

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 127/128 (1946)  
**Heft:** 25

**Artikel:** Drehzahlregelung von Flugzeug-Triebwerken  
**Autor:** Stein, Th.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-83856>

### **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:** 16.01.2026

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

## Drehzahlreglung von Flugzeug-Triebwerken

Von Dipl. Ing. TH. STEIN, Escher Wyss A.-G., Zürich

(Fortsetzung von Seite 300)

## d) Vereinfachte Beurteilung des Regelverlaufs

Das Aufzeichnen des zeitlichen Verlaufs der massgebenden Reglergrößen, vor allem der Drehzahl, erfordert zeitraubende Rechnungen. Man hat sich daher bisher mit dem Aufstellen der Stabilitätsbedingungen begnügt. Dies genügt jedoch nicht, um die praktische Brauchbarkeit einer Anordnung zu beurteilen. Da man es meist mit gedämpften Schwingungen zu tun hat, muss man wissen, wie schnell die Schwingung abklingt und wieviel Ausschläge dabei auftreten. Hier besteht die Schwierigkeit, dass theoretisch der Vorgang unendlich lang geht und unendlich viel Ausschläge auftreten. Praktisch kommt man dagegen zu einem einfachen Kriterium der Brauchbarkeit durch die Definition [13], dass ein *Regelvorgang praktisch beendet* ist, wenn vom ersten Maximum an gerechnet die Ausschläge auf  $1/10$  abgeklungen sind (Bild 4, S. 297). Bis zu diesem Zeitpunkt gerechnet, bedeutet  $T_{1/10}$  die praktische *Abklingzeit* und  $a_{1/10}$  die praktische *Zahl der Ausschläge*.

Statt den Regelverlauf für jeden Einzelfall aufzuzeichnen, kann man bei charakteristischen Gleichungen 2. Grades diese Kennwerte allgemein wie folgt berechnen:

$$w^2 + aw + b = 0 \quad (23)$$

$$w = -\frac{a}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} - b}$$

Bei gedämpften Schwingungen ist die Wurzel  $w$  imaginär und man setzt alsdann:

$$w = p + qi; \quad p = -\frac{a}{2}; \quad q = \sqrt{b - \frac{a^2}{4}} \quad (24)$$

Für eine der Variablen, z. B. für  $\varphi$  gilt nun der Ansatz:

$$\varphi = e^{pt} (c_1 \cos qt + c_2 \sin qt) \quad (25)$$

Die Periode  $T$  folgt aus:  $qt = qT = 2\pi$ , also ist die

$$\text{Periode: } T = \frac{2\pi}{q} \quad (26)$$

In der Abklingzeit  $T_{1/10}$  ist der Dämpfungsfaktor  $f_d = e^{pt}$  auf  $1/10$  seines grössten Wertes abgeklungen; alsdann ist:

$$f_d = e^{pT_{1/10}} = 1/10; \quad T_{1/10} = \frac{\ln 1/10}{p} = \frac{2,3}{-p} = \frac{4,6}{a}$$

$$\text{Abklingzeit } T_{1/10} = \frac{4,6}{a} \quad (27)$$

Da auf jede halbe Periode ein Ausschlag fällt, berechnet man die Zahl der Ausschläge zu:

$$a_{1/10} = \frac{2T_{1/10}}{T} = \frac{2 \cdot 4,6}{a} \cdot \frac{q}{2\pi}$$

$$\text{Zahl der Ausschläge: } a_{1/10} = 1,46 \frac{q}{a} \quad (28)$$

## e) Uebertouren bei Triebwerken

Bei stationären Kraftmaschinen rechnet man oft mit einer Näherungsformel für die ungedämpfte Schwingung, da man weit vom aperiodischen Gebiet entfernt ist. Bei Flugzeug-Triebwerken trifft das nicht zu. Ferner ist eindeutig der grösste Drehzahlausschlag stationärer Turbinen bei Ausfall der gesamten Last, also bei plötzlichem Uebergang von Vollast auf *Leerlauf*, kritisch. Ganz anders bei Flugzeug-Triebwerken. Es ist oft üblich, bei Teillast mit Teildrehzahlen zu arbeiten, sodass bei *Vollgas* und voller Drehzahl der Drehzahlausschlag kritisch ist. Dies besonders, wenn man, von der Norm abweichend, aus dem *Leerlauf* mit voller Drehzahl auf *Vollgas* übergeht, was bei Verstellpropellern, aber nicht bei Strahltriebwerken möglich ist. Wenn beim Schalten auf *Vollgas* — bei Verstellpropellern meist, bei Turbotriebwerken immer — von einer gegenüber der Volldrehzahl wesentlich tieferen Drehzahl ausgegangen wird, ist zunächst eine Drehzahlabweichung zu durchlaufen, die um ein Vielfaches grösser ist als der Ungleichförmigkeit  $\delta$  des Reglers entspricht. Der Regler stellt dann die konstante Maximalgeschwindigkeit des Servomotors ein, so dass in der Schlusszeit  $T_s$  eine Abweichung um das *Vollgasdrehmoment* erreicht ist.

Bei der Strahltrieburbine ist es ausserdem üblich, die Veränderung der Brennstoffzufuhr nicht dem Drehzahlregler allein zu überlassen, sondern die Brennstoffmenge auch direkt durch den

Gashebel zu verstellen, wobei der vom Drehzahlregler gesteuerte Servomotor nur eine begrenzte Korrekturverstellung vornimmt. Entsprechend der Gesamtverstellung durch Gashebel und Drehzahlregler wird dann durch den dauernd voll geöffneten Servomotor die Drehzahl gleichförmig beschleunigt, bis sie den Beharrungswert zum ersten Mal erreicht.

Je nach der Anordnung ist auch beim Verstellpropeller diese erste Phase des Regelvorganges getrennt zu berechnen, falls er bei Teillasten mit Teildrehzahlen arbeitet. Nun ist festzustellen, welche Servomotorabweichung vorhanden ist, wenn die Drehzahl zum ersten Mal den Beharrungswert durchläuft. Durch diese *relative Servomotorabweichung*  $\mu_0$  sind die «Anfangsbedingungen» für die weitere Phase gegeben, die von dem Zeitpunkt ab gerechnet wird, bei dem die Drehzahlabweichung zum ersten Mal null ist (Bild 4, S. 297).

