



# Anzeiger

der  
**Ornithologischen Gesellschaft  
in Bayern**

Zeitschrift baden-württembergischer und bayerischer Ornithologen

---

Band 25, Nr. 2/3

Ausgegeben im Dezember 1986

1986

---

*Anz. orn. Ges. Bayern 25, 1986: 137–153*

## **Taubenflug im Windkanal: Was kann man über Energetik, Wärmeabgabe und Wasserhaushalt beim Langstreckenflug lernen?**

Von **Werner Nachtigall**

### **1. Vorbemerkungen**

Der Vogelflug ist – zusammen mit dem Insektenflug – bekanntlich die energetisch aufwendigste Lokomotionsform, die im Bereich der belebten Welt entwickelt ist. Vögel können sehr lange fliegen, Zugvögel ohne weiteres einen Tag und länger „am Stück“. Solange telemetrische Einrichtungen noch zu schwer und zu wenig ausgereift sind, bleibt nur der Windkanalflug zur meßtechnischen Simulation von Langstreckenflügen. TUCKER (1966) hat die ersten derartigen Versuche unternommen; er und eine Reihe anderer Autoren konnten die Vögel aber nur im Minutenbereich fliegen lassen. Für eine verlässliche Messung stoffwechselphysiologischer Parameter muß man jedoch sicher sein, daß die Vögel auf „Dauerflugzustand geschaltet“ haben. Das heißt, man sollte mindestens eine volle Stunde Flugzeit erreichen.

Wir haben uns dieses schwierige Ziel gesetzt und können mit unseren Saarbrücker Einrichtungen nach langwierigen technischen, züchterischen und Dressurversuchen Tauben nun 3 Stunden und länger „am Stück“ in einem speziell dafür geeigneten Windkanal fliegen lassen, wäh-

rend sie beispielsweise Atemgasmasken zur Messung stoffwechselphysiologischer Kenngrößen oder Thermosensoren tragen. Voraussetzung dafür war einerseits ein spezieller Windkanal, andererseits die Züchtung einer besonders für den Windkanalflug geeigneten Taubenrasse und schließlich der Aufbau geeigneter Meßeinrichtungen.

## 2. Methode und Material

### 2.1 Windkanaltechnik

Unser selbstkonstruierter und gefertigter Windkanal (Abb. 1) ist 9 m lang und verjüngt sich aus einem  $2 \times 2$  m großen Einlaufstutzen auf den Querschnitt eines Quadratmeters in der Meßstrecke über eine geeignete Düse. Die Meßkammer ist 1,40 m lang, 1 m hoch, so daß mittelgroße Tauben problemlos fliegen können. Durch ein 18-kW-Gebläse, das zwischen 0 und 5 000 Umdrehungen in der Minute regelbar ist, kann eine Strömungsgeschwindigkeit bis zu  $24 \text{ m s}^{-1}$  ( $86 \text{ km h}^{-1}$ ) eingestellt werden, so daß der gesamte Geschwindigkeitsbereich des Taubenflugs

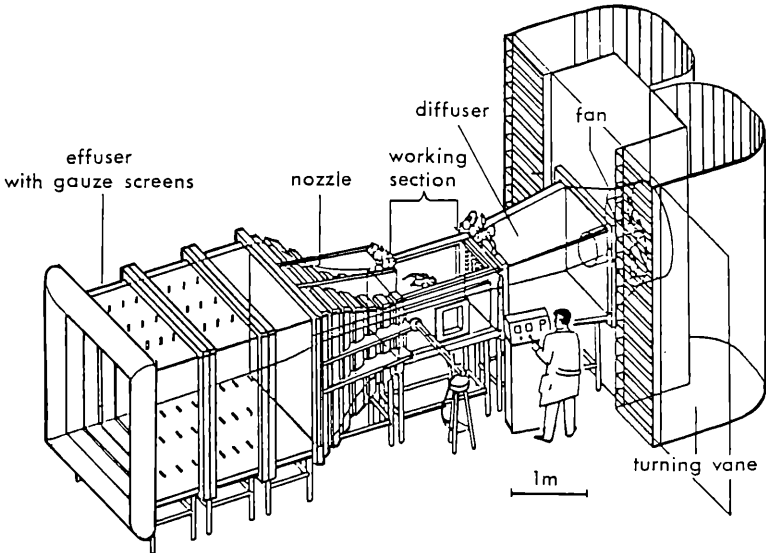


Abb. 1:

Räumliche Zeichnung des Windkanals der Arbeitsgruppe Nachtigall an Zoologischen Institut der Universität des Saarlandes, konstruiert für biophysikalische und stoffwechselphysiologische Analysen des Vogelflugs. Zeichnung: B. KRESLING. – 3-D-drawing of the Saarbrücken wind tunnel for bird flight analysis. Working group Nachtigall, Zoologisches Institut, University of the Saarland.

abdeckbar ist. Die Turbulenz ist klein (Turbulenzfaktor 1,25 bis 1,4), und die Strömungsgeschwindigkeit ist in der gesamten Meßstrecke innerhalb von weniger als 3% konstant.

## 2.2 Windkanaltauben

Wir haben sieben Taubenrassen ausprobiert; durchschlagende Erfolge hatten wir aber erst mit der Züchtung einer achten Rasse aus englischen Tippler-Tauben und russischen Griwuni-Hochfliegern. Wir nannten sie „Grippler“ (NACHTIGALL & ROTHE 1978), und diese Tauben mittlerer Körpermasse sind bei geeigneter Dressur dazu zu bringen, 3 Stunden und länger im Non-stop-Flug im Windkanal zu fliegen.

