

**Untersuchungen zur Farbwahrnehmung beim
Goldfisch *Carassius auratus*: Gibt es eine
Kategorisierung von Spektralfarben?**

Dissertation

Zur Erlangung des Grades
Doktor der Naturwissenschaften

Am Fachbereich Biologie
Der Johannes Gutenberg-Universität

Julia Poralla

geb. am 24.06.1973 in Freiburg i. Brsg.

Mainz, 2003

Mündlichen Prüfung: Januar 2004

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1 Einführung | 1 |
| 1.2 Farbensehen bei Tieren | 2 |
| 1.2.1 Der Goldfisch als Versuchstier | 2 |
| 1.2.2 Das Farbensehen des Goldfisches | 3 |
| 1.3 Kategorisierung | 5 |
| 1.3.1 Farbkategorisierung beim Menschen | 5 |
| 1.3.2 Farbkategorien bei Tieren | 6 |
| 1.3.2.1 Farbkategorien beim Goldfisch | 8 |
| 1.4 Fragestellung der Arbeit | 10 |
| | |
| 2. Material und Methode | 13 |
| 2.1 Versuchstiere | 13 |
| 2.2 Haltung | 13 |
| 2.3 Raumbelichtung | 14 |
| 2.4 Versuchsaufbau | 14 |
| 2.5 Testfeldbeleuchtung | 16 |
| 2.6 Dressur | 17 |
| 2.7 Erstellung der fischspezifischen Wellenlängenskala und Auswahl der Dressur- und Testwellenlängen..... | 18 |
| 2.8 Testmethoden | 23 |
| 2.8.1 Zwei Dressurwellenlängen | 23 |
| 2.8.1.1 50:50-Test | 23 |
| 2.8.1.2 Generalisierungstest | 24 |
| 2.8.1.3 Transfertest | 25 |
| 2.8.1.4 Wellenlängenunterscheidungstest | 27 |
| 2.8.2 Versuche mit sechs verschiedenen Dressurwellenlängen | 28 |
| | |
| 3. Ergebnisse | 30 |
| 3.1 Versuche mit zwei Dressurwellenlängen | 30 |
| 3.1.1 50:50-Test | 30 |
| 3.1.2 Generalisierungstest | 35 |

| | |
|---|-----|
| 3.1.2.1 Gesamtergebnis der Generalisierungstests | 46 |
| 3.1.3 Transfertest | 47 |
| 3.1.3.1 Gesamtergebnis des Transfertests | 55 |
| 3.1.4 Wellenlängenunterscheidungstest | 57 |
| 3.1.4.1 Gesamtergebnis des Wellenlängenunterscheidungstest | 65 |
| 3.2 Versuche mit sechs Dressurwellenlängen | 67 |
| 3.2.2 Gesamtergebnis der Versuche mit sechs Dressurwellenlängen | 87 |
| 4. Diskussion | 90 |
| 4.1 Versuche mit zwei Dressurwellenlängen | 92 |
| 4.1.1 50:50-Test | 92 |
| 4.1.2 Generalisierungstest | 93 |
| 4.1.3 Transfertest | 97 |
| 4.1.4 Wellenlängenunterscheidungstest | 100 |
| 4.1.5 Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen mit zwei Dressurwellenlängen | 105 |
| 4.2 Versuche mit sechs Dressurwellenlängen | 106 |
| 4.2.1 Überprüfung von „Wahl Tendenzen“ | 107 |
| 4.2.2 Vergleich Gesamtergebnis mit der spektralen Empfindlichkeit der Zapfen | 109 |
| 4.2.3 Vergleich Gesamtergebnis mit der Unterscheidungsfähigkeit für Wellenlängen | 110 |
| 4.2.4 Vergleich Gesamtergebnis mit der Chlorophyllabsorptions- kurve..... | 112 |
| 4.2.5 Mögliche Kategoriegrenzen | 113 |
| 4.2.6 Transfertest der Fische 14 und 15 nach Dressur auf 569 – 608 nm..... | 117 |
| 4.2.7 Schlussfolgerung aus den Ergebnissen mit sechs Dressurwellenlängen | 118 |
| 4.3 Vergleich der Ergebnisse mit zwei und sechs Dressurwellenlängen | 119 |
| 5. Zusammenfassung | 123 |
| 6. Literatur | 125 |

1. Einleitung

1.1 Einführung

Sinnesorgane sind die „Antennen“, mit denen Organismen Informationen aus ihrer Umwelt empfangen. Von allen Sinnesorganen liefert das Auge die detailreichste Information über die Umwelt; es ist das räumlich am höchsten auflösende Sinnesorgan. Der adäquate Reiz für die Lichtsinnesorgane sind elektromagnetische Wellen bestimmter Länge. Das sichtbare Spektrum repräsentiert dabei nur einen kleinen Ausschnitt des gesamten Spektrums der elektromagnetischen Strahlung. Dabei variiert der sichtbare Bereich bei verschiedenen Tiergruppen und ist an deren Lebensweise und Anforderungen angepasst.

Die meisten Wirbeltiere und auch viele Insekten sind in der Lage verschiedene Spektralbereiche des Lichtes voneinander zu unterscheiden. Voraussetzung dafür ist das Vorhandensein verschiedener Rezeptortypen mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit. So wird Licht einer bestimmten Wellenlänge nicht einfach als heller oder dunkler als seine Umgebung wahrgenommen, sondern zeichnet sich außer durch Helligkeit durch eine besondere Sinnesqualität - eine Farbe - aus. Dabei gibt die Anzahl der verschiedenen Rezeptortypen noch keine Information über die Anzahl der Farben, die wahrgenommen werden können. So kann z.B. der trichromatische Mensch mit seinen drei verschiedenen Zapfentypen hunderte von Farben unterscheiden. Dies ist jedoch nicht nur eine Leistung der Rezeptoren sondern auch der nachgeschalteten Informationsverarbeitungsprozesse im ZNS (WEHNER u. GEHRING, 1995; PENZLIN, 1991).

1.2 Farbsehen bei Tieren

Am Anfang des 20. Jahrhunderts war noch nichts über das Farbsehen bei Tieren bekannt. Die Versuche, die v. HESS (1912) an Fischen durchgeführt hatte, sollten der Beweis sein, dass Fische, wie auch alle Invertebraten, farbenblind sind. Diese Versuche wurden doch schon sehr bald in Frage gestellt. Von FRISCH (1913) machte Experimente zunächst mit Ellritzen (*Phoxinus laevis*), mit denen er beweisen konnte, dass Fische sehr wohl in der Lage sind, Farben wahrzunehmen und zu unterscheiden. Die Fische konnten eine bestimmte Farbe aus einer ganzen Reihe grauer Testfelder unterschiedlicher Helligkeit herausuchen. Die Fähigkeit von Fischen Farben wahrzunehmen wurde einige Jahre später auch von anderen bestätigt (z.B. SCHIEMENZ, 1924; WOLFF, 1925; HAMBURGER, 1926). Ebenso gelang es als erstem von FRISCH (1914) mit seinen berühmten Dressurexperimenten an Bienen ein Farbsehen bei Invertebraten nachzuweisen. KÜHN (1927) zeigte schon früh bei Bienen das Phänomen des simultanen Farbkontrastes. Somit war bewiesen, dass mit Hilfe geeigneter Testmethoden der Nachweis über das Farbsehen von Tieren erbracht werden kann. Seit diesen frühen Untersuchungen wurde für eine Vielzahl von Invertebraten und Vertebraten mit unterschiedlichen Methoden Farbsehen nachgewiesen (Übersicht in KELBER et al., 2003).

1.2.1 Der Goldfisch als Versuchstier

Der Goldfisch (*Carassius auratus*) gehört zu den Karpfenfischen (*Cyprinidae*) und stellt eine Unterart des Giebels (*Carassius auratus gibelio*) dar. Aus verschiedenen Gründen eignet sich der Goldfisch besonders gut als Versuchstier. Überlieferungen nach ist er bereits seit über 2 000 Jahren domestiziert, und damit die älteste Zierfischart. Historisch sichere Nachweise über die gezielte Haltung existieren aus dem 10. Jahrhundert nach Christus. Der Goldfisch ist recht zahm und kann daher leicht dressiert werden. Zudem ist er sehr anspruchslos in seiner Haltung und das Visuelle System ist bereits sehr gut untersucht.

1.2.2 Das Farbsehen des Goldfisches

Das Visuelle System der Cypriniden und besonders das des Goldfisches ist sehr gut untersucht. Nicht nur die Photopigmente der nicht am Farbsehen beteiligten Stäbchen (SCHWANZARA, 1967), sondern auch der Zapfen (MARKS, 1965) sind bekannt. Marks wies mit Hilfe von mikrospektralphotometrischen Messungen die Absorptionsspektren von drei verschiedenen Zapfentypen nach. Seine Ergebnisse wurden durch die Untersuchungen von HÁROSI und MacNICHOL (1974) bestätigt. Die Absorptionsmaxima wurden bei ca. 450 nm, 530 nm und 625 nm gefunden. Der vierte, UV-empfindliche Zapfen wurde dagegen erst später entdeckt (NEUMEYER, 1985; HAWRYSHYN u. BEAUCHAMP, 1985 sowie BOWMAKER et al., 1991), sein Absorptionsmaximum liegt bei ca. 360 nm (Abbildung 1.1). Der Goldfisch nutzt alle vier Zapfen zum Farbsehen, sein Farbsehen ist tetrachromatisch (NEUMEYER, 1992). Somit entspricht der Farbraum des Goldfisches, im Vergleich zur Darstellung des Farbdreiecks beim Menschen, einem Tetraeder (siehe Abbildung 1.2). Auch die spektrale Empfindlichkeit ist auf verschiedenen Ebenen des visuellen Prozesses und mit unterschiedlichen Methoden untersucht worden (WAGNER et al. 1960; YAGER, 1967, 1968; KANEKO, 1973; BEAUCHAMP u. ROWE, 1977; POWERS u. EASTER, 1978 a u. b; NEUMEYER, 1984). Ebenso ist die Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit der Goldfische untersucht worden (YARCZOWER u. BITTERMAN, 1965; NEUMEYER, 1986).

Aufgrund dieser grundlegenden Informationen über das Farbsehen der Goldfische lag es nahe, auch andere Aspekte, die auf Farbsehen beruhen, zu erforschen. So wurden mit Hilfe von Dressurexperimenten z.B. die Farbkonstanz (DÖRR, 1996; DÖRR u. NEUMEYER 1996, 2000; NEUMEYER et. al, 2002) und der simultane Farbkontrast (DÖRR u. NEUMEYER, 1997) bei Goldfischen untersucht. ZERBOLIO (1980) machte Untersuchungen zur Farbbevorzugung und fand heraus, dass 67 % der getesteten Fische eine ausgeprägte Farbbevorzugung zeigten, die jedoch nicht einheitlich war.

Des weiteren wurde entdeckt, dass die Bewegungswahrnehmung, welche mit Hilfe der optomotorischen Folgereaktion untersucht wurde, farbenblind ist (SCHAERER und NEUMEYER, 1996).

Das Farbsehen des Goldfisches ist folglich in einigen Bereichen bereits sehr gut untersucht und eignet sich für weitere Experimente.

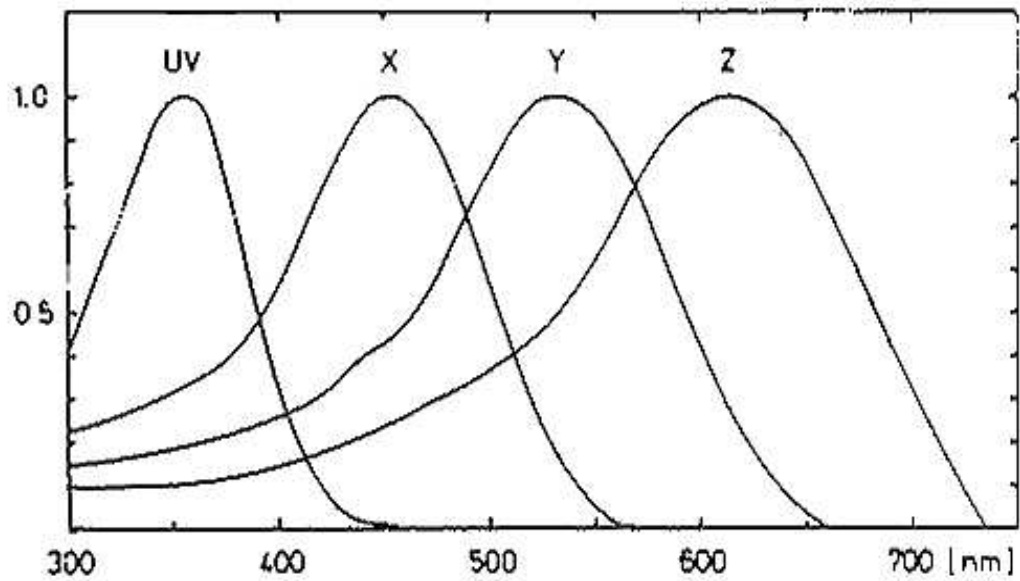


Abbildung 1.1: Absorptionsspektren der vier verschiedenen Zapfenphotopigmente beim Goldfisch (nach BOWMARKER et al., 1991).

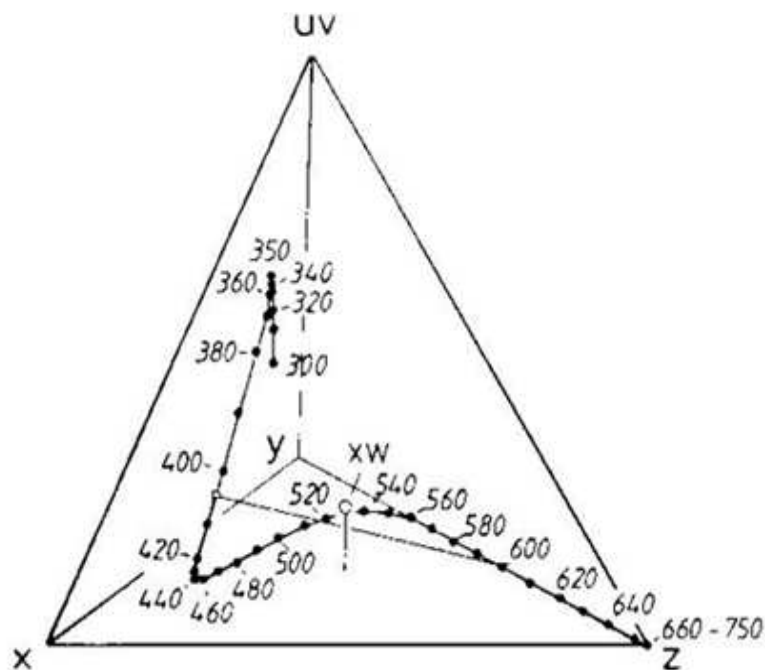


Abbildung 1.2: Farbtetraeder des Goldfisches, welcher auf den Rezeptorempfindlichkeitsfunktionen der Zapfen beruht. Die Eckpunkte des Tetraeders werden mit x, y, z und uv bezeichnet und stellen die alleinige Erregung des S-, M-, L- bzw. UV- Zapfens dar (nach NEUMEYER, 1992).

1.3 Kategorisierung

Unter Kategorisierung versteht man die Reduzierung von Komplexität, nach der Individuen die überwältigende Fülle an Informationen aufgliedern (DORSCH, 1998). Vereinfacht gesagt, wird eine Reihe von unterscheidbaren Reizen in einer bestimmten Art und Weise, z.B. indem sie denselben Namen bekommen, gleich behandelt (BORNSTEIN, 1987). Dem Prozess der Kategorisierung liegen Generalisierungs- und Differenzierungsvorgänge zugrunde. Die Generalisierung versetzt Organismen in die Lage, die unendliche Vielfalt der Natur in handhabbare Einheiten aufzuteilen. Reize werden durch eine Herstellung von Ähnlichkeiten auf Gruppierungen von Reizen in Kategorien reduziert, deren Menge sonst nicht bewältigt werden könnte. Die Diskriminierung hilft dagegen, wichtige Unterscheidungen zwischen zwei Reizen vorzunehmen (WESSELLS, 1994).

Kategorien sind in sich strukturiert. Manche Vertreter einer Kategorie werden als typischer eingeschätzt als andere (ROSCH, 1973). Der Reiz, der eine Kategorie am besten repräsentiert wird als Prototyp bezeichnet. Bildlich gesehen liegen die Prototypen in der Mitte einer Kategorie, atypische Mitglieder eher an der Peripherie (WESSELLS, 1994).

1.3.1 Farbkategorien beim Menschen

Der Begriff Farbe kann mit den drei Begriffen Farbton, Helligkeit und Sättigung beschrieben werden. Der Mensch kann gut 300 Farbtöne wahrnehmen, variiert zudem noch die Helligkeit und die Sättigung sind es mehrere Millionen (MÖRIKE, 1991). Dadurch ist eine Kategorisierung nicht nur sinnvoll, sondern auch notwendig. Farbbenennungsexperimente (z.B. BEARE, 1963; BOYNTON & GORDON, 1965) ermöglichen es, die Anzahl an Kategorien festzustellen. Es wurde in Versuchen gezeigt, dass nur vier Farbnamen (Blau, Grün, Gelb und Rot) ausreichen, um alle Spektralfarben zu beschreiben (BORNSTEIN, 1987; WOOTEN & MILLER, 1997). Physikalisch gesehen variiert das Wellenlängenspektrum kontinuierlich, von der physiologischen Seite her variieren die Farbtöne kategorisch. So werden z.B. zwei

verschiedene Grün als ähnlicher gesehen, als ein Grün und ein Gelb, auch wenn sie denselben Abstand auf der Wellenlängenskala aufweisen (HARNAD, 1987).

Lange Zeit war nicht bekannt, ob der Bildung von Farbkategorien ein angeborener oder ein erlernter Mechanismus zugrunde liegt. Liegen Kategorien genetische Faktoren zugrunde, so sollten sie in einem bestimmten Ausmaß universell und transkulturell sein. Werden Kategorien jedoch primär von Erfahrungen und kulturellen Mustern geformt, so sollten sie zwischen den verschiedenen Kulturen variieren (WESSELLS, 1994). Die Arbeit von BERLIN & KAY (1969) lieferte erstmals eine Antwort auf diese Frage. Die Anthropologen untersuchten 20 verschiedene Sprachen und fanden heraus, dass zwar die Grenzen von basalen Farbbezeichnungen bei den verschiedenen Sprachen variierten, die Prototypen einer Farbkategorie jedoch einheitlich waren. Dies lieferte den Beweis, dass die Bildung von Farbkategorien universell ist und nicht dem Einfluss von Sprache und Kultur unterliegt. Die Anzahl von Kategorien unterscheidet sich dabei stark und unterliegt z.B. kulturellen Unterschieden (KAY et al., 1997) und daher ist eine genaue und einheitliche Angabe über die Anzahl von Kategorien beim Menschen nicht möglich.

Gestützt wird die Annahme einer universellen Farbkategorisierung auch durch die Versuche an vier Monate alten Kindern, welche noch nicht in der Lage sind, sich über Sprache auszudrücken (BORNSTEIN et al., 1976). Durch Habitationsversuche konnte gezeigt werden, dass Säuglinge Farben in Kategorien einteilen, die mit denen bei Erwachsenen übereinstimmen.

Diese Ergebnisse schließen jedoch nicht aus, dass Sprache und Erfahrung einen Einfluss auf die Farbkategorien haben, welche somit nicht vollkommen fest und starr sind.

1.3.2 Farbkategorien bei Tieren

Ein weiterer Beweis dafür, dass Farbkategorien universell sind, liefern Versuche an Tieren, die in der Lage sind Farben wahrzunehmen, aber keine Möglichkeit haben, eine sprachliche oder kulturelle Einteilung der Farben in Kategorien vorzunehmen (BORNSTEIN, 1987). Dabei ist nicht nur die Frage, ob Tiere Farbkategorien bilden interessant, sondern auch, ob es Übereinstimmungen mit denen des Menschen gibt. Dabei muss man berücksichtigen, dass das sichtbare Spektrum bei Tieren verschie-

den von dem des Menschen sein kann. So ist z.B. das Spektrum der Biene ins Kurzwellige verschoben. Sie können UV-Licht wahrnehmen, sind aber nicht in der Lage den Wellenlängenbereich, der beim Menschen die Farbe Rot bildet, als Farbe zu sehen, sondern sie verwechseln Licht dieser Wellenlängen mit Schwarz (v. FRISCH, 1914).

Farbkategorien bei Tieren wurden bisher hauptsächlich mit zwei verschiedenen Verhaltensexperimenten untersucht: der „matching-to-sample“ Methode und über den Generalisierungsgradienten.

Die „matching-to-sample“ Methode wurde z.B. bei Schimpansen angewendet (MATSUZAWA, 1985). Das Tier lernte, mit Hilfe von geometrischen Symbolen elf verschiedenen Farben Namen zuzuordnen. Anschließend mussten 40 Farbchips mit Hilfe der elf Symbole benannt werden. Dabei ergaben sich Gruppen von Farbchips, die mit denselben Symbolen benannt wurden, also Kategorien. Farben, die mit zwei Farbnamen benannt wurden, bilden die Grenzen zwischen zwei Kategorien. Dabei bildete die Schimpansin dieselben Farbgruppen, wie sie in einem Parallelversuch von Menschen erhalten wurden.

Bei Makaken wurde dagegen der Generalisierungstest zur Ermittlung von Kategorien herangezogen (SANDELL et al., 1979). Die Affen wurden auf eine bestimmte Wellenlänge dressiert, indem sie für 70 Mal Drücken eines Knopfes belohnt wurden. Im Generalisierungstest bekamen sie die Dressurwellenlänge wie auch eine gewisse Anzahl an anderen Wellenlängen für je 50 sek. zu sehen und es wurde jeweils gezählt, wie oft der Knopf gedrückt wurde. Die Ergebnisse wurden dann als Generalisierungskurven dargestellt und anhand dieser die Kategorien lokalisiert und ebenfalls eine Übereinstimmung mit denen des Menschen gefunden.

Mit Hilfe der genannten Methoden konnten aber auch Kategorien bei Nicht-Primaten nachgewiesen werden. Dabei unterschieden sich jedoch Lage und Anzahl von denen beim Menschen. So wurden Kategorien bei Tauben (BLOUGH, 1961 u. 1972; WRIGHT & CUMMING, 1971; ZENTALL & EDWARDS, 1984) und Hühnern (JONES et al., 2001) nachgewiesen.

Wright und Cumming wählten dabei die „match-to-sample“-Methode. Die Tauben bekamen drei Testfelder zu sehen und mussten das mittlere Testfeld, welches eine von drei Dressurwellenlängen zeigte, mit den beiden äußeren vergleichen. Wählten sie die richtige Seite, so wurden sie belohnt. Im anschließenden Versuch wurden die Seiten mit zwei der Dressurwellenlängen beleuchtet und das mittlere Feld zeigte eine

Reihe von Wellenlängen, welche dazwischen lagen. Die Wahlhäufigkeiten auf die seitlichen Dressurwellenlängen ergaben dann charakteristische Kurven, welche zusammen aufgetragen zwei Schnittpunkte ergaben, die bei 540 nm und 595 nm lagen. Diese Schnittpunkte wurden von den Autoren als Kategoriegrenzen gedeutet. In weiteren Versuchen zeigte sich, dass diese Schnittpunkte unabhängig von den ausgewählten Dressurwellenlängen auftraten. Wurden die Tauben dagegen auf die Wellenlängen dieser Schnittpunkte dressiert, so brauchten sie zum einen deutlich länger, diese Farben zu erlernen, zum anderen war das anschließende Wahlverhalten sehr konfus. Die Tauben schienen bei diesen Wellenlängen Schwierigkeiten zu haben, die Farbe in eine Kategorie einzuordnen.

BLOUGH (1972) wendete bei Tauben dagegen den Generalisierungstest an und ermittelte mit dessen Hilfe eine Kategoriegrenze, die, übereinstimmend mit den Versuchen von Wright und Cumming, bei 540 nm lag.

1.3.2.1 Farbkategorien beim Goldfisch

Auch beim Goldfisch gibt es bereits drei Arbeiten, die sich mit dem Thema Farbkategorien beschäftigen.

Die ersten Versuche stammen von ZERBOLIO (1985). ZERBOLIO hatte bereits 1981 Untersuchungen zur Farbpräferenz bei Goldfischen durchgeführt. Die Goldfische befanden sich in einer Y-förmigen Versuchsanordnung, bei der zwei Arme beleuchtet waren, ein Arm mit rotem und einer mit blauem Licht. Die Fische mussten in einen der beleuchteten Arme schwimmen, um einem Elektroschock zu entgehen. Die Farbe Grün wurde dabei insgesamt von den Fischen bevorzugt, jedoch gab es auch Fische mit anderen Präferenzen, so dass Zerbolio eine einheitlich angeborene Präferenz für eine Farbe ausschloss. In seinen fortführenden Experimenten (1985) sollte geklärt werden, ob die Fische die Farben Rot und Gelb bzw. Grün und Blau miteinander assoziieren. Dazu lernten die Fische wiederum in einem Y-förmigen Versuchsaufbau, bei denen die Arme entweder mit Rot und Blau oder Grün und Gelb beleuchtet waren, den roten (bzw. blauen) oder den grünen (bzw. gelben) Arm zu meiden, um einem Elektroschock zu entgehen. In einem anschließenden Transfer-test wurden die Arme dann mit der zuvor nicht gezeigten Farbkombination, also bei zuvor roter und blauer Beleuchtung nun mit den Farben Grün und Gelb, beleuchtet.

Die Fische, die gelernt hatten, den roten Arm zu wählen, bevorzugten nun in der Kombination der grünen und gelben Beleuchtung den gelben Arm. Waren die Fische zuvor auf Blau dressiert worden, dann wählten sie nun Grün. Diese Ergebnisse wurden von Zerbolio als Beweis für eine Kategorisierung gewertet.

Als nächstes beschäftigten sich GOLDMAN et al. (1991) mit dem Thema Farbkategorisierung. Hier sollte der Generalisierungstest Aufschluss über mögliche Kategorien liefern. Die Goldfische wurden auf verschiedene Wellenlängen dressiert. Um eine Belohnung zu erhalten, mussten sie ihr Maul auf das mit der Dressurwellenlänge beleuchtete Feld pressen. Im anschließenden Test wurden 14 verschiedene Wellenlängen für jeweils 2 Minuten gezeigt und die Anzahl der Wahlen registriert. Dabei sollte die Wahlhäufigkeit Aufschluss über die Ähnlichkeit der Testwellenlängen zur Dressurwellenlänge liefern. Für jede Dressurwellenlänge wurde so eine Wahlhäufigkeitskurve bzw. Generalisierungskurve erhalten, die Kategorien und ihre Grenzen aufzeigen sollten. Nimmt die Wahlhäufigkeit um die Testwellenlänge herum symmetrisch ab, so wurde angenommen, dass sich die Dressurwellenlänge in der Mitte einer Kategorie befindet. Eine Kategoriegrenze sollte dagegen bei steiler Abnahme und asymmetrischer Kurve vorliegen. Wurden die verschiedenen Generalisierungskurven zusammen aufgetragen, so ergaben sich zwei Schnittpunkte, welche bei 500 nm und zwischen 595 nm und 610 nm lagen, welche laut Goldman et al. die Grenze zwischen Kategorien repräsentieren.

Die dritte Arbeit über Farbkategorien beim Goldfisch stammt von KITSCHMANN (1999). Kitschmann dressierte verschiedene Goldfische auf jeweils eine bestimmte Wellenlänge. Nach erfolgreicher Dressur wurden den Fischen in einer Reihe von Testfarbpaarvergleichen je zwei Farbreize gezeigt, die nicht der Dressurwellenlänge entsprachen. Es ergaben sich daraus von der Dressurwellenlänge abhängige Wahlbereiche, in denen die Fische Wellenlängen mit einer Wahlhäufigkeit von 50 % und mehr wählten. Diese unterschieden sich laut Kitschmann von den Ergebnissen des ebenfalls durchgeführten Wellenlängenunterscheidungstests und zeigten in einigen Bereichen Asymmetrien auf, die als Hinweise auf Kategorien gewertet wurden. Der als Kontrollexperiment durchgeführte Generalisierungstest zeigte, dass dessen Ergebnisse im Grunde nur die Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit der Goldfische wiedergibt und somit die Versuche von GOLDMAN et al. (1991) wenig geeignet sind um Kategorien und Kategoriegrenzen zu ermitteln. Erstmals wählte Kitschmann eine Auftragung der Daten über einer Wellenlängenachse, die nach der Wellenlängenun-

terscheidungsfähigkeit der Goldfische so verändert wurde, dass gleiche Strecken über dieser Achse gleicher Unterscheidbarkeit entsprechen. Kitschmanns Aussage war, dass Goldfische Kategorien bilden und dessen Zahl mindestens der Anzahl der Zapfentypen, also vier, entspricht.

1.4 Fragestellung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, weitere Information über eine mögliche Kategoriebildung und deren Anzahl und Grenzen beim Goldfisch zu ermitteln.

Die bisherigen Untersuchungen zu Farbkategorien konnten diesbezüglich keine genauen Aussagen liefern. Zwar wurde in den drei bisher durchgeführten Arbeiten (ZERBOLIO, 1985; GOLDMAN et al., 1991; KITSCHMANN, 1999) jeweils angenommen, dass Goldfische die Vielzahl der Farben in Kategorien einteilen, doch es fehlen z.T. genauere Angaben und die verwendeten Tests scheinen nicht immer aussagekräftig zu sein. Goldman zog zur Untersuchung den Generalisierungstest heran, der, wie Kitschmann herausfand, jedoch nur die Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit der Goldfische wiedergibt und keine Aussage über Kategorien liefert. Auch Kitschmanns Ergebnisse, bei denen ein Farbpaarvergleichstest durchgeführt wurde, ließen keinen eindeutigen Schluss über Kategorien und deren Grenzen zu.

In dieser Arbeit soll nun eine andere Vorgehensweise angewandt werden. Es ist möglich, dass die Dressur auf nur eine Wellenlänge wie sie z.B. bei Goldman et al. und Kitschmann erfolgte, ein zu genaues Lernen zur Folge hat. Es könnte deshalb sein, dass die Fische bei der Versuchsanordnung mit nur einer Dressurwellenlänge keine Notwendigkeit sehen, eine Kategorisierung vorzunehmen, da sie in der Lage sind, die Dressurwellenlänge genau zu erkennen und von den meisten anderen Wellenlängen zu unterscheiden.

Erschwert man jetzt die Bedingungen für den Fisch, in dem er zwei oder sogar noch mehr verschiedene Wellenlängen erlernen muss, welche einen so großen Abstand voneinander aufweisen, dass sie vermutlich nicht bzw. nicht alle in dieselbe Kategorie fallen, dann könnte es für die Fische notwendig sein, die Farben nicht mehr absolut zu behandeln sondern eher eine grobe Einteilung vorzunehmen.

Zu diesem Zwecke wurden zunächst Fische auf jeweils zwei verschiedene Wellenlängen dressiert. Im Anschluss durchliefen sie verschiedene Tests. Im Transfertest wurden den Fischen zwei Wellenlängen, welche nicht den Dressurwellenlängen entsprachen, gleichzeitig gezeigt. Die Wahlhäufigkeiten zeigen dabei an, welche der Testwellenlängen ähnlicher zu einer der Dressurwellenlängen erscheint. Die Ergebnisse werden dann unter Berücksichtigung der Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit aufgetragen. Ungleichmäßige Wahlverteilungen könnten einen Hinweis auf Kategoriegrenzen liefern.

Als Kontrollversuch wurde der Generalisierungstest angewandt, welcher von GOLDMAN et al. (1991) zur Ermittlung von Kategorien beim Goldfisch durchgeführt wurde. Die Fische bekamen eine ganze Reihe von Testwellenlängen, wie auch die beiden Dressurwellenlängen gegen ein unbeleuchtetes Feld präsentiert. In einer Zeitspanne von zwei Minuten wurde dann die Anzahl der Wahlen des Fisches registriert und liefert dadurch ein Maß für die Ähnlichkeit der Testwellenlängen zu den Dressurwellenlängen.

Nach Beendigung dieser Tests durchlief jeder Fisch noch den Wellenlängenunterscheidungstest, bei dem jede Testwellenlänge im direkten Vergleich zu den Dressurwellenlängen gezeigt wurde. Dieser Test zeigt, wie gut die verschiedenen Wellenlängen von den Testwellenlängen unterschieden werden können und dient als Vergleich zu den Ergebnissen des Transfer- und Generalisierungstests.

Noch weiter erschwert wurde die Aufgabe für die Fische im zweiten Teil der Arbeit. Die Fische werden nun auf sechs Wellenlängen dressiert, die einen ganzen Abschnitt des Wellenlängenspektrums repräsentieren. Dabei können die Wellenlängen so gewählt sein, dass sie in einer Kategorie liegen oder aber auf zwei oder vielleicht sogar drei Kategorien verteilt sind. Da die Fische sich jetzt sechs verschiedene monochromatische Lichter merken müssen, könnte es für sie notwendig werden, eine Kategorisierung vorzunehmen.

Als Test wurde dann der Generalisierungstest durchgeführt. Da während der Dressurphase alle Dressurwellenlängen gleich behandelt und gleich oft gezeigt und belohnt wurden, sollten sich auch die Wahlhäufigkeiten der sechs Dressurwellenlängen, welche in zwei Minuten gemessen wurden, nicht unterscheiden. Sollten allerdings Unterschiede auftreten, könnten diese Informationen über Kategoriegrenzen liefern.

Mit Hilfe dieser Experimente soll versucht werden zu zeigen, wie die Goldfische ihr sichtbares Spektrum in Kategorien einteilen und wo möglicherweise die Kategoriegrenzen liegen.

2. Material und Methode

2.1 Versuchstiere

Für die Experimente wurden adulte Goldfische (*Carassius auratus*) unbekanntes Alters und Geschlechts als Versuchstiere genutzt. Diese wurden von verschiedenen lokalen Zoohandlungen bezogen. Die Tiere hatten eine Länge von ca. 5 - 8 cm und waren im Bezug auf Verhaltensversuche naiv. Vor den eigentlichen Versuchen wurden sie zu mehreren in größeren Aquarien mit Bewuchs gehalten.

2.2 Haltung

Während der Versuche wurden die Fische einzeln in 25 cm x 40 cm großen Becken von 30 cm Höhe aus UV-durchlässigem Plexiglas oder 29 cm x 50 cm großen Glasbecken untergebracht. Diese wiesen bis auf einen Filter keinerlei weitere Ausstattung auf, um die Fische nicht von den eigentlichen Experimenten abzulenken. Das Wasser hatte Raumtemperatur und wurde ca. alle 14 Tage gewechselt.

Gefüttert wurden die Tiere an den Versuchstagen ausschließlich mit der selbst hergestellten Futterpaste, die als Belohnung gegeben wurde. Diese bestand aus Flockenfutter (Sera), Wasser, dem Verdickungsmittel Tragant (Merck) und einer Multivitaminpaste (Multi-Mulsin N). Diese Zutaten wurden zu einem dickflüssigen Brei gemixt und anschließend im Exsikkator für ca. 2 Stunden entlüftet. Die Konsistenz dieses Futterbreis musste so gewählt werden, dass er nicht zu flüssig war, damit er nicht von alleine aus den unten beschriebenen „Futterschläuchen“ lief, aber auch nicht zu fest, damit man ihn mittels Spritzen durch diese Schläuche pressen konnte. An versuchsfreien Tagen erhielten die Fische Futterflocken (Sera) oder Granulatfutter (Sera).

2.3 Raumbelichtung

Die Beleuchtung in den fensterlosen Versuchsräumen erfolgte außerhalb der Versuchszeit durch Osram TLD 58W/865 Neonröhren und folgte einem 12/12 Stunden hell/dunkel- Rhythmus. Während der Versuche wurden diese Neonröhren ausgeschaltet und es erfolgte eine indirekte Beleuchtung durch seitlich verblendete Neonröhren (Osram L36 W/19 Tageslicht 5000 de luxe bzw. Osram L58 W/11-860 Lumilux Plus ECO Daylight), die im Bereich der Aquarien eine Raumhelligkeit von 50-60 Lux lieferten. Diese Raumbelichtung gewährleistete eine Helladaptation der Fische.

2.4 Versuchsaufbau

Eine Übersicht über den Versuchsaufbau ist in Abbildung 2.1 zu sehen.

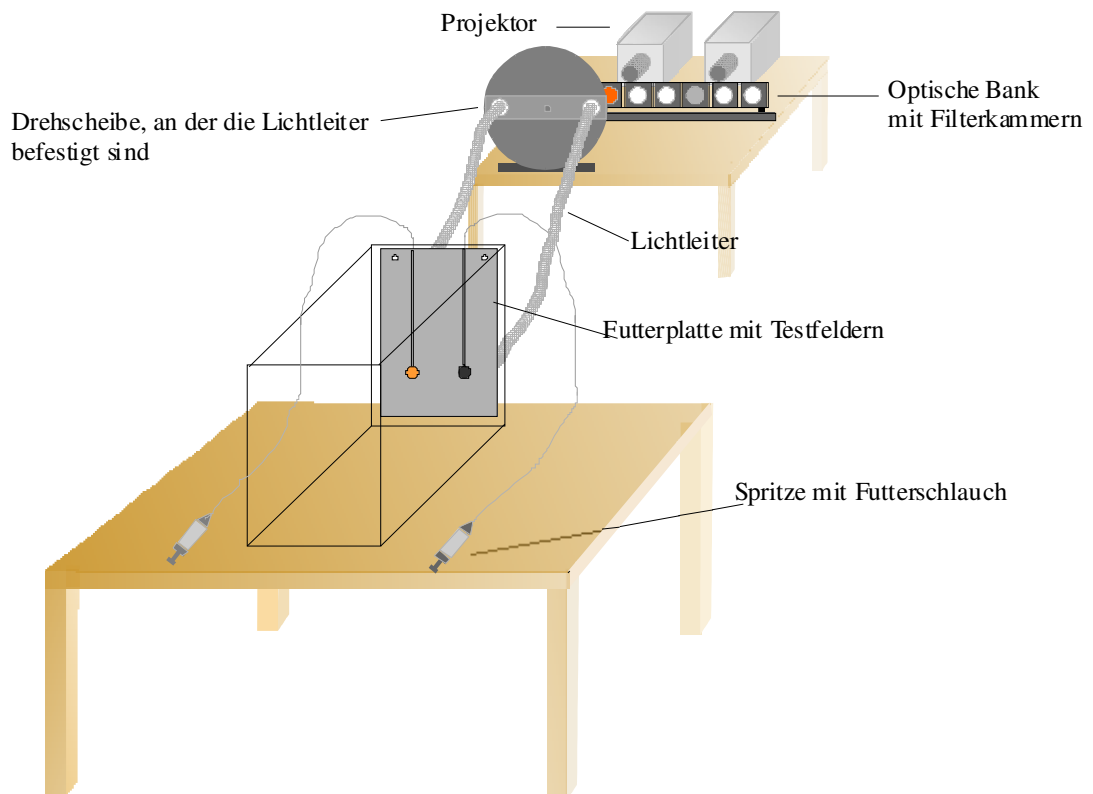


Abbildung 2.1: Versuchsaufbau

Die drei Aquarien mit den drei pro Einzelversuch adressierten Fischen standen auf einem Tisch in einem fensterlosen Raum, der, wie oben beschrieben beleuchtet war. Während des Versuches wurde an der hinteren Schmalseite des Aquariums eine 19 cm x 26,5 cm große Platte eingelassen, die so genannte Futterplatte, welche fast die gesamte Rückwand einnahm. Die übrige Fläche der Aquarienwand wurde mit schwarzer Pappe verkleidet um einen Streulichteinfall zu verhindern. Die Futterplatte wies in 10 cm Höhe vom Beckenboden (6 cm Höhe der Platte) zwei runde Aussparungen mit 2 cm Durchmesser auf, die einen Abstand von 8 cm voneinander hatten. Oberhalb dieser Löcher waren in diese PVC-Platte zwei Rillen eingefräst, in die zwei schmale PVC-Schläuche mit einem Innendurchmesser von 1 mm eingedrückt werden konnten. Diese Futterschläuche endeten mittig über den runden Testfeldlöchern. Die anderen Enden dieser Schläuche steckten in Edelstahlkanülen mit einem Durchmesser von 1,2 mm, welche auf Glasspritzen mit einem Fassungsvermögen von 2 ml gesteckt wurden. Diese Spritzen waren mit der Futterpaste gefüllt. Mit der Hand wurde zur Belohnung der Fische eine gewisse Menge Futter über die Schläuche herausgedrückt. Durch die Löcher in der Futterplatte und die dahinter liegende Aquarienwand sah der Fisch auf die Enden zweier Aluminiumrohre (Innendurchmesser: 2 cm), in welchen je ein Lichtleiter befestigt war. Die Lichtleiter (Quarzglas, UV-durchlässig, Firma Schott), die einen Bündeldurchmesser von 10 mm aufwiesen, wurden mit Hilfe zweier Diaprojektoren (Leitz-Prado Universal, 24 V, 250 W) beleuchtet. Die Enden der Aluminiumrohre waren mit Diffusionsfolie versehen, um eine gleichmäßige Ausleuchtung der Fläche zu erzielen. In Versuchen, bei denen monochromatisches Licht im UV-Bereich benutzt wurde, war einer der Diaprojektoren durch eine Xenon-Hochdrucklampe (Leitz, Osram, 150 W) ersetzt. Zwischen Diaprojektor bzw. Xenonlampe und Lichtleiter konnten auf einer optischen Bank sechs verschiedene Interferenzfilter (Schott & Gen, Typen DIL, UV-DIL, UV-DEPIL und DMZ mit Halbwertsbreiten zwischen 6 und 14 nm) und Neutralfilter (Schott, Typ NG) in den Strahlengang gegeben werden, um monochromatisches Licht einer bestimmten Wellenlänge und Intensität zu erhalten. Diese optische Bank ließ sich mit Hilfe eines Elektromotors über einen Schalter an verschiedene Positionen verschieben und ermöglichte so einen für die Fische nahezu störungsfreien Wechsel der Filter.

Bei der Messung im UV-Bereich wurde zum Schutz der wärmeempfindlichen Interferenzfilter zwischen Xenonlampe und Interferenzfilter noch ein Wärmeschutzfilter zwischengeschaltet.

Da die Lichtleiter an einer ebenfalls durch einen Elektromotor drehbaren Scheibe befestigt waren, war es möglich sie mittels eines Fußschalters in den Strahlengang oder aus dem Strahlengang heraus zu drehen und somit die Beleuchtung der Testfelder genau zu kontrollieren.

Von der der Futterplatte gegenüberliegenden Seite des Aquariums wurden die Fische und ihr Wahlverhalten beobachtet.

2.5 Testfeldbeleuchtung

Für die unterschiedlichen Versuchsdurchläufe wurden Wellenlängen des Bereiches 334 nm - 699 nm verwendet. Die einzelnen Interferenzfilter (Schott & Gen, Typen DIL, UV-DIL, UV-DEPIL und DMZ mit Halbwertsbreiten zwischen 6 und 14 nm) waren: 334 nm, 358 nm, 388 nm, 404 nm, 409 nm, 416 nm, 420 nm, 425 nm, 429 nm, 434 nm, 438 nm, 439 nm, 443 nm, 451 nm, 459 nm, 462 nm, 472 nm, 484 nm, 490 nm, 495 nm, 499 nm, 501 nm, 509 nm, 514 nm, 523 nm, 523 nm, 540 nm, 548 nm, 555 nm, 556 nm, 569 nm, 576 nm, 584 nm, 590 nm, 599 nm, 608 nm, 622 nm, 630 nm, 641 nm, 661 nm, 685 nm, 699 nm. Da die spektrale Empfindlichkeit nicht in allen Wellenlängenbereichen beim Goldfisch gleich ist, musste die Lichtintensität der Empfindlichkeitsfunktion der Goldfische (NEUMEYER, 1984) angepasst werden, wobei die Intensität so gewählt wurde, dass sie $\frac{1}{2}$ log Einheit über den von Neumeyer gemessenen Werten lagen (siehe Abbildung 2.2). Dadurch wurde gleiche Reizwirksamkeit erzielt, was ausschließen sollte, dass die Fische aufgrund von möglichen Helligkeitsunterschieden und nicht aufgrund des Farbtons wählten. Die Intensität wurde mit einem Radiometer (IL 1700) außerhalb des Aquariums an den Testfeldern gemessen. Zur richtigen Intensitätseinstellung wurden verschiedene Neutralfilter verwendet. Die Überprüfung der Lichtintensität erfolgte alle 3 bis 6 Wochen.

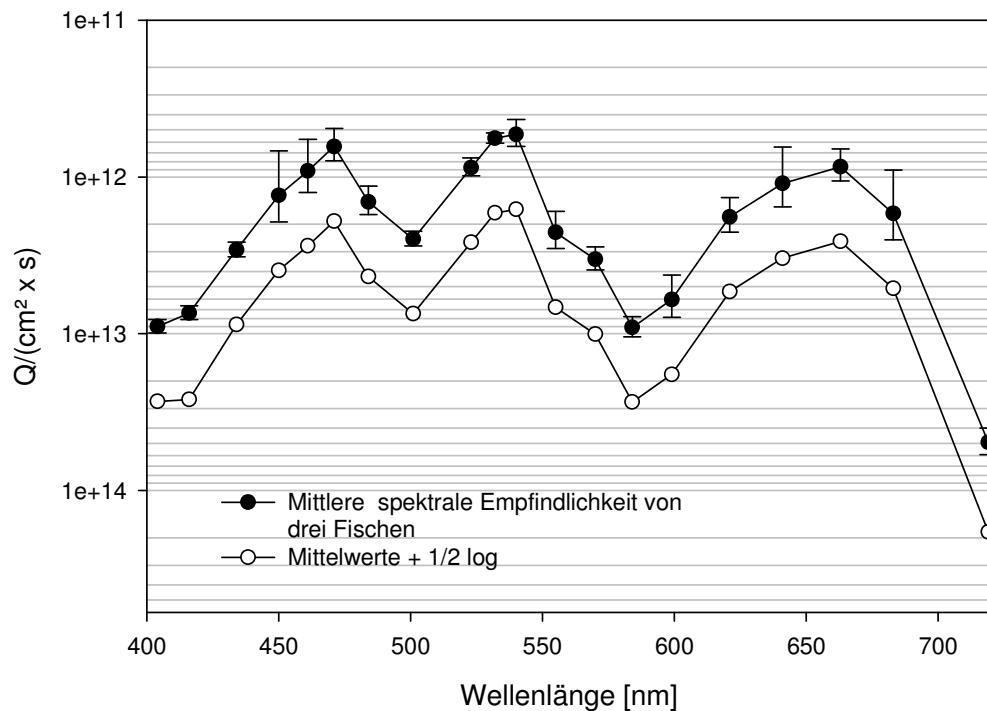


Abbildung 2.2: Spektrale Empfindlichkeit der Goldfische. Die schwarzen Kreise geben die Mittelwerte der Messung von drei Goldfischen wieder. Die Kurve mit den weißen Kreisen ist die um $\frac{1}{2}$ log Einheit verschobene Kurve (Nach NEUMEYER, 1984).

2.6 Dressur

Nachdem die Goldfische in die Versuchsaquarien umgesetzt wurden, begann zunächst die Gewöhnung an den Futterschlauch. Dieser wurde zuerst nur lose in das Aquarium gehalten, bis die Tiere gelernt hatten, dass sie aus dessen Schlauchende Futter bekamen. Anschließend wurde die Futterplatte in das Aquarium gehängt und mit dem Futterschlauch in deren Nähe gefüttert. Schließlich wurde der Schlauch in die dafür vorgesehene Nut der Futterplatte eingepasst. Wenn die Fische auch dann weiterhin an den Schläuchen knabberten, begann die eigentlich Dressur auf die einzelnen monochromatischen Lichter. In den Versuchen wurden die Fische entweder auf zwei verschiedene Wellenlängen, die einen Abstand von 56 nm bis zu 90 nm hatten, oder auf sechs verschiedene Wellenlängen, die einen ganzen Abschnitt von 30 nm – 95 nm der Wellenlängenskala umfassten, dressiert. Dabei wurde immer

eines der beiden Testfelder mit einer der Dressurwellenlängen beleuchtet, das zweite Testfeld blieb währenddessen unbeleuchtet. Biss der Fisch an dem Futterschlauch, der über dem mit der Dressurfarbe beleuchteten Testfeld endete, dann erhielt er eine Futterbelohnung. Diese erfolgte anfangs noch bei jedem einzelnen Biss, wurde dann aber immer weiter herausgezögert, bis der Fisch nur noch nach je 25 Bissen belohnt wurde. Dabei wurden die beiden bzw. die sechs Dressurfarben abwechselnd bzw. in zufälliger Reihenfolge geboten. Sie wurden also nahezu gleichzeitig gelernt. Damit sollte verhindert werden, dass der Fisch die zuerst gelernte Wellenlänge vielleicht der anderen gegenüber bevorzugte. Eine Ausnahme stellte dabei die erste Fischgruppe (Fische P, C, A) dar. Bei diesen Fischen wurde die zweite Dressurwellenlänge erst nach der erfolgreichen Dressur der ersten Wellenlänge dazu genommen.

