PM-BLDC-Motor mit toroidaler Wicklung

Joachim Näf, Aramis Ringgenberg[1]

1 Einleitung

In diesem Artikel beschreiben wir einen permanenterregten, bürstenlosen Gleichstrommotor (PM-BLDC-Motor) mit einer toroidalen Wicklung und drei Phasen. Die Verwendung von toroidalen Wicklungen in elektrischen Maschinen wurde schon einige Male vorgeschlagen, wie z.B. die Patente US4087711, US4373148, US4547713, US5175462, US5977684, US6700271, US20070228860A1 und US20140125155A1 zeigen. Unabhängig davon entdeckten wir diese Möglichkeit bei der Suche nach geeigneten Motorgeometrien. Aufgrund der einfachen Konstruktion und unseren Messergebnissen halten wir es für wünschenswert, die Verwendung von toroidalen Wicklungen im Motorbau voranzutreiben.

Es gibt einige Ähnlichkeiten, aber auch deutliche Unterschiede zwischen den in den o.g. Patenten beschriebenen Maschinen und dem hier vorgestellten RNT-Motor[2]. So weist z.B. der in US5977684 beschriebene Motor sowohl bezüglich der Konstruktion als auch des Funktionsprinzips einige Parallelen auf. Allerdings wird dort ein ferromagnetischer Wicklungskern verwendet, und zudem wird die für den RNT-Motor typische gestaffelte Wicklung der Phasen mit Ringspulen nicht benötigt. Diese gestaffelte Wicklung ist jedoch in US4373148 zu finden. Der dort beschriebene Motor ist ein bürstenloser, permanenterregter Innenläufermotor mit vier Ringspulen und zwei Phasen. Der RNT-Motor hingegen verfügt über drei Ringspulen, die je einer Phase zugeordnet sind.

Der RNT-Motor weist des weiteren folgende Merkmale auf:

- Der Motor ist elektrokummutiert (EC) und benötigt für den Betrieb eine geeignete Steuerung. Je nach Steuerung werden zur Positionsbestimmung des Rotors zudem Sensoren benötigt.
- Der Motor weist ein hohes Anlaufdrehmoment auf, und da der Wicklungskern aus einem nicht ferromagnetischen Material besteht, entfallen sowohl das Rastmoment wie auch Hystereseverluste. Damit vereint der Motor die positiven Eigenschaften von EC- und Asynchronmotoren.
- Bei geeigneter Skalierung stellt der Motor genügend hohe Drehmomente zur Verfügung, um mindestens leichte Fahrzeuge (E-Bike, E-Motorräder, Kleinwagen) ohne mechanische Getriebe anzutreiben. Eine Hochskalierung des Motorkonzepts für höhere Leistungen und damit den getriebelosen Antrieb von schwereren Fahrzeugen ist ebenfalls denkbar, wurde von uns jedoch bisher nicht implementiert.
  Allerdings sind bei einem Antrieb ohne mechanische Getriebe höhere Stromstärken notwendig, und der Wirkungsgrad fällt bei niedrigen Drehzahlen und gleichzeitig hoher Last eher niedrig aus. Gegebenenfalls kann der Antrieb auch über eine Achsenuntersetzung erfolgen.
- Je nach Proportionen und Volumen des Wicklungskerns ist eine Flüssigkeitskühlung im Inneren der Spulen möglich.
- Der Motor weist je nach Bauweise in verschiedenen Leistungsklassen und über einen weiten Betriebsbereich einen Wirkungsgrad von über 90% auf.
- Wie die meisten Elektromotoren kann auch der RNT-Motor als Generator verwendet werden. Hierzu haben wir mit unseren Prototypen jedoch noch keine systematischen Messungen vorgenommen.

[1] info@r-n-t.ch

[2] Die Abkürzung „RNT“ verweist auf „Ringgenberg-Näf-Toroid“.

- Der Motor hat einen einfachen Aufbau und kann in einer entsprechend ausgestatteten Werkstatt auch im Handwerk hergestellt werden.

