

Helmut Schenk

Abschätzung des Antriebs von Elektroflugmodellen

Inhaltsübersicht

Vorwort

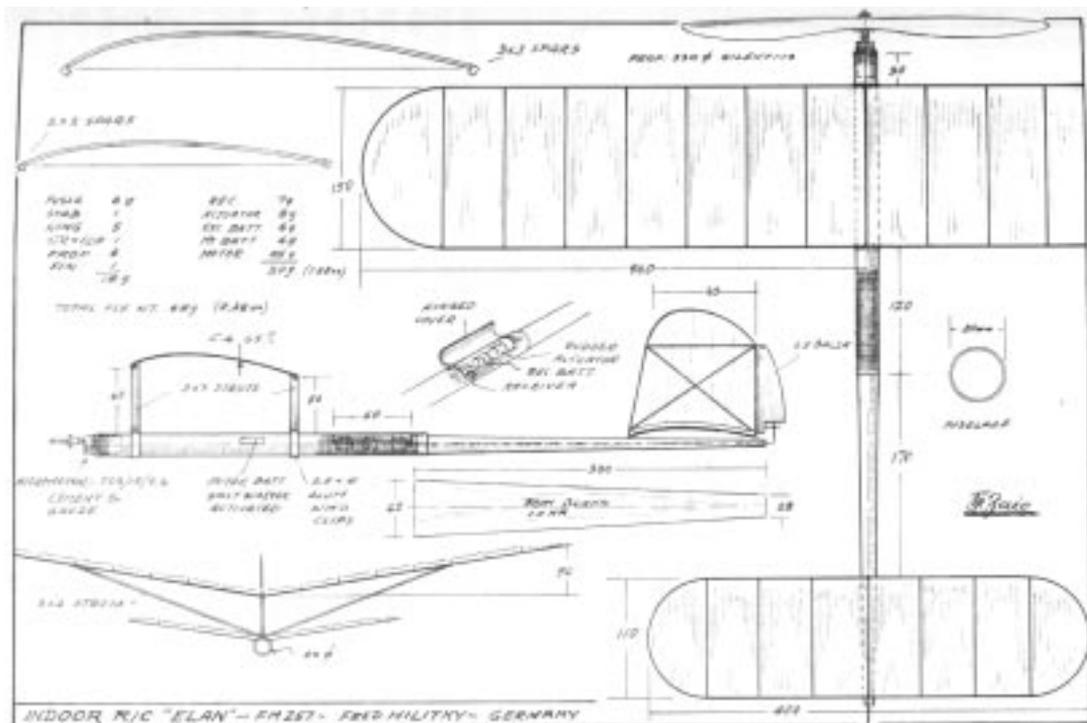
I. Grundlagen

- I. 1 Vortriebsleistung
- I. 2 Horizontalflugleistung
- I. 3 Steigleistung
- I. 4 Wirkungsgrad-Kette
- I. 5 Akku
- I. 6 Motor und Motodiagramm
- I. 7 Propeller und Propelleranpassung

II. Praktische Durchführung

- II. 1 Vorgehensweise
- II. 2 Flußdiagramm
- II. 3 Bücher

Ein Blick zurück:



Indoor-RC-Elektroflugmodell 1964 von Fred Militky, Fluggewicht 68 gr, Flugzeit 10-15 Minuten

Vorwort

Dieser Beitrag wurde ursprünglich als Manuskript zu einer Schulung für einen kleinen Personenkreis verfasst, ein begrenzter Umfang war vorgegeben, und der Inhalt wurde bewußt knapp gehalten. Dieses Manuskript wurde nun etwas überarbeitet und erweitert, die knappe Darstellung aber beibehalten. Daher kann es keinesfalls das Studium eines Fachbuchs ersetzen; vielmehr sollte es als eine Einführung in die erforderlichen Gedankengänge verstanden werden.

Um ein elektrisch angetriebenes Flugmodell überhaupt erst mal in der Luft zu halten und darüberhinaus noch zum Steigflug zu bringen, benötigen wir eine gewisse Antriebsleistung. Dies äußert sich nicht zuletzt in der wohl am häufigsten von Elektro-Modellfliegern gestellten Frage: „Welchen Motor brauche ich für das Modell XYZ“ ? Wobei die Frage eigentlich nicht ganz richtig gestellt ist, denn zunächst einmal geht es immer um die notwendige Antriebsleistung. Erst danach sollten wir die Frage nach dem dazu notwendigen Motor stellen, denn dieser ist letztlich nur eine Art „Transformator“, der im erforderlichen Maß elektrische in mechanische Leistung umsetzt.

Wenn es um den Neuentwurf eines Elektromodells geht, sollte man immer von einem (angenommenen) Motor ausgehen, und aufgrund der gewünschten Flugleistungen „drum herum“ das Modell entwerfen. Dies ist der übersichtlichste und einfachste Weg, und spätere Überraschungen sind so am leichtesten zu vermeiden.

In der Praxis kommt aber häufiger der Fall vor, daß ein Modell schon gegeben ist und dazu der passende Antrieb gesucht wird. Diese Aufgabe ist schwieriger, denn es kommt vor, daß ungeeignete (in der Regel zu schwere) Modelle „elektrifiziert“ werden sollen. Die Folge ist dann, daß die Flugleistungen bescheiden ausfallen. Solche unangenehme Überraschungen kann man vermeiden, wenn man versucht, ein paar wesentliche Daten wenigstens abzuschätzen.

Die am besten für solche Überlegungen geeignete Größe ist die Antriebsleistung (in Watt). Erst im zweiten Schritt befaßt man sich dann mit Einzelheiten wie z.B. Spannung, Strom, Drehzahl, Propellerschub, Motorlaufzeit.

Auf eine Besonderheit dieser Überlegungen und Rechnungen soll schon an dieser Stelle hingewiesen werden: So benötigen wir z.B. für die meisten Rechnungen das Fluggewicht des Modells, das aber zu Beginn nur ungenau bekannt ist, weil u.a. der Motortyp oder die Akkukapazität noch nicht bekannt sind. Man macht deshalb anfangs möglichst plausible Annahmen für die entsprechenden Größen; Erfahrung ist dabei hilfreich. Mit diesen Werten rechnen wir. Nur selten wird das Ergebnis dieses "ersten Anlaufs" zufriedenstellend sein. Wir wissen dann aber, was geändert werden muß (z.B. größerer Akku), und mit entsprechend geänderten Annahmen rechnet man ein zweites mal.

Ist das Ergebnis noch nicht zufriedenstellend, muß die "Schleife" nochmal durchlaufen werden, usw. Es kann aber auch passieren, daß man keine Lösung findet. Dann wissen wir, daß das Projekt so wie gewünscht nicht realisierbar ist. Manchmal ist eine Lösung aber z.B. dann möglich, wenn man zu besonders leistungsfähigen Komponenten greifen kann, z.B. Stromquellen mit sehr hoher Energiedichte, oder einem Motor mit besonders hohem Wirkungsgrad.

Dieses Suchen der Lösung mittels Durchlaufen von Schleifen ist weiter hinten in Form eines Flußdiagramms gezeigt. In dieser Art könnte man z.B. auch ein Computer-Programm zur Lösungssuche erstellen. Wem dieses scheinbare "Probiervorgehen" etwas windig vorkommt, dem sei gesagt, daß man in der Technik häufig so vorgehen muß, und daß auch "Profis" beim Entwurf von mantragenden Flugzeugen auf ähnliche Weise vorgehen.

