

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 127/128 (1946)
Heft: 26

Artikel: Drehzahlregelung von Flugzeug-Triebwerken
Autor: Stein, Th.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-83861>

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>

ersetzt N durch $\frac{M}{e}$, so folgt als neue Gleichung anstelle von (7)

$$\mu_T + \frac{h}{e} m_{eT} = \frac{100}{\gamma} \left(1 - \frac{\delta}{2 \cdot \xi}\right) + 50 \frac{\xi}{\gamma} \beta \quad \dots \quad (7a)$$

Der Vergleich mit (7) zeigt sofort, dass auch das $\mu_T - \beta$ -Nomogramm bestehen bleibt, wenn man sich auf der μ_T -Axe den ideellen Armierungsgehalt

$$\mu_{Tid} = \mu_T + \frac{h}{e} m_{eT} \quad \dots \quad (18)$$

aufgetragen denkt. Mit Gl. (18) lässt sich die wichtigste Aufgabe, die *Bemessung der Armierung* bei gegebenen Abmessungen und vorgeschriebenem σ_a , erledigen wie bei reiner Biegung. Es ist nur zu beachten, dass sich aus dem Nomogramm der ideelle Armierungsgehalt ergibt. Der richtige Armierungsgehalt beträgt nach (18)

$$\mu_T = \mu_{Tid} - \frac{h}{e} m_{eT}$$

Natürlich könnte die Beziehung (18) auch direkt nomographisch dargestellt werden, was besonders bei kleinen Exzentrizitäten vorteilhaft wäre, da in diesen Fällen mit der obigen Berechnung μ_T als stark fehlerhafte, kleine Differenz resultiert. Praktisch kommen jedoch kleine Exzentrizitäten bei Plattenbalken kaum vor, sodass für ein spezielles Nomogramm kein Bedürfnis besteht.

Beim *Spannungsnachweis* muss man in (18) das zunächst noch gar nicht bekannte m_{eT} schätzen. Einen brauchbaren Ausgangswert gewinnt man mit dem Näherungsausdruck (17) für den Hebelarm η . Für reine Biegung gilt nämlich

$$m_{eT} = \eta \mu_{Tid}$$

Mit (18) zusammen ergibt sich dann:

$$m_{eT} = \frac{\mu_T}{\frac{1}{\eta} - \frac{h}{e}}$$

oder auch direkt:

$$\mu_{Tid} = \frac{\mu_T}{1 - \frac{h}{e} \eta}$$

Die Spannungsberechnung verläuft nun wie bei reiner Biegung. Zur Kontrolle müssen der berechnete und der geschätzte Wert von m_{eT} zusammenfallen; bei grösserer Abweichung wird die Rechnung mit dem verbesserten m_{eT} wiederholt. In fast allen Fällen erübrigt sich dieser zweite Rechnungsgang.

Drehzahlreglung von Flugzeug-Triebwerken

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

4. Strahl-Turbine

(Schluss von Seite 313)

a) Zweck des Drehzahlreglers

Bei Strahlturbinen ist es im Gegensatz zum Verstellpropeller nicht möglich, durch Änderung des Anstellwinkels jeder Leistung eine frei wählbare Drehzahl zuzuordnen. Vielmehr wird hier meist, wie Bild 3 (S. 295) zeigt, nur die Brennstoffmenge durch den Regler beeinflusst und die Drehzahl stellt sich selbsttätig ein. Hingegen ist der Drehzahlregler, abgesehen von seiner Aufgabe Uebertouren zu vermeiden, ein brauchbares Mass der Leistung. Hierzu genügt wegen den stark verschiedenen Flugbedingungen die Drosselstellung des Gashebels allein nicht. Neben einfachen Grenzreglern für die maximale Drehzahl (Bild 31) werden deshalb auch Drehzahlregler komplizierter Bauart mit Isodrom-rückführung gebaut (Bild 32). Sie haben die Aufgabe, im oberen Leistungsgebiet einer bestimmten Gashebelstellung eine bestimmte Drehzahl isodrom, also ohne Drehzahl-Ungleichförmigkeit zuzuordnen, wonach sich die zugehörige Leistung selbsttätig einstellt.

Aber auch als Grenzregler (Bild 31) verwendet, genügt es nicht, wenn der Regler nur ein Organ steuert, das bei Überschreiten einer bestimmten Drehzahl wie ein Schnellschluss die Betriebsmittelzufuhr einfach abschliesst. Sobald die Drehzahlgrenze erreicht ist, muss vielmehr auch hier der Regler die Strahlenturbine so beherrschen, dass die Drehzahlauflässchläge zulässig bleiben und dass sie ohne störende Pendelung schnell genug abklingen. Die nachfolgende Ableitung der dynamischen Beziehungen soll dazu dienen, im Einzelfall vorausberechnen zu können, wie die Reglerkonstanten am zweckmässigsten zu wählen sind.

b) Gleichung des Regelvorganges

Regler für den Barometerstand, d. h. für die Höhenlage oder auch für die Fluggeschwindigkeit leiten im Vergleich zur Drehzahlreglung so langsame und sich stetig ändernde Regelvorgänge ein, dass ihre Rückwirkung auf die Drehzahlreglung vernachlässigt wird. Ebenso bleibt die Änderung der Fluggeschwindigkeit selbst unberücksichtigt, die im Verlauf des Regelvorganges

eintritt. Ferner werden hier nur die Beziehungen für Vollast abgeleitet, da die Drehzahlreglung meist nur in dieser Gegend verwendet wird.

