

Kontrastsehen – eine unterschätzte Sehqualität

Michael Bach

Klinik für Augenheilkunde, Universitätsklinikum Freiburg, Albert Ludwigs-Universität Freiburg

Zusammenfassung

Unser Kontrastsehen hat eine hohe Bedeutung im täglichen Leben, z. B. im Haushalt, im Straßenverkehr und in der nichtverbalen Kommunikation. Trotz noch praktisch normaler Sehschärfe kann das Kontrastsehen so gestört sein, dass die Aktivität im Alltag beeinträchtigt ist. Das Kontrastsehen wird unterschätzt, weil (1) die Kontrastadaptation ein reduziertes Kontrastsehen unbemerkt lässt, (2) die Defizite unspezifisch sind und den Betroffenen diffus erscheinen, und (3) im typischen Beratungskontext die Umgebung überschwellige Orientierungs- und Erkennungskontraste aufweist und dann keine Probleme aufwirft. Erst spezifische Kontrasttests schaffen Klarheit. Verlässliche und einfache Tests gibt es für das Tagessehen und, besonders relevant bei der Beurteilung der Fahreignung, auch für das Dämmerungssehen.

Schlüsselwörter:

Kontrast, Sehschärfe, Adaptation, Übersichtsarbeit, Dämmerungssehen, Michelson-Kontrast, Weber-Kontrast

Contrast vision – an underestimated quality of vision

Summary

Our contrast vision is of great importance in daily life, e.g., for housekeeping, in road traffic and for non-verbal communication. Even if visual acuity is nearly intact, contrast vision can be so reduced that everyday activities are significantly impaired. The importance of contrast vision is often underestimated because (1) reduced contrast vision often goes unnoticed in high-contrast environments, as a result of contrast adaptation, (2) deficits are non-specific and appear diffuse to those affected, and (3) the environment in a typical counselling context has suprathreshold contrasts and thus does not pose problems for the patient. Only when specific tests for contrast vision are used, do the deficits become revealed. Reliable and simple tests are available for daytime vision and – of particular relevance for the assessment driving aptitude – also for night vision.

Keywords:

Contrast, visual acuity, adaptation, review, night vision, Michelson contrast, Weber contrast

Sehqualitäten

Unser Sehvermögen wird in Sehqualitäten untersucht. In absteigender Häufigkeit sind dies Sehschärfe, Gesichtsfeld, Farbsehen, Stereosehen und das Kontrastsehen.

Beispiele hoher Anforderungen an das Kontrastsehen

- Interpersonelle nichtverbale Kommunikation: Wir können – wenn auch nicht zuverlässig – Gefühle von Gesichtern ablesen. Neben der Mimik spielt da unbewusst die Hautfarbe eine Rolle. Schwache farbliche Schattierungen entstehen durch Änderungen der Durchblutung, wobei zwei Dimensionen vorliegen (Changizi et al. 2006): (1) globale Änderung des Durchblutungsvolumens sowie (2) der Anteil des desoxygenierten Blutes als Blauverschiebung.
- Zwiebelschneiden: Zwiebeln, fast weiß, auf heller Unterlage haben einen niedrigen Kontrast, und dann ist auch noch ein Messer in der Nähe ...
- Kaffee in eine dunkle Tasse gießen (schwarz auf schwarz)
- Bügelqualität einschätzen (weiß auf weiß)
- Flecken erkennen auf Kleidern oder Geschirr – Flecken zeigen sich oft nur als schwache Schattierungen
- Flamme des Gasherdes sehen: Das fast durchsichtige Blassblau der Flamme hebt sich kaum vom Hintergrund ab
- Straßenverkehr:
Eingeschränkte Sicht bei Nebel, Regen, Schneefall. In der Dämmerung erklärt die um den Faktor 30 (siehe unten) reduzierte Kontrastempfindlichkeit das zutreffende Gefühl, schlechter zu sehen.
Unfälle: Untersuchungen haben gezeigt, dass ein reduziertes Kontrastsehen ein wichtigerer Faktor bei Unfällen ist als ein reduzierter Visus (Owsley et al. 2001; Wood and Owens 2005).
- Bi-/Multifokallinsen reduzieren den retinalen Bildkontrast (dies gilt für alle Bi-/Multifokallinsen), typischerweise um den Faktor zwei (Anton et al. 2014), dies wird weiter unten noch genauer diskutiert.

Warum wird das Kontrastsehen unterschätzt?

