Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft in Bern
Band: 22 (1964)

Artikel: Stoffliche Grundlagen der Gefiederfarben der Vögel
Autor: Völker, Otto
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-319528

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Otto Völker [1]

Stoffliche Grundlagen der Gefiederfarben der Vögel [2]

Die Farbenerscheinungen im Gefieder der Vögel können auf sehr verschiedene Weise zustande kommen. Hier ist zu unterscheiden zwischen den sogenannten optischen oder Strukturfarben und den chemischen oder Pigmentfarben. Bei vielen Gefiederfärbungen kommt es zu einer innigen Verflechtung dieser beiden so verschiedenartigen farbenerzeugenden Prinzipien.

Wenden wir uns zunächst den optischen Farben zu, so ist ihr jeweiliges Auftreten grundsätzlich gebunden an eine gewisse morphologische Struktur im Aufbau der Feder. Die einfachste derartige Strukturfarbe ist daß Weiß pigmentfreier Federn. Sie kommt zustande durch die lufterfüllten Markzellen der Federäste, an denen das Licht total reflektiert wird. Eine andere, sehr häufig auftretende optische Farbe ist das Strukturblau, ein Blau optisch trüber Medien. Die Wand modifizierter Markzellen wirkt hierbei als lichtzerstreuendes, also optisch trübes Medium, wobei die Farbe Blau resultiert. Stets trägt unterlagerndes dunkles Pigment — Melanin —, indem es die Reststrahlen absorbiert, dazu bei, das Blau besonders intensiv hervortreten zu lassen. Ein Beispiel hierfür ist das schöne Blau der Flügeldeckfedern beim Eichelhäher (*Garrulus glandarius*). Gesellt sich zu dem Strukturblau gelbes Pigment in der Rindenschicht der Feder, so erscheint durch diese Kombination die Feder grün. Tritt rotes Pigment an die Stelle des gelben, so wirkt die Feder violett.

Wieder andere optische Farben sind die weitverbreiteten metallisch glänzenden Dünnblatt- oder Schillerfarben, die besonders eindrucksvoll im Gefieder der Kolibris (*Trochilidae*) und der Glanzstare

[1] Herr Prof. Dr. O. Völker, Zoologisches Institut der Justus Liebig-Universität, Gießen.

[2] Sitzung der Naturforschenden Gesellschaft in Bern vom 19. Juni 1964.

(*Lamprocolius*) hervortreten. Die mit dem Lichteinfall sich ändernden Farben entstehen durch Interferenz an den Schillerradien der Federäste, in denen feinste Melaninblättchen das Interferenz erzeugende Medium darstellen.

Bei den vielen Modifikationen, welche die Strukturfarben in den verschiedenen Verwandtschaftsgruppen der Vögel erfahren, ist es für das unbewaffnete Auge nicht immer leicht, diese als solche zu erkennen. Hinzu kommt, daß in neuester Zeit bei gewissen Tauben (*Ptilinopodinae*) Schillerstrukturen gefunden wurden, die, unabhängig vom Lichteinfall, zum Beispiel grünes Licht nach allen Richtungen reflektieren, so daß eine Wirkung erzielt wird wie bei einer Pigmentfarbe. In der Regel verschafft jedoch ein Blick ins Mikroskop oder ein Extraktionsversuch die wünschenswerte Klarheit.

Ich habe bereits auf die große Bedeutung dunkler Pigmente, der Melanine, beim Zustandekommen der Strukturfarben hingewiesen. Diesen Farbkörpern kommt jedoch weit darüber hinaus eine große Verbreitung im Vogelgefieder zu, denn nach der Häufigkeit ihres Auftretens beurteilt, stehen sie unter allen Pigmenten weitaus an erster Stelle. Es sind in granulärer Form abgelagerte Pigmente von hellbrauner bis schwarzer Farbe, die man auf Grund ihrer unterschiedlichen Löslichkeit in Alkalien in Eu- und Phaeomelanine einzuteilen pflegt. Wir wollen uns aber mit ihnen nicht näher auseinandersetzen, da bis heute noch kein Melanin als einheitliche chemische Verbindung isoliert werden konnte. Man weiß nur, daß sie als hochmolekulare Körper außer Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff auch Stickstoff enthalten und biochemisch als Endprodukte des Eiweißstoffwechsels zu betrachten sind.

Die Vogelfeder ist das differenzierteste von allen Gebilden, das die Epidermis der Wirbeltiere hervorzubringen vermag. Fassen wir die Fülle der in ihr zur Ablagerung kommenden Pigmente ins Auge, so erblicken wir hierin den Ausdruck für eine stoffliche Differenzierung, die der morphologischen offenbar parallel läuft. Es sind uns heute extreme Fälle bekannt, in denen beim Zustandekommen der Färbung einer Einzelfeder Pigmente beteiligt sind, die zumindest drei Farbstoffklassen angehören. Wie viel einfacher muten uns demgegenüber Pigmentierungen an, wie wir solche vom Haar der Säugetiere her gewohnt sind, und auch die Färbung der Reptilienhaut reicht bei weitem nicht an die Kompliziertheit der Vögel heran.

Von Extremen will ich an dieser Stelle absehen. Vielmehr möchte ich zunächst mit einer Pigmentklasse vertraut machen, welcher das Vogel-

gefieder seine leuchtenden gelben bis roten Färbungen verdankt. Es sind jene gelben bis roten Farbtöne, die auch den Feldornithologen immer wieder faszinieren, wenn sie im Sehfeld seines Feldstechers aufleuchten, seien dies die Federn als solche oder die «Rosen» einiger Waldhühner oder auch die Beine schlanker Limicolen und anderer Vogelarten.

Es handelt sich bei den Farbstoffen, die unsere Färbungen hervorzaubern, um die Klasse der Lipochrome oder Fettfarbstoffe, die man heute mit dem gebräuchlicheren Namen als Carotinoide (= carotinähnliche Stoffe) bezeichnet, so benannt nach ihrer Stammverbindung, dem Carotin. Wir wissen heute, daß nur die Pflanze zum Aufbau derartig gefärbter Verbindungen befähigt ist, der Vogel also auf die Zufuhr der Carotinoide mit der Nahrung angewiesen ist, um diese dann wieder in seinem Integument zur Ablagerung zu bringen. Was die Häufigkeit dieser Farbstoffe bei den Vögeln betrifft, so sind sie nächst den Melaninen am weitesten verbreitet. Doch stets handelt es sich um minimale Substanzmengen, die besonders in der Feder ein Optimum an Wirkung erzeugen!

Schon verhältnismäßig früh boten die Carotinoide der Forschung einen Angriffspunkt durch ihre Löslichkeit in Fetten und organischen Lösungsmitteln, weiter durch ihre ausgeprägten Absorptionserscheinungen im sichtbaren Bereich des Spektrums. Carotinoide ergeben ferner mit konzentrierter Schwefelsäure eine Blaufärbung, vor allem geeignet zu ihrem mikroskopisch-histologischen Nachweis, doch haften dieser Reaktion alle Vorteile und Schwächen einer Klassenreaktion an, da sie über den Bereich der Carotinoide hinausgeht. Es vermochten jedoch erst die Einsichten der letzten 30 Jahre Klarheit über das Wesen dieser Farbstoffe bei Pflanze und Tier zu schaffen. Bei allen nun folgenden Betrachtungen sind jedoch die gelben und roten Federfarbstoffe der Papageien (*Psittaci*) bewußt auszuschließen, da es sich bei diesen um eine chemisch noch unbekannte Pigmentklasse handelt. Nur die Farbe und die stark ungesättigte Natur haben diese Papageienfarbstoffe mit den Carotinoiden gemeinsam, in allen übrigen Eigenschaften weichen sie jedoch stark von ihnen ab.

Zur Methode der Analyse sei hier nur erwähnt, daß man nach bewährten klassischen Verfahren mit alkoholischer Lauge den Federn das Lipochrom entzieht und es dann in organische Lösungsmittel überführt. Hierauf wird die Lösung der chromatographischen Adsorptionsanalyse unterworfen. Liegt ein Gemisch von Farbstoffen vor, so wird dieses hierbei in

seine Komponenten zerlegt. Sofern die Menge des Ausgangsmaterials dies gestattet, ist jedoch in jedem Falle die Isolierung des fraglichen Farbstoffes in kristallisierter Form höchstes Ziel, weil erst dadurch die Realität eines Farbkörpers sichergestellt wird und die Voraussetzung für seine weitere chemische Reinigung geschaffen ist. Trotz zahlreicher indirekter Nachweismethoden genießt dieser Vorgang noch immer den höchsten Rang. Wir machen bei diesem Vorgehen genau das Gegenteil von dem, was uns die Natur zuvor vollzog: während sie in subtiler Kleinarbeit eine winzige Farbstoffmenge auf die enorme Oberfläche der Federn verteilte, um damit ein weithin sichtbares Aushängeschild zu erzielen, streben wir die konzentrierteste Form des Pigments, d. h. seine Abscheidung in kristallisiertem Zustand mit dem Ziel seiner Identifizierung an.