Wenn M_T das Drehmoment der Turbine und M_C das des Kompressors ist, wird das beschleunigende Moment M nach dem

$$\text{Drallsatz: } M = M_T - M_C = \Theta \frac{d\omega}{dt} \quad \dots \quad (41)$$

Rechnet man mit den Abweichungen ΔM und $\Delta \omega$ von den Beharrungswerten M_0 und ω_0 und berücksichtigt, dass $\omega = \omega_0 + \Delta \omega$ also $d\omega = d(\Delta \omega)$ so wird:

$$\Delta M = \Theta \frac{d\omega}{dt}$$

Für das Vollgasdrehmoment M_{max} und die Anlaufzeit T_a gilt

$$M_{max} = \Theta \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{max} = \Theta \frac{\omega_{0max}}{T_a}$$

$$\frac{\Delta M}{M_{max}} = \frac{d\omega}{dt} \frac{T_a}{\omega_{0max}} = \frac{d\Delta n}{dt} \frac{T_a}{n_{0max}}$$

Hieraus folgt mit $\varphi = \Delta n / n_{0max}$ die

$$\text{Beschleunigungsgleichung: } \frac{\Delta M}{M_{max}} = T_a \varphi \quad \dots \quad (42)$$

$$\text{Anlaufzeit: } T_a = \frac{\Theta \omega_{0max}}{M_{max}} \quad \text{Grössenordnung: 0,1 bis 2s}$$

ΔM ist die Abweichung des Drehmomentes M von der Beharrungslage für das Gesamttaggregat Turbine-Kompressor. Die Beharrungsgröße des Drehmomentes ist beim Strahlantrieb immer 0, da nur Strahlenergie, aber keine mechanische Leistung vom Gesamttaggregat Turbine-Kompressor nach aussen abgegeben wird. M ist abhängig von der Brennstoffmenge, die der Servomotorstellung m (Bild 3) proportional angenommen wird. Ausser dieser Abhängigkeit von der automatischen Regelung hängt M selbsttätig von der Drehzahl n ab; es ist also:

$$M = f(n, m) \quad \dots \quad (43)$$

$$\Delta M = \frac{\partial M}{\partial n} \Delta n + \frac{\partial M}{\partial m} \Delta m \quad \dots \quad (44)$$

Als Kennzahlen für das Mass der Einwirkung von Drehzahl und Servomotorstellung (Brennstoffmenge) werden eingeführt:

$$k_\varphi = \frac{\frac{\partial M}{\partial n}}{\frac{\partial M}{\partial n} n_{0max}} = \frac{\text{Zunahme des Momentenüberschusses in \%}}{\text{Zunahme der Drehzahl in \%}} \quad (45)$$

k_φ gilt bei unveränderter Stellung des Servomotors und hat die Grössenordnung $k_\varphi \sim -1$

$$k_\mu = \frac{\frac{\partial M}{\partial m}}{\frac{\partial M}{\partial m} m_{max}} = \frac{\text{Zunahme des Momentenüberschusses in \%}}{\text{Zunahme der Servomotoröffnung in \%}} \quad (46)$$

k_μ gilt bei konstanter Drehzahl, wobei m_{max} einer Änderung um die Vollgasleistung entspricht und weist die Grössenordnung $k_\mu \sim 0,3$ auf. Mit diesen Kennzahlen wird:

$$\Delta M = k_\varphi M_{max} \frac{\Delta n}{n_{0max}} + k_\mu M_{max} \frac{\Delta m}{m_{max}} \quad \dots \quad (47)$$

wobei:

$$\frac{\Delta n}{n_{0max}} = \varphi; \quad \frac{\Delta m}{m_{max}} = \mu; \quad \frac{\Delta M}{M_{max}} = T_a \varphi$$

Setzt man wie in Abschnitt 2:

$$\text{Selbst. konstante: } e_s = \frac{\text{Abnahme des Drehmomentes in \%}}{\text{Zunahme der Drehzahl in \%}} \quad (48)$$

so ist hier $e_s = -k_\varphi$, also von der Grössenordnung $e_s \sim 1$

$$\text{Triebwerksgleichung: } T_a \varphi + e_s \varphi = k_\mu \mu \quad \dots \quad (49)$$

Für die Regleröffnung η gilt die gleiche Ableitung wie für Formel (12), nur mit negativem Vorzeichen, da der Drehzahlregler mit steigender Drehzahl hier nicht den Propeller auf Zunahme, sondern die Turbine auf Abnahme des Drehmomentes steuert. Demnach gilt für den

$$\text{Regler: } \eta = -\frac{\varphi}{\delta} \quad \dots \quad (50)$$

Bei Annahme eines Reglers mit starrer Rückführung sind die Formeln (13), (14), (17) unverändert gültig. Sie ergeben zusammen mit den Formeln (49) und (50) und unter Vernachlässigung von Gliedern kleinerer Ordnung mit w als Wurzel die charakteristische Regelgleichung des Turbotriebwerkes:

$$w^2 + \left(\frac{e_s}{T_a} + \frac{r}{T_s} \right) w + \frac{k_\mu}{\delta T_a T_s} = 0 \quad \dots \quad (51)$$

$\underbrace{e_s}_{\text{Selbstreglung}} + \underbrace{\frac{r}{T_s}}_{\text{Rückführung}}$

c) Die Rolle der Schlusszeit

Es ist zu beachten, dass hier die Schlusszeit T_s in viel grösserem Masse variieren kann als beim Flugzeugpropeller und bei stationären Kraftmaschinen. Beim Flugzeugpropeller befinden sich der Drehzahlregler am Motor und der Servomotor möglichst in der Nabe, wobei es schon schwer fällt, die Verbindungsleitungen durch die Antriebswelle zu verlegen. Mechanische Rückführ-Verbindungen sind hier kaum anwendbar; außerdem begrenzen hier die starken entgegenwirkenden Kräfte die Verstellgeschwindigkeiten, da die Regulierarbeit nicht beliebig gross sein kann.

Demgegenüber ist bei der Strahlтурbine nur ein Nadelventil oder ein Verstellorgan der Brennstoffpumpe zu steuern (Bild 31 und 32), sodass grundsätzlich Schlusszeiten von Bruchteilen einer Sekunde möglich sind. Bei stationären Kraftmaschinen kommen so hohe Verstellgeschwindigkeiten nur für Vorsteuerungen, aber nicht für den Hauptservomotor vor. Ferner können Drehzahlregler und Servomotor für die Brennstoffzufuhr nahe beieinander liegen, sodass mechanische Rückführungen ausführbar sind.