Die hier beschriebenen Rechnungen beschränken sich bewußt auf „08/15“-Modelle wie Motorsegler, Sportmodelle oder Parkflyer. Die Antriebsauslegung von Sondertypen wie z.B. Pylonracern, senkrecht steigenden Wettbewerbsmodellen, Impellermodellen u.ä. erfordert Eingehen auf Spezialfragen, was den hier möglichen Rahmen weit übersteigen würde.

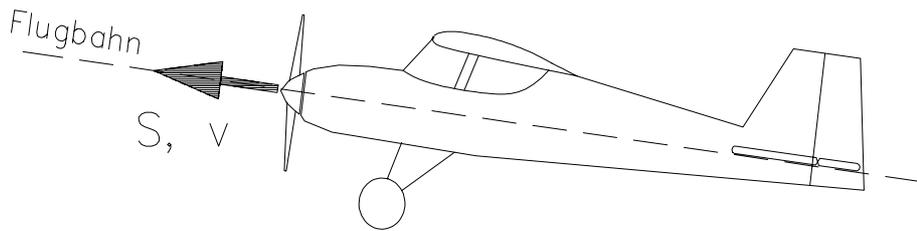
I. Grundlagen

I. 1 Vortriebsleistung

Der Propeller erzeugt einen Schub S [N], welcher das Modell vorwärts bewegt. Multipliziert mit der Fluggeschwindigkeit v [m/s] erhält man die unmittelbar am Modell wirkende Antriebsleistung. Diese Leistung bezeichnet man als Vortriebsleistung P_v [W]. Wie wir noch sehen werden, ist die Leistung, die man dafür dann aus dem Akku entnehmen muß, wesentlich größer.

Es ist also einfach

$$P_v = S \times v \quad [N] \times [m/s] = [Nm/s] = [W]$$



Die Vortriebsleistung kann man sich aus 2 Anteilen zusammengesetzt denken:

1. Die zum Horizontalflug ("Schwebeflug") erforderliche Leistung P_h
2. Die zusätzlich zum Steigen erforderliche Leistung P_s

Entsprechend können wir uns auch den Propellerschub S in die Anteile S_h und S_s zerlegt denken.

Es ist dann

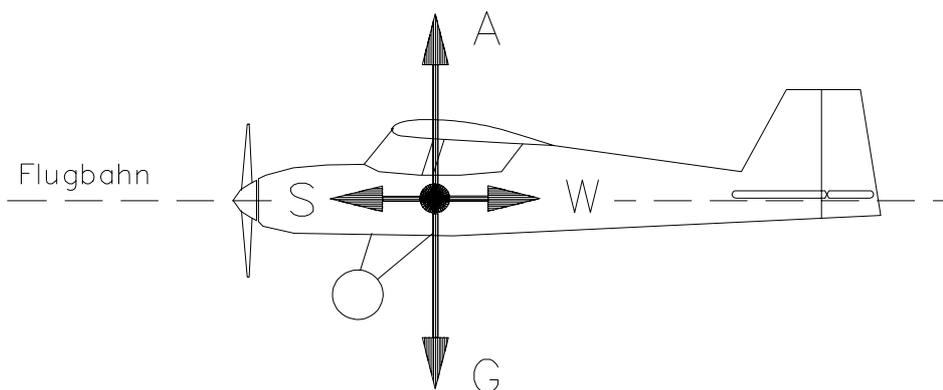
$$P_v = P_h + P_s$$

und

$$S = S_h + S_s$$

I. 2 Horizontalflug-Leistung

Im Horizontalflug ist das Gewicht gleich dem Auftrieb, und der Propellerschub gleich dem Widerstand des Modells.



$$G = A$$

$$S_h = W$$

Mit der Gleitzahl $E = A / W$ des Modells ist aber andererseits

$$A = W \times E$$

Damit ist dann

$$S_h = G/E$$

Zur Anwendung dieser Formel muß die Gleitzahl geschätzt werden (falls sie nicht z.B. aus einer Polarenberechnung bekannt ist).

Typische Werte sind z.B. :

Slow Flyer, Indoor-Modelle	E = 3.5 – 6
“Sport“-Modelle	E = 8 - 10
Einfache Motorsegler	E = 6 – 12
Mittlere Motorsegler	E = 15 - 20
Leistungs-Motorsegler	E = 15 - 25

Die Horizontalflug-Leistung ist das Produkt von Widerstand und Fluggeschwindigkeit

$$P_h = S_h \times v$$

Die hierzu notwendige Fluggeschwindigkeit ergibt sich aus der Formel

$$v = \sqrt{\frac{2 G}{\rho F} \cdot \frac{1}{c_a}} \quad [\text{m/s}]$$

Vereinfachte Formel:

$$v = 1.26 \cdot \sqrt{\frac{G}{F} \cdot \frac{1}{c_a}} \quad [\text{m/s}]$$

In diesen Formeln bedeuten

ρ = Luftdichte [kg/m^3]

G/F = Flächenbelastung [N/m^2]

c_a = Auftriebsbeiwert des Modells [-]

Die Flächenbelastung G/F ist bekannt. Für den Auftriebsbeiwert c_a setzt man ein:

Bei Modellen mit “08/15” – Profilen (Clark Y u.ä.) $c_a = 0.7$

Bei Modellen mit Hochauftriebsprofilen (Gö 417a u.ä.) $c_a = 1.0$

Achtung:

Für c_a darf nicht der maximale Wert des verwendeten Profils eingesetzt werden, da

1. der maximale Auftriebsbeiwert des Flügels immer kleiner als der des Profils ist;
2. man beim maximalen Auftriebsbeiwert praktisch nicht mehr fliegen kann. Die o.g. Werte reichen für die Praxis aus.

Beispiel: Motorsegler,

$$G = 500 [\text{p}] = 5 [\text{N}]$$

$$F = 24 [\text{dm}^2] = 0.24 [\text{m}^2]$$

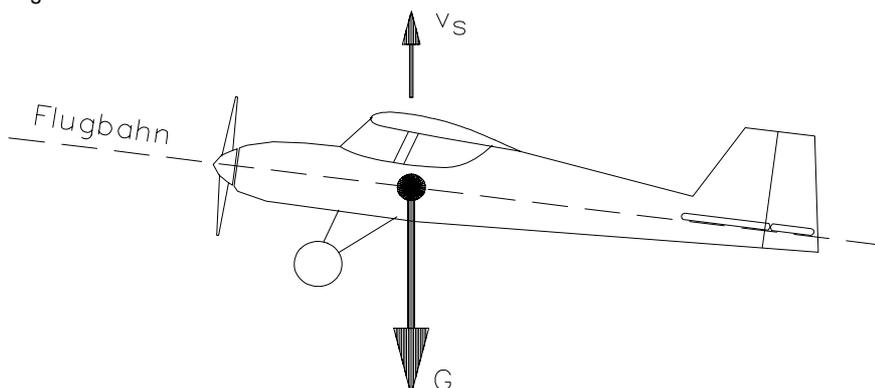
$$E = 8, c_a = 0.7$$

$$v = 1.26 \cdot \sqrt{\frac{5}{0.24} \cdot \frac{1}{0.7}} = 6.87 \quad \text{m/s}$$

$$P_h = 5 / 8 \times 6.87 = 4.33 \quad [\text{W}]$$

I.3 Die Steigleistung

Sie ergibt sich aus der einfachen Überlegung, daß beim Steigen das Modellgewicht G mit der Geschwindigkeit v_s nach oben gehoben werden muß.