Die Seite, welche mit der Dressurwellenlänge beleuchtet war, wurde durch Drehen der Lichtleiterscheibe jedes Mal gewechselt, um eine Ortsdressur auszuschließen.

Jeder Biss der Fische wurde auf einem Protokollblatt festgehalten. Dabei bestand eine einzelne Versuchseinheit immer aus 100 Wahlen, also vier belohnten Durchgängen à 25 Bissen. Die Dressur galt als erfolgreich, wenn bei der Konstellation Dressurwellenlänge gegen das unbeleuchtete Testfeld mindestens 70 % der Wahlen auf die Dressurwellenlänge erfolgten.

2.7 Erstellung der „fischspezifischen“ Wellenlängenskala und Auswahl der Dressur- und Testwellenlängen

Die Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit der Goldfische ist nicht über das gesamte von ihnen wahrgenommene Spektrum hin gleich (NEUMEYER, 1986). In manchen Bereichen können schon sehr kleine Änderungen der Wellenlänge sehr gut erkannt werden (bei 400 nm, 500 nm und 600 nm), in anderen Bereichen werden auch größere Wellenlängensprünge von den Fischen nur schlecht wahrgenommen (siehe Abbildung 2.3). Um diese ungleichmäßige Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit im Spektrum auch in den Abbildungen wiederzugeben, wurde eine Wellenlängenskala in Form einer „fischspezifischen“ Skala ermittelt. Diese hat die Eigenschaft, dass ein gleicher Abstand über dieser Skala einer gleich guten Unterscheidungsfähigkeit des Goldfisches entspricht. Dies wird möglich, indem gut unterscheidbare Bereiche einen

größeren Abschnitt der Skala einnehmen als schlecht unterscheidbare Bereiche. Dazu wurden die Kehrwerte der $\Delta\lambda$ -Werte gebildet ($1/\Delta\lambda$) und auf den größten Wert (0,167) normiert (Tabelle 2.1).

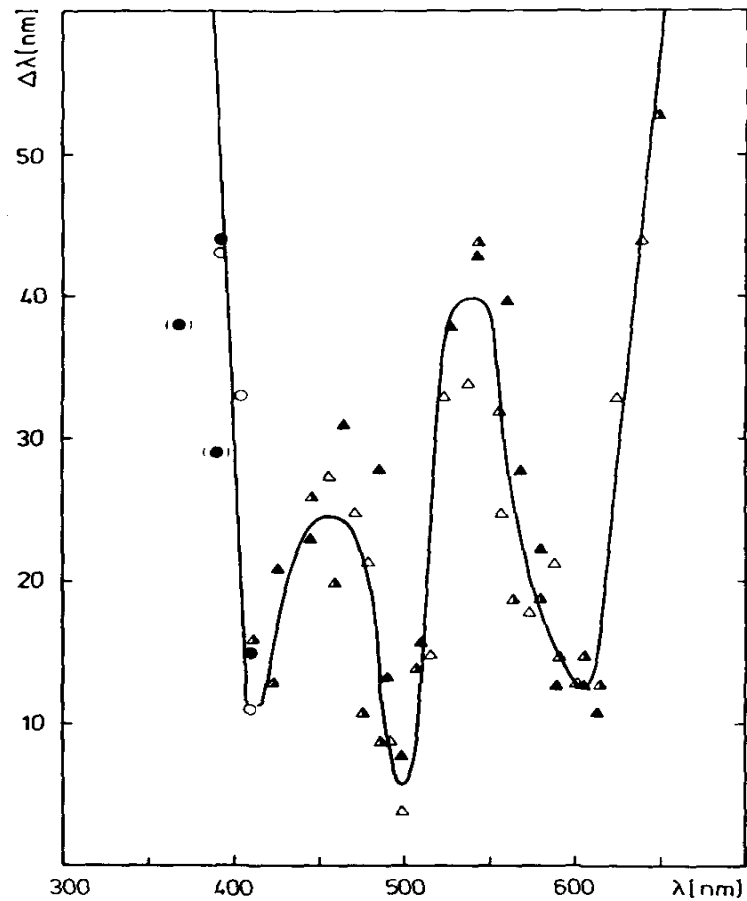


Abbildung 2.3: Die $\Delta\lambda$ - Funktion der Goldfische gibt die Unterscheidungs-empfindlichkeit als Funktion der Wellenlänge an. $\Delta\lambda$: Wellenlängendifferenzen, die von den Fischen mit einer Wahlhäufigkeit von 70 % beantwortet wurden (Nach FRATZER et al.,1994).

Tabelle 2.1: $\Delta\lambda$ und Werte für die fischspezifische Achse der Goldfische bei den verschiedenen Wellenlängen.

| λ [nm] | $\Delta\lambda$ | Werte für die fischspezifische Achse |
|----------------|-----------------|--------------------------------------|
| 350 | 125,0 | 0 |
| 360 | 76,0 | 1,6 |
| 370 | 66,0 | 3,4 |
| 380 | 52,6 | 5,6 |
| 390 | 38,5 | 8,8 |
| 400 | 25,0 | 13,6 |
| 410 | 13,5 | 22,4 |
| 420 | 15,5 | 30,0 |
| 430 | 19,0 | 36,2 |
| 440 | 23,0 | 41,4 |
| 450 | 24,5 | 46,4 |
| 460 | 22,0 | 51,8 |
| 470 | 23,0 | 57,0 |
| 480 | 20,0 | 61,0 |
| 490 | 10,5 | 72,4 |
| 500 | 6,0 | 92,4 |
| 510 | 13,0 | 101,6 |
| 520 | 32,0 | 105,4 |
| 530 | 38,0 | 108,6 |
| 540 | 40,0 | 111,6 |
| 550 | 38,0 | 114,8 |
| 560 | 29,0 | 118,8 |
| 570 | 22,0 | 124,2 |
| 580 | 20,0 | 130,2 |
| 590 | 16,0 | 137,8 |
| 600 | 13,5 | 146,6 |
| 610 | 13,0 | 155,8 |
| 620 | 24,0 | 160,8 |
| 630 | 36,0 | 164,2 |
| 640 | 44,0 | 167,0 |
| 650 | 58,8 | 169,0 |
| 660 | 66,7 | 170,8 |
| 670 | 76,9 | 172,4 |
| 680 | 90,9 | 173,8 |
| 690 | 100,0 | 175,0 |
| 700 | 111,1 | 176,0 |

Anhand dieser Wellenlängenachse wurden nun die verschiedenen Dressurwellenlängen ausgewählt. Bei den Versuchen mit zwei Dressurwellenlängen sollten diese bei den verschiedenen Fischgruppen immer den gleichen Abstand (ca. $2 \times \Delta\lambda$) auf dieser fischspezifischen Achse haben. Dass dies nicht immer genau der Fall war, lag an den zur Verfügung stehenden Interferenzfiltern.

Die ausgewählten Wellenlängen bei der Dressur auf zwei verschiedene monochromatische Lichter waren:

- 523 nm und 608 nm (Fische P, C, A)
- 499 nm und 576 nm (Fische 1, 2, 3)
- 484 nm und 540 nm (Fische 4, 5, 6)
- 540 nm und 630 nm (Fische 7, 8, 9)
- 438 nm und 501 nm (Fische 10, 11, 12)

Bei der Dressur auf sechs Wellenlängen sollte der Bereich, den die sechs Dressurwellenlängen auf der fischspezifischen Achse bilden, in etwa gleich groß sein. Die Verteilung der sechs Dressurwellenlängen innerhalb dieses Bereiches wurde ebenfalls anhand der vorhandenen Interferenzfilter ausgewählt.

Die einzelnen Wellenlängen für die Dressur auf sechs verschiedene monochromatische Lichter waren:

- 569 nm, 576 nm, 584 nm, 590 nm, 599 nm und 608 nm (Fische 13, 14, 15)
- 590 nm, 608 nm, 622 nm, 641 nm, 661 nm und 685 nm (Fische 16, 17, 18)
- 540 nm, 555 nm, 569 nm, 576 nm, 584 nm und 590 nm (Fische 19, 20, 21)
- 499 nm, 514 nm, 523 nm, 540 nm, 548 nm und 555 nm (Fische 22, 23, 24)
- 484 nm, 490 nm, 495 nm, 499 nm, 509 nm und 514 nm (Fische 25, 26, 27)
- 388 nm, 404 nm, 416 nm, 425 nm, 434 nm und 443 nm (Fische 28, 29, 30)
- 434 nm, 451 nm, 462 nm, 472 nm, 484 nm und 490 nm (Fische 31, 32, 33)

Im Folgenden ist die Verteilung der ausgewählten Dressurwellenlängen über der fischspezifischen Skala wiedergegeben, einmal für die Versuche mit zwei Dressurwellenlängen (Abb. 2.4) und für die Versuche mit sechs Dressurwellenlängen (Abb. 2.5).

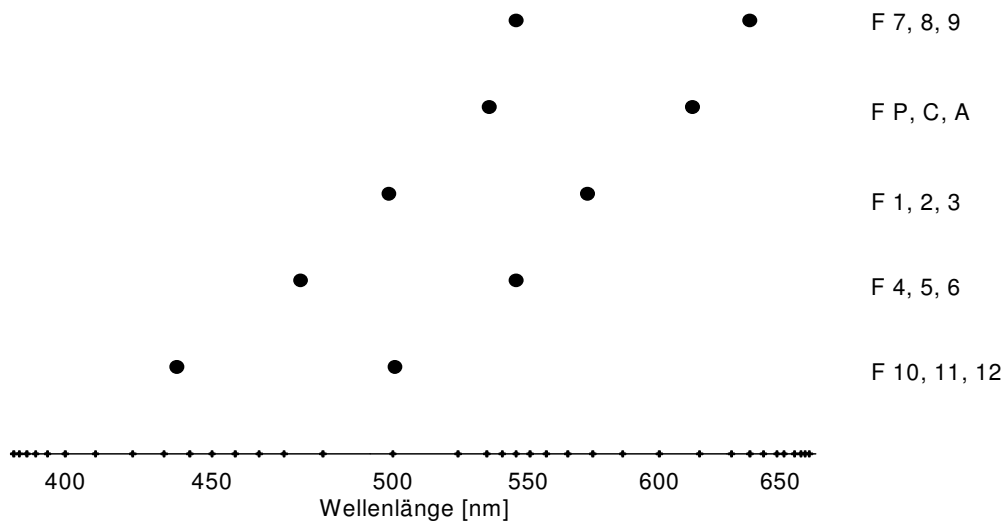


Abbildung 2.4: Verteilung der je zwei Dressurwellenlängen über der fischspezifischen Wellenlängenskala. Rechts sind jeweils die Fische angegeben, die auf die verschiedenen Wellenlängenkombinationen dressiert wurden.

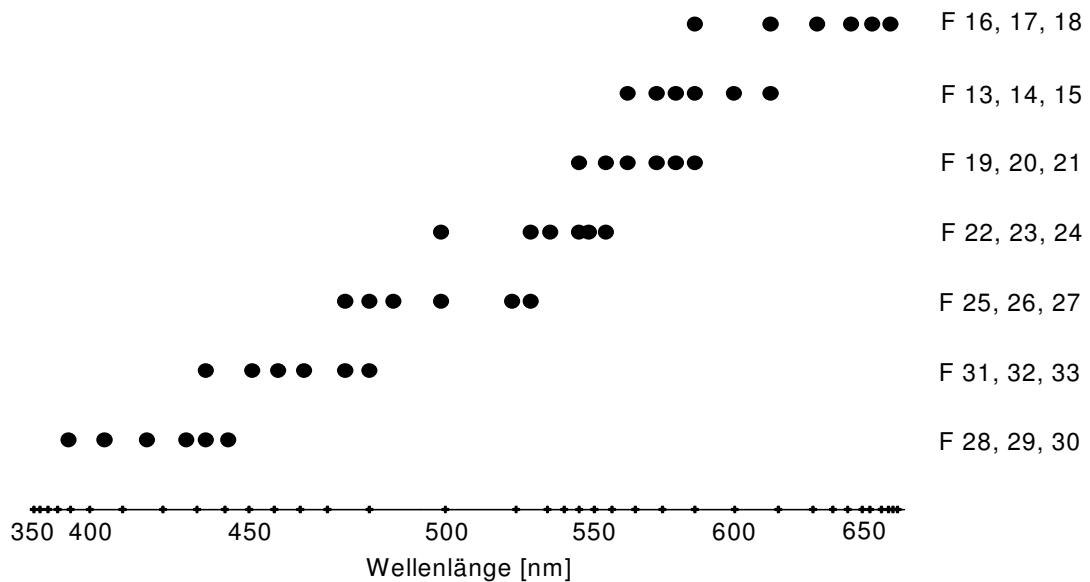


Abbildung 2.5: Verteilung der je sechs Dressurwellenlängen über der fischspezifischen Wellenlängenskala.

2.8 Testmethoden

2.8.1 Zwei Dressurwellenlängen

2.8.1.1 50:50-Test

Nach erfolgreicher Dressur, bei der jede der Dressurwellenlängen mit einer Wahlhäufigkeit von mindestens 70 % gegenüber dem unbeleuchteten Testfeld bevorzugt wurde, war immer der erste durchgeführte Test der so genannte 50:50-Test. Dieser Test sollte zeigen, ob die beiden gelernten Wellenlängen von den Fischen als gleichwertig gelernt wurden, sie also beide Dressurwellenlängen gleich oft wählen und nicht schon von vornherein eine der „Farben“ bevorzugen. Die beiden Testfelder wurden dazu gleichzeitig mit den beiden Dressurwellenlängen beleuchtet und 25 Wahlen registriert. Anschließend wurde eine der beiden Dressurwellenlängen, welche jetzt gegen ein unbeleuchtetes Feld gezeigt wurde, belohnt, wobei die beiden Dressurwellenlängen abwechselnd in der Belohnung verwendet wurden. Der Test heißt 50:50-Test, weil bei gleich gutem Lernerfolg beider „Farben“ eine Wahlhäufigkeit von 50 % auf jede der Wellenlängen erwartet wird, also das Ergebnis von Dressurwellenlänge 1 zu Dressurwellenlänge 2 im Idealfall je 50 Prozent beträgt.

Um etwas über mögliche Kategorien und deren Grenzen herauszufinden, wurden auf den 50:50-Test folgend drei weitere Testverfahren angewandt:

- Generalisierungstest
- Transfertest
- Wellenlängenunterscheidungstest

2.8.1.2 Generalisierungstest

Dieser Test wurde vor allem deshalb mit in das Versuchsprozedere aufgenommen, weil verschiedene vorherige Arbeiten diese Methode zur Identifizierung von Kategorien und ihren Grenzen sowohl bei Goldfischen (GOLDMAN et al., 1991 und KITSCHMANN, 1999), als auch bei anderen Tieren wie z. B. Tauben (BLOUGH, 1961 und 1972, WRIGHT & CUMMING, 1971) und Schimpansen (SANDELL et al., 1979) herangezogen haben.

Bei der Generalisierung wurde dem Goldfisch in jedem Versuchsdurchlauf ein beleuchtetes Feld gegen ein unbeleuchtetes Feld präsentiert. Das beleuchtete Feld konnte sowohl eine der Dressurwellenlängen als auch jede der ausgewählten Testwellenlängen zeigen. Diese wurden in zufälliger Reihenfolge ausgewählt und den Fischen präsentiert, bis jede der Dressurwellenlängen bzw. Testwellenlängen mit wenigen Ausnahmen, bei denen nur vier Messungen erfolgten, mindestens sechs Mal gezeigt wurden. Der Fisch bekam diese Versuchssituation jeweils zwei Minuten zu sehen und innerhalb dieser Zeit wurde die Anzahl der Wahlen in Form der Bisse an den Schläuchen registriert. Nach diesen zwei Minuten wurde im Falle, dass eine der Dressurwellenlängen gezeigt wurde, diese belohnt, im Falle dass eine der Testwellenlängen gezeigt wurde, diese ausgeblendet und im direkten Anschluss daran eine der beiden Dressurwellenlängen gezeigt und belohnt. Dabei wurden die zur Belohnung gezeigten Dressurwellenlängen immer abgewechselt. Bei diesem Test könnte eine unterschiedliche Wahlhäufigkeit bei den verschiedenen Testwellenlängen einen Hinweis auf die Ähnlichkeit der Farben und möglicherweise auf Kategorien und deren Grenzen liefern. Um dies besser zu veranschaulichen und die verschiedenen Fische einer Gruppe besser vergleichen zu können, wurde die größte Anzahl an Wahlen jedes Fisches gleich 100 % und die anderen Wahlhäufigkeiten in Bezug dazu gesetzt. In Normalfall sollten beide Dressurwellenlängen die Wahlhäufigkeit 100 % haben und weit entfernte Wellenlängen, die keine Ähnlichkeit mehr zu den Dressurwellenlängen aufweisen, geringere Prozentzahlen erhalten.

2.8.1.3 Transfertest

Der Transfertest oder auch Farbpaarvergleichstest wurde beim Goldfisch bereits von KITSCHMANN (1999) in ihren Versuchen mit nur einer Dressurwellenlänge durchgeführt. Hierbei wurden bei Kitschmann aus einer ganzen Reihe von Testwellenlängen je zwei Wellenlängen, von denen eine langwelliger und eine kurzwelliger als die Dressurwellenlänge waren, gleichzeitig geboten. Aus dem Wahlverhalten des Fisches ließ sich dann ablesen, welche der beiden gezeigten Wellenlängen ihm wohl ähnlicher seiner Dressurwellenlänge erschien, die er nur aus dem Gedächtnis heraus mit den beiden Testwellenlängen vergleichen konnte.

In den Versuchen mit den zwei Dressurwellenlängen wurden nur ganz bestimmte Wellenlängen für diesen Farbpaarvergleichstest ausgewählt. Eine lag dabei „unterhalb“ der ersten, kürzerwelligen Dressurwellenlänge, die zweite zwischen den beiden Dressurwellenlängen und die dritte im längerwelligen Bereich „oberhalb“ der zweiten Dressurwellenlänge. Von diesen drei ausgesuchten Wellenlängen wurden alle möglichen Testkombinationen gezeigt, es ergaben sich daher für jede Dressurwellenlängenkombination insgesamt drei Testpaare.

Für die verschiedenen Dressurwellenlängen wurden folgende Testwellenlängenpaar-Kombinationen ausgewählt:

Dressurwellenlängen 523 nm und 608 nm:

- 499 nm gegen 576 nm
- 576 nm gegen 641 nm
- 499 nm gegen 641 nm

Dressurwellenlänge 499 nm und 576 nm:

- 459 nm gegen 523 nm
- 523 nm gegen 599 nm
- 459 nm gegen 599 nm

Dressurwellenlänge 484 nm und 540 nm:

- 438 nm gegen 514 nm
- 514 nm gegen 584 nm
- 438 nm gegen 584 nm

Dressurwellenlängen 540 nm und 630 nm:

- 499 nm gegen 608 nm
- 608 nm gegen 685 nm
- 499 nm gegen 685 nm

Dressurwellenlängen 438 nm und 501 nm:

- 409 nm gegen 484 nm
- 484 nm gegen 523 nm
- 409 nm gegen 523 nm

Zur besseren Veranschaulichung der Verteilung der ausgesuchten Wellenlängen sind die Transfertestwellenlängen noch einmal zusammen mit den Dressurwellenlängen über der fischspezifischen Wellenlängenskala dargestellt (Abbildung 2.6).

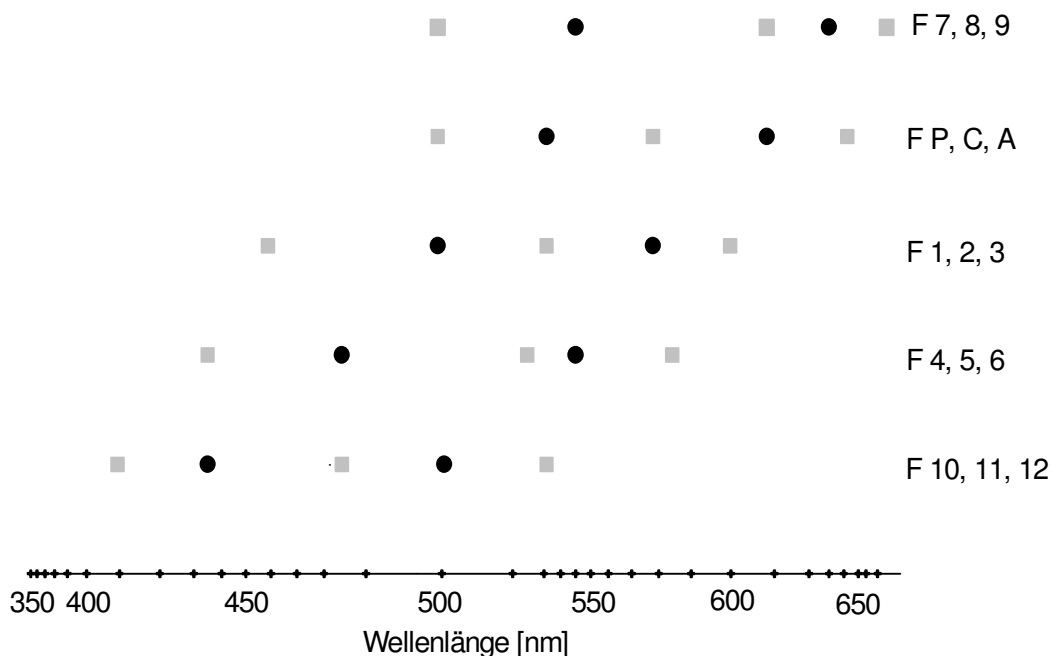


Abbildung 2.6: Lage der ausgewählten Transferwellenlängen (graue Quadrate) im Vergleich zu den Dressurwellenlängen (schwarze Kreise) über der fischspezifischen Wellenlängenskala.

Die Transferwellenlängen wurden dabei so ausgewählt, dass die Abstände für die ausgewählten Wellenlängen, bezogen auf die fischspezifische Wellenlängenskala in etwa gleich sind, so dass sie dem Fisch aufgrund gleichen Abstandes auf dieser Achse als gleich unterschiedlich bzw. gleich ähnlich erscheinen sollten. Auch hier war die Auswahl durch die vorhandenen Interferenzfilter beschränkt.

Der Fisch entscheidet jetzt durch seine Wahl, ob ihm die beiden gezeigten Testwellenlängen gleich ähnlich bzw. gleich unähnlich zu einer oder beiden Dressurwellenlängen erscheinen oder ob eine Testwellenlänge bevorzugt wird, obwohl sie auf der fischspezifischen Skala die gleiche Entfernung aufweist. Dies könnte z.B. dann der Fall sein, wenn eine der Transferwellenlängen in einer Kategorie liegt, welche einer der beiden Dressurwellenlängenkategorien entspricht und die zweite im Test verwendete Transferwellenlänge nicht.

Beim Transfertest wurden nach 25 Einzelwahlen die Testwellenlängen entfernt und abwechselnd eine der beiden Dressurwellenlängen gezeigt und diese nach nur wenigen Bissen belohnt. Diese Belohnungen sollten verhindern, dass die Fische nach einiger Zeit unbelohnten Beißens die Lust daran verlieren, zu den Testfeldern zu schwimmen und an den Schläuchen zu knabbern. Sie diente zudem dazu, das hohe Lernniveau durch die ständige Nachdressur aufrecht zu erhalten. Es wurden wiederum jeweils 100 Wahlen pro Durchgang registriert. Insgesamt wurden $n = 5$ bis 7 Durchgänge ausgeführt, also insgesamt 500 bis 700 Einzelwahlen zu einem Ergebnis zusammengefasst, wobei die Darbietung der einzelnen Kombinationen in zufälliger Anordnung erfolgte.

2.8.1.4 Wellenlängenunterscheidungstest

Das dritte durchgeführte Testverfahren war der so genannte Wellenlängenunterscheidungstest. Dieser Test sollte prüfen, ob die Fische in ihrem vorher gezeigten Wahlverhalten die Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit wiedergegeben hatten oder ob andere Wahlkriterien zu den Ergebnissen geführt hatten.

Anders als im Generalisierungstest wurde hier jeweils eine der Testwellenlängen gleichzeitig mit einer der Dressurwellenlängen gezeigt. Der Fisch musste jetzt nicht mehr die Testwellenlängen aus dem Gedächtnis heraus mit den Dressurwellenlängen vergleichen, sondern hatte sie gleichzeitig vor sich. Dabei wurde jede der

Testwellenlängen gegen jede der beiden Dressurwellenlängen dargeboten. Es wurden dabei alle bereits im Generalisierungs- und Transfertest vorkommenden Testwellenlängen verwendet. Ein Durchgang bestand hier wieder aus vier belohnten Einzelversuchen à 25 Wahlen, wobei nach jedem Einzelversuch die Dressurwellenlänge gewechselt wurde. Anschließend erfolgte eine Belohnung auf die Dressurwellenlänge. Hier sollten nur noch Testwellenlängen, die einer der beiden Dressurwellenlängen ähnlich sind, häufig gewählt werden, wobei die Dressurwellenlängen im direkten Vergleich, bis evtl. auf die direkten Nachbarn, immer bevorzugt sein sollten. Die Ergebnisse des Wellenlängenunterscheidungstest zeigen, welche Wellenlängendifferenz für den Fisch gerade noch einen wahrnehmbaren Unterschied darstellt.

2.8.2 Versuche mit sechs verschiedenen Dressurwellenlängen

Die ausgewählten Dressurbereiche, welche jeweils sechs Wellenlängen umfassten, deckten das Wellenlängenspektrum von 388 nm bis 685 nm ab (siehe Abbildung 2.5). Die Fische wurden wie oben beschrieben dressiert, mit dem Unterschied, dass es nun sechs anstelle von zwei Dressurwellenlängen waren. Bei diesem Test wurde strengstens darauf geachtet, dass alle Dressurwellenlängen gleich oft gezeigt wurden, um ein Verfälschen der Ergebnisse durch eine ungleichmäßige Dressur auszuschließen. Die Reihenfolge unterlag wieder dem Zufall, wobei keine Dressurwellenlänge zweimal hintereinander gezeigt wurde.

Bei diesem Versuch sollte untersucht werden, ob der Fisch vielleicht gewisse Wellenlängen bevorzugt und daher schneller oder leichter lernt als andere Wellenlängen. Dies würde sich dann im anschließend an die Dressur durchgeführten Generalisierungstest durch eine häufigere Wahl zeigen. Eine ungleichmäßige Wahl der sechs Dressurwellenlängen könnte dabei auch einen Hinweis auf mögliche Kategorien bzw. Kategoriegrenzen geben. Liegen z.B. fünf der Dressurwellenlängen in einer vom Fisch gebildeten Kategorie und die sechste Wellenlänge nicht, dann könnte der Fisch diese eine Dressurwellenlänge weniger häufig wählen, da der Schwerpunkt des Gelernten in der anderen Kategorie lag.

Als Test wurde, wie schon erwähnt, der Generalisierungstest angewendet, wie er bereits in Abschnitt 2.8.1.2 für die zwei Dressurwellenlängen beschrieben wurde. Er wurde mit den sechs Dressurwellenlängen und einigen an den Dressurbereich an-

grenzenden Testwellenlängen durchgeführt. Im Falle der ersten Fischgruppe wurde zusätzlich noch ein Transfertest gemacht, bei dem eine Reihe von kurzwelligen monochromatischen Lichtern gegen eine Anzahl von langwelligen Lichtern gezeigt wurde.

3. Ergebnisse

3.1 Versuche mit zwei Dressurwellenlängen

3.1.1 50:50-Test

An eine erfolgreiche Dressur, bei der jede der beiden Dressurwellenlängen im Vergleich zu einem unbeleuchteten Testfeld mit mindestens 70 % Häufigkeit gewählt wurde, wurde der 50:50-Test angeschlossen. Hierbei sollte getestet werden, ob beide Dressurwellenlängen gleich gut gelernt wurden. Die Fische bekamen jetzt ihre beiden Dressurwellenlängen gleichzeitig an den beiden Testfeldern gezeigt. Dabei wurde die jeweilige Präsentationsseite einer Dressurwellenlänge ständig gewechselt. Die Ergebnisse der einzelnen Fische setzen sich aus $n = 5 - 10$ Einzeldurchläufen zusammen, die jeweils aus 100 Wahlen bestanden, wobei immer nach 25 Wahlen eine Belohnung und ein Seitenwechsel erfolgte.

Die Ergebnisse dieser 50:50-Tests sind in Säulendiagrammen (Abbildungen 3.1 – 3.5) zu sehen. Die Ergebnisse der verschiedenen Fische einer Dressurgruppe sind in unterschiedlichen Graustufen wiedergegeben, die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler des Mittelwertes.

Bei den Fischen P, C und A ist die Wahlhäufigkeit, welche den Mittelwert aus 5 bis 7 Einzelmessungen wiedergibt, nicht ganz gleichmäßig auf die beiden Dressurwellenlängen verteilt. (Abbildung 3.1). Dass es hier wohl nicht zu einem ganz gleichmäßigen Dressurerfolg gekommen ist, kann mit der in diesem Fall etwas anderen Dressurvorgehensweise erklärt werden. Die Fische P, C, und A waren schon in einem Vorversuch auf die Wellenlänge 608 nm dressiert worden und erst nach einiger Zeit wurde die zweite Dressurwellenlänge 523 nm hinzugenommen. In diesem Fall wurde also die Wellenlänge 608 nm vermutlich besser gelernt, da sie über einen längeren Zeitraum dressiert und daher viel häufiger gezeigt wurde, als die Wellenlänge 523 nm. Da sich aber nur für den Fisch C ein signifikanter Unterschied ergab, welcher aber nicht auf einem sehr extremen Unterschied der Wahlhäufigkeit beruht, war zu hoffen, dass dieser etwas unterschiedliche Lernerfolg der beiden Dressurfarben keinen großen Einfluss auf die weiteren Ergebnisse haben würde. Da außerdem

während der durchgeführten Tests eine andauernde Belohnung auf beide Dressurfarben erfolgte, gab es eine ständige Nachdressur, so dass der 50:50-Test am Ende der Versuche wahrscheinlich ausgeglichener ausgefallen wäre, als am Anfang der Testphase.

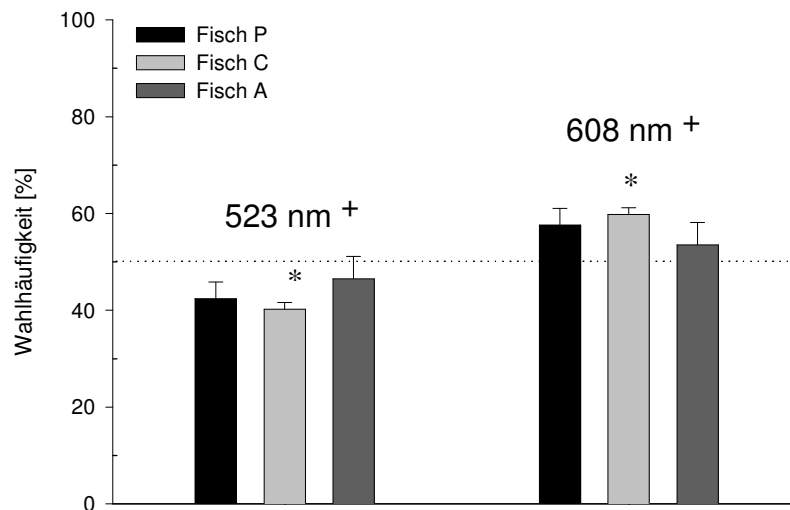


Abbildung 3.1: 50:50-Test. Den Fischen P, C, und A werden gleichzeitig die beiden Dressurwellenlängen 523 nm und 608 nm gezeigt. Das Ergebnis beruht auf $n = 5 - 7$ Durchgängen à 100 Wahlen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder. * = der t-Test ergibt für Fisch C einen signifikanten Unterschied von dem 50 % Wert ($p < 0,05$).

Der 50:50-Test bei der zweiten Fischgruppe, die auf 499 nm und 576 nm dressiert worden war, fiel jetzt deutlich ausgeglichener aus, als es im ersten Ergebnis der Fall war (Abb. 3.2). Bei allen drei Fischen (1, 2 und 3) war der Unterschied in der Wahlhäufigkeit, die aus 8 bis 10 Einzelwerten zusammengesetzt ist, mit maximal 3 % sehr gering, beide Dressurwellenlängen wurden daher gleich gut gelernt.

Die nächste Gruppe mit den Dressurwellenlängen 484 nm und 540 nm (Abbildung 3.3) wird nach Ausfall des Fisches 6 nur noch durch zwei Fische (4 und 5) repräsentiert. Auch bei diesen beiden Fischen ist der Unterschied in den Wahlhäufigkeiten geringer als 2 %, die Dressur auf beide Wellenlängen war folglich ausgeglichen.

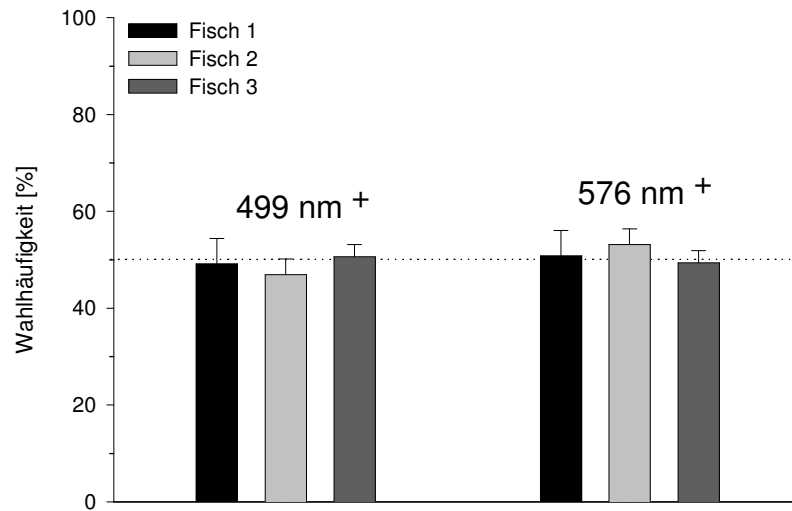


Abbildung 3.2: 50:50 - Test. Den Fischen 1, 2 und 3 werden gleichzeitig die beiden Dressurwellenlängen 499 nm und 576 nm gezeigt. Das Ergebnis beruht auf $n = 8 - 10$ Durchgängen à 100 Wahlen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler des Mittelwertes wieder.

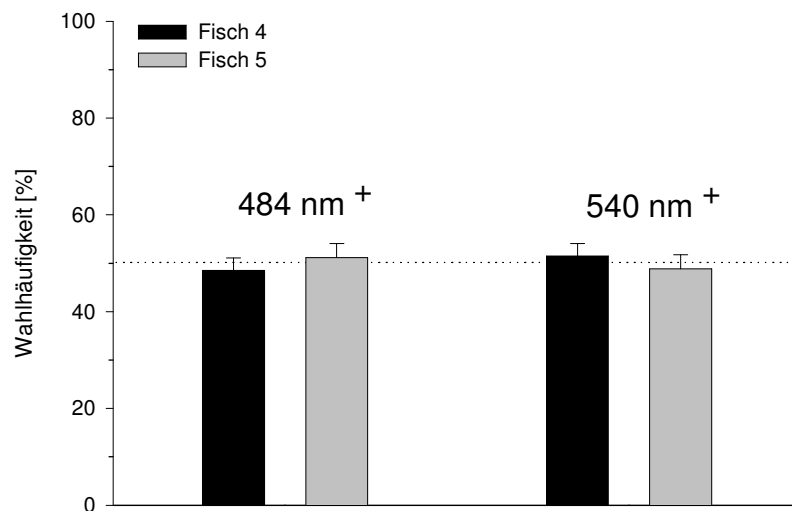


Abbildung 3.3: 50:50 - Test. Den Fischen 4 und 5 werden gleichzeitig die beiden Dressurwellenlängen 484 nm und 540 nm gezeigt. Das Ergebnis beruht auf $n = 6$ Durchgängen à 100 Wahlen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler des Mittelwertes wieder.

Im 50:50-Test der Fische 7, 8 und 9 mit den Dressurwellenlängen 540 nm und 630 nm sind maximal 5 % Unterschied in der Wahlhäufigkeit bei den Fischen 7 und 9 zu sehen, wobei dieser Unterschied aber nicht signifikant ist (Abb. 3.4). Die Ergebnisse beruhen dabei auf 6 - 9 einzelnen Versuchsdurchläufen.

Bei den Dressurwellenlängen 438 nm und 501 nm (Fische 10, 11 und 12) ist nur bei Fisch 12 ein Unterschied von fast 6 % aufgetaucht, der signifikant ist (t-Test: $p < 0,05$) (Abb. 3.5).

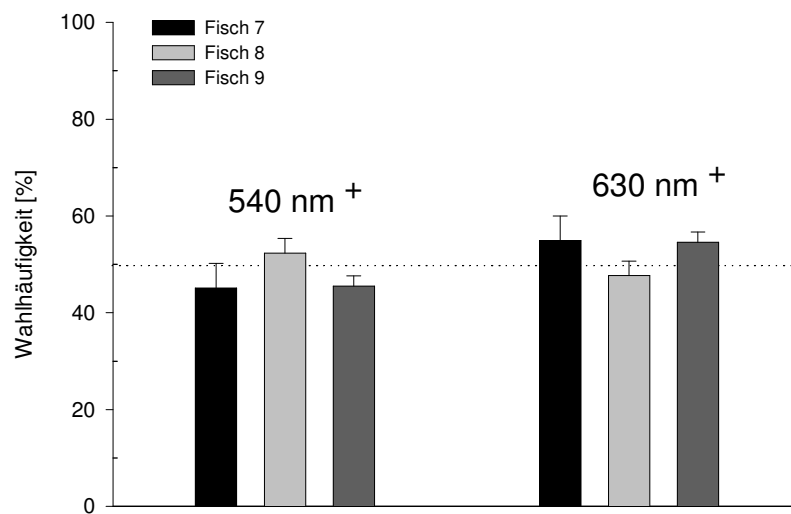


Abbildung 3.4: 50:50 - Test. Den Fischen 7, 8 und 9 werden gleichzeitig die beiden Dressurwellenlängen 540 nm und 630 nm gezeigt. Das Ergebnis beruht auf $n = 6 - 9$ Durchgängen à 100 Wahlen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler des Mittelwertes wieder.

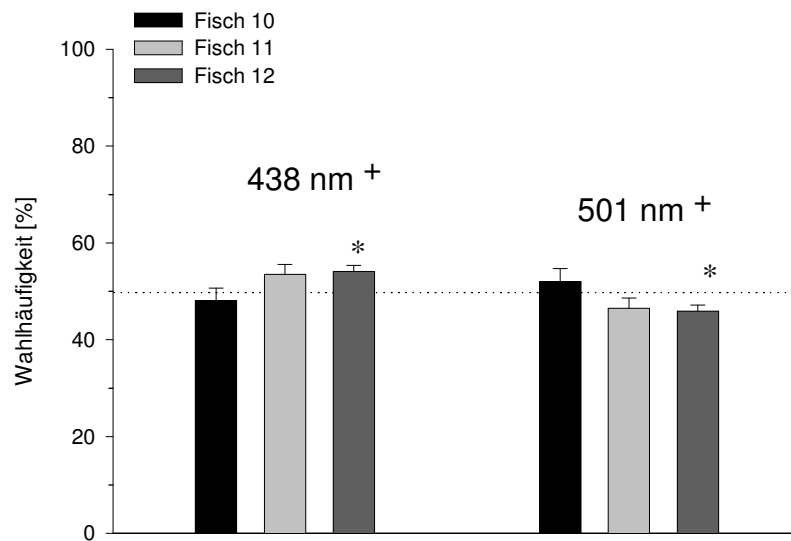


Abbildung 3.5: 50:50 - Test. Den Fischen 10, 11 und 12 werden gleichzeitig die beiden Dressurwellenlängen 438 nm und 501 nm gezeigt. Das Ergebnis beruht auf $n = 6 - 8$ Durchgängen à 100 Wahlen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder. Der t - Test zeigt für den Fisch 12 einen signifikanten Unterschied (*) zwischen den Wahlhäufigkeiten auf die beiden Dressurwellenlängen ($p < 0,05$).

Zusammenfassend ist der 50:50-Test bis auf kleine Schwankungen sehr ausgeglichen ausgefallen, beide Dressurwellenlängen wurden bei den verschiedenen Fischgruppen gleich gut gelernt und keine der beiden Dressurwellenlängen wurde sehr deutlich bevorzugt oder abgelehnt. Eine gewisse Ausnahme sind dabei die Fische C und 12, bei denen der Signifikanztest positiv war, bei ihnen wurde statistisch gesehen die Wellenlänge 608 nm gegenüber 523 nm (Fisch C) und 438 nm gegenüber 501 nm (Fisch 12) bevorzugt. Da diese Bevorzugung aber nicht so groß war, dass man von einer sehr deutlichen Ablehnung einer Wellenlänge sprechen kann, wurden alle Fische in die weiteren Tests mit aufgenommen.

3.1.2 Generalisierungstest

Auf den 50:50-Test folgend wurde der so genannte Generalisierungstest durchgeführt. Hierbei werden dem Fisch sowohl seine Dressurwellenlängen als auch eine ganze Anzahl von Testwellenlängen einzeln gegen ein unbeleuchtetes Testfeld gezeigt. Die Darbietungsseite wurde dabei ständig gewechselt, um eine Ortsdressur auszuschließen. Die Reihenfolge der Präsentation der Dressur- und Testwellenlängen erfolgte zufällig. In einer Zeiteinheit von 2 Minuten wurde registriert, wie oft der Fisch das beleuchtete Testfeld wählte. Dabei wurde erwartet, dass die Dressurwellenlängen und diejenigen Testwellenlängen, die nur geringfügig von diesen abweichen, häufiger angeschwommen werden als Testwellenlängen, die weiter von den Dressurwellenlängen entfernt liegen. Die Wahlhäufigkeit könnte dabei auch von Kategorien beeinflusst sein.

Die absolute Anzahl der Wahlen auf jede der verschiedenen Wellenlängen wurden über die 4 – 14 verschiedenen Messungen gemittelt und diese Mittelwerte wurden dann auf den höchsten Mittelwert (meist bei einer der beiden Dressurwellenlängen) bezogen und sind als „relative Mittelwerte“ angegeben. Dadurch wird ein Vergleich der verschiedenen Fische untereinander ermöglicht, die häufig große Unterschiede in ihren „Beißhäufigkeiten“ zeigten.

Werte, die bei oder unter 50 % liegen, wurden so gedeutet, dass die getestete Wellenlänge für den Fisch unähnlich einer seiner Dressurwellenlängen ist, wobei eine Wahlhäufigkeit von über 50 % auf eine größere Ähnlichkeit schließen lässt. Die einzelnen Generalisierungswerte für die verschiedenen Wellenlängen werden dann zusammenfassend als Generalisierungskurve dargestellt. Die Vorgehensweise in diesem Test richtet sich nach bereits auch beim Goldfisch durchgeführten Versuchen von GOLDMAN et al. (1991) und KITSCHMANN (1999).

In den Diagrammen ist die Wahlhäufigkeit über den gesamten Testbereich als Funktion der Wellenlänge dargestellt, wobei auf der Ordinate die relative Wahlhäufigkeit bezogen auf die Wellenlänge mit der größten Anzahl an Wahlen aufgetragen ist. Die Auftragung der Wellenlängen erfolgt hier jedoch nicht linear, sondern auf der fischspezifischen Achse. Diese ergibt sich durch eine unterschiedliche Gewichtung der Skala nach der $\Delta\lambda$ -Funktion nach NEUMEYER, 1986 (siehe auch Methodik, Abschnitt 2.7). Dadurch werden Bereiche, in denen die Unterscheidungsfähigkeit gut

ist, gestreckt und solche, in denen sie schlecht ist, gestaucht. Dabei bedeuten jetzt gleiche Strecken auf der x-Achse gleiche Unterscheidbarkeit für den Fisch.

Es werden jeweils die drei (bzw. zwei) Fische einer Gruppe zusammen in einem Diagramm dargestellt. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler aller Messungen für die jeweilige Wellenlänge an.

Dressurwellenlängen 523 nm und 608 nm

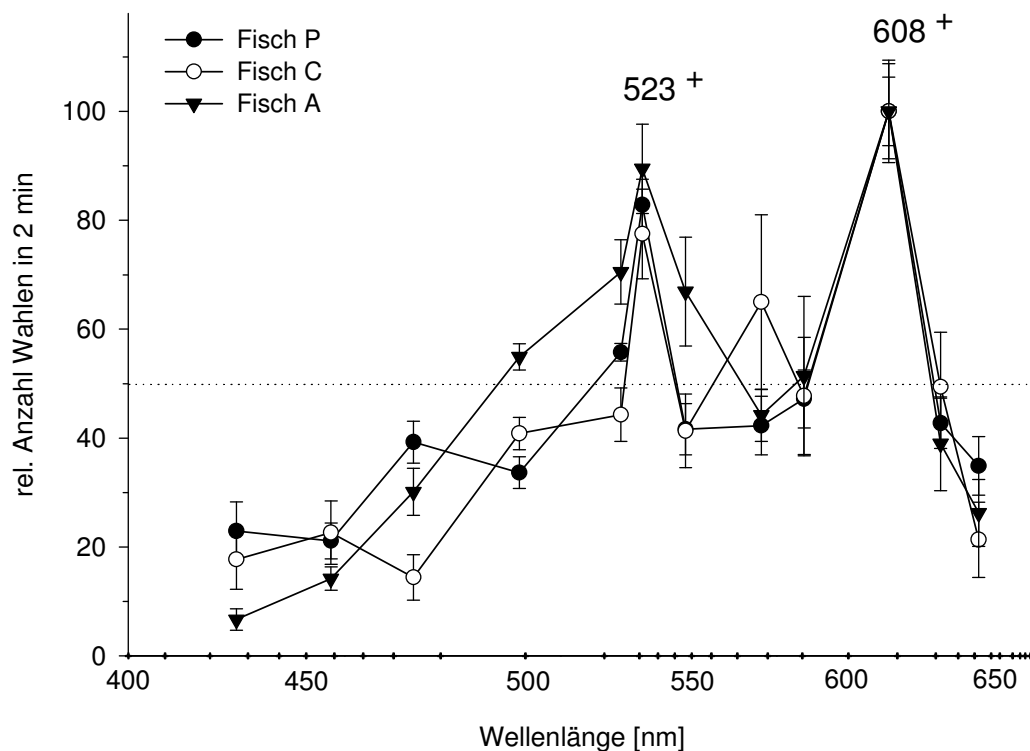


Abbildung 3.6: Generalisierungstest bei den Fischen P, C und A, die auf die Wellenlängen 523 nm und 608 nm dressiert wurden. Die Wellenlängenchse wurde nach der $\Delta\lambda$ - Funktion so verändert, dass gleiche Abstände gleiche Unterscheidbarkeit bedeuten. Die Ergebnisse beruhen auf $n = 4 - 11$ Einzelmessungen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler an. Die meisten Wahlen in den 2 Minuten fielen auf die Dressurwellenlänge 608 nm. Diese Anzahl wurde als 100 definiert und die anderen Wahlhäufigkeiten auf diesen Wert bezogen.

In Abbildung 3.6 sind zunächst die Generalisierungskurven der Fische P, C und A zu sehen, die auf die Wellenlängen 523 nm und 608 nm dressiert wurden. Die einzelnen dargestellten Punkte sind die Mittelwerte aus 4 - 11 Einzeltests der verschiedenen Wellenlängen, die Balken geben den entsprechenden Standardfehler des Mittelwerts an. Die Mittelwerte von Fisch P reichten von ca. 15 Beißen in 2 Minuten bis zu 70

Beißern bei der Wellenlänge 608 nm, bei Fisch C variierten die Mittelwerte zwischen 7 und 51 Wahlen in 2 Minuten, bei Fisch A von im Mittel 4 Beißern bei der Wellenlänge 425 nm bis zu 62 Wahlen bei der Wellenlänge 608 nm. Der getestete Wellenlängenbereich ging von 459 nm – 641 nm. In diesem Diagramm wird deutlich, dass die beiden Dressurwellenlängen, wie man es auch erwarten würde, in der zweiminütigen Messphase am häufigsten gewählt wurden. Zu den Flanken, also zu weiter entfernten Testwellenlängen hin, nimmt die Wahlhäufigkeit ab. Besonders schnell, nämlich bereits bei den beiden benachbarten Testwellenlängen, werden um die Dressurwellenlänge 608 nm herum Werte von fast 50 % oder sogar unter 50 % erreicht. Um die Dressurwellenlänge 523 nm herum liegen dagegen bei zwei Fischen Testwellenlängen über der 50 % Grenze. Bei den zwischen den Dressurwellenlängen liegenden Testwellenlängen werden Wahlhäufigkeiten von unter 50 % erreicht, sie werden von den Fischen also deutlich als nicht ähnlich den Dressurwellenlängen gewertet. Eine Ausnahme ist dabei Fisch C, der bei der Wellenlänge 576 nm noch einen leichten Anstieg zeigt, welcher aber aufgrund des großen Fehlerbalkens vernachlässigt werden kann. Die Schnittpunkte mit der 50 %-Achse liegen für die einzelnen Fische wie folgt:

Tabelle 3.1: Schnittpunkte der Generalisierungskurven der Fische P, C und A mit der 50 % - Linie.

| Fisch | P | C | A |
|----------------------|--------|--------|--------|
| Unterhalb von 523 nm | 510 nm | 515 nm | 497 nm |
| Oberhalb von 523 nm | 543 nm | 542 nm | 569 nm |
| Unterhalb von 608 nm | 592 nm | 593 nm | 590 nm |
| Oberhalb von 608 nm | 621 nm | 622 nm | 621 nm |

Durch diese Schnittpunkte kann man nun die Bereiche angeben, welche von den Fischen um die Dressurwellenlängen herum noch als „ähnlich“ den Dressurwellenlängen akzeptiert werden. Diese Bereiche sind in der folgenden Tabelle wiedergegeben:

Tabelle 3.2: Fische P, C und A: Wellenlängenbereiche um die Dressurwellenlängen 523 nm und 608 nm, in denen eine Wahlhäufigkeit von 50 % und mehr erreicht wird. Von der Dressurwellenlänge ausgehend wird der Bereich jeweils ins kürzer- und längerwellige gehend mit einem – bzw. + angegeben.

| Fisch | P | C | A |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Bereich um 523 nm | -13 nm / +20 nm | -8 nm / +19 nm | -26 nm / +46 nm |
| Bereich um 608 nm | -16 nm / +13 nm | -15 nm / +14 nm | -18 nm / +13 nm |

Bis auf die Werte um die Dressurwellenlänge 523 nm für den Fisch A, die deutlich größere Bereiche ergeben, liegen die Schnittpunkte der drei Fische mit der 50 %-Achse sehr dicht beieinander.

