



(12)

# PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 1215/93

(51) Int.Cl.<sup>6</sup> : F03B 15/06

(22) Anmeldetag: 21. 6.1993

(42) Beginn der Patentdauer: 15. 9.1997

(45) Ausgabetag: 25. 5.1998

(30) Priorität:

23. 6.1992 DE 4220255 beansprucht.

(56) Entgegenhaltungen:

DE 3601289A DE 17031268 US 4794544A

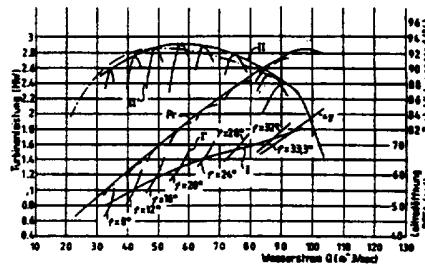
(73) Patentinhaber:

J.M. VOITH GMBH  
D-7920 HEIDENHEIM (DE).

## (54) VERFAHREN ZUM OPTIMIEREN DES WIRKUNGSGRADES EINES MASCHINENSATZES MIT EINER TURBINE UND EINEM GENERATOR

(57) Bei einem Verfahren zum Optimieren des Wirkungsgrades eines Maschinensatzes mit einer doppeltregulierten Turbine und einem Generator wird zunächst durch Versuchsreihen der Zusammenhang zwischen dem Wirkungsgrad  $\eta$ , dem Durchfluß  $Q$ , der variablen Fallhöhe  $H$ , der Leitradöffnung  $\Delta y$  und der Laufradöffnung  $\phi$  an der Modellmaschine bestimmt, woraus sich die Modell-Optimalkurve ergibt, und danach der optimale Wirkungsgrad für einen Arbeitspunkt der Großausführung ermittelt.

Um die Optimierung einfacher und schneller durchführen zu können, werden ausgehend von der Modell-Optimalkurve solche Änderungen der Leitradöffnung  $\Delta y$  und der Laufradöffnung  $\phi$  an der Großausführung vorgenommen, daß der hierbei konstante Durchfluß der Modellmaschine auch für die Großausführung als konstant vorausgesetzt wird, und wird durch Vergleich der abgegebenen Leistungen vor und nach der Änderung schrittweise der  $\Delta y/\phi$ -Arbeitspunkt mit optimalem Wirkungsgrad festgestellt.



B

AT 403 722

AT

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Optimieren des Wirkungsgrades eines Maschinensatzes mit einer Turbine und einem Generator gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1. Dabei handelt es sich um eine sogenannte doppeltregulierte Turbine. Dies bedeutet, daß hierbei der Wirkungsgrad optimiert wird durch Einstellen der Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  und gleichzeitig der Laufradöffnung  $\phi$ . Dabei ergibt sich der Wirkungsgrad

- 5 bekanntlich aus dem Verhältnis zwischen der vom Generator abgegebenen elektrischen Leistung zur zugeführten hydraulischen Leistung. Dabei läßt sich die an den Klemmen des Generators abgegebene elektrische Leistung verhältnismäßig einfach messen. Hingegen ist es, insbesondere bei Großausführungen, sehr aufwendig, die zugeführte hydraulische Energie zu ermitteln, da hierzu in irgendeiner Weise der Durchfluß gemessen werden muß.

- 10 Dieses Verfahren ist seit langer Zeit bekannt und wurde beispielsweise in der Fachzeitschrift "Die Wasserwirtschaft", Ausgabe 1954, Heft Nr. 4, Seite 104 - 105 in dem Artikel "Vereinfachtes Verfahren zum Einstellen der Kaplan-turbinen auf besten Wirkungsgrad" beschrieben.