Es ist daher

$$P_s = G \times v_s \quad [N] \times [m/s] = [Nm/s] = [W]$$

Die Steiggeschwindigkeit v_s wird entsprechend dem Modelltyp vorgegeben:

Indoor, einfache Slow-Flyer	0.5 – 1 m/s
Einfache Motorsegler	1.5 – 2 m/s
Leistungsfähige Motorsegler	2.5 – 5 m/s
“Sport“-Modelle	2 – 3 m/s

Für im Freien fliegende Modelle sollte 1.5 m/s nicht unterschritten werden. Jeder Steuerfehler, jeder Kurvenflug drückt diesen theoretischen Wert auf 1 m/s oder darunter. Die Folge wäre dann ein ständiges "Fliegen am Minimum".

Beispiel:

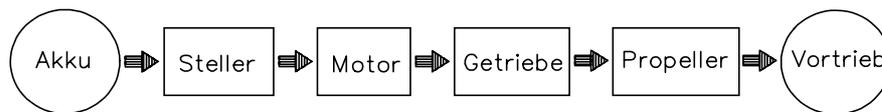
$$G = 1.5 \text{ kp} = 15 \text{ N} \quad v_s = 2 \text{ m/s}$$

$$P_s = 15 \times 2 = 30 \text{ [W]}$$

I. 4 Wirkungskette der Leistung

Die tatsächlich in Vortrieb des Modells umgesetzte Leistung ist weitaus geringer als die Leistung, die dem Antriebsakku entnommen wird.

Wir haben eine Wirkungskette:



Jedes Glied der Kette ist mit Verlusten behaftet, die durch einen Wirkungsgrad beschrieben werden. Diese Wirkungsgrade sind leider nicht konstant und hängen z.T. sehr stark von der Auslegung im Detail ab. Für die Abschätzung genügt es aber, zu erwartende typische Wirkungsgrade anzunehmen.

Typische Werte:	Steller	0.85 – 0.95	
	Motor	0.60 – 0.90	
	Getriebe	0.85 – 0.95	(ca. 93 % pro Stufe)
	Propeller	0.60 – 0.85	

“Hintereinandergeschaltete” Wirkungsgrade multiplizieren sich. Daher ist

$$\eta_{ges} = \eta_{stell} \times \eta_{mot} \times \eta_{getr} \times \eta_{prop}$$

Beispiel:	Steller	η_{stell}	= 0.95
	Motor	η_{mot}	= 0.65
	Getriebe	η_{getr}	= 0.90
	Propeller	η_{prop}	= 0.70

$$\eta_{ges} = 0.95 \times 0.65 \times 0.90 \times 0.70 = 0.39$$

Nur rd. 40% der dem Akku entnommenen Leistung wird tatsächlich in Nutzleistung umgesetzt ! Dies ist ein typischer Fall. Höhere Gesamtwirkungsgrade als 50% bedürfen schon besonderer Anstrengung und erfordern erhöhten Aufwand, niedrigere Werte als 40% kommen durchaus vor.

Der Gesamt-Antriebswirkungsgrad ist andererseits

$$\eta_{\text{ges}} = \text{Vortriebsleistung} / \text{Akku-Abgabeleistung} = P_v / P_a$$

oder, wenn wir nun daraus die notwendige Akku-Abgabeleistung berechnen:

$$P_a = P_v / \eta_{\text{ges}}$$

Beispiel:

Angenommen, wir hätten berechnet:

Horizontalflug-Leistung $P_h = 20 \text{ [W]}$

Steigflug-Leistung $P_s = 30 \text{ [W]}$

Gesamt-Antriebswirkungsgrad $\eta_{\text{ges}} = 0.42$

Dann beträgt die notwendige Vortriebsleistung

$$P_v = 20 + 30 = 50 \text{ [W]}$$

und die Akku-Abgabeleistung wird

$$P_a = 50 / 0.42 = 119 \text{ [W]}$$

Diese Leistung muß der Akku über die gewünschte (Kraft-) Flugzeit erbringen können.

Dabei ist es zunächst egal, ob dies durch hohe Spannung (Zellenzahl) und niedrigen Strom geschieht, oder umgekehrt. In der Praxis ist aber häufig die Zellenzahl schon in gewissen Grenzen vorgegeben, beispielsweise durch das verfügbare Ladegerät, oder die maximal zulässige Eingangsspannung des Stellers. Damit ist dann aber die Stromstärke ebenfalls weitgehend vorbestimmt, da sie sich aus der notwendigen Leistung ergibt, wenn diese durch die Spannung dividiert wird.

I. 5 Der Akku

Der Akku ist Lieferant für die benötigte Leistung [W], und -multipliziert mit der Motorlaufzeit- für die benötigte Energie [Wh] oder [Ws]. Sein Gewicht macht in der Regel den größten Teil der Zuladung eines Modells aus. Ist sein Anteil am Fluggewicht zu groß, so geht dies zu Lasten der Festigkeit bzw. der Belastbarkeit des Modells; ist er zu klein, dann werden die Flugleistungen enttäuschend sein.

Es haben vor allem zwei Akkutechnologien größere Verbreitung erlangt:

1. Nickel-Cadmium- (NC) Akkus
2. Nickel-Metallhydrid- (NiMH) Akkus

Ohne Belastung ist die Klemmenspannung beider Typen etwa gleich groß. Unter Last ändert sich das jedoch erheblich.

NiMH-Akkus

Wird eine lange Motorlaufzeit bei kleinen Strömen gewünscht, dann ist ein NiMH-Akku die beste Wahl. NiMH-Akkus haben -grob gesagt- bei gleichem Gewicht und gleichen Abmessungen einen etwa 70-80% höheren Energieinhalt (höhere Kapazität) als NC-Akkus. Ihr Innenwiderstand (s.u.) ist aber noch deutlich höher als der von NC-Akkus, das bedeutet bei gleichem Strom eine schlechtere Spannungslage.

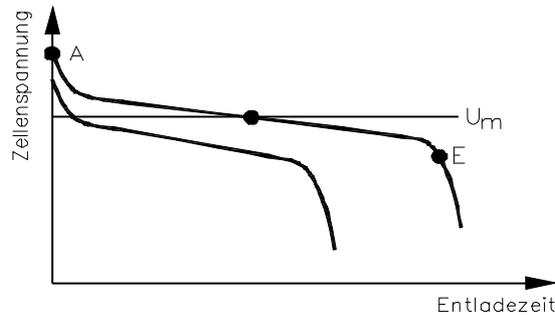
Als Faustregel hat sich bei kleinen Modellen bewährt, etwa pro 7 NC-Zellen 1 Zelle mehr bei Verwendung von NiMH-Akkus vorzusehen; dies bei gleichem Strom und gleichen Zellenabmessungen. Dadurch steigt zwar das Akkugewicht wieder etwas an, und die NiMH-Akkus sind stark belastet und erwärmen sich auch stark. Es bleibt aber ein Gewinn in der Motorlaufzeit (auf Kosten der Akku-Lebensdauer).

Die Weiterentwicklung von NiMH-Akkus hin zu kleinerem Innenwiderstand ist noch in vollem Gange.

NC-Akkus

Wenn große Stromstärken notwendig sind, führt an NC-Akkus wegen deren geringerem Innenwiderstand noch kein Weg vorbei. Nachfolgend wird nur auf diesen Typ eingegangen.

