



(10) **AT 514356 A1 2014-12-15**

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50360/2013 (51) Int. Cl.: **G01R 31/04** (2006.01)
 (22) Anmeldetag: 28.05.2013 **G01R 31/34** (2006.01)
 (43) Veröffentlicht am: 15.12.2014 **B60L 3/00** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
 LEE, S.B. et al. "A New Strategy for Condition Monitoring of Adjustable Speed Induction Machine Drive Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Februar 2011 (02.2011), Vol.26, No.2, Seiten 389-398, ISSN 0885-8993, XP011334727 US 2010060289 A1
 YUN, J. et al. "Detection and Classification of Stator Turn Faults and High-Resistance Electrical Connections for Induction Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, März/April 2009 (03/04.2009), Vol.45, No.2, Seiten 666-675, ISSN 0093-9994, XP011253778

(71) Patentanmelder:
 TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
 1040 WIEN (AT)

(74) Vertreter:
 SONN & PARTNER PATENTANWÄLTE
 WIEN

(54) **Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen von Kontaktfehlern an einer elektrischen Maschine**

(57) Zum Erkennen von Kontaktfehlern an einer elektrischen Maschine (2), die von einem Umrichter (4) gespeist wird, werden mit Hilfe des Umrichters (4) zeitlich aufeinander folgend eine erste (V_1) und (eine) zweite, gegenüber der ersten erhöhte Spannung (V_2) angelegt sowie die dadurch bewirkten zugehörigen Maschinen-Ströme (i_1 , i_2) gemessen, und aus dem Quotienten der Differenz (Δ_V) der beiden Spannungen durch die Differenz (Δ_i) der beiden Ströme wird ein Wert für den Widerstand (r) ermittelt.

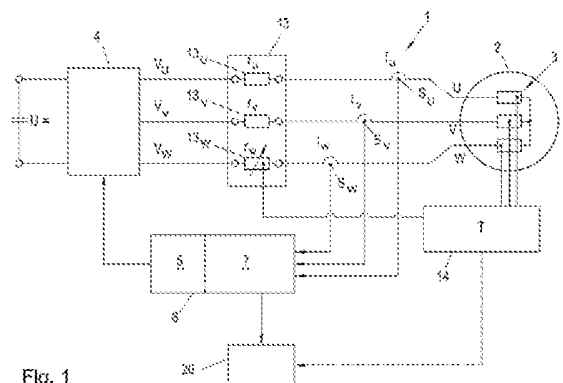


Fig. 1

Zusammenfassung:

Zum Erkennen von Kontaktfehlern an einer elektrischen Maschine (2), die von einem Umrichter (4) gespeist wird, werden mit Hilfe des Umrichters (4) zeitlich aufeinander folgend eine erste (V_1) und (eine) zweite, gegenüber der ersten erhöhte Spannung (V_2) angelegt sowie die dadurch bewirkten zugehörigen Maschinen-Ströme (i_1 , i_2) gemessen, und aus dem Quotienten der Differenz (Δ_v) der beiden Spannungen durch die Differenz (Δ_i) der beiden Ströme wird ein Wert für den Widerstand (r) ermittelt.

(Fig. 1)

Die Erfindung betrifft ganz allgemein das Gebiet von umrichter-
gespeisten elektrischen Maschinen und dabei mehr im einzelnen
ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zum Erkennen von Kontakt-
fehlern an einer von einem Umrichter gespeisten elektrischen Ma-
schine.

Zwischen einer elektrischen Maschine und dem sie ansteuernden
Umrichter befinden sich in der Regel Leiter, Anschlussklemmen,
Schalter, Sicherungen, Unterbrecher und dergl. Elemente. Dabei
liegen üblicherweise zahlreiche Metall-Metall-Kontakte vor, die
einen mehr oder weniger großen elektrischen Widerstand mit sich
bringen können. Hierbei ist zu beachten, dass bei derartigen
Kontakten die Kontaktflächen nicht eben und kontinuierlich sind,
sondern uneben. Demgemäß bilden nur kleine Flächenbereiche die
tatsächliche Kontaktfläche. Weiters liegen bei üblichen Metall-
Kontakten, z.B. Aluminium, Kupfer oder Messing, nichtleitende
Oxidfilme vor, und ein guter elektrischer Kontakt kann nur dort
erhalten werden, wo durch einen hohen Kontaktdruck der Oxidfilm
unterbrochen wird.

Wenn nun derartige elektrische Kontakte vergleichsweise hohen
Strömen ausgesetzt werden, wie dies bei elektrischen Maschinen,
die in der Industrie und für Antriebssysteme verwendet werden,
üblich ist, so führen diese Ströme in den Metall-Metall-Kontakt-
bereichen zu einem Temperaturanstieg, der zu Abbauprozessen und
zu einem Anwachsen von Oxidfilmen führt. Insbesondere führen
Ströme bei Überlast oder Kurzschluss zu einer hohen Übertempera-
tur und in der Folge zu einer wesentlichen Widerstandserhöhung.

Andererseits können sich bei Lastwechseln verschiedene mechani-
sche Drücke oder Kräfte im Bereich der Kontaktteile, wie Bolzen
und Klemmen, ergeben, wobei Wärmedehnungen von verschiedenen Ma-
terialien problematisch sind. Wenn beispielsweise eines der Kon-
taktmaterialien einen doppelt so hohen
Wärmeausdehnungskoeffizienten hat, verglichen mit dem anderen am
Kontakt beteiligten Material, erhöht sich der Druck nach dem Er-
hitzen des Verbindungsbereichs auf das Doppelte. Dies führt zu
Deformationen der Kontaktteile und möglicherweise zu Rissen.

Schließlich sind auch noch Umgebungseinwirkungen in rauen Be-

triebsumgebungen zu berücksichtigen, wie etwa Feuchtigkeit, Staub, Verschmutzungen, Änderungen in der Umgebungstemperatur, Vibrationen, äußere mechanische Kräfte und dergl., was zu einer vergleichsweise hohen Abnutzung und Korrosion von Kontaktteilen führen kann.

Ein anwachsender Widerstand im Bereich eines Kontaktes ergibt einen reduzierten Wirkungsgrad der Verbindungsteile und somit des gesamten Systems. Zu beachten ist hier weiters, dass der Grad an Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindungen nicht geringer sein sollte als jener des Umrichters und der Maschine. Untersuchungen haben gezeigt (vgl. R.S. Colby, „Detection of high-resistance motor connections using symmetrical component analysis and neural networks“), dass Verbindungen mit hohem Widerstand mit zu den Hauptgründen für den Ausfall von elektrischen Systemen zählen. Dabei sind nicht nur die hohen Widerstände selbst problematisch, sondern auch die nachfolgenden Ausfälle oder Störungen. Beispielsweise führt ein erhöhter Widerstand in einer Phase einer Mehrphasen-Maschine zu einer Spannungsasymmetrie in der Statorwicklung und schließlich zu Defekten in der Statorwicklung, wobei dies zu den häufigsten Ausfallgründen zählt.

Es wurden demgemäß bereits Untersuchungen durchgeführt, um elektrische Verbindungen mit hohem Widerstand zu ermitteln, wobei sich diese Untersuchungen in der Regel allerdings mit netzgespeisten Maschinen befassten. Diese Untersuchungsergebnisse lassen sich aber praktisch nicht auf umrichter gespeiste Maschinen übertragen. Auch sind zusätzliche Sensoren, wie Spannungssensoren, notwendig, die die Kosten erhöhen. Außerdem beschränkten sich diese Untersuchungen in der Regel auf das Feststellen von bereits aufgetretenen Fehlern im elektrischen Schaltkreis, wogegen es wünschenswert wäre, beginnende Fehler sicher und rasch festzustellen, etwa um gravierendere Maschinenschäden zu vermeiden.

Wünschenswert wäre daher eine Technik zur Überwachung von elektrischen Maschinen, nämlich umrichter gespeisten Maschinen, ohne zusätzlichen Schaltungsaufwand und mit der Möglichkeit, beginnende Widerstandserhöhungen in Kontaktbereichen – auch ohne die

hier üblichen visuellen Untersuchungen und händischen Widerstandsmessungen - zu erfassen. Dabei ist etwa bei Maschinen in Antriebssystemen in der Regel ein Zugang zu Verbindungen von Kontakten nicht ohne Weiteres möglich. Andererseits soll jedoch die Überwachungstechnik ohne Demontagen auskommen können.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung zum Erkennen von Kontaktfehlern an umrichter gespeisten elektrischen Maschinen vorzuschlagen, wobei bereits beginnende Kontaktfehler zuverlässig festgestellt werden können sollen, und wobei ein besonderer apparativer Aufwand vermieden werden soll.

Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht darin, auch im Fall von Mehrphasen-Maschinen, insbesondere Dreiphasen-Maschinen, derartige Kontaktfehler frühzeitig zu erkennen, insbesondere wenn sie auch nur in einer Phase vorliegen und sie der jeweiligen Phase zuordnen zu können, wobei in der Folge Asymmetrien in den Phasenspannungen an den Statorwicklungen reduziert bzw. vermieden werden können sollen, um so einen Maschinenausfall zur Folge einer fehlerhaften Statorwicklung möglichst zu verhindern.

Demgemäß sieht die Erfindung ein Verfahren zum Erkennen von Kontaktfehlern an einer elektrischen Maschinen vor, die von einem Umrichter gespeist wird, dadurch gekennzeichnet, dass mit Hilfe des Umrichters zeitlich aufeinander folgend eine erste und eine zweite, gegenüber der ersten erhöhte Spannung angelegt sowie die dadurch bewirkten zugehörigen Maschinen-Ströme gemessen werden, und aus dem Quotienten der Differenz der beiden Spannungen durch die Differenz der beiden Ströme ein Wert für den Widerstand ermittelt wird.

Weiters ist Gegenstand der Erfindung eine Vorrichtung zum Erkennen von Kontaktfehlern an einer von einem Umrichter gespeisten elektrischen Maschine, mit zumindest einem Stromsensor zur Erfassung eines bei Anlegen einer Spannung an die Maschine durch den Umrichter bewirkten Maschinen-Stroms, gekennzeichnet durch eine mit dem Stromsensor verbundene Messanordnung mit Erfassungsmitteln für die Umrichter-Spannung und mit einer Widerstands-Ermittlungseinheit, um bei einem aufeinanderfolgenden Anlegen von zwei verschiedenen Spannungen, wobei die zweite

Spannung gegenüber der ersten erhöht ist, und wobei zwei verschiedene Ströme bewirkt werden, durch Quotientenbildung von Spannungs- durch Stromdifferenz einen Maschinenanschluss-Widerstandswert zu ermitteln.

Die Erfindung basiert dabei auf der Erkenntnis, dass bei einer elektrischen Maschine unmittelbar nach dem Starten die Temperatur in Kontaktbereichen noch gleich der Umgebungstemperatur sein wird; ein Anstieg des Widerstands wird in dieser Startphase eher vernachlässigbar bzw. kaum detektierbar sein. Wenn jedoch der Strom durch einen Kontakt, etwa zur Folge einer entsprechenden Maschinenlast, steigt, wird auch der Widerstand sich erhöhen. Wenn nun eine Verbindungs- bzw. Kontaktstelle fehlerhaft ist, wird hier der Widerstand rascher ansteigen als in Kontakten. Ein derartiger Störfall wird auch als heißer Kontaktpunkt (HCP - Hot Contact Point) bezeichnet, und die Ermittlung von derartigen HCP-Fehlern ermöglicht es, rasch zu reagieren und Auswirkungen bis hin zu einem Ausfall zu vermeiden.

Die vorliegende Technik basiert demgemäß auf der Messung von Strom-Antworten auf Spannungsstufen, die vom Umrichter erzeugt werden. Ein Vorteil dabei ist auch, dass üblicherweise in einem Umrichterkreis bereits standardmäßig Stromsensoren vorgesehen sind, sodass diesbezüglich keine zusätzlichen Komponenten (Hardware) erforderlich sind. Andererseits ist die vom Umrichter angelegte jeweilige Spannung von der Ansteuerung des Umrichters her bekannt, und wenn dann der sich ergebende Strom gemessen wird, kann der Widerstand gemäß dem Ohm'schen Gesetz berechnet werden.

Allerdings wird die von einem Umrichter an die elektrische Maschine angelegte Spannung durch ein nicht-ideales Verhalten des Umrichters beeinträchtigt, und es wäre eigentlich notwendig, die Ausgangsspannungen des Umrichters zusätzlich, mit eigenen Spannungssensoren, zu erfassen. Dies würde jedoch zu erhöhten Kosten führen, da an sich Spannungssensoren für die Steuerung bzw. Regelung der Maschinensysteme nicht erforderlich sind und daher auch in der Regel nicht vorhanden sind bzw. nicht eingesetzt werden.

Üblicherweise wird die Ausgangsspannung des Umrichters durch dessen Schalten gemäß der an sich bekannten Pulsweitenmodulation (PWM) erzeugt. Abgesehen von den dabei erhaltenen diskreten Pulsen ergeben sich dabei weitere, inhärente Erscheinungen, wie Spannungsabfälle, Flanken in den Übergängen der Ausgangsspannung, Aus- und Einschaltzeiten sowie Totzeiten des Umrichters. Alle diese Erscheinungen beeinflussen die Widerstandsermittlung oder -abschätzung zur Folge der Verzerrung der Umrichter-Ausgangsspannung. Diese Effekte sollten daher eliminiert oder zumindest reduziert werden, ohne eine eigene Spannungsmessung zu erfordern, um eine möglichst genau Widerstandsermittlung zu erreichen.

Dies gelingt bei der vorliegenden Technik durch die vorerwähnte Quotientenbildung Spannungsdifferenz durch Stromdifferenz, wie nachstehend noch näher erläutert werden wird, wobei die vorerwähnten Effekte zur Folge der nicht-exakten Ausgangsspannung des Umrichters zumindest wesentlich reduziert werden. Eine eigene Spannungsmessung kann sich dabei erübrigen.

Im Prinzip ist es denkbar, die zweite, höhere Spannung relativ lange an die Maschine anzulegen, sodass sich durch den erhöhten Stromfluss eine entsprechende Erwärmung und damit Beeinflussung des Widerstands im Anschlussbereich der elektrischen Maschine ergibt. Der dann ermittelte Widerstand könnte mit einem vorgegebenen bzw. bei Beginn der Verwendung der Maschine gemessenem, gespeicherten Widerstandswert verglichen werden, um so einen etwaigen Anstieg des Widerstands feststellen zu können. Eine besonders einfache und elegante Lösung ergibt sich jedoch, wenn die Widerstandsermittlung zumindest einmal wiederholt wird und die erhaltenen Widerstands-Werte verglichen werden. Dabei wird besonders bevorzugt, wenn die angelegten Spannungen erhöht werden, bis allgemein ein Nennstrom in der Maschine fließt. Sollte sich bei diesen Wiederholungen ein anormaler, übermäßiger Temperaturanstieg an irgendeiner Verbindungsstelle im Bereich der Spannungszuführung zur Maschine ergeben, würde der damit verbundene erhöhte Widerstand sicher erfasst und angezeigt werden können.

Tests haben hier gezeigt, dass es für eine verlässliche Untersu-

chung auf etwaige Kontaktfehler ausreichend ist, wenn die Messungen während einer Messdauer von z.B. 120s vorzugsweise kontinuierlich oder aber Sekunden-weise wiederholt werden.

Die Messungen werden dabei bevorzugt vor einer jeweiligen Inbetriebnahme der Maschine durchgeführt; im Prinzip kann die beschriebene Widerstandsermittlung auch im Betrieb, allerdings nur in speziellen Betriebsphasen, nämlich bei stillstehender Maschine, durchgeführt werden.

Demgemäß ist es von besonderem Vorteil, wenn die Messungen und Widerstandsermittlungen bei unbelasteter, stillstehender Maschine durchgeführt werden.

Die vorliegende Technologie ist besonders vorteilhaft bei Mehrphasen-Maschinen, insbesondere Dreiphasen-Maschinen, anzuwenden, wobei dann die Messungen und Widerstandsermittlungen sowie -vergleiche für jede Phase einzeln durchgeführt werden. Die für die einzelnen Phasen erhaltenen Widerstands-Werte werden dann nicht nur für jede Phase isoliert ausgewertet, sondern zweckmäßig auch im Hinblick auf eine etwaige asymmetrische Widerstandserhöhung miteinander verglichen.

Bei diesen Widerstands-Ermittlungen werden bevorzugt die in den einzelnen Phasen bereits vorhandenen (drei) Stromsensoren direkt zur Strommessung herangezogen; es ist aber auch denkbar, nur zwei Phasen-Stromsensoren zu verwenden, und zwar in Kombination mit einer Stromsummen-Erfassung, um die einzelnen, drei Phasenströme und in der Folge die drei Phasen-Widerstände zu ermitteln.

Insbesondere kann hier eine besonders einfache Vorgangsweise bei der Fehlerermittlung erzielt werden, wenn die jeweiligen Phasen-Widerstände in eine Zeigerform, in einer komplexen Ebene, transformiert werden.