In dieser Dokumentation erheben wir nicht den Anspruch, einen formal einwandfreien wissenschaftlichen Artikel vorzulegen. Es soll vielmehr der grundlegende Aufbau und das Funktionsprinzip erklärt werden. Die Abbildungen dienen zur Illustration und sollen zum Verständnis beitragen, erfüllen aber keine Norm für technische Zeichnungen.

2 Grundlegender Aufbau

In Abbildung 1 ist der grundlegende Aufbau des RNT-Motors schematisch dargestellt. Die Darstellung ist beispielhaft und zeigt nur eine von vielen möglichen Varianten.

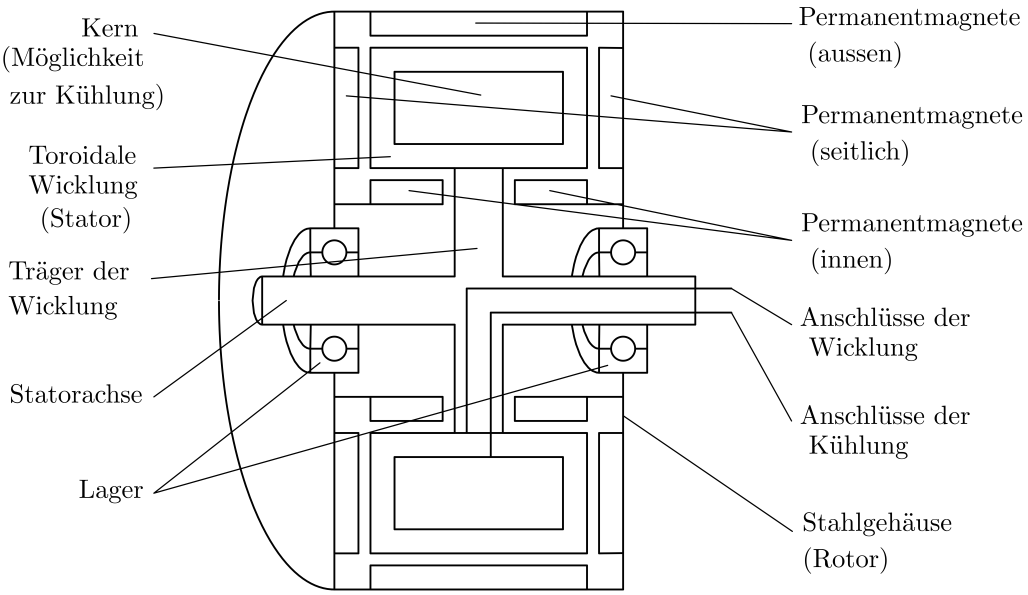


Abb. 1: Schematische Darstellung eines RNT-Motors (der Übersichtlichkeit halber wurde auf eine perspektivische Darstellung des Motorinneren verzichtet). Die Magnete können sowohl innerhalb und ausserhalb als auch seitlich des Stators montiert werden. Die Anschlüsse der Wicklung und der Kühlung werden entlang oder innerhalb des Trägers zur Statorachse und innerhalb dieser nach aussen geführt.

Die wichtigsten Variationen beim grundlegenden Aufbau umfassen:

- **Rotor:**
  Je nach dem, ob Magnete innerhalb, ausserhalb bzw. seitlich des Stators angebracht werden, kann der RNT-Motor prinzipiell als Innen-, Aussen- oder Scheibenläufer konstruiert werden. Insbesondere sind aber auch verschiedene Kombinationen dieser Motorkonzepte möglich. In der Abbildung ist die Kombination aller drei Möglichkeiten („Rundumläufer“) dargestellt. Die Wahl einer Kombination richtet sich unter anderem an den Proportionen des Stators aus.

  Zudem kann die Feldstärke, Skalierung und Form der Magnete den Anforderungen entsprechend angepasst werden. Auch bei der Anzahl der Polpaare gibt es Möglichkeiten zur Variation. Prinzipiell funktioniert der Motor auch ohne abwechselnde Polarisierung der Magnete, so dass nicht mehr die Anzahl Polpaare, sondern einfach die Anzahl Magnete massgebend wäre. Eine derartige „homopolare“ Variante wurde von uns ursprünglich ebenfalls getestet, jedoch nicht weiter verfolgt.