In der Praxis ermittelt man die Kurve optimalen Wirkungsgrades an der Modellmaschine, die bei Großturbinen vor der Herstellung der Großausführung gebaut wird. Zu diesem Zweck wird zunächst für die 15 Modellmaschine eine Optimalkurve des Wirkungsgrades für verschiedene Fallhöhen erstellt. Dabei geht man wie folgt vor: Bei ein und derselben Fallhöhe wird die Laufradöffnung  $\phi$  konstant gehalten, und es wird die Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  variiert. Hieraus gewinnt man eine Vielzahl von steil ansteigenden Einzelkurven konstanter Laufradöffnung  $\phi$ . Gleichzeitig ermittelt man den Wirkungsgrad. Dies führt zu der Aussage, für welche Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  bei einer bestimmten Laufradöffnung  $\phi$  der Wirkungsgrad einen Maximalwert 20 erreicht. Das Ergebnis ist der sogenannte optimale  $\Delta\gamma$ - $\phi$ -Zusammenhang in Gestalt einer Kurvenschar optimaler Leitradöffnung über der Laufradöffnung mit der Fallhöhe als Parameter, der im Turbinenregler die Grundlage zur Einstellung der Turbinenöffnungen darstellt.

In der Praxis ergibt sich jedoch eine Abweichung zwischen dem Verhalten der Modellmaschine einerseits und jenem der Großausführung andererseits. Aus diesem Grunde ist es notwendig, an der 25 Großausführung eine Anpassung vorzunehmen. Man geht somit zwar von den Kurven der Modellmaschine aus, führt aber bei der Großausführung mit Hilfe von sogenannten Indexmessungen eine Optimierung durch. Diese ist umständlich, zeitaufwendig und teuer, da sie zwangsläufig ein Messen des Durchflusses notwendig macht.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, das genannte Optimieren der an der Modellmaschine gewonnenen Kurven - optimaler  $\Delta\gamma$ - $\phi$ -Zusammenhang - derart zu gestalten, daß es schneller, einfacher und weniger aufwendig als bisher durchgeführt werden kann.

Diese Aufgabe wird durch die kennzeichnenden Merkmale von Anspruch 1 gelöst.

Durch die Erfindung wird ein Modul zur Selbstoptimierung des  $\Delta\gamma$ / $\phi$ -Zusammenhangs geschaffen. Dieses Modul sorgt dafür, daß die Turbine in jedem Betriebszustand die maximal mögliche Leistung bei 35 optimalem Wirkungsgrad abgibt.

Das Modul basiert auf der Grundidee, Leitrad- und Laufradöffnung so lange zu verändern, bis ein Maximum der Leistung und damit ein Maximum des Wirkungsgrades aufgefunden ist. Dabei werden Leitradöffnung und Laufradöffnung derart verfahren, daß sich während der Suchbewegung der Durchfluß und damit die hydraulische Eingangsleistung praktisch nicht ändert. Zu diesem Zwecke werden aus dem 40 Turbinenkennfeld abgeleitete Kenngrößen herangezogen, die hauptsächlich von der Schaufelgeometrie abhängen und die sich deshalb zwischen Modellmaschine und Großausführung nicht oder nicht wesentlich voneinander unterscheiden.

Das heißt also, es läßt sich an der Modellmaschine bei gegebener Fallhöhe  $H$  eine Zuordnung  $f$  von Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  zu Laufradöffnung  $\phi$  derart finden, daß der Durchfluß  $Q$  konstant bleibt, also daß  $\Delta\gamma = f(\phi)$  mit  $H = \text{konstant}$  und  $Q = \text{konstant}$  gilt.

Da diese Zuordnung  $f$  im wesentlichen durch die Schaufelgeometrie der Turbine bestimmt ist, ist sie mit großer Präzision von der Modellmaschine auf die Großausführung zu übertragen. - Wie bekannt ist, gilt dieser Schluß für die Übertragung der Wirkungsgradoptimalkurve von Modellmaschine auf Großausführung nicht. -

50 Es ist damit also die Möglichkeit eröffnet, bei gegebener Fallhöhe  $H$  die Laufradöffnung  $\phi$  und Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  koordiniert durch die Funktion  $\Delta\gamma = f(\phi)$  so zu verändern, daß der Durchfluß  $Q$  konstant bleibt, also auch die Eingangsleistung in die Turbine konstant bleibt.

