

REGELUNG DES LUFTVOLUMENSTROMES IN LADUNGSKÜHLANLAGEN

Prof. Dr. Hans Witt

EINLEITUNG

Der Transport von Kühlladung in Kühlschiffen und Containerschiffen erfordert einen hohen Energieaufwand, wovon ein wesentlicher Teil von den Ventilatoren verbraucht wird.

Die Lüfterleistung muß nicht nur aufgebracht werden, sondern auch wieder weggekühlt werden, da sie im Ventilationskreis des Kühlraumes bzw. des Kühlcontainers in Wärme umgesetzt wird. Der Gesamtleistungsbedarf, der den Ventilatoren zuzurechnen ist, beträgt bei Tiefkühlladung ca. das 2,6fache der Ventilatornennleistung, bei Fruchtfahrt ca. das 1,6fache.

Wesentliche Energieeinsparungen sind zu erzielen, wenn der Volumenstrom des Ventilators regelbar ist. Die Ventilatorenauswahl und verschiedene Regelmethode werden nachstehend besprochen.

VENTILATOREN - REGELVERHALTEN

Die den Ventilatoren zugeführte Leistung wird im Lüftungskreis in Wärme umgesetzt, die wieder weggekühlt werden muß. Die hierfür erforderliche Kühlleistung ist ein wesentlicher Teil der gesamten Kühllast.

Es gibt drei Fälle, wo eine Regelung des Volumenstroms der Ventilatoren nicht nur große Energieeinsparungen ermöglicht, sondern auch besser für das Transportgut ist, da übermäßige Austrocknung als Folge zu hohen Luftdurchsatzes vermieden wird:

- a) Wenn die Anlage z. B. für Bananenfahrt mit 80fachem Luftwechsel ausgelegt war und ein anderes Kühlgut zu transportieren ist, das z. B. nur 20fachen Luftwechsel benötigt.
- b) Bei Teillast, wenn z. B. an einen Kühlstab für 9 Container nur 2 gefahren werden.
- c) Nach Beendigung der Kühlphase, wenn sich in der Ladung stationäre Verhältnisse gemäß Vorgabe eingestellt haben.

Im folgenden werden wir uns zunächst mit der Ventilatorenauswahl beschäftigen, bevor näher auf das charakteristische Regelverhalten eingegangen wird.

Der Hochleistungs-Radialventilator mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln hat eine stabile Kennlinie (A), die im Verhältnis zur Luftmenge relativ hohe Drücke erzeugt (Abb.1)

Der Axialventilator (B) ist dagegen eine Niederdruckmaschine, die trotz höherer Drehzahl niedrigere Drücke erzeugt. Sie hat bei steiler Schaufelstellung eine instabile Kennlinie, die den praktisch ausnutzbaren Volumenstrombereich auf ca. 0,5 bis 0,9 des Volumenstroms bei freiem Ausblas beschränkt. Diese instabile Kennlinie kann bei Vereisung des Luftkühlers zu Strömungsabriß führen, welches zum sogenannten Pumpen und Flügelbrüchen oder Motorschäden führen kann.

Es ist zwar möglich, die axiale Kennlinie zu stabilisieren, aber der Aufwand wird meistens gescheut. Interessanter ist dagegen, Axialgebläse mit flach angestellten Schaufeln zu verwenden (C), die von Natur aus eine abrißfreie Kennlinie besitzen. Da die Druckziffer dieser Ventilatoren klein ist, muß man sie entweder höher drehen lassen, größere Ventilatoren einsetzen oder Anlagen mit niedrigen Strömungswiderständen bauen. Abb. 1 zeigt den gleichen Axialventilator mit steiler und als unterste Kurve mit flacher Schaufelstellung.

Axialventilatoren sollten selbstverständlich immer mit Leitschaufeln ausgestattet sein. Hierdurch erhöht sich nicht nur der Wirkungsgrad des Ventilators, sondern der Widerstand im angeschlossenen Kanalnetz vermindert sich auch bei einer weniger drallbehafteten Strömung. Die folgenden Regelkurven stammen aus den "VGB-Richtlinien für die Planung, Bestellung und Abnahme von Ventilatoren für Dampferzeuger und Reaktoren," Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber.

