Karl Herzog: Der Schwingenflug in der Natur und in der Technik.
Erschienen in der Heftreihe Mechanikus, J.F. Schreiber Verlag Esslingen, **Februar 1963**
Das Copyright liegt heute beim AUE-Verlag, Möckmühl, Deutschland.
Texte und Zeichnungen dürfen nicht an anderer Stelle veröffentlicht werden.

Der Schwingenflug in der Natur und in der Technik

TEIL II — BIOPHYSIK DES VOGELFLUGS

Als Krönung des tierischen Fluges wird zweifellos der Segelflug empfunden, das Dahinschweben ohne aktiven Kraftaufwand. Es gibt auch keinen herrlicheren Anblick, als wenn ein großer Raubvogel leicht und ruhig segelt, wenn er sich in thermischen Aufwinden — als wäre das Gesetz der Erdenschwere aufgehoben — in ungeahnte Höhen tragen läßt.
Die physikalischen Gesetze, welche dieses Schweben ermöglichen, sind heute jedem Segel- und Modellflieger geläufig. Der Vogelflug ist aber nicht nur Gleit- und Segelflug allein, er wird zum großen Teil im Kraftflug bewältigt. Bevor der Vogel sein Körpergewicht den Luftströmungen anvertrauen darf, um von ihnen im Luftraum getragen zu werden, muß er sich mit eigener Kraft von der Erde abheben; Höhe gewinnt er durch kräftige Flügelschläge. Die Befähigung dazu verdankt er seinen mächtigen Muskeln über der Brust, die bei großen Vögeln 1/8, bei kleinen Vögeln bis zu 1/4 des Gesamtgewichtes ausmachen. Das Fliegen ist also auch für den Vogel eine Bewegungsweise mit hohem Energieverbrauch.

vielmehr auf gerader Bahn und mit nahezu gleichmäßiger Geschwindigkeit vorwärts. Der Vorgang sieht auf geheimnisvolle Weise unnachahmbar aus, ein Geheimnis steckt aber nicht dahinter. Wer die natürlichen Zusammenhänge verstehen will, sollte sich zuerst einen Vogelflügel etwas genauer anschauen.

Zum besseren Verständnis bauen wir aus Zeichenkarton eine kleine Vogelschwinge und vergegenwärtigen uns an ihr die anatomischen Verhältnisse. Im Prinzip ist ein Vogelflügel ganz ähnlich gebaut wie die entsprechende menschliche Extremität; man kann also die uns geläufigen Benennungen weitgehend übertragen. Die Umrisse des Flügels werden zuerst, wie in Abb. 12, aufgezeichnet und mit der Schere ausgeschnitten. Nach dem Muster der anatomischen Skizze (Abb. 11) werden dann die einzelnen Knochen der Oberarm-, Unterarm- und der Handgegend eingezeichnet, wofür in unserem Fall einfache Striche genügen. Entlang dieser Striche wird das Papier gefaltet. In Abb. 12 gestrichelte Linien bedeuten eine

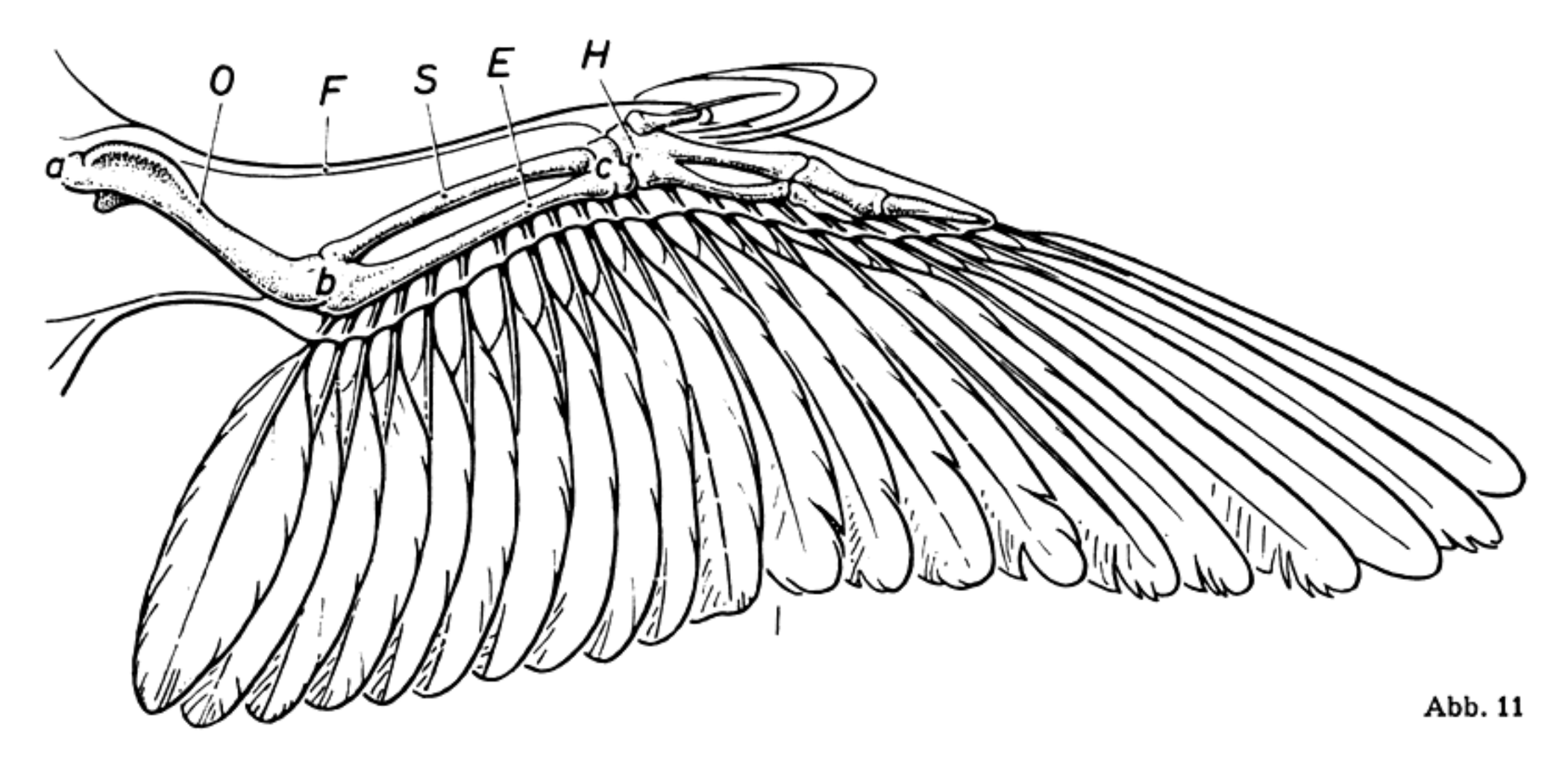


Abb. 11

Wie geht nun aber der Schwingenflug des Vogels vor sich, und auf welche Weise werden dabei die Schwingen bewegt. Eigentlich sollte man meinen, der Vogelleib müsse beim Flügelabschlag in die Höhe schnellen und beim Flügelaufschlag wieder zu Boden fallen. Wie wir wissen, tut er dies nicht; der Leib gleitet

