

Zusammenfassung:

Verfahren zur Optimierung der Förderleistung einer Bohrloch-Fördervorrichtung umfassend eine im Bohrloch angeordnete Förderpumpe mit einer die Förderleistung bestimmenden und von einer Drehzahl der Förderpumpe abhängigen Fördergröße (Q, P) , bei dem vorgeschlagen wird, dass eine zeitabhängige, stetige Sollwertfunktion (Q_n, P_n) für die drehzahlgeregelte Fördergröße (Q, P) der Förderpumpe vorgegeben wird, wobei die Sollwertfunktion (Q_n, P_n) aus einem Konstantwert (Q_b, P_b) und einem zeitabhängigen Wert (Q_t, P_t) gebildet wird, und bei einer Unstetigkeit der gemessenen Fördergröße (Q_a, P_a) der Messwert (Q_{\max}, P_{\min}) der gemessenen Fördergröße (Q, P) zum Zeitpunkt (t_1) der ermittelten Unstetigkeit oder ein vorgegebener Prozentsatz dieses Messwerts $(f(Q_{\max}), f(P_{\min}))$ der neue Konstantwert (Q_b, P_b) der Sollwertfunktion (Q_n, P_n) ist. Mithilfe der erfindungsgemäßen Regelung kann die Förderleistung einer Bohrloch-Fördervorrichtung optimiert und die Förderpumpe hierfür in einem optimalen Betriebspunkt betrieben werden.

(Fig. 1)

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Optimierung der Förderleistung einer Bohrloch-Fördervorrichtung umfassend eine im Bohrloch angeordnete Förderpumpe mit einer die Förderleistung bestimmenden und von einer Drehzahl der Förderpumpe abhängigen Fördergröße, gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1.

Bohrloch-Fördervorrichtungen sind aus dem Stand der Technik in unterschiedlichen Ausgestaltungen bekannt. Derartige Fördervorrichtungen werden in Bohrlöchern verwendet und zur Förderung eines Fördermediums wie Öl oder dergleichen eingesetzt. Die Bohrloch-Fördervorrichtungen werden hierbei bis nahe dem Grund des Bohrlochs in das Bohrloch hinabgelassen und pumpen das zu fördernde Medium über eine durch das Bohrloch geführte Leitung zur Oberfläche. Die hierbei verwendete Pumpe wird im Bohrloch angeordnet und üblicherweise mittels eines elektrischen Antriebs angetrieben. Als Förderpumpen finden insbesondere Exzentrerschneckenpumpen („Progressive Cavity Pumps“, PCP) sowie Zentrifugalpumpen („Electric Submersible Pumps“, ESP) Einsatz.

Die wichtigste Größe zur Beurteilung der Produktivität eines Ölfeldes ist die Förderrate, die die Fördermenge pro Zeit angibt. Das Ölfördermaximum („maximum inflow rate“) ist die maximale Förderrate, die ein Ölfeld im Laufe seiner Bewirtschaftung erreichen kann. In der Regel steigt die Förderrate sehr schnell bis zum Erreichen des Fördermaximums an, und fällt danach relativ langsam und mehr oder weniger kontinuierlich wieder ab. Die Förderrate ist stark vom Lagerstättentyp abhängig. Hiervon wird im Folgenden die Förderleistung der Bohrloch-Fördervorrichtung unterschieden, die im Wesentlichen vom Betriebspunkt der Förderpumpe abhängt. Für den effizienten Betrieb einer Bohrloch-Fördervorrichtung muss die Förderleistung optimiert werden, indem die Förderpumpe optimal betrieben wird, nämlich im Bereich des Ölfördermaximums, beispielsweise bei etwa 80% des Ölfördermaximums. Das Ölfördermaximum eines bestimmten Bohrlochs ist aber nicht ohne weiteres bekannt und verändert

sich auch im Laufe der Betriebszeit. Es stellt sich daher die Frage, wie der optimale Betriebspunkt der Förderpumpe gefunden werden kann, wenn das aktuelle Ölfördermaximum nicht bekannt ist.

In herkömmlicher Weise ist es etwa bekannt, einen optimalen Betriebspunkt über Pumpenmodelle zu bestimmen. Hierbei wird versucht die Lagerstätte sowie die Förderpumpe bestmöglich in einem mathematischen Modell zu erfassen und den optimalen Betriebspunkt der Förderpumpe zu errechnen. Diese Modelle sind aber aufwändig und hängen in ihrer Genauigkeit von der genauen Bestimmung einer Vielzahl an Eingabeparameter ab, die aber mitunter nur schwer oder nur mit unzureichender Genauigkeit ermittelt werden können.

Es ist daher das Ziel der Erfindung die Förderleistung einer Bohrloch-Fördervorrichtung zu optimieren und die Förderpumpe hierfür in einem optimalen Betriebspunkt zu betreiben. Diese Optimierung soll vergleichsweise einfach und automatisierbar sein.

Diese Ziele werden durch die Merkmale von Anspruch 1 erreicht. Anspruch 1 bezieht sich auf ein Verfahren zur Optimierung der Förderleistung einer Bohrloch-Fördervorrichtung umfassend eine im Bohrloch angeordnete Förderpumpe mit einer die Förderleistung bestimmenden und von einer Drehzahl der Förderpumpe abhängigen Fördergröße, wobei erfindungsgemäß vorgeschlagen wird, dass eine zeitabhängige, stetige Sollwertfunktion für die drehzahlgeregelte Fördergröße der Förderpumpe vorgegeben wird, wobei die Sollwertfunktion aus einem Konstantwert und einem zeitabhängigen Wert gebildet wird, und bei einer Unstetigkeit der gemessenen Fördergröße der Messwert der gemessenen Fördergröße zum Zeitpunkt der ermittelten Unstetigkeit oder ein vorgegebener Prozentsatz dieses Messwerts der neue Konstantwert der Sollwertfunktion ist.

Bei einer Ausführungsform der Erfindung handelt es sich bei der Fördergröße um die Durchflussmenge einer

Exzentrerschneckenpumpe, wobei die erfindungsgemäß ermittelte Unstetigkeit als eine über einen vorgegebenen Zeitraum bestehende und eine vorgegebene Mindestgröße überschreitende Abweichung der gemessenen Durchflussmenge vom jeweils vorgegebenen Sollwert detektiert wird.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform handelt es sich bei der Fördergröße um den Ansaugdruck an der Ansaugseite einer Zentrifugalpumpe, wobei die Unstetigkeit als unstetiger Abfall des Pumpendrehmoments detektiert wird.