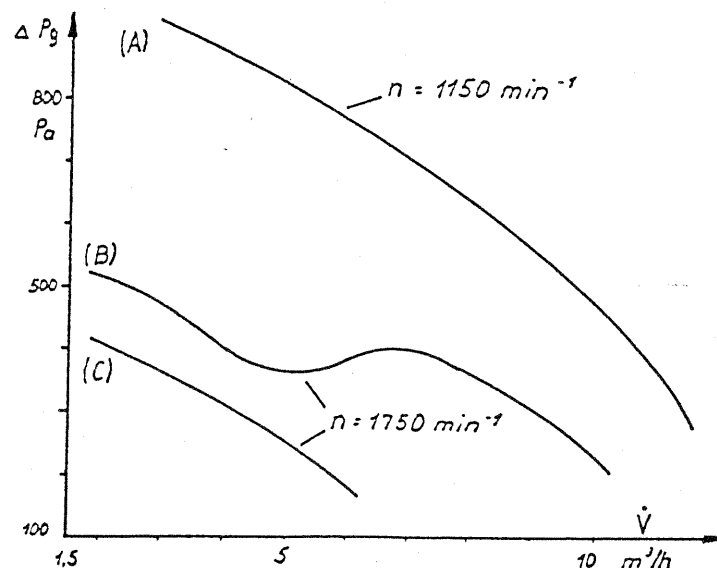


Abb. 1. Charakteristische Kennlinien für Axial- und Radialventilatoren, bei 500 mm Ansaugdurchmesser Witt & Sohn

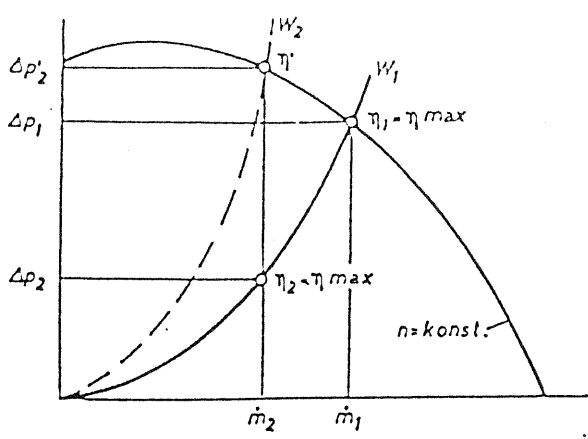


Bild 2: Kennlinie eines Radialventilators
Drosselregelung mit konstanter Drehzahl

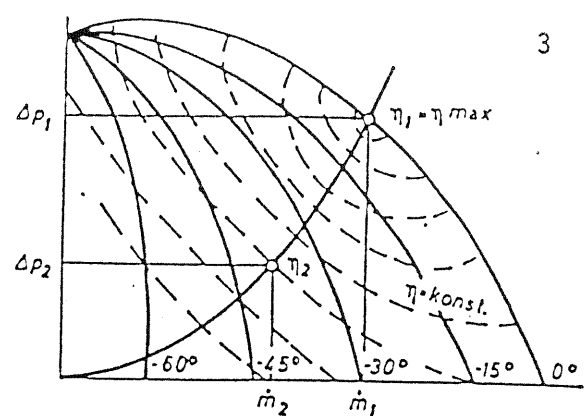


Bild 4: Kennlinienfeld eines Radialventilators
Drosselregelung mit konstanter Drehzahl

