Manfred Schrödl, Andreas Brunner, Richard Spießberger

# Abstract

In the contribution, a multi-rotor-machine, the so-called "Planetary Motor", is presented. It enables a compact combination of gear box, electric motor and power electronics. After deriving the principle of the planetary motor, a compact structure with integrated electronics is presented, which especially considers demands of electric cars. Furthermore, the control scheme and the possibility of mechanical field-weakening is presented based on a functional prototype. An outlook with respect to automotive applications is given.

# Kurzfassung

In der Arbeit wird eine Multi-Rotor-Maschine, der sogenannte Planetenmotor präsentiert, die eine kompakte Kombination von Getriebe, E-Maschine und Leistungselektronik ermöglicht. Nach der Herleitung des Prinzips wird eine kompakte Struktur mit integrierter Elektronik vorgestellt, die speziell auf Anforderungen von Elektrofahrzeugen Rücksicht nimmt. Weiters werden anhand eines Funktionsmusters das Regelkonzept und das Konzept der mechanischen Feldschwächung präsentiert. Ein Ausblick auf den Einsatz in Automotive-Anwendungen wird gegeben.

# 1 Einleitung und Problemstellung

Elektrische Maschinen werden häufig mit Getrieben ausgeführt, um die Drehzahl der elektrischen Maschine zu reduzieren und das Drehmoment zu erhöhen. Die klassische Lösung ist, die Abtriebswelle der elektrischen Maschine als Eingang in ein Stirnrad- oder Planetengetriebe zu verwenden. Motor und Getriebe stellen daher getrennte Funktionseinheiten dar.

Der vorliegende Aufsatz zeigt einen neuen Ansatz zum kombinierten Aufbau einer Motor/Getriebe/Elektronik-Einheit, wobei der Motor als ein verteiltes System mit mehreren Rotoren ausgeführt ist [1], [2].

# 2 Herleitung der neuen Maschinenstruktur

Die Grundidee der Planetenmotor-Struktur wird beispielhaft anhand einer einfachen zweipoligen Struktur mit 3 Zähnen pro Umfang gezeigt (für kompakt aufgebaute Planetenmotor-Strukturen wird auf Kapitel 3 verwiesen).

Ausgehend von zwei Einzelmotoren wird durch Kombination der beiden Motoren und geometrische Vereinfachung eine gemeinsame Motorstruktur mit einem gemeinsamen Stator und zwei Rotoren gebildet (Abb. 1).



Abbildung 1: Zwei Einzelmotoren und daraus abgeleiteter Planetenmotor mit zwei Rotoren [3]

Kombiniert man zwei solche Strukturen mit je zwei Rotoren, erhält man einen Planetenmotor mit vier Rotoren und insgesamt nur sechs Statorspulen (Abb. 2). Diese können zu einem klassischen Drehstromsystem zusammengeschaltet werden (siehe Kapitel 4).



Abbildung 2: Planetenmotor mit vier Rotoren [3]

Die Rotoren werden mit einem (typischerweise stark) untersetzenden Getriebe mechanisch gekoppelt, wobei auf die Erzeugung der gewünschten Drehrichtung zu achten ist [2].



Abbildung 3: Planetenmotor mit vier Rotoren und einer zentralen Zahnrad-Anordnung mit Innen- und axial versetzter Außenverzahnung [3]

#### Deutliche Erhöhung der installierbaren Leistung bei Hochdrehzahlrotoren

Betrachten wir einen Kompaktantrieb bestehend aus Hochdrehzahlmotor und Untersetzungsgetriebe, etwa einen Elektroauto-Antrieb (Abb. 4).





