Seminararbeit
Vergleich der Drehmomentdichte von Schritt- und PSM-Motoren

Florian Führer e11813843
Dario Spoljaric e11806417

Mai 2022

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung **3**

2 PSM **4**
- 2.1 Grundlagen . . . 4
- 2.2 Funktionsprinzip . . . 4
  - 2.2.1 Drehmoment einer elektrischen Maschine . . . 5
  - 2.2.2 Drehmoment einer PSM . . . 6
- 2.3 Bauformen . . . 7
  - 2.3.1 Magnetaufbau . . . 7
  - 2.3.2 Spulenaufbau . . . 8
- 2.4 Moderne PMSM . . . 10
  - 2.4.1 Nord Drivesystems IE5+ 71Nx/8 . . . 10
  - 2.4.2 Baumüller powerMELA . . . 10

3 Schrittmotor **12**
- 3.1 Grundlagen . . . 12
- 3.2 Funktionsprinzip . . . 12
  - 3.2.1 Drehmomententwicklung . . . 15
- 3.3 Bauformen . . . 18
  - 3.3.1 PM-Schrittmotor . . . 19
  - 3.3.2 VR-Schrittmotor . . . 19
  - 3.3.3 Hybrid-Schrittmotor . . . 20
- 3.4 Moderne Schrittmotoren . . . 21
  - 3.4.1 Kollmorgen Nema 23-T2 . . . 21
  - 3.4.2 Nanotec - Nema 42 ST11018 . . . 22

4 Drehmomentausbeute Vergleich **23**

5 Conclusion **24**

1 Einführung

Ziel dieser Arbeit ist der Vergleich zwischen Schritt-Motoren (eng. stepper motors, kurz „stepper“) und permanentmagneterregter Synchronmaschinen (kurz „PSM“ oder „PMSM“), mit Fokus auf deren volumenbezogenes Drehmoment $\frac{\partial M}{\partial V}$. Dabei soll der Fokus ausschließlich auf die elektrischen Maschinen gelegt, und nicht auf Wechselrichtertechnologien eingegangen werden. Hierzu sollen zunächst die Grundlagen wiederholt und mögliche Anwendungsgebiete beschrieben werden. Anschließend sollen die unterschiedlichen Bauformen und deren Funktionsprinzip untersucht werden. Besonderes Augenmerk liegt bei den Ausführungsformen zur maximalen Drehmomentausbeute. Schlussendlich sollen die derzeit in der Industrie verwendeten Motoren untersucht und auf deren Drehmomentdichte verglichen werden.

2 PSM

2.1 Grundlagen

Die permanentmagneterregte Synchronmaschine ist eine Ausführung der Sychronmaschine und gehört zur Familie der Drehfeldmaschinen.
Synchronmaschninen bestehen aus einem stationärem Teil, dem Stator, und einem rotierenden Teil, dem Rotor. Ein Teil trägt dabei den elektrischen Hauptstrom (meist der Stator), dessen elektrische Leistung in mechanische umgewandelt wird, wogegen der andere (meist der Rotor) den feldererregenden Strom trägt. Im Falle der PSM wird das Erregerfeld von Ferromagneten generiert. PSMs erreichen durch das Wegfallen der Erregerverluste einen höheren Wirkungsgrad als fremderregte Synchronmaschinen, der magnetische Fluss kann allerdings nicht unabhängig vom Hauptstrom geregelt werden.
Da zur feldorientierten Regelung des Statorfeldes zwingend die Lage des Rotors bekannt sein muss, wird im Allgemeinem zum Betrieb einer PSM die Rotorlage entweder von Sensoren gemessen, oder durch mathematische Modelle berechnet.
Durch die oft verwendeten Seltenerdmagneten und die notwendige Steuerrungselektronik sind PSMs meist relativ kostspielig. Dafür erreichen sie hohe Effizienz auf kleinem Volumen und eine hohe Dynamik im Betrieb.

2.2 Funktionsprinzip

Im folgenden wird der Aufbau einer innenlaufenden PSM mit permanenterregtem Rotor beschrieben. Andere mögliche Ausführungen basieren auf den selben Prinzipien.
Die im Rotor verbauten Permanentmagnete erzeugen ein Magnetfeld $\underline{\Psi}_M$. Abhänging von der Lage des Rotors wird ein Stromraumzeiger in die mehrphasigen, meist 3-phasig ausgeführten, Statorspulen eingeprägt, die ein Magnetfeld aufbauen. Steht das Statorfeld parallel zum Rotorfeld, wird dieses verstärkt, steht es antiparallel, geschwächt. Besitzt das Statorfeld allerdings einen Normalanteil zum Rotorfeld, so erfährt der Rotor eine tangentiale Kraft, zu einer Drehbewegung des Rotors führt. Die Lage des Rotors wird dabei kontinuierlich in den Regler zurückgeführt, und der Stromzeiger angepasst, sodass dieser synchron (daher der Name „Synchronmaschine“) mit dem Rotor rotiert.

Ein Sonderfall dieser Regelung stellt der BLDC-Betrieb dar, bei dem die Rotorlage nicht kontinuierlich, sondern diskret gemessen wird, und lediglich der Statorsektor, in dem sich das Rotorfeld befindet, zur Regelung verwendet wird. Dies vereinfacht die Lagebestimmung und den nötigen Regler deutlich. Der eingeprägte, auf den Strang-Nennstrom bezogenen, Statorstromzeiger $\underline{i}_S$ wird zur Vereinfachung der Regelung als komplexe Zahl im Rotorfesten dq-Koordinatensystem dargestellt, dessen Real- und Imaginärteil getrennt voneinander geregelt werden können. Der normierte Stromzeiger $\underline{i}_S$ im rotorfestem Koordinatensystem einer N-Phasigen Maschine wird durch Summation der Strang-Momentanströme gemäß

$$\underline{i}_{Sdq} = \left(\frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N} i_n(t) \cdot e^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}(n-1)} \right) \cdot e^{-j\gamma} \tag{1}$$

berechnet. Der Realteil des bezogenen Zeigers, $\Re\{\underline{i}_S\} = i_{S,d}$, beeinflusst den im Luftspalt herrschenden magnetischen Fluss, und wird daher meist entweder minimiert, um Kupferverluste im Stator zu vermeiden, oder für den Feldschwächbetrieb negativ eingeprägt. Der Imaginärteil, $\Im\{\underline{i}_S\} = i_{S,q}$ ist direkt proportional zum Drehmoment der Maschine. Durch Regelung des $i_{S,q}$-Stroms kann direkt das in der Maschine wirkende Drehmoment gesteuert werden.