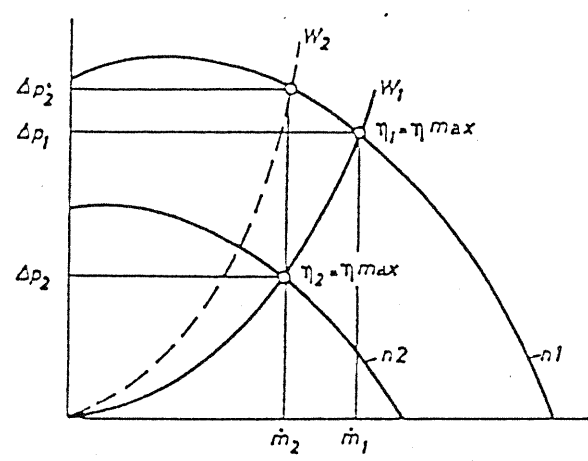


Bild 3: Kennlinie eines Radialventilators
Drosselregelung mit zwei Drehzahlen

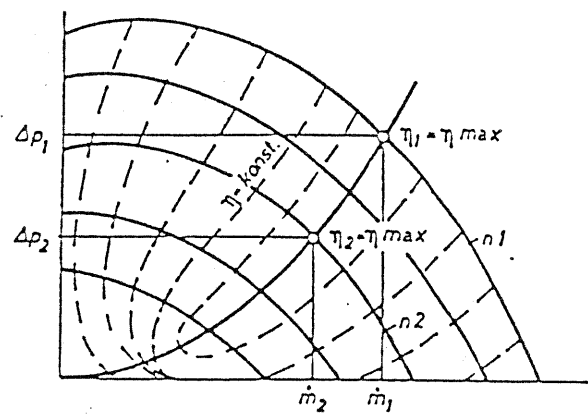


Bild 5: Kennlinienfeld eines Radialventilators
Drehzahlregelung

Abb. 2 bis 5 zeigen Regelkurven von Radialventilatoren mit dem Massenstrom $\dot{m} = \rho \dot{V} (\text{kg}/\text{sek})$ als Ordinate und dem Gesamtdruck Δp_g (Pa) als Abszisse. Es wird von konstanter Dichte ρ (kg/m^3) ausgegangen.

Bei Drosselung, Abb. 2, wird die Widerstands-parabel $W_1 = k \cdot \dot{m}^2$, wo k eine Konstante ist, mit z. B. der Widerstandparabel W_2 ersetzt. Dieses ist eine denkbar unwirtschaftliche Art der "Regelung". Wenn der Ventilator vorher nahe seines maximalen Wirkungsgrades gearbeitet hat, gilt für den neuen Betriebspunkt, daß η' kleiner als η_{max} ist. Ein großer Druckanteil $\Delta p'_2 - \Delta p_2$ muß in der Drossel vernichtet werden. Der effektive Wirkungsgrad bezogen auf den Nutzdruck fällt von

$$\eta_{max} \text{ z. B. } 80\% \text{ auf } \frac{\Delta p_2}{\Delta p'_2} \cdot \eta'; \text{ z. B. } 25\% \text{ im gezeigten Beispiel}$$

Diese Form der "Regelung" ist in Kälteanlagen sinnlos. Auch die in der Drossel vernichtete Leistung wird in Wärme umgesetzt. Bei Axialventilatoren steigt außerdem der Leistungsbedarf bei Drosselung ohne Strömungsabriß, im Gegensatz zum Radialventilator, wo der Leistungsbedarf fällt.

Gelegentlich verwendet man auch Bypassregelungen, die beim Radialventilator jedoch noch ungünstiger sind als eine Drosselregelung.

Bei Polumschaltung (Abb. 3) arbeitet man weiter bei maximalem Wirkungsgrad, kann aber nur 2 oder maximal 3 diskrete Betriebspunkte realisieren. Durch Verbindung mit einer Drallregelung kann jedoch eine kontinuierliche Regelkurve erreicht werden.

Abb. 4 zeigt die Regelkurve, die aus der Verwendung eines Drallreglers resultiert. Bei kleinen Volumenstromvariationen ist dieses eine wirtschaftliche Regelmethode. Bei großem erforderlichen Regelbereich sollte sie mit Polumschaltung kombiniert werden. Die Wirkung des Drallreglers beruht darauf, daß die Luft einen Vordrall in Drehrichtung erhält. Dabei ändern sich die Strömungsverhältnisse im Rad und es fördert weniger Luft.

