



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
**22.06.2005 Patentblatt 2005/25**

(51) Int Cl.7: **H01F 6/00**

(21) Anmeldenummer: **04028362.4**

(22) Anmeldetag: **30.11.2004**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR  
HU IE IS IT LI LU MC NL PL PT RO SE SI SK TR**  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
**AL HR LT LV MK YU**

(72) Erfinder:  
• **Schauwecker, Robert, Dr.**  
**8004 Zürich (CH)**  
• **Spreiter, Rolf, Dr.**  
**8050 Zürich (CH)**

(30) Priorität: **15.12.2003 DE 10358549**

(74) Vertreter: **Kohler Schmid Möbus  
Patentanwälte  
Ruppmanstrasse 27  
70565 Stuttgart (DE)**

(71) Anmelder: **Bruker BioSpin AG  
8117 Fällanden (CH)**

(54) **Supraleitendes Magnetsystem mit kontinuierlich arbeitender Flusspumpe und zugehörige Betriebsverfahren**

(57) Eine Magnetanordnung mit einem supraleitenden Magnetspulensystem ( $M$ ), welches im Betriebszustand einen Ohmschen Widerstand ( $R$ ) größer oder gleich null aufweist, und mit einer Flusspumpe ( $P$ ), welche mindestens einen supraleitenden Schalter und mindestens zwei supraleitende Sekundärspulen ( $M1$ ,  $M2$ ) umfasst, ist dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein supraleitender Strompfad vorhanden ist, in welchem das supraleitende Magnetspulensystem ( $M$ ) oder Teile davon mit mindestens zwei Sekundärspulen ( $M1$ ,  $M2$ )

zusammen in Serie geschaltet ist und in welchem mindestens eine Sekundärspule ( $M2$ ) durch Schließen eines supraleitenden Schalters ( $S1$ ) supraleitend überbrückt werden kann, und dass mindestens zwei Primärspulen ( $C1$ ,  $C2$ ) vorhanden sind, welche unabhängig voneinander mit je einem Strom ( $I1$ ,  $I2$ ) gespeist werden können und welche jeweils mit mindestens einer der Sekundärspulen ( $M1$ ,  $M2$ ) induktiv gekoppelt sind. Die Flusspumpe kann gut zur Stabilisierung des Magnetfelds des Magnetspulensystems ( $M$ ) im Betriebszustand über lange Zeit eingesetzt werden.

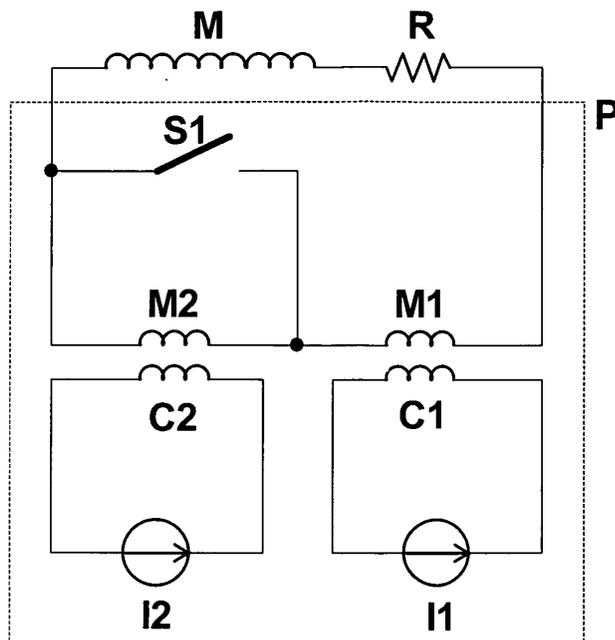


Fig. 1

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Magnetanordnung mit einem supraleitenden Magnetspulensystem, welches im Betriebszustand einen Ohmschen Widerstand größer oder gleich null aufweist, und mit einer Flusspumpe, welche mindestens einen supraleitenden Schalter und mindestens zwei supraleitende Sekundärspulen umfasst.

**[0002]** Eine solche Magnetanordnung mit einem supraleitenden Magnetspulensystem beschreiben T. P. Bernart et al., Rev. Sci. Instrum., Vol. 46, No. 5, May 1975, Seiten 582- 585.

**[0003]** Das supraleitende Magnetspulensystem umfasst eine oder mehrere in Serie geschaltete Magnetspulensysteme, die einen geschlossenen supraleitenden Stromkreis bilden. Das supraleitende Magnetspulensystem ist typischerweise in einem Kryostaten angeordnet. Es kann im Betriebszustand einen Ohmschen Widerstand größer null aufweisen, wenn die verwendeten Supraleiter bis knapp unter den kritischen Strom belastet sind oder wenn sie keinen scharfen Übergang von supraleitend zu normalleitend aufweisen. Das Prinzip einer Flusspumpe besteht darin, durch induktives Einkoppeln von Energie resistive Verluste der Magnetspule auszugleichen oder die Spule zu laden oder zu entladen, ohne dass große Ströme in den Kryostaten geführt werden müssen. Die Erfindung betrifft insbesondere supraleitende Magnetspulensysteme mit einer Flusspumpe, welche mindestens einen supraleitenden Schalter und mindestens zwei supraleitende Sekundärspulen umfasst, in welchen induktiv eine Spannung aufgebaut werden kann. Damit diese Spannung zum Ausgleich resistiver Verluste oder zum Laden oder Entladen in das supraleitende Magnetspulensystem eingespeist werden kann, müssen die Sekundärspulen supraleitend mit dem Magnetspulensystem in Serie geschaltet sein, was beispielsweise durch Schließen eines supraleitenden Schalters erfolgen kann.

**[0004]** Eine Magnetanordnung mit einer Flusspumpe, welche mindestens zwei supraleitende Sekundärspulen umfasst, ist bekannt aus T.P. Bernat et. al., Rev. Sci. Instrum., Vol. 46, No 5, May 1975, und aus L.J.M. van de Klundert et. al., Cryogenics, May 1981. Diese Flusspumpe basiert darauf, dass das supraleitende Magnetspulensystem mit zwei Strompfaden überbrückt wird, welche je einen Schalter und eine supraleitende Sekundärspule umfassen. In einer Primärspule, deren induktive Kopplung mit den Sekundärspulen je entgegengesetzt gleich groß ist, wird zyklisch Strom ein und wieder ausgefahren. Wenn im gleichen Takt die mit den Sekundärspulen in Serie geschalteten supraleitenden Schalter alternierend geöffnet und geschlossen werden, entsteht über dem Magnetspulensystem eine über den ganzen Zyklus konstante Spannung, abgesehen von Spannungsspitzen beim Öffnen der Schalter.