 Abbildung 4: a) Klassische Antriebseinheit für ein Elektrofahrzeug mit Elektromotor, Stirnradgetriebe und Differenzialgetriebe (Foto: VW)
b) Elektrische Antriebseinheit mit koaxialem Abgang der Halbachsen aus dem Differenzialgetriebe durch die hohle Motorwelle (Zeichnung: GKN)

Bei gegebenem Rotordurchmesser wird die Umfangsgeschwindigkeit aufgrund der Festigkeitseigenschaften des Rotormaterials limitiert. Typischerweise können Umfangsgeschwindigkeiten im Bereich von 100-200 m/s wirtschaftlich dargestellt werden [4]. Unterstellen wir die gleiche spezifische Schubkraft im Luftspalt sowohl des ursprünglichen klassischen Motors als auch des Planetenmotors (gleiche Flussdichte-Grundwelle und gleicher Strombelag), so können wir den Originalrotor (Durchmes-

ser D) durch vier in Summe flächengleiche Planetenrotoren (Durchmesser jeweils D/2) ersetzen. Jeder Planetenrotor liefert dann ein Viertel des ursprünglichen Drehmomentes (halbe Umfangskraft wegen halber Umfangsfläche im Luftspalt; halber Radius), also in Summe liefern die vier Planetenrotoren das gleiche Drehmoment wie der Originalrotor. Bei gleicher Leistung von Originalmotor und Planetenmotor bedeutet dies gleiche Drehzahl des ursprünglichen Rotors und der Planetenrotoren. Aufgrund des halben Durchmessers tritt also nur die halbe Umfangsgeschwindigkeit gegenüber dem ursprünglichen Rotor auf. Tritt also die Leistungsgrenze durch die Umfangsgeschwindigkeit auf, kann diese im Planetenmotor um den Faktor 2 erhöht werden, bis die gleiche Umfangsgeschwindigkeit auftritt.

#### Vereinfachte Planetengetriebestufe

Im Vergleich zu einem normalen Planetengetriebe weist die Planetenstufe des Planetenmotors einige Vorteile auf. Die vier Rotoren erzeugen praktisch das gleiche Drehmoment, wodurch automatisch eine gleichmäßige Krafteinleitung in die Zähne des Sonnenrades gewährleistet ist. Es ist also aus Sicht der Kraftaufteilung auf die Planeten keine besondere Präzision bei der Zahnfertigung nötig. Weiters erfolgt die Kraftumsetzung beim Planetenmotor nur in einem Kontaktpunkt pro Planeten-Zahnrad (im Gegensatz zu zwei Kontaktstellen beim klassischen Planetengetriebe), wodurch der Wirkungsgrad des Getriebes deutlich besser als beim normalen Getriebe ist.

Bei Außenläufer-Antrieben, wie z.B. Trommelmotoren, Radnabenmotoren, Rohrmotoren etc. kann das Sonnenrad des Planetenmotors direkt mit dem rotierenden Außenteil verbunden werden, wodurch sehr kompakte Lösungen möglich sind.

#### Elektrofahrzeug-Antriebe

Elektrofahrzeuge haben Antriebseinheiten bestehend aus klassischem Elektromotor und Getriebestufe. In Abb. 4a ist die Antriebseinheit eines VW E-Golf gezeigt. Die elektrische Maschine ist über ein zweistufiges Stirnradgetriebe und ein Differenzialgetriebe an die beiden Halbachsen gekoppelt. Alternativ kann der Antrieb koaxial aufgebaut werden (z.B. Lösung von GKN, Abb. 4b), wo die Motorwelle als Hohlwelle ausgeführt ist und die elektrische Maschine mit einem Planetensatz und einem folgenden Differenzialgetriebe verbunden ist. Das Differenzialgetriebe treibt die beiden Halbachsen an, wobei eine Halbachse durch die Hohlwelle des Motors geführt ist. Führt man diese Grundstruktur als Planetenmotor aus, erhält man eine sehr kompakte Einheit (Abb. 5). Das Sonnenrad des Planetenmotors ist mit einer Hohlwelle ausgeführt und direkt mit dem Planetengetriebe konstruktiv verbunden. Damit können diverse mechanische Komponenten eingespart werden. Auf den zusätzlichen Vorteil der reduzierten Umfangsgeschwindigkeit der Rotoren und der kompakten Motor/Elektronik-Einheit sei nochmals verwiesen.