Alternativ kann auch direkt durch Messung aller Sensoren (bzw. von mindestens zwei Sensoren) jeweils ein komplexer Zeiger gebildet werden, d.h. es werden somit drei komplexe Zeiger für die Phasenwerte der Widerstände erhalten. Die Richtungen der drei

Zeiger können - bei asymmetrischer Anordnung - auch verschieden von den Phasenrichtungen (0° , 120° , 240°) sein.

In apparativer Hinsicht weist die Messanordnung vorzugsweise eine Vektortransformationseinheit auf, die eingerichtet ist, die jeweiligen Phasen-Widerstände in eine Zeigerform zu transformieren.

In der Folge können dann die erhaltenen, Phasen-bezogenen Widerstands-Zeiger räumlich addiert werden, wozu eine geeignete Additionseinheit mit der Vektortransformationseinheit verbunden werden kann, und der sich dann ergebende Einzel-Vektor - der im Idealfall Null ist - kann dann als Fehler-Indikator herangezogen werden.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von besonders bevorzugten Ausführungsbeispielen, auf die sie jedoch nicht beschränkt sein soll, und unter Bezugnahme auf die Zeichnung noch weiter erläutert. Im Einzelnen zeigen in der Zeichnung:

Fig. 1 ein schematisches Blockschaltbild einer Anlage mit Umrichter und elektrischer Maschine (Induktionsmaschine), und mit einem Steuerungs- (Regelungs-) sowie Messsystem;

Fig. 2 in einer Art Schaltbild eine Vorrichtung zur Erkennung von Kontaktfehlern bei einem System etwa gemäß Fig. 1;

Fig. 3 Phasen-bezogene Widerstandswerte und einen Fehler-Indikator in einer komplexen Ebene, und zwar für eine ordnungsgemäß funktionierende Maschine;

Fig. 4 eine entsprechende Darstellung eines Fehler-Indikators in einer komplexen Ebene, und zwar für den Fall eines Kontaktfehlers in einer einzelnen Phase;

Fig. 5 in Teildiagrammen A, B und C, den Verlauf der Temperatur (Fig. 5A) und den Verlauf eines Phasenstroms (Fig. 5B), und zwar jeweils für den Fall einer ordnungsgemäß funktionierenden Maschine in ausgezogener Linie und für den Fall eines Kontaktfeh-

lers, mit gestrichelter Linie; sowie - in Fig. 5C - den Verlauf der Stromdifferenz bei einem Kontaktfehler, jeweils für die Dauer eines Messintervalls;

Fig. 6 in einem Diagramm den Verlauf der Größe eines Fehler-Indikators, und zwar in einem ersten Abschnitt ohne Filterung und in einem zweiten Abschnitt mit Tiefpassfilterung;

Fig. 7 eine schematische Darstellung eines komplexen Fehler-Indikators abhängig von der Zeit, und zwar einerseits für eine ordnungsgemäß funktionierende Anlage und andererseits für den Fall eines HCP-Fehlers; und

Fig. 8 in einem zu Fig. 7 gehörigen Diagramm die Größe des Fehler-Indikators (in beliebigen Einheiten) über der Zeit, und zwar mit punktierter Linie für den Fall eine ordnungsgemäß funktionierenden Systems, mit ausgezogener Linie für den Fall eines Kontaktfehlers (HCP-Fehler), und mit strichlierter Linie für den Fall eines bereits früher an einem Test-Anschluss teil bewusst für die betreffende Phase besonders erhöhten Widerstandswertes.

In Fig. 1 ist allgemein eine Maschinenanlage 1 mit einer Dreiphasen-Induktionsmaschine 2 (nachstehend kurz Maschine 2 bezeichnet), mit drei nur schematisch veranschaulichten Wicklungen 3 für Phasen U, V und W veranschaulicht. Die Maschine 2 wird von einem Umrichter 4 gespeist, der entsprechende Phasenspannungen V_U , V_V und V_W bei entsprechender Ansteuerung durch eine Steuereinheit 5, die Teil eines Steuer- (Regel-) und Messsystems 6 ist, abgibt. Üblicherweise erfolgt dabei die Ansteuerung, d.h. das Schalten, des Umrichters 4 mittels PWM.

Zwischen dem Umrichter 4 und der Maschine 2 sind Stromsensoren S_U , S_V und S_W zur Messung der Phasenströme i_U , i_V und i_W in üblicher Weise vorgesehen. Über diese Erfassung der Phasenströme i_U , i_V und i_W kann auch anstatt einer bloßen Ansteuerung des Umrichters 4 eine Regelung, beispielsweise zur Regelung der Leistung oder der Stromaufnahme der Maschine 2, mit Hilfe des Systems 6 durchgeführt werden.

Soweit bisher beschrieben ist die Maschinenanlage 1 an sich her-

kömmlich, sodass keine weiteren Erläuterungen hierzu erforderlich sind.

Wie bereits erwähnt können sich aufgrund der verschiedensten Ursachen einschließlich Schaltvorgängen und insbesondere Umrichter-Totzeiten Unregelmäßigkeiten in der Spannungs- und damit Stromversorgung ergeben. Die tatsächlich an die Wicklungen 3 der Maschine 2 angelegten Spannungen V sind daher nicht unbedingt gleichbleibende, symmetrische Ausgangsspannungen des Umrichters 4. Wenn daher eine einfache Widerstandsmessung durchgeführt würde, um so in der Verbindung zwischen Umrichter 4 und Maschine 2 etwaige Erhöhungen von Widerständen feststellen zu können, so wäre es notwendig, entsprechende Spannungssensoren zusätzlich an der Maschine 2 vorzusehen. Eine derartige Widerstandsmessung wäre durchzuführen, um etwaige Erhöhungen von Kontaktwiderständen, allgemein Kontaktfehler, in den Zuleitungen zu den Wicklungen 3 der Maschine 2 festzustellen, wobei hier die verschiedensten Elemente, wie Anschlusskontakte, Sicherungen, Unterbrecher, Leitungen usw., gegeben sind. Um diese Phänomene zu eliminieren oder zumindest weitestgehend auszuschalten, ist nun eine mehrfache Strommessung vorgesehen, die mit den entsprechenden Ansteuerungs-Spannungen V des Umrichters 4 in Verbindung gesetzt wird, um eine Widerstandsermittlung durchzuführen.

Im Einzelnen werden im gezeigten Beispiel Spannungszeiger mit derselben Richtung, jedoch mit unterschiedlicher Größe vom Umrichter 4 angelegt. Die Messung wird dabei bevorzugt bei stillstehender Maschine, ohne Last und ohne Fluss, durchgeführt. Da nur der Widerstandswert ermittelt wird und nur stationäre Endwerte in Betracht gezogen werden, haben auch die resultierenden Ströme dieselbe Richtung. Ganz allgemein führt eine erste Spannung V_1 des Umrichters 4 zu einem ersten Strom i_1 und eine zweite, höhere Spannung V_2 zu einem Strom i_2 . Die vorstehend angeführten, die Widerstandsmessung ansonsten beeinträchtigenden Effekte können nun dadurch eliminiert werden, dass die Differenzen $\Delta_V = V_2 - V_1$ und $\Delta_i = i_2 - i_1$ gebildet werden. Hieraus kann dann der Widerstand $R = \Delta_V / \Delta_i$ berechnet werden.

Eine solche Widerstandswert-Ermittlung wird nun im vorliegenden Beispiel für jede Phase U, V und W durchgeführt, sodass alle

Phasen-Widerstände nicht nur für sich verglichen sondern auch miteinander kombiniert werden können. Auf diese Weise können symmetrische Einflüsse (Statorwiderstand) reduziert bzw. eliminiert werden, und eine Darstellung der Phasensymmetrie wird erhalten.

Gemäß Fig. 1 wird nun mit einer zum Steuer- und Messsystem 6 gehörenden Messanordnung 7, die nachfolgend noch näher anhand der Fig. 2 erläutert werden soll, und die mit den Stromsensoren S_U , S_V und S_W verbunden ist, die Widerstandsmessung nach dem vorstehend bestimmten Prinzip für alle drei Phasen U, V und W durchgeführt.

