

2 Verhaltensanalytische Untersuchungen des Farbensehens landwirtschaftlicher Nutztiere am Beispiel der Zwergziege (*Capra hircus* L.)

Die Ergebnisse einiger Studien bei Rind, Schaf, Schwein und Ziege scheinen die Vermutung zu bestätigen, dass diese Nutztierarten Farbsehen besitzen, während andere Studien diesen Tierarten jegliches Farbreizunterscheidungsvermögen absprechen (s. o.). Die afrikanische Zwergziege (*Capra hircus*, L.) soll als ein erster Repräsentant der landwirtschaftlichen Nutztiere und zur weiteren Methodenerforschung zum Nachweis der Chromazität und Dimensionalität des Farbensehens dienen. Diese Methode kann ggf. auch auf die anderen Nutztierarten wie Rind, Schaf, Schwein und Pferd angewandt werden. Die Zwergziegen bieten sich an, da sie sehr neugierig sind und an ihre Haltung und Fütterung nur geringe Ansprüche stellen.

Ziel der Untersuchungen war, aus dem Wahlverhalten von Zwergziegen abzuleiten, **1)** ob die Tiere Farbreize als Futtersignal erlernen können und wenn ja, **2)** in welchen Bereichen ihres subjektiven Farbreizraumes sie Farbreize besser oder schlechter unterscheiden können. Die Ergebnisse sollten **3)** den Schluss auf die Chromazität des Farbsehensystems, d. h. auf die Anzahl der Photorezeptoren, die essentiell am Farbreizdiskriminationsverhalten beteiligt sind, ermöglichen. In Zweifachwahlexperimenten wählten die Zwergziegen zwischen zwei auf einem Computermonitor präsentierten Farbreizen, durch Druck entsprechender Knöpfe unter dem Monitor. Die Wahlen absolvierte jedes Tier einzeln in einem Versuchsstand (**Abb. 5**). Durch einen Computer wurde sowohl die Präsentation der Farbreize als auch die Belohnung gesteuert und dokumentiert. Die Erkennung und Registrierung des Einzeltieres erfolgte über einen Sender (Transponder) am Halsband des Tieres und ein PC-gekoppeltes Respondersystem. Der Einsatz eines PCs in Verbindung mit einem Tränkautomaten ermöglichte eine Durchführung der Versuche ohne direkte Beeinflussung durch den

Menschen, d. h. die Tiere befanden sich in ihrer gewohnten Umgebung (Stall) und blieben in ihrem Gruppenverband.

Zuerst wurden Tests durchgeführt, die ggf. eine Vorliebe oder Abneigung, durch Vorerfahrung oder, genetisch bedingt, in Bezug auf einen Farbreiz aufzeigen sollten. In der Literatur (s. o.) wurde bei einigen Tieren (Rinder und Ziegen) z. B. eine Abneigung gegen „Blau“ beschrieben (Buchenauer & Fritsch, 1980). Bei Vorliegen einer Präferenz für eines der farbigen Lichter „Rot“, „Grün“ oder „Blau“ sollte sich diese in ersten, unbelohnten Spontan-Wahl-Tests zeigen. Zudem wurde das Wahlverhalten auf Seitenstetigkeit untersucht. Im Folgenden wird von Seitenstetigkeit gesprochen, wenn eine Monitorseite unabhängig vom dargebotenen Licht, mit einer Wahlhäufigkeit von $< 0,3$ bzw. $> 0,7$ gewählt wurde. Sollte sich eine Vorliebe oder Abneigung bei den Tieren bei einem der präsentierten Stimuli oder für eine Monitorseite erweisen, würde gegen diese Vorgabe dressiert werden müssen.

Die Dressur der Zwergziegen erfolgte jeweils auf einen konstanten Farbreiz, der gegen verschiedene „farbige“ Kreise angeboten wurde. Für jeden Farbreiz und jedes Tier wurden Lernkurven (siehe **Anhang C**) in Abhängigkeit von der Anzahl Lernakte erstellt und so das maximale Richtigwahlniveau (Akquisitionsniveau) ermittelt. Die weiteren Versuche dienten dazu, die absolute Sichtbarkeitsschwelle für jedes Tier für farbiges Licht mit zwei Methoden zu bestimmen, indem die Intensität der farbigen Kreise jeweils verändert wurde. **Messmethode I:** Auf- und Ab- Methode. Diese steuert die Lichtintensitäten in Abhängigkeit vom Ergebnis der Vorwahl. Bei Richtigwahl wurde die Intensität der Alternative reduziert und bei Falschwahl erfolgte eine Erhöhung der Intensität. Die relative Anzahl der Wahlakte (Wahlprozente) ergibt ein Maximum an der absoluten Sichtbarkeitsschwelle für den jeweiligen Farbreiz. **Messmethode II** erzeugt alle Lichtintensitäten gleichhäufig, unabhängig von der Vorwahl. Die mittels dieser Messmethode ermittelten Wahlhäufigkeiten (bzw. Wahlprozente) wurden in ein Diagramm über den dargebotenen Intensitäten aufgetragen. Daraus konnten die RGB-Werte der für das einzelne Tier gleichhellen Farbreize (RGB-Werte) mit einem Kriterium von 90% Richtigwahlen abgelesen werden. Es wurden jeweils die Wahlhäufigkeiten für „Rot“ -, „Grün“ -, „Blau“ -, „Gelb“ -, „Türkis“ -, „Violett“ - und „Weiß“ - Lichtintensitäten bestimmt.

Die mittels **Messmethode II** bestimmten gleichhellen Farbreize wurden gegen die ebenso ermittelten, für die Ziegen subjektiv gleichhellen achromatischen Farbreize getestet. Zur Absicherung wurden stärkere und schwächere Intensitäten nahe des ermittelten Wertes ebenfalls gegen den achromatischen Stimulus getestet. Die Wahlhäufigkeiten wurden über den Intensitäten in einem Diagramm aufgetragen. Zeigten die Wahlhäufigkeitskurven jeweils

ein Minimum, beruhte der Wahrnehmungsunterschied auf einer rein chromatischen Farbreizunterscheidung bei gleichbleibender subjektiver Helligkeit der Farbreize (Jacobs, 1981, Backhaus et al., 1991). Das Wahlhäufigkeitsminimum für jeden getesteten Farbreiz gegen „Grau“ wird als inkrementelle Schwelle zweier Farbreize bezeichnet.

Zuletzt erfolgte eine Veränderung des „Weiß“ - Lichtanteils von „Rot“ -, „Grün“ - und „Blau“ - gegen „Grau“ - Licht, indem prozentual „Weiß“ - Licht zugemischt wurde. Dies erlaubte, das Unterscheidungsvermögen der Zwergziegen in Bezug auf die chromatische Reinheit gleichheller Farbreize in verschiedenen Richtungen des subjektiven Farbreizraums zu messen und die Chromazität (Anzahl spektraler Photorezeptortypen) des Farbreizdiskriminationsvermögens der Zwergziegen zu bestimmen.

Die spektralen Intensitätsfunktionen der Farbreize (NOKIA Monitor, 21“) wurden mit einem Simultanspektralphotometer (Instaspec IV mit 16mm Linse, Oriel Instruments, Darmstadt) der Arbeitsgruppe Theoretische und Experimentelle Biologie, FU – Berlin, vermessen (Intensität [W / m^2] über der Wellenlänge [nm], siehe **Anhang A**).