Gemäß einer weiteren Ausführungsvariante wird dabei der zeitabhängige Wert der Sollwertfunktion zum Zeitpunkt der ermittelten Unstetigkeit auf Null gesetzt. Zudem kann vorgesehen sein, dass der zeitabhängige Wert der Sollwertfunktion erst nach Ablauf einer Verzögerungszeitdauer nach dem Zeitpunkt der ermittelten Unstetigkeit bei Null beginnend dem Konstantwert hinzugefügt wird.

Als besonders einfache Sollwertfunktion kann etwa vorgesehen sein, dass der zeitabhängige Wert der Sollwertfunktion eine lineare Funktion ist. In diesem Fall zeigt sich ein sägezahnartiger Verlauf der Sollwertfunktion. Grundsätzlich könnten sich aber auch andere Verläufe als ein linearer Verlauf als geeignet erweisen.

Die Erfindung verwirklicht somit ein Regelverfahren, mit dem die Förderpumpe in einem optimalen Betriebspunkt betrieben wird. Dieses Regelverfahren schlägt einerseits geeignete Regelgrößen vor, um die Förderpumpe in einem optimalen Betriebspunkt zu betreiben, sowie Möglichkeiten der Detektion eines Ölfördermaximums im Zuge der Regelung. Für eine Exzentrerschneckenpumpe wird als Regelgröße die Durchflussmenge der Exzentrerschneckenpumpe vorgeschlagen, und für eine Zentrifugalpumpe der Ansaugdruck an der Ansaugseite der Zentrifugalpumpe. Als Stellgröße der erfindungsgemäßen Regelung dient jeweils die Drehzahl der Förderpumpe. Erfindungsgemäß wird für die Fördergröße eine zeitabhängige, stetige Sollwertfunktion für die drehzahlgeregelte Fördergröße

der Förderpumpe vorgegeben, etwa in Form einer linearen Sollwertfunktion, die aus einem Konstantwert und einem zeitabhängigen Wert gebildet wird, der zum Konstantwert addiert wird. Zum Start der Regelung kann bei einer konstanten Drehzahl zunächst abgewartet werden, bis sich die Fördergröße nicht mehr ändert. Dieser Messwert der Fördergröße kann als erster Konstantwert herangezogen werden. Für den zeitabhängigen Wert muss eine Steigung geeignet vorgegeben werden, die von der jeweiligen Fördersituation abhängt. Der zeitabhängige Wert der Sollwertfunktion für die Fördergröße kann durchaus langsam ansteigen, etwa über einen Tag oder mehrere Tage, oder auch länger, wobei die Fördergröße über Nachregelung der Drehzahl der Förderpumpe an den jeweiligen Sollwert angepasst wird. Der Messwert der Fördergröße wird daher der Sollwertfunktion zunächst folgen.

Die steigende Drehzahl der Förderpumpe ist dabei zunächst mit einer steigenden Förderleistung verbunden. Eine Exzentrerschneckenpumpe beispielsweise fördert pro Umlauf des Rotors ein konstantes Fördervolumen, das von der Pumpengröße abhängt. Eine 360°-Drehung bei freiem Auslauf ergibt dabei die volumetrische Fördermenge pro Umdrehung. Die Pumpenfördermenge lässt sich somit über die Drehzahl in annähernd linearer Weise verändern. Die tatsächliche Fördermenge ist aber auch vom sich einstellenden Gegendruck abhängig, sodass stets ein Anteil der Fördermenge von der Druck- zur Saugseite strömt. Diese „Schlupf-Verluste“ sind anhand der Kennlinie als Differenz zwischen dem theoretischen und dem tatsächlichen Förderstrom ersichtlich, sodass die Abhängigkeit der Pumpenfördermenge von der Drehzahl Abweichungen von einem linearen Verlauf zeigt. Äquivalentes gilt für die Zentrifugalpumpe („Electric Submersible Pumps“, ESP), jedoch mit quadratischem Zusammenhang, wobei die Abweichungen von der jeweiligen Pumpenkennlinie für die erfindungsgemäße Regelung weniger entscheidend sind, da die drehzahlabhängige Fördergröße, also die Durchflussmenge bei der Exzentrerschneckenpumpe und der Ansaugdruck bei der Zentrifugalpumpe, ohnehin gemessen und bei

Bedarf an den jeweils aktuellen Sollwert über entsprechende Einstellung der Drehzahl nachgeregelt werden.

Bei einem optimalen Betrieb einer Exzentrerschneckenpumpe würde die Drehzahl so gewählt werden, dass die Durchflussmenge der Förderpumpe dem Ölfördermaximum entspricht. Ein Überschreiten des Ölfördermaximums zeigt sich bei einer Exzentrerschneckenpumpe in einem scharfen Abfall („pump off“) der Durchflussmenge bei konstant bleibender Drehzahl. Bei einer Zentrifugalpumpe („Electric Submersible Pumps“, ESP) zeigt sich bei zunehmender Drehzahl zunächst ein abnehmender Ansaugdruck, der bei Überschreiten des Ölfördermaximums über einen unstetigen Übergang wieder ansteigt. Dieser Übergang korreliert bei der Zentrifugalpumpe neben einem scharfen Abfall der Durchflussmenge auch mit einem scharfen Abfall des Pumpendrehmoments. Beide Sachverhalte können bei der erfindungsgemäßen Regelung zur Detektion eines Ölfördermaximums benutzt werden, indem das Auftreten einer Unstetigkeit der gemessenen Fördergröße im Zuge der stetig ansteigenden Sollwertfunktion für diese Fördergröße detektiert wird. Bei einer Exzentrerschneckenpumpe weist nur die gemessene Durchflussmenge eine gut messbare Unstetigkeit zur Detektion des Ölfördermaximums auf. Bei der Zentrifugalpumpe wird die Unstetigkeit im Verlauf des gemessenen Ansaugdrucks mithilfe des Pumpendrehmoments oder der Durchflussmenge detektiert und zur Identifikation des Ölfördermaximums herangezogen.