Die sehr verbreitete gelbe Federfarbe kommt in der Regel durch die Einlagerung von Lutein (Xanthophyll) zustande. Durch das Aufarbeiten von 10 ausgezeichneten Bälgen des afrikanischen Pirols *Oriolus auratus*, war es sogar möglich, die präparative Darstellung dieses Pflanzenfarbstoffes anzustreben. Es gelang schließlich nach gründlicher Reinigung das Pigment in Form wohlausgebildeter Kristalle zu erhalten, die sich als völlig identisch erwiesen mit Lutein. Es ist das erste und bis jetzt einzige gelbe Pigment, das aus Federn isoliert und identifiziert werden konnte. Carotin kommt daneben nur in Spuren vor. Dies Beispiel zeigt uns zugleich, wie streng selektiv die Aufnahme und Ablagerung carotinoider Stoffe hier erfolgt. Diese Vogelart spricht nur auf das Lutein ihrer Nahrung an, das sie in völlig unveränderter Form in ihren Federn wieder zur Ablagerung bringt. Es herrschen hier ähnliche Verhältnisse vor wie im Eidotter normal ernährter Hennen, wo ebenfalls dem Lutein die dominierende Rolle zukommt. Dem Lutein verdanken auch die gelben Federn von Goldammer (*Emberiza citrinella*) und Wiesenstelze (*Motacilla flava*) und vielen anderen Vögeln ihre Färbung, und ich bin sicher, daß auch hier die Isolierung des Farbstoffes mit einer genügend großen Menge Ausgangsmaterial gelingt.

Verhältnismäßig selten ist das Zeaxanthin, der Farbstoff des gelben Maises, als Federfarbstoff anzutreffen. Bis jetzt fand es sich nur neben Lutein, von dem es in wechselnder Menge bei den einzelnen Spezies begleitet wird, zum Beispiel in den gelben Federn der Taube *Chrysoena victor* und vom Gelben Felsenhahn (*Rupicola p. peruviana*).

Es gibt aber auch gelbe Federn, deren Carotinoide mit Lutein nicht identisch sind, so zum Beispiel das Lipochrom in den Federn des gelben Kanarienvogels, das wir herkunftsgemäß mit Kanarienxanthophyll

bezeichnen, und das sich vor allem durch sein gegenüber Lutein kürzerwelliges Absorptionsspektrum von diesem unterscheidet. Es findet sich auch in der gelben Flügelbinde des Stieglitzes *(Carduelis carduelis)*. Das Gelb von Girlitz (*Serinus serinus*) und Grünfink (*Chloris chloris)* kommt ebenfalls durch die Einlagerung von Kanarienxanthophyll zustande. Füttert man den gelben Kanarienvogel mit reinem Lutein, so findet sich in seinen Federn Kanarienxanthophyll. Damit ist gezeigt, daß das Kanarienxanthophyll ein Umwandlungsprodukt des Luteins ist, das im Vogel aus diesem gebildet wird.

Ein weiteres gelbes Carotinoid, von auffallend kurzwelliger Absorbtion, findet sich in den gelben Federn von Spechten (*Picidae*) und Tangaren (*Tanagridae*). Weil man es in Spechtfedern zuerst fand, nennt man es auch heute noch Picofulvin. Es verdient besonders hervorgehoben zu werden, daß in solchen Federn Lutein völlig fehlt, obwohl die Tangaren als Früchtefresser diesen Farbstoff zweifellos in großer Menge aufnehmen. Daher ist auch das Picofulvin als ein spezifisches Umwandlungsprodukt gelber Nahrungscarotinoide aufzufassen. Alle diese Vogelarten besitzen eben die Fähigkeit, gelbe Nahrungscarotinoide mehr oder minder stark zu transformieren.

Über den chemischen Bau von Kanarienxanthophyll und Picofulvin vermögen wir zurzeit noch keine gesicherten Aussagen zu machen, da beide in Substanz noch nicht gewonnen werden konnten. Sicher ist jedenfalls, daß diese beiden Feder-Xanthophylle mit authentischen pflanzlichen Carotinoiden, denen sie im Sektrum sehr ähneln, nicht identisch sind.

Wir haben also in den drei gelben Lipochromen: Lutein, Kanarienxanthophyll und Picofulvin drei verschiedene Federfarbstoffe kennen gelernt, deren Kolorit von unserem Auge kaum unterschiedlich wahrgenommen wird, die aber dennoch in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften so sehr von einander abweichen. Einem sehr ähnlichen Tatbestand werden wir sehr bald bei der Betrachtung roter Lipochrome gegenüber stehen.

Wenden wir uns nunmehr nach diesen Erörterungen der Analyse der roten Gefiederfarben zu, also jenen Lipochromen, die durch ihre große Labilität dem Tiergärtner wie dem Vogelliebhaber allzu oft großen Kummer bereiten, so ergibt sich hierbei die folgende Situation: in vielen Fällen erweist sich rotes Lipochrom als eine Mischfarbe, die sich chromatographisch in eine Gelb- und eine Rotkomponente quantitativ zerlegen läßt. Der gelbe Anteil ist dabei Kanarienxanthophyll oder Lutein, wäh-

rend der rote Anteil zunächst keine stoffliche Charakterisierung zuließ. Auf diesem Stand stagnierte unsere Erkenntnis längere Zeit, so daß es schier hoffnungslos schien, über die chemische Natur der Rotkomponente bestimmtere Aussagen zu machen. Zum Teil lag dies daran, daß wir zur Analyse meist die roten Federn einheimischer Vogelarten — Spechte, Kreuzschnabel, Stieglitz, Gimpel — benutzten, von denen wir heute wissen, daß sie bei unserer Fragestellung ungeeignete Objekte sind, zum anderen mangelte es aber auch an rein chemischen Erkenntnissen, über die der Biologe verfügen muß, wenn er seine spröden Objekte einer biochemischen Analyse unterziehen will.

Diese Situation änderte sich schlagartig, als in dem feuerroten Gefieder des Rotbauchwürgers (*Laniarius atrococcineus*) ein Objekt gefunden wurde, das die Voraussetzung zu einer stofflichen Analyse bot. Diese Federn enthalten nur roten Farbstoff in relativ reichlicher Menge, der sich als identisch erwies mit Astaxanthin, dem Farbstoff des gekochten Hummers und zahlreicher anderer Meerestiere. Als Ausgangsmaterial dienten 24 frische Bälge dieses Singvogels aus Südwestafrika, der heute noch, wie ehedem in den reinsten Farben des alten Kaiserreiches die Savanne ziert. Aus diesen Federn gelang schließlich die kristallisierte Abscheidung des Astaxanthins und mit ihr die endgültige Identifizierung des ersten roten Federlipochroms. Astaxanthin ist ein sehr leicht autoxydabler Farbstoff, der bei Gegenwart von Sauerstoff und Alkali sofort in Astacin übergeht. Will man den Federn den nativen Farbstoff entziehen, so muß dies unter strenger Vermeidung von Alkali geschehen: Legt man die Federn von *Laniarius* längere Zeit in eine konzentrierte Lösung von Kaliumrhodanid, so läßt sich nach dieser Vorbehandlung das Astaxanthin mit Alkohol extrahieren.