Wir bemerken ein reduziertes Kontrastsehen kaum. Das hat zwei Hauptgründe:

- Zum einen sind die meisten uns umgebenden Strukturen kontrastreich, schon aus Sicherheitsgründen. Insbesondere in der ärztlichen Praxis wollen wir es sehbehinderten Patienten leichtmachen und gestalten Lichtverhältnisse günstig. Daher wird das Kontrastsehen im Sprechstundenkontext gar nicht gefordert, und die Patienten sprechen es nicht an.
- Das Kontrastsehen wird durch ein Regelsystem laufend angepasst, innerhalb weniger Sekunden, so dass die Übertragung von Kontrast in neuronale Aktivität im günstigsten Bereich bleibt – nur die Absolutschwelle kann sich nicht verbessern. Den Effekt dieser Kontrastadaptation kann man sich hier <https://michaelbach.de/ot/lum-contrastAdapt/index-de.html> vor Augen führen. Beispiel: Hinter einer intraokularen Bi-/Multifokallinse liegt der Kontrast nie über ca. 50% (Abb. 1). Dieser Kontrast wird zum Normalzustand und sieht nicht so flau aus, wie man einen solchen Kontrast mit einer Monofokallinse empfinden würde

(Vera-Diaz et al. 2010; Anton et al. 2014). [Bei Katarakt wird typischerweise erst ein Auge versorgt – das ist ein Kontrastgewinn auch mit einer Bi-/Multifokallinse.]

Mangelndes Kontrastsehen wird also subjektiv als solches kaum wahrgenommen. Dennoch: Eine Verschlechterung der Kontrast-Absolutschwelle (die durch Adaptation nicht besser wird) hat große Konsequenzen, vor allem beim Dämmerungssehen.

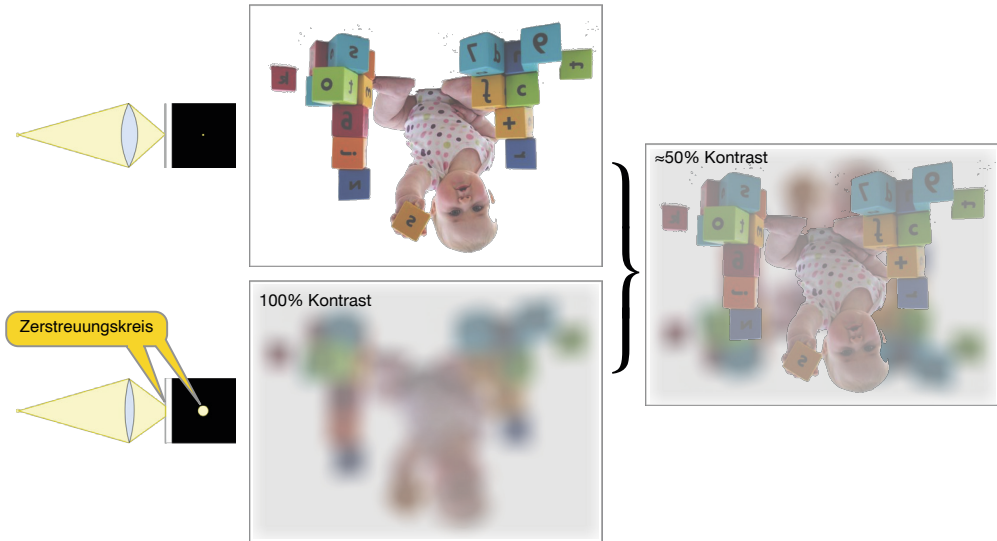


Abb. 1: Wirkung einer bifokalen Intraokularlinse auf das Netzhautbild.

Links zwei Strahlengänge bei Abbildung eines nahen punktförmigen Objekts: Abbildung oben scharf, unten als Zerstreuungsscheibe. Bei einer bifokalen Intraokularlinse überlagert die Zerstreuungsscheibe das scharfe Bild. In der Mitte die Wirkung, für beide Strahlengänge getrennt. Rechts Überlagerung: So sieht das Netzhautbild mit einer Bifokallinse aus: Scharf, aber im Kontrast halbiert.

Definitionen

Der Kontrast wird definiert als relative Helligkeit zweier Flächen (Abb. 2). Die absolute Helligkeit spielt fast keine Rolle: Der Kontrast von nicht-leuchtenden Flächen ändert sich kaum mit der Beleuchtung. Dies gilt in dem großen Bereich von der Lichtwahrnehmungsschwelle bis kurz vor der Blendung. In den Formeln zur Kontrastdefinition äußert sich das darin, dass Verhältnisse der verschiedenen Helligkeiten gebildet werden.

