

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 0 734 773 A2

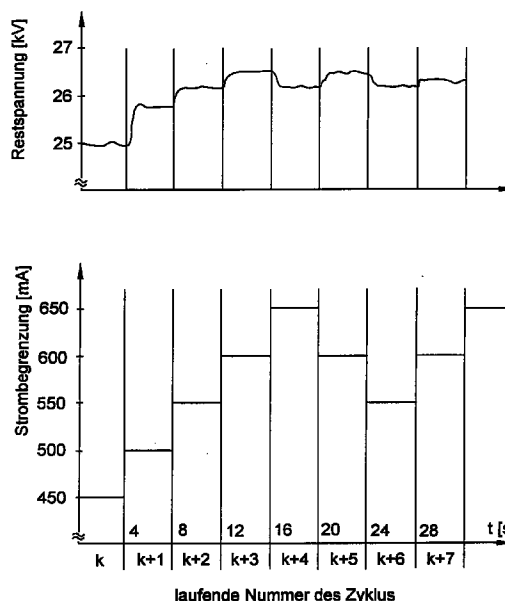
(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG(43) Veröffentlichungstag:
02.10.1996 Patentblatt 1996/40(51) Int. Cl.⁶: **B03C 3/68**(21) Anmeldenummer: **96103433.7**(22) Anmeldetag: **06.03.1996**(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT DE DK ES FR GB GR IT NL PT SE(30) Priorität: **30.03.1995 DE 19511604**(71) Anmelder: **BABCOCK PROZESSAUTOMATION
GMBH
46049 Oberhausen (DE)**(72) Erfinder:
• **Deiwick, Achim, Dr.
D-47829 Krefeld (DE)**
• **Bock, Frank
D-37441 Bad Sachsa (DE)**(74) Vertreter: **Planker, Karl Josef, Dipl.-Phys.
c/o Babcock-BSH GmbH,
Postfach 6
47811 Krefeld (DE)****(54) Verfahren zum fortgesetzten Optimieren des Betriebszustandes eines Elektrofilters**

(57) Der optimale Betriebspunkt eines Elektrofilters hängt von den Kenngrößen des zu reinigenden Gasstromes ab. Wenn die Kenngrößen sich ändern, so ist im Allgemeinen auch eine Änderung des Betriebspunktes erforderlich. Um die Abscheidung zu optimieren, ist es ferner erforderlich, den Strom oder die Spannung in der Weise zu begrenzen, daß das Rücksprühen gerade vermieden wird.

Bei dem neuen Verfahren wird der eingestellte Betriebspunkt fortgesetzt, überwacht und nachgeführt, so daß das Elektrofilter unter Vermeidung des Rücksprühens ständig in der Nähe des optimalen Betriebspunktes arbeitet. Es wird im sogenannten "Semipulsverfahren" gearbeitet. Aufeinanderfolgende Betriebsperioden (1, 2, 3, ..., m, ...) umfassen je eine Normalphase und eine daran anschließende relativ kurze Testphase. In jeder Betriebsphase wird in der Normalphase und in der Testphase mit konstanter Pulszahl gearbeitet. Während der Normalphase und der Testphase wird jeweils in aufeinanderfolgenden Zyklen (1, 2, 3, ..., k, ...) bei gegebener Begrenzung des Stromes oder der Spannung die Begrenzung des Stromes oder der Spannung in Abhängigkeit von der Änderung der Restspannung von Zyklus zu Zyklus iterativ verändert, so daß die Restspannung ein Maximum zustrebt. In jeder Betriebsperiode (1, 2, 3, ..., m, ...) wird in der Testphase mit einer im Vergleich zur Normalphase um ± 1 geänderten Pulszahl gearbeitet. Die Mittelwerte der Spannung in der Normalphase und in der Testphase werden gemessen und miteinander verglichen. In Abhängigkeit von der Differenz wird die Pulszahl von Betriebsperiode zu Betriebsperiode iterativ verändert, so daß der Mittelwert der Spannung einem Maximum zustrebt.

Das Verfahren kommt insbesondere bei der Abscheidung hochohmiger Stäube zum Einsatz.

**Figur 3****EP 0 734 773 A2**

Beschreibung

Ein Elektrofilter hat zwei Sätze von Elektroden: Niederschlagselektroden und Sprühelektroden. Die Niederschlagselektroden bestehen meistens aus profilierten Blechstreifen, die zu mehreren parallelen Wänden zusammengesetzt sind. Je zwei benachbarte Wände bilden eine Gasse für den zu reinigenden Gasstrom. Mittig in der Gasse sind die Sprühelektroden angeordnet. Sie bestehen vielfach aus Drähten oder Bändern, die mit Spitzen besetzt sind. Meistens sind die Niederschlagselektroden geerdet, und die Sprühelektroden sind mit einer Hochspannungsquelle verbunden.