2.1 Material und Methoden

2.1.2 Apparatur

Die Apparatur (**Abb. 5**) bestand aus einem Stand im Stall, in den die Tiere nur einzeln eintreten konnten. Der Versuchsstand entsprach teilweise der Anordnung, die die Tiere bereits aus den vorherigen Versuchen zum Lernvermögen (Franz & Reichart, 1999) kannten. Gemeinsam war den Apparaturen, dass es sich um einen Stand mit Druckknöpfen vor einem Monitor handelte, deren Betätigung bei Richtigwahl eine Belohnung durch Trinkwasser auslöste. Veränderungen wurden am äußeren Stand dahingehend vorgenommen, dass das Versuchstier im Stand nicht von anderen Tieren bei seinen Wahlen beobachtet werden konnte, d.h. Seitenteile und Oberteil (Holzklappe) waren lichtundurchlässig. Dadurch wurde zudem Fremdlicht vom Monitor ferngehalten. An seiner Stirnseite befand sich in einer Höhe von 17 cm ein 21“ Monitor (NOKIA), mit dem die Farbreize erzeugt wurden. Dieser wurde von einer achromatischen Plexiglasscheibe (31 cm x 39 cm x 0,5 cm) vor Verschmutzung und Beschädigung durch die Tiere geschützt. Die Plexiglasscheibe wurde so ausgewählt, dass keiner der vom Monitor dargestellten Farbreize stärker absorbiert wurde als die anderen. Der Intensitätsverlust betrug 7,15 % ($0.3209 \text{ Photonen /s/cm}^2$) gemessen anhand des Spektrums einer Halogenlampe mit einem tragbaren Simultanspektralphotometer (PS 1000, World Precision Instruments, Sarasota, FL USA) der Arbeitsgruppe Theoretische und

Experimentelle Biologie, FU - Berlin. An der Plexiglasscheibe waren zwei braunrote Druckknöpfe (Durchmesser = 2 cm) 9.5 cm vom rechten und linken Rand und 5 cm vom unteren Rand der Farbreize (Kreise) entfernt befestigt. Die Betätigung durch das Tier löste das Erscheinen des Folgebildes aus und schaltete bei richtiger Wahl die Belohnung in Form von Wasser (jeweils 20 ml) ein, das in eine Tränkschale floss. Die Druckknöpfe werden im Folgenden als Schalter bezeichnet.

Die Länge des Standes (57 cm) entsprach in etwa der Länge einer ausgewachsenen Ziege und war so schmal (26 cm), dass nur eine Ziege hinein passte. Die Höhe von 70 cm war so gewählt, dass keine der anderen Ziegen auf die sich gerade im Stand befindliche aufspringen konnte. Dies wurde zusätzlich durch ein Brett (15 cm breit) verhindert, das den Eintrittsbereich auf 50 cm verkleinerte und zugleich die Stabilität der Konstruktion erhöhte. Ebenfalls der Stabilisierung dienten zwei Bretter (je ca. 10 cm breit), die oben quer aufgeschraubt waren. Außerdem schützten sie die im Stand stehende Ziege vor Attacken durch die anderen Ziegen, da der Abstand dieser zwei Bretter ca. 6 cm betrug.

In einer Entfernung von 25 cm zur Wand verbreiterte sich der Stand, sodass die gesamte Mattscheibe des Monitors sichtbar war. Hier war ein Joch integriert, an dem sich der Responder für die Einzeltiererkennung befand. Alle Tiere trugen einen Transponder am Halsband. Das Joch verhinderte zudem ein Umdrehen der Tiere im Stand. Direkt hinter dem Joch war mittig eine Tränkschale (7 cm x 7 cm) in Schulterhöhe (17 cm) angebracht, sodass die Tiere den Kopf nur leicht senken mussten, um Wasser zu trinken. Das Wasser wurde durch einen Schlauch, der sich im Inneren eines Holzbalkens befand, in die Tränkschale geleitet. Der Holzbalken (7 cm x 25 cm) endete auf der einen Seite mit dem integrierten Schälchen vor dem Joch und auf der anderen Seite an der Wand unmittelbar unter der Plexiglasscheibe.

Der Monitor zeigte jeweils an derselben Position, horizontal nebeneinander, zwei farbige, gleichgroße Kreise auf schwarzem Hintergrund.

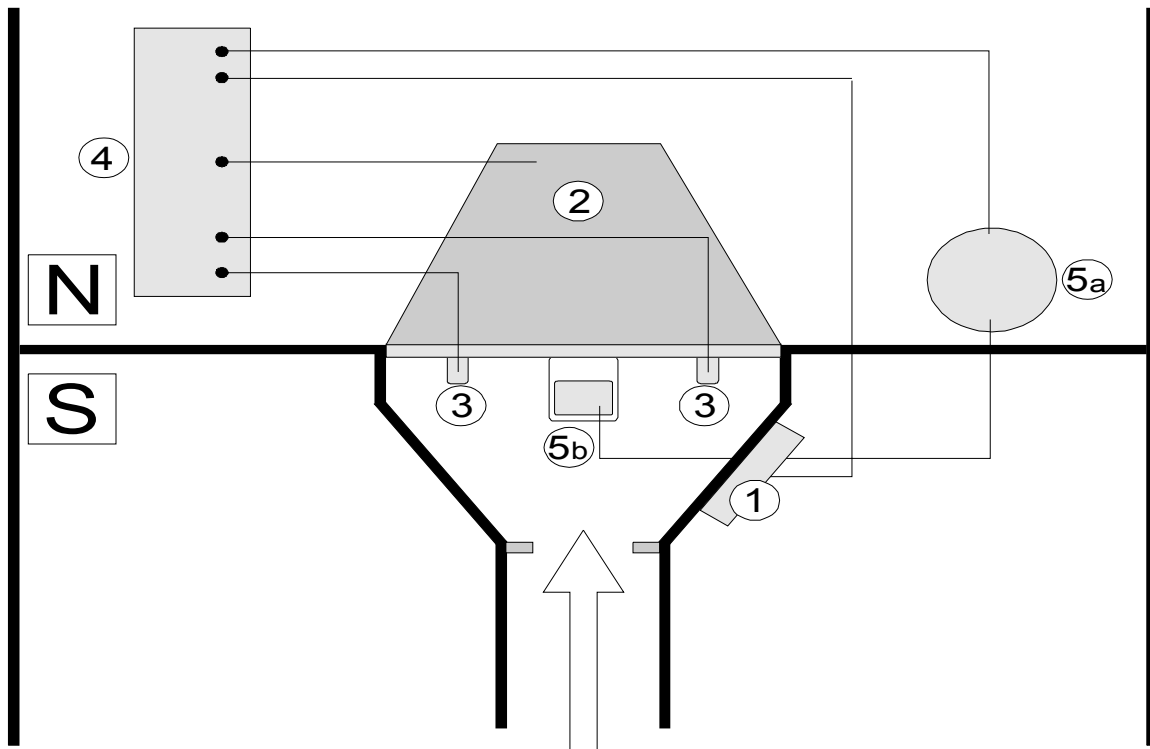


Abb. 5 Skizze der Versuchsanordnung. N: Computer- und Beobachtungsraum; S: Stall; 1: Einzeltiererkennung; 2: Monitor; 3: Druckknöpfe (Schalter); 4: Computer; 5a: Wassersammelbehälter; 5b: Wasserschale; Pfeil: Zugang für ein Versuchstier. (siehe Text).