**[0005]** Das typische Einsatzgebiet von Flusspumpen ist das Laden und Entladen von supraleitenden Magnet-

spulensystemen. Der Vorteil gegenüber dem direkten Einspeisen des Betriebsstromes in die Spulen besteht darin, dass die Ströme zum Betreiben der Flusspumpe viel schwächer sind als die typischen Magnetströme. Damit können die Stromzuleitungen kleiner dimensioniert und der Wärmeeintrag in den Kryostaten reduziert werden.

**[0006]** Das Einsatzgebiet von supraleitenden Magneten umfasst aber auch Anwendungsfelder, bei denen die Magnetspulensysteme nach dem Ladevorgang über Jahre auf Feld bleiben und dabei eine möglichst geringe Felddrift aufweisen sollen. Dazu gehören insbesondere supraleitende Magnetspulensysteme für Magnetresonanzverfahren. Bei solchen Magnetsystemen ist der Einsatz einer Flusspumpe weniger zum Laden des Magnetsystems von Interesse, sondern zur Stabilisierung des Magnetfeldes im Betriebszustand. Eine effiziente Flusspumpe brächte in dieser Hinsicht verschiedene Vorteile. Es könnten beispielsweise Magnete mit Teilspulen aus Hochtemperatursupraleitern gebaut werden, welche nach heutigem Stand der Technik die Driftspezifikationen für Magnetresonanzanwendungen ohne zusätzliche Maßnahmen nicht erfüllen. Dies würde den Bau von Magneten mit stärkeren als den heute üblichen Feldern ermöglichen. Weiter könnten durch den Einsatz einer Flusspumpe zur Feldstabilisierung die Supraleiter im Magneten höher belastet werden, was den Bau kompakterer und kostengünstigerer Magnete erlauben würde.

**[0007]** Für den Einsatz zur präzisen Feldstabilisierung über große Zeiträume sind die bekannten Flusspumpen nicht geeignet. Zum einen treten jeweils beim Öffnen von supraleitenden Schaltern Spannungsspitzen über dem Magnetspulensystem auf, was für empfindliche Anwendungen wie Magnetresonanzverfahren nicht tolerierbar ist. Zum anderen muss in jeder Phase des Pumpzyklus mindestens ein supraleitender Schalter geöffnet sein, damit die in der Sekundärspule induzierte Spannung in das Magnetspulensystem eingespeist werden kann. Bei den gebräuchlichen Schaltern fällt dabei eine Wärmemenge an, welche zu großen Verlusten an Kühlflüssigkeit im Kryostaten führt. Für die Stabilität des Feldes ist auch die thermische Stabilität im Kryostaten sehr wichtig, das heißt bei empfindlichen Anwendungen wie Magnetresonanzverfahren müssen die Wärmeeinträge in den Kryostaten minimiert werden.

**[0008]** Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine Flusspumpe gemäß dem Stand der Technik derart zu verbessern, dass neben dem Laden und Entladen eines supraleitenden Magnetspulensystems auch eine gute Stabilisierung des Magnetfeldes des Magnetspulensystems im Betriebszustand über lange Zeit möglich ist, insbesondere dann, wenn das Magnetspulensystem leicht resisitiv ist und die Anforderungen an die Feldstabilität sehr hoch sind. Insbesondere ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, dass die verbesserte Flusspumpenanordnung ein Betriebsverfahren zulässt, mit welchem eine über alle Zyklen der Flusspumpe kon-

stante Spannung über dem Magnetspulensystem angelegt werden kann.

**[0009]** Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe bei einer Magnetanordnung der eingangs vorgestellten Art dadurch gelöst, dass mindestens ein supraleitender Strompfad vorhanden ist, in welchem das supraleitende Magnetspulensystem oder Teile davon mit mindestens zwei Sekundärspulen zusammen in Serie geschaltet ist und in welchem mindestens eine Sekundärspule durch Schließen eines supraleitenden Schalters supraleitend überbrückt werden kann, und dass mindestens zwei Primärspulen vorhanden sind, welche unabhängig voneinander mit je einem Strom gespeist werden können und welche jeweils mit mindestens einer der Sekundärspulen induktiv gekoppelt sind.

**[0010]** Kurz gesagt sieht die Erfindung vor, dass ein supraleitender Strompfad vorhanden ist, in welchem das supraleitende Magnetspulensystem oder Teile davon mit mindestens zwei Sekundärspulen zusammen in Serie geschaltet ist und in welchem mindestens eine Sekundärspule durch Schließen eines supraleitenden Schalters überbrückt werden kann. Insbesondere kann vorgesehen sein, dass die Sekundärspulen mit je einer eigenen Primärspule induktiv gekoppelt sind.

**[0011]** Diese Anordnung ermöglicht ein Betriebsverfahren der Flusspumpe, bei welchem in einem ersten Schritt eine erste Primärspule, welche mit einer ersten, nicht supraleitend überbrückten Sekundärspule gekoppelt ist, geladen wird, bis in der Primärspule ein maximaler Endstrom erreicht ist. Dadurch kann eine Spannung über dem supraleitenden Magnetspulensystem aufgebaut werden, welche beispielsweise genau der zu kompensierenden resistiven Spannung im Magnetspulensystem entspricht. In einem zweiten Schritt muss die erste Primärspule wieder auf ihren Anfangsstrom entladen werden. Während dieser Phase wird über einer zweiten, zuvor mit einem geschlossenen Schalter supraleitend überbrückten Sekundärspule der supraleitende Schalter geöffnet und in jener Primärspule, welche mit dieser Sekundärspule induktiv koppelt, der Strom hochgefahren, wodurch in dieser Sekundärspule eine Spannung induziert wird. Die Stromrampe in der zweiten Primärspule wird so gewählt, dass durch die in der zweiten Sekundärspule induzierte Spannung sowohl die durch das Entladen der ersten Primärspule in der ersten Sekundärspule induzierte Spannung als auch die resistive Spannung über dem supraleitenden Magnetspulensystem kompensiert wird. Nachdem die erste Primärspule auf ihrem Anfangsstrom angelangt ist, wird der Schalter über der zweiten Sekundärspule wieder geschlossen und die zweite Primärspule wird - bei geschlossenem Schalter - auf ihren Anfangsstrom zurückgefahren. Der Zyklus kann nun von vorn beginnen.

**[0012]** Der Vorteil einer erfindungsgemäßen Anordnung ist also, dass dank mehreren voneinander unabhängig mit Strom versorgten Primärspulen in verschiedenen Sekundärspulen unterschiedliche Spannungen

induziert werden können, welche dank der Serieschaltung dieser Sekundärspulen zu einer Gesamtspannung addiert werden. Die Serieschaltung der Sekundärspulen mit dem supraleitenden Magnetspulensystem erlaubt die Einspeisung dieser Gesamtspannung in das supraleitende Magnetspulensystem. Die große Flexibilität der Anordnung ermöglicht, dass durch geeignete Verfahrensschritte in jeder Phase des Flusspumpen-Zyklus eine gewünschte Spannung über dem supraleitenden Magnetspulensystem aufrechterhalten werden kann.

