

# Eine Theorie des Kugellagermotors

4.4.2020

**Tilman Schneider**

Rüdesheimer Str. 58, D-53175 Bonn

E-mail: [admin@relativistische-asynchronmaschine.de](mailto:admin@relativistische-asynchronmaschine.de)

**Abstract.** The ball bearing motor is the version of a homopolar machine, in which the driving magnetic field is not generated by a stator but until by moving of the rotor. This motor combined the characteristics of different types of electrical engines.

**Zusammenfassung.** Der Kugellagermotor ist eine Variante der Unipolarmaschine, bei der das antreibende Magnetfeld nicht von einem Stator, sondern erst durch die Bewegung des Rotors erzeugt wird. Dieser Motor vereint in sich die Eigenschaften verschiedener Typen von elektrischen Maschinen.

PACS numbers: 41.20.-q

urn:nbn:de:101:1-2020040411415692385822

## 1. Einleitung

Zu dieser Arbeit wurde der Verfasser durch den so genannten Kugellagermotor inspiriert, der zuerst im Jahr 1967 von R. A. Milroy beschrieben wurde [1]. Dieser Motor wird mit elektrischem Strom betrieben, *ohne dass ein Magnetfeld dazu nötig zu sein scheint*. Videos dazu gibt es im Internet (z. B. [2] und [3]). Zu seiner Funktionsweise sind auch in der Literatur verschiedene Erklärungen zu finden (z. B. [4] und [5]).

Der Autor schlägt hier eine Erklärung vor, die auf das Prinzip der Unipolarmaschine zweiter Art zurückgreift [6]. So kann geklärt werden, ob der Kugellagermotor durch die Kugeln der Lager angetrieben wird oder nicht.

## 2. Das Modell des Motors

Die im folgenden Kapitel hergeleiteten Beziehungen gelten (mit Ausnahme der Abhängigkeit der Drehzahl von der Zeit) auch für den Generatorbetrieb. Es ist jedoch instruktiv, diese Gleichungen ausgehend von der Betrachtung des Motorbetriebs herzuleiten.

### 2.1. Motorbetrieb

Am Kugellagermotor lässt sich folgendes beobachten:

1. Er benötigt zum Anlauf kein Magnetfeld.
2. Er läuft nicht von selbst an und muss angeworfen werden.
3. Er beschleunigt in Anlaufrichtung in einen stabilen Betriebspunkt.
4. Er kann in beiden Drehrichtungen betrieben werden.
5. Er läuft sowohl mit Gleich- als auch mit Wechselstrom.

Beobachtung 1 legt die Vermutung nahe, dass der Motor mit Hilfe eines selbsterregten Magnetfeldes arbeitet. Beobachtung 2 deutet darauf hin, dass das Feld erst durch eine Bewegung hervorgerufen und dann durch Beschleunigung (Beobachtung 3) verstärkt wird. Wegen Beobachtung 5 ähnelt der Motor einer Reihenschlussmaschine, die als Universalmotor betrieben wird.

Aufgrund dieser Beobachtungen lässt sich ein physikalisches Modell aufstellen, welches aus vier Gleichungen besteht:

$$U' = I'R'_i + U'_g, \quad (\text{Maschengleichung}), \quad (2.1a)$$

$$U'_g = k_{1\varphi}A_\varphi n, \quad k_{1\varphi} > 0, \quad [k_{1\varphi}] = m, \quad (1. \text{ Hauptgleichung}), \quad (2.1b)$$

$$M' = \frac{k_{1\varphi}}{2\pi}A_\varphi I' \quad (2. \text{ Hauptgleichung}), \quad (2.1c)$$

$$A_\varphi = k_{2\varphi}U'n, \quad k_{2\varphi} > 0, \quad [k_{2\varphi}] = \frac{s^2}{m}, \quad (\text{Selbsterregung}). \quad (2.1d)$$

Gestrichene Größen gelten für den bewegten Rotor,  $k_{1\varphi}$  und  $k_{2\varphi}$  sind Konstanten. Die ersten drei Gleichungen beschreiben in allgemeiner Form Gleichstrommaschinen. Dabei ist (2.1a) die Maschengleichung, (2.1b) und (2.1c) die Hauptgleichungen der Gleichstrommaschine.