Als erstes wird beispielsweise eine Spannung in der Phase U an die Maschine 2 angelegt, und die Stromantwort wird mithilfe des Sensors S_U gemessen. (An sich können auch alle drei Stromsensoren S für die Strommessung herangezogen werden, um Messtoleranzen bei den einzelnen Sensoren S zu reduzieren.) Sodann wird ein zweiter, höherer Spannungszeiger in derselben Phasenrichtung angelegt, und der Strom wird neuerlich erfasst. Dies ist in Fig. 2 näher veranschaulicht, wobei schematisch für die Phase U die Generierung der Spannungszeiger bei V_{U1} und V_{U2} durch entsprechende Ansteuerung des Umrichters 4 bzw. allgemein Erfassungsmittel 5' für die vorgegebenen Umrichter-Spannungen gezeigt ist bzw. sind. Die Spannungszeiger sind somit jene, wie sie durch die Ansteuerung des Umrichters 4 als Soll-Spannungen generiert werden. In entsprechender Weise werden mithilfe der Messanordnung 7 die entsprechenden Ströme i_{U1} und i_{U2} gemessen. Die erhaltenen Stromwerte i_{U1} , i_{U2} werden in nachfolgenden Tiefpassfiltern 8 gefiltert und danach einer Widerstandsermittlungseinheit 9U zugeführt, wo die vorgenannte Differenz- und Quotientenbildung erfolgt, um als Ausgangswert den Widerstand r_U in der Phase U zu erhalten.

Ganz analog wird für die Phasen V und W vorgegangen, um so über Widerstandsermittlungseinheiten 9V und 9W (allgemein „9“) die Widerstandswerte r_V und r_W zu erhalten. Diese Werte werden nachfolgend auch „Widerstandszeiger“ genannt, und sie sind für die jeweiligen Phasen-Widerstandswerte repräsentativ, aber nicht mit anderen Zeigergrößen, wie Spannung, Strom oder Fluss, vergleichbar.

In einer Vektortransformationseinheit 10 werden sodann diese Widerstandswerte r_U , r_V und r_W von einer skalaren Größe zu einer Vektorgröße mit der entsprechenden Amplitude, gemäß dem ermittelten Wert, und mit einer entsprechenden Phasenrichtung als Winkelposition gemäß folgenden Beziehungen ermittelt:

$$\begin{aligned}\underline{r}_U &= r_U \cdot e^{j0} \\ \underline{r}_V &= r_V \cdot e^{j2\pi/3} \\ \underline{r}_W &= r_W \cdot e^{j4\pi/3}\end{aligned}$$

Denkbar ist es aber auch, bereits bei der Bestimmung der einzelnen Phasenwerte der Widerstände r_U , r_V , r_W unmittelbar auf komplexe Vektorgrößen überzugehen.

In einem nachfolgenden Schritt wird mithilfe einer Additionseinheit 11 eine räumliche Addition der Widerstandszeiger $\underline{r}_U$, $\underline{r}_V$ und $\underline{r}_W$ durchgeführt, wobei im Idealfall, wenn alle Leitungs- und Kontaktwiderstände in der Anlage 1 gleich sind, also die Phasen diesbezüglich symmetrisch sind, zufolge dieser Addition ein Null-Vektor erhalten wird. Dieser Null-Vektor zeigt somit einen ordnungsgemäßen Zustand der Anlage 1, unabhängig von symmetrischen Widerstandsänderungen etwa zur Folge Temperaturänderungen in den Statorwicklungen, an.

Dieser Zustand ist in Fig. 3 schematisch veranschaulicht, wobei bei U, V und W die Endpunkte der Widerstands-Zeiger in einer komplexen Ebene mit Realteil („real“) und Imaginärteil („imag“) veranschaulicht sind. Im Nullpunkt befindet sich in diesem Symmetrie-Fall, dem idealen, fehlerlosen Fall, der „Fehler“-Indikator, der hier gleich Null ist. Dieser Fehler-Indikator wird hier allgemein mit 12 bezeichnet.

In Fig. 1 ist nun weiters allgemein bei 13 ein Verbindungsmodul gezeigt, wobei die Phasen-Widerstände r_U , r_V und r_W symbolisch zusammengefasst dargestellt sind. In einem Test wurde tatsächlich ein derartiges Verbindungs- oder Anschlussmodul 13 realisiert, und für die Phase W wurde der Verbindungs- oder Kontaktwiderstand r_W verändert, wie nachfolgend noch näher erläutert werden wird, um so einen Kontaktfehler (beispielhaft für alle Phasen)

in der Phase W zu simulieren.

Im Einzelnen wurde auf einem Labor-Prüfstand eine 280 V-11 kW-Käfigrotor-Induktionsmaschine 2 mit einem Inverter 4 installiert. Das Steuer- bzw. (Regel-) und Messsystem 6 wurde mit einem Rechnersystem realisiert, das unter MATLAB/Simulink programmierbar war. Im Verbindungsmodul 13 waren zur Realisierung von Phasen-Widerständen r_u , r_v und r_w zunächst Kupfer-Leitungen mit gleichem elektrischen Widerstand angebracht zur Simulation von Kontakten 13_v , 13_u und 13_w , wobei im Anschluss daran die wie vorstehend beschriebenen Widerstands-Ermittlungen und -Auswertungen einen Fehler-Indikator = 0 wie im Diagramm gemäß Fig. 3 gezeigt ergaben. Der Widerstand der Kupferleitungen bzw. der Zuleitung von Umrichter 4 zu Maschinenwicklungen 3 betrug dabei in allen drei Phasen beispielhaft 10,8 mΩ.

Diese Messung kann als Referenz, als Anfangswert für eine ordnungsgemäß funktionierende Anlage, dienen.

Konkret wurde diese erste Messung bei einer geringen Amplitude der Spannungszeiger durchgeführt, wobei die zweite Spannung V_2 beispielhaft viermal so groß wie die erste Spannung V_1 war.

Es wurde dann die Kupferverbindung für die Phase W im Anschlussmodul 13 (Kontakt 13_w) gegen eine Verbindung mit einem höheren Widerstandswert, nämlich 18 mΩ, getauscht, was eine Erhöhung des Widerstandswerts in der Phase W um ungefähr 60% bedeutet. Der Fehler-Indikator 12' ergab sich in diesem Fall in der komplexen Ebene entsprechend in der Richtung der W-Phase verschoben, s. Fig. 4 (in Fig. 4 wurden der Einfachheit halber die einzelnen Widerstands-Zeiger nicht näher veranschaulicht, sondern nur die einzelnen Phasenrichtungen U, V und W). Die Verschiebung des Fehler-Indikators 12 vom Nullpunkt, Fehler-Indikator 12, zum im dritten Quadranten vorliegenden Punkt 12' deutet eindeutig auf einen erhöhten Widerstand in der Phase W hin. Dieser Fehler ergab sich wie erwähnt aufgrund des Austauschs der ursprünglichen Verbindungsleitung aus Kupfer durch eine Leitung mit dem höheren Widerstandswert in der Phase W, bei vergleichsweise geringen Spannungen, und bei einer Messdauer von 5 s.

In einem weiteren Test wurde der Kupferleiter im Verbindungsmodul 13 in der Phase W durch eine Zinnstreifen-Verbindung ersetzt. Zur Ermittlung der Widerstands/Temperatur-Beziehung wurde die Temperatur dieser „Zinnbrücke“ 13_W mit dem veränderlichen Phasenwiderstand r_W (s. Fig. 1) mithilfe eines Temperaturfühlers gemessen. In entsprechender Weise wurden auch die Temperaturen der Wicklungen 3 der Maschine 2 gemessen; vgl. auch die in Fig. 1 schematisch veranschaulichte Temperaturmesseinheit 14. Die Zinnbrücke in der Phase W hatte bei Umgebungstemperatur einen Ohm'schen Widerstand gleich jenem der Kupferleiter in den anderen Phasen, also 10,8 m Ω .

Die Messdauer, d.h. die Stufenspannung, nach Umschaltung von der Spannung V_1 , der ersten Spannung, auf die zweite Spannung V_2 in jeder Phase U, V und W, betrug beispielhaft 120 s.

In den Diagrammen A, B und C der Fig. 5 sind nun beispielhaft Messergebnisse für eine derartige Fehlersimulation in der Phase W dargestellt. Im Diagramm gemäß Fig. 5A ist der Temperaturverlauf T_W veranschaulicht. Die Temperatur der „defekten“ Kontaktstelle 13_W , mit der Zinnbrücke in der Phase W, stieg gemäß der strichlierten Linie in Fig. 5A von ungefähr Raumtemperatur auf über 300°C an, wogegen sich die Temperatur $T_{U,V}$ der „gesunden“ Kontaktstellen 13_U , 13_V in den Phasen U und V kaum veränderte. Mit anderen Worten, der Temperaturanstieg in den Phasen U, V, s. die ausgezogene Linie $T_{U,V}$ in Fig. 5A, hatte einen wesentlich geringeren Anstieg als der Temperaturverlauf T_W in der Phase W. In der Folge war im übrigen in diesem Test ein Anstieg der Wicklungstemperatur in der Phase W von 26°C auf 38°C festzustellen, wogegen die Wicklungstemperatur in den Phasen U und V von 26°C auf nur 33°C erfolgte.