**[0013]** Es zeigt sich, dass beim oben beschriebenen Betriebsverfahren der Flusspumpe während dem ganzen Zyklus zu keiner Zeit ein supraleitender Kurzschluss über der ersten Sekundärspule bestehen muss. Dies bedeutet, dass erfindungsgemäß von  $n \geq 2$  Sekundärspulen höchstens  $n-1$  Sekundärspulen mit einem Schalter überbrückt werden müssen. Im einfachsten Falle von  $n = 2$  wird also nur ein einziger Schalter benötigt, welcher zudem nur während der kurzen Zeit, während welcher der Strom in der ersten Primärspule zurückgesetzt wird, geöffnet sein muss. Dadurch wird die Wärmeleistung durch die Schalterheizer gegenüber einer Flusspumpe nach dem Stand der Technik deutlich reduziert. Diese Ausführungsform der Erfindung ist daher besonders vorteilhaft.

**[0014]** Bevorzugt ist außerdem eine Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung, bei welcher ein supraleitender Schalter eine Sekundärspule zusammen mit einem Widerstand überbrückt, welcher mit dieser Sekundärspule in Serie geschaltet ist, wobei der Widerstand einen Wert, gemessen in Ohm, zwischen 0 und dem Wert der Induktivität dieser Sekundärspule, gemessen in Henry, aufweist. Der Vorteil dieser Anordnung liegt darin, dass beim Laden und Entladen einer Primärspule, welche mit dieser Sekundärspule induktiv gekoppelt ist, bei geschlossenem supraleitendem Schalter keine unkontrolliert hohen Ströme in der Sekundärspule induziert werden können.

**[0015]** Eine besonders bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung zeichnet sich dadurch aus, dass anstatt des in obiger Ausführungsform verwendeten Widerstandes ein weiterer supraleitender Schalter verwendet wird. Diese Ausführungsform sieht somit vor, dass ein supraleitender Schalter eine Sekundärspule zusammen mit einem weiteren supraleitenden Schalter überbrückt, welcher mit der genannten Sekundärspule in Serie geschaltet ist; siehe auch Figur 3. Dadurch lässt sich durch geeignetes Laden und Entladen der zugehörigen Primärspule sowie durch Öffnen und Schließen des weiteren Schalters der Strom in der Sekundärspule gezielt steuern. Insbesondere kann so verhindert werden, dass vor dem Öffnen des ersten Schalters an einem bestimmten Punkt des Pumpzyklus ein Strom über diesen Schalter fließt. Damit werden Spannungspulse über dem supraleitenden Magnetspulensystem verhindert, was insbesondere bei empfindlichen Anwendungen wie Kernspinresonanzverfahren unum-

gänglich ist. Außerdem wird im ersten Schalter keine Wärme durch den Abbau von Strom erzeugt, was eine weitere Ersparnis an Kühlflüssigkeit ermöglicht. Diese Anordnung ermöglicht die Anwendung eines Betriebsverfahrens der Flusspumpe, welches eine ungestörte, kontinuierliche Pumpleistung bei einem Minimum an Wärmeeintrag in den Kryostaten garantiert.

**[0016]** In zwei weiteren vorteilhaften Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Anordnung werden Sekundärspulen mit je genau einer Primärspule induktiv gekoppelt, oder Sekundärspulen werden voneinander induktiv entkoppelt. Dadurch können die in den Sekundärspulen beim Laden oder Entladen der Primärspulen induzierten Spannungen besser kontrolliert werden und die Verfahren zum Betrieb der Flusspumpe werden vereinfacht.

**[0017]** Besonders vorteilhaft sind auch Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Anordnung, bei welchen Primär- oder Sekundärspulen vom supraleitenden Magnetspulensystem induktiv weitgehend entkoppelt sind oder im Arbeitsvolumen des supraleitenden Magnetspulensystems im wesentlichen kein Feld erzeugen. So werden Störungen des Magnetfeldes im Arbeitsvolumen während dem Betrieb der Flusspumpe verhindert.

**[0018]** Eine weitere vorteilhafte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung zeichnet sich dadurch aus, dass mindestens eine Primärspule supraleitend ist. Ein in einer supraleitenden Primärspulen fließender Strom erzeugt im Gegensatz zu normalleitenden Primärspulen keine Wärme. Falls sich die Primärspulen im Kryostaten befinden, können so die Kühlmittelverluste reduziert werden.

**[0019]** Eine weitere Verbesserung hinsichtlich Reduktion der Kühlmittelverluste wird erreicht, wenn auch die Zuleitungen zu den Spulen im Kryostaten oder zu den Schaltern mindestens teilweise supraleitend ausgeführt werden.

**[0020]** Eine andere Ausführungsform sieht vor, dass mindestens einer der supraleitenden Schalter durch einen Heizer betätigbar ist, dessen Zuleitungen mindestens teilweise supraleitend sind.

**[0021]** Eine vorteilhafte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung zeichnet sich dadurch aus, dass mindestens ein Abschnitt des supraleitenden Magnetspulensystems supraleitend oder mit einem Widerstand überbrückt ist. Diese Anordnung kann dazu verwendet werden, um die Auswirkung von kleinen Spannungsflektuationen, etwa beim Öffnen von Schaltern der Flusspumpe, auf das Gesamtfeld des supraleitenden Magnetsystems zu dämpfen. Damit die Dämpfung wirksam ist, darf der Widerstand (in Ohm) die Größenordnung der Induktivität (in Henry) des überbrückten Abschnittes nicht übersteigen.

**[0022]** Die erfindungsgemäße Anordnung ist besonders dann vorteilhaft, wenn sie Teil einer Apparatur für die magnetische Kernspinresonanz ist. In solchen Magnetanordnungen werden an eine Vorrichtung zur akti-

ven Feldstabilisierung, als welche die erfindungsgemäße Flusspumpe in diesem Anwendungsgebiet bevorzugt eingesetzt wird, besonders hohe Anforderungen hinsichtlich Konstanz der Stabilisierungsspannung und Minimierung des Wärmeeintrages in den Kryostaten gestellt. Genau diese Kriterien werden in den oben aufgeführten Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Flusspumpe besser erfüllt als mit Flusspumpen nach dem Stand der Technik.

**[0023]** Eine vorteilhafte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung umfasst ein supraleitendes Magnetspulensystem, in welchem eine oder mehrere Spulen mit Hochtemperatursupraleitern gewickelt sind. Die potentiell höhere Drift bei Verwendung von Hochtemperatursupraleitern lässt sich mit der erfindungsgemäßen Flusspumpe kompensieren, unter Beibehaltung der Feldstabilität des supraleitenden Magnetspulensystems.