In ihnen wird der übliche magnetische Fluss durch das Vektorpotential (Komponente  $A_\varphi$ ) ersetzt. Die zusätzliche Gleichung (2.1d) ist ein Ansatz aus der Überlegung heraus, dass das Vektorpotential beim Anwerfen mit Hilfe der verfügbaren Spannung ( $U'$ ) durch eine Bewegung ( $n$ ) erzeugt wird.

Der Rotor besteht aus einer Welle aus Metall mit dem Radius  $r_0$ , die mit zwei Kugellagern leicht drehbar gelagert ist. Die Lager haben einem Abstand  $l$ . Dieser Abstand bestimmt den ohmschen Widerstand  $R'_l$  der Welle. An beide Kugellager wird eine Spannung  $U'$  angelegt.

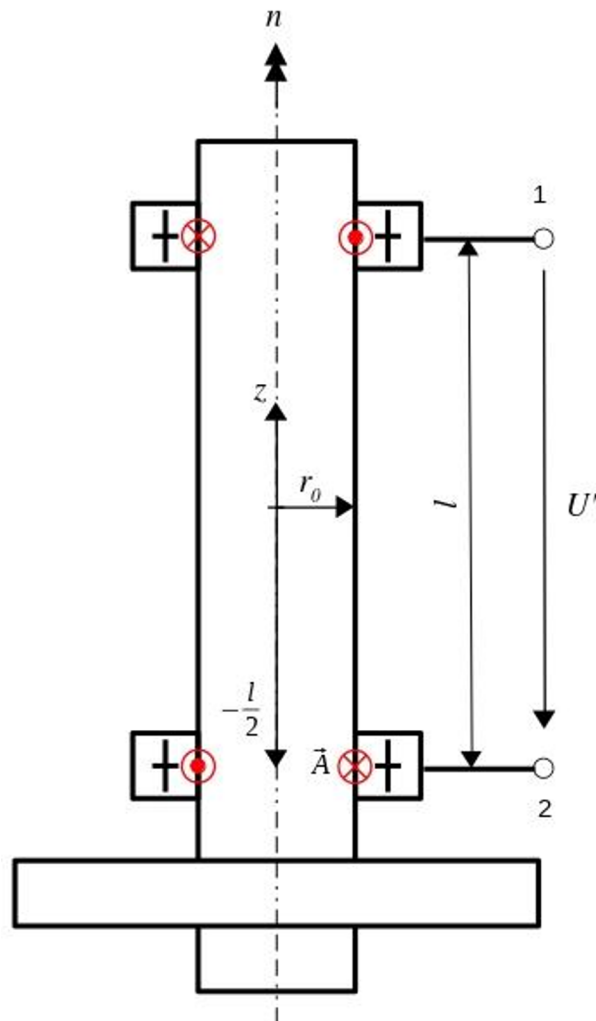


Abbildung 1. Kugellagermotor.

Beim Anwerfen wird zunächst ein kleines Vektorpotential (2.1d) und mit dessen Hilfe ein Antriebsmoment erzeugt (2.1c). Dadurch nimmt die Rotation zu und das Vektorpotential wird verstärkt (2.1d). Infolge der wachsenden Drehzahl wird zunehmend eine Gegenspannung  $U'_g$  erzeugt. Einsetzen von (2.1d) in (2.1b) liefert

$$U'_g = U' \left( \frac{n}{n_0} \right)^2 \quad (2.2)$$

mit der Leerlaufdrehzahl

$$n_0 = \frac{1}{\sqrt{k_{1\varphi} k_{2\varphi}}}. \quad (2.3)$$

Zu Beginn fließt ein hoher Anfahrstrom

$$I'_a = \frac{U'}{R'_i}. \quad (2.4)$$

Nach dem Anfahren wird der Strom mit zunehmender Drehzahl kleiner. Es gilt mit (2.1a) und (2.2):

$$I' = I'_a \left[ 1 - \left( \frac{n}{n_0} \right)^2 \right]. \quad (2.5)$$

Dadurch wächst das Antriebsmoment immer langsamer bis zu einem maximalen Drehmoment (Kippmoment) an, um dann schließlich mit weiter wachsender Gegenspannung wieder abzunehmen. Es ergibt sich mit den Gleichungen (2.2) und (2.5) der Zusammenhang zwischen Drehmoment und Drehzahl:

$$M' = \frac{P'_{\text{mech}}}{2\pi n} = \frac{U'_g I'}{2\pi n} = \frac{P'_a}{2\pi n_0} \left[ 1 - \left( \frac{n}{n_0} \right)^2 \right] \frac{n}{n_0}, \quad (2.6)$$

mit der Anfahrverlustleistung

$$P'_a = \frac{U'^2}{R'_i}. \quad (2.7)$$

Der Abfall des Drehmoments jenseits des Kippmoments ist wichtig, um einen stabilen Betriebspunkt zu ermöglichen (Beobachtung 3).