Die abzuscheidenden Staubteilchen werden durch Elektronen, die von den Sprühelektroden abgegeben werden, ionisiert und in dem zwischen Sprühelektroden und Niederschlagselektroden bestehenden elektrostatischen Feld aus der Gasströmung ausgelenkt und an den Niederschlagselektroden abgeschieden. Die mitgeführte elektrische Ladung geben sie an die Niederschlagselektrode ab.

Wenn aber die abzuscheidenden Staubteilchen einen sehr hohen spezifischen Widerstand haben ($> 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$), kann unter gewissen Betriebsbedingungen die elektrische Ladung aus der auf den Niederschlagselektroden abgelagerten Staubschicht nicht so schnell abfließen, wie sie durch den Zustrom von weiteren geladenen Teilchen aufgeladen wird. Das Ergebnis ist das sogenannte Rücksprühen, d.h. eine Entladung, die der an den Sprühelektroden auftretenden Entladung entgegengerichtet ist. Durch das Rücksprühen wird Staub in den Gasstrom zurückgeschleudert. Der Abscheidegrad wird verschlechtert.

Die elektrostatische Abscheidung hochohmiger Stäube ist bei einer bestimmten Stärke des Stromes, der zwischen den Elektroden eines Elektrofilters fließt, optimal. Verschlechtert sich die Abscheidung bei Vergrößerung des Stromes, so ist dies ein Indiz dafür, daß das Rücksprühen eingesetzt hat. Um die Abscheidung zu optimieren, ist es daher erforderlich, den Strom in der Weise zu begrenzen, daß das Rücksprühen gerade vermieden wird.

Der optimale Betriebspunkt hängt aber von den Kenngrößen des zu reinigenden Gasstromes ab. Wenn die Kenngrößen sich ändern, so ist im allgemeinen auch eine Änderung des Betriebspunktes erforderlich. Dies sei an einigen einfachen Beispielen erläutert:

Ein Elektrofilter kann die Flugasche aus dem Rauchgas eines kohlegefeuerten Kessels trennen. Mit dem im Kessel erzeugten Dampf kann über eine Turbine ein Generator zur Erzeugung elektrischer Energie betrieben werden. Nimmt der Bedarf an elektrischer Energie innerhalb des täglichen Lastspiels ab, so wird auch weniger Dampf benötigt. Zur Verminderung der Dampferzeugung wird weniger Kohle gefeuert. Dementsprechend nimmt die Menge an Flugasche ab, die das E-Filter abtrennen muß. Durch die Änderung der Fahrweise des Kessels von Vollast zu Teillast ändert sich

also eine wesentliche Kenngröße nämlich der Volumenstrom der Flugasche.

Zur Reinigung der Kesselwände werden diese während des Betriebs mit Wasserdampf abgestrahlt. Diesen Vorgang bezeichnet man als Rußblasen. Rußblasen kann 3 bis 4 mal am Tage vorgenommen werden und jeweils eine halbe bis eine Stunde in Anspruch nehmen. Der Wasserdampf verläßt den Kessel mit dem Rauchgas durch den Entstauber. Ein Teil der Feuchtigkeit lagert sich an die Flugaschepartikel an und ändert die elektrischen Eigenschaften der Flugasche und des Rauchgases. So ändert auch das Rußblasen die für den Betrieb des Elektrofilters wesentlichen Kenngrößen.

Lastwechsel und Rußblasen sind nur Beispiele für durchaus gewöhnliche Vorgänge beim Betrieb eines Elektrofilters, bei denen sich die Kenngrößen des zu reinigenden Gasstromes ändern.

Durch EP 0 097 161 B1 ist es bekannt, einen elektrostatischen Abscheider mit einem Strom zu betreiben, der gerade dem Einsetzpunkt des Rücksprühens entspricht. Strom und Spannung werden überwacht, in dem man die Erregung erhöht oder erniedrigt, um den Punkt zu bestimmen, bei dem das Rücksprühen beginnt. Die Quelle, aus der die Erregung gespeist wird, ist ein 50 Hz - Netz. Der Strom besteht aus einer Pulsfolge, und die Spannung ist eine Gleichspannung mit überlagerter Wechselspannungskomponente. Bei konventioneller Zweiweg-Gleichrichtung der Netzspannung ergibt sich für den Strom und die Wechselspannungskomponente der Spannung eine Frequenz von 100 Hz.

Durch EP 0 140 855 B1 ist ein Verfahren zum Verändern einer an den Elektroden eines elektrostatischen Staubabscheiders auftretenden Spannung bekannt, bei dem die Spannung durch eine von der Netzfrequenz abgeleitete Pulsfolge erzeugt wird und die Veränderung dadurch bewirkt wird, daß die Länge des Intervalls zwischen zwei aufeinanderfolgenden einzelnen Pulsen durch Ausblenden einer geraden Anzahl von Pulsen variiert wird. Die Anzahl der Pulse pro Sekunde wird dadurch je nach Anzahl der ausgeblendeten Pulse auf 33, 20, 14, 11, usw. erniedrigt. Die Netzspannung wird dabei über Thyristoren einem Hochspannungstransformator zugeführt, der sekundärseitig mit einem Zweiweg-Gleichrichter verbunden ist. Die Ausgangsspannung des Gleichrichters liegt an den Elektroden des Elektrofilters. Die Thyristoren werden über einen Regelkreis gesteuert, der so geschaltet ist, daß er zwischen zwei Pulsen, die dem Elektrofilter zugeführt werden, eine gerade Anzahl von Pulsen aus der Netzspannung löscht.