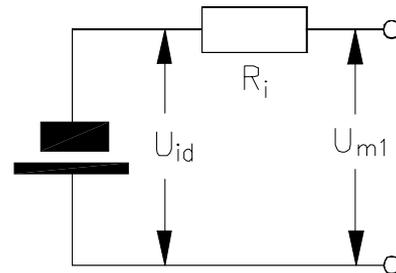
Während der Entladung ist die Zellenspannung nicht konstant, sondern verläuft (bei konstantem Strom) etwa wie in der Skizze gezeigt. Bei höherem Strom liegt diese Kurve bei niedrigeren Spannungswerten und endet nach einer kürzeren Entladezeit (untere Kurve). Da andererseits die Stromaufnahme des Motors wieder von seiner Betriebsspannung abhängt, stellt sich eine Art „Gleichgewicht“ von Strom und Spannung ein (das sich während der Entladung verändert !), und zur Berechnung ist erheblicher mathematischer Aufwand erforderlich.



Für die hier dargestellten Abschätzungen genügt es, von einer konstanten, mittleren Zellenspannung U_m (s. Skizze) auszugehen. Diese ist jedoch wegen des Innenwiderstands von der Stromstärke abhängig; dieser muß berücksichtigt werden.

Innenwiderstand der Akkuzellen

Eine reale Akkuzelle kann man sich als Reihenschaltung einer idealen Zelle und einem Ohm'schen Widerstand vorstellen. In Wirklichkeit ist dieser Widerstand über die gesamten "Innereien" der Zelle verteilt. Diesen Widerstand bezeichnet man als Innenwiderstand R_i .



Entnimmt man der Zelle den Strom I , so entsteht an R_i ein Spannungsverlust

$$\Delta U = I \times R_i$$

An den Klemmen erhält man nur noch die Spannung

$$U_{m1} = U_{id} - I \times R_i \quad [V]$$

Ein Akku mit z Zellen hat bei der Stromstärke I damit eine Klemmenspannung vom

$$U_m = z \times (U_{id} - I \times R_i) \quad [V]$$

Bei guten Zellen beträgt U_{id} etwa 1.32 V und R_i etwa $0.005 \Omega = 5 \text{ m}\Omega$.

Bei schlechten und/oder alten Zellen beträgt U_{id} etwa 1.26 V und R_i etwa 7 - 10 m Ω .

Beispiel:

Guter Akku (5 m Ω), 10 Zellen, $I = 30 \text{ A}$

$$U_m = 10 \times (1.32 - 30 \times 0.005) = 11,7 \text{ V}$$

Schlechter Akku (8m Ω), 10 Zellen, $I = 30 \text{ A}$

$$U_m = 10 \times (1.26 - 30 \times 0.008) = 10,2 \text{ V}$$

Wenn nun eine bestimmte Zellenzahl z gewählt wurde, liegt die mittlere Akkuspannung U_m fest:

$$U_m = z \times U_{m1} \quad [V]$$

Aus der geforderten Abgabeleistung P_a ergibt sich dann der mittlere Strom

$$I_m = P_a / U_m \quad [A]$$

Akkukapazität

Sie gibt an, wie lange ein bestimmter Strom aus dem Akku entnommen werden kann. Die (Nenn-) Kapazität C wird in Amperestunden [Ah] oder Milliamperestunden [mAh] angegeben. Ein wichtiger Begriff in diesem Zusammenhang ist die sog. "1C-Rate" für den Strom. Man versteht darunter den Strom, der zu einer 1-stündigen Entladung gehört. Beispielsweise beträgt bei einem Akku mit einer Kapazität von $C = 2000 \text{ mAh} = 2 \text{ Ah}$ die 1C-Rate 2 A; er kann 1 Stunde lang einen Strom von 2 A abgeben. 4C wären $4 \times 2 = 8 \text{ A}$, 10C = $10 \times 2 = 20 \text{ A}$, usw.

Wichtig:

Die für einen Akku angegebene Kapazität gilt immer nur für die Entladung mit der 1C-Rate. Bei höheren Strömen -was im Elektroflug immer der Fall ist- verringert sich die verfügbare Kapazität. Diese Abnahme der Kapazität hängt u.a. auch erheblich vom Akkutyp ab. Daneben kann ein einzelnes Exemplar aufgrund der Serienstreuung auch Unter- oder Überkapazität aufweisen. Wir können hier nur vom Nennwert ausgehen.

Für die Abschätzung der entnehmbaren Kapazität bei Hochstromentladung kann man folgende Formel anwenden, die durch Auswertung von Messergebnissen entstanden ist:

$$C_e = C_N \times (1 - X \times 0.01)$$

In der Formel bedeuten: C_e = Entnehmbare Kapazität, C_N = Nennkapazität

X = C-Rate des Entladestroms

Die Formel gilt sowohl für NC- als auch für NiMH-Akkus und gibt das "mittlere" Verhalten wieder. Abweichungen durch besonders gute, geeignete Typen oder andererseits ungeeignete Typen lassen sich beschreiben durch

"optimistisch", guter und/oder geeigneter Akku: $C_e = C_N \times (1 - X \times 0.005)$

"pessimistisch", ungeeigneter und/oder überlasteter Akku: $C_e = C_N \times (1 - X \times 0.015)$

Beispiel:

Akku mit Nennkapazität 1600 mAh = 1.6 Ah, Entladestrom 18 A

$$\text{C-Rate } X = 18 / 1.6 = 11.2$$

Entnehmbare Kapazität $C_e = 1600 \times (1 - 11.2 \times 0.01) = 1600 \times 0.89 = 1424 \text{ [mAh]}$

Motorlaufzeit

Nach (vorläufiger) Wahl des Akkus und gfls. Berücksichtigung der Kapazitätsabminderung ergibt sich mit dem mittleren Entladestrom I_m die Motorlaufzeit T_{mot}

$$T_{\text{mot}} = C_e \text{ [mAh]} \times 0.06 / I_m \quad [\text{min}]$$

Beispiel: $C_e = 1424 \text{ mAh}$, $I_m = 18 \text{ A}$

Dann ist $T_{\text{mot}} = 1424 \times 0.06 / 18 = 4.75 \text{ [min]}$

Anhand von I_m und T_{mot} können wir nochmals überprüfen, ob der gewählte Akku unter günstigen Bedingungen betrieben wird. Der mittlere Strom sollte im Clubbetrieb nicht über 20C liegen, möglichst aber bei 10 -15C.

Ein gutes Maß für die Praxis ist auch die Motorlaufzeit. 3 Minuten sollten für Modelle im normalen Clubbetrieb nicht unterschritten werden; 4 Minuten sind anzustreben, bei "zurückgeregelter" Motor mehr. Kürzere Motorlaufzeiten als 3 Minuten sind möglich, aber "Expertensache" !