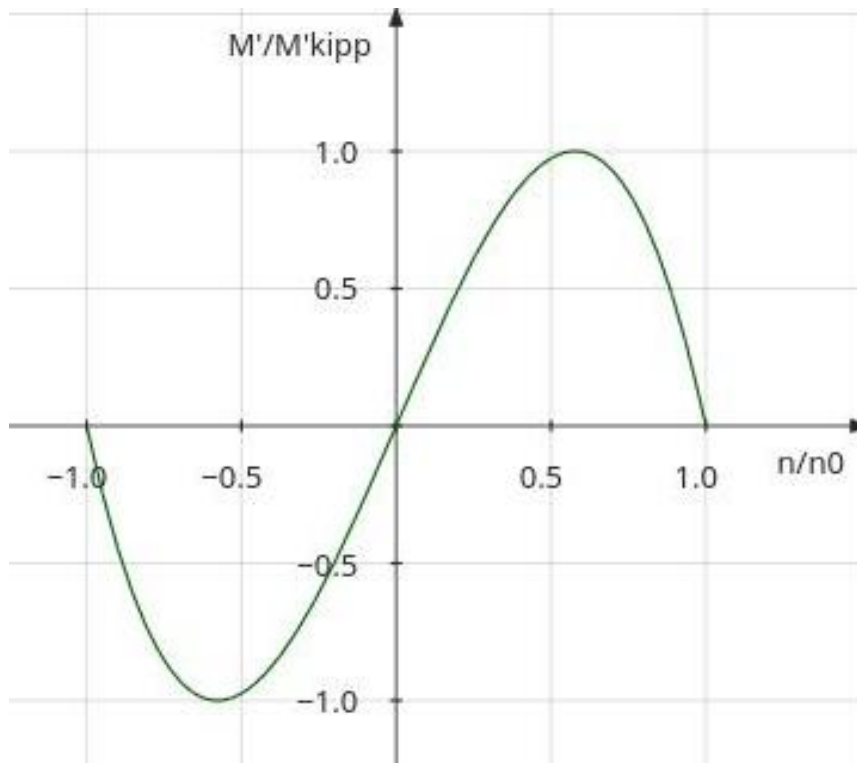


Abbildung 2. Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie für den Motorbetrieb.

Das Antriebsmoment sinkt dann nur soweit ab, bis nahe der Leerlaufdrehzahl ein stabiles Gleichgewicht mit dem Lastmoment erreicht ist. Die Drehzahl bleibt dann konstant. Das Kippmoment liegt bei

$$\frac{n_{\text{kip}}}{n_0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

und ergibt sich zu

$$M'_{\text{kip}} = \frac{P'_a}{\sqrt{27}\pi n_0}. \quad (2.9)$$

Wird dem Motor ein größeres Lastmoment abverlangt, bleibt er stehen (er “kippt”). Dies geschieht auch, wenn bei gegebenem Lastmoment der Strom unter den Kippstrom

$$I'_{\text{kip}} = I'(n_{\text{kip}}) = \frac{2}{3}I'_a \quad (2.10)$$

abgesenkt wird. Die elektrische Wirkleistung

$$P'_{\text{el}} = U'I' \quad (2.11)$$

kann sowohl mit Gleich- als auch mit Wechselspannung zugeführt werden (Beobachtung 5). Im Fall von Wechselspannung ist für die Spannung der Effektivwert einzusetzen. Die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie verläuft punktsymmetrisch durch den Ursprung, womit sich Beobachtung 2 und 4 wiederfinden. Für die mechanisch abgegebene Leistung gilt

$$P'_{\text{mech}} = U'_g I', \quad (2.12)$$

d. h. der Wirkungsgrad ist mit (2.2) und (2.5)

$$\eta = \frac{P'_{\text{mech}}}{P'_{\text{el}}} = \frac{U'_g}{U'} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 = 1 - \frac{I'}{I'_a}. \quad (2.13)$$