2.1.1 Tiere

Die Versuchstiere waren 10 weibliche (**Gruppe A**) und 9 männliche (**Gruppe B**) afrikanische Zwergziegen (*Capra hircus*, L.) aus der Zucht des Forschungsinstituts für die Biologie landwirtschaftlicher Nutztiere, Dummerstorf. Die weiblichen Ziegen (**Gruppe A**) hatten folgende Ohr- und Versuchsnummern: 216: Tier-Nr.1, 217: Tier-Nr.2, 220: Tier-Nr.3, 226: Tier-Nr.4, 232: Tier-Nr.5, 237: Tier-Nr.6, 241: Tier-Nr.7, 246: Tier-Nr.8, 249: Tier-Nr.9, 254: Tier-Nr.10. Die Ohrnummern von **Gruppe B** (Zwergziegenböcke) lauteten: 319: Tier-Nr.1, 320: Tier-Nr.2, 321: Tier-Nr.3, 330: Tier-Nr.4, 334: Tier-Nr.5, 340: Tier-Nr.6, 341: Tier-Nr.7, 342: Tier-Nr.8, 360: Tier-Nr.9.

Alle weiblichen Zwergziegen der **Gruppe A** wurden im Herbst 1997 geboren. Zu Beginn der Experimente waren diese Tiere ca. vier bis fünf Monate alt. Sie kamen aus Lernexperimenten (ohne Farbreize) des Forschungsinstitutes Dummerstorf, in denen sie mit einer ähnlichen Apparatur (siehe **Kap. 2.1**) vertraut gemacht worden waren. Bei den Zwergziegen der **Gruppe B** handelte es sich um Böcke, die im Okt.1998 geboren waren.

Die Versuche zur Farbreizdiskrimination mit dieser **Gruppe (A)** wurden in den Monaten von Ende April 1998 bis Ende April 1999 durchgeführt. Die Experimente mit den weiblichen Tieren wurden für jeweils 6 Wochen im Herbst 1998 (Decksaison) und 10 Wochen im Frühjahr 1999 (Ablammen und erneutes Decken) ausgesetzt. Im Frühjahr 1999, in dem die Ziegen nicht für die Versuche zur Verfügung standen, fanden zusätzliche Dressuren und Tests mit männlichen Tieren (**Gruppe B**) statt. Die Tests mit den weiblichen Tieren (**Gruppe A**) wurden nach Absetzen der Lämmer und Beenden der Decksaison fortgesetzt.

Folgende zusätzliche Tests wurden mit den männlichen Tieren (**Gruppe B**) durchgeführt: **1)** Spontantests für „Rot“, „Grün“, „Blau“, „Schwarz“, „Weiß“, „Gelb“, „Türkis“ und „Violett“ - Licht (**Kap. 3.1.2**); **2)** Erstellen von Lernkurven (siehe **Anhang C**) und Bestimmung der Akquisitionsniveaus (**Kap. 3.2.2**); **3)** Erstellen von Intensitätskurven mit **Methode II** (**Kap. 3.4.3**) und **4)** Erstellen von Wahlhäufigkeitskurven für einen achromatischen Stimulus gegen einen Farbstimulus, dem prozentual „Weiß“ - Licht zugemischt wurde (**Kap. 3.7**).

Die Haltung der Versuchstiere erfolgte in Gruppenhaltung, durch das Personal des Institutes für die Biologie landwirtschaftlicher Nutztiere, Dummerstorf, in einem Stall mit verschiedenen Abteilen. Der Versuchsraum (Box) besaß ein Fenster und war durch eine Trennwand (1,2 m Höhe) in zwei Bereiche, einen vorderen zum Stallgang hin und einen hinteren zum Fenster hin, geteilt. Die Trennwand besaß zwei Öffnungen, durch die die Tiere in den jeweils anderen Bereich gelangten. Die Fütterungseinrichtung (Heuraufe) befand sich an der Trennwand zur Fensterseite hin. Der Raum besaß die Maße 4.2 m x 3.5 m. Die Fütterung erfolgte mit Heu und Kraftfutter, zweimal täglich, wobei das Kraftfutter vom Stallgang aus in einem Trog verteilt wurde. Fanden keine Experimente statt, erfolgte morgens und abends eine Tränkung mit dem Eimer und einer Selbsttränke in der Box.

Während der Versuche erhielten die Tiere Wasser ausschließlich über die Belohnung in den Experimenten. Das Wasser wurde morgens und abends in einen Behälter im Computerraum gefüllt und die Ziegen konnten dies dann zu jeder Tageszeit abrufen. Die Menge an Wasser, die bei Richtigwahl in die Trinkschale floss, war jeweils 20 ml. Um ihren täglichen Wasserbedarf zu decken, mussten die Tiere je zwischen 50 und 150 Mal den richtigen Schalter drücken. Dies wurde durch die von mir weiterentwickelte Software im Computer gesteuert.

Als Computer wurde für den Einzeltierstand ein PC AT 486 DX-33 mit ATI-Grafikkarte (4 MB) und einer Zusatzkarte (PIO-Karte, Keithley Instruments, Germering) der AG Theoretische und Experimentelle Biologie, FU-Berlin zur zeit- und zustandsabhängigen

Ein- und Ausgabe von Steuerungssignalen eingesetzt. Der verwendete Monitor war ein 21“ Nokia High Resolution Colour Monitor.

Die elektronische Tiererkennung erfolgte mit dem System Megastar der Firma Urban, Wüstring, das durch einen Schnittstellenwandler ergänzt wurde. Die elektronische Tiererkennung und der Monitor wurden vom Institut für die Biologie landwirtschaftlicher Nutztiere, Dummerstorf, für die Versuche zur Verfügung gestellt.

Die vom Monitor abgestrahlte spektrale Intensitätsverteilung, sowie die Gesamtintensität bestimmter Farbreiz-Intensitäten ist mit einem Spektralphotometer (Instaspec IV mit 16 mm Linse, Oriel Instruments, Darmstadt) der AG Theoretische und Experimentelle Biologie ermittelt worden (Darstellung der Spektren: siehe **Anhang A**). Dabei wurde die Intensität [W/m^2] über der Wellenlänge [nm] der „Rot“ -, „Grün“ -, „Blau“ -, „Violett“ -, „Gelb“ -, „Türkis“ - und „Weiß“ - Lichter auf schwarzem Hintergrund und im dunklen Raum gemessen. Der Abstand des Objektivs von der Mattscheibe des Monitors betrug 14,5 cm. Dadurch wurde eine kreisförmige Fläche des Bildschirms von 1 cm Durchmesser erfasst. Die folgende Tabelle stellt die Wellenlängenbereiche für den jeweiligen Farbreiz, sowie ihr Maximum bei maximal darstellbarer Intensität für den oben genannten Abstand bzw. Kreisdurchmesser dar.

Licht: RGB(R, G, B) R, G, B = relative Lichtintensitätswerte der Phosphore von 0 bis 255	Wellenlängen- bereich [nm]	Maximum [nm]	Intensität [W/m^2], Abstand: 14.5 cm = Kreisfläche mit 1cm Durchmesser
Rot-Licht: RGB(255, 0, 0)	580 – 715	596 618 628 711	14 000 41 000 90 000 57 600
Grün-Licht: RGB(0, 255, 0)	470 – 620	528	15 100
Blau-Licht: RGB(0, 0, 255)	370 – 530	448	8 800

Tab. 1 Wellenlängenbereiche für die Farbreize und Intensitäts-Maxima, sowie relative bzw. absolute Intensitäten [W/m^2]. Die Spektren für alle vermessenen Lichter (Rot- Grün-, Blau-, Gelb-, Türkis-, Violett- und Weiß - Lichter) sind im **Anhang A** dargestellt.

