Vermeidung von Vogelanprall an Glasflächen

Experimentelle Untersuchungen zur Wirksamkeit von Glas-Markierungen unter natürlichen Lichtbedingungen im Flugtunnel II

Martin Rössler

Biologische Station Hohenau-Ringelsdorf

Wolfgang Laube

Philipp Weihs

Universität f. Bodenkultur, Inst. f. Meteorologie

Hohenau a. d. March, März 2007

DANK

Konzeption und Bau des Flugtunnels II wurden durch ASFINAG und BMVIT finanziert. Wir danken Herrn DI Werner Kaufmann und Frau DI Viktoria Reiss-Enz für die Unterstützung des Projektes. Ohne den neuen Flugtunnel könnten die vielen offenen Fragen zur Wirksamkeit von bestimmten Glasscheiben-Markierungen nicht untersucht werden.

Die Autoren danken vorneweg:

DI Christoph Schauer	Methodenentwicklung, Versuchsbegleitung, Reflexion
Mag. Lidia Brandstätter	Leitung der Tunnelversuche
Dr. Erwin Nemeth	Statistik

Die Zusammenarbeit mit den Firmen, die mit der Errichtung des Tunnels beauftragt waren, verlief hervorragend. Dadurch war es möglich, rechtzeitig und ohne Anfangsschwierigkeiten mit den Versuchen zu beginnen. Allen voran ist Otmar Schweinberger für die Bauleitung und Gregor Gerlinger für die exakte Ausführung des Versuchstunnels zu danken. Mag. Barbara Pitschmann und Josef Schimkowitsch übernahmen die Feinarbeiten am Tunnel, also Einrichtungen zur Sicherheit der Versuchsvögel und die Installationen an der Tunnelrückwand. Vielen Dank an die wechselnden Teams der Vogelberingungsstation Hohenau-Ringelsdorf für die Bereitstellung der Vögel.

Herzlichen Dank an Prof. Kuno Kirschfeld (Tübingen, D), Prof. Daniel Klem (Allentown, PA), Dr. Daniel Osorio (Brighton, UK), Dr. H. Martin Schaefer (Freiburg, D), Prof. Wolfgang Schleidt (Wien) und Prof. Hans Winkler (Wien) für Diskussion und Unterstützung in wissenschaftlichen Fragen.

INHALT

1 EINLEITUNG ... 6

1.1 Grundsätzliche Aufgabenstellung ... 7

1.2 Rückblick ... 7

1.2.1 Flugtunnel I (2004 – 2005) ... 7

1.2.2 Ergebnisse der Versuche 2004 - 2005 ... 8

1.2.3 Methodische Erkenntnisse ... 8

1.3 Weiterentwicklung von Fragestellung und Methode ... 9

1.3.1 Evaluierung der bisherigen Methode ... 9

1.3.2 Neue Variablen - Licht und Kontrast ... 9

1.3.3 Neue Methode – wie viel Natur, wie viel Labor? ... 10

2 METHODE ... 13

2.1 Der Tunnel ... 13

2.1.1 Planung und Vorversuche ... 13

2.1.1.1 Maße und Geometrie des Versuchstunnels ... 13

2.1.1.2 Geeignete Spiegel (UV-Reflektanz) ... 16

2.1.2 Errichtung ... 17

2.2 Die Messungen ... 18

2.2.1 Messungen im Labor ... 18

2.2.1.1 Transmittanz der Scheiben ... 18

2.2.1.2 Reflektanz der Markierungen ... 18

2.2.2 Messung der Lichtverhältnisse während der Versuche ... 18

2.3 Geplante Untersuchungen ... 19

2.3.1 Markierte Scheiben ... 19

2.3.2 UV – Absorber in unmarkiertem Acryl ... 19

2.3.3 Der Glas – Luft – Versuch ... 19

2.4 Markierungen ... 20

2.4.1 Begründung der Auswahl ... 20

2.4.1.1 Wiederholungen der Versuche 2004/2005 im Flugtunnel II ... 20

2.4.1.2 Neue Testmarkierungen: Reduktion des Deckungsgrades ... 20

2.4.1.3 Neue Testmarkierungen: Vergleich schwarz - weiß ... 20

2.4.2 Vorstellung der Kandidaten ... 21

2.4.3 Reflektanz der Markierungen ... 22

2.5 Transmittanz der Versuchsscheiben ... 23

2.6 Herrschende Lichtverhältnisse bei den Versuchen ... 24

2.6.1 Lichtintensität der Globalstrahlung ... 24

2.6.2 Lichtintensität hinter den Versuchsscheiben ... 25

2.6.2.1 Lichtintensität und Tageszeit ... 25

2.6.2.2 Lichtintensität bei Sonne und Bewölkung ... 25

2.6.2.3 Zusammenhang zwischen Globalstrahlung und Lichtintensität im Scheibenhintergrund ... 25

2.7 Das Modell zur nachträglichen Ermittlung der Kontraste ... 27

2.8 Untersuchungszeitraum ... 28

2.9 Versuchsvögel ... 28

2.10 Vorversuche und Kontrollversuche ... 29

2.10.1 Vorversuche ... 29

2.10.2 Kontrollversuche ... 30

2.11 Datenauswertung ... 30

2.11.1 Videoauswertung ... 30

2.11.2 Ausgewertete und verworfene Daten ... 30

2.11.3 Statistische Methoden ... 31

3 ERGEBNISSE ... 32

3.1 Überblick über das Datenmaterial ... 32

3.2 Versuchsergebnisse ... 32

3.2.1 Ergebnisüberblick ... 32

3.2.2 Markierungen ... 33

3.2.3 UV-Absorber in unmarkiertem Acryl ... 33

3.2.4 Der Glas – Luft – Versuch ... 33

3.3 Versuchsergebnisse unter Berücksichtigung der Lichtverhältnisse ... 34

3.3.1 Einfluss der Globalstrahlung ... 34

3.3.2 Einfluss der Lichtintensität hinter den Scheiben ... 35

3.3.3 Einfluss direkter Sonnenstrahlung ... 36

4 DISKUSSION ... 37

4.1 Methodische Integrität der Versuche ... 37

4.1.1 Gleichverteilung der Versuchsscheiben auf linke und rechte Seite ... 37

4.1.2 Gleichverteilung der Anflüge auf linke und rechte Seite ... 38

4.1.3 Gleichverteilung der „richtigen“ und „Fehl“-Entscheidungen auf linke und rechte Seite ... 38

4.1.4 Methodische Integrität der Untersuchung ... 39

4.2 Diskussion der Versuchsergebnisse ... 39

4.2.1 Unmarkiertes Glas ist nicht sichtbar ... 39

4.2.2 Konstant gute Wirksamkeit von „Acryl horizontal“ (PLEXIGLAS SOUNDSTOP®) ... 39

4.2.3 Ein breites Mittelfeld zeigt keine Unterschiede ... 39

4.2.4 Lichtverhältnisse im Hintergrund geben den Ausschlag ... 40

4.2.5 Auf die Versuchsbedingungen kommt es an ... 40

4.3 Literaturanalyse zu Licht, Wahrnehmung und Verhalten ... 40

4.3.1 Intensität und Zusammensetzung des Lichtes ... 41

4.3.1.1 Berechnung der Lichtintensität ... 41

4.3.1.2 Radianz direkter Sonnenstrahlung und diffuser Strahlung ... 41

4.3.1.3 Zusammensetzung des Lichtes ... 42

4.3.1.4 Bedeutung von variablem Umgebungslicht für Farbe und Kontrast ... 44

4.3.2 Wahrnehmung und Verhalten ... 44

4.3.2.1 Sechs Photorezeptoren und Ölkugeln ... 44

4.3.2.2 Farbwahrnehmung ... 45

4.3.2.3 Die Bedeutung chromatischer Kontraste ... 47

4.3.2.4 Helligkeitssehen geschieht im langwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums ... 48

4.3.2.5 Die Bedeutung achromatischer Kontraste (Hell-Dunkel-Kontraste) ... 48

4.4 Konsequenzen aus theoretischen Überlegungen ... 49

4.4.1 Dichotomien des Sehens ... 49

4.4.2 Sackgasse Greifvogelsilhouetten ... 49

4.4.3 Sackgasse UV-Markierungen? ... 50

4.4.4 Gibt es wirksame Markierungen? ... 51

4.4.4.1 Was ist Wirksamkeit? ... 51

4.4.4.2 Signifikant besser als wirksam ... 51

4.4.5 Aktualisierte Empfehlungen ... 52

4.5 Die nächsten Schritte ... 52

4.5.1 Weitere Experimente ... 52

5 ZUSAMMENFASSUNG ... 54

6 LITERATUR ... 55

1 EINLEITUNG

Kollisionen mit Glasscheiben gehören für Vögel zu den bedeutendsten anthropogen bedingten Mortalitätsfaktoren (KLEM 1990). Kollisionen ereignen sich sowohl im Siedlungsraum, z. B. an Glasfassaden, als auch in offener Landschaft, z. B. entlang von Verkehrsachsen (Lärmschutzwände) etc. Sie betreffen Vögel unspezifisch, also unabhängig von Art, Alter oder Geschlecht. Markierungen von Glasflächen werden als Weg zur Vermeidung von Vogelanprall angesehen. Zur Prüfung und Steigerung der Wirksamkeit solcher Markierungen sind seriöse Untersuchungen im Schnittfeld Planung und Vogelschutz notwendig, die sowohl die ästhetischen Ansprüche der Nutzer und betroffenen Anwohner als auch die Forderungen des Vogelschutzes einbeziehen (vgl. RICHARZ 2001).

Abbildung 1: Ein neuer Versuchstunnel („Flugtunnel II“) in Hohenau-Ringelsdorf soll die Forschungen der Jahre 2004 und 2005 mit erweiterten Möglichkeiten fortführen und bessere Prognosen zur Wirksamkeit von vogelschlagmindernden Markierungen auf Glasflächen möglich machen. Flugtunnel II, hier nicht in Betrieb, Spiegel verhüllt.

Die Unwirksamkeit aufgeklebter Greifvogelsilhouetten ist mehrfach geprüft und bestätigt (z. B. KLEM 1990, TRYBUS 2003). Von BUER & REGNER (2002) angedachte Wirksamkeit für den Menschen unsichtbarer, für Vögel aber wahrnehmbarer UV-reflektierender Markierungen wurde von LEY (2004) geprüft und unter künstlicher Beleuchtung in einem Fall bestätigt. An der Biologischen Station Hohenau-Ringelsdorf (Niederösterreich) wird an Markierungen gearbeitet, die für das menschliche Auge sichtbar und wesentlich wirksamer sind (s. Kap. 4.4).

Die experimentellen Untersuchungen an der Biologischen Station Hohenau-Ringelsdorf laufen seit 2004. Sie sind an den Betrieb der Vogelberingungsstation gekoppelt (Kap. 1.2.1). Die Hohenauer Versuche werden in hohem Maße von Kontrollversuchen und Wiederholungsversuchen (Kap. 2.10) begleitet, die eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zeigen und eine zuverlässige Differenzierung zwischen einzelnen Markierungen erlauben, wo dies statistisch gerechtfertigt ist.

In den Jahren 2004 und 2005 standen Form, Dichte, Größe und Deckungsgrad[1] einer Markierung im Vordergrund. Für die komplexeren Fragestellungen nach der Wirkung von Licht und Kontrast waren ein neues Konzept und eine neue Versuchsanlage erforderlich. Dementsprechend wurde für das Jahr 2006 ein neues Untersuchungsdesign entwickelt und der Versuch auf Basis der bisherigen Ergebnisse erweitert. Dazu waren Bau und Konzeption eines neuen drehbaren Flugtunnels mit seitlicher Einspiegelung des Sonnenlichtes notwendig (Abb. 1). Der Auftrag dazu stammt von ASFINAG (Autobahnen- und Straßenfinanzierungs AG) und vom BMVIT (Bundesministerium für Verkehr, Infrastruktur und Technologie). Die Versuche wurden zwischen 2004 und 2006 von der Wiener Umweltanwaltschaft (WUA) getragen, ergänzt durch Aufträge der Stadt Wien (MA 29) und der Firma Para-Chemie.

Die Exploration neuer und die Optimierung wirksamer Markierungen (z. B. geringster Deckungsgrad, kleinste Objektgröße, etc.) wird auch in Zukunft notwendiges Anliegen unserer Versuche sein. Die Tatsache, dass sich in den Versuchen eine Markierung mit 2mm breiten Streifen und einem Deckungsgrad von nur 6,7% als wirksam erwiesen hat (Acryl horizontal), zeigt, dass möglicherweise ein großer Spielraum besteht, die eventuell störende Sichtbarkeit von Markierungen zu reduzieren (RÖSSLER 2005).

1.1 Grundsätzliche Aufgabenstellung

Die Grundfrage ist: Werden bestimmte Markierungen von Vögeln wahrgenommen und wird dadurch für heranfliegende Vögel die Gefahr einer Kollision mit der Glasfläche signifikant vermindert?

Gesucht werden Markierungen mit

- möglichst hoher Verminderung von Kollisionen
- möglichst geringem Deckungsgrad
- möglichst geringen Herstellungskosten und langer Lebensdauer
- möglichst hoher öffentlicher Akzeptanz

Dieser Fragestellung soll experimentell unter wirklichkeitsnahen Lichtverhältnissen nachgegangen werden.

1.2 Rückblick

1.2.1 Flugtunnel I (2004 – 2005)

Das Hohenauer Konzept von 2004 geht von Synergien mit der Vogelberingung der Beringungsstation Hohenau-Ringelsdorf aus und sieht vor, Vögel in einem Versuchstunnel einem Wahlversuch zwischen markierten und unmarkierten Scheiben zu unterziehen. Der erste Versuchstunnel, „Flugtunnel I“, mit einer Länge von 7,50m befand sich im Freiland neben der Beringungsstation. Er ist in RÖSSLER & ZUNA-KRATKY (2004) ausführlich beschrieben.

[1] Deckungsgrad: Anteil beklebter Fläche an der Gesamtfläche einer Scheibe. Z. B.: Zwei Streifen, 1cm breit, 100cm lang (200cm²) auf einer Scheibe 50cm breit, 100cm lang (5.000cm²): Deckungsgrad 4%.

Grundkonzept:

- Tendenz von Vögeln aus einem dunklen Raum ins Licht zu fliegen (Attraktor Licht)
- Hohe Effizienz bei Kombination aus Netzfang (360m² Japannetz) und Versuchen auf 1m² Glasfläche (auswechselbare Versuchsscheiben)
- Begrenzte Zahl von Variablen, große Stichprobenhäufigkeit, statistisch erfassbare Unterschiede zwischen Markierungen
- Keine Kollisionen, keine Todesopfer, Vögel werden von Japannetz vor Kollision abgefangen
- Vollständige Videodokumentation aller Versuchsflüge
- Günstiger Untersuchungszeitraum: Juli / August – nach der Brutzeit, stärkstes Vogelaufkommen
- 1.000 Vögel pro Jahr → 10 Versuchsanordnungen pro Jahr (n > 90)

Im Flugtunnel I entsprachen die Beleuchtungsverhältnisse der Versuchsscheiben nicht denen des Freilandes. Dieser Umstand war zunächst von nachrangiger Bedeutung, denn es mussten zunächst prinzipielle Muster visueller Wahrnehmung und daran gekoppelten Verhaltens getestet werden.

1.2.2 Ergebnisse der Versuche 2004 - 2005

Im Flugtunnel I wurden 13 Markierungen in 1.996 Experimenten untersucht (RÖSSLER & ZUNA-KRATKY 2004, RÖSSLER 2005).

- Eine Markierung erwies sich als unwirksam.
- Zwölf Markierungen mit Deckungsgraden zwischen 6,7% und 25% erwiesen sich als wirksam.
- Deckungsgrad und Effizienz standen nicht in zwingendem Zusammenhang.
- Fünf Markierungen mit Deckungsgraden <20% wurden in mehr als 90% der Experimente erkannt und vermieden.
- Drei Markierungen mit Deckungsgraden <20% wurden in mehr als 95% der Experimente erkannt und vermieden.
- Horizontale Streifen im Abstand von 10cm waren signifikant weniger wirksam als vertikale Streifen im Abstand 10cm.
- Eine horizontale Markierung mit 2mm breiten schwarzen Streifen (Abstand 2,8cm, Deckungsgrad 6,7%) erwies sich als wirksam.
- Eine Siebdruck-Markierung mit 25% Deckungsgrad war weniger wirksam als Klebefolien-Markierungen mit 16 bis 27% Deckungsgrad.

1.2.3 Methodische Erkenntnisse

- Die Ergebnisse mit einer in beiden Jahren (2004, 2005) untersuchten Markierung zeigen, dass Ergebnisse wiederholbar sind und eine Stichprobe mit ca. 100 Vögeln ausreichend ist.

- Video-Dokumentation ist unerlässlich (vgl. RÖSSLER 2005 und Kap. 2.11).

- Tageszeitliche Aktivität der Vögel: 50% der Vögel stehen zwischen 5:00 und 9:00 Uhr für Experimente zur Verfügung; da Vogelaktivität – Fangerfolg – Experimente in engem zeitlichen Zusam-

menhang stehen, ergibt sich automatisch, dass die Experimente zu den wichtigsten Tageszeiten unter den dafür repräsentativen tageszeitlichen Lichtverhältnissen stattfinden.

- Der Sonnenstand beeinflusst die Versuche, weshalb direkter Einfluss der Sonnenstrahlung ausgeschaltet werden oder das Sonnenlicht immer aus der selben Richtung kommen muss.

1.3 Weiterentwicklung von Fragestellung und Methode

1.3.1 Evaluierung der bisherigen Methode

In den Jahren 2004 und 2005 galt die Aufmerksamkeit ausschließlich der Form (Größe, Anordnung, Deckungsgrad, etc.) einzelner Markierungen. Mit den Versuchsergebnissen konnten erstmals innerhalb sehr ähnlicher Markierungen statistisch gesicherte Unterschiede gefunden werden. Ab Sommer 2005 wurden aber neue Überlegungen zur Verbesserung der Untersuchungsmethode angestellt. Es wurden verschiedene Elemente der Untersuchungsmethode evaluiert. Außer Zweifel standen die Prinzipien:

- Wahlversuch
- Versuchstunnel
- Wildvögel, einmaliger Flug
- Zufällige Reihung der Markierungen
- Zufällige Anordnung der markierten Scheibe links bzw. rechts
- Wechsel der Versuchsscheiben nach jeweils drei Versuchen
- Stichprobe n = +/-90
- Videodokumentation

1.3.2 Neue Variablen - Licht und Kontrast

Die bisher vernachlässigte Komponente war der im Flugtunnel I vermutlich unnatürlich hohe Kontrast zum Hintergrund, der durch Tunnelfinsternis auf der Seite des Vogels und Tageshelligkeit im Hintergrund der Scheiben nicht der Freilandsituation entspricht. Die Überlegungen zur Weiterentwicklung der Methode mussten also dieses Problem umgehen. Zur Abschätzung der wirksamen Variablen wurden die Physik des Lichtes, das derzeitige Wissen über optische Sinnesleistungen der Vögel und Verhaltensfragen einbezogen.

Je besser eine gefährliche Glasfläche zum natürlichen Lebensraum kontrastiert und warnende Signale setzt, desto geringer sollte das Kollisionsrisiko für Vögel sein. Evolutionsbiologisch haben sich in der Natur zahlreiche optische Beziehungen, z. B. zwischen Räubern und Beute, zwischen potenziellen Geschlechtspartnern, zwischen Blüten und Bestäubern und zwischen Früchten und deren Verteilern entwickelt (Kap. 4.3.2). Es sind selektiv optische Systeme entstanden, die in vielen Fällen auf Kontrastwirkung beruhen.

Folgende Variablen sind für Kontrastwirkungen der Glasflächen entscheidend:

- Optische Eigenschaften der Markierung
- Optische Eigenschaften der Glasflächen
- Lichtverhältnisse vor und hinter den Scheiben

Mit einem neuen Flugtunnel sollte es möglich werden, die entscheidenden physikalisch-optischen Faktoren und deren Variabilität einzubeziehen. Entscheidend dafür sind:

- Beleuchtung der Versuchsscheiben auf der dem Vogel zugewandten Seite
- Messungen der optischen Eigenschaften von Markierung und Glasflächen
- Erfassung und Modellierung der Lichtverhältnisse während der Versuche

1.3.3 Neue Methode – wie viel Natur, wie viel Labor?

Zur Diskussion stand, wie sehr der Versuch vom „seminatürlichen Versuchsdesign“ in eine zunehmend artifizielle Laborsituation umzubauen sei, bzw. wie einige spezielle Anforderungen bei Beibehaltung des „seminatürlichen Ansatzes“ im Freiland zu bewerkstelligen wären. Vor allem die Entscheidungen:

- künstliches oder natürliches Licht
- künstlicher oder natürlicher Hintergrund

sind sehr schwer zu treffen. Bei der Entscheidung zwischen künstlicher Beleuchtung und natürlichem Licht wurden verschiedene Kriterien aufgestellt und beide Varianten geprüft (Tab. 1). Zu berücksichtigen sind auch spezielle Rahmenbedingungen, z. B. dass die Beringungsstation nicht an das Stromnetz angebunden ist. Bei der Wahl des Hintergrundes erleichtern sehr günstige Voraussetzungen homogener Vegetation die Wahl.

Tabelle 1: Kriterien für die Wahl der Lichtquelle, die Vor- und Nachteile künstlicher und natürlicher Beleuchtung und die konzeptionellen Konsequenzen für den Flugtunnel II.