Während des selben Messintervalls sank der Strom i_W im Fall der „fehlerhaften Verbindung“, d.h. des simulierten Kontaktfehlers zur Folge der Zinnbrücke, wesentlich stärker, s. die strichlierte Linie i_W' in Fig. 5B, im Verhältnis zur ausgezogenen Linie i_W bei nicht-fehlerhafter Verbindung, wobei die Stromkurven für die Ströme i_U , i_V ähnlich wie mit der ausgezogenen Linie in Fig. 5B gezeigt verliefen.

Zur zusätzlichen Veranschaulichung ist in Fig. 5C die Differenz der Ströme, Δi_w , für den Fall des in der Phase W simulierten Kontaktfehlers (Zinnbrücke im Verbindungsmodul 13) veranschaulicht, wobei zu ersehen ist, dass der Betrag dieser Stromdifferenz Δi_w während des Messintervalls relativ stark anstieg; dies erklärt auch die starke Verschiebung des Fehler-Indikators 12' in Fig. 4 im Vergleich zum Null-Fehlerindikator 12 in diesem Diagramm.

In einem weiteren Test wurde eine Spannungsstufendauer von jeweils 30 s vorgesehen, und die Strommessung erfolgte innerhalb dieser Messdauer jeweils mit einer Abtastfrequenz von 5 kHz. Um das Signalrauschen zu unterdrücken, wurde allgemein ein Tiefpassfilter verwendet, wie dies auch in Fig. 2 mit den Filtern 8 in der Messanordnung veranschaulicht ist. Konkret wurde hier eine Softwarelösung, d.h. ein digitales Filter, das eine laufende Mittelung durchführte, implementiert, konkret ein 2FIR-Filter (FIR - Finite Impulse Response - nicht rekursives Filter) mit einer Fensterlänge von 1000 eingesetzt. Das Ergebnis dieser Filterung ist aus Fig. 6 zu ersehen, in der der Betrag des Fehlerindikators über der Zeit aufgezeichnet ist, wobei zunächst der Betrag ohne Filterung veranschaulicht ist, und das Filter 8 zum Zeitpunkt T_1 eingeschaltet wurde, wobei sich dann ein mehr oder weniger konstanter Mittelwert ergab.

In Fig. 7 ist in einer 3D-Darstellung der Fehlerindikator über der komplexen Ebene (wo beliebige Einheiten zugrunde gelegt wurden) und in Abhängigkeit von der Zeit veranschaulicht, und zwar zum einen, bei 12, für eine ordnungsgemäß funktionierende Anlage und bei 12' für den Fall eines "Kontaktfehlers", nämlich den Fall, wo der Widerstand 13W durch einen Zinnstreifen anstatt eines Kupferdrahts mit gleichem Widerstand wie in den anderen Phasen U und V (s. Fig. 1) ersetzt wurde. Die Höhe in der Zeitachse T entspricht ungefähr der Pulsdauer von 30 s.

Im Einzelnen sind die beiden Fehler-Indikatoren 12, 12' einerseits in der komplexen Basis-Ebene vergleichbar den Diagrammen gemäß Fig. 3 und 4 veranschaulicht und der Verlauf in der Zeit ist bei $\overline{12}$ bzw. $\overline{12'}$ gezeigt. Es ist dabei eine wesentliche Abweichung vom Null-Fehlerindikator 12 für den Fall des HCP-Fehlers erkennbar. Weiters ist hier auch erkennbar, dass die Abweichung

ungefähr in Richtung der Phase W liegt.

Bei den Tests wurde sodann die Verbindung in der Phase W im Anschlussmodul 13 mit einem Kupferdraht mit einem vergleichsweise höheren Widerstand ($52\text{ m}\Omega$) vorgenommen, was einer Erhöhung um ungefähr 480% im Vergleich zu den anderen Phasen U, V entspricht. In Fig. 8 ist nun die Größe des Fehler-Indikators in beliebigen Einheiten auf der Ordinate aufgetragen. Mit der punktiert gezeichneten Kurve 15 ist der Fall eines Null-Fehlerindikators 12 veranschaulicht; die mit durchgezogener Linie 16 veranschaulichte HCP-Situation zeigt, wie bei dem erhöhten Widerstand mit zunehmender Dauer der Messung der Fehlerindikator-Betrag steigt. Zur Vervollständigung ist schließlich noch in Fig. 8 mit einer strichliert gezeichneten Kurve 17 der Effekt des oben beschriebenen „Kontaktfehlers“ gezeigt, wobei sich aufgrund dieses Kontaktfehlers keine Änderung mehr im Betrag des Fehlerindikators während der Messung ergibt.

Wenn die Erfindung vorstehend anhand von besonders bevorzugten Ausführungsbeispielen erläutert wurde, so sind doch selbstverständlich weitere Abwandlungen und Modifikationen im Rahmen der Erfindung denkbar. So ist beispielsweise in Fig. 1 noch eine Ausgabeeinheit 20, etwa ein Display, gezeigt, die bzw. das mit der Messanordnung 7 einerseits und mit der Temperaturmesseinheit 14 andererseits verbunden ist, um entsprechende Anzeigen, beispielsweise in Diagrammform wie in den Fig. 3, 4 oder aber 5 bis 8 gezeigt erhalten zu können. Weiters ist die beschriebene Technik im Prinzip auch bei Einphasen-Maschinen anwendbar, wobei sich dann selbstverständlich die Zeiger-Darstellung erübrigen kann und eine einfache, lineare Widerstands-Ermittlung, mit Anlegen der ansteigenden Spannungen wie beschrieben, ergibt. In diesem Fall wird somit unmittelbar der eine Widerstandswert r bei der Ermittlung eines etwaigen Kontaktfehlers in der Anlage zugrunde gelegt.

Ein besonderer Vorteil ist auch, dass die beschriebene Technik realisiert werden kann, ohne dass zusätzliche Schaltungskomponenten erforderlich wären (die beschriebenen Temperatursensoren wurden vor allem zu Testzwecken eingesetzt, sind aber in der Praxis nicht wirklich erforderlich) - eine besonders günstige

Realisierung liegt in einer entsprechenden Ausgestaltung bzw. Programmierung eines Rechnerbausteins (μP , μC), der für die Umrichter-Ansteuerung bereits vorzusehen ist.

Patentansprüche:

1. Verfahren zum Erkennen von Kontaktfehlern an einer elektrischen Maschine (2), die von einem Umrichter (4) gespeist wird, dadurch gekennzeichnet, dass mit Hilfe des Umrichters (4) zeitlich aufeinander folgend eine erste (V_1) und (eine) zweite, gegenüber der ersten erhöhte Spannung (V_2) angelegt sowie die dadurch bewirkten zugehörigen Maschinen-Ströme (i_1, i_2) gemessen werden, und aus dem Quotienten der Differenz (Δ_v) der beiden Spannungen durch die Differenz (Δ_i) der beiden Ströme ein Wert für den Widerstand (r) ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Widerstandsermittlung zumindest einmal wiederholt wird und die erhaltenen Widerstands-Werte verglichen werden.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Spannungen erhöht werden, bis allgemein ein Nennstrom in der Maschine (2) fließt.
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Messungen während einer Messdauer von z.B. 120s kontinuierlich wiederholt werden.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Messungen und Widerstandsermittlungen bei unbelasteter, stillstehender Maschine (2) durchgeführt werden.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass im Fall einer Mehrphasen-Maschine (2) die Messungen und Widerstandsermittlungen sowie -vergleiche für jede Phase (U, V, W) durchgeführt werden.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die für die einzelnen Phasen (U, V, W) erhaltenen Widerstands-Werte (r_u, r_v, r_w) im Hinblick auf eine etwaige asymmetrische Widerstandserhöhung miteinander verglichen werden.
8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass die jeweiligen Phasen-Widerstände (r_u, r_v, r_w) in eine Zei-

gerform $(\underline{r}_U, \underline{r}_V, \underline{r}_W)$, in einer komplexen Ebene, transformiert werden.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die erhaltenen Phasen-bezogenen Widerstands-Zeiger räumlich addiert werden, wobei der sich ergebende Einzel-Vektor als Fehlerindikator (12) herangezogen wird.