**[0024]** Die Vorteile der erfindungsgemäßen Anordnung können nur unter Anwendung von geeigneten Verfahren zum Betrieb der Flusspumpe voll ausgeschöpft werden. Ein erstes Verfahren zeichnet sich durch einen besonders einfachen Zyklus von Laden und Entladen der Primärspulen und Öffnen und Schließen der Schalter aus. Bei diesem Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung mit mindestens einer ersten und einer zweiten supraleitenden Sekundärspule und einem ersten supraleitenden Schalter wird der erste supraleitende Schalter, welcher die zweite Sekundärspule überbrückt, periodisch geöffnet und geschlossen. Bei geschlossenem erstem Schalter wird der Strom in einer ersten Primärspule, welche mit der ersten Sekundärspule induktiv koppelt, von einem Anfangswert auf einen Endwert gefahren. Bei geöffnetem erstem Schalter wird der Strom in dieser Primärspule wieder weitgehend auf den Anfangswert zurückgesetzt. Gleichzeitig wird bei geöffnetem erstem Schalter der Strom in einer zweiten Primärspule, welche mit der zweiten Sekundärspule koppelt, von einem Anfangswert auf einen Endwert gefahren und bei geschlossenem erstem Schalter wieder weitgehend auf den Anfangswert zurückgesetzt.

**[0025]** Ein verbessertes Verfahren unter Verwendung des weiteren, zweiten supraleitenden Schalters zeichnet sich dadurch aus, dass bei geschlossenem erstem Schalter ein zweiter supraleitender Schalter, welcher mit der zweiten Sekundärspule in Serie geschaltet ist und zusammen mit dieser vom ersten supraleitenden Schalter überbrückt wird, mindestens zeitweise geöffnet wird. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass sich die zweite Sekundärspule beim Zurücksetzen des Stromes in der zweiten Primärspule nicht unkontrolliert auflädt.

**[0026]** Besonders vorteilhaft ist es, den Strom in der zweiten Primärspule jeweils wieder auf null zurückzuführen, um weniger Wärme in den Zuleitungen und - im Falle einer normalleitenden zweiten Primärspule - in der Spule selbst zu erzeugen.

**[0027]** Diese Verfahrensvariante kann weiter verbessert werden, indem vor Erreichen des Endstromes von

null Ampere in der zweiten Primärspule der Strom in dieser Spule auf einen Betrag von  $I * L / K$  gesetzt wird und dass spätestens nach Erreichen dieses Stromes der zweite supraleitende Schalter geöffnet wird, und dass dann während dem Zurücksetzen des Stromes in der zweiten Primärspule auf den Endstrom von null Ampere und bis zum neuerlichen Öffnen des ersten supraleitenden Schalters der zweite supraleitende Schalter supraleitend geschlossen bleibt, wobei /den Strom im supraleitenden Magnetspulensystem,  $L$  die Selbstinduktivität der zweiten Sekundärspule und  $K$  die induktive Kopplung in Henry zwischen der zweiten Sekundärspule und der zweiten Primärspule bezeichnet. Dieses Verfahren wird im untenstehenden Beispiel genauer beschrieben. Sein besonderer Vorteil ist, dass vor dem Öffnen des ersten supraleitenden Schalters kein Strom über diesen fließt. So werden Spannungsspitzen über dem supraleitenden Magnetspulensystem verhindert, was für den Einsatz der erfindungsgemäßen Flusspumpe zur Feldstabilisierung bei empfindlichen Anwendungen ein wichtiges Kriterium darstellt.

**[0028]** In zwei weiteren vorteilhaften Verfahrensvarianten werden die Schritte der beschriebenen Verfahren zyklisch wiederholt, um das supraleitende Magnetspulensystem entweder zu laden oder zu entladen, oder um den Strom im Magnetspulensystem auf einem Betriebswert genau zu stabilisieren.

**[0029]** Die erfindungsgemäße Anordnung erlaubt auch die Anwendung einer hinsichtlich Reduktion des Wärmeeintrages in den Kryostaten besonders vorteilhaften Verfahrensvariante, bei welcher jene Phase des Pumpzyklus, während welcher kein supraleitender Schalter geöffnet ist, länger dauert als die Phasen mit geöffneten, also geheizten, supraleitenden Schaltern. Demgegenüber müssen bei Flusspumpen nach dem Stand der Technik permanent Schalter geheizt werden.

**[0030]** Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter ausgeführten Merkmale erfindungsgemäß jeweils einzeln für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung.

**[0031]** Die Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird anhand eines Ausführungsbeispiels näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 ein Verdrahtungsschema einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung mit einem supraleitenden Magnetspulensystem und einer Flusspumpe;

Fig. 2 ein Verdrahtungsschema einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung mit einem supraleitenden Magnetspulensystem und einer Flusspumpe mit einem zusätzlichen Widerstand im

Strompfad der Flusspumpe;

Fig. 3 ein Verdrahtungsschema einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung mit einem supraleitenden Magnetspulensystem und einer Flusspumpe mit einem zusätzlichen supraleitenden Schalter im Strompfad der Flusspumpe;

Fig. 4 ein Verdrahtungsschema einer erfindungsgemäßen Magnetanordnung mit einem supraleitenden Magnetspulensystem und einer Flusspumpe und einem zusätzlichen Widerstand, welcher einen Abschnitt des supraleitenden Magnetspulensystems überbrückt;

Fig. 5 die Ströme und Schalterzustände der Flusspumpe sowie die über dem supraleitenden Magnetspulensystem aufgebaute Spannung während mehrerer Pumpzyklen für ein besonders vorteilhaftes Verfahren zum Betrieb einer erfindungsgemäßen Flusspumpe.

**[0032]** Anhand der **Figur 1** wird schematisch eine erfindungsgemäße Anordnung gezeigt, welche ein supraleitendes Magnetspulensystem  $M$  und eine Flusspumpe  $P$  umfasst. Das Magnetspulensystem  $M$  kann einen Widerstand der Größe  $R$  aufweisen. Mit dem Magnetspulensystem  $M$  sind zwei weitere supraleitende Spulen  $M1$  und  $M2$  in Serie geschaltet, welche in der Flusspumpe  $P$  als Sekundärspulen dienen. In diesen Spulen kann durch Veränderung des Stromes  $I1$  beziehungsweise  $I2$  in den Primärspulen  $C1$  beziehungsweise  $C2$  der Flusspumpe  $P$  durch induktive Kopplung eine Spannung induziert werden. Eine der Sekundärspulen, nämlich  $M2$ , ist mit einem supraleitenden Schalter  $S1$  überbrückt.

**[0033]** **Figur 2** zeigt schematisch eine erfindungsgemäße Anordnung, bei welcher die Sekundärspule  $M2$ , welche mit dem supraleitenden Schalter  $S1$  überbrückt wird, mit einem Widerstand  $R2$  in Serie geschaltet ist, derart dass der Schalter  $S1$  sowohl die Spule  $M2$  als auch den Widerstand  $R2$  überbrückt.

**[0034]** **Figur 3** zeigt eine erfindungsgemäße Anordnung wie in **Figur 2**, mit dem Unterschied, dass anstelle des Widerstandes  $R2$  ein zweiter supraleitender Schalter  $S2$  verwendet wird.