Dressurwellenlängen 499 nm und 576 nm

Den Fischen 1, 2 und 3 mit den Dressurwellenlängen 499 nm und 576 nm wurden Testwellenlängen aus dem Bereich zwischen 459 nm und 685 nm gezeigt (Abb. 3.7). Bei den Fischen 1 und 3 liegen die größten Wahlhäufigkeiten erwartungsgemäß bei den beiden Dressurwellenlängen 499 nm und 576 nm. Für Fisch 2 trifft dies nur im Falle von 499 nm zu, im „oberen“ Wellenlängenbereich wurde nicht die Dressurwellenlänge 576 nm mit 93 % am häufigsten gewählt, sondern die benachbarte Testwellenlänge 590 nm mit 95 %. Oberhalb der Dressurwellenlänge 576 nm fällt die Wahlhäufigkeit bei Fisch 2 auch deutlich langsamer ab als es für die anderen beiden Fische der Fall ist.

Alle drei Fische erreichen im Bereich zwischen den beiden Wellenlängen keine Wahlhäufigkeiten unter 50 % und auch nicht zwischen 499 nm und 450 nm. Die Fische akzeptieren hier also große Bereiche als der Dressurwellenlänge ähnlich und zeigen nur bei den „oberhalb“ von 590 nm liegenden Wellenlängen einen deutlichen Unterschied in ihrer Wahlhäufigkeit.

Die genauen Werte sind auch hier in einer Tabelle (3.3) wiedergegeben.

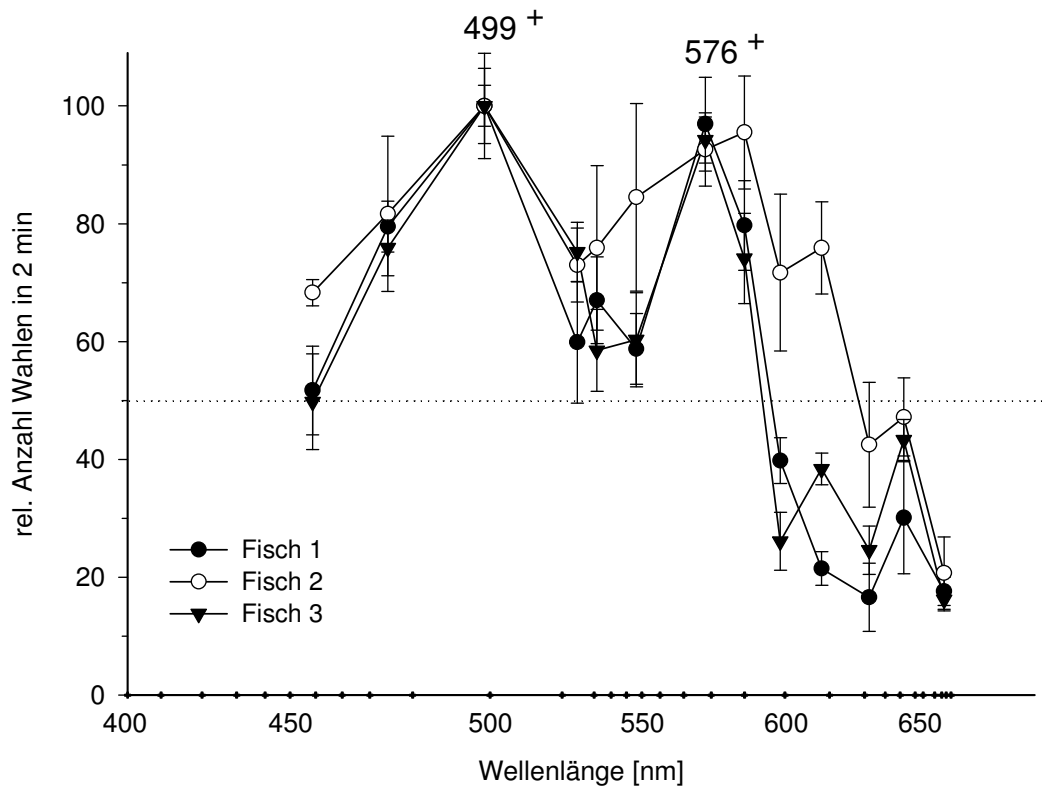


Abbildung 3.7: Generalisierungstest bei den Fischen 1, 2 und 3, die auf die Wellenlängen 499 nm und 576 nm dressiert wurden. Die Ergebnisse beruhen auf $n = 6 - 12$ Einzelmessungen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler an. Die Anzahl der meisten Wahlen in 2 min wurde als 100 definiert und die anderen Wahlhäufigkeiten auf diesen Wert bezogen. Die Wahlhäufigkeiten in 2 Minuten variierten bei Fisch 1 von 7 bis zu 52 Beißen, bei Fisch 2 von 6 bis 29 und bei Fisch 3 von 7 bis 45 Beißen.

Tabelle 3.3: Schnittpunkte der Generalisierungskurven der Fische 1, 2 und 3 mit der 50 %- Linie.

| Fisch | 1 | 2 | 3 |
|----------------------|----------|--------|----------|
| Unterhalb von 499 nm | ~ 458 nm | -- | 459 nm |
| Oberhalb von 499 nm | ~ 520 nm | -- | ~ 540 nm |
| Unterhalb von 576 nm | ~ 520 nm | -- | ~ 540 nm |
| Oberhalb von 576 nm | 595 nm | 619 nm | 593 nm |

Aufgrund der z. T. fehlenden Schnittpunkte mit der 50 %-Gerade können hier keine genauen Bereiche mit der Wahlhäufigkeit von 50 % und mehr angegeben werden. Verlängert man jedoch die Linien, so kann man angeben, bei welchen Werten vermutlich ein Schnittpunkt mit der 50 %-Achse erreicht werden würde. Fisch 3 und Fisch 1 erreichen zwar auch zwischen den Dressurwellenlängen keinen Schnittpunkt

mit der 50 %-Achse, es werden hier aber die Werte genutzt, die mit ca. 58 % nur unwesentlich höher liegen. Fügt man diese Werte dazu, so kann man in etwa die Bereiche angeben, die um die Dressurwellenlänge herum noch als „ähnlich“ akzeptiert werden:

Tabelle 3.4: Fische 1, 2 und 3: Wellenlängenbereiche um die Dressurwellenlängen 499 nm und 576 nm, in denen eine Wahlhäufigkeit von 50 % und mehr erreicht wird. Von der Dressurwellenlänge ausgehend wird der Bereich jeweils ins kürzer- und längerwellige gehend mit – bzw. + angegeben.

| Fisch | 1 | 2 | 3 |
|-------------------|---------------------|------------|-------------------|
| Bereich um 523 nm | ~ -41 nm / ~ +21 nm | -- | -40 nm / ~ +41 nm |
| Bereich um 608 nm | ~ -56 nm / +19 nm | - / +43 nm | ~ -36 nm / +17 nm |

Dressurwellenlängen 484 nm und 540 nm

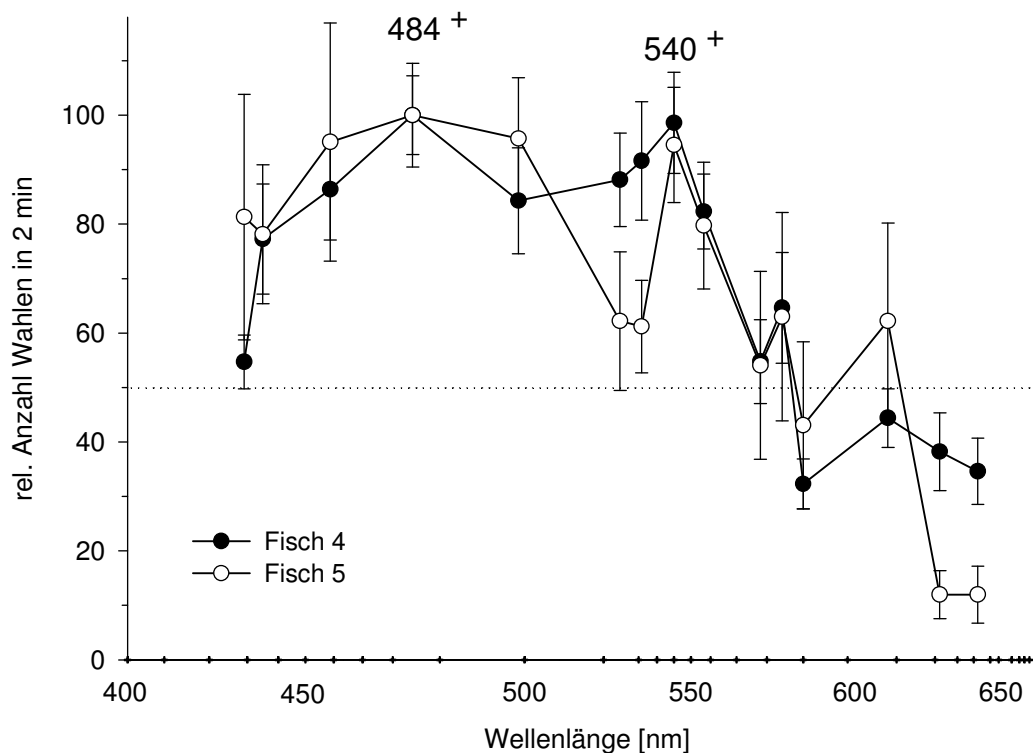


Abbildung 3.8: Generalisierungstest bei den Fischen 4 und 5, die auf die Wellenlängen 484 nm und 540 nm dressiert wurden. Die Ergebnisse beruhen auf $n = 4 - 14$ Einzelmessungen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler an. Die Anzahl der meisten Wahlen in 2 min wurde als 100 definiert und die anderen Wahlhäufigkeiten auf diesen Wert bezogen. Die Wahlhäufigkeiten in 2 Minuten variierten bei Fisch 4 von 12 bis zu 36 Beißen und bei Fisch 5 von 3 bis 21 Beißen.

Bei den Dressurwellenlängen 484 nm und 540 nm gingen letztlich nur zwei Fische, F 4 und 5, in die Wertung ein, deren Generalisierungskurven in Abbildung 3.8 dargestellt sind. Der getestete Bereich reichte von 429 nm bis 641 nm. Für die Testwellenlängen zwischen den beiden Dressurwellenlängen, wie auch im kürzerwelligen Bereich unterhalb von 484 nm, wurden keine Werte um die 50 % Grenze oder darunter erreicht. Erst im langwelligen Bereich wird ein Schnittpunkt gefunden. Dieser ist für beide getesteten Fische nahezu gleich. Anders als in den beiden vorher dargestellten Generalisierungstests ist im Falle der ersten Dressurwellenlänge auch keine so klare Spitze zu erkennen. Dies ist besonders deutlich bei Fisch 5 zu sehen, der die benachbarten Testwellenlängen nur geringfügig weniger häufig wählt als die Dressurwellenlänge 484 nm. Bei 514 nm fällt die Kurve jedoch deutlich bis auf einen Wert von ca. 60 % ab. Bei Fisch 4 fällt die Kurve im Bereich von 484 nm etwas steiler aus, die Unterscheidung zwischen der Dressurwellenlänge und den benachbarten Testwellenlängen ist also etwas besser als bei Fisch 5, aber zwischen den beiden Dressurwellenlängen fällt die Kurve nie unter 80 %. Dem Fisch erscheinen alle dazwischen getesteten Wellenlängen etwa gleich ähnlich. Im Verlauf der Kurve zeigt sich ein Anstieg der Wahlhäufigkeit bei der Wellenlänge 608 nm, der bei beiden Fischen in unterschiedlicher Ausprägung auftritt.

Tabelle 3.5: Schnittpunkte der Generalisierungskurven der Fische 4 und 5 mit der 50 % - Linie.

| Fisch | 4 | 5 |
|----------------------|----------|--------|
| Unterhalb von 484 nm | ~ 428 nm | -- |
| Oberhalb von 484 nm | -- | -- |
| Unterhalb von 540 nm | -- | -- |
| Oberhalb von 540 nm | 587 nm | 589 nm |

Dressurwellenlängen 540 nm und 630 nm

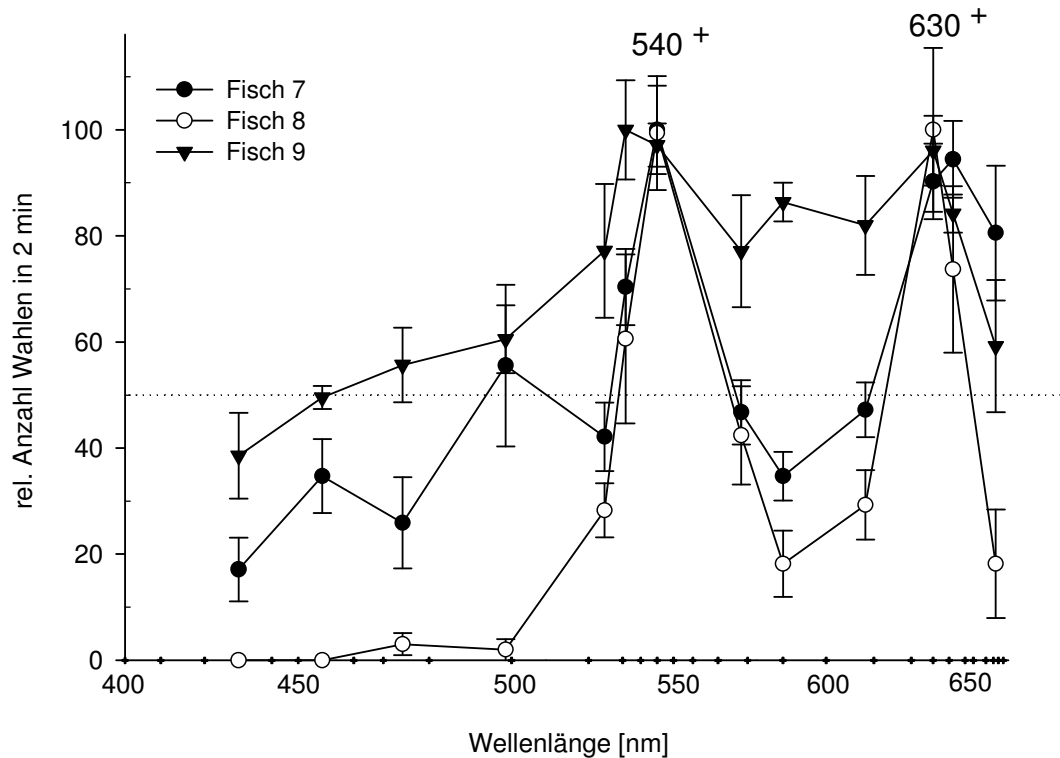


Abbildung 3.9: Generalisierungstest bei den Fischen 7, 8 und 9, die auf die Wellenlängen 540 nm und 630 nm dressiert wurden. Die Ergebnisse beruhen auf $n = 6 - 10$ Einzelmessungen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler an. Die Anzahl der meisten Wahlen in 2 min wurde als 100 definiert und die anderen Wahlhäufigkeiten auf diesen Wert bezogen. Die Wahlhäufigkeiten in 2 Minuten variierten bei Fisch 7 von 7 bis zu 36 Beißern, bei Fisch 8 von 0 bis 17 und bei Fisch 9 von 15 bis 38 Beißern.

Bei den Fischen 7, 8 und 9 lagen die ausgewählten Dressurwellenlängen bei 540 nm und 630 nm und der im Generalisierungstest untersuchte Wellenlängenbereich reichte von 429 nm bis 685 nm (Abb. 3.9). Beide Dressurwellenlängen sind nicht für jeden der Fische die Wellenlängen mit höchster Wahlhäufigkeit, die in der 2 Minuten dauernden Testphase erreicht wurde. Die größte Anzahl an Wahlen ist bei diesen aber jeweils nur um eine der getesteten Wellenlängen verschoben und die Dressurwellenlängen erhielten ebenfalls hohe Wahlhäufigkeiten. Bei Fisch 7 wird die Wellenlänge 641 nm mit 94 % etwas häufiger gewählt als die Dressurwellenlänge 630 nm mit 90 %. Für den Fisch 9 ist es die Wellenlänge 523 nm, die mit 100 % anstelle der Dressurwellenlänge 540 nm mit 97 % am häufigsten gewählt wurde. Fisch 8 hat jeweils seine höchsten Wahlhäufigkeiten bei den Dressurwellenlängen mit 99 % bei 540 nm und 100 % bei 630 nm. Im „oberen“ Wellenlängenbereich über 630 nm wird

innerhalb des untersuchten Bereiches bei zwei Fischen die 50 % Grenze nicht erreicht. Nur bei Fisch 8 wird bei der Wellenlänge 685 nm die 50 % Grenze durchschritten. Im Bereich zwischen den beiden Wellenlängen erreicht Fisch 9 diese Grenze wiederum nicht, für ihn scheinen sich die getesteten Wellenlängen nicht so stark von den Dressurwellenlängen zu unterscheiden. Im Wellenlängenbereich unterhalb von 540 nm wurden von allen drei Fischen Werte von weniger als 50 % erreicht. Besonders deutlich ist das Ergebnis von Fisch 8, bei dem von den Dressurwellenlängen ausgehend die Wahlhäufigkeiten sehr schnell sinken.

In der Tabelle 3.6 sind wiederum die Schnittpunkte der Generalisierungskurven mit der 50 % Grade angegeben:

Tabelle 3.6: Schnittpunkte der Generalisierungskurven der Fische 7, 8 und 9 mit der 50 % - Linie.

| Fisch | 7 | 8 | 9 |
|----------------------|--------|--------|----------|
| Unterhalb von 540 nm | 514 nm | 519 nm | 460 nm |
| Oberhalb von 540 nm | 574 nm | 571 nm | -- |
| Unterhalb von 630 nm | 609 nm | 613 nm | -- |
| Oberhalb von 630 nm | -- | 660 nm | ~ 703 nm |

Daraus lassen sich jetzt für die einzelnen Wellenlängen zum Teil wieder die Bereiche angeben, in denen die Wahlhäufigkeit bei 50 % und darüber liegt (Tabelle 3.7):

Tabelle 3.7: Wellenlängenbereiche um die Dressurwellenlänge, wo die Wahlhäufigkeit 50 % oder höher ist. Von der Dressurwellenlänge ausgehend wird der Bereich jeweils ins kürzer- und längerwellige gehend mit - bzw. + angegeben.

| Fisch | 7 | 8 | 9 |
|-------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| Bereich um 540 nm | -26 nm / +34 nm | -21 nm / +31 nm | -80 nm / - |
| Bereich um 630 nm | -21 nm / - | -17 nm / +30 nm | - / ~ +73 nm |

Nur bei Fisch 8 werden vier Schnittpunkte mit der 50 %-Achse erreicht, wodurch vier Bereiche angegeben werden können, die als ähnlich der Dressurwellenlängen gewertet werden. Bei Fisch 7 fehlt nur im langwelligen Bereich der Schnittpunkt mit

der 50 %-Achse. Dieser ist auch bei Fisch 9 nicht vorhanden, aber aus dem Verlauf der Kurve kann ein Schnittpunkt mit Bereich um 700 nm angenommen werden. Auch zwischen den beiden Dressurwellenlängen erreicht Fisch 9 keinen Schnittpunkt mit der 50 %-Achse. Hier gehen die Werte nur knapp unter 80 %.

Dressurwellenlängen 438 nm und 501 nm

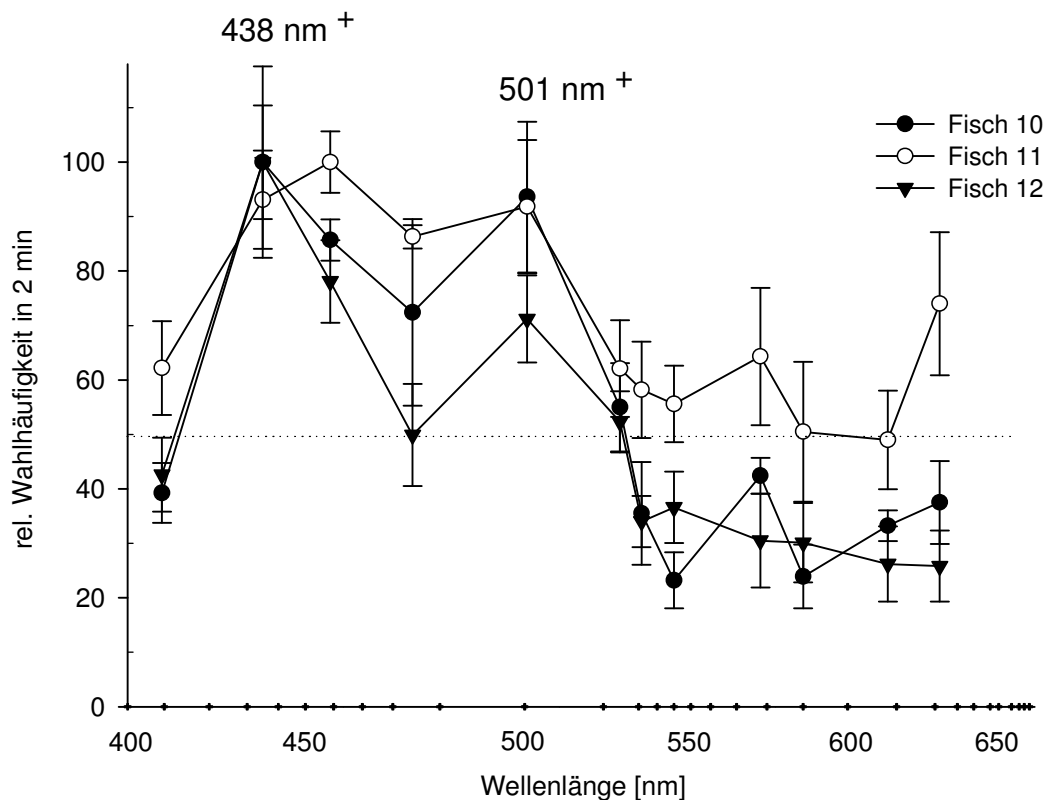


Abbildung 3.10: Generalisierungstest bei den Fischen 10, 11 und 12, die auf die Wellenlängen 438 nm und 501 nm dressiert wurden. Die Ergebnisse beruhen auf $n = 6$ Einzelmessungen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler an. Die Anzahl der meisten Wahlen in 2 min wurde als 100 definiert und die anderen Wahlhäufigkeiten auf diesen Wert bezogen. Die Wahlhäufigkeiten in 2 Minuten variierten bei Fisch 10 von 11 bis zu 47 Beißern, bei Fisch 11 von 16 bis 33 und bei Fisch 12 von 12 bis 47 Beißern.

Die Fische 10, 11 und 12 wurden auf die Wellenlängen 438 nm und 501 nm dressiert. Der im Generalisierungstest untersuchte Bereich reichte von 409 nm bis 622 nm. Fisch 10 hat jeweils die größten Wahlhäufigkeiten in den 2 Minuten-Messungen bei den beiden Dressurwellenlängen. Bei Fisch 11 ist die zu 438 nm benachbarte Wellenlänge 459 nm mit 100 % Wahlhäufigkeit etwas stärker bevorzugt als die Dressurwellenlänge 438 nm mit 93 % und bei Fisch 12 wird die Dressurwellenlänge

501 nm mit nur 71 % weit aus weniger häufig gewählt, als die Dressurwellenlänge 438 nm, trotzdem entspricht es im längerwelligen Bereich der größten Wahlhäufigkeit (Abb. 3.10).

Die Generalisierungskurve von Fisch 11 erreicht weder im kurzwelligen Bereich unter 438 nm noch zwischen den beiden Dressurwellenlängen Wahlhäufigkeiten, die unter 50 % liegen. Erst bei der Wellenlänge 608 nm, also mehr als 100 nm von der Dressurwellenlänge 501 nm entfernt, wird die 50 %-Achse geschnitten, wobei die Wahlhäufigkeit anschließend sogar wieder ansteigt. Die Generalisierungskurve von Fisch 10 schneidet sowohl unterhalb von 438 nm als auch oberhalb von 501 nm die 50 %-Achse. Zwischen den Dressurwellenlängen erfolgt dies nicht, die geringste Wahlhäufigkeit liegt hier bei der Wellenlänge 484 nm mit 72 %. Dagegen weist Fisch 12 in allen drei Bereichen, „vor“ 438 nm, zwischen den Dressurwellenlängen und „nach“ der Dressurwellenlänge 501 nm einen Schnittpunkt mit der 50 %-Achse auf. Im Folgenden werden wieder die Schnittpunkte angegeben (Tabelle 3.8):

Tabelle 3.8: Schnittpunkte der Generalisierungskurven der Fische 10, 11 und 12 mit der 50 % - Linie.

| Fisch | 10 | 11 | 12 |
|----------------------|--------|----------|--------|
| Unterhalb von 438 nm | 415 nm | ~ 408 nm | 413 nm |
| Oberhalb von 438 nm | -- | -- | 485 nm |
| Unterhalb von 501 nm | -- | -- | 485 nm |
| Oberhalb von 501 nm | 518 nm | 590 nm | 515 nm |

Daraus ergeben sich einzig für den Fisch 12 abgetrennte Bereiche um die Dressurwellenlängen, bei denen die Wahlhäufigkeit bei 50 % oder mehr liegt (Tabelle 3.9). Dieser Bereich ist um die Wellenlänge 438 nm insgesamt 72 nm breit, bei 501 nm ist der Bereich dagegen schmaler, er beträgt 30 nm.

Tabelle 3.9: Wellenlängenbereiche um die Dressurwellenlängen, in denen die Wahlhäufigkeit bei 50 % und mehr liegt. Von der Dressurwellenlänge ausgehend wird der Bereich jeweils ins kürzer- und längerwellige gehend mit – bzw. + angegeben.

| Fisch | 10 | 11 | 12 |
|-------------------|------------|--------------|-----------------|
| Bereich um 438 nm | -23 nm / - | ~ -30 nm / - | -24 nm / +48 nm |
| Bereich um 501 nm | - / +17 nm | - / +89 nm | -16 nm / +14 nm |

3.1.2.1 Gesamtergebnis der Generalisierungstests

Um über die gesamten Ergebnisse des Generalisierungstest einen Überblick zu bekommen, wurde versucht, in der nächsten Abbildung (3.11) eine entsprechende Darstellung zu finden. Dazu wurden die Dressurwellenlängen der verschiedenen Fischgruppen und die Schnittpunkte mit der 50 % Geraden und dadurch auch die Bereiche, in denen die Wellenlängen mit einer Häufigkeit von über 50 % gewählt wurden, eingezeichnet. Dabei geben die Linien bei den jeweiligen Dressurwellenlängen die Bereiche mit einer Wahlhäufigkeit von über 50 % an. Enden die Linien mit einem kleinen Längsbalken, so ist dies der Schnittpunkt mit der 50 %-Achse. Endet die Linie mit einem Pfeil, so bedeutet dies, dass in dem untersuchten Testbereich kein Schnittpunkt mit der 50 %-Achse erreicht wurde, Werte unterhalb von 50 % sind also erst außerhalb des getesteten Bereichs zu erwarten. Traten zwischen den beiden jeweiligen Dressurwellenlängen keine Wahlhäufigkeiten von 50 % und darunter auf, so ist die Linie hier durchgezogen.

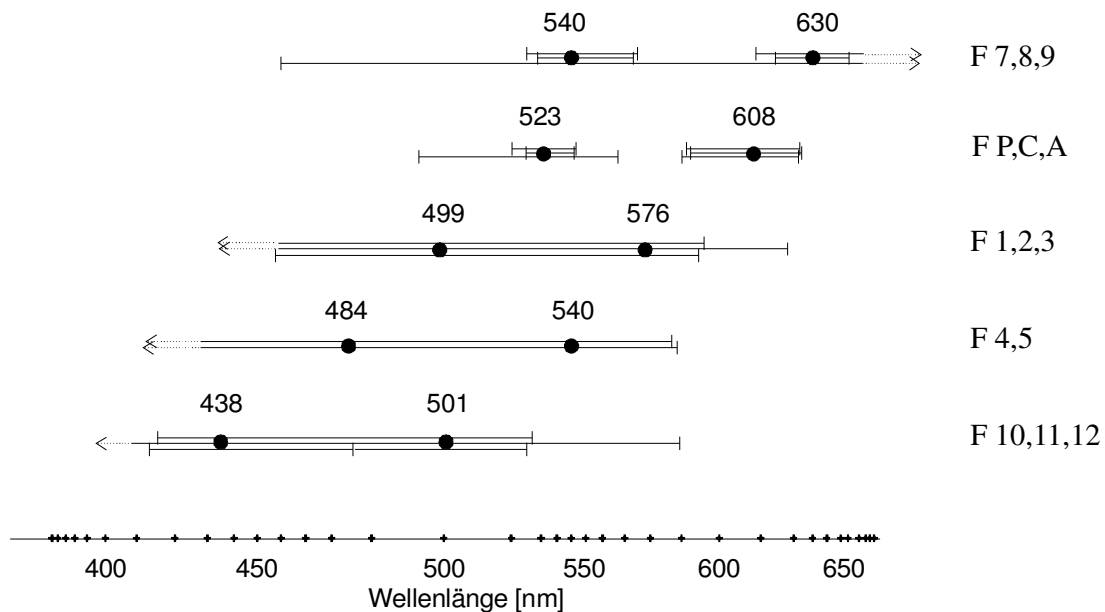


Abbildung 3.11: Zusammenfassende Darstellung der Bereiche, bei denen im Generalisierungstest 50 % oder mehr Wahlhäufigkeit erreicht wurde. Die Kreise stehen für die Dressurwellenlängen und die Linien mit den Endbalken geben die Schnittpunkte mit der 50 % - Achse an. Wurde im getesteten Wellenlängenbereich kein Schnittpunkt erzielt, so wurde die Linie bis zum getesteten Bereich gezogen und eine daran anschließende gestrichelte Linie mit Pfeilspitze gibt an, dass der Schnittpunkt irgendwo außerhalb des getesteten Bereiches liegt.

3.1.3 Transfertest

Beim Transfertest wurden je nach Dressurwellenlängen drei bestimmte monochromatische Wellenlängen ausgewählt (siehe Abschnitt 2.8.1.3). Von diesen wurden dem Fisch immer zwei gleichzeitig präsentiert, wobei der Fisch dann durch seine Wahlen angab, welche der beiden gezeigten Transferwellenlängen er bevorzugte, also welche vermutlich ähnlicher seiner Dressurwellenlänge ist, oder ob er sie als gleich ähnlich, bzw. unähnlich empfindet und sie dementsprechend in etwa auch gleich oft wählt. Aus den drei ausgewählten Transferwellenlängen ergaben sich je drei Kombinationsmöglichkeiten.

Die im Transfertest benutzten Wellenlängen wurden dabei so ausgewählt, dass eine „unterhalb“ der kürzerwelligen Dressurwellenlänge, eine „oberhalb“ der längerwelligen Dressurwellenlänge und eine zwischen den beiden Dressurwellenlängen lag. Dabei sollte der Abstand auf der fischspezifischen Wellenlängenskala möglichst

gleich sein, also die kurzwellige Testwellenlänge sollte etwa den gleichen Abstand auf der fischspezifischen Wellenlängenskala von der kurzwelligen Dressurwellenlänge haben, wie die langwellige Testwellenlänge von der langwelligen Dressurwellenlänge. Die zwischen den beiden Dressurwellenlängen liegende Transferwellenlänge sollte in etwa in der Mitte dieses Abstandes liegen.

Im Transfertest bestand ein Versuchsdurchlauf aus 100 Wahlen des Fisches, wobei nach jeweils 25 Wahlen eine Belohnung auf eine der Dressurwellenlängen erfolgte. Die verschiedenen Versuchsdurchläufe wurden anschließend gemittelt und in einem Säulendiagramm für jeden Fisch als prozentuale Wahlhäufigkeit mit entsprechendem Standardfehler des Mittelwertes angegeben.

Dressurwellenlängen 523 nm und 608 nm

Im Transfertest der Fische P, C und A mit den Dressurwellenlängen 523 nm und 608 nm wurden die Wellenlängen 499 nm, 576 nm und 641 nm verwendet (Abbildung 3.12). Die dargestellten Ergebnisse stellen die Mittelwerte aus 4 – 6 Einzelversuchen dar, die je 100 Wahlen beinhalten. In der ersten getesteten Kombination 499 nm gegen 576 nm wurde zwar bei den Fischen C und A die Wellenlänge 499 nm mit jeweils 42 % seltener gewählt, aber der Unterschied zu 576 nm war bei beiden Fischen nicht signifikant. Fisch P dagegen bevorzugt mit 56 % die Wellenlänge 499 nm leicht gegenüber 576 nm, aber auch dieses Ergebnis ist nicht signifikant. Ein deutlicherer Unterschied ergab sich jedoch bei den zwei weiteren Transfertestkombinationen. Bei dem Test 576 nm gegen 641 nm wurde von allen drei Fischen die Wellenlänge 576 nm gegenüber 641 nm bevorzugt. Die Wahlhäufigkeiten lagen hier zwischen 68 % und 92 %. Bei den Transferwellenlängen 499 nm und 641 nm wurde die Wellenlänge 499 nm ebenfalls gegenüber 641 nm bevorzugt, die Wahlhäufigkeiten lagen hier zwischen 70 % und 81 %. Diese Ergebnisse können entweder als eine Bevorzugung der Wellenlängen 499 nm und 576 nm gegenüber der Wellenlänge 641 nm interpretiert werden, oder aber als eine Ablehnung der Wellenlänge 641 nm gegenüber den anderen beiden Transferwellenlängen, wogegen die Wellenlängen 499 nm und 576 nm in etwa gleich ähnlich bzw. unähnlich ihrer Dressurwellenlängen bewertet wurden.

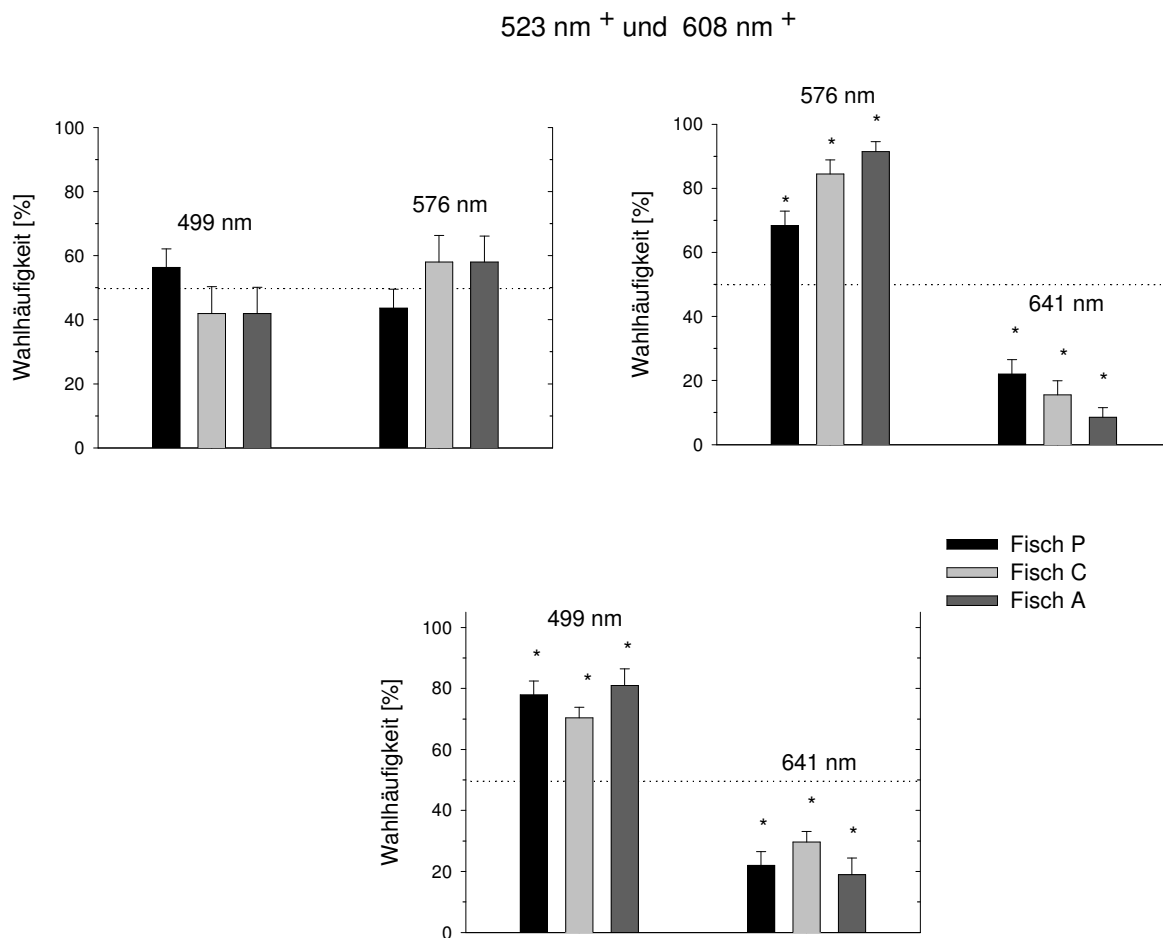


Abbildung 3.12: Transfertest der Fische P, C und A. Die Dressurwellenlängen lagen bei 523 nm und 608 nm, die ausgewählten Transfertestwellenlängen waren 499 nm, 576 nm und 641 nm. Die Ergebnisse beruhen auf $n = 4 - 6$ Einzeldurchgängen à 100 Wahlen. Die Balken geben den Standardfehler des Mittelwertes an. * = signifikanter Unterschied für die getestete Kombination ($p < 0,05$).

Dressurwellenlängen 499 nm und 576 nm

Bei den Fischen 1, 2 und 3 mit den Dressurwellenlängen 499 nm und 576 nm wurden die Transferwellenlängen 459 nm, 523 nm und 599 nm gegeneinander getestet (Abbildung 3.13). Die Ergebnisse setzen sich aus 6 oder 7 Versuchsdurchläufen zusammen. In der ersten getesteten Kombination 459 nm gegen 523 nm variiert die Wahlhäufigkeit der Wellenlänge 459 nm zwischen 30 % bei Fisch 2 und ca. 45 % bei Fisch 1 und 3. Für die Fische 1 und 3 ist der Unterschied zur Vergleichswellenlänge aber zu gering, so dass hier von keiner signifikanten Bevorzu-

gung einer Wellenlänge gesprochen werden kann, sie wählen die beiden Transferwellenlängen nahezu gleich oft. Nur bei Fisch 2 kann man eine eindeutige Bevorzugung der Wellenlänge 523 nm sehen. Diese ist mit $p < 0,05$ signifikant. Bei der zweiten Kombination 523 nm gegen 599 nm liegen die Werte für Fisch 1 und 2 mit 57,6 % und 46,3 %, bei der Wellenlänge 523 nm nahe bei 50 % und sind nicht signifikant von den Werten bei 599 nm verschieden. Fisch 3 dagegen bevorzugt die Wellenlänge 523 nm mit 63,8 % deutlich gegenüber der Wellenlänge 599 nm. Die dritte Transferkombination 459 nm gegen 599 nm zeigt bei allen drei Fischen keinen signifikanten Unterschied, die Werte schwanken bei der Wellenlänge 459 nm zwischen 44,3 und 61,4 % und bei 599 nm entsprechend.

499 nm⁺ und 576 nm⁺

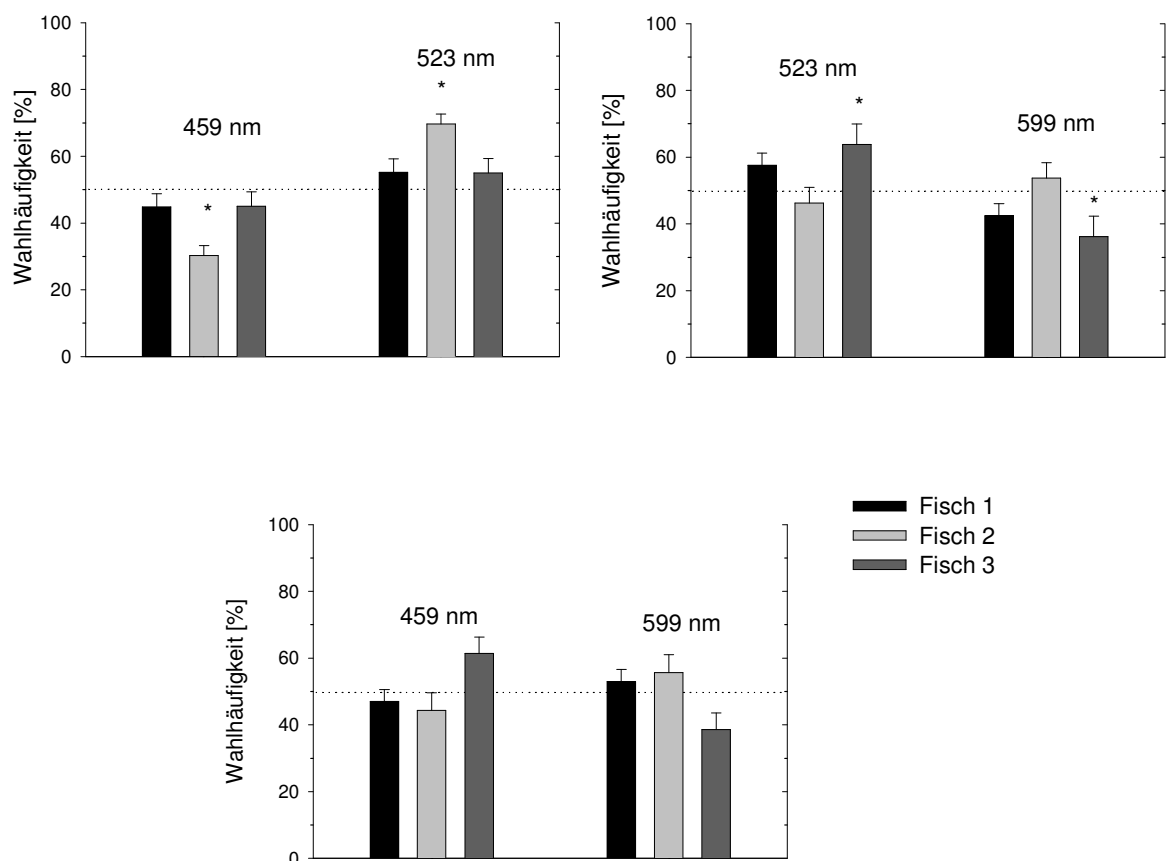


Abbildung 3.13: Transfertest der Fische 1, 2 und 3, die auf die Wellenlängen 499 nm und 576 nm dressiert wurden. Die ausgewählten Transfertestwellenlängen waren 459 nm, 523 nm und 599 nm. Die Ergebnisse beruhen auf $n = 6 - 7$ Einzelversuchen à 100 Wahlen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler an. * = signifikanter Unterschied ($p < 0,05$).

Dressurwellenlängen 484 nm und 540 nm

Die auf die Wellenlängen 484 nm und 540 nm dressierten Fische 4 und 5 wurden im Transfertest mit den Wellenlängen 438 nm, 514 nm und 584 nm konfrontiert und durchliefen 5 oder 6 Einzelversuche (Abbildung 3.14). Die Ergebnisse der Kombination 438 nm gegen 514 nm zeigen für beide Fische nur geringe Schwankungen um den 50 %-Wert. Dies trifft für den Fisch 5 auch auf die beiden weiteren Transfertestkombinationen zu. Anders ist dies für Fisch 4, der in der Kombination 514 nm gegen 584 nm die erstere Wellenlänge mit 60,4 % bevorzugt und in der Kombination 438 nm gegen 584 nm die Wellenlänge 438 nm mit 63 %.

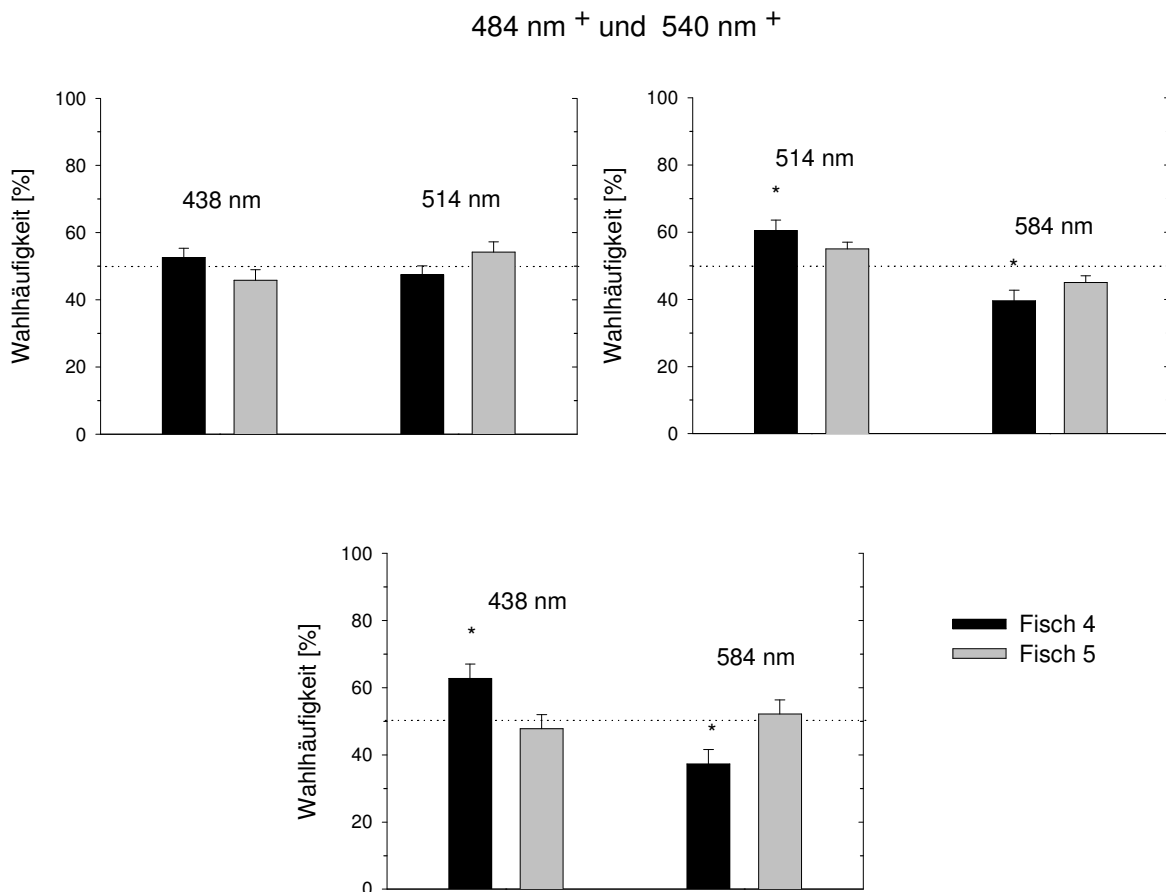


Abbildung 3.14: Transfertest der Fische 4 und 5 mit den Dressurwellenlängen 484 nm und 540 nm. Die Transfertestwellenlängen lagen bei 438 nm, 514 nm und 584 nm. Die Balken geben den Mittelwert aus 5 bzw. 6 Einzelversuchen wieder. Die Fehlerbalken geben den entsprechenden Standardfehler an. * = signifikanter Unterschied ($p < 0,05$).