2.2.1 Drehmoment einer elektrischen Maschine

Allgemein kann die enstehende Kraft in einer elektrischen Maschine durch ein Integral über die lokale Flächenkraftdichte $\vec{f}$ im dominant magnetischen Fall (2) hergeleitet werden,

$$\vec{f} = \vec{A} \cdot \langle \vec{B} \rangle \tag{2}$$

wobei $\vec{A}$ den Flächenstrombelag, und $\langle \vec{B} \rangle$ die mittlere magnetische Flussdichte zwischen 2 Medien beschreibt. Diese Kraft wirkt über den Hebelarm $d_{si} = d_R + \delta$, d.h. über den Rotorradius und der Luftspaltbreite. Daraus folgt das Drehmoment (3) [1, p. 210].

$$M_e = \frac{d_{si}}{2} \cdot \int_{\partial \mathcal{V}} \vec{f}_t \cdot \mathrm{d}\vec{A} = \frac{d_{si}}{2} \cdot l_e \cdot \int_0^{2p\tau_p} B_\delta(x,t) \cdot A(x,t) \tag{3}$$

Alternativ kann das Drehmoment über die Lorentzkraft (4) des Rotorfeldes auf die einzelnen Leitungen der Statorwicklungen hergeleitet werden.

$$\vec{F_c} = \int_0^l I \cdot (\mathrm{d}\vec{s} \times \vec{B}) = I \cdot B \cdot l \tag{4}$$

2.2.2 Drehmoment einer PSM

Für die induzierte Spannung in der PSM gilt

$$\underline{U}_p = \mathrm{j}U_p = \mathrm{j}\omega\frac{\psi_p}{\sqrt{2}} \tag{5}$$

Unter Vernachlässigung des Strangwiderstandes R_S folgt für die Strangspannung

$$\underline{U}_S = \mathrm{j}\omega L_d I_{S,d} + \mathrm{j}\omega L_q \cdot (\mathrm{j}I_{S,q}) + \underline{U}_p \tag{6}$$

$$\underline{U}_S = \mathrm{j}\omega L_d I_{S,d} - \omega L_q I_{S,q} + \mathrm{j}\omega\frac{\psi_p}{\sqrt{2}} \tag{7}$$

Bei Annahme, dass die zugeführte elektrische Leistung der wirkenden mechanischen Leistung entspricht ($P_e = P_m$), folgt

$$P_e = m\,U_S\,I_S\cos\phi_S = m_S\,\Re\{\underline{U}_S\,\underline{i}_S^*\} = m \cdot (U_{S,d}I_{S,d} + U_{S,q}I_{S,q}) \tag{8}$$

$$P_e = m \cdot \left(-\omega L_q I_{S,q} I_{S,d} + \omega L_d I_{S,d} I_{S,q} + \omega I_{S,q}\frac{\psi_p}{\sqrt{2}}\right) \tag{9}$$

$$M_e = \frac{P_m}{\Omega_{\mathrm{syn}}} = \frac{P_e}{\Omega_{\mathrm{syn}}} \tag{10}$$

$$M_e = m \cdot p \cdot \left(\psi_p \cdot \frac{I_{S,q}}{\sqrt{2}} + (L_d - L_q) \cdot I_{S,d} \cdot I_{S,q}\right) \tag{11}$$

Für eine m-strängige und 2p-polige, magnetisch symmetrische ($L_d = L_q$, im Allgemeinen gilt $L_d < L_q$, da der q-Fluss, im Gegensatz zum d-Fluss nur Luft überbrücken muss [1, p. 651]. Dies kann durch Einspeisen eines negativen d-Stromes kompensiert werden) gilt bei Einspeisung eines reinen q-Stromes [1, p. 655]

$$M_e = m \cdot p \cdot \Psi_p \cdot \frac{I_S}{\sqrt{2}} \tag{12}$$

des Weiteren kann aus der momentanen inneren Leistung als Summe der Strangleistungen für eine m-phasige Maschine im Sinusbetrieb das Drehmoment

$$M_e = \frac{\frac{m}{2} \cdot \hat{U}_p \cdot \hat{I}}{2 \cdot \pi \cdot n} \tag{13}$$

hergeleitet werden [1, p. 659]. Aus (13) ist der Zusammenhang zwischen Drehmoment und Drehzahl erkennbar, dies ist für die Charakterisierung und den Vergleich der Maschinen wesentlich.
Zur analytischen Beschreibung des wirkenden Drehmoments einer PSM ($l_d \sim l_q$) mit bezogener Statorflussverkettung $|\underline{\psi}_S|$ und bezogenem Statorstromzeiger $\underline{i}_S$ wird die Drehmomentgleichung

$$m_R = -\Im\{\underline{i}_S^* \, \underline{\psi}_S\} = |\underline{\psi}_M| \cdot i_{S,q} \tag{14}$$

angewendet. Aus diesem Zusammenhang folgt sofort, dass das wirkende Drehmoment lediglich von der Luftspaltflussverkettung und vom q-Anteil des Statorstromraumzeigers abhängig ist. [4]

2.3 Bauformen

2.3.1 Magnetaufbau

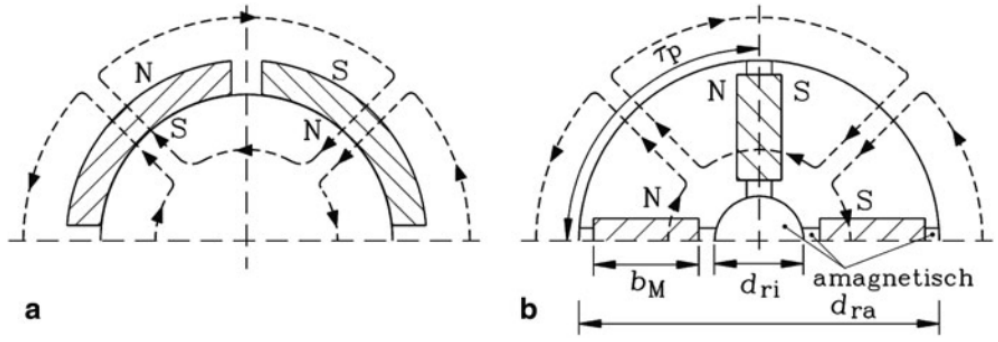

Abbildung 1: Vergleich von Magnetanordnungen. a) Oberflächenmagnete b) vergrabene Magnete [1]

Die einfachste Ausführung des Rotors wird durch Aufbringen von Permanentmagneten auf die Oberfläche der Rotorwelle dar. Dabei wird der Streufluss minimiert, allerdings wird B_δ durch $B_\delta \leq B_M$ beschränkt.

Im Falle von vergrabenen Magneten schließt sich zwar ein Teil des Magnetflusses im Rotor kurz, dafür kann B_δ die Magnetflussdichte B_M übersteigen, d.h. es kann $B_\delta > B_M$ gelten [1, p. 636].
Eine weitere Möglichkeit die Luftspaltflussdichte über die des Permamentmagneten zu erhöhen, bietet das Halbach-Array. Dabei werden die benachbarten Pole nicht antiparallel, sondern normal zueinander angeordnet, sodass jener Fluss der radial ausgerichteten Pole, der in den Rotor fließen würde, zum Nachbarpol kurzgeschlossen wird (siehe Abb. 2). Der Fluss wird auf einer Seite verstärkt, und auf der anderen Seite abgeschwächt. Im Falle einer PSM kann dadurch der im Luftspalt herschende magnetische Fluss um einen Faktor von 1 bis 4 [2, p. 20] erhöht werden. In Abbildung 3 wird der Effekt des Halbach-Array auf den Luftspaltfluss verdeutlicht.