Es gibt leider fünf gebräuchliche Definitionen (Bach et al. 2011, 2017):

1. Michelson-Kontrast $KM = (L_{max} - L_{min}) / (L_{max} + L_{min})$
2. Weber-Kontrast $KW = (L_{max} - L_{min}) / L_{max}$
3. DIN-Kontrastverhältnis (DIN 58220-7): $KV = (L_{max}/L_{min}) : 1 = L_{max} : L_{min}$
4. „Aulhorn-Harms“-Kontrast: $KAH = 1 : (L_{max}/L_{min}) = L_{min} : L_{max} = 1 / KV$
5. Logarithmus der Weber-Kontrastempfindlichkeit als Kontrastmaß
 $\log CS = \log CS_{Weber} = \log_{10}(1 / KW) = \log_{10}(L_{max} / (L_{max} - L_{min}))$

wobei L_{max}/L_{min} = maximale/minimale Leuchtdichte ist, $\log CS$ für den Logarithmus der Kontrastempfindlichkeit (CS) steht, und die Kontrastempfindlichkeit der Kehrwert des Schwellenkontrastes (Kontrast an der individuellen Schwelle) ist. Alle diese Kontrastwerte lassen sich ineinander umrechnen (Bach et al. 2017).

Warum dann so viele?

Dass zwischen Michelson- und Weber-Kontrast unterschieden wird, ist sinnvoll bei Anwendung auf verschiedene Reizextreme: Bei Gittermustern ist der Michelson-Kontrast angemessen: Es kommen genauso viele helle wie dunkle Bereiche vor, entsprechend gehen beim Michelson-Kontrast die beiden mit gleichem Gewicht in die Formel ein. Bei einzelnen Optotypen, die auf größerem homogenem Hintergrund stehen, ist dagegen der Weber-Kontrast angemessen. Bei sehr großem Kontrast sind die Michelson- und Weber-Zahlenwerte fast gleich, bei sehr kleinem Kontrast sind die Michelson-Zahlenwerte halb so groß wie die Weber-Zahlenwerte. Beispiele für den Weber-Kontrast zeigt Abb. 3.

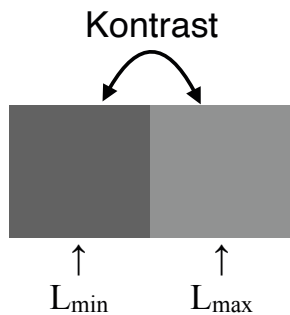


Abb. 2: Kontrast bezieht sich auf den Helligkeitsunterschied zwischen zwei Bereichen, hier den beiden grauen Flächen. Die linke, dunklere, hat die Leuchtdichte L_{min} , die rechte, hellere, L_{max} .

[Unterschied zwischen Leuchtdichte und Helligkeit: Die Leuchtdichte kann man physikalisch messen, die Helligkeit entspricht der subjektiven Empfindung.]

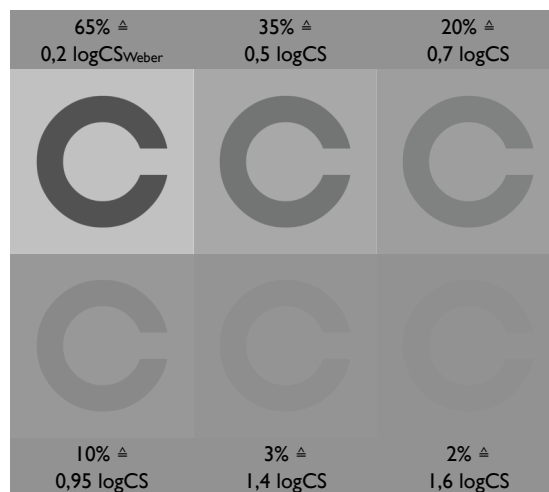


Abb. 3: Verschiedene Weber-Kontrastwerte am Beispiel eines Landoltringes. Aus drucktechnischen Gründen sind die Kontraste quantitativ nicht ganz korrekt, und die schwächsten Kontraste möglicherweise nicht erkennbar. Realistisch sind die Kontraste auf dem Bildschirm z. B. hier <https://michaelbach.de/fract/> zu sehen, wenn man einen Kontrasttest startet.

Die DIN-Definition mit dem dunklen Helligkeitswert L_{min} im Nenner führt dazu, dass z. B. Bildschirme mit sehr dunklen Schwarzanteilen „werbemäßig beeindruckend“ hohe Kontrast-Zahlenwerte haben, 10.000 und mehr.

Das „Aulhorn-Harms“-Kontrastverhältnis geht auf die umfangreiche und sorgfältige Arbeit von Aulhorn and Harms (1970) zurück. In der Verkehrsophthalmologie (siehe unten „Mesopische Kontrasttests“) kommt man um die Aulhorn-Harms-Kontrastwerte nicht herum. Die dort resultierenden „krummen“ Zahlenwerte mit Stellen hinter dem Komma sind tatsächlich „glatte“ $\log CS_{Weber}$ -Werte (siehe Tabelle 1). Sie sind logarithmisch gestuft, entsprechend dem Weber-Fechnerschen Gesetz.