Dressurwellenlängen 540 nm und 630 nm

Bei den Fischen 7, 8 und 9 mit den Dressurwellenlängen 540 nm und 630 nm wurden die Transferwellenlängen 499 nm, 608 nm und 685 nm ausgewählt (Abbildung 3.15). Bei der Kombination 499 nm gegen 608 nm zeigten die Fische 7 und 8 keine signifikanten Unterschiede zu einem 50:50 Ergebnis. Bei Fisch 7 war das Ergebnis mit 50,5 % zu 49,5 % sehr ausgeglichen, bei Fisch 8 unterschieden sich die Werte mit 42 % zu 58 %. Bei Fisch 9 kann der Unterschied von 60 % zu 40 % als unterschiedliche Wahlhäufigkeit angesehen werden ($p < 0,05$). In der zweiten getesteten Kombination 499 nm gegen 685 nm wird von den Fischen 7 und 8 die Wellenlänge 685 nm gegenüber 499 nm bevorzugt (Fisch 7 und Fisch 8 mit jeweils um die 66 %), bei Fisch 9 ergibt sich ein umgekehrtes Verhältnis, er bevorzugt 499 nm mit 55 % leicht vor der Wellenlänge 685 nm. In der dritten Kombination 608 nm gegen 685 nm zeigt nur Fisch 7 ein unterschiedliches Wahlverhalten. Er wählt die Wellenlänge 608 nm nur mit einer Wahlhäufigkeit von 30 %, bevorzugt also die Wellenlänge 685 nm. Die Fische 8 und 9 zeigen keine deutliche Bevorzugung, die Wellenlänge 685 nm wird mit 55 % bzw. 52 % gewählt.

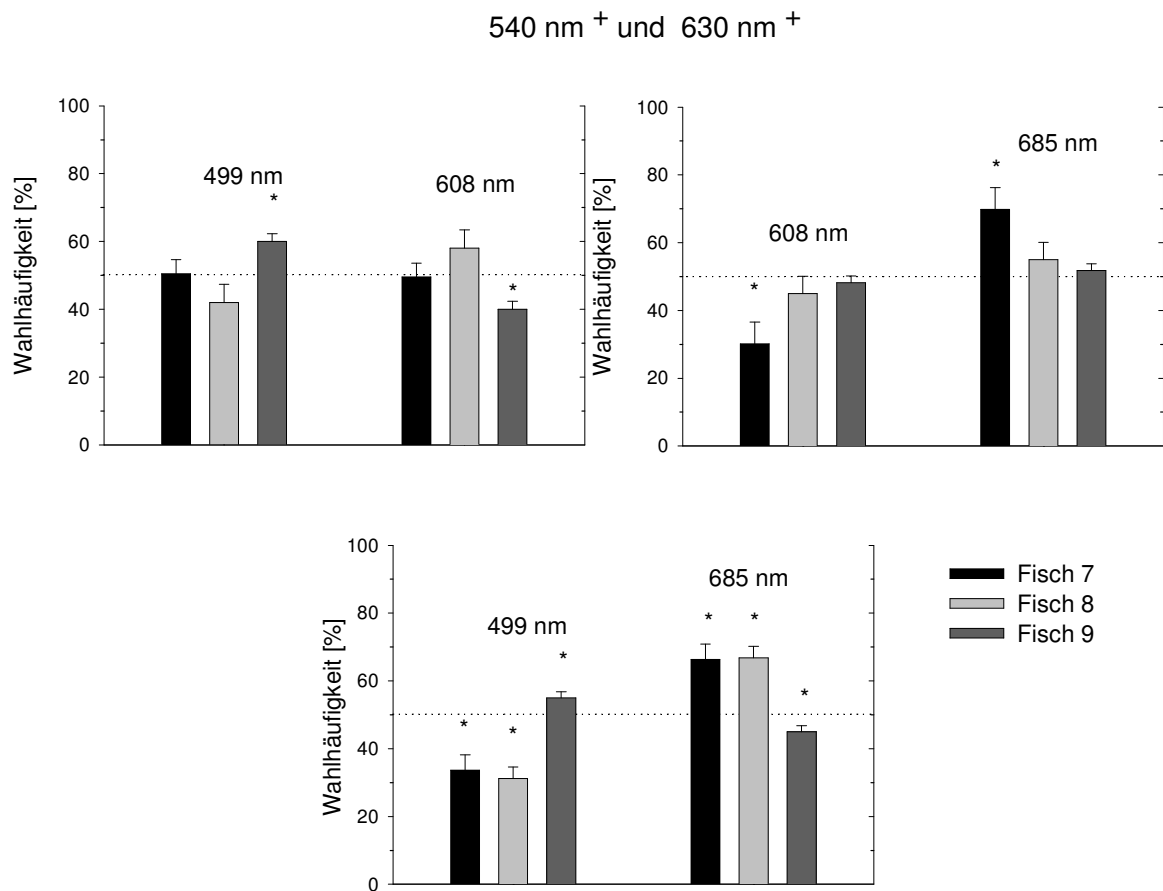


Abbildung 3.15: Transfertest der Fische 7, 8 und 9 mit den Dressurwellenlängen 540 nm und 630 nm und den Transfertestwellenlängen 499 nm, 608 nm und 685 nm. Die Ergebnisse beruhen auf 6 Einzelversuchen und der Standardfehler des Mittelwertes wird durch den Fehlerbalken angegeben. * = signifikanter Unterschied ($p < 0,05$).

Dressurwellenlängen 438 nm und 501 nm

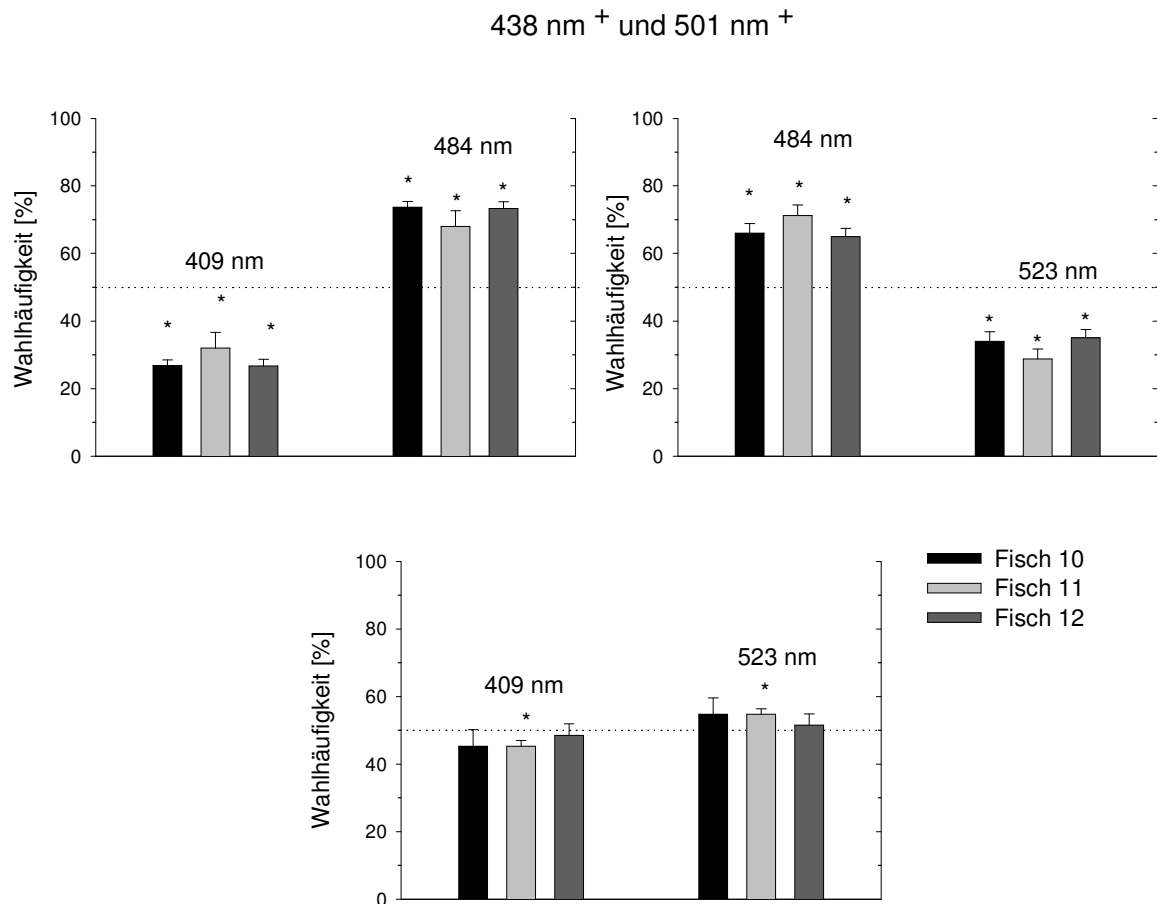


Abbildung 3.16: Transfertest der Fische 10, 11 und 12, welche auf die Wellenlängen 438 nm und 501 nm dressiert wurden. Die Transfertestwellenlängen liegen bei 409 nm, 484 nm und 523 nm. Die Ergebnisse beruhen auf n = 6 Einzelversuchen die je 100 Wahlen des Fisches ausmachen. Der Standardfehler des Mittelwertes wird durch den Fehlerbalken angegeben. * = signifikanter Unterschied (p < 0,05).

Die Fische 10, 11 und 12 wurden auf die Wellenlängen 438 nm und 501 nm dressiert. Als Transferwellenlängen wurden 409 nm, 484 nm und 523 nm ausgewählt. Abbildung 3.16 zeigt das Ergebnis aus je sechs Einzelversuchen. Bei der ersten Kombination, bei der die Wellenlänge 409 nm gegen 484 nm gezeigt wurde, wählten alle drei Fische mit einer Wahlhäufigkeit von 68 % bis zu 74 % häufiger die Wellenlänge 484 nm. In der zweiten Testkombination, in der 484 nm gegen 523 nm präsentiert wurde, wurde ebenfalls wieder von allen drei Fischen die Wellenlänge 484 nm bevorzugt (zwischen 65 % und 71 %). Wenn dagegen 409 nm gegen 523 nm

gezeigt wurde, so wählten die Fische beide Wellenlängen mit einer Häufigkeit von ca. 50 %. Nur bei Fisch 11 ergibt sich bei einer Wahlhäufigkeit von 45 % bei 409 nm zu 55 % bei 523 nm ein signifikanter Unterschied.

3.1.3.1 Gesamtergebnis des Transfertests

In den folgenden beiden Abbildungen 3.17 und 3.18 sollen die Ergebnisse des Transfertests zusammenfassend dargestellt werden. Dabei sind in der ersten Darstellung (Abbildung 3.17) die unterschiedlichen Wahlverteilungen aller Fische wiedergegeben. Wenn hier ein oder mehrere Fische eine Wellenlänge einer der Transferkombinationen bevorzugten, dann wird dies durch einen Pfeil am Ende der Linie, die die beiden getesteten Transferwellenlängen verbindet, dargestellt. Ein besonderer Fall ist dabei bei den Dressurwellenlängen 540 nm und 630 nm die Kombination 499 nm gegen 685 nm. Die Verbindungslinie der beiden Wellenlängen weist auf beiden Seiten eine Pfeilspitze auf, da ein Fisch bei dieser Kombination 499 nm bevorzugt und die anderen beiden die Wellenlänge 685 nm.

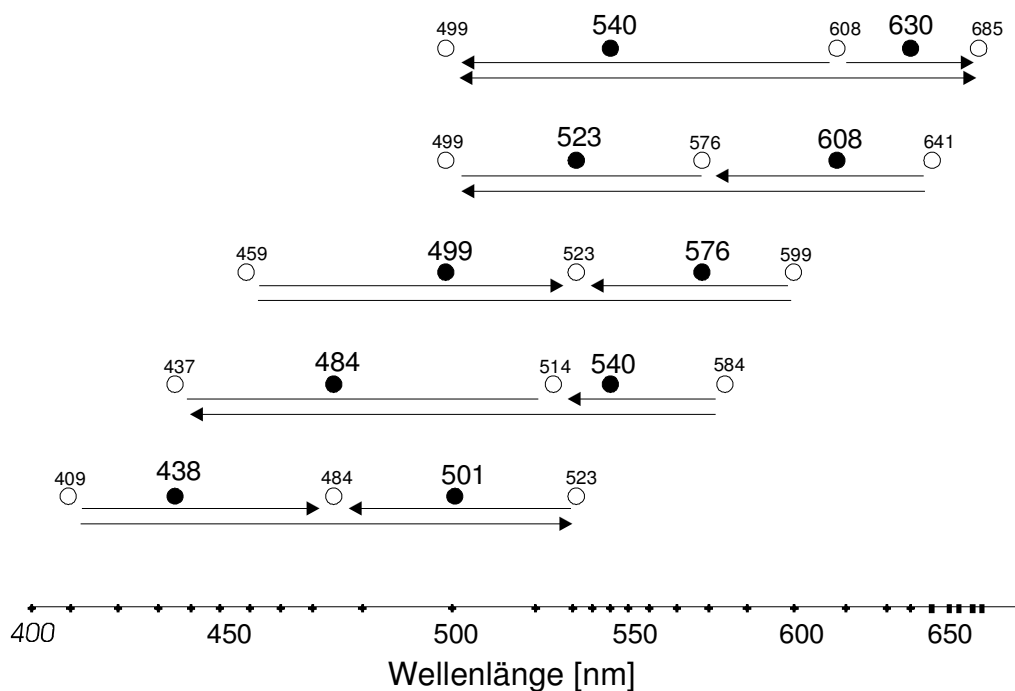


Abbildung 3.17: Zusammenfassende Darstellung aller Transfertests. Die schwarzen Kreise geben die Dressurwellenlängen wieder, die weißen stehen für die jeweiligen Transferwellenlängen. Die Linien verbinden die jeweils gegeneinander getesteten Transferwellenlängen. Weisen diese Linien eine Pfeilspitze auf, so wird die Wellenlänge, unter der der Pfeil steht, gegenüber der anderen Wellenlänge von einem oder mehreren Fischen bevorzugt.

In der zweiten Graphik (Abb. 3.18) sind bei gleicher Darstellung dagegen nur die Kombinationen mit einem signifikanten Unterschied in der Wahlhäufigkeit dargestellt, die von mindestens zwei Fischen einer Gruppe gezeigt wurden. Dadurch soll verhindert werden, dass Zufallsentscheidungen einzelner Fische eine zu starke Gewichtung bekommen.

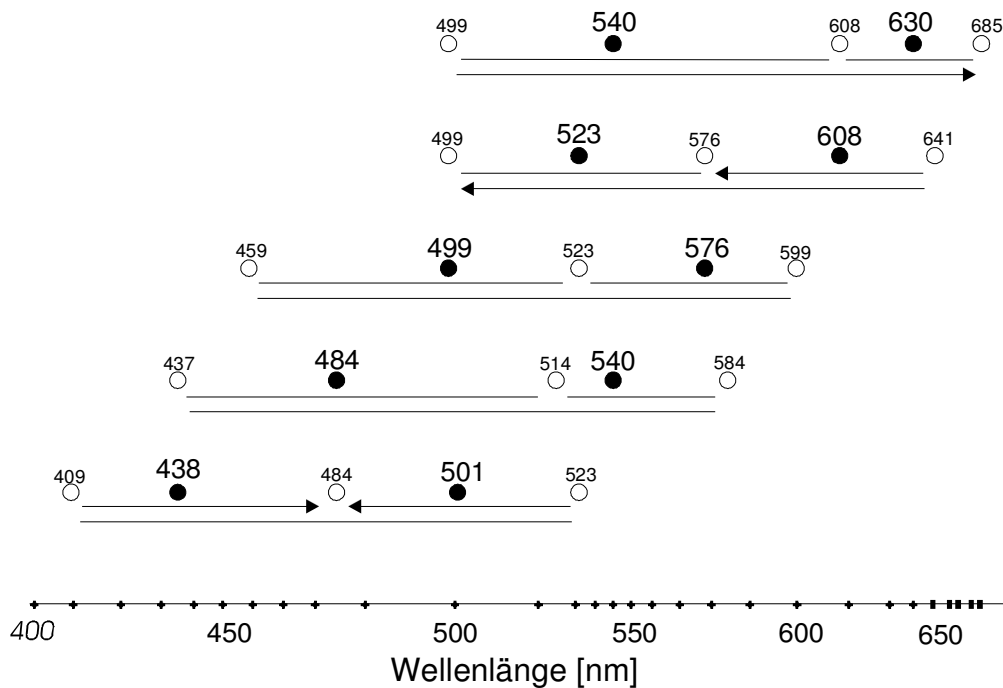


Abbildung 3.18: Darstellung der Ergebnisse aller Transfertests. Die Linien geben die Kombinationen der Transferwellenlängen (weiße Kreise) der zugehörigen Dressurwellenlängen (schwarze Kreise) an. Die Pfeilspitzen stehen dafür, dass bei der jeweiligen Kombination eine der Wellenlängen bevorzugt wird. Dabei sind in diese Darstellung nur die Wahlen eingegangen, die von mindestens zwei Fischen einer Gruppe gezeigt wurden.

Genauer soll auf die Abbildung 3.18 eingegangen werden, bei der mindestens zwei Fische eine statistisch unterschiedliche Wahlhäufigkeit der beiden Transferwellenlängen aufwiesen. Dies schließt, wie schon erwähnt, Zufallsentscheidung eines einzelnen Fisches aus. Dass es sich dann wirklich um keine Zufallswahl handelt, dafür spricht auch, dass in keiner der in Abbildung 3.18 dargestellten Entscheidungen nur zwei Fische diese Wahl zeigten. Entweder zeigte nur ein Fisch eine ungleichmäßige Wahl der Transferwellenlängen, wobei sie dann in die Abbildung 3.18 nicht eingegangen ist, oder es zeigten alle drei Fische diese ungleichmäßige

Wahl. Ein Sonderfall ist dabei die Transferkombination 499 nm gegen 685 nm bei den Dressurwellenlängen 540 nm und 630 nm, wo zwar alle drei Fische unterschiedliche Wahlhäufigkeiten der beiden Testwellenlängen zeigen, allerdings bevorzugen sie dabei verschiedene Wellenlängen.

Bei dieser Auswertung der Daten, bei der nur Ergebnisse gewertet werden, wenn sie mindestens zwei Fische zeigen, treten in drei von den fünf Dressurkonstellationen ungleichmäßige Wahlhäufigkeiten bei den Transferwellenlängen auf. Dies ist bei den Dressurkombinationen 540 nm und 630 nm, 523 nm und 608 nm sowie bei 438 nm und 501 nm der Fall.

3.1.4 Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit

Nach Abschluss des Generalisierungstest wurde als Letztes die Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit der Fische untersucht. Hierbei wurden dem Fisch alle Wellenlängen, die im Generalisierungs- und Transfertest gezeigt wurden, gegen jede der beiden Dressurwellenlängen gleichzeitig präsentiert und je 100 Wahlen registriert, mit je einer Belohnung nach 25 Bissen. In diesem Test kann ermittelt werden, wie gut die einzelnen Wellenlängen von den Dressurwellenlängen unterschieden werden können. Zur Darstellung der Ergebnisse werden die einzelnen Werte zu je einer Kurve zusammengefügt. Dabei wird auf der Abszisse die Wellenlänge aufgetragen, die in diesem Fall im direkten Vergleich zur Dressurwellenlänge gezeigt wurde, auf der Ordinate die Wahlhäufigkeit, die auf die jeweilige Vergleichswellenlänge entfiel. Für die nicht realisierte Konstellation, dass die Dressurwellenlänge gegen sich selbst getestet wurde, ergab sich eine angenommene Wahlhäufigkeit von 50 %. Für die Kombination, bei der die Dressurwellenlängen im direkten Vergleich gezeigt gegeneinander gezeigt werden, wurden die Werte aus dem 50:50-Test eingesetzt. Aus den Wellenlängenunterscheidungskurven lassen sich dann die Bereiche herauslesen, in denen die Wellenlängen gut von den Dressurwellenlängen unterschieden werden können. Als Schwellenkriterium wurde hier die 30 %-Marke genutzt, also alle Wellenlängen, die mit einer Wahlhäufigkeit von 30 % oder weniger gewählt werden, kann der Fisch gut von den Dressurwellenlängen unterscheiden; liegt die Wahlhäufigkeit über 30 %, so fällt dem Fisch die Unterscheidung zwischen Dressur- und

Testwellenlängen schwer. Anders als im Generalisierungstest, bei dem der Vergleich zwischen den gezeigten Testwellenlängen und Dressurwellenlängen aus dem Gedächtnis erfolgt, ist im Wellenlängenunterscheidungstest ein direkter Vergleich möglich.

Für jeden Fisch ergeben sich zwei Wellenlängenunterscheidungsfähigkeitskurven, je eine für jede Dressurwellenlänge. Diese sind in den Graphiken als graue Punkte und Linien dargestellt. Zusätzlich wurden die Mittelwerte der Ergebnisse für die beiden Dressurwellenlängen für jede Wellenlänge berechnet. Diese ist mit schwarzen Symbolen dargestellt. Die Abbildungen 3.19 – 3.24 zeigen den Wellenlängenunterscheidungstest der verschiedenen Fischgruppen.

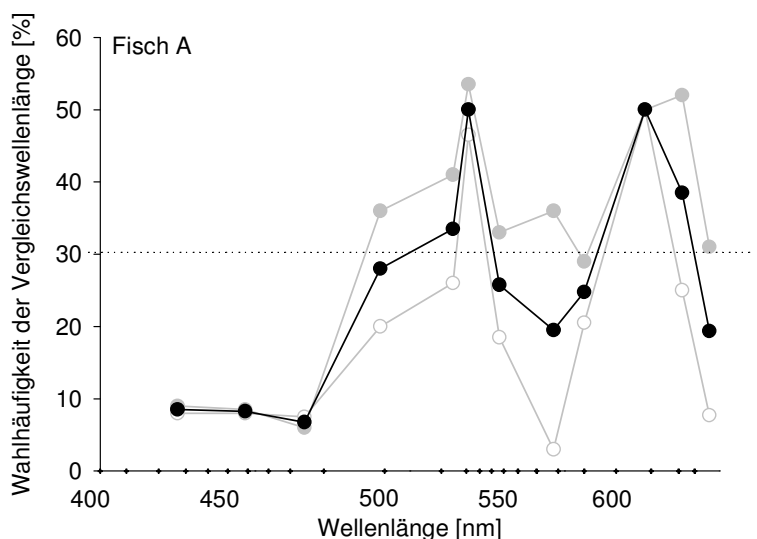
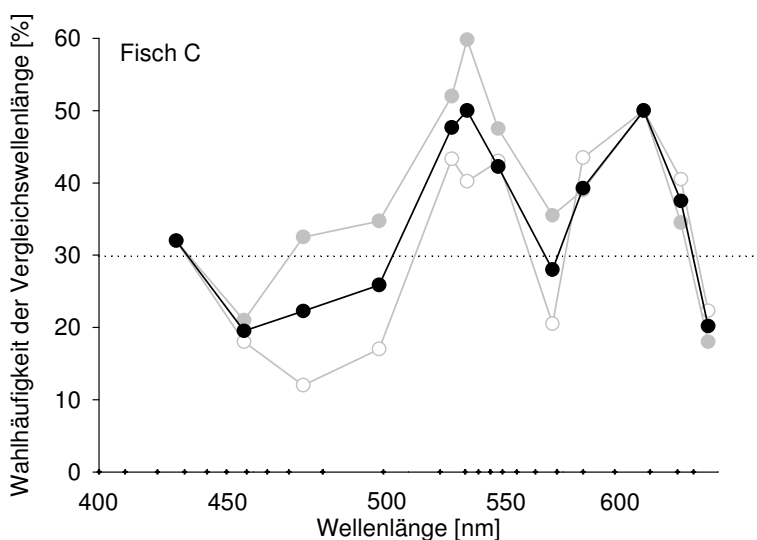
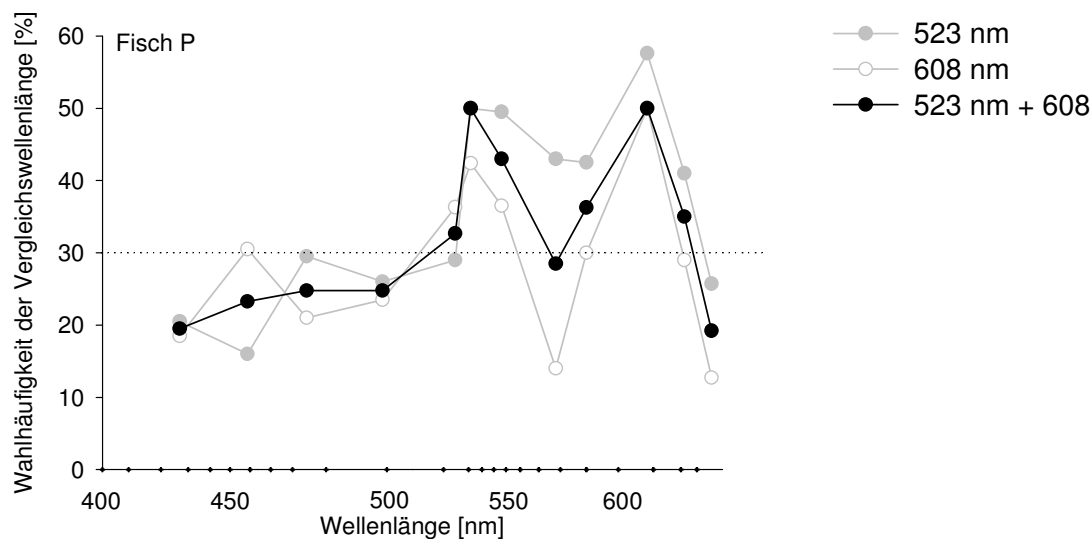


Abbildung 3.19: Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit der Fische P, C und A, welche auf die Wellenlängen 523 nm und 608 nm dressiert wurden. Die grauen Punkte geben die Wahlhäufigkeiten wieder, die auf die Vergleichswellenlängen entfielen, wenn sie mit je einer der beiden Dressurwellenlängen gleichzeitig gezeigt wurden. (Mittelwerte aus $n = 2 - 4$ Einzelversuchen) Die schwarzen Punkte zeigen die Mittelwerte aus den beiden Einzelkurven.

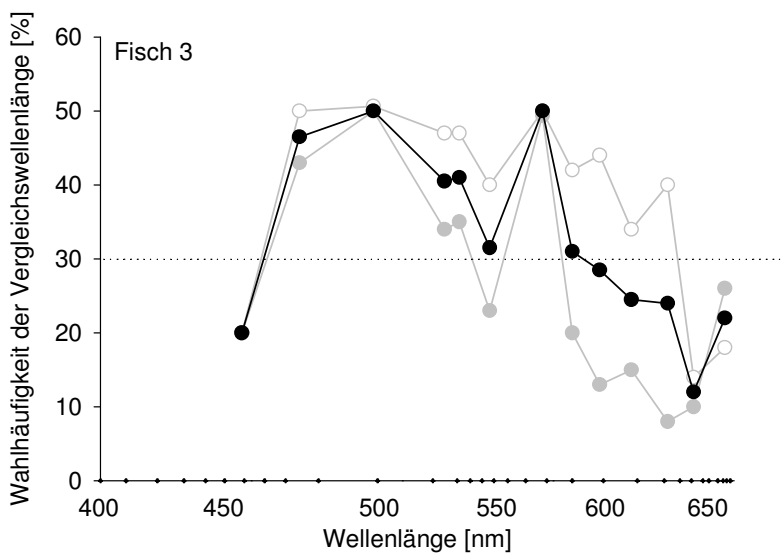
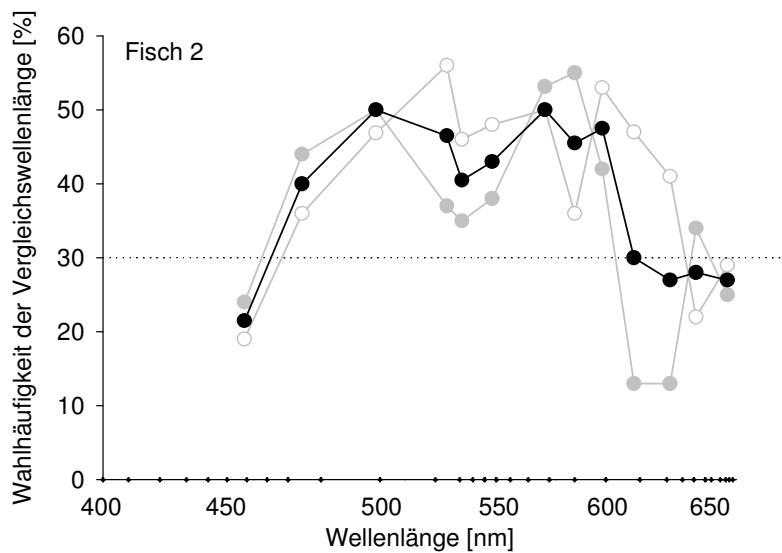
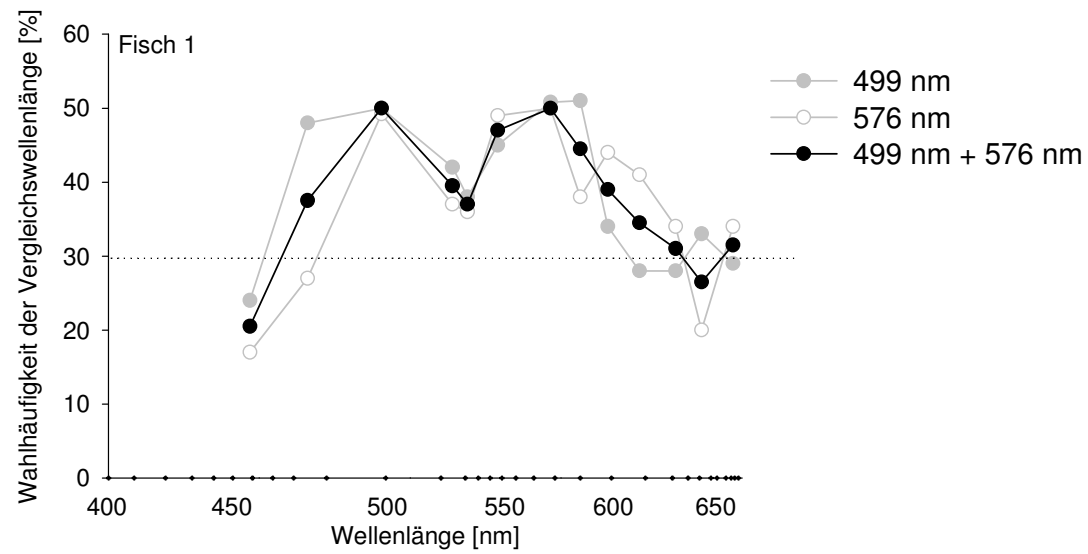


Abbildung 3.20: Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit der Fische 1, 2 und 3, welche auf die Wellenlängen 499 nm und 576 nm dressiert wurden. Die grauen Punkte geben die Wahlhäufigkeiten wieder, die auf die Vergleichswellenlängen entfielen, wenn sie mit je einer der beiden Dressurwellenlängen gleichzeitig gezeigt wurden (Mittelwerte aus n = 2 Einzelversuchen). Die schwarzen Punkte zeigen die Mittelwerte aus den beiden Einzelkurven.

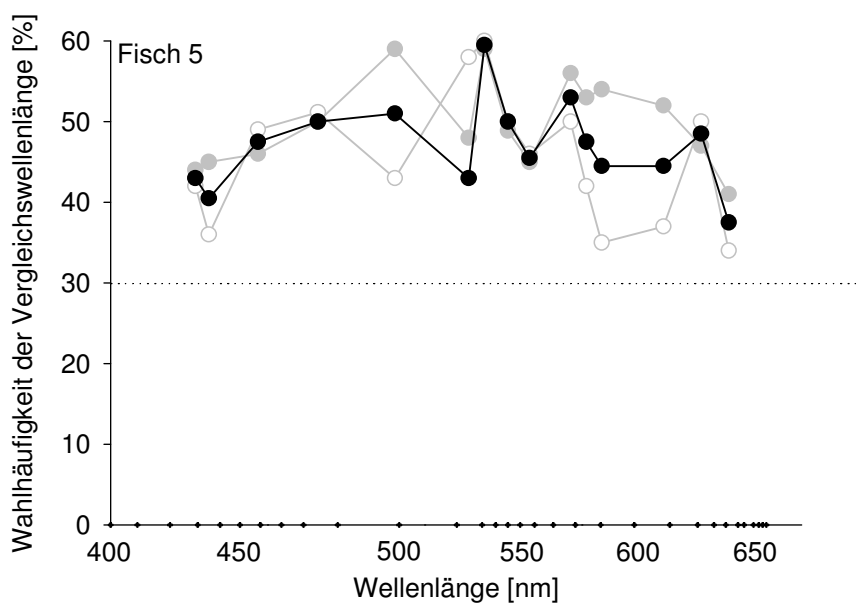
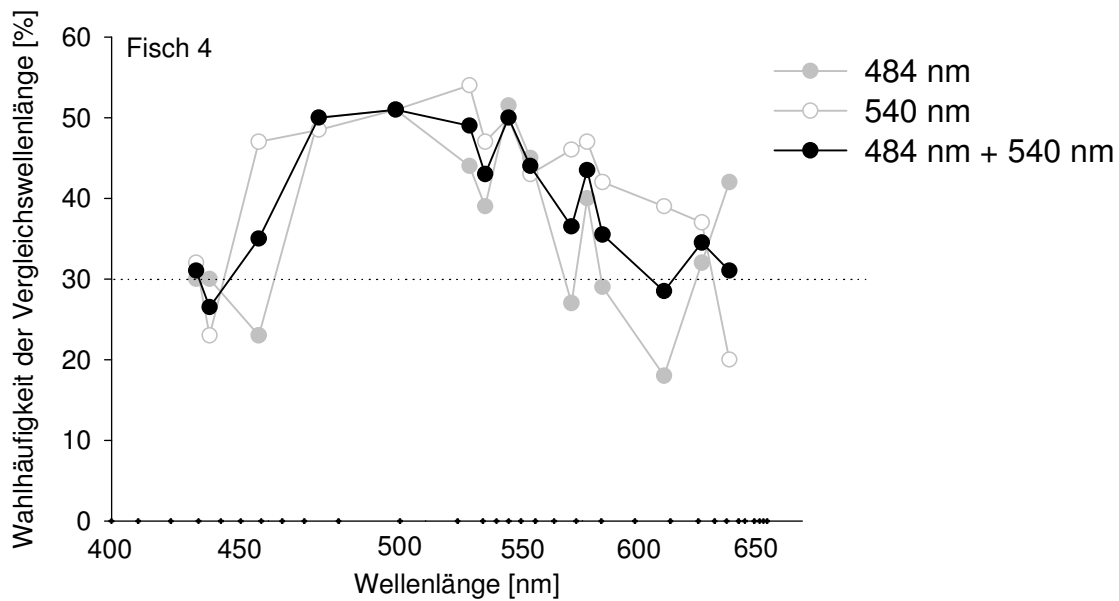


Abbildung 3.21: Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit der Fische 4 und 5, nach Dressur auf die Wellenlängen 484 nm und 540 nm. Gezeigt sind grau die beiden Kurven die sich ergeben, wenn die beiden Dressurwellenlängen gegen jede der Testwellenlängen gezeigt werden. Es handelt sich hierbei um Mittelwerte aus $n = 2$ Einzelmessungen. Schwarz ist die Mittelwertkurve aus beiden Einzelkurven jedes Fisches wiedergegeben.

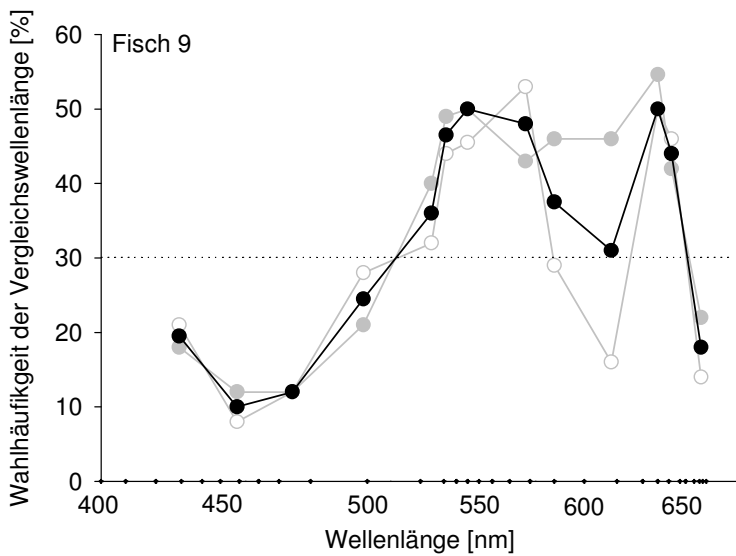
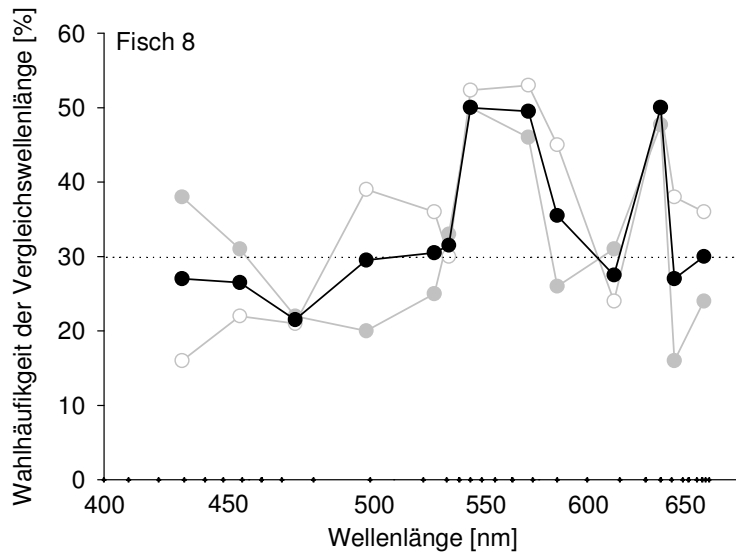
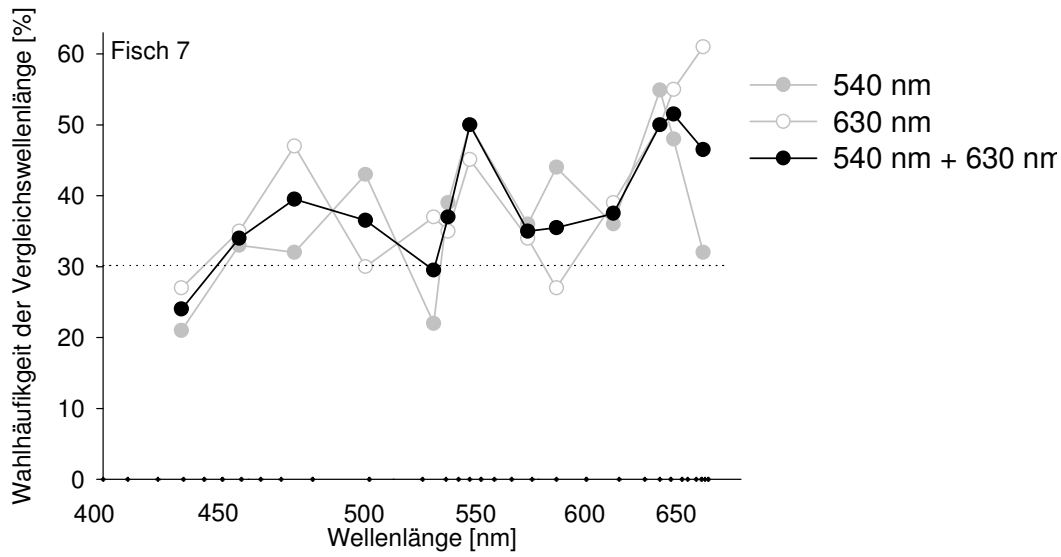


Abbildung 3.22: Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit der Fische 7, 8 und 9, nach Dressur auf die Wellenlängen 540 nm und 630 nm. Die grauen Punkte geben die Wahlhäufigkeiten wieder, die auf die Vergleichswellenlängen entfielen, wenn sie mit je einer der beiden Dressurwellenlängen gleichzeitig gezeigt wurden. Die schwarzen Punkte zeigen die Mittelwerte aus den beiden Einzelkurven.

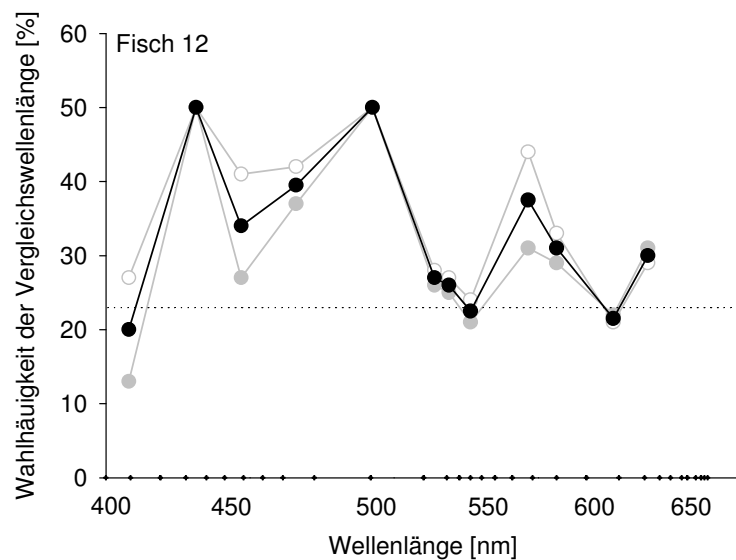
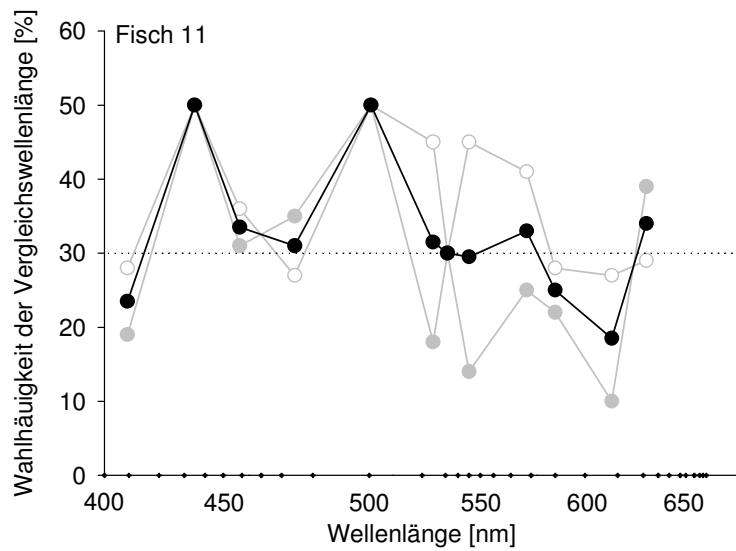
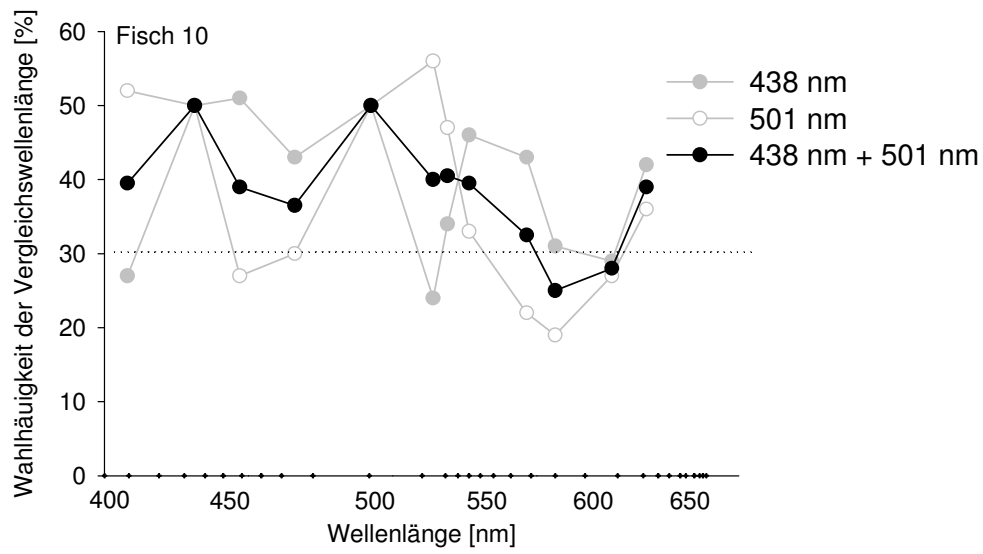


Abbildung 3.23: Wellenlängenunterscheidungs-fähigkeit der Fische 10, 11 und 12 nach Dressur auf die Wellenlängen 438 nm und 501 nm. Die grauen Punkte geben die Wahlhäufigkeiten wieder, die auf die Vergleichswellenlängen entfielen, wenn sie mit je einer der beiden Dressurwellenlängen gleichzeitig gezeigt wurden. Die schwarzen Punkte zeigen die Mittelwerte aus den beiden Einzelkurven.

In der folgenden Tabelle sind für jeden Fisch die Schnittpunkte der Kurven mit der 30 %-Achse angegeben, sowohl für die beiden Kurven von den einzelnen Dressurwellenlängen als auch von der Mittelwertskurve.

Tabelle 3.10: Überblick über die Schnittpunkte der Wellenlängenunterscheidungskurven aller Fische mit der 30 %-Achse. Die Dressurwellenlängen werden hier als λ_1^+ und λ_2^+ bezeichnet.

| Dressurwellenlänge | Fisch | $\lambda < \lambda_1^+$ | $\lambda > \lambda_1^+$ | $\lambda < \lambda_2^+$ | $\lambda > \lambda_2^+$ |
|--------------------|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 523 nm | P | 513 | -- | -- | 638 nm |
| 608 nm | P | 506 nm | 558 nm | 589 nm | 621 nm |
| 523 nm + 608 nm | P | 508 nm | 575 nm | 580 nm | 629 nm |
| 523 nm | C | 480 nm | -- | -- | 628 nm |
| 608 nm | C | 506 nm | 564 nm | 580 nm | 631 nm |
| 523 nm + 608 nm | C | 502 nm | 574 nm | 580 nm | 630 nm |
| 523 nm | A | 496 nm | 589 nm | 591 nm | ~ 642 nm |
| 608 nm | A | 515 nm | 580 nm | 595 nm | 620 nm |
| 523 nm + 608 nm | A | 504 nm | 542 nm | 593 nm | 630 nm |
| 499 nm | 1 | 466 nm | -- | -- | 605 nm |
| 576 nm | 1 | 488 nm | -- | -- | 628 nm |
| 499 nm + 576 nm | 1 | 472 nm | -- | -- | 624 nm |
| 499 nm | 2 | 466 nm | -- | -- | 603 nm |
| 576 nm | 2 | 476 nm | -- | -- | 634 nm |
| 499 nm + 576 nm | 2 | 470 nm | -- | -- | 608 nm |
| 499 nm | 3 | 470 nm | 532 nm | 557 nm | 586 nm |
| 576 nm | 3 | 468 nm | -- | -- | 628 nm |
| 499 nm + 576 nm | 3 | 469 nm | -- | -- | 594 nm |
| 484 nm | 4 | 465 nm | -- | -- | 574 nm |
| 540 nm | 4 | 442 nm | -- | -- | 630 nm |
| 484 nm + 540 nm | 4 | 443 nm | -- | -- | 606 nm |
| 484 nm | 5 | -- | -- | -- | -- |
| 540 nm | 5 | -- | -- | -- | -- |
| 484 nm + 540 nm | 5 | -- | -- | -- | -- |
| 540 nm | 7 | 519 nm | -- | -- | ~ 670 |
| 630 nm | 7 | 501 nm | 584 nm | 569 nm | -- |
| 540 nm + 630 nm | 7 | 514 nm | -- | -- | -- |

| Dressurwellenlänge λ^+ | Fisch | $\lambda < \lambda_1^+$ | $\lambda > \lambda_1^+$ | $\lambda < \lambda_2^+$ | $\lambda > \lambda_2^+$ |
|--------------------------------|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 540 nm | 8 | 519 nm | 589 nm | 602 nm | 638 nm |
| 630 nm | 8 | 521 nm | 602 nm | 611 nm | -- |
| 540 nm + 630 nm | 8 | 504 nm | 602 nm | 610 nm | 640 nm |
| 540 nm | 9 | 505 nm | -- | -- | 665 nm |
| 630 nm | 9 | 505 nm | 589 nm | 615 nm | 665 nm |
| 540 nm + 630 nm | 9 | 505 nm | ~ 608 nm | ~ 608 nm | 665 nm |
| 438 nm | 10 | 412 nm | -- | -- | 509 nm |
| 501 nm | 10 | -- | 456 nm | 483 nm | 568 nm |
| 438 nm + 501 nm | 10 | -- | -- | -- | 583 nm |
| 438 nm | 11 | 148 nm | ~ 459 nm | ~ 459 nm | 508 nm |
| 501 nm | 11 | 411 nm | 478 nm | 488 nm | 523 nm |
| 438 nm + 501 nm | 11 | 414 nm | ~ 484 nm | ~ 484 nm | 523 nm |
| 438 nm | 12 | 419 nm | 458 nm | 469 nm | 511 nm |
| 501 nm | 12 | 411 nm | -- | -- | 511 nm |
| 438 nm + 501 nm | 12 | 417 nm | -- | -- | 511 nm |

3.1.4.1 Gesamtergebnis des Wellenlängenunterscheidungstests

In Abbildung 3.24 sind im Überblick alle Schnittpunkte der Wellenlängenunterscheidungskurven mit der 30 %-Achse und die daraus resultierenden Bereiche mit einer Wahlhäufigkeit von über 30 % eingezeichnet. Die Darstellung ist dieselbe wie in Abbildung 3.11, wo die Schnittpunkte der Generalisierungskurven mit der 50 %-Achse dargestellt sind. Die Wellenlängen, bei denen der Schnittpunkt lag, werden durch einen Endbalken an der Linie angezeigt. Wurde kein Schnittpunkt mit der 30 %-Achse im getesteten Bereich erhalten, so ist dies durch gepunktete Linien mit Pfeilspitzen am Ende des Testbereiches angegeben, die darauf hindeuten sollen, dass der Schnittpunkt vermutlich erst außerhalb des Testbereiches auftauchen würde.