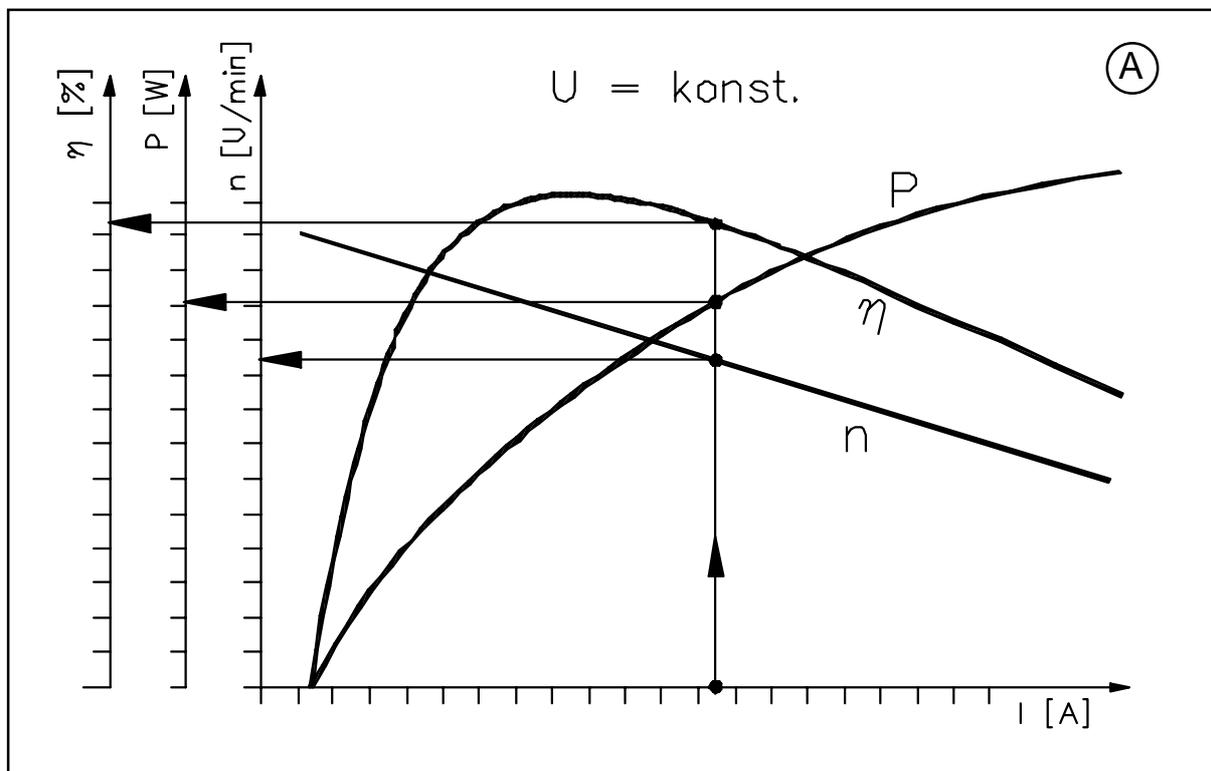
I. 6 Motor und Motordiagramm

Der Elektromotor ist nicht nur "ein Kapitel für sich", sondern "ein Buch für sich". Deshalb gehen wir hier nicht in Details, sondern verwenden die sog. "Motordiagramme". Solche Diagramme werden von kompetenten Herstellern (zumindest auf Anforderung) zur Verfügung gestellt. Weitere Quellen sind Fachzeitschriften, Fachbücher, und nicht zuletzt das Internet.

Ein Motordiagramm enthält alle die Eigenschaften und Daten, die wir für die Anwendung wissen müssen. In ihm sind die Zusammenhänge von Drehzahl, Strom, Abgabeleistung und Wirkungsgrad als Kurven dargestellt, und zwar für konstante Betriebsspannung. Meistens sogar nicht nur für eine einzige Spannung, sondern die Kurven sind für verschiedene Spannungen gezeichnet, und die zugehörige Spannung ist dann an die jeweilige Kurve angeschrieben. In den Bildern unten sind die Kurven der Übersichtlichkeit halber nur für eine Spannung dargestellt.

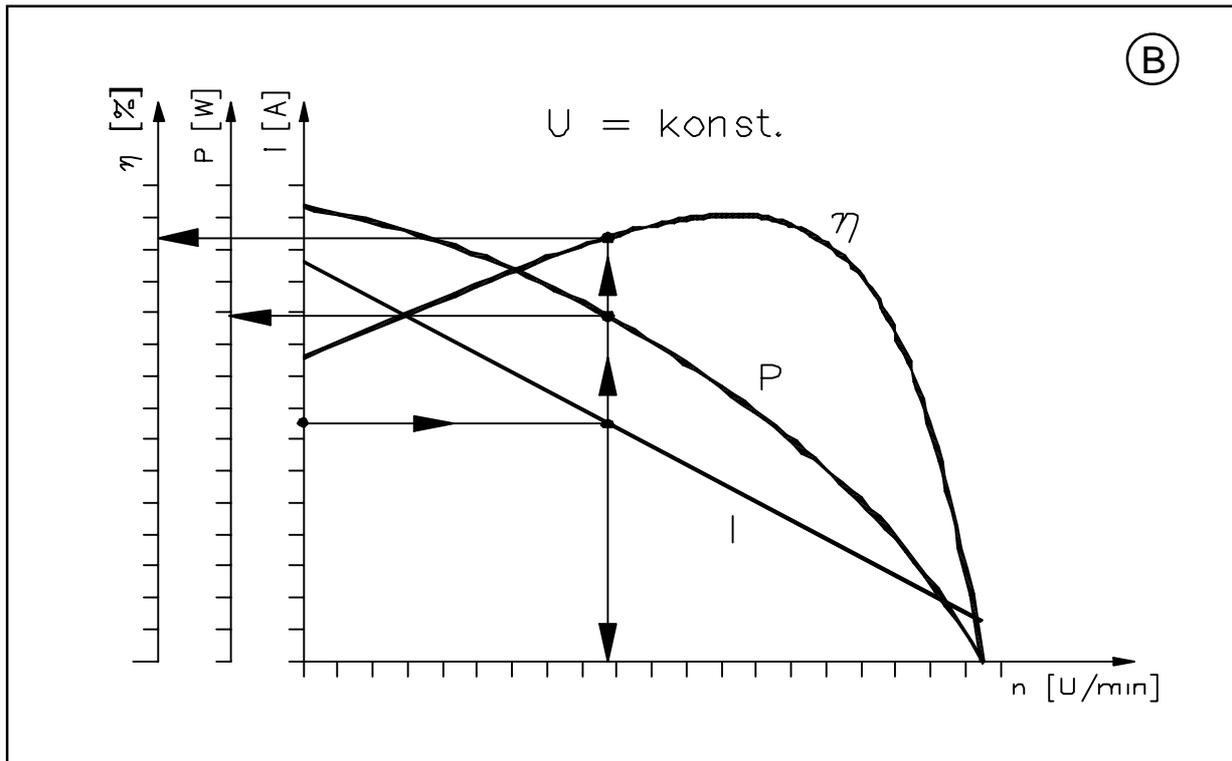
Im Modellbau sind zwei verschiedene Diagrammformen üblich, die sich als besonders geeignet erwiesen haben. Beide Formen haben ihre Vor- und Nachteile und stellen natürlich dieselben Sachverhalte dar. Nur der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß es noch eine weitere Diagrammform gibt, die aus der Elektrotechnik stammt, und bei der die Kurven über dem Drehmoment aufgetragen werden. Diese Form wird hier nicht verwendet; gfls. kann man die Diagramme in die hier gebrauchten Formen umzeichnen.

In der ersten Diagrammform (A) werden Drehzahl, Leistung und Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Strom aufgetragen:



Die Kurven beginnen links beim Leerlaufstrom und enden rechts etwa beim maximal zulässigen Strom und der zugehörigen minimal zulässigen Drehzahl. Sie gehen dort natürlich noch weiter, aber der Betrieb bei höheren Strömen ist weder sinnvoll noch zulässig, ohne daß der Motor Schaden erleidet.

In der zweiten Diagrammform (B) werden die Kurven über der Drehzahl aufgetragen:



Die Kurven beginnen links ungefähr bei der minimal zulässigen Drehzahl und dem zugehörigen maximal zulässigen Strom, und sie enden rechts bei der Leerlaufdrehzahl.

Die in beiden Diagrammen eingezeichneten Pfeile beschreiben, wie wir uns etwas weiter unten in den Diagrammen "bewegen" werden.