Abbildung 5: Planetenmotor mit Differenzialgetriebe D (Gehäuse T, Kegelräder K1, K2), funktionell kombiniert mit dem Sonnenrad Z1. Planeten P1, P3 (ohne angeschlossene Rotoren des elektrischen Teils dargestellt). Halbachsen A1, A2, die mit den Antriebsrädern verbunden werden

# 3 Entwurf eines kompakten Planetenmotors für Automotive Anwendung

In den zuvor gezeigten prinzipiellen Planetenmotor-Strukturen wurde speziell auf das grundsätzliche Funktionsprinzip Wert gelegt. Wie in [5] gezeigt, weist der Planetenmotor Vorteile in der Anwendung für Elektrofahrzeuge auf. Im Folgenden wird ein Entwurf eines Planetenmotors gezeigt, der auf Eigenschaften Rücksicht nimmt, wie sie in Antrieben in Elektrofahrzeugen wichtig sind, speziell sind dies:

- Kompakter Aufbau
- Geringe Komplexität des Wicklungsaufbaus
- Hohe Überlastfähigkeit durch thermisch gut angebundene Kühlung an die Spulen
- Leichte Automatisierbarkeit der Fertigung
- Geringe Verluste
- Absenken der Klemmenspannung auf ein geringes Niveau aus jeder Situation heraus

Folgende Rahmendaten liegen der Auslegung zugrunde:

- Konstantmomentbereich M = 60 Nm bis 8.000 U/min
- Konstantleistungsbereich P = 50 kW zwischen 8.000 24.000 U/min
- Zwischenkreisspannung 400 V
- Maximaler Durchmesser der Anordnung: 200 mm

#### 3.1 Erreichen der geforderten Eigenschaften

#### 3.1.1 Kompakter Aufbau

Kompaktheit wird erreicht, indem die Eisenwege des Stators möglichst kurz gehalten werden. Dabei wird auf vollständige Symmetrie des Magnetkreises rund um den Luftspalt verzichtet und die Eisenwege soweit möglich verkürzt. Diese Strategie benötigt eine sorgfältige Auslegung des magnetischen Kreises, um die Drehmomentwelligkeit und den Oberschwingungsgehalt in der von den Rotoren induzierten Spannung im zulässigen Rahmen zu halten. Aus den vielen möglichen Pol/Zahn-Kombinationen wird die einfachste 3-strängige Topologie mit 3 Zähnen pro Rotorumfang gewählt. In Abb. 6 wird eine kompakte Statorstruktur gezeigt. Insgesamt besteht die Topologie aus 6 Zahnelementen, die dann mit Spulen ausgestattet werden.



Abbildung 6: Kompakte Statorstruktur mit sechs Statorelementen

Die Konstruktion zeigt neben der Kompaktheit zwei wichtige vorteilhafte Eigenschaften: Erstens erlauben alle Elemente das Aufschieben von vorgefertigten Spulen und damit eine einfache Spulenfertigung und Montage, und zweitens ist die Flussführung in den Elementen weitgehend parallel zur langen Kante, sodass analog zu Transformatoren ein anisotropes Blech (klassisches kaltgewalztes Trafoblech) eingesetzt werden kann, welches sehr gute Eigenschaften im Hinblick auf zulässige maximale Flussdichte und geringe spezifische Verluste aufweist (siehe Abb. 7).

#### 3.1.2 Auslegungskriterien für die Rotoren

Es sind verschiedene Polpaarzahlen denkbar. Eine zweipolige Anordnung hat den Vorteil einer geringen Ummagnetisierungsfrequenz pro mechanischer Umdrehung und damit geringere Eisenverluste zur Folge, andererseits ist die zweipolige Anordnung weniger günstig im Hinblick auf die magnetische Flussführung im Rotor im Vergleich zu einer vierpoligen Variante. Daher wird beim vorgestellten Konzept eine vierpolige Anordnung mit einfacher Geometrie gewählt (Abb. 8).