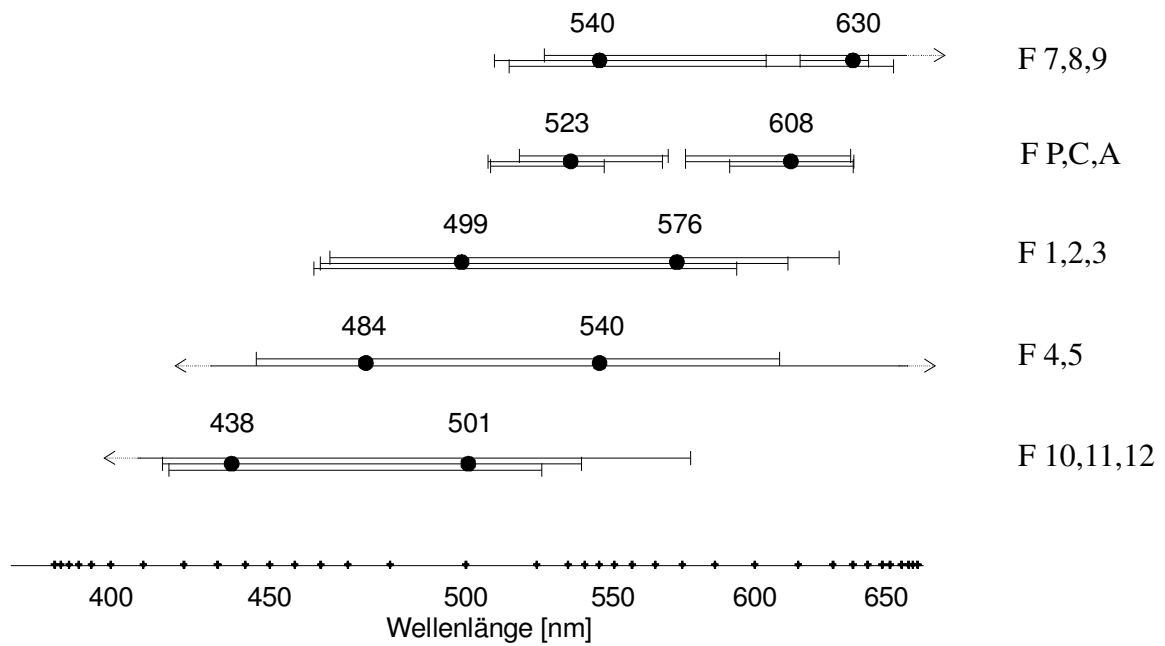


Abbildung 3.24: Zusammenfassende Darstellung des Wellenlängenunterscheidungstests mit den Bereichen, bei denen 30 % oder mehr Wahlhäufigkeit erreicht wurde. Die Linien mit den Endbalken geben dabei die Schnittpunkte mit der 30 % - Achse an. Wurde im getesteten Wellenlängenbereich kein Schnittpunkt erreicht, so wurde die Linie bis zum getesteten Bereich gezogen und eine gestrichelte Linie mit Pfeilspitze gibt an, dass der Schnittpunkt irgendwo außerhalb des getesteten Bereiches liegt.

3.2 Versuche mit sechs Dressurwellenlängen

Im nächsten Versuchsabschnitt wurden sieben Fischgruppen auf jeweils sechs verschiedene Wellenlängen dressiert, die jeweils in einem bestimmten Abschnitt der Wellenlängenskala lagen. Insgesamt deckten die verschiedenen Gruppen das Wellenlängenspektrum von 434 nm – 685 nm ab. Diese Versuchssituation sollte mögliche Unterschiede im Lernerfolg innerhalb der sechs Dressurwellenlängen aufdecken und dadurch ebenfalls Hinweise auf Kategorien und Kategoriegrenzen liefern.

Der hier verwendete Test war der Generalisierungstest, bei dem wieder alle Dressurwellenlängen und eine Reihe von Testwellenlängen für je 2 min gegen ein unbeleuchtetes Feld gezeigt wurden. Die Einzelwerte aus den sechs bis acht Einzelversuchen eines jeden Fisches wurden wieder gemittelt und auf die größte Wahlhäufigkeit, welche 100 % gesetzt wird, bezogen. In den Darstellungen der Ergebnisse werden die Wellenlängen des Dressurbereiches durch zwei senkrechte, gestrichelte Linien von den restlichen Wellenlängen abgegrenzt. Neben den Einzelergebnissen werden im Folgenden die Mittelwerte aus den Generalisierungskurven der einzelnen Fische gezeigt. Da sich die Fische in ihrer Beißhäufigkeit sehr stark unterschieden, konnten dazu nicht einfach die Einzelwerte gemittelt werden. Stattdessen wurden die prozentualen Werte der Fische gemittelt, so dass die individuelle Beißhäufigkeit keine Auswirkungen hat.

Bei der ersten Fischgruppe wurde zusätzlich noch ein Transfertest durchgeführt, welcher nicht wie bei den vorherigen Versuchen (mit zwei Dressurwellenlängen) mit drei ausgewählten Transfertestwellenlängen durchgeführt wurde, sondern es wurden jetzt mehrere Wellenlängen aus dem Bereich „ober-“ und „unterhalb“ der Dressurwellenlängen getestet.

Dressurbereich 569 nm – 608 nm

Bei der ersten auf sechs Wellenlängen dressierten Gruppe von Fischen (Fische 13, 14 und 15) erreichten nur zwei Fische (14 und 15) das für eine erfolgreiche Dressur erforderliche Wahlkriterium von mindestens 70 % und somit gehen in die folgenden Ergebnisse nur diese beiden Fische ein.

Der untersuchte Bereich des Generalisierungstests reichte von 484 nm bis 641 nm, die sechs Dressurwellenlängen waren 569 nm, 576 nm, 584 nm, 590 nm, 599 nm und 608 nm. Wie man in Abbildung 3.25 sehen kann, ist die Häufigkeit, mit der die Dressurwellenlängen gewählt wurden, deutlich größer als bei den benachbarten Testwellenlängen. Dies zeigt, dass die Dressur erfolgreich war und die Fische diese Wellenlängen deutlich von den anderen unterschieden. Wenn man als nächstes nur die Wahlhäufigkeiten innerhalb des Dressurbereiches betrachtet, dann sieht man, dass die Dressurwellenlängen nicht gleich häufig gewählt wurden. Da alle sechs Dressurwellenlängen aber gleich oft und in gleicher Weise während der Dressur belohnt wurden, dürfte man hier von der Vorgehensweise her keine Unterschiede erwarten. Besonders deutliche Unterschiede in der Wahlhäufigkeit sind bei Fisch 14 zu sehen. Dieser wählte die ersten beiden Dressurwellenlängen 569 nm und 576 nm mit 78 % und 62 % deutlich seltener als die folgenden vier Dressurwellenlängen, welche nahezu gleich oft innerhalb der 2-minütigen Testphase gewählt wurden (zw. 96 % und 100 %). Für Fisch 14 verhält es sich ähnlich, auch bei ihm werden die Wellenlängen 569 nm und 576 nm innerhalb des Dressurbereiches am wenigsten häufig gewählt (76 % und 78 %), jedoch schwanken hier die Wahlhäufigkeiten der restlichen vier Dressurwellenlängen etwas stärker (zwischen 87 % und 100 %). Es erfolgte bei dieser Fischgruppe also eine Teilung der sechs Wellenlängen in zwei Gruppen.

In der Abbildung 3.26, in der die Werte der beiden Fische zusammengefasst wurden, kann man diese Aufteilung der sechs Dressurwellenlängen noch deutlicher sehen. Die eine Gruppe wird von den ersten beiden Dressurwellenlängen 569 nm und 576 nm gebildet, die deutlich seltener als die zweite Gruppe mit den vier Dressurwellenlängen 584 nm, 590 nm, 599 nm und 608 nm gewählt wurde.

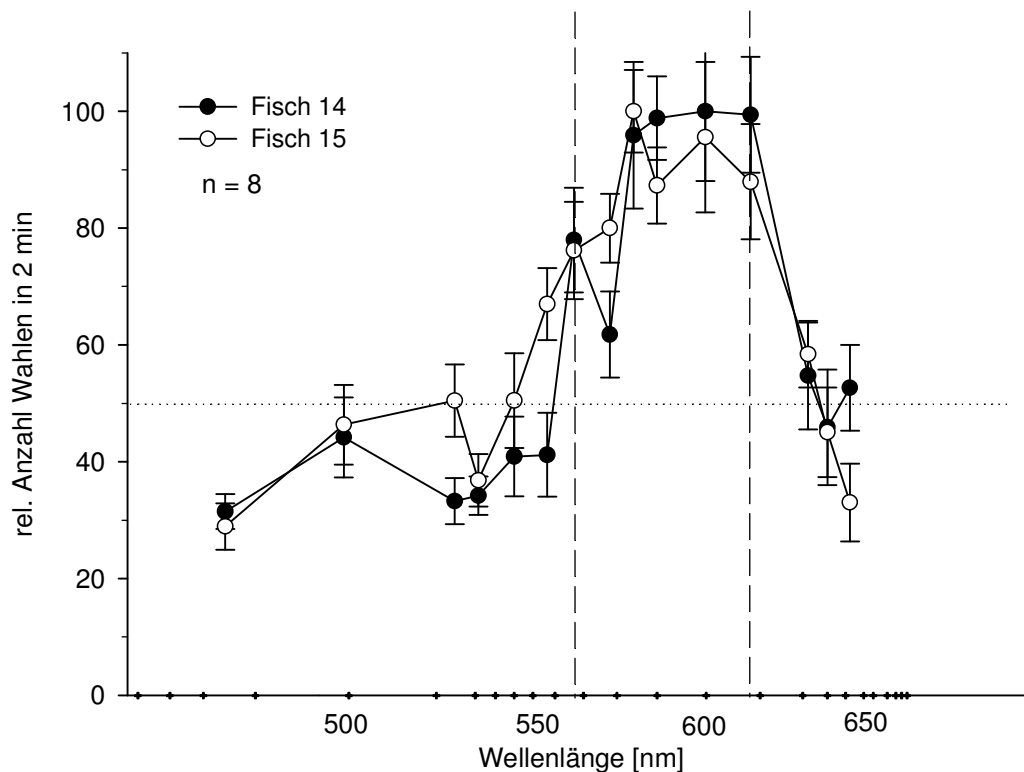


Abbildung 3.25: Generalisierungstest der Fische 14 und 15, welche auf die sechs Wellenlängen 569 nm, 576 nm, 584 nm, 590 nm, 599 nm und 608 nm dressiert wurden. Dieser Bereich ist durch die gestrichelten Linien von den anderen getesteten Wellenlängen abgegrenzt. Die Fehlerbalken geben den jeweiligen Standardfehler wieder.

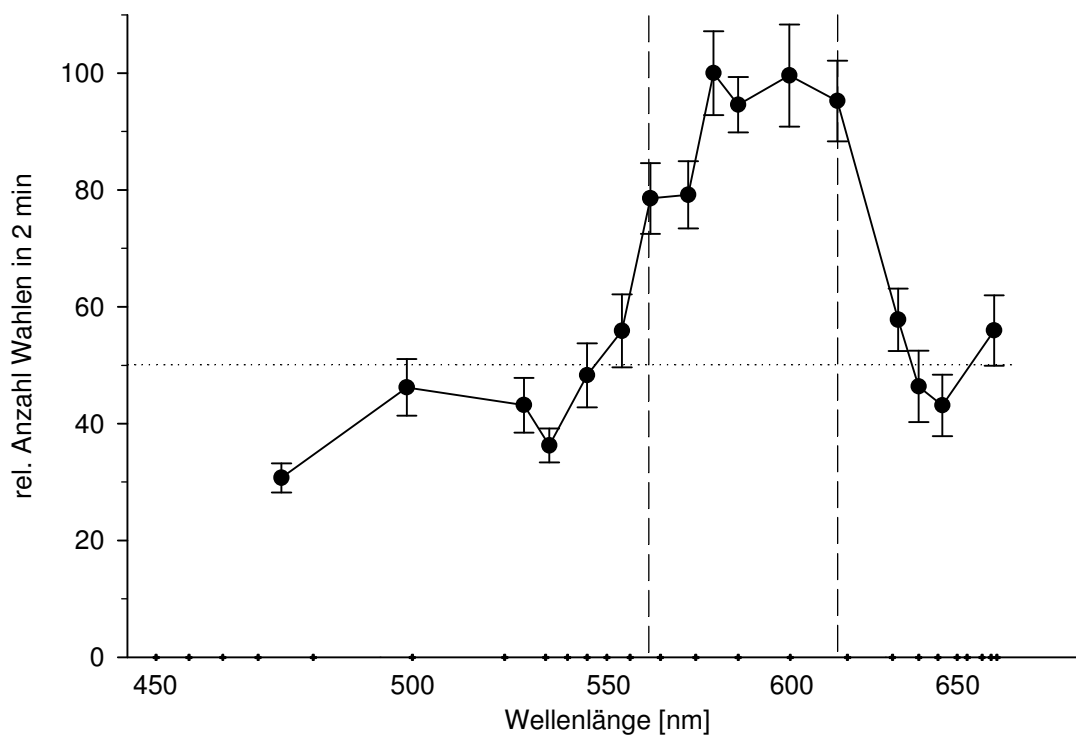


Abbildung 3.26: Zusammengefasste Generalisierungskurve der Fische 14 und 15. Der Dressurbereich ist durch die gestrichelten Linien von den restlichen Wellenlängen abgegrenzt.

Bei dieser ersten Fischgruppe wurde zusätzlich noch ein Transfertest durchgeführt. Dazu wurden sechs Wellenlängen „unterhalb“ des Dressurbereiches und fünf Wellenlängen „oberhalb“ dieses Bereiches ausgewählt. Im einzelnen waren es die Wellenlängen 484 nm, 499 nm, 514 nm, 523 nm, 555 nm „unterhalb“ des Dressurbereiches und die Wellenlängen 622 nm, 630 nm, 641 nm, 661 nm und 685 nm „oberhalb“. Jetzt wurde jede Wellenlänge des unteren Testbereiches gegen jede Wellenlänge des oberen Bereiches gleichzeitig gezeigt. Die Verteilung der Wahlhäufigkeiten wurde dann für jeden Fisch zu einem Liniendiagramm zusammengefügt (Abbildungen 3.27 und 3.28). Aufgetragen wurden dabei die Wahlhäufigkeiten jeder einzelnen Transferwellenlänge, die sich im direkten Vergleich mit den anderen Transferwellenlängen ergaben. Die verschiedenen Wahlhäufigkeiten einer Transferwellenlänge werden dann zu einer Kurve verbunden. Die Wellenlängenskala wurde in diesem Fall linear aufgetragen und der Dressurbereich ausgespart.

Um aus diesen Transfertests die Schnittpunkte mit der 50 % Geraden bestimmen zu können und um ein übersichtlicheres Bild zu erhalten, wurden die Kurven „unterhalb“ und „oberhalb“ des Dressurbereiches zu je einer Kurve für jeden Fisch gemittelt, was möglich war, weil sich der Verlauf der einzelnen Kurven sehr ähnelte (Abbildungen 3.29 und 3.30). Da die zu den Dressurwellenlängen benachbarten Testwellenlängen 555 nm und 622 nm noch hohe Wahlhäufigkeiten zeigen, welche die gesamte Mittelwertskurve beeinflussen, wurde neben der Mittelwertskurve aus allen Ergebnissen (weiße Kreise) jeweils noch eine zweite Kurve ermittelt, bei der die Transferwellenlängenkombinationen mit den Wellenlängen 555 nm und 622 nm nicht berücksichtigt wurde (schwarze Kreise).

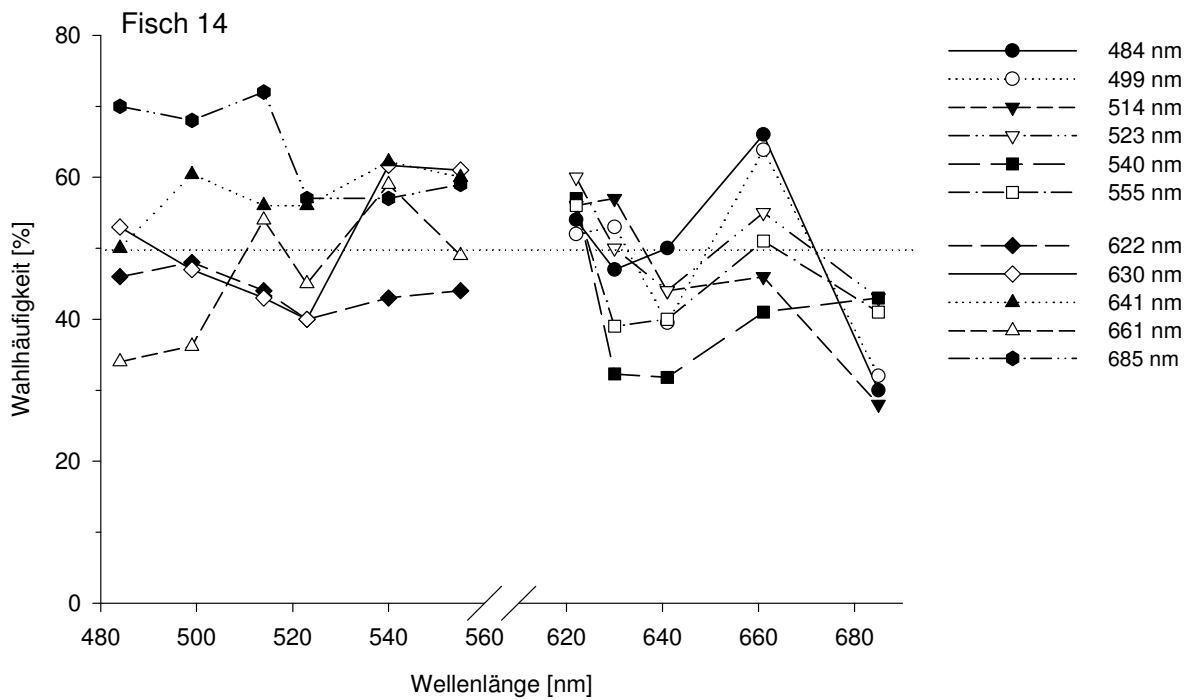


Abbildung 3.27: Transfertest des Fisches 14. Jede Wellenlänge „unterhalb“ des Dressurbereiches wurde gegen jede Wellenlänge „oberhalb“ des Dressurbereiches getestet und die entsprechenden Wahlhäufigkeiten aufgetragen. Der Dressurbereich ist hier aus der Wellenlängenskala ausgeschnitten.

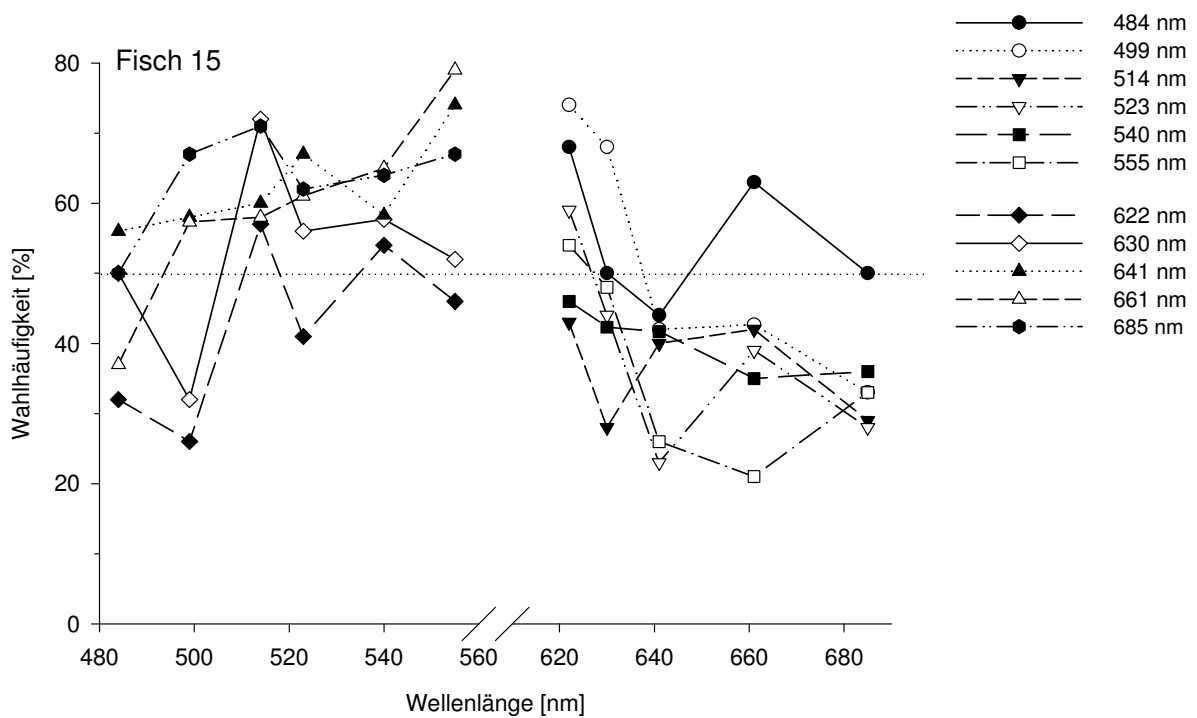


Abbildung 3.28: Transfertest des Fisches 15. Jede Wellenlänge „unterhalb“ des Dressurbereiches wurde gegen jede Wellenlänge „oberhalb“ des Dressurbereiches getestet und die entsprechenden Wahlhäufigkeiten aufgetragen. Der Dressurbereich 569 nm – 608 nm ist aus der Wellenlängenskala ausgeschnitten.

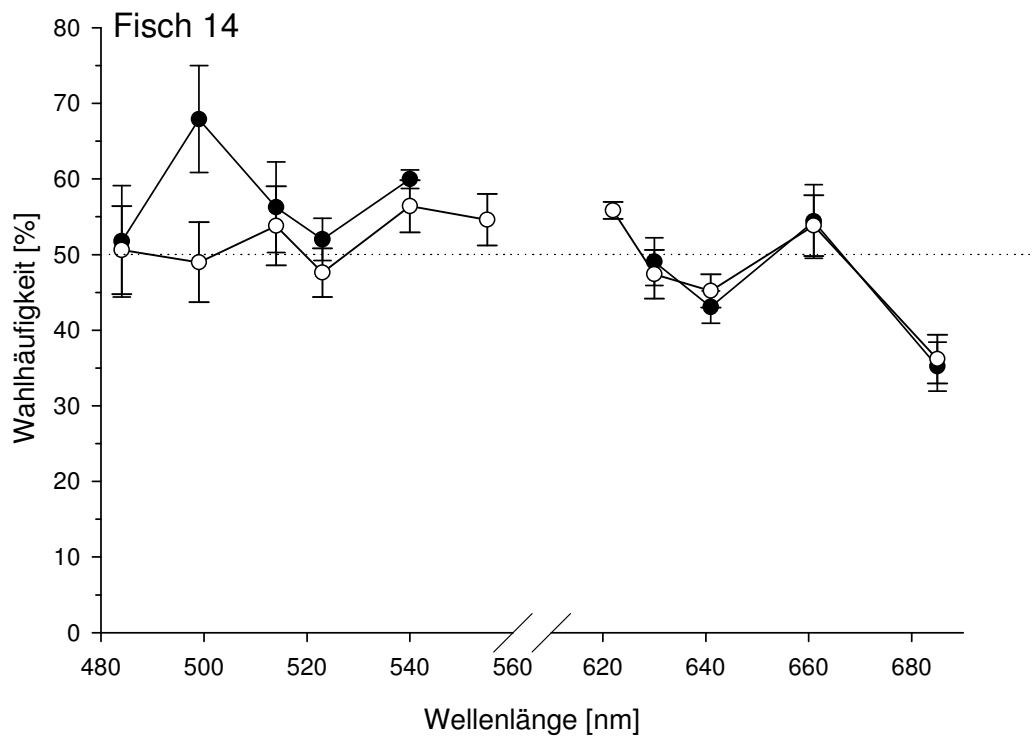


Abbildung 3.29: Mittelwerte der Transferergebnisse der einzelnen Wellenlängen von Fisch 14 und deren Schnittpunkte mit der 50 % Gerade. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder. Die weißen Kreise zeigen den Mittelwert aller Ergebnisse, die schwarzen Kreise die Mittelwerte ohne die Kombinationen bei denen die „Nachbarwellenlängen“ des Dressurbereiches 555 nm und 622 nm beteiligt waren.

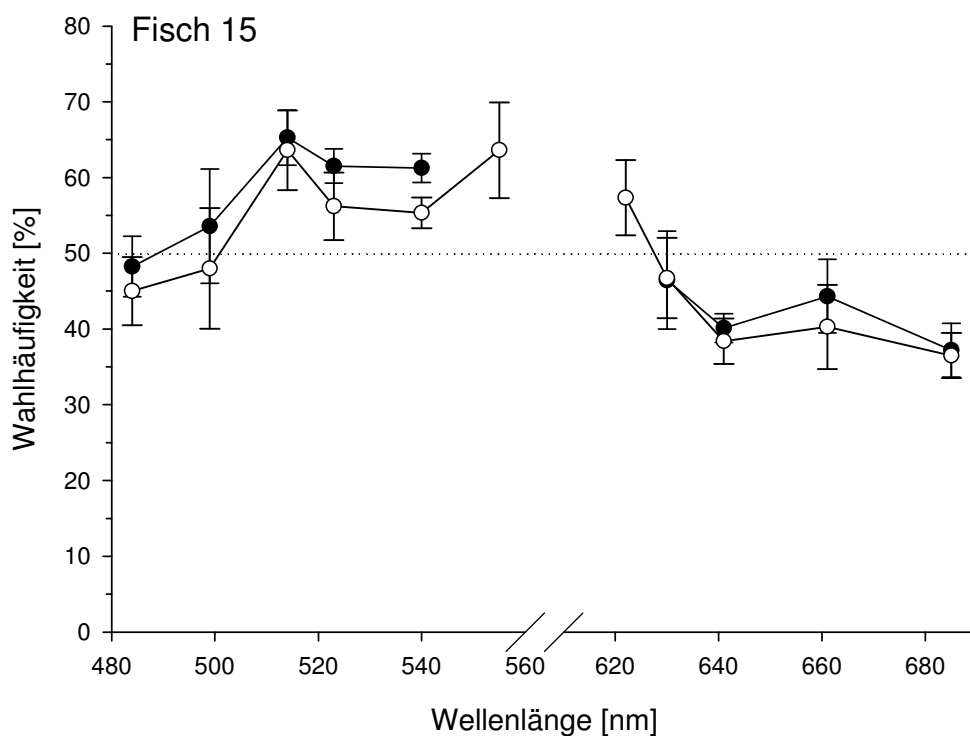


Abbildung 3.30: Mittelwerte der Transferergebnisse der einzelnen Wellenlängen von Fisch 15 und deren Schnittpunkte mit der 50 % Gerade. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder. Die weißen Kreise zeigen den Mittelwert aller Ergebnisse, die schwarzen Kreise die Mittelwerte ohne die Kombinationen bei denen die „Nachbarwellenlängen“ des Dressurbereiches 555 nm und 622 nm beteiligt waren.

Aus den beiden Graphen mit den Mittelwerten der Transfertestergebnisse der einzelnen Wellenlängen lassen sich nun die Bereiche ablesen, in denen der Fisch eine Wahlhäufigkeit von über 50 % zeigte. Bei Fisch 14 ergeben sich aus der gemittelten Transferkurve auf beiden Seiten des Dressurbereiches mehrere Schnittpunkte, von denen der erste, von der Dressurwellenlänge aus gesehen, gewertet wird.

Tabelle 3.11: Schnittpunkte der Transferkurven der Fische 14 und 15 mit der 50 % Gerade (aus Abbildung 3.29 und 3.30).

| | Fisch 14 | Fisch 15 |
|--|----------|----------|
| Unterhalb des Dressurbereiches mit den Wellenlängen 555 nm und 622 nm | 528 nm | 500 nm |
| Oberhalb des Dressurbereiches mit den Wellenlängen 555 nm und 622 nm | 628 nm | 628 nm |
| Unterhalb des Dressurbereiches ohne den Wellenlängen 555 nm und 622 nm | -- | 488 nm |
| Oberhalb des Dressurbereiches ohne den Wellenlängen 555 nm und 622 nm | 633 nm | -- |

Dieser Transfertest zeigt deutlich, dass die Fische die kürzeren Wellenlängen gegenüber den längeren bevorzugen, obwohl innerhalb der sechs Dressurwellenlängen die vier Längerwelligen bevorzugt wurden (Generalisierungstest Abbildung 3.26).

Dressurbereich 590 nm – 685 nm

Bei dieser und allen folgenden Gruppen wurde nur noch der Generalisierungstest angewandt. Der getestete Wellenlängenbereich der Fische 16, 17 und 18 ging von 334 nm bis 699 nm. In Abbildung 3.31 soll wieder besonders auf die Ergebnisse im Dressurbereich geachtet werden. Der Dressurbereich grenzt sich, wie im vorherigen Beispiel, wieder deutlich von den anderen Testwellenlängen ab, die Fische unterschieden folglich sehr gut zwischen Dressur- und Testwellenlängen. Was die Ergeb-

nisse innerhalb des Dressurbereiches angeht, so kann man bei diesen drei Fischen keine so deutliche Aussage treffen, wie im vorherigen Fall der Fische 14 und 15. Bei Fisch 16 scheint es so zu sein, dass die drei ersten Dressurwellenlängen 590 nm, 608 nm und 622 nm deutlich seltener gewählt werden als die übrigen drei, 641 nm, 661 nm und 685 nm. Im Vergleich dazu weisen die Fische 17 und 18 bei der zweiten Dressurwellenlänge ihr Maximum auf und Fisch 17 hat die niedrigste Wahlhäufigkeit bei den letzten beiden Dressurwellenlängen, Fisch 18 bei der letzten Dressurwellenlänge.

Betrachtet man als nächstes das über alle drei Fische gemittelte Ergebnis (Abbildung 3.32), so zeigt dies noch einmal deutlich die Schwankungen innerhalb des Dressurbereiches. Die geringsten Wahlhäufigkeiten liegen bei den äußeren Dressurwellenlängen 590 nm und 685 nm, sowie bei der in der Mitte liegenden Dressurwellenlänge 622 nm.

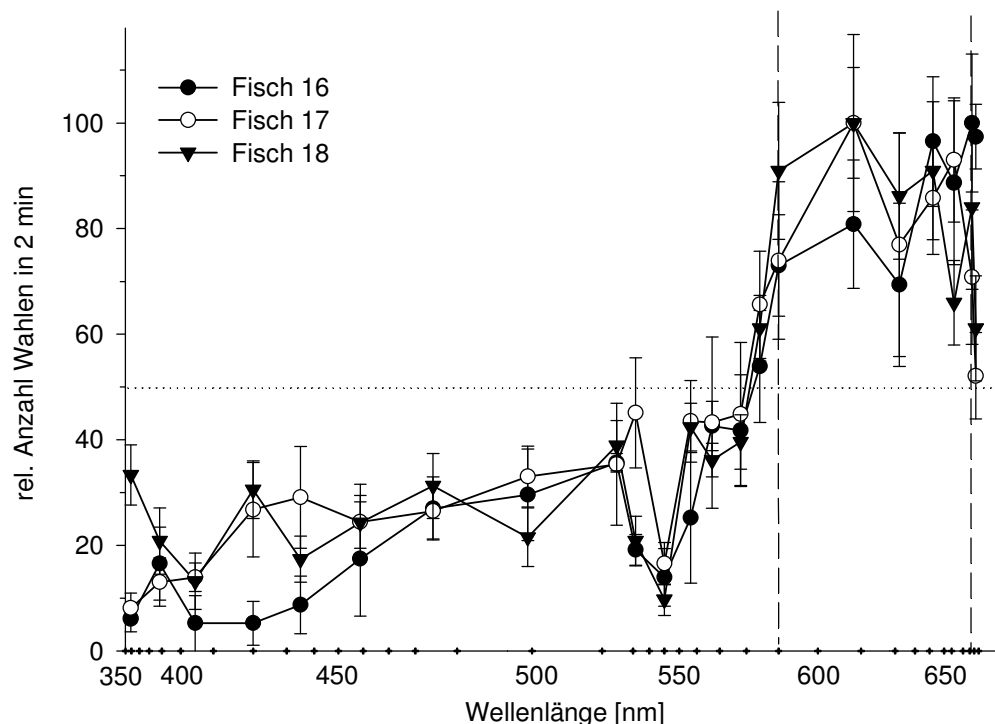


Abbildung 3.31: Generalisierungskurven der Fische 16, 17 und 18, mit dem Dressurbereich von 590 nm bis 685 nm. Der Dressurbereich ist von den übrigen Wellenlängen durch die gestrichelten Linien abgegrenzt. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder.

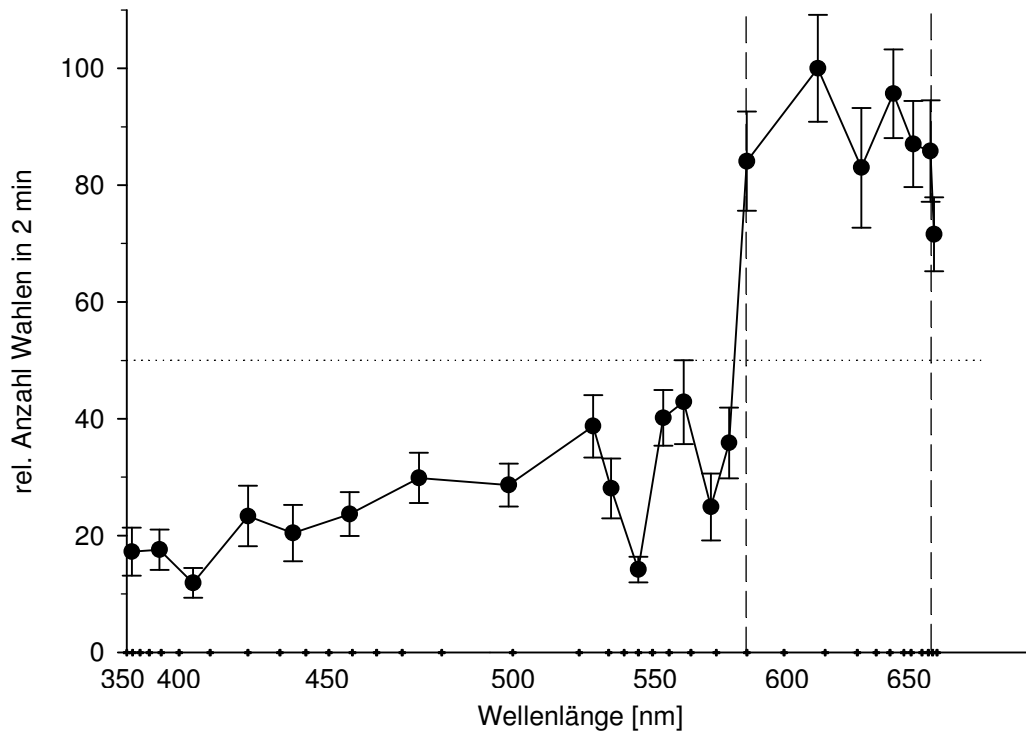


Abbildung 3.32: Gesamtergebnis des Generalisierungstests der Fische 16, 17 und 18. Der Dressurbereich ist von den übrigen Wellenlängen durch die gestrichelten Linien abgegrenzt. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder.

Dressurbereich 540 nm - 590 nm

Der untersuchte Spektralbereich für die Fische 19, 20 und 21 ging von 334 nm bis 685 nm (Abbildung 3.33). Die sechs Dressurwellenlängen 540 nm, 555 nm, 569 nm, 576 nm, 584 nm und 590 nm wiesen die größten Wahlhäufigkeiten innerhalb der Generalisierungskurven auf und grenzen sich dadurch wieder von den restlichen Testwellenlängen ab. Die Wahlen innerhalb des Dressurbereiches sind auch hier nicht einheitlich und unterscheiden sich bei den verschiedenen Fischen. Fisch 19 zeigt die häufigsten Wahlen bei den Dressurwellenlängen 576 nm und 590 nm, also von der Tendenz eher im zweiten Abschnitt des Dressurbereiches. Diese Bevorzugung der letzten drei Wellenlängen ist bei Fisch 20 deutlich zu sehen, die Wahlhäufigkeiten der ersten drei Dressurwellenlängen liegen zwischen 76 % und 80 %, die der anderen drei zwischen 92 % und 100 %. Beim dritten Fisch, F 21, schwanken die Werte stärker, die 100 % Wahlhäufigkeit liegt aber bei Wellenlänge 584 nm, also auch im Bereich der letzten drei Dressurwellenlängen.

In Abbildung 3.34 kann man in der über alle Fische gemittelten Kurve eine Zweiteilung der Dressurwellenlängen erkennen. Die ersten drei Wellenlängen 540 nm, 555 nm und 569 nm werden mit Wahlhäufigkeiten zwischen 74 % und 89 % seltener gewählt als die Wellenlängen 576 nm, 584 nm und 590 nm, welche Wahlhäufigkeiten von 93 % bis 100 % erzielten.

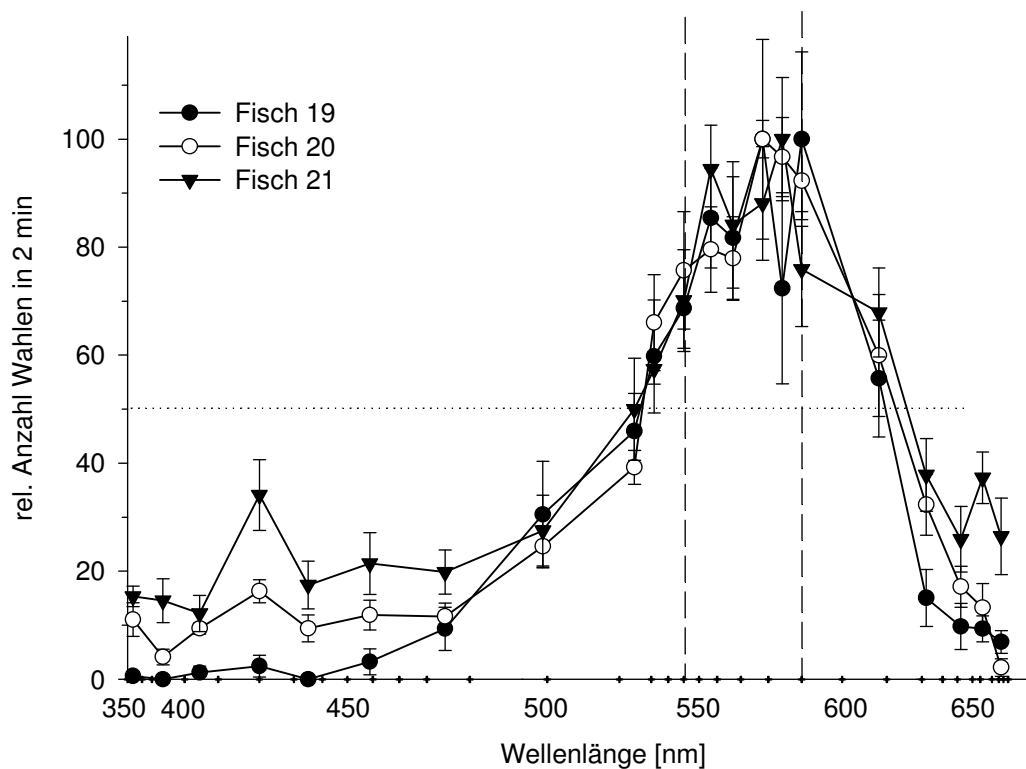


Abbildung 3.33: Generalisierungskurven der Fische 19, 20 und 21. Die Dressurwellenlängen waren 540 nm, 555 nm, 569 nm, 576 nm, 584 nm, und 590 nm, dieser Bereich wird von den beiden gestrichelten Linien eingefasst. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler des Mittelwertes aus den je sechs Einzelwerten an.

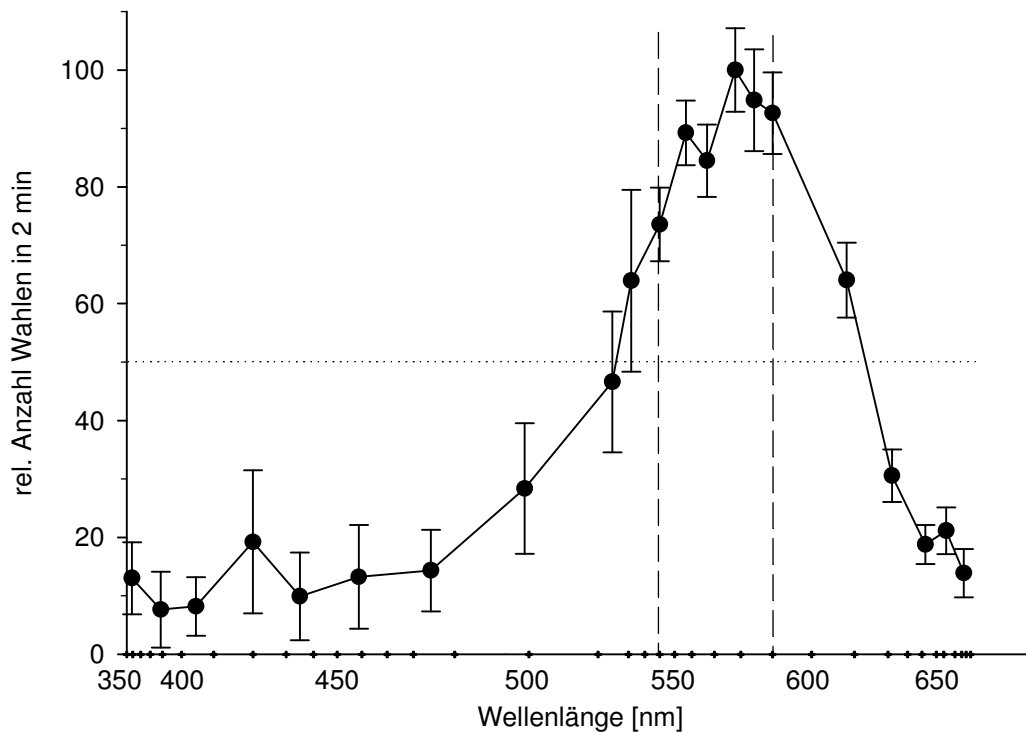


Abbildung 3.34: Gesamtergebnis des Generalisierungstests der Fische 19, 20 und 21. Die größte Wahlhäufigkeit wurde auf 100 % gesetzt und die übrigen Werte darauf bezogen. Der Dressurbereich ist durch die gestrichelten Linien angegeben. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler an.

Dressurbereich 499 nm – 555 nm

Die Fische 22, 23 und 24 waren auf die Dressurwellenlängen 499 nm, 514 nm, 523 nm, 540 nm, 548 nm, und 555 nm dressiert und der getestete Spektralbereich umfasste den Wellenlängenabschnitt von 334 nm bis 685 nm (Abbildung 3.35). Bis auf den langwelligen Bereich bei Fisch 23 kann man bereits an den Wahlhäufigkeiten sehr gut den Dressurbereich erkennen. Fisch 22 wählt am häufigsten die beiden ersten Dressurwellenlängen 499 nm und 514 nm, danach nimmt die Wahlhäufigkeit immer mehr ab, sie ist bei der letzten Dressurwellenlänge 555 nm mit 70 % am niedrigsten. Fisch 23 wählt die Wellenlänge 514 nm am häufigsten, mit der geringsten Wahlhäufigkeit von 80 % wird dagegen die benachbarte Wellenlänge 523 nm gewählt. Fisch 24 zeigt über die ersten fünf Dressurwellenlängen fast ein einheitliches Wahlverhalten mit einem kleinen Anstieg bei 523 nm, die Wellenlänge 555 nm wird dagegen mit nur 73 % deutlich seltener gewählt.

Bei der über alle Fische gemittelten Kurve (Abbildung 3.36) werden die ersten beiden Wellenlängen 499 nm und 514 nm am häufigsten gewählt (mit 96 % und 100 %), danach nimmt die Wahlhäufigkeit immer weiter ab und erreicht bei der Dressurwellenlänge 555 nm ihr Minimum mit 79 %.

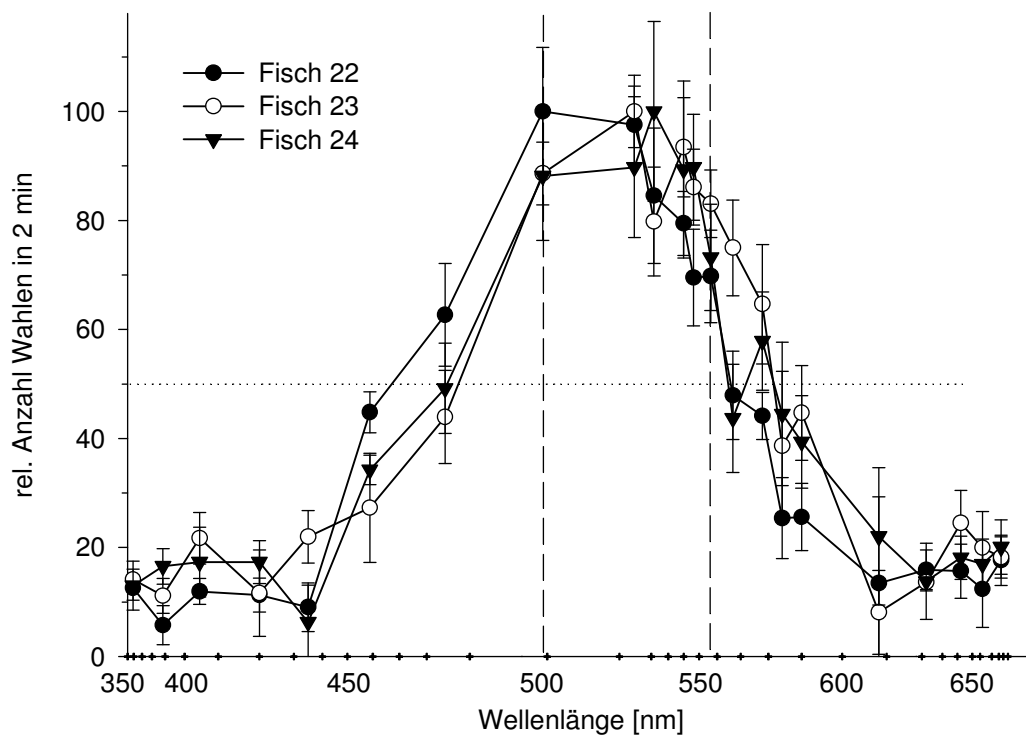


Abbildung 3.35: Generalisierungskurven der Fische 22, 23 und 24. Zwischen den beiden gestrichelten Linien liegen die sechs Dressurwellenlängen 499 nm, 514 nm, 523 nm, 540 nm, 548 nm und 555 nm. Jeder Punkt ist der Mittelwert aus sechs Versuchsdurchgängen und der Fehlerbalken zeigt den Standardfehler des Mittelwertes.

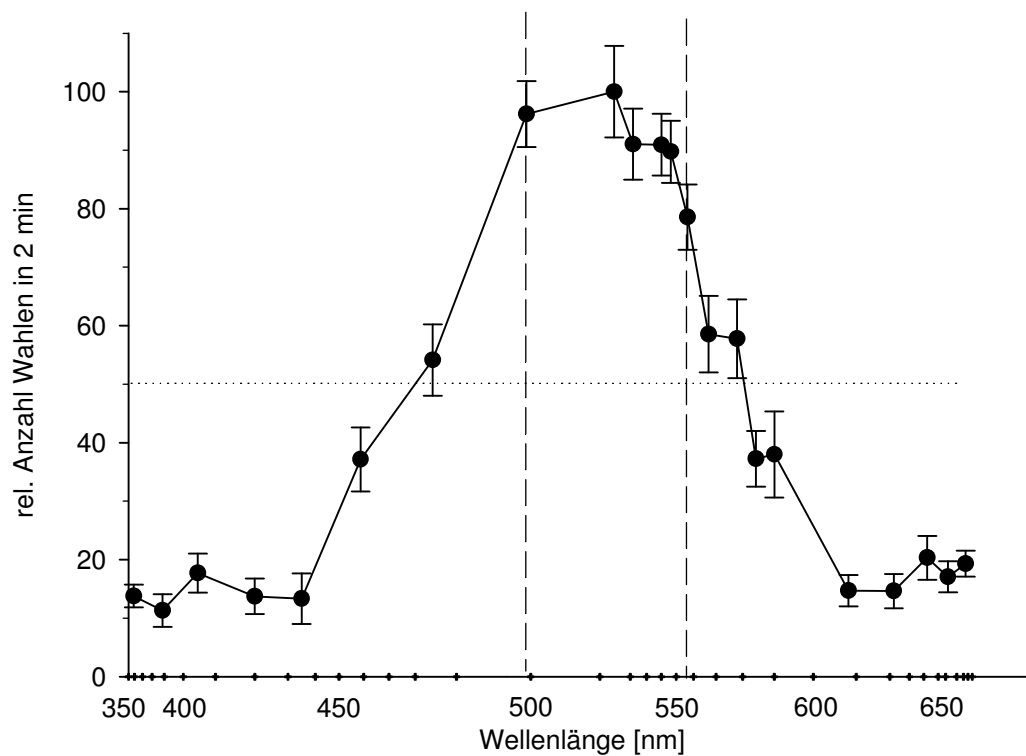


Abbildung 3.36: Generalisierungskurve aus den Mittelwerten der drei Fische 22, 23 und 24. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder.