10. Vorrichtung zum Erkennen von Kontaktfehlern an einer von einem Umrichter (4) gespeisten elektrischen Maschine (2), mit zumindest einem Stromsensor (S_U, S_V, S_W) zur Erfassung eines bei Anlegen einer Spannung an die Maschine (2) durch den Umrichter (4) bewirkten Maschinen-Stroms (i_U, i_V, i_W), gekennzeichnet durch eine mit dem Stromsensor (S_U, S_V, S_W) verbundene Messanordnung (7) mit Erfassungsmitteln (5') für die Umrichter-Spannung und mit einer Widerstands-Ermittlungseinheit (9), um bei aufeinanderfolgenden Anlegen von zwei verschiedenen Spannungen, wobei die zweite Spannung gegenüber der ersten erhöht ist, und wobei zwei verschiedene Ströme bewirkt werden, durch Quotientenbildung von Spannungs- durch Stromdifferenz einen Maschinenanschluss-Widerstandswert (r_U, r_V, r_W) zu ermitteln.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Messanordnung (7) eingerichtet ist, die Widerstands-Ermittlung, vorzugsweise kontinuierlich, zu wiederholen und die erhaltenen Widerstandswerte zu vergleichen.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Umrichter (4) mit einer Steueranordnung (5) verbunden ist, die eingerichtet ist, um die Spannungen zu erhöhen, bis allgemein ein Nennstrom in der Maschine (2) fließt.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass im Fall einer Mehrphasen-Maschine (2) pro Phase (U, V, W) ein Stromsensor (i_U, i_V, i_W) vorgesehen und die Messanordnung (7) eingerichtet ist, die Messungen bzw. Widerstandsermittlungen und -vergleiche für jede Phase durchzuführen.

14. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Messanordnung (7) eine Vektortransformationseinheit (10)

aufweist, die eingerichtet ist, die jeweiligen Phasen-Widerstände in eine Zeigerform ($\underline{r}_U$, $\underline{r}_V$, $\underline{r}_W$), in einer komplexen Ebene, zu transformieren.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass mit der Vektortransformationseinheit (10) eine Additionseinheit (11) verbunden ist, die eingerichtet ist, die Widerstands-Zeiger räumlich zu addieren und den sich ergebenden Einzel-Vektor als Fehlerindikator (12) auszugeben.