Die verschiedenen Lichtintensitäten werden von den Phosphoren R, G, B des Monitors unterschiedlich erzeugt. Es werden keine einzelnen Wellenlängen erzeugt, sondern

Wellenlängenbereiche mit einem Maximalwert bei einer bestimmten Wellenlänge („Grün“ und „Blau“). „Rot“ wird vom Monitor mit vier Maximalwerten jeweils hoher Intensität erzeugt (siehe **Tab. 1**).

2.1.3 Experimentablaufsteuerung

Die Software zur Steuerung der Versuchsanlage und zur Erfassung der Daten für die Auswertung basierte auf dem DOS-Betriebssystem und lief unter WINDOWS 3.11 bzw. WINDOWS 95. Das Programm wurde in der Programmiersprache VISUAL BASIC (Version 3.0) geschrieben und mir von Dr. H. Franz, Forschungsinstitut für die Biologie landwirtschaftlicher Nutztiere, Dummerstorf zur Weiterentwicklung zur Verfügung gestellt. Auf dem Monitor wurden zwei farbige Felder erzeugt und die Gabe von Wasser wurde als Belohnung bei Richtigwahl über ein Schalterventil gesteuert (s. o). Der Computer registrierte jede Respondernummer, die zuvor in eine Tabelle im Programm eingegeben worden war. Das Programm erlaubte Versuchablaufpläne (siehe **Anhang B**) in unterschiedlichem Umfang einzugeben. Mit der Schrittzahl wurde die Anzahl der Präsentationen (Bilder) festgelegt. Diese gemäß einer Tabelle eingegebenen Schritte wurden fortlaufend wiederholt, bis eine neue Datei geöffnet bzw. der Versuch gestoppt wurde. Bei jedem Programmschritt wurde dem Tier für die Dauer von maximal 8 Stunden ein Bild präsentiert. Jede Aktion des Tieres, d. h. jeder Schalterdruck, den das Tier ausführte, rief den Folgeschritt, d. h. das nächste Bild gemäß Versuchsplan auf. Für jeden Schritt konnten zwei Kreise (Durchmesser in mm) mit verschiedenen RGB - Werten eingegeben werden, die dann auf schwarzem Hintergrund präsentiert wurden. Damit die Tiere vor jeder Aktion auf den Bildschirm blickten, sind Zwischenschritte programmiert worden, die über einen Zeitraum von 4 Sekunden keine Belohnung zuließen. Während der Zwischenschritte wurde in den Vorexperimenten der unbelohnte Farbreiz auf beiden Seiten des Monitors gezeigt. In den Hauptexperimenten wurde während dieser Zeit eine dunkle Mattscheibe präsentiert. Der Programmablauf erzeugte eine Protokolldatei mit den jeweiligen Daten des Ablaufplanes, d. h. **1**) Uhrzeit des Experimentbeginns und den Namen der Versuchsplandatei, **2**) Schrittzahl: Länge des Planes, **3**) Schalteranzahl (2) mit Art der Belohnung (Wasser) und Schalteraktivzeit, **4**) Felderanzahl (2) und **5**) eine Liste der Respondernummern (zur Identifikation der Tiere durch die Einzeltiererkennung). Es folgte eine genaue Beschreibung jedes einzelnen Schrittes **6**) mit den RGB – Werten der kreisförmigen Farbreize **7**) dargeboten auf der rechten bzw. linken Seite des Monitors mit **8**) Darbietungszeit und **9**) Folgeschrittnummer, sowie **10**) der Angabe,

welches der Felder belohnt wird. Das Programm erzeugte eine Protokoll-Tabelle mit Datum und Uhrzeit des Betretens bzw. Verlassens des Standes, der Aktion und der Schrittnummer, der Nummer des Feldes, das belohnt wurde, dem betätigten Schalter („1“ für Belohnung empfangen und „.“ bei Falschwahl), die RGB - Werte des unbelohnten und des belohnten Kreises, sowie die Respondernummer des Tieres, das sich im Stand befand. Diese Tabelle wurde anschließend in ein Tabellenverarbeitungsprogramm, z. B. EXCEL (Microsoft) eingelesen und später halbautomatisch ausgewertet. Zur besseren Übersicht und Kontrolle der aufgenommenen Tageswassermenge, wurde jeweils um 00:00 Uhr eine neue Datei mit dem aktuellen Datum angelegt.

2.1.4 Experimente: Übersicht

Folgende Zweifach-Wahlexperimente wurden mit Hilfe der oben beschriebenen Apparatur durchgeführt:

Test 1 Unbelohnte Tests auf Präferenz für einen der Farbreize „Rot“, „Grün“ oder „Blau“ mit maximaler Intensität gegen „Schwarz“ (**Gruppe A**) bzw. „Rot“, „Grün“, „Blau“, „Violett“, „Gelb“, „Türkis“ (**Gruppe B**), über einen Tag. Diese sollten eventuelle Vorlieben oder Abneigungen (genetisch bedingt oder durch Vorerfahrung) zeigen, damit dies ggf. bei der weiteren Versuchsplanung und Dressur berücksichtigt werden konnte. Spontane Bevorzungen oder Vermeidungen von Farbreizen können i. A. durch Dressur überkommen und durch Bestimmung des Lernniveaus geprüft werden (Backhaus, 1990).

Test 2 Bestimmung des Akquisitionsniveaus. Präsentation eines Farbreizes maximaler Intensität gegen „Schwarz“ für alle Farbreize (**Gruppe A**) bzw. für „Rot“, „Grün“ und „Blau“ (**Gruppe B**), sowie für „Weiß“ (**beide Gruppen**), da nur Tiere mit einem Akquisitionsniveau von über 75% Richtigwahlen für die Hauptexperimente verwendet werden sollten.

Test 3 Bestimmung „gleichheller“ Farbreize. Variation der Intensität des Alternativ-Farbreizes mit zwei unterschiedlichen Methoden. **Methode I** Halbierung der Intensität bei jeder Richtigwahl bzw. Verdopplung der Intensität bei jeder Falschwahl (Auf - und Ab - Methode) bis die getestete Lichtintensität mit „Schwarz“ verwechselt wurde (**Gruppe A**); **Methode II** Randomisiertes Anbieten in einer Tabelle vorgegebener Intensitätsintervalle (Intensitätskurven). Damit der belohnte Stimulus gleich blieb, wurde die „schwarze“ Monitorseite belohnt (**Gruppe A**). Bei **Gruppe B** wurde der farbige Kreis belohnt. Für jeden Farbreiz wurden Intensitätskurven (Richtigwahlen über relativer Intensität) erstellt (**Gruppe A und B**). Anhand dieser wurden die RGB - Werte bei 90 % Richtigwahlen für das

individuelle Versuchstier abgelesen und im nächsten Test als subjektiv gleichhelle Lichter verwendet.

Test 4 (Gruppe A und B) Testen von gleichhellen (gleicher Abstand zu „Schwarz“ bei 90% Richtigwahlen) farbigen Farbreize („Rot“, „Grün“ und „Blau“) gegen einen gleichhellen achromatischen Farbreiz („Grau“), wobei vorher eine Umdressur stattfand, bis das neue Akquisitionsniveau erreicht war, denn nun wurde der „graue“ Stimulus belohnt. Die Präsentation der Stimuli erfolgte auf der rechten und linken Seite des Monitors gemäß Tabellen, sowohl randomisiert (Exel-Zufallstabelle) als auch pseudo-randomisiert (Gellermann, 1933), wobei nicht öfter als dreimal hintereinander die gleiche Seite belohnt wurde, um keine Seitenstetigkeit anzudressieren.