Kriterium	**Künstliches Licht**	**Tageslicht**
keine störenden Lichter im Flugtunnel	mögliche Reflexionen durch Punktleuchten problematisch, Lampen müssen seitlich der Scheiben angeordnet sein	möglich, wenn Scheiben vor Tunnel montiert werden und Sonnenlicht eingespiegelt wird
pulsationsfreie Beleuchtung zur Vermeidung von unnatürlichen stroboskopischen Effekten an der Markierung	problematisch; 50 Hz oder hoch frequent durch Lichtbogen bei Leuchtstofflampen, für Glühlampen und LED möglich	ja
paralleler Lichteinfall	nur mit großem optischen Aufwand (Parabolpiegel oder Linsensysteme)	ja
symmetrischer Lichteinfall	ja	ja, wenn Tunnel drehbar
gleichmäßige Ausleuchtung der Scheiben	möglich, hoher Aufwand	für direktes Sonnenlicht herstellbar, für diffuses Licht abhängig von Horizont
schlagschattenfreier Lichteinfall	ja	ja, wenn direkter Sonnenlichteinfall auf die Scheiben für jeden Sonnenstand ausgeschlossen werden kann (Sonnenblenden)
Spektrale Zusammensetzung des Lichtes identisch natürlichem Licht ab 350nm	?	ja, wenn Spiegel UV-A-Licht reflektieren (Chrom-Oberflächenspiegel?, UV-A-Durchlässigkeit von verwendetem Glas?)
Scheibenhintergrund	notwendigerweise künstlich, da sonst störende Variable; Beleuchtung entsprechend Scheibenvordergrund; Attraktor möglicherweise schwach; vollständige Einhausung erfordert	entweder künstlich (Attraktor möglicherweise schwach, Schatten bei niederen Sonnenständen durch Tunnel) oder natürliche Vegetation (Attraktor bekannt, stark, Kontinuität zu 2004-2005 gegeben, durch Drehbarkeit des Tunnels konstanter Einfallswinkel des Lichtes)

Windstabilität und Vibrationsfreiheit	ja	ja, bei solider Bauweise (Verankerung des drehbaren Tunnels und Verspreizung der hohen Spiegel)
Erfassung der Variablen (abhängig von beabsichtigter Genauigkeit: geringe Toleranz bei künstlicher Simulation, höher bei „seminatürlichen“ Versuchsbedingungen)	Kontrolle der spektralen Lichtzusammensetzung, sehr aufwändig	ständige Messung der Lichtintensität (Pyranometer) mit Speicherung auf Datenlogger; für jeden Versuchsflug verfügbare Werte; Beleuchtung in einem Modell nachrechenbar
Bedienbarkeit	komplex: Versorgung des Stromaggregats, Vorwärmen der Lampen, Warten der elektrischen Anlage, Kontrollmessungen des emittierten Lichtspektrums	einfach: Nachbewegen des Tunnels entsprechend Sonnenstand, Abdecken der Spiegel während der Stehzeiten, um Vogelkollisionen zu vermeiden, regelmäßiges Auslesen des Dataloggers (s.o.)
Energieversorgung	Stromaggregat für Beleuchtung	nur Kleingeräte mit Akkus
Kosten	hoch und laufende Kosten	hoch, aber einmalig

Eine bestimmte Beleuchtungssituation setzt sich aus einer großen Zahl von Variablen zusammen (direkte Sonnenstrahlung, diffuse Himmelsstrahlung, von Boden, Vegetation und Objekten der Umgebung reflektierte Strahlung, Kap. 4.3.1) und ist abhängig von der Exposition der Scheibe, vom Sonnenstand, der Witterung und dem Ambiente. Die Versuchung liegt nahe, mittels elektrischer Beleuchtung von bekannter konstanter Lichtstärke und spektraler Zusammensetzung eine bestimmte Lichtsituation zu simulieren. Aber selbst bei vollständiger Ausreizung der derzeit zur Verfügung stehenden Technik ergeben sich bei elektrischer Beleuchtung Probleme (vgl. Tab.1).

- Lichtstrahlen ausgehend von Lichtquellen in endlicher Entfernung treffen nicht parallel auf und führen dementsprechend zu Gradienten der Lichtintensität (Lambertsches Cosinus Gesetz)[2].
- Reflexionen der Punktquellen in Flugrichtung des Vogels. Um diese zu vermeiden, muss das Licht von der Seite her kommen. Aus der Tunnelgeometrie und den möglichen Flugwegen der Vögel ergeben sich für Punkte in der Nähe der Scheibenränder Einfallswinkel von ca. 35°, und für Punkte die von den Rändern entfernt, also „in der Mitte der Scheibe“, liegen, Einfallswinkel <10°.
- Sowohl mit Glühlampen als auch mit Leuchtstoffröhren oder LEDs lässt sich eine der landläufigen Erwartung entsprechende Simulation des Tageslichtes nicht herstellen. Hohe und vor allem konstante Leistung der Stromversorgung ist im Freiland (Stromaggregat) schwer herzustellen, die Lichtabgabe der Beleuchtungskörper schwankt mit der Betriebstemperatur der Beleuchtungskörper (müssten durchgehend in Betrieb sein) und unterliegt einer Alterung (v. a. LED).
- Bei definierter Beleuchtung des Vordergrundes der Scheiben muss zur Bildung von Kontrastklassen auch der Hintergrund der Scheiben klar definiert beleuchtet sein. Dies würde vollständige Einhausung bedeuten, zur Abkoppelung von Tageslicht und Vegetation führen und neue Fragen zur Umlegbarkeit auf natürliche Verhältnisse aufwerfen.

► Alles in allem lässt sich mit künstlicher Beleuchtung eine klar zu definierende und auf Freilandbedingungen umzulegende Beleuchtungssituation nicht in gewünschtem Umfang herstellen. Daher wurde der Ansatz „künstliche

[2] Lambertsches Cosinus Gesetz: Beziehung zwischen Lichtintensität und Einfallswinkel. Die Lichtintensität nimmt mit zunehmendem Cosinus des Einfallswinkels ab. Je flacher der Einfallswinkel, desto geringer die Strahlendichte und die Lichtintensität; vgl. 4.3.1.1.

Beleuchtung“ nach einigen Experimenten verworfen. Aus ähnlichen Gründen, nämlich dass die Vorteile nur scheinbar überwiegen, wurde auf einen künstlichen Hintergrund in einheitlichem Grau verzichtet.

Die Variabilität von Licht und Hintergrund wurde also bewusst in Kauf genommen und der Zufall des natürlichen Geschehens als „natürliche Verhältnisse“ subsumiert. Dies muss bei der Auswertung der Ergebnisse bewusst bleiben. Viele der Einflussgrößen sind allerdings messbar und dokumentierbar und können über ein Modell (Kap.2.7) für die Zeitpunkte einzelner Experimente nachvollzogen werden.

2 METHODE

2.1 Der Tunnel

2.1.1 Planung und Vorversuche

Während der Versuche 2005 entstanden erste Ansätze und Skizzen zur neuen Versuchsanordnung. Ab Dezember 2005 konkretisierten sich die Konzepte durch die Kooperation zwischen Biologischer Station Hohenau-Ringelsdorf und dem Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur. Praktische Erfahrung mit dem spezifischen Versuchsablauf und konkrete Vorstellungen über geeignete Versuchsbedingungen verschmolzen mit dem Fachwissen über Strahlung, Zusammensetzung des Lichtes und Messung und Interpretation der physikalischen Parameter.

2.1.1.1 Maße und Geometrie des Versuchstunnels

Die Grundmaße des neuen Versuchstunnels weichen nicht von jenen des Flugtunnels I ab, allerdings wurde statt des rechteckigen ein trapezförmiger Grundriss gewählt (s. u.). Die Maße sind: Länge 7,50m, Höhe 1,30m, Breite vorne (ohne Verkleidung) 1,25m, hinten 0,40m. Die Versuchsscheiben (0,50 x 1,00m) sind in einer Haltevorrichtung 0,30m vor dem Tunnel leicht auswechselbar montiert. Die Haltevorrichtung besteht aus einer Spanplatte, die so groß dimensioniert ist, dass Himmel und Vegetation aus dem Tunnelinneren nur durch die Versuchsscheiben zu sehen sind. Abhängig vom Flugweg kommen die Spiegel frühestens 20cm vor dem Auffangnetz (bei einer Geschwindigkeit von $5ms^{-1}$: 0,04s vor Kollision mit dem Netz) ins Blickfeld.

Der Tunnel ist in seinem Schwerpunkt auf einem Drehkranz horizontal drehbar gelagert und kann ohne Anstrengung manuell dem sich ändernden (Kompass-)Einfallswinkel der Sonne nachgeführt werden. Die nach hinten sich verjüngende Form (2,5°) bedingt eine Nachführtoleranz von 5°, etwa 20 Minuten. In dieser Zeitspanne muss der Tunnel nicht nachgeführt werden. Bis zu einer Sonnenhöhe von 50° trifft direktes Sonnenlicht (sofern vorhanden) zu jeder Tageszeit an jedem Punkt der Versuchsscheiben auf. Eine Sonnenblende über Tunnelkammer gewährleistet, dass direktes Sonnenlicht ausschließlich über die Spiegel auf die Scheiben gelangt und verhindert Schlagschatten auf den Markierungen.

Die Spiegelmaße (0,65m x 2,50m) errechnen sich aus dem Strahlengang des Lichtes, der Distanz zu den Scheiben, der Breite der Scheiben und dem kritischen Sonnenstand (50°). Der Winkel der Spiegel zur Ebene der Sonnenstrahlen beträgt 32°, der Aufprallwinkel auf den Scheiben dementsprechend 26°. Aus dem Lambertschen Cosinus Gesetz (Kap. 4.3.1.1) ergibt sich eine Beleuchtungsstärke von ca. 35% der Beleuchtungsstärke im Falle direkten Auftreffens. Das direkte, eingespiegelte Sonnenlicht hat an jeder Stelle der (markierten) Scheibe die selbe Beleuchtungsstärke.

Folgende Überlegungen und Versuche gingen der Ausführung des Tunnels voran:

- Modellversuche zu den geometrischen Verhältnissen bei Einspiegelung des Sonnenlichtes: Ein Tunnelmodell wurde mit einfachen Mitteln nachgebaut und der Sonnengang in einem Hörsaal mit einer starken Lichtquelle simuliert (Abb. 2). So wurde die Lichtausbeute unter verschiedenen Spiegelanordnungen und –größen gemessen. Als die entscheidenden Faktoren bekannt waren, wurden Berechnungen zu Position, Größe und Winkel der Spiegel durchgeführt. Abb. 3 zeigt die Ausführung in der Fertigungshalle.

- Ein Experiment im Flugtunnel dauert wenige Sekunden, in denen der an helles Licht adaptierte Vogel aus einer verdunkelten Startröhre nach vorne zum Licht startet, sich für die Flucht in Richtung der linken oder rechten Scheibe, also einer markierten oder unmarkierten Scheibe, entscheidet und von einem Netz aufgefangen wird. Da das Netz bis zu 30cm nachgibt, dürfen die Glasscheiben nicht weniger als 30cm vom Netz entfernt sein, da sonst Lebensgefahr für für den Vogel besteht. Eine Distanz von mehr als 40cm ist bei einer Größe der Versuchsscheiben von 50 x 100cm ungünstig, da die Scheiben dann nicht mehr das Sichtfeld des Vogels dominieren. Der Abstand zwischen Tunnel und Versuchsscheiben bestimmt die Menge und die Verteilung des eindringenden diffusen Lichtes von Himmel und Vegetation. Je näher die Scheiben am Tunnel, desto geringer die Ausbeute diffuser Strahlung und desto geringer die Beleuchtung der Scheiben bei Fehlen direkter Sonneneinstrahlung bei bewölkten Verhältnissen.

- Während direktes Sonnenlicht über die Spiegel an jeden Punkt der Versuchsscheiben gleichmäßig eingespiegelt wird, ist die Versorgung mit diffusem Licht abhängig davon, wie viel Himmel von verschiedenen Punkten auf der Scheibe zu sehen ist (vgl. Abb. 4). Je größer der Abstand zwischen Tunnel und Versuchsscheiben desto höher ist die Lichtintensität bei Verhältnissen ohne starke Sonneneinstrahlung.

Abbildung 2: Im Labor wurde die Eignung von Spiegeln in vereinfachten Versuchen getestet und ein günstiger Strahlengang ermittelt.

Abbildung 3: Vom Modell zur Verwirklichung: hier die Spiegel (0,65m x 2,50m) am fast fertiggestellten Versuchstunnel in der Werkshalle.

Bei der Wahl des Abstandes zwischen Tunnel und Glasscheiben ist folgendes zu berücksichtigen:

- Je größer der Abstand zwischen Scheiben und Tunnel, desto größer kann der Winkel gewählt werden, mit dem das Sonnenlicht auf die Versuchsscheiben auftrifft, desto breiter und höher müssen aber die Spiegel gewählt werden.

- Je näher die Scheiben am Tunnel sind, desto schräger muss das direkte Sonnenlicht an die Scheiben herangeführt werden, desto geringer ist die Lichtintensität infolge des Lambertschen Cosinus Gesetzes und desto geringer ist der Einfall diffuser Strahlung.

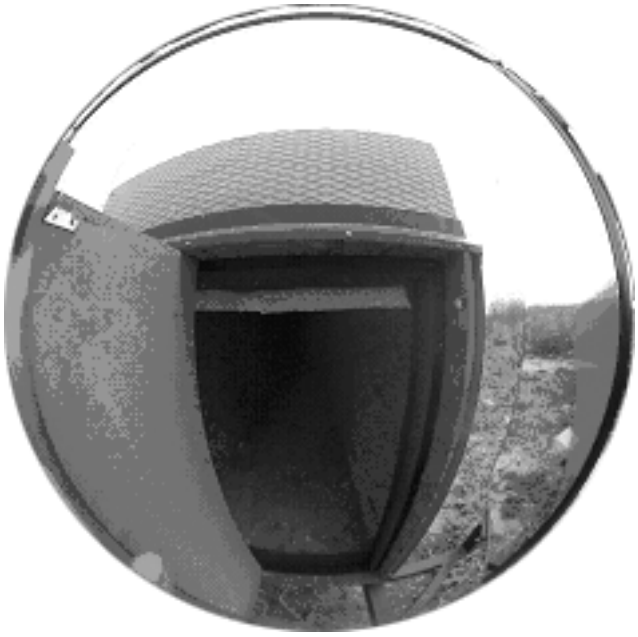

Abbildung 4: Fischaugen-Aufnahme von der Ebene der Glasscheiben aus. Links: Trennwand zwischen den Versuchsscheiben, rechts: Spiegel, an leichter Strukturdiskontinuität erkennbar.

Tabelle 2: Uhrzeiten für Über- und Unterschreitung des 50°-Sonnenstandes und Sonnenhöchststand für die Beringungsstation Hohenau-Ringelsdorf, 2006.

Datum	Sonnenstand 50° wird erreicht		Sonnenhöchst-stand (°)
	aufsteigend	absteigend	
01.07.	10:20	15:35	64,5
08.07.	10:25	15:30	63,9
15.07.	10:30	15:25	62,9
22.07.	10:35	15:20	61,7
29.07.	10:45	15:10	60,1
05.08.	11:00	14:55	58,4
12.08.	11:10	14:40	56,3
19.08.	11:30	14:20	54,1
26.08.	12:00	13:50	51,8
31.08.	keine Überschreitung		50,0

Berücksichtigung der laufenden Änderungen des Sonnenstandes

- Zeitliche Beschränkungen in Folge Sonnenhöhe und Höhe der Spiegel: in der Planung des Tunnels wurde die maximale Arbeits-Sonnenhöhe mit 50° festgesetzt, um die Höhe der Spiegel mit 2,50m begrenzen zu können. Daraus ergeben sich zeitliche Einschränkungen. Tab.2 zeigt die kritischen Uhrzeiten und den Sonnenhöchststand zu verschiedenen Kalendertagen für Hohenau. Die zeitlichen Einschränkungen waren Anfang Juli fünf Stunden, Anfang August vier Stunden. Da erfahrungsgemäß 50% der Vögel vor 9:00 Uhr und nur sehr wenige um die Mittagszeit gefangen werden, konnte diese Einschränkung akzeptiert werden, ohne dass viele Experimente verloren gingen.

- Anzustreben war darüber hinaus eine gewisse Toleranz gegenüber der Bewegung der Sonne, die im Durchschnitt 15° pro Stunde zurücklegt. Damit die Spiegel bei geringer Sonnenhöhe nicht ständig in den Schatten des Tunnels gerieten, wurde der Tunnelgrundriss trapezförmig geplant.

2.1.1.2 Geeignete Spiegel (UV-Reflektanz)

Da UV-A-Strahlung (350 – 400nm) aus dem Sonnenlicht auf die Markierungen übertragen werden musste, wurde überlegt, ob verglaste Spiegel (wegen möglicher UV-Absorption) die Voraussetzungen erfüllen könnten, oder ob Oberflächenspiegel eingesetzt werden mussten. Da sich zunächst kein Hersteller von Oberflächenspiegeln fand, ließen wir bei Galvaniseuren Messingplatten verchromen und prüften die Reflexion verschiedener Qualitätsstufen und verglichen diese mit einem herkömmlichen Glasspiegel guter Qualität. Im letzten Augenblick erhielten wir noch eine Probe eines industriell gefertigten Spezialspiegels, über dessen Zusammensetzung uns aber nichts bekannt ist.

Die Ergebnisse der Doppelmonochromator-Messungen sind in Abb. 5 dargestellt. Die Kurven zeigen die spektrale Reflektanz der Spiegel gemessen in 10nm-Schritten in % direkt einfallenden Lichtes. (Zur Messmethode s. 2.2.1)

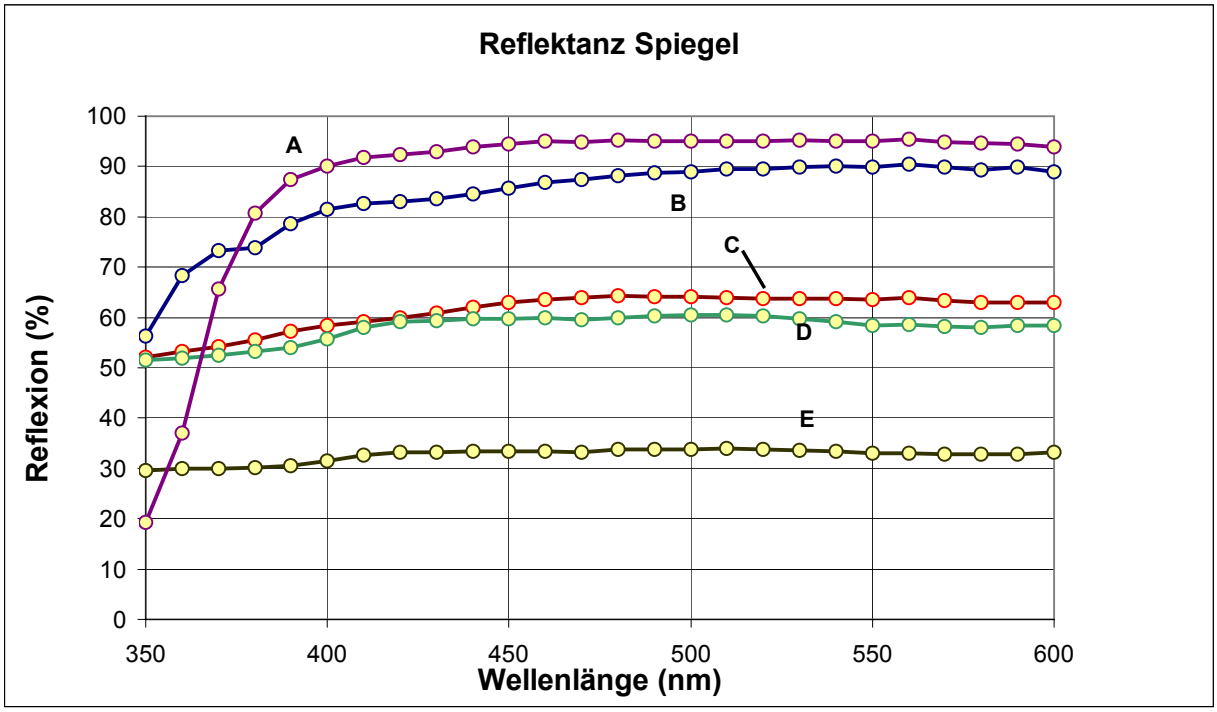

Abbildung 5: Reflektanz eines industriell gefertigten Oberflächenspiegels (A), eines industriell gefertigten Silberspiegels mit 3mm Floatglas (B) und drei verchromten Metallplatten verschiedener Schleifqualitäten (C, D, E). Der Oberflächenspiegel (A) reflektiert sichtbares Licht besser als der konventionelle Spiegel (B), ist im UV-A-Bereich dem konventionellen Spiegel (B) aber unterlegen. Die verchromten Platten (C-E) hatten insgesamt eine sehr unbefriedigende Reflektanz.

Die UV-Reflektanz betrug bei 350nm in 2 Fällen (A,E) weniger als 50%, die verchromten Platten lagen trotz erheblicher Unterschiede im Grad der Oberflächenbehandlung dicht beieinander mit 52% und der Silberspiegel erreichte trotz 3mm Floatglas 56%. Die Gesamtreflektanz ist bei den Chrom-Oberflächen (C-E) wesentlich geringer als bei A und B. Die Gesamtreflektanz des Spezialspiegels (A) ist mit mehr als 90% im sichtbaren Spektralbereich um

einiges besser als die des herkömmlichen Spiegels (B). Neben dem finanziellen Aspekt gab die geringe UV-Reflektanz von A den Ausschlag diesen auszuscheiden. Die Wahl fiel auf den herkömmlichen Glas-Silberspiegel (B).

2.1.2 Errichtung

Der Tunnel wurde durch die Fa. Otmar Schweinberger, Landmaschinen- und KFZ-Werkstätte, 2273 Niederabsdorf in der Werkshalle hergestellt. Nach Errichtung des Fundamentes, in dem ein Gerüst aus 1m langen Gewindestangen zur späteren Montage des Drehkranzes verankert wurde, wurde der Tunnel mit einem Tieflader zur Beringungsstation gebracht. Auf einer eigenen Achse montiert wurde der Tunnel mit einem Traktor zum Errichtungsplatz gezogen und schließlich mit der Hydraulik des Traktors genau auf den vorher horizontierten Drehkranz gesetzt, und dann mit diesem verschweißt.

Abbildung 6: Mit dem Tieflader wurde der Tunnel zur Beringungsstation gebracht .....

Abbildung 7: ....und auf dem genau horizontierten Drehkranz festgeschweißt.

Der Tunnel wurde *in time and budget* fertiggestellt, ohne dass irgendwelche Planungs-, Konstruktionsfehler oder andere Mängel festgestellt wurden, die nachträgliche Korrekturen erforderlich machten.

Tabelle 3: Arbeitsschritte bei Bau und Errichtung des Flugtunnels II.