Erfindungsgemäß wird in weiterer Folge so verfahren, dass der Messwert der gemessenen Fördergröße zum Zeitpunkt der ermittelten Unstetigkeit oder ein vorgegebener Prozentsatz dieses Messwerts als neuer Konstantwert der Sollwertfunktion herangezogen wird. Der zeitabhängige Wert der Sollwertfunktion wird zum Zeitpunkt der ermittelten Unstetigkeit auf Null gesetzt und vorzugsweise erst nach Ablauf einer Verzögerungszeitdauer nach dem Zeitpunkt der ermittelten Unstetigkeit bei Null beginnend dem Konstantwert wieder hinzugefügt. Diese erfindungsgemäße Regelung erreicht, dass die Förderpumpe stets im Bereich des Ölfördermaximums

betrieben wird, auch wenn das Ölfördermaximum zunächst nicht bekannt ist oder sich im Laufe der Regelung ändert.

Die Erfindung wird in weiterer Folge anhand der beiliegenden Zeichnungen mithilfe von Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen hierbei die

Fig. 1 die erfindungsgemäße Regelung der Durchflussmenge als Fördergröße einer Exzentrerschneckenpumpe,

Fig. 2 die Identifikation des Ölfördermaximums im Zuge der erfindungsgemäßen Regelung bei einer Exzentrerschneckenpumpe,

Fig. 3 die Generierung der Sollwertfunktion für die erfindungsgemäße Regelung der Durchflussmenge als Fördergröße einer Exzentrerschneckenpumpe,

Fig. 4 die erfindungsgemäße Regelung des Ansaugdrucks als Fördergröße einer Zentrifugalpumpe,

Fig. 5 die Identifikation des minimalen Ansaugdrucks, bei dem das Ölfördermaximum im Zuge der erfindungsgemäßen Regelung bei einer Zentrifugalpumpe erreicht wird, und die

Fig. 6 die Generierung der Sollwertfunktion für die erfindungsgemäße Regelung des Ansaugdrucks als Fördergröße einer Zentrifugalpumpe.

Zunächst wird auf die Fig. 1 bis 3 Bezug genommen, um die erfindungsgemäße Regelung einer Exzentrerschneckenpumpe zu erläutern. Für eine Exzentrerschneckenpumpe wird als Regelgröße die Durchflussmenge Q der Exzentrerschneckenpumpe vorgeschlagen. Als Stellgröße der erfindungsgemäßen Regelung dient die Drehzahl der Förderpumpe. Erfindungsgemäß wird für die Durchflussmenge Q eine zeitabhängige, stetige Sollwertfunktion Q_n für die drehzahlgeregelte Durchflussmenge Q der Förderpumpe vorgegeben, in der gezeigten Ausführungsform etwa in Form einer linearen Sollwertfunktion Q_n , die aus einem

Konstantwert Q_b und einem zeitabhängigen Wert Q_t gebildet wird, der zum Konstantwert Q_b addiert wird. Zum Start der Regelung kann bei einer konstanten Drehzahl zunächst abgewartet werden, bis sich die Durchflussmenge Q nicht mehr ändert. Dieser Messwert für die Durchflussmenge Q kann als erster Konstantwert Q_b herangezogen werden. Für den zeitabhängigen Wert Q_t muss eine Steigung entsprechend einem Wertepaar (Q_{TS} , t_{TS}) geeignet vorgegeben werden, die von der jeweiligen Fördersituation abhängt. Der zeitabhängige Wert Q_t der Sollwertfunktion Q_n für die Durchflussmenge Q kann durchaus langsam ansteigen, etwa über einen Tag oder mehrere Tage, oder auch länger. Das hierfür maßgebliche Wertepaar (Q_{TS} , t_{TS}) kann beim Start der Regelung zunächst anders gewählt werden, als im weiteren Verlauf der Regelung, etwa um den ersten Messwert für den Konstantwert Q_b schneller zu ermitteln. Die Durchflussmenge Q wird gleichzeitig gemessen und über Nachregelung der Drehzahl der Exzentrerschneckenpumpe an den jeweiligen Sollwert Q_n angepasst. Die gemessene Durchflussmenge Q_a für die Durchflussmenge Q wird der Sollwertfunktion Q_n daher zunächst folgen.

Während des Betriebes eines Bohrlochs wird stets ein Betriebspunkt erreicht, bei dem die Menge des zufließenden Fördermediums zur Förderpumpe pro Zeiteinheit einen Maximalwert erreicht, die so genannte Förderrate des jeweiligen Bohrlochs, welche über einen langen Zeitraum aufrecht erhalten werden kann und dem maximalen Zufluss der Lagerstätte zum Bohrloch entspricht. Mehr als diese Förderrate des Bohrlochs kann somit von der Förderpumpe nicht abgepumpt werden. Dieses Maximum ist in der Fig. 1 als Ölfördermaximum Q_{max} eingezeichnet. Ein Überschreiten des Ölfördermaximums Q_{max} zeigt sich bei einer Exzentrerschneckenpumpe in einem scharfer Abfall („pump off“) der Durchflussmenge Q bei konstanter Drehzahl und somit in einer Abweichung ΔQ vom vorgegebenen Sollwert Q_n . Dieser Sachverhalt wird bei der erfindungsgemäßen Regelung zur Detektion eines Ölfördermaximums Q_{max} benutzt, indem das Auftreten einer Unstetigkeit der gemessenen Durchflussmenge Q_a im Zuge der stetig ansteigenden

Sollwertfunktion Q_n für die Durchflussmenge Q detektiert wird. Bei einer Exzentrerschneckenpumpe weist die gemessene Durchflussmenge Q_a eine gut messbare Unstetigkeit zur Detektion des Ölfördermaximums Q_{\max} auf, indem eine über einen vorgegebenen Zeitraum t_{\max} bestehende und eine vorgegebene Mindestgröße ΔQ_{\max} überschreitende Abweichung ΔQ der gemessenen Durchflussmenge Q_a vom jeweils vorgegebenen Sollwert Q_n detektiert wird.