Falzung nach hinten; die angrenzenden Flächen sollen also zurückgeklappt werden. Demgegenüber bezeichnen die gestrichelten Linien mit Kreuzen eine Falzung der angrenzenden Flächen nach vorne. Das so entstandene Gebilde wird auf diese Weise zunächst in 3 Flächen aufgeteilt. Ein spitzwinkeliges Drei-

eck, das in der Mitte steht, teilt den Flügel in 2 Abschnitte auf, von denen der eine der Armschwinge und der andere der Handschwinge entspricht. Vor den Skelettknochen ist schließlich noch eine nach vorn abschüssige, dreieckige Fläche entstanden; sie entspricht am natürlichen Vogelflügel dem elastischen, sehnigen Hautgebilde, das als Flughaut bekannt ist. Dem Schultergelenk entspricht in der Zeichnung Punkt (a), dem Ellenbogengelenk Punkt (b) und dem Handwurzelgelenk Punkt (c). Das Ellenbogengelenk (b) steht etwas höher als die Gelenke (a) und (c). Auf der Flügelunterseite hat sich damit eine Hohlkehle gebildet. Den Papierflügel kann man sich so vorstellen, daß er oben und unten mit weichen Federn ausgepolstert sei; die Ecken und Kanten würden dann nicht mehr in Erscheinung treten, und an der Stelle der großen Papierfläche wären harte Schwungfedern. Der so gebildete Flügel ist oben konvex und unten konkav. Die größte Wölbung liegt sehr weit vorne, etwa über den Knochen; von da an wird sie nach hinten rasch flacher. Aber nicht nur in der Flügeltiefe gemessen nimmt die Flügelwölbung ab, sie verringert sich auch von der Flügelwurzel zur -Spitze hin. Eigentlich ließe sich ein derartiger Vogelflügel mit einer unsymmetrisch gewölbten Platte vergleichen, die nach außen hin trapezförmig zuläuft und deren Wölbung allmählich flacher wird; sie hat wie man im Flugzeugbau sagt, eine aerodynamische Schränkung. Vorn ist die Platte verdickt und durch eingelagertes Strebwerk (Knochen) versteift.

Alle diese Eigentümlichkeiten bekommen beim Ruderflug funktionelle Bedeutung. Wichtig ist vor allem die Untergliederung der Vogelschwinge in einen Arm- und Handfittich. Der Handfittich kann nämlich im Handwurzelgelenk verkantet werden; auf die Flugrichtung bezogen vermag er, gegenüber dem Armfittich, einen anderen Anstellwinkel einzunehmen. Sobald die Hinterkante des Handflügels auf den Widerstand der Luft trifft, weicht sie beim Flügelaufschlag nach unten und beim Flügelabschlag nach oben aus. Diese „Drehschwingung" wird durch die Wirkung kräftiger Sehnen- und Muskelzüge in gewissen Grenzen gehalten; sie kann sogar nach Belieben reguliert und bei Bedarf ganz eingestellt werden. Dadurch wird ein „harter" oder ein „weicher" Flügelschlag erreicht, bzw. der Flügel auf Segelflug eingestellt.

Denkt man sich einen solchen Flügel in Bewegung gesetzt, dann stellt er dem Prinzip nach einen einfachen Hebel dar, der bei der Ruderbewegung um das Schultergelenk auf- und niederschlägt. Der ganze Flügel erfährt dabei im Schultergelenk eine leichte aktive Drehbewegung, zusätzlich findet eine Verkantung des Handflügels im Handwurzelgelenk statt. Die außen gelegene Handflügelfläche wird also in der Längsrichtung stärker verdreht als die weiter innen gelegene Fläche der Armschwinge. Beim *Flügelaufschlag* weicht die Handschwinge durch den Zug bestimmter Muskeln und Sehnenbänder mit der Hinterfahne schnell nach unten aus, und somit kann dieser Flügel, mit der Nasenkante voraus, ohne nennenswerten Luftwiderstand hochgezogen werden (Abb. 13). Die Armschwinge wird unterdessen in V-Stellung mit einem positiven Anstellwinkel angeblasen, erzeugt Auftrieb und verhindert ein Herabfallen des Vogels. Beim *Flügelniederschlag* trifft die Handschwinge auf den von unten wirkenden Luftwiderstand und schnellt jetzt mit ihrer Hinterkante nach oben (passive Drehbewegung), wodurch sie dann wie das Blatt eines Propellers wirkt (Abb. 14). Wie dieses sinnvolle Zusammenspiel zwischen Außen- und Innenflügel abläuft, ist zunächst nicht ganz leicht zu verstehen. Professor **Erich von Holst,** dem wir grundlegende Arbeiten über den Vogelflug verdanken, hat einen sehr anschaulichen Vergleich dafür gefunden. Lassen wir ihn hier selbst zu Wort kommen:

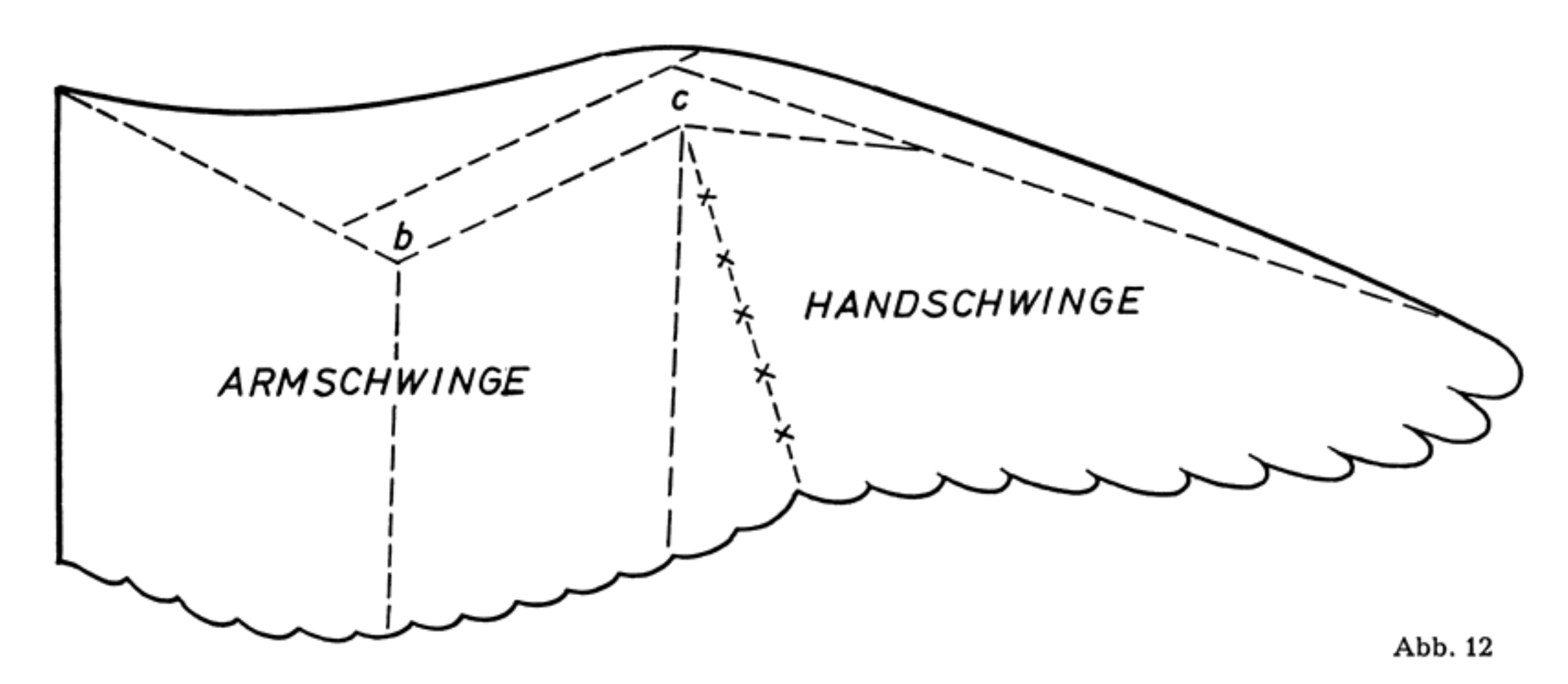
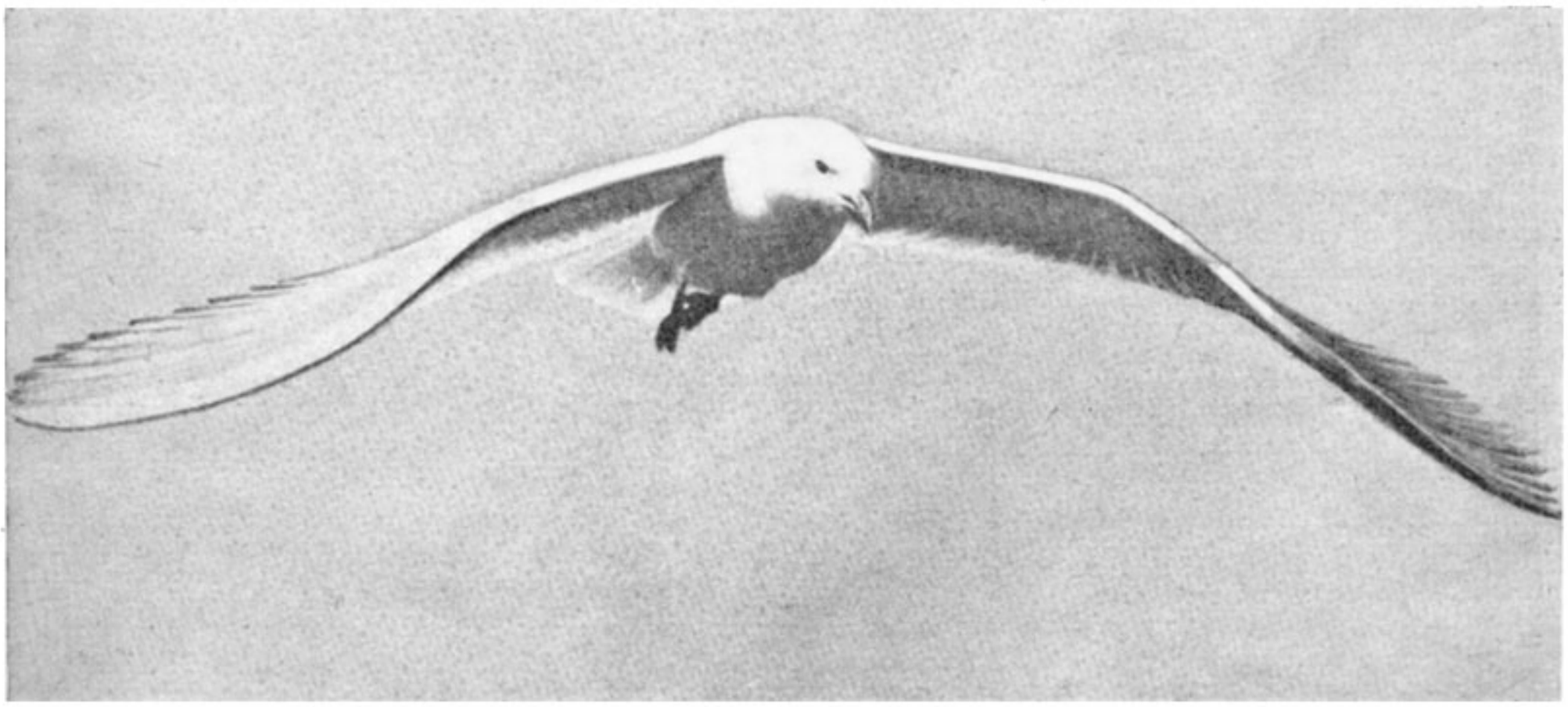