Zunächst sei die Frage geprüft, wie sich durch Wahl der Schlusszeit beim Regler mit Rückführung Pendelungen vermeiden lassen. Eine völlig aperiodische Regelung würde erreicht, wenn in der Lösung der charakteristischen Gleichung:

$$w = -\frac{1}{2} \left(\frac{e_s}{T_a} + \frac{r}{T_s} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{e_s}{T_a} + \frac{r}{T_s} \right)^2 - \frac{k_\mu}{\delta T_a T_s}} \quad (52)$$

der Wurzelausdruck statt negativ (gedämpfte Schwingung) null würde, also:

$$\left(\frac{e_s}{T_a} + \frac{r}{T_s} \right)^2 = \frac{4 k_\mu}{\delta T_a T_s} \quad \dots \quad (53)$$

$$e_s \sqrt{\frac{T_s}{T_a}} + r \sqrt{\frac{T_a}{T_s}} = 2 \sqrt{\frac{k_\mu}{\delta}} \quad \dots \quad (54)$$

Selbstreglung Rückführung

Wie man aus Gleichung (54) erkennt, wirkt die Schlusszeit genau im umgekehrten Verhältnis auf Selbstreglung und Rückführung ein. Da ferner durch die gegenüber stationären Turbinen fast zehnmal kleinere Anlaufzeit T_a der Strahlтурbine die Selbstreglung bei gleicher Schlusszeit stärker ist, beeinflusst sie, wie das Beispiel auf Bild 35 zeigt, den Regelvorgang in so hohem Mass, dass bei Schlusszeiten von einer Sekunde und mehr die Selbstreglung nicht vernachlässigt werden darf. Ohne Selbstreglung würde die Zahl der Ausschläge mit steigender Schlusszeit sehr bald ganz unzulässig anwachsen, wie die gestrichelte Linie auf Bild 35 zeigt. Tatsächlich wirkt aber die wachsende Selbstreglung so stark entgegen, dass bei längeren Schlusszeiten die Zahl der Ausschläge wieder kleiner und sogar das praktisch aperiodische Gebiet erreicht wird (nur ein Ausschlag, der schon auf $1/10$ gedämpft ist). Vom Standpunkt der Pendelungen aus wäre also jede Schlusszeit zulässig.

Dagegen wachsen gemäss Bild 35 die Uebertouren bei Schlusszeiten von 1 bis 3 s auf Werte an, die grösser sind als bei stationären Turbinen. Dies wiederum, weil durch den Leichtbau die Anlaufzeit T_a fast zehnmal kleiner ist. Je nach der Anordnung kann aber der Anfangswert μ_0 der Servomotorabweichung von der Beharrungslage sehr gering sein. Wie bei der Berechnung von φ_{\max} gezeigt wurde, setzt sich μ_0 im Zeitpunkt, da bei Schaltung auf Vollgas die Beharrungsdrehzahl zum erstenmal erreicht wird, aus dem Fehler der Handsteuerung des Drosselhahns und der Vollöffnung des Korrektur-Servomotors (Bild 3) zusammen. Entspricht der Fehler der Handeinstellung 5% und ist der Korrekturspielraum des Drehzahlreglers 10% des Vollgas-Drehmoments, so ist $\mu_0 = 5 + 10 = 15\%$. Alsdann kann nach Bild 35 eine Schlusszeit von z. B. 2 s zulässig sein. Dabei lässt sich auch die Ungleichförmigkeit δ noch variieren. Bei Drehzahlreglern ohne Rückführung sind noch grössere Schlusszeiten notwendig, um die Zahl der Ausschläge $a_{1/10}$ klein zu halten, sodass die Grösse der Ausschläge $\varphi_{\max} : \mu_0$ noch zunimmt. Höchsten Ansprüchen genügen Regler mit Rückführung, deren Schlusszeit ein Bruchteil einer Sekunde ist.

d) Sicherung vollkommener Verbrennung

Die kleinen Brennkammern der Strahlтурbine, die pro m^3 Rauminhalt mehr als zehnmal grössere Brennkammerbelastungen aufweisen als Oelfeuerungen von stationären Dampfkesseln, können dies nur durch einen gegenüber Oelfeuerungen vielfach grösseren Luftüberschuss leisten, wie er bei Gasturbinen das Gegebene ist. Eine Belastungssteigerung durch Erhöhen der Brennstoffmenge darf hier nicht zu schnell einsetzen, da die Luft