**[0035]** **Figur 4** zeigt eine erfindungsgemäße Anordnung wie in **Figur 1**, bei welcher zusätzlich ein Abschnitt des supraleitenden Magnetspulensystems  $M$  mit einem Widerstand  $r$  überbrückt wird.

**[0036]** **Figur 5** zeigt für ein Betriebsverfahren der erfindungsgemäßen Flusspumpe nach **Figur 3** die Ströme  $I1$  und  $I2$  in den Primärspulen  $C1$  und  $C2$  der Flusspumpe  $P$  sowie die Schaltzustände der supraleitenden Schalter  $S1$  und  $S2$ , den Strom  $IS1$  im Schalter  $S1$  und die durch die Flusspumpe  $P$  über dem supraleitenden Magnetspulensystem  $M$  aufgebaute Spannung  $VMagnet$ . Nach rechts ist die Zeit  $t$  aufgetragen. Das Verfahren ist dahingehend optimiert, die Spannung  $VMagnet$

über beliebig viele Pumpzyklen konstant zu halten und keine Spannungsspitzen zu erzeugen. Außerdem wird die Dauer, während der die supraleitenden Schalter geöffnet sind, minimiert.

**[0037]** Im Folgenden wird die Erfindung anhand eines Beispiels erläutert. Die dem Beispiel zu Grunde gelegte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung ist jene aus Figur 3. Das angewendete Verfahren zum Betrieb der Flusspumpe *P* ist jenes aus Figur 5. Das Ziel ist es, über einem supraleitenden Magnetspulensystem *M* eine konstante Spannung  $V_{Magnet}$  von  $25\mu V$  aufrechtzuerhalten. Die Komponenten der Flusspumpe sind folgendermaßen ausgelegt:

$LM1 = LM2 = 10^{-6}H$  (Induktivität der Sekundärspulen *M1* und *M2*),

$KM1C1 = KM2C2 = 10^{-4}H$  (induktive Kopplung zwischen der Sekundärspule *M1* und der Primärspule *C1* beziehungsweise zwischen *M2* und *C2*),

$IM = 100A$  (Betriebsstrom des supraleitenden Magnetspulensystems *M*).

Alle anderen Kopplungen sind null.

**[0038]** Zu Beginn und während der ersten Phase des Zyklus der Flusspumpe *P* von  $t = 0$  bis  $t1 = 8s$  (siehe Figur 5) sind die beiden Schalter *S1* und *S2* supraleitend geschlossen und der Betriebsstrom *IM* des supraleitenden Magnetspulensystems *M* fließt über den Strompfad *M-M1-M2-S2*. Der Strom *I2* in der zweiten Primärspule *C2* ist null und der Strom *I1* in der ersten Primärspule *C1* wird mit einer kontinuierlichen Rampe von  $0.25A/s$  während  $8s$  von  $-1A$  auf  $+1A$  geladen. Dadurch wird in der Sekundärspule *M1* eine Spannung von  $25\mu V$  induziert. Weil die Sekundärspule *M1* supraleitend mit dem Magnetspulensystem *M* verbunden ist, ist somit in dieser ersten Phase die Bedingung  $V_{Magnet} = 25\mu V$  bereits erfüllt. Zum Zeitpunkt  $t1$  hat der Strom *I1* in der Primärspule *C1* den Maximalwert von  $+1A$  erreicht und soll bis zum Zeitpunkt  $t2 = 10s$  wieder auf den Anfangswert von  $-1A$  entladen werden. Die in *M1* induzierte Spannung beträgt in dieser Phase  $-100\mu V$ . Um während dieser Phase die Spannung  $V_{Magnet}$  konstant auf  $25\mu V$  zu halten, wird der Schalter *S1* geöffnet und der Strom in der zweiten Primärspule *C2* von null auf  $2.5A$  gefahren. Dadurch wird in der zweiten Sekundärspule *M2* eine Spannung von  $125\mu V$  induziert. Weil der Schalter *S1* geöffnet ist, addieren sich die in *M1* und *M2* induzierten Spannungen im Strompfad *M-M1-M2-S2* zu  $25\mu V$ , womit auch während dieser Phase die Bedingung  $V_{Magnet} = 25\mu V$  erfüllt wird. Zum Zeitpunkt  $t2 = 10s$  wird der Schalter *S1* wieder geschlossen und der Ladezyklus der Primärspule *C1* beginnt von Neuem.

**[0039]** Damit ist das System aber noch nicht wieder im Anfangszustand, weil der Strom *I2* in der zweiten Primärspule *C2* nicht null ist. Beim Zurücksetzen von *I2* auf null muss außerdem gewährleistet werden, dass der Betriebsstrom *IM* am Schluss wieder durch die Sekundärspule *M2* fließt und nicht über den geschlossenen

Schalter *S1*, das heißt *IS1* soll null sein. Falls diese Bedingung nicht erfüllt ist, wird beim neuerlichen Öffnen des Schalters *S1* im folgenden Zyklus der Flusspumpe *P* ein unerwünschter Spannungspuls über dem supraleitenden Magnetspulensystem *M* erzeugt.

**[0040]** Das Ziel, sowohl *I2* als auch *IS1* auf null zu bringen, wird dadurch erreicht, dass *I2* zwischen  $t2$  und  $t3$  auf den Wert  $-IM * KM2C2 / LM2$  gefahren wird, im Beispiel  $-1A$ . Dabei ist der Schalter *S2* geöffnet, wodurch der Strom in *M2* auf null gehalten wird. Zwischen  $t2$  und  $t3$  fließt daher der Magnetstrom *IM* über den geschlossenen Schalter *S1*, also  $IS1 = IM = 100A$ . Zum Zeitpunkt  $t3$  wird der Schalter *S2* wieder geschlossen und anschließend wird bis zum Zeitpunkt  $t4$  der Strom *I2* in der zweiten Primärspule *C2* auf null zurückgefahren. Dadurch wird in der zweiten Sekundärspule *M2* ein Strom des Betrages *IM* in der Richtung des Betriebsstromes des supraleitenden Magnetspulensystems *M* induziert, so dass ab dem Zeitpunkt  $t4$  der ganze Betriebsstrom *IM* wieder über den Strompfad *M-M1-M2-S2* fließt. Somit ist die zweite Primärspule *C2* und der Strompfad *M2-S1-S2* ab dem Zeitpunkt  $t4$  wieder im Ausgangszustand.