Das Astaxanthin hat man lange Zeit für ein spezifisch tierisches Carotinoid gehalten, bis sich herausstellte, daß es auch im Pflanzenreich vorkommt, hier aber merkwürdigerweise nur bei einigen niederen Algen, die als Vogelnahrung sicherlich keine Rolle spielen. Die Frage nach der Herkunft des Astaxanthins bei unserem Würger ist daher dahin zu beantworten, daß dieser Vogel sein Astaxanthin durch die Oxydation gelber Nahrungscarotinoide selbst bereitet. Diese Annahme wird fast zur Gewißheit durch das Auftreten einer gelbbäuchigen Mutante des Rotbauchwürgers. Diese seltene Abart besitzt eben nicht mehr die Fähigkeit, gelbes Lipochrom in rotes umzuwandeln und sie lagert daher nur gelbes ab. Biochemisch bedeutet dies, daß die Mutante infolge eines Gendefektes den entscheidenden Syntheseschritt vom gelben Kanarienxanthophyll,

um das es sich hier handelt, zum roten Astaxanthin nicht mehr zu vollziehen vermag. Eine viel weniger wahrscheinliche Alternative wäre die, daß bei einem Angebot von gelben und roten Nahrungscarotinoiden die Mutante nur auf das gelbe anspricht, während sie das ausschließliche Selektionsvermögen für rotes — das der Norm entspräche — eingebüßt hat. Es ist ferner bekannt, daß *Laniarius* sein rotes Lipochrom auch in der Gefangenschaft reproduziert, bei einer Nahrung, die frei von Astaxanthin ist. Einen schönen Parallelfall hierzu fanden wir kürzlich bei der Gouldamadine (*Chloëbio gouldiae*), einem Prachtfinken, der in einer rotköpfigen und in einer mutierten gelbköpfigen Form vorkommt. Auch hier enthalten die roten Federn nur rotes Lipochrom — Astaxanthin —, während die gelben Federn nur gelbes Lipochrom — im wesentlichen Lutein — einschließen. Auch bei der Gouldamadine ist demnach die gelbköpfige Mutante auf Grund ihrer genetischen Konstitution nicht mehr in der Lage, gelbe Nahrungscarotinoide, und als Hirsefresser nimmt sie nur gelbe auf, in rotes Astaxanthin umzuwandeln. Im übrigen ist die Umwandlung von Carotin in Astaxanthin im Tierreich wiederholt nachgewiesen worden, so zum Beispiel in den Eiern der Wanderheuschrecke (*Locusta migratoria*).

Erstmals wurde das Astaxanthin in der Klasse der Vögel aus den «Rosen» des Jagdfasans (*Phasianus colchicus*) isoliert, wie man die roten Papillen der Augenfelder dieses Vogels zu bezeichnen pflegt. Es kommt neben anderen Carotinoiden auch in den roten Ölkugeln der Hühner-Retina vor.

Als roter Lipochromfarbstoff ist das Astaxanthin bei Wirbellosen und Wirbeltieren weit verbreitet. Demgegenüber ist sein Vorkommen in Vogelfedern nach den bis jetzt vorliegenden Erfahrungenn sehr sporadisch und mit Sicherheit nur noch bei einigen Singvögeln: der Purpurtangare (*Ramphocelus bresilius*), dem Diamantfinken (*Stagonopleura guttata*), dem Fliegenschnäpper (*Peltops blainvillei*) und dem Rosenlöffler (*Ajaja ajaja*) bekannt.

Es bedeutete daher eine große Überraschung, als sich aus den lipochromatischen Federn anderer Vögel ein weiteres rotes Carotinoid, das Rhodoxanthin, extrahieren ließ. Es weicht in seinen Eigenschaften vom Astaxanthin erheblich ab durch sein völlig anderes Absorptionsspektrum und das Fehlen der sauren Eigenschaften nach alkalischer Behandlung. Erstmals im Tierreich überhaupt gelang sein Nachweis in den scharlachroten Federn des Cotingiden *Phoenicircus nigricollis* (Ekuador). Das Rhodoxanthinvorkommen stellt bei dieser Vogelart einen ganz

singulären Fall innerhalb der Verwandtschaftsgruppe der Cotingiden (= Schmuckvögel) dar, da die anderen hier so weit verbreiteten roten Lipochrome mit Rhodoxanthin nichts gemeinsam haben.

Das Rhodoxanthin ist bekanntlich der rote Farbstoff des Arillus der Eibenfrucht (*Taxus baccata*), der in der heimatlichen Flora nur hier in nennenswerter Menge auftritt, in einer Reihe anderer grüner Pflanzen dagegen nur in untergeordneten Mengen vorkommt.

Das Rhodoxanthin findet sich ferner als Federfarbstoff bei einer Reihe von Tauben der Gattungen *Megaloprepia* und *Ptilinopus*, die in einer Fülle von Arten in Australien und der benachbarten Inselwelt verbreitet sind, und welche durch die lebhafte Färbung vor allem ihrer Kopfplatten den Systematiker schon wiederholt zu phylogenetischen Studien veranlaßt haben.

Natürlich war es auch hier wieder das dringlichste Anliegen, das Rhodoxanthin in kristallisierter Form in die Hand zu bekommen. Ein solches Vorhaben kann man jedoch nur verwirklichen, wenn man sehr gute Freunde unter den Museologen hat, da es sich bei diesen Vögeln um wertvolle und schwierig zu beschaffende Objekte handelt. Als Ausgangsmaterial dienten mir acht Bälge der Taube *Megaloprepia*. Man vermißt hier das leuchtende Rot von *Phoenicircus*. Ein Blauschiller — eine Strukturfarbe — in den proximalen Abschnitten der Brustfedern ist jedoch die Ursache für diese Dämpfung der rein roten Lipochromfarbe. Nach der chromatographischen Abtrennung und Reinigung des Rhodoxanthins von Begleitfarbstoffen trat der große Augenblick ein, als sich der prachtvolle Farbstoff in Form metallisch glänzender Kristalle abzuscheiden begann. Angesichts der relativ geringen Federmenge, die sich gerade noch mit einer Hand ergreifen ließ, war es uns eine besondere Freude, diese Substanz in großer Reinheit zu erhalten. Sie wurde damit erstmals aus dem Tierkörper gewonnen und mit ihr das zweite rote Lipochrom in Federn endgültig identifiziert.

Es ist sehr auffallend, daß bei der durch Rhodoxanthin bedingten Federfärbung auch leuchtende Lipochromfarben auftreten, die von Rot erheblich abweichen. So zeigen die lipochromatischen Federregionen (Kopfplatten, Bauch, Unterschwanzdecken) vieler Arten der Gattung *Ptilinopus* in der Farbe alle Übergänge von Rot über Purpurrot, Violett bis Blau. Es ist dies ein in der Klasse der Vögel noch immer einmaliges Phänomen, daß durch die Anwesenheit ein und desselben Carotinoids — des Rhodoxanthins — diese von Rot so verschiedenen Farben auftreten und dies ohne das Hinzutreten irgendeines farbenerzeugenden Struk-

turfaktors geschieht. Es läßt sich jedoch zeigen, daß bei der Adsorption des Rhodoxanthins an geeigneten Adsorbienten recht verschiedene, von Rot abweichende Adsorbatfarben auftreten, die an die natürliche Farbenskala der Tauben sehr erinnern. So haftet das Rhodoxanthin vor allem an wasserhaltigen Silikaten, besonders eindrucksvoll an Talkum aus Benzin-Benzol-Gemischen mit tief violetter Farbe, die jener der Federn völlig gleicht. Bei der Verwendung von Benzol als Lösungsmittel wird der Farbton der Adsorbate nach Blau verschoben. Eluiert man, so erfolgt augenblicklich wieder der Farbumschlag nach Rot.

Überträgt man aus Analogiegründen diese Verhältnisse auf die Federn, indem man eine Adsorption des Rhodoxanthins an der stark verkieselten Hornmasse der Federn annimmt, die Farben Purpurrot, Violett und Blau demzufolge Adsorbatfarben des Rhodoxanthins an der Feder darstellen, so erklären sich alle Erscheinungen an diesen Federn widerspruchsfrei, die zuvor unverständlich bleiben mußten. Es ist jedoch einzusehen, daß ein derartiger Vorgang der Farbstoffadsorption am Substrat der Feder sich naturgemäß nur während des Verhornungsprozesses im Rahmen der Federentwicklung abzuspielen vermag und es darf daher nicht überraschen, wenn es nicht gelingt, diese Farbtöne etwa durch äußeres Anfärben der Federn mit Rhodoxanthin hervorzurufen. Möglicherweise sind artliche Unterschiede in der Zusammensetzung der Feder-Keratine die Ursache für die so verschiedene Ausfärbung des Rhodoxanthins.

Die Beantwortung der Frage nach der Herkunft des Rhodoxantins in den Federn dürfte in derselben Richtung liegen wie beim Astaxanthin. Denn so verlockend die Vorstellung auch sein mag, daß diese Tiere als ausgesprochene Früchtefresser das Rhodoxanthin lediglich aus diesen beziehen und es in ihren Federn in unverändertem Zustand wieder ablagern, so ist auch hier mit der Möglichkeit einer oxydativen Veränderung gelber Nahrungscarotinoide zu rechnen, deren Hauptprodukt in diesem Falle das Rhodoxanthin ist. Über den Carotinoidgehalt der Nahrung dieser Vögel liegen zwar keine Angaben vor, doch kann kaum ein Zweifel darüber bestehen, daß in ihr gelbe Carotinoide quantitativ stark vorherrschen. Ob daneben auch Rhodoxanthin in einer zur Pigmentierung ausreichenden Menge vorhanden ist, entzieht sich zunächst noch jeder Beurteilung.