Tab. 1: Kontrastverhältnisse („Aulhorn-Harms“), bei denen eine Nachtfahreignung noch gegeben ist, je Fahrzeugführerklasse

Klassen		Kontrast-Verhältnis	$\log CS_{Weber}$
PKW Motorrad	AM, A, A1, A2 B, BE	1 : 23	$\approx 0,0$
LKW	C, C1, CE, C1E	1 : 5	0,1
Bus	D, D1, D1E	1 : 2,7	0,2

Für die Augenheilkunde empfehle ich, „ $\log CS$ “ zu benutzen. Vorteile sind:

- die Abstufung ist etwa äquivalent zur Wahrnehmungsstärke. Daher ist es mathematisch/statistisch erlaubt, Mittelwerte von $\log CS$ -Werten zu bilden.
- Bei normalem Kontrastsehen liegt die Kontrastschwelle etwa bei 1,6 $\log CS_{Weber}$. Bei schlechtem Kontrastsehen geht der $\log CS$ -Wert in Richtung 0. Damit verläuft $\log CS$ als Maß der Kontrastempfindlichkeit (im Gegensatz zu LogMAR) intuitiv richtig herum: Bei hoher Kontrastempfindlichkeit ist die Zahl größer als bei niedriger Kontrastempfindlichkeit.
- In der Verkehrsophthalmologie werden die „krummen“ Aulhorn-Harms-Kontrastwerte verwendet. Einfacher wäre es, die „glatten“ $\log CS_{Weber}$ -Werte zu verwenden (Tabelle 1).

Wie prüft man das Kontrastsehen?

Bei allen Messverfahren werden zwei Helligkeiten angeboten (Abb. 2), z. B. eine dunkle Optotype auf hellerem Hintergrund oder Gittermuster mit helleren und dunkleren Streifen. Die Kontrastschwelle ist der schwächste Kontrast, bei dem die Optotype oder das Gitter gerade noch erkannt wird. Die Kontrastempfindlichkeit ist der Kehrwert der Kontrastschwelle. Besseres Kontrastsehen heißt also niedrigere Kontrastschwelle bzw. höhere Kontrastempfindlichkeit. Zunächst besprechen wir photopische Kontrasttests, also wenn es heller ist als etwa 3 Lux (DIN für Arbeitsplatzbeleuchtung: 300–500 Lux).

Typen von Tests: Sinusgitter/Optotypen und photopisch/mesopisch

Die Kontrastempfindlichkeit wird stark von der Ortsfrequenz mitbestimmt (Abb. 4). Deswegen kann es sinnvoll sein, die Kontrastempfindlichkeit mit Gittermustern zu prüfen. Die Ortsfrequenz (oft aus dem englischen „spatial frequency“ irrig mit „Raumfrequenz“ übersetzt) ist die Anzahl der Gitterperioden pro Grad Sehwinkel. Übliche Sinusgitter-Tests sind z. B. das „Vistech 6500 Vision Contrast Test System“, oder der „Functional Acuity Contrast Test (F.A.C.T.)“.

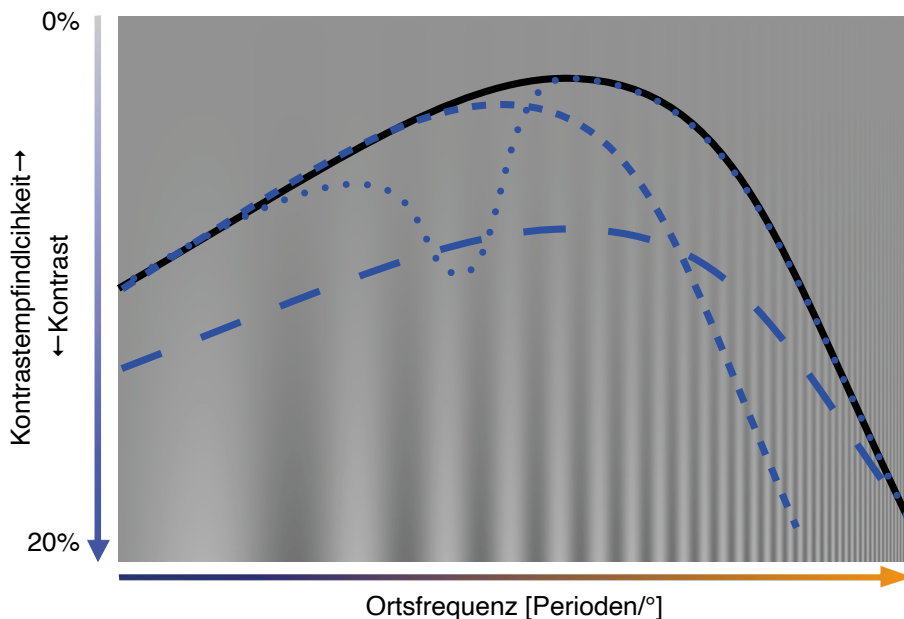


Abb. 4: Kontrastschwelfunktion bei einem Sinusgitter unterschiedlicher Ortsfrequenz. Der Michelson-Kontrast ist unten 20% und geht nach oben auf 0. Wo man das Gitter gerade nicht mehr erkennt, ist die Kontrastschwelle. Sie hängt von der Ortsfrequenz ab (links niedrig, rechts hoch).