Abbildung 7: Magnetisierungskennlinien unterschiedlicher Materialien [11] a) Elektroblech, kornorientiert in Walzrichtung magnetisiert

- b) Elektroblech und Stahlguss
- c) Legiertes Blech
- d) Gusseisen



Abbildung 8: Struktur mit vierpoligen Rotoren

Mit Hilfe der Geometrieparameter entlang des Luftspalts (Öffnungswinkel, Verschiebungswinkel zwischen den Zähnen, Aufweitung des Luftspaltes bei den Zahnrändern etc.) kann Einfluss auf den Oberwellengehalt der Flussdichteverteilung im Luftspalt und letztlich auf die Flussverkettung in den Spulen in Abhängigkeit von der Rotorstellung genommen werden. Weiters besteht natürlich noch die Möglichkeit einer kontinuierlichen oder diskretisierten Schrägung (mehrere Rotorsegmente um einen gewissen Winkel verdreht zusammengesetzt), um eine gleichmäßige Drehmomententwicklung in Abhängigkeit von der Rotorstellung zu erzielen.

Um möglichst viel Leistung im Bauraum zu installieren, werden die Rotoren mit möglichst hoher Drehzahl betrieben. Erfahrungsgemäß ergeben sich zulässige Umfangsgeschwindigkeiten von ca. 100-200 m/s, je nach mechanischen Eigenschaften der Materialien [4].

Für die dargestellten Rotoren wurde eine mechanische Simulation durchgeführt, um die zulässigen Drehzahlen abzuschätzen. Die geplanten Drehzahlen von 24.000 U/min sind gemäß Festigkeitsberechnung zulässig (Abb. 9).



Abbildung 9: Festigkeitsberechnung der Rotoren bei 24.000 U/min (Schnittmodell, Verformung in mm)

#### 3.1.3 Geringe Komplexität des Wicklungsaufbaus

Aufgrund des rechteckigen Querschnitts der magnetisch leitenden Elemente im Bereich der Spulen können diese sehr einfach vorgefertigt und auf die magnetisch leitenden Teile aufgeschoben werden. Um einen hohen Kupferfüllfaktor zu erzielen, können die Spulen mit Rechteckleitern ausgeführt werden (Abb. 10).



Abbildung 10: Vorgefertigte Spule mit Rechteckleiter

Führt man alle Spulenenden auf einer Seite aus, so können die Spulen einfach mit einer Leistungselektronik gekoppelt werden, die in unmittelbarer Nähe angebracht ist. Der Stator mit aufgeschobenen Spulen ist in Abb. 11 gezeigt.



Abbildung 11: Stator mit aufgeschobenen Spulen in Wechselwirkung mit vierpoligen Rotoren

Da die Rotoren mit hoher Drehzahl betrieben werden, treten hohe Frequenzen in den Strömen auf. Damit wird die Stromverteilung über dem Leiterquerschnitt nicht mehr mit der Gleichstromverteilung übereinstimmen. Diese Effekte wurden untersucht und zeigten beim gewählten Spulenquerschnitt tolerierbare Erhöhung der Kupferverluste durch Stromverdrängungseffekte (Abb. 12). Der ohmsche Widerstand erhöht sich dadurch im Nennpunkt um 5 % und im höchsten Feldschwächpunkt um 24 %. Isolationstechnisch stellt die vorgestellte Spulengeometrie eine günstige Topologie dar, da keine Überkreuzungen von verschiedenen Strängen vorliegen und somit keine Phasentrenner und ähnliche Maßnahmen nötig sind. Die Spulen werden zu einem klassischen Drehstromsystem verschaltet und an üblichen dreisträngigen Umrichtern betrieben.



Abbildung 12: Erhöhung des Leiterwiderstands durch Stromverdrängung in Abhängigkeit der Drehzahl

# 4 Konkrete Auslegung eines automotive-kompatiblen Planetenmotors

#### 4.1 Elektrische Verschaltung des Planetenmotors

Ausgehend von der Viermotor-Topologie mit 12 Spulen seien die Teilmotoren beispielsweise in Stern geschaltet. (Abb. 13a). Die vereinfachte Spulenanordnung des Planetenmotors kann z.B. in Stern, Dreieck oder offener H-Brücke geschaltet werden. Weiters können die zwei Teilspulen der Stränge in Serie oder parallel geschaltet werden. In Abb. 13b ist ein Schaltungsbeispiel mit zwei parallelen Spulen pro Strang, sowie eine Sternschaltung der drei Stränge u,v,w gezeigt.