## 2.3 Dressurexperimente

Wenn die Tauben gut fliegen sollen, müssen sie praktisch handzahn aufgezogen werden. An den Flug in der Meßstrecke werden sie über ein fünfstufiges Dressurprogramm gewöhnt (Abb. 2). Phase 1: Licht an; der auf dem Boden sitzende Vogel startet durch milde Strafdressur in Richtung auf eine Sitzstange am vorderen Ende der Meßkammer und setzt sich. Phase 2: der Vogel sitzt auf der Stange. Licht an: die Stange wird herausgezogen. Der Vogel fliegt kurzzeitig. Licht aus und Stange eingeschoben: der Vogel setzt sich. Phase 3: der Zeitabstand zwischen Herausziehen und Einschieben der Stange wird vergrößert. Der Vogel führt „Warteflüge“ von etwa fünf Minuten vor der Stange aus, bevor sie wieder eingeschoben wird. Phase 4: die Länge der Warteflüge wird ausgedehnt. Der Vogel gewöhnt sich an die Meß-

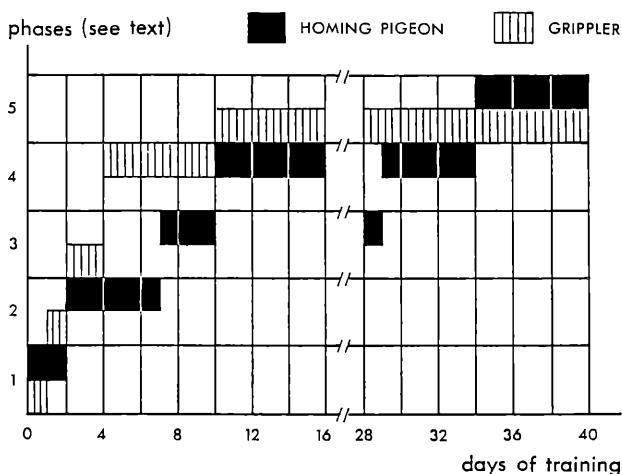


Abb. 2:

Dressur-Diagramm. Brief-Tauben: schwarze Kästchen; Grippler-Tauben: längsgerichelte Kästchen. Die fünf Phasen sind im Text erläutert; auf der Abszisse stehen Trainingstage. – *Training diagram of homers and grippers. For phases 1–5 see text.*

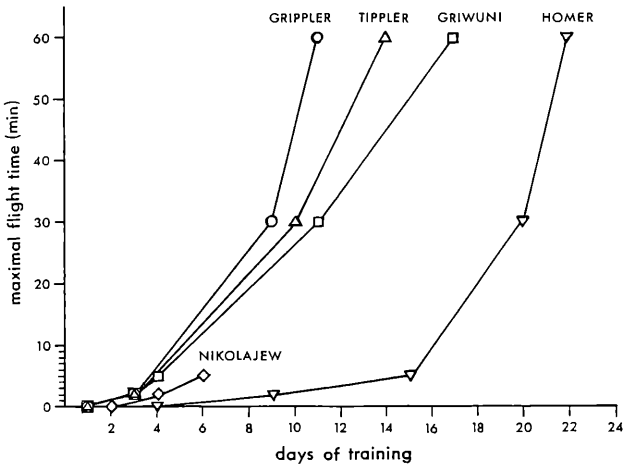


Abb. 3:

Dressur-Erfolg. Aufgetragen ist die maximale Flugzeit in Minuten über die Zahl der Dressurtage. Den besten Erfolg zeigen die Gripler-Tauben, den schlechtesten die normalen Brieftauben. – „*Training success diagram*“. *Best are the griplers, worst the ordinary homers.*

kammer und fliegt überwiegend in der Mitte. Phase 5: Infolge bedingten Reflexes startet der Vogel beim Einschalten des Lichts und fliegt so lange, bis es wieder ausgeschaltet wird, stetig in der Meßkammer (ROTHE & NACHTIGALL 1987).

Die Abbildung 2 zeigt, wie lange Brieftauben (schwarze Symbole) und unsere Gripler-Tauben (längsgestreifte Symbole) brauchen, bis sie eine bestimmte Dressurphase beherrschen, und wie weit sie bei Unterbrechung der Dressur zurückfallen. Gripler-Tauben lernen deutlich besser und vergessen weniger rasch als Brieftauben. Dies zeigt im Vergleich zu einigen anderen getesteten Taubenrassen auch die Abbildung 3. Die Dressur-Erfolgs-Kennlinien weisen klar die Überlegenheit der Gripler-Tauben auf, während die Brieftauben die schlechtesten sind.

Bei diesen Experimenten hat sich (wieder einmal) gezeigt, daß die beste technische Einrichtung nichts nützt, wenn man unbiologisch vorgeht, und daß eine genaue Beobachtung der Versuchstiere – in unserem Fall das freie Flugverhalten der verschiedenen aus den Taubenschlägen frei ausfliegenden Rassen – immer noch die beste Basis ist. Dieses genaue Hinschauen und Ansprechen, das kritische Beobachten vor einer Eintragung habe ich im ornithologischen Bereich von Walter Wüst gelernt, an dessen Exkursionen ich als Schüler und später als Student stets begeistert teilgenommen habe.

#### 2.4 Meßtechnik

Die Tauben wurden schließlich daran gewöhnt, eine Art Atemgasmaske zu tragen, was sie – da gut behandelt – problemlos taten. Ein Teil der ausgeatmeten Luft

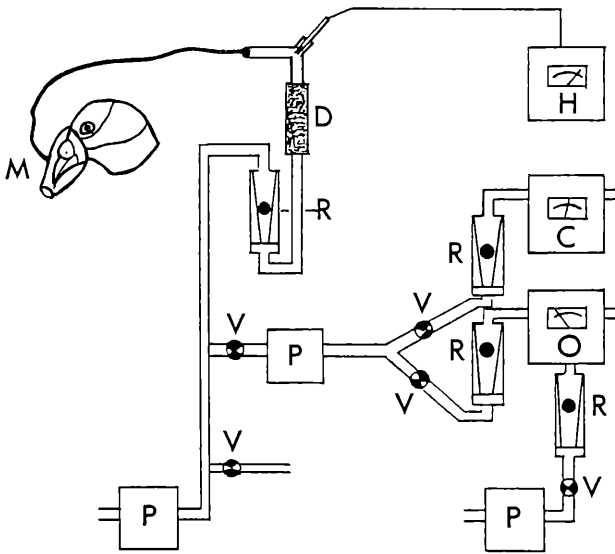


Abb. 4:

Schema der – im Text kurz erläuterten – stoffwechsel-physiologischen Meßeinrichtung, M Atemmaske, D Trockner, P Pumpen, V Ventile, R Rotameter (Strömungsgeschwindigkeits-Meßgeräte), H Feuchtemesser, C CO<sub>2</sub>-Meßgerät O<sub>2</sub>-Meßgerät. – Sketch of the gas analysing system described in the text. M mask, D dryer, p pumps, V valves, R rotameters, H humidity measuring system, O O<sub>2</sub> measuring system.