Normal: schwarz durchgezogen. Zwei typische pathologische Veränderungen: blau gestrichelt (siehe Text); lokale Ausfälle (punktiert) kommen nicht vor.

Die meisten dieser Tests haben nur eine geringe Genauigkeit, da sie pro Ortsfrequenz nur 3 Beispiele anbieten – Zufallstreffer sind da recht wahrscheinlich. Dies ist der Zeiteffizienz geschuldet: bei z. B. 5 verschiedenen Ortsfrequenzen und 9 Kontraststufen sind 45 Entscheidungen nötig. Zur Reduzierung der Streuungen wird das Testergebnis oft als ein „score“ angegeben: ein Pauschalwert, über alle Ortsfrequenzen gemittelt. Dieser score kann in der Tat das Kontrastsehen gut repräsentieren, auch wenn die Information über Verlust bei bestimmten Ortsfrequenzen damit verloren geht. Das muss aber kein Nachteil sein, wenn man bedenkt, was als Verlust bei verschiedenen Ortsfrequenzen praktisch vorkommt: (1) Bei Hornhaut- oder Linsentrübung zeigt sich der Verlust in allen Ortsfrequenzen (Abb. 4, breit gestrichelt). (2) Bei hohen Ortsfrequenzen (Abb. 4, fein gestrichelt) muss die Kontrastempfindlichkeit gar nicht extra geprüft werden, da dieser Bereich bereits durch die Visusmessung abgedeckt ist. Der Visus gibt an, was die feinste Struktur

(= höchste Ortsfrequenz) ist, die bei 100% Kontrast erkannt werden kann. (3) Dass ein Empfindlichkeitsverlust nur bei bestimmten Ortsfrequenzen auftritt (Abb. 4, punktiert), wurde bei der multiplen Sklerose berichtet (Bodis-Wollner and Diamond 1976), aber als Artefakt erkannt (Apkarian et al. 1987). Auch sonst gibt es keine mich überzeugenden Beispiele, dass es in der angewandten Ophthalmologie nötig wäre, nach ortsfrequenzspezifischem Verlust zu fahnden. Die Konsequenz: der score ist ausreichend geeignet, und man braucht nicht Gittermuster einzusetzen, um die Kontrastempfindlichkeit zu prüfen. Es genügen Optotypen, die unseren Patienten schon von der Visusmessung bekannt sind.

Optotypen-Tests

Die Fourieranalyse (Cooley and Tukey 1965; Wikipedia 2023) zeigt, dass man jedes Muster in eine Überlagerung von vielen Ortsfrequenzen mit der richtigen Stärke und Orientierung zerlegen kann. In Abb. 5 ist das Ortsfrequenzspektrum eines Landoltringes gezeigt. Abb. 5 veranschaulicht, wie damit der relevante Ortsfrequenzbereich überstrichen wird. Somit reicht eine einzige Optotypengröße aus, und beim Kontrasttest wird nicht die Größe, sondern ihr Kontrast verändert. Man kann das hier ausprobieren: <https://michaelbach.de/fract/>.