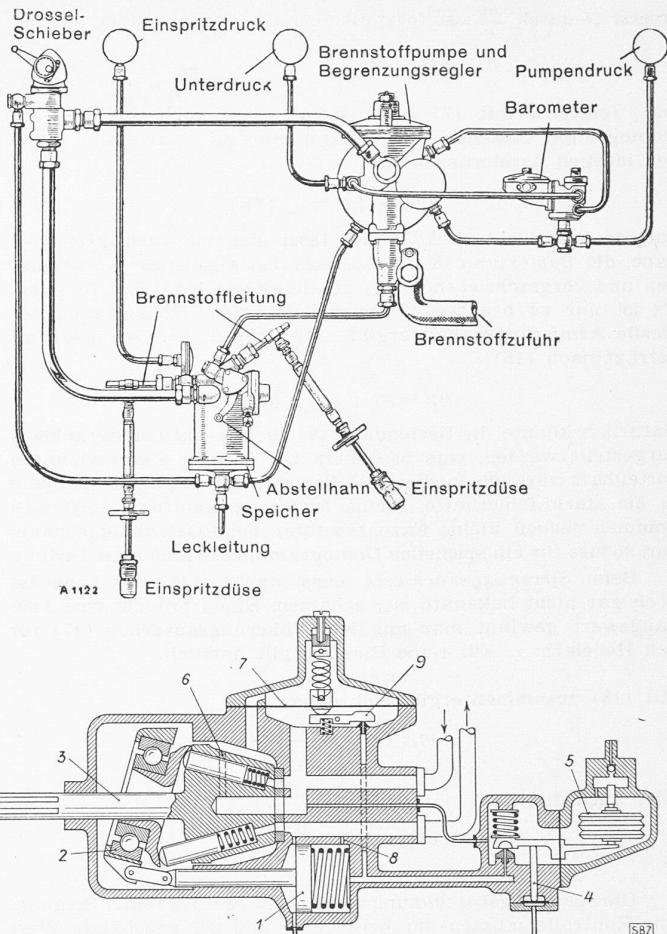


Bild 29 (oben) und 30. Drehzahl-Begrenzungsregler von Lucas für Strahlturbinen von Rolls-Royce Derwent (aus «Flight» 10. I. 1946, S. 41). Zwischen die Brennstoffzufuhr und die Einspritzdüse ist ein vom Piloten betätigter Drosselschieber geschaltet, während die Förderung der Brennstoffpumpe durch einen automatischen Regler kontrolliert wird. Nach Bild 30 wird durch den Servomotor 1 die Schrägstellung des Verstell-Lagers 2 für die rotierende Kolbenpumpe 3 (Taumpumpe) und damit ihr Hub und ihre Fördermenge gesteuert. Der Servomotor arbeitet normalerweise über den Steuerstift 4 auf konstanten Förderöldruck, der durch den Barometerregler 5 der Flughöhe angepasst wird. Durch radiale Bohrungen 6 im Pumpenrotor wird ein mit steigender Drehzahl zunehmender Oeldruckunterschied erzeugt und durch Membran 7 auf die Drehzahlsteueröffnung 9 des Servomotors 1 übertragen. 8 Blende für das Steueröl. Die Steueröffnung 9 bleibt geschlossen, solange die (einstellbare) Grenzdrehzahl nicht überschritten wird.

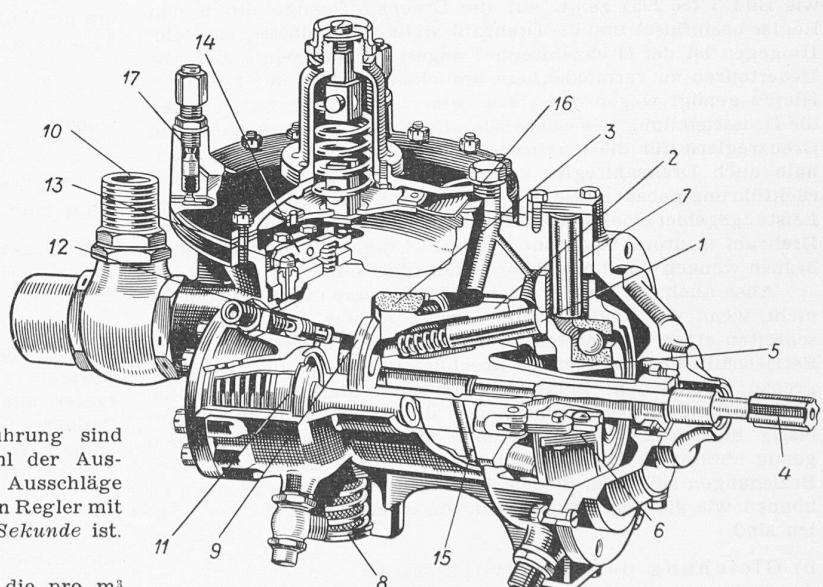
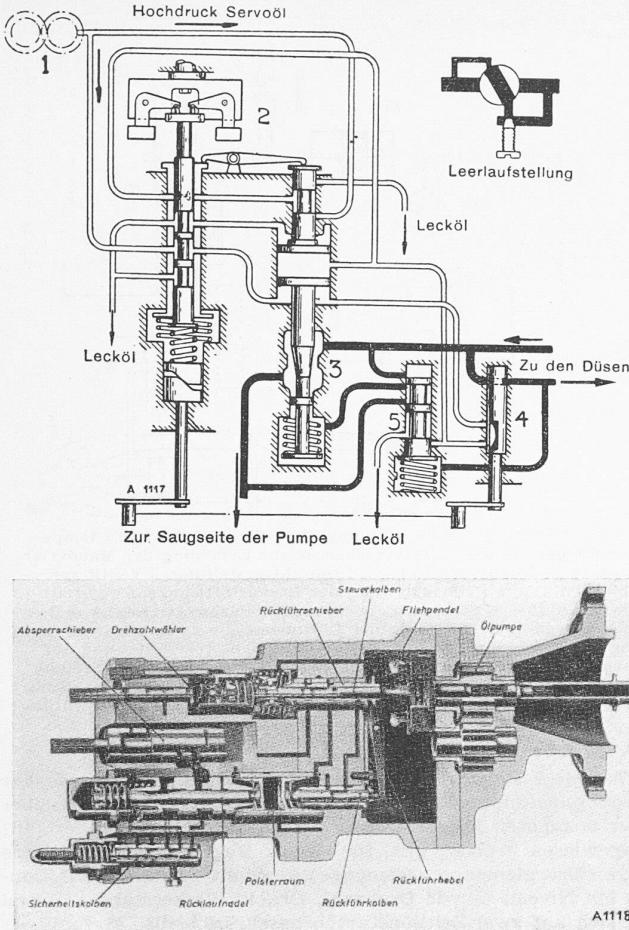


Bild 31. Drehzahl-Begrenzungsregler von Lucas. 1 Pumpenkolben, 2 Rotor, 3 Kohlenring, 4 Antriebwelle, 5 Steuerkopf, 6 Verstellring, 7 Drehachse hierzu, 8 Sieb für Oeleinlass, 9 Steuerscheibe für Einlass und Auslass zu den Pumpenkolben, 10 Austrittsstutzen, 11 Servomotor, 12 Eintrittsblende für das Steueröl, 13 Steueröffnung, 14 Steuerhebel des Drehzahlreglers, 15 radiale Bohrungen zur Drehzahlmessung, 16 Membran des Drehzahlreglers, 17 Ausflussventil.