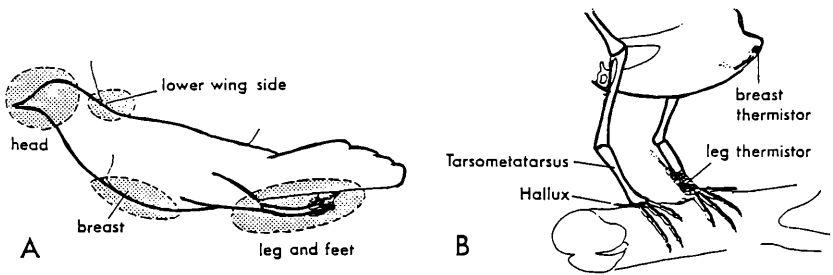


Abb. 5:

Angabe der wichtigsten wärmeabführenden Stellen am Vogelkörper (A) und Lage der Thermistoren in der Brustregion und der Beinregion (B). Die Körpermittemperatur wurde durch einen Thermistor in der Cloake gemessen. – The most important cooling locations on a bird's body (A) and positioning of thermistors (B). Core temperature was measured via a thermistor in the cloaca.

wurde abgesaugt und über einen Sauerstoff- und einen Kohlendioxid-Analysator geleitet (Abb. 4). Aus der Masse des in der Zeiteinheit verbrauchten Sauerstoffs kann man bei Kenntnis des verbrannten Treibstoffs auf die ausgegebene Flugleistung schließen. Kenntnis über den verbrannten Treibstoff gewinnt man über die respiratorische Austauschrate, den Quotienten des in der Zeiteinheit abgegebenen  $\text{CO}_2$ -Volumens und gleichzeitig aufgenommenen  $\text{O}_2$ -Volumens. Aus diesen Größen, im Vergleich mit zwischenzeitlichen Wägungen (der Flug läßt sich leicht unterbrechen, und die Tauben können von zehn zu zehn Minuten herausgenommen und gewogen werden) kann man auf den Massenverlust und den Wasserverlust schließen. Temperaturen schließlich werden über eingepflanzte oder angeklebte feinste Thermistoren gemessen (Abb. 5). Das gesamte Meßverfahren ist hoch automatisiert, und die Werte werden als Zeitfunktion parallel auf Mehrkanalbändern gespeichert. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft hat uns dankenswerterweise die nötigen Mittel zur Verfügung gestellt.

### 3. Ergebnisse

Von den sehr zahlreichen Ergebnissen, die wir gewinnen konnten, seien hier solche angeführt, die über die speziellen flugbiophysikalischen und stoffwechselphysiologischen Fragen hinausgehen und vielleicht von allgemeinerem Interesse sind.

#### 3.1 Flugtreibstoff und Flugleistung in der ersten Flugstunde

Die Abbildung 6 zeigt die Endergebnisse von 41 60-Minuten-Flügen von 5 Individuen (Grippler-Tauben) nach ROTHE, BIESEL & NACHTIGALL (1987). Die respiratorische Austauschrate (die man mit einiger Berechtigung gleich dem bekannten respiratorischen Quotienten RQ setzen kann) sinkt von Werten knapp unter 1 direkt nach Flugbeginn (in den ersten Minuten Einschwingvorgänge) auf Werte von etwa 0,7 nach einer Stunde. Einen wirklich stetigen Wert erreicht sie allerdings erst nach etwa 1,2 Stunden. Das bedeutet: die Taube startet zunächst mit Kohlenhydrat-treibstoff. Sobald die Kohlenhydratvorräte im Blut und in der Muskulatur aufgebraucht sind – nach etwa einer Stunde –, hat sie vollständig auf Fett-Treibstoff umgeschaltet, den sie in der Folge weiter verbrennt. Dies erscheint auch sinnvoll, da die „Energiedichte“ von Fett-Treibstoff mindestens doppelt so hoch ist wie die von Kohlenhydrat-Treibstoff. Die Flugleistung  $P$ , gemessen in Watt, ist zu Flugbeginn relativ hoch und sinkt nach etwa einstündiger Flugzeit ungefähr auf den halben Wert ab, der dann konstant bleibt.

An der Graphik kann man einen Endwert von rund 33,5 W ablesen. Da die Tauben im Mittel eine Körpermasse von 340 g aufwiesen, entspricht dies einer relativen Leistung von rund  $100 \text{ W kg}^{-1}$ . Es läßt sich abschät-

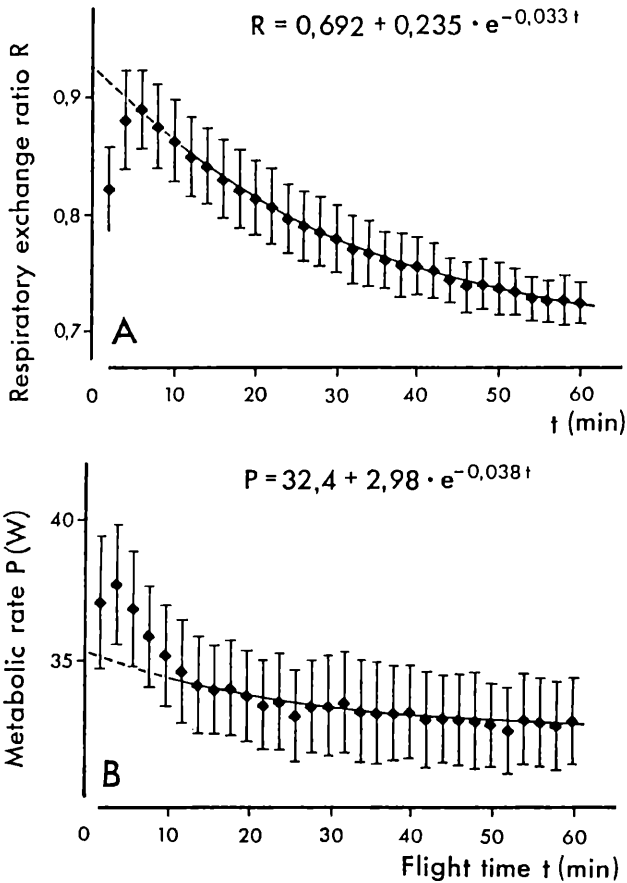


Abb. 6:

Abhängigkeit der respiratorischen Austauschrate R von der Flugzeit (A) und Abhängigkeit der Stoffwechselleistung P, angegeben in Watt, von der Flugzeit (B). Erst nach rund einstündiger Flugzeit bahnt sich ein Plateau an, ein Hinweis darauf, daß der Vogel erst nach so langer Zeit auf die stoffwechsel-physiologischen Bedürfnisse des Langstreckenflugs umgeschaltet hat. Messungen im Minutenbereich, wie von Voruntersuchern häufig durchgeführt, müssen notwendigerweise zu nicht zutreffenden Werten führen. – *Respiratory rate (A) and metabolic power (B) as a function of flight time. For discussion comp. the text.*

zen, daß die Taube im Verhältnis zum wirklich freien Flug in natürlicher Umgebung mehr Leistung ausgeben muß (weil sie Atemmasken mit-schleppt und dadurch auch eine leicht unnatürliche Flughaltung einneh-

men muß etc.). Die Abschätzung führt zu einer Mehrleistung von rund 30%. Bezieht man diese ein, so kommt man für den Freiflug auf eine tatsächliche spezifische stoffwechselphysiologische Leistung von rund  $70 \text{ W kg}^{-1}$ . Da man mit einem Wirkungsgrad von ungedähr 25% rechnen muß (von der stoffwechselphysiologischen Leistung bei der chemischen Treibstoffverbrennung gehen nur 25% in mechanische Flugleistung über; 75%, also immerhin mehr als  $50 \text{ W kg}^{-1}$ , werden als nutzlose Wärme abgegeben, deren Abführung im übrigen ein Problem für sich ist: s. u.) ergibt sich damit eine spezifische Flugleistung von  $0,25 \cdot 70 = 17,5 \text{ W kg}^{-1}$ . Rechnet man wieder unter Einbeziehung der oben angegebenen mittleren Körpermasse auf „eine typische Taube“ um, so ergibt sich letztendlich: Die Taube kann unter Dauerflugbedingungen im Stoffwechsel eine Leistung von etwa 24 W aufbringen, von der sie rund 6 W in Flugleistung umsetzt. (Zum Vergleich: Eine Mini-Mikroskopierlampe von 12 V, die 0,5 A Strom zieht, leistet auch gerade 6 W.) Weiter: 1 g Fett-Treibstoff enthält eine Energie von rund 40 kJ – und die Brustmuskulatur einer 340-g-Taube enthält rund 5 g Fett. Auch bei Annahme einer sehr hohen Stoffwechselleistung von beispielsweise  $2 \text{ kJ min}^{-1}$  (d. h.  $33 \text{ J s}^{-1} = 33 \text{ W}$ ) kann diese Taube allein damit schon  $5 \cdot 40 \cdot 2^{-1} = 100$  Minuten in der Luft bleiben. Der mobilisierbare Fettvorrat ist aber mindestens 10mal größer. Kommt es nach einigen Stunden zum Flugabbruch, kann das also nicht am Erschöpfen der Treibstoffvorräte liegen, sondern es müssen andere Gründe dafür maßgebend sein.

### 3.2 Leistungsabhängigkeit von der Fluggeschwindigkeit

Interessant ist die Tatsache, daß diese eben berechnete minimale Leistung nur bei einer ganz bestimmten Fluggeschwindigkeit ausgegeben wird, im Windkanal bei etwa 11 bis  $12 \text{ m s}^{-1}$ . Bei größerer Geschwindigkeit steigt die Leistung, was verständlich erscheint, bei kleinerer aber auch! Es entsteht damit eine Minimumskurve (Abb. 7), wie sie typisch für solche Leistungsbetrachtungen ist. Es ist anzunehmen, daß derartige U-geformten Leistungs-Geschwindigkeits-Kurven für Langstrecken fliegende Vögel ganz allgemein typisch sind; TUCKER (1966) hat eine solche Kurve auch für den Wellensittich gefunden. Größere Zugvögel konnten in dieser Hinsicht noch nicht untersucht werden, und bei den kleinsten, den Kolibris – der Rubinkehlkolibri fliegt zweimal jährlich über den Golf von Mexico! – herrschen etwas andere Verhältnisse (BERGER 1985). Man kann aber annehmen, daß die Zugvögel im „Leistungsminimum“ fliegen, d. h. bei derjenigen Geschwindigkeit, bei der die geringste spezifische Leistung ausgegeben wird. (Im Grunde genommen gibt es zwei derartige Geschwindigkeiten, die allerdings relativ nahe beieinander liegen; bei einer



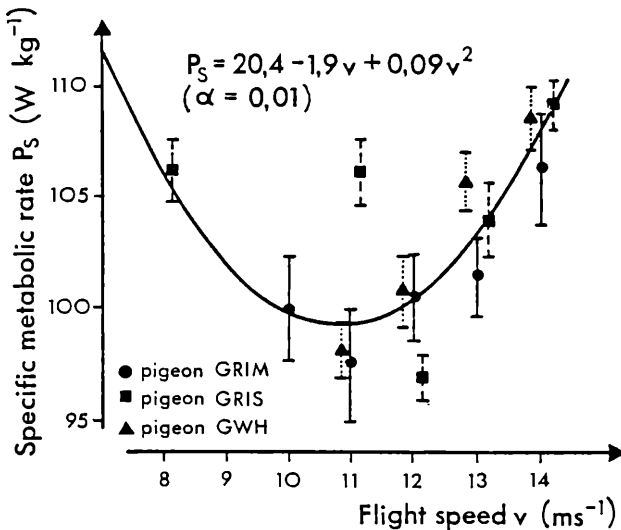


Abb. 7:

Abhängigkeit der Stoffwechselleistung (Ordinate, aufgetragen in Watt pro Kilogramm Körpermasse) von der Fluggeschwindigkeit (Abszisse, angegeben in Meter pro Sekunde). Die Messungen stammen von drei Tauben. Die Streckenangaben entsprechen den einfachen Standardabweichungen. Die eingezeichnete Kurve zeigt die gerechnete bestmögliche parabolische Näherung. – *Specific metabolic power as a function of flight speed. Measurements from 3 individuals. Bars: standard deviations*

kann der Vogel am längsten in der Luft bleiben, bei der anderen kommt er mit gegebenem Treibstoffverbrauch am weitesten. Es ist nicht ausgeschlossen, daß die Vögel, je nach der momentanen Flugsituation, die eine oder die andere Strategie einschlagen). Der von uns (ROTHE, BIESEL & NACHTIGALL 1987) gemessene Minimalwert stimmt im übrigen mit nach Theorien gerechneten Werten englischer Autoren, so mit PENNYCUICK (1968) und RAYNER (1979) gut überein.

### 3.3 Körpertemperaturen

Vögel halten eine relativ hohe Körpertemperatur (Kerntemperatur) aufrecht. Es war die Frage, inwieweit sie diese auch bei den Extrembelastungen des Fluges regulieren können oder müssen. Bleibt die Körpertemperatur – gemessen über Thermofühler – in der Cloake konstant, so ist das ein Zeichen dafür, daß die Abwärme (wie gesagt 75 % der Stoffwechselleistung!) problemlos abgeführt werden kann. Nach der Ab-

Temperature range: 10,6 - 13,9 °C

Temperature range: 23,7 - 28,8 °C

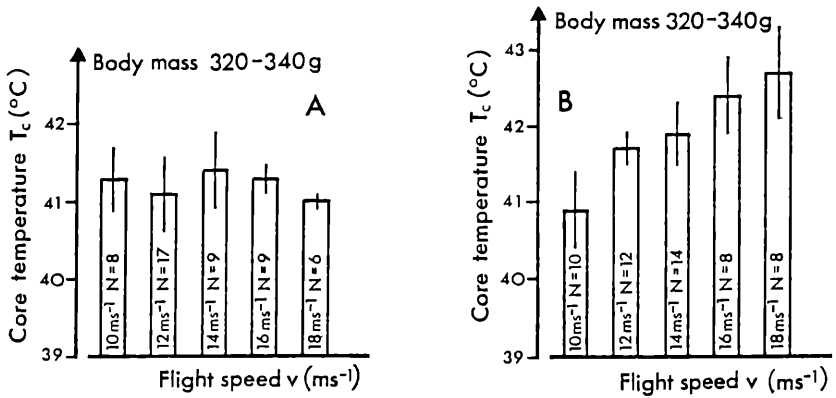


Abb. 8:

Abhängigkeit der Körperkerntemperatur von der Fluggeschwindigkeit bei geringen Umgebungstemperaturen (A) und bei hohen Umgebungstemperaturen (B). Erläuterung im Text. – Core temperature as a function of flight speed at low (A) and high (B) ambient temperatures.

bildung 7 sollten vor allem bei ganz langsamen und ganz schnellen Flügen Temperaturregulations-Probleme auftreten, außerdem verständlicherweise bei hohen Außentemperaturen. Wie die Abbildung 8 zeigt, bleibt die Körperkerntemperatur bei allen untersuchten Fluggeschwindigkeiten im Bereich geringer Außentemperaturen bis zu etwa 14 Grad konstant, bei sehr hohen künstlichen Außentemperaturen (Aufheizen des Windkanalraums) bis zu 29 Grad steigt sie dagegen mit größeren Stoffwechselleistungen signifikant an (im untersten Geschwindigkeitsbereich wollten die Tauben bei diesen Außentemperaturen nicht fliegen, deshalb fehlen hier Angaben). Das bedeutet, daß ein Dauerflug bei diesen hohen Außentemperaturen nicht möglich ist. Und das heißt wiederum, daß im Extremfall die Außentemperatur die Länge von Dauerflügen stark limitiert: Sobald eine Körperkerntemperatur von 42°C wesentlich überschritten wird, muß der Vogel landen. Zugvögel suchen auch gerne kühlere Luftschichten auf oder fliegen des nachts. Diese hohe Kerntemperatur kann im übrigen, wie HIRTH, BIESEL & NACHTIGALL (1987) diskutieren, nicht nur Fluglimits setzen, sondern durchaus auch positive Effekte haben, so Voraussetzungen für günstigere Enzymwirkung schaffen.

### 3.4 Thermoregulation

Die überschüssige Stoffwechselwärme (oben wurde dies am Beispiel des Wirkungsgrads von 0,25 erläutert) muß während des Fluges abgegeben werden; der „Flugmotor muß gekühlt werden“. Dies kann auf unterschiedliche Weise geschehen, nämlich erstens durch Abstrahlung, zweitens durch Konvektion (Umströmung von Kühlelementen) und drittens durch Wasserverdunstung: da Vögel keine Schweißdrüsen haben, sollte die Wasserabgabe überwiegend über das ausgeatmete Atemwasser geschehen. Es läßt sich zeigen, daß der erste Vorgang beim Flug keine Rolle spielt, so daß man letztlich von einer nicht-evaporativen Wärmeabgabe über Konvektion und einer evaporativen Wärmeabgabe über Wasserverdunstung ausgehen muß. Mit steigender Außentemperatur nimmt der nicht-evaporative Anteil an Bedeutung ab, der evaporative an Bedeutung zu, wie die Abbildung 9 zeigt. Den letzteren Aspekt kann man schon dadurch verfolgen, daß der Vogel beim Flug unter höheren Außentemperaturen den Schnabel weiter öffnet (Abb. 10) und schließlich – im extremsten