I. 7 Propeller und Propelleranpassung

Die letzten Glieder unserer Kette sind vor allem der Propeller, und evtl. zu dessen Anpassung ein Getriebe. Gleichgültig, ob man nun einen gesamten Antrieb nach dem hier beschriebenen Verfahren auslegt, oder ob wir nur die einfachere Aufgabe haben, zu einem bestimmten Motor und Modell den passenden Propeller zu bestimmen; es ist beidesmal dieselbe Aufgabe:

Wir haben einen Motor, für den wir einen gewissen "Betriebspunkt" gewählt oder berechnet haben. In diesem Betriebspunkt sind Abgabeleistung und Drehzahl bekannt und vorgegeben. Ferner wissen wir, mit welcher Geschwindigkeit das Modell etwa fliegen soll, und auf welche "Sonderleistungen" (z.B. "Hovern" oder als Gegenteil dazu "Speedflug") wir besonderen Wert legen. Wir suchen jetzt denjenigen Propeller, der diese Forderungen am besten erfüllt.

Nun ist die theoretische bzw. rechnerische Anpassung und Auswahl eines Propellers ein Thema, das weit über den hier möglichen Rahmen hinausgeht. Das wird Inhalt eines anderen Beitrags sein. Um aber wenigstens ein grobes Verfahren zur Propellerwahl anzugeben, wird nachfolgend die Propellerwahl mit Hilfe des sog. "n100w"-Wertes vorgestellt.

Die "n100w"-Methode

Die Leistungsaufnahme eines Propellers im Stand wächst im Idealfall mit der 3. Potenz der Drehzahl, d.h. man kann schreiben

$$P = k \times n^3$$

hierbei ist k ein vom individuellen Propeller abhängiger Faktor. Man kann ihn experimentell bestimmen, indem man bei einer bekannten Leistung die zugehörige Drehzahl misst.

Es ist praktikabel und üblich, diese Messung bei einer Leistungsaufnahme von 100 W zu machen. Die Drehzahl, die sich dabei ergibt, bezeichnet man dann als "n100w" (n bei 100 Watt). Damit wird dann der Faktor k

$$k = \frac{100}{n_{100w}^3} \quad [W / \text{Upm}^3]$$

Nach Einsetzen und Umformen ergibt sich daraus die für die Anwendung verwendete Formel:

$$P [W] = 100 \times \left(\frac{n}{n_{100w}} \right)^3$$

Wenn n100w bekannt ist, kann man damit für jede Drehzahl n die vom Propeller aufgenommene Leistung P berechnen.

Beispiel: $n_{100w} = 11400 \text{ [Upm]}$, gemessen $n = 13500 \text{ [Upm]}$

Es wird

$$P = 100 \times \left(\frac{13500}{11400} \right)^3 = 166 \text{ [W]}$$

Die n100w-Werte werden teilweise von den Propellerherstellern angegeben, z.T. kann man sie in Fachbüchern, Fachzeitschriften oder im Internet finden.

In unserem Fall sind nun Leistung und Drehzahl vorgegeben, und wir müssen einen (oder mehrere) Propeller mit dem passenden n100w finden. Dazu verwenden wir eine umgestellte Form der obigen Gleichung:

$$n_{100w} = \frac{n}{0,215 \times P^{0,333}} \quad [\text{Upm}]$$

Beispiel: $P = 180 \text{ [W]}$, $n = 13500 \text{ [Upm]}$

Es wird

$$n_{100w} = \frac{13500}{0,215 \times 180^{0,333}} = 11140 \text{ [Upm]}$$

Wir müssen also einen Propeller suchen, dessen n100w-Wert möglichst nahe bei 11140 Upm liegt. Normalerweise werden wir dabei -mindestens näherungsweise- mehrere Propeller finden, die dann aber unterschiedliche Durchmesser und Steigungen aufweisen. Die Auswahl unter diesen erfolgt aufgrund der Anwendung. So wird man z.B. für ein Modell, das langsam fliegen und/oder "hovern" soll, den Propeller mit dem größeren Durchmesser und der kleineren Steigung wählen, und für ein "schnelles" Modell den mit der größeren Steigung und dem kleineren Durchmesser.

Drehzahl im Stand und im Flug

Die n100w-Werte, mit denen wir es oben zu tun hatten, gelten nur im Stand. Im Flug tritt durch die Anströmung mit der Fluggeschwindigkeit eine "Entlastung" des Propellers auf, die eine Drehzahl-erhöhung zur Folge hat. Um dies genau zu berücksichtigen, müssten wir die "Propellerdiagramme" haben oder komplizierte aerodynamische Rechnungen durchführen.

Näherungsweise kann man die Entlastung berücksichtigen, indem man bei der obigen Rechnung eine etwas kleinere Drehzahl als berechnet einsetzt. Messungen in der Praxis haben gezeigt, daß unter den am häufigsten vorkommenden Umständen (Motorsegler, Sportmodelle u.ä.) die Drehzahl-zunahme zwischen Stand und Flug bei Verwendung von "steifen" (Seltenerd-Magnete) Motoren bis zu etwa 10% beträgt, bei "Billigmotoren" bis zu 15%. Bei Speedmodellen, in denen Propeller mit hohem Steigungs-/Durchmesser-Verhältnis verwendet werden, kann die Drehzahlzunahme bis zu 30% betragen.

Bevor wir also anhand von P und n das n_{100w} des gesuchten Propellers berechnen, muß die Drehzahl n um den jeweiligen Prozentsatz verringert werden.

Getriebe

Dieser Punkt soll hier nur kurz erwähnt werden. Es kann der Fall eintreten, daß beim Direktantrieb -vor allem bei schnellaufenden Motoren- nur kleine Propellerdurchmesser realisierbar sind. Diese Propeller laufen dann natürlich auch mit hoher Drehzahl. Wird eine solche Motor-/Propellerkombination in einem relativ langsamen Modell (z.B. Motorsegler) eingesetzt, ergeben sich sehr ungünstige Umstände für den Propeller-Wirkungsgrad. Dieser kann dann ohne weiteres bis zu 20% unter dem eines günstigen Propellers liegen.

In solchen Fällen ist der Einbau eines Getriebes angesagt, das die Verwendung eines größeren und langsamer laufenden Propellers mit höherem Wirkungsgrad ermöglicht. Trotz der Getriebeverluste von etwa 5% bleibt dann ein Gewinn von 10 - 15% im Gesamtwirkungsgrad gegenüber dem Direktantrieb.

Ein Getriebe wird in unseren Rechnungen berücksichtigt, indem

- a) die Abgabeleistung des Motors mit dem Getriebewirkungsgrad (z.B. 0,95) multipliziert wird, und
- b) die Motordrehzahl durch die Untersetzungszahl des Getriebes (z.B. 2,5) dividiert wird.

Mit diesen neuen Werten wird dann das n_{100w} bestimmt und dazu ein passender Propeller gesucht.

Zum Propellerwirkungsgrad

Die Abschätzung des zu erwartenden Propellerwirkungsgrads geht wie schon erwähnt über den hier möglichen Rahmen hinaus. Einige Anhaltswerte sollen aber noch angegeben werden:

- 80% und mehr werden nur in Sonderfällen (z.B. Solarflug) von speziellen Propellern erreicht
 - 70-75% werden von wenig belasteten und gut gemachten Propellern erreicht
 - 70% kann von guten und gut angepassten Propellern erreicht werden
 - 65% sind eine "sichere" Annahme in den meisten Fällen
 - 60% erreichen "gute" Propeller bei falscher Anpassung
- Noch weniger kommt immer wieder dann vor, wenn "langsame" Modelle mit kleinen Propellern, hoher Leistung und hoher Drehzahl angetrieben werden.