Bilder 32 u. 33. Regler mit Drehzahlwähler und Isodromrückführung bei der Strahlturbinen Junkers Jumo 004 («Aircraft Engineering» Januar 1946, Seite 10). Durch den Gashebel des Piloten wird der Brennstoffhahn 4 eingestellt und zur Feinregulierung gleichzeitig die Drehzahl-Verstellfeder des Fliehkarfreglers 2. Dieser steuert durch das Korrekturventil 3 einen Rücklauf zur Saugseite der Pumpe. Zwischen den Servomotor 3 und den Regler 2 ist eine Isodromrückführung eingeschaltet. 5 Sicherheitskolben

menge erst mit steigender Drehzahl des Kompressors zunimmt. Vielmehr muss verhütet werden, dass der Luftüberschuss vorübergehend zu klein wird, weil dann in der hochbelasteten Brennkammer keine vollkommene Verbrennung mehr möglich wäre. Dagegen darf das Schalten auf kleinere Leistung beliebig schnell geschehen, da durch die Reduktion der Brennstoffmenge bei zunächst unveränderter Drehzahl noch die volle Luftmenge vorhanden ist und so eine für die Verbrennung zulässige Erhöhung des Luftüberschusses eintritt.

Es ist also Vorsorge gegen zu plötzliche Steigerung der Brennstoffmenge zu treffen bis die Luftmenge gefolgt ist. Ähnlich ist bei Wasserturbinen mit langen Druckröhren eine zu plötzliche Änderung zu vermeiden, weil sonst ein zu grosser Druckstoss entstehen würde. Man verlangsamt deshalb hier durch die Verstellorgane die Änderung der Betriebswasser- menge. Eine andere Lösung gibt es nicht, weil man im allgemeinen die Lastschwankungen nicht beeinflussen kann. Im

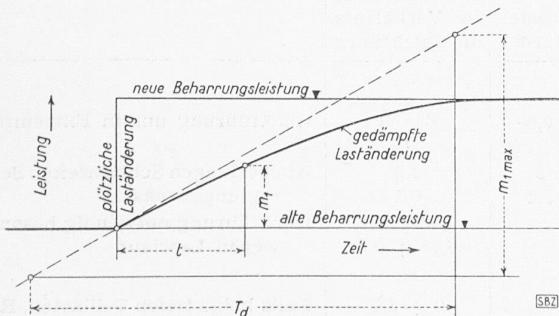


Bild 34. Bestimmung der Dämpfungszeit T_d zur Berechnung des Regelverlaufs und der viel kleineren Uebertouren bei gedämpfter Schaltung des Gashebels mit einer unabhängig vom Piloten begrenzten Schnelligkeit des Lastanstieges

Gegensatz dazu wird bei der Flugzeug-Strahl-turbine die Heftigkeit der Laständerung durch den Eingriff des Piloten bestimmt. Auch würde eine Verlängerung der Schlusszeit deshalb nicht abhelfen, weil der Regler nur im obersten Lastbereich wirksam ist. Will man also die Schnelligkeit des Lastanstieges unabhängig vom Piloten begrenzen, so kann man ein Dämpfungsorgan zwischen den Schaltthebeln des Piloten und die Brennstoffverstellung einfügen. Der Reglerkreis: Drehzahlregler-Servomotor - Brennstoffänderung - Drehzahländerung der Strahlerturbine - Drehzahlregler behält dann optimale Eigenschaften. Eine weitere Verbesserung tritt dadurch ein, dass die Schwingungserregung, von der der maximale Drehzahlaussschlag abhängt, viel geringer ist als bei der bisher vorausgesetzten plötzlichen Belastungsänderung.

Dieser kleinere Maximalausschlag lässt sich wie folgt berechnen: Wie früher durch eine vektorielle Untersuchung nachgewiesen wurde [8], wirkt bei einer kontinuierlichen Leistungsänderung der zweite Differentialquotient des Leistungsverlaufs nach der Zeit einem Verlauf mit Dämpfung die stärkste, für die Ueben den Knick zu Beginn den zu diesem Knick die trachtet werden kann, während des Brennstoffventilregelganges an die Kurve der. Dieser Knick ist dann nach der Öffnungszeit T_d des Drosselklappenventils notwendig, um mit dem Ventilfangs voll geöffnetem Drosselklappenventil die vollen Brennstoffventilhöhen m , des Brennstoffventils

$$\frac{m_1}{m_{1,\max}} = \frac{t}{T_d} \quad \dots \quad (55)$$

Die Änderung der Brennstoffmenge um den Betrag m_1 ruft eine zusätzliche Änderung des Drehmomentes um M_1 hervor, sodass das letzte Glied der Formel (47) übergeht in:

$$k_{\mu} M_{\max} \frac{\Delta m}{m_{\max}} \longrightarrow k_{\mu} M_{\max} \left(\frac{\Delta m}{m_{\max}} + \frac{m_1}{m_{1\max}} \right) \\ = k_{\mu} M_{\max} \left(\frac{\Delta m}{m_{\max}} + \frac{t}{T_d} \right) \dots \dots \dots \quad (56)$$

Zur leichteren Berechnung wird angenommen, dass sich wie bei plötzlicher Belastungsänderung der Maximalausschlag nur durch den Dämpfungsfaktor f_d der Formel (34a) von dem eines Reglers ohne Rückführung und ohne Selbstregelung unterscheidet.

Setzt man $e_s = 0$, so wird nach Einsetzen von (56) in Formel (49):

$$T_a \dot{\varphi} = k_\mu \left(\mu + \frac{t}{T_d} \right) \quad \dots \quad (57)$$

Da für einen Regler ohne Rückführung $\xi = 0$ ist, also nach Gleichung (13) $\sigma = \eta$, gilt:

$$T_s \dot{\mu} = - \frac{\varphi}{\delta} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (58)$$

$$\ddot{\varphi} + \frac{k_\mu}{\delta T_a T_s} \varphi - \frac{k_\mu}{T_a T_d} = 0 \quad \dots \quad (59)$$

$$\ddot{\varphi} + b \varphi - c = 0 \quad \dots \quad (60)$$

$$\varphi = c_1 \cos qt + c_2 \sin qt + c_3$$

Sucht man für diese Gleichung die Konstanten, indem man berücksichtigt, dass für den Beginn des Regelvorganges zur Zeit $t = 0$ gilt: $\varphi = 0$ und $\dot{\varphi} = 0$, so wird:

$$c_1 = -\frac{c}{b}; \quad c_2 = 0; \quad c_3 = \frac{c}{b}$$

$$\varphi = \frac{c}{b} (1 - \cos qt) = \delta \frac{T_s}{T_d} (1 - \cos qt)$$

Der Maximalausschlag entsteht nach einer halben Periode, wenn $\cos qt = -1$, also ist für gedämpfte Belastungsänderung, wenn man wiederum den Dämpfungsfaktor f_d wie bei Formel (34a) einführt:

$$\text{Uebertouren bei gedämpfter Schaltung } \varphi_{\max d} = 2 f_d \delta \frac{T_s}{T_d} \quad \dots \quad (61)$$