Test 5 Testen von gleichhellen (nach Intensitätskurven aus **Test 3**) farbigen Lichtern der Zwischenfarbreize „Gelb“, „Türkis“ und „Violett“ gegen „Grau“ mittels der in **Test 4** verwendeten Tabellen (**Gruppe A**). Diese Zwischenfarbreize besaßen einen höheren „Weiß“ - Lichtanteil, d. h. einen geringeren Farbreizunterschied zu „Weiß“ - Licht. Deshalb wurden diese Reize von den Tieren weniger unterschieden als die in **Test 4** verwendeten Farbreize (s. u.).

Test 6 Bestimmung von minimalen Farbreizabständen zu „Grau“ durch Präsentation verschiedener Intensitäten der Farbreize „Rot“, „Grün“ und „Blau“, sowie von „Gelb“, „Türkis“ und „Violett“ (**Gruppe A**). Auch hier ist der achromatische Stimulus belohnt und die Präsentation der farbigen Kreise erfolgte pseudorandomisiert auf der rechten bzw. linken Monitorseite. Wenn die Tiere die farbigen Reize von „Grau“ unterscheiden konnten, ergaben sich jeweils Richtigwahlhäufigkeiten in Abhängigkeit von der Intensität, die ein Minimum von signifikant über 50% Richtigwahlen (**Kap. 3.8.4**, Irrtumswahrscheinlichkeit $< 0,05$; außer „Türkis“ siehe **Anhang E**) besaßen.

Test 7 In diesem Test sollten die Tiere (**Gruppe A und B**) auf ihre Unterscheidungsfähigkeit gleichheller Farbreize mit unterschiedlichen „Weiß“ - Lichtanteilen in den drei Bereichen „Rot“ -, „Grün“ - und „Blau“ - Licht untersucht werden. Damit konnte bestimmt werden, in welchem Bereich die Tiere die Farbreize besser oder schlechter unterscheiden können. Auch hier war der achromatische Stimulus der belohnte (**Gruppe A**), während die Farbreize, die einen „Weiß“ - Lichtanteil besaßen, randomisiert auftraten. Da die Zwischenfarbreize bereits mit relativ hohem „Weiß“ - Lichtanteil erzeugt wurden, fanden für diese keine Tests mit Zumischung von „Weiß“ - Licht statt.

2.1.5 Auswertemethoden

Allen Experimenten lag ein Versuchsplan zugrunde, der die Mindestanzahl der benötigten Beobachtungen berücksichtigte (Sachs, 1976a) und bei entsprechender Dauer (abhängig von der Anzahl Wahlen pro Tag) des Versuchs zu einer Anzahl Wahlen pro Tier führte, die einen kleinen Vertrauensbereich und somit ein hohes Signifikanzniveau ermöglichte. Eine Normalverteilung der Wahlanzahl je Farbreiz konnte vorausgesetzt werden, da die den Experimenten zugrunde liegenden Tabellen jeweils auf einer Binomial- bzw. Normalverteilung basierten. Zunächst musste festgestellt werden, ob die Wahlen der einzelnen Tiere unabhängig voneinander ausgeführt wurden. Dazu wurde für jeden getesteten Farbreiz der Mehrfelder- χ^2 -Test auf Unabhängigkeit der Anzahlen durchgeführt (Sachs, 1976b).

$$\chi^2 = \sum_{i=1} \frac{(B_i - E_i)^2}{E_i}; E = \frac{n_r}{n} \quad (1)$$

mit B: Besetzungszahlen (Anzahl Wahlen), E: Erwartungswerte, n_r : Richtigwahlen und n: Anzahl Wahlen.

χ^2 wurde mit Hilfe der folgenden beiden Tabellen für jedes Tier und jeden präsentierten Stimulus berechnet. Die zugrunde gelegte Mehrfeldertafel beschreibt in ihren Spalten die verschiedenen Intensitätsstufen des präsentierten Farbreizes und in den Zeilen die Einzeltiere anhand ihrer Tiernummern. Die erste dieser Tabellen (**Tab. 2**) lieferte die B-Werte (Anzahl Wahlen) und bildete die Grundlage zur Berechnung des jeweiligen E-Wertes (Erwartungswert), der dann in die Tabelle für die Erwartungswerte (**Tab. 3**) eingetragen wurde.

Anzahl Wahlen	RGB-Wert „Rot“ vs „Schwarz“	RGB-Wert „Grün“ vs „Schwarz“	RGB-Wert „Blau“ vs „Schwarz“	Summe
Tiernummer/ RGB-Wert				
31	B_{rot31}	B_{grün31}	B_{blau31}	B₃₁
....
39	B_{rot39}	B_{grün39}	B_{blau39}	B₃₉
Summe	B_{rot}	B_{grün}	B_{blau}	B_{ges}

Tab. 2 Berechnung (Summe) der B-Werte aus den Wahlanzahlen der Einzeltiere und den jeweiligen Farbreizen.

Der Erwartungswert für „Rot“ vs. „Schwarz“ für die Tiernummer 31 errechnete sich beispielsweise wie folgt:

$$E_{\text{rot31}} = B_{\text{rot}} * B_{31} / B_{\text{ges}} \quad (2)$$

Für alle Tiere und Farbreize ergab sich daraus die folgende Tabelle für die Erwartungswerte.

<u>Erwartungswerte</u> Tiernummer/ RGB- Wert	RGB-Wert „Rot“ vs „Schwarz“	RGB-Wert „Grün“ vs „Schwarz“	RGB-Wert „Blau“ vs „Schwarz“	Summe
31	E_{rot31}	$E_{\text{grün31}}$	E_{blau31}	E_{31}
....
39	E_{rot39}	$E_{\text{grün39}}$	E_{blau39}	E_{39}
Summe	E_{rot}	$E_{\text{grün}}$	E_{blau}	E_{ges}

Tab. 3 Berechnung (Summe) der Erwartungswerte der Anzahl Wahlen der Einzeltiere und in Abhängigkeit vom jeweiligen Farbreiz.

Der berechnete χ^2 - Wert wurde jeweils mit dem tabellierten $\chi^2_{v,\alpha}$ -Wert mit dem Freiheitsgrad $v = (\text{Zeilenanzahl} - 1) * (\text{Spaltenzahl} - 1)$ und der vorgewählten Irrtumswahrscheinlichkeit α verglichen. Bei berechnetem $\chi^2_{v; 0,05} < \text{tabellarischem } \chi^2_{v; 0,05}$ wurde die Unabhängigkeitshypothese (Unabhängigkeit der Wahlen voneinander bzw. von den Erwartungswerten) auf dem 5%-Niveau nicht abgelehnt. Der tabellierte $\chi^2_{v,\alpha}$ - Wert hätte im Falle der obigen Tabelle (die Anzahl (9) der Tiere entspricht der Zeilenanzahl, die Anzahl der (3) RGB - Werte vs. Schwarz entspricht der Spaltenanzahl) den Freiheitsgrad $v = 16$ und müsste laut Signifikanz-Tabelle (Sachs, 1976c, siehe **Tab. 4**) bei Unabhängigkeit und einer vorgewählten Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 kleiner als 26,3 sein. Eine Unabhängigkeit auf diesem Niveau gilt für alle im Folgenden zusammengefassten Ergebnisse.