Ein sehr wichtiges Experiment zur Stütze dieser Auffassung von der Transformation gelber Nahrungscarotinoide in rote läßt sich am Stieglitz (*Carduelis carduelis*) ausführen. Dieser Vogel führt bekanntlich in

seinem Gefieder zwei Lipochrome, ein rein gelbes in den Schwingen und ein rotes in den Federn des Kopfes. Reicht man diesem Vogel anstelle der normalen Kost eine stark rhodoxanthinhaltige und rupft ihm die Schwingen mit ihrem gelben Lipochrom, so wird dieses durch ein ziegelrotes ersetzt. Damit ist gezeigt, daß die Papillen der Schwungfedern auch zur Aufnahme eines roten, im Futter gebotenen Carotinoids befähigt sind, und nicht nur auf gelbes anzusprechen vermögen. Weiterhin läßt sich aus diesem Versuch schließen, daß der freilebende Stieglitz bei einem nennenswerten Angebot von «federfähigen» roten Carotinoiden[3] keine gelbe, sondern eine rote Flügelbinde haben müßte. In den Federpapillen der roten Gesichtsmaske hingegen ist der Ort zu suchen, wo Wirkstoffe gelbes Nahrungscarotinoid zu einem erheblichen Teil in rotes umwandeln. Und bezüglich dieser Eigenschaft steht der Stieglitz sicherlich nicht allein. Es muß vielmehr in allen jenen Fällen, wo gelbes und rotes Lipochrom fein säuberlich getrennt im Gefieder vorkommen, mit einem entsprechenden Geschehen gerechnet werden. So auch bei unseren Flaumfußtauben der Gattungen *Megaloprepia* und *Ptilinopus*. Es dürfte nicht leicht sein, ein zum Experimentieren brauchbares Objekt hier ausfindig zu machen.

Bereits vor Jahren wurde die Feststellung gemacht, daß es eine ganze Anzahl von Vogelarten gibt, die in ihren roten Federn Carotinoide einschließen, die im Spektrum durch einen breiten, einbandigen Absorptionsstreifen ausgezeichnet sind, die sich jedoch vom Astaxanthin, das einen ähnlichen Spektraltyp aufweist, vor allem dadurch unterscheiden, daß sie nach alkalischer Behandlung keine sauren Eigenschaften zeigen, d. h. sie bleiben auch bei alkalischer Reaktion im Benzin, und sie sind nach ihrer Adsorption an Aluminiumoxyd wieder quantitativ eluierbar. Eine Identifizierung dieser Lipochrome mit authentischen Carotinoiden war damals nicht möglich, und auch an eine Isolierung war angesichts der minimalen Farbstoffmengen, welche die Federn einschließen, nicht zu denken.

Erst als die Kunde von einem in Amerika entdeckten roten Pilz-Carotinoid zu uns gelangte, das man aus dem Pfifferling *Cantharellus cinnabarinus* isoliert und herkunftsgemäß als Canthaxanthin bezeichnet hatte, lag es nahe, seine Eigenschaften mit den roten Lipochromen einer Anzahl von Vogelarten zu vergleichen, unter denen der Rote Kardinal

[3] Es gibt auch rote Carotinoide, die von der Feder nicht aufgenommen werden, zum Beispiel das Lycopin, der Farbstoff der Tomate.

(*Cardinalis cardinalis*), der Quesal (*Pharomachrus mocino*), der Rosenlöffler (*Ajaja ajaja*), der Rote Sichler (*Guara rubra*) und der Flamingo (*Phoenicopterus ruber*) die markantesten Vertreter sind. Dabei ergab sich eine völlige Übereinstimmung in den Eigenschaften dieser Carotinoide mit Canthaxanthin.

Auch hier lag uns wieder die Isolierung des Canthaxanthins besonders am Herzen. Wir wählten hierzu die besonders farbstoffreichen Federn des Roten Sichlers (*Guara rubra*), der uns in einem prächtigen Exemplar zur Verfügung stand. Nach der chromatographischen Abtrennung von Begleitcarotinoiden und der Reinigung des Farbstoffes gelang schließlich auch in diesem Falle die kristallisierte Abscheidung des Lipochroms, das alle Eigenschaften mit synthetischem Canthaxanthin gemeinsam hat. Auch dieses Carotinoid wurde hiermit erstmals aus dem Tierkörper gewonnen und mit ihm das dritte rote Lipochrom aus Federn identifiziert. Das Respekt einflößende Alter der Federn von 106 Jahren überzeugt dabei aber auch von der geradezu idealen Konservierung der Carotinoide in Vogelfedern. Die Natur verfügt auch heute noch über bessere Methoden zur Stabilisierung organischer Farbstoffe als dies die chemische Industrie unserer Tage vermag!

Nachdem es lange Jahre durchaus nicht den Anschein hatte, daß es möglich sei, die roten Lipochrome der Vogelfeder chemisch zu charakterisieren, ist es nunmehr bei einer Anzahl von Vogelarten gelungen, deren rote Lipochrome mit dreien in der Natur vorkommenden authentischen Carotinoiden zu identifizieren. Da es weiterhin gelang, diese drei Carotinoide in kristallisierter Substanz aus der Feder zu gewinnen, ist der Beweis für ihre chemische Realität erbracht. Zur Voraussetzung hatte dies allerdings, die rein chemische Erschließung des Gebietes der Carotinoidfarbstoffe ebenso wie das Auffinden geeigneter Objekte unter den Vögeln.

Hier möchte ich jedoch bemerken, daß es unserem Auge auch bei bester Beleuchtung der Bälge im Tageslicht meist nicht gelingt, aus der Federfarbe mit Sicherheit auf die Natur des jeweiligen Carotinoids zu schließen. Und dies gilt nicht nur für rote, sondern gleichermaßen auch für gelbe Lipochrome, wie schon eingangs erwähnt. Farbstoffkonzentration, Begleitpigmente, Oberflächenstruktur der Feder und anderes mehr sind Faktoren, die uns das Urteil oft sehr erschweren.

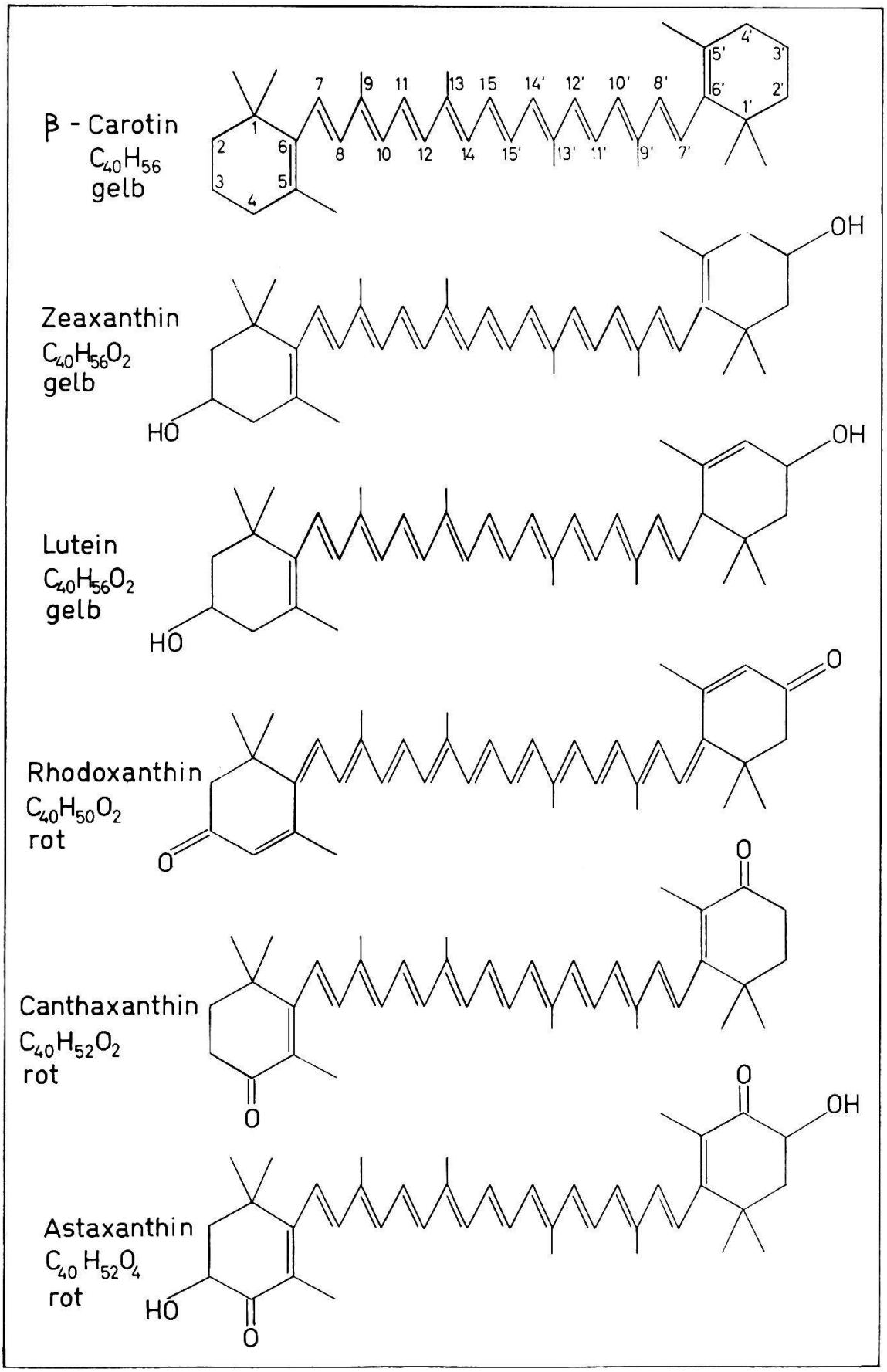
Es wäre etwas verfrüht, wollte man schon heute genaue Angaben über die Verbreitung dieser drei roten Carotinoide in der Klasse der Vögel machen. Immerhin gibt sich zu erkennen, daß Astaxanthin nur