Sowohl die Polumschaltung wie die Stellung von Drallreglern sind gut elektrisch zu steuern.

Abb. 5 zeigt das Verhalten bei Drehzahlregelung. Der Ventilator arbeitet praktisch immer bei seinem optimalen Wirkungsgrad. Die Regelkurve ist perfekt, so wird z. B. bei 50 % des Massenstromes nur $0,5 \cdot 0,5^2 = 0,125$ der Voll-Lastleistung aufgenommen, wozu natürlich die elektrischen Verluste des Reglers addiert werden müssen.

Die Drehzahlregelung erfolgt heute fast ausschließlich mit Thyristoren oder mit variablen Keilriementrieben. Keilriementriebe sind relativ einfach bei Radialventilatoren, aber auch bei Axialventilatoren möglich, ihre Leistung ist allerdings auf ca. 30 kW begrenzt.

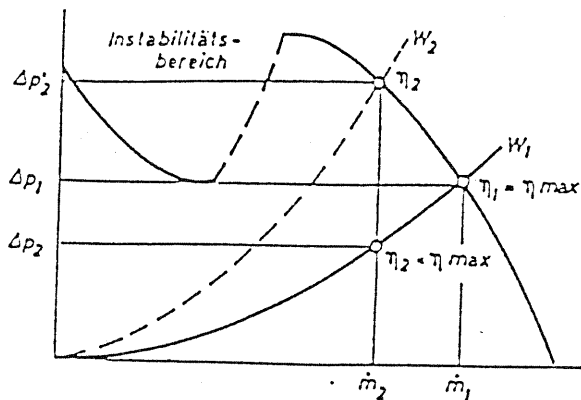


Bild 6: Kennlinie eines Axialventilators
Drosselregelung mit konstanter Drehzahl

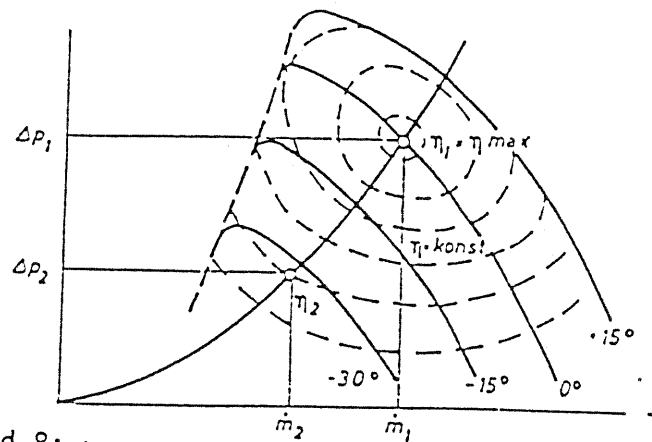


Bild 8: Kennlinienfeld eines Axialventilators
Drallregelung mit konstanter Drehzahl