In weiterer Folge wird die gemessene Durchflussmenge Q_a zum Zeitpunkt t_1 der ermittelten Unstetigkeit als Ölfördermaximum Q_{\max} interpretiert und ein vorgegebener Prozentsatz $f(Q_{\max}(t_1))$ dieses Messwerts, beispielsweise 80%, als neuer Konstantwert $Q_b(t_1)$ der Sollwertfunktion Q_n herangezogen. Der zeitabhängige Wert Q_t der Sollwertfunktion Q_n wird zum Zeitpunkt t_1 der ermittelten Unstetigkeit auf Null gesetzt und vorzugsweise erst nach Ablauf einer Verzögerungszeitdauer t_q nach dem Zeitpunkt t_1 der ermittelten Unstetigkeit bei Null beginnend dem neuen Konstantwert $Q_b(t_1)$ wieder hinzugefügt. Die Durchflussmenge Q wird in weiterer Folge auf einen neuen, niedrigeren Sollwert Q_n geregelt und beginnt danach wieder anzusteigen. Diese erfindungsgemäße Regelung erreicht, dass die Förderpumpe stets im Bereich des Ölfördermaximums Q_{\max} betrieben wird, auch wenn das Ölfördermaximum Q_{\max} zunächst nicht bekannt ist oder sich im Laufe der Regelung ändert. Die Identifikation des Ölfördermaximums Q_{\max} im Zuge der erfindungsgemäßen Regelung einer Exzentrerschneckenpumpe wird nochmals anhand der Fig. 2 erläutert. Der jeweils aktuelle Sollwert Q_n für die Durchflussmenge Q wird mit der gemessenen Durchflussmenge Q_a verglichen, eine Abweichung ΔQ ermittelt und über einen PID-Regler entsprechend nachgeregelt. Die ermittelte Abweichung ΔQ wird ferner für die Generierung eines binären Signals p_{off} („pump off“-Detektionssignal) herangezogen, das „Eins“ ist, falls die ermittelte Abweichung ΔQ der gemessenen Durchflussmenge Q_a vom jeweils vorgegebenen Sollwert Q_n über einen vorgegebenen Zeitraum t_{\max} eine vorgegebene Mindestgröße ΔQ_{\max} überschreitet, andernfalls ist das Signal p_{off} „Null“. Falls das binäre Signal p_{off} auf „Eins“

gesetzt ist, wird die zu diesem Zeitpunkt t_1 gemessene Durchflussmenge Q_a erhoben und als Ölfördermaximum Q_{\max} interpretiert.

Das binäre Signal p_{off} stellt somit das „pump off“-Detektionssignal dar und kann gemeinsam mit dem auf diese Weise ermittelten Ölfördermaximum Q_{\max} für eine erfindungsgemäße Regelung verwendet werden, wie anhand der Fig. 3 erläutert wird. Bei Ermittlung eines Ölfördermaximums Q_{\max} wird der zeitabhängige Wert Q_t der Sollwertfunktion Q_n auf Null gesetzt („Reset“) und vorzugsweise erst nach Ablauf einer Verzögerungszeitdauer t_q ein Konstantwert Q_b hinzugefügt. Dieser Konstantwert Q_b ist die vorgegebene Durchflussmenge beim Start der Regelung, die in der Fig. 3 als $Q_{\text{automation}}$ bezeichnet wird, oder bei Kenntnis eines bereits ermittelten Ölfördermaximums Q_{\max} eine Funktion $f(Q_{\text{automation}}, Q_{\max})$. Dieser Konstantwert Q_b wird dem zeitabhängigen Wert Q_t zur Generierung einer Sollwertfunktion Q_n hinzugefügt. Mithilfe dieser Sollwertfunktion Q_n wird in weiterer Folge die Regelung der Durchflussmenge Q wie anhand der Fig. 1 und 2 erläutert durchgeführt.

In weiterer Folge wird auf die Fig. 4 bis 6 Bezug genommen, um die erfindungsgemäße Regelung einer Zentrifugalpumpe zu erläutern. Für eine Zentrifugalpumpe wird als Regelgröße der Ansaugdruck P an der Ansaugseite der Zentrifugalpumpe vorgeschlagen. Als Stellgröße der erfindungsgemäßen Regelung dient die Drehzahl der Förderpumpe. Erfindungsgemäß wird für den Ansaugdruck P eine zeitabhängige, stetige Sollwertfunktion P_n für den drehzahlgeregelten Ansaugdruck P der Förderpumpe vorgegeben, in der gezeigten Ausführungsform etwa in Form einer linearen Sollwertfunktion P_n , die aus einem Konstantwert P_b und einem zeitabhängigen Wert P_t gebildet wird, der vom Konstantwert P_b subtrahiert wird. Zum Start der Regelung kann bei einer konstanten Drehzahl zunächst abgewartet werden, bis sich der Ansaugdruck P nicht mehr ändert. Dieser Messwert für den Ansaugdruck P kann als erster Konstantwert P_b herangezogen werden. Für den zeitabhängigen Wert P_t muss eine Steigung

entsprechend einem Wertepaar (P_{TS}, t_{TS}) geeignet vorgegeben werden, die von der jeweiligen Fördersituation abhängt. Der zeitabhängige Wert P_t der Sollwertfunktion P_n für den Ansaugdruck P kann durchaus langsam ansteigen, etwa über einen Tag oder mehrere Tage, oder auch länger. Das hierfür maßgebliche Wertepaar (P_{TS}, t_{TS}) kann beim Start der Regelung zunächst anders gewählt werden, als im weiteren Verlauf der Regelung, etwa um den ersten Messwert für den Konstantwert P_b schneller zu ermitteln.

Der Ansaugdruck P wird gleichzeitig gemessen und über Nachregelung der Drehzahl der Zentrifugalpumpe an den jeweiligen Sollwert P_n angepasst. Der gemessene Ansaugdruck P_a wird der Sollwertfunktion P_n daher zunächst folgen (Fig. 4). Bei einer Zentrifugalpumpe zeigt sich bei zunehmender Drehzahl zunächst ein abnehmender Ansaugdruck P , der bei Überschreiten eines optimalen Betriebspunkts über einen un stetigen Übergang wieder ansteigt. Dieser Übergang korreliert bei der Zentrifugalpumpe mit einem scharfen Abfall des Pumpendrehmoments. Bei der Zentrifugalpumpe wird die Unstetigkeit im Verlauf des gemessenen Ansaugdrucks P somit mithilfe der Pumpendrehzahl und des Pumpendrehmoments oder der gemessenen Durchflussmenge unter Heranziehung der Pumpenkennlinie detektiert und zur Identifikation des optimalen Betriebspunkts herangezogen. Dieser Betriebspunkt ist in der Fig. 4 als minimaler Ansaugdruck P_{min} eingezeichnet.