Der Dämpfungsfaktor f_d nach einer halben Periode ist in Bild 17 besonders eingetragen. Nach dieser Formel lässt sich berechnen, ob bei Verwendung eines Dämpfungsorgans zwischen Schaltthebel und Brennstoffverstellung ein Regler ohne Rückführung als einfachste Bauform eines Isodromreglers keine zu hohen Uebertouren ergibt.

Statt aber nur durch Dämpfen des Lastanstieges ein zu starkes Nacheilen der Drehzahlsteigerung (Luftmenge) gegenüber der Brennstoffmenge zu verhindern, ist eine aktive Drehzahlbeeinflussung möglich. Am Beispiel einer Strahlтурbinen, die mit veränderlichem Düsenquerschnitt arbeitet (Bild 36), soll schematisch gezeigt werden, wie durch eine zusätzliche temporäre Drehzahlbeeinflussung die Manövrfähigkeit gesteigert werden kann. Die Regulierung des Düsenquerschnitts dient normalerweise dazu, durch Anpassung an Leistung, Höhenlage und Fluggeschwindigkeit die Arbeitsbedingungen des Kompressors zu verbessern. Parallel zu dieser Regulierung kann durch ein Verstellorgan, dessen Bewegung temporär durch den Gashebel eingeleitet wird, der Düsenquerschnitt vergrößert werden, wodurch ein grösserer Teil der Brennstoffenergie auf Kosten der Strahlenergie die Beschleunigung der Strahlтурbinen herbeiführt und dadurch die Luftmenge steigert, die zur Verbrennung der gesteigerten Brennstoffmenge dient. Auf die Brennstoffmenge wirkt ein Dämpfungsorgan 10, das am Schluss der Dämpfungszeit im Gegensatz zum Dämpfungsorgan 9 der Düse eine dauernde statt temporäre Verstellung steuert. Um sicher zu gehen, dass die Luftmenge genügend angestiegen ist, wenn die Brennstoffmenge zunimmt, kann das Dämpfungsorgan 10 für den Brennstoff auf langsameren Gang eingestellt sein. Die Anordnung ist so zu treffen, dass bei Abschaltung von Leistung die Dämpfungsorgane unwirksam sind. Die schematische Skizzierung dient hier nur dem Zweck, die grundsätzlichen Elemente zu kennzeichnen, mit denen sich der Regelvorgang verbessern lässt, wenn höchste Ansprüche an die Drehzahlregelung gestellt werden.

5. Allgemeines

Um die Berechnungsunterlagen praktisch besser verwenden zu können, sind sie in Tabelle 1 (S. 296) zusammengestellt.

Tabelle 2. Grössenordnungen der Selbstreglung als Ursache des übereinstimmenden oder abweichenden Verhaltens verschiedener Regler

	e_s		T_a	T_s		$e_s \frac{T_s}{T_a}$	Ergebnis
	Selbstreglungs-Konstante e_s bei kleinsten Last	größten Last		Anlaufzeit	Schlusszeit bei kleinsten Last	größten Last	
<i>Drehzahlreglung</i>							
Flugzeugpropeller . . .	1,5 ¹⁾	÷ 10 ²⁾	1,5	6 ¹⁾	0,5 ²⁾	6 ÷ 3	Rückführung nur in Extremfällen
Strahlтурbinen		1	1,5	1,5	2	1,3	Nur bei langen Schlusszeiten Selbstreglung wirksam
Dampfturbine	0,1	÷ 1	10	0,2	0,1	0,02 ÷ 0,2	Rückführung notwendig besonders wegen Leerlauf
Wasserturbine	0,1	÷ 1	10	5	0,05 ÷ 0,5		
<i>Druckreglung</i>							
Dampfdruckregler . . .	0	÷ 2,5	2	2	0 ÷ 2,5	0 ÷ 2,5	Falls keine tiefen Teillasten, Rückführung entbehrlich
Zugregler (Dampfkessel) .	100	÷ 1000	2	2	100 ÷ 1000	100 ÷ 1000	Immer ohne Rückführung

¹⁾ Bei kleinsten im Leerlauf regulierter Fluggeschwindigkeit

²⁾ Bei hoher Fluggeschwindigkeit

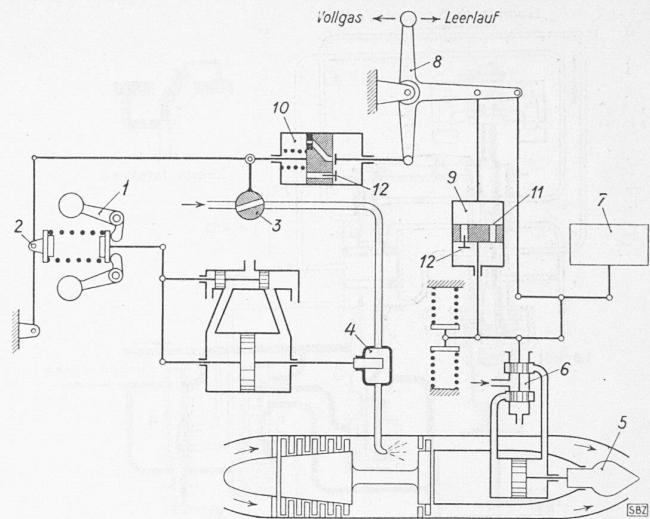


Bild 36. Vorschlag für die Regelung einer Strahlтурbinen mit temporärer Steigerung des Luftüberschusses zur Erhöhung der Manövrfähigkeit. 1 Fliehkraftpendel, 2 Drehzahlverstellung, 3 Ventil zur Roheinstellung, 4 Feineinstellung der Brennstoffmenge, 5 verstellbare Strahldüse, 6 Steuerschieber hierzu, 7 Barometer-Regler, 8 Gashebel, 9 Organ zur Erhöhung der Luftmenge durch temporäre Öffnung der Strahldüse bei Schaltung auf Vollgas (bei Schaltung auf Leerlauf wirkungslos), 10 Dämpfungsorgan zur verzögerten Steigerung der Brennstoffmenge bei Schaltung auf Vollgas (bei Schaltung auf Leerlauf wirkungslos), 11 Drosselöffnung, 12 Rückschlagventile