Werden (2.1b) und (2.1d) mit der Leerlaufdrehzahl (2.3) erweitert so gilt

$$U'_g = \sqrt{\frac{k_{1\varphi}}{k_{2\varphi}}} A_\varphi \frac{n}{n_0} = v_{\varphi_0} A_\varphi \frac{n}{n_0}, \quad (2.14a)$$

$$A_\varphi = \sqrt{\frac{k_{2\varphi}}{k_{1\varphi}}} U' \frac{n}{n_0} = \frac{1}{v_{\varphi_0}} U' \frac{n}{n_0}. \quad (2.14b)$$

$v_{\varphi_0}$  ist eine Geschwindigkeitskonstante. Um sie zu bestimmen, berechnen wir die Kraft mit Hilfe von [6]

$$\vec{K}'(r, z) = I' \vec{A}'(r, z). \quad (2.15)$$

Gemäß der in [6] gewählten Konvention für den Motorbetrieb werde der bei Klemme 1 ( $r = r_0, z = \frac{l}{2}$ ) zufließende Strom negativ und der bei Klemme 2 ( $r = r_0, z = -\frac{l}{2}$ ) abfließende Strom positiv gezählt. Da die Kraft an beiden Stellen aus Symmetriegründen gleich groß und die gleiche Richtung hat, muss das Vektorpotential den gleichen Betrag, aber entgegengesetzte Richtungen haben (Abb. (1)). Der Betrag des Drehmoments liefert, wenn beide Kräfte berücksichtigt werden:

$$M' = 2r_0 I' A_\varphi = \frac{2r_0}{v_{\varphi_0}} U' I'_a \left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2\right] \frac{n}{n_0} = \frac{2r_0}{v_{\varphi_0}} P'_a \left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2\right] \frac{n}{n_0}. \quad (2.16)$$

Ein Vergleich mit (2.6) liefert

$$v_{\varphi_0} = 4\pi n_0 r_0. \quad (2.17)$$

Also ist

$$U'_g = 4\pi r_0 A_\varphi n, \quad (2.18a)$$

$$A_\varphi = \frac{U'}{4\pi r_0} \frac{n}{n_0^2} = A_\varphi(r_0, -\frac{l}{2}). \quad (2.18b)$$

Das Vektorpotential ist am Anfang ( $n = 0$ ) nicht vorhanden. Es wird erst durch das Anwerfen angeregt und bildet eine Feldstruktur aus, die sich aus der Feldgleichung

$$\Delta \vec{A} = 0 \quad (2.19)$$

herleiten lässt (siehe Anhang 4.1).

Mit Hilfe der Lorentzkraft lässt sich dem Vektorpotential ein Magnetfeld zuordnen. Wegen Gleichheit der Kräfte muss gelten:

$$B_r I' l = 2I' A_\varphi, \quad (2.20)$$

d. h.

$$\boxed{B_r = \frac{2}{l} A_\varphi = \frac{U'}{2\pi l r_0} \frac{n}{n_0^2}}. \quad (2.21)$$

Zu bestimmen ist nun die Leerlaufdrehzahl  $n_0$ . Bei dieser Drehzahl ist der Wirkungsgrad 1, d.h. die Anfahrverlustleistung wird idealerweise - ohne Reibungsverluste - vollständig in mechanische Leistung umgewandelt:

$$P'_a = P'_{\text{mech}}. \quad (2.22)$$

Für die Anfahrverlustleistung gilt allgemein

$$P'_a = \frac{E_{\text{el}}}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T u'(t) i'(t) dt = \frac{U'^2}{R'_i}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (2.23)$$

Und für die mechanische Leistung bei  $n_0$

$$P'_{\text{mech}} = \frac{E_{\text{kin}}}{T_0} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} M(t) \omega(t) dt = \frac{\frac{1}{2} J \omega_0^2}{T_0} = \frac{J \omega_0^3}{4\pi}, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}. \quad (2.24)$$

Dabei ist  $J$  das Trägheitsmoment des Rotors. Für einen Zylinder der Masse  $m$  mit dem Außendurchmesser  $D$  und dem Innendurchmesser  $d$  gilt beispielsweise

$$J = \frac{1}{8} m (D^2 + d^2). \quad (2.25)$$

Gleichsetzen beider Leistungen liefert für die Leerlaufdrehzahl

$$\boxed{n_0 = \frac{1}{\sqrt[3]{2\pi^2}} \sqrt[3]{\frac{U'^2}{JR'_i}}}. \quad (2.26)$$

Für das Kippmoment (2.9) ergibt sich damit

$$M'_{\text{kipp}} = \frac{1}{\sqrt{27}} \sqrt[3]{\frac{2}{\pi}} \sqrt[3]{JP'_a{}^2}. \quad (2.27)$$

Um ein hohes Kippmoment zu erreichen ist es sinnvoll, die Rotorwelle mit einem Schwungrad zu versehen (großes Trägheitsmoment), wie es in [2] und [3] zu sehen ist.