In weiterer Folge wird der gemessene Ansaugdruck P_{min} zum Zeitpunkt t_1 der ermittelten Unstetigkeit als Grenzbetriebspunkt, charakterisiert durch Ansaugdruck und Pumpendrehzahl, interpretiert, der hinsichtlich Ansaugdruck nicht unterschritten werden soll und bei dem die maximale Fördermenge (Förderrate des Bohrlochs) bei einem geringwertig höheren Ansaugdruck erreicht wird. Basierend auf diesem Betriebspunkt kann ein vorgegebener Prozentsatz $f(P_{min}(t_1))$ dieses Messwerts P_{min} , beispielsweise 80%, als neuer Konstantwert $P_b(t_1)$ der Sollwertfunktion P_n herangezogen werden. Der zeitabhängige Wert P_t der Sollwertfunktion P_n wird

zum Zeitpunkt t_1 der ermittelten Unstetigkeit auf Null gesetzt und vorzugsweise erst nach Ablauf einer Verzögerungszeitdauer t_q nach dem Zeitpunkt t_1 der ermittelten Unstetigkeit bei Null beginnend dem neuen Konstantwert $P_b(t_1)$ wieder als Negativwert hinzugefügt, sobald der Ansaugdruck den neuen Konstantwert $P_b(t_1)$ erreicht hat. Der Ansaugdruck P wird in weiterer Folge mithilfe einer neuen Sollwertfunktion P_n geregelt. Diese erfindungsgemäße Regelung erreicht, dass die Förderpumpe stets im Bereich des optimalen Betriebspunkts der maximalen Förderleistung betrieben wird.

Die Identifikation des minimalen Ansaugdrucks P_{\min} im Zuge der erfindungsgemäßen Regelung einer Zentrifugalpumpe wird nochmals anhand der Fig. 5 erläutert. Der jeweils aktuelle Sollwert P_n für den Ansaugdruck P wird mit dem gemessenen Ansaugdruck P_a verglichen und über einen PID-Regler entsprechend nachgeregelt. Gleichzeitig wird das Pumpendrehmoment gemessen und für die Generierung eines binären „pump off“-Detektionssignals p_{off} herangezogen, das „Eins“ ist, falls ein plötzlicher Abfall des Pumpendrehmoments detektiert wird, andernfalls ist das Signal „Null“. Falls das „pump off“-Detektionssignal auf „Eins“ gesetzt ist, wird der zu diesem Zeitpunkt t_1 gemessene Ansaugdruck P_a erhoben und als minimaler Ansaugdruck P_{\min} interpretiert.

Das „pump off“-Detektionssignal p_{off} kann gemeinsam mit dem auf diese Weise ermittelten minimalen Ansaugdruck P_{\min} für eine erfindungsgemäße Regelung verwendet werden, wie anhand der Fig. 6 erläutert wird. Bei Ermittlung eines minimalen Ansaugdrucks P_{\min} wird der zeitabhängige Wert P_t der Sollwertfunktion P_n auf Null gesetzt („Reset“) und vorzugsweise erst nach Ablauf einer Verzögerungszeitdauer t_q vom Konstantwert P_b als Negativwert hinzugefügt. Dieser Konstantwert P_b ist etwa beim Start der Regelung ein anfänglich gemessener Ansaugdruck P , der in der Fig. 6 als $P_{\text{automation}}$ bezeichnet wird, oder eine Funktion $f(P_{\text{automation}}, P_{\min})$ bei Kenntnis eines bereits ermittelten minimalen Ansaugdrucks P_{\min} . Dieser Konstantwert P_b wird dem zeitabhängigen Wert P_t zur

Generierung einer Sollwertfunktion P_n hinzugefügt. Mithilfe dieser Sollwertfunktion P_n wird in weiterer Folge die Regelung des Ansaugdrucks P wie anhand der Fig. 4 und 5 erläutert durchgeführt.

Mithilfe der erfindungsgemäßen Regelung kann die Förderleistung einer Bohrloch-Fördervorrichtung optimiert und die Förderpumpe hierfür in einem optimalen Betriebspunkt betrieben werden. Diese Optimierung ist dabei vergleichsweise einfach und automatisierbar.

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Optimierung der Förderleistung einer Bohrloch-Fördervorrichtung umfassend eine im Bohrloch angeordnete Förderpumpe mit einer die Förderleistung bestimmenden und von einer Drehzahl der Förderpumpe abhängigen Fördergröße (Q, P) , **dadurch gekennzeichnet**, dass eine zeitabhängige, stetige Sollwertfunktion (Q_n, P_n) für die drehzahlgeregelte Fördergröße (Q, P) der Förderpumpe vorgegeben wird, wobei die Sollwertfunktion (Q_n, P_n) aus einem Konstantwert (Q_b, P_b) und einem zeitabhängigen Wert (Q_t, P_t) gebildet wird, und bei einer Unstetigkeit der gemessenen Fördergröße (Q_a, P_a) der Messwert (Q_{max}, P_{min}) der gemessenen Fördergröße (Q, P) zum Zeitpunkt (t_1) der ermittelten Unstetigkeit oder ein vorgegebener Prozentsatz dieses Messwerts $(f(Q_{max}), f(P_{min}))$ der neue Konstantwert (Q_b, P_b) der Sollwertfunktion (Q_n, P_n) ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass es sich bei der Fördergröße (Q, P) um die Durchflussmenge (Q) einer Exzentrerschneckenpumpe handelt.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Unstetigkeit als eine über einen vorgegebenen Zeitraum (t_{max}) bestehende und eine vorgegebene Mindestgröße (ΔQ_{max}) überschreitende Abweichung (ΔQ) der gemessenen Durchflussmenge (Q_a) vom jeweils vorgegebenen Sollwert (Q_n) detektiert wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass es sich bei der Fördergröße (Q, P) um den Ansaugdruck (P) an der Ansaugseite einer Zentrifugalpumpe handelt.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Unstetigkeit als unstetiger Abfall des Pumpendrehmoments oder der Durchflussmenge (Q_a) detektiert wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zeitabhängige Wert (Q_t, P_t) der

Sollwertfunktion (Q_n, P_n) zum Zeitpunkt (t_1) der ermittelten Unstetigkeit auf Null gesetzt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zeitabhängige Wert (Q_t, P_t) der Sollwertfunktion (Q_n, P_n) erst nach Ablauf einer Verzögerungszeitdauer (t_q) nach dem Zeitpunkt (t_1) der ermittelten Unstetigkeit bei Null beginnend dem Konstantwert (Q_b, P_b) hinzugefügt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zeitabhängige Wert (Q_t, P_t) der Sollwertfunktion (Q_n, P_n) eine lineare Funktion ist.