Kalenderwoche	Arbeitsschritte
21. Woche	Zuschneiden der Platten, Zusammenstellen der Holzkonstruktion, Herstellen der Tragekonstruktion aus Formrohren.
22. Woche	Aufbauten für Spiegel und Trägerplatte für Versuchsscheiben, Einrichten der Spiegel.
23. Woche	Lieferung der Spiegel, Lackierarbeiten, Herstellung des Bauplatzes.
24. Woche	Fundament und Montage des Drehkranzes am Bauplatz, Kalibrierung der Pyranometer, Datalogger.
25. Woche	Errichtung des Tunnels: Anlieferung des Tunnels mit Tieflader, Verlegen des Tunnels zum Bauplatz auf eigener Achse, Einrichten des Drehkranzes und Horizontierung des Tunnels, Windabspannungen, Lichtmessungen, erste Flugversuche.
26. Woche	Blechverkleidung, Feinarbeiten (Sicherheit der Vögel, Startbox), Flugversuche, Standard-Lichtmessungen
27.Woche	Regulärer Betrieb der Anlage

2.2 Die Messungen

2.2.1 Messungen im Labor

Die optischen Messungen wurden im Lichtlabor des Instituts für Meteorologie der Universität für Bodenkultur in einem schwarz ausgekleideten Raum durchgeführt. Gemessen wurde mit einem Doppelmonochromator (Jobin Yvon HRD1, 650mm, mit Hamamatsu Photomultiplier Tube 8250 U) und einem Halogenlicht (H3 mit UV-durchlässigem Glaskolben) im Spektralbereich von 300nm bis 600nm in 10nm-Schritten.

2.2.1.1 Transmittanz der Scheiben

Für die Messungen der Transmittanz wurden die Glasscheiben in einer Entfernung von 60cm vom Eingangsschlitz des Monochromators normal zur optischen Achse des Monochromatoreingangs montiert. Die Lichtquelle befand sich in der optischen Achse hinter den Versuchsscheiben. Referenzmessungen wurden in derselben Anordnung ohne Glasscheiben durchgeführt.

2.2.1.2 Reflektanz der Markierungen

Für die Messungen der Reflektanz wurden die Glasscheiben in einer Entfernung von 15cm vom Eingangsschlitz des Monochromators vertikal montiert. Die Lichtquelle befand sich unterhalb des Prüfkörpers, das Licht wurde mit einem Oberflächenspiegel mit geringem Winkel zur optischen Achse des Monochromators auf die Scheiben gebracht. Als Referenzweiß wurde eine mit Magnesium-Oxid beschichtete Fläche gewählt. Die Beschichtung wurde unmittelbar vor den Messungen auf ein Trägerobjekt aufgedampft. Die Messwerte wurden in Beziehung zu den Reflexionswerten der Magnesium-Oxid-Referenz gesetzt.

2.2.2 Messung der Lichtverhältnisse während der Versuche

Abbildung 8: Pyranometer 1 zur Messung der Globalstrahlung

Abbildung 9: Pyranometer 2 zur Messung der Strahlung hinter den Versuchsscheiben.

Zur Messung der Strahlung wurden zwei Silicon Photovoltaic Sensoren (Environmental Measurement Systems EMS 11) am Tunnel montiert. Die Pyranometer messen die gesamt einfallende Energie der Strahlung zwischen 400 und 1.100nm. Ein Sensor (Pyranometer 1) befindet sich etwa 2m über dem Boden, die Messebene ist horizontal, gemessen werden diffuse Himmelsstrahlung und direkte Sonnenstrahlung (Abb. 8). Der zweite Sensor (Pyranometer 2) wurde mit vertikal ausgerichteter Messebene an der Rückseite der Scheibenhalterung etwa 2,5m über dem Boden montiert (Abb. 9). Mit diesem Sensor wird die Strahlung des Scheibenhintergrundes gemessen, zusammengesetzt aus diffuser Himmelsstrahlung und Reflexion der Vegetation und des Bodens. Die Messintervalle

betragen zehn Sekunden, die Messungen werden als Minutenmittelwerte auf einem Datenlogger EMS Mini Cube) registriert, und wurden während des Untersuchungszeitraumes wöchentlich abgefragt und auf externem PC gespeichert.

2.3 Geplante Untersuchungen

Für 2006 waren in einer ersten Tranche Versuche mit acht Markierungstypen geplant. Diese sollten Ende Juli abgeschlossen sein. Im August sollte eine zweite Tranche von vier bis sechs Markierungen untersucht werden, die nach den Ergebnissen der ersten Tranche gewählt werden sollten. Da die Fangzahlen im Juli außerhalb jeglicher Norm waren (50% des langjährigen Mittels, vgl. Kap. 2.9), zog sich die erste Tranche sehr weit in den August hinein. Die zweite Tranche musste entfallen.

2.3.1 Markierte Scheiben

Bei der Auswahl der Markierungen (Kap. 2.4.1) ging es darum,

- einzelne besonders wichtige oder repräsentative Markierungen, die bereits 2004 oder 2005 untersucht worden waren, unter den Bedingungen von Flugtunnel II erneut zu testen
- ausgehend von bereits untersuchten Markierungen den Deckungsgrad zu reduzieren (wie wenig ist zu wenig?)
- ausgehend von bereits untersuchten Markierungen schwarze, weiße und gemischte Typen zu untersuchen

2.3.2 UV – Absorber in unmarkiertem Acryl

Die Acrylscheibe „PLEXIGLAS SOUNDSTOP®“ (Markierung „Acryl horizontal“) war 2005 über die Erwartungen wirksam. Da sich Acrylglas optisch anders als Floatglas verhält (Kap.2.5), musste geprüft werden, ob die Wirksamkeit mit optischen Unterschieden zur Referenzscheibe zu erklären sei. Während Acrylglas eigentlich eine höhere UV-Transmittanz hat als Floatglas, ist das bei den untersuchten Scheiben nicht der Fall. Wie Abb. 12 zeigt, lässt diese Scheibe auf Grund von beigemengten UV-Absorbern, welche die Lebensdauer erhöhen sollen, Licht erst ab Wellenlängen von 390nm in wesentlichem Ausmaß durch. Um zu prüfen, ob die Wirksamkeit von PLEXIGLAS SOUNDSTOP® eventuell auf die optischen Eigenschaften des Materials zurückgeht, wurde die „Wirksamkeit“ einer identischen unmarkierten Scheibe geprüft.

2.3.3 Der Glas – Luft – Versuch

Es gibt noch keine experimentelle Grundlage für die Aussage, dass Vögel unmarkiertes Glas nicht wahrnehmen können. Im Flugtunnel I war diese Untersuchung nicht möglich, da die Versuchsscheiben den Tunnel am Vorderende abschlossen. Das Fehlen einer Scheibe hätte zu Diskontinuitäten der Akustik und der Luftströmungen geführt und den Versuch beeinträchtigt. Da beim Flugtunnel II zwischen Scheiben und Tunnel 30cm freier Luftraum ist, wurde dieser Versuch nun möglich. Die Versuche wurden gleich wie die anderen durchgeführt, statt markierten Scheiben, die in zufälliger Reihenfolge gewechselt oder in der Position (links, rechts) getauscht werden, blieb die Halterung in zufälliger Reihenfolge links oder rechts der unmarkierten Scheibe leer.

2.4 Markierungen

2.4.1 Begründung der Auswahl

Zur Unterscheidung der Faktoren „Form“ und „Licht“ wurden vier Versuche aus dem Jahr 2004 bzw. 2005 unter den neuen Versuchsbedingungen wiederholt (Kap. 2.4.1.1). Zur Weiterentwicklung von Markierungen entsprechend den Zielsetzungen (Kap. 1.1) wurden vier neue Markierungen untersucht. Dabei ging es darum zu prüfen, wie weit Deckungsgrad, Linienbreite etc. reduziert werden können (Kap. 2.4.1.2) bzw. welche Rolle Hell-Dunkel-Kontraste, insbesondere schwarze und weiße Markierungen spielen (Kap. 2.4.1.3).

2.4.1.1 Wiederholungen der Versuche 2004/2005 im Flugtunnel II

Acryl horizontal: Für die 2005 festgestellte hohe Effektivität der Acrylscheibe mit schwarzer Polyamidstreifen-Markierung galt ein Vorbehalt, da die Fäden im Inneren der Scheibe liegen und sich Spiegelungen negativ auswirken könnten. Die Einspiegelung von Tageslicht, kommt der Freilandsituation bereits so nahe, dass der Vergleich des Testergebnisses 2005 mit dem Testergebnis 2006 Rückschlüsse auf die Freilandsituation ermöglicht. Eine deutliche Verschlechterung (verglichen auch mit den anderen Testmarkierungen) würde den Vorbehalt stärken, ein eventuell konstantes Ergebnis, diesen ausräumen.

10 v: Die Markierung 10 v, welche 15 v und 10 h in den Versuchen 2004 überlegen war, ist nun „Universal-Referenz-Markierung“ unserer Versuche. Sie zeigte bei einer Wiederholung 2005, dass der Versuch mit der verwendeten Stichprobengröße zu wiederholbaren Ergebnissen führt. Diese gut untersuchte Markierung sollte also auch eine robuste Aussage darüber zulassen, welchen Einfluss Tageslicht auf die Wirksamkeit der Markierung hat. Erwartet wurde eine Verschlechterung im Vergleich zu 2004 und 2005 durch Verminderung der Kontraste.

15 v und 10 h: Die beiden Markierungen schnitten 2004 schlechter (schwacher Trend) bzw. signifikant schlechter ab als 10 v. Die Einbeziehung in die Tests sollte zeigen, ob sich an der Rangfolge und an den Verhältnissen zwischen den Markierungen etwas ändert und ob die Unterschiede deutlicher oder geringer werden, wenn Licht auf die Markierungen fällt.

2.4.1.2 Neue Testmarkierungen: Reduktion des Deckungsgrades

10 v // 5 weiß: Diese Markierung ist eine Reduktion der Markierung 10 v von 20mm breiten Streifen auf 5mm breite Streifen im Kantenabstand von 10cm. Erwartet wurde geringere Wirksamkeit als 10 v.

Punkte: Die Markierung „Punkte“ ist eine Reduktion der Markierung „Kreise klein“ (2005), die damals 0% „Fehlentscheidungen“ zeigte. Der Deckungsgrad wurde von 25% auf 6,5% reduziert. Es handelt sich um einen unvollständigen Test, da zwei Variable (Licht und Deckungsgrad) gleichzeitig verändert werden.

2.4.1.3 Neue Testmarkierungen: Vergleich schwarz - weiß

Bisher war „Acryl horizontal“ die einzige schwarze Markierung. Die Helligkeit von schwarz ist konstant, da „schwarz“ kein Licht reflektiert und der Helligkeitseindruck nicht von Umgebungslicht geprägt wird. Diese Eigenschaft könnte sehr wichtig für die Effizienz von Markierungen unter verschiedenen Lichtverhältnisse sein.

10 v // 5 schwarz: Diese Markierung ist identisch mit 10 v // 5 weiß, statt weißer Klebestreifen werden schwarze angebracht.

10 v schwarz/weiß: Diese Markierung leitet sich direkt aus 10 v ab, teilt aber die 20mm Streifen der Breite nach in 10mm schwarz und 10mm weiß, hat also einen inneren Kontrast und nach außen einen doppelt variablen Kontrast, der sowohl bei starkem als auch bei schwachem Licht das Optimum darstellen sollte.

2.4.2 Vorstellung der Kandidaten

Tab. 4 und Abb. 10 geben einen Überblick über die Markierungen, die auf 50cm x 100cm großen Scheiben angebracht wurden. Die Bezeichnungen der Makrierungen setzen sich aus Angeben für Abstände (z. B. 10cm), Linienbreiten (z. B. 5mm) und Ausrichtung (h = horizontal, v = vertikal) etc. zusammen.

Tabelle 4: Ausführung der untersuchten Markierungen. Die Deckungsgrade sind abhängig von Größe und Abstand der Markierungselemente. UV-Reflektanz war kein Auswahlkriterium und wurde im Nachhinein gemessen. Alte Testergebnisse („Fehler“: Anflüge an Markierung) soweit in Flugtunnel I (2004, 2005) getestet, zum späteren Vergleich.

Bezeichnung	Beschreibung	Deckungsgrad	Reflexionen im UV	Ergebnis („Fehler“) 2004 / 2005
10 h	Horizontale Streifen (weißes Klebeband), 2 cm breit, Kantenabstand 10 cm	16,7 %	ja	21,6%
10 v (Referenzmarkierung; Vergleich mit 2004, 2005)	Vertikale Streifen (weißes Klebeband), 2 cm breit, Kantenabstand 10 cm	16,7 %	ja	4,6% 6,7%
10 v schwarz/weiß	Vertikale Streifen (weißes Klebeband), Doppelstreifen 1cm schwarz, 1cm weiß, Kantenabstand 10 cm	16,7 %	ja	-
10 v // 5 schwarz	Vertikale Streifen (schwarzes Klebeband), 0,5 cm breit, Kantenabstand 10 cm	4,8 %	-	-
10 v // 5 weiß	Vertikale Streifen (weißes Klebeband), 0,5 cm breit, Kantenabstand 10 cm	4,8%	ja	-
15 v	Vertikale Streifen (weißes Klebeband), 2 cm breit, Kantenabstand 15 cm	11,8 %	ja	11%
Acryl horizontal	PLEXIGLAS SOUNDSTOP® mit eingearbeiteten schwarzen Polyamidfäden horizontal, 2 mm Stärke, 28 mm Abstand	6,7 %	-	6,7%
Punkte	Kreise (weiße Klebefolie), r = 9mm, im Raster angeordnet, Mittelpunktabstand 82 mm	6,25 %	nein	-

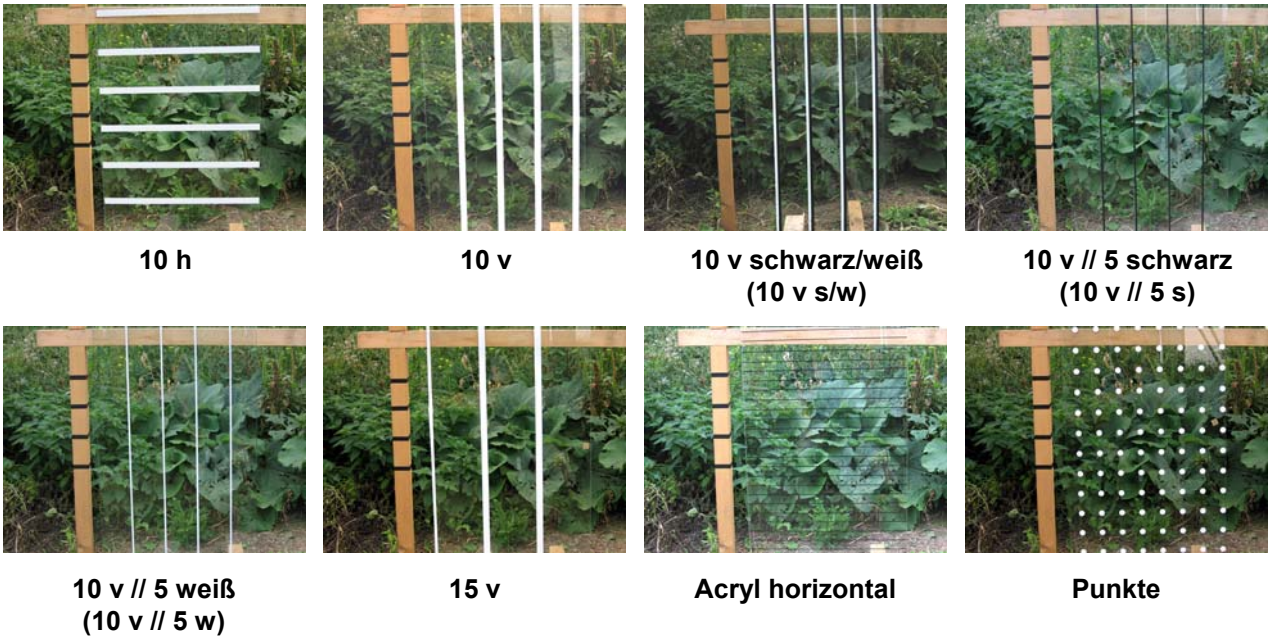

Abbildung 10: Die 2006 untersuchten Markierungen

2.4.3 Reflektanz der Markierungen

2006 wurde erstmalig die Reflektanz der Markierungen, auch jene der Jahre 2004 und 2005, für Wellenlängen zwischen 350nm und 600nm gemessen (Kap. 2.2.1.2).

Untersucht wurden:

- weiße Klebefolie, 2006 verwendet für „Kreise klein“, 2005 verwendet für „Kreise groß“ und „Kreise klein“
- weißes Isolierband, 2006 verwendet für 10 h, 10 v, 10 v schmal weiß
- Siebdruck weiß (Eckelt 541), 2005 geprüft für „Quadrate klein“
- Semitransparente Klebefolie, 2004 geprüft für „Koralle“

Wie Abb.11 zeigt, reflektieren zwischen 410nm und 600nm die weißen Klebemarkierungen (Mittel: >80,6%, >61,1%) das Licht stärker als der weiße Siebdruck (Mittel: 51,4%). Die matte semitransparente Folie reflektiert erwartungsgemäß weniger (Mittel: 26,6%). Reflektanz zwischen 350 und 400nm (UV, violett) gibt es in nennenswertem Ausmaß nur bei den verwendeten Klebebändern (Mittel: 37,1%). Die semitransparente Folie reflektiert im Vergleich zur Reflektanz >410nm relativ gleichmäßig auch im UV-Bereich (22,3%).

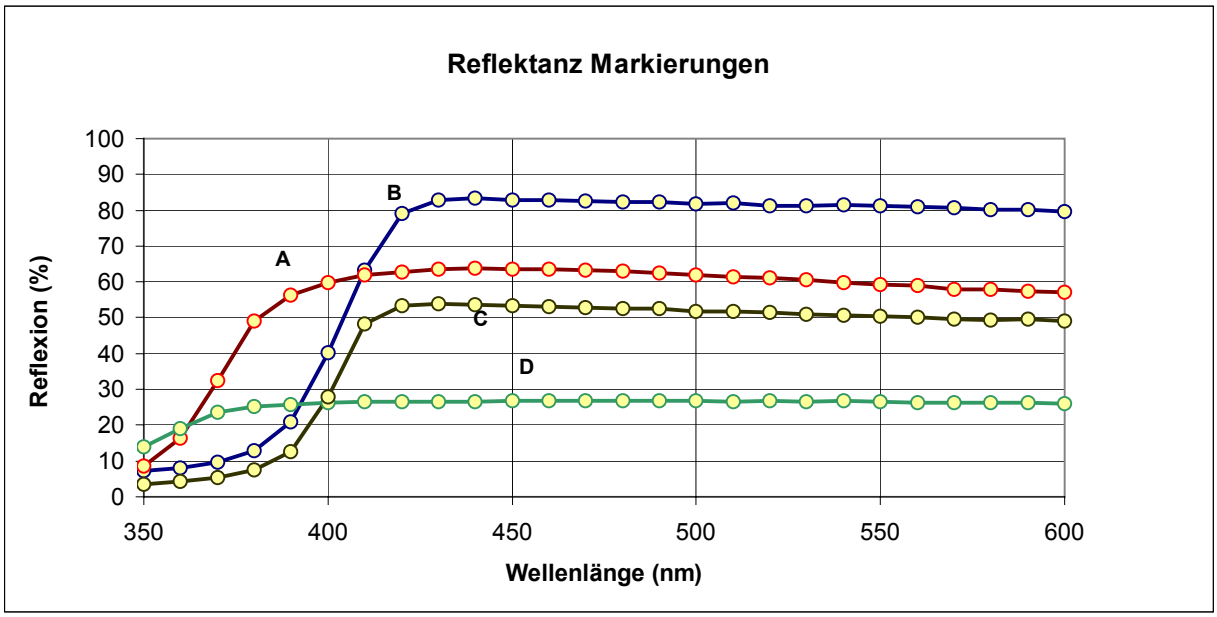

Abbildung 11: Spektrale Reflektanz von verschiedenen Materialien zur Markierung von Glasscheiben in den Experimenten 2004 – 2006. A: Tesa weiß (weiße Streifen), B: Klebefolie weiß (Punkte), C: Siebdruck weiß (Quadrate klein; RÖSSLER 2005), D: semi-transparente Folie (Koralle, RÖSSLER & ZUNA-KRATKY 2004).