Diese Verlegung des Zeitpunktes 0 für die Berechnung des Schwingungsvorganges vereinfacht die Formel für die Drehzahlabweichung wesentlich. Sie hat ausserdem den Vorteil, dass die Annahme einer Verstellgeschwindigkeit, die der Steueröffnung  $\sigma$  proportional ist, im Berechnungsgebiet annähernd zutrifft. Für die erste Phase wird dann mit konstanter Geschwindigkeit des Servomotors gerechnet.

Für die relativen Abweichungen  $\varphi$  und  $\mu$  gilt nach der charakteristischen Gleichung (23):

$$\varphi = e^{pt} (c_1 \cos qt + c_2 \sin qt) \quad (29)$$

$$\mu = e^{pt} (c_{1\mu} \cos qt + c_{2\mu} \sin qt) \quad (30)$$

Die Konstanten ergeben sich aus den Anfangsbedingungen zur Zeit  $t = 0$ ; wofür oben angenommen wurde:

$$\varphi = 0 \text{ und } \mu = \mu_0$$

Demzufolge sind  $c_1 = 0$  und  $c_{1\mu} = \mu_0$ , woraus folgen:

$$\varphi = e^{pt} c_2 \sin qt$$

$$\mu = e^{pt} (\mu_0 \cos qt + c_{2\mu} \sin qt) \quad (31)$$

Wie später abgeleitet wird (Formel 49), gilt für Strahltrieburbine eine analoge Formel, wie Formel (8) für  $\varphi$ , nämlich:

$$\mu = \frac{T_a}{k_{\mu}} \dot{\varphi} + \frac{e_s}{k_{\mu}} \varphi$$

Aus ihr folgt:

$$\mu = e^{pt} \left[ c_2 \frac{q T_a}{k_{\mu}} \cos qt + \frac{c_2}{k_{\mu}} (p T_a + e_s) \sin qt \right]$$

Durch Vergleich der zu  $\cos qt$  gehörigen Faktoren ergibt sich:

$$c_2 = \frac{k_{\mu} \mu_0}{q T_a}, \text{ woraus: } \varphi = e^{pt} \frac{k_{\mu} \mu_0}{q T_a} \sin qt \quad (32)$$

Der erste Maximalausschlag  $\varphi_{\max}$  entsteht nach  $1/4$  Periode, indem dann  $\sin qt = 1$  wird; der zweite Ausschlag nach  $3/4$  Perioden. Da nach Formel (26)  $T = 2\pi/q$  ist, wird:

$$\frac{T}{4} = \frac{\pi}{2q}; \quad p = -\frac{a}{2}; \quad e^{pt} = e^{-\frac{\pi a}{4q}} = e^{-0,79 \frac{a}{q}} \quad (33)$$

Für Verstellpropeller ist für  $k_{\mu}$  der Wert 1 zu setzen. Die grössten Drehzahlausschläge werden nach folgenden Gleichungen berechnet:

## a) Verstellpropeller, erster Ausschlag:

$$\varphi_{\max} = e^{-0,79 \frac{a}{q}} \frac{\mu_0}{q T_a} = f_d \frac{\mu_0}{q T_a} \quad (34)$$

## b) Verstellpropeller, zweiter Ausschlag:

$$\varphi_{\max} = e^{-2,37 \frac{a}{q}} \frac{\mu_0}{q T_a} = f_d \frac{\mu_0}{q T_a} \quad (35)$$

## c) Strahltrieburbine, erster Ausschlag:

$$\varphi_{\max} = e^{-0,79 \frac{a}{q}} \frac{k_{\mu} \mu_0}{q T_a} = f_d \frac{k_{\mu} \mu_0}{q T_a} \quad (34a)$$

## d) Strahltrieburbine, zweiter Ausschlag:

$$\varphi_{\max} = e^{-2,36 \frac{a}{q}} \frac{k_{\mu} \mu_0}{q T_a} = f_d \frac{k_{\mu} \mu_0}{q T_a} \quad (35a)$$

Der zweite Ausschlag kann bei Entlastung von Vollast auf *Leerlauf* massgebend sein, weil dann der erste Ausschlag eine Verminderung der Drehzahl herbeiführt, was nicht kritisch ist. Zur Erleichterung der Berechnung findet man auf Bild 17 die Werte für den Dämpfungsfaktor  $f_d$  zusammengestellt.

Der für die kritischen Uebertouren massgebende maximale Ausschlag ist, sobald  $\mu_0$  bekannt ist, einfach der Ausschlag der ungedämpften Schwingung (Dämpfungsfaktor  $f_d = 1$ ), multipliziert mit demjenigen Dämpfungsfaktor, der im Zeitpunkt des Auftretens dieses Maximums gilt.

#### f) Vergleich von Selbstreglung und Rückführung

Der Regelvorgang ist umso schneller beendet und die Zahl der Ausschläge ist umso geringer, je grösser in den Gleichungen (27) und (28) der Wert  $a$  ist. Der Faktor von  $w$  in den Gleichungen (20) und (21) soll also möglichst gross sein:

$$\frac{e_s}{T_a} + \frac{r}{T_s} \gg (36)$$

Selbstreglung Rückführung

Die Wirkung der Selbstreglung überwiegt die der Rückführung, wenn:

$$e_s T_s / T_a > r \quad (37)$$

worin bei starrer Rückführung  $r \sim 1$  ist. Bei einer Anlaufzeit  $T_a = 1,6$  s sind nach Bild 15 im langsamen Flug die Schlusszeiten  $T_s$  viel grösser, also ist  $T_s / T_a > 1$ . Im Schnellflug nimmt  $e_s$  nach Bild 11 ganz bedeutende Werte an. Solange man die Verstellgeschwindigkeit nicht steigert, also die Schlusszeit  $T_s$  nicht kleiner macht, kann  $e_s T_s / T_a$  viel grösser als 1, also die Selbstreglung der Rückführung weit überlegen sein. Muss man aber bei steigenden Anforderungen eine Rückführung verwenden, so ist sie nach Gleichung (36) nur wirksam bei starker Verkleinerung der Schlusszeit. Damit schwächt man aber die Selbstreglung. Man kann also nur entweder durch langsame Verstellung die Selbstreglung oder durch schnelle Verstellung die Rückführung in ihrer Wirkung steigern.