**[0041]** Es ist zu beachten, dass die Vorgänge während dem Rücksetzen der zweiten Primärspule *C2* und des Strompfades *M2-S1-S2* in den Ausgangszustand keinen Einfluss haben auf die Spannung  $V_{Magnet}$ , welche über dem supraleitenden Magnetspulensystem *M* anliegt. Der Grund dafür ist, dass während dieser Phase der Schalter *S1* immer supraleitend ist, so dass über den Anschlusspunkten von *S1* an den Strompfad *M-M1-M2-S2* keine Spannung entstehen kann. Somit ist also während dieser Phase die Spannung  $V_{Magnet}$  über dem supraleitenden Magnetspulensystem *M* einzig durch die in der Sekundärspule *M1* induzierte Spannung gegeben, welche durch die Stromrampe in der Primärspule *C1* auf den gewünschten Wert von  $25\mu V$  eingestellt ist.

**[0042]** Anhand des in diesem Beispiel gezeigten Verfahrens zum Betrieb einer erfindungsgemäßen Flusspumpe *P* werden die Vorteile dieser Anordnung deutlich. Erstens kann die Spannung über den gesamten Zyklus der Flusspumpe *P* konstant gehalten werden und es treten keine Spannungsspitzen beim Öffnen von supraleitenden Schaltern auf. Zweitens sind die Schalter nur während einem Bruchteil des Betriebszyklus der Flusspumpe *P* geöffnet, wodurch der Wärmeeintrag in den Kryostaten durch die Schalter minimal wird.

**[0043]** Gegenüber einer Flusspumpe nach dem Stand der Technik mit nur einer Primärspule müssen in einer erfindungsgemäßen Anordnung mindestens zwei Primärspulen *C1* und *C2* mit Strom versorgt werden. Dadurch wird der Wärmeeintrag in den Kryostaten durch die Stromzuleitungen der Primärspulen vergrößert. Allerdings wirkt sich dieser Nachteil im gezeigten Beispiel nur geringfügig aus, weil die zweite Primärspule *C2* nur während einem Bruchteil des Betriebszyklus der Flusspumpe *P* Strom trägt, wodurch die Wärmeent-

wicklung in den Zuleitungen klein gehalten wird.

**[0044]** Falls ein supraleitendes Magnetspulensystem für die magnetische Kernspinresonanz verwendet werden soll, sind die Anforderungen an die zeitliche Stabilität des Magnetfeldes besonders hoch. Typischerweise darf die Gesamtresistivität des Magnetspulensystems höchstens in der Größenordnung von  $0.1 \cdot 10^{-9} \text{ Ohm}$  liegen, damit die Felddrift akzeptabel ist. Mit einer erfindungsgemäßen Flusspumpe nach obigem Beispiel kann dagegen das Feld auch dann noch stabilisiert werden, wenn die Resistivität des supraleitenden Magnetspulensystems in der Größenordnung von  $V_{\text{Magnet}}/I_{\text{M}} = 25 \mu\text{V} / 100\text{A} = 250 \cdot 10^{-9} \text{ Ohm}$  liegt. Die Resistivität des Magnetspulensystems darf also über tausend mal größer sein als bei einer Anordnung ohne die erfindungsgemäße Flusspumpe.

**[0045]** Eine erfindungsgemäße Magnetanordnung umfasst ein supraleitendes Magnetspulensystem  $M$  und mindestens zwei supraleitende Sekundärspulen  $M1$ ,  $M2$ , die mit dem Magnetspulensystem in Serie geschaltet sind, sowie einen ersten supraleitenden Schalter  $S1$ , der die zweite der Sekundärspulen  $M2$  supraleitend überbrücken kann. Besonders vorteilhaft weist die Magnetanordnung einen zweiten supraleitenden Schalter  $S2$  auf, der in Serie mit der zweiten Sekundärspule  $M2$  geschaltet ist, wobei der erste supraleitende Schalter  $S1$  die Gesamtheit von zweiter Sekundärspule  $M2$  und zweitem supraleitenden Schalter  $S2$  überbrücken kann. Durch induktive Kopplung kann mittels mindestens zwei voneinander unabhängigen Primärspulen  $C1$ ,  $C2$  eine vorgebbare Spannung in jeder der Sekundärspulen  $M1$ ,  $M2$  erzeugt werden, unabhängig von der jeweils anderen Sekundärspule. Das System von Sekundärspulen, Primärspulen und supraleitenden Schaltern bildet eine Flusspumpe  $P$  für das Magnetspulensystem. Diese Flusspumpe kann gut zur Stabilisierung des Magnetfeldes des Magnetspulensystems im Betriebszustand über lange Zeit, das heißt zur Driftkompensation im Magnetspulensystem, eingesetzt werden.

#### Patentansprüche

1. Magnetanordnung mit einem supraleitenden Magnetspulensystem ( $M$ ), welches im Betriebszustand einen Ohmschen Widerstand ( $R$ ) größer oder gleich null aufweist, und mit einer Flusspumpe ( $P$ ), welche mindestens einen supraleitenden Schalter ( $S1$ ) und mindestens zwei supraleitende Sekundärspulen ( $M1$ ,  $M2$ ) umfasst, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens ein supraleitender Strompfad vorhanden ist, in welchem das supraleitende Magnetspulensystem ( $M$ ) oder Teile davon mit mindestens zwei Sekundärspulen ( $M1$ ,  $M2$ ) zusammen in Serie geschaltet ist und in welchem mindestens eine Sekundärspule ( $M2$ ) durch Schließen eines supraleitenden Schalters ( $S1$ ) supraleitend überbrückt wer-

den kann,

und **dass** mindestens zwei Primärspulen ( $C1$ ,  $C2$ ) vorhanden sind, welche unabhängig voneinander mit je einem Strom ( $I1$ ,  $I2$ ) gespeist werden können und welche jeweils mit mindestens einer der Sekundärspulen ( $M1$ ,  $M2$ ) induktiv gekoppelt sind.

2. Anordnung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens ein supraleitender Strompfad vorhanden ist, in welchem das supraleitende Magnetspulensystem ( $M$ ) oder Teile davon mit  $n \geq 2$  Sekundärspulen ( $M1$ ,  $M2$ ) zusammen in Serie geschaltet ist, und in welchem mindestens eine, aber höchstens  $n-1$  Sekundärspule(n) ( $M2$ ) durch Schließen eines oder mehrerer supraleitender Schalter ( $S1$ ) supraleitend überbrückt werden können.

3. Anordnung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein supraleitender Schalter ( $S1$ ) eine Sekundärspule ( $M2$ ) zusammen mit einem Widerstand ( $R2$ ) überbrückt, welcher mit der genannten Sekundärspule ( $M2$ ) in Serie geschaltet ist, wobei dieser Widerstand ( $R2$ ) einen Wert, gemessen in Ohm, zwischen 0 und dem Wert der Induktivität der genannten Sekundärspule ( $M2$ ), gemessen in Henry, aufweist.

4. Anordnung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein supraleitender Schalter ( $S1$ ) eine Sekundärspule ( $M2$ ) zusammen mit einem weiteren supraleitenden Schalter ( $S2$ ) überbrückt, welcher mit der genannten Sekundärspule ( $M2$ ) in Serie geschaltet ist.