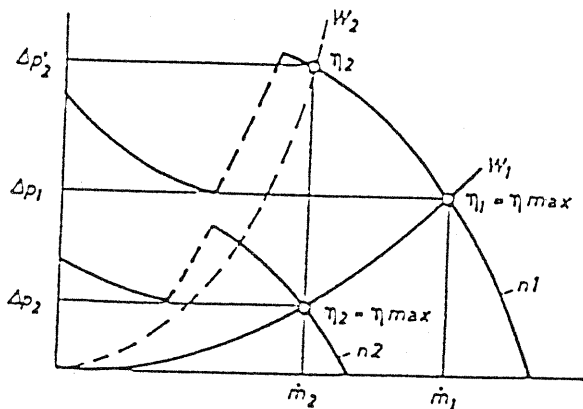


Bild 7: Kennlinien eines Axialventilators
Drosselregelung mit zwei Drehzahlen

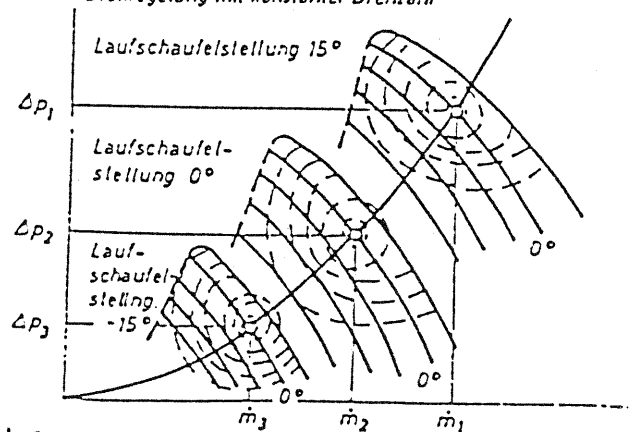


Bild 9: Kennlinienfeld eines Axialventilators
Drallregelung mit konstanter Drehzahl, jedoch verschiedener Laufschaufelstellungen

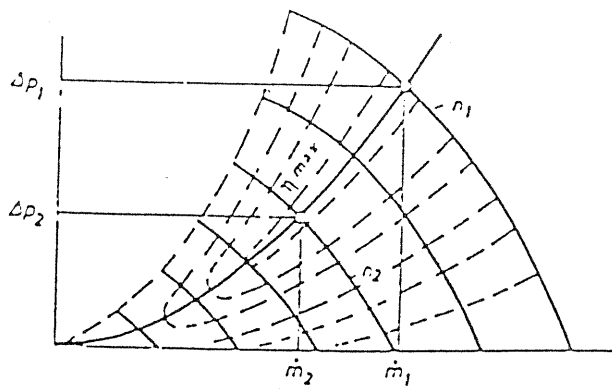


Bild 10: Kennlinienfeld eines Axialventilators
Drehzahlregelung

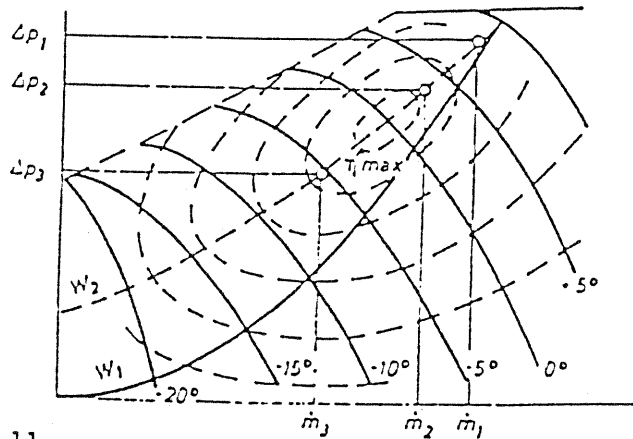


Bild 11: Kennlinienfeld eines Axialventilators
Laufschaufelverstellung mit konstanter Drehzahl