Durch EP 0 465 547 B1 ist es bekannt, zum Steuern der Stromversorgung der Entladungselektroden eines Elektrofilters zwecks Erzielung einer max.

Entstaubung den Entladungselektroden Strompulse mit gegebener Stromstärke zuzuführen und die Anzahl der Pulse pro Sekunde gemäß dem vorgenannten Dokument zu variieren. Dabei werden einander entsprechende Momentanwerte der Spannung zwischen

Entladungs- und Niederschlagselektroden für eine Anzahl verschiedener Pulsfrequenzen gemessen, und die Strompulsversorgung wird dann auf die Pulsfrequenz eingestellt, für welche der größte Momentanwert gemessen worden ist. Der Impulsstrom wird dabei unter Berücksichtigung der Kapazität der Stromversorgungseinheit und evtl. Überschläge zwischen den Entladungs- und den Niederschlagselektroden auf einen Höchstwert eingestellt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Betreiben eines Elektrofilters anzugeben, bei dem der eingestellte Betriebspunkt fortgesetzt überwacht und nachgeführt wird, so daß das Filter ständig in der Nähe des optimalen Betriebspunktes arbeitet. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die in Anspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst.

Weitere vorteilhafte Merkmale sind in den Unteransprüchen angegeben.

Die Figuren 1 - 3 dienen zur Verdeutlichung der Erfindung anhand von Diagrammen.

Figur 1 veranschaulicht den Verlauf von Strom und Spannung für verschiedene Fälle, die sich durch unterschiedliche Länge des Intervalls zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen unterscheiden.

Figur 2 veranschaulicht die Aufeinanderfolge der Betriebsperioden.

Figur 3 veranschaulicht die Folge der Zyklen innerhalb einer einzelnen Phase.

In Figur 1 zeigen fünf übereinander angeordnete Diagramme den Verlauf von Strom und Spannung für den herkömmlichen Betrieb mit Netzfrequenz und Zweiweg-Gleichrichtung (oben) sowie im sogenannten "Semipulsbetrieb" mit verschiedenen Pulszahlen 1 - 4. Bei der Zweiweg-Gleichrichtung ist der Stromverlauf ebenso wie der Spannungsverlauf durch eine Kette von Pulsen in Abständen von 10 ms gekennzeichnet. Die Spannungspulse sind dabei einer Gleichspannung überlagert. Bei Pulszahl 1 wird der Hochspannungsteil der Stromversorgung zwischen je zwei Pulsen für eine volle Netzschwingung nicht angesteuert. Die verbleibenden Pulse haben daher einen vergrößerten Abstand von 30 ms. Jeder Spannungspuls hat am Anfang eine steil ansteigende Flanke. Die andere Flanke fällt bis zum Einsetzen des nächst folgenden Pulses annähernd exponentiell auf eine Restspannung ab. Die Strompulse steigen steil bis zu einem Maximalstrom an und fallen dann ebenso steil bis auf 0 ab. Nachfolgend ist mit "Strom" immer der Maximalstrom gemeint. Bei Pulszahl 2 sind zwischen zwei Pulsen jeweils zwei volle Netzschwingungen nicht durchgeschaltet. Die verbleibenden Pulse haben daher einen Abstand von 50 ms. Die entsprechenden Charakteristiken für die Pulszahlen 3 und 4 sind aus Figur 1 ohne weiteres zu entnehmen.

In Figur 2 sind mehrere aufeinanderfolgende Betriebsperioden $m, m + 1, m + 2, \dots$ schematisch dar-

gestellt. Jede Betriebsperiode umfaßt eine Normalphase und eine anschließende Testphase. Die Normalphase dauert wesentlich länger als die Testphase. Die Dauer der Normalphase verhält sich zur Dauer der Testphase vorzugsweise wie etwa 4:1 bis 20:1. Die Normalphase dauert z. B. 1 h, die Testphase 5 - 10 min.

In jeder einzelnen Normalphase wird mit konstanter Pulszahl gearbeitet, ebenso in jeder Testphase. Jedoch weicht die Pulszahl der Testphase von der Pulszahl der unmittelbar vorangegangenen Normalphase um ± 1 ab, wie weiter unten zu erläutern ist.

Die Normalphase und die Testphase umfassen je eine Folge von Zyklen, welche fortlaufend mit 1, 2, 3, ..., $k, k + 1, \dots$ numeriert sind. Die Zyklen folgen aufeinander in Zeitabständen von 20-40 s, vorzugsweise etwa 30 s. In jedem Zyklus wird an der Regeleinrichtung des Elektrofilters ein oberer Grenzwert für den Strom, d. h. eine Strombegrenzung, eingegeben. Die zugehörige Restspannung wird gemessen, und aufgrund des erhaltenen Meßwertes wird die Strombegrenzung für den folgenden Zyklus eingestellt, wie nachfolgend anhand von Figur 3 erläutert wird.