2.5 Transmittanz der Versuchsscheiben

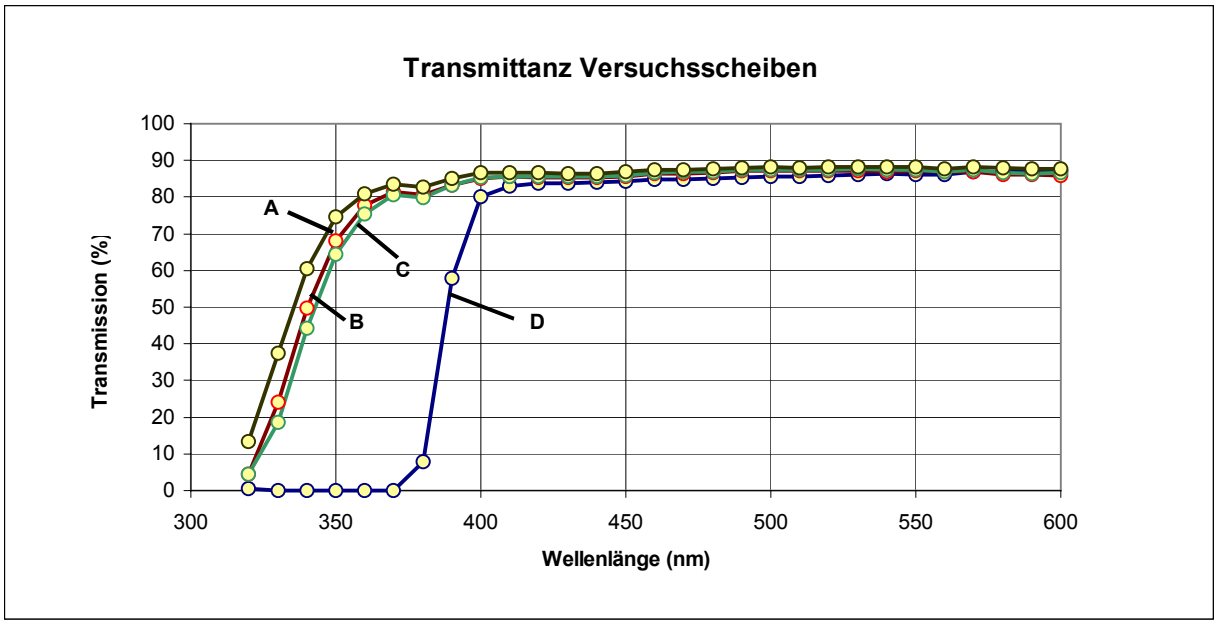

Abbildung 12: Spektrale Transmittanz (Lichtdurchlässigkeit) von vier Versuchsscheiben unterschiedlicher Herkunft und Dicke. A: Floatglas („Koralle“ – 2004), B: Floatglas 4mm, C: Floatglas 5mm, D: Acrylglas mit UV-Absorbern (PLEXIGLAS SOUNDSTOP®)

Abhängig von Material und Stärke der verwendeten Scheiben ist die Lichtdurchlässigkeit (Transmittanz) unterschiedlich. So musste über den Vergleich der optischen Eigenschaften von Glasscheiben unterschiedlicher Herkunft und Stärke beurteilt werden können, ob sich eventuelle Unterschiede in der Wirksamkeit eventuell auf Unterschiede in der Transmittanz zurückführen lassen. Wie Abb. 12 zeigt, unterscheiden sich die Glasscheiben nur geringfügig von einander, wobei in der UV-Transmittanz Unterschiede von 10 – 15 Prozentpunkte möglich sind. Die

Acrylscheibe weicht in der UV-Durchlässigkeit jedoch sehr stark von den Glasscheiben ab. Absorber zur Verbesserung der Haltbarkeit sperren Wellenlängen bis 370nm vollständig, erst darüber kommt es zu einer Angleichung an die Glasscheiben. Diese Charakteristik gab den Anlass dazu, eine unmarkierte Acrylscheibe zu testen (Kap. 2.3.2).

2.6 Herrschende Lichtverhältnisse bei den Versuchen

Die Zeitpunkte der Versuche hängen mit der zeitlichen Verteilung der Fangerfolge der Beringungsstation zusammen. Der Fangerfolg der Beringungsstation wiederum hängt von der Aktivität der Vögel ab. Da die Aktivität der Vögel in den Stunden nach Sonnenaufgang und vor Sonnenuntergang höher ist als in den späten Vormittagsstunden, über Mittag und am frühen Nachmittag, kommt die Verteilung der Versuche vermutlich sehr in die Nähe natürlicher Aktivitäts–Lichtintensitäts–Beziehungen. Die Lichtverhältnisse wurden während der Versuche durchgängig von zwei Pyranometern gemessen (Kap. 2.2.2).

2.6.1 Lichtintensität der Globalstrahlung

Die Globalstrahlung gemessen am Pyranometer 1 mit horizontaler Messebene betrug im Untersuchungszeitraum zwischen 0 und 1.000Wm^{-2} , wobei der Median in der Klasse 200-300 Wm^{-2} liegt (Abb. 13)[3].

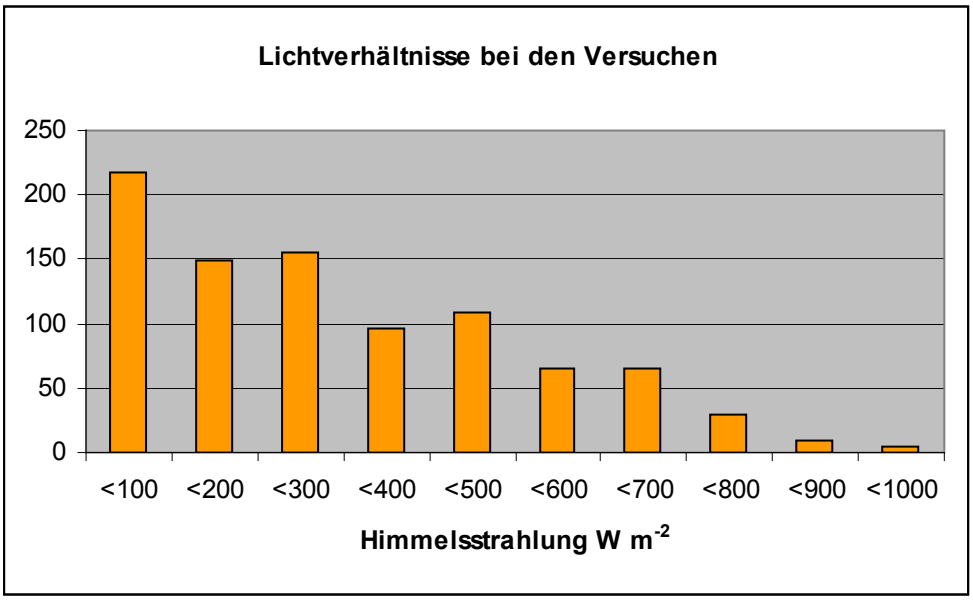

Abbildung 13: Anzahl von Versuchen unter bestimmten Lichtverhältnissen (Globalstrahlung gemessen an Pyranometer 1). Mehr als 50% der Versuche (n=899) fanden bei einer Lichtintensität zwischen 0 und 300 Wm^{-2} statt; n=899.

[3] Für die Beleuchtung der Versuchsscheiben sind diese Messwerte allerdings nur bedingt aussagekräftig, da infolge der Lambertschen Cosinusbeziehung (4.3.1.1) die Sonnenlichtkomponente bei niedrigen Sonnenständen höher und bei hohen Sonnenständen niedriger ist als auf der horizontalen Messebene.

2.6.2 Lichtintensität hinter den Versuchsscheiben

Die Beleuchtung des Scheibenhintergrundes gemessen am Pyranometer 2 mit vertikaler Messebene betrug zwischen 0 und 240 Wm^{-2}. Etwa ein Drittel der Versuche fand bei Lichtintensitäten <60Wm^{-2} statt, ein Drittel bei 60 – 120 Wm^{-2} und ein Drittel bei 120 – 240 Wm^{-2}.

2.6.2.1 Lichtintensität und Tageszeit

Die Lichtverhältnisse hinter den Versuchsscheiben hängen stark mit der Tageszeit (resp. mit dem Sonnenstand) zusammen. Schwächstes Licht herrscht in den Morgenstunden, stärkstes um die Mittagszeit.

Typische Zeitfenster:

5:00 bis 7:00 Uhr und 19:00 bis 21:00 Uhr	65% der Experimente < 60Wm^{-2}
6:00 bis 11:00 Uhr und 18:00 bis 19:00 Uhr	50% der Experimente 60 - 120 Wm^{-2}
9:00 bis 12:00 Uhr	73% der Experimente >120 Wm^{-2}

2.6.2.2 Lichtintensität bei Sonne und Bewölkung

566 (63,0%) Versuche fanden bei Sonne, 314 (34,9%) bei bewölktem Himmel statt, in 19 Fällen war die Sonne zu erkennen aber durch Wolken getrübt. Vertikale zur Sonne exponierte Strukturen (z. B. Glasscheiben) bekommen bei niedrigen Sonnenständen relativ hohe und bei hohen Sonnenständen eher geringe Strahlungsintensität. Die Mehrzahl der Versuche bei direkter Sonneneinstrahlung fanden bei niedrigem Sonnenstand statt.

Niedrige Sonnenstände	vor 9:00 bzw. nach 17:00 Uhr	350 Versuche (61,8%)
Hohe Sonnenstände	9:00 bis 17:00 Uhr	216 Versuche (38,2%)

Direkte Sonnenstrahlung und Lichtintensität des Hintergrundes der Versuchsscheiben stehen nicht zwingend in Zusammenhang. Tab. 5 zeigt für 899 gültige Versuche die Lichtverhältnisse nach drei Kategorien gemessener Strahlung im Hintergrund der Scheiben. Der Vergleich mit den protokollierten Angaben zur Bewölkung zeigt, dass sowohl bei Sonne als auch bei Bewölkung 30 – 31% der Experimente in Lichtklassen unter 60 Wm^{-2} fielen und dass 21% der bei bewölktem Himmel durchgeführten Versuche bei einer Strahlungsintensität von mehr als 120 Wm^{-2} aus dem Scheibenhintergrund stattgefunden haben.

Tabelle 5: Lichtintensität des Scheibenhintergrundes unter dem Aspekt: Sonne – keine Sonne.

	Lichtintensität Hintergrund Wm^{-2}			
	<60	**<120**	**>120**	
Sonne	176	210	199	**585**
Keine Sonne	97	151	66	**314**
	273	**361**	**265**	**899**

2.6.2.3 Zusammenhang zwischen Globalstrahlung und Lichtintensität im Scheibenhintergrund

Die folgenden Abbildungen zeigen den Tagesgang der Globalstrahlung über und hinter dem Versuchstunnel. Pyranometer 1 (A) in Abb. 14 misst die Strahlung auf horizontaler Ebene (Maximum 907Wm^{-2} um 13:34 Uhr) unbeeinflusst von Reflexionen der Erdoberfläche. Direkte Sonnenstrahlung beeinflusst die Messungen des Pyranometers 1

(über dem Tunnel). Wolken reduzieren die gemessene Globalstrahlung über der horizontalen Fläche (mit Einfluss direkten Sonnenlichtes) um bis zu 70%. Pyranometer 2 (B) misst die Strahlung im Hintergrund der Versuchsscheiben auf einer immer der Sonne abgewandten vertikalen Ebene (blaue Linie mit Maximum 204,6Wm^{-2} um 16:35 Uhr) mit einem hohen Anteil von reflektiertem Licht von Boden, Vegetation, etc. (50% des Messfeldes). Pyranometer 2 wird nie von der Sonne bestrahlt.

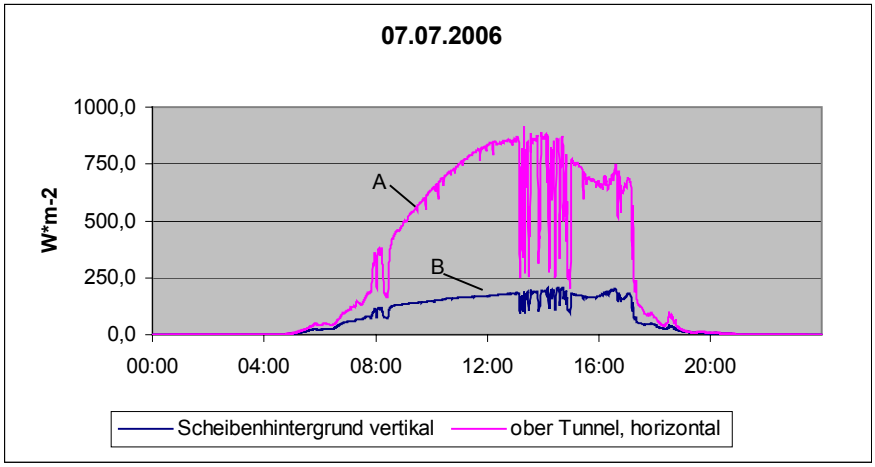

Abbildung 14: Tagesgang der Strahlungsverhältnisse am 7.Juli 2006 in Hohenau a. d. March. A: Pyranometer 1 mit horizontaler Messebene über Tunnel, B: Pyranometer 2 mit vertikaler Messebene im Scheibenhintergrund. Deutlich als Minima zu erkennen: Wolkendurchgänge.

In den Morgen- und Abendstunden (5:00 bis 9:00 Uhr und 17:00 bis 20:30 Uhr) bzw. bei Fehlen direkter Sonnenstrahlung besteht ein relativ enger Zusammenhang zwischen Globalstrahlung und Lichtintensität im Scheibenhintergrund (Abb. 15). Mit zunehmender Tageszeit (9:00 bis 17:00 Uhr) kommt es zu einer größeren Streuung der Werte, weil mit zunehmender Sonnenhöhe der gemessene Anteil direkter Sonnenstrahlung ansteigt (Abb. 16).

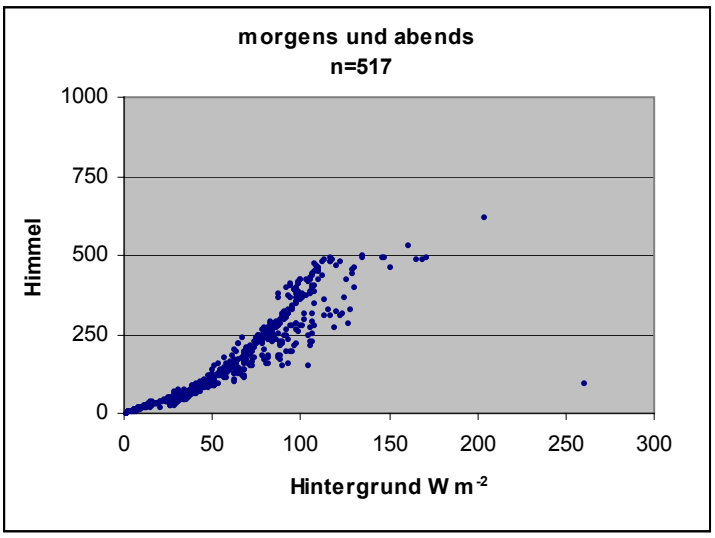

Abbildung 15: Zusammenhang von Globalstrahlung (Werte auf y-Achse) und Strahlung des Hintergrundes (Werte auf x-Achse) in Wm^{-2}. 5:00 bis 9:00 Uhr und 17:00 Uhr bis Sonnenuntergang.

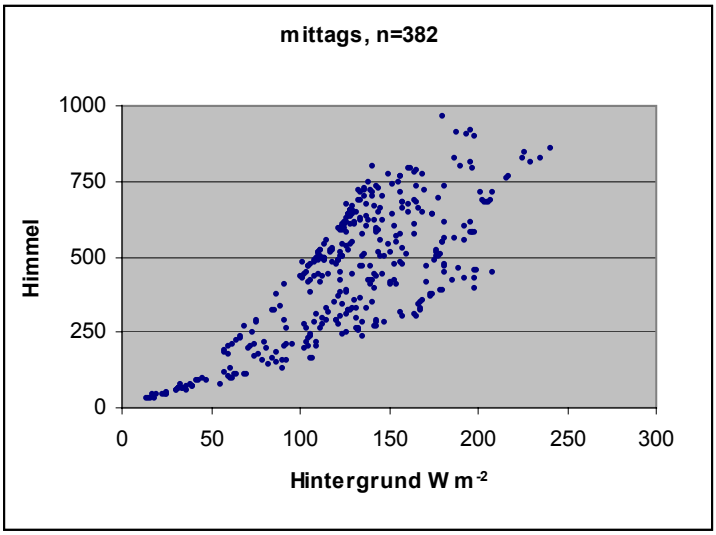

Abbildung 16: Zusammenhang zwischen Globalstrahlung (Werte auf y-Achse) und Strahlung des Hintergrundes (Werte auf x-Achse) in Wm^{-2}; 9:00 – 17:00 Uhr.

2.7 Das Modell zur nachträglichen Ermittlung der Kontraste

Um der Frage des Kontrastes nachzugehen, wird im Rahmen des Projektes ein optisches Modell entwickelt, mit dem die vom Vogel gesehene reflektierte Strahldichte berechnet wird. Das Modell ist in der Validierungsphase. Die bisher durchgeführten Simulationen sollen im kommenden Jahr durch gezielte Messungen geprüft werden. Danach könnten verschiedene Situationen und Beleuchtungsverhältnisse, die oft nicht gemessen werden können, nachmodelliert werden, um daraus Schlüsse auf Kontraste, Wirksamkeit bestimmter Kontraste und Wahrnehmungsvermögen der Vögel in bestimmten Situationen zu ziehen und Vorhersagen zur Wirkung bestimmter Markierungen für bestimmte Markierungen treffen zu können, ohne alle Situationen im Experiment mit Versuchsvögeln testen zu müssen.

Das Modell geht von Minuten-Messwerten der Lichtintensität über und hinter dem Tunnel aus. Herangezogen werden

- die Transmittanz der Scheiben
- die Reflektanz der Markierungen
- die mittels Fischaugenaufnahmen ermittelte Herkunft des Lichtes auf bestimmten Regionen der Testscheiben (direkte Sonnenstrahlung, diffuse Himmelsstrahlung, Reflexionen von Boden und Vegetation etc.)
- die Messwerte der beiden Pyranometer zum Zeitpunkt des Einzelversuchs

Die auf die Glasscheiben einfallende Strahlung ist für jeden Punkt der Scheibe verschieden. Mit Hilfe von Fischaugenphotos (Abb.4) wird der Anteil der Globalstrahlung und der von der Umgebung reflektierten Strahlung abgeschätzt. Mit Hilfe der Gleichung

$$I_{diff} = 2*\pi \int_{0}^{\pi/2} N(\theta) * \cos(\theta) * \sin(\theta) * d(\theta) * \theta \qquad \text{(vgl. 4.3.1.1)}$$

lässt sich die gesamte auf die Glasscheiben einfallende diffuse und reflektierte Strahlung bestimmen.

Der für den Vogel wirksam werdende Kontrast wird als Quotient aus Helligkeit der Markierung und Helligkeit des Hintergrundes ermittelt. Dadurch

- können durch Einsetzen verschiedener Kennwerte der Reflektanz von Markierungen (im Labor ermittelt) in der Natur herrschende Verhältnisse (z. B. Lichtverhältnisse bei Versuchen 2006) nachmodelliert werden und die Kontrastwirkung einer eventuellen neuen, noch nicht experimentell geprüften Markierung, als größer oder kleiner eingestuft werden
- kann versucht werden, das in den Experimenten beobachtete Verhalten der Vögel (Erkennen und Vermeiden einer Markierung oder nicht) in Beziehung zum herrschenden Kontrast zu setzen.

2.8 Untersuchungszeitraum

Die Untersuchungen wurden nach den langjährigen Fangerwartungen für Juli und die erste Augusthälfte geplant. Durch die außergewöhnlich geringen Bruterfolge vieler Vögel, die auf die außergewöhnlich feuchte kalte Witterung im Mai 2006 zurückgehen, blieb die Zahl im Juli gefangener Vögel außergewöhnlich gering. Der Untersuchungszeitraum musste bis Anfang September ausgedehnt werden. Die guten Fangzahlen im September konnten leider nicht mehr für Versuche genutzt werden, da der Untersuchungszeitraum nicht beliebig verlängert werden konnte.

Der Untersuchungszeitraum lag zwischen dem 1. Juli und dem 4. September.

2.9 Versuchsvögel

Als Versuchsvögel werden alle Vögel herangezogen, die während des Untersuchungszeitraumes von der Beringungsstation gefangen und beringt bzw. kontrolliert werden und denen ein Versuch zumutbar erscheint. Jungvögel mit nicht abgeschlossenem Gefiederwachstum und Vögel die Erschöpfungserscheinungen zeigen sowie Arten, die auf Grund ihrer Größe für den Versuch ungeeignet erscheinen, werden gleich nach der Beringung freigelassen.

Es werden erstmalig gefangene und frisch beringte Vögel sowie bereits im Versuchszeitraum gefangene und beringte Vögel (Wiederfänge) und bereits in einem der Vorjahre beringte Vögel (Altfänge) in den Versuch einbezogen. Die Vögel werden anschließend an die Beringung bzw. Kontrolle durch das Beringungsteam einzeln in Säckchen zum Tunnel gebracht und sofort dem Versuch unterzogen. Daraus ergibt sich ein von den lokalen Gegebenheiten geprägtes Artengefüge von Vögeln und eine von der Beringung abhängige Reihenfolge der Versuchsvögel. Tab.6 zeigt die Artenliste der Versuchsvögel für 899 gültige Versuche im Jahr 2005.

Es wurden 39 Arten in den Versuch einbezogen. Ein Fünftel der Vögel zählt zu typischen Anflugopfern des Siedlungsraumes, und alle untersuchten Vögel sind potenzielle Anflugopfer der offenen Landschaft.

Die Fangzahlen des Jahres 2006 lagen auf Grund der untypischen Witterung weit außerhalb jeglicher Norm. Im Juli wurden nur 53% der langjährig durchschnittlichen Zahl von Vögeln gefangen. Dies geht nach genauerer Analyse weniger auf den langen Winter oder die Hochwasserereignisse an der March im April 2006 zurück als vielmehr auf den sehr feuchten und kalten Mai, der sich enorm auf den Bruterfolg der im März und April ankommenden Zugvögel ausgewirkt hat.

Todesfälle: Es kam während der Versuche zu einem Todesfall (Kohlmeise) durch Strangulation im Netz (ein sehr seltenes Vorkommnis beim Netzfang - 0,03%). Es kam zu keinen weiteren Verletzungen an Tunnel oder Versuchsscheiben.

Tabelle 6: Artenliste der 899 ausgewerteten Versuchsflüge; Arten (39) und Anzahl der Versuchsvögel.

Vogelart		**Anzahl**	**Vogelart**		**Anzahl**
Eisvogel	*Alcedo atthis*	3	Gartengrasmücke	*Sylvia borin*	6
Wendehals	*Jynx torquila*	8	Mönchsgrasmücke	*Sylvia atricapilla*	19
Buntspecht	*Dendrocopos major*	1	Zilpzalp	*Phylloscopus collybita*	2
Rauchschwalbe	*Hirundo rustica*	2	Fitis	*Phylloscopus trochilus*	1
Bachstelze	*Motacilla alba*	1	Blaumeise	*Parus caeruleus*	1
Nachtigall	*Luscinia megarhynchos*	4	Kohlmeise	*Parus major*	19
Blaukehlchen	*Luscinia svecica*	16	Beutelmeise	*Remiz pendulinus*	2
Schwarzkehlchen	*Saxicola torquata*	2	Neuntöter	*Lanius collurio*	102
Amsel	*Turdus merula*	9	Raubwürger	*Lanius excubitor*	1
Singdrossel	*Turdus philomelos*	1	Star	*Sturnus vulgaris*	15
Feldschwirl	*Locustella naevia*	11	Feldsperling	*Passer montanus*	36
Schlagschwirl	*Locustella fluviatilis*	12	Buchfink	*Fringilla coelebs*	1
Rohrschwirl	*Locustella luscinoides*	4	Girlitz	*Serinus serinus*	1
Schilfrohrsänger	*Acrocephalus schoenobaenus*	56	Grünling	*Carduelis chloris*	4
Sumpfrohrsänger	*Acrocephalus palustris*	329	Stieglitz	*Carduelis carduelis*	12
Teichrohrsänger	*Acrocephalus scirpaceus*	26	Kernbeißer	*Coccothraustes coccothraustes*	1
Drosselrohrsänger	*Acrocephalus arundinaceus*	51	Goldammer	*Emberiza citrinella*	19
Sperbergrasmücke	*Sylvia nisoria*	6	Rohrammer	*Emberiza schoeniclus*	33
Klappergrasmücke	*Sylvia curruca*	1	unklar (unaufklärbarer Protokollierungsfehler)		1
Dorngrasmücke	*Sylvia communis*	80			
			Summe		**899**

2.10 Vorversuche und Kontrollversuche

2.10.1 Vorversuche

Mit der Errichtung der neuen Anlage mussten wie im Jahr 2004 Vorversuche eingeplant werden[4]. Es musste damit gerechnet werden, dass Mängel oder Planungsfehler zu Tage treten und eventuell noch technische Umbauten notwendig werden könnten. Die Vorversuche fanden zwischen 22.06. und 30.06.2006 statt.