bei einigen Singvögeln und dem Rosenlöffler in nennenswerter Menge vorhanden ist; Rhodoxanthin findet sich nur bei einer Anzahl von Fruchttauben und einem Cotingiden, während Canthaxanthin vermutlich das am weitesten verbreitete rote Carotinoid darstellt, da es bisher bei Vertretern von vier Ordnungen nachgewiesen ist.

Carotinoide sind bekanntlich stark ungesättigte Verbindungen, deren chromophore Gruppe aus einem System konjugierter Kohlenstoffdoppelbindungen besteht. Bezeichnend ist ferner der verschiedene Gehalt an Sauerstoff und seine Funktion bei den hier zur Diskussion gestellten sechs Carotinoiden. Drei gelben Carotinoiden stehen hier drei rote gegenüber. Während bei den zwei Xanthophyllen der Sauerstoff in Form der beiden sekundären Hydroxyle fungiert, ist es ein gemeinsames Merkmal der drei roten Carotinoide, daß sie durch den Besitz von je zwei Ketogruppen ausgezeichnet sind, die in Konjugation zur Polyenkette stehen und die wesentlichen Anteil haben an der Farbenvertiefung von Gelb und Rot. Generell läßt sich weiterhin sagen, daß der Vogel ganz überwiegend sauerstoffhaltige Carotinoide bevorzugt, während das Carotin als Kohlenwasserstoff keine oder eine nur ganz untergeordnete Rolle hier spielt (Formeln 1 bis 6 auf S. 213).

Im Anschluß an diese Ausführungen möchte ich eine Antwort auf die jetzt noch zu stellende Frage nach der Herkunft des Canthaxanthins bei den Vögeln geben. Niemand wird ernstlich in die Erwägung ziehen, daß die «Canthaxanthin-Vögel» dem Genuß amerikanischer Pfifferlinge ihre Färbung verdanken, daß dieser Farbstoff also exogener Natur sei! Einen Ansatzpunkt zur experimentellen Prüfung dieser Frage liefert der Rote Kanarienvogel, der sich in Mitteleuropa einer zunehmenden Beliebtheit erfreut. Er ist bekanntlich aus der gelben Zuchtrasse hervorgegangen durch die Einkreuzung des venezolanischen Kapuzenzeisigs (*Spinus cucculatus*), womit die Voraussetzung für die Entstehung einer roten Gefiederfarbe erblich fixiert wurde.

Das Rot des Kapuzenzeisigs ist eine Mischfarbe, die überwiegend aus Canthaxanthin, zum geringeren Teil aus Kanarienxanthophyll besteht. Die Analyse des «Rotvogels» hoher Farbstufe, wie ich den Roten Kanarienvogel nennen möchte, liefert genau das gleiche Ergebnis: auch hier liegt eine Mischfarbe vor, die aus einer Rot- und einer Gelbkomponente besteht. Man ist erstaunt über die weitgehende Übereinstimmung dieser beiden Analysen, die zu erkennen geben, daß es dem Züchter weitgehend gelungen ist, die Erbanlage — das Farbgen R — für das Zustandekommen der roten Gefiederfarbe vom Kapuzenzeisig auf den Kanarienvogel



Formeln Nr. 1—6

In den sechs Strukturformeln sind nur jene Atomgruppen mit Buchstaben symbolisiert, in denen sich die einzelnen Carotinoide voneinander unterscheiden.

zu übertragen, ganz so, wie dies in seiner Absicht lag, d. h. einen Vogel zu züchten mit dem roten Lipochrom des Kapuzenzeisigs und der Gestalt und der Größe des Kanarienvogels. Also auch der Rotvogel führt Canthaxanthin in seinen Federn, das in der Nahrung völlig fehlt, und er bildet sein rotes Farbkleid bei einer Ernährung, die derjenigen der gelben Zuchtrasse völlig gleicht und die daraus ihr gelbes Lipochrom bildet.

Ernährt man Rotvögel einige Zeit carotinoidfrei und rupft ihnen die Federn, so kommt es in kürzester Zeit zu einem völligen Zusammenbruch des pigmentbildenden Apparates, was sich dahin auswirkt, daß die nachwachsenden Federn nach bereits einer bis zwei Rupfungen praktisch pigmentfrei, also weiß sind. Bei der gelben Zuchtrasse — dem Gelbvogel — dauert dieser Vorgang viel länger. Solche Versuchsvögel sind nun hervorragend geeignet zum Testen einzelner Carotinoide in ihrer Wirkung auf die Federfarbe. Füttert man die Vögel mit Rhodoxanthin, so bewirkt dies nur eine zarte Rotfärbung. Sehr ähnlich ist das Ergebnis bei reiner Carotinfütterung. Immerhin vermag der Rotvogel auf Carotin mit der leichten Rotfärbung seiner Federn anzusprechen, wozu der Gelbvogel nicht befähigt ist. Bei ihm ist Carotin ohne jeden Einfluß auf die Federfarbe. Intensive Färbung ist aber mit diesen beiden Carotinoiden nicht zu erreichen. Füttert man den Rotvogel jedoch mit Lutein, so gelingt es damit, die frühere Farbstufe wieder zu gewinnen. Die Mitwirkung anderer Carotinoide ist hierbei nicht erforderlich. Das Lutein ist also von entscheidender Bedeutung beim Zustandekommen der normalen Federpigmentierung. Es muß dabei allerdings vorausgesetzt werden, daß sich der Vogel in bester körperlicher Kondition befindet, da schon geringste Störungen des allgemeinen Befindens ein Absinken der früheren Farbstufe zur Folge haben. Der Rotvogel ist also in der Lage, ein Carotinoid zu bilden, das mit der Nahrung nicht zugeführt wird, das bedeutet in unserem Falle, Lutein in Canthaxanthin umzuwandeln. Er wird hierzu befähigt durch eine vom Kapuzenzeisig ererbte Eigenschaft, ein Farbgen R, dessen Aufgabe die Bereitstellung eines Fermentes ist, welches die Umwandlung gelber Nahrungscarotinoide in Canthaxanthin katalysiert. Ein Zwischenprodukt bei dieser Reaktionsfolge vom Lutein zum Canthaxanthin stellt höchstwahrscheinlich das Kanarienxanthophyll dar, das man bei unserem Vogel stets als gelben Begleiter des Canthaxanthins antrifft. Bei normaler Fütterung ist daneben noch die Wirkung von Carotin kaum mehr als von zusätzlicher Art.

Als Parallelfall hierzu möchte ich die Flugversuche HUBERT WEBERS mit Kreuzschnäbeln (*Loxia curvirostra*) und Birkenzeisigen (*Carduelis flammea*) erwähnen, die gezeigt haben, daß zur Reproduktion der roten Gefiederfarbe auch bei diesen Arten kein rotes Lipochrom in der Nahrung zu sein braucht, wohl aber müssen die Vögel unter optimalen Lebensbedingungen gehalten werden, die sie in die Lage versetzen, die Rotfärbung zu realisieren.

