

# Qualitätsanforderungen an die Untersuchung des Farbsinns

## 1 Untersuchungsziele

Bezüglich angeborener und erworbener Farbsinnstörungen bestehen unterschiedliche Untersuchungsziele. Bei kongenitalen Farbenfehlsichtigkeiten wird die Eignung für Berufe und Tätigkeiten, welche Anforderungen an das Farbsehen stellen, geprüft. Untersuchungsziel ist die qualitative und quantitative Diagnose der angeborenen Farbenfehlsichtigkeit (z. B. Protanomalie mit Anomalquotient  $AQ < 0,7$  bis  $0$ , Deutanomalie mit  $AQ > 1,4$  bis  $\infty$ ), um die Befähigung des Probanden beurteilen zu können.

Erworbene Farbsinnstörungen sind Symptome bei Erkrankungen der Netzhaut, der Sehbahn sowie des Kortex. Untersuchungsziel ist die qualitative und quantitative Beschreibung dieser Symptome, um zur Frühdiagnostik, Differenzialdiagnose und Verlaufskontrolle der ursächlichen Erkrankung beizutragen.

## 2 Definitionen

### 2.1 Farbempfindung

Farbe erscheint dem Betrachter als Eigenschaft der Sehobjekte. Tatsächlich ist Farbe objektiv nicht existent. Farbempfindung entsteht im visuellen System und ist Eigenschaft des Betrachters. Erst die Gleichartigkeit der Farbempfindungen der meisten Beobachter bildet die Grundlage für eine Übereinkunft der Farbbezeichnungen. Farbsehen bedeutet Kodierung

der Wellenlängen des ins Auge fallenden Lichts als Farbempfindung.

Die drei Zapfentypen unterscheiden sich in ihrer spektralen Empfindlichkeit: langwellenempfindlich, mittel- und kurzwellenempfindlich, vereinfacht als Rot-, Grün- und Blauzapfen bezeichnet. Die Empfindlichkeitsbereiche überlappen sich stark, sodass ein Lichtreiz in der Regel mehrere Zapfentypen erregt, aber in unterschiedlichem Ausmaß. Die unterschiedliche Erregung der drei Zapfentypen wird in einem mehrstufigen Prozess der Signalverarbeitung in Netzhaut und Sehbahn zur Farbempfindung umgesetzt. Werden alle drei Zapfentypen in ausgewogenem Verhältnis angeregt, resultiert die Empfindung „unbunt“ oder „weiß“. Farbempfindungen sind nicht eindeutig an objektive Eigenschaften der Farbreize geknüpft. Spektral unterschiedlich zusammengesetzte Reize können die selbe Farbempfindung bewirken: „Metamerie“, auf der z. B. das Prinzip des Anomaloskops beruht [41]. Weiterführende Literatur zu dieser Thematik findet sich bei [17, 32, 37, 40, 51].

### 2.2 Farbreize, Farbdreieck

Prinzip, Aussagekraft und Untersuchungsqualität von Farbsinntests werden mit Hilfe des Farbdreiecks verständlich, einer graphischen Ordnung aller wahrnehmbaren Farben in einem Koordinatensystem. Farbnormale Beobachter können sämtliche Farben (aller Helligkeiten) aus

drei Normfarbwertanteilen  $x$ ,  $y$  und  $z$  komponieren:

$$x+y+z=1.$$

Aus der Umformung dieser Gleichung in

$$1-(x+y)=z$$

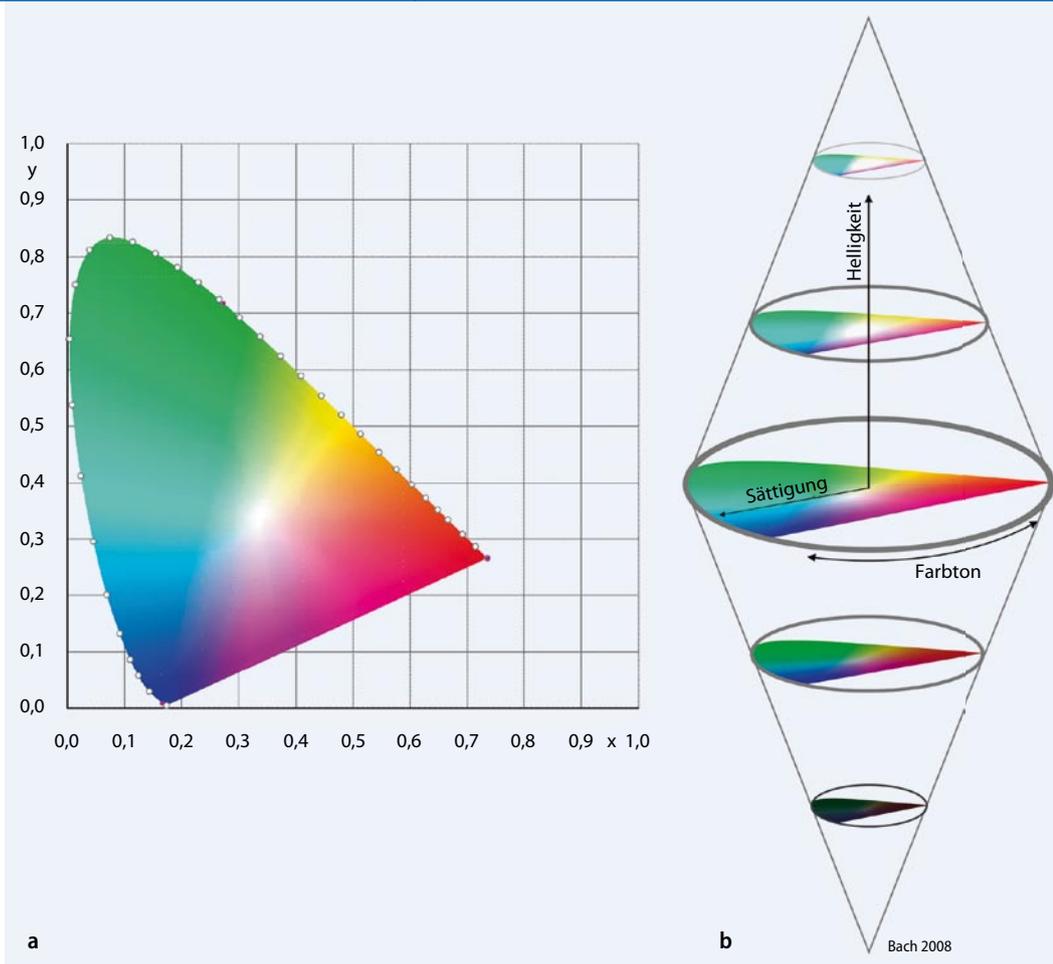
ergibt sich, dass unter Vernachlässigung der Helligkeit in einem  $x/y$ -Koordinatensystem sämtliche wahrnehmbaren Farben nach Farbton und Sättigung beschreibbar in Gestalt des Farbdreiecks sind (Übersicht bei [38]).

Auf dem äußeren Umfang des Farbdreiecks (**Abb. 1a**) finden sich die maximal gesättigten Farben, die monochromatischen Spektralreize. Die Gerade zwischen dem kurz- und dem langwelligen Endpunkt des Spektralfarbenzugs beschreibt die nicht im Spektrum vorkommenden Purpurfarben (da sie durch Mischung zweier Wellenlängen von entgegengesetzten Enden des Spektrums entstehen). Zum Inneren des Dreiecks werden die Farben ungesättigter; etwa im Zentrum liegt der maximal entsättigte Weißpunkt.

Das Farbdreieck zeigt die wahrnehmbaren Farbtöne für ein Helligkeitsniveau, in welchem maximal viele Farbtöne un-

---

Erarbeitet durch die DOG-Kommission zur Qualitätssicherung sinnesphysiologischer Untersuchungsverfahren und Geräte. Die Kommission besteht derzeit aus: U. Schiefer (Tübingen, Vorsitzender), M. Bach (Freiburg, Stellvertretender Leiter), F. Dannheim (Hamburg), M. Foerster (Berlin), M. Gräf (Gießen), H. Jägle (Regensburg), H. Krastel (Heidelberg), J. Weber (Köln), W. Wesemann (Köln), E. Zrenner (Tübingen).



**Abb. 1** ◀ **a** CIE-Farbdreieck (Normfarbtabelle der internationalen Beleuchtungskommission, Commission internationale de l'éclairage, CIE; die Abbildung beruht auf Farbkoordinaten aus [48]). Die Achsen x und y sind anschaulich schwer zu deuten, sie entstehen aus einer Transformation, die mit rein positiven Koeffizienten den Farbraum beschreibt. **b** Veranschaulichung der Zusammenhänge von Farbton, Farbsättigung und Helligkeit/Leuchtdichte. Mit zunehmender sowie abnehmender Helligkeit wird das aufgespannte Farbdreieck (**a**) kleiner, da weniger Sättigung wahrgenommen wird

terschieden werden können. Bei niedriger oder höherer Helligkeit (entsprechende Farbdreiecke „darüber und darunter“) können weniger Farbtöne unterschieden werden. Deswegen kommt es bei der Farbsinnprüfung auf Einhaltung richtiger, ausreichender und reproduzierbarer Beleuchtung an.

### 2.3 Verwechslungsfarben, Verwechslungslinien

Fehlt ein Zapfentyp, so werden jene Farben verwechselt, die normalerweise durch differente Erregung eben dieses Zapfentyps unterschieden werden. Sie liegen (■ **Abb. 2**) auf zapfenspezifischen Protan- (Rotzapfen-), Deutan- (Grünzapfen-) und Tritan- (Blauzapfen-)Verwechslungslinien.

Unterwertigkeit eines Zapfentyps verringert die Farbunterschiedsempfindlichkeit entlang seiner Verwechslungslinien. Schwächung der Rot-Grün-Opponentz, z. B. bei Ganglienzellschäden, führt zu ei-

ner neutralen Zone in Rot-Grün-Richtung. Schwächung des Blau-Gelb-Opponentz-Mechanismus dehnt den Weißpunkt zu einer neutralen Zone in Blau-Gelb- (Tetartan-)Richtung. Verschiebung des Absorptionsmaximums eines Zapfepigments wie auch Schädigung eines Opponentz-Mechanismus verringert die Farbunterschiedsempfindlichkeit an allen Orten im Farbdreieck in Richtung der jeweiligen Verwechslungslinien bzw. neutralen Zonen.

Die Farben der Bildpunkte von Sehzeichen und Umfeld einer pseudoisochromatischen Tafel sind verschiedenen Abschnitten je einer Verwechslungslinie entnommen. Für die Erfassung von Protan-, Deutan-, Tritan- und Tetartanstörungen werden deshalb verschiedene pseudoisochromatische Tafeln benötigt, bei denen es außer auf die Richtung der Verwechslungen im Farbdreieck auch auf die Distanz der Farborte und auf die Helligkeiten ankommt.

Bei Farbflecktests (■ **Abb. 3**) stellt der Patient seine eigenen Verwechslungslinien dar, indem er die Farbmarken Schritt für Schritt in Abfolge seiner Wahrnehmung ordnet. Die Zahl der verfügbaren unterschiedlichen Farbtöne (d. h. die Zahl der Testmarken) begrenzt die diagnostischen Möglichkeiten. Farbflecktests mit geringer Zahl der Prüfmarken (Panel D 15) haben deshalb eine niedrigere Sensitivität als solche mit größerer Zahl (85 beim 100-Hue-Test), als pseudoisochromatische Tafeln (zusätzlich Variation von Größe und Helligkeit der Bildpunkte) und als Anomaloskope (Farbmischung zwischen 545 nm und 666 nm in 146 Schritten oder kontinuierlich). Auf dem geraden Abschnitt des Spektralfarbenzugs (obere rechte Seite des Farbdreiecks) verlaufen die Protan- und Deutan-Verwechslungslinien in identischer Richtung; deshalb lassen sich Protan- und Deutanstörungen im Anomaloskop gleich gut erfassen. Innerhalb des Farbdreiecks unterscheiden sich die Richtungen von Protan- und Deutan-

Verwechslungslinien; deshalb sind Pro-  
tan- und Deutanstörungen mit einer Pig-  
mentfarbentafel allein nicht optimal zu er-  
fassen.

## 2.4 Abhängigkeit der Farbwahrnehmung von den Bedingungen der Darbietung

Farbempfindung ist von den Bedingungen  
abhängig, unter denen die Farbreize be-  
obachtet werden. Deren Reproduzierbar-  
keit ist Voraussetzung für reproduzierbare  
Untersuchungsergebnisse:

- der Adaptationszustand des visuellen Systems,
- auf die Beobachtungsdistanz korri-  
gierte Refraktion,
- konstante Eigenschaften der Prüfreize  
hinsichtlich des Sehwinkels (d. h. ins-  
besondere konstante Beobachtungs-  
distanz), spektraler Zusammenset-  
zung und Leuchtdichte,
- Zeitdauer der Darbietung,
- konstante Eigenschaften der Umfeld-  
beleuchtung: spektrale Zusammen-  
setzung, Leuchtdichte und Beleuch-  
tungswinkel.

Werden die Prüfreize in dunkler Umge-  
bung dargeboten, bleiben die Farben von  
ihrer Umgebung unbeeinflusst („unbezo-  
gene Farbe“). Diese Bedingung ist in Ano-  
maloskopen verwirklicht.

## 2.5 Chromatische Sehschärfe

Die chromatische Sehschärfe ist erheb-  
lich niedriger als die schwarz-weiß-Seh-  
schärfe, wenn wirklich nur Farbu-  
nterschiede die Sehzeichen vom Hinter-  
grund abheben (sog. Äquilibrium oder Iso-  
luminanz). Typischerweise werden jedoch  
farbige Sehzeichen auf andersfarbigem  
Grund getestet, wobei sowohl Farbton-  
wie Leuchtdichteunterschiede vorlie-  
gen (Abschn. 5.1.4). Bei pseudoisochro-  
matischen Tafeln ist ihre maximale Er-  
kennungsdistanz Ausdruck der chroma-  
tischen Sehschärfe [12]. Generell ist die  
Farbwahrnehmung vom Sehwinkel des  
Objekts oder Prüffelds abhängig, beson-  
ders auffällig bei Dichromaten [33]. Im  
Anomaloskop verbessert sich die Farbu-  
nterscheidung mit Vergrößerung des Test-  
felds [16, 17, 43].

## Zusammenfassung · Abstract

Ophthalmologie 2009 · 106:1083–1102 DOI 10.1007/s00347-009-1976-3  
© Springer-Verlag 2009

H. Krastel · G. Kolling · U. Schiefer · M. Bach

### Qualitätsanforderungen an die Untersuchung des Farbsinns

#### Zusammenfassung

Die Untersuchung des Farbensehens in der  
Praxis umfasst ein breites Spektrum hand-  
licher und diagnostisch informativer Metho-  
den. In dieser Vielfalt kommt es auf die ziel-  
führende Auswahl und richtige Handhabung  
der einzelnen Verfahren an. In dieser Über-  
sicht soll die sinnvolle Anwendung der Me-  
thoden und die Vermeidung typischer Feh-  
ler aufgezeigt werden, um die Einhaltung von  
Qualitätsstandards der guten klinischen Pra-  
xis zu erleichtern.