Für die Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Motors wird die Bewegungsgleichung aufgestellt, wobei ein verschwindendes Lastmoment angenommen wird. Mit (2.6) und

$$J\dot{\omega} = M' \quad (2.28)$$

ergibt sich

$$J\dot{\omega} = \frac{P'_a}{\omega_0} \left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right] \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (2.29)$$

Division auf beiden Seiten durch  $J\omega_0^2$  ergibt

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega_0^2} = \frac{P'_a}{J\omega_0^3} \left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right] \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (2.30)$$

Es werden nun folgende Normierungen gewählt:

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad (2.31a)$$

$$\tau = \frac{\omega_0}{4\pi} t = \frac{t}{2T_0}. \quad (2.31b)$$

Die Bewegungsgleichung lässt sich nun schreiben als

$$\dot{\Omega} = (1 - \Omega^2)\Omega. \quad (2.32)$$

Der Punkt bedeutet nun die totale zeitliche Ableitung nach  $\tau$ . Die Integration mittels Trennung der Variablen und anschließender Partialbruchzerlegung liefert

$$\tau - \tau_0 = \ln |\Omega| - \frac{1}{2} \ln |\Omega - 1| - \frac{1}{2} \ln |\Omega + 1|, \quad (2.33)$$

oder nach Umformung

$$e^{-2(\tau-\tau_0)} = C e^{-2\tau} = \left| 1 - \frac{1}{\Omega^2} \right| = \begin{cases} \frac{1}{\Omega^2} - 1 & 0 < |\Omega| < 1, \\ 1 - \frac{1}{\Omega^2} & |\Omega| > 1. \end{cases} \quad (2.34)$$

Der obere der beiden Fälle beschreibt den Motor-, der untere den Generatorbetrieb. Der Einfachheit halber werden nun positive Drehzahlen  $\Omega$  betrachtet. Die allgemeine Lösung der Bewegungsgleichung für den Motorbetrieb ist dann

$$\Omega(\tau) = \frac{1}{\sqrt{1 + C e^{-2\tau}}} = \frac{D e^\tau}{\sqrt{1 + D^2 e^{2\tau}}}. \quad (2.35)$$

Dabei gilt

$$D = \frac{\Omega(0)}{\sqrt{1 - \Omega^2(0)}}, \quad 0 \leq \Omega(0) < 1 \quad (2.36)$$

mit der Drehzahl  $\Omega(0)$  als Anfangswert, die ungleich Null gewählt werden muss, wenn die Maschine anlaufen soll (vgl. Beobachtung 2). Die Drehzahl nähert sich mit fortschreitender Zeit asymptotisch der Leerlaufdrehzahl an. *Der Motor zeigt ein asynchrones (untersynchrones) Betriebsverhalten.* In der Tat ähnelt die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der eines Asynchronmotors im Einphasenbetrieb. Von diesen Maschinen ist bekannt, dass sie nicht von selbst anlaufen und angeworfen werden müssen. Die in (2.36) genannten Anfangswerte legen den Motorbetrieb fest.