Dressurbereich 484 nm – 514 nm

Der Generalisierungstest der Fische 25, 26 und 27, welche auf die Wellenlängen 484 nm, 490 nm, 495 nm, 499 nm, 509 nm und 514 nm dressiert waren, umfasste den Wellenlängenbereich von 420 nm bis 555 nm (Abbildung 3.37). Alle drei Fische zeigen einheitlich die geringste Wahlhäufigkeit innerhalb des Dressurbereiches bei der Wellenlänge 514 nm (zwischen 67 % und 74 %). Die benachbarte Wellenlänge 509 nm dagegen wurde, auch bei allen drei Fischen, deutlich häufiger gewählt (zwischen 92 % und 100 %). Die Maxima der Wahlhäufigkeiten liegen bei Fisch 25 und 26 beide bei 499 nm, wobei Fisch 26 die gleiche Anzahl an Wahlen auch bei der Wellenlänge 484 nm zeigt. Fisch 27 bevorzugt innerhalb des Dressurbereiches die Wellenlänge 509 nm.

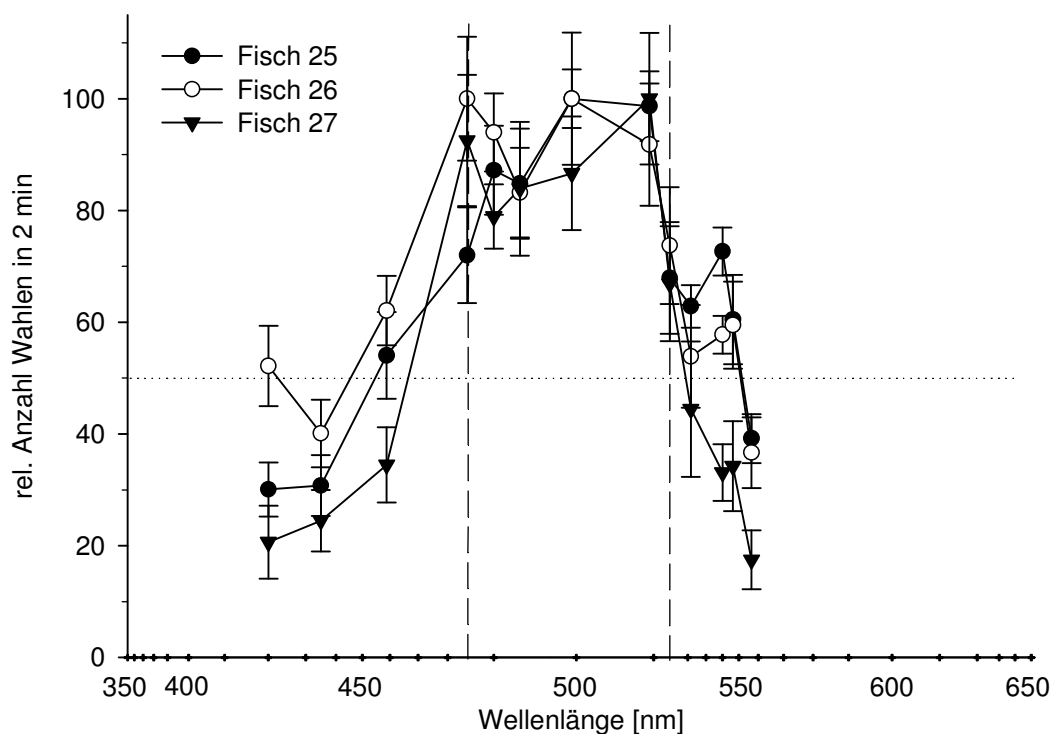


Abbildung 3.37: Generalisierungskurven der Fische 25, 26 und 27, mit dem Dressurbereich von 484 nm bis 514 nm. Der Dressurbereich ist von den übrigen Wellenlängen durch die gestrichelten Linien abgegrenzt. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder.

Bei der Generalisierungskurve, die über alle drei Fische gemittelt wurde (Abbildung 3.38), werden die beiden Wellenlängen 499 nm und 509 nm, wie auch schon bei den Einzelkurven ersichtlich, bevorzugt (mit 99 % und 100 %). Dann folgen mit einer Abstufung die drei Wellenlängen 484 nm, 490 nm und 495 nm (87 % bis 92 %). Die geringste Wahlhäufigkeit fiel auf die Wellenlänge 514 nm, die sich mit nur 72 % deutlich von den anderen abgrenzt.

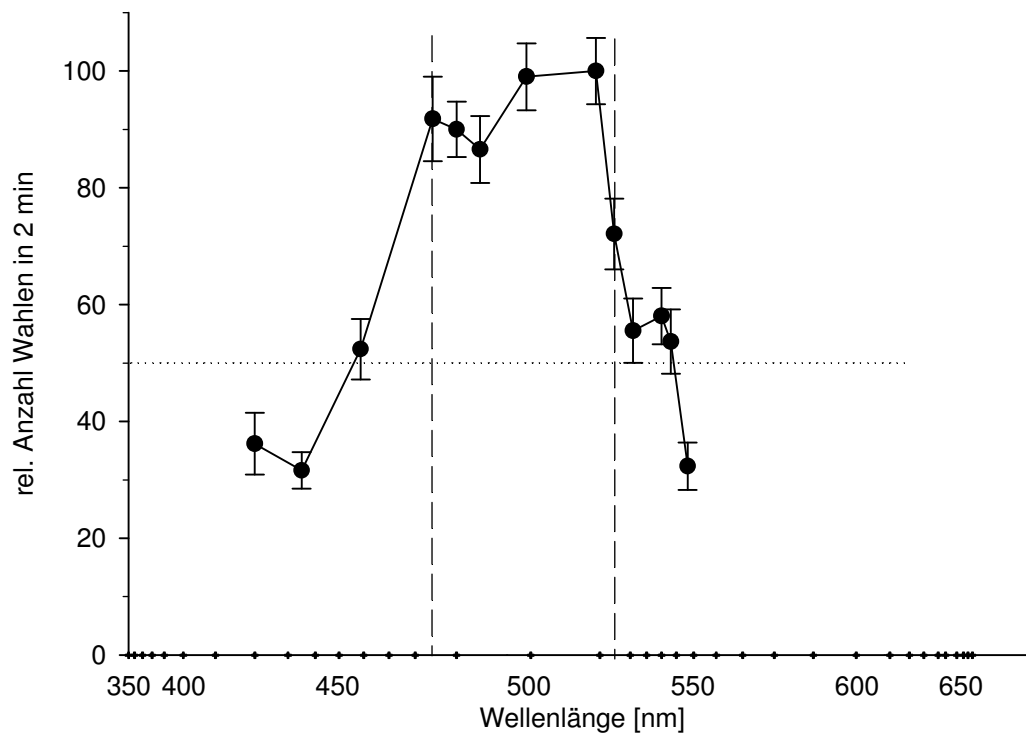


Abbildung 3.38: Gesamtergebnis des Generalisierungstests der Fische 25, 26 und 27. Der Dressurbereich ist von den übrigen Wellenlängen durch die gestrichelten Linien abgegrenzt. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder.

Dressurbereich 388 nm – 443 nm

Der untersuchte Spektralbereich der Fische 28, 29 und 30 reichte von 334 nm bis 499 nm (Abbildung 3.39). Die dressierten Wellenlängen waren 388 nm, 404 nm, 416 nm, 425 nm, 434 nm und 443 nm. Alle drei Fische zeigten hier Unterschiede in der Wahlhäufigkeit der Dressurwellenlängen. Fisch 28 bevorzugt die Wellenlängen am Rand, 388 nm, 434 nm und 443 nm und hatte seine geringsten Wahlhäufigkeiten bei den Wellenlängen 404 nm, 416 nm und 425 nm. Bei Fisch 29 verhält es sich genau anders herum, hier werden die drei mittleren Wellenlängen am häufigsten und die äußeren Wellenlängen des Dressurbereiches weniger oft gewählt. Bei Fisch 30 sind die Wellenlängen, die in den 2-minütigen Testphasen am häufigsten angeschwommen wurden, 388 nm und 404 nm.

In der gemittelten Generalisierungskurve (Abbildung 3.40) werden die ersten beiden Dressurwellenlängen 388 nm und 434 nm etwas häufiger gewählt. Die Wahlhäufig-

keiten liegen dabei bei 95 % und 100 % gegenüber den anderen vier Dressurwellenlängen, bei denen die Wahlhäufigkeiten zwischen 82 % und 91 % liegen.

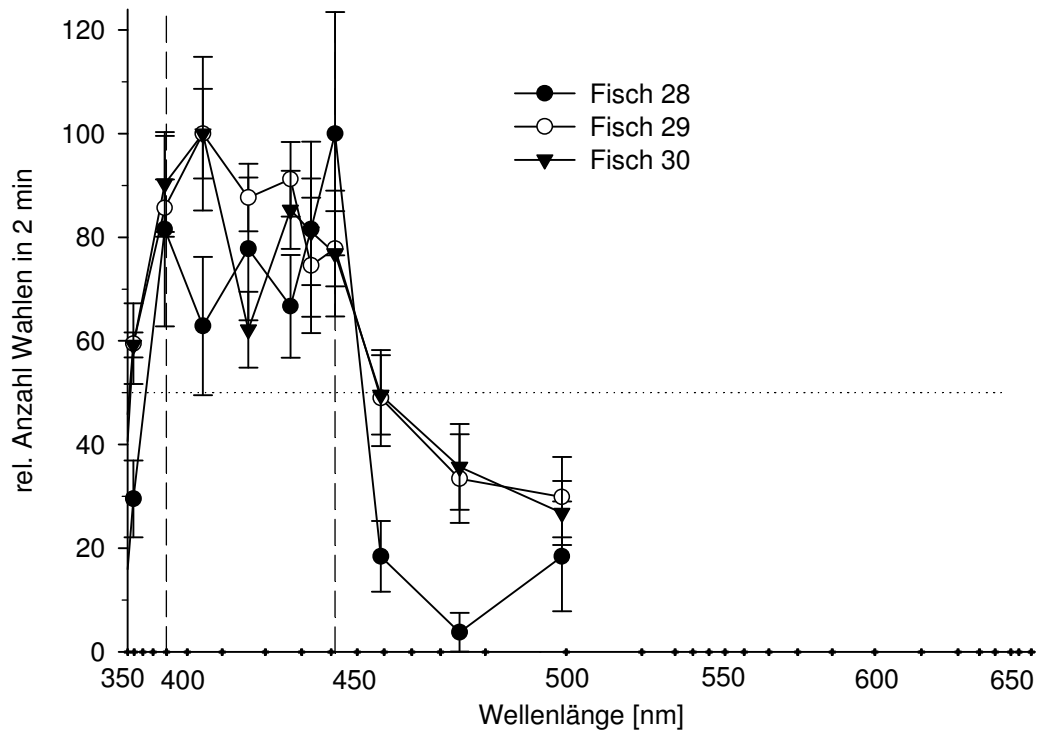


Abbildung 3.39: Generalisierungskurven der auf die Wellenlängen 388 nm, 404 nm, 416 nm, 425 nm, 434 nm und 443 nm dressierten Fische 28, 29 und 30. Der Dressurbereich ist durch die gestrichelten Linien gekennzeichnet. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler des Mittelwertes aus sechs Einzelversuchen an.

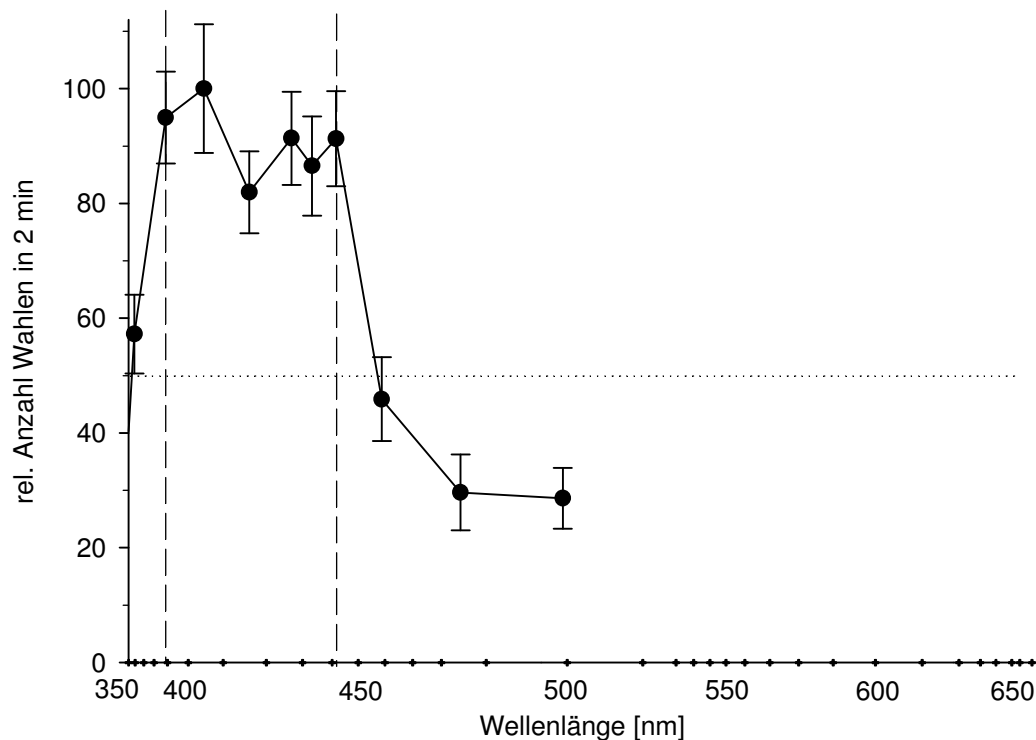


Abbildung 3.40: Generalisierungskurve aus den Mittelwerten der drei Fische 28, 29 und 30. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder.

Dressurbereich 434 nm – 490 nm

Die Fische 31, 32 und 33 wurden auf die Wellenlängen 434 nm, 451 nm, 462 nm, 472 nm, 484 nm und 490 nm dressiert. Der getestete Spektralbereich reichte von 388 nm bis 523 nm (Abbildung 3.41). Bei Fisch 31 wurden die ersten vier Wellenlängen stärker bevorzugt als die letzten beiden. Fisch 32 zeigte die niedrigste Wahlhäufigkeit bei der ersten Dressurwellenlänge 434 nm und wählt bis auf ein weiteres kleines Minimum bei 472 nm die restlichen Wellenlängen in etwa gleich oft. Auch Fisch 33 hat bei 472 nm zusammen mit der Wellenlänge 490 nm seine geringste Wahlhäufigkeit, die restlichen dazwischen liegenden Wellenlängen werden deutlich häufiger gewählt.

In Abbildung 3.42 mit der gemittelten Generalisierungskurve liegen die geringsten Wahlhäufigkeiten bei den Wellenlängen, die den Rand des Dressurbereiches bilden, 434 nm und 490 nm. Die Wahlhäufigkeiten liegen bei beiden bei etwa 85 %. Die rest-

lichen vier Wellenlängen unterschieden sich weniger in ihrer Wahlhäufigkeit (zwischen 94 % und 100 %).

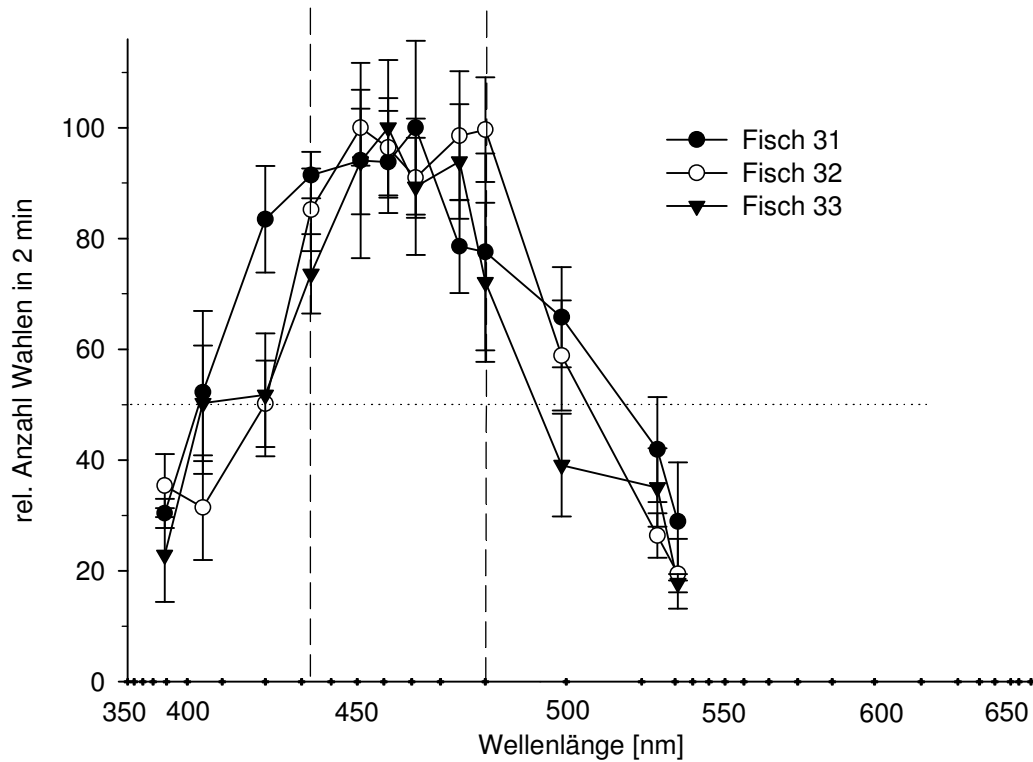


Abbildung 3.41: Generalisierungskurven der Fische 31, 32 und 33, die auf den Wellenlängenbereich 434 nm bis 490 nm dressiert waren. Die Punkte geben jeweils den Mittelwert aus sechs Einzelmessungen jedes Fisches wieder. Die zugehörigen Standardfehler werden durch die Fehlerbalken angegeben.

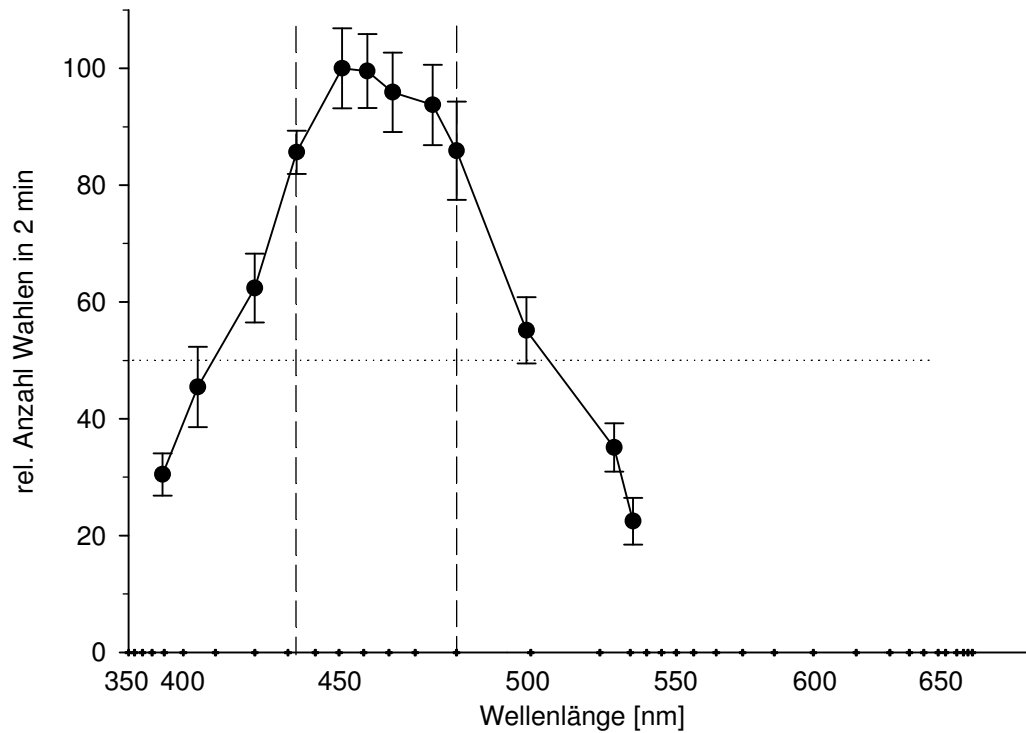


Abbildung 3.42: Gesamtergebnis der Generalisierungskurven der Fische 31, 32 und 33. Die größte Wahlhäufigkeit wurde auf 100 % gesetzt und die übrigen Werte darauf bezogen. Der Dressurbereich ist durch die gestrichelten Linien angegeben. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler an.

Aus den Generalisierungskurven lassen sich auch für die Versuche mit sechs Dressurwellenlängen wieder die Bereiche ablesen, in denen die Wahlhäufigkeit bei 50 % und mehr liegt. Die Schnittpunkte mit der 50 %-Achse sind in der folgenden Tabelle 3.12 sowohl für alle Fische einzeln, als auch für die über eine Fischgruppe gemittelten Kurven wieder gegeben:

Tabelle 3.12: Schnittpunkte aller Fische mit der 50 %- Linie.

| Dressurbereich | Fisch | Schnittpunkt „unterhalb“ des Dressurbereiches | Schnittpunkt „oberhalb“ des Dressurbereiches | Größe des Bereiches mit $\geq 50\%$ |
|-----------------|--------------|---|--|-------------------------------------|
| 569 nm – 608 nm | 14 | 565 nm | 619 nm | 54 nm |
| 569 nm – 608 nm | 15 | 560 nm | 617 nm | 57 nm |
| 569 nm – 608 nm | 14 + 15 | 545 nm (24 nm) | 626 nm (18 nm) | 81 nm |
| 590 nm – 608 nm | 16 | 582 nm | -- | -- |
| 590 nm – 608 nm | 17 | 579 nm | ~ 699 nm | ~ 120 nm |
| 590 nm – 608 nm | 18 | 580 nm | -- | -- |
| 590 nm – 608 nm | 16 + 17 + 18 | 586 nm (4 nm) | -- | -- |
| 540 nm – 590 nm | 19 | 516 nm | 611 nm | 95 nm |
| 540 nm – 590 nm | 20 | 518 nm | 615 nm | 97 nm |
| 540 nm – 590 nm | 21 | 515 nm | 618 nm | 103 nm |
| 540 nm – 590 nm | 19 + 20 + 21 | 514 nm (26 nm) | 613 nm (23 nm) | 99 nm |
| 499 nm – 555 nm | 22 | 468 nm | 568 nm | 100 nm |
| 499 nm – 555 nm | 23 | 488 nm | 582 nm | 94 nm |
| 499 nm – 555 nm | 24 | 484 nm | 568 nm | 84 nm |
| 499 nm – 555 nm | 22 + 23 + 24 | 480 nm (19 nm) | 580 nm (25 nm) | 100 nm |
| 484 nm – 514 nm | 25 | 453 nm | 550 nm | 97 nm |
| 484 nm – 514 nm | 26 | 445 nm | 550 nm | 95 nm |
| 484 nm – 514 nm | 27 | 468 nm | 519 nm | 51 nm |
| 484 nm – 514 nm | 25 + 26 + 27 | 456 nm (28 nm) | 549 nm (35 nm) | 93 nm |
| 388 nm – 443 nm | 28 | 373 nm | 452 nm | 79 nm |
| 388 nm – 443 nm | 29 | 352 nm | 459 nm | 107 nm |
| 388 nm – 443 nm | 30 | 352 nm | 459 nm | 107 nm |
| 388 nm – 443 nm | 28 + 29 + 30 | 359 nm (29 nm) | 458 nm (15 nm) | 99 nm |
| 434 nm – 490 nm | 31 | 403 nm | 508 nm | 105 nm |
| 434 nm – 490 nm | 32 | 420 nm | 503 nm | 83 nm |
| 434 nm – 490 nm | 33 | 404 nm | 497 nm | 93 nm |
| 434 nm – 490 nm | 31 + 32 + 33 | 411 nm (23 nm) | 503 nm (13 nm) | 92 nm |

Die Grenzen sollen in der folgenden Abbildung (Abbildung 3.43) noch einmal bildlich dargestellt werden:

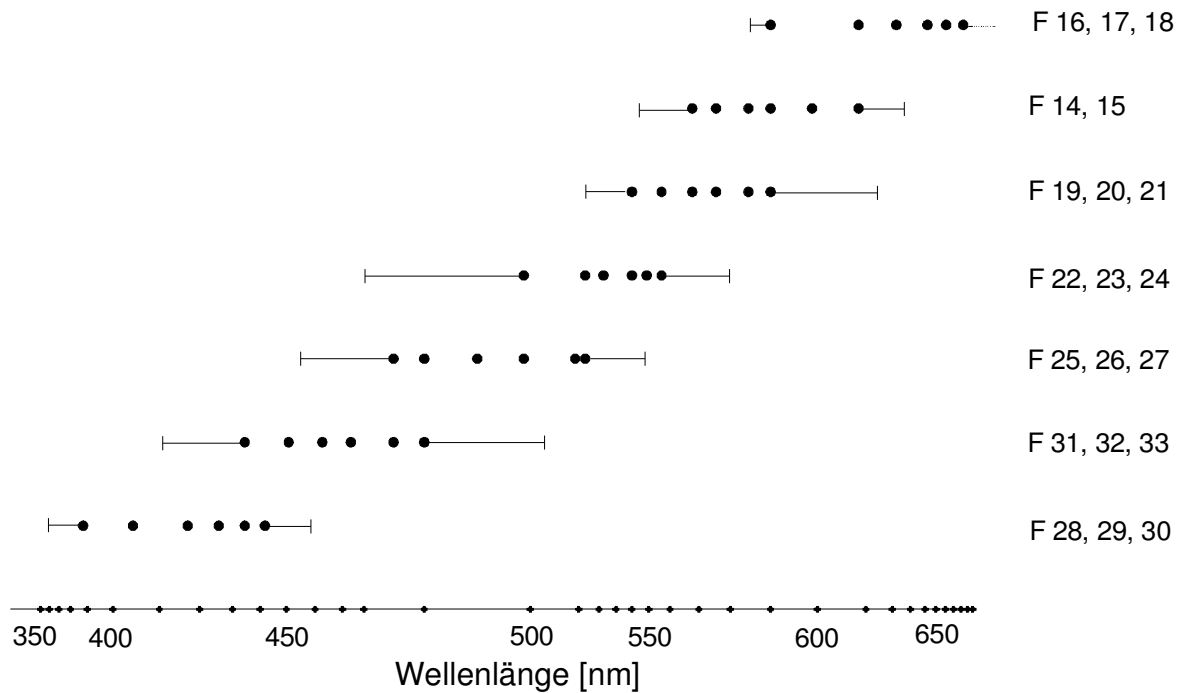


Abbildung 3.43: Zusammenfassende Darstellung der Dressurwellenlängen mit den Bereichen, bei denen 50 % oder mehr Wahlhäufigkeit erreicht wurden. Die Linien mit den Endbalken geben dabei die Schnittpunkte mit der 50 % - Achse an. Nur für die Fischgruppe 16, 17, 18 ist im langwelligen getesteten Bereich kein Schnittpunkt erreicht worden

3.2.2 Gesamtergebnis der Versuche mit sechs Dressurwellenlängen

Die Einzelergebnisse der sieben Fischgruppen werden nun in einer gemeinsamen Abbildung (3.44) dargestellt. Dazu werden die gemittelten Generalisierungskurven mit den zugehörigen Standardfehlern aller Fische über das gesamte getestete Spektrum aufgetragen. Die einzelnen Dressurbereiche waren so ausgewählt worden, dass sie sich bei den verschiedenen Fischgruppen überlappen, damit ein lückenloses Ergebnis über den gesamten Spektralbereich von 388 nm bis 685 nm erhalten wurde.

Prüft man jetzt die Bereiche, bei denen Werte von zwei verschiedenen Fischgruppen vorhanden sind, so kann man dort häufig eine tendenziell gleiche Wahl der Fische sehen. Im Wellenlängenbereich von ca. 440 nm – 450 nm zum Beispiel, bei denen

sich die Dressurbereiche von den Fischgruppen F 28/29/30 und F 31/32/33 überlappen, erhält in beiden Fällen die Wellenlänge 434 nm niedrige Wahlhäufigkeiten, die zum Langwelligen hin wieder ansteigen. Bei den Wellenlängen 484 nm und 490 nm, welche beide in den Dressurbereichen der Fischgruppen F 31/32/33 und F 25/26/27 liegen, ist ebenfalls eine Übereinstimmung zu sehen. In beiden Gruppen liegen hier nur geringe Wahlhäufigkeiten vor. Auch der Anfang des Überlappungsbereiches von Fischgruppe F 25/26/27 mit F 22/23/24 ist fast deckungsgleich, die Kurven haben fast den selben Verlauf. Allerdings gibt es bei diesen beiden Fischgruppen bei der Wellenlänge 514 nm einen gravierenden Unterschied. Die Fischgruppe F 25/26/27 hat hier ihre mit Abstand niedrigste Wahlhäufigkeit, wogegen die Fischgruppe F 22/23/24 hier ihr Maximum der Wahlhäufigkeit aufweist. Gleiches trifft auch bei der Wellenlänge 576 nm zu, die bei den Fischgruppen F 19/20/21 und F 14/15 zu den Dressurwellenlängen gehörte. Auch hier hat die eine Gruppe ihre höchste Wahlhäufigkeit und die andere ihre niedrigste. Bis auf diese beiden extremen Unterschiede kann man in den meisten Fällen von einem „fließenden“ Übergang der Überlappungsbereiche der verschiedenen Fischgruppen sprechen.

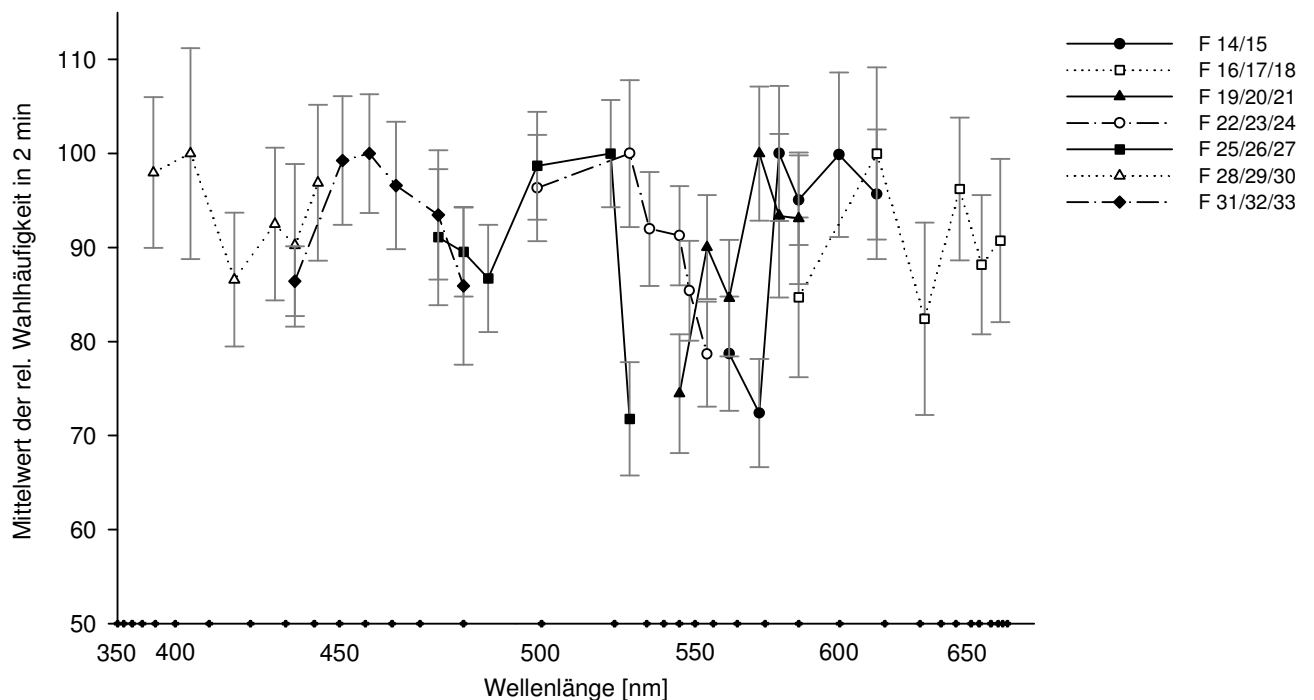


Abbildung 3.44: Gesamtbild der gemittelten Generalisierungskurven der verschiedenen Fischgruppen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder.

Betrachtet man das Gesamtergebnis, so kann man für das untersuchte Wellenlängenspektrum von 388 nm bis 685 nm vier deutliche Maxima der Wahlhäufigkeiten angeben. Diese liegen in den Bereichen von:

- 388 nm bis 405 nm
- 440 nm bis 480 nm
- 499 nm bis 515 nm
- 575 nm bis 610 nm

Im Gegensatz dazu liegen die Minima in folgenden Wellenlängenbereichen:

- 415 nm bis 435 nm
- 485 nm bis 495 nm
- 515 nm bis 580 nm
- evtl. ein weiteres bei 622 nm

Das Minimum bei 515 nm bis 580 nm hat dabei die größte Ausweitung. Hier liegen auch von allen Ergebnissen die geringsten Wahlhäufigkeiten über das gemessene Spektrum vor.

4. Diskussion

In dieser Arbeit sollte versucht werden zu klären, wie die Mannigfaltigkeit der Farben, die der tetrachromatische Goldfisch nachweislich unterscheiden kann (NEUMEYER, 1986; FRATZER et al., 1994; DÖRR & NEUMEYER, 1996), in seiner Wahrnehmung organisiert ist. Gibt es beim Goldfisch Farbkategorien analog zu denen des Menschen oder findet eine solche Einteilung der Farben in Gruppen nicht statt und müssen alle Farben „absolut“ wahrgenommen und im Gedächtnis gespeichert werden?

Zwar wird in den Arbeiten von ZERBOLIO (1985) sowie GOLDMAN et al. (1991) eine Kategorisierung der Wellenlängen innerhalb des Spektrums der Goldfische angenommen und von Goldmann et al. sogar die Grenzen bei 500 nm und zwischen 595 nm und 610 nm angegeben, doch zeigten bereits die Versuche von KITSCHMANN (1999), dass vor allem der von Goldmann durchgeführte Generalisierungstest wenig aussagekräftig für eine Untersuchung von Kategorien scheint, weil er lediglich die Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit der Goldfische widerspiegelt. Jedoch auch die von Kitschmann durchgeführten Versuche ließen keinen eindeutigen Schluss auf Kategorien zu. Der Farbpaarvergleichstest (Transfertest), der nach der Dressur auf eine bestimmte Wellenlänge durchgeführt wurde, zeigte Ergebnisse, die im wesentlichen ebenfalls durch die Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit erklärt werden können. Kitschmann allerdings deutete ihre Ergebnisse aufgrund eines Vergleiches mit Farbbenennungsversuchen beim Menschen so, dass auch Goldfische das Spektrum in Kategorien einteilen, deren Zahl mindestens der Anzahl der Zapfentypen entspricht. Eine eindeutige Aussage über die Anzahl und vor allem über die Grenzen von Farbkategorien beim Goldfisch war nicht möglich.

Das nicht deutliche Hervortreten von Kategorien in den von Kitschmann durchgeführten Versuchen könnte auf eine zu genaue Dressur der Fische zurückzuführen sein. Die Fische wurden jeweils nur auf eine einzige Wellenlänge dressiert und das so lange, bis das mit der Dressurwellenlänge beleuchtete Feld gegenüber einem unbeleuchteten Feld mit einer Wahlhäufigkeit von mindestens 75 % gewählt wurde. Bis dieses Dressurergebnis erzielt wurde, konnten mitunter mehrere Wochen vergehen, in denen die Fische nur diese eine Wellenlänge zu sehen bekamen. Die Fische

könnten nun diese eine Dressurwellenlänge so gut erlernt haben, dass sie von ihnen immer als „absolute“ Wellenlänge behandelt wird, unabhängig davon, ob sie Kategorien bilden oder nicht. Es könnte folglich so sein, dass die Fische keine Generalisierung vornehmen. Die Dressurwellenlänge wird, bis vielleicht auf die direkt benachbarten Wellenlängen, immer von den restlichen Testwellenlängen unterschieden und ein Hervortreten von Kategorien spielt in diesem Falle keine Rolle.

Wenn diese „zu genaue“ Dressur auf eine Wellenlänge das Auftreten von Kategorien verhindert, weil für den Fisch eine Generalisierung nicht erforderlich ist, dann sollte eine etwas komplexere Dressuraufgabe vielleicht eine Kategorisierung notwendig machen und zeigen.

Deshalb wurde in den hier durchgeführten Versuchen die Dressur erschwert, in dem eine Reihe von Fischen zunächst auf zwei unterschiedliche Wellenlängen dressiert wurden, die einen Abstand von 56 nm bis zu 90 nm voneinander hatten. Dieser Abstand sollte etwa so groß sein, wie der Wellenlängenbereich, der in Kitschmann's Experimenten mit über 50 % Wahlhäufigkeit gewählt worden war. Dieser betrug ungefähr $2 \times \Delta\lambda$ und gewährleistete, dass die beiden Wellenlängen sehr gut unterscheidbar waren. Durch diesen Abstand zwischen den beiden Dressurwellenlängen sollten also die Fische zwei Wellenlängen lernen, die sich nicht aufgrund direkter Nachbarschaft ähnelten und möglicherweise in unterschiedlichen Kategorien des Spektrums liegen.

Eine andere Dressuraufgabe wurde den weiteren sieben Fischgruppen gestellt. Diese wurden auf sechs verschiedene Wellenlängen dressiert, die einen gewissen Abschnitt des Spektrums mit einer Ausdehnung von 30 nm – 95 nm einnahmen. Sollte der Goldfisch Kategorien bilden, so sind Konstellationen dieser sechs Dressurwellenlängen vorstellbar, in denen möglicherweise alle in einer Kategorie liegen und solche, bei denen die sechs Dressurwellenlängen über zwei oder vielleicht sogar drei Kategorien verteilt sind.

Die Ergebnisse und Vorgehensweisen dieser Versuche sollen in den nächsten Abschnitten diskutiert werden.

4.1 Versuche mit zwei Dressurwellenlängen

4.1.1 50:50-Test

Der 50:50-Test diene lediglich dazu auszuschließen, dass eine der beiden Dressurwellenlängen bevorzugt wird. Grund für eine solche Bevorzugung könnte z.B. eine spontane bzw. angeborene Präferenz der Fische für bestimmte Farben sein, wie sie von MUNTZ und CRONLY-DILLON (1966) aufgrund unterschiedlicher Lerngeschwindigkeiten angedeutet und von ZERBOLIO (1980, 1981) weiter untersucht wurde. Muntz und Cronly-Dillon zeigten, dass die Goldfische bei einem Vergleich zwischen Grün und Blau, Blau deutlich schneller lernten. Bei der Farbkombination Grün und Rot wurde Rot besser gelernt als Grün. Zerbolio fand in seinen Versuchen dagegen keine einheitlichen, sondern individuelle Präferenzen der Fische für verschiedene Farben. Aber auch die Annahme, dass die „Farben“, die den Mittelpunkt einer Kategorie darstellen, besser erinnert werden können als solche, die eher am Rande liegen, wie es für den Menschen angenommen wurde (BERLIN & KAY, 1969; HEIDER, 1972) oder dass ökologisch wichtige Farben besser gelernt werden (RATNER & McCARTHY, 1990), könnte ein ungleichmäßiges Lernen zur Folge haben.

Der 50:50-Test konnte eine Bevorzugung einer der beiden Dressurwellenlängen gegenüber der anderen ausschließen. Bis auf geringe Abweichungen in der Wahlhäufigkeit der beiden Dressurwellenlängen (Fisch P in Abbildung 3.1 und Fisch 12 in Abbildung 3.5), traten solche Bevorzugungen in unseren Versuchen nicht auf, bzw. wurden durch eine verstärkte Dressur auf die Wellenlänge, welche seltener gewählt wurde, beseitigt. Dadurch kann ein unterschiedlicher Einfluss der Dressurwellenlängen auf die folgenden Ergebnisse nahezu ausgeschlossen werden.

4.1.2 Generalisierungstest

Der Generalisierungstest wurde hauptsächlich deswegen in das Versuchsprozedere mit aufgenommen, weil viele der bisherigen Untersuchungen zu Farbkategorien mit diesem Test durchgeführt wurden (BLOUGH, 1961 und 1972; YARCZOWER & BITTERMAN, 1965; GOLDMAN et al. 1991).

Die Generalisierungskurven der fünf Fischgruppen, welche auf zwei Wellenlängen dressiert wurden, verlaufen in einer Hinsicht sehr ähnlich: von den beiden Dressurwellenlängen wegführend ins länger- bzw. kürzerwellige werden meist nach einigen Testwellenlängen nur noch geringe Wahlhäufigkeiten, bezogen auf die höchste Wahlhäufigkeit bei den Dressurwellenlängen, erreicht. Es treten aber auch Unterschiede auf: In zwei Fällen sind die beiden Dressurwellenlängen sehr klar voneinander abgesetzt, die Flanken sind steil und die Wahlhäufigkeiten fallen zwischen den beiden Dressurwellenlängen auf Werte unter 50 % ab (Abbildungen 3.6 und 3.9). In den anderen Fällen bleibt die Wahlhäufigkeit zwischen den Dressurwellenlängen über der 50 % Linie und damit sehr hoch (Abbildungen 3.7, 3.8 und 3.10). Sinkt die Wahlhäufigkeit zwischen den Dressurwellenlängen auf Werte unter 50 % ab, so entspricht die Generalisierungskurve für zwei Dressurwellenlängen in etwa einer zusammengesetzten Generalisierungskurve aus zwei einzelnen Kurven, die sich bei der Dressur auf nur eine Wellenlänge ergeben. Dies soll anhand der Abbildung 4.1 veranschaulicht werden. Hier ist zu den Generalisierungskurven der Fische P, C und A, welche auf die Wellenlängen 523 nm und 608 nm dressiert wurden, zusätzlich die Generalisierungskurve eines Fisches eingezeichnet, der von KITSCHMANN (1999) nur auf die Wellenlänge 523 nm dressiert wurde. Leider hat Kitschmann keinen Generalisierungstest für die Wellenlänge 608 nm durchgeführt, so dass nur eine Kurve zum Vergleich steht.

In den Fällen, in denen die Wahlhäufigkeit zwischen den Dressurwellenlängen über 50 % bleibt, scheint die Dressur auf zwei Wellenlängen das Ergebnis der Generalisierungskurve zu beeinflussen. Dies zeigt sich darin, dass die Kurve nicht so verläuft, wie man es für eine Zusammensetzung aus zwei Generalisierungskurven mit jeweils einer Dressurwellenlänge erwarten würde. Auch hier soll ein Vergleich mit Kitschmanns Ergebnissen herangezogen werden. Leider stimmt auch hier nur eine ihrer Dressurwellenlängen mit den hier verwendeten überein. In Abbildung 4.2 ist das Ergebnis ihres Generalisierungstests bei der Dressurwellenlänge 501 nm zu den

Generalisierungstests auf die beiden Dressurwellenlängen 438 nm und 501 nm hinzugefügt worden. Hier zeigen zwei Fische zwischen den Dressurwellenlängen noch sehr hohe Wahlhäufigkeiten und die Generalisierungskurven dieser beiden Fische fallen von der Dressurwellenlänge 501 nm ausgehend nicht in dem Maße ab, wie man es bei der Dressur nur auf die Wellenlänge 501 nm sehen kann.

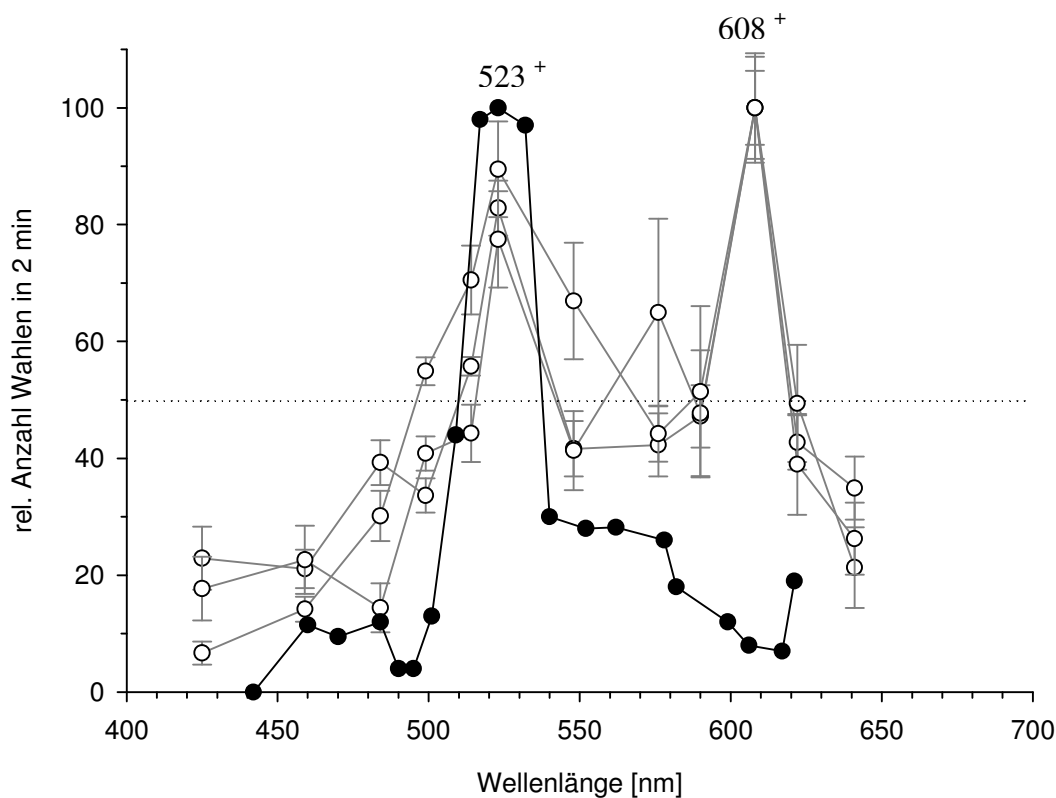


Abbildung 4.1: Generalisierungskurven der Fische P, C, A mit den Dressurwellenlängen 523 nm und 608 nm (offene Kreise) und der Generalisierungskurve eines Fisches, welcher nur auf die Wellenlänge 523 nm dressiert wurde (schwarze Kreise; nach KITSCHMANN, 1999).

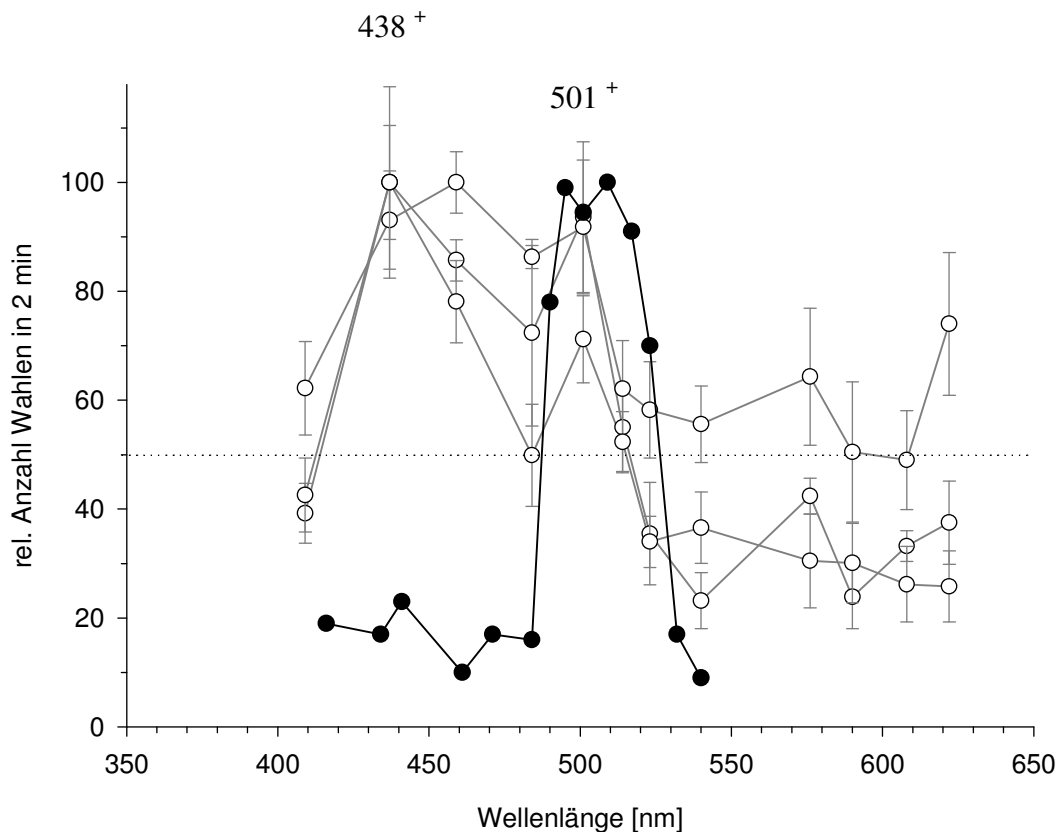


Abbildung 4.2: Generalisierungskurven der Fische 10, 11,12 mit den Dressurwellenlängen 438 nm und 501 nm (offene Kreise) und der Generalisierungskurve eines Fisches, welcher nur auf die Wellenlänge 501 nm dressiert wurde (schwarze Kreise; nach KITSCHMANN, 1999).