Einführend werden einige Aspekte der  
Physiologie des Farbensehens angesprochen,  
die für das Verständnis der Untersuchungs-  
methoden, ihrer Möglichkeiten und ihrer  
Fehler wichtig sind. Bei angeborenen Stö-  
rungen wird die Eignung für Berufe und Tä-  
tigkeiten geprüft, welche Anforderungen an  
das Farbsehen stellen. Bei erworbenen Stö-  
rungen ergänzt die Untersuchung des Far-  
bensehens die Diagnostik von Erkrankungen

der Netzhaut, der Sehbahn sowie des Kortex  
und bietet Möglichkeiten zur Früherkennung  
und zu Verlaufskontrollen. Bei angebore-  
nen und erworbenen Farbsinnstörungen lie-  
fern Farbtests unterschiedliche Befunde und  
müssen differenziert eingesetzt und beur-  
teilt werden, ein breites Methodenspektrum  
wird diesbezüglich dargestellt. Fehlerquel-  
len infolge technischer Merkmale der Appa-  
raturen und solchen beim Ablauf der Unter-  
suchungen werden erläutert. Als Vorlage für  
zuverlässige Dokumentation wird ein Mus-  
terformular angegeben. Eine Tabelle mit vie-  
len derzeit in Deutschland kommerziell er-  
hältlichen Geräten und Tests schließt die Dar-  
stellung ab.

#### Schlüsselwörter

Farbsinn · Farbsinntests · Sehfunktion ·  
Sinnesphysiologie · Qualitätskontrolle

## Quality demands on the assessment of colour vision

#### Abstract

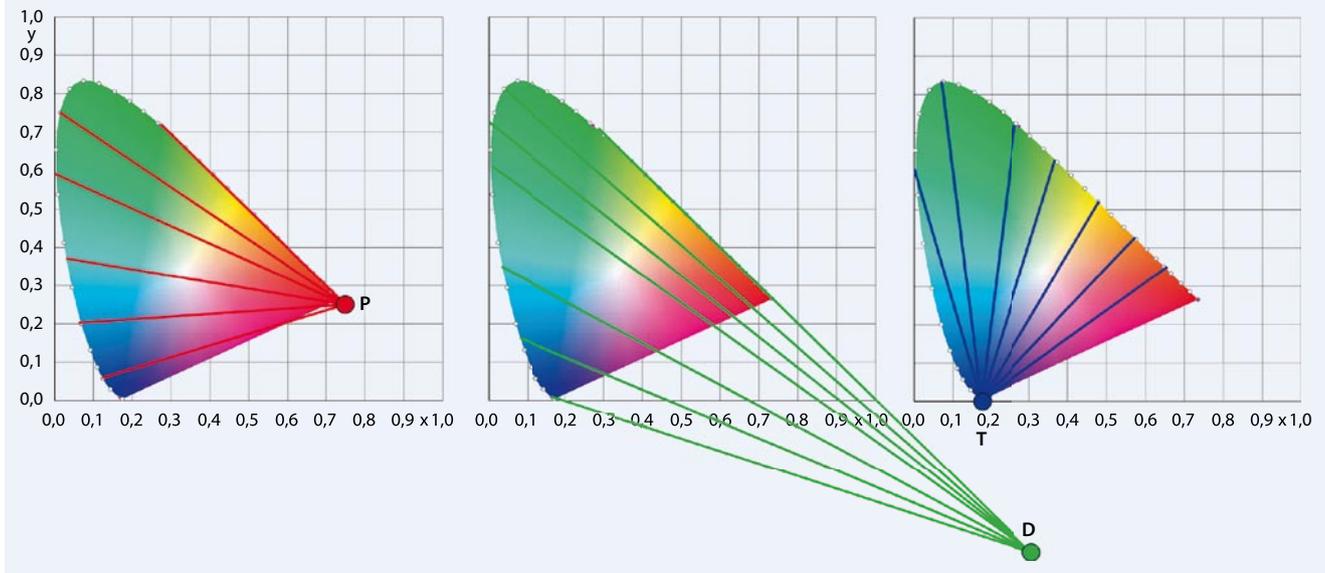
Assessing colour vision comprises a wide  
spectrum of methods, many of which are  
practical and highly informative. Given this  
methodological variety this review aims to  
help select the most appropriate test and  
how to correctly execute it, thus achieving  
the highest quality.

Some aspects of the physiology of co-  
lour vision are covered as far as is necessary  
for a basic understanding of colour testing  
methodology and possible pitfalls. For con-  
genital colour anomalies most pertinent are  
questions of occupational aptitude. For ac-  
quired colour deficiencies assessing colour vi-  
sion supplements diagnostics of the retina

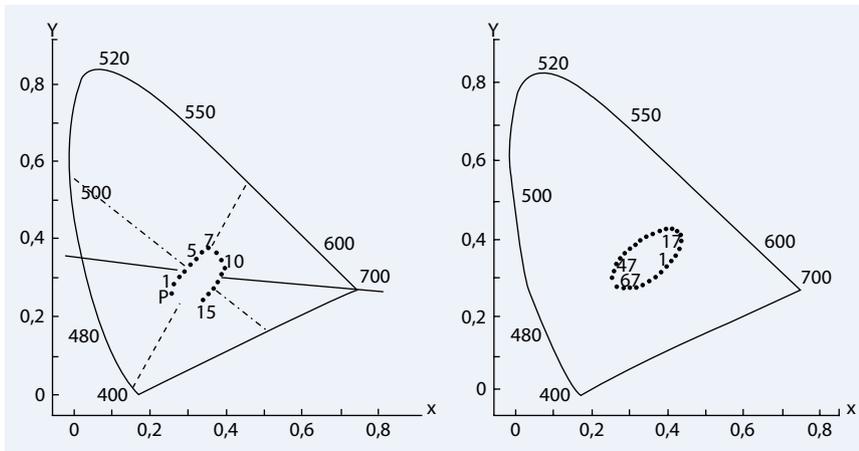
and the visual pathway, allowing both early  
diagnosis and/or monitoring. For both these  
fields colour tests provide different kinds of  
evidence and need to be adequately select-  
ed. Methodical artefacts due to both equip-  
ment design properties and testing proce-  
dures are highlighted so they can be avoided.  
A form is presented for recording colour ex-  
amination results commensurate with quali-  
ty objectives. Finally, a tabular overview of 19  
common colour vision tests is provided.

#### Keywords

Colour vision test · Colour vision · Visual func-  
tion · Sensory physiology · Quality control



**Abb. 2** ▲ Protan-Verwechslungslinien (*links*), Deutan- (*Mitte*) und Tritan-Verwechslungslinien (*rechts*) im CIE-Farbdreieck (s. auch **Abb. 1**). Die Verwechslungslinien verbinden alle Punkte, die die verbleibenden beiden Rezeptortypen identisch reizen und treffen sich in jeweils einem gemeinsamen Kardinalpunkt (engl. „copunctal“ oder „confusion point“). Der Kardinalpunkt entspricht der „virtuellen Farbe“, an dem die beiden jeweils anderen, normalen Zapfen gar nicht aktiviert werden. Die spektrale Empfindlichkeit der M-Zapfen („grün“) überlappt stark mit jener der L-Zapfen („rot“). Die L-Zapfen lassen sich relativ leicht mit langwelligem Licht isoliert aktivieren (Kardinalpunkt P), der M-Zapfentyp hingegen ist nur mit einem virtuellen Licht isoliert aktivierbar, deshalb liegt der Kardinalpunkt D so weit außerhalb des CIE-Farbdreiecks



**Abb. 3** ▲ Farborte des Panel-D-15-Farbflecktests, gesättigte Version (*links*), und des 100-Hue-Tests (*rechts*), Normlichtart C. (Nach [2])

### 3 Indikationen

#### 3.1 Angeborene Farbsinnstörungen

Etwa 8% der männlichen und 0,4% der weiblichen Bevölkerung Europas weisen kongenitale, X-chromosomal vererbte Rot-Grün-Farbsinnstörungen auf, denen Veränderungen der Photopigmente und/oder Mangel der betreffenden Zapfen zugrunde liegen: Protanomalie, Protanopie, Deuteranomalie, Deuteranopie. Die Fehlfunktion betrifft nur den Rot-Grün-Sinn.

Der Blausinn ist normal. Angeborene Anomalien des Blausinns (dominante Tritanomalie bzw. Tritanopie) sind in Europa äußerst selten und kaum von praktischer Bedeutung, hier ist der Rot-Grün-Sinn normal. Für alle vorgenannten Farbsinnstörungen sind Sehschärfe und Weiß-Gesichtsfeld unbeeinträchtigt.

Ein Funktionsausfall bzw. eine Funktionsminderung aller Zapfentypen liegt bei autosomal-rezessiver Achromatopsie (treffender: Stäbchenmonochromasie) in kompletter bzw. inkompletter Form

vor. Funktionsausfall der lang- und mittelwellig empfindlichen Zapfen prägt die X-chromosomale Blauzapfenmonochromasie. Gemeinsam sind den Achromatopsien ausgeprägte Farbsinnstörungen bis zum reinen Stäbchensehen, verminderte Sehschärfe, vermehrte Blendung, Nystagmus und ein pathologisches Gesichtsfeld v. a. bei roten Prüfmarken. Eine ophthalmologische Untersuchungsindikation besteht in der Abgrenzung gegenüber progressiven Erkrankungen (die sich natürlich nicht nur auf Farbsinnstest stützt). Entsprechende Netzhauterkrankungen sind z. B. juvenile Makuladystrophien und Zapfendystrophien, beim Sehnerv autosomal-dominante Optikusatrophie (ADOA). Für weiterführende Information verweisen wir auf Buchpublikationen, Handbuchartikel und Übersichtsarbeiten, z. B. [3, 11, 14, 15, 17, 21, 22, 25, 37, 40, 50, 51].

#### 3.1.1 Verkehrs- und Arbeitsmedizin

Für Tauglichkeit zur Kraffahrt (Personenbeförderung und LKW-Verkehr), Schiff-, Bahn- und Luftfahrt, bei Polizei, Bundeswehr, Grenzschutz, Zoll- und Forstdienst bestehen Richtlinien und Vorschriften, welche die Anforderungen an das Farbsehen definieren. Intaktes Farbsehen

ist ein Eignungsmerkmal auch in Berufen, für die keine konkreten Vorschriften bestehen, z. B. Lackierer, Drucker, Elektriker, Zahnärzte, Forstwirtschaft, Maleireibetriebe, Modebranche, (Farb-)Designer etc. [34]. Farbsinntests dienen auch zur Erkennung von Eignung und Belastungen am Arbeitsplatz. Sie sind Teil der berufsgenossenschaftlichen Grundsätze G 25 und G 37.

## 3.2 Erworbene Farbsinnstörungen

Erworbene Farbsinnstörungen gehen den Störungen anderer neuroretinaler Funktionen voraus und begleiten sie dann fortschreitend mit der Einschränkung der übrigen Sehfunktionen:

- Makulopathien werden durch Pseudoprotanomalie früh erfasst (Morbus Stargardt, Zapfendystrophien), retinale Intoxikationen auch durch Blausinnstörung (Chloroquin/Quensyl, Digitalis, Antidepressiva),
- Retinopathien werden durch Blausinnstörung früh erfasst (diabetische Retinopathie, bei Retinitis pigmentosa und deren Konduktorinnen auch Blauerimetrie),
- Optikopathien durch Blausinnstörung (ganglienzellbedingt: ADOA, beginnende Ethambutol-Optikopathie) und Rot-Grün-Sinn-Störung (erregungsleitungsbedingt; Optikusneuritis, zunehmende Ethambutoloptikopathie),
- Glaukome durch Blaugesichtsfeld,
- Hypophysenprozesse durch Rotgesichtsfeld,
- Sehbahnischämien durch Hemidyschromatopsie vor Hemianopsie bei Insult,
- Intoxikationen und Effekte chronischer Exposition (Tabak, Alkohol, Leime, Lösungsmittel) bewirken vor der Visusreduktion Farbsinnstörungen.

Erworbene Störungen des Blausinns sind häufiger als solche des Rot-Grün-Sinns, möglicherweise bedingt durch den kleineren dynamischen Bereich des Blausinns [10, 45]. Für weiterführende Informationen verweisen wir auf Buchpublikationen, Handbuchkapitel und Übersichtsartikel: [11, 15, 17, 22, 25, 26, 37, 39, 50, 51]

## 4 Methoden

### 4.1 Auswahl unter den zahlreichen Methoden von Farbsinnuntersuchungen

Die Wahl der Methode bei Farbsinnuntersuchungen orientiert sich an folgenden Zielen:

- Detektion angeborener oder erworbener Farbsinnstörungen: mit Farbtafeln (bevorzugt für Rot-Grün-Sinnstörungen) oder Farbflecktests (bevorzugt für Blausinnstörungen),
- qualitative und quantitative Diagnostik: differenzierte Farbflecktests und Anomaloskope,
- Verlaufskontrolle erworbener Störungen: Anomaloskop, Farbflecktests sowie unter Nutzung des Prinzips der chromatischen Sehschärfe (Abschn. 2.5/5.1.4) auch Tafeln,
- Erfassung und Verlaufskontrolle der befallenen Gesichtsfeldregion bei erworbenen Störungen: nach Topographie und Defekttiefe mit Farbperimetrie,
- Bildschirmtests, z. B. zur Bestimmung der Farbkontrastschwelle, bei erworbenen, weniger bei angeborenen Farbsinnstörungen werden voraussichtlich in Zukunft einen breiteren Raum in der Untersuchungspalette einnehmen (s. Anmerkungen Abschn. 4.7).

Die diagnostischen Aussagen der verschiedenen Verfahren sind nicht gleichwertig, sondern quantitativ und qualitativ unterschiedlich [17, 21]. Je nach Fragestellung ist z. B. die Reinheit der Spektralreize besonders wichtig, z.B. bei angeborenen Farbfehlsichtigkeiten, oder der Grad der Entsättigung von Pigment- oder Bildschirmfarben, z. B. bei erworbenen Farbsinnstörungen.

### 4.2 Verfahrensprinzipien

Man unterscheidet zwischen Farbtests mit nichtselbstleuchtenden gedruckten Pigmentfarben (bei diesen ist die richtige Beleuchtung unabdingbarer Bestandteil des Verfahrens), Tests mit spektral breitbandigen Lichtreizen (Glühlampe plus Farbfilter) sowie Farbtests mit spektral schmal-

bandigen Lichtreizen (Bildschirmleuchtstoffen und Leuchtdioden) und Tests mit monochromatischen Spektrallichtern (Anomaloskopen).