Beim Rotvogel ist die Reaktionsbereitschaft des Gewebes auf Canthaxanthin besonders auffallend, denn es gelingt mühelos, durch die Verfütterung dieses Carotinoids eine über die Norm hinausgehende intensive Rotfärbung des Gefieders zu erreichen, welche die Farbstufe des Kapuzenzeisigs noch übertrifft. Es tritt das ein, was man als Überfärbung zu bezeichnen pflegt. Man gewinnt den Eindruck, daß dem Vogel durch das Angebot des körpereigenen roten Farbstoffes die Pigmentierung der Feder deshalb so ganz wesentlich erleichtert wird, weil man ihn der Mühe der im normalen Leben erforderlichen aktiven Umwandlung gelber Nahrungscarotinoide in rote enthebt. Das Canthaxanthin ist überdies auch am besten auf sein Fermentsystem abgestimmt.

Sehr wählerisch ist der Rotvogel bei der Verabreichung gebotener Carotinoide: Während er auf Canthaxanthin sehr intensiv anspricht, ist mit Rhodoxanthin nur eine schwache Rotfärbung zu erzielen. Anders verhält sich dagegen der Fichtenkreuzschnabel (*Loxia curvirostra*), er unterscheidet n i c h t zwischen Cantha- und Rhodoxanthin, denn bei ihm rufen diese beiden roten Carotinoide eine gleich intensive, wenn auch eine etwas verschieden nuancierte Rotfärbung seiner Federn hervor, die jene des Wildvogels sogar noch übertrifft. Es sei jedoch hervorgehoben, daß das Rot des Wildvogels mit keinem dieser beiden Carotinoide identisch ist. Die Zeit der ausgeblichenen Kreuzschnäbel in den Volieren der Liebhaber sollte jetzt vorüber sein, nachdem wir nunmehr reichlich Gelegenheit haben durch die Verfütterung von Extrakten des Eiben-Arillus diesen Übelstand glänzend zu beseitigen oder durch die Verabreichung von Canthaxanthin, das die schweizerische chemische Industrie in Basel jetzt synthetisch herstellt.

Je mehr Vogelarten wir untersuchen, um so deutlicher zeigt sich, daß die einzelnen Spezies auf verschiedene Carotinoidfarbstoffe in unterschiedlichem Maße ansprechen, und durch diesen Umstand werden die oft erheblichen Verschiedenheiten in qualitativer und quantitativer Beziehung verständlich.

Kehren wir nach diesem kleinen kosmetischen Exkurs zum Abschluß unserer Betrachtungen über die Carotinoide noch einmal zurück zu unserer vorhin angeschnittenen Frage nach der Verknüpfung von Gen und Außenmerkmal, die sich bei unseren Objekten in geradezu gebieterischer Weise aufdrängt, eine Verknüpfung, die heute so erregend empfunden und von Biologen wie Chemikern intensivst bearbeitet wird: Wir haben die Gründe dargelegt, die dafür sprechen, daß die roten Lipochrome der Vögel von diesen selbst gebildet werden. Das hierzu erforderliche «Rohmaterial» bezieht der Vogel direkt oder indirekt aus der Pflanze in der Gestalt gelber Carotinoide. Diese erfahren im Vogel in gattungs- und artspezifischer Weise eine Transformation, wobei durch oxydative Prozesse (Dehydrierungen) Astaxanthin, Rhodoxanthin und Canthaxanthin entstehen. Es kann kein Zweifel darüber herrschen, daß es sich hierbei um gengesteuerte Vorgänge handelt. Aber auch die gelben, vom Lutein abweichenden Lipochrome wie das Kanarienxanthophyll und das Picofulvin sind das Produkt von Genwirkungen, die ebenfalls erst im Vogel aus pflanzlichen Carotinoiden gebildet werden.

Die Vorstellung, daß die Gene nicht direkt in das stoffliche Geschehen eingreifen, sondern über Fermente wirken, die unter ihrer Kontrolle stehen und die nun ihrerseits chemische Reaktionen auslösen, hat sich bewährt. Sie kommt jedenfalls als Erklärungsmöglichkeit den tatsächlichen Lebensabläufen im Organismus, die wir chemisch zu erfassen bestrebt sind, am nächsten.

Mit diesen Feststellungen sind wir aber auch an eine Stelle angelangt, wo die Genetik und die Biochemie sich die Hand reichen, wo die langersehnte Querverbindung zwischen diesen beiden Wissensgebieten hergestellt ist. Doch keineswegs nur bei den Vögeln, auch in den weiten Gefilden des Tierreichs kennen wir im Prinzip ähnliche, unter der Kontrolle von Genen sich vollziehende biochemische Reaktionen der verschiedensten Art und Bedeutung.

Die vorstehenden Ausführungen haben uns also gezeigt, daß mit einer verhältnismäßig kleinen Anzahl definierter carotinoider Stoffe eine Vielzahl von sehr auffälligen Färbungen des Vogelgefieders realisiert werden kann. Diese Farbenskala wird aber noch wesentlich mannigfaltiger durch die so häufige Kombination, welche die Carotinoide mit den Melaninen und den Strukturelementen der Feder erfahren. Aber dennoch bliebe das Bild, das ich von den Färbungsmöglichkeiten der Vogelfeder geben will einseitig und unvollständig, würde ich nicht noch die Rolle der Pyr-

rolfarbstoffe beim Zustandekommen von Färbung wenigstens in einigen groben Zügen erwähnen.

Die Federn vieler Vogelarten besitzen die Eigenschaft, im filtrierten U. V.-Licht etwa einer Quarzlampe mehr oder minder intensiv rot aufzuleuchten. Dabei ist bemerkenswert, daß sich diese rote Fluoreszenz grundsätzlich nur auf Federn oder Federabschnitte beschränkt, die weitgehend vor dem Zutritt des Tageslichtes geschützt sind. Diese Feststellung war zugleich ein erster Hinweis auf die Lichtempfindlichkeit der Farbkörper, um die es sich hierbei handelt. Die Sichtung eines großen Materials hat ergeben, daß die Erscheinung der Rotfluoreszenz der Federn bei Vogelarten verbreitet ist, die mindestens 13 Ordnungen angehören. Allerdings ist in der Mehrzahl der Fälle die Erscheinung recht geringfügig und das Pigment zur Extraktion keineswegs ausreichend. Nur drei Verwandtschaftsgruppen, die der Nachtschwalben, der Eulen und der Trappen machen hierin eine Ausnahme: bei ihnen ist das Pigment durch reichlichere Einlagerung extrahierbar und auf Grund seiner spektralen und sonstigen Eigenschaften mit ätherlöslichem Porphyrin, im besonderen mit Koproporphyrin identifizierbar. Es handelt sich also um einen Körper der Blutfarbstoffreihe, der sich vom Häm des Blutes im wesentlichen durch den Mangel an Eisen auszeichnet. Quantitativ gesehen sind auch bei den Nachtschwalben und Eulen die eingelagerten Porphyrinmengen gering, so daß das unbewaffnete Auge in der Regel nichts davon wahrnimmt. Nur bei unseren einheimischen Eulen kann durch reichlicheres Porphyrinvorkommen eine leichte Rosatönung der vom Licht abgewandten Gefiederregionen zustande kommen, ja es ist eine Besonderheit vieler Eulen der Salomon-Inseln, rosafarbene Axillaren zu besitzen. Dem Zoologen dient dies sogar als systematisches Merkmal, das er mit zur Namengebung benutzt: er nennt diese Eulen folgerichtig nach dieser Eigenschaft: *Ninox roseoaxillaris.*

Von allen bisher untersuchten Fällen besitzen jedoch die Federn der Trappen den weitaus höchsten Gehalt an freiem Porphyrin. Er ist hier so beträchtlich, daß er den basalen Federabschnitten und Dunen eine schöne rosenrote Färbung verleiht, die ein Charakteristikum der ganzen Ordnung darstellt. Solche Federn fluoreszieren äußerst intensiv rot, doch ist auch ihre Pracht in wenigen Stunden oder Tagen dahin, wenn man sie dem Tageslicht aussetzt. Um so mehr überrascht es daher, daß die Genickfedern der Schopftrappe *Lophotis ruficrista,* demselben Porphyrin ihre schöne weinrote Färbung verdanken. Es ist dies der einzige bisher

bekannte Fall, wo durch beträchtliche Anhäufung von Porphyrin eine Schmuckfarbe zustande kommt. Welchen Umständen allerdings der lichtunbeständige Farbstoff an dieser exponierten Stelle — am lebenden Vogel und in der Sonne Afrikas — seine Erhaltung verdankt, ist noch völlig unklar. Diese Pigmentierung ist in zweifacher Hinsicht labil: dem Licht ausgesetzt schwindet ihre Färbung in Kürze dahin, sie wird zusehends heller und schließlich weiß. Da hier der Farbstoff in Form mikroskopisch kleiner, gefärbter Hornschüppchen als sogenannter Puder der Feder außen anhaftet, so sind diese Federn auch gegen mechanische Beanspruchung empfindlich, so daß leichtes Reiben, das den mit Porphyrin imprägnierten Puder entfernt, hier ebenfalls zur Depigmentierung führt. Angesichts der großen Empfindlichkeit dieses Pigmentierungsprinzips hätte selbst die kühnste Phantasie es nicht gewagt, diesen von der Natur realisierten Fall zu postulieren!