[4] 2004 hat sich z. B. unerwartet gezeigt, dass die Vögel in ihrer Wahl des linken oder rechten Sektors sehr stark vom Sonnenstand beeinflusst werden.

1) Sporadische Versuchsflüge während der Bauphase um sofort auf eventuelle grobe nicht bedachte Mängel zu stoßen (n = 10).

2) Systematische Versuchsflüge ohne Scheiben, ohne Netz; Vögel fliegen ungehindert aus dem Tunnel und werden auf die zufällige Verteilung ihrer Flugwege untersucht (n = 25).

3) Systematische Versuchsflüge ohne Scheiben, aber mit Netz; um die Eignung des Netzes zu prüfen ohne die Vögel einer Gefahr auszusetzen (n = 15).

Alle Vorversuche liefen reibungslos ab, die Entscheidung der Vögel für eine der beiden Seiten des Fluchtweges wurde gleich verteilt getroffen und es zeigte sich keine Notwendigkeit zu Umbauten und Adaptierungen des Versuchstunnels.

2.10.2 Kontrollversuche

Kontrollversuche dienen der Ermittlung von unerkannten Störungen während der Versuche. Es wird geprüft, ob es eine von den Markierungen unabhängige Bevorzugung einer der beiden Seiten (links bzw. rechts) gibt. Die Kontrollversuche werden mit einem identischen, unmarkierten Scheibenpaar durchgeführt und in Gruppen zu 10 Flügen zufällig zwischen die regulären Experimente verteilt.

2.11 Datenauswertung

2.11.1 Videoauswertung

Die Versuche werden direkt protokolliert und gleichzeitig auf Video für eine spätere Kontrolle aufgezeichnet. Alle Videoaufzeichnungen werden in Zeitlupe angesehen. Für die Berechnungen der Versuchsergebnisse werden ausschließlich Videodaten herangezogen. In 171 Fällen (16,7%) war die Videodokumentation zumindest hilfreich oder konnte eine fehlerhafte Protokollierung richtig stellen.

2.11.2 Ausgewertete und verworfene Daten

Es werden nur eindeutige Entscheidungen zwischen zwei Scheiben („links“, „rechts“) herangezogen und „mittige“ Anflüge verworfen. Abgebrochene Flüge, zögerliche Annäherung, oft entlang der Decke oder einer der Seitenwände, können nicht gewertet werden. Sofern bereits während der Versuche deutlich wurde, dass der Versuch nicht gewertet werden kann, wurde am Protokoll eine zusätzliche Zeile eingefügt und der Versuch mit einem anderen Vogel wiederholt. Flüge bei denen Unregelmäßigkeiten erst bei der Videoauswertung festgestellt wurden (Regentropfen, beschlagene Flächen, unsymmetrischer Lichteinfall, offene Türe etc.), wurden nachträglich ausgeschieden. Tab. 7 zeigt die Zahl der ausgeschiedenen Versuche und die Gründe, die zum Ausscheiden geführt haben.

Tabelle 7: Nicht in die Auswertung eingehende Versuche.

Ursache	**Anzahl der Fälle**
Vogel verweigert Flug	29
Vogel bricht Flug ab	9
Vogel bremst vor Netz	4
Zu zögerlicher Flug	31
Unklare Ursache oder nicht dokumentiert	13
Nachträglich wegen Regen oder beschlagener Scheiben ausgeschieden	33
Versuchsfehler	7
Anflug mittig	33
Summe	**159**

2.11.3 Statistische Methoden

Die Ergebnisse wurden mit Binomialtests, Chi²-Exakt-Tests und Residualanalysen mit adjustierten standardisierten Residuen (HABERMANN 1973) geprüft. Die Tests wurden mit SPSS 12.0 berechnet.

3 ERGEBNISSE

3.1 Überblick über das Datenmaterial

Tabelle 8: Struktur der Auswertungsdaten 2006.

Versuche	Anzahl	%		Anzahl	%	
Alle	**1.025**	100				
	▼		►	126	12,3	ungültig
Gültig	**899**	87,7				
	▼		►	33	3,2	mittig
Eindeutig	**866**	84,5				
	▼		►	71	6,9	Kontrollversuche
ergebnisrelevant	**795**	77,6				
	▼		►	140	13,6	andere (UV, Luft)
Markierungen	**655**	63,9				

Es wurden 1.025 Versuche durchgeführt (Tab. 8), von denen 899 gültig sind und 126 ausgeschieden werden mussten. 866 Anflüge waren eindeutig einer der Seiten (links oder rechts) zuzuordnen, 33 mittige Anflüge wurden ebenfalls ausgeschieden. Es gingen somit 795 Versuche in die Auswertung, in 71 Kontrollversuchen wurde der Verlauf der Experimente auf Links- oder Rechts-*biases* kontrolliert. 655 Versuche untersuchten markierte Scheiben, 140 Versuche galten den grundlegenden Fragen, ob die Versuche mit der Acrylscheibe durch das Material (insbesondere die UV-Absorber) beeinflusst wurden und ob Floatglas für Vögel unsichtbar ist oder in irgendeiner Weise wahrgenommen wird.

3.2 Versuchsergebnisse

3.2.1 Ergebnisüberblick

Abb.17 zeigt die Ergebnisse aller Versuche mit einer Stichprobe von jeweils n = 77 bis n = 86. Die Markierungen sind in drei Gruppen unterschiedlicher Wirksamkeitsstufe (A bis C) untergliedert. Die Ergebnisse der Versuche mit Floatglas unmarkiert gegen Acryl unmarkiert (n = 68) und die Versuche mit Floatglas unmarkiert gegen freie Luft (n = 72) sind in Gruppe D zusammengefasst. Die Säulen zeigen die relativen Häufigkeiten der Anflüge an die markierten Scheiben (resp. „Acryl unmarkiert“ bzw. Luft), die entsprechenden Prozent-Werte sind darüber angeschrieben.

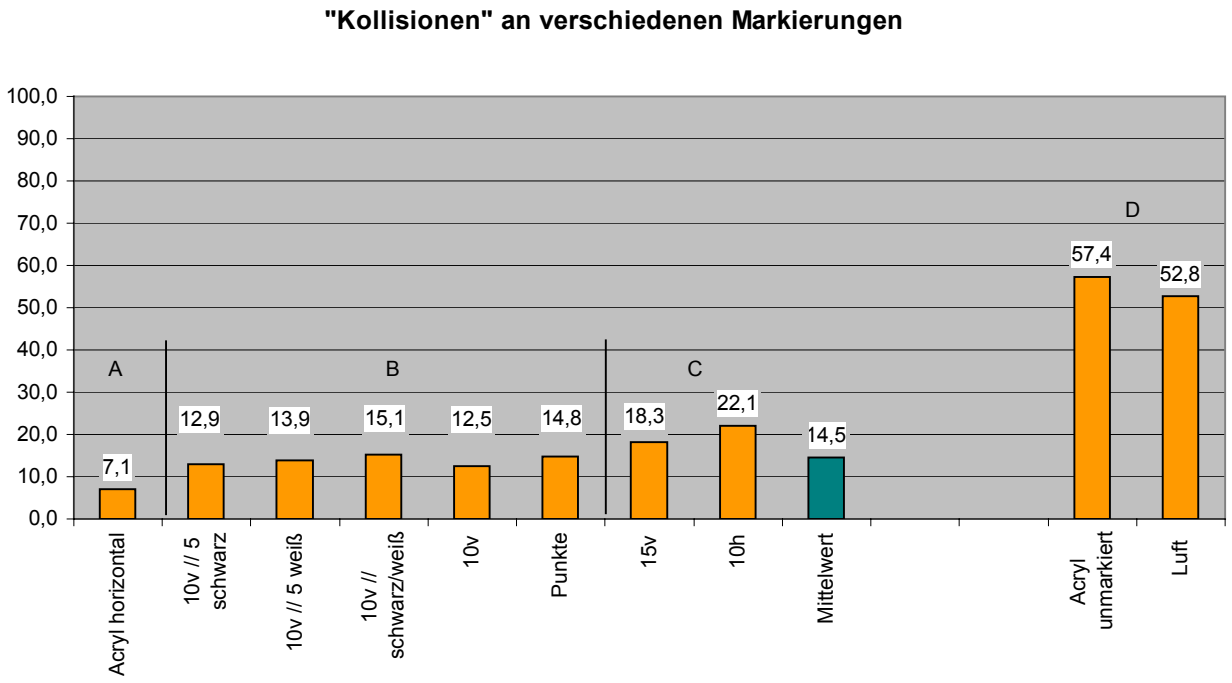

Abbildung 17: Relative Häufigkeit von Anflügen an markierte Glasscheiben im Wahlversuch mit unmarkierter Referenzscheibe. „Acryl horizontal“ (A) signifikant besser als der Durchschnitt, 15 v und 10 h (C) signifikant schlechter als der Durchschnitt. Rechte Säulen (D): Anflüge an unmarkierte Acrylscheibe bzw. an leere Glasscheibenhalterung („Luft“) im Vergleich mit unmarkierter Floatglas-Referenzscheibe.

3.2.2 Markierungen

Im Mittel kam es zu 14,5% Anflüge an markierte Scheiben. Alle markierten Scheiben sind wirksam. Bei einer Betrachtung nach drei Gruppen (A, B und C) zeigen sich signifikante Unterschiede (chi^2 =7,99; 2seitig, p = 0,019). Die Markierung „Acryl horizontal“ ist signifikant besser als der Durchschnitt aller wirksamen Markierungen (Residualanalyse, adjustierte, standardisierte Residuen res_{adst} = 2,1, p<0,05), während 10 h und 15 v (C) signifikant schlechter als der Durchschnitt abschneiden (res_{adst} = -2,3, p<0,05). PLEXIGLAS SOUNDSTOP® (“Acryl horizontal“) ist die einzige Markierung, die ein Ergebnis unter 10% Fehler bringt.

3.2.3 UV-Absorber in unmarkiertem Acryl

Um den Effekt vom abweichenden Material der Versuchsscheibe „Acryl horizontal“ zu prüfen, wurde eine identische Scheibe ohne eingearbeitete Polyamidfäden, also eine völlig transparente Acrylplatte gegen unmarkiertes Floatglas getestet. Das Ergebnis 57,4% Anflüge an die unmarkierte Acrylscheibe (39:29) zeigt keinerlei abschreckende Wirkung des Materials.

3.2.4 Der Glas – Luft – Versuch

Um zu prüfen ob durchsichtiges unmarkiertes Floatglas tatsächlich „unsichtbar“ für Vögel ist, wurde eine solche Scheibe gegen einen leeren Rahmen, also gegen freien Luftraum getestet. Die Anflüge verteilen sich mit einem Verhältnis von 52,8% zu 47,2% (38 Anflüge zur Scheibe : 34 Anflüge zu „Luft“), also zufällig.

3.3 Versuchsergebnisse unter Berücksichtigung der Lichtverhältnisse

Für die 655 gewerteten Versuche mit Markierungen stellten sich folgende Fragen:

- Ist die Wirksamkeit bestimmter Markierungen abhängig von den Lichtverhältnissen?
- Sind bestimmte Markierungen z. B. in der Dämmerung wirksamer als andere?
- Welche Markierungen eignen sich am besten, wenn im Hintergrund nur wenig Vegetation und viel Himmel sichtbar ist?

Da es mit dem neuen Versuchstunnel möglich ist, die verschiedenen Lichtverhältnisse, die im Freiland wirksam werden, zu berücksichtigen und zu dokumentieren, können wir nun die Ergebnisse differenzieren. Eine Auswertung nach drei Lichtklassen ist bei unseren Stichprobengrößen gerade noch möglich. Die Messwerte der Lichtverhältnisse sind in Kap. 2.6 dargestellt.

3.3.1 Einfluss der Globalstrahlung

Pyranometer 1 oberhalb des Tunnels misst das auf eine horizontale Fläche einwirkende Licht. Die gemessene Globalstrahlung besteht aus dem von Wolken und aus der Atmosphäre reflektierten Licht und direkter Sonnenstrahlung. Zu berücksichtigen ist der unterschiedliche Einfallswinkel des direkten Sonnenlichtes auf das Pyranometer 1 mit horizontaler Messebene und auf vertikal stehende Scheiben. Das über die Spiegel auf die Scheiben gelangende Sonnenlicht geht bei niedrigen Sonnenständen schwach in die Pyranometer-Messungen (horizontal) ein, äußert sich aber in einer starken Helligkeit auf den vertikalen Scheiben, während bei hohen Sonnenständen die Wirkung auf den Scheiben schwächer ist, als vom Pyranometer 1 gemessen.

Die Auswertung nach drei Klassen der Intensität der Globalstrahlung (Tab. 9) zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Wirksamkeit von Markierungen (Chi^2 =1,12; 2seitig, n = 655; p = 0,574, n.s.).

Tabelle 9: Verteilung von Anflügen an die markierte Scheibe bei verschiedener Helligkeit (auf horizontaler Fläche gemessene Globalstrahlung) nach drei Lichtklassen (bis 250Wm^{-2}, 250 – 500Wm^{-2}, 500 – 1.000Wm^{-2}).

Markierung	**Lichtintensität Globalstrahlung Wm^{-2}**					
	<250		**< 500**		**>500**	
	n	% Fehler	*n*	% Fehler	*n*	% Fehler
10 h	*43*	20,9	*21*	14,3	*13*	38,5
10 v	*48*	12,5	*15*	13,3	*17*	11,8
10 v s/w	*31*	19,4	*29*	17,2	*26*	7,7
10 v // 5 s	*58*	12,1	*13*	7,7	*14*	21,4
10 v // 5 w	*47*	12,8	*18*	16,7	*14*	14,3
15 v	*38*	21,1	*31*	12,9	*13*	23,1
Acryl horizontal	*36*	8,8	*32*	8,3	*13*	0,0
Punkte	*34*	16,7	*36*	12,5	*15*	15,4

3.3.2 Einfluss der Lichtintensität hinter den Scheiben

Das hinter dem Tunnel auf eine senkrechte, der Sonne abgewandte, Fläche einwirkende Licht, gemessen mit Pyranometer 2, besteht zur Hälfte aus Licht, das von Himmel und Wolken zur Messung gelangt, zur Hälfte aus Reflexionen von Boden und Vegetation. Die vertikale Messebene ermöglicht gute Vergleichbarkeit mit dem Licht, das durch die Scheiben zum Vogel gelangt. Hier zeigt sich ein deutlicher Einfluss auf die Ergebnisse der Versuche.

Die Verteilung der Anflüge unter Berücksichtigung der Lichtverhältnisse im Scheibenhintergrund (Tab. 10) ist nicht zufällig. Es zeigt sich nach der Trennung der Versuche in drei Lichtklassen (<60 Wm^{-2}, 60-120Wm^{-2}, >120 Wm^{-2}) eine signifikante Abweichung von der Gleichverteilung der Anflüge (Chi² exakt 2-seitig; Chi² = 11,55; p = 0,003, n = 655). Es ereignen sich signifikant mehr Anflüge bei einer Lichtintensität des Scheibenhintergrundes von <60 Wm^{-2} und signifikant weniger Anflüge bei einer Lichtintensität von 60 – 120 Wm^{-2}. Die Residualanalyse zeigt bei schwachem Licht signifikant schlechtere Ergebnisse (adjustierte, standardisierte Residuen res_{adst} = -2,5, p < 0,01) und bei mittlerem Licht (res_{adst} = 3,3, p < 0,001) signifikant bessere.

Tabelle 10: Verteilung von Anflügen an die markierte Scheibe bei verschiedener Helligkeit des Hintergrundes der Versuchsscheiben (auf vertikaler Fläche gemessene diffuse Himmelsstrahlung + Reflexion von Vegetation und Boden).

Markierung	**Lichtintensität Hintergrund Wm^{-2}**					
	<60		**<120**		**>120**	
	n	% Fehler	*n*	% Fehler	*n*	% Fehler
10 h	*30*	20,0	*31*	22,6	*16*	25,0
10 v	*34*	14,7	*24*	**4,2**	*22*	18,2
10 v s/w	*14*	35,7	*35*	**8,6**	*37*	13,5
10 v // 5 s	*42*	14,3	*22*	**4,5**	*21*	19,0
10 v // 5 w	*32*	15,6	*24*	**4,2**	*23*	21,7
15 v	*27*	22,2	*33*	12,1	*22*	22,7
Acryl horizontal	*21*	14,3	*30*	**6,7**	*34*	2,9
Punkte	*14*	35,7	*46*	**4,3**	*21*	23,8

Mit Ausnahme der beiden ohnehin als weniger wirksam erachteten Markierungen 10 h und 15 v zeigen in der Klasse 60 – 120 Wm^{-2} alle Markierungen „Fehlentscheidungen“ unter 10%. Auffallenderweise werden von allen jenen Markierungen, die bereits in einem der Vorjahre im Flugtunnel I getestet wurden, die Ergebnisse von Flugtunnel I reproduziert. (Tab. 11).

Tabelle 11: Vergleich der Ergebnisse 2006 bei Lichtwerten aus dem Scheibenhintergrund zwischen 60 und 120 Wm^{-2} (Flugtunnel II) mit Ergebnissen der Jahre 2004 – 2005 im Flugtunnel I (Prozent Anflüge gegen Markierung).

	Flugtunnel II	**Flugtunnel I**	
	Hintergrund	**2004**	**2005**
	60 – 120 Wm^{-2}		
10 h	22,6	21,6	
10 v	4,2	4,6	6,7
15 v	12,1	11,0	
Acryl horizontal	6,7		6,7

3.3.3 Einfluss direkter Sonnenstrahlung

Bei Sonnenschein wird Sonnenlicht gleichmäßig über die Versuchsscheiben verteilt auf die Markierungen gespiegelt. Es wurde bei den Versuchen protokolliert, ob die Sonne sichtbar oder von Wolken verdeckt war. Ein Vergleich der Versuche, die bei Sonne und jenen, die bei bewölktem Himmel stattgefunden haben (Tab. 12), zeigt nur zufällige Unterschiede ($Chi^2 = 0,175$; 2-seitig; n=655; n.s.).

Tabelle 12: Verteilung von Anflügen an die markierte Scheibe bei Sonne bzw. Bewölkung

	Sonne		**keine Sonne**	
	n	% Fehler	*n*	% Fehler
10 h	*47*	23,4	*30*	20,0
10 v	*33*	18,2	*47*	8,5
10 v s/w	*47*	14,9	*39*	15,4
10 v // 5 s	*36*	11,1	*49*	14,3
10 v // 5 w	*35*	8,6	*44*	18,2
15 v	*45*	13,3	*37*	24,3
Punkte	*42*	13,2	*43*	17,9
Acryl horizontal	*53*	7,1	*28*	7,0

4 DISKUSSION

4.1 Methodische Integrität der Versuche

Eine Voraussetzung der Integrität der Versuche und der Vermeidung von Autokorrelationen besteht in der zufälligen Reihenfolge der einzelnen Versuche und in der gleichen Häufigkeit der Seite (links oder rechts), auf der die Versuchsscheiben im Wahlversuch angebracht wurden. Die für die Prüfung Ausschlag gebenden Fragen sind:

- Waren die Versuchsscheiben gleich häufig links und rechts montiert?
- Sind die Ergebnisse der Kontrollversuche gleichmäßig auf die linke und die rechte Seite verteilt?
- Sind die Ergebnisse der Versuche (unabhängig von unterschiedlicher Wirksamkeit einzelner Versuchsscheiben) gleichmäßig auf die linke und die rechte Seite verteilt?

4.1.1 Gleichverteilung der Versuchsscheiben auf linke und rechte Seite

Da nicht auszuschließen ist, dass unauffällige Unregelmäßigkeiten in der Tunnelsymmetrie oder im Scheibenhintergrund zu einer systematischen Bevorzugung einer der beiden Seiten (links oder rechts) führt, muss die zu prüfende Markierung gleich häufig links wie rechts angebracht werden. Tab. 13 zeigt die Verteilung der Versuchsscheiben auf die Positionen links und rechts in 795 Versuchen mit markierten Scheiben, unmarkierter Acrylscheibe (UV) und dem leeren Rahmen (Luft).

Tabelle 13: Position der markierten Scheiben in 795 Wahlversuchen.

Versuchsscheibe	**links montiert**	**rechts montiert**	**Summe**
10h	38	39	77
10v	38	42	80
10v // schwarz/weiss	45	41	86
10v // 5 schwarz	42	43	85
10v // 5 weiß	39	40	79
15v	41	41	82
Acryl horizont	44	41	85
Punkte	43	38	81
Acryl unmarkiert	39	29	68
Luft	37	35	72
Summe	**406 (51,1%)**	**389 (48,9%)**	**795**

4.1.2 Gleichverteilung der Anflüge auf linke und rechte Seite

Sofern die Versuchsanlage nicht zu einer systematischen Bevorzugung der linken oder rechten Seite führt, sollten die Kontrollversuche eine zufällige Verteilung der Anflüge (links / rechts) ergeben. Unter der Voraussetzung, dass sich die Versuchsscheiben gleich häufig links wie rechts befunden haben und durch zufällige zeitliche Verteilung der Versuche keine Abhängigkeit von Störgrößen besteht, sollte auch die Gesamtheit der gewerteten Versuche eine Gleichverteilung der Anflüge ergeben.