In Figur 3 sind längs der waagerechten Zeitachse mehrere aufeinanderfolgende Zyklen $k, k + 1, \dots$ symbolisch dargestellt. Der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Zyklen beträgt in diesem Fall 30 s. Betrachtet wird zunächst eine Normalphase.

Der Zeitpunkt 0 in Figur 3 kann ein beliebiger Zeitpunkt während des Betriebes sein, z. B. der Einschaltzeitpunkt oder der Beginn einer Normalphase. In diesem Zeitpunkt ist die Strombegrenzung für den Zyklus k auf 450 mA eingestellt. Die zugehörige Restspannung liegt gemäß dem oberen Diagramm von Figur 3 bei etwa 25 kV. Anschließend wird die Strombegrenzung auf 500 mA erhöht, um auszuprobieren, ob sich nun eine höhere Restspannung einstellt. Die erhöhte Strombegrenzung ergibt im Zyklus $k + 1$ eine Restspannung von 25,8 kV. Da die Erhöhung der Strombegrenzung zu einer Erhöhung der Restspannung geführt hat, wird im folgenden Zyklus $k + 2$ die Strombegrenzung abermals erhöht, diesmal auf 550 mA. Es ergibt sich wieder eine erhöhte Restspannung, nämlich 26,2 kV. Da die Änderung der Restspannung auch diesmal ein positives Vorzeichen hat, wird die Strombegrenzung in der gleichen Richtung noch einmal geändert, d. h. auf 600 mA erhöht. Es stellt sich im Zyklus $k + 3$ eine erhöhte Restspannung von 26,5 kV ein. Ein erneuter Versuch, durch eine Steigerung der Strombegrenzung auf 650 mA eine noch höhere Restspannung zu erreichen, geht jedoch im Zyklus $k + 4$ fehl. Die Restspannung fällt auf 26,2 kV ab. Das ist ein Indiz für den Beginn des Rücksprühens. Daher wird im Zyklus $k + 5$ die Strombegrenzung wieder niedriger angesetzt, und zwar auf 600 mA, mit dem Effekt, daß die Restspannung steigt, und zwar auf 26,5 kV. Nachdem im Zyklus $k + 5$ die Erniedrigung der Strombegrenzung zu einer erhöhten Restspannung geführt hat, wird die Strombegrenzung für den Zyklus $k + 6$ ebenfalls erniedrigt. Es

ergibt sich aber diesmal eine niedrigere Restspannung von 26,2 kV. Daher wird die Strombegrenzung für den nächsten Zyklus wieder in umgekehrter Richtung geändert, nämlich auf 600 mA erhöht. Das führt im Zyklus $k + 7$ wieder zu einer erhöhten Restspannung. Offensichtlich hat sich ab Zyklus $k + 3$ der Zustand stabilisiert. Die Folge ist, daß fortan die Strombegrenzung zwischen 550 und 650 mA hin und her pendelt. Die Restspannung stellt sich auf einen quasi stationären Wert ein. Sie schwankt geringfügig um etwa 26,4 kV. Dieser Zustand ist bei der eingestellten Pulszahl und den augenblicklichen Kenngrößen des zu reinigenden Gasstromes optimal. Sollten sich die Kenngrößen jedoch während der betrachteten Normalphase ändern, so tastet sich die Regeleinrichtung analog zu den Zyklen k bis $k + 3$ an den optimalen Betriebspunkt heran, der den geänderten Kenngrößen entspricht. Erfahrungsgemäß verlaufen die Änderungen der Kenngrößen relativ langsam, gemessen an der Periodendauer der Zyklen. Die Änderungen der Strombegrenzung von Zyklus zu Zyklus, die bei dem angegebenen Beispiel jeweils ± 50 mA, sind in jedem Falle klein im Vergleich zu dem Strom, auf den jeweils begrenzt wird, vorzugsweise etwa 5 bis 15 %. Daher sind im stationären Zustand auch die Spannungsänderungen relativ klein, so daß der Filterbetrieb durch sie nicht merklich beeinträchtigt wird.

Es versteht sich von selber, daß unter Berücksichtigung der Strom-Spannungskennlinie, die experimentell zu ermitteln ist, anstelle des Stromes auch die Spannung begrenzt werden kann.

Während der ganzen Dauer der Normalphase oder zumindest während eines Zeitabschnitts, der sich über mehrere Zyklen am Ende der Normalphase erstreckt, wird durch Auswertung einer großen Anzahl von Momentanwerten ein Mittelwert der Spannung berechnet und gespeichert. Als Mittelwert wird z. B. die effektive Spannung gewählt.

An die Normalphase schließt sich eine Testphase an. In der Testphase soll ausprobiert werden, ob mit einer geänderten Pulszahl die Abscheidung verbessert werden kann.