### 4.3 Pseudoisochromatische Tafeln

Dies sind im Wesentlichen Suchtests auf angeborene oder erworbene Farbsinnstörungen. Zwar wurden auch Tafeln zur Differenzialdiagnose und zur Graduierung von Farbsinnstörungen angegeben; wegen der fest vordefinierten Farb- und Helligkeitswerte können solche differenzierten diagnostischen Aussagen mit Tafeln jedoch nur unvollkommen getroffen werden. Die Ishihara-Tafeln testen den Rot-Grün-Sinn, Velhagen-Broschmann den Rot-Grün- und Blausinn. Die Ichikawa SPP<sub>1</sub>-Tafeln sind für angeborene, die SPP<sub>2</sub>-Tafeln für erworbene Farbsinnstörungen optimiert. Die von Neitz und Bailey neu überarbeiteten AO-HRR-Tafeln prüfen Rot-Grün- und Blausinn. Weitere Details finden sich in **Tab. 2 – 8**.

### 4.4 Farbfleck- oder Farbordnungstests

Sie sind nach Anzahl der Prüfmarken und damit Differenziertheitsgrad als orientierende Tests (z. B. Panel D 15 nach Farnsworth [9], entsättigte Version nach Lanthony [24]), als semiquantitative (28-Hue-Test nach Roth [39]) oder als quantitative Verfahren zu bewerten (Farnsworth-100-Hue-Test [9] und der New-Colour-Test nach Lanthony [35, 36]).

Der ursprünglich zur Trennung farbnormaler von farbenfehlsichtigen Beobachtern konzipierte Panel-D-15-Test (daher „dichotomous test“, d. h. Aufteilung in zwei Gruppen [9]) vermag diese Aussage nicht mit Sicherheit zu treffen. Er erfasst Rot-Grün- und Blausinnstörungen mit begrenzter Sensitivität. Blausinnstörungen werden wegen des geringeren Auflösungsvermögens des Blausinns besser erfasst als Rot-Grün-Sinnstörungen. Manche Deuteranomale, selten Protanomale, bewältigen den Panel-D-15-Test korrekt. Es handelt sich dabei meist um sicher einstellende Anomale (Einstellbreite ihrer Rayleigh-Gleichung am Anomaloskop 0 bis 5 Skalenteile). Tests, die den Farbkreis in eine größere Anzahl von Stufen auflö-

sen, sind sensitiver (28 Hue nach Roth mit 28 Prüfmarken, FM 100 Hue nach Farnsworth mit 85 Prüfmarken). Entsättigte Tests bieten eine höhere Sensitivität bei geringerer Spezifität.

Zur Quantifizierung der Resultate wurden verschiedene Fehlerkalkulationen angegeben (z. B. [4, 47], u. a. eine internetbasierte Auswertung [46]). Die Fehlerrichtung (Protan, Deutan, Tritan, Tetrantan) ergibt sich aus der Richtung der Verwechslungen (D 15 und 28 Hue) bzw. der regionalen Häufung von Fehlern (FM 100 Hue). Der FM 100 Hue untersucht den Farbkreis nicht in einem Zug, sondern in 4 Sektoren. Dadurch sind, anders als bei D 15 und 28 Hue, keine Verwechslungen quer über den Farbkreis möglich. Stattdessen kommt es zu Endbox-Artefakten beim Übergang von einem Sektor auf den nächsten [28, 29].

#### 4.5 Verfahren mit Lichtreizen breiter spektraler Bandcharakteristik

Verfahren mit Glühlampe plus Farbfiltern in Sehtestgeräten können als Suchtest (z. B. Oculus), als semiquantitativer Test (z. B. Rodenstock-Farbttestscheibe [13]) und als quantitatives diagnostisches Verfahren (Lovibond Colour Vision Analyzer) konzipiert sein, während sog. Laternentests (in Deutschland kaum in Gebrauch) nur bestimmte Fähigkeiten prüfen, jedoch keine eigentliche Diagnostik leisten.

#### 4.6 Farbtests mit spektral schmalbandigen Lichtreizen, Leuchtdiodentests

Leuchtdioden stehen in ihren spektralen Eigenschaften zwischen Pigmentfarben und monochromatischen Spektralreizen. Das Prinzip der stillen Substitution [7] und die spektrale Helligkeitsverteilung werden im Gerät „OSCAR“ nach Éstevéz mit Leuchtdioden verwirklicht und zur Protan-Deutan-Unterscheidung X-chromosomaler Farbsinnstörungen genutzt. „OSCAR“ erfasst auch Konduktorinnen (mit ihren nur geringen Farbsinnstörungen). Andere Geräte imitieren pseudoisochromatische Tafeln, indem sie deren Bildpunkte durch Leuchtdioden ge-

nerieren (z. B. APT-Test nach Massof und Severns).

Zahlreiche Leuchtdiodengeräte mit einem den Anomaloskopien angenäherten Aufbau wurden angegeben und reklamieren z. T. auch die Bezeichnung „Anomaloskop“. Leuchtdioden ohne zusätzlich angepasste Filter können jedoch keine anomaloskopgleichen Resultate liefern, weil die spektralen Eigenschaften nicht erfüllt werden (Anomaloskopnorm DIN 6160, Fachnormenausschuss Farbe 1996, Abs. 4). Viele derartige Geräte weichen auch in anderen Modalitäten der Darbietung ihrer Farbreihe ab, sodass sie nur eine orientierende Diagnostik erlauben. Diese Geräte auf Leuchtdiodenbasis ohne angepasste Filter weisen also eine Diskrepanz zwischen ihrem Anspruch und den erreichbaren Untersuchungsergebnissen, gerade im Hinblick auf Sicherstellung der Untersuchungsqualität, auf.

#### 4.7 Bildschirmverfahren

Bildschirmverfahren für die Farbsinnprüfung unterliegen einer raschen Entwicklung. Eine Standardisierung hat noch nicht stattgefunden. Die Farben werden aus den anteiligen Emissionen der drei Bildschirmleuchtstoffe generiert. Bildschirmverfahren prüfen, zentral oder auch peripher, Farbkontrastschwellen für farbige Optotypen und für Muster auf andersfarbigem Hintergrund oder stellen pseudoisochromatische Tafeln auf dem Bildschirm nach. Valide Verfahren zur Prüfung von Farbkontrastschwellen auf Bildschirmen stammen u. a. von der Arbeitsgruppe um Arden [1, 49], von King-Smith et al. [18], von Nimsgern u. Lang [23] und von Mollon u. Reffin [27]. Auch pseudoisochromatische Tafeln werden als Bildschirmversion angeboten, z. B. zum Herunterladen aus dem Internet. Doch noch nicht ausgeräumt sind Bedenken gegen abweichende Farbwiedergabe bei unterschiedlichen Bildschirmtechnologien, mangelnde Kalibration, Einfluss von Umgebungsbeleuchtung und andere Möglichkeiten unsachgemäßen Umgangs mit internetbasiertem Testmaterial.

Zwei Merkmale können, auch in der Vielfalt der Bildschirmverfahren, dem

Anwender helfen, die Validität einer Methode einzuschätzen:

- Photometrische und kolorimetrische Kalibrierungen des Bildschirms sind notwendig und müssen vom Anwender wiederholt werden können.
- Das physiologische Konzept des Verfahrens darf nicht im Widerspruch zu den technischen Möglichkeiten stehen. Insbesondere weisen LCD-Bildschirme erheblich andere Übertragungseigenschaften und Farborte auf als die herkömmlichen CRT-Bildschirme; Verfahren der Bildschirmlinearisierung müssen dem Rechnung tragen [44].

Eine Anomaloskopfunktion ist auf üblichen Bildschirmen prinzipiell nicht möglich, denn Voraussetzung sind definierte monochromatische Spektralreize (DIN 6160, Abs. 4). Die Leuchtstoffe der Bildschirme sind weder von ihrer spektralen Breite noch von der dominanten Wellenlänge ihrer Emission für die Anomaloskopie geeignet. Insbesondere kann das Prinzip des Abgleichs einer additiven Mischung zweier Farbreihe mit einem davon spektral differenter dritten Farbreihe („Metamerie“) nicht erfüllt werden, weil Bildschirmfarben identischen Aspekts auch identische Emissionsgemische der Bildschirmleuchtstoffe zugrunde liegen.

#### 4.8 Anomaloskope

Qualitative und quantitative Diagnostik mit spektralen Gleichungen in Anomaloskopien sind die Referenzverfahren zur Untersuchung von angeborenen Störungen des Rot-Grün-Farbsinns, kommen aber auch bei erworbenen Störungen zur Anwendung. Spektralgleichungen nutzen die Metamerie: Eine bestimmte additive Mischung zweier Spektralreize sieht einem dritten Spektralreiz gleich, dessen Helligkeit anzupassen ist. Spektrallichter der nötigen Reinheit können mit Monochromatoren (Prismen, Gittern oder Interferenzfiltern) erzeugt werden, nicht jedoch mit Leuchtdioden ohne geeignete Zusatzfilter und nicht mit Bildschirmen (s. o.).

Anomaloskope sind Einblicksgeräte. Die Beobachtung der Farbreihe ist von der Umgebung unabhängig und von den Herstellern so zu gestalten, dass in ver-

schiedenen Geräten übereinstimmende Untersuchungsbedingungen resultieren; DIN 6160, Abs. 5: Darbietung des farbigen Prüffeldes in dunkler Umgebung („unbezogene Farbe“) oder zumindest in definierter Umgebung. Normgerecht muss die Neutralstimmung des Auges durch eine Vorrichtung am oder im Gerät aufrechterhalten werden, die nach je 3 s Prüffeldbeobachtung je 3 s Weißadaptation bewirkt [8]. Längere Prüffeldbeobachtung wird Umstimmung verursachen, d. h. Adaptation an das farbige Prüffeld. Dadurch kann sich die Gleichung des Beobachters verschieben und die Farbunterschiedsempfindlichkeit verringern, d. h. die Einstellbreite vergrößern – sowohl bei Protanomalie und Deuteranomalie (Daten bei [14]), aber auch bei erworbenen Farbensinnstörungen.

#### 4.8.1 Anomaloskope mit spektraler Rot-Grün-Gleichung (Rayleigh-Gleichung)

Die Eigenschaften von Anomaloskopen mit Rayleigh-Gleichung (Rot-Grün) sind genormt (DIN 6160; [6]); Referenzgerät ist das Anomaloskop nach Nagel [32] in seiner letzten Version. Verwendet wird die Rayleigh-Gleichung in der Modifikation nach Kohlrausch: Ein halbkreisförmiges Prüffeld variabler Rot-Grün-Mischung: Grünreiz (549±3 nm) + Rotreiz (666±6 nm) und ein entsprechendes gelbes Vergleichsfeld (Gelbreiz = 589±3 nm) variabler Helligkeit werden unter einem Blickwinkel von 2° auf Gleichheit beurteilt. Die Wahl der Spektralreize aus dem geraden Teil des Spektralfarbenzugs im Farbdreieck (■ **Abb. 1a**, die rechte Grenze der Hufeisenform, 670–549 nm) bewirkt, dass die Mischung kein Sättigungsdefizit gegenüber dem spektralen Vergleichslicht aufweist und dass vollkommene Übereinstimmung der Protan- und Deutan-Verwechslungslinien besteht.

#### 4.8.2 Einstellbreite und Anomalquotient

Die meisten Beobachter beurteilen nicht nur eine einzige Rot-Grün-Mischung als übereinstimmend mit dem gelben Vergleichslicht, sondern einen Bereich benachbarter Mischungen: die Einstellbreite. Standardmäßig geprüft, auch für gutachtliche Zwecke, wird die absolute Ein-

stellbreite, die bei Neutralstimmung zu ermitteln ist (im Wechsel 3 s Farb-, 3 s Weiß-Darbietung). Die Skalenwerte des Mischlichts, welche die absolute Einstellbreite begrenzen, können zur Berücksichtigung verschiedener Geräthenormalen in Anomalquotienten (AQ) umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt mittels Rechenstab, mittels Programm im Gerät oder direkt nach der Formel:

$$AQ = [(73 - M_p) : M_p] / [(73 - M_n) : M_n].$$

Dabei ist 73 der Skalenwert des Rot-Grün-Mischlichts bei grünfreier Darbietung (oder bei rotfreier Darbietung)  $M_p$  die Mischung vom Proband und  $M_n$  die Normalmischung des benutzten Anomaloskops in Skalenteilen. Anomalquotienten unter 0,7 bis 0 beschreiben Protanomalien, solche über 1,4 bis ∞ Deuteranomalien. Dazwischen liegt der Normalbereich mit AQ 0,7 bis 1,4. Im Anomaloskop nach Nagel werden die monochromatischen Spektrallichter mit Prisma und Doppelspalt erzeugt. Die Skala von 0 bis 73 beschreibt linear die Wegstrecke der mittleren Spaltblende vom völligen Verschluss des Rotspalts (0) bis zum völligen Verschluss des Grünspalts (73). Es können auch andere lineare Skalenteilungen zwischen rotfreier Einstellung (0) und grünfreier Einstellung (z. B. 100) benutzt werden. Die Berechnung der Anomalquotienten erfolgt ganz analog durch Einsetzen der Werte in die obige Gleichung.

Selten akzeptiert ein Beobachter nur eine einzige Einstellung des Mischlichts als übereinstimmend mit dem Vergleichslicht: Für ihn ist sein Rot-Grün-Sinn mit einem einzigen AQ-Wert richtig beschrieben. Gelegentlich wird keine Einstellung, sondern nur ein Umschlagpunkt gefunden (Kontraststeigerung der Anomalen).

Bei Beobachtern mit einer merklichen Einstellbreite ergeben sich zwei Anomalquotienten entsprechend den Skalenwerten, welche die Einstellbreite begrenzen. Bei Eignungsuntersuchungen wird im Sinn der Grenzwertdefinition derjenige AQ-Wert angegeben, der von der Norm weiter abweicht (Eignungsuntersuchung bei Neutralstimmung; dabei ist Umstimmung zu vermeiden,

s. 5.2.6). Eine ergiebige Referenz über Einstellbreite, Kontraststeigerung der Anomalen, Umstimmung und Neutralstimmung ist [14].

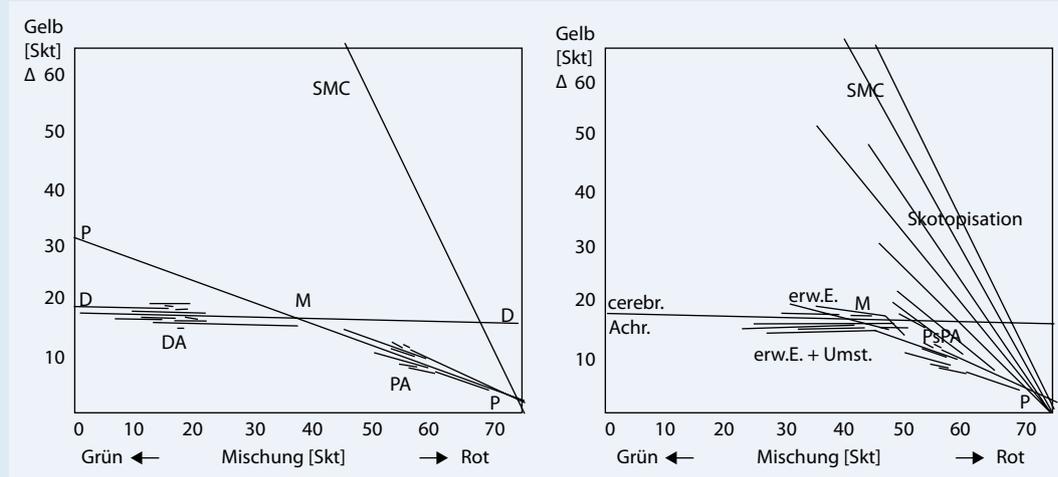
Die vom Proband wahrgenommene Helligkeit des Vergleichslichts ist ohne Einfluss auf den Anomalquotient. Der Helligkeitsverlust für Rot ist aber trotzdem wesentliches Merkmal der Protanstörungen.