Sowohl die Kontrollversuche (n=71) als auch die gewerteten Versuche (n=795) zeigen eine fast völlige Gleichverteilung der Anflüge auf die linke und die rechten Seite. Die Gesamtsummen der Versuche verteilen sich völlig gleich (433 links, 433 rechts) auf die beiden Seiten (Tab. 14).

Tabelle 14: Verteilung der Anflüge bei 71 Kontrollversuchen (unmarkiert gegen unmarkiert) und 795 ausgewerteten Wahlversuchen (markiertes gegen unmarkiertes Floatglas und Acryl markiert, Acryl unmarkiert und „Luft“ gegen unmarkiertes Floatglas). Prozentwerte in Klammern.

	Anflug		
	links	**rechts**	**Summe**
Kontrollversuche	34 (47,9)	37 (52,1)	71
Versuche	399 (50,2)	396 (49,8)	795
Summe	**433 (50,0)**	**433 (50,0)**	**866**

4.1.3 Gleichverteilung der „richtigen“ und der „Fehl“-Entscheidungen auf linke und rechte Seite

Eine getrennte Betrachtung der Verteilung der Anflüge nach „Fehlentscheidung“ (Anflug auf die markierte Scheibe) und „richtige Entscheidung“ (Anflug auf die unmarkierte Scheibe) zeigt in beiden Fällen keine Unterschiede zur Gleichverteilung (Tab. 15).

Tabelle 15: Verteilung der Anflüge der gewerteten Versuche (nur Markierungen, n=655) bei 95 „Fehlentscheidungen“ und 560 „richtigen Entscheidungen“. Prozentwerte in Klammern.

	Anflug		
Anflug an	**links**	**rechts**	**Summe**
Markierung („falsch“)	49 (51,6)	46 (48,4)	95
Referenzscheibe (”richtig”)	279 (49,8)	281 (51,2)	560
Summe	**328 (50,1)**	**327 (49,9)**	**655**

4.1.4 Methodische Integrität der Untersuchung

Aus 4.1.1 bis 4.1.3 ergibt sich, dass die 795 gewerteten Versuche innerhalb der für die Versuche geltenden Prämissen konsistent und gültig sind. Die Prüfung der Positionen der Versuchsscheiben zeigt keine Abweichungen von der Gleichverteilung. Die Verteilung der Anflüge auf die linke bzw. rechte Seite zeigt weder bei 71 Kontrollversuchen, noch bei der Gesamtheit der 795 Versuche, weder bei den „Fehlentscheidungen“ noch bei den „richtigen“ Entscheidungen Abweichungen von der Gleichverteilung. Methodische Integrität ist folglich vollständig gewährleistet.

4.2 Diskussion der Versuchsergebnisse

4.2.1 Unmarkiertes Glas ist nicht sichtbar

Dass Vögel Glas nicht wahrnehmen, wurde neben den Effekten von Spiegelungen bisher als Ursache für die tödlichen Kollisionen an Glasscheiben angenommen, war aber noch nicht experimentell untersucht worden. Im Wahlversuch zwischen Floatglas unmarkiert und einem leeren Feld (3.2.4) zeigt sich nun deutlich, dass die Annahme zu Recht besteht und dass Vögel Glas nicht wahrnehmen.

4.2.2 Konstant gute Wirksamkeit von „Acryl horizontal“ (PLEXIGLAS SOUNDSTOP®)

„Acryl horizontal“ (PLEXIGLAS SOUNDSTOP®) ist die einzige Markierung, die im Versuch auf unter 10% Fehlentscheidungen kommt (3.2.2). Mit 7,1% ist das Ergebnis praktisch identisch mit dem Ergebnis in Flugtunnel I im Jahr 2005 und es ist kein Hinweis zu erkennen, dass seitlicher Lichteinfall negative Auswirkungen auf die vogelschlagmindernde Wirksamkeit der Markierung hat. „Acryl horizontal“ ist auch die einzige Markierung, die innerhalb der wirksamen Markierungen statistisch gesichert besser ist, als die in der Rangfolge schlechtesten der untersuchten Markierungen 15 v und 10 h.

Im ergänzenden Wahlversuch (3.2.3) zwischen unmarkiertem Floatglas und unmarkiertem Acrylglas zeigen sich keinerlei Anzeichen einer Vermeidung der unmarkierten Acrylscheibe. Damit steht fest, dass nicht das Material (Plexiglas mit UV-Absorber-Zuschlägen) den Ausschlag für die gute Wirksamkeit von PLEXIGLAS SOUNDSTOP® gibt, sondern dass die Wirksamkeit von den schwarzen Filamenten ausgeht.

4.2.3 Ein breites Mittelfeld zeigt keine Unterschiede

Nach unseren Untersuchungen gibt es keine Hinweise darauf, dass weiße Markierungen besser als schwarze wirken oder umgekehrt. Es gibt auch keine Hinweise darauf, dass weiße Markierungen z. B. bei schlechtem Licht im Hintergrund besser wirken als schwarze oder dass schwarze Markierungen bei sehr hellen Bedingungen wirksamer sind. Auch gibt es keinen Anlass zu vermuten, dass ein kombinierter schwarz-weißer Streifen Vorteile hat. Möglicherweise liegt letzteres an der simplen starren Form der untersuchten Doppellinie der Versuchsscheibe (Foto: 2.4.2). Vielleicht können innere Kontraste einer Markierung erzeugt werden, die eine bessere Wirksamkeit gewährleisten. Die Rangfolge der Markierungen aus den Versuchen 2004 mit 2cm breiten weißen Streifen (10 v > 15 v > 10 h) bleibt erhalten. Auszuschließen ist, dass die Markierungen 15 v und 10 h unter die 10%-Fehlentscheidungen-Marke kommen können.

4.2.4 Lichtverhältnisse im Hintergrund geben den Ausschlag

Die Differenzierung nach Lichtintensitäten zeigt keine Ergebnisse, die eindeutig genug wären, bei den herrschenden Stichprobengrößen Einzelvergleiche anzustellen und bestimmte Markierungen für bestimmte Situationen vorzuschlagen. Vorerst ist das Ergebnis sehr eindeutig, dass die Gesamtheit der von uns untersuchten Markierungen bei „mittleren“ Lichtverhältnissen (60 – 120 Wm^{-2}) im Scheibenhintergrund sehr zufrieden stellend funktioniert und die Markierungen die Kollisionen erheblich reduzieren. Bei extremeren Lichtverhältnissen, insbesondere wenn der Hintergrund der Scheiben relativ schwach beleuchtet ist (<60Wm^{-2}), lässt die Wirkung nach. Dass dies auch für weiße Markierungen gilt, ist erstaunlich aber kohärent. Es werden weitere Experimente notwendig sein, um das zu verstehen und daraus Empfehlungen für die Praxis abzuleiten.

4.2.5 Auf die Versuchsbedingungen kommt es an

Viele Ergebnisse der vorliegenden Studie sind neu und in dieser Differenziertheit noch in keiner der Untersuchungen zu Vogelanprall aufgetaucht. Die Methoden, mit denen an dieser Fragestellung gearbeitet wird, haben einen großen Einfluss auf die Ergebnisse und deren Aussagekraft. Die Notwendigkeit der Videoanalyse wurde bereits in RÖSSLER (2005) erörtert. Die Notwendigkeit von Lichtmessungen zeigt der Vergleich der allgemeinen Ergebnisse mit den differenzierteren Analysen des Lichteinflusses. Hier zeigt sich auch, dass Stichproben in der Größenordnung unserer Versuche bereits zu gering sind, um für einzelne Scheiben zum Beispiel eine besondere Eignung für eine von drei Lichtklassen zu prüfen.

Es kann derzeit nicht abgeschätzt werden, ob die begrenzte Tunnellänge einen Einfluss auf die Aussagekraft der Untersuchung hat, wobei es weniger darauf ankommt, in welcher Distanz Markierungen zu erkennen sind als mehr darauf, ob die Geschwindigkeiten der Vögel mit der natürlichen Situation vergleichbar sind. Videoanalysen geben nur sehr schlecht darüber Auskunft, da keine Angaben zu räumlichen Koordinaten der Vögel je Video-*frame* gemacht werden können. Eventuell wird der Tunnel in Richtung Analyse der Raumkoordinaten weiterentwickelt, um z. B. den Ort der Richtungsänderung eines Vogels und den Geschwindigkeitsverlauf besser beurteilen zu können.

Generell wurden viele Ergebnisse der Hohenauer Untersuchungen von 2004 und 2005 bestätigt. Die Hohenauer Experimente zeigen hohe Reproduzierbarkeit, eine wichtige Voraussetzung für die Untersuchungen. Sehr effiziente Markierungen, die auf eine große Zahl von Versuchen nur sehr wenige „Fehlentscheidungen“ hervorrufen, sind allerdings mit Stichprobengrößen im Bereich n=100 nicht mehr voneinander zu unterscheiden. Je besser die Markierungen werden, desto größer muss die Stichprobe werden.

4.3 Literaturanalyse zu Licht, Wahrnehmung und Verhalten

Auf einem Expertentreffen im August 2005 in Möggingen wurden verstärkte Bemühungen zur Einbeziehung der Grundlagenforschung (visuelle Wahrnehmung und neuronale Verarbeitung visueller Reize) als wichtiges Anliegen der anwendungsorientierten Forschung an Markierungen von Glasscheiben gefordert. Nicht zuletzt wegen des großen Interesses, das UV-wirksamen Markierungen entgegengebracht wird, mussten Lichtgrößen, physiologische und psychophysikalische Charakteristika der Vögel etc. besser in unsere Arbeit integriert werden. Weder in den Untersuchungen von KLEM (1990), noch in jenen von SCHMID & SIERRO (2000) oder von LEY (2004) wurden die Lichtverhältnisse gemessen oder gezielt gesteuert.

Im folgenden sollen Faktoren, die in der visuellen Ökologie der Vögel bereits erforscht wurden, nach einer Literaturrecherche vorgestellt werden. Im Vordergrund stehen:

- Zusammensetzung und Intensität des Lichtes
- Wahrnehmung von Licht, Helligkeit und Farbe
- Visuelle Wahrnehmung und Verhalten

4.3.1 Intensität und Zusammensetzung des Lichtes

Intensität und Zusammensetzung des vorhandenen bzw. wahrgenommenen Lichtes sind an jedem Ort des Raumes verschieden und abhängig von der Radianz[5] einer Lichtquelle (leuchtende oder reflektierende Objekte) und vom Winkel, mit dem das Licht aus verschiedenen Quellen auf das Auge des Betrachters auftrifft. Lichtquellen sind Sonne, blauer Himmel, Wolken, Vegetation, Boden (resp. Wasserflächen und Schnee), Objekte anthropogener Herkunft etc.

4.3.1.1 Berechnung der Lichtintensität

Die Lichtintensität (eigentlich Beleuchtungsstärke), die auf einer Fläche, die von einer Lichtquelle bestrahlt wird, wirksam wird, ist abhängig vom Winkel, in dem das Licht auf die Fläche auftrifft. Dabei wird das Lambertsche Cosinus Gesetz wirksam:

$$I = Io \cos \theta \qquad (1)$$

wobei I die Lichtintensität, Io die Intensität auffallenden Lichtes auf eine normal zur Einfallsrichtung stehende Fläche und θ der Zenitwinkel der Lichtquelle ist. Die Energie wird in Wm^{-2} angegeben.

In der freien Natur trifft Licht nicht nur von einer Lichtquelle sondern von zahlreichen reflektierenden Flächen auf. Die Intensität dieses reflektierten Lichtes (Ir) ist von den Reflexionseigenschaften der reflektierenden Flächen abhängig und wird mit

$$Ir = I * Refl \qquad (2)$$

berechnet, wobei I die auf dem Medium (Molekül der Atmosphäre, Wolke, Blatt etc.) auftreffende Strahlung bezeichnet und Refl für das Reflexionsvermögen des Mediums steht.

Die Intensität der diffusen Strahlung I_{diff}, die von allen Seiten her auf eine Fläche eintrifft, ist ein Integral der aus allen Richtungen θ (Zenitwinkel) einfallenden diffusen Strahldichte N.

$$I_{diff} = 2*\pi \int_0^{\pi/2} N(\theta) * \cos(\theta) * \sin(\theta) * d(\theta) * \theta \qquad (3)$$

4.3.1.2 Radianz direkter Sonnenstrahlung und diffuser Strahlung

ENDLER (1993) untersuchte die spektrale Zusammensetzung des Lichtes in Wäldern tropischer und gemäßigter Zonen mit einem Spektroradiometer. Für diesen speziellen Zweck wurden die Radianzen als Photonenmassen-

[5] Radianz: Licht-Strahlung bestimmter Intensität und Wellenlänge ausgehend von Licht produzierenden und Licht reflektierenden Objekten. -- Irradianz: Gesamtenergie einstrahlenden Lichtes aller Lichtquellen auf einer Fläche.

strom pro Steradiant gemessen. Die Radianz direkter Sonnenstrahlung ist um den Faktor 10^4 – 10^6 größer als die des Himmels, der Wolken oder der Vegetation (Tab. 16).

Tabelle 16: Totale Radianzen verschiedener Lichtquellen angegeben als Lichtstrom in $\mu mol*m^{-2}*s^{-1}*sr^{-1}$. Schwankung bei Wolken und Laubwerk: 45%. (ENDLER 1993)

Lichtquelle	**Totale Radianz ($\mu mol*m^{-2}*s^{-1}*sr^{-1}$)**
Sonne	$1{,}648 * 10^7$
Wolken	689,7
Blauer Himmel	101,1
Besonnte Blätter	23,52
Blätter im Schatten	1,25

4.3.1.3 Zusammensetzung des Lichtes

Die soeben besprochenen Radianzen differenzieren nicht nach einzelnen Spektralbereichen. Da Farben und Farbsehen auf unterschiedlichen Wellenlängen des Lichtes beruhen, ist es notwendig, die spektrale Zusammensetzung des Lichtes zu beachten.

Das einen Betrachter erreichende Licht einer reflektierenden Fläche ist abhängig von

- der Zusammensetzung des Umgebungslichtes, von dem die Fläche beleuchtet wird
- den Reflexionseigenschaften der Fläche (z. B. Blatt mit einem Maximum spektraler Reflektanz bei 555nm)
- und dem Medium zwischen Fläche und Betrachter (klare Luft, Dunst, Nebel).

Die Reflexionseigenschaften einer Fläche bleiben in der Regel zumindest über längere Zeiträume konstant und die Trübung des Mediums außer bei sehr nebligem oder dunstigem Wetter kann vernachlässigt werden. Unser Hauptaugenmerk liegt auf der Zusammensetzung des Umgebungslichtes, das mit dem Ort, dem Wetter und der Tageszeit stark variieren kann.

Abb. 18 zeigt die spektrale Zusammensetzung des direkten Sonnenlichtes, bewölkten und wolkenlosen Himmels und des von der Vegetation reflektierten Lichtes. Die Kurven zeigen große Intensitätsunterschiede und Unterschiede in der spektralen Zusammensetzung. Das Spektrum der Sonne ist im Bereich größerer Wellenlängen sichtbaren Lichtes reicher (röter) als das weiße von Wolken reflektierte Licht. Blauer Himmel ist reicher an kurzwelligem Licht (blauer), Blätter an Licht mittlerer Wellenlängen, und Borke reflektiert im mittleren bis langwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums. UV-Licht (<400nm) ist bei bewölktem und wolkenlosem Himmel in beträchtlichem Anteil vorhanden. Im Inneren der Vegetation fehlt es weitgehend.

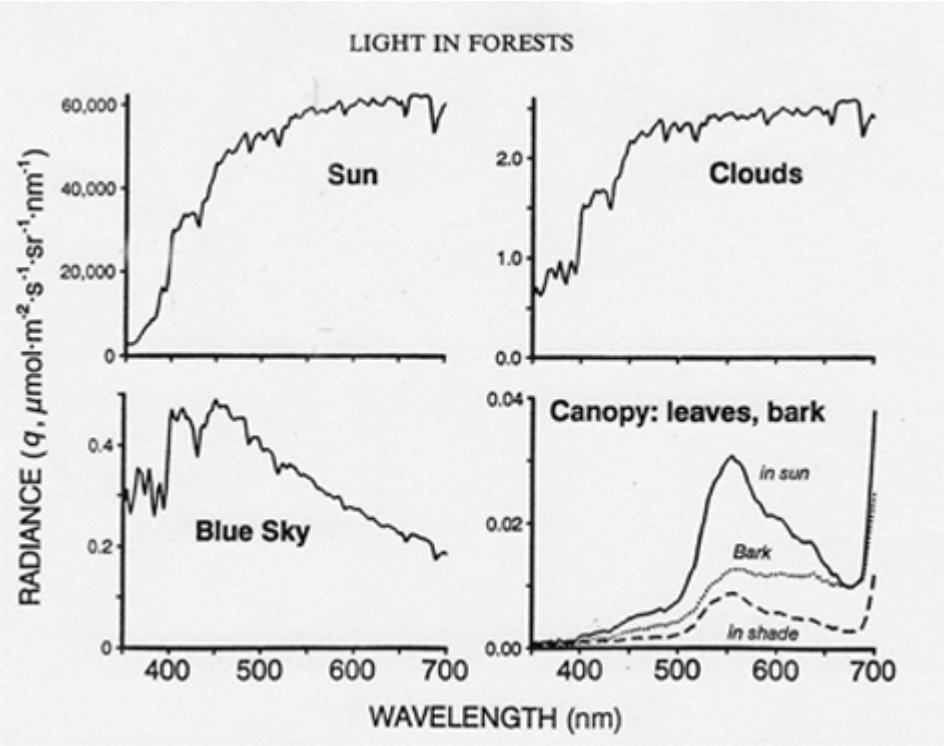

Abbildung 18: Spektrale Radianz verschiedener Lichtquellen (ENDLER 1993).

Tabelle 17: Spektrale Zusammensetzung des Lichtes (*light environments*) in verschiedenen Lichthabitaten (*light habitats*) von Wäldern (ENDLER 1993).

Lichthabitate ***(„light habitats“)***	**Merkmale**	**spektrale Zusammensetzung des Lichtes *(„light environments“)***
Schatten im Waldinneren (*(Forest shade)*	keine Lücken; kein Licht von Sonne und offenem Himmel, alles Licht von Blättern reflektiert oder transmittiert	reich an mittleren Wellenlängen des sichtbaren Spektrums; Lichteindruck: grünlich, gelbgrün
Schatten randlicher Waldbereiche (W*oodland shade)*	kleine Lücken; kein Licht von der Sonne, aber durchaus Licht von offenem Himmel, hauptsächlich Licht von Laubwerk	reich an kurzwelligem und UV Licht; Lichteindruck: bläulich, blaugrau
kleine Lichtungen *(Small gaps)*	Öffnungswinkel 0,5° (entspricht Ø Sonne), Licht von Sonne und Vegetation, kein Licht von offenem Himmel	reich an größeren Wellenlängen des sichtbaren Spektrums; Lichteindruck: rötlich
große Lichtungen *(Large gaps)*	Öffnungswinkel viel größer als 0,5°, Licht von Sonne und Vegetation, aber auch in großem Anteil von offenem Himmel	hauptsächlich „weißes“ Licht
Bewölkung allgemein (*forest shade, woodland shade, small gaps, large gaps*)		hauptsächlich „weißes“ Licht
Morgenlicht, Abendlicht		arm an mittleren Wellenlängen des sichtbaren Spektrums; Lichteindruck: purpurn (*„purplish“)*

ENDLER unterscheidet *light habitats* (z. B. Waldschatten, kleine Lichtung) und *light environments* (spektrale Zusammensetzung des Lichtes). Die Untersuchungen ergeben vier *light habitats* unter Berücksichtigung der Tageszeit und der Bewölkung und führten zur Differenzierung von fünf *light environments* (Tab. 17).

4.3.1.4 Bedeutung von variablem Umgebungslicht für Farbe und Kontrast

Die spektrale Zusammensetzung des Umgebungslichtes hat auf die Erscheinung eines Objektes unterschiedlicher Reflexionseigenschaften - Farbe (*hue*), Helligkeit (*brightness*) und Farbsättigung (*chroma*) - entscheidenden Einfluss. Aus ENDLER (1993) leitet sich Folgendes ab:

- Der Farbeindruck einer Fläche hängt von den Reflexionseigenschaften (konstant) und der jeweiligen (veränderlichen) spektralen Zusammensetzung des Umgebungslichtes ab.
- Mit einer Veränderung des Umgebungslichtes verändern sich die Kontraste zwischen Flächen (oder Flecken) verschiedener spektraler Reflektanz, da sich die spektrale Radianz dieser Flächen verschieden ändert.
- Die Helligkeit einer Fläche bestimmten Farbeindrucks hängt von der Ähnlichkeit der spektralen Reflektanz mit der spektralen Zusammensetzung des Umgebungslichtes ab.
- Mit unterschiedlicher Änderung der Farbhelligkeit verschiedener Flächen (oder Flecken) ändern sich die achromatischen Kontraste.
- Der Grad der Beeinflussung des Farbeindrucks und der Farbhelligkeit einer Fläche durch das Umgebungslicht hängt vom Chroma (Farbsättigung) ab. Je schwächer das Chroma einer Farbe desto mehr schwanken Farbeindruck und Helligkeit mit dem Umgebungslicht.

4.3.2 Wahrnehmung und Verhalten

4.3.2.1 Sechs Photorezeptoren und Ölkugeln

Bei Wirbeltieren und Insekten geschieht die Lichtwahrnehmung über Photorezeptoren in den Augen. Bei Vögeln bestehen generell dem Menschen sehr ähnliche Mechanismen. Die Photorezeptoren weisen aber sehr grundlegende Unterschiede auf: Es existiert ein vierter Zapfentyp, für den extrem kurzwelligen UV- bzw. Violett-Bereich, ein weiterer für Hell-Dunkel-Sehen mit wichtigen Aufgaben für das Bewegungssehen, und es existieren Ölkugeln, die den Photorezeptoren vorgeschaltet sind und als Farbfilter wirken. Tab. 18 zeigt die Aufgaben des retinalen Rezeptorapparates.