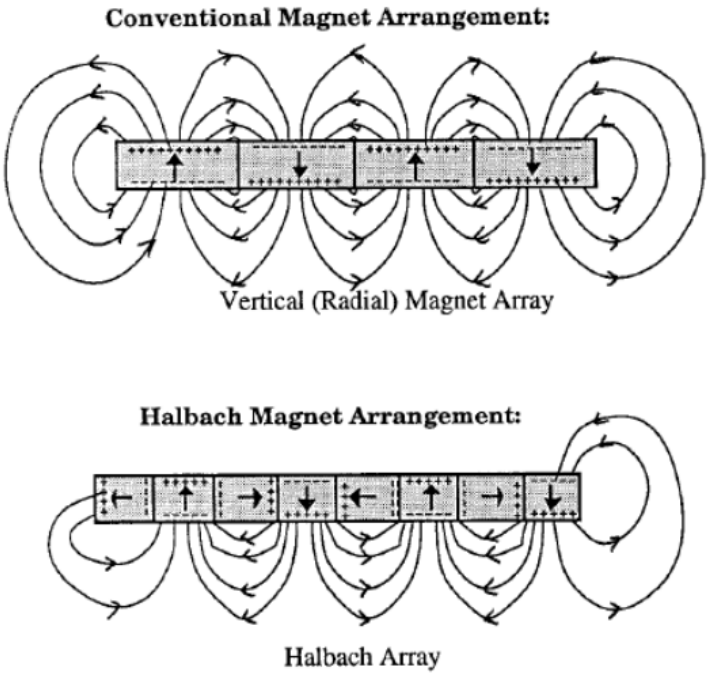

Abbildung 2: Aufbau eines Halbach-Arrays [2]

2.3.2 Spulenaufbau

„Für Antriebsanwendungen mit niedriger Drehzahl, aber hohem Drehmoment eignen sich besonders hochpolige PM-Synchronmaschinen

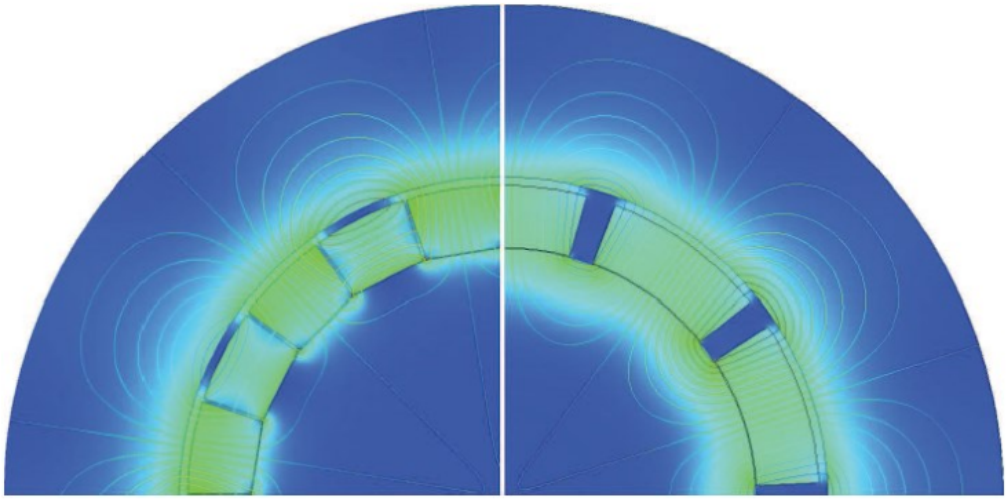

Abbildung 3: Effekt eines Halbach-Arrays in einer PSM. Links: Halbach-Array-Anordnung, Rechts: Konventionelle Polanordnung [2]

> mit Zahnspulenwicklung, da kleine Polteilungen bei mäßig großer Nutzahl, axial kurzen Wickelköpfen und niedrigem Rastmoment auch bei ungeschrägter Ausführung möglich sind.“ [1, p. 715]

Bei der Zahnspulenwicklung handelt es sich um eine Art der Bruchlochwicklung, bei der die Lochzahl (Nuten pro Pol und Strang) $q \approx \frac{1}{m}$, gewählt wird ($q = \frac{1}{m}$ sollte vermieden werden, da sonst die Drehfeldwicklung unsymmetrisch ausfällt). Die Spulenweite enspricht zirka der Polteilung des Rotors [1, p. 99].
Nachteile dieser Wicklungsart sind u.A. dass es zu zusätzlichen Unter- und Oberwellen kommt, die eine Reihe von negativen Effekten mit sich bringen. Die Unter- und Oberwellen wirken sich durch die größeren Radialkräfte stärker auf das Geräusch- und Schwingungsverhalten der Maschine aus. Es kommt zu größeren Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverlusten. Außerdem wird bei der Zahnspulenwicklung L_d und L_q beträchtlich erhöht, was zu erhöhtem Stromverbrauch, und damit schlechterem Wirkungsgrad und schwächerer Dynamik führt [1, p. 709f.].
Aufgrund dieser Eigenschaften führen Zahnspulenwicklungen bei höheren Drehzahlen oder Leistungen über 100 kW zu erheblichen Problemen, die in der Auslegung berücksichtigt werden müssen.

2.4 Moderne PMSM

In diesem Abschnitt werden PSMs der Firmen Baumüller, Nord Drivesystems und ABB vorgestellt. Diese Hersteller wurden vor allem deshalb gewählt, da ihre Datenblätter besonders ausführlich das in dieser Arbeit untersuchten Verhalten der Maschinen beschreiben.

2.4.1 Nord Drivesystems IE5+ 71Nx/8

Da wir es hier mit einer ganzen Produktserie zu tun haben, werden hier die verschiedenen Motoren als Gesamtes untersucht. Im Datenblatt ist zu sehen, dass die Motoren 71 Nx/8 alle in dasselbe Gehäuse verbaut werden können. Zum einfacheren Vergleich mit den Schrittmotoren werden hier die Nema-Gehäuse gewählt, welche ein Gehäusevolumen von:

$$V_{IE5+} = (L - E) \cdot \frac{AC^2}{4} \cdot \pi = 2.312 \cdot 10^6 \,\mathrm{mm}^3 \tag{15}$$

ausfüllen. Es ergibt sich ein Gesamtvolumen von $2.312 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{m}^3$ bei einem maximalen Drehmoment (Version 71 N3/8) von 9.6 Nm. Daraus errechnet sich eine maximale Drehmomentdichte von $\frac{\partial M}{\partial V} = 4.152 \cdot 10^3 \,\frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{m}^3}$. Die charakteristische Kennlinie des Modells ist in Abbildung 4 zu sehen, wobei hier die blaue Linie das Drehmoment repräsentiert.

2.4.2 Baumüller powerMELA

Bei der PowerMELA-Reihe der Firma Baumüller handelt es sich um Traktionsantriebe, welche für 50, 80 und 140 kW Antriebsleistung ausgelegt sind. Solche Leistungen bedürfen zusätzlicher Kühlung zur Führung größerer Ströme. Die Variante PM6-132/140 schafft ein Drehmoment von bis zu 600 Nm und das bei einem Maschinenvolumen von

$$V_{\mathrm{powerMELA}} = 513\,\mathrm{mm} \cdot (290\,\mathrm{mm})^2 = 43.143 \cdot 10^6\,\mathrm{mm}^3 \tag{16}$$

Es ergibt eine Drehmomentdichte von $\frac{\partial M}{\partial V} = 13.9 \cdot 10^3 \,\frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{m}^3}$. Die zugehörige Drehmomentenkennlinie ist in Abbildung 5 ersichtlich.