Irrtumswahr- scheinlichkeit	≥ 0.05	< 0.05	< 0.01	< 0.001
Bedeutung	nicht signifikant	signifikant	sehr signifikant	hoch signifikant

Tab. 4 Übersicht der Signifikanzniveaus für die Unabhängigkeit der Wahlen.

Wenn alle Wahlen der Einzeltiere auf dem 5%-Niveau unabhängig voneinander waren, wurden die relativen Richtigwahlfrequenzen (belohnte Wahlen / Gesamtwahlen) zum Gruppenmittelwert zusammengefasst, in Abhängigkeit von den Lichtintensitäten (RGB - Werte) aufgetragen und interpoliert.

Ob eine Vergleichbarkeit der Stichproben gewährleistet war, wurde anhand eines weiteren χ^2 -Anpassungstests nachgewiesen, der bei verschiedenen Farbreizen in den Vorexperimenten zur Anwendung gelangte, da diese zum Teil wiederholt wurden. Diese Vergleichsstichproben wurden einige Wochen nach den ersten Tests durchgeführt.

Im Folgenden bezeichnet (n) jeweils die Anzahl der Wahlen eines Einzeltieres (A: Anzahl der Tiere), während (N) die Gesamtanzahl der Wahlen aller Tiere in einem Versuch ist. Bei den experimentell bestimmten Mittelwerten (MW) handelt es sich um sogenannte gewogene Mittelwerte (MW_{gew}), d. h. die Anzahl an Wahlen eines jeden Tieres (n) wird mit dem zugehörigen erreichten Mittelwert (MW) multipliziert, aufsummiert und dann durch die Gesamtanzahl der Wahlen aller Tiere dividiert.

$$MW_{\text{gew}} = \frac{(n_1 * mw_1) + (n_2 * mw_2) + \dots + (n_k * mw_k)}{N} \quad (3)$$

Um eine Aussage über die Farbreizunterscheidungsfähigkeit der Tiere der Grundgesamtheit treffen zu können, wird in den Graphen jeweils der Vertrauensbereich für die unbekannt exakte Wahrscheinlichkeit π (relative Häufigkeit) einer gleichverteilten Grundgesamtheit durch folgende Formel angenähert:

$$\frac{x-0.5}{N} - 1.96 * \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}} \leq \pi \leq \frac{x+0.5}{N} + 1.96 * \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}} \quad (4)$$

mit **x**: Anzahl der Richtigwahlen pro Lichtintensität; **N**: Anzahl der Gesamtwahlen pro Lichtintensität; **p**: Richtigwahlwahrscheinlichkeit von 0-1.

Die Fehlerbalken in den Graphen sind z. T. theoretische Fehlerbalken (Standardfehler des Mittelwerts: $s_x = s / N^{0.5}$). Je nach Anwendung ist der einfache bzw. doppelte empirische Fehler bzw. der Standardfehler (des Mittelwerts) angegeben und in der jeweiligen Bildunterschrift erklärt. Die Angemessenheit dieser Vorgehensweise wurde stichprobenartig

durch den Vergleich von theoretischen und empirischen Fehlerbalken geprüft. Je größer eine Stichprobe (n) ist, desto geringer wird der Einfluss von Extremwerten und desto kleiner wird der Abstand des experimentellen Mittelwertes (\bar{x}) vom wahren Mittelwert (π). Die folgende **Tab. 5** soll beispielhaft für die getesteten RGB - Werte des „roten“ Farbreizes einen Vergleich des experimentell bestimmten Standardfehlers des experimentellen Mittelwerts (MW) und dem aus obiger Formel bestimmten Vertrauensbereich (VB, **Fig. 4**) zeigen:

RGB-Werte	Standardfehler d. Mittelw.	Mittelwert (MW)	Anzahl Wahlen (N)	Vertrauensbereich oben	Vertrauensbereich unten
(255,0,0)	0,018	0,933	1360	0,947	0,920
(128,0,0)	0,028	0,942	1362	0,954	0,929
(64,0,0)	0,022	0,915	1363	0,930	0,900
(32,0,0)	0,030	0,757	1336	0,780	0,734
(16,0,0)	0,004	0,636	1361	0,661	0,610
(8,0,0)	0,014	0,588	1188	0,617	0,560
(4,0,0)	0,059	0,589	1361	0,615	0,562
(3,0,0)	0,003	0,654	1363	0,680	0,628

Tab. 5 Vergleich des experimentell bestimmten Standardfehlers des Mittelwerts bzw. deren Addition zum bzw. Subtraktion vom Mittelwert (MW) und den theoretisch bestimmten Grenzen des Vertrauensbereiches (VB oben und unten).

Addiert bzw. subtrahiert man den Standardfehler zum bzw. vom Mittelwert (MW) und vergleicht diesen Wert mit dem theoretischen oberen bzw. unteren Wert für den berechneten Vertrauensbereich, so findet man nur geringe Abweichungen. Es ist somit stichprobenartig gezeigt, dass die theoretischen Fehlerbalken eine gute Annäherung an die empirisch erhobenen Werte darstellen. Die theoretischen Fehlerbalken können somit als Schätzungen des empirischen Fehlers dienen. Der Standardfehler ist der wahrscheinlichste Fehler des Mittelwerts:

$$s_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N * (N - 1)}} \quad , \quad (5)$$

wobei **X**: Gruppenmittelwert der Richtigwahlhäufigkeit; **x_i**: Richtigwahlhäufigkeit des Einzeltieres und **N**: Gesamtanzahl der getätigten Wahlen sind.

Die graphische Darstellung der Versuchsergebnisse wurde mit dem Computerprogramm EXCEL 8.0 (Microsoft, München) erstellt, in dem auch die statistischen Berechnungen gemäß den oben angegebenen Formeln erfolgten. Die Graphen sind unterschiedlich für die Vor- und Hauptexperimente. Sie werden nachfolgend beispielhaft für einige typische Licht-Intensitäten dargestellt.

Die Mittelwerte (MW_{gew}) wurden interpoliert und durch eine Linie miteinander verbunden. Die Interpolation der Mittelwerte ist zulässig, da die psychophysische Funktion (siehe Sixtl, 1982) ähnlich verläuft. Danach ist die Wahrscheinlichkeit der Wahrnehmungsreaktion (Richtigwahlhäufigkeit) eine monoton wachsende Funktion des Reizes. Die gestrichelte Linie stellt die Anzahl Wahlen je relativer Intensität dar. Die RGB - Werte der rel. Lichtintensitäten können für „Blau“, „Rot“ und „Grün“ in Stufen von 0 bis 255 dargestellt werden.

Abb. 6 stellt einen Graphen dar, der beispielhaft die Vorexperimente zur Bestimmung gleichheller Lichter nach **Methode II** (gleichhäufiges Anbieten der verschiedenen Intensitätsstufen) beschreibt. Als relative Intensität ist der Zahlenwert aus dem zugehörigen RGB - Wert aufgetragen (X-Achse), bei den Zwischenfarbreizen die Summen der einzelnen R, G, und B-Werte. Als Häufigkeit (primäre Y-Achse) ist die Richtigwahlhäufigkeit eingetragen. Die eingezeichneten Fehlerbalken sind mit Hilfe der obigen Näherungsformel (**Fig. 3**) für den 95% Vertrauensbereich (95% VB) berechnet. Die Anzahl der Wahlen gibt die Wahlen pro Intensitätsstufe an.