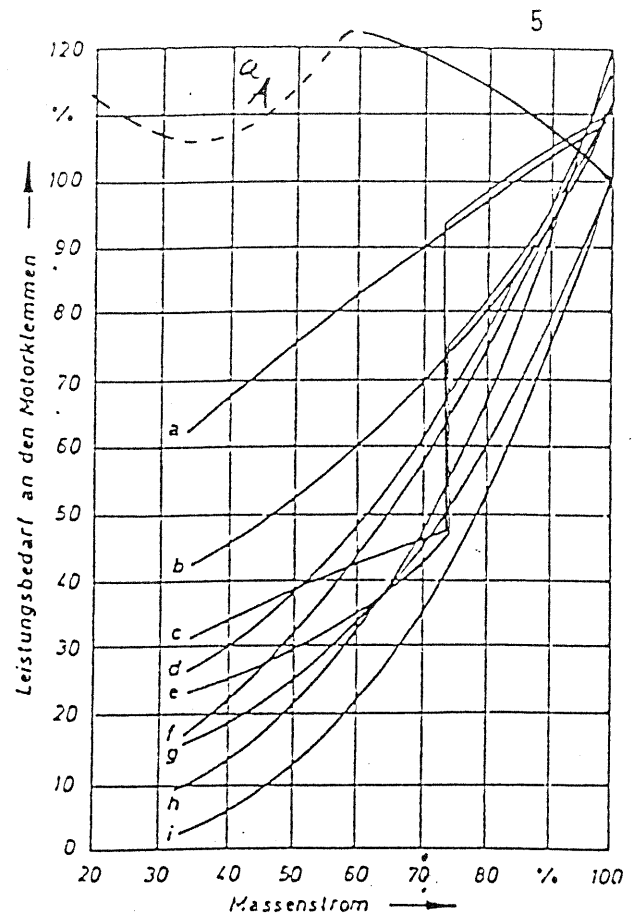


Abb. 12. Teillast-Leistungsbedarf von Ventilatoren
bei verschiedener Regelung

VERGLEICH VERSCHIEDENER REGELVERFAHREN

Abb. 6 - 11 zeigen die Regelkurven von Axialventilatoren mit steil angestellten Schaufeln, so daß im Instabilitätsbereich Strömungsabriß auf der Unterdruckseite des Profils eintritt. Neben den bereits vom Radialventilator bekannten Regelverfahren kommt hier eine weitere Variante vor, die Schaufelwinkerverstellung (Abb. 11). Diese kann mit Drallregelung Abb. 9, oder noch besser mit Polumschaltung kombiniert werden. In der Praxis hat sich das im Lauf verstellbare Rad bei Schiffskühlanlagen allerdings nicht durchsetzen können.

Auch beim Axialventilator ist die Drehzahlregelung das absolut günstigste Regelverfahren. Dreifache polumschaltbare Drehstrommotoren können eine relativ gute Annäherung an die kontinuierliche Regelkurve darstellen, besonders wenn das gekühlte Gut einen Intermittenzbetrieb zuläßt.

Abb. 12 zeigt einen Vergleich des Leistungsbedarfes der verschiedenen Regelmethoden für einen Radialventilator. Zugefügt wurde die Kurve des Axialventilators a_A , die sich wesentlich vom Radialventilator unterscheidet.

Die Regelkurven sind wie folgt gekennzeichnet:

- a_A) Drosselregelung mit einer Drehzahl, Axialventilator
- a) Drosselregelung mit einer Drehzahl, Radialventilator
- b) Drallregelung mit einer Drehzahl
- c) Drosselregelung mit zwei Drehzahlen
- d) Drehzahlregelung mit Schleifringläufermotor
- e) Drallregelung mit zwei Drehzahlen
- f) Drehzahlregelung mit Turbokupplung
- g) Laufschaufelverstellung, Axialventilator
- h) Drehzahlregelung mit Kommutator-Motor
- i) Drehzahlregelung mit Thyristoren (nur Leistungsbedarf des Ventilators)

Schleifringläufermotoren, regelbare Turbokupplungen und Kommutatormotoren stellen lediglich verschiedene Methoden der Drehzahlregelung dar. Sie werden wahrscheinlich auch in Zukunft kaum eine Rolle spielen, da sie für den Schiffsbetrieb gewisse Nachteile bieten. Die Drehzahlregelung über die Spannung wurde nicht dargestellt, da sie bei der Größe der Maschinen zu überhöhten Rotortemperaturen führen würde.

Die Überlegenheit der Drehzahlregelung mit Thyristoren ist eindeutig sichtbar, leider ist diese Lösung auch die teuerste. Bei Axialventilatoren ist eine relativ gute Annäherung möglich durch Reihenschaltung von 2 zweifach polumschaltbaren Axialventilatoren. Dadurch können zwischen Null und Vollast 6 verschiedene Volumenströme gefahren werden.