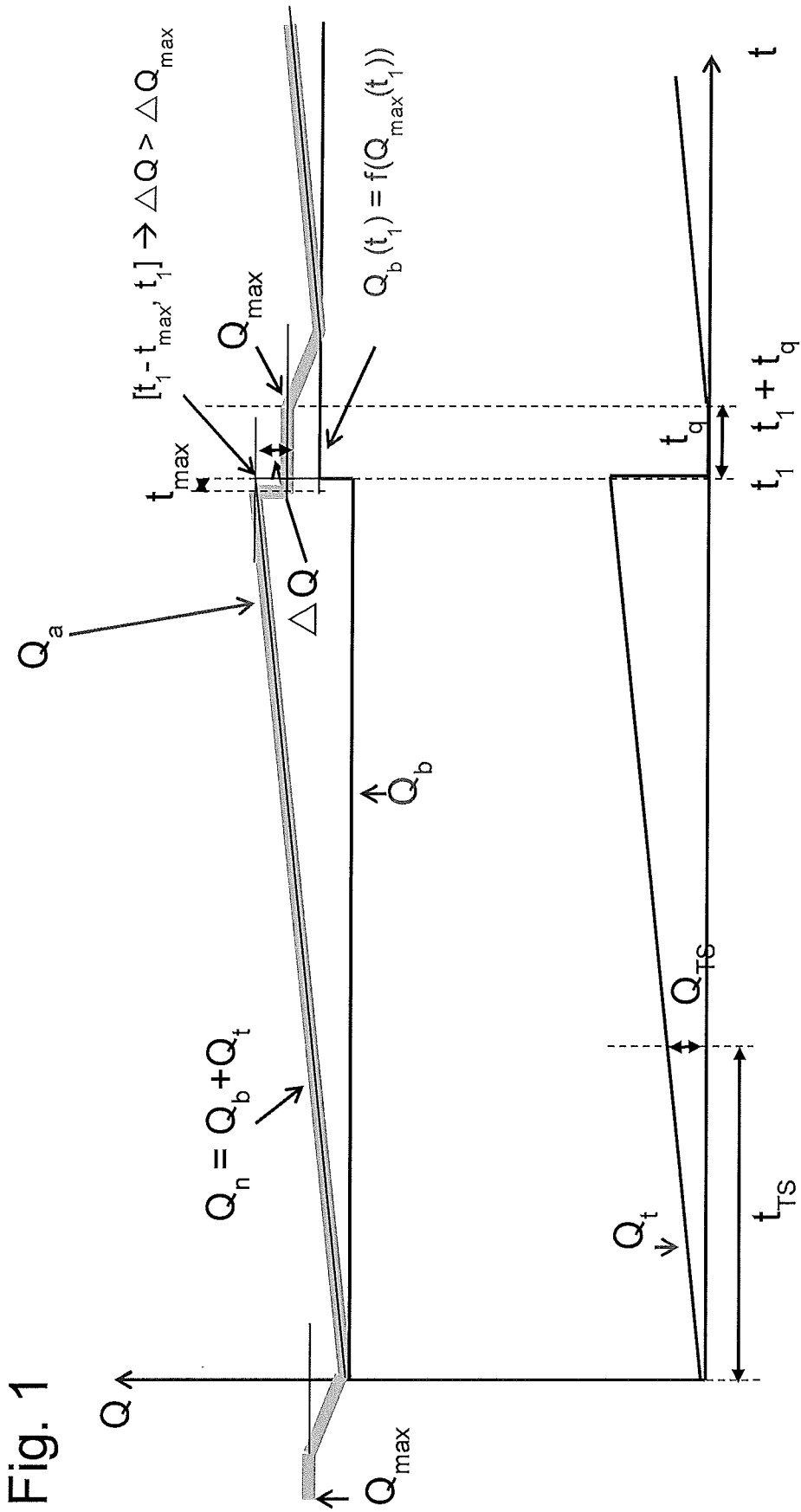


Fig. 2

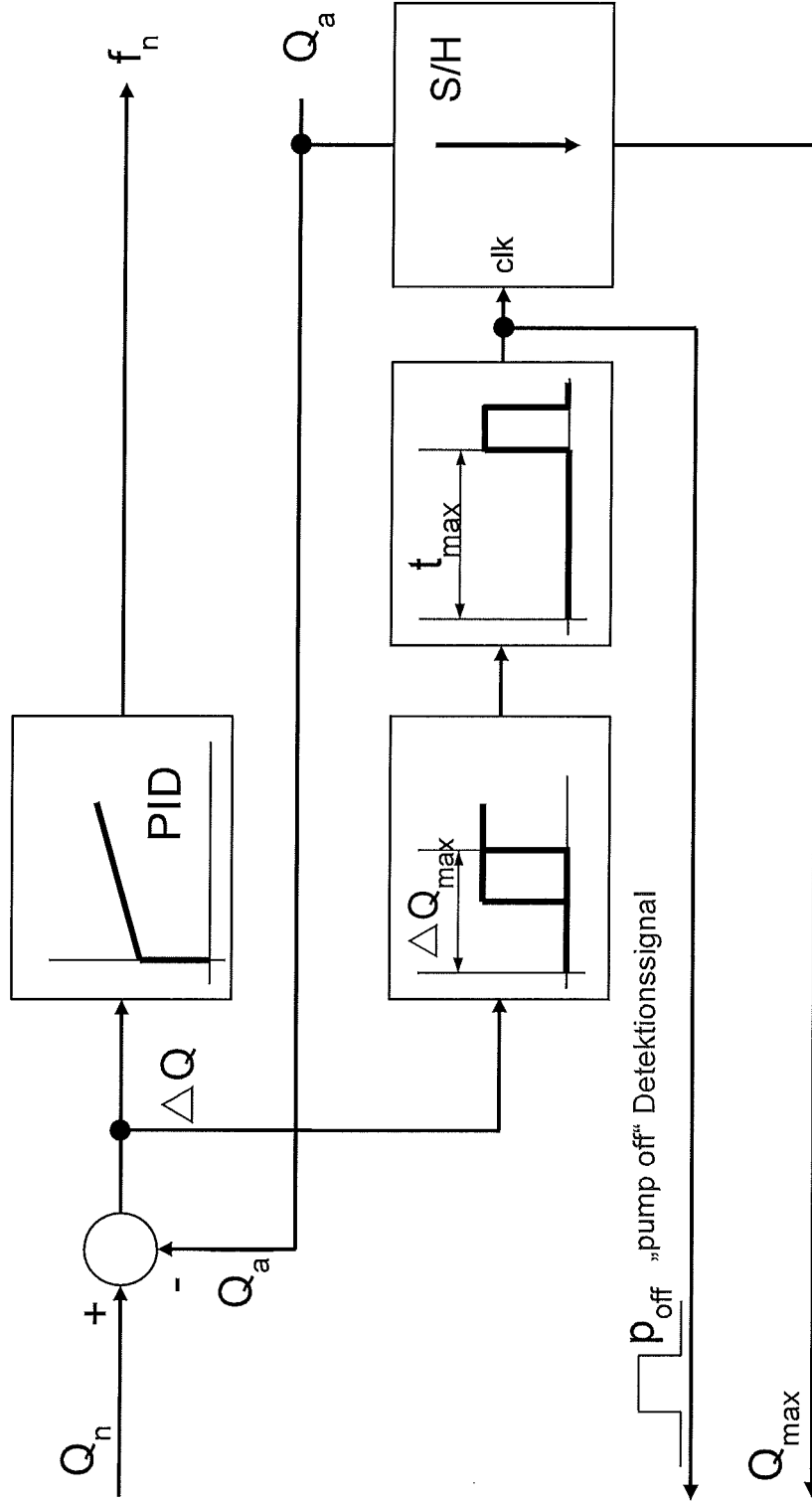