#### g) Normaler Leistungsflug

Da der Regler ohne Rückführung konstruktiv am einfachsten zu bauen ist, weil man keinerlei Bewegungsübertragung vom Servomotor auf den Regler vorzusehen hat, war man nach diesen Erkenntnissen bei der Ausbildung des Escher Wyss Reglers bestrebt, im Regulierbetrieb zu grosse Verstellgeschwindigkeiten zu vermeiden. Dagegen wurden grösste Verstellgeschwindigkeiten (bis 50 %/s) für die Schaltung in die Bremsstellung verwendet [2]. Bei dieser Entwicklung war es wichtig, durch die abgeleiteten Beziehungen feststellen zu können, wann eine Rückführung vermeidbar ist und durch welche andere Mittel der Regelvorgang verbessert werden kann. Auch im Leerlauf, bei dem auf anderen Gebieten Regler ohne Rückführung versagen, genügt hier die Selbstreglung, weil bei kleinen Flugeschwindigkeiten (unter etwa 300 km/h) der Propeller als Festpropeller ohne Regelung arbeitet. Wenn es nur darauf ankäme, die Abklingzeit  $T_{1/10}$  und die Zahl der Ausschläge  $a_{1/10}$  herabzusetzen, würde man keine Rückführung brauchen, sondern einfach mit mässigen Verstellgeschwindigkeiten arbeiten (Bild 19). Dagegen kann die Rückführung ein Mittel sein, die Uebertouren  $\varphi_{\max}$  herabzusetzen.

In Bild 19 ist der extreme Fall berechnet, in dem aus dem Leerlauf und voller Drehzahl plötzlich Vollgas einsetzt. Bild 18 zeigt zunächst, dass der kritische Punkt, der zu untersuchen ist, bei der tiefsten automatisch geregelten Geschwindigkeit liegt, also hier bei 300 km/h. Da bei noch kleineren Flugeschwindigkeiten ein Anschlag den Propeller daran hindert, den zugehörigen flacheren Flügelwinkel einzustellen, entspricht beim Uebergang auf Vollgas die Abweichung  $\mu_0$  vom Vollgas-Beharrungs-

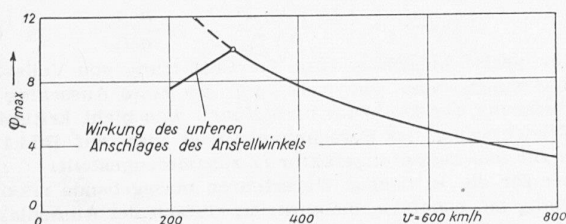


Bild 17. Diagramm zur Bestimmung des Dämpfungsfaktors  $f_d$  in den Formeln der Uebertouren. Mit  $f_d$  sind die Formeln der ungedämpften Schwingungen zu multiplizieren

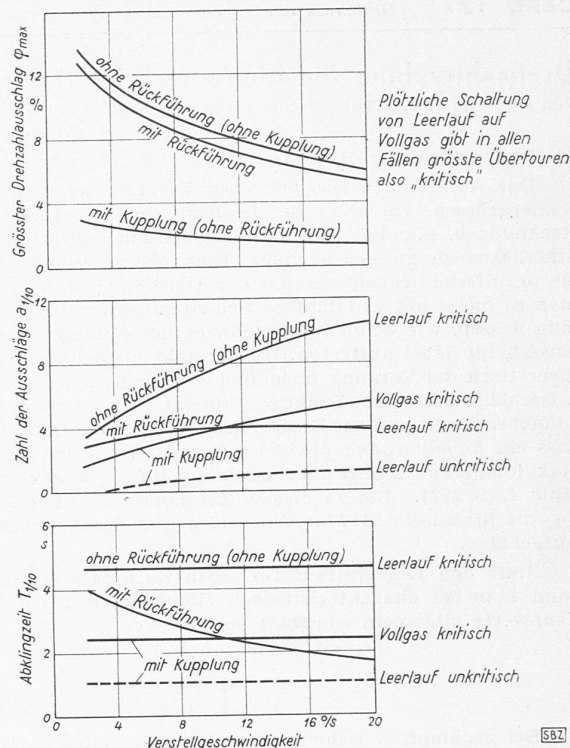


Bild 19. Herabsetzung der Uebertouren eines Verstellpropellers durch gesteigerte Verstellgeschwindigkeit mit Rückführung oder mit Kupplung zwischen Gashebel und Drehzahlverstellung. Mit Kupplung entstehen kleinere und weniger Ausschläge als mit Rückführung (berechnet für 300 km/h = kleinste Flugeschwindigkeit mit Regelung im Leerlauf)

wert nicht mehr der Vollast-Abweichung  $\mu = 1$ , weshalb der maximale Ausschlag unter 300 km/h kleiner ausfällt. Ein Senken der Uebertouren  $\varphi_{\max}$  entsteht nach Bild 19 durch Steigern der Verstellgeschwindigkeit.

Die Kurven für  $\varphi_{\max}$  auf Bild 19 sind mit der bei Vollast auftretenden Selbstregelungskonstanten berechnet worden. Dagegen ist für die zulässige Zahl und Dauer der Ausschläge die im Leerlauf geltende schwächere Selbstreglung kritisch und daher massgebend.

Nun ist das Senken der Uebertouren, das bei gleicher Verstellgeschwindigkeit an sich durch eine Rückführung entsteht, nicht von Bedeutung (Bild 19). Wichtig ist aber der Umstand, dass die Rückführung eine die Uebertouren senkende Erhöhung der Verstellgeschwindigkeit gestattet, während der Regler ohne Rückführung die Zahl der Ausschläge  $a_{1/10}$  völlig unzulässig anwachsen liesse (Bild 19, Mitte). Beim Regler mit Rückführung sinkt mit steigender Verstellgeschwindigkeit die Zahl der Ausschläge wieder, statt dass sie immer weiter anwächst. Auch kommt der Regelvorgang, wie die Kurven für  $T_{1/10}$  auf Bild 19 zeigen, viel schneller zum Abschluss.