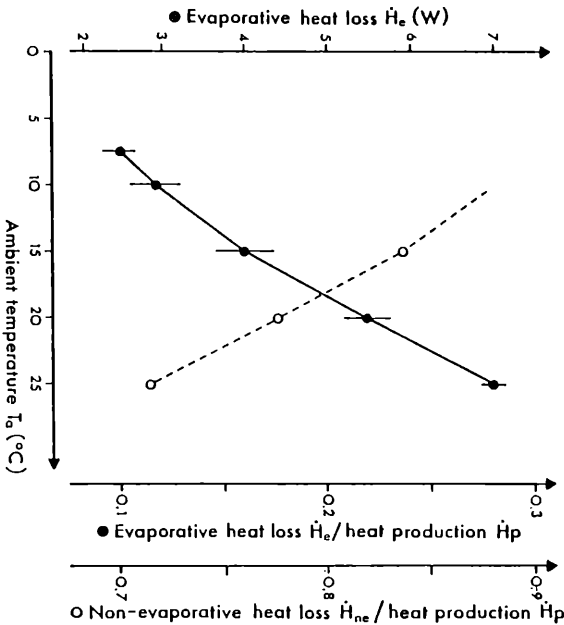


Abb. 9:

Änderung des Anteils an der Wärmeabfuhr durch Konvektion etc. (nicht evaporativer Anteil) und durch Wasserabgabe (evaporativer Anteil) mit ansteigender Umgebungstemperatur. – *Not evaporative and evaporative heat exchange as a function of ambient temperature. Comp. the text.*

Fall, der aber, einmal aufgetreten, in den weiteren Experimenten vermieden wurde – ins Hecheln kommt und den Flug abbricht. Die Erhöhung des evaporativen Anteils an der Kühlung bei höherer Außentemperatur ist aber auch deshalb sehr gefährlich, weil der Vogel damit leicht in die Gefahr der Austrocknung kommt und dann seinen Flug abbrechen muß, was bei Langstreckenflügen über Wüstengebiete oder Meere unweigerlich zum Tode führt.

Verständlich, daß der Vogel mit allen möglichen Tricks versucht, den nicht-evaporativen Anteil, wenngleich dieser aus theoretischen Gründen mit höherer Außentemperatur abnehmen muß, so lange wie möglich so hoch wie möglich zu halten: Er spreizt bei höherer Außentemperatur nicht nur das Gefieder stärker, so daß der Fahrtwind besser kühlt, sondern benutzt auch in ausgedehntem Maß die Beine als Kühler. Ist die Luft sehr kalt, so sind die Beine vollständig im Gefieder versteckt (Abb. 10), bei höherer Lufttemperatur werden sie nach hinten angelegt, bei noch höherer nach hinten abgestreckt, und bei den höchsten tolerierten Außentemperaturen schließlich schräg nach unten in den Fahrtwind gehängt. Dabei

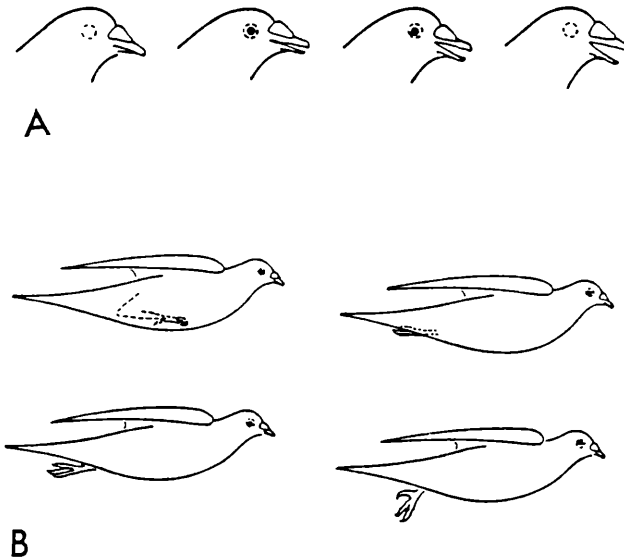


Abb. 10:

Änderung des Schnabelöffnungsgrads (A) und der Beinhaltung (B) mit zunehmender Umgebungstemperatur zwischen etwa 7 und etwa 25 Grad Celsius. – *Changes in degree of bill opening (A) and exposure of legs (B) at increasing ambient temperatures between approx. 7 and 28 centigrades degree.*

werden die Zehen gespreizt. Zugunsten einer besseren Wärmeabfuhr nimmt die Taube dann sogar den höheren Widerstand des „Kühlers“ in Kauf.

### 3.5 Der Wasserhaushalt als limitierter Faktor bei Langstreckenflügen

Man war bisher immer der Meinung, daß der vorhandene Treibstoff die Zahl der Stunden beschränkt, die ein Vogel „am Stück“ fliegen kann. Es zeichnet sich aber ab, daß der Wasserhaushalt mindestens ebenso wichtig ist. Bei der Ausatmung wird nolens volens Wasser abgegeben. Bei höherer Außentemperatur muß zur Erhöhung der gesamten Kühlleistung mehr Wasser abgegeben werden, weil die nicht-evaporativen Anteile – trotz aller Anstrengungen mit dem Bein-Kühler – absinken. Nun wird bei der Treibstoffverbrennung im Stoffwechsel ja Wasser gebildet („Stoffwechselwasser“). Solange der Nachschub durch Stoffwechselwasser und die Abgabe durch Ausatmung sich die Waage halten, kann der Vogel nicht austrocknen. Es läßt sich nun zeigen, daß dieses günstige Gleichgewicht nur bei sehr geringen Außentemperaturen um  $+5^{\circ}\text{C}$ , jedenfalls aber nicht über  $+7^{\circ}\text{C}$  möglich ist. Gelingt es dem Vogel nicht, in so kalter Umgebung zu fliegen (Höhenflüge, Nachtflüge), so ist die Wasserbilanz nicht ausgeglichen und er trocknet langsam aus. Man spricht von Dehydratation.