5. Anordnung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens eine der Sekundärspulen ( $M1$ ) mit genau einer der Primärspulen ( $C1$ ) induktiv gekoppelt ist, und dass mindestens eine weitere Sekundärspule ( $M2$ ) mit genau einer weiteren Primärspule ( $C2$ ) induktiv gekoppelt ist.

6. Anordnung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens zwei der Sekundärspulen ( $M1$ ,  $M2$ ) induktiv voneinander weitgehend entkoppelt sind.

7. Anordnung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** mindestens ein Abschnitt des supraleitenden Magnetspulensystems ( $M$ ) mit einem Widerstand ( $r$ ) überbrückt ist, wobei dieser Widerstand einen Wert, gemessen in Ohm, zwischen 0 und dem Wert der Induktivität des überbrückten Abschnitts, gemessen in Henry, aufweist.

8. Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche mit mindestens einer ersten ( $M1$ ) und einer zweiten ( $M2$ ) supraleitenden Sekundärspule und einem ersten supraleitenden Schalter ( $S1$ ),  
5  
**dadurch gekennzeichnet,**  
**dass** der erste supraleitende Schalter ( $S1$ ), welcher die zweite Sekundärspule ( $M2$ ) überbrückt, periodisch geöffnet und geschlossen wird, wobei bei geschlossenem erstem Schalter ( $S1$ ) der Strom ( $I1$ ) in einer ersten Primärspule ( $C1$ ) von einem Anfangswert auf einen Endwert gefahren wird und bei geöffnetem erstem Schalter ( $S1$ ) wieder weitgehend auf den Anfangswert zurückgesetzt wird,  
10  
und **dass** bei geöffnetem erstem Schalter ( $S1$ ) der Strom ( $I2$ ) in einer zweiten Primärspule ( $C2$ ) von einem Anfangswert auf einen Endwert gefahren wird und bei geschlossenem erstem Schalter ( $S1$ ) wieder weitgehend auf den Anfangswert zurückgesetzt wird.  
20
- ( $S2$ ) geöffnet wird, und dass dann während dem Zurücksetzen des Stromes ( $I2$ ) in der zweiten Primärspule ( $C2$ ) auf den Endstrom von 0 Ampere und bis zum neuerlichen Öffnen des ersten supraleitenden Schalters ( $S1$ ) der zweite supraleitende Schalter ( $S2$ ) supraleitend geschlossen bleibt, wobei  $I$  den Strom im supraleitenden Magnetspulensystem ( $M$ ),  $L$  die Selbstinduktivität der zweiten Sekundärspule ( $M2$ ) und  $K$  die induktive Kopplung in Henry zwischen der zweiten Sekundärspule ( $M2$ ) und der zweiten Primärspule ( $C2$ ) bezeichnet.
9. Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung nach Anspruch 4 mit mindestens einer ersten ( $M1$ ) und einer zweiten ( $M2$ ) supraleitenden Sekundärspule und einem ersten ( $S1$ ) und einem zweiten ( $S2$ ) supraleitenden Schalter,  
25  
**dadurch gekennzeichnet,**  
**dass** der erste supraleitende Schalter ( $S1$ ), welcher die zweite Sekundärspule ( $M2$ ) überbrückt, periodisch geöffnet und geschlossen wird, wobei bei geschlossenem erstem Schalter ( $S1$ ) der Strom ( $I1$ ) in einer ersten Primärspule ( $C1$ ) von einem Anfangswert auf einen Endwert gefahren wird und bei geöffnetem erstem Schalter ( $S1$ ) wieder weitgehend auf den Anfangswert zurückgesetzt wird,  
30  
**dass** bei geöffnetem erstem Schalter ( $S1$ ) der Strom ( $I2$ ) in einer zweiten Primärspule ( $C2$ ) von einem Anfangswert auf einen Endwert gefahren wird und bei geschlossenem erstem Schalter ( $S1$ ) wieder weitgehend auf den Anfangswert zurückgesetzt wird, und dass bei geschlossenem erstem Schalter ( $S1$ ) ein zweiter supraleitender Schalter ( $S2$ ), welcher mit der zweiten Sekundärspule ( $M2$ ) in Serie geschaltet ist und zusammen mit dieser vom ersten supraleitenden Schalter ( $S1$ ) überbrückt wird, mindestens zeitweise geöffnet wird.  
35  
40  
45
10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Endwert des Stromes in der zweiten Primärspule ( $C2$ ) im wesentlichen 0 Amperre beträgt.  
50
11. Verfahren nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** vor Erreichen des Endstromes von 0 Ampere in der zweiten Primärspule ( $C2$ ) der Strom in dieser Spule auf einen Betrag von  $I * L / K$  gesetzt wird und dass spätestens nach Erreichen dieses Stromes der zweite supraleitende Schalter  
55