Ändert sich bei dieser Einstellungsänderung von  $\Delta\gamma$  und  $\phi$  nun die leicht und genau zu messende Ausgangsleistung am Generator, so entspricht dies auch einer Änderung des Wirkungsgrades der Turbine 55 mit gleichem Vorzeichen. Es ist auf diese Weise also eine schrittweise Näherung an den optimalen Wirkungsgrad der Großausführung möglich, ohne daß in der Großausführung der Durchfluß  $Q$  gemessen werden muß.

Zur Verwirklichung der Erfindung geht man von der an der Modellmaschine erstellten Optimalkurve aus, nämlich der Kurve optimaler Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  über dem Durchfluß beziffert mit der Laufradöffnung  $\phi$ . Ausgehend von einem ersten Punkt fährt man auf der genannten Kurve unter Veränderung des Laufradwinkels  $\phi$  eine bestimmte Strecke entlang, bis zu einem zweiten Punkt. Nun verläßt man die Kurve der optimalen Leitradöffnung  $\Delta\gamma$ , behält jedoch die dort gegebene Laufradöffnung  $\phi$  bei, und zwar so lange, bis man zu einem dritten Punkt gelangt, bei dem der Durchfluß wieder denselben Wert hat, wie bei dem ersten Punkt.

Dabei dient der zweite Punkt nur als Rechenhilfsmittel zur Erleichterung der Berechnung von Punkt 3. Der Arbeitspunkt der Maschine wird direkt von Punkt 1 nach Punkt 3 verändert. Anschließend vergleicht 10 man, ob sich die elektrische Leistung durch die Veränderung der Turbinenöffnungen vergrößert hat. Falls ja, wird die Veränderung der Laufradöffnung in dieselbe Richtung vergrößert und auf die oben beschriebene Weise ein neuer Arbeitspunkt ermittelt. Falls nicht, wird die Veränderung der Laufradöffnung entsprechend verkleinert. Nach einer verhältnismäßig geringen Zahl von Suchpunkten läßt sich somit die für den jeweiligen Durchfluß und die jeweilige Fallhöhe optimale Kombination von Leitrad- und Laufradöffnung 15 ermitteln.

Damit erspart man sich das mühevolle aufwendige und nicht immer genaue Messen des Durchflusses. Alle notwendigen Meßeinrichtungen sind bereits vorhanden, daß keine zusätzlichen Vorkehrungen mehr getroffen werden müssen. Die elektrische Leistung ist ebenfalls gegeben. Deshalb ist die erfindungsgemäße Lösung äußerst preiswert.

Ein besonderer Vorteil des oben beschriebenen Verfahrens besteht darin, daß selbst größere Verschiebungen der Kurven Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  über dem Durchfluß  $Q$  bei konstanter Laufradöffnung  $\phi$  keinerlei Einfluß auf die Funktion des Suchsystems haben. Voraussetzung ist lediglich, daß die Steigungen dieser Kurven genau bekannt sind.

Das Optimierungsmodul berücksichtigt unter anderem folgende Überlegungen:

Die  $\Delta\gamma/\phi$ -Korrektur darf nicht zu häufig geschehen und auch nicht mit zu großen Ausschlägen arbeiten, um

- a - die Anlage ruhig zu halten und
- b - zu frühen Verschleiß der Regeleinrichtungen zu vermeiden.

Hierfür sind mehrere Vorkehrungen getroffen worden.

Das Suchsystem ist nicht dauernd aktiv. Sobald für einen Arbeitspunkt das Optimum gefunden ist, bleibt das System so lange in Ruhe, bis sich die Maschine in einem neuen Arbeitspunkt befindet.

Zu einer Korrektur des voreingestellten  $\Delta\gamma/\phi$ -Zusammenhangs genügt die Aufzeichnung eines relativ groben Rasters an Arbeitspunkten, zwischen denen interpoliert werden kann.

Den Zeitpunkt, wann genügend Daten vorhanden sind, kann der Benutzer selbst bestimmen. Fehlende 35 Meßpunkte werden durch Interpolation aufgefüllt.