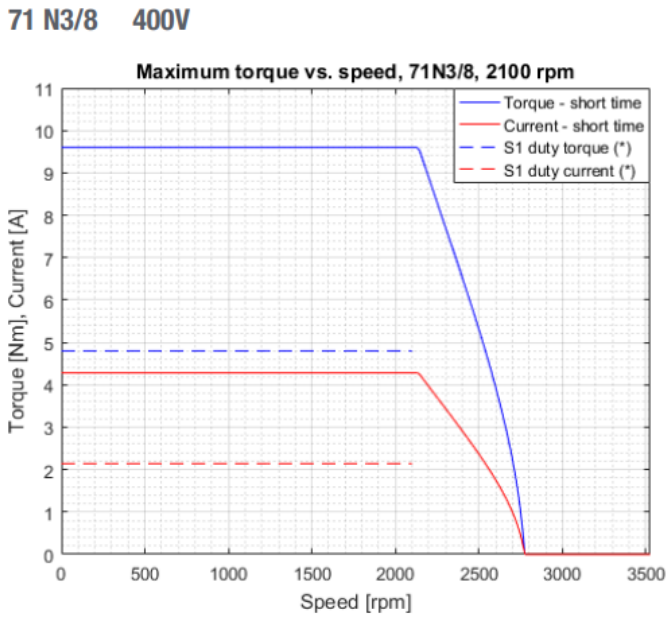

Abbildung 4: Charakteristische Kennlinie der 71 N3/8

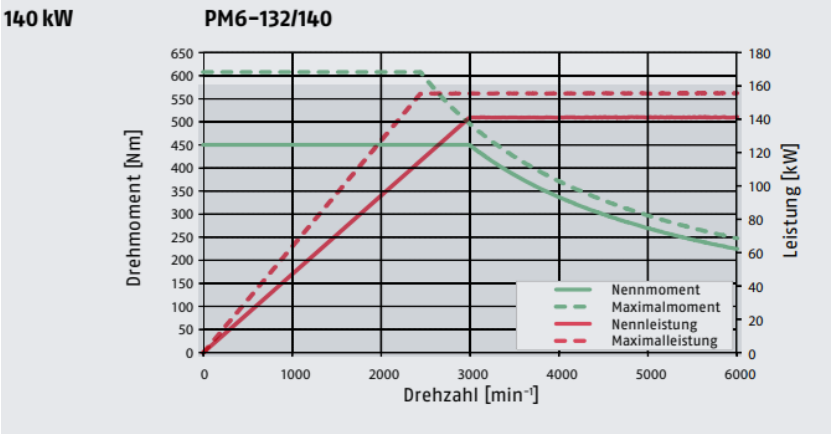

Abbildung 5: Charakteristische Kennlinie von PM6-132/140

3 Schrittmotor

3.1 Grundlagen

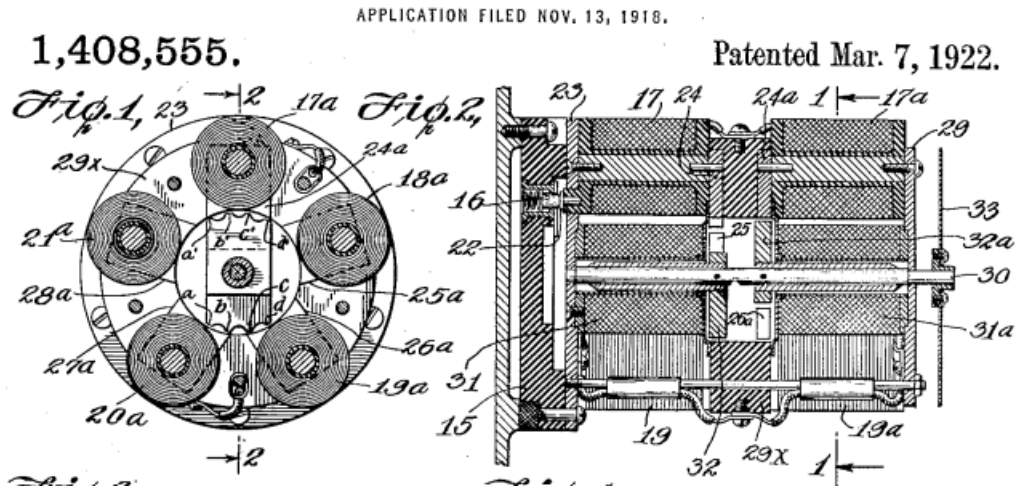

Abbildung 6: Schrittmotor Patent aus 1920

Der Schrittmotor wurde im Jahr 1920 von Frank W. Wood patentiert und entwickelte sich im Laufe des 20. Jahrhunderts zu einer kostengünstigen Alternative zu den damals vorherrschenden Servomotoren. Anders als bei den Servomotoren musste bei den Schrittmotoren nicht mehr die exakte Position gemessen und in einem Regelkreis rückgeführt werden, sondern es genügte eine einfache Steuerung. Das bedeutet, dass die Kosten für jegliche Sensoren zur Rotorlagen-Bestimmung entfallen. Zu den historisch ersten Anwendungen gehören die Ausrichtung von Schiffskanonen in der Royal Navy, heute werden diese typischerweise in Verteidigungs- und Luftfahrtanwendungen eingesetzt, eben dort wo eine winkeltreue Ausrichtung wichtig ist.

3.2 Funktionsprinzip

Es gibt viele verschiedene Bauformen und noch mehr Möglichkeiten diese anzusteuern. Die vorherrschenden Typen sind:

- Permanentmanet-Schrittmotor
- Reluktanz-Schrittmotor

- Hybrid-Schrittmotor
- Lavet-Schrittmotor

Wobei die Hybrid-Variante eine Kombination aus Reluktanz- und Permanentmagnet-Schrittmotor, und heute die am meistverbreiteste Art ist. Der Lavet-Schrittmotor wird zumeist in Quarzuhren verbaut und ist für größere Drehmomente eher uninteressant, deshalb wird in dieser Arbeit der Fokus hauptsächlich auf die ersten drei genannten Vertreter gelegt.
Alle drei Bauformen ähneln sich im Statoraufbau, dieser umfasst wie auch bei der PMSM die stromführenden Wicklungen zur Erzeugung eines magnetischen Feldes, nach welcher sich der Rotor ausrichtet. Abbildung 7 zeigt einen vereinfachten Aufbau, aus dem ersichtlich wird, dass die Spulen in derselbe Querschnitts-ebene verbaut, aber auch gestaffelt axial hintereinander angeordnet werden können. [1, p. 827].

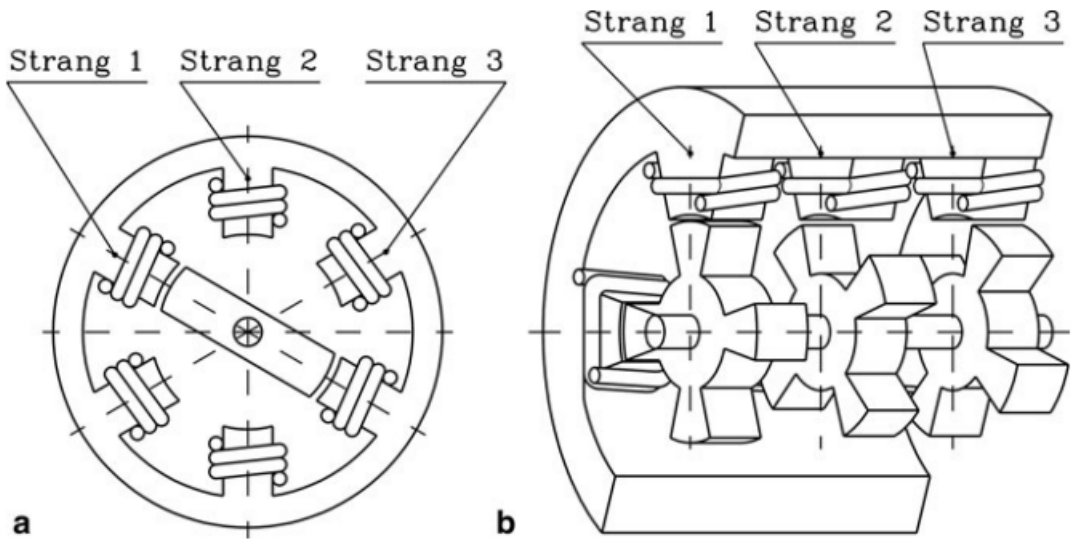

Abbildung 7: Schrittmotor Stator-Aufbau [1, p. 827]

Um nun den Rotor auszurichten wird ein Wicklungsstrang mit einer impulsförmig aufgeschalteten Gleichspannung bestromt, dabei wird die Richtung des Ständerfeldes durch die jeweilige Achse der Spulen bestimmt. Die einzelnen Schritte (eng. „steps“ genannt) werden demnach durch den Aufbau des Stators, aber auch durch den Aufbau des Rotors bestimmt.