Tabelle 18: Wesentliche Bestandteile des Lichtsinnesapparates im Vogelauge und deren Aufgaben. Vgl.

Rezeptorapparat der Retina		**Aufgabe**
Rods	Stäbchen	Dämmerungssehen
Single cones	Zapfen, 4 Typen	Farbsehen
Double Cones	Doppel – Zapfen, 1 Typ	Helligkeits-, Bewegungssehen, kleine Strukturen
Oil droplets	Ölkugeln	vorgeschaltete Farbfilter

4.3.2.2 Farbwahrnehmung

Während Menschen über ein trichromatisches System (drei Zapfentypen) verfügen[6], haben Vögel vier Zapfentypen („*single cones*“ mit vorgelagerten Ölkugeln verschiedener Färbung als Farbfilter) für ein tetrachromatisches System abgestellt. Drei der *single cone*–Rezeptoren zeigen *peak sensitivities*[7] (λ_{max}) im spektralen Wahrnehmungsbereich des Menschen, der vierte Zapfentyp erweitert die Lichtwahrnehmung in den kurzwelligen Bereich des UV-A bzw. in jenen des violetten Lichtes (Abb. 20). *Passeriformes* zeigen für die UV-Zapfen *peak sensitivities* in kürzeren Wellenlängen als *Non-Passeriformes* (Tab. 19).

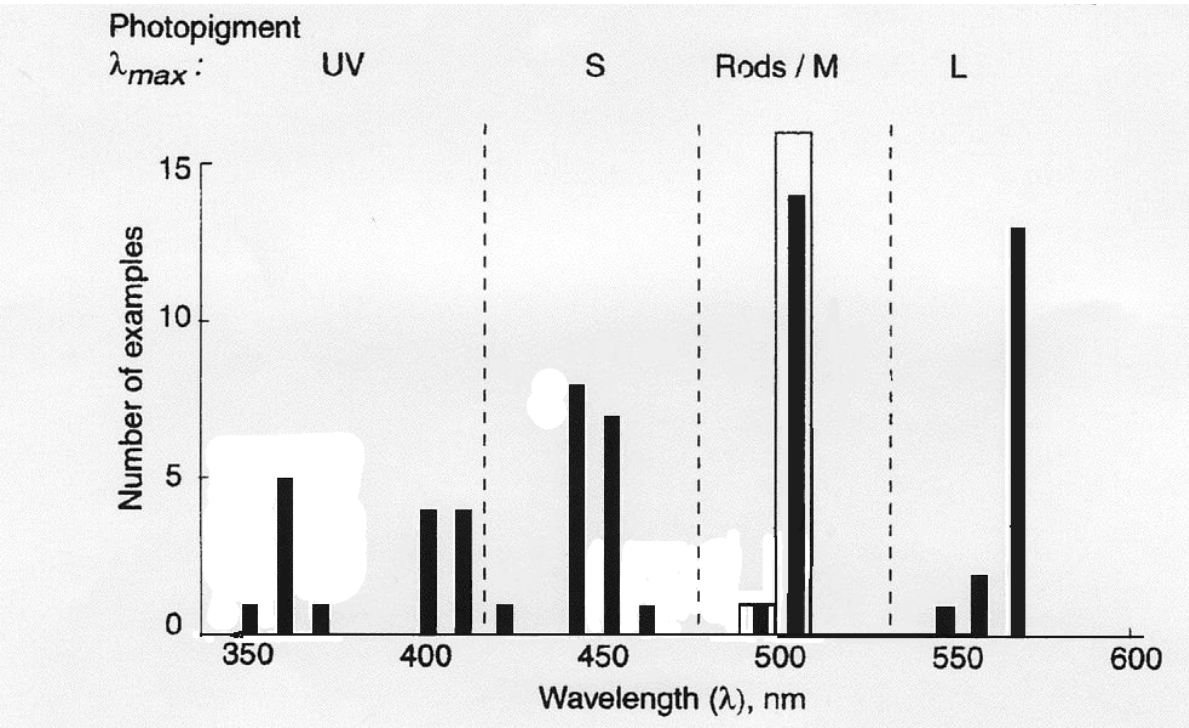

Abbildung 19: Anzahl von spektralen Empfindlichkeitsmaxima bei 17 Vogelarten mit vier Zapfentypen im Spektralbereich 350 bis 600nm. Bei der Empfindlichkeit der UV-Zapfen teilt sich das Feld in zwei Gruppen(ca. 360nm und ca. 400nm), die Empfindlichkeit der S-, M- und L-Zapfen stimmt für alle 17 Arten jeweils gut überein. OSORIO ET AL. 1999

Abb. 19 (OSORIO ET AL. 1999) zeigt neben den beiden unterschiedlichen Empfindlichkeiten des UV-Rezeptors die *peak sensitivities* für S-, M- und L-Rezeptoren von 17 untersuchten Arten mit geringer interspezifischer Streuung (BOWMAKER ET AL. 1997, VOROBYEV & OSORIO 1998).

---

[6] Trichromatismus der Primaten ist innerhalb der Säugetiere die Ausnahme, generell sehen Säugetiere dichromat.

[7] *Peak sensitivity:* Wellenlänge höchster Empfindlichkeit des Rezeptors.

Tabelle 19: *Peak sensitivities* der UV-Zapfen nach mikrospektrophotometrischen Messungen verschiedener Autoren in: OSORIO ET AL. (1999).

	Peak sensitivity λ_{max} **des UV Zapfens nm**
Non–Passeriformes **(Nicht-Singvögel)**	
Humboldtpinguin *(Spheniscus humboldti)*	403
Stockente *(Anas platyrhynchos)*	420
Straßentaube *(Columba livia)*	410
Passeriformes **(Singvögel)**	
Amsel *(Turdus merula)*	365
Star*(Sturnus vulgaris)*	362
Blaumeise *(Parus caeruleus)*	367

Prozentuale Verteilung der Zapfen auf der Retina:

VOROBYEV & OSORIO (1998) zitieren verschiedene Autoren und gehen von Zahlenverhältnissen beim Menschen von 1S:16M:32L aus, für den Sonnenvogel *Leiothrix lutea (Passeriformes)* von 1UV:2S:2M:4L und für die Straßentaube *Columba livia* von 1UV:1S:1M:2L. Beim Menschen kann der M:L-Quotient individuell stark schwanken. DILLENBURGER (2001) fand eine geschlechtsspezifisch unterschiedliche Schwankung, was über chromosomale Mechanismen erklärt werden könnte. Bisher ist nicht bekannt, welchen Einfluss die Verhältnisse zwischen den Photorezeptoren auf die Wahrnehmung haben. Die Farbwahrnehmung bei Primaten dürfte nicht beeinflusst werden (DOBKINS ET AL. 2000).

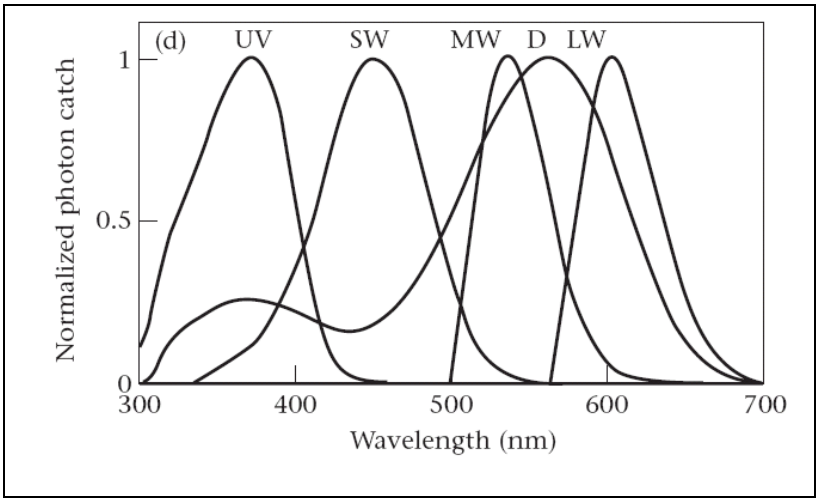

Abbildung 20: Standardisierte spektrale Empfindlichkeit der vier *single cones* (UV, SW, MW und LW) und der *double cones* (D) bei der Blaumeise (*Parus caeruleus*). (STUART-FOX ET AL. 2003 nach : HART ET AL. 2000)

4.3.2.3 Die Bedeutung chromatischer Kontraste

Die Herabsetzung des chromatischen Kontrastes zur Tarnung bzw. die Entfaltung hoher chromatischer Kontraste zur Abschreckung von Prädatoren (Aposematismus[8]) sind überlebensrelevante visuelle Elemente auf der Seite des *Erscheinungs*-bildes. Chromatische Kontraste haben große Bedeutung für Partnerwahl (sexueller Dichromatismus[9]), bei der Nahrungssuche und für das Erkennen von Objekten großflächigen Farbeindrucks.

SCHMIDT ET AL. (2004) fanden bei Tangaren (*Thraupidae*), dass nicht Frucht-„Farbe" (rot, grün, schwarz, weiß) *per se* sondern Farbkontrast zwischen Früchten und Hintergrund einen Schlüssel bei der Nahrungssuche darstellen. Die Vögel zeigten keine Bevorzugung roter (künstlicher) Früchte, sondern bevorzugen rote Früchte vor grünem Hintergrund und grüne Früchte vor rotem Hintergrund.

SCHAEFER ET AL. (2006) untersuchten die Wirkung von chromatischen und achromatischen Kontrasten an Krähen. Rote künstliche Früchte (1-2cmØ) mit hohem chromatischen Kontrast zu (Palm-)Vegetation wurden aus größerer Distanz entdeckt als schwarze künstliche Früchte mit geringem chromatischen Kontrast. Viele Früchte, die von Vögeln verbreitet werden, reflektieren UV-Licht, was als indirekter Hinweis auf eine Wechselbeziehung mit UV-sensitiven Mechanismen bei Vögeln angesehen werden kann (vgl. BURKHARDT 1982).

SCHAEFER ET AL. (2006) entfernten Heidelbeeren (*Vaccinium myrtillus*) den UV-reflektierenden Belag und setzten damit den chromatischen Kontrast zu mittellangwelligem Hintergrund (Vegetation) herab. Intakte UV-reflektierende Beeren wurden auf größere Distanz erkannt als manipulierte, nicht reflektierende Beeren mit geringem chromatischen Kontrast.

Auch Primaten entdecken im sehr helligkeitsheterogenen Laubwerk (hohe achromatische Kontraste durch Licht und Schatten, geringe chromatische Kontraste zwischen den Blättern) Früchte vorwiegend über chromatische Mechanismen (SUMNER & MOLLON 2000).

OSORIO ET AL. (1999) testeten die Bedeutung chromatischer und achromatischer Kontraste in Bezug auf die Objektgröße an Tagesküken mit Pickversuchen. Es zeigten sich klare Unterschiede: bei größeren Objekten (5mm) wurden die gegen grauen Hintergrund chromatische Kontraste erzeugenden „blauen" und „orangen" Objekte bevorzugt und weiße (achromatische Kontraste erzeugende) ignoriert.

Chromatische Kontraste innerhalb der Körperfärbung von Tieren und chromatische Kontraste zwischen Körperfärbung und der Umwelt sind wichtig für Räuber-Beute-Beziehungen (Tarnung, Aposematismus) und für Paarungssysteme. Interaktionen zwischen Blüten und Bestäubern oder zwischen Früchten und Samenverbreitern sind weitere Beispiele. UV-Reflektanz kann dabei eine wichtige Rolle spielen (BURKHARDT 1989). Da chromatische Kontraste mit Umgebungslicht und Färbung des Hintergrundes veränderlich sind, und mobile Organismen in der Wahl der Umgebung flexibel sind, besteht eine Flexibilität, chromatische Signale zur Schau zu stellen oder zu verbergen. Exposition verschiedener Körperteile zu verschiedenen Lichtquellen ist eine weitere Möglichkeit, Signale zu variieren. (ENDLER 1993, SANTOS 2005, HEINDL & WINKLER 2003).

---

[8] Aposematismus: Abschreckung von Feinden durch auffällige Färbung, die schlechten Geschmack oder Wehrhaftigkeit signalisiert (z. B. Feuersalamander).

[9] Sexueller Dichromatismus: Unterschiedliche Färbung von Männchen und Weibchen.

4.3.2.4 Helligkeitssehen geschieht im langwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums

Das Helligkeitssehen bei Vögeln funktioniert über den fünften Photorezeptor im Vogelauge, die *double cones*. Die Rezeptoren haben eine hohe Sensitivität für den Spektralbereich 500 – 650nm (Abb. 20). Zahlenmäßig nehmen die *double cones* bei Landvögeln 35 – 56% der Zapfen ein (HART 2001). Bei Seevögeln sind es nur 29 – 34% (HART 2004).

Helligkeitssehen ist also im langwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums angesiedelt. Das Erfassen achromatischer Kontraste geschieht offensichtlich schneller als das Erkennen von Farben, weshalb Bewegungssehen und Erfassen kleiner Strukturen mit dem Helligkeitssehen zum achromatischen Mechanismus gehören (OSORIO ET AL. 1999). Die *double cones* spielen für terrestrische Vögel[10] die Hauptrolle bei der Wahrnehmung bewegter Lichtreize.

4.3.2.5 Die Bedeutung achromatischer Kontraste (Hell-Dunkel-Kontraste)

Für den Menschen sind alle visuellen überlebensrelevanten Informationen in Hell-Dunkel-Kontrasten enthalten. Der Informationsverlust von einer Farbaufnahme zu einer Schwarz-Weiß-Aufnahme ist meistens eine Geschmacksfrage, selten ein Verlust von Informationsgehalt. Ein bewegter Gegenstand wird als solcher auf Grund der sich ändernden Hell–Dunkel–Kontraste zu erkennen sein. Nur im seltenen Fall wirklich isochromatischer[11] Bilder ist z. B. ein roter Socken nicht mehr von einem grünen Socken zu unterscheiden. (vgl. DILLENBURGER 2001)

Achromatische Kontraste spielen bei Vögeln die zentrale Rolle im Bewegungssehen, also zur Wahrnehmung und Kontrolle der Eigenbewegung und zum Erkennen von bewegten Objekten. In Kap. 4.3.2.3 wurde die Bedeutung achromatischer Mechanismen für das Bewegungssehen geschildert. Auch für die Nahrungssuche sind achromatische Kontraste von Bedeutung – Erkennen bewegter Beute und kleiner Objekte. Während mit chromatischen Kontrasten eher Farbflächen erkannt und differenziert werden, ermöglichen achromatische Kontraste das Erkennen von Umrissen und kleinen Strukturen.

Auf der Nahrungssuche führten achromatische Kontraste bei SCHAEFER ET AL. (2006) Testkrähen weniger rasch (i.e. aus geringerer Distanz) zu den (schwarzen) Versuchsfrüchten als chromatische Kontraste (rote Früchte).

Die in 4.3.2.3 beschriebenen Pickversuche an Tagesküken von OSORIO ET AL. (1999) zeigten für kleine Objekte (2mm) das Gegenteil der Ergebnisse als die Versuche mit großen (5mm) Objekten. Kleine weiße Objekte (achromatische Kontraste) wurden bevorzugt gepickt, und blaue und orange Objekte ignoriert. Bei größeren Objekten wurden die gegen grauen Hintergrund chromatische Kontraste erzeugenden „blauen“ und „orangen“ Objekte bevorzugt und weiße (achromatische Kontraste erzeugende) ignoriert.

Als kleine bewegte Objekte mit ausschließlich achromatischem Kontrast sind sicher auch fliegende Greifvögel am Himmel anzusehen. Angriffe von Sperber, Baumfalke etc. fallen eindeutig in die Kategorie Bewegungssehen. Zur daraus abgeleiteten Wirkung von Greifvogelsilhouetten siehe 4.4.2.

---

[10] Möglicherweise bei Seevögeln (in „kurzwelligem Ambiente“) anders. HART (2004) zählt geringere *double-cone*-Anteile bei verschiedenen Seevogelarten und schließt daraus, dass die eher im langwelligen Bereich sensitiven *double cones* bei Seevögeln weniger hilfreich sind und möglicherweise deshalb einen geringeren Anteil einnehmen.

[11] Isochromatismus: Summe der Anregungszustände aller Photorezeptoren von z. B. zwei Farben ist genau gleich.

4.4 Konsequenzen aus theoretischen Überlegungen

Es ist nicht möglich, von den Sehleistungen des Menschen auf die Sehleistungen der Vögel zu schließen. Dennoch sind viele auffällige Färbungen und Kontrastbildungen der Natur auch für Menschen sehr attraktiv bzw. wirken Mechanismen zur Tarnung auch auf den Menschen. Es weist nichts auf gravierende Unterschiede in der Farbwahrnehmung von Vögeln und Menschen hin, außer der Unterschied der UV- bzw. Violettrezeptoren, der die Vögel im sehr kurzwelligen Bereich „Farben“ wahrnehmen lässt, in dem Menschen keine Wahrnehmung haben. Die Literaturrecherche in Kap. 4.3.2 macht allerdings deutlich, dass diese Sensitivität nicht generalisiert werden kann.

4.4.1 Dichotomien des Sehens

Eine geläufige Dichotomie des Sehens besteht auch beim Menschen zwischen photopischem und skotopischem Sehen, also zwischen farbtüchtigem „Tagsehen“ unter Beteiligung der Zapfen (*cones*) und achromatischem „Nachtsehen“ unter Beteiligung der Stächen (*rods*).

Die in 4.3.2 zitierte Literatur führt zu einer weiteren Dichotomie „langsamen“ und „schnellen“, chromatischen und achromatischen Sehens. Dabei spielen zwei Rezeptortypen (*single*- und *double cones*) eine unterschiedliche Rolle. *Double cones* werden eindeutig mit Bewegungssehen in Zusammenhang gebracht. Sie verarbeiten mittel- bis langwellige Signale und setzen achromatische Mechanismen in Gang. Somit kann zumindest nicht ausgeschlossen werden, dass für das Bewegungssehen ausschließlich mittel- und langwellige Signale ausschlaggebend sind.

Dies hat Konsequenzen für die Entwicklung effektiver Markierungen von transparenten Scheiben. Eine wirksame Abschreckung für fliegende Vögel zu erzeugen, führt in den Mechanismus des Bewegungssehens, also zu auch im schnellen Flug wahrnehmbaren Strukturen und Wellenlängen. Hätten wir uns nicht mit Abschreckung sondern mit Attraktivität zu beschäftigen, könnte vermutlich der langsamere der beiden Mechanismen bedient werden.

Zur Entwicklung starker Kontraste beim Bewegungssehen werden also „schwarz“ und „weiß“ beziehungsweise alle sehr hellen und sehr dunklen (vom achromatischen Mechanismus als helle und dunkle Graustufen erkannte) Farbtöne von Wellenlängen zwischen 500 und 650nm beitragen.

Die soeben angestellten Überlegungen liefern

- eine zusätzliche Erklärung, warum eine starre Greifvogelsilhouette, die einen heranstürzenden Predatoren simuliert, wirkungslos ist und
- eine Erklärung, warum ausschließlich auf UV basierende Markierungen schlecht wirksam sind.

4.4.2 Sackgasse Greifvogelsilhouetten

Die Idee der abschreckenden Wirkung von Greifvogelsilhouetten geht vermutlich auf die Versuche von LORENZ und TINBERGEN (zit. in SCHLEIDT 1961) zurück, die in Freilandversuchen festgestellt haben, dass bestimmte Formmerkmale (kurzer Hals, langer Schwanz) bei Truthühnern Fluchtverhalten auslösen. SCHLEIDT (1961) wiederholte die Versuche unter Laborbedingungen und konnte

1. feststellen, dass erfahrungslose Truthühner (jene von LORENZ und TINBERGEN waren nicht erfahrungslos) nicht spezifisch auf bestimmte Formmerkmale (Kreuz, Kreis, Streifen, etc.) reagieren und

2. zeigen, dass das Fluchtverhalten mit der Seltenheit bestimmter Reize korreliert und abnimmt, wenn die selbe Silhouette häufig gezeigt wird.

Die erwähnten Versuche wurden mit bewegten Silhouetten gemacht. Nach den in Kap. 4.3.2 dargestellten Unterschieden in der Reizwahrnehmung und damit in Zusammenhang stehenden Unterschieden in der neuronalen Reizverarbeitung ist anzunehmen, dass angreifende Greifvögel und statisch geklebte Silhouetten bei Vögeln unterschiedlich wahrgenommen und unterschiedlich verarbeitet werden. Für die Entdeckung eines akuten Angriffs eines Feindes (Bewegungssehen) ist der achromatische Mechanismus mit seiner sehr hohen zeitlichen Auflösung (vgl. Kap. 4.3.2.5) zuständig. Die visuellen Reize, die von einem mit hoher Geschwindigkeit angreifenden Greifvogel (oder einem anderen Prädatoren) ausgehen, sind 1) überraschend, 2) schnell bewegt und werden eventuell 3) als Kette von Einzelbildern mit Strukturmerkmalen, die in ein erlerntes Alarmschema passen, erkannt. Eine auf eine Glasscheibe geklebte Silhouette ist von ihrer Größe und Unbewegtheit her schon nicht mehr ausschließlich diesem Mechanismus zuzuordnen. Es ist anzunehmen, dass diese unbewegten Silhouetten, die 1) nicht überraschend, 2) ohne Eigenbewegung und 3) als großes Objekt Reize auslösen, die in einer anderen Gehirnregion ankommen und als „Objekt - Flughindernis“ verarbeitet werden, das es in einem gewissen Abstand zu umfliegen gilt, wie einen Ast oder ein anderes Hindernis. Kollisionen an Glasscheiben sind also in nächster Nähe dieses Objektes nicht zu erwarten, eine weit reichende (über ein „Alarmschema“ ausgelöste) Wirkung allerdings auch nicht. Daher kann es in der Nähe der Silhouette zu Vogelanprall kommen, was auch geschieht. Die Wirkungslosigkeit dieser Methode wurde bereits mehrfach bewiesen (z. B. KLEM 1990, TRYBUS 2003).