Der Mensch zeigt bereits bei einem Wasserverlust von 3 % der Körpermasse klinische Syndrome. Unsere Windkanal-Tauben zeigten bei Wasserverlust bis zu 2 % der Körpermasse keinerlei Lust zum Trinken, tranken aber regelmäßig nach dem Flug, wenn der Wasserverlust größer als 2 % war. Nach allem, was man weiß, dürfte ein Wasserverlust von 5 % der Körpermasse die kritische Grenze darstellen. Akzeptiert man dies, so läßt sich ein aus unseren Daten (BIESEL & NACHTIGALL 1987 aufgestelltes Wasserverlust-Maximalflugzeit-Diagramm gut interpretieren (Abb. 11). Zieht man bei dem Wert eines relativen Massenverlustes von 5 % der Körpermasse eine abszissenparallele Gerade, so ergibt sich über ihre Schnittpunkte mit den Temperatur-Kennlinien folgendes: Bei einer Außentemperatur von  $7,5$  Grad Celsius kann der Vogel ohne weiteres länger als einen Tag in der Luft bleiben, so daß die Flugdauer hier durch die Treibstoffvorräte begrenzt werden dürfte. Bereits bei einer Außentemperatur von  $10$  Grad Celsius ist die Flugzeit auf rund  $15$  Stunden beschränkt, bei  $15$  Grad Celsius auf rund  $7,5$  Stunden, bei  $25$  Grad Celsius gar auf lediglich  $2$  Stunden. Dies gilt für die ideale Fluggeschwindigkeit von ungefähr  $12\text{ m s}^{-1}$ . Der Wasserverlust ist aber auch eine Funktion der Fluggeschwindigkeit. Er ist minimal nur bei der optimalen Geschwindigkeit von rund  $12\text{ m s}^{-1}$ ; bei den ungünstigeren kleineren und größeren Flugge-

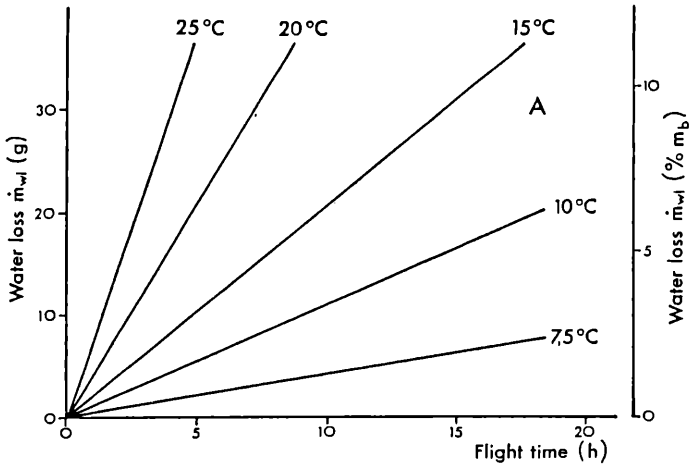


Abb. 11:

Abhängigkeit des Wasserverlustes von der Flugzeit bei unterschiedlichen Außentemperaturen. Nimmt man einen maximal tolerierten Austrocknungsgrad von 5% der Körpermasse an, so erläutert das Diagramm die bei der jeweiligen Außentemperatur längstmögliche Flugzeit. Vgl. den Text. – *Water loss as a function of flight time at different ambient temperatures. The diagram indicates the maximal possible flight time, too: water loss allowed  $\approx$  5% of body mass. Comp. the text.*

schwindigkeiten steigt er ganz entsprechend der in Abbildung 7 gezeigten Kennlinie an.

Man kann also zusammenfassend folgendes sagen. Lassen sich die Ergebnisse der Windkanalflüge auf Flüge in freier Umwelt übertragen – und nichts spricht dagegen, wie Gewichtsmessungen an Zugvögeln in der Sahara gezeigt haben (z. B. BAIRLEIN 1985), so ist bei höheren Außentemperaturen als etwa 7°C nicht der Treibstoffverlust, sondern der Wasserverlust der flugzeitlimitierende Faktor! Abhängig von der Außentemperatur muß der Vogel nach einer bestimmten Zeit den Flug abbrechen, dann nämlich, wenn er eine Dehydratation von rund 5% der Körpermasse erreicht hat. Die zur Verfügung stehende Flugzeit ist um so kürzer, je höher die Außentemperatur ist und je stärker der Vogel nach oben und nach unten von seiner idealen Reisegeschwindigkeit abweicht. Es ist somit anzunehmen, daß der Zugvogel bei der Optimierung seiner „Rastplatzstrategie“ eine größere Anzahl von Parametern verrechnet, darunter sein Startgewicht (Treibstoffvorrat), seine Flughöhe (u. a. Aufsuchen eines Temperaturoptimums für den Wasserhaushalt) und seine Fluggeschwindigkeit (Einstellung auf geringsten Treibstoffverbrauch pro Zeiteinheit oder pro Streckeneinheit).

#### 4. Schlußbemerkungen

Diese durch Laborexperimente gefundenen Aussagen verzahnen sich, wie kurz erwähnt, gut mit Feldmessungen anderer Autoren, die seit einigen wenigen Jahren angelaufen sind. Insgesamt stellen sie einen weiteren, wichtigen Schritt zum Verständnis der Leistungen unserer Zugvögel dar und dürften wesentlich werden für den internationalen Druck zum Erhalt alter und zum Anlegen neuer Rastplätze, deren Lage sich nicht nur an den üblichen Zuglinien orientieren muß; auch der Abstand muß so gewählt werden, daß der Flug von Platz zu Platz von den Vögeln unter den von uns nun klargestellten stoffwechselphysiologischen Gegebenheiten und unter den jeweils herrschenden klimatischen Bedingungen problemlos bewältigt werden kann.