Bei dem Reluktanzschrittmotor besteht der Rotor aus einem gezahnten Weicheisenkern, bei welchem das Moment sich anders als bei der PMSM ergibt (dazu später mehr).
Bei dem Permanenterregten-Schrittmotor umfasst der Rotor Permanentmagnete, welche eine Rotorflussverkettung vorgeben. Das entstehende Moment ergibt sich wie bei der PMSM. In beiden Fällen führt der Rotor keinen Strom, enthält demnach keine Spulen und ist somit wartungsfrei. Da das Hauptmerkmal eines Schrittmotors die winkeltreue Ausrichtung ohne jegliche Messelektronik ist, wird dieses Merkmal zuerst diskutiert und im Anschluss auf die Drehmoment bildenden Mechanismen eingegangen. Zur vereinfachten Betrachtung wird zunächst der Permanenterregte Schrittmotor betrachtet. Für jeden Statorpol gibt es eine Spule, wobei mehrere Statorpole von einer Spule versorgt werden. Nehmen wir nun an dieser Motor umfasst 2 Phasen, von dessen Bestromung der eingestellte Winkel des Rotors abhängig ist. Werden

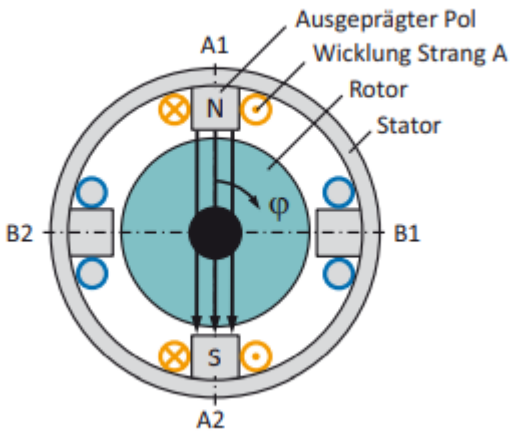

Abbildung 8: Schrittmotor Grundprinzip [3, p. 116]

beide mit dem gleichen Betrag bestromt, nimmt der Rotor eine Mittenposition zwischen den beiden Statorpolen ein. Diese Betriebsart wird Vollschrittbetrieb und liefert das höchste Drehmoment. Im Allgemeinem ergibt sich der Schrittwinkel aus folgender Formel [1, p. 846].

$$\alpha_S = \frac{2\pi}{z} \tag{17}$$

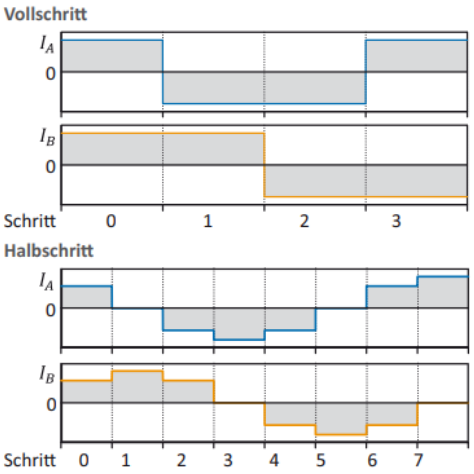

Abbildung 9: Halbschritt [3, p. 120]

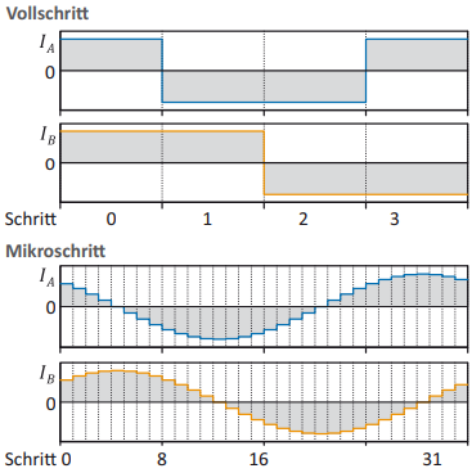

Abbildung 10: Mikroschritt [3, p. 120]

Wobei z die Anzahl der Schritte je Umfang ist. Die Anzahl unterscheidet sich sowohl je nach Motoraufbau als auch nach Betriebsart. Beim Halbschrittbetrieb können beide Spulen abwechselnd und gleichzeitig mit demselben Strombetrag bestromt werden. Im Mikroschrittbetrieb werden die Spulen nun nicht mehr mit nur einem Strombetrag versorgt, sondern dieser wird variiert. Typsicherweise kann somit ein Schritt im Vollschrittbetrieb zu vielen kleineren Schritten unterteilt werden. Die Schrittzahl z ergibt sich bei Reluktanz (VR- Variable Reluktanz) Schrittmotoren zu [1, p. 830]:

$$z = \frac{Q_r \cdot m}{k_B} \tag{18}$$

und bei PM-Schrittmotoren zu:

$$z = \frac{p \cdot m}{k_B} \tag{19}$$

Die Variable k_B sei hier ein Faktor, welcher die Schrittunterteilung berücksichtigt, sprich bei Unterteilung eines Vollschrittes auf 2 Schritte ergibt $k_b = 0.5$. Abbildung 9 und 10 zeigen die zuvor genannten Betriebe [3, p. 120]

3.2.1 Drehmomententwicklung

Bei der Drehmomententwicklung der Schrittmotoren muss zunächst noch unterschieden werden zwischen statischen und dynamischen Momenten. Da die

Schrittmotoren eine Sonderform der Synchronmaschine darstellen [1, p. 869] können die statischen Momente anhand der Sychronmaschine erklärt werden.

Statische Drehmomente Hierbei gibt es das synchrone Drehmoment M_{syn} durch die Wechselwirkung von Stator mit den Permanentmagneten des Rotors, und das Reluktanzmoment M_{rel} welches sich als Wechselwirkung von Statorströmen des erregten Statorfelds mit dem durch die über den Umfang veränderliche Rotorreluktanz ergibt. Je nach Typ (PM-,VR- oder Hybrid) ergibt sich das angreifende Moment aus einem oder beiden Momenten. Das synchrone Drehmoment ergibt sich im wesentlichen genauso wie das Drehmoment der PSM, die Erläuterung ist im Kapitel 2 nachzulesen.
Um das Reluktanzmoment zu erhalten muss zunächst wieder in das rotorfeste dq-System gewechselt werden. Das d-Feld übernimmt die Rolle zur Feldbildung im Rotor und das q-Feld ist, wie auch bei der PSM, verantwortlich für die Momentenbildung. Durch die Zahn-Nut Geometrie des Rotors ergibt sich eine Differenz zwischen den jeweiligen Induktivitäten von Zahn L_d und Nut L_q. Wir können nun den Betrieb vergleichen wie den einer geschalteten Reluktanzmaschine, dabei muss zunächst noch die umgesetzte Leistung in einer solchen Maschine genauer untersucht werden. Die Strangspannung ergibt sich zu [1, p. 762]

$$u = R \cdot i + \frac{d\Psi}{dt} = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL}{d\gamma_m} \cdot \Omega_m \tag{20}$$