Fig. 3

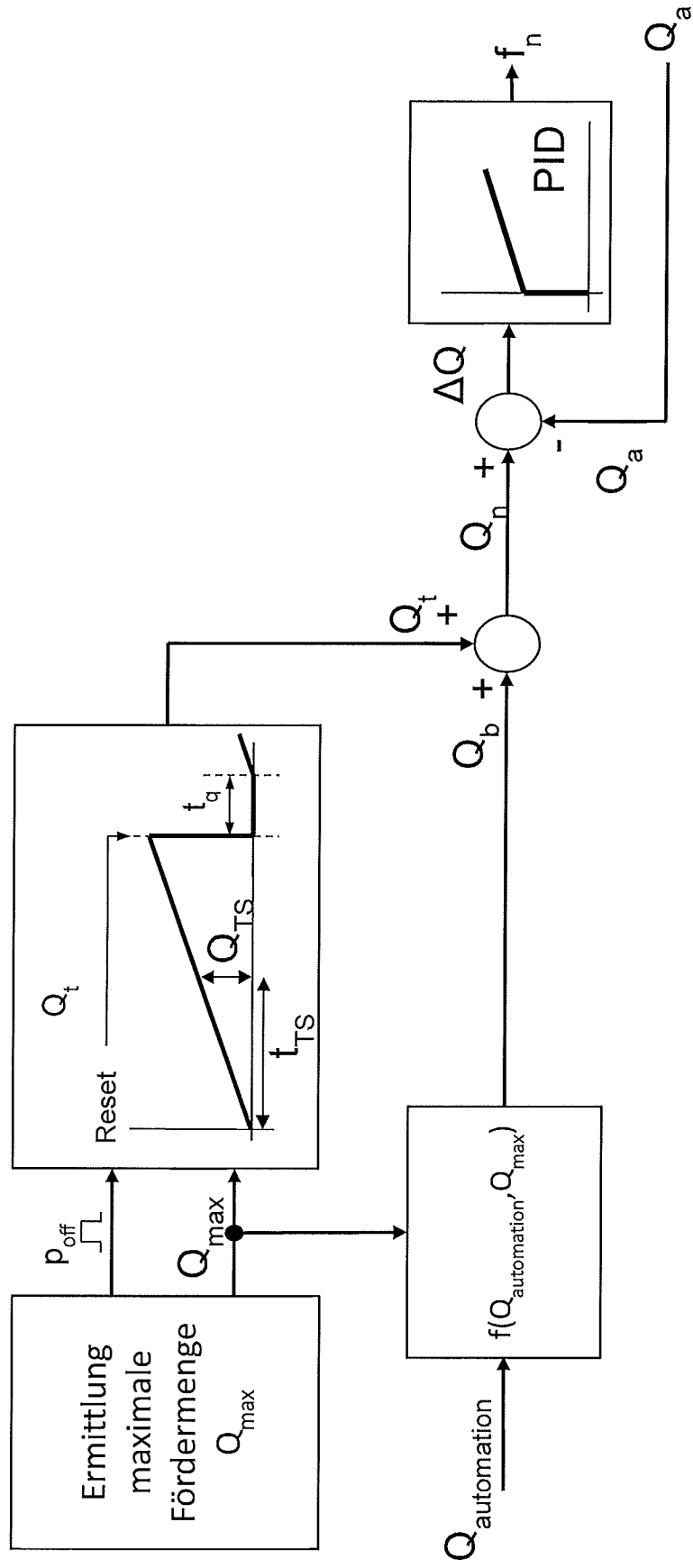


Fig. 4