Abb. 12

Abb. 13

„Machen wir uns zunächst deutlich, daß der Vogel, der seine Flügel auf und ab bewegt und dabei selbst horizontal vorwärtsgleitet, die Flügelspitzen auf einer wellenförmigen Bahn dahinführt. Denken wir uns diese Wellenbahn des Flügels erstarrt zu einer Kette gleichmäßiger, schneebedeckter Hügel. An Stelle des Vogels und seiner Flügel setzen wir ein kleines Bübchen, Max geheißen, das auf einem Schlitten über diese Schneeberge hinwegrodeln möchte (Abb. 15a). Dieses Mäxchen möchte ebenso wie der Vogel es scheinbar kann, ohne Kraftaufwand über einen nach dem anderen dieser Hügel hinweggleiten. Natürlich gelingt ihm dies nicht, denn schon vor dem Gipfel des zweiten Berges hat Mäxchen so viel an Schwung verloren, daß er ihn nicht mehr erreicht. Nun hat Mäxchen plötzlich einen genialen Einfall: Er holt sich einen zweiten Schlitten und verbindet beide durch ein langes Brett. Beide Schlitten fahren jetzt mit mehreren Metern Abstand nebeneinander her und zwar so, daß der eine Schlitten über die steilen Bergkuppen, der andere mehr in flacherem Gelände nebenher fährt (Abb. 15b). Zwischen diesen beiden Schlitten wechselt der Knabe ab. Bergab sitzt er auf dem ersten, im Tal rutscht er behende auf den zweiten Schlitten, und nun reicht der Schwung mit Leichtigkeit aus, zur Überwindung der viel flacheren Steigung. Der

Abb. 14



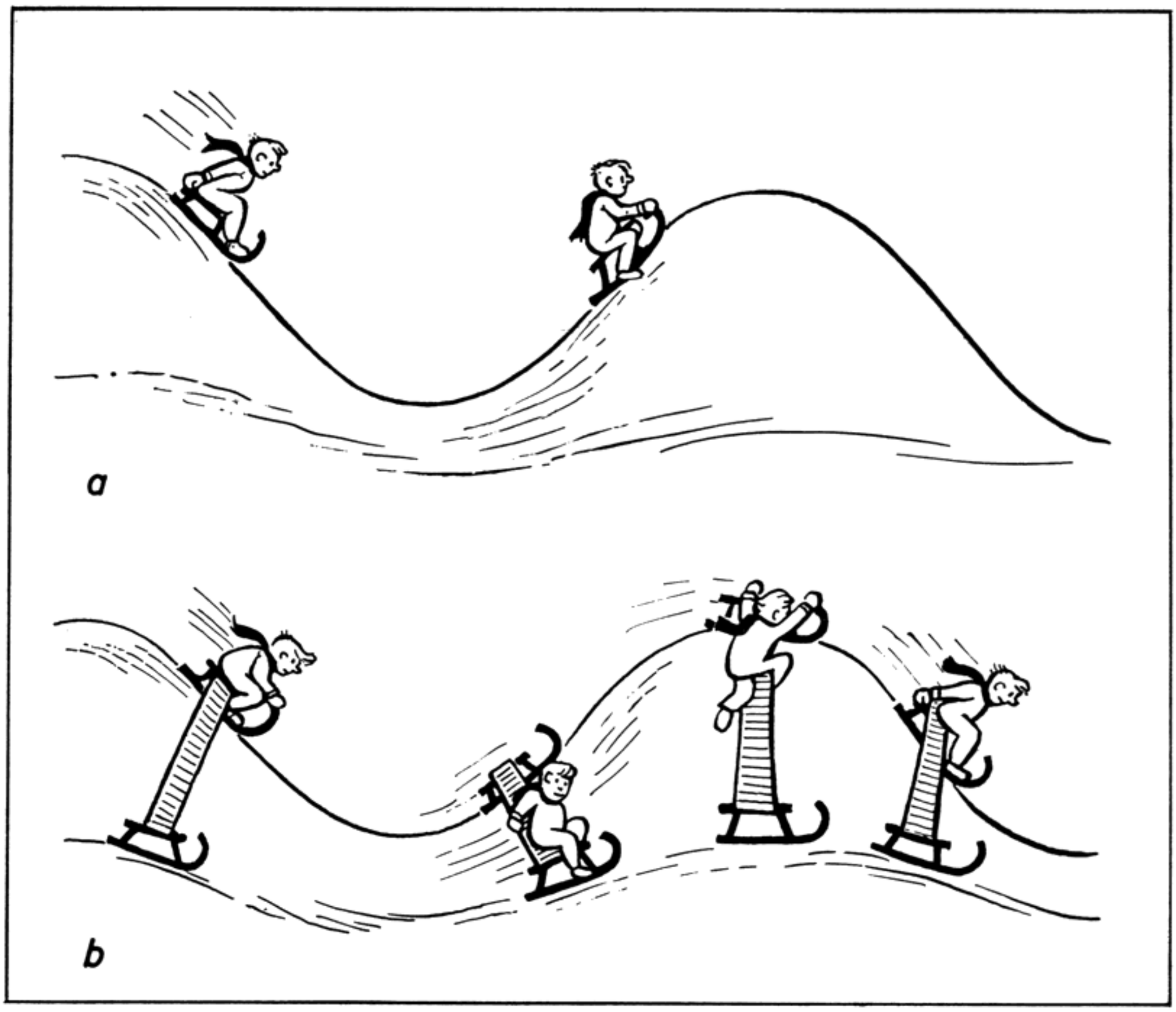


Abb. 15

leere Schlitten fährt entlastet bergauf und erreicht ohne weiteres seinen höchsten Punkt. Oben angekommen klettert Max schnell wieder auf den ersten Schlitten und dieses Spiel wiederholt er in einem fort, und so kann unser kleiner Rodler tatsächlich einen Gipfel nach dem anderen überwinden, indem er immer bergab eine steile, bergauf eine flache Bahn fährt. Aber — und das ist nun das Wichtigste: diese Reise wird ihm nicht mühelos geschenkt. Sie ist nur möglich, weil er selbst Arbeit leistet, weil er im Tal von dem ersten auf den zweiten Schlitten rutscht und auf der Bergkuppe von diesem auf den viel höheren ersten Schlitten hinaufklettert. Er leistet auf diese Weise tatsächlich ebensoviel Arbeit, wie er aufwenden müßte, wenn er auf einem Schlitten fahrend, unterhalb der Bergkuppe stehen bliebe, abstiege und mit seinem Schlitten vollends auf die Spitze hinaufwandern würde."