Die Einzeltiere sind durch ihre Tiernummern (siehe **Kap. 2.1.1**) bezeichnet. Ergänzend werden die Anzahlen der Wahlen eines jeden Tieres aufgeführt. Als Fehlerbalken ist hier der Standardfehler (s_x) aufgetragen (**Fig. 5**). Die relative Richtigwahlwahrscheinlichkeit (p) des Einzeltieres für den achromatischen Stimulus ist über dem entsprechenden Farbreiz aufgetragen, mit (n_1) -(n_8) als Anzahl der Wahlen je Tier.

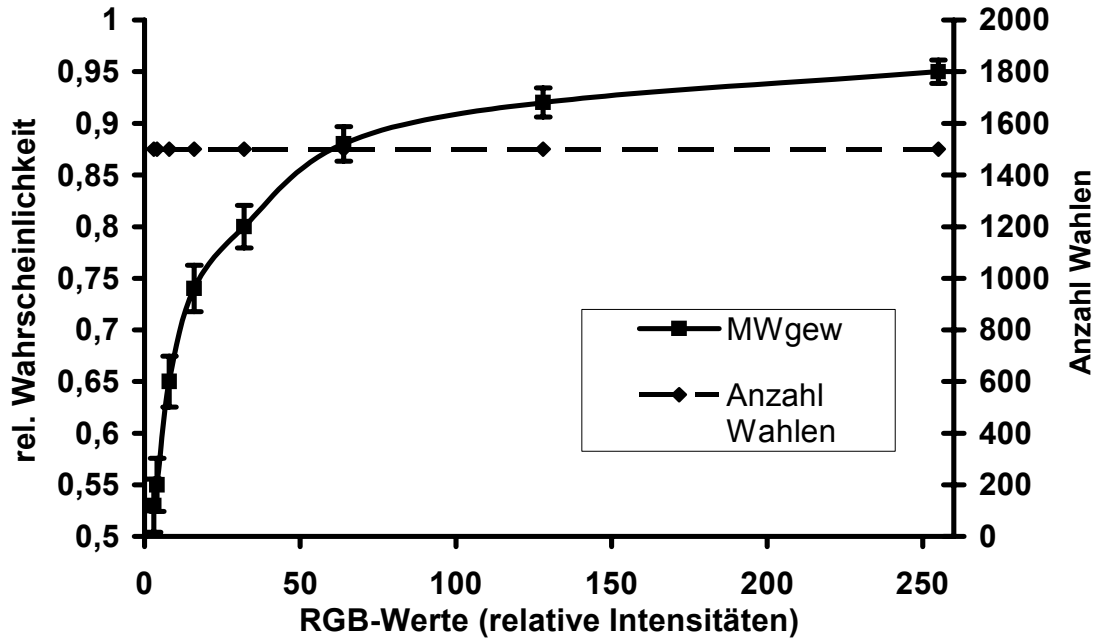


Abb. 6 Wahlhäufigkeit und relative (rel.) Wahlwahrscheinlichkeit (MWgew) in Abhängigkeit von der relativen Intensität (RGB - Werte) farbigen Lichts vs. kein Licht (R, G, B = 0; „Schwarz“), 95% Vertrauensbereich (VB).

Die Wahlhäufigkeiten der Hauptexperimente (Tests 4 und 5) werden durch Balkendiagramme (**Abb. 7**) für die jeweiligen Einzeltiere dargestellt.

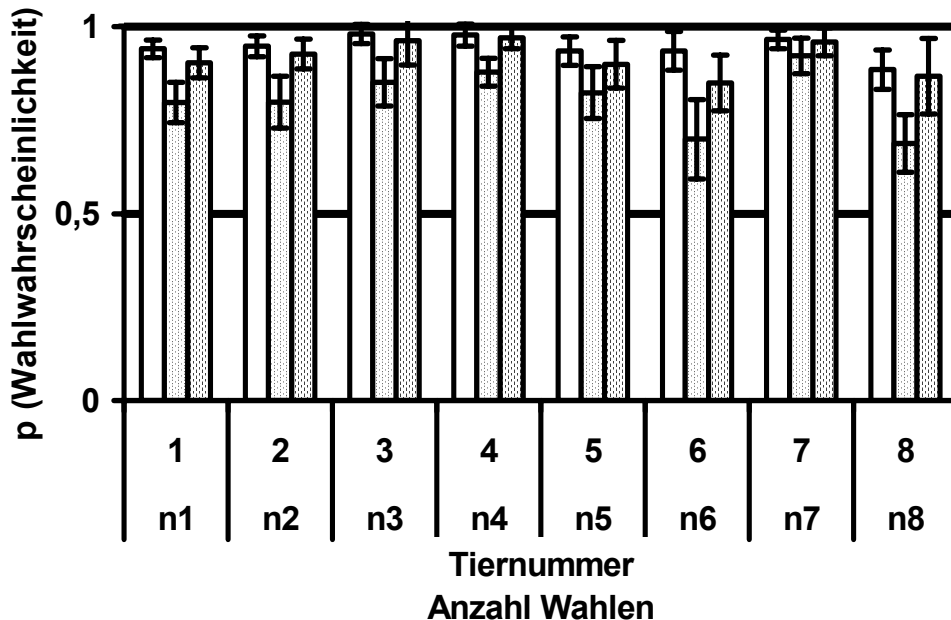


Abb. 7 Wahlhäufigkeiten (p) der Einzeltiere (1-8) für einen achromatischen Stimulus vs. Farbreiz; „n“: Anzahl der Wahlen je Tier; Fehlerbalken sind die Standardfehler s; linke Säule (leer): „Grau“ vs. „Rot“; mittlere Säule (gepunktet): „Grau“ vs. „Grün“; rechte Säule (gestrichelt): „Grau“ vs. „Blau“.

Die Hauptexperimente, **Test 6**, untersuchten „Grau“ gegen verschiedene Intensitäten (RGB - Werte) gleichheller Farbreize. Die Wahlhäufigkeiten für den achromatischen Stimulus sind gegen die verschiedenen Farbreize in Abhängigkeit zur relativen Intensität (Zahlen- bei „Rot“, „Grün“ und „Blau“ bzw. Summenwert des RGB - Wertes bei „Gelb“, „Türkis“, „Violett“ und „Weiß“) aufgetragen (**Abb. 7**). Hierbei waren jedoch systematische und stochastische Unterschiede zwischen den Wahlen der Einzeltiere zu erwarten, sodass hier jedes Tier einzeln dargestellt wird. Die Wahlhäufigkeiten werden wiederum interpoliert und mit theoretischen Fehlerbalken (1 s) (95%VB) versehen.