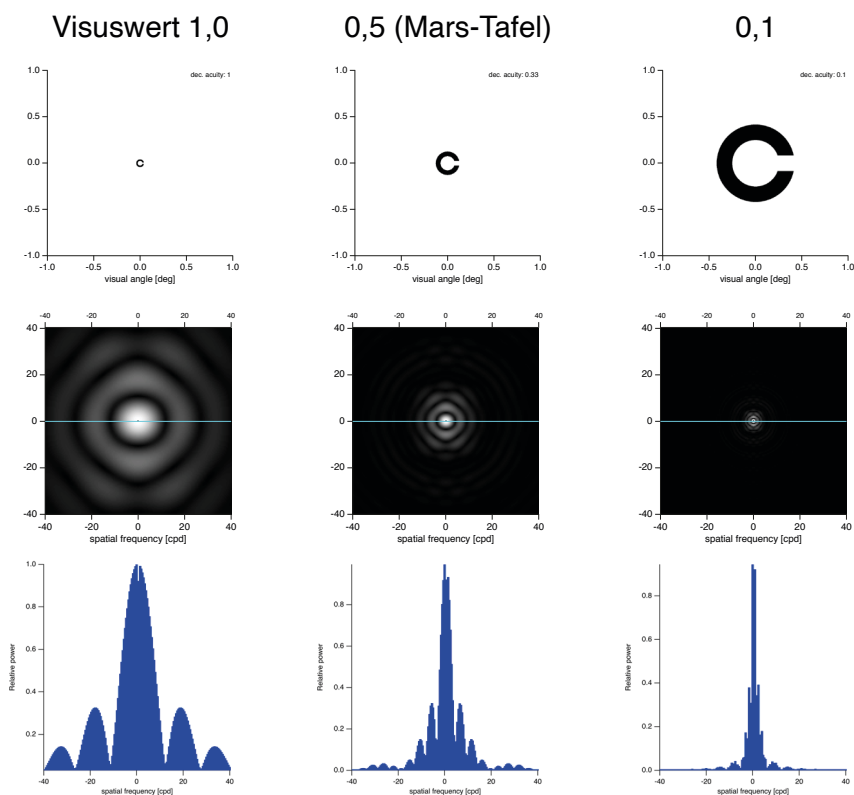


Abb. 5: Oben: Landoltringe verschiedener Visuswerte, Mitte: Das zweidimensionale Ortsfrequenzspektrum, Unten: Das auf eine Dimension reduzierte Spektrum (Null in der Mitte, maximale Ortsfrequenz 40 Perioden/°). Eine Optotype entsprechend Visus 0,5 deckt Ortsfrequenzen bis etwa 15 Perioden/° ab.

Sehr geeignet zur Kontrastmessung sind die Pelli-Robson-Tafeln (Pelli et al. 1988), siehe Abb. 6, links. Wichtig ist, sie bei einem guten Hersteller zu beziehen, weil es drucktechnisch sehr anspruchsvoll ist, kleine Kontraste korrekt zu drucken. Ferner müssen die Tafeln gleichmäßig beleuchtet werden, weil die Kontrastschwelle stark von der Helligkeit abhängt. Auch wenn eine Karte gleichmäßig beleuchtet aussieht, erkennt man, wenn man sie ausmisst, dass man einen Helligkeitsunterschied bis zu einem Faktor 2 leicht übersehen kann. Für anspruchsvolle Studien ist ein Leuchtkasten (Durst et al. 2011) empfehlenswert. Den Pelli-Robson-Tafeln sind in meiner Erfahrung die Mars-Tafeln (Arditi 2005) gleichwertig <<https://marsperceptrix.com/>> (Abb. 6, Mitte). Zwar wird die Kontrastempfindlichkeit damit bei sehr hohen Werten wohl unterschätzt (Haymes et al. 2006, siehe auch Abb. 7), doch sind diese Werte nicht im klinisch relevanten Bereich. Zu den Mars-Tafeln gehört ein Satz von altersspezifischen Normwerten <<https://marsperceptrix.com/downloads>>



*Abb. 6: Drei auf Optotypen beruhende Kontrasttests.
Links: Pelli-Robson, Mitte: Mars, Rechts: FrACT.*

Neben den Pelli-Robson- und den Mars-Tafeln gibt es eine Reihe weiterer Tests, von denen ich hier (als Autor, also pro domo) den Freiburger Acuity/Contrast Test (FrACT) erwähnen möchte (Bach 1996, 2021). Als Computerprogramm online und für alle Plattformen umsonst erhältlich, stimmen die Ergebnisse mit den genannten Tafeltests überein, es gelten die Normwerte wie beim Mars-Test.

Mesopische Kontrasttests

In der Dämmerung nimmt das Kontrastsehen stark ab, auch bei Gesunden (mehr dazu unten). Dies berücksichtigen Vorschriften für die Erlaubnis zur Fahrgastbeförderung (Bundesministerium der Justiz 2010). Die zugrundeliegenden Messungen gehen vor allem auf Elfriede Aulhorn zurück (Aulhorn 1964; Aulhorn and Harms 1970), die in diesem Jahr ihren hundertsten Geburtstag gehabt hätte.

Geeignete Geräte sind laut den Empfehlungen der DOG-Kommission für die Qualitätssicherung sinnesphysiologischer Untersuchungsverfahren z. B. Binophor, Nyktometer 500, Binoptometer 4P, Mesotest II und Optovist II.