In der Testphase wird mit einer Pulszahl gearbeitet, die sich von der Pulszahl der unmittelbar vorangegangenen Normalphase um ± 1 unterscheidet. Auch in der Testphase werden analog zur Normalphase zahlreiche Zyklen durchlaufen. Nachdem sich ein quasi stationärer Zustand eingestellt hat, wird auch in der Testphase ein Mittelwert der Spannung berechnet und gespeichert. Dieser Mittelwert wird mit dem Mittelwert der zugehörigen Normalphase verglichen.

Bei dem in Figur 2 veranschaulichten Beispiel ergibt sich für die Betriebsperiode m , daß der Mittelwert in der Testphase niedriger liegt als in der Normalphase. Die Änderung der Pulszahl - in diesem Fall von 5 auf 6 - hat also keine Verbesserung im Sinne einer Erhöhung des Mittelwertes der Spannung ergeben. Daher wird in der Normalphase der folgenden Periode $m + 1$ wieder mit der Pulszahl 5 gearbeitet. Da in der Betriebsperiode m eine Erhöhung der Pulszahl erfolglos war, wird in der

Testphase der Betriebsperiode $m + 1$ die Pulszahl auf 4 erniedrigt. Der Effekt besteht auch diesmal darin, daß der Mittelwert der Spannung absinkt. Daher wird in der Normalphase der Betriebsperiode $m + 2$ die Pulszahl auf 5 zurückgestellt. In der anschließenden Testphase wird erneut die Pulszahl 6 ausprobiert, auch hier mit dem Erfolg, daß der Mittelwert der Spannung absinkt. Folglich wird auch in der Betriebsperiode $m + 3$ in der Normalphase wieder die Pulszahl 5 eingestellt. In der Testphase wird noch einmal die Pulszahl 4 ausprobiert, diesmal mit Erfolg, offenbar weil sich inzwischen eine Kenngröße des zu reinigenden Gasstromes geändert hat. Es stellt sich ein erhöhter Mittelwert der Spannung ein. Da die Absenkung der Pulszahl in der Betriebsperiode $m + 3$ erfolgreich war, wird in der Betriebsperiode $m + 4$ in der Normalphase die Pulszahl 4 beibehalten. In der anschließenden Testphase wird die Pulszahl erneut abgesenkt, und zwar auf 3. Der Effekt ist aber negativ. Daher wird in der Normalphase der Betriebsperiode $m + 5$ die Pulszahl wieder auf 4 zurückgestellt.

Da die Testphase im Vergleich zur Normalphase relativ kurz ist und die Pulszahlen der Normalphase und der anschließenden Testphase sich nur um ± 1 unterscheiden, sind die hierdurch bedingten Schwankungen relativ gering und haben im Einzelfall geringen Einfluß auf die Qualität der Abscheidung. Wenn sich aber in längeren Zeiträumen die Kenngrößen des zu reinigenden Gasstromes nachhaltig ändern, wird durch die in Figur 2 veranschaulichte Arbeitsweise bewirkt, daß das Elektrofilter stets in der Nähe des jeweiligen optimalen Betriebspunktes arbeitet.

Patentansprüche

1. Verfahren zum fortgesetzten Optimieren des Betriebszustandes eines Elektrofilters mit folgenden Merkmalen:

- a) Es wird mit einer durch Zweigweg-Gleichrichtung von der Netzspannung abgeleiteten Gleichspannung mit überlagerten Pulsen gearbeitet, wobei der zeitliche Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Pulsen durch Ausblenden einer wählbaren Anzahl voller Netzwellen veränderbar ist;
- b) aufeinanderfolgende Betriebsperioden (1, 2, 3, ..., m , ...) umfassen je eine Normalphase und eine daran anschließende Testphase;
- c) in jeder Betriebsperiode wird in der Normalphase und in der Testphase mit konstanter Pulszahl gearbeitet;
- d) während der Normalphase und der Testphase wird jeweils in aufeinanderfolgenden Zyklen (1, 2, 3, ..., k , ...) bei gegebener Begrenzung des Stromes oder der Spannung die Restspannung gemessen und die Begrenzung in Abhängigkeit von der Änderung der Restspannung von Zyklus zu Zyklus iterativ verän-

dert, so daß die Restspannung einem Maximum zustrebt.

e) in jeder Betriebsperiode (1, 2, 3, ..., m, ...) wird in der Testphase mit einer im Vergleich zur Normalphase um ± 1 geänderten Pulszahl gearbeitet, und die Mittelwerte der Spannung in der Normalphase und in der Testphase werden gemessen und miteinander verglichen, und in Abhängigkeit von der Differenz wird die Pulszahl von Betriebsperiode zu Betriebsperiode iterativ verändert, so daß der Mittelwert der Spannung einem Maximum zustrebt.