Der Unterschied zwischen den Generalisierungskurven, bei denen zwischen den Dressurwellenlängen eine Wahlhäufigkeit von 50 % nicht erreicht oder unterschritten wird, wird auch deutlich in der Übersicht in Abbildung 3.11. Behandeln die Fische jede Dressurwellenlänge für sich, so sollten sich Wahlbereiche ergeben, wie sie für die Dressurwellenlängen 540 nm und 630 nm sowie 523 nm und 608 nm auftreten. Nur ein gewisser Bereich um die Dressurwellenlänge wird als ähnlich zu dieser gewertet. Dagegen werden in den drei weiteren Dressurkombinationen (499 nm und 576 nm, 484 nm und 540 nm, 438 nm und 501 nm) offenbar die gesamten Bereiche zwischen den Dressurwellenlängen als ähnlich beurteilt.

Versucht man die Unterschiede in den Wahlhäufigkeiten zwischen den Dressurwellenlängen in den Generalisierungskurven mit Hilfe von Kategorien zu deuten, dann ergibt sich folgende Erklärungsmöglichkeit: Die Generalisierungskurven, bei denen die Wahlhäufigkeit zwischen den Dressurwellenlängen auf über 50 % bleibt, könnten

auf einen kontinuierlichen Übergang zwischen zwei Kategorien zurückzuführen sein. Dieser Bereich würde Farben repräsentieren, die einen Anteil von beiden Dressurfarben enthalten. Dies entspräche beim Menschen z.B. der Farbe Türkis, die sowohl Blau als auch Grün enthält. Dagegen könnte in den beiden Fällen, bei denen die Wahlhäufigkeit zwischen den Dressurwellenlängen unter 50 % abfällt, kein direkter Übergang zweier Kategorien vorliegen, sondern es könnte eine weitere Kategorie dazwischen liegen. Dies würde beim Menschen den Farben Grün und Rot entsprechen. Hier gibt es keinen direkten Übergang und somit keine Mischfarbe aus Grün und Rot, weil die Farbkategorie Gelb dazwischen liegt.

Ist dies die Erklärung für den Unterschied in den Generalisierungskurven, dann müssten die Wellenlängen 540 nm und 630 nm, sowie 523 nm und 608 nm in zwei unterschiedlichen Kategorien liegen, die durch eine weitere Kategorie getrennt sind.

Laut GOLDMAN et al. (1991) ist eine symmetrische Abnahme der Wahlhäufigkeiten zu beiden Seiten der Dressurwellenlänge in einer Generalisierungskurve ein Hinweis darauf, dass die Dressurwellenlänge in der Mitte einer Kategorie liegt, wogegen eine asymmetrische Abnahme der Wahlhäufigkeiten zu beiden Seiten der Dressurwellenlänge bedeutet, dass die ausgewählte Dressurwellenlänge eher im Randbereich einer Kategorie liegt. Diese Asymmetrien bei Goldman et al. lassen sich jedoch durch die unterschiedliche Unterscheidbarkeit der Wellenlängen erklären. Werden die Ergebnisse von Goldman et al. nicht linear über der Wellenlänge aufgetragen, sondern über einer „fischspezifischen“ Wellenlängenchse, welche entsprechend der Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit der Goldfische verändert wurde (Abbildung 2.3), so fallen diese von Goldman beschriebenen Asymmetrien weg.

Betrachtet man das Gesamtergebnis des Generalisierungstests nach der Dressur auf zwei Wellenlängen mit den eingezeichneten Bereichen, in denen eine Wahlhäufigkeit von 50 % oder mehr vorliegt, so kann man jedoch auch hier Asymmetrien dieser Bereiche um die Dressurwellenlängen erkennen (Abbildung 3.11), die, anders als bei Goldman et al., trotz der fischspezifischen Achse auftraten. Solche Asymmetrien sind um die Dressurwellenlängen 540 nm (Fische 7, 8 und 9) und 608 nm (Fische P, C und A) zu erkennen. Bei 540 nm ist für zwei Fische der ins Kürzerwellige gehende Bereich fast halb so groß wie der ins Längerwellige reichende. Umgekehrt verhält es sich bei der Wellenlänge 608 nm, hier ist der Bereich, der ins Kürzerwellige geht, doppelt so groß wie der ins Längerwellige gehende.

4.1.3 Transfertest

Auch der Transfertest wurde bereits in anderen Arbeiten zur Ermittlung von Farbkategorien beim Goldfisch verwendet (ZERBOLIO, 1985; KITSCHMANN, 1999). Der Unterschied zu Kitschmanns Versuchen liegt aber sowohl in der Anzahl der Dressurwellenlängen als auch in einer leichten Veränderung in der Vorgehensweise des Transfertests. Im Gegensatz zu Kitschmann wurden jetzt nur noch ausgewählte Wellenlängen gegeneinander präsentiert. Diese wurden so ausgesucht, dass sie von den Dressurwellenlängen den gleichen Abstand aufweisen sollten (Abbildung 2.6). Dies ist in manchen Fällen nicht ganz geglückt, aber es wird noch darauf eingegangen, ob dies einen Einfluss auf das Ergebnis hat. Wenn die Abstände der in den Transfertests gegeneinander gezeigten Testwellenlängen gleich von der Dressurwellenlänge bzw. den Dressurwellenlängen sind, so würde man erwarten, dass bei einer Wahl, die lediglich auf der Unterscheidungsfähigkeit der Fische beruht, diese gleich behandelt werden, also eine Wahlhäufigkeit von ca. 50 % auf beide Wellenlängen des Transfertests entfällt. Dies ist, wie in den Ergebnissen beschrieben, jedoch in einigen Kombinationen nicht so (Abbildung 3.17). Betrachtet man nur die Ergebnisse, welche die Wahl von mindestens zwei Fischen zeigen (Abbildung 3.18), so kann man in drei Dressurkonstellationen Wahlen erkennen, die deutlich von 50 % abweichen. Prüft man nun diese Kombinationen von Transferwellenlängen in Bezug auf den Abstand, den diese von den Dressurwellenlängen haben, so könnte nur eine dieser ungleichen Wahlen auf diesen ungleichen Abstand zurückgeführt werden. Dies ist bei der Dressurkombination 540 nm und 630 nm der Fall, bei dem die Fische 7 und 8 die Wellenlänge 685 nm in der Kombination mit 499 nm bevorzugen. Wie man deutlich erkennen kann, weist die Wellenlänge 685 nm auf der fischspezifischen Wellenlängenachse einen geringeren Abstand von der Dressurwellenlänge 630 nm auf als 499 nm von der Dressurwellenlänge 540 nm. Allerdings trifft dies für die anderen Fälle ungleicher Wahlhäufigkeit nicht zu. Bei den Dressurwellenlängen 523 nm und 608 nm ist der Abstand der bevorzugten Wellenlänge 499 nm (in der Kombination 499 nm gegen 641 nm) von der Dressurwellenlänge 523 nm größer als der von der Wellenlänge 641 nm zur Dressurwellenlänge 608 nm. Ebenso verhält es sich bei der Kombination 576 nm gegen 641 nm, hier wird die Wellenlänge 576 nm trotz größeren Abstandes auf der fischspezifischen Wellenlängenskala bevorzugt. Auch die Kombination 409 nm gegen 484 nm bei den Dressurwellenlängen 438 nm und

501 nm liefert ein weiteres Beispiel dafür, dass unterschiedliche Wahlhäufigkeiten nicht anhand ungleicher Abstände zu den Dressurwellenlängen erklärt werden können. Es scheint somit, dass diesen Ergebnissen ein anderes Wahlkriterium der Fische als nur die Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit zugrunde liegt.

Die Ergebnisse des Generalisierungs- und des Transfertests sind zusammen in Abbildung 4.3 dargestellt. Von Bedeutung ist dabei der Vergleich der Fälle, in denen im Transfertest ungleiche Wahlverteilungen auftraten, mit den Ergebnissen des Generalisierungstests.

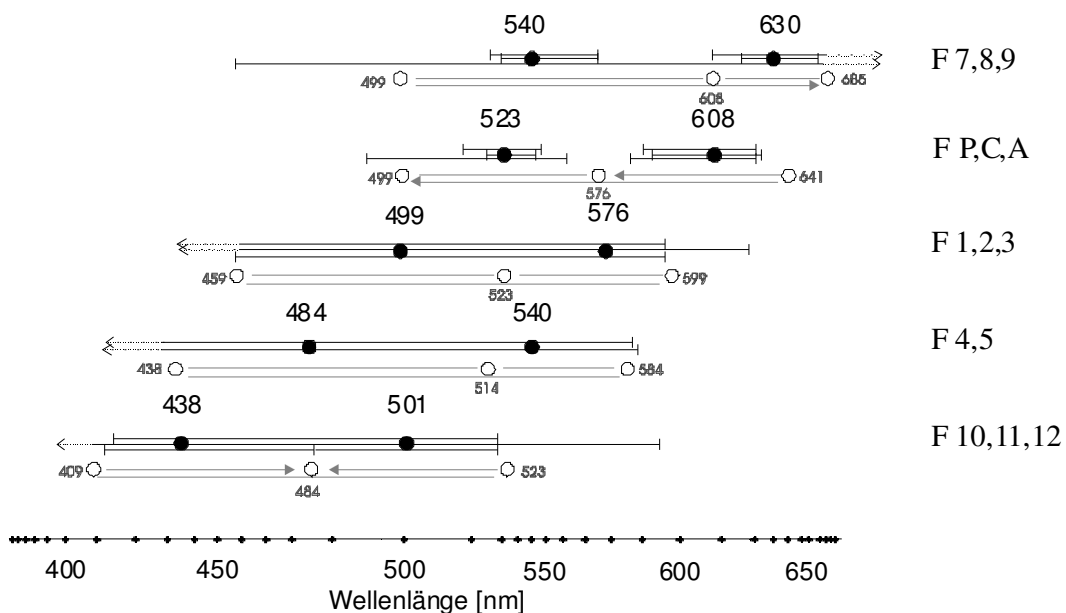


Abbildung 4.3: Vergleich der Ergebnisse des Transfer- und Generalisierungstests der Fischgruppen, die auf zwei Wellenlängen dressiert wurden. Die schwarzen Kreise sind die Dressurwellenlängen, die unangefüllten Kreise die Transferwellenlängen. Die Linien durch die Dressurwellenlängen sind die Wahlhäufigkeiten $\geq 50\%$ aus dem Generalisierungstest, die Linien mit den Pfeilspitzen darunter die Ergebnisse aus dem Transfertest.

Bei der Dressurkombination 540 nm und 630 nm liegt die Wellenlänge 499 nm für zwei Fische außerhalb des Wahlbereiches von $\geq 50\%$. Wird diese im Vergleich zu der Wellenlänge 685 nm gezeigt, die bei zwei Fischen noch mit einer Wahlhäufigkeit von über 50% gewählt wird, dann lässt sich die Bevorzugung von 685 nm durch das Ergebnis des Generalisierungstests erklären. Auch die Transferwellenlänge 608 nm

liegt bei zwei Fischen im Wahlbereich von über 50 % und daher ist die Gleichverteilung der Wahlen in der Kombination 608 nm und 685 nm zu erwarten. Allerdings sollten zwei Fische die Wellenlänge 608 nm gegenüber 499 nm bevorzugen, da 499 nm mit einer Wahlhäufigkeit von unter 50 % gewählt wurde. Dies ist jedoch nicht der Fall.

Bei den Dressurwellenlängen 523 nm und 608 nm liegen alle drei Transferwellenlängen, mit Ausnahme der Wellenlänge 499 nm bei Fisch A, in Bereichen, die von den Fischen im Generalisierungstest mit einer Wahlhäufigkeit von unter 50 % gewählt wurden. Würden dem Transfertest dieselben Wahlkriterien zugrunde liegen wie dem Generalisierungstest, dann sollte keine der Transferwellenlängen bevorzugt werden, wie es jedoch bei der Wellenlänge 576 nm im Falle der Kombinationen von 576 nm gegen 641 nm und bei 499 nm in der Kombination 499 nm gegen 641 nm der Fall war.

Bei den Dressurwellenlängen 499 nm und 576 nm sowie 484 nm und 540 nm, bei denen keine ungleiche Wahlverteilungen auf die Transferwellenlängen auftraten, liegen die Transferwellenlängen jeweils noch im Bereich von ≥ 50 % Wahlhäufigkeit des Generalisierungstests oder nur ganz knapp darunter. In diesen Fällen stimmen die Ergebnisse von Generalisierungs- und Transfertest überein.

Ungleichmäßige Wahlverteilungen im Transfertest traten auch bei der Dressurkombination 438 nm und 501 nm auf. Die bevorzugte Wellenlänge 484 nm liegt im Bereich der Wahlhäufigkeit ≥ 50 %, die seltener gewählten Transferwellenlängen 409 nm und 523 nm liegen dagegen bei jeweils zwei Fischen nicht mehr in diesem Bereich. Daher lässt sich die Wahl im Transfertest anhand des Ergebnisses des Generalisierungstests erklären.

Insgesamt lassen sich die meisten ungleichen Wahlen im Transfertest durch den Generalisierungstest erklären.

4.1.4 Wellenlängenunterscheidungstest

Der Wellenlängenunterscheidungstest soll einen Vergleich zum Generalisierungstest liefern. KITSCHMANN (1999) hatte vermutet, dass der Generalisierungstest lediglich in einem etwas weiteren Maße die Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit der Fische wiedergibt. Beim Wellenlängenunterscheidungstest werden die Schnittpunkte mit der 30 %-Geraden als Grenze der Bereiche angesehen, die dem Fisch der Dressurwellenlänge ähnlich erscheinen. Diese Bereiche sollten aufgrund des direkten Vergleiches zwischen Dressur- und Testwellenlänge enger sein als im Generalisierungstest, bei dem die gezeigten Wellenlängen aus dem Gedächtnis heraus verglichen werden. Der Wellenlängenunterscheidungstest wurde für jeden Fisch nach Abschluss aller anderen Tests durchgeführt.

Wenn man die Generalisierungskurven jedes einzelnen Fisches direkt mit der Wellenlängenunterscheidungskurve vergleicht, wie es in Abbildung 4.4 und 4.5 exemplarisch für die Fischgruppen P, C, A und 10, 11, 12 möglich ist, dann kann man sehen, dass z. T. der Verlauf der beiden Kurven fast identisch ist. Dabei wurden die Kurven so übereinander gelegt, dass man die Übereinstimmungen deutlich sehen kann und es wurde auf eine gleiche Normierung bei den verschiedenen Fischen verzichtet. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Wahlkriterium im Generalisierungstest der Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit entspricht. Da die Wellenlängenunterscheidung bei den zwei Dressurwellenlängen in manchen Fällen aber deutlich von der Unterscheidungsfähigkeit bei nur einer Dressurfarbe abweicht (Abbildungen 4.6 und 4.7), wie es auch im Vergleich der Generalisierungskurven von einer und zwei Dressurwellenlängen der Fall war (Abbildungen 4.1 und 4.2), ist anzunehmen, dass die Dressur auf zwei Wellenlängen das Ergebnis so beeinflusst, dass die Fische die dazwischenliegenden Wellenlängen deutlich häufiger wählen.

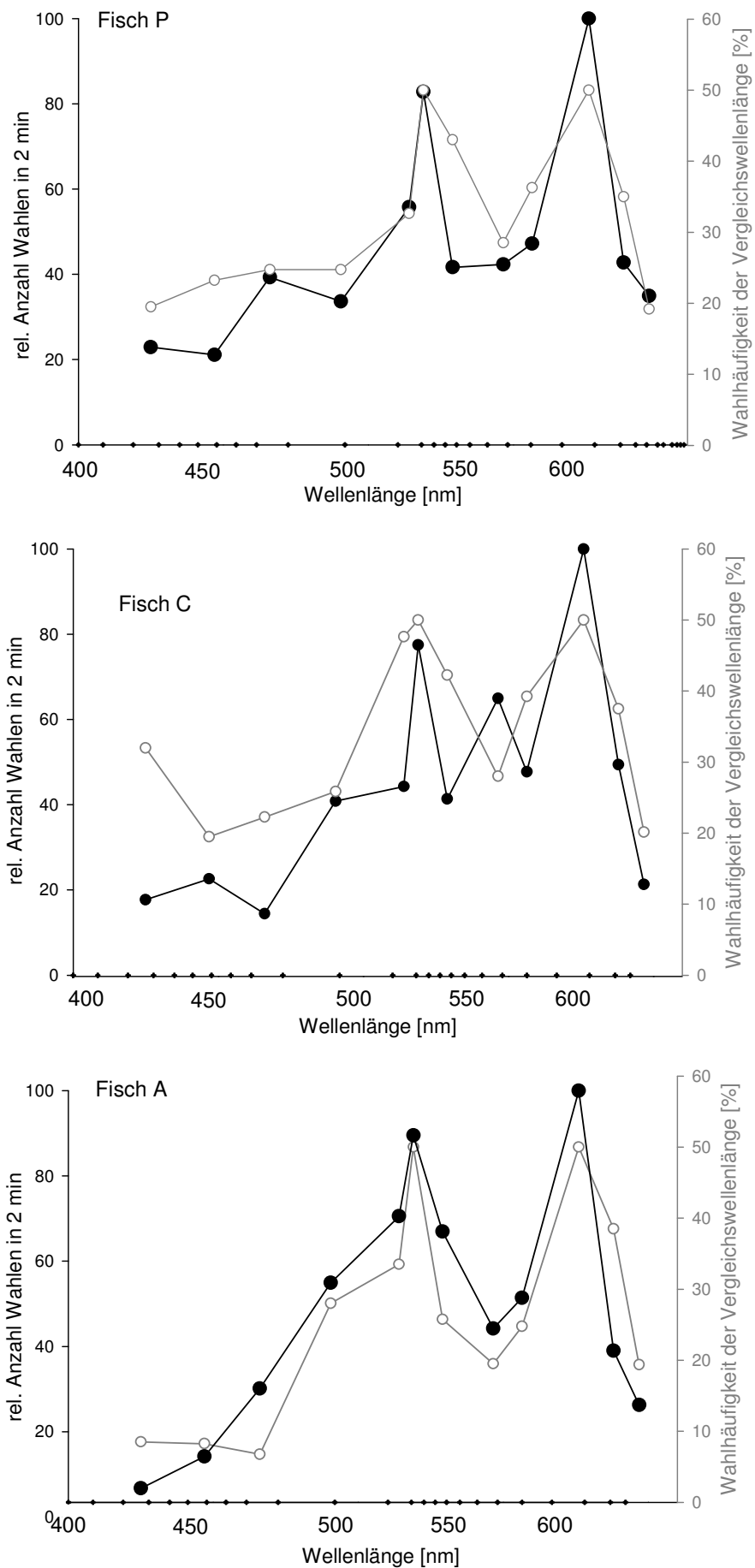


Abbildung 4.4: Vergleich von Generalisierungs- (schwarze Kreise) und Wellenlängenunterscheidungskurven (offene Kreise) der Fisch P, C und A, welche auf die Wellenlängen 523 nm und 608 nm dressiert wurden. Für die Wellenlängenunterscheidungskurve wurde die Mittelwertskurve genommen.

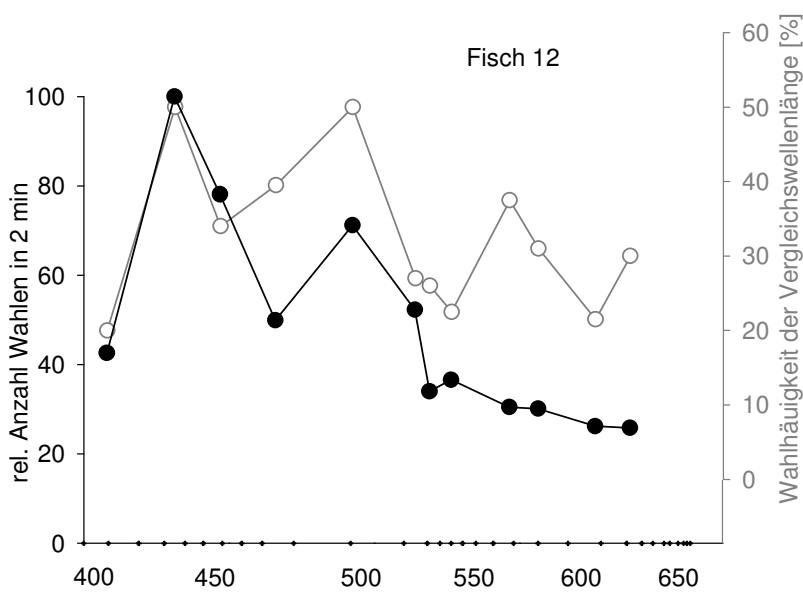
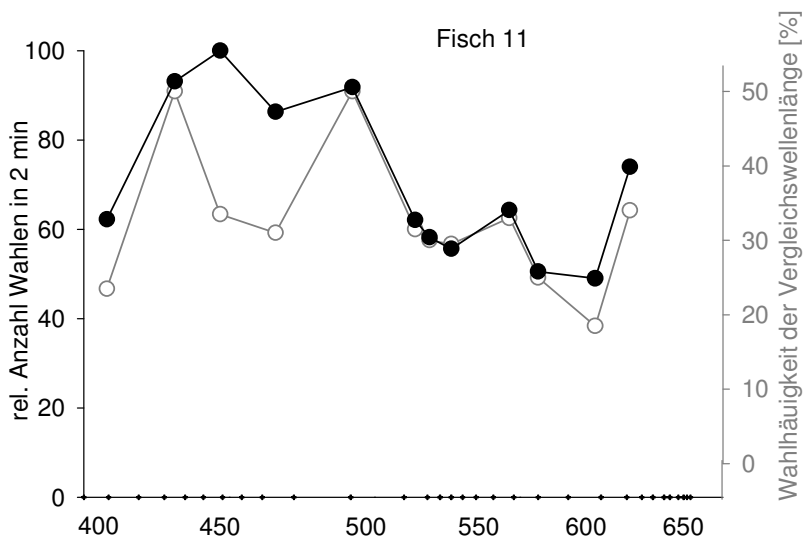
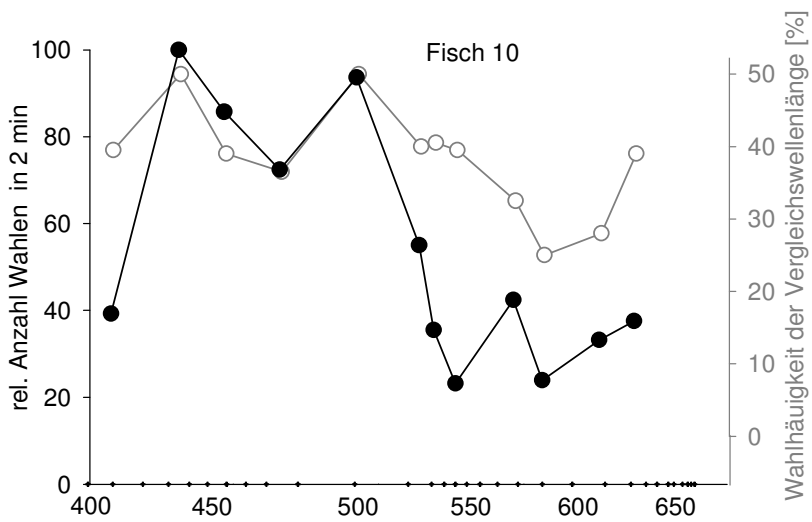


Abbildung 4.5: Vergleich von Generalisierungs- (schwarze Kreise) und Wellenlängenunterscheidungskurven (offene Kreise) der Fisch 10, 11 und 12, welche auf die Wellenlängen 438 nm und 501 nm dressiert wurden. Für die Wellenlängenunterscheidungskurve wurde die Mittelwertskurve genommen.

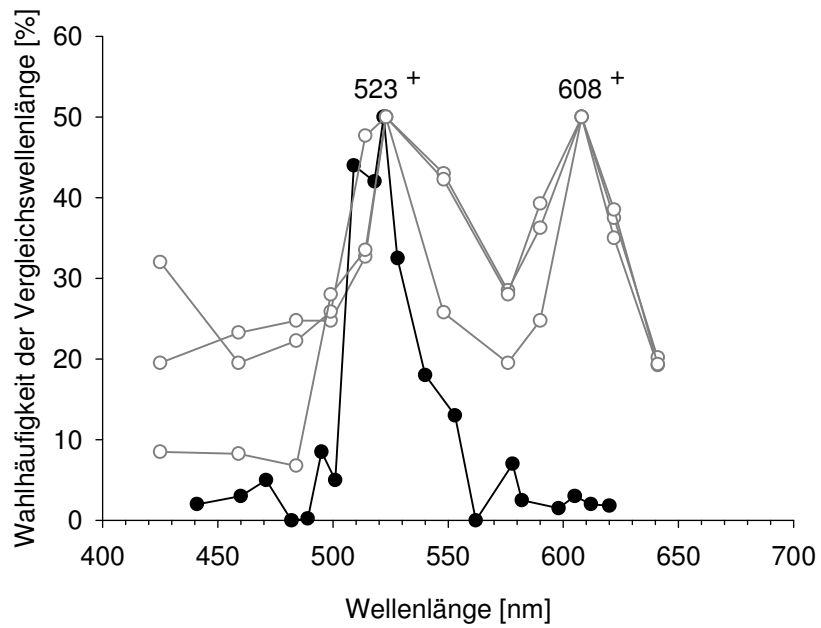


Abbildung 4.6: Vergleich der Wellenlängenunterscheidungskurven der Fische P, C und A, die auf die Wellenlängen 523 nm und 608 nm dressiert wurden (offene Kreise) mit der Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit eines Fisches, welcher nur auf die Wellenlänge 523 nm dressiert wurde (schwarze Kreise, nach KITSCHMANN, 1999).

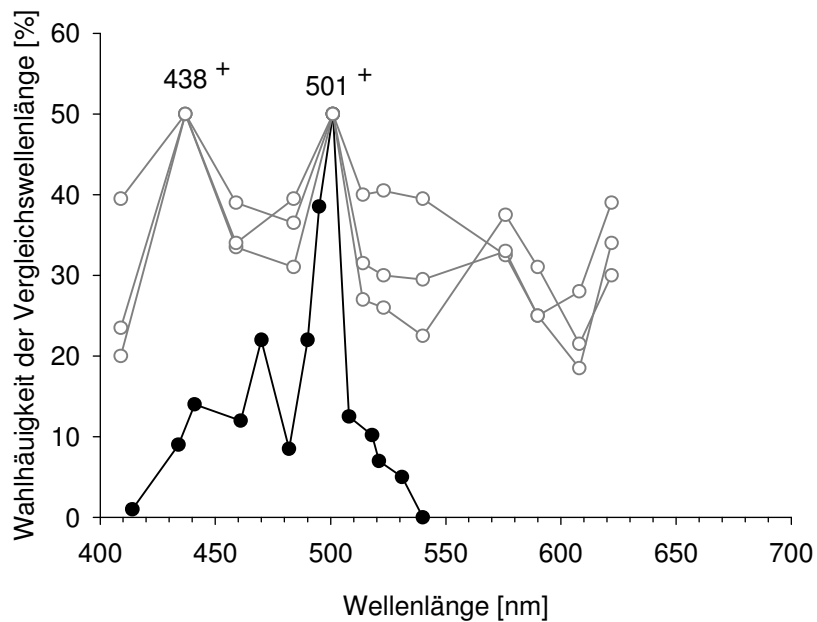


Abbildung 4.7: Vergleich der Wellenlängenunterscheidungskurven der Fische 10, 11 und 12, die auf die Wellenlänge 438 nm und 501 nm dressiert wurden (offene Kreise) mit der Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit eines Fisches, welcher nur auf die Wellenlänge 501 nm dressiert wurde (schwarze Kreise, nach KITSCHMANN, 1999).

Schaut man sich dann die Gesamtergebnisse von Generalisierungs- und Wellenlängenunterscheidungstest mit den Bereichen an, die mit über 50 % Wahlhäufigkeit als ähnlich der Dressurwellenlänge gewertet werden (Abbildung 3.11 und 3.24), so fällt auf, dass nur in wenigen Fällen die Bereiche um die Dressurwellenlänge im Wellenlängenunterscheidungstest enger sind als im Generalisierungstest. Häufiger ist es jedoch, dass die Bereiche im Wellenlängenunterscheidungstest größer oder fast gleich sind. Dies würde man aufgrund des im Wellenlängenunterscheidungstest möglichen direkten Vergleiches zwischen Dressur- und Testwellenlänge nicht erwarten. Eine Ursache dafür könnte sein, dass die Fische ihre beiden Dressurfarben so gut gelernt haben, dass es für sie kaum einen Unterschied macht, ob sie diese direkt mit den Testwellenlängen vergleichen können oder ob sie dies aus dem Gedächtnis heraus tun müssen. Der Generalisierungstest war zudem der erste Test nach der Dressur und dem 50:50-Test, was bedeutet, dass sie bis zu diesem Zeitpunkt nur die Dressurfarben gesehen hatten. Der Wellenlängenunterscheidungstest dagegen wurde im Anschluss an Generalisierungs- und Transfertest durchgeführt, also nachdem die Fische mit vielen verschiedenen Testwellenlängen konfrontiert worden waren. Da aber im Anschluss an jeden einzelnen Testdurchlauf immer wieder eine Belohnung auf die Dressurwellenlängen erfolgte, ist dieses meist bessere Ergebnis des Generalisierungstests trotzdem verwunderlich.

Zu berücksichtigen ist dabei außerdem, dass in den Generalisierungstests deutlich mehr (bis auf wenige Ausnahmen mindestens sechs) Einzelmessungen eingegangen sind als in den Wellenlängenunterscheidungstest, der meist auf einer, in machen Fällen auf zwei bis drei Messungen beruht.

4.1.5 Schlussfolgerung aus den Ergebnissen mit zwei Dressurwellenlängen

Die Ergebnisse aus den Versuchen mit zwei Dressurwellenlängen zeigen deutliche Unterschiede zu den Untersuchungen von KITSCHMANN (1999) mit nur einer Dressurwellenlänge. Sowohl der Verlauf der Generalisierungs- wie auch der der Wellenlängenunterscheidungskurven zeigen ein Wahlverhalten, das durch die gleichzeitige Dressur auf zwei verschiedene Wellenlängen beeinflusst ist. Bei beiden Tests zeigen sich in Abhängigkeit von den ausgewählten Dressurwellenlängen Unterschiede. So traten bei zwei Dressurkombinationen, 540 nm und 630 nm sowie 523 nm und 608 nm, Bereiche mit deutlich niedrigeren Wahlhäufigkeiten zwischen den Dressurwellenlängen auf. Hier wird nur ein bestimmter, an die Dressurwellenlängen angrenzender Bereich als der Dressurwellenlänge ähnlich gewertet. Bei den anderen drei Dressurkombinationen werden alle Testwellenlängen, die zwischen den Dressurwellenlängen liegen, mit Wahlhäufigkeiten von über 50 % gewählt. Somit scheinen diese Testwellenlängen Ähnlichkeiten mit den Dressurwellenlängen zu haben. Dies würde, wie bereits in Abschnitt 4.1.2 erwähnt, einer Einteilung entsprechen, bei der die Dressurwellenlängen in zwei benachbarten Kategorien liegen, zwischen denen ein Bereich liegt, der einen Übergang zwischen beiden Dressurkategorien repräsentiert. Im Falle der Dressurkombinationen dagegen, bei denen die Wahlhäufigkeiten stark absinken, liegt vermutlich eine Kategorie zwischen den Dressurwellenlängenkategorien, die keine „Mischung“ aus beiden darstellt.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass zwar die Aussage, dass der Generalisierungstest nicht geeignet ist, um Informationen über Kategorien zu liefern (KITSCHMANN, 1999) für eine Dressurwellenlänge zutreffen mag, aber nicht unbedingt auf die Ergebnisse mit mehreren Dressurwellenlängen übertragbar ist.

4.2 Versuche mit sechs Dressurwellenlängen

Bei den Fischen, welche auf sechs verschiedene Wellenlängen dressiert waren, wurde sehr genau darauf geachtet, dass jede Wellenlänge sowohl in der Dressur als auch in der anschließenden Belohnung bei den Generalisierungstests (und Transfertests mit den Fischen 14 und 15) exakt gleich oft gezeigt wurde. Dies ist sehr wichtig, weil Unterschiede in den Wahlhäufigkeiten auf jede der sechs Dressurwellenlängen gedeutet werden sollen und eine ungleiche Behandlung während der Dressur solche Unterschiede hervorrufen könnte.

Für alle Fischgruppen wurde der Generalisierungstest durchgeführt. Dabei wurden neben den Dressur- auch eine Reihe weiterer Testwellenlängen verwendet. Diese Testwellenlängen sollen zeigen, dass der Fisch die Dressurwellenlängen auch wirklich gelernt hat und diese von anderen Wellenlängen unterscheiden kann. Dies wird durch den Verlauf der Generalisierungskurven der Fische deutlich. Die Generalisierungskurven jeder Fischgruppe wurden zu einer Mittelwertskurve zusammengefasst. Hier kann man in den meisten Fällen von den Dressurbereichen ausgehend eine sehr rasche Abnahme der Wahlhäufigkeiten sehen. Dies zeigt sich darin, dass bei den meisten der Generalisierungsmittelwertskurven zu beiden Seiten des Dressurbereiches nur die direkt angrenzenden Testwellenlängen eine Wahlhäufigkeit von über 50 % erreichen (Fische 14/15 in Abb. 3.25, Fische 19/20/21 in Abb. 3.34, Fische 31/32/33 in Abb. 3.42). In manchen Fällen wird eine an den Dressurbereich angrenzende Testwellenlänge bereits mit weniger als 50 % Häufigkeit gewählt, sie erscheint dem Fisch also deutlich unterschiedlich zu den Wellenlängen des Dressurbereiches (Fische 16/17/18 in Abb. 3.32 und Fische 28/29/30 in Abb. 3.40). Nur in zwei Fällen liegen - vom Dressurbereich ausgehend - mehr als eine Testwellenlänge im Bereich von 50 % Wahlhäufigkeit. Dies ist bei den Fischen 22/23/24 mit zwei Wellenlängen im Bereich „oberhalb“ des Dressurbereiches (Abbildung 3.36) und den Fischen 25/26/27 (Abbildung 3.38) ebenfalls „oberhalb“ des Dressurbereiches mit drei Wellenlängen der Fall.

Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Fische die sechs Dressurwellenlängen gelernt haben und sie von den Testwellenlängen unterscheiden können.

Von besonderem Interesse sind nun aber die Unterschiede der Wahlhäufigkeiten der Dressurwellenlängen (siehe Abbildung 4.8). Da alle Wellenlängen des Dressurbereiches gleich behandelt und gleich oft gezeigt und belohnt wurden, sollten sich

die Wahlhäufigkeiten der sechs Dressurwellenlängen kaum unterscheiden. Wie man sehen kann, ist dies jedoch nicht der Fall. Es gibt deutliche Unterschiede in den Wahlhäufigkeiten der sechs Dressurwellenlängen einer Fischgruppe. Es zeigen sich deutliche Maxima in den Bereichen 388 nm – 405 nm, 440 nm – 480 nm, 499 nm – 515 nm und 575 nm – 610 nm. Minima findet man dagegen bei 415 nm – 435 nm, 485 nm – 495 nm, 515 nm bis 580 nm und bei 622 nm.

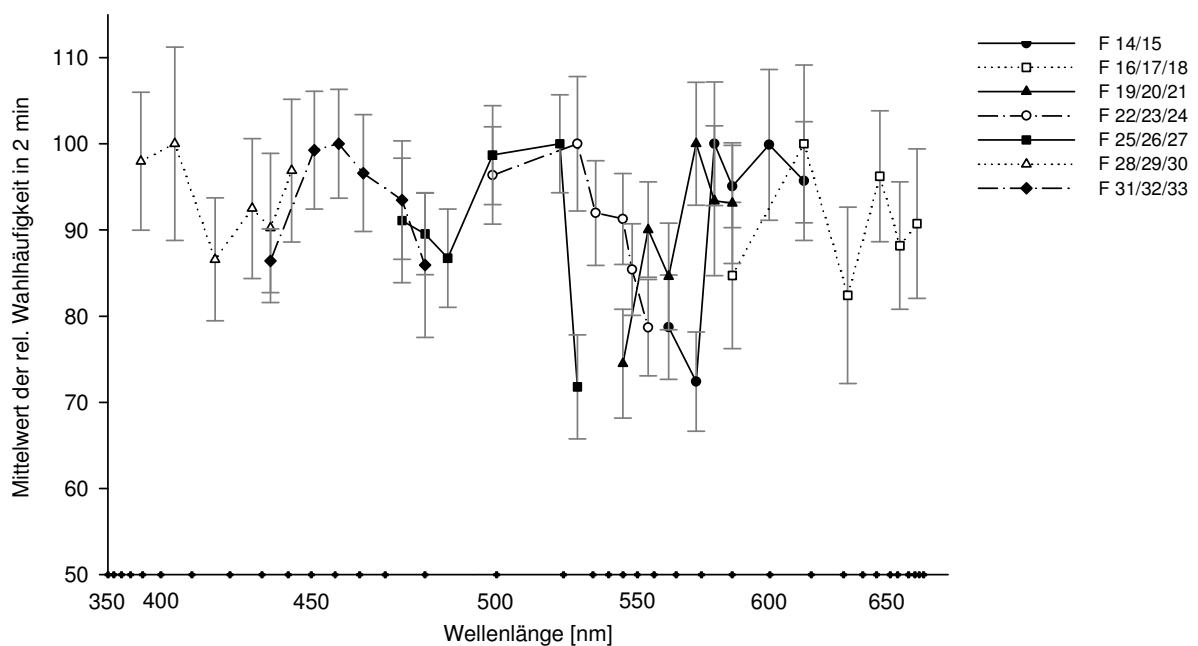


Abbildung 4.8: Gesamtbild der gemittelten Generalisierungskurven der verschiedenen Fischgruppen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler wieder.

4.2.1 Überprüfung von „Wahl Tendenzen“

Um zu zeigen, dass hinter der Verteilung der Wahlhäufigkeiten kein Muster steckt, d.h., dass z.B. immer die äußeren Wellenlängen seltener gewählt werden als solche, die in der Mitte des Dressurbereiches liegen, sind in der folgenden Graphik (Abbildung 4.9) die gemittelten Generalisierungskurven der verschiedenen Fischgruppen übereinander aufgetragen. Dabei wurden die tatsächlichen Abstände zwischen den einzelnen Dressurwellenlängen außer Acht gelassen. Es wurden jeweils die Wahlhäufigkeiten der ersten Dressurwellenlängen innerhalb der sechs

Dressurwellenlängen der verschiedenen Fischgruppen übereinander aufgetragen, wie auch der zweiten Dressurwellenlänge usw.

Diese Art der Auftragung lässt deutlich erkennen, dass es keine allgemeinen Tendenzen der Verteilung der Wahlhäufigkeiten gibt. So zeigt z.B. bei der Dressurwellenlänge 1 die Fischgruppe F 28/29/30 eine ihrer höchsten Wahlhäufigkeiten, wogegen die Fischgruppe F 19/20/21 hier ihre niedrigste Wahlhäufigkeit aufweist. Allgemein kann man jedoch sagen, dass Wahlhäufigkeiten in den Randbereichen größere Unterschiede aufweisen als bei den Dressurwellenlängen, welche in der Mitte liegen. Dies ist sehr gut bei der 4. Dressurwellenlänge zu sehen, wo die Wahlhäufigkeiten nur zwischen 91 % und 100 % schwanken.

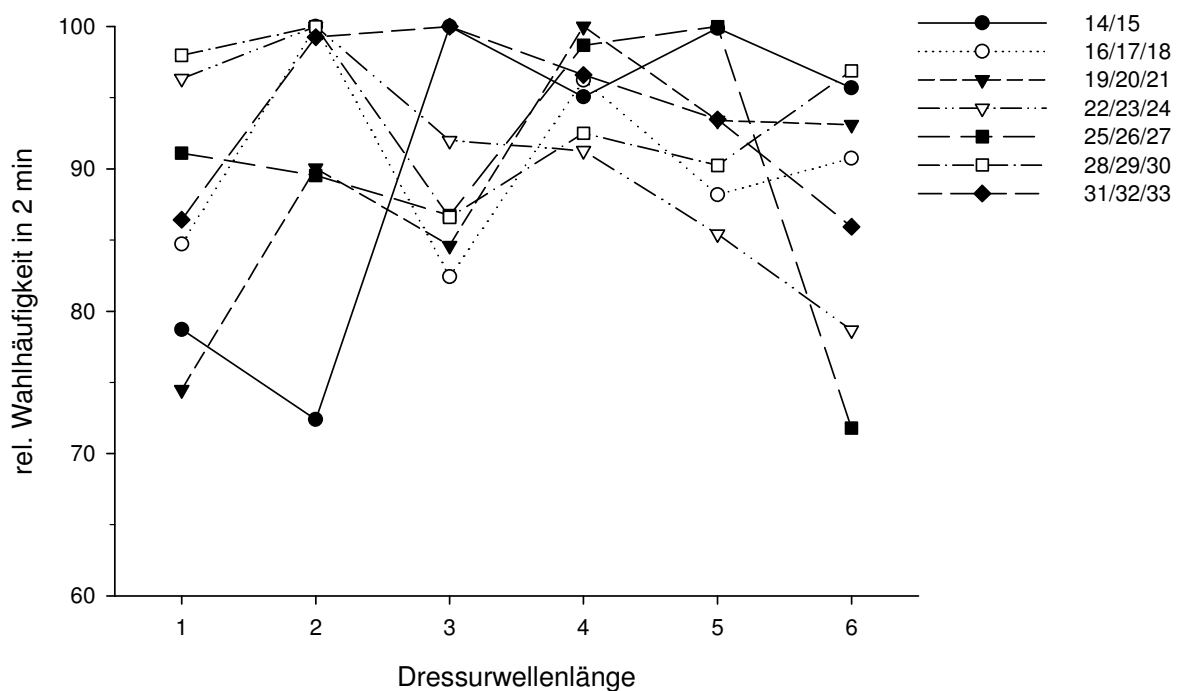


Abbildung 4.9: Auftragung der einzelnen Dressurwellenlängen der verschiedenen Fischgruppen übereinander. Der tatsächliche Abstand zwischen den Wellenlängen wurde hier nicht berücksichtigt.

4.2.2 Vergleich Gesamtergebnis mit der spektralen Empfindlichkeit der Zapfen

Um zu klären, ob es einen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen des Generalisierungstests (Abbildung 4.8) und den Empfindlichkeitsspektren der verschiedenen Zapfentypen des Goldfisches gibt, wurden diese in der folgenden Abbildung 4.10 zusammen dargestellt. Da dieser Vergleich unabhängig von der Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit der Fische ist, wurde hier auf die Darstellung mit der fischspezifischen Achse verzichtet und eine lineare Auftragung gewählt.

Im Bereich um 450 nm deckt sich das Maximum des Empfindlichkeitsspektrums des S- Zapfens mit dem Maximum der Generalisierungskurve. Die anderen drei Maxima der Generalisierungskurve liegen dagegen nicht im Bereich eines Zapfenmaximums. So liegt ein Maximum bei 510 nm, während das Maximum des M- Zapfens bei 530 nm – 540 nm liegt. Ein weiteres, sehr breites Maximum reicht von ca. 575 nm – 610 nm, während das Maximum des L- Zapfens bei 620 nm – 630 nm liegt. Hohe Wahlhäufigkeiten im Generalisierungstest zeigen sich somit im Übergangsbereich von zwei Zapfentypen. Das erste Maximum fällt genau in den Übergangsbereich zwischen UV- und S- Zapfen bei 400 nm, das dritte liegt im Übergang zwischen S- und M- Zapfen bei 500 nm und das vierte zwischen M- und L- Zapfen bei 600 nm.

Das erste Minimum der Generalisierungskurve bei ca. 425 nm liegt zwischen dem Überschneidungsbereich von UV- und S- Zapfen und dem Maximum des S- Zapfen, das zweite Minimum liegt bei 490 nm und somit, wie auch das Maximum bei 500 nm, im Übergangsbereich von S- und M- Zapfen. Die niedrigsten Wahlhäufigkeiten finden sich im Maximum des M- Zapfens bei 530 nm – 540 nm und auch im Maximum des L- Zapfens bei 620 nm - 630 nm findet sich eine Stelle mit geringeren Wahlhäufigkeiten.

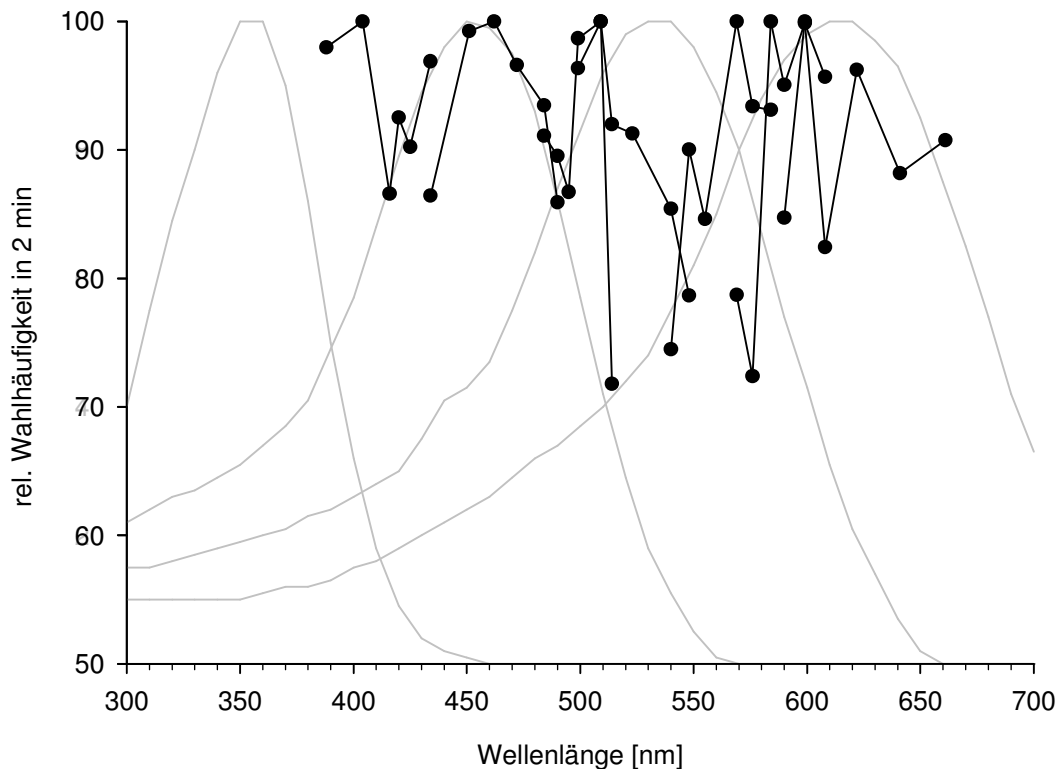


Abbildung 4.10: Vergleich der „Gesamt-Generalisierungskurve“ aller Fische mit den Absorptionskurven der verschiedenen Zapfenphotopigmente (graue Kurven).

4.2.3 Vergleich Gesamtergebnis mit der Unterscheidungsempfindlichkeit für Wellenlängen

Da drei Maxima des Generalisierungsergebnisses in den Übergangsbereichen zwischen zwei Zapfentypen liegen, in denen auch hohe Unterscheidungsempfindlichkeiten vorliegen, soll untersucht werden, ob man eine Beziehung zwischen den Generalisierungskurven und der Unterscheidungsempfindlichkeit der Goldfische herstellen kann. In Abbildung 4.11 wurden beide Funktionen eingetragen. Hier ist die $\Delta\lambda$ - Funktion als graue Linie dargestellt ist. Es handelt sich dabei um Mittelwerte von drei verschiedenen Fischen (nach NEUMEYER, 1986).