#### h) Beschleunigte Rückführung

Die Einführung eines grossen Beschleunigungsgrades,  $r$  in Formel (22), hat den Vorteil stärkerer Dämpfung, erzeugt aber eine zusätzliche Verschleppung. Wie nachgewiesen wurde [13], entsteht hierdurch bei Dampfdruckreglern ein ganz bedeutender Vorteil, dagegen nicht bei stationären Kraftmaschinen. Um festzustellen, ob beim Flugregler hiermit eine weitere Verbesserung möglich ist, muss man die Gleichung (22) auflösen und erhält die auf Bild 21 eingezeichnete Kurve. Darnach bringt zwar die beschleunigte Rückführung die Schwingungen zum Verschwinden; sie bewirkt aber ausser einer Verschleppung eine bedeutende Steigerung der Uebertouren, die den Sinn einer Rückführung aufheben kann.

Im vorliegenden Fall geht der ganze Vorteil, den man durch eine Rückführung erreicht, wieder verloren. Bis zu einer Verstellgeschwindigkeit von 5 %/s ist es ohne weiteres möglich, ohne Rückführung zu arbeiten. Die Rückführung senkt nach Bild 19 die Uebertouren von 11 auf 7,5 %, indem mit ihr die Verstellgeschwindigkeit von 5 %/s auf 10 %/s erhöht werden kann, ohne dass unzulässige Pendelungen auftreten. Bei der beschleunigten Rückführung steigen die Uebertouren wieder auf 15 % an (Bild 21), was einen stärkeren Rückschlag bedeutet als das

Bild 18. Der grösste (kritische) Drehzahlausschlag entsteht bei Schalten auf Vollgas bei der kleinsten Flugeschwindigkeit, bei der noch im Leerlauf geregelt wird (hier 300 km/h)



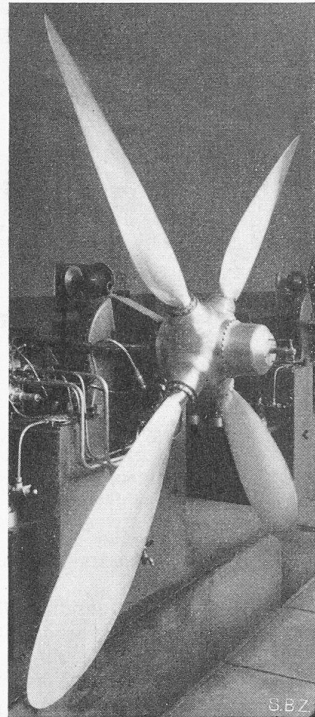
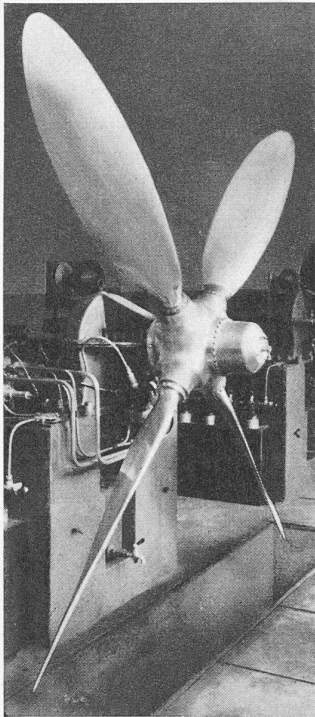


Bild 20a. Leistungsstellung      Bild 20b. Bremsstellung des Escher Wyss Propellers. In der Bremsstellung ist nicht mehr die abgerundete Eintrittskante, sondern die scharfe Flügel-Austrittskante nach vorn gerichtet (Propellerdrehung wie Uhrzeiger)

Arbeiten mit einem Regler ohne Rückführung und nur 2°/s Verstellgeschwindigkeit (siehe Bild 19), der rechnerisch etwa 14 % Uebertouren aufweist.

#### i) Kupplung von Drehzahlverstellung und Gashebel

Eine ganz bedeutende Senkung der Uebertouren erreicht man dagegen ohne Rückführung und mit mässigen Verstellgeschwindigkeiten, wenn man durch den Gashebel bei Teillasten eine tiefere Beharrungsdrehzahl einstellen lässt. Dies geschieht beim Escher Wyss Verstellpropeller konsequent, wie *Von der Mühl* [3] auseinandersetzt, durch einen kombinierten Bedienungshebel, wodurch gleichzeitig der Pilot weitgehend entlastet wird. Um hierfür den maximalen Drehzalaussschlag  $\varphi_{\max}$  berechnen zu können, ist zunächst festzustellen, welchen Wert die Servomotorabweichung  $\mu_0$  annimmt, nachdem in der ersten Regulierphase die Drehzahlabweichung  $\varphi$  zum ersten Mal null geworden ist (Bild 22). Im durchgerechneten Beispiel hat der Verstellpropeller bei einem Drehzahlfaktor von  $z_n = 0,6$  und bei 300 km/h im Leerlauf einen Anstellwinkel von  $31^\circ$ , statt von nur  $17,5^\circ$  bei voller Drehzahl. Er ist höher als der Anstellwinkel von  $29^\circ$  bei Vollgas und Vollandrehzahl, der nach Schalten auf Vollgas durch den Regler eingestellt wird. Im Vergleich zwischen Vollgas und Leerlauf von  $\Delta\alpha_{\max} = 29 - 17,5 = 11,5^\circ$  hat also die relative Abweichung um  $31 - 29 = 2^\circ$  den Wert  $\mu = 2 : 11,5 \approx 0,175$ . Der Drehzahlfaktor ist vom Leerlauf her 0,6, gegenüber 1 bei Vollgasbeharrung, also ist im Schalt Augenblick (d. h. zur Zeit  $t = 0$ )  $\varphi = -0,4$  (Bild 22). In der ersten Regulierphase geht die Drehzahlabweichung  $\varphi$  zunächst auf 0 und der Servomotor stellt mit voller Geschwindigkeit auf kleinem Verstellwinkel, da bei der grossen Drehzahlabweichung der Steuerschieber voll geöffnet ist. Während er in der Schlusszeit  $T_s$  um den Vollgaswinkel ( $\Delta\alpha_{\max}$ ,  $\Delta\mu = 1$ ) verstellen würde, ist im Zeitabschnitt  $\Delta t$

$$\Delta\mu = \frac{\Delta t}{T_s} \quad (38)$$

Für die Beschleunigung gilt Gleichung (8)

$$T_a \dot{\varphi} = -e_s \varphi - \mu \quad (39)$$

Da in der ersten Hälfte der Regulierphase  $\varphi$  negativ und  $\mu$  positiv ist, wirken sich Selbstreglung und Reguliervorstellung entgegen bis  $\mu$  null wird; von da ab unterstützen sie sich. Da ausserdem mit steigendem Drehzahlfaktor nach Bild 15  $T_s$  abnimmt, ist eine Differenzrechnung zweckmässig für eine Anzahl Zeitabschnitte  $\Delta t$  von z. B. 0,2 s, indem man setzt:

$$T_a \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = -e_s \varphi - \mu; \quad \Delta\varphi = -\frac{\Delta t}{T_a} (e_s \varphi + \mu) \quad (40)$$