2. Verfahren nach Anspruch 1 zum fortgesetzten Optimieren des Betriebszustandes eines Elektrofilters mit folgenden Merkmalen:

a) Es wird mit einer durch Zweigweg-Gleichrichtung von der Netzspannung abgeleiteten Gleichspannung mit überlagerten Pulsen gearbeitet, wobei der zeitliche Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Pulsen durch Ausblenden einer wählbaren Anzahl voller Netzwellen veränderbar ist;

b) aufeinanderfolgende Betriebsperioden (1, 2, 3, ..., m, ...) umfassen je eine Normalphase und eine daran anschließende Testphase;

c) in jeder Betriebsperiode wird in der Normalphase und in der Testphase mit konstanter Pulszahl gearbeitet;

d) die Pulszahl der Testphase weicht von der Pulszahl der unmittelbar vorangegangenen Normalphase um ± 1 ab, wobei das Vorzeichen gemäß nachfolgenden Merkmalen h und i ermittelt wird;

e) die Normalphase und die Testphase umfassen je eine Folge von Zyklen (1, 2, 3, ..., k, ...) nach folgendem Schema:

ea) der Strom wird auf i_k begrenzt;

eb) die Restspannung u_k wird gemessen;

ec) der Strom wird auf einen von i_k abweichenden Wert

$$i_{k+1} = i_k + \Delta i_k$$

begrenzt, wobei Δi_k positiv oder negativ ist und der Absolutwert $|\Delta i_k|$ klein gegenüber i_k ist;

ed) die Restspannung u_{k+1} wird gemessen;

ee) die Differenz $\Delta u_k = u_{k+1} - u_k$ wird ermittelt;

ef) der Strom wird auf einen von i_{k+1} abweichenden Wert

$$i_{k+2} = i_{k+1} \pm \Delta i_k$$

begrenzt, wobei das Vorzeichen von Δi_k mit dem Vorzeichen gemäß ec) dann und nur dann übereinstimmt, wenn das Vorzeichen von Δu_k gemäß ee) positiv ist.

f) sowohl in der Normalphase als auch in der Testphase wird zumindest im Endabschnitt ein Mittelwert der Spannung ermittelt und gespeichert;

g) der Mittelwert der Testphase wird mit dem Mittelwert der zugehörigen Normalphase verglichen;

h) wenn in der Periode (m) in der Testphase der Mittelwert nicht größer ist als in der Normalphase, dann wird in der folgenden Periode (m + 1)

in der Normalphase mit der gleichen Pulszahl gearbeitet wie

in der Normalphase der Periode (m)

und beim Übergang in die Testphase die Pulszahl in umgekehrter

Richtung geändert wie in der Periode (m);

i) wenn aber in der Periode (m) der Mittelwert in der Testphase größer ist als in der Normalphase, dann wird in der folgenden Periode (m + 1)

in der Normalphase mit der gleichen Pulszahl gearbeitet wie

in der Testphase der Periode (m)

und beim Übergang in die Testphase die Pulszahl in der gleichen

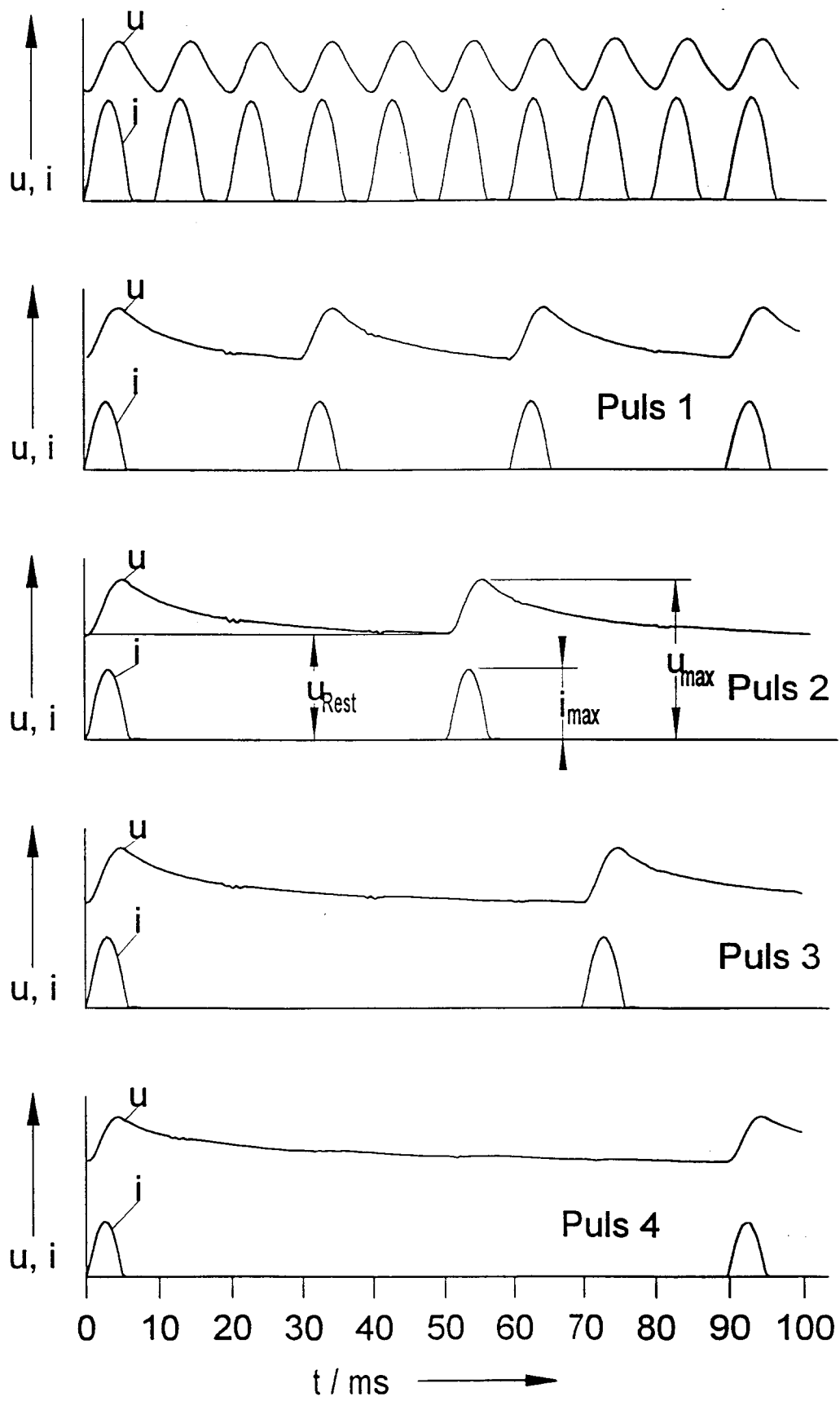
Richtung geändert wie in der Periode (m).