Wobei der letzte Term als der rotatorische Anteil angesehen werden kann. Die Leistung ergibt sich somit zu

$$p_e = u \cdot i = R \cdot i^2 + i \cdot L \cdot \frac{di}{dt} + i^2 \cdot \frac{dL}{d\gamma_m} \cdot \Omega_m \tag{21}$$

Die im Luftspalt umgesetzte Leistung p_δ ergibt sich nun z

$$p_\delta = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\gamma_m} \cdot \Omega_m \tag{22}$$

Diese Leistung bestimmt somit die Winkelgeschwindkeit und das Drehmoment. Das Drehmoment kann hier einfach durch $M_{rel} = \frac{p_\delta}{\Omega_m}$ angegeben werden. Wenn wir nun einen unipolaren Statorstrom unter dem Winkel α zur d-Achse versetzt mit der Amplitude $\hat{I}_s$ einprägen folgt für die das Moment

gemäß der Definition [1, p. 763]

$$M_e = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\gamma_m} = \frac{1}{2} \cdot \hat{I}_s^2 \cdot \frac{L_d - L_q}{\alpha} \tag{23}$$

Der schlussendliche Zusammenhang zwischen Drehmoment zur Winkelposition ist in Abbildung 11 gezeigt. Das Reluktanzmoment ist hierbei mit M_{rel} gekennzeichnet und wie zu sehen ist ergibt sich ein sinusförmiger Verlauf über eine Umdrehung, dies ist mit dem periodischen Aufbau der Zähne und Nuten im Rotor zu begründen. Der Verlauf von M_{syn} zeigt das Moment welches sich zufolge des Rotormagnetfeldes in Wecheslwirkung mit den Statorfeld ergibt, sprich es zeigt das Moment zufolge der Permanentmagneten.

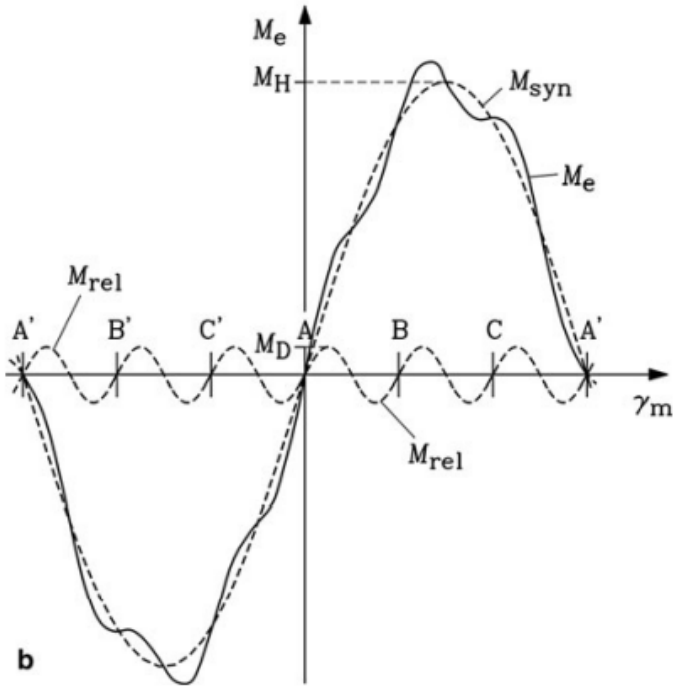

Abbildung 11: Drehmoment zu Winkelposition [1, p. 854]

Bei den meisten Schrittmotoren werden die Drehmomentkennlinien $M(\omega)$ von den Herstellern angegeben. Dementsprechend ist es nun auch interessant wie sich das Drehmoment in bezug zur Drehzahl ändert. Dazu wird wieder

an der Reluktanzmaschine orientiert und die Idealisierungen angenommen (Blockstrom etc.) [1, p. 780].

$$u = U_d = R \cdot \hat{I} + L\frac{d\hat{I}}{dt} + \hat{U}_i \Rightarrow U_d = \hat{U}_i\hat{I} \cdot Q_r \cdot \frac{dL}{d\gamma} \cdot \Omega_m \tag{24}$$

Da nun U_d konstant ist, ergibt sich die zulässige Stromamplitude zu (25)

$$\hat{I} = \frac{1}{Q_r} \cdot \frac{U_d}{dL/d\gamma} \cdot \frac{1}{\Omega_m} \cong \frac{U_d}{(L_d - L_q)/\alpha} \cdot \frac{1}{\Omega_m} \tag{25}$$

Umgeformt auf Ω_m und ausgedrückt durch die Drehzahl: $n_g = \frac{\Omega_m}{2\pi}$ ergibt sich die Grenzdrehzahl. Mit 23 und der Grenzdrehzahl ergibt sich das maximale Moment bezogen auf die Drehzahl:

$$M_e \cong \frac{1}{2(L_d - L_q)/\alpha} \cdot \left(\frac{U_d}{2\pi n}\right)^2 \tag{26}$$

Dieser Zusammenhang ist auch in Abbildung 12 zu sehen.

Zur Beschreibung werden zusätzlich das Haltemoment M_H und das Selbsthaltemoment M_D verwendet. M_H gibt somit das maximale Drehmoment an mit welchem ich den erregten Schrittmotor belasten kann, ohne dass er sich in Gegenrichtung dreht. M_D gibt das maximale Moment an mit welchem der Motor belastet werden kann ohne das dieser erregt ist. Diese Daten werden separat im Datenblatt angeführt.

Dynamische Drehmomente Dynamisch betrachtet kann der Motor sein maximales Haltemoment nur dann entwickeln, wenn gemäß der Wicklungszeitkonstante der Strom seinen stationären Endwert erreicht hat. Mit steigeneder Schaltfrequenz nimmt die Bestromungsdauer auch proportional mit $\frac{1}{n^2}$ ab, dementsprechend nimmt auch das Moment mit steigender Frequenz ab [1, p. 872].

In Abbildung 12 ist mit 1 das maximal mögliche Moment gezeigt, 2 und 3 zeigen den Momentenverlauf beim Anlauf des Schrittmotors mit jeweils zusätzlichen Massenträgheitsmomenten.

3.3 Bauformen

Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt gibt es drei wichtige Bauformen. Der Aufbau dieser wird nun skizziert. Natürlich lassen sich diese Motortypen auch

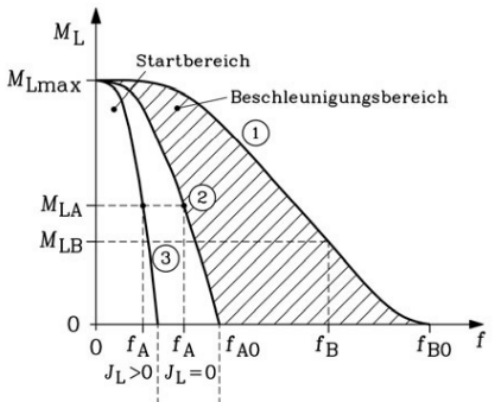

Abbildung 12: SM - Momententwicklung [1, p. 854]

noch in unterschiedlichen Konstruktionstypen realisieren, z.B. als Transversalflussmaschine oder als Radialflussmaschine.