 Abbildung 13: a) Originale Vierfach-Sternschaltung bei vier magnetisch unabhängigen Teilmotoren
b) Planetenmotor mit Sternschaltung der Stränge, Strang-Teilspulen parallel oder alternativ in Serienschaltung

# 4.2 Hohe Überlastfähigkeit durch thermisch gut angebundene Kühlung an die Spulen

Aus Abb. 11 ist zu sehen, dass jede Spule einige plane Seiten aufweist, die mit einem Kühlelement gut thermisch angebunden werden können. Als Beispiel ist in Abb. 14 ein Kühlkonzept für eine sehr effektive Kühlung angegeben.

Die Kühlelemente haben direkten Kontakt zu den Spulenoberflächen und sind vorzugsweise mit Kühlflüssigkeit durchströmt. Die Kühlung kann mit zwei stirnseitigen Kühlplatten, die Teile des Kühlkreislaufs sind, vervollständigt werden. Die stirnseitigen Kühlplatten dienen gleichzeitig als Lagerplatten für die Rotoren. In Abb. 15 ist die seitliche Situation dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Geometrie sehr kurze Wickelköpfe aufweist und die Kühlplatten geometrisch einfach aufgebaut sind.



Abbildung 14: Kühlelemente mit enger thermischer Kopplung an Spulen und Blechpakete



Abbildung 15: Seitliche Ansicht mit Wickelköpfen und einseitig ausgeführten Spulenenden

Die Spulenenden werden durch die Kühl- und Lagerplatte (entsprechend isoliert) geführt und stellen eine mechanisch gut anzuschließende Verbindung für eine integrierte Leistungselektronik dar (Abb. 16). Dabei kühlt die Platte sowohl die Wickelköpfe als auch die Leistungselektronik.

Dieses Konzept mit der angebundenen Leistungselektronik wurde anhand eines Prototyps aufgebaut und getestet. Dabei zeigt sich, dass ein sehr kompakter Aufbau der Motor/Getriebeeinheit möglich ist (Abb. 17).

16 Der Planetenmotor mit integrierter Elektronik und mechanischer Feldschwächung als neuer Antrieb für Elektro-KFZ



Abbildung 16: Spulenenden ohne und mit ausgeführter Kühl- und Lagerplatte



Abbildung 17: Symbolische und ausgeführte Leistungselektronik (linker Bildrand: 1200 V / 400 A-IGBT, durch Kühlplatte gekühlt, Mitte: Spulenleiter-Durchführung) direkt am Planetenmotor gekoppelt

## 4.3 Ergebnisse der Auslegung

Gemäß den Anforderungen wurde der Planetenmotor auf folgende Drehmomentund Leistungskennlinie über der Drehzahl (links) ausgelegt. Rechts ist das ermittelte Drehmoment über dem Strangstrom aufgetragen. Unter Einhaltung des maximalen Durchmessers von 200 mm ergibt die Berechnung eine nötige Länge des Blechpakets von 100 mm. Aufgrund der Spulenanordnung kann gegenüber einem kreisförmigen Querschnitt noch Bauhöhe eingespart werden, sodass die Einbauhöhe ohne Gehäuse auf 170 mm beschränkt werden kann (siehe auch Abb. 17).

16 Der Planetenmotor mit integrierter Elektronik und mechanischer Feldschwächung als neuer Antrieb für Elektro-KFZ



Abbildung 18: Auslegung des Planetenmotors: Vorgegebene (und erreichte) Drehzahl/Drehmoment-Kennlinie sowie ermittelte Drehmoment/Strom-Kennlinie

In folgenden Bildern sind die Klemmenspannungsverläufe bei Nenndrehzahl und Maximaldrehzahl (Feldschwächbereich) dargestellt. Die Feldschwächung wird dabei durch eine entsprechende feldschwächende Stromkomponente erzielt.



Abbildung 19: Strangspannungsverläufe bei Nenndrehzahl und maximaler Drehzahl

Die Drehmomentbildung über dem Winkel ist in Abb. 20 bei Nenndrehzahl und maximaler Drehzahl angegeben. Es ist dies das Summendrehmoment der vier Rotoren, die in das gemeinsame Getriebe eintreiben. Bei einer Untersetzung von 1:20 (Nenndrehzahl am Abtrieb 400 U/min, Maximaldrehzahl 1.200 U/min) liefert der Planetenmotor dann 1.200 Nm Nenndrehmoment bei 400 U/min.