Die notwendigen Sprünge in den  $\Delta\gamma/\phi$ -Bewegungen können so klein gehalten werden, daß sie beim normalen Betrieb der Anlage kaum erkennbar sind. Im übrigen ändert sich durch die durchflußneutrale Suchbewegung ohnehin nichts am Zufluß bzw. Abfluß der Anlage.

Als Option ist vorgesehen, daß das System erkennt, ob ein Arbeitspunkt bereits optimiert wurde. Das 40 heißt, daß die gespeicherten Korrekturwerte automatisch eingestellt werden und ein erneuter Suchvorgang unterbleibt. Der Suchvorgang, der zum Auffinden und Korrigieren der notwendigen Arbeitspunkte führt, nennt sich Optimierungsphase.

Eine weitere Optimierungsphase kann sowohl manuell wie auch automatisch eingeleitet werden. Im automatischen Modus lassen sich die Abstände, in denen die einzelnen Optimierungsphasen eingeleitet 45 werden, (z.B. 1 Jahr) programmieren.

Das Optimierungsmodul erlaubt es außerdem, gezielt ausgewählte Betriebspunkte auf Optimierung zu untersuchen, indem die Turbine in einen bestimmten Betriebspunkt gefahren wird und das Modul durch einen "Single-Shot" die Korrekturspeicherung durchführt.

Die langjährige Aufnahme der Veränderung im Maschinenverhalten prädestiniert das Optimierungsmodul auch als ein Gerät für den Einsatz mit Diagnosefunktionen.

Es versteht sich, daß der Generator in verschiedenen Ausführungsformen Verwendung finden kann, beispielsweise als Synchronmaschine.

Bei der Ermittlung des optimalen  $\Delta\gamma/\phi$ -Zusammenhangs im Modellversuch wird auf den Wirkungsgrad des Generators keine Rücksicht genommen. An sich stellt dies einen Fehler dar, der jedoch vernachlässigbar ist.

Wird hingegen gemäß der Erfindung der oben erwähnte Suchvorgang durchgeführt, so wird der Wirkungsgrad des Generators berücksichtigt.

Die Erfindung ist anhand einiger Diagramme näher erläutert.

Darin zeigt Figur 1 vor allem zwei Kurven:

Kurve I zeigt den Verlauf der optimalen Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  über dem Durchfluß Q. Wie man sieht, wird Kurve I von Kurven I' geschnitten. Diese Kurven sind Kurven konstanter Laufradöffnung  $\phi$  bei unterschiedlichen Leitradöffnungen  $\Delta\gamma$ .

- 5 Fur diese Kurven I' werden die Wirkungsgrade ermittelt. Dabei entstehen sogenannte Propellerkurven II'. Die Maximalwerte dieser Propellerkurven liegen in der Kurve II, die den Verlauf des optimalen Wirkungsgrades darstellt. Zu den genannten Maximalwerten des Wirkungsgrades gehört eine optimale Kombination der Laufradöffnung und der Leitradöffnung.

- 10 Figur 2 zeigt eine Kurvenschar von drei Kurven als Ergebnis der Messungen, die in Figur 1 dargestellt sind. Diese drei Kurven zeigen eine optimale Kombination von Leitradwinkel  $\Delta\gamma$  über dem Laufradwinkelf  $\phi$ , und zwar jeweils für eine bestimmte Fallhöhe.

Figur 3 zeigt wiederum Kurve I mit einer Mehrzahl von diese schneidenden Kurven I' (siehe Figur 1). Hierdurch wird veranschaulicht, in welcher Weise Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  und Laufradöffnung  $\phi$  gemeinsam derart verändert werden, daß die Veränderung durchflußneutral ist.

- 15 Man erkennt im Diagramm drei Punkte, nämlich 1, 2 und 3 Punkt 1 stellt die Ausgangssituation dar, wobei einer bestimmten Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  eine bestimmte Laufradöffnung  $\phi$  und ein bestimmter Durchfluß Q zugeordnet sind - siehe Tabelle im Diagramm.