3.3.1 PM-Schrittmotor

Der Rotor enthält Permanentmagnete in Nuten, aufgrund derer sich ein konstantes Feld ausbildet. Die Wechselwirkung der Statornuten mit dem Rotorfeld führt selbst bei stromloser Statorwicklung zu einem Selbsthaltemoment M_D. Zwei Stränge sind zum selbsttätigen Anlaufen auch bei symmetrischen Rotoraufbau ausreichend. Nachteilig ist hier die begrenzte Schrittteilung, da die Permanentmagnete nicht beliebig klein gestaltet werden können. Abbildung 13 zeigt den Aufbau eines PM-Schrittmotors als Transversalflussmaschine mit Klauenpolen [1, p. 839].

3.3.2 VR-Schrittmotor

Bei diesem Schrittmotortyp ist bei stromloser Statorwicklung das Selbsthaltemoment gleich null. Der Rotor besteht hierbei aus einem gezahnten Weicheisenkern. Der Vorteil dieses Motortyps ist die hohe Schrittzahl je Motorumdrehung und damit die höhere Winkelauflösung. Bei diesem Motor muss jedoch darauf geachtet werden, dass bei symmetrischen Rotoraufbau 3 Stränge zum Anlauf notwendig sind.

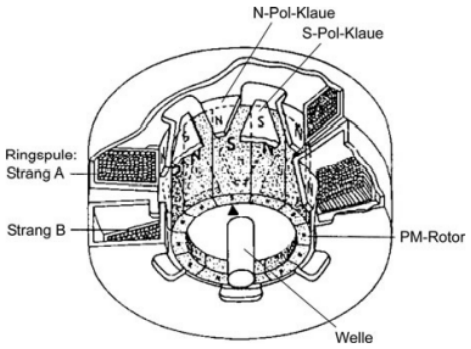

Abbildung 13: PM-Schrittmotor Aufbau [1, p. 839]

Abbildung 14: Hybrid Schrittmotor

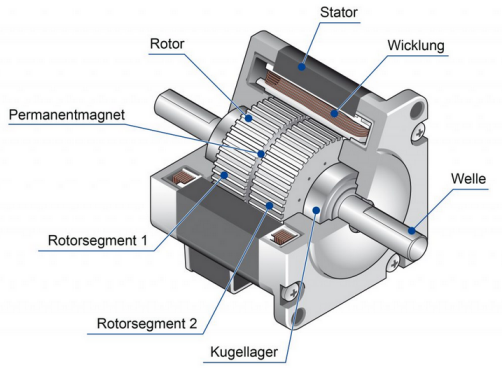

Abbildung 15: Skizze eines Hybrid Schrittmotors

3.3.3 Hybrid-Schrittmotor

Hier werden die beiden vorher genannten Typen vereinigt und deren Vorteile ergänzt. Wie in Abbildung 14 zu sehen ist, besteht der Rotor hier aus zwei Weicheisenkränzen und einem Permanentmagneten dazwischen [1, p. 859] . Es können mehrere Weicheisenkränze axial hintereinander angeordnet werden, dies erhöht ebenfalls das Drehmoment.

3.4 Moderne Schrittmotoren

In diesem Kapitel werden Schrittmotoren der Firmen Kollmorgen und Nanotec beispielhaft herangezogen.

3.4.1 Kollmorgen Nema 23-T2

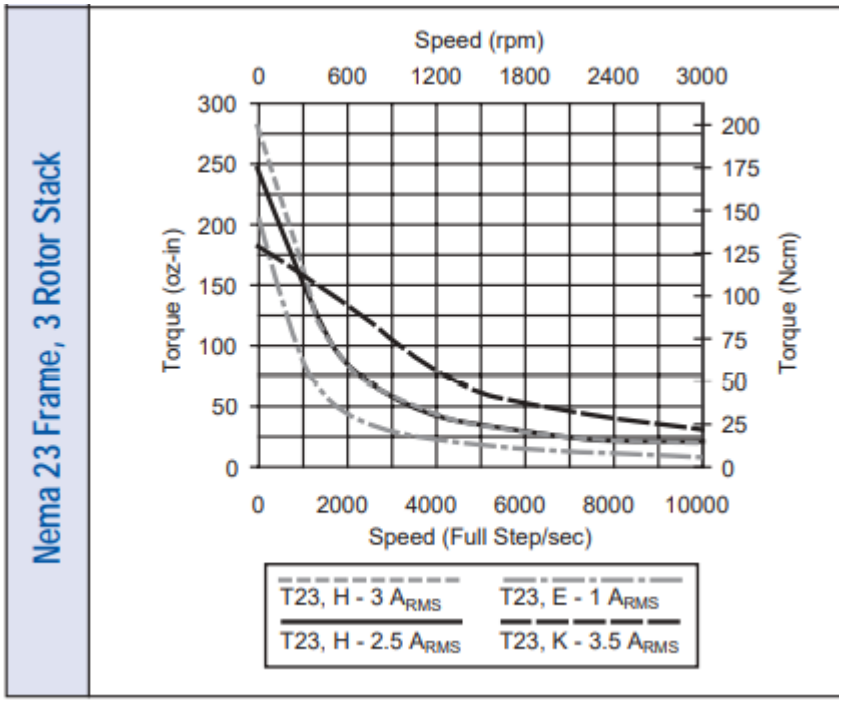

Abbildung 16: Kollmoregen Nema 23 - T2 (24V)

Die T2-Reihe von Kollmorgen bietet das höchste Drehmoment von allen in deren Produktpalette. Es handelt sich hierbei um einen Hybrid Schrittmotor mit 3 axial hintereinander geschalteten Rotorsegementen. Wie in Abbildung 16 zu sehen ist, beläuft sich dieses auf ein maximales Drehmoment von $200\,\mathrm{Ncm} = 2\,\mathrm{Nm}$ bei einem Motorvolumen von

$$V = 103.1\,\mathrm{mm} \cdot 56.9\,\mathrm{mm}^2 \approx 3.34 \cdot 10^6 \mathrm{mm}^3 \tag{27}$$

(laut Datenblatt) was einer Drehmomentdichte von $\frac{\partial M}{\partial V} = 5.99 \cdot 10^3\,\frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{m}^3}$ entspricht.