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß sich die Dauer der Normalphase zur Dauer der Testphase verhält wie 4:1 bis 20:1.

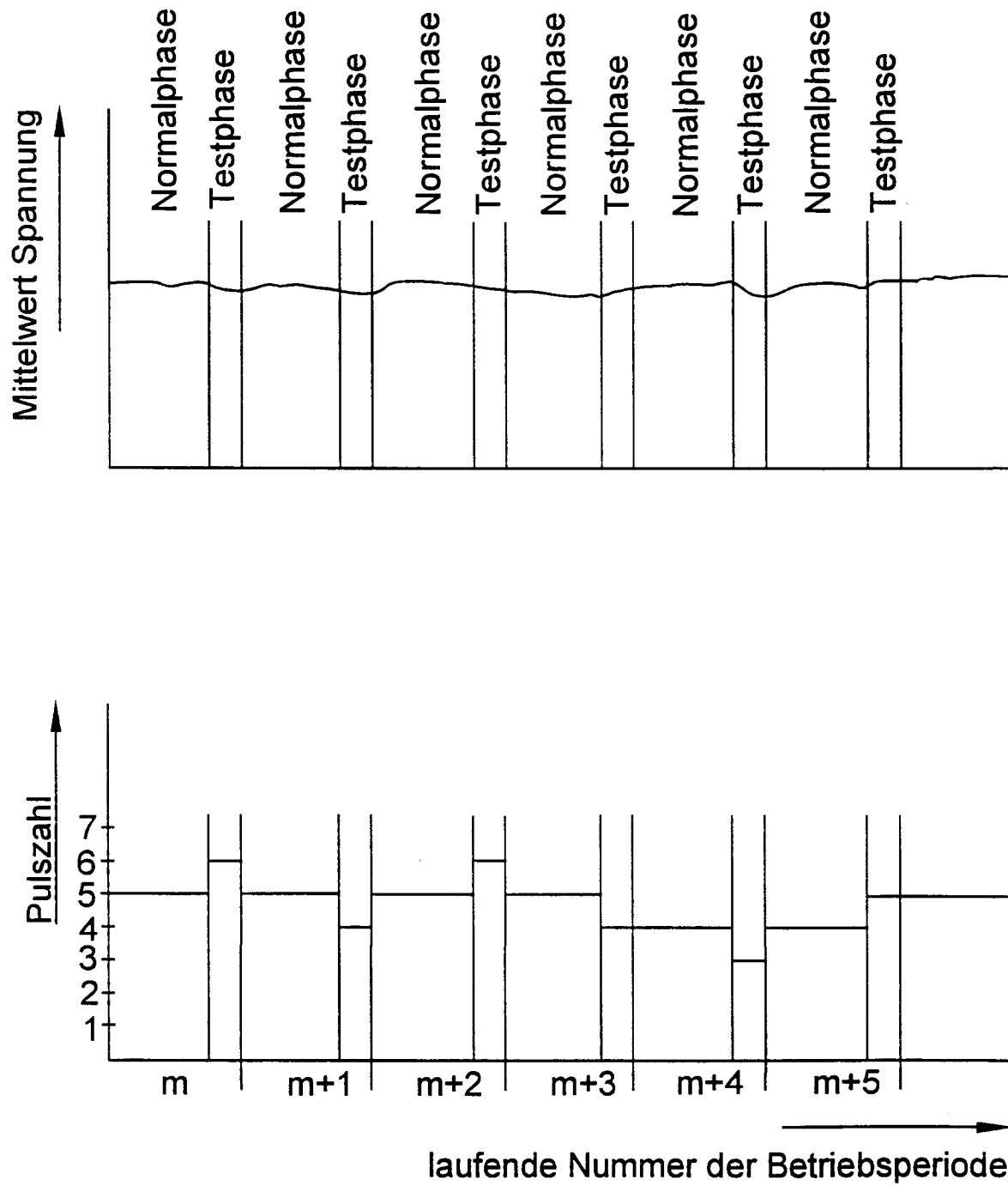
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Dauer einer Betriebsperiode 1 bis 2 h beträgt.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Dauer eines Zyklus 10 bis 30 s beträgt.