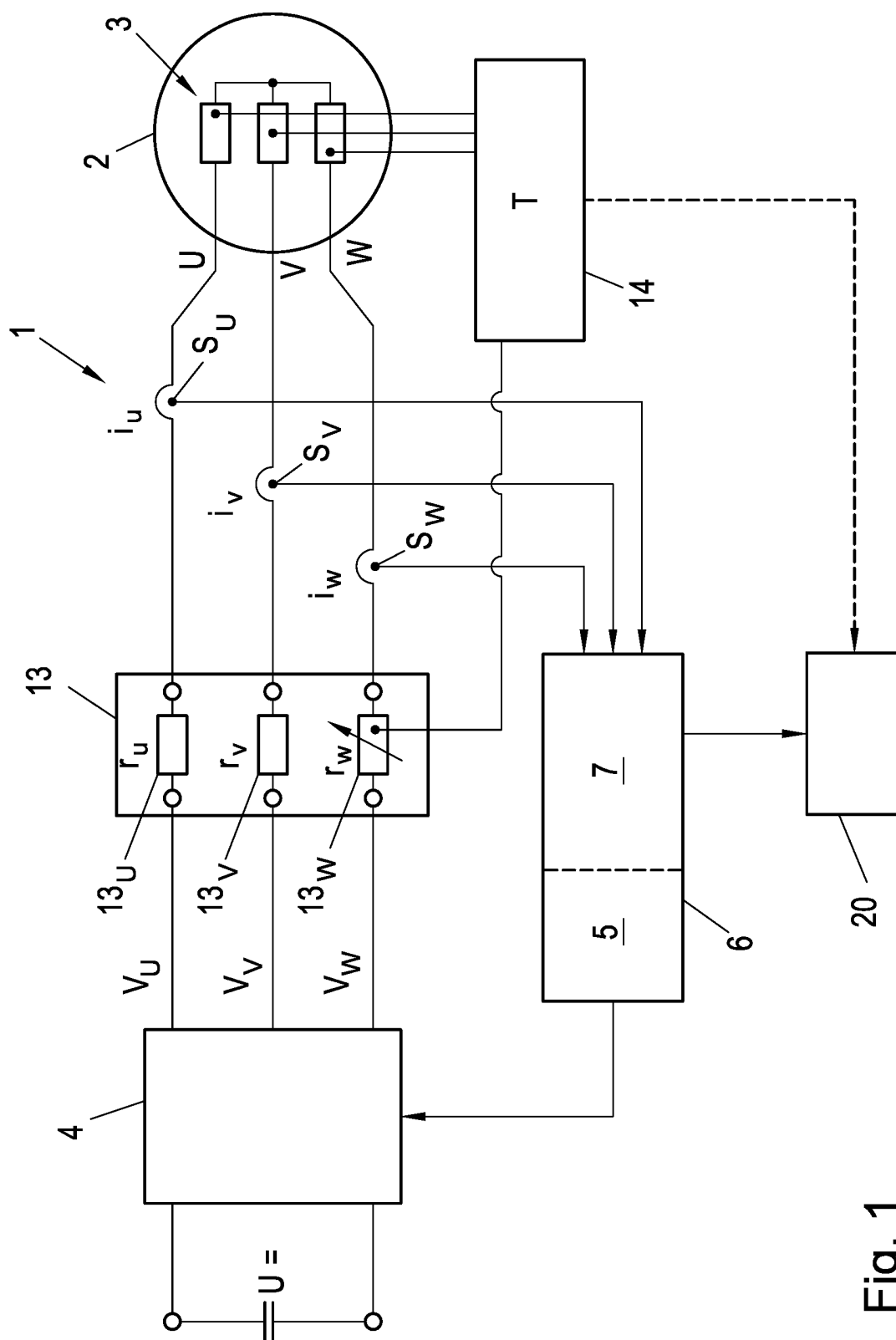


Fig. 1

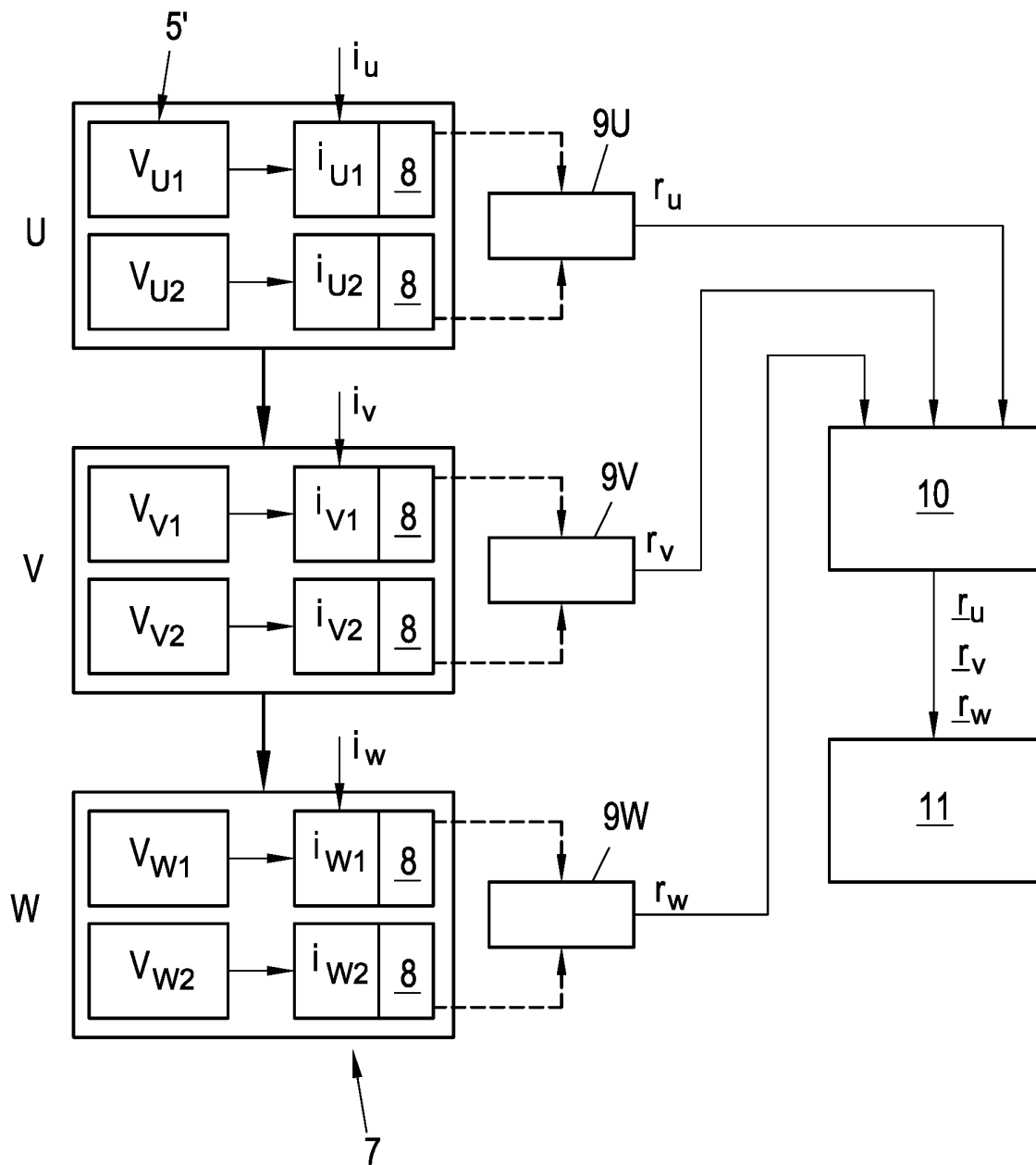


Fig. 2

3/5

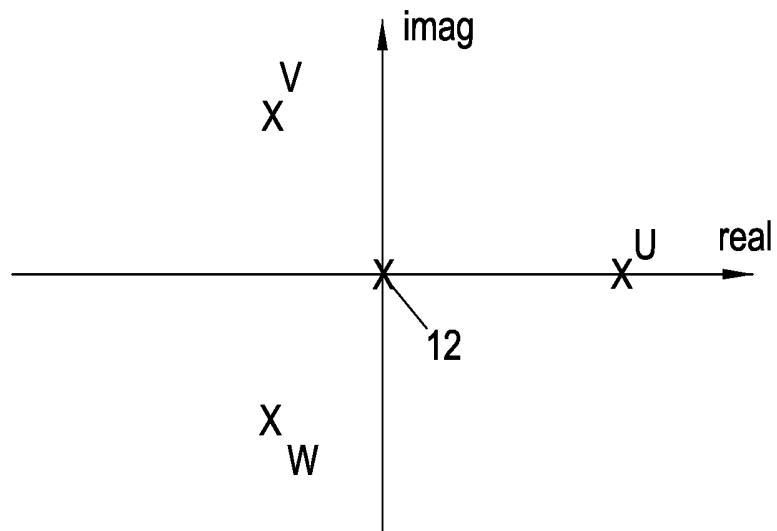


Fig. 3

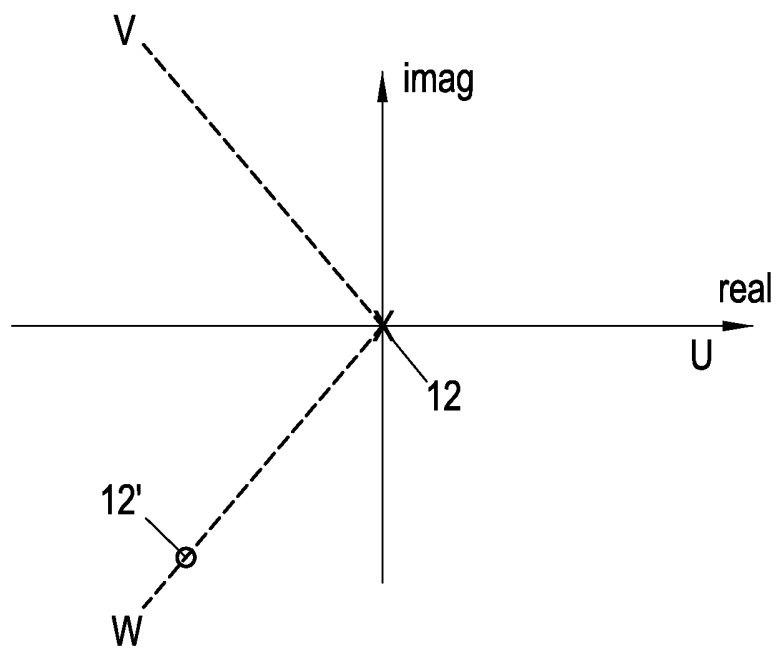


Fig. 4

4/5

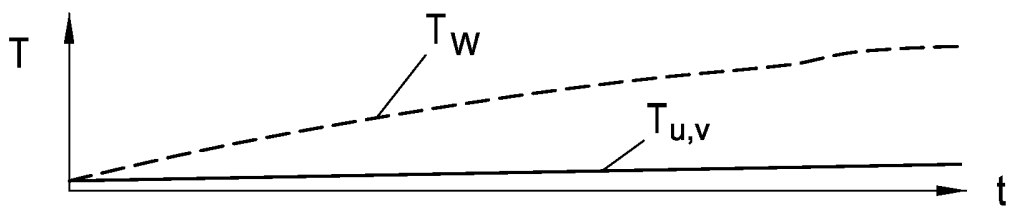


Fig. 5A

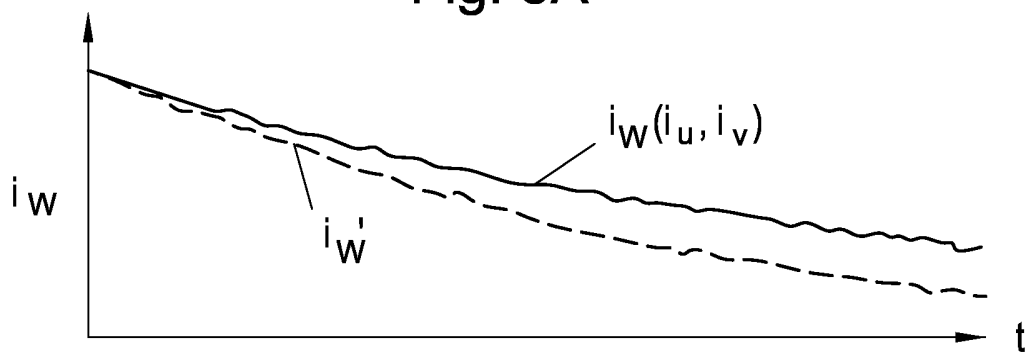


Fig. 5B

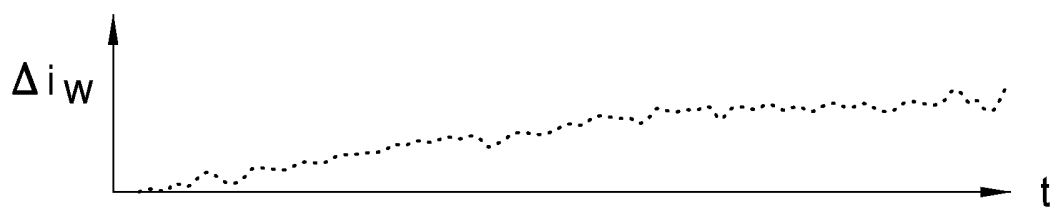


Fig. 5C

Fig. 5

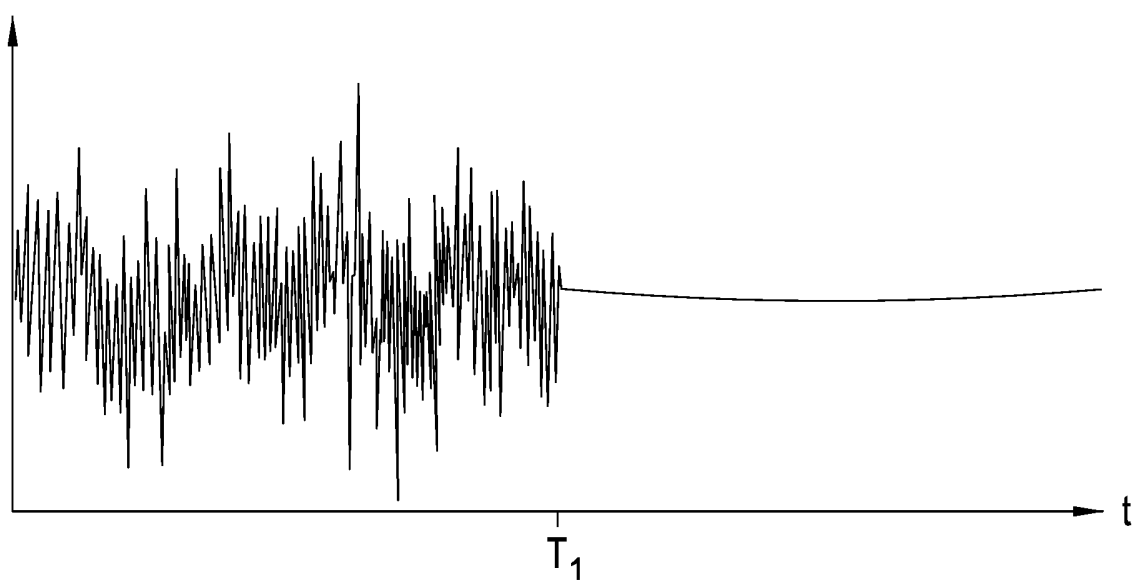


Fig. 6

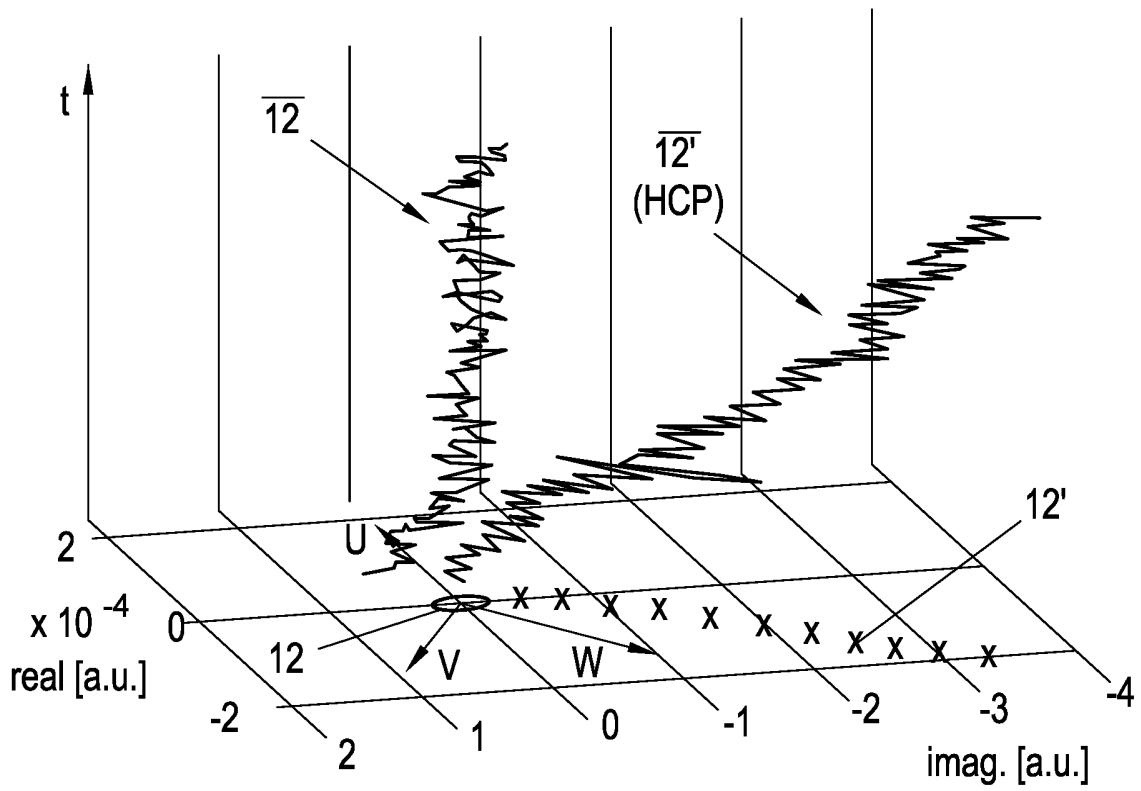


Fig. 7

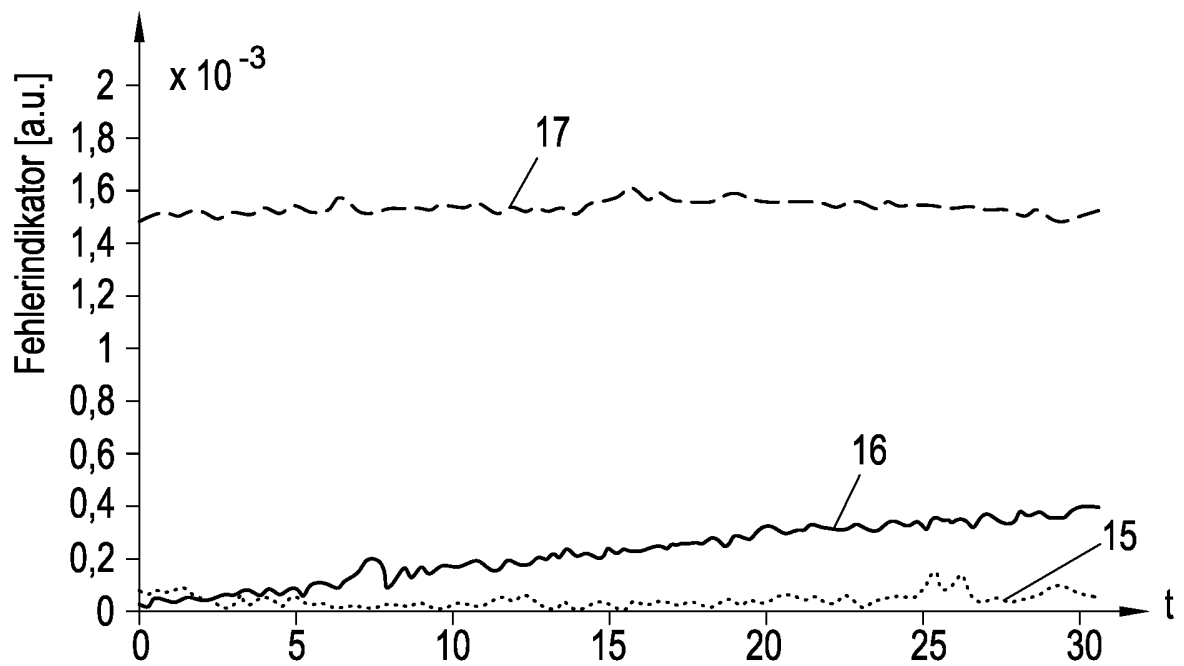


Fig. 8

Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß IPC:
G01R 31/04 (2006.01); **G01R 31/34** (2006.01); **B60L 3/00** (2006.01)

Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß CPC:
G01R 31/04 (2013.01); **G01R 31/34** (2013.01); **B60L 3/0061** (2013.01)

Recherchierter Prüfstoff (Klassifikation):
G01R, B60L

Konsultierte Online-Datenbank:
WPI, EPODOC, XPI3E

Dieser Recherchenbericht wurde zu den am **28.05.2013** eingereichten Ansprüchen **1-15** erstellt.

Kategorie ^{*)}	Bezeichnung der Veröffentlichung: Ländercode, Veröffentlichungsnummer, Dokumentart (Anmelder), Veröffentlichungsdatum, Textstelle oder Figur soweit erforderlich	Betreffend Anspruch
A	LEE, S.B. et al. "A New Strategy for Condition Monitoring of Adjustable Speed Induction Machine Drive Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Februar 2011 (02.2011), Vol.26, No.2, Seiten 389-398, ISSN 0885-8993, XP011334727 Zusammenfassung, Kapitel II, IV.	1-15