#### 4.8.3 Spektrale Blau-Grün-Gleichung nach Moreland

Zur Untersuchung des Blausinns in Anomaloskopen hat die Moreland-Gleichung weiteste Verbreitung gefunden. Das Prüffeld variabler Mischung [Blaureiz (436 nm) + Türkisreiz (490 nm, frühere Version 500 nm)] wird mit einem Vergleichsfeld variabler Helligkeit [Grünblaureiz (480 nm) + Gelbreiz (580 nm)] zwecks Entsättigung zum Abgleich gebracht. Eine Entsättigung der Mischung gegenüber dem spektralen Vergleichslicht ist wegen der Krümmung des Spektralfarbenzugs im Blau-Grün-Bereich unvermeidbar [30]. Sie wird mit gelbem Entsättigungslicht des Vergleichslichts kompensiert. Wegen der schmalen spektralen Basis ist die Moreland-Gleichung für die Probanden schwieriger zu beurteilen als die Rayleigh-Gleichung. Die Moreland-Gleichung wird deshalb unter einem Beobachtungswinkel von 4° (frühere Version 2°) beurteilt. Die Spektralreize der Moreland-Gleichung wurden so gewählt, dass Einflüsse des Makulapigments minimiert sind.

#### 4.9 Farbperimetrie

Ein Merkmal der Pseudoprotanomalie bei Makulopathien ist der Helligkeitsverlust für Rot, bei Blausinnstörungen der Helligkeitsverlust für Blau. Auch in der Perimetrie bei Netzhaut- und Sehnervenerkrankungen kommen diese wellenlängenspezifischen Helligkeitsverluste zum Tragen [19]. Das macht eine Zuwachsschwellen-Perimetrie für rote und blaue Farbreize sinnvoll. Die Rotperimetrie ist außerdem zapfenspezifisch. Die Zuwachsschwellen-Perimetrie für Farbreize fordert vom Beobachter keine Farbdiskrimination, sondern nur einfache Detektion der Stimuli. Sie ist deshalb eine gut nutzbare und klinisch ein-



**Abb. 4** ▲ Diagramm nach Pitt zur Planung, Durchführung und Dokumentation der Untersuchung mittels Rayleigh-Gleichung an Anomaloskop. *Links*: angeborene Farbensinnstörungen. Untersuchung bei Neutralstimung: Prüffeldbeobachtung 3 s, Weißadaptation 3 s: absolute Einstellbreite (P–P Protanopie, D–D Deuteranopie, PA Protanomalie, DA Deuteranomalie, M Mittelnormgleichung, SMC Stäbchenmonochromasie mit extremem Helligkeitsverlust in Richtung Rot). *Rechts*: erworbene Farbensinnstörungen. Untersuchung bei Neutralstimung (Erw.E. erweiterte Einstellbreite, PsPA Pseudoprotanomalie, Skotopisation: Progression zum Stäbchensehen mit extremem Helligkeitsverlust in Richtung Rot, erw.E.+Umst. Untersuchung bei Prüffeldbeobachtung mindestens 15 s zur Umstimung, cerebr. Achr. zerebrale Achromatopsie mit Annahme aller Mischungen – 0 bis 73 Skalenteile – ohne Helligkeitsverlust)

geführte Methode. Die Rotperimetrie erfolgt auf weißem Hintergrund, die blau-selektive oder blaupräferentielle Perimetrie auf gelbem Hintergrund [42]. Letztere wurde als „Short Wavelength Automated Perimetry“ (SWAP) speziell für die Glaukom(früh)diagnostik eingeführt. Die nach wie vor nicht befriedigend gelöste Kompensation der altersbedingten „Linsenvergilbung“ steht jedoch einem breiten klinischen Einsatz, speziell in der Glaukomverlaufsbeurteilung, entgegen.

Die qualitative Beurteilung von Farb- reizen in der Peripherie des Gesichtsfelds überfordert den Beobachter. Die bisherigen methodischen Ansätze zu einer solchen Farbunterscheidungsperimetrie konnten bislang die Ansprüche an eine klinisch nutzbare Untersuchung nicht erfüllen.

## 5 Fehlerquellen

Man kann zwischen strukturellen (geräte-seitigen) und prozeduralen (untersuchungs-seitigen) Fehlermöglichkeiten unterscheiden. Letztere umfassen sowohl Fehler der Untersucher wie auch solche der Beobachter. Geräteseitige und untersuchungs-seitige Fehler können miteinander verknüpft sein.

## 5.1 Strukturelle (geräte-seitige) Fehlermöglichkeiten

### 5.1.1 Beleuchtung bei Pigmentfarbentests: spektrale Zusammensetzung

Fehlerhaft sind Glühlampenlicht sowie Leuchtstoffröhren ohne die unten genannte Spezifizierung. Auch Dreiband-leuchtstoffröhren („Energiesparlampen“: Kompaktleuchtstoffröhren) sind ungeeignet. Fehlerhaft ist auch direktes Sonnenlicht. Richtig ist mittleres Tageslicht vom nördlichen Himmel. Dies steht jedoch nicht überall und nicht in abrufbarer Qualität und Intensität zur Verfügung. Tageslichtähnliche Lichtquellen mit definierter spektraler Emission (entsprechend Normlichtart C oder D 65) und Intensität (siehe 5.1.2) sind richtig. Auf Lichteinfall etwa senkrecht zur Tafel und auf homogene Ausleuchtung ist zu achten.

Geeignete Lichtquellen sind:

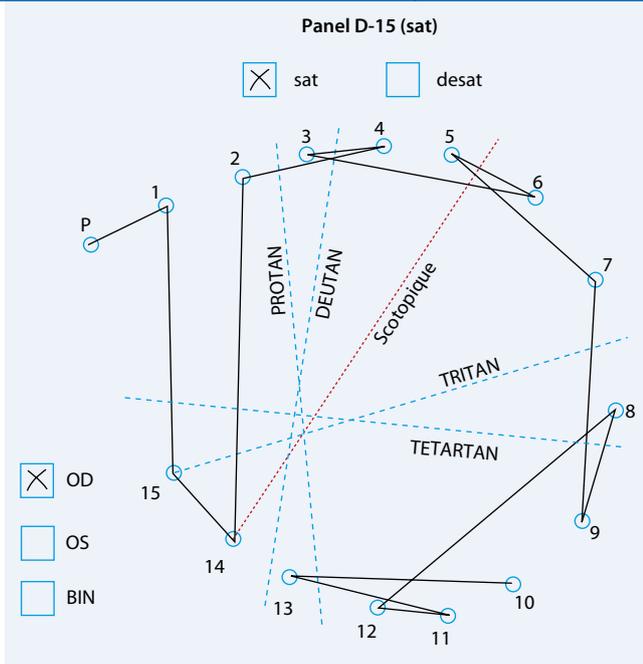
- weiße Leuchtröhren mit tageslichtähnlicher, kontinuierlicher Emission (keine Dreiband-röhren) für Zwecke der Farbabmusterung mit einer korrelierten Farbtemperatur von über 5000–6774°K und einem Farbwiedergabeindex (Ra) von über 90. Geeignet sind z. B. die Typen Osram

Biolux (nach Terstiege, Bundesanstalt für Materialprüfung), Philips TL 54, Philips TL 55 [5], Philips TL 57 oder eine Kombination aus TL 55 und 57 [37]. Auch Leuchtröhren zahlreicher anderer Hersteller genügen diesen Spezifikationen. Arbeitsplatzleuchten mit D65 Röhren werden kommerziell angeboten: Light2go, Unity Color, Wertheim.

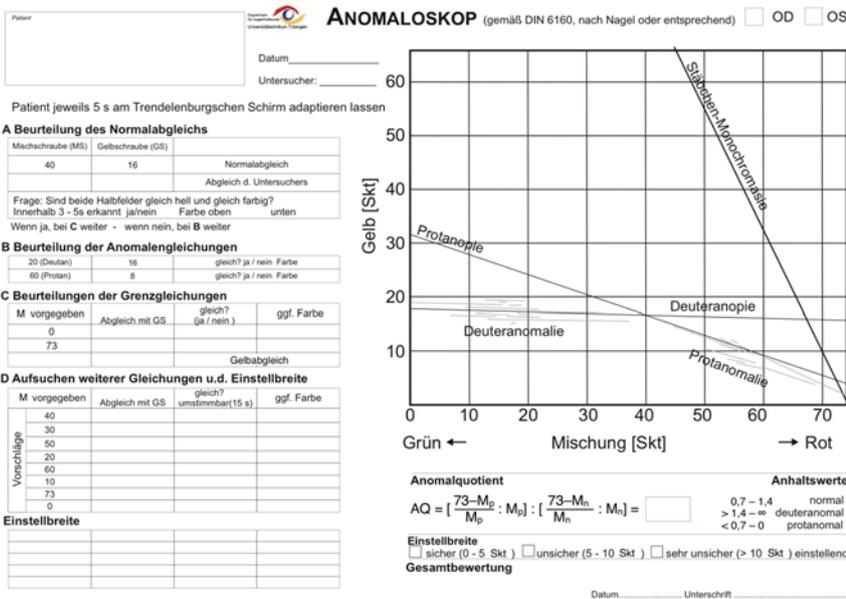
- Glühlampen mit Farbkonversionsfilter (Macbeth-Easel-Lamp, Macbeth-Easel-Lichtkabinett), sodass Normlichtart C oder D 65 erzielt wird.
- Xenon-Bogenlampen mit gleichmäßiger Emission im sichtbaren Spektralbereich, ggf. mit Filter zum Erzielen von Normlicht C oder D 65.

### 5.1.2 Beleuchtungsstärken

Beleuchtungsstärken für Pigmentfarbentests werden in der Literatur nicht einheitlich empfohlen, obwohl Einigkeit über die Relevanz der Beleuchtungsstärke bzw. der Leuchtdichte des Prüfmaterials besteht. Für erworbene Farbsinnstörungen ist die Beleuchtungsstärke besonders wesentlich. Wir empfehlen, sich im unteren Grenzbereich der Größenordnung der Vorgabe für die DIN/ISO-Sehschärfe zu orientieren, entsprechend einer Beleuchtungsstärke



**Abb. 5** ◀ Dokumentation des Panel-D-15-Tests (*sat* gesättigt nach Farnsworth [9]; *desat* entsättigt nach Lanthony [22]): Befundbeispiel einer erworbenen Farbsinnstörung. Die Achsenlage der Verwechslungen ist weniger eindeutig als bei angeborenen Farbsinnstörungen. Es zeigen sich sowohl Rot-Grün-Sinn-Störungen als auch Blau-sinnstörungen. Die Summe der Farbmarkenabstände („Intervallsumme“) beträgt hier 50, bei einem fehlerfrei gelegten Test beträgt sie 15



**Abb. 6** ▲ Dokumentation der Untersuchung mit Anomaloskop. Bei der Formel des AQ bedeutet Mp die Mischung des Probanden in Skalenteilen [Skt], Mn die Mischung des mittleren Normalprobanden an diesem Gerät. Die grünfreie Einstellung der Mischung ist, je nach Gerät, bei „73“ oder „100“ Skalenteilen

ke von ca. 400–1000 lx (oder Leuchtdichten weißen Kartons, der von der Lichtquelle angeleuchtet wird, von ca. 100–300 cd/m<sup>2</sup>).

**5.1.3 Filtereffekte durch farbige Korrektionsgläser**

Getönte Brillengläser und Kontaktlinsen bewirken abweichende und farbverfälschende retinale Beleuchtung. Je nach Filtereigenschaften kann daraus ein Erken-

nen pseudoisochromatischer Tafeln durch Farbenfehlsichtige resultieren. Das Tragen gefärbter Kontaktlinsen muss, ggf. mit Spaltlampenuntersuchung, ausgeschlossen werden. Zur Bewertung der spektralen Eigenschaften von Brillengläsern eignen sich Blitzspektrometer (z. B. im Humphrey Lens-Analyzer).

Hersteller farbiger Brillengläser oder Kontaktlinsen, die eine Korrektur von Farbsinnstörungen versprechen, drän-

gen immer wieder auf den Markt [20]. Als Beweis der Wirkung wird die Fähigkeit bewertet, mit Farbfiler pseudoisochromatische Tafeln lesen zu können. Allerdings unterlaufen dann die Fehler bei anderen Farben als sie in den Tafeln vorgegeben sind und bei Farbflecktests Fehler in anderen als den typischen Verwechslungsachsen. Sehzeichen auf pseudoisochromatischen Tafeln können auch aufgrund des filterinduzierten Helligkeitskontrasts erkannt werden. Mittels des 100-Hue-Tests lässt sich leicht zeigen, dass die Farbunterschiedsempfindlichkeit durch Farbfiler nicht verbessert, wohl aber verändert und meist verschlechtert wird.

Die negative Bewertung bisheriger Korrekturversuche von Farbsinnstörungen mit Filtern schließt nicht prinzipiell aus, dass zukünftig einzelne Anomalien des Farbsinns evtl. doch mit Filtern günstig beeinflusst werden können. Es müssten dann aber die spektralen Eigenschaften des individuellen Photopigments ebenso berücksichtigt werden wie die Adaptation der Netzhaut im spektralen Schatten des Filters und eine definierte Beleuchtung, in welcher das Filter wirken soll. Einfacher dürfte es sein, z. B. auf kalibrierten Bildschirmen die Verwechslungsfarben des Beobachters programmgesteuert durch andere Farben zu ersetzen.

**5.1.4 Beobachtungsdistanzen, -winkel und -zeiten**

Die Sehschärfe lässt sich nicht nur für schwarze Optotypen auf weißem Grund, sondern auch für farbige Sehzeichen auf andersfarbigem, helligkeitsgleichem Grund definieren: die chromatische Sehschärfe. Deshalb sind die Farbtafeln aus der vom Hersteller benannten Distanz zu beurteilen (Angabe z. B. bei Ishihara-Tafeln 75 cm, bei Velhagen-Broschmann Tafeln 70 cm). Beobachtung aus geringerer Distanz kann bewirken, dass einige Tafeln trotz Farbsinnstörung entziffert werden [12].