Das erste Minimum der Generalisierungskurve bei ca. 400 nm stimmt mit dem ersten Bereich bester Unterscheidbarkeit überein, allerdings ist im Bereich des ersten Minimums der Generalisierungskurve (bei 425 nm) die Unterscheidbarkeit ebenfalls noch sehr gut. Das zweite Maximum fällt mit einem Bereich schlechterer Wellen-

längenunterscheidbarkeit zusammen (ca. 450 nm – 480 nm). Das zweite Minimum, aber auch das direkt folgende Maximum der Generalisierungskurven befindet sich in einem Bereich der besten Wellenlängenunterscheidbarkeit. Der Wellenlängenbereich von etwa 530 nm – 560 nm weist die schlechteste Unterscheidbarkeit der Goldfische auf, hier befindet sich bei den Generalisierungskurven das stark ausgeprägte Minimum. Im weiteren ist es wieder umgekehrt, das Maximum der Generalisierungskurve bei 580 nm – 610 nm befindet sich im Bereich sehr guter Wellenlängenunterscheidbarkeit. Es kann hier folglich keine einheitliche Aussage getroffen werden, dass z.B. ein Maximum der Generalisierungskurve immer mit einem Bereich bester Wellenlängenunterscheidbarkeit oder umgekehrt, zusammenfällt.

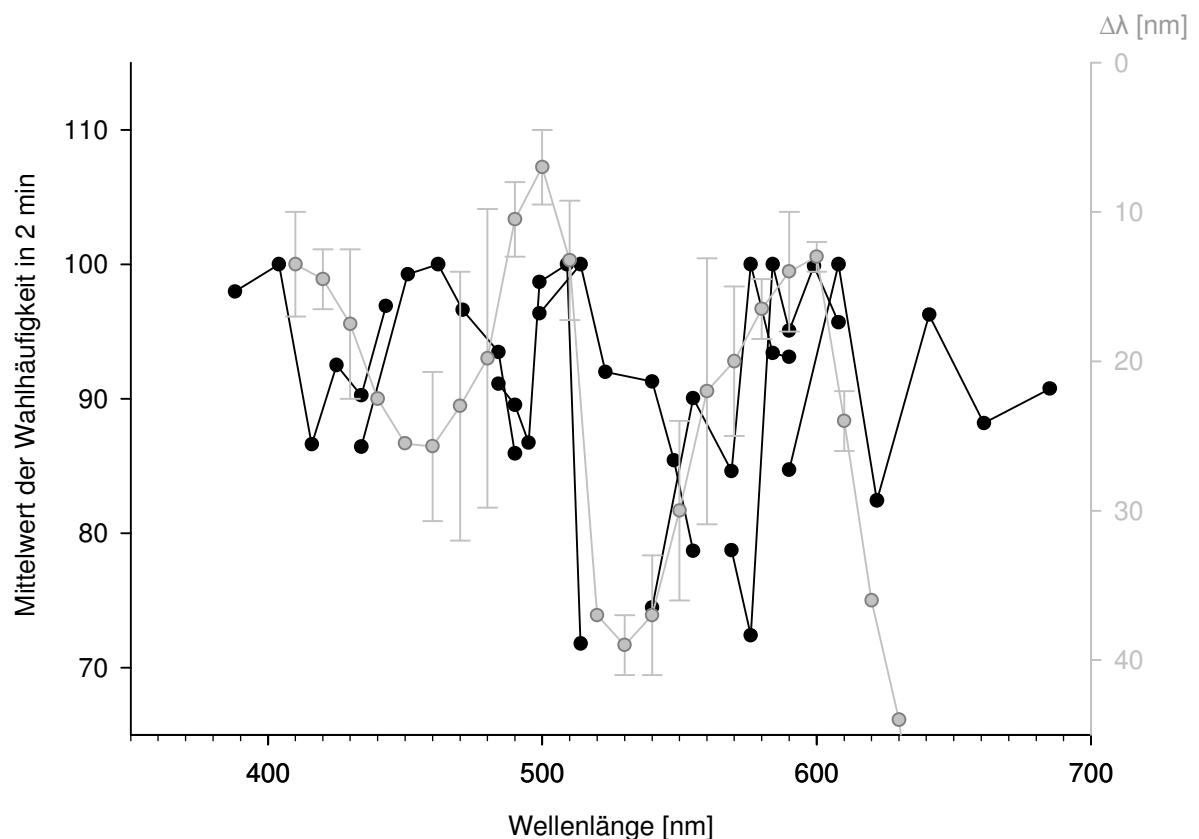


Abbildung 4.11: Vergleich der „Gesamt-Generalisierungskurve“ aller Fische mit der $\Delta\lambda$ - Kurve der Goldfische (graue Kurve; nach NEUMEYER, 1986). Die $\Delta\lambda$ - Funktion ist hier so aufgetragen, dass kleine Werte, die große Unterscheidungsempfindlichkeit bedeuten, nach „oben“ abgetragen sind (rechte Ordinate).

4.2.4 Vergleich Gesamtergebnis mit der Chlorophyllabsorptionskurve

Auffällig bei der Betrachtung der Ergebnisse des Generalisierungstests aller Fische ist das ausgedehnte Minimum im Bereich zwischen 510 nm und 560 nm. Hier zeigen vier verschiedene Fischgruppen jeweils ihre geringsten Wahlhäufigkeiten, welche auch im Gesamtergebnis von allen Fischen den wenigsten Wahlen entsprechen. Aufgrund dieser deutlichen Unterschiede in der Wahlhäufigkeit, und das über diesen relativ großen Bereich hin, ist anzunehmen, dass dieser Abschnitt des Wellenlängenspektrums eine Sonderstellung einnimmt. Vergleicht man dieses Ergebnis mit der Absorptionskurve des Chlorophylls (Abbildung 4.12), dann fällt dieses Minimum genau in den Bereich, in dem Chlorophyll sein Minimum der Absorption aufweist. An das Minimum zu beiden Seiten anschließend befinden sich dagegen gleich Maxima, welche in beiden Fällen jeweils die höchsten Wahlhäufigkeiten der jeweiligen Fischgruppen mit 100 % aufweisen. Daher könnte sich hier die Annahme von NEUMEYER (1986) bestätigen, welche sie für die gute Unterscheidungsfähigkeit bei 500 nm und 600 nm aufgestellt hat, dass es für die Fische wichtig ist, alle Farben, die sich von der Farbe des Blattgrüns unterscheiden, besonders gut wahrzunehmen. Dies würde dann ähnlich wie ein Filter wirken, der alles „Grüne“ herausfiltert und dadurch Farben, die von diesem abweichen, besonders gut erkennen lassen.

Auch das von MUNTZ und CRONLY-DILLON (1966) festgestellte unterschiedlich schnelle Lernen von den Farbkombinationen Grün und Blau sowie Rot und Grün, bei denen jeweils die Nicht-Grüne Farbe deutlich besser gelernt wurde, würde für diese Sonderstellung des Wellenlängenspektrums zwischen 515 nm und 580 nm sprechen.

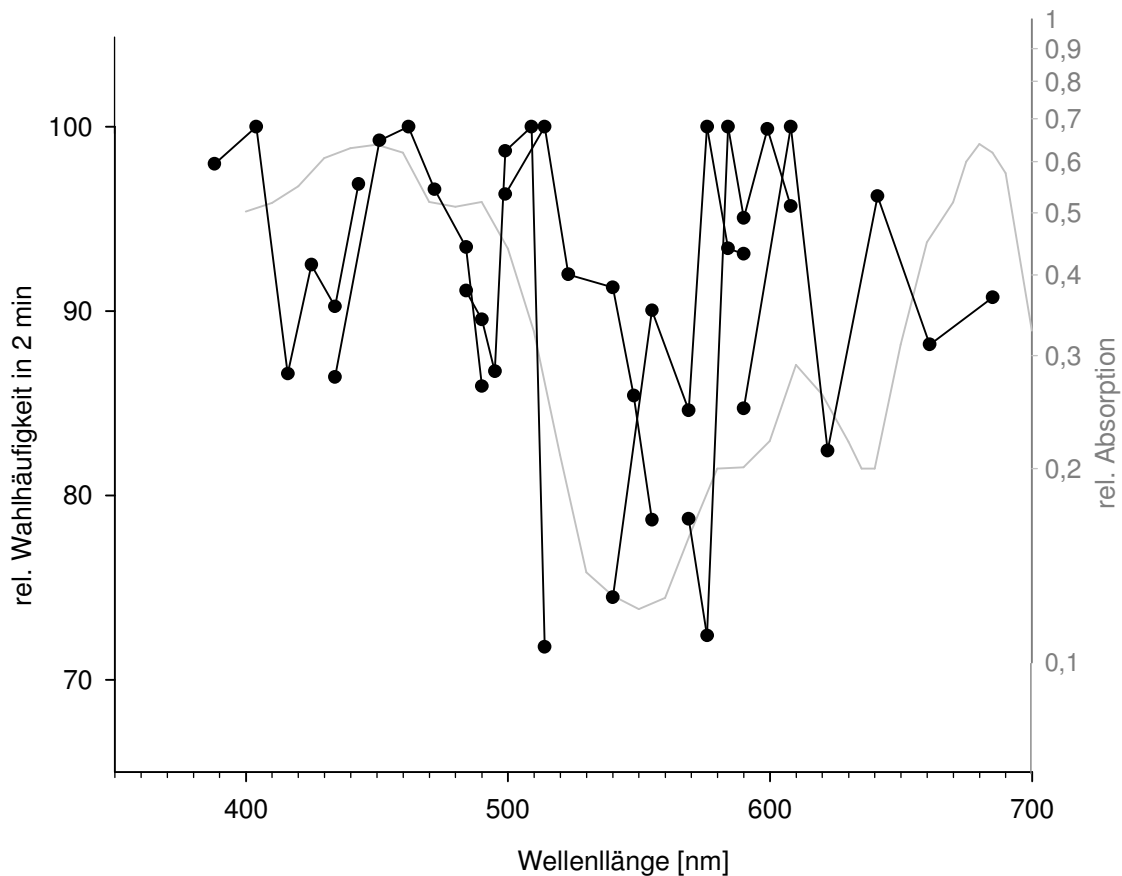


Abbildung 4.12: Vergleich der „Gesamt-Generalisierungskurve“ aller Fische (schwarze Kurven) mit der Chlorophyll - Absorptionskurve (graue Kurve) (nach YENTSCH, aus LYTHGOE, 1979).

4.2.5 Mögliche Kategoriegrenzen

Da die Dressurbereiche so ausgewählt wurden, dass sich für die verschiedenen Fischgruppen Überlappungsbereiche ergeben, kann man bei der Auftragung aller Ergebnisse (siehe Abbildung 4.8) in einigen Bereichen eine tendenziell gleiche Wahl der Fische verschiedener Gruppen sehen. So kann man Bereiche mit hoher Wahlhäufigkeit, die Maxima bei 388 nm bis 404 nm, 443 nm bis 480 nm, 499 nm bis 514 nm und 576 nm bis 608 nm, von Bereichen mit niedrigerer Wahlhäufigkeit, den Minima bei 416 nm bis 434 nm, 484 nm bis 495 nm und 515 nm bis 580 nm und vielleicht bei 622 nm unterscheiden.

Diese Unterschiede in der Wahlhäufigkeit zeigen, dass die Fische wohl manche Farben lieber „mögen“ oder aus irgendwelchen Gründen besser lernen als andere. Dies könnte mit einer Kategorisierung in Verbindung gebracht werden. Die Wellenlängen, bei denen die hohen Wahlhäufigkeiten erreicht werden, würden dann die Prototypen einer Kategorie darstellen. Es wurde bereits erwähnt, dass Farben, die den Mittelpunkt einer Kategorie bilden, von Menschen besser erinnert werden, als solche, die eher den Randbereich darstellen (BERLIN & KAY, 1969; HEIDER, 1972). Dies könnte auch beim Goldfisch der Fall sein.

Aufgrund der Verteilung der Maxima und Minima kann man eine Einteilung des Spektrums in bestimmte Abschnitte vornehmen, die evtl. Kategorien darstellen. Solche Grenzen wurden rein optisch anhand der Ergebnisse der Generalisierungskurven für die Dressurbereiche gezogen, indem als Grenze etwa die Mitte des Bereiches eines Minimums angenommen wurde. Bei dieser Einteilung stellt sich die Frage, ob man das ausgedehnte Minimum im Bereich zwischen 515 nm und 580 nm als einen eigenen Abschnitt werten soll oder nicht. In den Abbildungen 4.13 und 4.14 sind beide Möglichkeiten dargestellt. Die Grenzen würden etwa bei folgenden Werten liegen:

Grenzen mit Minimum bei 548 nm:

- 425 nm
- 490 nm
- 548 nm
- 622 nm

Grenzen mit Minimum-Bereich zwischen 515 nm und 580 nm:

- 425 nm
- 490 nm
- 515 nm
- 580 nm
- 622 nm

Dementsprechend wäre das Wellenlängenspektrum des Goldfisches im getesteten Bereich in mindestens fünf Bereiche aufgeteilt, die folgende Abschnitte umfassen:

Bereiche mit Minimum bei 548 nm:

1. Bereich 380 nm – 425 nm
2. Bereich 425 nm – 490 nm
3. Bereich 490 nm – 548 nm
4. Bereich 548 nm – 622 nm
5. Bereich ab 622 nm

Bereiche mit Minimum zwischen 515 nm und 580 nm:

1. Bereich 380 nm – 425 nm
2. Bereich 425 nm – 490 nm
3. Bereich 490 nm – 515 nm
4. Bereich 515 nm – 580 nm
5. Bereich 580 nm – 622 nm
6. Bereich ab 622 nm

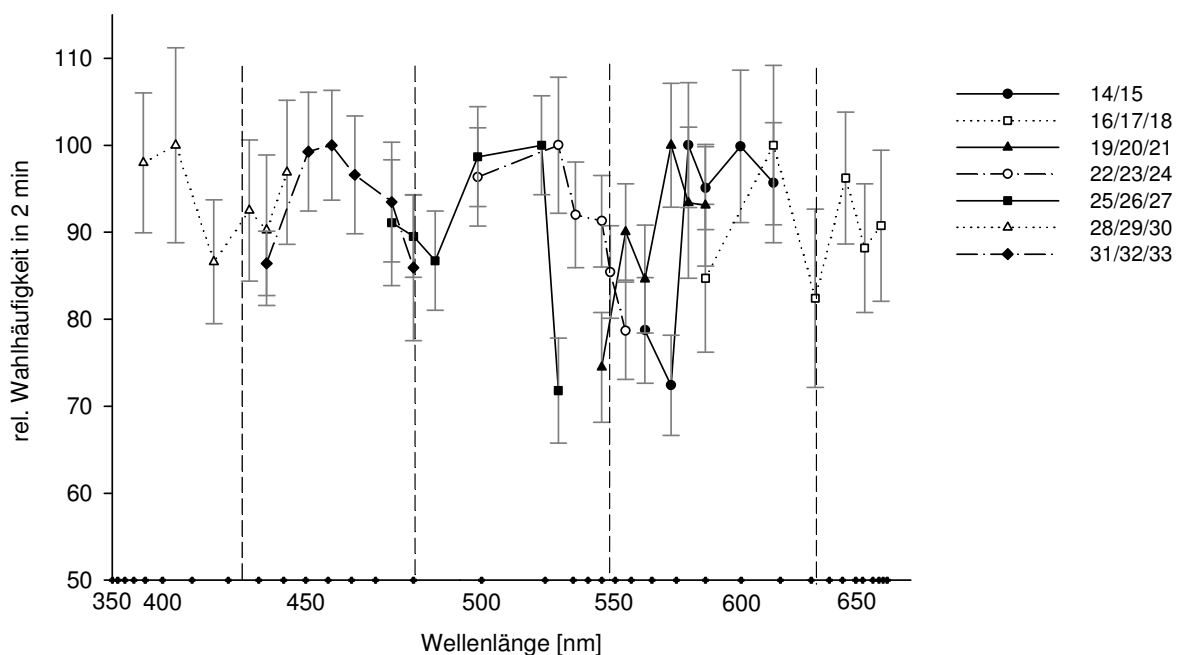


Abbildung 4.13: Gesamtbild der Generalisierungsergebnisse aller Fischgruppen mit eingezeichneten Grenzen, welche die verschiedenen Bereiche des Spektrums teilen.

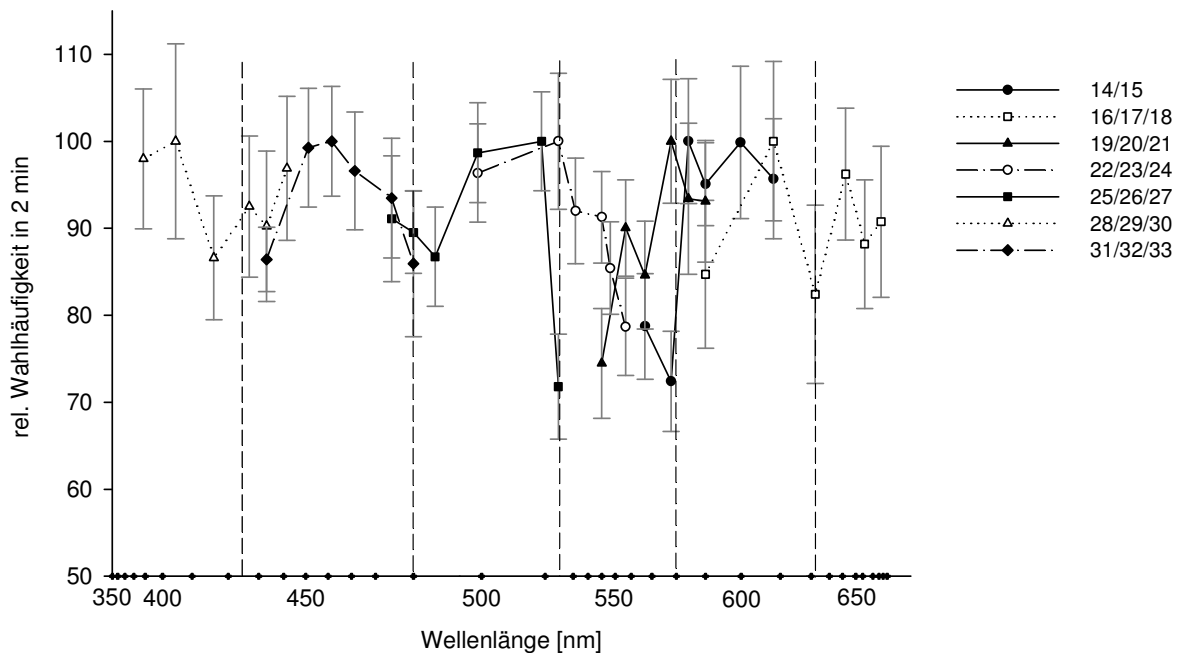


Abbildung 4.14: Gesamtbild der Generalisierungsergebnisse aller Fischgruppen mit eingezeichneten Grenzen, welche die verschiedenen Bereiche des Spektrums teilen. Das ausgedehnte Minimum bei 515 nm bis 580 nm wird hier als eigener Abschnitt definiert.

Da das Minimum bei 622 nm nur auf einem einzigen Wert bei einer Fischgruppe beruht und die Wahlhäufigkeit bei der folgenden Wellenlänge 641 nm bereits wieder höher liegt, entspricht dies vielleicht nicht einer tatsächlichen Grenze, sie könnte weiter im Langwelligen verschoben liegen oder es könnte überhaupt keine Grenze mehr auftreten. Dafür könnte auch der sehr große Standardfehler bei 622 nm sprechen. Trotzdem wurde hier erstmal von einer Grenze bei 622 nm ausgegangen.

4.2.6 Transfertest der Fische 14 und 15 nach Dressur auf 569 – 608 nm

Für die Annahme einer Grenze bei 622 nm spricht auch das Ergebnis des in Abschnitt 3.2 beschriebenen Experiments: Von den sieben Fischgruppen, die auf sechs Wellenlängen dressiert waren, wurde für die erste Gruppe, die Fische 14 und 15, zusätzlich zum Generalisierungstest auch ein Transfertest durchgeführt. Dieser erfolgte nicht nur mit drei ausgewählten Wellenlängen, wie es bei den Versuchen mit zwei Dressurwellenlängen der Fall war, sondern es wurden mehrere Wellenlängen „unterhalb“ und „oberhalb“ des Dressurbereiches dafür ausgewählt.

Die Kurven in den Abbildungen 3.27 und 3.28, in denen die Einzelkurven im Bereich „unterhalb“ und „oberhalb“ des Dressurbereiches gezeigt sind, lassen eine deutliche Tendenz erkennen. Wenn eine Wellenlänge aus dem Kurzwelligen gegen eine im Langwelligen getestet wird, dann werden im Falle einer Dressur auf die Wellenlängen 569 nm, 576 nm, 584 nm, 590 nm, 599 nm und 608 nm, die längeren Transferwellenlängen deutlich seltener gewählt als die kürzeren Transferwellenlängen. Eine Ausnahme sind dabei die benachbarten Wellenlängen 622 nm und 630 nm bei Fisch 15.

Dies wird besonders deutlich in den Abbildungen mit den Mittelwertskurven jedes Fisches (Abbildung 3.29 und 3.30). Lässt man dann auch noch die direkt an den Dressurbereich angrenzenden Wellenlängen 555 nm und 622 nm weg (Kurve mit den schwarzen Kreisen), dann liegen alle kurzen Testwellenlängen oberhalb der 50 % Grenze (mit Ausnahme des Wertes bei 484 nm bei Fisch 15) und alle Testwellenlängen im Langwelligen unterhalb der 50 % Grenze (mit Ausnahme des Wertes 661 nm bei Fisch 14). Das heißt, dass kurze Testwellenlängen bevorzugt werden.

Da die Wellenlänge 661 nm bei Fisch 14 in allen Fällen einen starken Anstieg, bei einer sonst abfallenden Tendenz der Kurve zeigt, ist zu vermuten, dass hier evt. ein anderer Parameter als nur die Wellenlänge eine Rolle gespielt haben könnte. Eine mögliche Erklärung wäre eine nicht exakt eingestellte Helligkeit, was vor allem in diesem langwelligen Bereich eine große Auswirkung haben kann (NEUMEYER; 1984). Bei Fisch 15 ist dieses Phänomen zwar nicht so stark aufgetreten, aber in zwei Fällen (Kurve 484 nm und 523 nm) ist eine starke Abweichung vom übrigen Kurvenverlauf zu erkennen.

Die Bevorzugung der kurzwelligen Transferwellenlängen könnte darauf hindeuten, dass diese eine größere Ähnlichkeit mit den Wellenlängen des Dressurbereiches

haben als die im langwelligen Testbereich. Dies spricht dafür, dass die längeren Wellenlängen (> 640 nm) einer anderen Kategorie zugehören als die Wellenlängen um 600 nm.

4.2.7 Schlussfolgerung aus den Ergebnissen mit sechs Dressurwellenlängen

Der Vergleich der Generalisierungskurven mit den Zapfenabsorptionskurven zeigt, dass die Maxima der Generalisierungskurven zum Teil mit den Zapfenempfindlichkeitsmaxima übereinstimmen. Beim Goldfisch finden sich aber auch hohe Wahlhäufigkeiten in den Übergangsbereichen zwischen zwei Zapfen, in denen auch die Bereiche der besten Unterscheidungsfähigkeit liegen. Dies ist im Bereich um 500 nm und um 600 nm der Fall.

Für den Goldfisch sind folglich die „Farben“, welche z.T. in den Bereich der Zapfenabsorptionsmaxima und den Zapfenübergangsbereichen fallen, wichtig und vermutlich leichter zu lernen.

Eine Ausnahme bildet der Bereich 515 nm bis 580 nm. Hier liegt zwar das Absorptionsmaximum des M – Zapfens, trotzdem wurden hier die niedrigsten Wahlhäufigkeiten im gesamten untersuchten Wellenlängenbereich gefunden. Auf eine Sonderstellung dieses Wellenlängenabschnitts deutet auch der Vergleich mit der in diesem Bereich sehr schlechten Unterscheidungsfähigkeit des Goldfisches hin. Dies könnte, wie schon erwähnt, mit der „Farbe“ des Chlorophylls zusammenhängen und der Bedeutung von allen benachbarten Wellenlängen, die sich von diesen abheben.

Diese Ergebnisse berücksichtigend erscheint die Einteilung des Wellenlängenspektrums in sechs Abschnitte (Abbildung 4.14), welche evtl. Kategorien entsprechen, für sinnvoller als die Einteilung in fünf Kategorien (Abbildung 4.13). Somit wird also der Bereich 515 nm – 580 nm als eigener Abschnitt gewertet, obwohl dieser nicht durch ein Maximum, sondern ein Minimum der Wahlhäufigkeit repräsentiert wird.

4.3 Vergleich der Ergebnisse mit zwei und sechs Dressurwellenlängen

Im Folgenden soll versucht werden, die Ergebnisse aus den beiden Versuchsabschnitten, mit zwei und mit sechs Dressurwellenlängen, zusammenzufassen bzw. mögliche Zusammenhänge aufzudecken.

In der folgenden Abbildung 4.15 werden die Ergebnisse aus den Generalisierungstests mit zwei Dressurwellenlängen und mit sechs Dressurwellenlängen verglichen. Dazu wurden in die Abbildung mit den Bereichen von über 50 % Wahlhäufigkeit des Generalisierungstests mit zwei Dressurwellenlängen (entspricht der Abbildung 3.11) die Grenzen, die aus den Generalisierungskurven mit sechs Dressurwellenlängen ermittelt wurden, eingezeichnet.

Bei der Dressurwellenlänge 540 nm zeigen zwei Fische Wahlhäufigkeiten von $\geq 50\%$, die ziemlich genau in die eingezeichnete Kategorie von 515 nm – 580 nm passen. Ebenso fallen die Wahlen von $\geq 50\%$ nach Dressur auf die Wellenlänge 608 nm in die Kategorie, die von 580 nm bis 622 nm reicht. Bei den Dressurwellenlängen 540 nm und 501 nm enden die Bereiche von $\geq 50\%$ Wahlhäufigkeit jeweils im Langwelligen ebenfalls sehr nahe den Kategoriegrenzen bei 515 nm und 580 nm.

Da die Kategoriegrenzen sicherlich nicht auf eine bestimmte Wellenlänge festgelegt werden können und nur in etwa die Grenzbereiche aufzeigen sollen, sind gewisse Abweichungen zu erwarten.

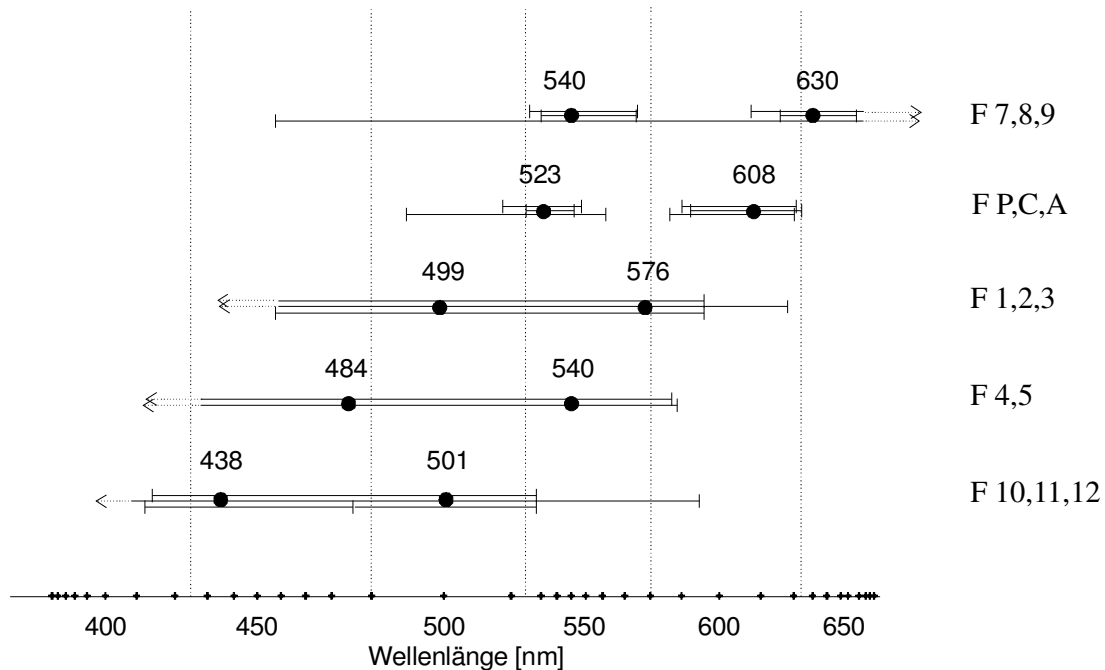


Abbildung 4.15: Zusammenfassende Darstellung der Bereiche, bei denen im Generalisierungstest mit zwei Dressurwellenlängen 50 % oder mehr Wahlhäufigkeit erreicht wurde (siehe Abbildung 3.11) zusammen mit den Grenzen, die im Generalisierungstest mit sechs Dressurwellenlängen ermittelt wurden, wenn der Bereich von 515 nm bis 580 nm als eigene Kategorie gewertet wird (Abbildung 4.10).

Wie bereits im Abschnitt 4.1.6 besprochen, ist es aufgrund der Generalisierungskurven mit zwei Dressurwellenlängen wahrscheinlich, dass es im langwelligen Bereich eine Kategorie gibt, die zwischen 540 nm und 608 nm liegt, da die Wellenlängen in diesem Bereich keine Ähnlichkeiten mit den Dressurwellenlängen haben und mit Wahlhäufigkeiten unter 50 % gewählt werden. Da diese Kategorie vermutlich nur sehr schmal ist, besteht die Möglichkeit, dass in den Versuchen mit sechs Dressurwellenlängen dieser enge Abschnitt nicht zum Vorschein kam. In der folgenden Abbildung 4.16 wurde eine Darstellung gewählt, in der von einer weiteren Kategorie in diesem genannten Bereich ausgegangen wird.

Diese zusätzliche Kategorie würde in mehreren Fällen die im Generalisierungstest ermittelten Bereiche von über 50 % erklären. Bei den Dressurwellenlängen 608 nm, 576 nm und 540 nm würden die Bereiche mit $\geq 50\%$ Wahlhäufigkeit sehr genau mit einer solchen Kategorie zwischen 580 und ca. 592 nm übereinstimmen und somit eine solche Einteilung zumindest möglich erscheinen lassen.

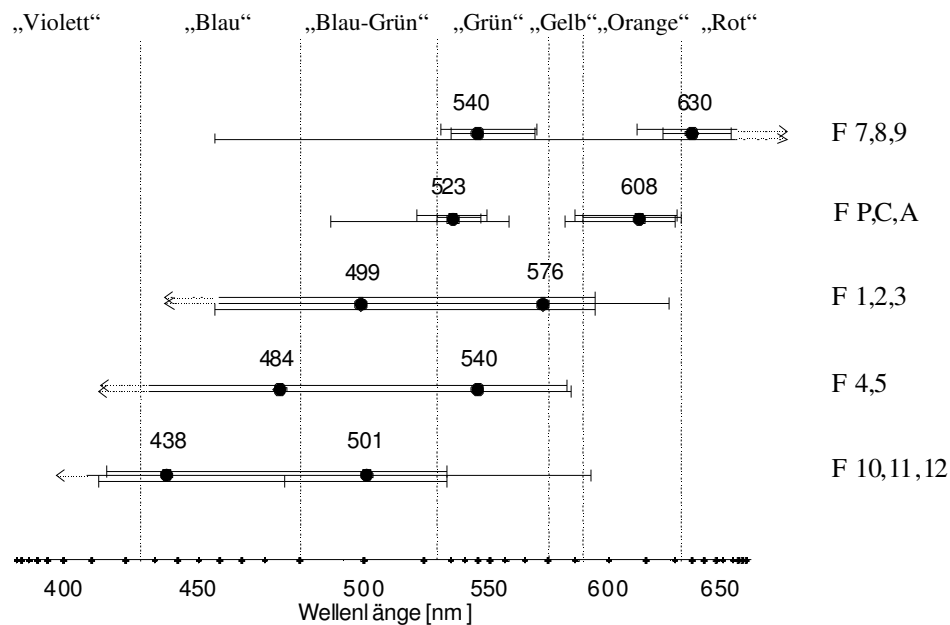


Abbildung 4.16: Zusammenfassende Darstellung der Bereiche, bei denen im Generalisierungstest mit zwei Dressurwellenlängen 50 % oder mehr Wahlhäufigkeit erreicht wurde zusammen mit den Grenzen, die im Generalisierungstest mit sechs Dressurwellenlängen ermittelt wurden, wenn der Bereich von 515 nm bis 580 nm als eigene Kategorie gewertet wird. Zusätzlich wird hier von einer weiteren Kategorie im Bereich von 580 nm bis ca. 592 nm ausgegangen.

In Abbildung 4.16 wurden zusätzlich noch die Farbnamen des Menschen eingetragen. Eine solche Bezeichnung der Kategorien des Goldfisches mit den Farbnamen des Menschen würden folgende Einteilung liefern: (1) UV bzw. Violett wäre der Bereich bis 425 nm (2) Blau würde den Bereich bis zur Grenze bei 490 nm repräsentieren (3) Blau-Grün (Türkis) ist der Bereich von 490 nm – 514 nm (4) Grün ist der Bereich von 515 nm bis 580 nm (5) Gelb würde dem Bereich 580 nm bis ca. 592 nm entsprechen (6) Orange der Bereich zwischen 592 nm und 622 nm und (7) Rot der Abschnitt ab 622 nm.

Nicht auszuschließen ist, dass es im UV- Bereich eine zusätzliche Kategorie gibt, welche den Bereich unterhalb von 425 nm noch einmal unterteilt. Dabei könnte es eine Kategorie UV und eine zweite Kategorie Violett, welche einen Übergang zwischen UV und Blau darstellt, geben.

Es stellt sich nun die Frage, ob man die Ergebnisse dieser beiden Dressur- experimente überhaupt vergleichen kann. Es ist möglich, dass in der Konstellation mit nur zwei Dressurwellenlängen immer noch ein zu genaues Lernen erfolgt ist, wie

es bereits für die Versuche mit einer Dressurwellenlänge angenommen wurde und dass in den durchgeführten Tests für die Goldfische keine Kategoriebildung von Nöten ist. Allerdings wären dann die ungleichmäßigen Wahlen der Fische im Transfer test schwierig zu deuten.

Ein weiterer Erklärungsversuch für die z.T. unterschiedlichen Ergebnisse könnte sein, dass Kategorien vermutlich nicht starr und für jeden Fisch gleich sind. Auch bei Menschen gibt es durchaus individuelle Abweichungen (ABRAMOV & GORDON, 1994; FÄNGEWISCH, 1999), wie man sie vermutlich auch für die Fische erwarten könnte. Da jede Dressuraufgabe von anderen Fischen erfüllt wurde, ist vermutlich gar keine exakte Übereinstimmung zu erwarten. Dabei wäre allerdings die Dressur eines Fisches nacheinander auf verschiedene Dressurwellenlängen kombinationen ebenfalls keine Lösung, da die vorherigen Dressuren das Ergebnis beeinflussen könnten. Des weiteren wurden die Grenzen der Kategorien frei in die Bereiche der Minima gelegt. Diese Darstellung wurde zum besseren Verständnis und Überblick gewählt. Ob man die Kategoriegrenzen so eng auf eine Wellenlänge festlegen darf, oder ob die Übergänge zwischen den Kategorien vielleicht größere Abschnitte einnehmen, lässt sich anhand der Ergebnisse nicht beurteilen.

5. Zusammenfassung

Der Goldfisch mit seinem tetrachromatischen Farbsehen kann nachweislich sehr viele Farben erkennen und unterscheiden. Doch wie werden diese Farben in der Wahrnehmung des Goldfisches organisiert? Wird jede Farbe absolut behandelt oder existieren Farbgruppen, so genannte Kategorien? Ziel dieser Arbeit war es, die Frage nach einer Kategorisierung zu klären und, sollte diese vorliegen, die Anzahl und Lage der Kategorien zu bestimmen.

Dazu wurden Fische auf zwei, bzw. sechs verschiedene monochromatische Lichter dressiert.

Bei den Versuchen mit zwei Dressurwellenlängen wurden diese so ausgewählt, dass sie aufgrund ihres Abstandes (56 nm – 90 nm) vermutlich in zwei verschiedenen Kategorien liegen. Im Transfertest wurden zwei Farbreize gezeigt, die beide nicht den Dressurwellenlängen entsprachen und von diesen etwa gleich unterscheidbar waren. Es traten dabei in drei der fünf Dressurkonstellationen unterschiedliche Wahlverteilungen auf, die nicht auf die Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit zurückzuführen sind. Auch im Generalisierungstest, bei dem alle Dressur- und Testwellenlängen für je 2 min präsentiert wurden, ergaben sich zum Teil von der Wellenlängenunterscheidungsfähigkeit abweichende Verteilungen. Die Generalisierungskurven unterschieden sich in manchen Bereichen deutlich von solchen, die nach Dressur auf nur eine Wellenlänge zu erwarten wären. Die Ergebnisse dieser Tests sprechen für eine Kategorisierung des Wellenlängenspektrums und zeigen deutlich, dass es zwischen 540 nm und 608 nm einen Bereich geben muss, der die Bereiche oberhalb von 608 nm und unterhalb von 540 nm voneinander trennt.

Bei den Versuchen mit sechs Dressurwellenlängen lernten die Fische einen ganzen Abschnitt des Spektrums, der so breit gewählt wurde, dass die Dressurwellenlängen in mehr als einer Kategorie liegen könnten. Trotz gleicher Behandlung aller sechs Wellenlängen während der Dressur zeigte der anschließende Generalisierungstest nicht nur Unterschiede zwischen Dressur- und angrenzenden Testwellenlängen, sondern auch Unterschiede in den Wahlhäufigkeiten der sechs Dressurwellenlängen. Die Generalisierungskurven aller Fischgruppen gemeinsam deckten dabei das Spektrum von 388 nm bis 685 nm ab. Definiert man die Bereiche mit den höchsten

Wahlhäufigkeiten als Mitte oder Prototypen einer Kategorie, so würde die Anzahl der Kategorien fünf entsprechen. Die Kategoriegrenzen würden dann vermutlich in den Minima zwischen den Bereichen mit der höchsten Wahlhäufigkeit liegen. Der Bereich zwischen 515 nm – 580 nm zeichnet sich durch besonders niedrige Wahlhäufigkeiten aus, die in einem solchen Ausmaß sonst nicht zu finden sind. Es könnte dabei sinnvoll sein, auch diesen Bereich als eigene Kategorie zu werten. Bezieht man außerdem noch die Ergebnisse der Dressur auf zwei Wellenlängen mit ein, so ergibt sich eine Einteilung des Wellenlängenspektrums des Goldfisches von 388 nm bis 685 nm in sieben Kategorien.

6. Literatur

ABRAMOV, I. und GORDON, J. (1994)

Color appearance: on seeing red--or yellow or green or blue. *Annual Review of Psychology*, 45, 451 - 485

BEARE, A.C. (1963)

Color-name as a function of wavelength. *American Journal of Psychology*, 76, 248 - 256

BEAUCHAMP, R.D. und ROWE, J.S. (1977)

Goldfish spectral sensitivity: a conditioning heart rate measure in restrained or curarized fish. *Vision Research*, 17, 617 - 624

BERLIN, B. und KAY, P. (1969)

Basic colour terms: their universality and evolution. Berkley, CA: University of California Press

BLOUGH, D.S. (1961)

The shape of some wavelength generalization gradients. *Journal of Experimental Analysis of Behavior*, 4, 31 - 40

BLOUGH, P.M. (1972)

Wavelength generalization and discrimination in the pigeon. *Perception and Psychophysics*, 12, 342 - 348

BORNSTEIN, M.H. (1987)

Perceptual categories in vision and audition. In: *Categorical Perception: the groundwork of cognition*. Ed. HARNAD, S., Cambridge University Press New York

-
- BORNSTEIN, M.H., KESSEN, W. und WEISKOPF, S. (1976)
Color vision and hue categorization in young human infants. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *3*, 115 - 129
- BOWMAKER, J.K., THORPE, A. und DOUGLAS, R.H. (1991)
Ultraviolet-sensitive cones in the goldfish. *Vision Research*, *31*, 349 - 352
- BOYNTON, R.M. und GORDON, J. (1965)
Bezold-Brücke hue shift measured by color-naming technique. *Journal of the Optical Society of America*, *55*, 78 - 86
- DÖRR, S. (1996)
Quantitative Untersuchungen zur Farbkonstanz beim Goldfisch. Dissertation
Universität Mainz
- DÖRR, S. und NEUMEYER, C. (1996)
The goldfish – a color constant animal. *Perception* *25*, 243 - 250
- DÖRR, S. und NEUMEYER, C. (1997)
Simultaneous color contrast in goldfish – a quantitative study. *Vision Research*, *37*,
1581 - 1593
- DÖRR, S. und NEUMEYER, C. (2000)
Color constancy in goldfish: the limits. *Journal of Comparative Physiology A*, *186*,
885 - 896
- DORSCH, F., HÄCKER, H. und STAPF, K.H. (Hsg.) (1998)
Dorsch Psychologisches Wörterbuch, Verlag Hans Huber - Bern, Göttingen, Toronto,
Seattle
- FÄNGEWISCH, C. (1999)
Experimente zur Kategorisierung von Spektralfarben beim Menschen.
Examensarbeit Universität Mainz

FRATZER, C., DÖRR, S. und NEUMEYER, C. (1994)

Wavelength discrimination of the goldfish in the ultraviolet spectral range. *Vision Research*, *34*, 1515 - 1520

FRISCH, K. von (1913)

Weitere Untersuchungen über den Farbensinn der Fische. *Zoologische Jahrbücher. Abteilung für allgemeine Zoologie und Physiologie der Tiere*, *34*, 43 - 68

FRISCH, K. von (1914)

Der Farbensinn und Formensinn der Biene. *Zoologische Jahrbücher. Abteilung für allgemeine Zoologie und Physiologie der Tiere*, *35*, 1 - 182

GOLDMAN, M., LANSON, R. und RIVERA, G. (1991)

Wavelength categorization by goldfish (*Carassius auratus*). *International Journal of Comparative Psychology*, *4*, 195 - 209

HAMBURGER, V. (1926)

Versuche über Komplementärfarben bei Ellritzen (*Phoxinus laevis*). *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, *4*, 286 - 304

HARNAD, S. (1987)

Psychophysical and cognitive aspects of categorical perception: A critical overview. In: *Categorical Perception: the groundwork of cognition*. Ed. HARNAD, S., Cambridge University Press New York

HÁROSI, F.I. und MacNICHOL jr, E.F. (1974)

Visual pigments of goldfish cones. Spectral properties and dichroism. *Journal of General Physiology*, *63*, 279 - 304

HAWRYSHYN, C.W. und BEAUCHAMP, R. (1985)

Ultraviolet photosensitivity in goldfish: an independent u.v. retinal mechanism. *Vision Research*, *25*, 11 - 20

HEIDER, E.R. (1972)

Universals in color naming and memory. *Journal of Experimental Psychology*, 93, 10 - 20

HESS, C. von (1912)

Untersuchungen zur Frage nach dem Vorkommen von Farbensinn bei Fischen. In: *Zoologische Jahrbücher*, 31, Physiol.

JONES, C.D., OSORIO, D. und BADDELEY, R.J. (2001)

Colour categorization by domestic chicks. *Proceedings of the Royal Society of London*, 268, 2077 - 2084

KANEKO, A. (1973)

Receptive field organization of bipolar and amacrine cells in the goldfish retina. *Journal of Physiology*, 235, 133 - 153

KAY, P., BERLIN, B., MERRIFIELD, W.R. und MAFFI, L. (1997)

Color naming across languages. In: *Color categories in thought and language*. Ed. HARDIN, C.L. und MAFFI, L., Cambridge: Cambridge University Press

KELBER, A., VOROBYEV, M. und OSORIO, D. (2003)

Animal colour vision – behavioural tests and physiological concepts. *Biological Reviews*, 78, 81 - 118

KITSCHMANN, M. (1999)

Verhaltensphysiologische Untersuchungen zur Kategorisierung der Spektralfarben beim Goldfisch (*Carassius auratus*) mit einer vergleichenden Studie am Farbensehen des Menschen. Dissertation Universität Mainz

KÜHN, A. (1927)

Über den Farbensinn der Biene. *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, 5, 762 - 800

LYTHGOE, J.N. (1979)

The ecology of vision. Clarendon Press, Oxford

MARKS, W.B. (1965)

Visual pigments of single goldfish cones. *Journal of Physiology*, 178, 14 - 32

MATSUZAWA, T. (1985)

Colour naming and classification in a chimpanzee (*Pan troglodytes*). *Journal of Human Evolution*, 14, 283 - 291

MÖRIKE, K.D. und BETZ, E. (1991)

Biologie des Menschen. Heidelberg : Quelle & Meyer

MUNTZ, W.R. und CRONLY-DILLON, J.R. (1966)

Color discrimination in goldfish. *Animal Behaviour*, 14, 351 - 355

NEUMEYER, C. (1984)

On spectral sensitivity in the goldfish. Evidence for neural interactions between different "cone mechanisms". *Vision Research*, 24, 1223 - 1231

NEUMEYER, C. (1985)

An ultraviolet receptor as fourth receptor type in goldfish colour vision. *Naturwissenschaften*, 72, 162 - 163

NEUMEYER, C. (1986)

Wavelength discrimination in the goldfish. *Journal of Comparative Physiology A*, 158, 203 - 213

NEUMEYER, C. (1992)

Tetrachromatic colour vision in goldfish: evidence from colour mixture experiments. *Journal of Comparative Physiology A*, 171, 639 - 649

-
- NEUMEYER, C., DÖRR, S., FRITSCH, J. und KARDELKY, C. (2002)
Colour constancy in goldfish and man: influence of surround size and lightness. *Perception*, *31*, 171 - 187
- PENZLIN, H. (1991)
Lehrbuch der Tierphysiologie. Jena: Fischer
- POWERS, M.K. und EASTER jr, S.S. (1978 a)
Absolute visual sensitivity of the goldfish. *Vision Research*, *18*, 1137 - 1147
- POWERS, M.K. und EASTER jr, S.S. (1978 b)
Wavelength discrimination by the goldfish near absolute visual threshold. *Vision Research*, *18*, 1149 - 1154
- RATNER, C. und McCARTHY, J. (1990)
Ecologically relevant stimuli and color memory. *Journal of General Psychology*, *117*, 369 - 377
- ROSCH, E.H. (1973)
Natural categories. *Cognitive Psychology*, *4*, 328 - 350
- SANDELL, J.H., GROSS, C.G. und BORNSTEIN, M.H. (1979)
Color categories in macaques. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, *93*, 626 - 635
- SCHAERER, S. und NEUMEYER, C. (1996)
Motion detection in goldfish investigated with the optomotor response is "Color Blind". *Vision Research*, *36*, 4025 - 4034
- SCHIEMENZ, F. (1924)
Über den Farbensinn der Fische. *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, *1*, 175 - 220

SCHWANZARA, S.A. (1967)

The visual pigments of freshwater fishes. *Vision Research*, 7, 121 - 148

WAGNER, H.G., MacNICHOL jr, E.F. und WOLBARSHT, M.L. (1960)

The response properties of single ganglion cells in the goldfish retina. *Journal of general Physiology*, 43, 45 - 62

WEHNER, R. und GEHRING, W. (1995)

Zoologie. Begr. von Alfred Kuehn. Thieme Stuttgart; New York

WESSELLS, M.G. (1994)

Kognitive Psychologie. UTB, E. Reinhardt Verlag, München, Basel

WOLFF, H. (1925)

Das Farbunterscheidungsvermögen der Ellritze. *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, 3, 279 - 329

WOOTEN, B. und MILLER, D.L. (1997)

The psychophysics of color. In: *Color categories in thought and language*. Ed. HARDIN, C.L. und MAFFI, L., Cambridge: Cambridge University Press

WRIGHT, A.A. und CUMMING, W.W. (1971)

Color-naming functions for the pigeon. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 15, 7 - 17

YAGER, D. (1967)

Behavioral measures and theoretical analysis of spectral sensitivity and spectral saturation in the goldfish, *Carassius auratus*. *Vision Research*, 7, 707 - 727

YAGER, D. (1968)

Behavioral measures of the spectral sensitivity of the dark-adapted goldfish. *Nature*, 220, 1052 - 1053

YARCZOWER, M. und BITTERMAN, M.E. (1965)

Stimulus generalization in the goldfish. In: Stimulus generalization. Ed. MOSTOFSKY, D.J., Stanford University Press, Stanford California

ZENTALL, T.R. und EDWARDS, C.A. (1984)

Categorical color coding by pigeons. *Animal Learning and Behavior*, 12, 249 - 255

ZERBOLIO jr, D.J. (1980)

Measurement of color preference in goldfish using a negative reinforcement Y-maze avoidance procedure. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 15, 128 - 130

ZERBOLIO jr, D.J. (1981)

Discriminated avoidance learning and reversal by goldfish in a shuttlebox using a linear presentation procedure. *Animal Learning and Behavior*, 9, 346 - 356

ZERBOLIO jr, D.J. (1985)

Categorical color coding in goldfish. *Animal Learning and Behavior*, 13, 269 - 273

Danksagung

Die Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt: Ne (215/10-3).