Abbildung 20: Drehmomentverläufe bei Nenndrehzahl und maximaler Drehzahl

#### 4.4 Mechanische Feldschwächung

Die Permanentmagneterregung der einzelnen Rotoren kann durch (Teil-) Flussverkettungszeiger repräsentiert werden, die geometrisch zu einem Gesamtflussverkettungszeiger addiert werden, welcher für die innere Spannungsbildung in den Strängen verantwortlich ist. Verdreht man die elektrischen Winkellagen der Rotoren zueinander, kann die geometrische Summe der Teilflussverkettungen beeinflusst werden. Im Fall einer elektrischen 180°-Verdrehung der beiden Drehrichtungsgruppen geht die resultierende Klemmenspannung gegen Null, somit kann durch mechanische Winkelverdrehung eine Feldschwächung bis zur Feldauslöschung, sprich verschwindenden Klemmenspannung erzielt werden. Damit kann im Fehlerfall des Umrichters die Spannung auf ein ungefährliches Niveau ohne aktive Kurzschlussschaltung erzielt werden. Die berechnete Klemmenspannung in Abhängigkeit vom mechanischen Feldschwächgrad ist in Abb. 21 angegeben.



Abbildung 21: Effektivwert der Klemmenspannung bei mechanischer Feldschwächung im Vergleich zum Nennwert (90° mechanischer Feldschwächwinkel entspricht 180° elektrisch bei den vierpoligen Rotoren)

#### Messung der mechanischen Feldschwächung an einem Prototyp

Zum Test der Eigenschaften des Planetenmotors einschließlich der Möglichkeit der mechanischen Feldschwächung wurden je ein zwei- und vierpoliger Prototyp aufgebaut [3], [6], der die Verdrehung der Winkellagen durch axiale Verschiebung des zentralen innen- und außenverzahnten Hohl- bzw. Sonnenrades auf der Abtriebswelle erzeugt (Abb. 22).



Abbildung 22: Verdrehung von schrägverzahnten Rädern bei axialer Verschiebung des Zentralrades

Dabei wird ausgenützt, dass die schrägverzahnten Räder bei axialer Verschiebung eine Winkeldrehung der Rotoren ausführen.



Abbildung 23: Planetenmotor mit axialem Verstellmechanismus [6]



Abbildung 24: Planetenmotor (rechts) am Prüfstand [6]

Die folgende Abbildung 25 zeigt die Abnahme der Strangspannung mit steigendem mechanischen Feldschwächgrad über der Drehzahl. Die Spannung kann fast völlig abgebaut werden.



Abbildung 25: Abnahme der Strangspannung mit steigendem mechanischen Feldschwächgrad, rechts: Vergleich zwischen Rechnung und Messung [6]



Abbildung 26: Klemmenspannungsverlauf bei unterschiedlichen mechanischen Feldschwächgraden [6]

## 5 Regelung des Planetenmotors

Wie in Abb. 13 gezeigt, bildet der Planetenmotor ein klassisches dreisträngiges System. Obwohl die Geometrie der elektrischen Aktivteile nicht zylindrisch ist, verhält sich die Maschine wie ein symmetrischer dreisträngiger Motor. Daher kann ein üblicher dreisträngiger Umrichter mit konventioneller Regelung (z.B. feldorientiert) verwendet werden. (Abb. 27).

16 Der Planetenmotor mit integrierter Elektronik und mechanischer Feldschwächung als neuer Antrieb für Elektro-KFZ



Abbildung 27: Sensorlose feldorientierte INFORM / EMK – Regelung des Planetenmotors [12]

Wie in Abb. 27 dargestellt, kann eine besonders wirtschaftliche Realisierung des Planetenmotors unter Verwendung von sensorlosen Regelverfahren dargestellt werden [6]. Sensorlose Verfahren (kein mechanischer Geber nötig) sind seit vielen Jahren Gegenstand von Forschung und bereits in diversen Anwendungen im Einsatz [8], [9], [10].

