas herabsetzt. Zum anderen wirken einige Bereiche im Gras etwas vertrocknet, wodurch der gemessene NDVI-Wert ebenfalls reduziert werden könnte. Der NDVI-Wert für Laub mit 0,87 spricht für gesunde Vegetation. Der relativ kleine Wert für Kalkstein resultiert aus den geringen Unterschieden im Reflexionsgrad dieses Materials im roten und im nahinfraroten Spektralbereich.

### NIR-Strahlung und Untergrund

In der Kunsthistorik lassen sich mit Hilfe der NIR-Fotografie Untermalungen bzw. Unterzeichnungen dann sichtbar machen, wenn Farbschichten durchdrungen werden können und die Untermalungen sich im Reflexionsverhalten der darüber liegenden Schichten unterscheiden. Hierbei kommt die für bestimmte Materialien größere Eindringtiefe der NIR-

Strahlung gegenüber dem Sichtbaren oder dem UV zum Tragen. Vorzeichnungen mit Kohle oder Graphit können somit unterhalb farbiger Schichten wieder zum Vorschein gebracht werden [17]. In manchen Fällen ist es auch möglich, eine Grundierung unterhalb einer Deckbeschichtung sichtbar zu machen. Die Abbildungen 12a und 12b zeigen zwei schwarze Proben, von denen die eine mit

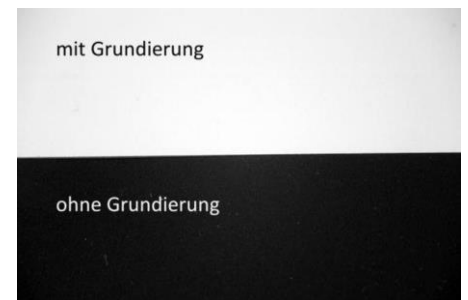
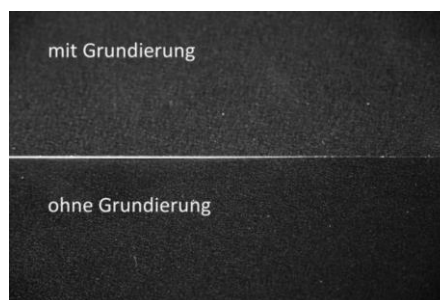


Abb. 12a:(links) Schwarze Blechproben mit und ohne Grundierung aufgenommen im Sichtbaren mit Sperrfilter nach Umwandlung in Schwarz-Weiß.

Abb. 12b:(rechts) Schwarze Blechproben mit und ohne Grundierung im NIR aufgenommen mit 695 nm Filter nach Umwandlung in Schwarz-Weiß.



einer hoch NIR-reflektierenden weißen Farbe mit Titandioxid als Pigment grundiert wurde. Obwohl beide Proben im Sichtbaren schwarz erscheinen, deckt die NIR-Fotografie deutliche Unterschiede im Untergrund auf, ohne dass die Beschichtungen zerstört werden müssen.

### NIR-Strahlung und Sicherheitsmerkmale

Um Ausweise oder Banknoten vor Fälschungen zu schützen, beinhalten diese viele unterschiedliche Sicherheitsmerkmale. Einige sind im UV-Bereich aktiv, andere im sichtbaren sowie im NIR-Bereich. Bei einem 100 Euro Geldschein werden z.B. bestimmte Sicherheitstinten verwendet, so dass einige der dargestellten Symbole und Ziffern, die im sichtbaren gut erkennbar sind (Abbildung 13a), im NIR-Bereich teilweise oder sogar ganz verschwinden (Abbildung 13b).

### Fazit

Heutige Digitalkameras bieten relativ preiswerte Möglichkeiten, den Nahinfrarotbereich fotografisch oder auch analytisch zu nutzen. Ein klarer Vorteil liegt in der zerstörungsfreien Untersuchung NIR-durchlässiger Oberflächen. Wegen der hohen Akzeptanz und Verbreitung von Mobiltelefonen ist prinzipiell ein großes Potenzial preiswerter NIR-Anwendungen gegeben, wenn diese zusätzlich mit NIR-Kameras mit entsprechendem Filter ausgestattet würden. Die gewonnenen Daten ließen sich mittels entsprechender Auswertoptionen (Apps) aufbereiten und analysieren.

### Literatur

- [1] B. Neumann, *Analytik News*, 2019
- [2] H. Kuchling, *Taschenbuch der Physik*, 1988, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main, S. 268
- [3] H. Kuchling, *Taschenbuch der Physik*, 1988, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main, S. 386
- [4] E. Limpert, W. A. Staehl, *Bericht über die 53. Tagung 2002 der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs BAL Gumpenstein*, S. 1-22
- [5] K. Mangold, J. A. Shaw, M. Vollmer, *Eur. J. Phys.* 34, 2013, 51-71
- [6] K. Mütze, L. Foitzik, W. Krug, G. Schreiber, *ABC der Optik*, Verlag Werner Dausien, Hanau am Main, 1972, S.744
- [7] R. Wood, *The Century Magazin*, 1910, 565-572
- [8] E. B. Knipling, *Remote sensing of Environment* 1 (1970), 155-159
- [9] D. M. Gates, H. J. Keegan, J. C. Schleiter, V. R. Weidner, *Applied Optics*, Vol. 4, No. 1, 1965, 11-19
- [10] D. Shcherbakov, A. Knörzer, S. Espenhahn, R. Hilbig, U. Haas, M. Blum (2013) *Sensitivity Differences in Fish Offer Near-Infrared Vision as an Adaptable Evolutionary Trait*. *PLoS ONE* 8(5): e64429.
- [11] TL 8010-0002, 2011, S. 1-17
- [12] L. V. Wake, R. F. Brady, *DSTO Materials Research Laboratory*, Australia, 1993, 1-36
- [13] *Weiss ist Farbe Kronos Titan*, Kronos Titan-GmbH, 1978, S. 44

- [14] *Deutsche Soldaten bekommen neue Uniform* *WirtschaftsWoche* (2016)
- [15] *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*
- [16] T. Schüttler, R. Girwidz, S. Zepp, *Phy-Did* 1/16 (2017), S. 81-90
- [17] *Gemäldeuntersuchung mit Infrarotstrahlung*



Abb. 13a: (links) 100 Euro Banknote im Sichtbaren aufgenommen mit Sperrfilter.



Abb. 13b: (rechts) 100 Euro Banknote im NIR aufgenommen mit 830 nm Filter nach Umwandlung in Schwarz-Weiß.