Wenn möglich, sollte die "Strahlflächenbelastung" -d.h. der Quotient von Antriebsleistung und Flächeninhalt des Propellerkreises- möglichst gering gehalten werden. Dies ist (etwas vereinfacht gesagt) erste Voraussetzung für einen guten Propellerwirkungsgrad.

II. Praktische Durchführung

II. 1 Vorgehensweise

Im Teil I wurden die wesentlichsten Größen vorgestellt, welche die Leistungen des Modells beeinflussen. Jetzt soll im Zusammenhang gezeigt werden, wie man beim Entwurf eines Elektroflugmodells bzw. auch nur von dessen Antrieb vorgeht. Als Unterstützung dabei dient das Flußdiagramm auf Seite 15.

Vorüberlegungen und Konzeption

Zu Beginn sollte man sich überlegen, was das Modell später "können" soll. Schnell oder langsam fliegen, schnell oder eher gemächlich steigen, welche Motorlaufzeit haben, usw. Diese Vorstellungen möglichst in Zahlen fassen (was gar nicht so einfach ist).

Geht es um den kompletten Neuentwurf eines Modells, so kann man jetzt vorläufige Annahmen machen zu Modelltyp, Spannweite, Flächeninhalt, Bauweise, Gewicht usw. Auch eine erste Annahme des Motortyps und des Akkus müssen jetzt erfolgen.

Gewichtsannahmen

Danach kommt die Phase der (vorläufigen) Gewichtsaufstellung. Sie ist mit das Wichtigste überhaupt! Die späteren Flugleistungen hängen sehr stark vom Gewicht des Modells ab. Die Erfahrung zeigt, daß es so gut wie kein Modell gibt, das gegenüber dem Entwurf leichter geworden wäre; dagegen sehr viele, die zu schwer ausgefallen sind.

Die Gewichte der einzelnen Modellteile werden dazu so genau wie möglich abgeschätzt. Hierzu ist einige Erfahrung und/oder der Vergleich mit bekannten Modellen hilfreich; beispielsweise weiß man dann, was z.B. 1 qdm Tragflügel in Holz- oder Styroporbauweise wiegt, und kann damit auf das Gewicht der neue Tragflügelgröße hochrechnen. Bei Rumpf, Fahrwerk usw. kann man ebenso durch Vergleich mit bekannten Teilen auf das voraussichtliche Gewicht schließen. Erfahrenen Modellbauer notieren sich immer beim Bau ihrer Modelle die Gewichte der einzelnen Komponenten und können dann später auf diese Erfahrungswerte zurückgreifen. Besteht das Modell schon und soll nur "motorisiert" werden, so ist die Sache einfacher, da das Modellgewicht ja bekannt ist.

Die Gewichte der der "Einbauten" wie RC-Anlage, Motor, Akku usw. sind normalerweise bekannt. Nicht vergessen sollte man in diesem Zusammenhang evtl. notwendige Einbaurahmen, Motorspante, Verlängerungskabel usw. .Solche "Kleinigkeiten" können sich sehr schnell zu einigen 100 gr zusätzlichem Gewicht addieren. Je detaillierter und sorgfältiger man die Gewichtsaufstellung macht, desto besser wird das Ergebnis sein.

Als Summe erhalten wir das zu erwartende Fluggewicht. Dazu geben wir noch einen Sicherheitszuschlag von 10%, um auch "an das zu denken, an was wir nicht gedacht haben".

Hauptdaten

Damit können jetzt Flächenbelastung und typische Fluggeschwindigkeit berechnet werden, ebenso die ungefähre Minimalgeschwindigkeit des Modells. Wer über ein entsprechendes Computerprogramm verfügt, ist fein heraus und kann sich die Polare bzw. die Geschwindigkeitspolare des Modells rechnen lassen und weiß dann die Gleitzahl des Modells bei verschiedenen Fluggeschwindigkeiten. Wer über diese Möglichkeit nicht verfügt, muß die Gleitzahl anhand von Erfahrungs- oder Vergleichswerten schätzen.

Leistungswerte

Mit den nun bekannten Daten und der gewünschten Steigleistung kann jetzt die erforderliche Vortriebsleistung ermittelt werden. Danach werden vorläufige Wirkungsgrade von Motor, Propeller usw. geschätzt und damit der Gesamt-Antriebswirkungsgrad berechnet. Hieraus ergibt sich ein erster Wert für die notwendige Abgabeleistung des Akkus.

Akku

Nun ist es an der Zeit, eine (erste) Kontrolle hinsichtlich des angenommenen Akkus zu machen. Hierzu müssen wir die mittlere Akkuspannung und den mittleren Strom berechnen. Kann der Akku die erforderliche Leistung über die gewünschte Motorlaufzeit erbringen? Falls ja, wie hoch ist der Strom?

Liegt beides im "grünen Bereich", können wir weiterrechnen. Sollte der angenommene Akku viel mehr "können" als notwendig (kommt selten vor), oder reicht er nicht aus (wahrscheinlicher), dann müssen wir jetzt einen geänderten Akku annehmen. Mit anderer Zellenzahl und/oder anderer Kapazität gehen wir zurück zum Punkt "Gewichtsannahmen" und wiederholen die Rechnung. Dies machen wir solange, bis der Akku annähernd die nötige Leistung bzw. Energie aufbringen kann.

Gelingt das nicht, so ist dies ein Zeichen dafür, daß wir entweder unsere ursprünglichen Wünsche reduzieren müssen, oder das Projekt garnicht oder nur unter Verwendung von aufwendigen Technologien zu realisieren ist.

Motor

Nachdem jetzt Akku-Abgabeleistung (= ca. Motor-Eingangsleistung) sowie die an der Propellerwelle geforderte Leistung (= Motor-Augangsleistung, wenn kein Getriebe) bekannt sind, schauen wir uns

den Motor selbst an. Er sollte im Idealfall bei den berechneten mittleren Werten für Spannung und Strom die geforderte Abgabeleistung liefern. Zur Überprüfung dient das Motordiagramm, beispielsweise in dessen Version (A). Für den bekannten Strom gehen wir von der I-Achse aus nach oben bis zur Leistungs- (P-) Kurve für unsere Spannung; gfls. muß man hier "interpolieren", d.h. den Zwischenwert zwischen den Kurven für zwei benachbarte Spannungen suchen.

Wird die geforderte Leistung erreicht oder gar übertroffen, so können wir uns freuen und sind fast fertig. In diesem Fall war die anfänglich geschätzte Wirkungsgrad-Annahme für den Motor zu pessimistisch. Wird die geforderte Leistung nicht erreicht, so war diese Schätzung zu optimistisch. Es gibt dann nur 3 Möglichkeiten:

- 1.) Wir erhöhen die Spannung, d.h. die Zellenzahl des Akkus. Um wieviel das nötig ist, kann man aus dem Diagramm entnehmen. Das hat natürlich mehr oder weniger Auswirkung auf das Fluggewicht, und wenn wir ganz genau sein wollen, müssen wir nun zuerst wieder bei den Gewichtsannahmen einsteigen und die nachfolgenden Rechnungsstufen nochmals durchlaufen.
- 2.) Wir erhöhen den Strom. Dies hat kürzere Motorlaufzeit (evtl. auch einen schlechteren Motorwirkungsgrad) zur Folge, wenn wir nicht auf einen Akku mit höherer Kapazität übergehen wollen. Auch das Letztere führt wieder zu einem neuen, höheren Fluggewicht, Folgen s.o.
- 3.) Wir "leben" mit der kleineren Leistung. In diesem Fall sollte man aber wenigstens überprüfen, welche Reduzierung der ursprünglich gewünschten Flugleistungen man sich damit einhandelt.