4.4.3 Sackgasse UV-Markierungen?

Der von BUER & REGNER (2002) beschriebene „Spinnennetzeffekt“ soll Vögel abschrecken. Spinnenfäden beinhalten zur aktiven Anlockung von Insekten UV-reflektierende Substanzen. Dabei soll es gleichzeitig zu einer Art von Aposematismus (vgl. Kap. 4.3.2.3) kommen, der Vögel von den Netzen fernhält. Daraus leiten BUER und REGNER die Empfehlung ab, „unsichtbare Markierungen“ von Glasscheiben auf Basis von UV-Reflexion zu entwickeln, die Vögel vor Kollisionen bewahren sollen, da diese in der Lage sind, UV-Licht wahrzunehmen.

BUER und REGNER gelangen möglicherweise zu einer Fehlinterpretation der Arbeiten von BURKHARDT & MAIER (1989), BURKHARDT (1992) u. a. Sie interpretieren die prinzipielle Fähigkeit von Vögeln, UV-Licht wahrzunehmen, als generell gültig und differenzieren nicht in unterschiedliche Mechanismen des Sehens mit unterschiedlicher neuraler Verarbeitung der Signale. Die Fähigkeit von Pflanzen und Tieren, UV zu reflektieren wird gewöhnlich mit Attraktivität und nicht mit Abschreckung in Zusammenhang gebracht, möglicherweise Signalkategorien für unterschiedliche Sehkategorien (Bewegungssehen und „Suchsehen“).

Es wurde bisher nicht untersucht, ob Bewegungssehen eine untergeordnete, zentrale, oder exklusive Rolle spielt, wenn Vogelanprall an Glas vermieden werden soll. Sollte sich herausstellen, dass Bewegungssehen zentrale Bedeutung hat, muss der Frage nach der Fähigkeit, kurzwelliges Licht im Modus des Bewegungssehens wahrzunehmen, nachgegangen werden. Es spricht viel dafür, dass kurzwelliges Licht im Bewegungssehen nicht wahrgenommen wird (Kap. 4.3.2). Sollte dies alles zutreffen, wären UV-Markierungen in den meisten Fällen von untergeordneter Bedeutung.

In einer mit der unseren vergleichbaren Versuchsanordnung (allerdings mit künstlicher Beleuchtung) untersuchte LEY (2004) in 17 Versuchsreihen die vogelschlagmindernde Wirksamkeit von UV-A-reflektierenden oder UV-A-

absorbierenden Materialien. 16 Versuchsreihen zeigen kein signifikantes Vermeidungsverhalten (im Einzelvergleich). Eine Markierung zeigt signifikante Wirkung. Der Versuch wurde wiederholt und zeigt einmal 23,5% und in der Wiederholung 27% Anflüge an die „markierte Scheibe“. Die Wirksamkeit reicht also nicht an jene von beispielsweise 10 v oder „Acryl horizontal“ heran. Dies passt zur Hypothese, dass in Sehsituationen des Bewegungssehens die UV-Komponenten der Sinnesreize keine Rolle spielen, da Vögel auch in den Wahlversuchen oft vorwiegend auf Mechanismen des Bewegungssehens angewiesen sind. In Freilandsituationen in schneller Bewegung kann dieses Moment eine noch stärkere Bedeutung haben.

4.4.4 Gibt es wirksame Markierungen?

4.4.4.1 Was ist Wirksamkeit?

Unsere Untersuchungen sind wie jene von KLEM (1990) und LEY (1994) Wahlversuche. Bei Wahlversuchen bedeutet ein Ergebnis 50 : 50 „zufällige Verteilung“, also eine Wirksamkeit von 0%. Es wäre mathematisch falsch, in diesem Fall von 50% Wirksamkeit oder bei einem Ergebnis von 10% Anprall an markierte Scheibe von 90% Wirksamkeit oder Risikoverminderung zu sprechen. Sinnvoller zur Ermittlung eines Wertes zur Beurteilung der „Wirksamkeit“, aber auf Grund statistischer Gesetzmäßigkeiten problematisch und nur für mehrfach wiederholte Ergebnisse zulässig, ist eine Verdoppelung der Fehlentscheidungen. 25% „Fehlentscheidungen bedeuten demnach eine mögliche Halbierung der Mortalität und nicht eine Reduktion um 75%, 15% Fehlentscheidungen bedeuten eine mögliche Reduktion der Mortalität um 70% und nicht um 85%. Bei Stichprobengrößen unserer Versuche sind seriöse Aussagen dieser Schärfe nicht möglich.

Eine weitere mit Stichprobengrößen zusammenhängende Einschränkung zeichnet sich für die Differenzierung sehr guter Markierungen ab: Bei einer Stichprobengröße von 100 Versuchen kann noch kein statistisch gesicherter Unterschied zwischen z. B. fünf und zehn Kollisionen festgestellt werden, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass dieser Unterschied im Bereich des Zufalls liegt.

4.4.4.2 Signifikant besser als wirksam

Alle 2006 untersuchten Markierungen sind wirksam. Es interessiert aber, wie wirksam sie sind und ob es Unterschiede in der Wirksamkeit zwischen den Markierungen gibt. Mit Stichprobenumfängen von 80 – 90 auswertbaren Wahlversuchen ist es noch möglich, zwischen „wirksamen Markierungen“ zu differenzieren: Mit der Markierung „Acryl horizontal“ lässt sich eine signifikant höhere Wirksamkeit erzielen als mit dem Durchschnitt der wirksamen Markierungen. Die Markierungen 10 h und 15 v, die jedenfalls „wirksam“ sind, sind dies in signifikant geringerem Ausmaß als der Durchschnitt (Kap. 3.2).

Zusammenfassend kann gesagt werden: Es gibt viele Möglichkeiten wirksam zu markieren. Das Ergebnis „wirksam“ kann aber kein zufriedenstellendes Ziel sein, solange Glas in Vogellebensräumen zunehmend verwendet wird. „Wirksame Markierungen“ sind für die Vogelfauna dann wirksam, wenn sie nicht nur die Effekte der zunehmenden Verwendung von Glas kompensieren, sondern zu einer Trendumkehr beim Vogeltod durch Anprall an Glas führen. In Hohenauer Ergebnissen formuliert ist das Ziel, Markierungen zu entwickeln, welche die Anflüge an Markierungen im Wahlversuch in den Bereich von fünf bis zehn Prozent drücken. Das ist im Fall der Acrylscheibe PLEXIGLAS SOUNDSTOP® möglich. Alle Markierungen (außer 10 h und 15 v) erreichen dieses Ziel bei optimaler Beleuchtung des Hintergrundes, für schlechte Lichtverhältnisse gilt dies aber nicht.

4.4.5 Aktualisierte Empfehlungen

Es muss im Bewusstsein bleiben, dass Vogelanprall von gut erkennbaren Markierungen wohl erheblich reduziert aber bei weitem nicht verhindert werden kann. Vermehrte Verwendung von Glas relativiert die Wirksamkeit von Markierungen.

Es wird empfohlen, die Markierungen 15 v und 10 h nicht mehr anzuwenden. Die Markierung 10 h, also waagrechte weiße Linien im Abstand von 10cm wurde vor Beginn der Hohenauer Untersuchungen 2004 fallweise empfohlen und ist auch an Gebäuden oder Lärmschutzwänden zu sehen. Horizontale Linien sind nur bei geringem Linienabstand akzeptabel, während vertikale Linien bis zu Abständen von 10cm vertretbar sind.

„Acryl horizontal“ kann vorerst uneingeschränkt zur Reduzierung von Vogelanprall empfohlen werden. Es gibt immer noch Faktoren, die möglicherweise in den Versuchen zu wenig berücksichtigt werden konnten, und es ist auch noch nicht ausreichend geklärt, warum „PLEXIGLAS SOUNDSTOP®“ bessere Resultate erzielt als andere Markierungen. Es spricht aber alles für eine sehr gute Vereinbarkeit dieser Scheibe mit Zielen zur Vermeidung von Vogelanprall.

Weiterhin kann 10 v empfohlen werden. Wie die Ergebnisse 2006 nahe legen, ist 10 v unter breit gestreuten Lichtbedingungen wie erwartet weniger wirksam als im Flugtunnel I (Flugtunnel I: 2004: 4,6%, 2005: 6,7%, Flugtunnel II: 2006: 12,5%). Mit Markierungen des Typs 10 v lässt sich in den meisten Situationen immerhin eine Reduktion der Vogelverluste um zwei Drittel erwarten (nach mehr als 250 Versuchen mit dieser Markierung erscheint diese Aussage zulässig).

Eine Kombination schwarze Linie – weiße Linie wird vorerst nicht empfohlen. In kommenden Versuchsreihen wird die Untersuchung der Wirkung von Kontrasten noch verstärkt werden, vorerst ist dieser Fragenkomplex durch die Versuchsergebnisse 2006 noch nicht genügend greifbar. Die Reduktion der Breite der Streifen auf z. B. 5mm bzw. der Größe von Elementen im Allgemeinen wird vorerst noch nicht empfohlen. Hier braucht es noch eine Festlegung welche Fernwirkung erzielt werden muss und Untersuchungen, welche Dimensionen im Modus des Bewegungssehens aufgelöst werden.

Ausschließlich UV-wirksame Markierungen sind noch nicht am Markt. Die zur Zeit verfügbaren Daten geben Anlass zur Skepsis, dass die Wirksamkeit in die Nähe von guten kontrastierenden „sichtbaren“ Markierungen kommt. Generell geben lassen die in Kap. 4.3 vorgestellten Forschungsergebnisse eher vermuten, dass das Bewegungssehen UV-Licht nicht erfasst. Bewegungssehen spielt vermutlich eine zentrale Rolle beim Erkennen von Glasmarkierungen. Vorerst können auch noch keine Empfehlungen zu färbigen Markierungen gemacht werden. Theoretisch sind hohe Helligkeit, hohes Chroma und Wellenlängenbereiche zwischen 500 und 650nm zu bevorzugen. Die Wirksamkeit hängt vermutlich von achromatischen Komponenten ab.

4.5 Die nächsten Schritte

4.5.1 Weitere Experimente

Wie in Kap. 1 angesprochen, wird die Exploration neuer und die Optimierung wirksamer Markierungen (z. B. geringster Deckungsgrad, kleinste Objektgröße, etc.) auch in Zukunft notwendiges Anliegen unserer Versuche sein. Dazu gehört auch das sichere Ausschließen von Fehlentwicklungen auf Basis von deutlich negativen Ergebnissen.

Mehrfach wurde bereits ein negatives Ergebnis erwartet, die Tests ergaben aber passable oder sehr gute Wirksamkeit. Solche Ergebnisse leiten meist sehr gute Erkenntnisprozesse ein.

Nach den überraschenden Ergebnissen von 2006, dass es keine Unterschiede zwischen den Extremen „Weiß“ und „Schwarz“ gibt, drängt sich die Frage auf, ob es vielleicht auch keine Unterschiede dieser beiden Markierungen zu „Grau“ gibt. Dies könnte die Wirksamkeit der farblosen semitransparenten Markierung „Koralle“ im Jahr 2004 bestätigen (aber nicht erklären). Im Jahr 2007 sollen also auch Markierungen mit mäßigem „Kontrastpotenzial“ untersucht werden, schließlich waren die Ergebnisse mit schwarz und weiß nicht eindeutig. Semitransparente Markierungen arbeiten nach einem anderen Prinzip als Folien, die wie Filter bestimmte Wellenlängen eliminieren, aber die Bildkonturen nicht verändern. Nach diesem λ-spezifischen Prinzip funktionieren vermutlich UV-Markierungen. Semitransparente Folien ändern an der Wellenlängen-Komposition wenig, streuen aber das Licht, wodurch die Bildkonturen verändert und dadurch Strukturkontraste erzielt werden.

Weiters sollen demnächst echte „Farben“ getestet werden, und die Variablen „Spektrale Reflektanz“ und „Chromatischer Kontrast“ und „Achromatischer Kontrast“ (hohes und niedriges Chroma, hoher und niedriger Helligkeitswert) eine Rolle spielen.

Ein ganz anderer Weg könnte mit dem Erzeugen eines Bewegungseindrucks eingeschlagen werden, der dreidimensionale Markierungen einschließt bzw. Markierungen vor und hinter der Scheibe, die sich in Folge von Bewegungsparallaxen zu einander verschieben. Auch daran wird gearbeitet.

Alle Versuche und die daran gekoppelten Messungen des Umgebungslichtes im Jahr 2007 werden auch mit den Erfordernissen der Entwicklung des Modells zur nachträglichen Ermittlung der Kontraste abgestimmt.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Seit 2004 werden an der Biologischen Station Hohenau-Ringelsdorf Markierungen von Glasscheiben zur Verminderung von Vogelanprall untersucht. Bisher stand die Formwahrnehmung im Vordergrund, weshalb die Untersuchungen zunächst unter optimierten Lichtbedingungen durchgeführt wurden. Um eine realistischere Einschätzung der Wirkung von Licht im allgemeinen und Kontrasten im besonderen zu bekommen, wurde ein neuer Flugtunnel konzipiert und konstruiert, der den alten Versuchstunnel abgelöst hat. Die Versuchsanlage ist drehbar horizontal gelagert und folgt dem Sonnengang. Über zwei vertikale Spiegel wird das direkte Sonnenlicht parallel, symmetrisch und gleichmäßig auf die beiden Versuchsscheiben reflektiert. Diffuses Tageslicht gelangt von oben, den Seiten und über die Spiegel zu den Scheiben. Im „Flugtunnel II“ kann nun die Wirkung von Markierungen unter Tageslichtverhältnissen experimentell untersucht werden. Die Globalstrahlung und die Lichtverhältnisse hinter den Versuchsscheiben werden gemessen, die Beleuchtung der Scheiben (Reflexion der Markierungen) über ein Modell errechnet.

Unter den breit gestreuten Lichtbedingungen der Versuche 2006 erweisen sich alle untersuchten Markierungen als wirksam. Unmarkiertes Glas und unmarkiertes Acrylglas ohne UV-Transmittanz wurden ebenfalls untersucht. Sie werden nicht wahrgenommen und nicht vermieden. Innerhalb der acht untersuchten Markierungen zeigt die Versuchsscheibe PLEXIGLAS SOUNDSTOP® mit 2mm breiten schwarzen horizontal verlaufenden Streifen im Abstand von 28mm die höchste Wirksamkeit unter den Versuchsscheiben. Die bereits 2004 als weniger wirksam betrachteten Markierungen 15 v (20mm breite weiße vertikal verlaufende Linien im Abstand von 15cm) und 10 h (20mm breite weiße horizontal verlaufende Linien im Abstand von 10cm) zeigen abermals geringere Effektivität. Es gibt ein breites Mittelfeld von Markierungen sehr ähnlicher Wirksamkeit. Es gibt vorerst keine Hinweise darauf, dass sich weiße und schwarze Markierungen in ihrer Wirksamkeit unterscheiden. Es gibt auch keine Hinweise darauf, dass Unterschiede zwischen 2cm breiten und 0,5cm breiten Streifen bestehen.

Die Ergebnisse der Studien 2004 und 2005 werden weitgehend bestätigt. Bei Lichtintensitäten des Hintergrundes zwischen 60 und 120Wm^{-2} werden die Ergebnisse der Jahre 2004 und 2005 fast genau reproduziert. Es zeigt sich, dass die Wirksamkeit der untersuchten Markierungen stärker von den Lichtverhältnissen im Hintergrund der Scheibe abhängt als von der Beschaffenheit der untersuchten Markierungen. Bei schlechtem Hintergrundlicht schneiden die Markierungen signifikant schlechter ab, bei mittleren Lichtverhältnissen signifikant besser.

Der vorliegende Bericht widmet sich in einer Literaturanalyse neuen Erkenntnissen über die visuelle Ökologie der Vögel. Es liegt die Vermutung nahe, dass Bewegungssehen auf den mittellangwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums begrenzt ist und UV-Sehen nicht mit Bewegungssehen kompatibel ist. Sollte sich zeigen, dass Mechanismen des Bewegungssehens die zentrale Rolle bei der Erkennung von Glas-Markierungen spielen, liegt der Ansatzpunkt für weitere Entwicklungen bei achromatischen Markierungen (weiß, grau, schwarz) und färbigen Markierungen aus dem Bereich 500 – 650nm bzw. bei Markierungen, die das Bewegungssehen verstärkt ansprechen (Scheinbewegungen durch dreidimensionale Effekte).

6 LITERATUR

Bowmaker, J.K., L.A. Heath, S.E. Wilkie & D.M. Hunt (1997): Visual pigments and oil droplets from six classes of photoreceptor in the retinas of birds. Vision Res. 37: 2183 – 2194.

Buer, F. & M. Regner (2002): Mit „Spinnennetz-Effekt“ und UV-Absorbern gegen den Vogeltod an transparenten und spiegelnden Scheiben. Vogel und Umwelt 13: 31 – 41.

Burkhardt, D. (1982): Birds, berries and UV. Naturwissenschaften 69: 153 –157.

Burkhardt, D. (1989): UV vision: a bird’s eye view of feathers. J. Comp. Physiol A 164: 787 – 796.

Burkhardt, D. (1992): Ultraviolettsehen bei Vögeln. Nat. Wiss. Rundschau 45: 253 – 258.

Burkhardt, D. & E. Maier (1989): The spectral sensitivity of a passerine bird is highest in the UV. Naturwissenschaften 76: 82 – 83.

Dillenburger, B. (2001): Bewegungssehen chromatischer isoluminanter Reize. Diplomarbeit Univ. Tübingen. 69 pp.

Dobkins, K.R., A. Thiele & T.D. Albright. Comparison of red-green equiluminance points in humans and macaques: evidence for different l:m cone ratios between species. J. Opt. Soc. Am. A, 17: 545 – 556.

Endler, J.A. (1978): A predator’s view of animal color patterns. Evolutionary Biology 11: 319 – 364.

Endler, J.A. (1993): The color of light in forests and its implications. Ecol. Monographs 63 (1): 1-27.

Haberman S. (1973): The Analysis of residuals in cross-classification tables. Biometrics 29: 205 - 220.

Hart, N.S. (2001): Variation in cone photoreceptor abundance and the visual ecology of birds. J. Comp. Physiol. A 187: 685 – 697.

Hart, N.S. (2004): Microspectrophotometry of visual pigments and oil droplets in a marine bird, the wedge-tailed shearwater *Puffinus pacificus*: topographic variations in photoreceptor spectral characteristics. Journal of Experimental Biology 207: 1229-1240.

Hart, N.S., J.C. Partridge, I.C. Cuthill & A. T. D. Bennett (2000): Visual pigments, oil droplets ocular media and cone photoreceptor distribution in two species of passerine bird: the blue tit (*Parus caeruleus* L.) and the blackbird (*Turdus merula* L.). J. Comp. Physiol. A 186: 375 – 387.

Heindl, M. & Winkler, H. (2003): Interacting effects of ambient light and plumage color patterns in displaying wire-tailed manakins (*Pipra filicauda*, Aves, Pipridae). Behav. Ecol. Sociobiol. 53: 153 – 162.

Klem, D. Jr. (1990): Collisions between birds and windows: Mortality and prevention. J. Field Ornithol. 61: 120 – 128.

Ley, H.W. (2004): Experimentelle Überprüfung der Wahrnehmbarkeit patentierter Vogelschutzgläser durch eine Stichprobe mitteleuropäischer Gartenvögel. Radolfzell. 12 pp.

Osorio, D., A. Miklosi & Z. Gonda (1999): Visual ecology and perception of coloration patterns by domestic chicks. Evol. Ecol. 13: 673 – 689.

Richarz, K (2001): Glasscheiben als Vogelfallen. In: Richarz, K., E. Bezzel & M. Hormann Hrsg.: Taschenbuch für Vogelschutz. Wiebelsheim, Aula-Verl. 630 pp.

Rössler, M. & T. Zuna-Kratky (2004): Vermeidung von Vogelanprall an Glasflächen. Experimentelle Versuche zur Wirksamkeit verschiedener Glasmarkierungen bei Wildvögeln. Wiener Umweltanwaltschaft, Wien. 40 pp. Online: www.wien.gv.at/wua/pdf/studie-roessler-zuna.pdf

Rössler, M. (2005): Vermeidung von Vogelanprall an Glasflächen. Weitere Experimente mit 9 Markierungstypen im unbeleuchteten Versuchstunnel. Wiener Umweltanwaltschaft, Wien. 27 pp. Online: www.wien.gv.at/wua/pdf/studie-roessler.pdf

Santos, S.I.C.O. (2005): Seeing the invisible. Ph.D. Thesis, Utrecht University, The Netherlands.

Schäfer, H. M., D.J. Levey, Schaefer V. & M. L. Avery (2006): The role of chromatic and achromatic signals for fruit detection by birds. Behav. Ecol. 17: 784 – 789.

Schleidt, W.M. (1961): Über die Auslösung der Flucht vor Greifvögeln bei Truthühnern. Naturwissenschaften 48: 141 – 142.

Schmid, H. & A. Sierro (2000): Untersuchungen zur Verhütung von Vogelkollisionen an transparenten Lärmschutzwänden. Natur und Landschaft. 11:426 – 430.

Schmidt, V., H.M. Schaefer & H. Winkler (2004): Conspicuousness, not colour as foraging cue in plant-animal signalling. Oikos 106: 551 - 557.

Stuart-Fox, D.M, A. Moussalli, N.J. Marshall & I.P.F. Owens (2003): Conspicious males suffer higher predation risk: visual modelling and experimental evidence from lizards. Animal Behav. 66: 541 – 550.

Sumner, P. & J.D. Mollon (2000): Chromaticity as a signal of ripeness in fruits taken by primates. J. Exp. Biol. 203: 1987 – 2000.

Trybus, S. (2003): Wirksamkeit von Greifvogelsilhouetten zur Verhinderung von Kleinvogelanprall an Glasfronten. Diplomarbeit. Hrsg. Wiener Umweltanwaltschaft, Wien. 34 pp.

Vorobyev, M. & D. Osorio (1998): Receptor noise as a determinant of colour thresholds. Proc. R. Soc. Lond. B 265: 351 – 358.

Anschriften der Autoren:

DI Martin Rössler
Matznergasse 8/28
A- 1140 Wien
m_roessler@gmx.at

Ing. Wolfgang Laube
Universität f. Bodenkultur
Institut für Meteorologie
Peter Jordan Str. 82
A-1190 Wien
wolfgang.laube@boku.ac.at

Ao. Univ. Prof. Dr. Philipp Weihs
Universität f. Bodenkultur
Institut für Meteorologie
Peter Jordan Str. 82
A-1190 Wien
philipp.weihs@boku.ac.at