Durch Berechnung von  $\Delta\varphi$  und  $\Delta\mu$  wird punktweise der Verlauf von  $\varphi$  und  $\mu$  festgestellt und  $\mu_0$  in Formel (34) einge-

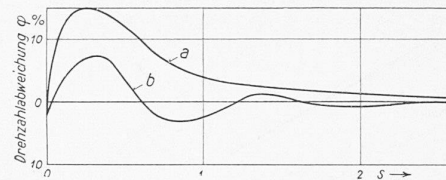


Bild 21. Beschleunigte Rückführung a bringt aperiodischen Verlauf, aber viel höhere Uebertouren, als die starre Rückführung b ( $v = 300 \text{ km/h}$ , Verstellgeschwindigkeit  $10^\circ/\text{s}$ )

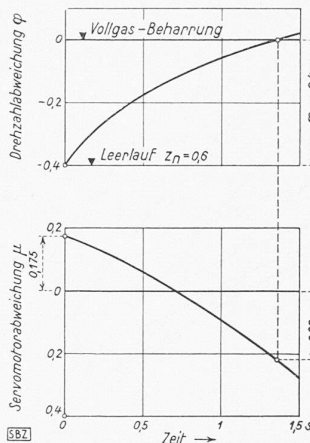


Bild 22. Ermittlung der ersten Regulierphase bei Kupplung Gashebel-Drehzahlverstellung

setzt.  $\mu_0 = 0,22$  bedeutet, dass hier der Drehzalaussschlag auf 2 % des Wertes ohne Kupplung sinkt. Aus Bild 19 geht hervor, dass mit Kupplung schon bei mässigen Verstellgeschwindigkeiten viel kleinere Uebertouren entstehen, als bei noch so grossen Verstellgeschwindigkeiten mit Rückführung ohne Kupplung.

Dabei ist aber auch mit Kupplung zur weiteren Senkung der Uebertouren eine Steigerung der Verstellgeschwindigkeit bis  $10^\circ/\text{s}$  zulässig, bevor mehr Ausschläge als bei ungekuppelten Reglern mit Rückführung entstehen. Durch die bei Teildrehzahlen gesteigerte Selbstreglung arbeitet nämlich der Regler im Leerlauf praktisch aperiodisch ( $a_{10} \sim 0$  bis 1, Bild

19). Hier ist also nur noch der bei Vollast geltende Selbstreglungsfaktor massgebend, der bei Vollandrehzahl 3 ist statt 1,6 im Leerlauf, wo ohne Kupplung die Zahl der Ausschläge kritisch ist (Bild 11, 300 km/h).

Für den normalen Leistungsflug ist deshalb zur Senkung der Uebertouren eine Kupplung besser, als eine Rückführung.

#### k) Drehzahlreglung bei Landeabbremsung

Die Wirkung der Landeabbremsung lässt sich gegenüber fester Flügelstellung steigern, indem man die Flügelstellung auf konstante Drehzahl regelt. Der Regler muss dabei aber umgekehrt auf die Flügelverstellung einwirken als beim Leistungsflug (Bild 23), damit bei steigender Drehzahl, also bei Momentenüberschuss des Motors, die Flügel steiler gestellt werden, wodurch das widerstehende Moment des Propellers anwächst und die Drehzahl wieder auf den Sollwert absenkt. An den mathematischen Ableitungen ändert sich dadurch nichts. Der Anstellwinkel  $\alpha$  wird in beiden Fällen von der Flachlage aus anwachsend als positiv gemessen und er wirkt in beiden Fällen auf Vergrösserung des Drehmomentes. So ist auch die Drehzahländerung, die über den Regler ein Anwachsen des Winkels  $\alpha$  bewirkt, in beiden Fällen als positiv einzusetzen. Alle abgeleiteten Beziehungen behalten also ihre Gültigkeit.

Solange praktisch nur ein Regeln auf volle Bremsleistung und konstante Drehzahl verlangt wird, genügt es, die Vollgaswerte zu untersuchen. Man erkennt aus dem Verlauf der  $k_d$ -Linien im Bereich negativer Anstellwinkel (Bild 24, gestrichelte Linien), dass sie mit steigendem  $\lambda$  wachsen, statt wie beim Leistungsflug abzufallen (ausgezogene Linien). Deshalb wird für Vollgas nach Formel (9) ( $z = 1$ ,  $z_n = 1$ ) die Selbstreglungskonstante für den Leistungsbereich  $e_s > 2$ , für den Bremsbereich  $e_s < 2$ .

Die Selbstreglung ist im Bremsbereich viel schwächer als beim Leistungsflug, weil der Fahrwind die Selbstreglung nicht unterstützt, sondern ihr entgegenwirkt. Dies geht aber im auf Bild 25 untersuchten Beispiel nicht so weit, dass die Selbstreglung ganz aufgehoben oder gar bei

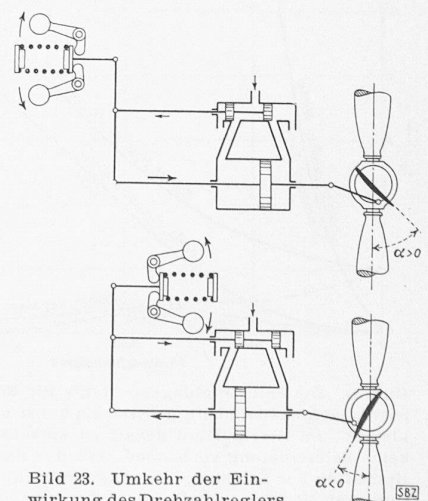


Bild 23. Umkehr der Einwirkung des Drehzahlreglers bei Reglung in der Bremsstellung