Als Beispiel ist in Abb. 28 ein Vergleich von sensorbasierten und sensorlos (mit INFORM-Verfahren) ermitteltem Drehwinkel bei 5% der Nenndrehzahl angegeben. Der Erwartungswert des Winkelfehlers liegt im Bereich von 5 elektrischen Grad. Es ist damit bis Drehzahl Null hohes Startmoment ohne mechanische Sensorik möglich. Bei höheren Drehzahlen kommen bekannte und bewährte EMK-basierte Modelle zum Einsatz.



Abbildung 28: Vergleich von mittels Geber und sensorlos (INFORM-) bestimmter Rotorposition bei kleiner Drehzahl sowie Histogramm der gemessenen Winkelfehler (Erwartungswert 5,5° el.) [6]

Die charakteristischen INFORM-Ortskurven für verschiedene Belastungen zwischen Leerlauf und Nennlast sind in Abb. 29 gezeigt.



Abbildung 29: INFORM-Ortskurven bei verschiedenen Belastungen und fester Drehzahl [6]

# 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von ausgeführten Funktionsmustern wurde in der Arbeit ein Planetenmotor für Automotive-Anwendungen entworfen. Dabei wurde speziell auf Kompaktheit, effiziente Kühlmöglichkeit und die Möglichkeit einer vollautomatischen Fertigung Wert gelegt. Es wurde auch die Integration der Leistungselektronik in ein gemeinsames Gehäuse aufgebaut und die einfache Ankopplung der Motorspulen an die Leistungselektronik gezeigt. Die Möglichkeit einer mechanischen Feldschwächung zur Reduktion der induzierten Spannung wurde experimentell bestätigt. Anhand der aufgebauten Prototypen wurden sowohl eine klassische feldorientierte Regelung als auch eine sogenannte sensorlose Regelung bis Stillstand implementiert und erfolgreich getestet. Im nächsten Schritt wird der Entwurf in einem Automotive-kompatiblen Prototyp umgesetzt.

# Literatur

- [1] Schrödl, M.: "Elektrisches Maschinensystem", Österreichisches Patent AT518943B1.
- [2] Schrödl, M.: "Der (elektrische) Planetenmotor Eine unkonventionelle Kombination von Elektromotor und Planetengetriebe.". Elektrotechnik und Informationstechnik, Heft 2 (2017), S 170-176. Springer.

- [3] Spießberger, R.: "Entwurf, Aufbau und Regelung eines zweipoligen Planetenmotors". Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2018.
- [4] Viggiano, F.: "Aktive Magnetische Lagerung und Rotorkonstruktion Elektrischer Hochgeschwindigkeits-Antriebe". Dissertation ETH Zürich, 1992. ADAG AG, Zürich.
- [5] Schrödl, M.: "The (Electrical) Planetary Motor An Unconventional Combination of Electric Motor and Planetary Gear Box". 29. Int. AVL Conference "Engine & Environment", 2017, Graz.
- [6] Brunner, A.: "Design and Construction of a Four-Pole Planetary Motor for Automotive Applications". Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2018.
- [7] Rajashekara, K. et al. (Hrsg): "Sensorless control of AC motor drives", New York:IEEE Press, PC3996, ISBN0-7803-1046-2, 1996.
- [8] Schrödl, M.: "Sensorless Control of AC machines". Habilitationsschrift, VDI-Fortschrittsberichte Nr. 117, Reihe (21) (1992).
- [9] Preusser, T.: "Neues sensorloses Regelverfahren für Synchronmaschinen". Antriebstechnik 41 (Deutschland) (2002), Nr. 7, S. 21-23. Vereinigte Fachverlage.
- [10] Consoli, Al, Scarcella G., Testa, A.: "Industry Applications of Zero Speed Sensorless Control Techniques for PM Synchronous Motors", IEEE Trans. On Industry Applications (2001), vol. 37, no. 2, S. 513-521.
- [11] Fischer, R., Linse H.: "Elektrotechnik für Maschinenbauer", Springer Verlag, ISBN 978-3-8348-8304-9, 2012
- [12] Brunner, A., Spießberger, R., Schrödl, M.: "Sensorless Control of a Planetary Motor," PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2019, pp. 1-6.