Nachdem die spektroskopischen Messungen und die sonstigen Eigenschaften des Porphyrins in den Federn der Trappen, Eulen und Nachtschwalben ergeben hatte, daß es sich ausnahmslos um Koproporphyrin handelt, war es von ganz großem Interesse, den Typ dieses Koproporphyrins zu bestimmen, was natürlich nur durch die Isolierung des Farbstoffes in Form seines Methylesters in befriedigender Weise möglich ist. Die Beantwortung dieser Frage schien uns von besonderer Wichtigkeit, weil wir seit einiger Zeit, insbesondere durch die Arbeiten von Hans Fischer und Mitarbeitern wissen, daß die so häufige Fleckenfarbe der Eischalen vieler Vogelarten auf der Anwesenheit von Protoporphyrin beruht. Hier dient also die eisenfreie Stammverbindung des Blutfarbstoffes, des Häms, dazu, den Vogeleiern einen wirksamen Tarnanstrich zu verleihen. Und das Protoporphyrin ist hier zweifellos sekundärer Entstehung, da es im Eileiter der Vögel aus sich zersetzenden Erythrocyten nach der Abspaltung des Eisens entsteht.

Als Ausgangsmaterial für die Isolierung des Porphyrins dienten die Federn der Schopftrappe *Lophotis ruficrista* und anderer afrikanischer Trappenarten (*Lissotis melanogaster, Eupodotis senegalensis*). Nach den klassischen Methoden der Aufarbeitung konnte das Porphyrin in kristallisierter Form jedoch erst gefaßt werden, nachdem der Ester wiederholt einer energischen chromatographischen Reinigung unterzogen worden war. Die kristallisierte Substanz erwies sich als identisch mit Koproporphyrin III, wobei die Ziffer III bedeutet, daß die Stellung der Seitenketten am Porphyrinring hier dieselbe ist wie beim Protoporphyrin, bzw. dem Häm, d. h. beide Farbstoffe besitzen die gleiche Struktur-

isomerie. Damit ist es erstmals gelungen, ein freies Porphyrin aus Vogelfedern in Substanz zu fassen.

Die Entstehung des Koproporphyrins an dieser Stelle ist hier zweifellos eine primäre. Gerade in diesen Tagen konnten wir uns bei der Untersuchung einer frischtoten Senegaltrappe (*Eupodotis senegalensis*) davon überzeugen, daß sich die Porphyrinablagerung und wohl auch seine Bildung ganz einseitig nur auf die Federn beschränkt, da die inneren Organe und das Knochengerüst frei davon sind. Ohne Zweifel liegt hier ein Fall von physiologischer Porphyrie vor, wie wir ähnliche Beispiele bisher nur wenige aus dem Tierreich kennen.

Die sich aufdrängende Frage nach der physiologischen Bedeutung dieses in relativ großer Menge in der Feder gebildeten und in ihr deponierten Porphyrins ist schwer zu beantworten. Man ist geneigt, dieses Geschehen als einen größtenteils mißglückten Versuch der Natur zu betrachten, auf dieser labilen stofflichen Basis eine Pigmentierung der Feder zu erzeugen. Der Weg der Biosynthese der Porphyrine im Organismus der höheren Tiere ist uns heute in den Grundzügen bekannt. Wir wissen, daß durch die fermentative Kondensation von vier Molekülen des farblosen Porphobilinogens über mehrere Zwischenstufen hinweg zuerst Uroporphyrin aufgebaut wird, das als die Muttersubstanz aller Porphyrine zu betrachten ist. Aus ihm entsteht dann durch schrittweise fermentative Decarboxylierung zunächst Koproporphyrin, das dann weiter in Protoporphyrin übergeht, welches die unmittelbare Vorstufe des Blutfarbstoffes ist.

Da in den Trappenfedern Koproporphyrin III zur Ablagerung gelangt, sieht es so aus, als würde in den Federanlagen dieser Vögel dem Abbau des Uroporphyrin III auf der Stufe des Koproporphyrin III Halt geboten, bedingt durch das Fehlen einer Decarboxylase, die normalerweise den weiteren Abbau zum Protoporphyrin katalysiert. Sollte jedoch das Koproporphyrin III nicht die Rolle eines Zwischenproduktes auf dem Wege vom Uroporphyrin III zum Protoporphyrin spielen — die Koproporphyrinbildung also gleichsam einer Sackgasse vergleichbar sein — so würde das Porphyrin einem Nebenweg der Blutfarbstoffsynthese seine Entstehung verdanken.

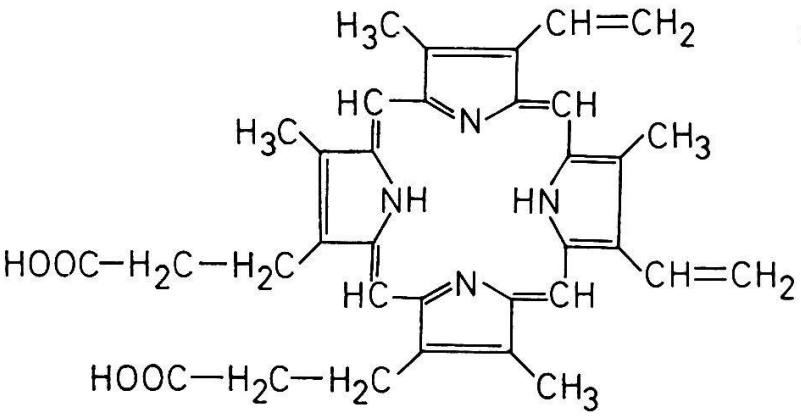
Haftet der Pigmentierung der Feder durch Koproporphyrin in technischer Hinsicht noch so mancher Mangel an, so sind die Turakos oder Bananenfresser (*Musophagidae*), die im afrikanischen Urwald leben, — und nur sie — auf der Basis des Porphyrinringes mit durchschlagendem Erfolg in Führung gegangen. Das Turacin, wie man den tief

karminroten Farbstoff seiner Herkunft gemäß benannt hat, und der sich vornehmlich in den Schwungfedern dieser Vögel findet, ist die Kupferverbindung eines Porphyrins. Mit dem Eintritt des Kupfers als Komplexmetall in den Porphyrinring erfolgt eine Vertiefung der Farbe nach Rot, zugleich aber auch eine Lichtstabilisierung des Moleküls, so daß auf diese Weise eine recht lichtechte und weithin sichtbare Schmuckfarbe zustande kommt. Ein Pigmentierungsprinzip, das bei den Trappen nur angedeutet ist, das bei ihnen im Ansatz gleichsam stecken blieb, wurde bei den Turakos zur höchsten Entfaltung entwickelt. Die Tendenz der Natur, eine Porphyrinsynthese großen Ausmaßes ganz in den Dienst der Pigmentierung zu stellen, ist hier unverkennbar.

Die Erforschungsgeschichte des Turacins, des zweifellos populärsten und meist untersuchten aller Federpigmente, ist in ihren wesentlichen Etappen rasch erwähnt: es war HANS FISCHER, dem es gelang, aus dem Turacin nach der Abspaltung des Kupfers Uroporphyrin in Substanz zu fassen und somit die Zugehörigkeit des Turacins zur Blutfarbstoffreihe sicher zu stellen. Später waren es RIMINGTON und NICHOLAS, denen größere Mengen Ausgangsmaterial zu seiner weiteren Erforschung zur Verfügung standen. Sie vermochten nach der Eliminierung des Kupfers Uroporphyrin III als Ester in Substanz zu erhalten und diesen durch Abbau in Koproporphyrin III-ester zu überführen. Damit war bewiesen, daß im Turacin das Kupferkomplexsalz des Uroporphyrins III vorliegt. In dieser Eigenschaft ist es das primäre Produkt der Porphobilinogen-Kondensation, gepaart mit Kupfer, das diesem Zwecke dient. Es ergibt sich somit, daß alle bisher aus adulten Vögeln isolierten Porphyrine, das Protoporphyrin der Eischalen, das Koproporphyrin der Trappenfedern und das Uroporphyrin der Turakos derselben Isomerenreihe III angehören. Die Entstehung von Porphyrinen des Typs III ist in der Klasse der Vögel eine durchaus einseitige und spricht sehr zugunsten ihrer endogenen Entstehung.