Diese Möglichkeit gibt es nicht bei Radialventilatoren. In den Fällen, wo Intermittenzbetrieb möglich ist, erhält man jedoch ebenfalls eine recht gute Regelkurve, in Abb. 12 a. Hier wurde von den synchronen Drehzahlen 1800, 1200, 900 min^{-1} ausgegangen. Wird z. B. über ein gewisses Zeitintervall 80 % Massenstrom benötigt, wird der Ventilator 39 % der Zeit bei voller Drehzahl betrieben und 61 % bei 0,67 x volle Drehzahl, d. h. bei 1200 min^{-1} mit häufigen Umschaltungen.

Im Bereich von 50 - 100 % Massenstrom, wo die größten Einsparungsmöglichkeiten liegen, ist diese Kurve kaum schlechter als die Thyristorkurve zuzüglich den unbekanntem Verlusten im Regler. Lediglich unter 50 % Massenstrom ist der Leistungsbedarf merkbar höher. Da die Leistung aber schon sehr niedrig ist, 12,5 % der Voll-Last, spielt das keine so große Rolle. Will man eine Abschaltung nicht zulassen, ergibt sich unterhalb 50 % die gestrichelte Kurve. Diese Betriebsart setzt natürlich voraus, daß Pendelungen im Gesamtsystem einschließlich Kältekreis zu vermeiden sind.

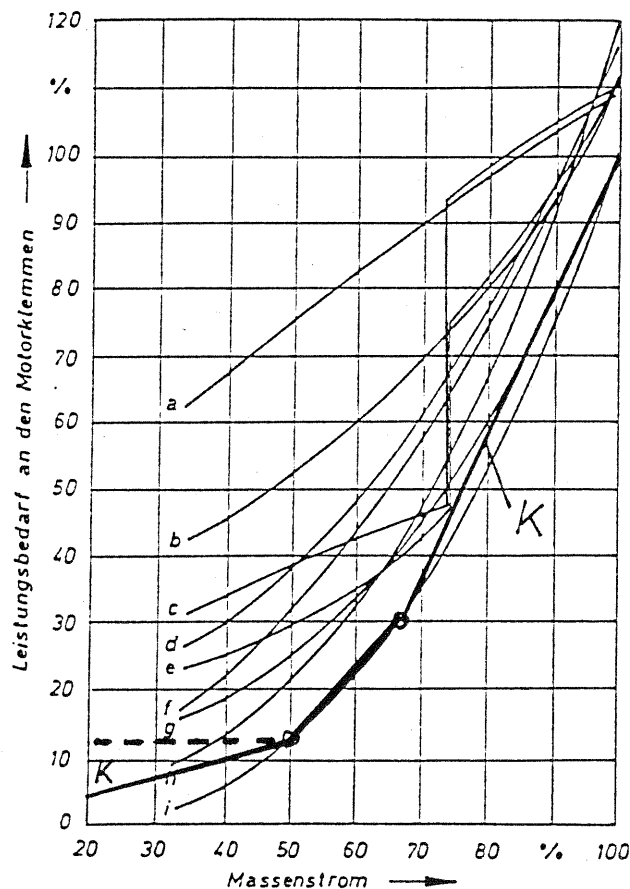


Bild 12a

Kurve K:
Polumschaltbarer Ventilator im Intermittenzbetrieb

Zusammenfassung

Die beste Regelmöglichkeit des Luft-Volumenstromes ist die Drehzahlregelung. Diese ist durch Thyristorregelung oder drehzahlregelbare Keilriementriebe möglich.

Eine gute Approximation ist durch die Reihenschaltung mehrfach polumschaltbarer Axialventilatoren möglich. Bei Radialventilatoren ist oberhalb von 50 % des Massenstromes eine relativ gute Regelung durch Intermittenzbetrieb von dreifach polumschaltbaren Ventilatoren möglich.

SCHRIFTTUM

- 1) Alders, Marine refrigeration manual
Rotterdam Marine Chartering agents
- 2) Idelschik, Handbook of Hydraulic
Resistance, Springer
- 3) Recknagel Sprenger Hönnmann, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik,
Oldenbourg
- 4) VGB-Richtlinien
VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerke
- 5) Munton & Stolt, Refrigeration at Sea
Applied Science Publishers, London