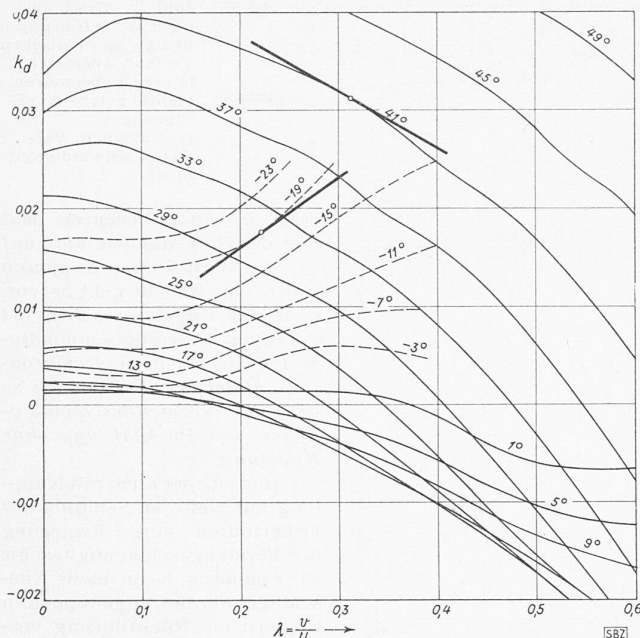


Bild 24. Die für die Selbstregulationskonstante massgebende Tangente der  $k_d$ -Linien fällt bei positiven Anstellwinkeln (Leistungsflug) mit steigendem  $\lambda$  ab, was die Selbstreglung stärkt. Dagegen steigt die Tangente bei negativen Anstellwinkeln (Bremsung) an, wodurch die Selbstreglung schwächer wird, als beim Leistungsflug

Einführung einer Rückführung auch diese unwirksam gemacht wird.

Durch die aufgestellten Beziehungen lässt sich im Einzelfall nachrechnen, ob bei der schwächeren Selbstreglung eine Rückführung notwendig ist oder nicht. Dabei ist es vom dynamischen Standpunkt aus zulässig, das Anwendungsgebiet des Reglers ohne Rückführung zu erweitern, indem man *mässige Verstellgeschwindigkeiten* vorsieht. Auch kann ein Anschlag den maximalen Verstellwinkel begrenzen.

#### 1) Bremsen im Flug

Ganz anders verhält sich die Drehzahlreglung bei Verwendung des Propellers als Bremse im Flug. Der Regler muss hier auch bei Teillasten arbeiten. Gegen den Leerlauf hin ist aber, wie Bild 25 zeigt, die Selbstreglung noch kleiner als bei Vollgas. Zudem besteht die Gefahr, dass im Bremsflug mit Vollgas der Motor aussetzt. Um ein den Motor zerstörendes Rückwärtsdrehen durch Windmühlenwirkung zu vermeiden, braucht es, wie Roth [2] nachweist, sehr hohe Verstellgeschwindigkeiten, besonders beim schnellen Flug. Wenn der Regler dieses Rückwärtsdrehen beim Aussetzen des Motors automatisch verhindern soll, muss er mit grosser Verstellgeschwindigkeit arbeiten, was die Wirkung der Selbstreglung schwächt. Die Selbstreglung ist aber gemäss Bild 25 an sich schon schwach. Sie vermindert sich

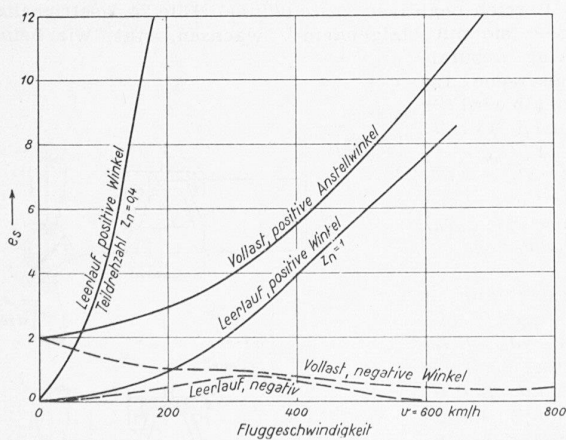


Bild 25. Die Selbstregulationskonstante für Vollast ist bei positiven Anstellwinkeln grösser als 2, bei negativen kleiner. Im Leerlauf mit negativen Anstellwinkeln ist fast keine Selbstreglung vorhanden, weil der Fahrwind beim Bremsflug der Selbstreglung entgegenwirkt. Beim Bremsflug braucht man deshalb Rückführungen oder Beschleunigungsregler

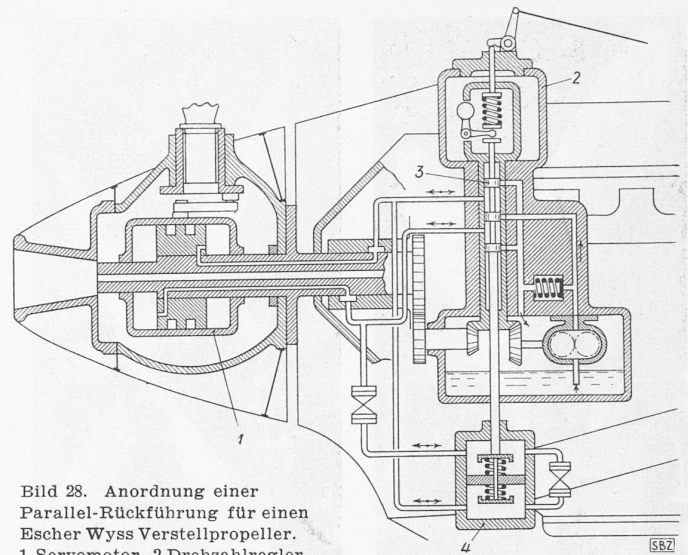


Bild 28. Anordnung einer Parallel-Rückführung für einen Escher Wyss Verstellpropeller. 1 Servomotor, 2 Drehzahlregler, 3 Steuerschieber, 4 Rückführkatarakt

durch grosse Verstellgeschwindigkeiten weiter, während die Wirkung der Rückführung zunimmt. Deshalb wird es in vielen Fällen, die sich durch Rechnung feststellen lassen, zweckmässig sein, mit Rückführung zu arbeiten oder mit der in den U. S. A. bevorzugten Beschleunigungsreglung [5].