Genau wie das Mäxchen beim Rodeln, so belastet der fliegende Vogel beim Auf- und Abschlag verschiedene Flügelzonen (Abb. 16a). Er stellt bei der Auf- und Abbewegung seiner Flügel, die Flügelflächen so ein, daß das Gewicht des Körpers bald von der rumpfnah gelegenen Armschwinge (Flügelaufschlag) mit flacher Wellenbahn, bald von der rumpffernen Handschwinge (Flügelabschlag) mit steiler Wellenbahn getragen wird. Der rumpfnah gelegene Flügelabschnitt bleibt dabei in allen Phasen der Flügelbewegung immer annähernd in Flugrichtung eingestellt, und nur die Flügelhand macht Rotationsbewegungen. Der Armflügel hat also die Aufgabe, den Vogel zu heben und zu tragen; der Handflügel liefert dagegen den Vortrieb und stellt somit den „Propeller" dar.

So weit der *horizontale Ruderflug;* wie kommt aber der *Steig- oder Rüttelflug* auf der Stelle zustande? Hier tritt eine anatomische Besonderheit des Knochengerüstes in Funktion; der Vogel kann das Skelett der Schultergegend etwas bewegen. Wenn er den Schultergürtel so einstellt, daß die Flügel nicht mehr von oben nach unten, sondern um 70 bis 90° gedreht, in fast horizontaler Ebene vorwärts- und

rückwärts schlagen, dann wird die vorwärtstreibende Kraft plötzlich zur tragenden Kraft (Abb. 16b). Ist bei raschem Flügelschlag die tragende Kraft größer als das Gewicht des Vogels, dann steigt er fast senkrecht empor; ist sie ebenso groß, dann bleibt er auf der Stelle in der Luft stehen. In diesem Fall wird der Handteil des Flügels abwechselnd von seiner oberen und unteren Seite her angeströmt; dabei entsteht sowohl beim „Aufschlag" als auch beim „Abschlag" eine senkrecht nach oben gerichtete Auftriebskomponente. Besonders geschickt meistern diesen Flug auf der Stelle die Lerchen, Falken und Seeschwalben, weniger geschickt die Möven, Habichte und Bussarde. Aber auch mit selbst gebauten „künstlichen Vögeln" läßt sich dieser Rüttelflug vortrefflich nachahmen.

Zusammenfassend kann man sagen, daß das *Prinzip des Schwingenfluges* sowohl beim horizontalen Ruderflug als auch beim Steigflug immer das gleiche ist. Es handelt sich um ein rhythmisches Flügelschlagen, verbunden mit einer zusätzlichen Drehschwingung der Flügelhand. Selbstverständlich ist der Vogel bemüht Kraft zu sparen, und er wird deshalb diese Drehschwingung so klein wie möglich halten, ohne jedoch den Luftwiderstand zu vergrößern. Dabei kommt ihm sein, für den Schwingenflug überaus günstiges *Flügelprofil* zu Hilfe. Dieses wollen wir jetzt etwas näher betrachten und stellen zum Vergleich dem Armflügelprofil des Bussards das technische Tragflächenprofil Clark Y gegenüber (Abb. 17a).

Will man erreichen, daß eine Tragfläche mit Clark Y Profil, den für den horizontalen Schwingenflug notwendigen Vortrieb, bei möglichst geringem Luftwiderstand liefert, muß sie mit einem negativen Anstellwinkel von 26° nach unten geschlagen werden. Der Bussardflügel hingegen bedarf nur einer Drehbewegung von 9°—10°. Abweichend von der Form des technischen Profils, zeigt hier die Nasenkante nicht nach vorne, sondern nach vorne-unten. Die Luftteilchen, die an der Flügelunterseite entlanggleiten, werden von der dortigen Konkavwölbung gezwungen, nach hinten-unten auszuweichen. Die Flügeloberseite liefert bei dieser Einstellung eine nach vorne gerichtete Auftriebskomponente. Auch für den Flügelaufschlag ist das Profil des Vogelflügels vorteilhafter geformt als das technische Tragflächenprofil; infolge der starken Wölbung, die der Flügel im vorderen Fünftel seiner Tiefe hat, kann die Luft hier schon weit vor der Flügelnase nach hinten-unten abgeleitet werden (Abb. 17b). Wollte man die entsprechende Wirkung mit dem technischen Tragflächenprofil hervorrufen, müßte es erheblich steiler angestellt werden. Das technische Tragflächenprofil ist eben geschaffen worden, um horizontale Luftströmungen optimal nutzbar zu machen, während es für den Auf- und Abschlag des Schwingenfluges weniger geeignet ist. Im Gegensatz dazu können sich aber konkav gewölbte Vogelflügelprofile hervorragend für den Modellflug eignen; das hat vor einigen