Der Proband hat sich initial mit dem Charakter der Optotypen vertraut zu machen. Dafür ist jedem Werk eine Demonstrationstafel vorgegeben, die trotz beeinträchtigten Farbsinns gelesen werden kann. Die Tafeln sind in etwa rechtem

**Tab. 1 Die wichtigsten erworbenen Farbsinnstörungen**

	Chloroquin, Hydroxychloroquin	Digitalis	RP	CAR	Ethambutol	Tabak/Alkohol	ADOA	Morbus Stargardt	NNO-Schub	Cat.nucl.
<b>Rot-(Ent-)Sättigung Seitenvergleich</b>									Pathologisch	o.B.
<b>Ishihara</b>	Im Verlauf pathologisch	Spät pathologisch	Spät pathologisch	(Pathologisch)	(Pathologisch)	(Pathologisch)	Spät pathologisch	Im Verlauf pathologisch	Pathologisch	o.B.
<b>Velhagen-Broschmann (Stilling-Hertel)</b>	Im Verlauf pathologisch	B früher pathologisch als R/G	B früher pathologisch als R/G	(Pathologisch)	B früher pathologisch als R/G	Pathologisch	B früher pathologisch als R/G	Im Verlauf pathologisch	Pathologisch	B pathologisch
<b>Chromatische Sehschärfe R/G Velh. 65 B Velh. 49</b>	B pathologisch später R/G	B früher reduziert als R/G	B früh pathologisch, dann R/G	R/G und B reduziert	B früh pathologisch, dann R/G	B früh pathologisch, dann R/G	B sehr früh pathologisch, später R/G		Pathologisch (R/G > B)	B pathologisch
<b>Panel-D-15-gesättigt (Farnsworth)</b>	B früh pathologisch	B pathologisch, später chaotisch	B früh pathologisch, R/G	R/G + B pathologisch	B früh pathologisch, dann R/G	B früh pathologisch, dann R/G	B früh pathologisch	B früh pathologisch, dann R/G	(R/G- und B-Fehler)	B pathologisch
<b>Panel-D-15-entsättigt (Lanthony)</b>	B früh pathologisch	B pathologisch, später chaotisch	B früh pathologisch, R/G	R/G + B pathologisch	B pathologisch, dann R/G, dann chaotisch	B pathologisch, dann R/G, dann chaotisch	B früh pathologisch, dann chaotisch	B früh pathologisch, dann R/G	R/G- und B-Fehler	B pathologisch
<b>Rayleigh-Gleichung: R/G 2°</b>	Pseudoprotanomalie zunehmend	Spät pathologisch	Spät Rotverschiebung	Früh Rotverschiebung	Später pathologisch als Pigmentfarben	Verbreit. Einstellung	Später pathologisch als Pigmentfarben	Pseudoprotanomalie bis Skotopsation	Verbreit. Einstellung	o.B.
<b>Moreland-Gleichung B 4°</b>	Zunehmend erweitert	Zunehmend erweitert	Zunehmend erweitert	Zunehmend erweitert	Verbreit. Einstellung	Verbreit. Einstellung	Früh pathologisch zunehmend verbreitert	Zunehmend erweitert	Erweitert	B-Verschiebung
<b>Rot-GF</b>	Früher pathologisch als Weiß-GF	Spät pathologisch	Viel früher pathologisch als Weiß-GF					Früh Perizentralkotom	Früher pathologisch als Weiß-GF	
<b>Blaugf</b>	Früher pathologisch als Weiß-GF	Früher pathologisch als Weiß-GF	Viel früher pathologisch als Weiß-GF		Früher pathologisch als W-GF		Sehr früh pathologisch			
<b>Arden-Colour-Contrast-Video-System</b>	B und R Schwellen früh pathologisch	B-Schwelle früher als R/G pathologisch	R und B Schwellen früh pathologisch	R und B Schwellen früh pathologisch	Früh B, dann auch G und R pathologisch	Früh B, dann auch G und R pathologisch	Früh B-Schwellen, später auch G, R pathologisch	Schwellen früh pathologisch	Schwellen früh pathologisch	B pathologisch

RP: Retinitis Pigmentosa, CAR<sub>r</sub>: carcinoma-associated retinopathy, ADOA<sub>r</sub>: autosomal dominant optic atrophy, NNO: Neuritis Nervi optici, Cat. nucl.: Cataracta nucleans, B: blau, G: grün, R: rot, GF: Gesichtsfeld.

<b>Tab. 2 Ishihara-Tafeln (Ausgaben mit unterschiedlicher Zahl der Tafeln. Empfohlen: 24 Tafeln)</b>	
Hersteller	Verlag Kanehara Shuppan, Tokyo und Kyoto, Japan
Vertrieb	Zahlreiche Vertriebsfirmen für ophthalmologischen Bedarf, Fachbuchhandel
Untersuchbare Farbsinnstörungen	Konzipiert für angeborene Rot-Grün-Sinn-Störungen, bedingt geeignet für erworbene Rot-Grün-Sinn-Störungen, keine Blausinntafeln
Konstruktionsprinzipien	1) Elemente von Sehzeichen und Hintergrund entstammen verschiedenen Abschnitten der Verwechslungslinien 2) Unterschiedliche Größe und Helligkeit der Bildelemente zwecks Camouflage
Tafeltypen	Sowohl Tafeln zu Detektion von Protan- und Deutanstörungen, wie auch Tafeln zu deren Unterscheidung. Pseudo-pseudo-isochromatische Tafeln (werden von Normalbeobachtern <i>nicht</i> erkannt, wohl aber von Farbenfehlsichtigen). Zahlentafeln und Nachführtafeln

<b>Tab. 3 Velhagen-Broschmann-Tafeln (Fortführung der früheren Stilling-Hertel-Tafeln)</b>	
Hersteller	Verlag G. Thieme, Stuttgart und Leipzig
Vertrieb	Zahlreiche Vertriebsfirmen für ophthalmologischen Bedarf, Fachbuchhandel
Untersuchbare Farbsinnstörungen	Konzipiert für angeborene Rot-Grün-Sinn-Störungen, für erworbene Rotgrünsinnstörungen, für Blausinnstörungen
Konstruktionsprinzipien	1) Elemente von Sehzeichen und Hintergrund entstammen verschiedenen Abschnitten der Verwechslungslinien 2) Größe und Helligkeit der Bildelemente unterschiedlich zwecks Camouflage 3) Tafeln zur Prüfung der Kontraststeigerung Anomaler 4) Florkontrasttafel
Tafeltypen	Sowohl Tafeln zu Detektion von Protan- und Deutanstörungen, wie auch Tafeln zu deren Unterscheidung. Tafeln zur Detektion von Blausinnstörungen. Detektion angeborener und erworbener Farbsinnstörungen. Zahlen- und Buchstabetafeln

<b>Tab. 4 Velhagen-Pflügerhaken-„E“-Tafeln</b>	
Hersteller	Verlag G. Thieme, Stuttgart und Leipzig
Vertrieb	Zahlreiche Vertriebsfirmen für ophthalmologischen Bedarf, Fachbuchhandel
Untersuchbare Farbsinnstörungen	Konzipiert für angeborene Rot-Grün-Sinn-Störungen, Blausinntafel
Konstruktionsprinzipien	1) Elemente von Sehzeichen und Hintergrund entstammen verschiedenen Abschnitten der Verwechslungslinien 2) Größe und Helligkeit der Bildelemente unterschiedlich zwecks Camouflage
Tafeltypen	Tafeln zu Detektion von Protan- und Deutanstörungen. Eine Tafel für Blausinnstörungen. Die Tafeln können sowohl mit Aussagen als auch mit Signalisieren der Richtung der Pflügerhaken sowie manuell nach dem Kongruenzprinzip genutzt werden (Ausschneiden, Übereinanderschoben)

Winkel zur Blickrichtung vorzulegen. Beobachtung aus schrägen und wechselnden Winkeln kann zu falsch-positiven Resultaten führen. Die vom Hersteller benannten Beobachtungszeiten sind einzuhalten: z. B. bei Ishihara 3 s, bei Velhagen-Broschmann sogar 15 s.

Zur Erfassung und Verlaufskontrolle erworbener Farbsinnstörungen, z. B. bei toxischer Optikusneuropathie, kann die Ermittlung der maximalen Erkennungsdistanz sinnvoll sein (chromatische Sehschärfe). Lerneffekte sind durch Anbieten identischer Farbsehzeichen in unterschiedlicher Orientierung („6“, „9“, „E“) und durch wechselnde Reihenfolge zu vermeiden.

### 5.1.5 Fehlerhafte Indikation

Tafeln zur Erfassung angeborener Rot-Grün-Farbsinn-Störungen sind so ausgelegt, dass sie von Normalbeobachtern

möglichst gut, von Rot-Grün-Farbenfehlsichtigen möglichst nicht erkannt werden, z. B. Ishihara, Ichikawa SPP I.

Tafeln zur Erfassung erworbener Rot-Grün-Sinn-Störungen sind dagegen so konzipiert, dass die Normalbeobachter sie gerade noch unterscheiden können, während erste Abweichungen von der Norm die Erkennung bereits erschweren (z. B. Velhagen „65“, „49“, Ichikawa SPP II).

Die Tafeln nach Ishihara prüfen nicht den Blausinn. Auch sind sie nicht zur Prüfung auf erworbene Farbsinnstörungen konzipiert. Ihre häufige Verwendung bei erworbenen Farbsinnstörungen ist zwar nicht grob fehlerhaft, berücksichtigt aber nicht das eigentliche Konzept dieser Tafeln.

### 5.1.6 Alterung von Pigmenten und Tafeln

Die Nutzungsdauer von Pigmentproben und Farbtafeln hängt von der Häufigkeit und dem Modus der Anwendung sowie der Dauer der Lichtexposition ab. Über die Nutzungsdauer lassen sich daher keine verbindlichen Angaben machen. Farbtafeln und Farbflecktests sind trocken und lichtgeschützt aufzubewahren und dürfen nur zur Untersuchung dem Licht ausgesetzt werden. Die Mehrzahl pseudoisochromatischer Tafeln ist berührungsfrei zu nutzen. Nachführtafeln sind durch den mechanischen Kontakt besonderer Alterung ausgesetzt. Pigmentfarbenproben und Farbtafeln mit sichtbaren Veränderungen (vergilbt, ausgebleicht, Fingerabdrücke) sind zu erneuern.

Tab. 5 Ichikawa-SPP-I-Tafeln	
Hersteller	Verlag Igaku-Shoin, Tokyo, Japan, New York, USA
Vertrieb	Zahlreiche Vertriebsfirmen für ophthalmologischen Bedarf, Fachbuchhandel
Untersuchbare Farbsinnstörungen	Konzipiert für angeborene Rot-Grün-Sinn-Störungen, nicht für Blausinnstörungen
Konstruktionsprinzipien	1) Elemente von Sehzeichen und Hintergrund entstammen verschiedenen Abschnitten der Verwechslungslinien 2) Regelmäßige Anordnung der Bildelemente, keine Camouflage, dadurch besonders hohe Anforderungen an die Farbwiedergabe
Tafeltypen	Sowohl Tafeln zu Detektion von Protan- und Deutanstörungen als auch Tafeln zu deren Unterscheidung. Zahlentafeln

Tab. 6 Ichikawa-SPP-II-Tafeln	
Hersteller	Verlag Igaku-Shoin, Tokyo, Japan; New York, USA
Vertrieb	Zahlr. Vertriebsfirmen für ophthalmologischen Bedarf, Fachbuchhandel
Untersuchbare Farbsinnstörungen	Konzipiert für erworbene Farbsinnstörungen (Rot-Grün-Sinn-Störungen, Blausinnstörungen, Skotopisation)
Konstruktionsprinzipien	1) Elemente von Sehzeichen und Hintergrund entstammen verschiedenen Abschnitten der Verwechslungslinien 2) Regelmäßige Anordnung der Bildelemente, keine Camouflage, dadurch besonders hohe Anforderungen an die Farbwiedergabe
Tafeltypen	Sowohl Optotypen zur Detektion von Blau-Gelb-Störungen, wie auch zur Detektion von Rot-Grün-Störungen. Optotypen zu deren Unterscheidung. Optotypen zu Erfassung skotopischen Sehens. Zahlentafeln

### 5.1.7 Auflage und Erscheinungsjahr pseudoisochromatischer Tafeln

Die Nennung von Auflagen-Nr. und Erscheinungsjahr wird in verschiedenen Gutachten-Richtlinien gefordert. Sie soll die von Auflage zu Auflage pseudoisochromatischer Tafeln nicht immer identische Druckqualität berücksichtigen (die Druckqualität der Ishihara-Tafeln wird von einem unabhängigen Gremium überwacht).

### 5.1.8 Farbflecktests

Die Handhabung der Farbmarken bewirkt Gebrauchsspuren. Sichtbar befleckte, verschmutzte oder in ihrer Farbfläche inhomogene Tests sind auszutauschen. Handhabung mit Untersuchungshandschuhen verlängert die Standzeit von Farbflecktests. Die im Abschnitt 5.1.4 dargestellten Richtlinien gelten entsprechend, der Prüfabstand ist Standardlesedistanz (33–40 cm).

### 5.1.9 Farbsinnprüfung in Sehtestgeräten

Zu berücksichtigen ist die Alterung der Lichtquelle (dadurch evtl. Änderung der Farbtemperatur), die Alterung der Pigmente in Filtern sowie mangelnde Ausleuchtung der Tests durch Einstauben des Geräts.

### 5.1.10 Leuchtdiodentests

Bei den zahlreichen neuen unterschiedlichen Farbsinntests auf der Basis von Leuchtdioden können im Rahmen dieser Richtlinie nicht alle möglichen Fehlerquellen behandelt werden. Eine Standardisierung existiert nicht, sodass der Anwender auf fehlerträchtige Gestaltung der Geräte selbst zu achten hat.

Typische Fehler sind:

- ungerechtfertigter herstellerseitiger Anspruch auf Anomaloskopfunktion: Ungefilterte Leuchtdioden bieten nicht die erforderliche Monochromasie und Wellenlänge.
- Prüffeld und Vergleichsfeld grenzen nicht unmittelbar aneinander.
- Das Prüffeld wird nicht in unbeleuchteter Umgebung dargeboten: Entsättigung durch Umgebungsbeleuchtung, Raum- oder Tageslicht, variable Effekte durch unterschiedliche Kontraste zur Umgebung.
- Falscher Beobachtungswinkel bzw. falsche Beobachtungsdistanz.
- Fehlende Vorrichtung zur Neutralstimmung und mangelnde Definition der Darbietungszeit, dadurch Umstimmung.