#### m) Neues Rückführprinzip

Der Vorteil eines zusätzlichen Beschleunigungsreglers besteht darin, dass die Beschleunigung, also die Drehzahlzunahme pro Zeiteinheit eine Grösse ist, die man am Regler selbst messen kann. Es ist also keine Verbindung zum Servomotor notwendig, wie das im Schema Bild 12 angegeben ist. Dagegen ist ein neues Empfangsorgan zu schaffen, das die Beschleunigung misst. Statt dessen wurde auch vorgeschlagen, die Geschwindigkeit des Servomotors hydraulisch auf die rückführende Oelbremse zu übertragen, indem in den Verbindungsleitungen zwischen Servomotor und Steuerschieber ein Druckabfall ausgenutzt wird. Dieser Druckabfall wirkt nun aber einer Erhöhung der Verstellgeschwindigkeit entgegen, die man gerade bei rückgeführten Reglern anstrebt, um den Regelvorgang zu verbessern. Es ist daher wichtig, dass man ohne verzögernden Druckverlust auskommt, was auf Grund der nachfolgenden dynamischen Überlegungen angestrebt wird.

Um auf einen Regelvorgang stabilisierend einzuwirken, kommt es nur darauf an, dass die Einflussgrössen im richtigen Zeitdifferential einwirken. Deshalb können z. B. Rückführung und Selbstreglung, also ganz verschiedene Einflüsse den gleichen Stabilisierungseffekt haben. So war es aus dieser Erkenntnis bei Feuerungsreglern möglich, die Katarakte der Servomotoren durch eine kleine Feder an der Messmembran zu ersetzen [8], [9]. Da nämlich die Servomotorgeschwindigkeit der von der Membran gesteuerten Druckabweichung proportional ist, hat eine einfache Membranfeder, deren Kraft der Druckabweichung proportional ist, die gleiche Wirkung wie ein umfangreicher Katarakt des Servomotors, dessen Kräfte zur Servomotorgeschwindigkeit proportional sind.

Entsprechend lässt sich beim Verstellpropeller die Bewegungsgeschwindigkeit des Servomotors 1 (Bild 26) auf den Katarakt 2 statt durch ein Gestänge durch die zur Servomotorgeschwindigkeit proportionale Steueröffnung  $\sigma$  auf den Katarakt übertragen. Der Katarakt ist hierzu einfach an die Leitungen zwischen Steuerschieber und Servomotor anzuschliessen.

Für die übliche Anordnung nach Bild 26 gelten die Formeln (19) und (14). An Stelle der Steuerstange 3, deren Wirkung durch das Glied  $r T_i \mu$  in Gleichung (19) ausgedrückt wird, tritt — unabhängig von der Stellung des Kataraktes, also unabhängig von der Grösse der Federkraft — der den Hauptservomotor steuernde Druckunterschied, der der Steueröffnung  $\sigma$  proportional

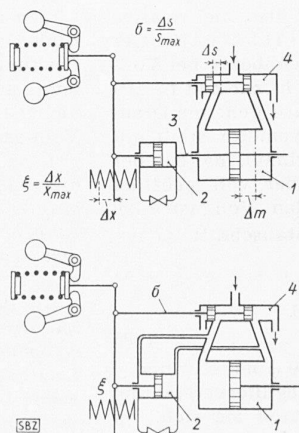


Bild 26 (oben). Uebliche Temporär-Rückführung Bild 27 (unten). Neues Prinzip der Parallel-Rückführung ohne Verbindung zwischen Servomotor 1 u. Katarakt 2, ohne Messdruckabfall zwischen Steuer-schieber 4 und Servomotor 1



angenommen werden kann (Bild 26). Der Katarakt-Zylinder ruht in diesem Fall fest; seine Dimensionen und die Drücke werden so angenommen, dass bei voll offenem Steuerschieber ( $\sigma = 1$ ) entgegen der Feder an der Rückführstange ein Ausschlag um  $x_{\max}$ , also  $\frac{x}{x_{\max}} = 1$  erzeugt wird. Bei  $\xi = 0$ , d. h. Ruhe, ist dann  $\xi = 0$ . Das ist der Fall, wenn:

$$\xi = \sigma - T_i \xi = T_s \dot{\mu} - T_i \xi = T_i \left( \frac{T_s}{T_i} \dot{\mu} - \xi \right)$$

Durch Vergleich mit Formel (19) erkennt man, dass die Anord-

nungen nach den Bildern 26 und 27 einander gleichwertig sind, wobei die Rückführkonstante  $r = T_s/T_i$  ist. Da hier die Bewegung des Katarakts zur Bewegung des Servomotors parallel geschaltet ist, wird die Anordnung *Parallelrückführung* genannt. Bild 28 zeigt ein schematisches Ausführungsbeispiel, bei dem zwischen Steuerschieber 3 und die Kammern des Servomotors 1 nirgends Messwiderstände eingeschaltet sind, sodass keine Verlingerung der Verstellgeschwindigkeit eintritt.

(Schluss folgt)