a) Allgemeine Gleichung des Niveaureglers

Tabelle 2 soll ferner in Grössenordnungen die Gründe für das übereinstimmende oder abweichende Verhalten gegenüber bisher bekannten Reglerarten erkennen lassen. Wie früher [10] nachgewiesen wurde, gilt für jeden Regler, der nicht eine Menge (Energiemenge, Gasmenge) konstant zu halten hat, sondern ein Niveau — wie Drehzahl, Druck, Wasserstand — wenn man sich auf zwei Zeitkonstanten beschränkt, die Allgemeine charakteristische Gleichung des Niveaureglers mit Rückführung:

$$w^2 + \underbrace{\left(\frac{e_s}{T_a} + \frac{r}{T_s} \right) w}_{\text{Selbstreglung}} + \underbrace{\frac{k}{\delta T_a T_s}}_{\text{Rückführung}} = 0$$

Im Verhältnis zum Einfluss einer starren Rückführung mit $r = 1$ hat die Selbstreglung die Stärke $e_s T_s / T_a$. Sie tritt also gegenüber der Rückführung umso stärker hervor, je grösser die Selbstreglungskonstante e_s und je grösser im Verhältnis zur Anlaufzeit T_a die Schlusszeit T_s ist. Das Verhältnis von Schlusszeit T_s zu Anlaufzeit T_a kann bei Strahlturbinen von Flugzeugen und bei stationären Dampfturbinen ähnlich klein sein, weil bei der Strahlтурbinen die Anlaufzeit wegen Leichtbau und die Schlusszeit wegen den kleinen durch den Regler zu verstellenden Massen je nur etwa $1/10$ der bei Dampfturbinen vorkommenden Werte betragen. Durch diese fast zufällige Senkung von T_s und T_a im gleichen Mass und die grössenordnungsmässig gleiche Stärke der Selbstreglung verhalten sich die stationären Dampfturbinen und

die leichte Strahlтурbine reguliertechnisch ähnlich, wenn man in beiden Fällen auf die kleinstmögliche Schlusszeit geht. Nur mit nicht extrem kurzen Schlusszeiten kann die Strahlтурbine durch Selbstregelung eine merkliche Unterstützung erfahren, weil man sich meist auf die Regulierung in der Nähe der Vollast beschränkt.

Dagegen zeigen, was man nicht vermuten würde, die Flugzeugtriebwerke — Verstellpropeller und Strahlтурbine — unter sich ganz abweichendes Verhalten. Wohl haben beim Leichtbau die Anlaufzeiten T_a ähnliche Grösse. Die Selbstregelungskonstante ist aber beim Flugzeugpropeller wesentlich stärker und trotzdem man hier im Leerlauf zu regeln hat, wo sonst die Selbstregelung versagt, bleibt eine genügende aerodynamische Selbstregelung erhalten, solange die Fluggeschwindigkeit nicht null ist. Die Schlusszeiten T_s müssen ausserdem grösser sein als bei der Strahlтурbine, weil man gegen starke Gegenkräfte zu regulieren hat. Dadurch nimmt die Selbstregelung weiter zu.

Bisher konnte man deshalb beim Verstellpropeller meist ohne Rückführung arbeiten, im Gegensatz zur Strahlтурbine, und muss sie erst bei steigenden Ansprüchen einführen. Der Regler ohne Rückführung kann aber beim Verstellpropeller nicht allen Forderungen genügen, wie dies durch überwiegende Stärke der Selbstregelung z. B. beim Zugregler von Dampfkesseln der Fall ist.

b) Die Untersuchungsmethoden der Regeltechnik

Es stellt sich die Frage, ob die mathematische Untersuchungsmethode überholt sei. Die vorliegenden Untersuchungen sind durch den Ausbau der klassischen Reglertheorie durchgeführt, die durch das Gesetz der Selbstregelung und die Einführung der Abklingzeit und der Zahl der Ausschläge für den auf $1/10$ abgeklungenen Regelvorgang ergänzt wurde.

J. v. Freudenreich hat die experimentelle Untersuchungsmethode eingeführt [11], bei der alle Zeitkonstanten durch äquivalente Steuerorgane ersetzt werden. Feiss [15] zeigt, wie man

elektrische Modelle zur experimentellen Untersuchung von Regelvorgängen verwenden kann. Die *vektorielle Untersuchungsmethode* wurde nach dem Vorbild der Elektrotechnik vom Verfasser eingeführt [8], um das Verhalten von Reglern bei kontinuierlichen Belastungsänderungen festzustellen. Feiss entwickelt eine neue Methode zur Bestimmung der Regelstabilität mit Hilfe des Vektorbildes [14] nach dem Kriterium von Nyquist [12]. Durch schiefwinkelige Vektoren erreicht Lüthy [16] eine Feststellung der Abklingtendenz, statt sich auf Ermittlung der Stabilitätsbedingungen zu beschränken. Profos entwickelt an Problemen der Temperaturregulation, die mathematisch nicht erfassbar sind, nach der Vektormethode ein anderes Verfahren, um das Mass des Abklingens festzustellen [18].