- 20 Sodann wird durch Änderung der Laufradöffnung  $\phi$  auf der Modell-Optimalkurve I der genannte zweite Punkt aufgesucht, dem wiederum eine zweite Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  und eine zweite Laufradöffnung  $\phi$  sowie ein zweiter Durchfluß zugeordnet sind.

Schließlich wird die Modell-Optimalkurve I verlassen, und unter Beibehalten der zweiten Laufradöffnung  $\phi$  sowie bei Veränderung der zweiten Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  der genannte dritte Punkt ermittelt. Dieser hat denselben Durchfluß, wie der erste Punkt.

- 25 Figur 4 ist ein Blockschaltbild des erfundungsgemäßen Moduls. Man erkennt das Optimierungsmodul, das die betreffenden Veränderungen der Werte der Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  und der Laufradöffnung  $\phi$  nämlich  $d\Delta\gamma$  und  $d\phi$ , den aus dem Regler kommenden Werten aufschaltet.

### Patentansprüche

- 30 1. Verfahren zum Optimieren des Wirkungsgrades eines Maschinensatzes mit einer doppeltregulierten Turbine und einem Generator wobei zunächst durch Versuchsreihen der Zusammenhang zwischen dem Wirkungsgrad  $\eta$ , dem Durchfluß Q, der variablen Fallhöhe H, der Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  und der Laufradöffnung  $\phi$  an der Modellmaschine bestimmt wird, woraus sich die Modell-Optimalkurve - also die optimale Leitradöffnung als Funktion von Durchfluß und Laufradöffnung - für die jeweilige Fallhöhe ergibt und danach der optimale Wirkungsgrad für einen Arbeitspunkt der Großausführung ermittelt wird, dadurch gekennzeichnet, daß in einem ersten Verfahrensschritt ausgehend von der Modell-Optimalkurve solche Änderungen der Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  und der Laufradöffnung  $\phi$  an der Großausführung vorgenommen werden, daß der hierbei konstante Durchfluß der Modellmaschine auch für die Großausführung als konstant vorausgesetzt wird und daß in einem zweiten Verfahrensschritt durch Vergleich der abgegebenen Leistungen vor und nach der Änderung schrittweise der  $\Delta\gamma/\phi$ -Arbeitspunkt mit optimalem Wirkungsgrad festgestellt wird.
- 35 2. Verfahren nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, daß der für die Großausführung gültige, tatsächliche Optimal-Zusammenhang durch Wiederholung des ersten und zweiten Verfahrensschrittes für verschiedene Fallhöhen und Durchflüsse bestimmt wird.
- 40 3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß in einem ersten Verfahrensschritt auf der Modell-Optimalkurve ein erster Punkt (1) herausgegriffen wird, dem eine Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  (1), eine Laufradöffnung  $\phi$ (1) und ein Durchfluß Q (1) zugeordnet sind, daß in einem zweiten Verfahrensschritt durch Änderung der Laufradöffnung  $\phi$  auf der Modell-Optimalkurve ein zweiter Punkt (2) rechnerisch aufgesucht wird, der somit eine zweite Laufradöffnung  $\phi$ , eine zweite Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  und einen zweiten Durchfluß (2) aufweist,
- 45 4. Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß in einem dritten Verfahrensschritt durch Verlassen der Modell-Optimalkurve ein dritter Punkt (3) nochmals rechnerisch ermittelt wird und zwar unter Beibehalten der zweiten Laufradöffnung  $\phi$ (2) und unter Verändern der Leitradöffnung  $\Delta\gamma$ , so lange, bis der erste Durchfluß Q (1) - bezogen auf die

## AT 403 722 B

gemessenen Werte der Modellmaschine - wieder erreicht wurde und daß in einem vierten Verfahrensschritt  
die so gewonnene Laufradöffnung  $\phi$  und Leitradöffnung  $\Delta\gamma$  durch direktes Anfahren in der Großausführung eingestellt wird.