### 5.1.11 Bildschirmverfahren

Die Bildschirmverfahren zur Untersuchung des Farbsinns sind in fortlaufender Entwicklung, eine Standardisierung er-

folgte noch nicht. Geräteseitige Fehlerquellen sind:

- ungeeignete oder unkalibrierte Bildschirme (unterlassene photometrische und kolorimetrische Kalibration). Generell ist zu berücksichtigen, dass der Farbraum/Spektralraum konventioneller Bildschirmchromophore deutlich eingeschränkt ist. Das von den Bildschirmchromophoren aufgespannte Farbdreieck ist deutlich kleiner als das CIE-Farbdreieck (vgl. Abschn. 2.2 und 4.7).
- Inadäquates Untersuchungskonzept (vermeintliche Anomaloskopfunktion auf einem Bildschirm).
- Unzureichende Definition der Prüfreize, insbesondere Darbietungszeit, Beobachtungswinkel, Neutralstimmung, Sättigung (Beleuchtung durch Umgebungslicht entsättigt die Bildschirmfarben)

### 5.1.12 Anomaloskope

Anomaloskope mit Rayleigh-Gleichung haben die Vorgaben von DIN 6160 einzuhalten [6], solche mit Moreland-Gleichung die in den Publikationen von Moreland et al. genannten Werte. Die Einhaltung der Wellenlängen, Monochromasie, Strahldichten und Feldgrößen sind vom Hersteller zu gewährleisten. Die beigelegte Geräteliste führt Anomaloskope auf, die nach Herstellerangabe und/oder Evaluation das Format DIN

Tab. 7 Matsubara-Kojima-Tafeln	
Hersteller	Verlag Handaya, Japan
Vertrieb	Zahlreiche Vertriebsfirmen für ophthalmologischen Bedarf, Fachbuchhandel
Untersuchbare Farbsinnstörungen	Konzipiert für angeborene Rot-Grün-Sinn-Störungen, keine Blausinntafel
Konstruktionsprinzipien	1) Elemente von Sehzeichen und Hintergrund entstammen verschiedenen Abschnitten der Verwechslungslinien 2) Größe und Helligkeit der Bildelemente unterschiedlich zwecks Camouflage
Tafeltypen	Kindgerechte Tafeln zur Detektion von Rot-Grün-Störungen. Bildmotive. Eine nonverbale Prüfung gelingt ab einem Alter von ca. 3 Jahren, wenn man Schwarz-Weiß-Versionen der Tafeln zuordnen lässt

Tab. 8 American Optical Company Hardy, Rand-and-Rittler-Tafeln, AO-HRR-Tafeln (ab der 4. Aufl. in Bearbeitung von Neitz und Bailey)	
Hersteller	Richmond Products, Albuquerque, USA
Vertrieb	Zahlreiche Vertriebsfirmen für ophthalmologischen Bedarf
Untersuchbare Farbsinnstörungen	Konzipiert für angeborene Rot-Grün-Sinn-Störungen, bedingt geeignet für erworbene Rot-Grün-Sinn-Störungen, zusätzlich Blausinntafeln
Konstruktionsprinzipien	1) Elemente von Sehzeichen und Hintergrund entstammen verschiedenen Abschnitten der Verwechslungslinien 2) Unterschiedliche Größe und Helligkeit der Bildelemente zwecks Camouflage
Tafeltypen	Tafeln zur Detektion von Protan-, Deutan- und Tritanstörungen. Symboltafeln

6160 [6] einhalten. Vom Anwender auszuschließen sind

- unscharfe Abbildung des Prüffelds, wenn der Refraktionsfehler des Beobachters den Einstellbereich des Geräteokulars überschreitet,
- mangelnde Neutralstimmung, wenn die Konstruktion des Geräts dem Beobachter keine obligate Neutralstimmung vorgibt,
- Einblicksmöglichkeit des Probanden während der Untersuchung auf die Resultate eben dieser Untersuchung.

Speziell beim Nagel-Anomaloskop muss versehentliche Wahl des Eichmodus anstelle des Untersuchungsmodus (im Eichmodus werden einzelne Wellenlängen ausgeblendet) vermieden werden.

## 5.2 Prozedurbedingte Fehlerquellen

Besonders bei Tauglichkeitsprüfungen ist die Identität des/der Untersuchten mittels Lichtbildausweis zu prüfen und zu protokollieren. Gefärbte Korrektionsgläser oder Kontaktlinsen sind generell nicht zuzulassen. Gefärbte Intraokularlinsen, ana-

log zum Filtereffekt einer Linsenkernsklerose, sind hingegen Bestandteil des Auges und finden zurecht Eingang in das Farbsinntestergebnis.

### 5.2.1 Prozedurale Fehlerquellen bei Pigmentfarbentests

Pseudoisochromatische Tafeln:

- falsche Beobachtungsdistanz,
- falsche Beleuchtung,
- zu lange Beobachtungszeit,
- Darbietung der Tafeln dem rechten und dem linken Auge in identischer Reihenfolge,
- unterlassene Protokollierung der Resultate auf einer Liste.

Farbflecktests:

- Farbfleckteste müssen unter Aufsicht durchgeführt werden, damit die Testmarken nicht aus zu kurzer Distanz bewertet und nicht von unten betrachtet werden.
- Ein Missverständnis des Untersuchungsprinzips kann bewirken, dass der Proband die Farbmarken nicht in fortlaufenden Schritten nach Farbähnlichkeit aufreißt, sondern z. B.

nach Kategorien (rötlich-grünlich; gelblich-bläulich) sortiert.

- Interpretation der Resultate: Die Intervallsumme erlaubt eine grobe Einschätzung des Grads der Farbsinnstörung. Die Richtung der Verwechslungen oder die regionale Häufung der Fehler erlaubt eine Einschätzung des Typs. Die Sensitivität der Farbflecktests ist umso geringer, je kleiner die Zahl ihrer Farbmarken ist. Ein korrekt gelegter Panel D 15 (sogar in entsättigter Version) ist nicht gleichbedeutend mit normalem Farbhsehen, sondern kann von einigen Deuteranomalien, seltener von Protanomalien, korrekt angeordnet werden.
- Vertauschung von Farbmarken um eine Position muss keinen pathologischen Befund bedeuten, sondern kann einer mangelnden Aufmerksamkeit des Probanden entsprechen. Beim Panel D 15 kann sogar der Sprung von Pos. 8 auf Pos. 15 evtl. nur einer Flüchtigkeit des Probanden entsprechen, wenn nicht weitere Verwechslungen gleicher Richtung auftreten.
- Für Probanden, die noch keinen Farbflecktest absolviert haben, empfiehlt sich ein erster Durchgang, der zwar protokolliert, aber nicht gewertet wird. Die relevanten Befunde werden ab dem zweiten Durchgang erhoben.

### 5.2.2 Monokulare vs. binokulare Beobachtung

Untersuchungen auch angeborener Farbenfehlsichtigkeiten müssen monokular erfolgen, da Seitendifferenzen der Ausprägung X-chromosomaler Rot-Grün-Sinn-Störungen vorkommen (Beispiel: Nagel selbst) und da sich angeborene mit erworbenen Farbsinnstörungen kombinieren können. Bei der Suche nach erworbenen Störungen muss ohnehin eine monokulare Prüfung erfolgen. Ob nachgehende Kontrolluntersuchungen auf fortbestehende Berufseignung binokular durchgeführt werden können, wird unterschiedlich beurteilt. Die Kommission weist auf die Situation nach einem Schadensfall hin, wenn Vorbefunde rückblickend gutachterlich bewertet und mit

denen der aktuellen Untersuchung verglichen werden und empfiehlt monokulare Untersuchung.

### 5.2.3 Generelles zur Farbsinnprüfung in Sehtestgeräten

Eventuell kann zwischen monokularer und binokularer Beobachtung gewählt werden. Mangelnde Scharfeinstellung des Prüffelds, Geräteakkommodation, inadäquate Konvergenz und/oder Akkommodation des Beobachters können das Ergebnis beeinträchtigen.

### 5.2.4 Leuchtdiodentests

Zu kurze Beobachtungsdistanz bewirkt zu gute Resultate, zu lange Beobachtungsdauer durch Umstimmung zu schlechte Resultate. Bei Geräten mit direkter Beobachtung der Diodenoberfläche ohne Abschirmung besteht eine Störungsmöglichkeit in Form einer Entsättigung z. B. durch Raumbeleuchtung.

### 5.2.5 Bildschirmverfahren

Prozedurale Fehler sind mit den geräteseitigen Limitationen der Bildschirmverfahren eng verknüpft (Abschn. 5.1.11). Potenzielle Fehlerquellen beim Untersuchungsablauf sind:

- fehlerhafte Beobachtungsdistanz,
- mangelnde oder mangelhafte optische Korrektur für die Beobachtungsdistanz,
- Entsättigung der Bildschirmfarben durch die Umgebungs- bzw. Raumbeleuchtung,
- unterlassene photometrische und kolorimetrische Kalibration des Bildschirms.

### 5.2.6 Prozedurale Fehlerquellen bei der Untersuchung mit Anomaloskop

Vom Anwender sind bei der Untersuchung auszuschließen bzw. zu berücksichtigen:

- unscharfe Abbildung des Prüffelds. (Der Refraktionsfehler des Probanden kann den Einstellbereich des Geräteokulars übersteigen: dann ist eine Untersuchung mit Korrektionsgläsern erforderlich).
- Mangelnde Neutralstimmung. Befindet sich die Adaptationsleuchtfläche zur Neutralstimmung außen am

**Tab. 9** Nagel-Anomaloskop

Gerät/Hersteller	Anomaloskop nach Nagel [32]	Fa. Schmitt & Haensch, Berlin (nicht mehr in Produktion)
Spektrale Gleichung	Typ I	Rayleigh-Gleichung (Rot/Grün) in der Modifikation nach Kohlrausch
	Typ II (nur wenige Exemplare)	Rayleigh-Gleichung und Engelking-Trendelenburg-Gleichung (Blau/Grün mit weißer Entsättigung)
Lichtquellen	Spezielle Glühlampe für Prüffeld (nicht mehr in Produktion)	Standardglühlampe für Adaptationsfeld und für Entsättigung
Farbreize	Monochromat. Lichter entsprechend DIN 6160	Erzeugt mit Prisma und Spalt
Neutralstimmung	Adaptationsfläche außen am Gerät	Glühlampe und Mattscheibe
Entsättigungslicht (Typ II)	Wird über Strahlenteiler in den B/G Strahlengang eingekoppelt	Glühlampe, Farbkonversionsfilter
Beobachtungszeit	Durch Untersucher bestimmt	
Anomalquotient AQ	Ablesung am Gerät nur in Skalenteilen	Bestimmung des AQ mit Rechenstab oder arithmetisch gemäß Formel zur Berücksichtigung des individuellen Gerätenormals
Anmerkung	Ursprüngliches Referenzgerät der Anomaloskopie	DIN 6160 basiert auf diesem Gerät

**Tab. 10** Heidelberger Anomaloskop

Gerät/Hersteller	Heidelberger Anomaloskop	Fa. Oculus/Wetzlar (Gerät nicht mehr in Produktion)
Spektrale Gleichung		Rayleigh-Gleichung (Rot/Grün) in der Modifikation nach Kohlrausch
Lichtquellen	Leuchtdioden, Glühlampe	Emission modifiziert durch Filter
Farbreize	Monochromatische Lichter entsprechend DIN 6160	Erzeugt mit Leuchtdioden und Zusatzfiltern, Kalibration jeder Einstellung durch Rückkopplung
Neutralstimmung	Im Einblicktubus	Halogenglühlampe und Farbkonversionsfilter
Beobachtungs- und Adaptationszeiten	Vom Gerät definiert (absolute und relative Einstellbreite)	Periodische Darbietung von Farbfeld und Weißfeld im Wechsel
Anomalquotient AQ	Ablesung am Gerät auf Knopfdruck	Einstellbreite und zugehörige AQ werden angezeigt und mit diagnostischem Vorschlag ausgedruckt

Gerät, ist es für Beobachter mit Gesichtsfelddefekten erschwert, nach der Neutralstimmung das Prüffeld im Tubuseinblick wiederzufinden. Beobachter mit Protan-/Deutanstörungen tendieren zu verlängerter Betrachtung des Prüffelds.

- Einsicht des Probanden während der Untersuchung auf die Resultate eben dieser Untersuchung.
- Missverständnisse über Untersuchungsprinzip und -ablauf sowie über

die verbale Beschreibung der betrachteten Farbreize. Ein erster Untersuchungsdurchgang sollte zwar protokolliert, aber als Übung eingestuft werden. Die relevanten Befunde fallen ab dem zweiten Durchgang an.

- Verwendung von gefärbten Korrektionsgläsern oder Kontaktlinsen. Intraokularlinsen sind dagegen Bestandteil des Auges, eventuelle Farbwirkungen finden zu Recht Eingang in das Untersuchungsergebnis. Gefärbte

Tab. 11 Heidelberger Multi-Color-Anomaloskop		
Gerät/Hersteller	HMC Heidelberger Multi-Color-Anomaloskop	Fa. Oculus/Wetzlar
Spektrale Gleichungen		Rayleigh-Gleichung (Rot/Grün) in der Modifikation nach Kohlrausch sowie Moreland-Gleichung Typ II (Blau/Grün mit gelber Entsättigung)
Okulare	Normokular 2° Zusatzokular 4°	Rayleigh-Gleichung, Moreland-Gleichung
Lichtquellen	Leuchtdioden, Glühlampe	Emission modifiziert durch Filter
Farbreize	Monochromatische Lichter entsprechend DIN 6160 bzw. der Moreland-Gleichung Typ II	Erzeugt mit Leuchtdioden und Zusatzfiltern
Darbietung, Untersuchungsmodi	Anwahl auf Graphikoberfläche, manuell und automatisch, vom Steuergerät oder vom Rechner aus	Einstellung der Rayleigh-Gleichung auf dem Pitt-Diagramm, der Moreland-Gleichung auf dem B/G-Diagramm (bei Steuerung vom Rechner aus)
Neutralstimmung	Im Einblicktubus	Weiß - LED
Beobachtungs- und Adaptationszeiten	Vom Gerät definiert (absolute und relative Einstellbreite)	Periodische Darbietung von Farbfeld und Weißfeld im Wechsel
Anomalquotient AQ	Ablesung am Steuergerät bzw. am Steuerrechner	Einstellbreite und zugehörige AQ werden angezeigt und mit diagnostischem Vorschlag samt Pitt-Diagramm ausgedruckt

Tab. 12 Neitz-Anomaloskop		
Gerät/Hersteller	Neitz-Anomaloskop Typ I und Typ II	Fa. Neitz/Japan (Typ I nicht mehr in Produktion)
Spektrale Gleichung		Rayleigh-Gleichung (Rot/Grün) in der Modifikation nach Kohlrausch
Lichtquellen	Typ I: Glühlampe, Typ II: Leuchtdioden	Emissionen modifiziert durch Filter
Farbreize	Monochromatische Lichter entsprechend DIN 6160	Erzeugt mit Glühlampe bzw. Leuchtdioden und Filtern
Neutralstimmung	Adaptationsfläche außen am Gerät	Glühlampe und Farbkonversionsfilter
Beobachtungs- und Adaptationszeiten	Durch Untersucher bestimmt	
Untersuchungsmodus	Manuell	
Anomalquotient AQ	Ablesung am Gerät auf Knopfdruck	Korrektur auf das individuelle Geräte-Normal

Kontaktlinsen sind mittels Spaltlampe ausschließen.

- Die erhöhte Umstimmbarkeit durch zu lange Betrachtung des Farbfelds bei Geräten, die keine automatische Neutralstimmung im Tubuseinblick bieten. Vorsicht bei Beobachtern, die ein besonders gutes Resultat erzielen möchten und deshalb das Prüffeld besonders ausgiebig zu betrachten streben. Umstimmung kann aber auch einem tatsächlichen Befund bei angeborenen und erworbenen Farbsinnstörungen entsprechen.