## 2.2. Generatorbetrieb

Die Lösung der Bewegungsgleichung für den Generatorbetrieb ist

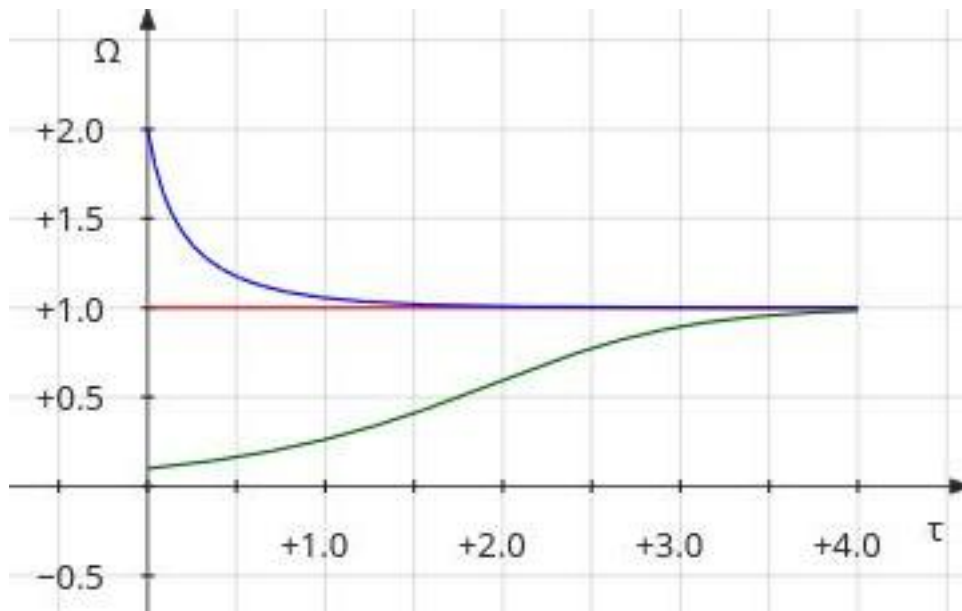
$$\Omega(\tau) = \frac{1}{\sqrt{1 - C e^{-2\tau}}}. \quad (2.37)$$

Hier gilt nun

$$C = 1 - \frac{1}{\Omega^2(0)}, \quad \Omega(0) \geq 1. \quad (2.38)$$

Wählt man als Anfangswert eine Drehzahl, die über der Leerlaufdrehzahl liegt, so liegt für kurze Zeit Generatorbetrieb (übersynchroner Betrieb) vor ( $U'_g > U'$ , d.h.  $I' < 0$ ). Der Rotor wird währenddessen abgebremst und nähert sich asymptotisch der Leerlaufdrehzahl an. Will man für den Generatorbetrieb dauerhaft eine Drehzahl oberhalb der Leerlaufdrehzahl aufrecht erhalten, so muss ein konstantes Antriebsmoment ( $M' < 0$ ) aufgebracht werden.





**Abbildung 3.** Beispiele für die Drehzahl als Funktion der Zeit: Beschleunigung (grüne Kurve) und Bremsen (blaue Kurve).

### 2.3. Ersatzschaltbild

Mit (2.1a) und (2.2) ergibt sich für den Widerstand zwischen den Klemmen 1 und 2

$$R' = \frac{U'}{I'} = \frac{R'_i}{1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2}. \quad (2.39)$$

Es wird nun folgendes definiert:

$$s = \frac{I'}{I'_a}. \quad (2.40)$$

$s$  wird als *Schlupf* bezeichnet. Für den Motorbetrieb gilt  $1 \geq s > 0$  und den Generatorbetrieb  $s < 0$ . Mit (2.5) folgt dann

$$R' = \frac{R'_i}{s}. \quad (2.41)$$

Diese Darstellung ist von der Asynchronmaschine vertraut mit dem Unterschied, dass hier der Wirkwiderstand des Ständers und die Induktivitäten entfallen. Damit erhält man ein einfaches Ersatzschaltbild.

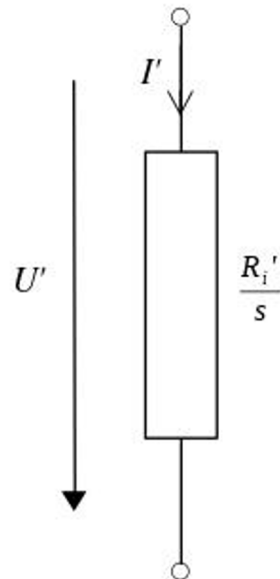


Abbildung 4. Ersatzschaltbild.

### 3. Zusammenfassung

Der Kugellagermotor hat folgende Eigenschaften:

- Er funktioniert wie eine Reihenschlussmaschine sowohl mit Gleich- als auch mit Wechselstrom.
- Er kann in beiden Drehrichtungen betrieben werden.
- Er beschleunigt von einem instabilen Betriebspunkt bei  $n = 0$  in Anlaufrichtung in einen stabilen Betriebspunkt nahe  $n_0$ .
- Wie bei einem Asynchronmotor im Einphasenbetrieb läuft er nicht von selbst an und muss angeworfen werden.