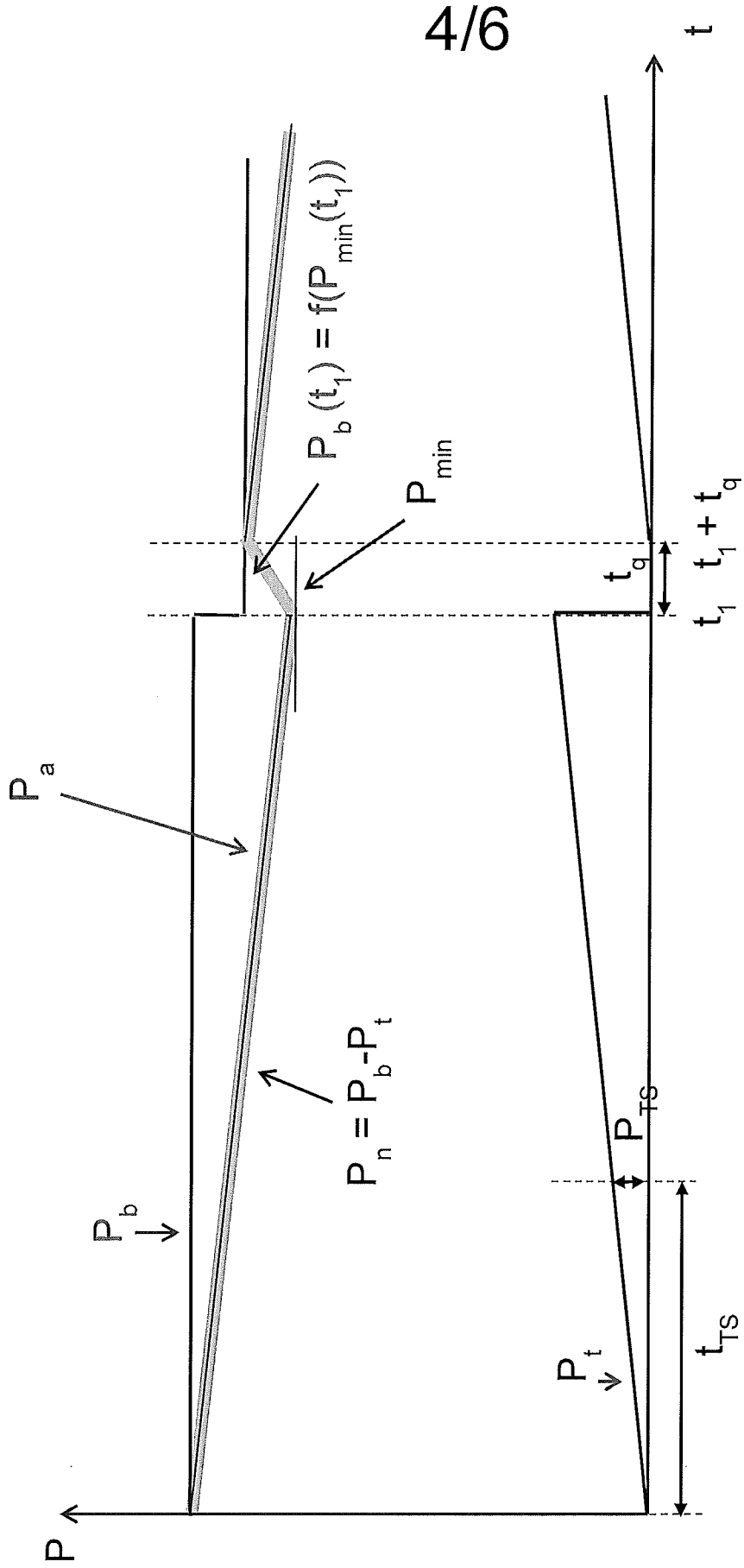


Fig. 5

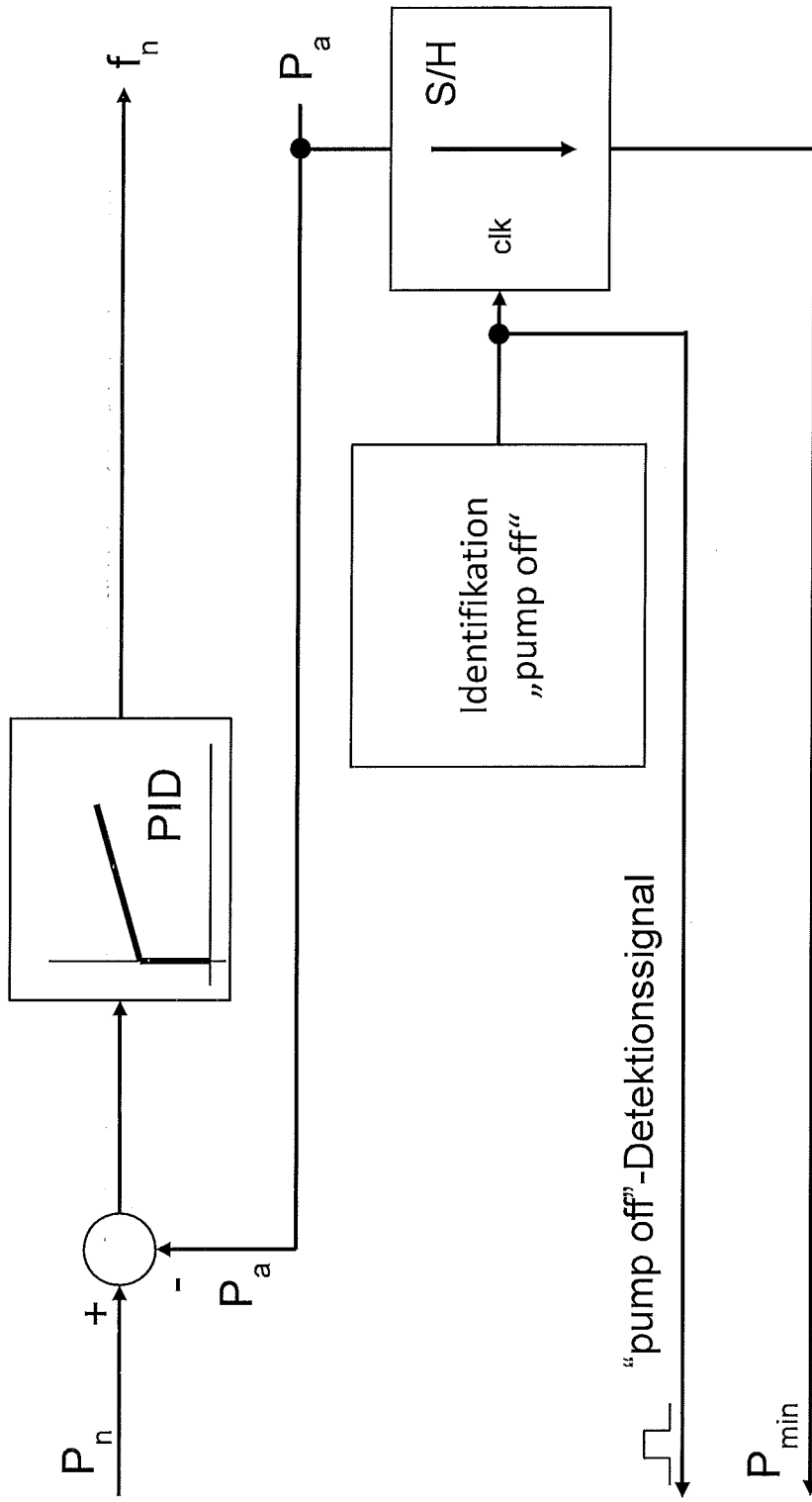


Fig. 6