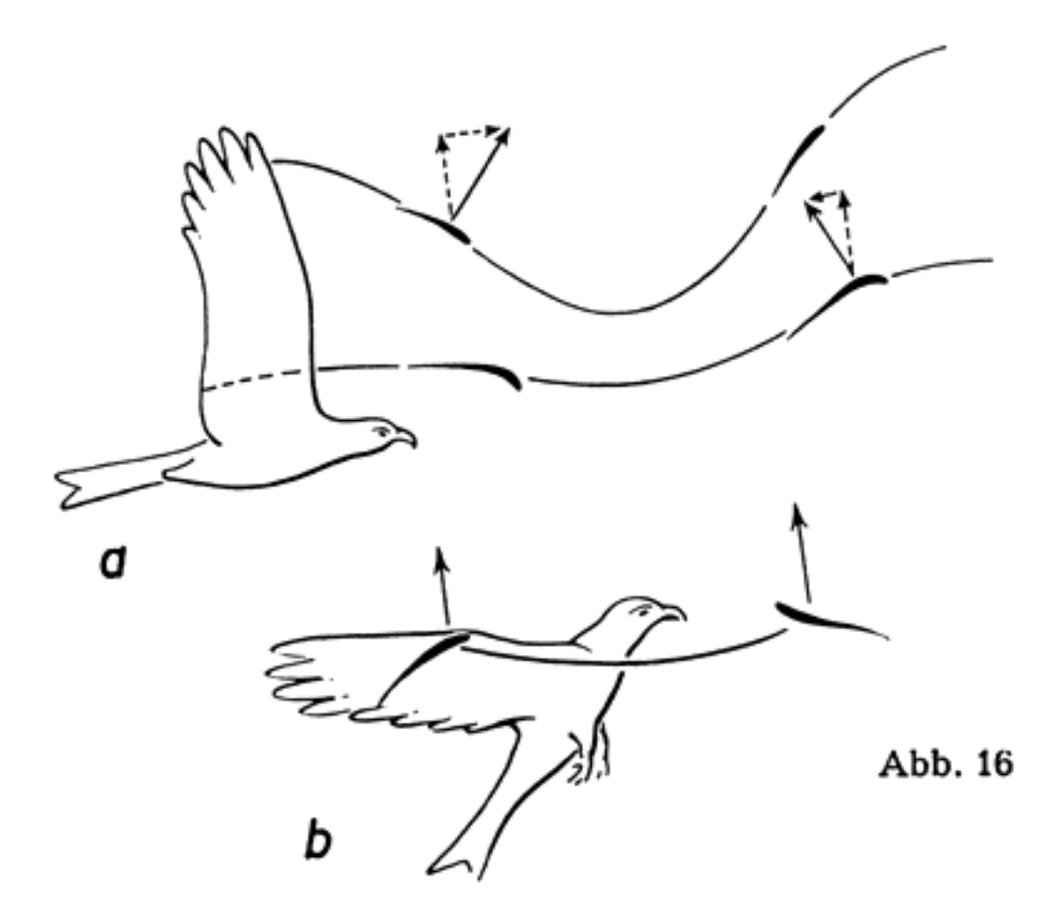
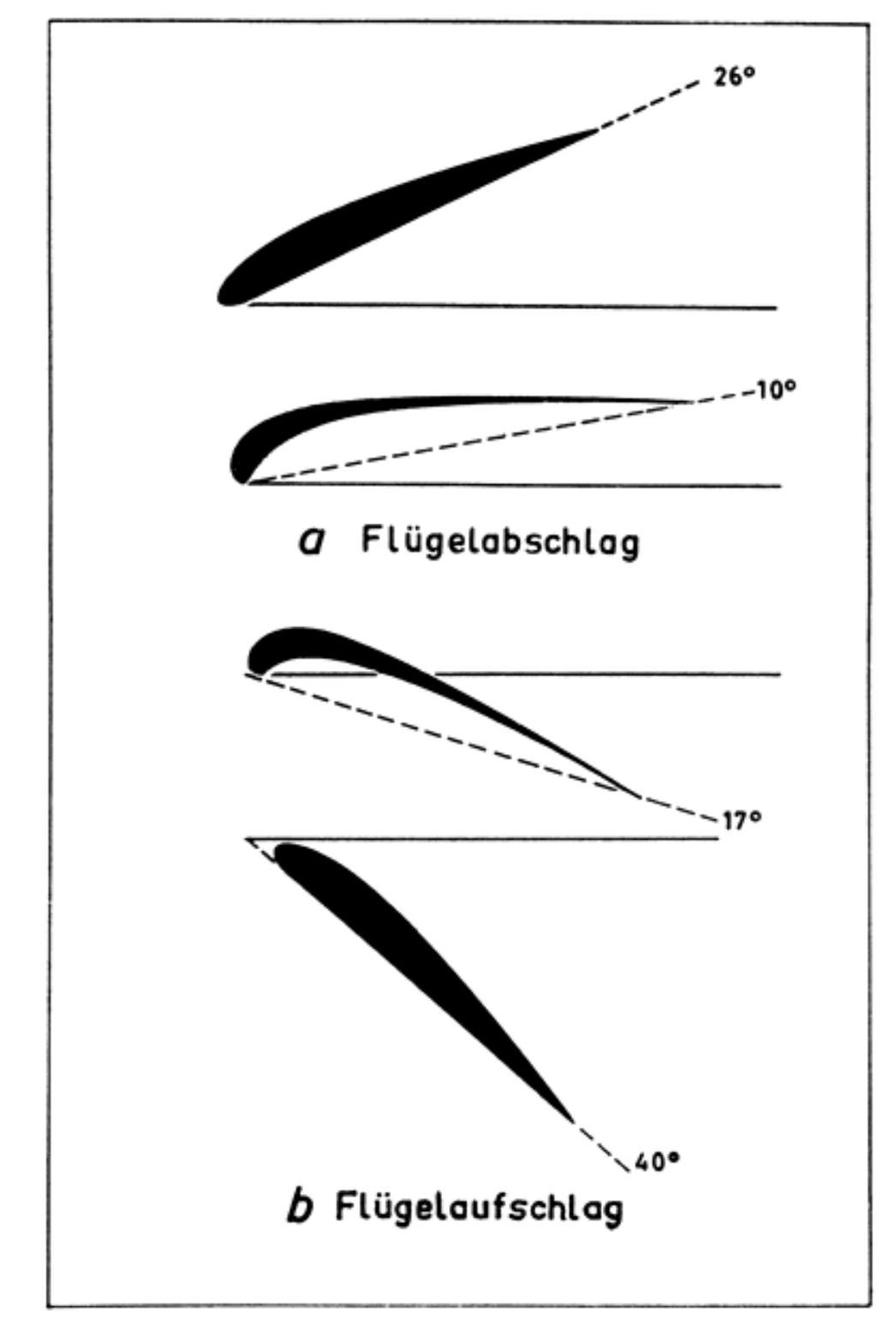


Abb. 16

Jahren **Erich Jedelsky** in Wien nachgewiesen. In umfangreichen Freiflugversuchen erprobte er alle erdenklichen Formen hochgewölbter Flügelquerschnitte systematisch. Die besten Leistungen lieferte ein Flügel, bei dem sich die konkave Unterseite in ihrem hinteren Drittel so sehr der Oberseite annäherte, daß dort nur noch eine Bespannungspapier-dünne Endfahne übrigblieb. Der Flügelquerschnitt, der damit entworfen wurde, kommt weitgehend dem des Vogelflügels gleich. Allerdings weist ein Vogelflügelprofil eine relativ große Druck-