- Selbsteinstellung der Farbgleichung durch den Patienten, die in der Regel zu unbefriedigenden, fehlerhaften oder bestenfalls unvollständigen Resultaten führt, da der Patient keine an die Ergebnisschritte angepasste und zielorientierte Strategie leisten kann. Auch wenn dem Patienten selbst ein Abgleich gelingt, überfordert ihn doch die Auslotung der Einstellbreite. Zur schrittweisen Anpassung des Untersuchungsgangs an die schon erarbeiteten Resultate empfiehlt sich Arbeit des Untersuchers

mit und auf dem Diagramm nach Pitt (Abb. 4).

- Das Unterlassen des Helligkeitsabgleichs vor der Frage nach Farbgleichheit. Ein unterlassener Helligkeitsabgleich führt zu besonders ausgeprägten Fehlern bei Protanstörungen, aber auch bei inkompletten Achromatopsien und bei Deutanstörungen. Vorsicht, auch nichtlineare Helligkeitsverteilungen kommen vor!
- Eine „dynamische“ Untersuchung mit fortlaufender Änderung von Mischlicht und evtl. Vergleichslicht, die der Patient bei subjektiver Wahrnehmung von Gleichheit anzuhalten hat. Mit dieser „Dynamik“ werden zusätzliche Variablen und Fehlerquellen eingeführt.

Ermittlung der Einstellbreite:

- Die Mehrzahl aller Beobachter hat eine gewisse Einstellbreite: Das heißt, der Abgleich zwischen Mischlicht und Vergleichslicht erfolgt nicht nur bei einer einzigen Mischung, sondern in einem Bereich benachbarter Mischlichter, der eine kleinere oder größere Breite aufweisen kann.
- Seltener findet sich nur ein einziger Wert der Farbmischung, der mit dem Vergleichslicht als übereinstimmend beurteilt wird.
- Ausnahmsweise, besonders bei anomalen Trichromaten mit Kontraststeigerung, findet sich kein Wert mit Übereinstimmung von Misch- und Vergleichslicht, sondern nur ein Umschlagspunkt, der dann als einziges Ergebnis zu benennen ist.
- Standardmäßig wird die absolute Einstellbreite bei Neutralstimmung ermittelt (3 s Farbbeobachtung im Wechsel mit 3 s Weißbeobachtung). Je größer die Einstellbreite, desto unexakter die Rot-Gelb-Grün-Unterscheidung des Probanden. Die relative Einstellbreite (Farbfeldbeobachtung 15 s oder länger: protokollieren) wird bei Sonderindikationen geprüft. Bei Optikopathien, insbesondere bei Optikusneuritis, ist die Zunahme der relativen Einstellbreite ein charakteristisches Symptom.
- Das Ergebnis der Untersuchung am Anomaloskop sind die Skalenwerte

der Mischlichter, welche die (absolute) Einstellbreite und die zugehörigen Helligkeitswerte des Vergleichslichts begrenzen. Es führt zur Fehleinschätzung des Ausmaßes der Farbsinnstörung, wenn man als Ergebnis nur den Mittelwert der Einstellbreite benennt, weil dabei die Farbunterschiedsempfindlichkeit unberücksichtigt bleibt. Ein anomaler Beobachter mit sicherer Einstellung (0–5 Skalenteile) verfügt über deutlich bessere Farbunterschiedsempfindlichkeit als z. B. ein extrem anomaler Beobachter mit einer Einstellbreite von einer Grenzgleichung bis zur Mittelnormgleichung, obwohl die Mittelwerte der Einstellbreiten beider Probanden übereinstimmen können.

- Je größer die Einstellbreite eines Beobachters, desto größer auch die Streuung der Skalenwerte der Mischlichter, welche sie begrenzen. Der gutachtlich relevante Grenzwert, der weiter von der Mittelnormgleichung entfernt liegt, ist evtl. mehrmals zu prüfen. Unter diesen Umständen ist eine Mittelung dieses Grenzwerts zulässig und auch zweckmäßig (nicht zu verwechseln mit dem o. g. Mittelwert der Einstellbreite). Die Mittelung des Grenzwerts erfolgt auf der linearen Skala des Anomaloskops. Erst danach wird in den Anomalquotient umgerechnet.

### 5.2.7 Fehlerquellen bei Ermittlung der Anomalquotienten (AQ)

Mischlichtskalenwerte können in Anomalquotienten umgerechnet werden, um unterschiedliche Gerätenormale einzelner Anomaloskope zu berücksichtigen. Die Mittelnormgleichungen einzelner Anomaloskope müssen nicht sämtlich bei Skalenwert 40 liegen. Abweichende Skalenwerte der Mittelnormgleichung sind bei der Berechnung der Anomalquotienten zu berücksichtigen (s. vorstehender Absatz und Abschn. 4.8.2). Zur Beschreibung des vollständigen ophthalmologischen Befunds werden die Skalenwerte derjenigen Mischlichter, welche die Einstellbreite begrenzen, in Anomalquotienten umgerechnet (s. vorstehender Absatz und Abschn. 4.8.2). Das Befundresultat besteht dann aus zwei AQ-Werten mit

Tab. 13 BKG-IF2-Anomaloskop		
Gerät/Hersteller	BKG Anomaloskop (früher: Tomey Allfarben-Anomaloskop)	Fa. BKG Bayreuth (nicht mehr in Produktion)
Spektrale Gleichungen		Rayleigh-Gleichung (Rot/Grün) in der Modifikation nach Kohlrausch, Moreland-Gleichung (Blau/Grün)
Lichtquellen	Leuchtdioden	Emissionen modifiziert durch Filter
Farbreize	Monochromatische Lichter entsprechend DIN 6160	Erzeugt mit Leuchtdioden und Filtern
Neutralstimmung	Adaptationsfläche im Tubuseinblick	Definierte Prüf- und Adaptationszeiten
Beobachtungs- und Adaptationszeiten, Untersuchungsmodi	Mehrere automatische Untersuchungsgänge, u. a. dynamischer Untersuchungsmodus, Dialog Untersucher-Programm-Proband, auch manueller Modus möglich	Definierte Beobachtungs- und Adaptationszeiten
Anomalquotient AQ	Wird vom Gerät berechnet	Ausdruck mit Diagnose

Tab. 14 Spectrum Color Vision Meter		
Gerät/Hersteller	Spectrum Color Vision Meter, früher: Anomalomètre	Fa. Interzeag/Haag-Streit, Schweiz (nicht mehr in Produktion)
Spektrale Gleichungen		Rayleigh-Gleichung (Rot/Grün) in der Modifikation nach Kohlrausch. Moreland-Gleichung Typ I und II (Blau/Grün mit gelber Entsättigung) sowie zahlreiche weitere Spektralgleichungen (z. B. nach Roth)
Okular	Okulartubus, mit definierter Umfeldbeleuchtung, zur winkeltgerechten Beobachtung, zum Aufstecken	Auch direkte Beobachtung auf der Frontmattscheibe möglich
Lichtquellen	Halogenleuchte	Lichtleiter zur Frontmattscheibe
Farbreize	Monochromatische Lichter entsprechend DIN 6160 bzw. den Moreland-Gleichungen sowie weiteren Spektralgleichungen	Zahlreiche Interferenzfilterkombinationen für verschiedene Spektralgleichungen können in den Strahlengang eingesteckt werden
Untersuchungsmodi	Manuell und automatisch, vom Rechner aus. Stufenweises „scanning“, orientierend oder mit hoher Auflösung	Zunächst Ermittlung einer Helligkeitsverteilung. Entlang dieser dann Ermittlung der Einstellbreiten
Neutralstimmung	Im Tubuseinblick	Periodische Darbietung von Farbfeld und Weißfeld im Wechsel
Anomalquotient AQ	Ermittlung durch Rechner	Ausdruck mit Diagramm nach Roth [40, 41]

Angabe der zugehörigen Helligkeiten des Vergleichsfelds.

Der Anomalquotient ist auch das gutachtlich relevante Resultat. Bei Beurteilung von Tauglichkeit und Eignung ist, im Sinn der Definition eines Grenzwerts, welcher nicht überschritten werden darf, derjenige Anomalquotient als einziger zu benennen, der vom Normalwert am weitesten abweicht.

### 5.3 Farbperimetrie

Auf die Farbunterschiedsperimetrie wird in diesem Beitrag nicht eingegangen. Wegen des für den Beobachter großen Schwierigkeitsgrades und der dadurch unsicheren Resultate hat sie bislang keine klinische Anwendung gefunden.

Die Zuwachsschwellenperimetrie für farbige Prüfpunkte, kinetisch und statisch (z. B. SWAP [42]), weist analoge Prinzipien und Fehlerquellen wie die Standard-weiß-auf-weiß-Perimetrie auf.

**Tab. 15 Panel-D-15-Test nach Farnsworth (gesättigte Version)**

Hersteller	Luneau, Chartres und Paris, Frankreich
Vertrieb	Zahlreiche Vertriebsfirmen für ophthalmologischen Bedarf
Untersuchbare Farbsinnstörungen	Erfasst Rot-Grün-Sinn-Störungen und Blausinnstörungen sowie die skotopische Verwechslungsachse (Stäbchensehen)
Konstruktionsprinzipien	Gemeinsames Prinzip der Farbflecktests nach Farnsworth, Lanthony und Roth: Ordnung von Farbfleckmarken. 15 Prüfmarken und die vordefinierte Startmarke konstituieren einen Farbkreis, den der Beobachter nach der von ihm empfundenen Farbähnlichkeit zu ordnen hat. Qualitative Diagnose durch Verwechslungen in Richtung der typischen Verwechslungsachsen. Orientierende Quantifizierung durch Ermittlung der Intervallsumme
Anmerkung	Begrenzte Sensitivität. Durchführung unter Aufsicht

**Tab. 16 Entsättigter D-15-Test nach Lanthony**

Hersteller	Luneau, Chartres und Paris, Frankreich
Vertrieb	Zahlreiche Vertriebsfirmen für ophthalmologischen Bedarf
Untersuchbare Farbsinnstörungen	Erfasst Rot-Grün-Sinn-Störungen und Blausinnstörungen sowie die skotopische Verwechslungsachse (Stäbchensehen)
Konstruktionsprinzipien	Wie Panel D 15, jedoch geringere Sättigung der Farbreize
Anmerkung	Sensitivität besser; Spezifität besonders im Blaubereich geringer als beim gesättigten Panel D 15. Durchführung unter Aufsicht

**Tab. 17 28-Hue-Test nach Roth**

Hersteller	Luneau, Chartres und Paris, Frankreich
Vertrieb	Zahlreiche Vertriebsfirmen für ophthalmologischen Bedarf
Untersuchbare Farbsinnstörungen	Erfasst Rot-Grün-Sinn-Störungen und Blausinnstörungen sowie die skotopische Verwechslungsachse (Stäbchensehen)
Konstruktionsprinzipien	Analog Panel D 15, jedoch konstituieren 28 Prüfmarken und die vordefinierte Startmarke den Farbkreis. Quantifizierung durch Ermittlung der Intervallsumme
Anmerkung	Bessere Sensitivität und Differenzierung in Protan-, Deutan-, Tritan-, Tetartan- und skotopische Verwechslungen, weil der Farbkreis in mehr Schritte aufgelöst ist. Durchführung unter Aufsicht

Der Patient ist darauf hinzuweisen, dass es nicht auf Farberkennung, sondern nur auf Wahrnehmung der Stimuli ankommt. Zusätzlich zu berücksichtigen ist bei der Zuwachsschwellenperimetrie für Farbstimuli, dass angeborene X-chromosomale Farbsinnstörungen vom Protan-Typ eine ausgeprägte Konstriktion des Rot-Gesichtsfelds bewirken. Auch Konduktoren für Protanomalie und Protanopie weisen eine Konstriktion ihres Rot-Gesichtsfelds auf. Die Pseudoprotanomalie bei Makulaleiden bewirkt demgegenüber ein Zentralskotom für Rot [19]. Die blau-selektive oder blaupräferenzielle Perimetrie wird durch die Absorption in der Linse, insbesondere bei gelblicher Kernkatarakt beeinflusst.

## 6 Befunddarstellung – Befundwiedergabe – Dokumentation

Die Ergebnisdarstellung erfolgt auf einem speziellem Befundbogen. Für die Farbsinnuntersuchung ist, analog zum Gesichtsfeld und zum Dämmerungssehen, ein spezifisch formalisierter Befundbogen zu verwenden. Für die Qualitätssicherung hat ein solcher Bogen den Vorteil, dass er dem Untersucher eine Richtschnur für sein Vorgehen bietet.

Die Darstellung der Befunde soll graphisch und numerisch erfolgen. Für die Farbflecktests sind die Auswerteschemata der Fa. Luneau zu benutzen, die Intervallsumme ist zusätzlich anzugeben (Abb. 5). Die Intervallsumme („total error score“) ist die Summe der Absolutdifferenzen der Kappennummern (die

Startkappe P zählt als Null). Um das grobe Maß der Intervallsumme zu verbessern, gab Bowman [4] ein Verfahren an, dass die perzeptuellen Abstände der Kappenfarben im CIElab-Raum berücksichtigt, der resultierende Score liegt normalerweise bei  $11,1 \pm 0,4$ . Jeder eindimensionale Intervallsummenwert verliert jedoch die Information über die Richtung der Verwechslungen. Vingrys und King-Smith [47] gaben ein mathematisches Verfahren mit Computer-Kode an, in dem nach Transformation in einen perzeptuellen Äquidistanzraum objektiv „Trägheitsachsen“ ermittelt werden [46].

Die graphische Darstellung der Anomaloskopergebnisse erfolgt auf dem Diagramm nach Pitt (Abb. 4). Es zeigt auf der Abszisse die Skalenwerte der Rot-Grün-Mischung, auf der Ordinate die Skalenwerte der „Helligkeiten“ des gelben Vergleichslichts. Zusätzlich zur Angabe der Skalenwerte können die Endwerte der Einstellbreite in Anomalquotienten umgerechnet werden. Die numerische Darstellung der Ergebnisse der Anomaloskopie muss in den Skalenwerten derjenigen Mischlichter bestehen, welche die absolute Einstellbreite begrenzen, mit den jeweils dazugehörigen Gelb-„Helligkeiten“. Bei Eignungsprüfungen ist der vom Normwert entfernte der beiden Anomalquotienten anzugeben (s. oben).

Eine gute Dokumentation einschließlich Pitt-Diagramm für die Anomaloskopie und Ergebnisliste gebräuchlicher Farbtafeln bieten die Tübinger Befundbögen (aktuelle Version Abb. 6). Die schriftliche Beurteilung soll das Untersuchungsergebnis diagnostisch bewerten, aber auch die Mitarbeit des Probanden einschätzen.