3.4.2 Nanotec - Nema 42 ST11018

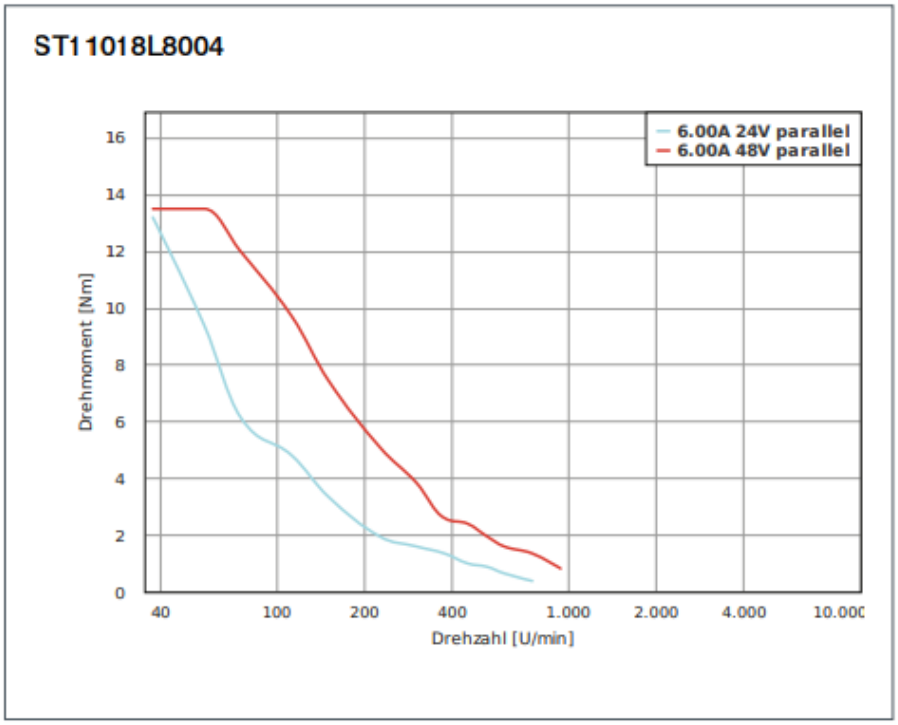

Abbildung 17: Nema 42 - ST11018L8004

Wie der Name schon verät handelt es sich hier um eine andere Baugröße, nämlich Nema 42. Diese wurde bewusst gewählt, um zu untersuchen ob die Drehmomentdichte bei unterschiedlichen Baugrößen trotzdem noch in derselben Größenordnung liegt, bzw. ob es signifikante Unterschiede gibt. Nehmen wir z.B. das Modell ST11018L8004, dieses hat bei 48 V und 6 A ein maximales Moment von 14 Nm. Der Motor umfasst ein Volumen von $2.432 \cdot 10^6\,\mathrm{mm}^3$ (laut Datenblatt), was zu einer maximalen Drehmomentdichte von $\frac{\partial M}{\partial V} = 5.76 \cdot 10^3\,\frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{m}^3}$. Dies ist ein erfreuliches Ergebnis, da es zeigt, dass die gewählten Motoren trotz unterschiedlicher Volumina und Momenten fast dieselbe Drehmomentdichte aufweisen. Sowohl Kollmorger als auch Nanotec geben an, dass diese Motortypen diejenigen mit den höchsten Drehmomenten sind, was vermuten lässt, dass diese errechneten Drehmomentdichten zu den höchsten der aktuell verfügbaren Schrittmotoren zählen

4 Drehmomentausbeute Vergleich

Vergleicht man nun die Drehmomentverläufe der Permanenterregten-Synchronmaschinen (Abb. 5 und 4) mit denen der Schrittmotoren (Abb. 16 und 17) fällt zunächst auf, dass die Schrittmotoren einen viel steileren Abfall des Moments bezogen auf die Drehzahl haben. Dies ist auch einleuchtend, da sich das Moment des Schrittmotors vorwiegend aus M_{rel} ergibt und der Verlauf laut Gleichung 26 mit einem $\frac{1}{n^2}$ Zusammenhang abfällt und das Moment der PSM zeigt laut Glg. 13 einen $\frac{1}{n}$ Zusammenhang. Nun zeigen sowohl die PSMs als auch die Schrittmotoren hohe Drehmomentdichten. Welche der beiden Motortypen hat nun die höhere Drehmomentdichte? Wie die Berechnungen zeigten kommt man bei den Schrittmotoren auf Drehmomentdichten auf bis zu $\approx 6 \cdot 10^3 \frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{m}^3}$. Bei den Permanenterregten Synchronmaschinen ergeben sich Drehmomentdichten von $\approx 4 \cdot 10^3 \frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{m}^3}$ bis zu $\approx 14 \cdot 10^3 \frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{m}^3}$. Diese große Differenz ergibt sich durch die verschiedenen Kühlungsarten die bei den Permanenterregten Synchromaschinen angewendet werden können. Um nun die beiden Motortypen fair vergleichen zu können muss hinzugefügt werden, dass die beiden Typen auf Basis des derzeit technisch möglichen und nicht unter gleichen Konditionen verglichen werden. Dementsprechend lässt sich die Aussage treffen, dass die PMSMs zu höheren Drehmomentdichten befähigt sind, aufgrund derer Kühlungsmöglichkeiten. Durch die derzeit etablierten Kühlungsmethoden der PMSMs ist es möglich bis zu 40 % höhere Ströme im Stator zu führen, was bedingt, dass auch das Moment gemäß 14 anwächst. Dies impliziert jedoch nicht, dass bei Schrittmotoren durch Kühlungsmaßnahmen das Moment nicht auch gesteigert werden kann, es ist schlicht nicht Stand der Technik, aus dem einfachen Grund, dass Schrittmotoren für eher drehmomentarme, aber positionierungs-relevante Anwendungen verwendet werden. Außerdem zeigt die PSM ein dynamisch viel hochwertigeres Verhalten, da auch bei höheren Drehzahlen das Moment annähernd konstant bleibt, bis die Nenndrehzahl und damit die Nennleistung erreicht wird.

5 Conclusion

Die Untersuchung der beiden Motortypen hat ergeben, dass Permanenterregte Synchronmaschinen Drehmomentdichten bis zu 14 $\cdot 10^3 \frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{m}^3}$ aufweisen können, was deutlich höher als die Drehmomentdichten von Schrittmotoren, welche bei $6 \cdot 10^3 \frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{m}^3}$ liegen, ist. Dies wird durch spezielle Kühlungsmaßnahmen erkauft, mit welchen es möglich ist deutlich höhere Ströme in den Statorwicklungen zu führen und damit größere Momente zu erwirken. Auch die dynamischen Eigenschaften der PSMS sind deutlich besser, da sie weitestgehend konstantes Moment über den Nutzdrehzahlbereich liefern können. Nichts desto trotz muss dem Schrittmotor zu gute gehalten werden, dass dieser ohne Regelung auskommt während die PSM ohne feldorientierte Regelung kaum ansteuerbar ist. Diese sensorlose Betriebsart des Schrittmotors ist Standard, es ist jedoch natürlich auch möglich diesen mit einer Rotorpositionserfassung auszustatten und ihn so mittels einer feldorientierten Regelung dynamisch hochwertig zu betreiben. Weiters kann der Schrittmotor bei niedrigen Drehzahlen relativ hohe Momente aufbringen, welche bei reiner Luftkühlung sogar die Drehmomentdichte der PSM überragen würde. Doch bereits bei geringeren Drehzahlen würden selbst bei luftgekühlten Maschinen die PSMs die Schrittmotoren schlagen.

Literatur

[1] Andreas Binder. *Elektrische Maschinen und Antriebe. Grundlagen, Betriebsverhalten*. 2. Auflage. Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3-662-53241-6.

[2] Maxime Perreault. „Analysis and Development of a Halbach Array Motor for Application into a Novel Delivery Drone Driving Cycle for Powertrain Optimization and Maximization of Delivery Radius“. University of Toronto, 2020.

[3] Rainer Hagl. *Elektrische Antriebstechnik. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage*. 3. Auflage. Hanser, 2021. ISBN: 978-3-446-46821-4.

[4] Manfred Schrödl. *Maschinen und Antriebe. Unterlagen zur Vorlesung VU370.015*. Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe.

Abbildungsverzeichnis

1 Vergleich von PSM-Magnetanordnungen 7
2 Aufbau eines Halbach-Arrays 8
3 Effekt eines Halbach-Arrays in einer PSM 9
4 Charakteristische Kennlinie der 71 N3/8 11
5 Charakteristische Kennlinie von PM6-132/140 11
6 Schrittmotor Patent aus 1920 12
7 Schrittmotor Stator-Aufbau 13
8 Schrittmotor Grundprinzip 14
9 Halbschritt 15
10 Mikroschritt 15
11 Drehmoment zu Winkelposition 17
12 SM - Momententwicklung 19
13 PM-Schrittmotor Aufbau 20
14 Hybrid Schrittmotor 20
15 Skizze eines Hybrid Schrittmotors 20
16 Kollmoregen Nema 23 - T2 (24V) 21
17 Nema 42 - ST11018L8004 22