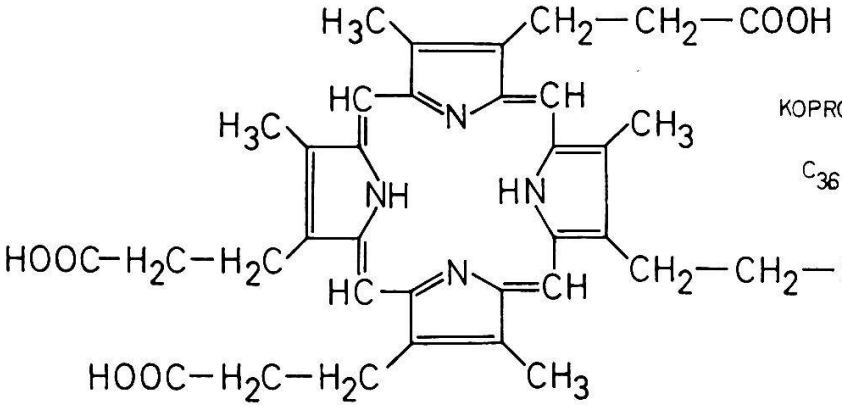
Die Porphyrine gehören zur Gruppe der vierkernigen, ringförmig gruppierten Pyrrolfarbstoffe, deren Strukturfomeln hie wiedergegeben sind (Formeln 7 bis 9 auf S. 221).

Im Tierreich ist das Turacin bisher nur aus der Klasse der Vögel bekannt geworden, und selbst hier ist sein Vorkommen etwas Einmaliges, da es nur in den roten Schwungfedern der Turakos als Schmuckfarbe auftritt und somit taxonomischen Wert besitzt. Auch hinsichtlich der Menge des in den Federn gespeicherten Farbstoffes ist es ein Sonderfall, denn es gelingt, aus einer einzigen Schwinge mit Ammoniak eine sehr



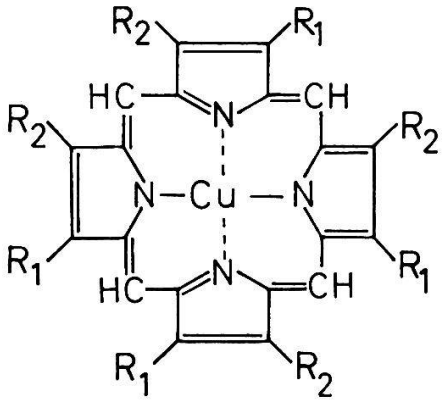
PROTOPORPHYRIN

$C_{34}H_{34}O_4N_4$



KOPROPORPHYRIN III

$C_{36}H_{38}O_8N_4$



TURACIN =

UROPORPHYRIN III – Cu – KOMPLEXSALZ

$C_{40}H_{36}O_{16}N_4Cu$

$R_1 = CH_2-CH_2-COOH$

$R_2 = CH_2-COOH$

Formeln Nr. 7—9

Die Strukturformeln der drei bisher aus adulten Vögeln isolierten Porphyrine gehören alle der Isomerenreihe III an.

farbstarke Lösung zu bereiten und aus ihr mit Eisessig das Turacin auszuflocken. Mit einem Gehalt von etwa 5 % Porphyrin sind nach WITH die roten Turakofedern das bisher bekannte porphyrinreichste Material überhaupt und die einzige Quelle für die Darstellung von reinem Uroporphyrin III.

Turacin ist in Alkalien ungemein leicht löslich, so daß schon Spuren genügen, um das Pigment mit weinroter Farbe in Lösung zu bringen. Durch diesen Umstand wird das Abfärben der Turakos auch verständlich. Es darf daher nicht überraschen, wenn das Badewasser der Vögel infolge seines von Verunreinigungen herrührenden Ammoniaks den Federn das Turacin allmählich entzieht und dadurch eine rötliche Färbung annimmt. Reines Wasser vermag dagegen Turacin nicht auszuwaschen. Wenn es dies aber dennoch tut, so ist dies ein von Buch zu Buch abgeschriebener Irrtum.

Die Turakos sind nicht nur mit dem roten Turacin, sondern auch mit ihrem grünen Pigment — dem Turacoverdin — ihre eigenen Wege gegangen. Chemisch ist seine Natur noch ganz unbekannt. Als Pigmentproduzenten sind diese Vögel autark. Sie haben jedenfalls völlig darauf verzichtet, Carotinoide in ihren Federn zu deponieren, obwohl sie diese als Vegetarier zweifellos in großer Menge mit der Nahrung aufnehmen, und die zur Hervorbringung dieser Farben ebenso geeignet wären.

Wie wir nunmehr gesehen haben, sind es eine Reihe von chemisch genau definierten Körpern aus der großen Klasse der Carotinoide und der Pyrrolfarbstoffe, die bis jetzt als Farbstoffe im Vogelgefieder erkannt und in Substanz isoliert worden sind. Daneben gibt es aber noch eine ganze Anzahl von Pigmentfarben, die sicherlich nicht diesen beiden Farbstoffklassen zuzuordnen sind. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wäre es jedoch verfrüht, über deren chemische Natur eine verpflichtende Aussage zu machen.

Während des Vortrages wurden die erwähnten Vorgelarten im farbigen Diapositiv gezeigt und Bälge der wichtigsten Arten im Original vorgelegt.

LITERATURVERZEICHNIS

FALK, J. E. (1964): Porphyrins and Metalloporphyrins. 266 Seiten. Amsterdam, London, New York.

Fischer, H., und ORTH, H. (1937): Die Chemie des Pyrrols. Bd. 2, 1. Hälfte: Porphyrine, Hämin, Bilirubin. 764 Seiten. Leipzig.

FOX, D. L. (1953): Animal Biochromes and Structural Colours. 379 Seiten. Cambridge.

FOX, H. M., and VEVERS, G. (1960): The Nature of Animal Colours. 246 Seiten. London.

KARRER, P., und JUCKER, E. (1948): Carotinoide. 388 Seiten. Basel.

SCHMIDT, W. J. (1949): Altes und Neues über Strukturfarben im Tierreich. Gießener Naturwiss. Vorträge, Heft 6. Gießen. 71 Seiten.

— (1952): Wie entstehen die Schillerfarben der Federn? Naturwiss. Jg. 51, S. 313 bis 318.

— (1952): Über die Buckelreflektoren der grünen Federn der Flaumfußtauben (*Megaloprepia, Ptilinopus*). Ber. Oberhess. Ges. Natur- u. Heilkunde. N. F. Naturwiss. Abt. Bd. 25, S. 93—98.

VÖLKER, O. (1960): Die Farbstoffe im Gefieder der Vögel. Fortschr. d. Chemie organischer Naturstoffe Bd. 18, S. 177—222.

— (1961): Die chemische Charakterisierung roter Lipochrome im Gefieder der Vögel. Journ. f. Ornithol. Bd. 102, S. 430—438.

— (1962): Experimentelle Untersuchungen zur Frage der Entstehung roter Lipochrome in Vogelfedern. Ebd. Bd. 103, S. 276—286.

— (1964): Federn, die am Licht ausbleichen. Natur u. Museum Bd. 94, S. 10—14.

— (1964): Die gelben Mutanten des Rotbauchwürgers (*Laniarius atrococcineus*) und der Gouldamadine (*Chloëbia gouldiae*) in biochemischer Sicht. Journ. f. Ornithol. Bd. 105, S. 186—189.

WEBER, H. (1953): Bewirkung des Farbwechsels bei männlichen Kreuzschnäbeln. Journ. f. Ornithol. Bd. 94, S. 342—346.

— (1961): Über die Ursache des Verlustes der roten Federfarbe bei gekäfigten Birkenzeisigen. Ebd. Bd. 102, S. 158—163.

WINTERSTEIN, A. (1960): Neuere Ergebnisse der Carotinoid-Forschung. Angewandte Chemie Jg. 72, S. 902—910.

ZEILE, K. (1954): Die Biosynthese des Hämins. Angewandte Chemie Jg. 66, S. 729 bis 735.

Manuskript eingegangen am 29. Juni 1964.