## 7 Qualitätsmerkmale – Qualitätskriterien

Die Qualitätsmerkmale der Untersuchung wurden vorstehend bei den verschiedenen Methoden, bei den Empfehlungen zur Befunddarstellung sowie im Abschnitt über Fehlerquellen und ihre Vermeidung im Einzelnen besprochen. Das Farbsehen ist die differenzierteste der basalen Funktionen des visuellen Systems. Entsprechend vielgestaltig sind die Methoden der Untersuchung, die Einflussgrößen

und die Fehlermöglichkeiten. Nach deren Abhandlung in den vorstehenden Paragraphen seien Eckpunkte der Qualitätsanforderungen zusammenfassend nochmals herausgestellt:

- Protokoll der Untersuchung auf speziellem Befundbogen mit Datum, Angabe des untersuchten Auges, Identifikation des Patienten (bei Gutachten Lichtbildausweis) und des Untersuchers, Angabe von Auflagen-Nr. und Erscheinungsjahr bei Tafeln,
- Beleuchtung von Pigmentfarbentests mit Normlichtart C oder D 65, mit entsprechender Lichtquelle in Arbeitsplatzleuchte oder Lichtkabinett,
- optische Korrektur adäquat zur Beobachtungsdistanz,
- ungetönte Korrektionsgläser und Kontaktlinsen, beim Anomaloskop möglichst Scharfeinstellung am Okular,
- Beurteilung von Prüffeldern, Prüfmarken und Farbtafeln aus der empfohlenen Distanz, d. h. unter dem korrekten Blickwinkel,
- kein Einblick des Probanden auf Resultate während der Untersuchung,
- Durchführung von Farbflecktests unter Aufsicht,
- Anomaloskop: Untersuchung im Rot-Grün-Bereich nach DIN 6160 [6], Standarduntersuchungsmodus: absolute Einstellbreite (Neutralstimmung),
- Darstellung der Resultate bei Farbflecktests und beim Anomaloskop in graphischer und numerischer Form.

## 8 Wichtigste erworbene Farbsinnstörungen

Die wichtigsten erworbenen Farbsinnstörungen sind in [Tab. 1](#) aufgelistet.

## 9 Gerätetabellen (Auflistung ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Pseudoisochromatische Tafeln:

- Ishihara-Tafeln ([Tab. 2](#)),
- Velhagen-Broschmann-Tafeln (Fortführung der früheren Stilling-Hertel-Tafeln; [Tab. 3](#)),
- Velhagen-Pflügerhaken-„E“-Tafeln ([Tab. 4](#))
- Ichikawa-SPP-I-Tafeln ([Tab. 5](#)),
- Ichikawa-SPP-II-Tafeln ([Tab. 6](#)),

**Tab. 18 FM-100-Hue-Test nach Farnsworth**

Hersteller	Luneau, Chartres und Paris, Frankreich
Vertrieb	Zahlreiche Vertriebsfirmen für ophthalmologischen Bedarf
Untersuchbare Farbsinnstörungen	Erfasst Rot-Grün-Sinn-Störungen und Blausinnstörungen sowie die skotopische Verwechslungsachse (Stäbchensehen)
Konstruktionsprinzipien	Prüft die Farbunterschiedsempfindlichkeit entlang des Umfangs des Farbkreises mit 85 Prüfmarken in 4 Sektoren. Deshalb keine Verwechslungen über den gesamten Farbkreis hinweg darstellbar. Regionale Fehlerhäufungen zeigen den Typ der Farbsinnstörung, die Fehlerzahl das Ausmaß. Anerkanntes Referenzverfahren. Verschiedene rechnergestützte Auswerte-Routinen wurden entwickelt [44, 45]
Anmerkung	Durchführung unter Aufsicht. Sehr zeitaufwändig, Hilfe: [44]

**Tab. 19 City-University-Test nach Fletcher**

Hersteller	Clement Clarke, U.K.
Vertrieb	Zahlreiche Vertriebsfirmen für ophthalmologischen Bedarf
Untersuchbare Farbsinnstörungen	Rot-Grün-Sinn-Störungen und Blausinnstörungen
Konstruktionsprinzipien	Prinzip des „gefrorenen“ Farbflecktests, d. h. Auswahl aus vorgegebenen Anordnungen [3]
Anmerkung	Begrenzte Sensitivität

**Tab. 20 Farbtestscheibe nach Guilino und Ledl**

Hersteller	Rodenstock, München. zurzeit nicht in Produktion
Vertrieb	Zahlreiche Vertriebsfirmen für ophthalmologischen Bedarf
Untersuchbare Farbsinnstörungen	Erfasst Rot-Grün-Sinn-Störungen. Konzipiert für angeborene Störungen des Farbsinns
Konstruktionsprinzipien	Farbreize werden mittels Glühlampe und Farbglassfilter in Sehtestgeräten dargeboten. Farbreizpaare sind vorgegeben, die der Proband auf Gleichheit und Ungleichheit zu beurteilen hat. Protan-Deutan-Differenzierung, jedoch keine Unterscheidung zwischen Anomalie und Anopie (die einem Anomaloskop vorbehalten ist)
Anmerkung	Einfachste Durchführung

- Matsubara-Kojima-Tafeln ([Tab. 7](#)),
- American Optical Company Hardy, Rand-and-Rittler-Tafeln, AO-HRR-Tafeln ([Tab. 8](#)).

Anomaloskope:

- Nagel-Anomaloskop ([Tab. 9](#)),
- Heidelberger Anomaloskop ([Tab. 10](#)),
- Heidelberger Multi-Color-Anomaloskop ([Tab. 11](#)),
- Neitz-Anomaloskop ([Tab. 12](#)),
- BKG-IF2-Anomaloskop ([Tab. 13](#)),
- Spectrum Color Vision Meter ([Tab. 14](#)).

Weitere Pigmentfarbentests:

- Panel-D-15-Test nach Farnsworth (gesättigte Version; [Tab. 15](#)),

- Entsättigter-D-15-Test nach Lanthony ([Tab. 16](#)),
- 28-Hue-Test nach Roth ([Tab. 17](#)),
- FM-100-Hue-Test nach Farnsworth ([Tab. 18](#)),
- City-University-Test nach Fletcher ([Tab. 19](#)),
- Farbtestscheibe nach Guilino und Ledl ([Tab. 20](#)).

## Fazit für die Praxis

Um Berufseignung korrekt zu bewerten sowie um Früh- und Verlaufsdagnostik von Netzhaut- und Sehnervenschäden zu unterstützen, müssen Farbensinnprüfungen richtig eingesetzt und unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt werden. Dieser Text beschreibt Geräte, Methoden und Verfahren der Prü-

**fung des Farbensinns im Hinblick auf Qualitätsmerkmale. Gerade in der Vielfalt der Möglichkeiten soll dem Anwender eine Richtschnur zur Sicherung der Untersuchungsqualität gegeben werden.**

### Korrespondenzadresse

**Prof. Dr. M. Bach**

Universitäts-Augenklinik Freiburg  
Killianstraße 5, 79106 Freiburg  
michael.bach@uni-freiburg.de

**Interessenkonflikt.** Der korrespondierende Autor gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

### Literatur

- Arden G, Gunduz K, Perry S (1988) Color vision testing with a computer graphics system: preliminary results. *Doc Ophthalmol* 69:167–174
- Birch J (1991) Colour Vision Tests: General Classification. In: Foster DH (ed) *Inherited and Acquired Colour Vision Deficiencies*. MacMillan, Basingstoke, pp 215–233
- Birch J (1993) *Diagnosis of Defective Colour Vision*. Oxford University Press, New York
- Bowman KJ (1982) A method for quantitative scoring of the Farnsworth Panel D-15. *Acta Ophthalmol (Copenh)* 60:907–916
- Dain SJ, Honson VJ (1989) Selection of an optimal light source for the FM 100 Hue test. *Doc Ophthalmol Proc Ser* 52:561–572
- DIN FNF (1996) DIN 6160:1996–02. Anomaloskope zur Diagnose von Rot-Grün-Farbenfehlsichtigkeiten. Beuth-Verlag GmbH, Berlin
- Estevez O, Spekrijse H (1982) The „silent substitution“ method in visual research. *Vision Res* 22:681–691
- Fachnormenausschuss Farbe im DIN, Obmann Jaeger W (1957) Anweisung für die Untersuchung des Farbensinns mit dem Anomaloskop. *Die Farbe* 6:115–119
- Farnsworth D (1943) The Farnsworth-Munsell 100 hue and dichotomous tests for color vision. *J Opt Soc Am* 33:568–578
- Greenstein VC, Hood DC, Ritch R et al (1989) S (blue) cone pathway vulnerability in retinitis pigmentosa, diabetes and glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 30:1732–1737
- Grützner P (1981) Angeborene Farbsinnstörungen. *Der Augenarzt*. VEB Georg Thieme, Leipzig, S 520–532
- Grützner P, Krastel H, Seybold C (1991) Validation of pseudoisochromatic plates by chromatic acuity. *Docum Ophthalmol Proc Ser* 54:199–203
- Guillino G, Ledl HL (1975) Über ein Verfahren zur Erkennung von Farbsinnstörungen im Rahmen eines Sehtests. *Augenarzt* 9:136–143
- Heinsius E (1973) Die Farbsinnstörungen und ihre Prüfung in der Praxis. Enke, Stuttgart
- Jaeger W (1987) Der diagnostische Wert der Pseudoprotonomalie für die Differenzierung zwischen Netzhaut- und Optikuskrankungen. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 191:427–429
- Jaeger W, Krastel H (1987) Normal and defective colour vision in large field. *Jpn J Ophthalmol* 31:20–40
- Jägle H (2008) Farbsinnprüfung. In: Kroll P, Kühle M, Kühle HJ (Hrsg) *Augenärztliche Untersuchungsmethoden*. Thieme, Stuttgart New York, S 39–52
- King-Smith PE, Chioran GM, Sellers KL, Alvarez SL (1983) Normal and deficient colour discrimination analyzed by colour television. In: Mollon JD, Sharpe LT (eds) *Colour Vision. Physiology and psychophysics*. Academic press London, S 167–172
- Krastel H (1993) Rasterperimetrie mit Farbreizen. In: Gloor B (Hrsg) *Perimetrie – mit besonderer Berücksichtigung der automatischen Perimetrie*. Enke, Stuttgart, S 104–127
- Krastel H (1997) Richtlinien zur Anpassung von Kantenfiltern. Zur Umsetzung und Anwendung der Heil- und Hilfsmittelrichtlinien. *Augenarzt* 5:155–159
- Krastel H (2007) Farbsinnprüfung in der Praxis. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 224:29–56
- Krastel H, Moreland JD (1991) Colour Vision Deficiencies in Ophthalmic Diseases. In: Foster DH (ed) *Inherited and Acquired Colour Vision Deficiencies*. MacMillan, Basingstoke, pp 115–172
- Nimsgern C, Lang H, Auffahrt GU, Krastel H (1997) Coldef and tritan flicker test: PC based evaluation of central and peripheral colour vision. In: Cavonius CR (ed) *Colour Vision Deficiencies XIII*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, S 351–359
- Lanthon P, Dubois-Poulsen A (1973) Le Farnsworth-15 desature Desaturated Farnsworth 15. *Bull Soc Ophthalmol Fr* 73:861–866
- Marré M, Marré E (1986) Erworbene Störungen des Farbsehens: Diagnostik. Thieme, Leipzig
- Marré M, Marré E (1991) Das Nagel-Anomaloskop in der Diagnostik von Augenerkrankungen. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 199:239–245
- Mollon JD, Reffin JP (1989) A computer controlled colour vision test that combines the principles of Chibret and Stilling. *J Physiol (London)* 414:p5
- Moreland JD (1979) The chromaticity circle. *Arch Ophthalmol* 97:2398
- Moreland JD (1989) Characteristics of the random 100 Hue observer. *Doc Ophthalmol Proc Ser* 52:463–467
- Moreland JD, Kerr J (1978) Optimization of stimuli for trit-anomaloscopy. *Mod Probl Ophthalmol* 19:162–166
- Moreland JD, Kerr J (1979) Optimization of a Rayleigh-type equation for the detection of tritanomaly. *Vision Res* 19:1369–1375
- Nagel W (1907) Zwei Apparate für die augenärztliche Funktionsprüfung. *Z Augenheilkd* 17:201–222
- Nagel WA (1907) Neue Erfahrungen über das Farbsehen der Dichromaten auf grossem Felde. *Z Sinnesphysiol* 41:319–337
- Pape R, Blankenagel A, Kaiser J (1976) Berufswahl und Auge. Die Berufseingliederung Sehgeschädigter. Enke, Stuttgart
- Pinckers A (1978) Lanthony's new color test. II. Clinical evaluation. *Ophthalmologica* 177:311–316
- Pinckers A (1978) Lanthony's new color test. Part I. *Ophthalmologica* 177:284–291
- Pokorny J, Smith VC, Verriest G, Pinckers AJLG (1979) *Congenital and Acquired Color Vision Defects*. Grune & Stratton, New York
- Richter M (1981) Einführung in die Farbmatrik. De Gruyter, Berlin
- Roth A (1966) Le test 28 Hue selon Farnsworth Farnsworth's 28 hue test. *Bull Soc Ophthalmol Fr* 66:231–238
- Roth A, Lanthony P (1999) Techniques d'exploration: Vision des couleurs. In: Risse JF (Hrsg) *Masson, Paris*, S 129–152
- Roth A, Pelizzone M, Hermes D, Sommerhalder J (1990) L'examen de la vision colorée par la méthode des deux équations métamériques. The examination of color vision using a 2 metameric equation method. *Ophthalmologie* 4:197–205
- Sample PA, Weinreb RN (1990) Color perimetry for assessment of primary open-angle glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 31:1869–1875
- Scheibner HM, Boynton RM (1968) Residual red-green discrimination in dichromats. *J Opt Soc Am* 58:1151–1158
- Sharma G (2002) LCDs versus CRTs – Color-calibration and gamut considerations. *Proc IEEE* 90:605–622
- Sperling HG (1991) Vulnerability of the blue-sensitive mechanism. In: Foster DH (ed) *Inherited and acquired colour vision deficiencies*. MacMillan, Basingstoke, pp 72–87
- Török B (2008) Web-based scoring software for the Farnsworth-Munsell 100-Hue, Roth 28-Hue, Farnsworth D-15, and the Lanthony D-15 desaturated color tests. Retrieved 2008-09-12, from <http://www.torok.info/colorvision/>
- Vingryns AJ, King-Smith PE (1988) A quantitative scoring technique for panel tests of color vision. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 29:50–63
- Wyszecki G, Stiles WS (1982) *Color Science: Concepts and methods, quantitative data and formulae*. John Wiley and Sons, New York
- Yu TC, Falcao-Reis F, Spileers W, Arden GB (1991) Peripheral color contrast. A new screening test for preglaucomatous visual loss. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 32:2779–2789
- Zrenner E (1985) Farbsinnprüfungen: Grundlagen, Messverfahren und Anwendungen bei angeborenen und erworbenen Farbsinnstörungen. In: Lund OE, Waubke TN (Hrsg) *Augenerkrankungen im Kindesalter*. Büch. Augenarzt 106. Enke, Stuttgart, pp 263–286
- Zrenner E (1987) Untersuchungsstrategien bei Farbsinnstörungen. In: Lund OE, Waubke TN (Hrsg) *Okuläre Symptome – Strategien der Untersuchung*. Büch. Augenarzt 112. Enke, Stuttgart, pp 84–101