Abb. 17



punktwanderung auf, und ist böenempfindlicher als die mit technischen Profilen gebildeten Tragflächen. Für den Segelflug ist das ein Nachteil, keinesfalls aber für den Schwingenflug; hier ist die Druckpunktunsicherheit sogar eine Voraussetzung, denn beim Vogel als lebendem Wesen sind Massen- und Auftriebsmittelpunkte in ständiger Bewegung.
Für den *Segelflug* des Vogels gelten selbstverständlich die gleichen Gesetze wie beim Flugmodell. Hier wie dort befindet sich der Schwerpunkt unter dem Auftriebsmittelpunkt. Weil der Vogel als „Schulterdecker" segelt, liegt der Schwerpunkt bei ihm ziemlich tief; wird der Vogel aus der Lage gebracht, pendelt er automatisch in die Normalfluglage zurück. Wie ist es aber nun während des *Ruderfluges?* Hier befinden sich die Schwingen einmal über, einmal seitwärts und einmal unter dem Schwerpunkt der Körpermasse. Der Vogel befindet sich also einmal im stabilen, einmal im indifferenten und einmal im labilen Gleichgewicht. Man sollte meinen, er müsse irgend etwas tun, um das Gleichgewicht der Kräfte zu erhalten. Er tut aber gar nichts; was hier zu geschehen hat, regeln die Flügel automatisch, allein durch die ständige Wanderung des Druckpunktes (Abb. 18). Beim *Flügelabschlag* lastet das Gewicht des Körpers vorwiegend auf den etwas nach vorn gepfeilten Handschwingen. Durch die Drehschwingung ist aber deren Auftriebsmittelpunkt so verlagert, daß er etwas vor den Schwerpunkt zu liegen kommt. Der Vogel würde deshalb leicht schwanzlastig werden. Die angreifenden Luftkräfte (Drehmoment der Flügel) wirken dem aber entgegen. Bei der *Flügelhebung* greift das Gewicht auf dem rumpfwärts gelegenen Armflügel an, und die Flügel werden so hochgeführt, daß sich der Auftriebsmittelpunkt und der Angriffspunkt des Gewichtes die Waage halten. Somit ist auch während der Schlagbewegung der Flügel eine vollkommene Harmonie und Ökonomie der Kräfte erreicht.

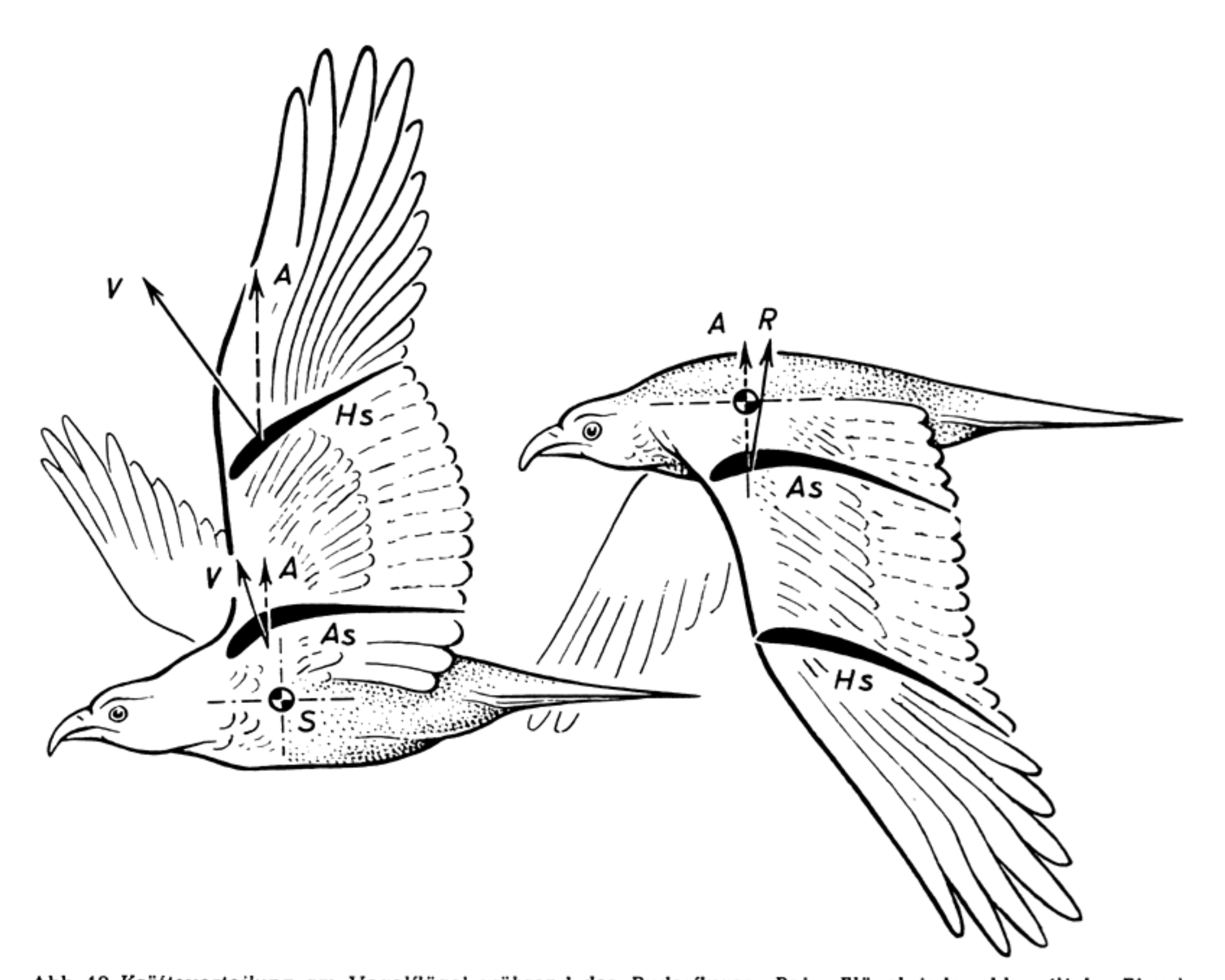


Abb. 18 *Kräfteverteilung am Vogelflügel während des Ruderfluges: Beim Flügelniederschlag (linke Figur) lastet das Gewicht des Vogels vorwiegend auf der Handschwinge (Hs). Die Luftkräfte erzeugen dort eine nach vorn gerichtete Auftriebskomponente (A=Auftrieb, V=Vortrieb). Beim Flügelaufschlag (rechte Figur) wird die Handschwinge (Hs) ausgeschaltet hochgeführt. Das Gewicht lastet jetzt allein auf der Armschwinge (As). Dort erzeugen die Luftkräfte eine etwas zurückgerichtete Auftriebskomponente. Während der Flügelbewegung bleibt die tragende Kraft immer gleich, der Vortrieb ist in allen Phasen vorherrschend. S=Schwerpunkt.*