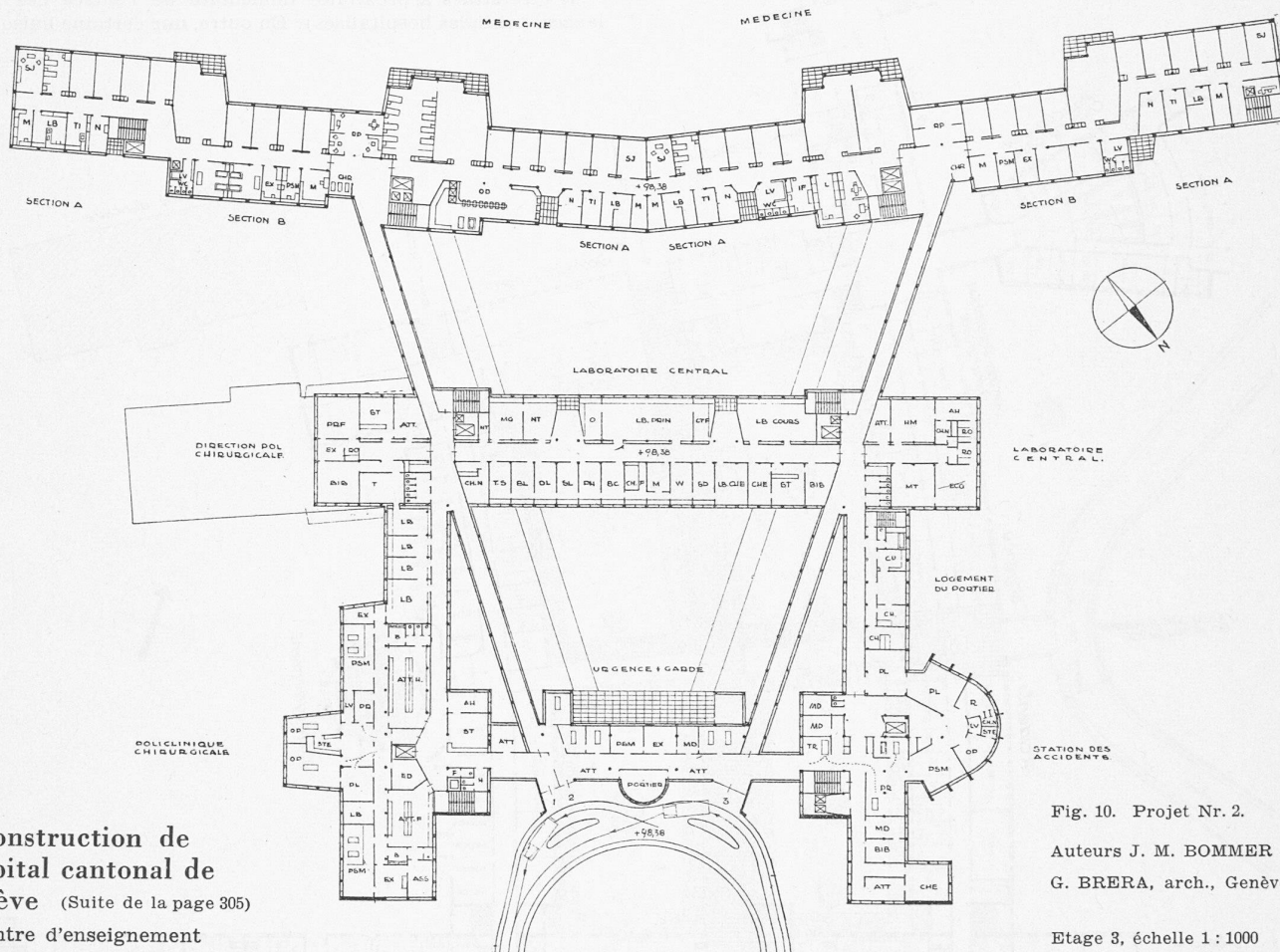


Fig. 10. Projet Nr. 2.

Auteurs J. M. BOMMER et  
G. BRERA, arch., Genève

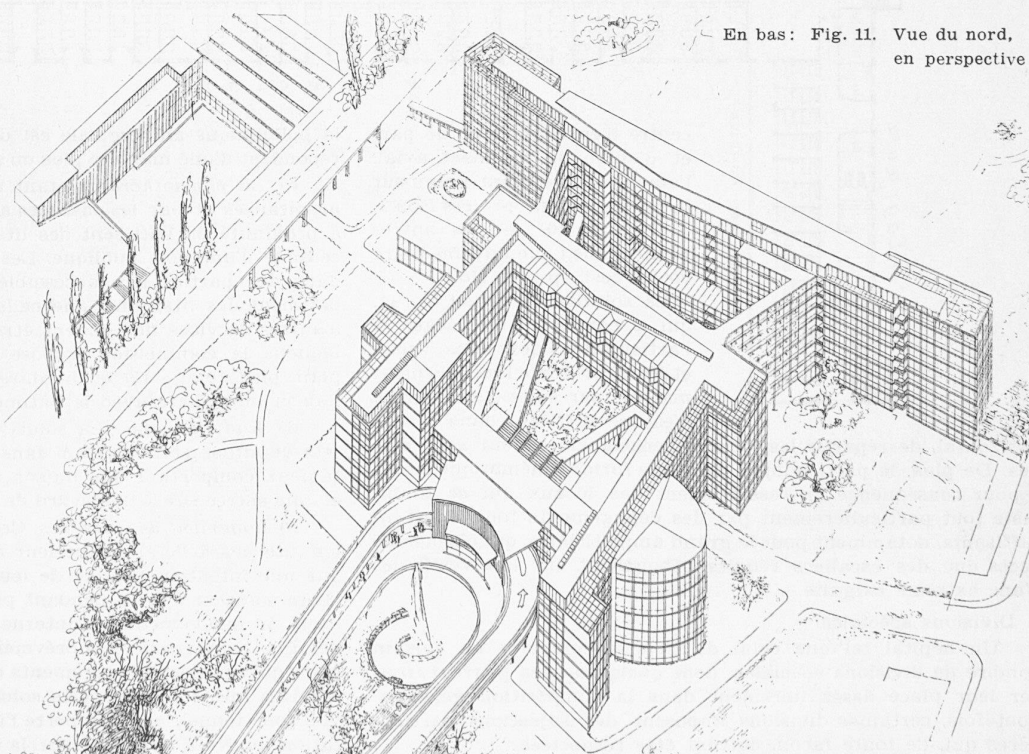
Etage 3, échelle 1:1000

## Reconstruction de l'hôpital cantonal de Genève (Suite de la page 305)

### 3. Centre d'enseignement

La création d'un centre d'enseignement est un élément essentiel d'un hôpital universitaire tel que celui de Genève. Pour remplir utilement sa fonction, ce centre doit répondre aux conditions suivantes: pouvoir être atteint dès l'entrée par les étudiants venant du dehors sans qu'ils aient à parcourir les couloirs intérieurs des services hospitaliers; être en bonne liaison avec le bâtiment des lits, tant pour la visite des malades par les étudiants dans les dortoirs que pour l'amenée des malades aux amphithéâtres. En outre, ses locaux doivent être groupés sur un petit nombre d'étages et non dispersés dans les divers corps des bâtiments.

Se fondant sur ces considérations, la commission estime que la meilleure solution consiste à prévoir le centre d'enseignement avec ses divers locaux au milieu de l'hôpital, sur l'étage A, sauf le grand amphithéâtre (médecine et chirurgie) sur les étages B et C. Elle propose en outre de répartir les locaux du



En bas: Fig. 11. Vue du nord, en perspective