Alle diese neuen Methoden haben den grossen Vorteil, dass man Regelvorgänge mit beliebig vielen Regelgliedern und Zeitkonstanten untersuchen kann, was mathematisch zu unlösbaren Gleichungen führen würde. Die Ergebnisse gelten aber nur für den konkreten Reglerkreis und Steuermechanismus, der untersucht wurde. Für das Vordringen zur grundsätzlichen Uebersicht, wie dies hier bis zur Aufstellung einer für alle Niveauregler gültigen Reglergleichung fortgesetzt wurde, ist vor allem die für Abstraktionen vom Einzelfall leichter zugängliche mathematische Methode geeignet.

Um sich auf neuen Gebieten einen allgemeinen Ueberblick über die Zusammenhänge zu verschaffen, wird die mathematische Methode dort weiter gute Dienste leisten, wo es gelingt, das Wesentliche mit einer möglichst kleinen Zahl von Zeitkonstanten zu erfassen. So war bei der Entwicklung des Escher Wyss Verstellpropellers eine Vorausberechnung der neuen Regelprobleme möglich, die sich bei der Einführung der Landebremung ergeben. Auf anderen Gebieten liessen sich durch Konzentration auf das physikalisch Grundsätzliche die Bedingungen für erhebliche konstruktive Vereinfachungen ableiten [9], [17], [19].

(Suite et fin de la page 316)

Conclusions

La commission estime que le prochain stade des études doit comporter l'établissement de nouveaux plans au 1/500 de l'ensemble de l'hôpital, basés sur la synthèse qu'elle a tirée des avant-projets, en même temps que l'établissement des plans d'exécution du bâtiment des polycliniques (1ère étape de construction). Conformément au mandat qui lui a été donné par le programme, la commission propose au Conseil d'Etat de confier ces études à deux des groupes d'architectes ayant élaboré les avant-projets. Dans un tel domaine, une collaboration est fructueuse, mais elle ne doit pas être étendue à un trop grand nombre de personnes. Quant au choix des architectes, la commission n'a pas jugé devoir opérer un classement de tous les projets; un tel classement serait d'ailleurs difficile en raison du peu de différence de qualité entre les envois et du fait que chaque projet a apporté des idées de valeur, sans cependant avoir évité un certain nombre d'erreurs.

Constatant que les projets qui ont apporté le plus grand nombre d'idées nouvelles et fécondes, retenues et utilisées pour l'élaboration de la synthèse, et susceptibles d'être développées dans le projet définitif, sont les projets Nos. 5 et 7, la commission propose au Conseil d'Etat de confier le mandat pour l'élaboration de ce projet à leurs auteurs, à savoir: MM. Arnold Hoechel et Pierre Nierlé (No. 5), MM. Arthur Lozeron et Jean Erb (No. 7).

Reconstruction de l'hôpital cantonal de Genève

D. Architecture

La commission a constaté que du fait qu'il s'agissait d'un avant-projet à échelle réduite portant avant tout sur un problème fonctionnel, les auteurs ne semblaient pas avoir voué une attention spéciale à l'aspect architectural des bâtiments projetés, notamment des façades. Il en résulte une certaine sécheresse générale. Le projet No. 2 se détache cependant de l'ensemble par une plus grande sensibilité et une recherche de composition plus poussée. Il conviendra que les architectes chargés des études ultérieures s'efforcent de mieux exprimer le caractère particulier de chacun des éléments de la composition générale et de dégager les divers corps de bâtiments (projet No. 5), l'esquisse de synthèse n'ayant dans ce domaine que la valeur d'un schéma. Ils devront également tenir compte davantage de la topographie spéciale de la région, notamment dans l'échelle de l'architecture et la composition des volumes.

E. Cube général

Les différences de cube entre les projets sont relativement minimales, ce qui tient sans doute à la rigueur du programme. Le cube total des constructions représente environ 200 000 m³ pour 650 lits, c'est à dire environ 300 m³ par lit, chiffre normal pour un hôpital général comportant un centre d'enseignement et des polycliniques.

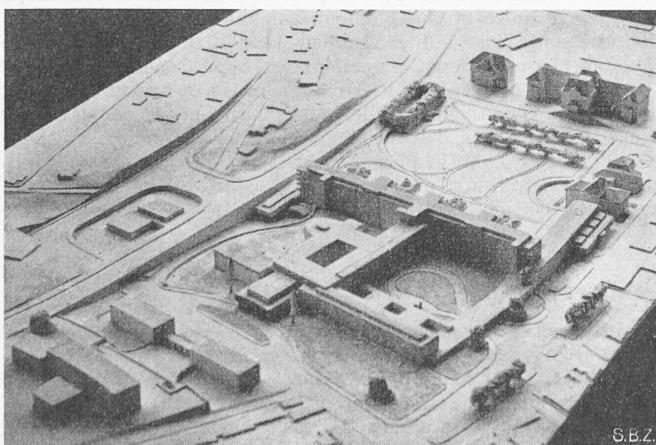


Fig. 16. Projet No. 1. Auteurs: BORDIGONI, HUBER et CHAPATTE, architectes, Genève. Maquette, vue du nord

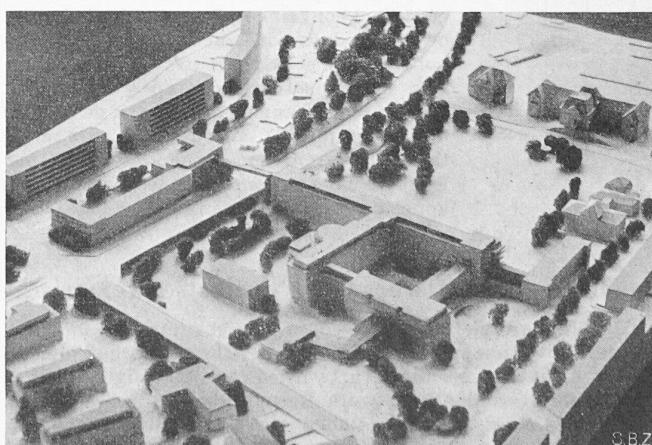


Fig. 17. Projet Nr. 9. Auteurs: P. et A. REVERDIN, architectes, Genève. Maquette, vue du nord