Kontrastsehen in der Dämmerung

In der Dämmerung nimmt das Kontrastsehen stark ab, bei $0,032 \text{ cd/m}^2$ Umgebungsleuchtdichte um den Faktor 30. Dies wird deutlich in Abb. 7, basierend auf Daten aus Hertenstein et al. (2016), die im Test-Retest-Format angelegt sind: auf der X-Achse die jeweils erste Messung, auf der Y-Achse die zweite. Es wurde im Hellen gemessen (Tagesehen, photopisch, oben rechts, mit den Mars-Tafeln (gefüllte Kreise) und FrACT (leere Kreise), sowie mesopisch (Dämmerung) mit dem „Mesotest“ (unten links). Die Einheit beider Achsen ist $\log\text{CSWeber}$, bei den Dämmerungswerten ist zusätzlich das Aulhorn-Harms-Kontrastverhältnis angegeben; \emptyset bezeichnet, dass auch 1:23 nicht erkannt wurde (negative $\log\text{CS}$ -Werte sind nicht möglich). Die Messpunkte sind absichtlich leicht zufällig verschoben, damit erkennbar wird, dass viele übereinanderliegen.

Hier sind viele Beziehungen erkennbar:

- Die Test-Retest-Streuung verläuft senkrecht zur Winkelhalbierenden.
- Das Tagesehen und Dämmerungssehen unterscheiden sich um den Faktor 30, erheblich mehr als die Streuung.
- Die Kontrastverhältnisstufungen beim Dämmerungssehen erscheinen fein gegenüber der Test-Retest-Streuung.
- Die Messpunkte beim Dämmerungssehen liegen (abgesehen von der beabsichtigten Verzitterung) in einem Raster, weil sie äquidistanten $\log\text{CSWeber}$ -Werten entsprechen.
- Rechts oben sind nur FrACT-Messpunkte zu sehen, keine der Mars-Tafel. Dies entspricht der oben erwähnten Unterschätzung der Kontrastempfindlichkeit durch Mars, aber es ist auch deutlich, dass das für klinische Fragestellungen nicht erheblich ist.
- Viele Probanden erkennen das kleine Kontrastverhältnis von 1:23 im Dämmerungssehen nicht – im Hellen sähe das fast schwarz-weiß aus.

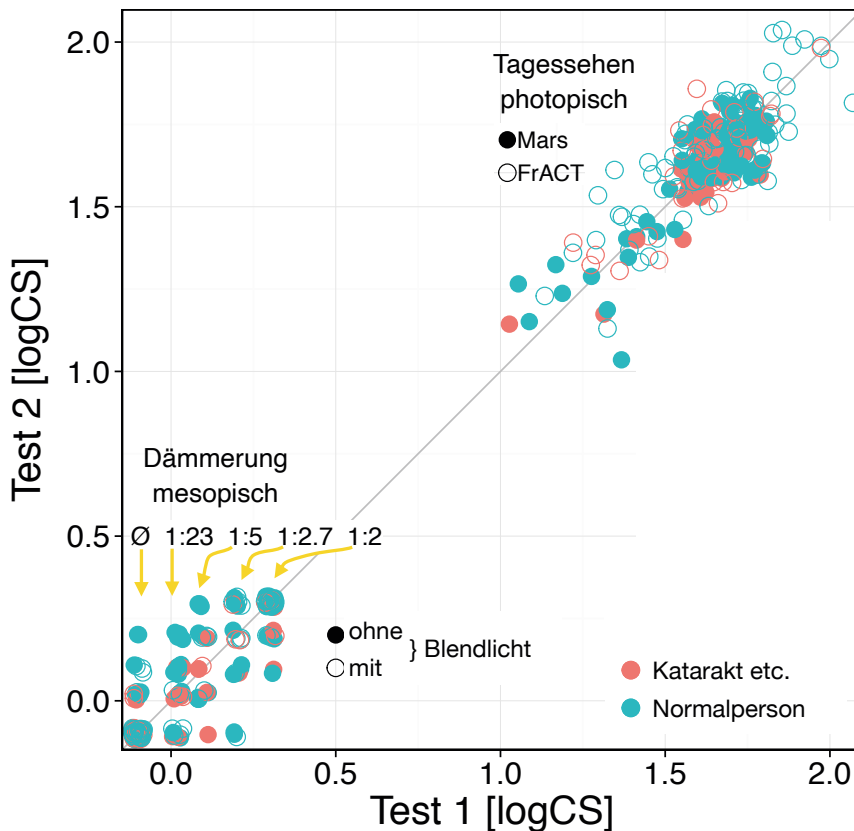


Abb. 7: Test-Retest-Diagramm der Kontrastempfindlichkeit im Hellen (oben rechts) und bei Dämmerung ($\leq 0,032 \text{ cd/m}^2$, unten links). Im Hellen wurde mit Mars-Tafeln und FrACT getestet, im Dunklen mit dem „Mesotest“, dort sind auch zugehörige Aulhorn-Harms-Kontrastverhältnisse angegeben (Daten aus Hertenstein et al. 2016).