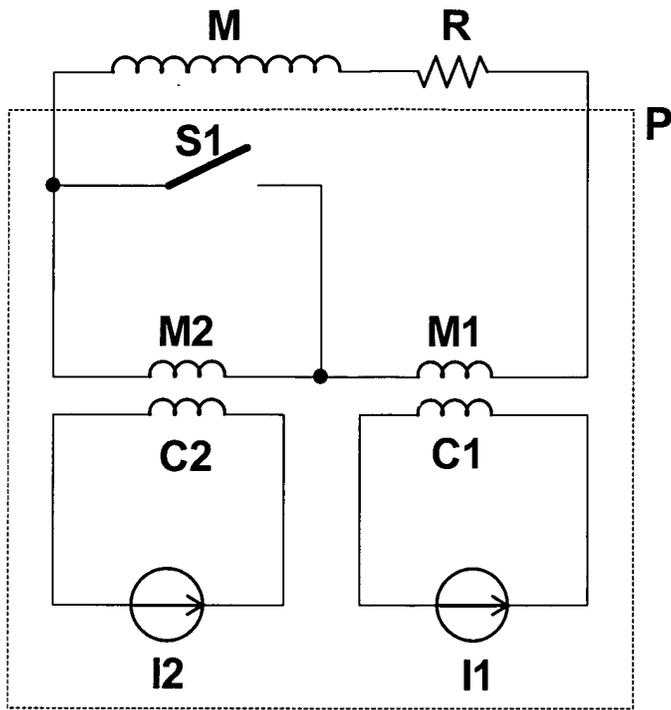


Fig. 1

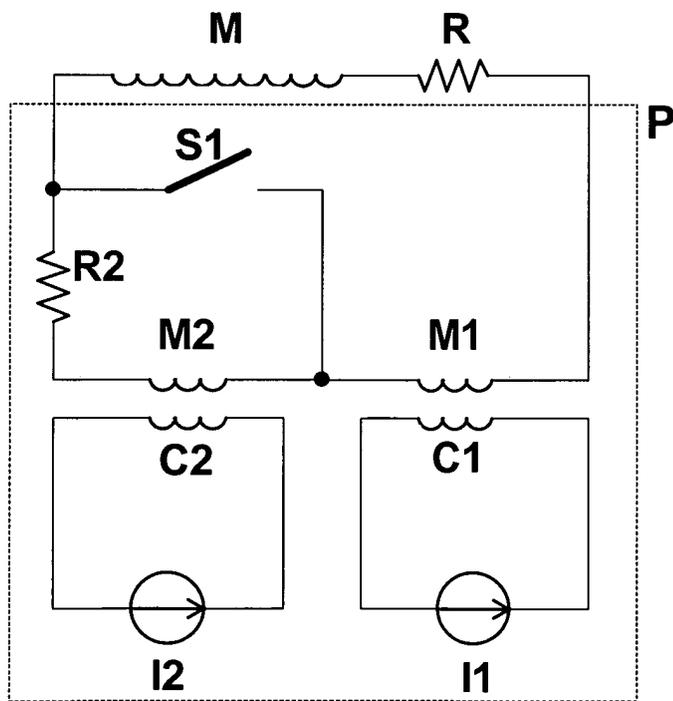


Fig. 2

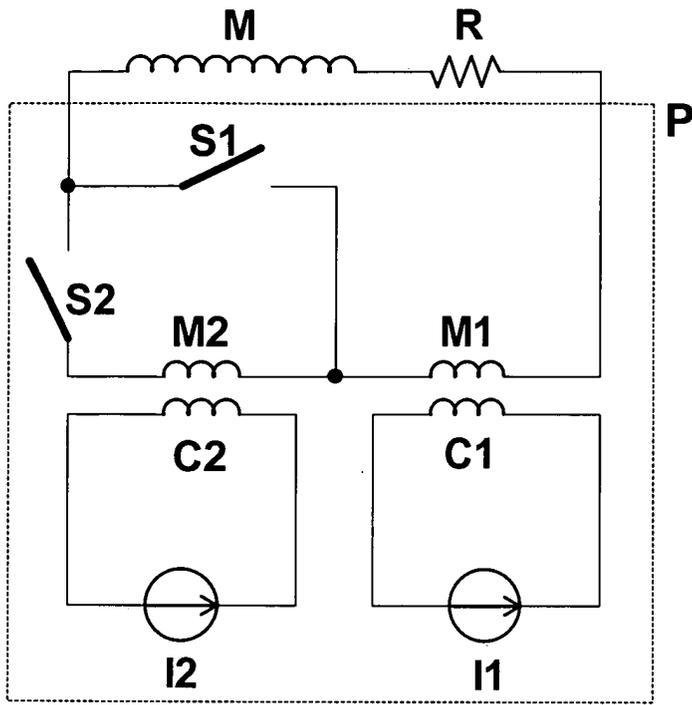


Fig. 3

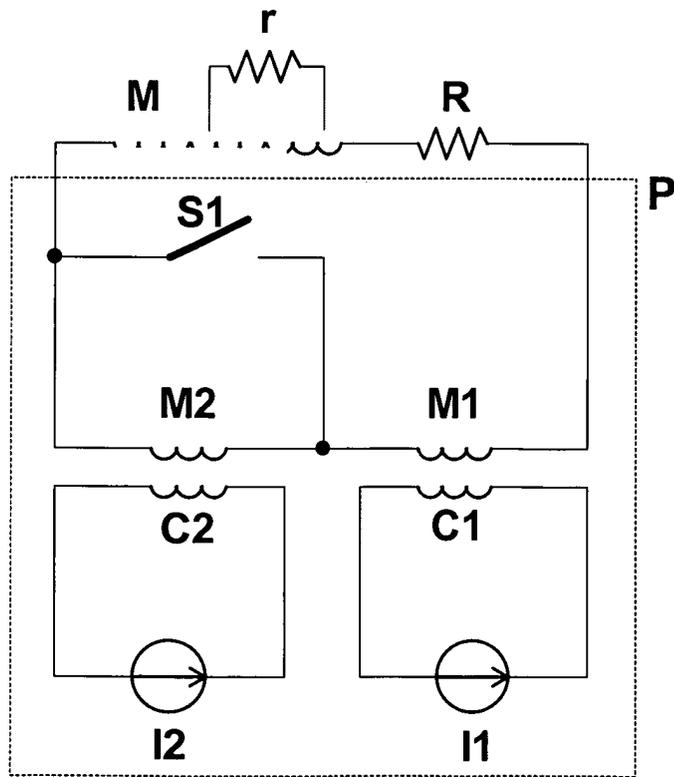


Fig. 4

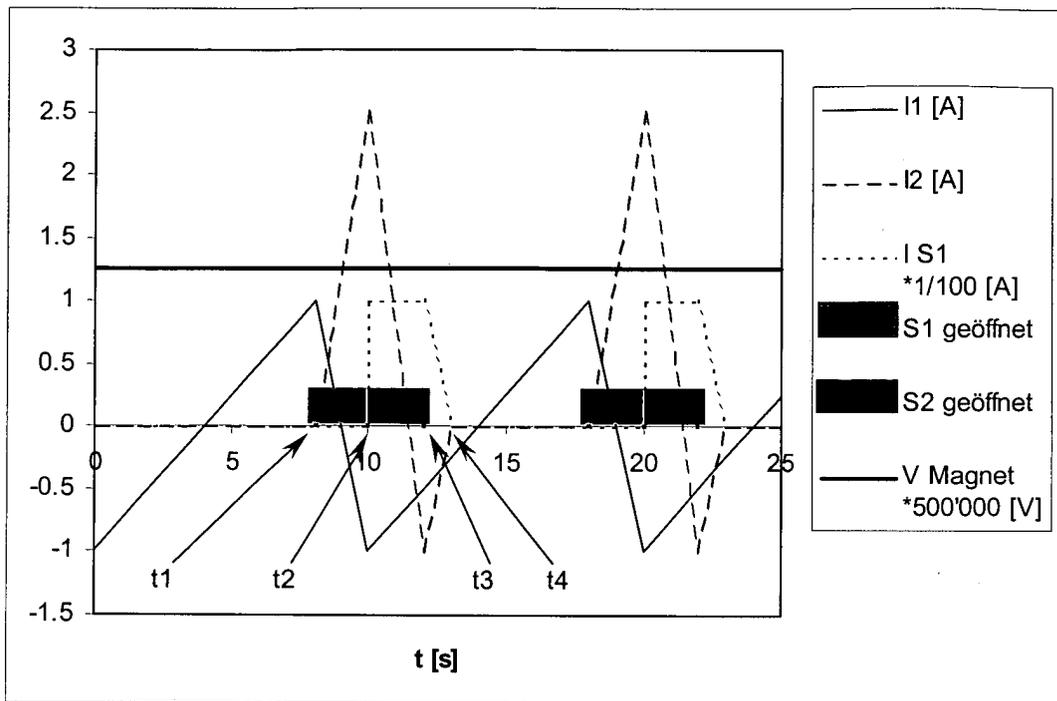


Fig. 5