5

4. Verfahren nach Anspruch 1 bis 3 **dadurch gekennzeichnet**, daß bereits optimierte Arbeitspunkte gekennzeichnet werden und der Maschinensatz bei gleichen Randbedingungen ohne vorhergehende Optimierung direkt auf die optimierten Einstellungen gesetzt wird.

10

Hiezu 4 Blatt Zeichnungen

15

20

25

30

35

40

45

50

55

Fig.1

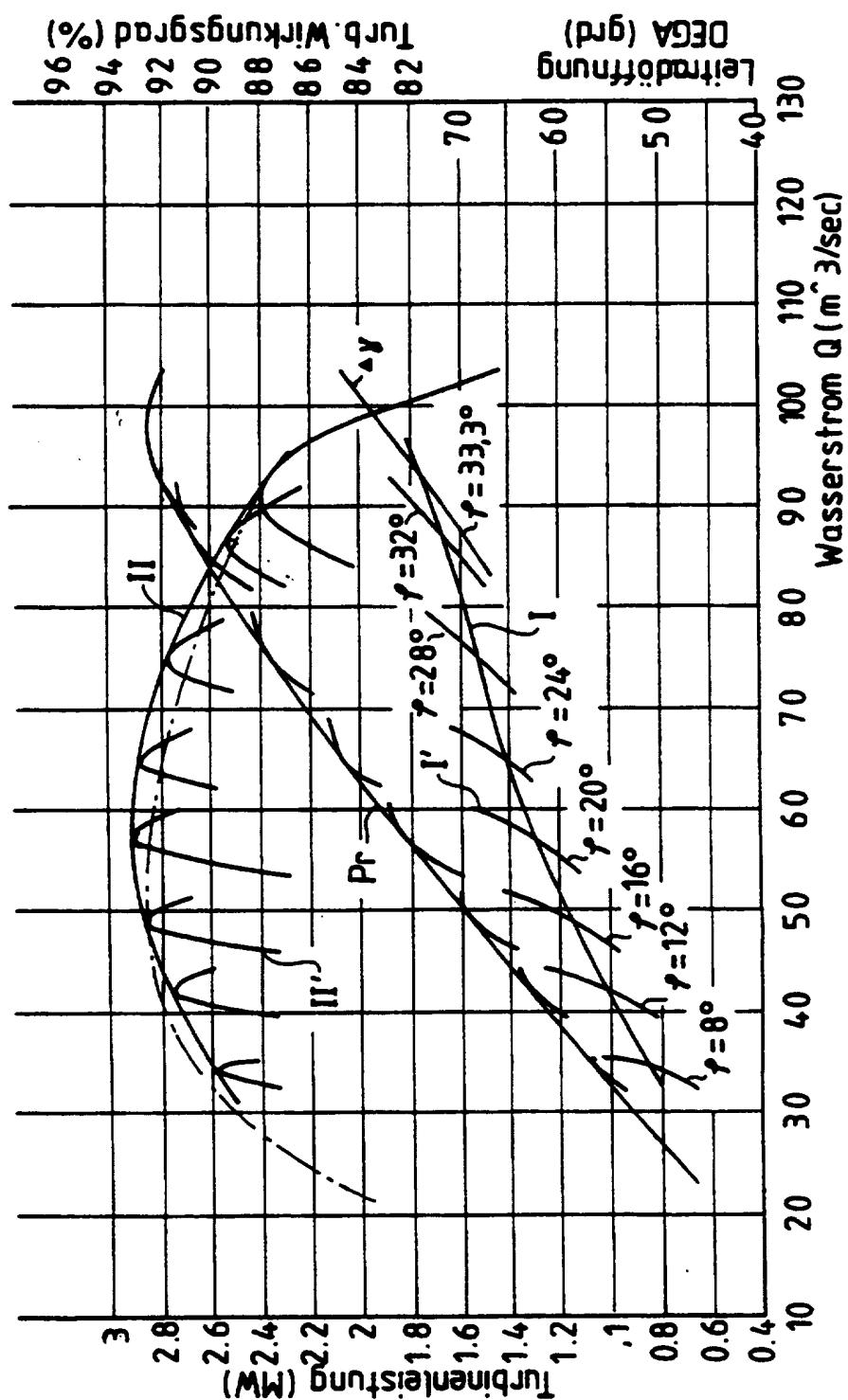


Fig.2

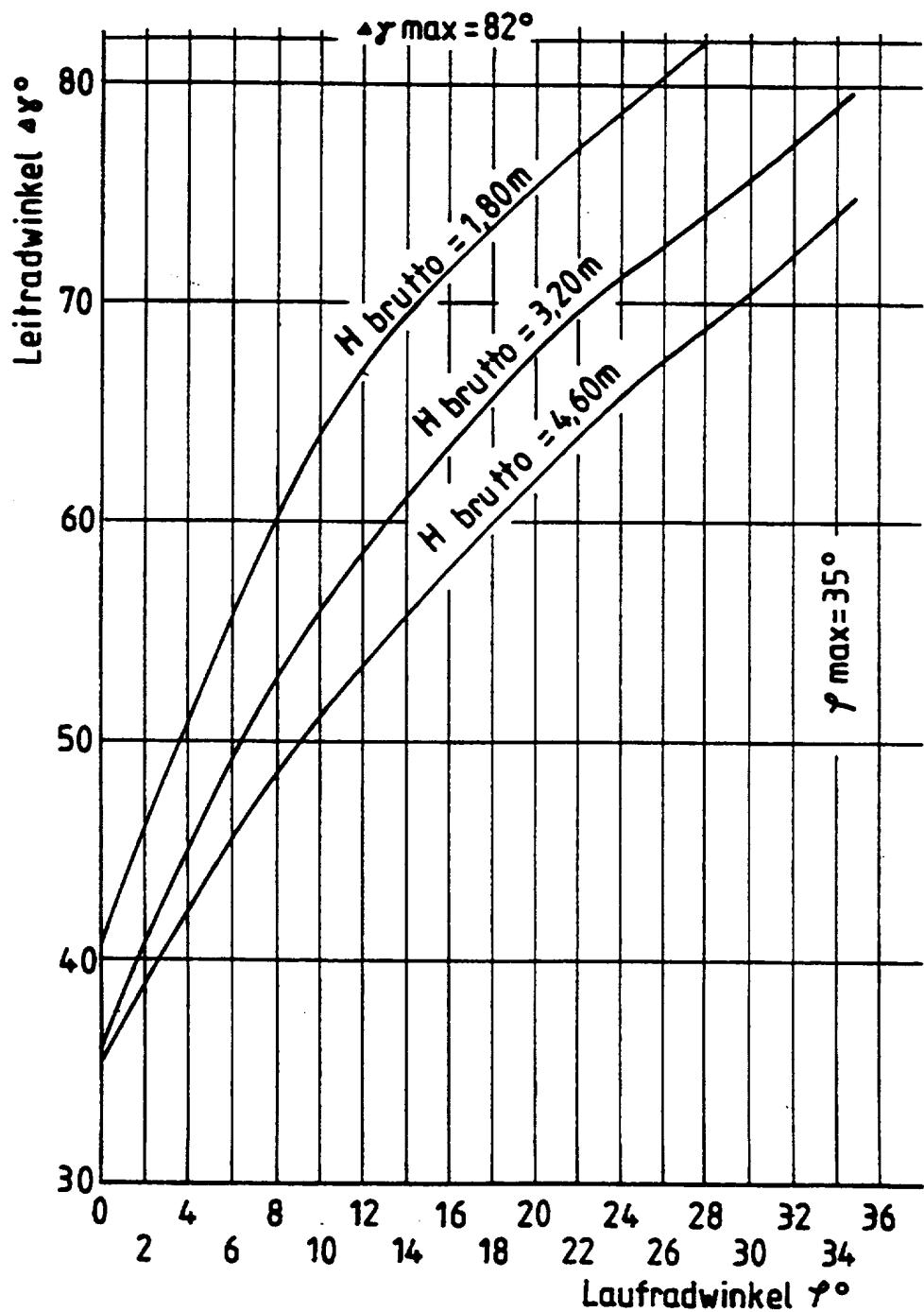


Fig.3

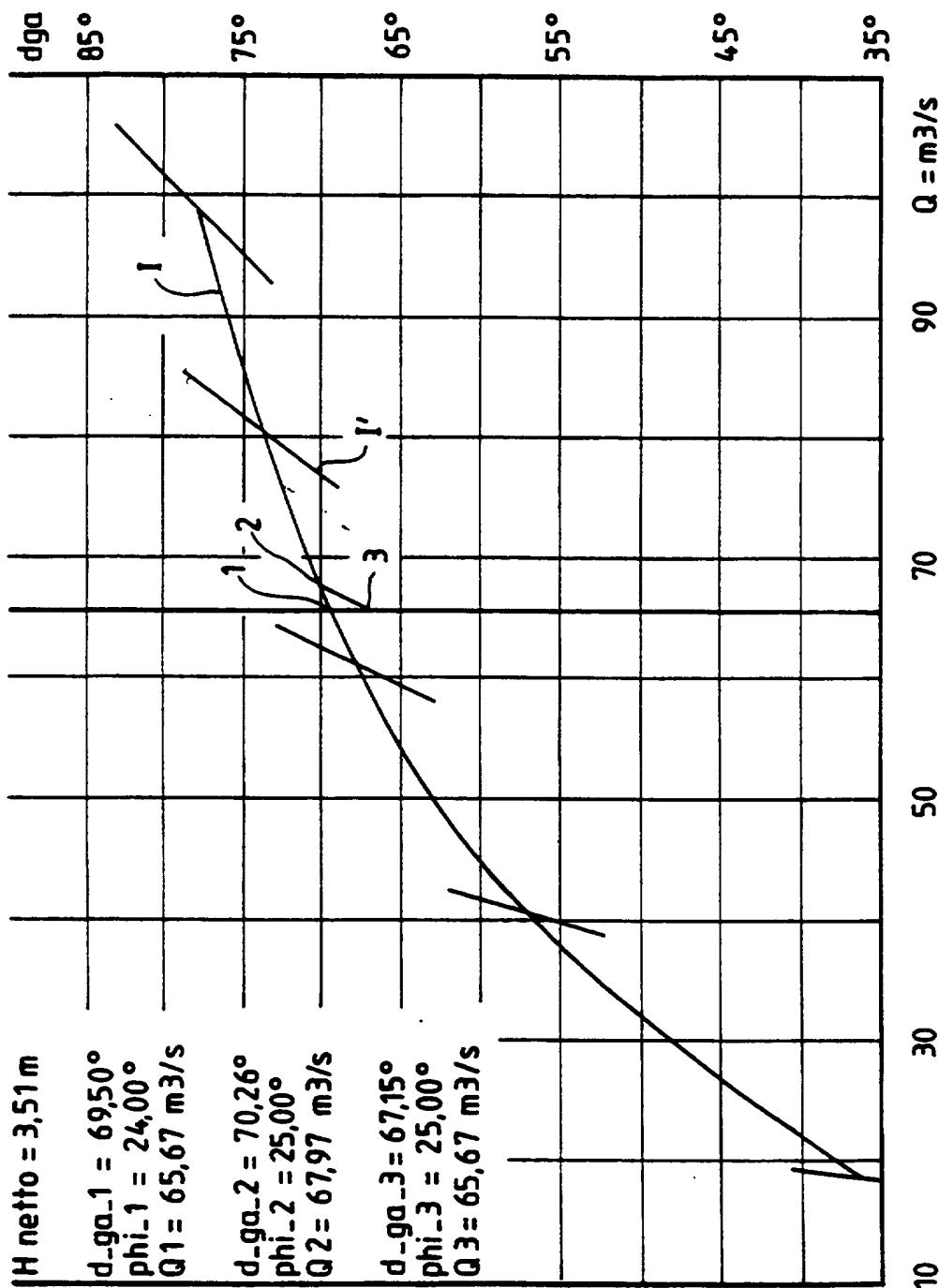


Fig.4