Am Schluß noch eine vergleichende Betrachtung hinsichtlich des *Gewichts* einiger Vögel. Allgemein herrscht die Ansicht, der Vogel sei überaus leicht gebaut; flugfähige Vogelmodelle könne man, vor allem wegen ihres unverhältnismäßig großen Gewichtes, nicht oder nur schlecht bauen. Diese Ansicht ist unrichtig; ein Blick auf die untenstehende Tabelle beweist dies.

Vogelart		Segelflugmodell		„künstliche Vögel"	
Schwan		*FAI* v. Herm. Nägele		*Schwan* v. Erich von Holst	
Spannweite	218 cm	Spannweite	264 cm	Spannweite	245 cm
Körperlänge	157 cm	Rumpflänge	164 cm	Rumpflänge	120 cm
Flügelgewicht	518 g	Tragflächengewicht	154 g	Flügelgewicht	22 g
Körpergewicht	5823 g	Rumpfgewicht	648 g	Rumpfgewicht	131 g
Schwanzfedern	19 g	Leitwerk	64 g	Schwanzgewicht	10 g
Gesamtgewicht	6878 g	Fluggewicht	1020 g	Gesamtgewicht	185 g
Steinadler		*ETB 35* v. Erwin Tümler		*Adler* v. Erich von Holst	
Spannweite	196 cm	Spannweite	181 cm	Spannweite	200 cm
Körperlänge	94 cm	Rumpflänge	122 cm	Rumpflänge	104 cm
Flügelgewicht	454 g	Tragflächengewicht	98 g	Flügelgewicht	10 g
Körpergewicht	3221 g	Rumpfgewicht	240 g	Rumpfgewicht	74 g
Schwanzfedern	16 g	Leitwerk	58 g	Schwanzgewicht	4 g
Gesamtgewicht	4145 g	Fluggewicht	598 g	Gesamtgewicht	98 g
Mäusebussard		*Bussard* v. Gust. Sämann		*Bussard* v. Erich von Holst	
Spannweite	118 cm	Spannweite	138 cm	Spannweite	97 cm
Körperlänge	52 cm	Rumpflänge	116 cm	Rumpflänge	45 cm
Flügelgewicht	90 g	Tragflächengewicht	58 g	Flügelgewicht	6 g
Körpergewicht	584 g	Rumpfgewicht	150 g	Rumpfgewicht	21 g
Schwanzfedern	14 g	Leitwerk	17 g	Schwanzgewicht	2 g
Gesamtgewicht	778 g	Fluggewicht	283 g	Gesamtgewicht	35 g
Krähe		*ETB 15* v. Erwin Tümler		*Rhamphorhynchus* v. E. v. Holst	
Spannweite	84 cm	Spannweite	90 cm	Spannweite	108 cm
Körperlänge	47 cm	Rumpflänge	64 cm	Rumpflänge	69 cm
Flügelgewicht	44 g	Tragflächengewicht	45 g	Flügelgewicht	4 g
Körpergewicht	397 g	Rumpfgewicht	138 g	Rumpfgewicht	14 g
Schwanzfedern	8 g	Leitwerk	12 g	Schwanzgewicht	2 g
Gesamtgewicht	493 g	Fluggewicht	240 g	Gesamtgewicht	24 g
Taube		*Minimoa* Kleinsegler		*Insekt* v. E. von Holst	
Spannweite	60 cm	Spannweite	78 cm	Spannweite	35 cm
Körperlänge	38 cm	Rumpflänge	34 cm	Rumpflänge	31 cm
Flügelgewicht	26 g	Tragflächengewicht	9 g	Flügelgewicht	2 g
Körpergewicht	240 g	Rumpfgewicht	42 g	Rumpfgewicht	5 g
Schwanzfedern	4 g	Leitwerk	4 g	Leitwerk	—
Gesamtgewicht	294 g	Fluggewicht	64 g	Fluggewicht	7 g

Flugmodelle sind also sehr viel leichter als Vögel vergleichbarer Größe. Zudem stehen uns heute Glühzünder und Dieselmotoren zur Verfügung, die ein Mehrfaches dessen leisten, was eine Vogelmuskulatur an Energie aufzubringen vermag. Wenn Erich von Holst seine „künstlichen Vögel" trotzdem in einer konsequenten Leichtbauweise ausgeführt hat, liegt das daran, daß ihm damals nur Gummimotore zur Verfügung standen, die nicht mehr als 0,6 mkg/sec. p. 10 Gramm ihres Gewichtes zu leisten vermögen. Die unwahrscheinlich guten Flugleistungen, die er damit erzielt hat, sind aber ein Beweis, daß Geräte dieser Art durchaus ernstzunehmende Flugmodelle darstellen. Demnächst wollen wir uns mit diesen kleinen Wunderwerken eingehend beschäftigen.

(wird fortgesetzt) *K. Herzog*

ALLES FÜR DEN TECHNISCHEN BASTLER

Zahnräder, Kugellager, Motore, Bleche, Stangen aus Stahl, Messing und Aluminium, Silberstahl, Stahldraht, Gewindestangen und vieles andere. Preisliste M 26 kostenlos. Geben Sie evtl. kurz Ihre Spezialwünsche bekannt.
Wagner, 432 Hattingen, Postfach 469

Drehbank-Selbstbau (Support)

Hobel-, Bohr-, Fräsmaschine ohne Hilfe anderer Maschinen. (Nur Hand-Werkzeug notwendig). Freiprospekt M 24.
Wagner, 432 Hattingen, Postfach 469