A	US 2010060289 A1 (WIEDENBRUG, E. et al.) 11. März 2010 (11.03.2010) Zusammenfassung, Fig. 6-17, 25-32; Absätze [0051]-[0093].	1-15
A	YUN, J. et al. "Detection and Classification of Stator Turn Faults and High-Resistance Electrical Connections for Induction Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, März/April 2009 (03/04.2009), Vol.45, No.2, Seiten 666-675, ISSN 0093-9994, XP011253778 Zusammenfassung, Kapitel I-III.	1-15

Datum der Beendigung der Recherche:
07.05.2014

Seite 1 von 1

Prüfer(in):

LOIBNER Klaus

^{*)} Kategorien der angeführten Dokumente:

- X** Veröffentlichung **von besonderer Bedeutung**: der Anmeldungsgegenstand kann allein aufgrund dieser Druckschrift nicht als neu bzw. auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden.
- Y** Veröffentlichung **von Bedeutung**: der Anmeldungsgegenstand kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren weiteren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese **Verbindung für einen Fachmann naheliegend** ist.

- A** Veröffentlichung, die den allgemeinen **Stand der Technik** definiert.
- P** Dokument, das von **Bedeutung** ist (Kategorien **X** oder **Y**), jedoch **nach dem Prioritätstag** der Anmeldung veröffentlicht wurde.
- E** Dokument, das **von besonderer Bedeutung** ist (Kategorie **X**), aus dem ein „**älteres Recht**“ hervorgehen könnte (früheres Anmeldedatum, jedoch nachveröffentlicht, Schutz ist in Österreich möglich, würde Neuheit in Frage stellen).
- &** Veröffentlichung, die Mitglied der selben **Patentfamilie** ist.