Ganz kurz gefasst

- Kontrastsehen ist äußerst wichtig für das tägliche Leben, Straßenverkehr
- Einschränkungen werden nicht bemerkt, u. a. wg. Kontrastadaptation
- Messung mit Kontrasttafeln, photopisch normal: ca. 1,6 logCSWeber
- Bi-/Multifokale Optiken halbieren die Kontrastempfindlichkeit
 - stört nicht wg. Kontrastadaptation
 - doch cave Fahrtauglichkeit in Dämmerung
- Beim Dämmerungssehen ist die Kontrastempfindlichkeit 30× schlechter als tagsüber.

Interessenkonflikt

M. Bach hat den kostenlos verfügbaren Sehtest FrACT/FrACT <<https://michaelbach.de/fract/>> entwickelt, der auch eine Messung der Kontrastschwelle ermöglicht.

Literatur

- ANTON A, BÖHRINGER D, BACH M et al (2014)
Contrast sensitivity with bifocal intraocular lenses is halved, as measured with the Freiburg Vision Test (FrACT), yet patients are happy. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 252:539–544. <https://doi.org/10.1007/s00417-014-2565-y>
- APKARIAN P, TIJSSEN R, SPEKREIJSE H, REGAN D
Origin of notches in CSF: optical or neural? *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 28:607–612 (1987)
- ARDITI A
Improving the design of the letter contrast sensitivity test. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 46:2225–2229. <https://doi.org/10.1167/iovs.04-1198> (2005)
- AULHORN E
Über die Beziehung zwischen Lichtsinn und Sehschärfe. *Albrecht v Graefes Arch Ophthal* 167:4–74. <https://doi.org/10.1007/BF00684291> (1964)
- AULHORN E, HARMS H
Über die Untersuchung der Nachtfahreignung von Kraftfahrern mit dem Mesoptometer. *Klin Mbl Augenheilk* 157:843–873 (1970)
- BACH M
The Freiburg Visual Acuity test – automatic measurement of visual acuity. *Optom Vis Sci* 73:49–53 (1996)
- BACH M
michaelbach/FrACT10 (2021)
- BACH M, HOFFMANN MB, JÄGLE H et al
Kontrastsehen – Definitionen, Umrechnungen und Äquivalenztabelle. *Ophthalmologie* 114:341–347. <https://doi.org/10.1007/s00347-016-0379-5> (2017)
- BACH M, LACHENMAYR B, SCHIEFER U
Prüfung des Kontrast- oder Dämmerungssehens. *Ophthalmologie* 108:1195–1198. <https://doi.org/10.1007/s00347-011-2488-5> (2011)
- BODIS-WOLLNER I, DIAMOND SP
The measurement of spatial contrast sensitivity in cases of blurred vision associated with cerebral lesions. *Brain* 99:695–710. <https://doi.org/10.1093/brain/99.4.695> (1976)
- BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ
(2010) Fahrerlaubnisverordnung, Anlage 6. http://www.gesetze-im-internet.de/fev_2010/anlage_6.html. Accessed 6 Apr 2015
- CHANGIZI MA, ZHANG Q, SHIMOJO S
Bare skin, blood and the evolution of primate colour vision. *Biology Letters* 2:217–221. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2006.0440> (2006)
- COOLEY JW, TUKEY J
An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematical Computing* 19:297–301 (1965)
- DURST W, PETERS T, WILHELM B
Testing acuity and contrast vision under standardised lighting conditions. *British Journal of Ophthalmology* 95:1506–1508. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2011-300353>
- HAYMES SA, ROBERTS KF, CRUESS AF et al
(2006) The Letter Contrast Sensitivity Test: Clinical Evaluation of a New Design. *IOVS* 47:2739–2745. <https://doi.org/10.1167/iovs.05-1419> (2011)
- HERTENSTEIN H, BACH M, GROSS NJ, BEISSE F
Marked dissociation of photopic and mesopic contrast sensitivity even in normal observers. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology* 254:373–384. <https://doi.org/10.1007/s00417-015-3020-4> (2016)
- OWSLEY C, STALVEY BT, WELLS J et al
Visual risk factors for crash involvement in older drivers with cataract. *Arch Ophthalmol* 119:881–887 (2001)
- PELLI DG, ROBSON JG, WILKINS AJ
The design of a new letter chart for measuring contrast sensitivity. *Clinical Vision Sciences* 187–199 (1988)

VERA-DIAZ FA, WOODS RL, PELI E

Shape and individual variability of the blur adaptation curve. *Vision Research* 50:1452–1461. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.04.013> (2010)

WIKIPEDIA

Fourier-Transformation. Wikipedia (2023)

WOOD JM, OWENS DA

Standard measures of visual acuity do not predict drivers' recognition performance under day or night-conditions. *Optom Vis Sci* 82:698–705 (2005)

Anschrift des Autors:

Prof. Michael Bach, Sehforscher

79194 Gundelfingen

E-mail: michael.bach@uni-freiburg.de