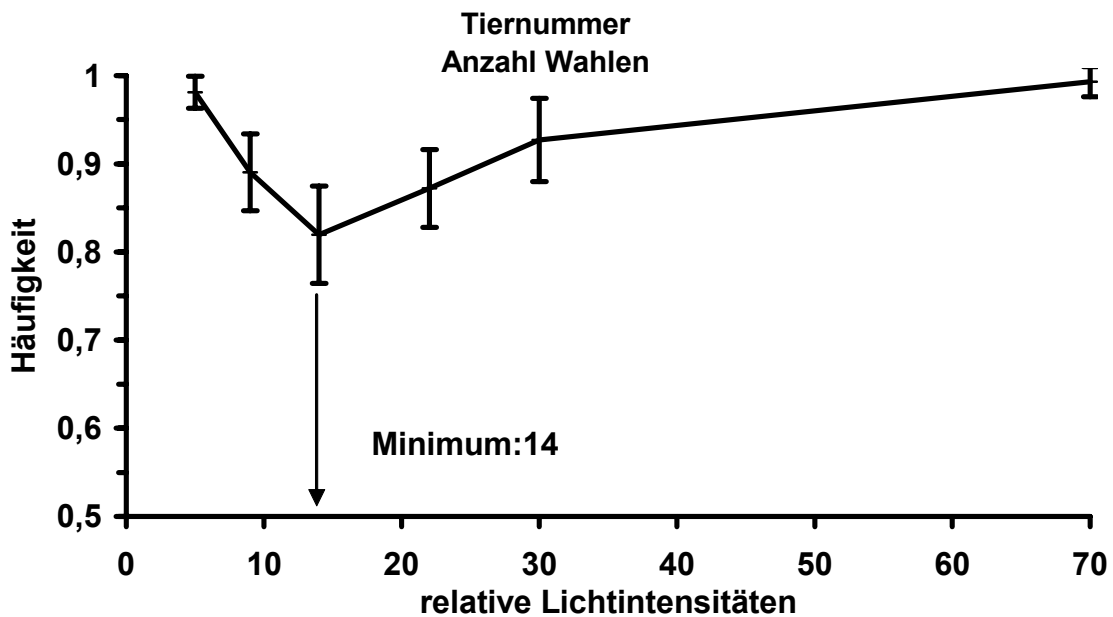


Abb. 8 Richtigwahlhäufigkeiten von „Grau“ vs. verschiedene Licht-Intensitäten (relative Lichtintensitäten: RGB - Wert) für die Einzeltiere (Tiernummern) sowie die gesamte Anzahl der Wahlen; Fehlerbalken = 95% VB.

Das Minimum der Wahlhäufigkeits-Kurve gibt an, dass das Einzeltier dort schlechter den Dressur-Farbreiz vom Alternativstimulus unterscheiden kann. Die entsprechenden Alternativreize wurden jedoch noch eindeutig (> 75% Richtigwahlen) vom belohnten Farbreiz unterschieden.

Die in den Hauptexperimenten (**Test 7**) gemessenen Wahlhäufigkeiten der drei Farbreize „Rot“, „Grün“ und „Blau“ sind in Abhängigkeit von ihrem zugemischten „Weiß“ - Lichtanteil (in Prozent) in **Abb. 9** dargestellt. Die Zumischung von „Weiß“ - Licht erfolgte nach der unten dargestellten Formel (**Fig. 6**). Dabei wurde zunächst ein Tier ausgewählt, dessen Minima in der Richtigwahlhäufigkeit in **Test 6** den Gruppenmittelwert für den entsprechenden RGB - Wert repräsentierte. Sie werden im Folgenden mit $RGB(R_{\max}, 0, 0)$ für den „roten“, $RGB(0, G_{\max}, 0)$ für den „grünen“ und $RGB(0, 0, B_{\max})$ für den „blauen“ Farbreiz

bezeichnet. Der achromatische Stimulus ist $RGB(R_a, G_a, B_a)$. Zunächst wird die Differenz zwischen den einzelnen Komponenten der RGB - Werte des Farbreizes und des achromatischen Lichtreizes ($RGB(R_a, G_a, B_a)$) ist der RGB - Wert für „Grau“ gebildet und mit dem vorgewählten %-Wert multipliziert. Je nach Vorzeichen wird diese Zahl dann zum jeweiligen achromatischen Wert $RGB(R_a, G_a, B_a)$ addiert oder subtrahiert.

Hier ein typisches Beispiel für den neuen RGB - Wert (R_x, G_x, B_x) mit $(1 - x)$ % „Weiß“ - Lichtanteil des „roten“ Farbreizes:

$$\begin{aligned} R_x &= R_a + x \% * (R_{\max} - R_a); \\ G_x &= G_a + x \% * (0 - G_a), \\ B_x &= B_a + x \% * (0 - B_a) \end{aligned} \quad (6)$$

Für x wurden die Werte 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 und 100 willkürlich gewählt, um einen gleichmäßigen Überblick zu erhalten.

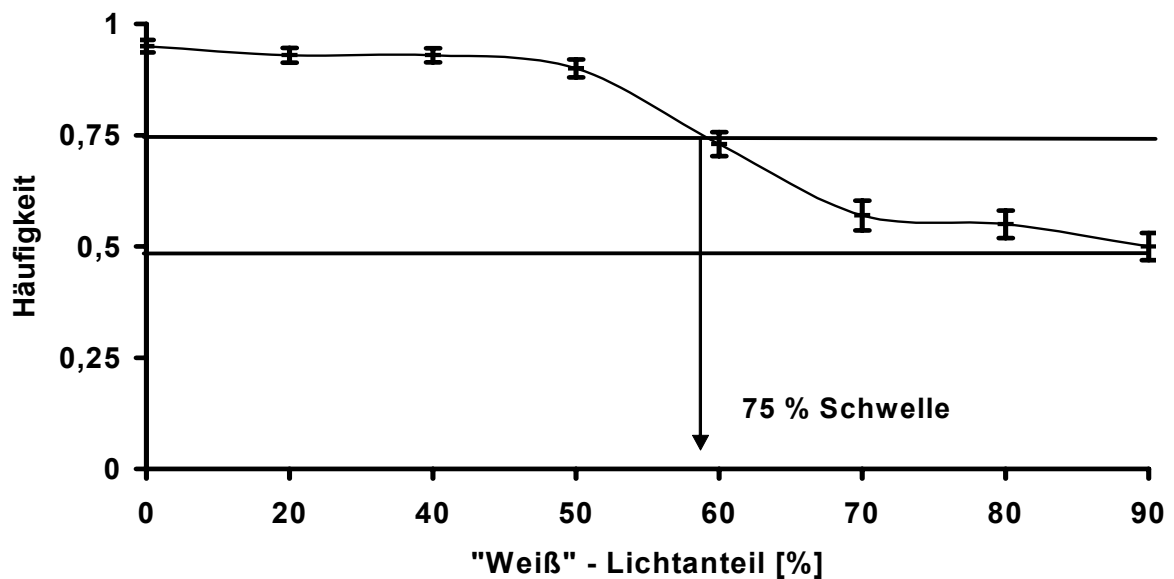


Abb. 9 Möglicher typischer Verlauf der Wahlhäufigkeiten (Häufigkeit) für „Weiß“ - Lichtanteile [%] am jeweiligen Farbreiz; absolute Schwelle: 75% Richtigwahlen (Häufigkeit 0.75); Fehlerbalken: 95% VB.

Das Minimum der Kurve (**Abb. 9**) bei einem bestimmten %-Wert kennzeichnet, inwieweit die Tiere in diesem Bereich den farbigen Farbreiz + „Weiß“ - Lichtbeimischung vom farbigen Farbreiz ohne Zumischung unterscheiden können. Der so gemessene

Unterschied wird gegen den zugemischten „Weiß“ - Lichtanteil aufgetragen und dadurch interpretiert.

Der Abzissenwert der Kurve bei 0.75 Richtigwahlhäufigkeit ist die Sichtbarkeitsschwelle (siehe **Kap. 1.2**). Bei 50 % Richtigwahlen wird der belohnte („graue“) Farbreiz nicht mehr vom Alternativfarbreiz („grauer“ Farbreiz und prozentual zugemischtes „Weiß“ - Licht) unterschieden. Die Fehlerbalken sind theoretische Fehlerbalken für den 95 % Vertrauensbereich. Die Zusammenfassung der Wahlhäufigkeiten aller Tiere einer Gruppe erfolgte nach positiver Prüfung durch einen χ^2 - Unabhängigkeitstest, der für alle Farbreize (siehe oben) durchgeführt wurde.