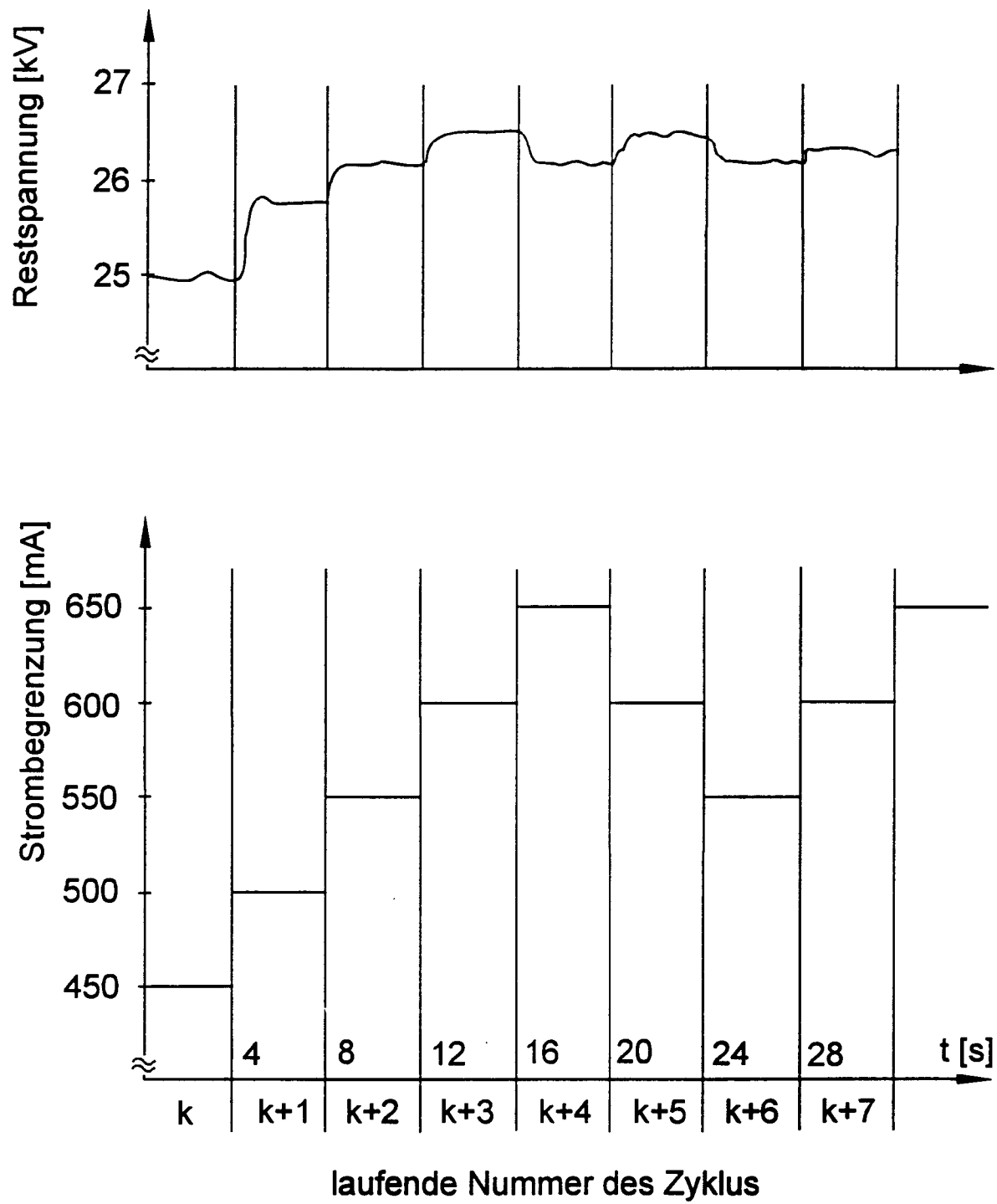
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Absolutwert $|\Delta i_k|$ zwischen 0,05 i_k und 0,15 i_k beträgt.



Figur 1



Figur 2

Figur 3