Haben wir das Motordiagramm in der Form (B) vorliegen, müssen wir zuerst von der I-Skala links ausgehend horizontal bis zur I-Kurve gehen, und vom Schnittpunkt aus dann senkrecht zur P-Kurve. Alles andere verläuft dann wie schon beschrieben.

Im allerschlechtesten Fall kann es passieren, daß der Motor die geforderte Leistung nur bei extremen Werten für Spannung und/oder Strom erreicht. Manchmal (z.B. wenn es um nur kurzzeitig geforderte Leistung geht) kann man das tolerieren, im Regelfall aber nicht. In diesem Fall hilft nur die Verwendung eines anderen Motors. Da dieser wahrscheinlich ein höheres Gewicht hat, geht unsere Rechnung bei den Gewichtsannahmen wieder von vorne los.

Egal, welcher der angeführten Fälle nun zutrifft: Nach einigen Versuchen und Korrekturen sind wir fertig, und als letztes entnehmen wir dem Motordiagramm dann die zugehörige Drehzahl des Motors, s. die eingezeichneten Pfeile in den Diagrammen.

Mit den jetzt bekannten Werten von Motor-Abgabeleistung und -Drehzahl kann man nun den Propeller -und gfls. auch ein notwendiges Getriebe- festlegen.

Einfluß der Hauptdaten

Zum Schluß noch einige Tendenzen und Erfahrungswerte:

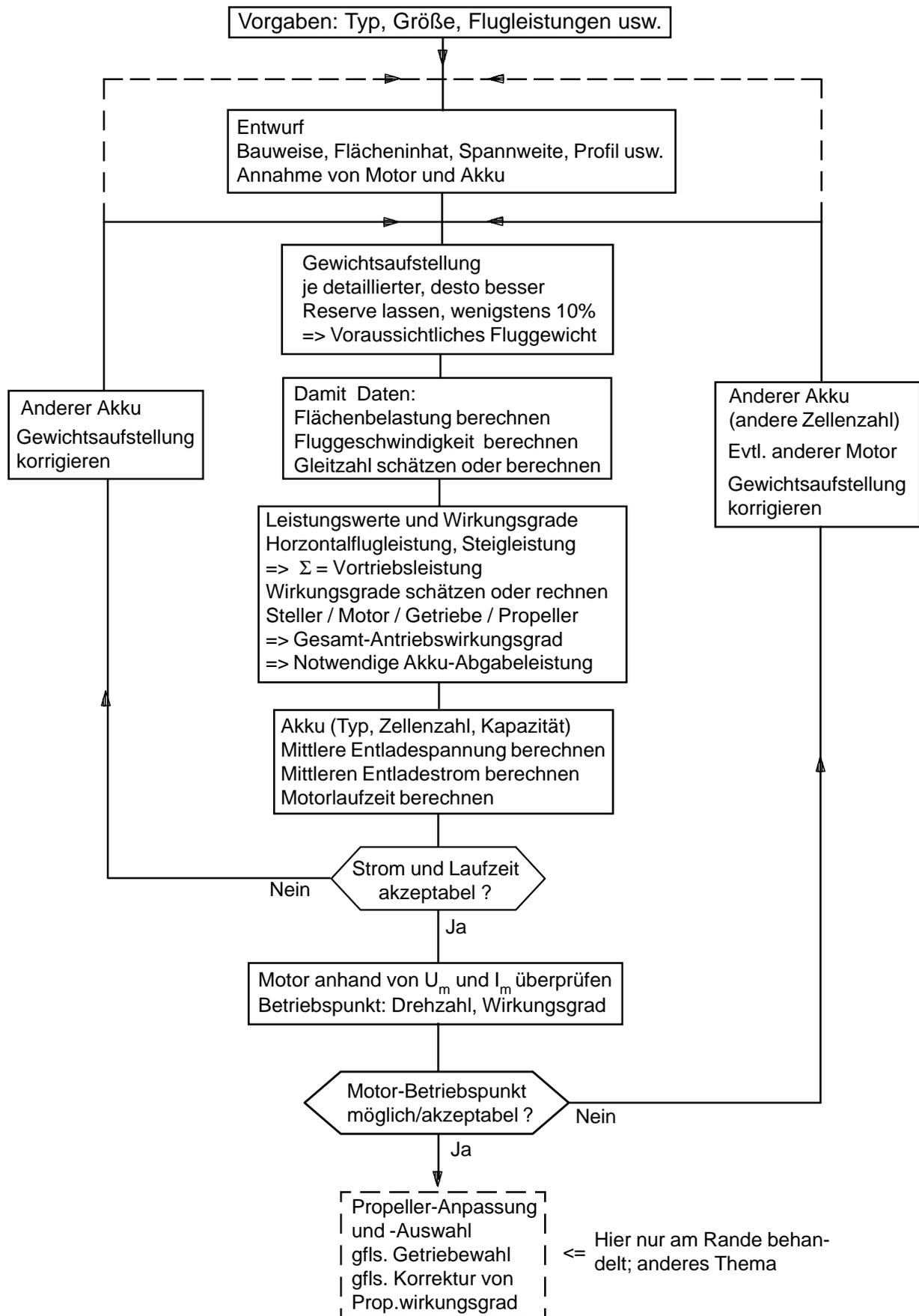
Das Fluggewicht hat (bei gegebenem Antrieb) entscheidenden Einfluß auf die Flugleistungen; es kommt in fast allen Formeln vor.

Die Flächenbelastung wirkt sich vor allem auf die Fluggeschwindigkeit aus. Indirekt beeinflusst sie damit auch den Wirkungsgrad des Propellers.

Sehr wichtig ist der Anteil des Akkus am Fluggewicht. Er soll möglichst groß sein, was andererseits auf Kosten der Festigkeit des Modells geht.

Akkuanteil am Fluggewicht:	30%	sehr gut
	20%	gut
	weniger als 10%	schlecht

II. 2 Flußdiagramm



Zum Schluß

Es wurde gezeigt, wie man den Elektroantrieb eines Flugmodells abschätzen kann, wenn bestimmte Flugleistungen gewünscht werden und die Hauptdaten des Modells bekannt sind.

Nun werden nur Wenige ein Modell und seinen Antrieb in dieser Vollständigkeit berechnen. Die hier vorgestellten Formeln und Vorgehensweisen sind aber auch in anderem Zusammenhang nützlich. So können sie selbstverständlich in anderer Reihenfolge oder auch nur teilweise angewendet werden.

Beispielsweise kann man von einem vorgegebenen Motor ausgehen und für diesen eine bestimmte Betriebsspannung und anschließend einen bestimmten Arbeitspunkt (Strom oder Drehzahl) wählen. Größe und Gewicht des Akkus ergeben sich dann aus der gewünschten Motorlaufzeit, oder umgekehrt. Danach kann man abschätzen, welche Flugleistungen nach Einbau in das Modell XX oder YY erreichbar sind.

Oder man kann ein schon samt Antrieb vorhandenes Modell nachrechnen und den Einfluß von eventuellen Änderungen studieren.

Durch "begleitendes" Rechnen kommt man meistens schneller zum Ziel als durch reines Probieren.

II. 3

Empfehlenswerte Bücher

W. Geck, **Antrieb nach Maß**, Neckar-Verlag

L. Retzbach, **Ratgeber Elektroflug**, Neckar-Verlag

O. Wennmacher, **Elektroflug-Getriebe**, Verlag f. Technik und Handwerk

Im Internet:

<http://home.t-online.de/home/wgeck/>

Homepage von W. Geck. Viele Daten und Links