Der Kugellagermotor sollte der Theorie zufolge auch folgende Eigenschaften haben, die sich experimentell überprüfen lassen:

- Das Magnetfeld (eine radiale Komponente) ist nur beim Anlauf nicht vorhanden. Es baut sich erst bei Bewegung von selbst auf (Selbsterregung, Gleichung (2.21)). Dies würde bedeuten, dass der Antrieb des Kugellagermotors nicht durch die Kugeln erfolgt.
- Wie bei einem Asynchronmotor wird die Leerlaufdrehzahl (Gleichung (2.26)) nie ganz erreicht, d. h. der Kugellagermotor kann einen hohen Wirkungsgrad (99%) erreichen.
- Wird der Motor selbst mit einer Drehzahl angetrieben, die größer als die Leerlaufdrehzahl ist (übersynchroner Betrieb), so wird er zum Generator.

## 4. Anhang

### 4.1. Herleitung der Feldstruktur des Vektorpotentials

Da für die Funktion des Kugellagermotors nur die azimutale Komponente des Vektorpotentials eine Rolle spielt, gilt für die Feldgleichung (2.19)

$$\frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial z^2} - \frac{A_\varphi}{r^2} = 0. \quad (4.1)$$

Diese Gleichung lässt sich mit dem Separationsansatz

$$A_\varphi(r, z) = \left(\frac{c_1}{r} + c_2 r\right)(c_3 z + c_4) \quad (4.2)$$

lösen. Es werden folgende zwei Gebiete betrachtet:

$$\begin{aligned} 0 \leq r \leq r_0, \quad -\frac{l}{2} \leq z \leq \frac{l}{2}, & \quad (\text{Gebiet I}), \\ r > r_0, \quad -\frac{l}{2} \leq z \leq \frac{l}{2}, & \quad (\text{Gebiet II}). \end{aligned}$$

Die Rand- und Stetigkeitsbedingungen lauten

$$A_{I\varphi}(0, z) = 0, \quad (4.3)$$

$$A_{I\varphi}(r_0, z) = A_{II\varphi}(r_0, z), \quad (4.4)$$

$$A_{II\varphi}(\infty, z) = 0. \quad (4.5)$$

Aus Symmetriegründen muss in beiden Gebieten gelten:

$$A_\varphi(r, -z) = -A_\varphi(r, z). \quad (4.6)$$

Mit diesen Bedingungen und mit (2.18b) ergibt sich für das Vektorpotential:

$$A_\varphi(r, z) = \begin{cases} -\frac{U'}{2\pi l r_0^2} \frac{n}{n_0^2} r z & (\text{Gebiet I}), \\ -\frac{U'}{2\pi l} \frac{n}{n_0^2} \frac{z}{r} & (\text{Gebiet II}). \end{cases} \quad (4.7)$$

Für das Magnetfeld ergibt sich dann mit  $\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$ :

$$B_r(r, z) = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z} = \begin{cases} \frac{U'}{2\pi l r_0^2} \frac{n}{n_0^2} r & (\text{Gebiet I}), \\ \frac{U'}{2\pi l} \frac{n}{n_0^2} \frac{1}{r} & (\text{Gebiet II}), \end{cases} \quad (4.8)$$

$$B_z(r, z) = \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} + \frac{A_\varphi}{r} = \begin{cases} -\frac{U'}{\pi l r_0^2} \frac{n}{n_0^2} z & (\text{Gebiet I}), \\ 0 & (\text{Gebiet II}). \end{cases} \quad (4.9)$$

Gleichung (4.8) erfüllt die Stetigkeitsbedingung

$$B_{I_r}(r_0) = B_{II_r}(r_0) = \frac{U'}{2\pi l r_0} \frac{n}{n_0^2}, \quad (4.10)$$

entsprechend der Gleichung (2.21).

## 5. Quellenhinweise

- [1] MILROY R.A.: *Hydrodynamic Gyroscope*. Journal of Applied Mechanics, Vol. 34(2), 1967, p. 525.
- [2] <https://youtu.be/f1xnQ9gWy1o?t=5>.
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=JhKcaWpodyI>.
- [4] WATSON D.B., PATEL S.M., SEDCOLE N.P.: *Ball-bearing motor effect with rolling cylinders*. IEE Proc. Sci. Meas. Technol., Vol. 146, 1999, p. 83.
- [5] McDONALD K.T.: *Ball-Bearing Motor*. Princeton University, Princeton, 2011.
- [6] SCHNEIDER Tilmann: *Die Unipolarmaschine zweiter Art*. Bonn : urn:nbn:de:101:1-2015020917870, 2015.