Damit schließt sich der Kreis. Der Ausgangspunkt für unsere Untersuchungen war das Flugverhalten im freien Feld; die dazu nötige „feldornithologische Prägung“ habe ich weitgehend Walter Wüst zu danken. Die Laboruntersuchungen entsprechen meinen physiologisch-physikalischen Neigungen und den Möglichkeiten, die die Forschungseinrichtungen zur Verfügung stellen können. Laborforschung am fliegenden Vogel sollte aber nicht Selbstzweck bleiben, sondern einmünden in die umfassenden Bestrebungen der Ornithologen zum Erhalt der Avifauna. Hierzu möchte auch ich mit meiner Arbeitsgruppe einen Beitrag liefern.

#### Zusammenfassung

Es wird ein zusammenfassender Bericht gegeben über die Ergebnisse der Arbeitsgruppe Nachtigall/Saarbrücken zur Stoffwechselphysiologie von Tauben (*Columba livia*, Rasse „Grippler“) beim Flug im Windkanal. Beschrieben wird in Kürze die Windkanal- und Meßtechnik sowie die Zucht einer geeigneten Windkanaltauben-Rasse und deren Dressur. Es wird gezeigt, daß die Tauben innerhalb der ersten Flugstunde von Kohlenhydrat- auf Fett-Treibstoff umschalten und dann – bei einem Wirkungsgrad von etwa 25 % und einer mittleren Körpermasse von 340 g eine Flugleistung von 6 W produzieren. Diese minimalen Leistungen liegen bei einer optimalen Fluggeschwindigkeit von etwa  $12 \text{ m s}^{-1}$ ; bei geringeren und bei höheren Geschwindigkeiten sind die Leistungen größer. Eine Überhitzung (Körpertemperatur  $>42^\circ\text{C}$ ) erfolgt nur bei experimentell sehr hoch eingestellten Umgebungstemperaturen von 24 bis  $29^\circ\text{C}$ , ansonsten auch beim Dauerflug nicht. Die Abfuhr der „Abwärme“ erfolgt über Konvektion (Umgebungstemperaturabhängigkeit), vor allem über die mehr oder minder in den Fahrtwind gestellten Beine, und über ausgeatmetes Wasser. Dieser letztere Anteil wird bei höherer Umgebungstemperatur bedeutsamer und kann nur bei Außentemperaturen bis etwa  $7,5^\circ\text{C}$  durch „Stoffwechselwasser“ ersetzt werden. Bei hohen Umgebungstemperaturen begrenzt nicht der

Treibstoffvorrat, sondern die beginnende Austrocknungsgefahr infolge des Wasserverlustes die Flugzeit von Langstreckenfliegern, bei 15°C beispielsweise auf 7,5 Stunden, bei 25°C auf 2 Stunden.

### Summary

#### Pigeon Flight in the Wind Tunnel: What Can We Learn About Energetics, Heat Loss and Water Balance for Long-distance Flights?

A comprehensive report is given concerning results of the research group Nachtigall/University Saarbrücken on physiology of metabolism of pigeons (*Columba livia*, race „Grippler“), flying in a wind tunnel. The tunnel design and measuring device is described as well as the breeding and training procedure of the pigeon race that flew best in the wind tunnel. It is shown that the birds switch from carbohydrate fuel to fat fuel within the first hour of flight and that they produce, then, – at a degree of efficiency of approximately 25 % and at 340 g body mass – a flight power of 6 W. This minimal-power is produced at an optimal flight speed of approx. 12 m s<sup>-1</sup>; at higher and lower speeds power expenditure is higher. There is no overheating even during long distance flights (body core temperature >42°C), but it occurs at experimentally induced very high ambient temperatures of 24 to 29°C. Heat exchange is due to convection (dependent on ambient temperature) especially via the legs, that are exposed more or less to the air and via expired water vapor, the latter becoming more important at higher ambient temperature and it can only be balanced by metabolic water production at ambient temperatures not higher than 7,5°C. At higher ambient temperatures flight time of long distance flights is not restricted by running out of fuel but by beginning of exsiccation due to excessive water loss. Maximal flight durations are calculated to 7,5 hours at 15°C, but only 2 hours at 25°C.

### Literatur

Angegeben sind hier nur unsere vier Originalberichte, die zur Publikation angenommen worden sind und zwei zusammenfassende Darstellungen. Die weitere, teils im Text zitierte Literatur, findet sich in diesen:

- ROTHE, H. J. & W. NACHTIGALL (1987): Pigeon flight in a wind tunnel. I. Aspects of wind tunnel design, training methods and flight behaviour of different pigeon races. J. Comp. Physiol. (im Druck).
- ROTHE, H. J., W. BIESEL & W. NACHTIGALL (1987): Pigeon flight in a wind tunnel. II: Gas exchange and power requirements. J. Comp. Physiol. (im Druck).
- HIRTH, K.-D., W. BIESEL & W. NACHTIGALL (1987): Pigeon flight in a wind tunnel. III: Regulation of the body temperature. J. Comp. Physiol. (im Druck).
- BIESEL, W. & W. NACHTIGALL (1987): Pigeon flight in a wind tunnel. IV: Thermoregulation and water homeostatics. J. Comp. Physiol. (im Druck).



Zusammenfassende Darstellung:

NACHTIGALL, W., W. BIESEL, H.-J. ROTHE & K.-D. HIRTH (1986): Gas exchange energetics and thermoregulation of pigeons wind tunnel flight. In: Bericht des DFG-Schwerpunkts „Stoffwechsel unter Extrembedingungen“, (vorl. Titel), im Druck.

Einige Ergebnisse unserer Arbeitsgruppe sind auch dargestellt in der bereits publizierten Arbeit:

NACHTIGALL, W. (1984): Vogelflugforschung in Deutschland. J. Orn. 125: 157–187.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Werner Nachtigall,  
Zoologisches Institut,  
FB 16.4, Bau 6, Universität des Saarlandes,  
D-6600 Saarbrücken

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Ornithologischer Anzeiger](#)

Jahr/Year: 1986

Band/Volume: [25 2-3](#)

Autor(en)/Author(s): Nachtigall Werner

Artikel/Article: [Taubenflug im Windkanal: Was kann man über Energetik, Wärmeabgabe und Wasserhaushalt beim Langstreckenflug lernen? 137-153](#)