- **Stator:**
  Die Proportionen des Stators und damit des Wicklungskerns reichen von einem Kreisring bei Scheibenläufermodellen über den abgebildeten Toroid mit rechteckigem Profil bis zu einem dünnwandigen Hohlzylinder, bei dem die seitlichen Magnete entfallen.

  Wie in Abschnitt 3 dargelegt ergibt die Wahl der Anzahl der Windungen n und Umläufe m sowie der detaillierten Geometrie der Wicklung unzählige Möglichkeiten zur Variation des Stators. Dasselbe gilt auch für die Wahl der verwendeten Wicklungsdrähte.

- **Konstruktion:**
  Je nach Anforderung kann es sinnvoll sein, den Träger der Wicklung nicht axial zentriert, sondern seitlich anzubringen. Zudem müssen die Lager nicht axial symmetrisch montiert werden.

- **Skalierung:**
  Elektrische Maschinen sind skalierbar. Auch der RNT-Motor kann je nach Bedarf an Leistung in verschiedensten Grössen konstruiert werden.

3 Die toroidale Wicklung

Die Wicklung basiert auf dem Konzept einer Ringspule, bei der der Draht um einen ringförmigen, d.h. toroidförmigen Kern gewickelt ist[3]. Die Anzahl der Windungen bei einem Umlauf um den Ring bezeichnen wir mit n. In Abbildung 2 ist eine Ringspule mit $n = 15$ dargestellt.

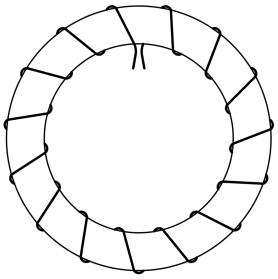
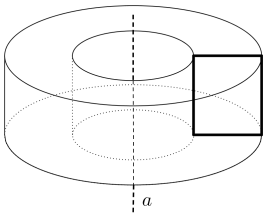


Abb. 2: Eine Ringspule mit $n = 15$ Windungen.

Zur Konstruktion des RNT-Motors wird der Kern der Wicklung aus einem nicht ferromagnetischen und elektrisch isolierenden Material hergestellt. Es besteht die Möglichkeit, die Kühlung der Wicklung mittels eines im Inneren des Kerns angebrachten Wärmetauschers zu realisieren.

Die Wicklung einer Phase besteht aus einer Ringspule mit n Windungen und m Umläufen. In Abbildung 3a) ist die Wicklung einer Phase mit $n = 15$ und $m = 5$ dargestellt, wobei der Kern mit äusserem bzw. innerem Durchmesser d_1 bzw. d_2 ein rechteckiges Profil mit Seitenlängen s_1 und s_2 aufweist. Prinzipiell sind natürlich auch Toroide mit anderen Profilen möglich. Der Draht wird zu einem dichten Paket gewickelt, so dass die Wicklung ein Drittel des Kerns annähernd oder vollständig bedeckt. Je nach Windungszahl n können auch mehrere Lagen gewickelt werden. Die Wicklungen der drei Phasen werden gestaffelt und bedecken den Kern gleichmässig.

[3] Die Bezeichnung *Toroid* stammt aus der Geometrie und bezeichnet allgemein die Oberfläche eines kreisringförmigen Objekts wie z.B. eines Schwimmrings oder einer Unterlagsscheibe. Ein Toroid ist ein Rotationskörper; z.B. entsteht ein Toroid mit rechteckigem Profil durch Rotation eines Rechtecks um eine Achse, die in der Ebene des Rechtecks verläuft, wobei sie das Rechteck jedoch nicht berührt oder schneidet. Ein Beispiel ist in der Abbildung rechts gezeigt, wobei hier die Achse a parallel zu einer der Rechteckseiten verläuft. Die Oberfläche eines Schwimmrings ist ein Toroid mit einem kreisförmigen Profil und wird als *Torus* bezeichnet.



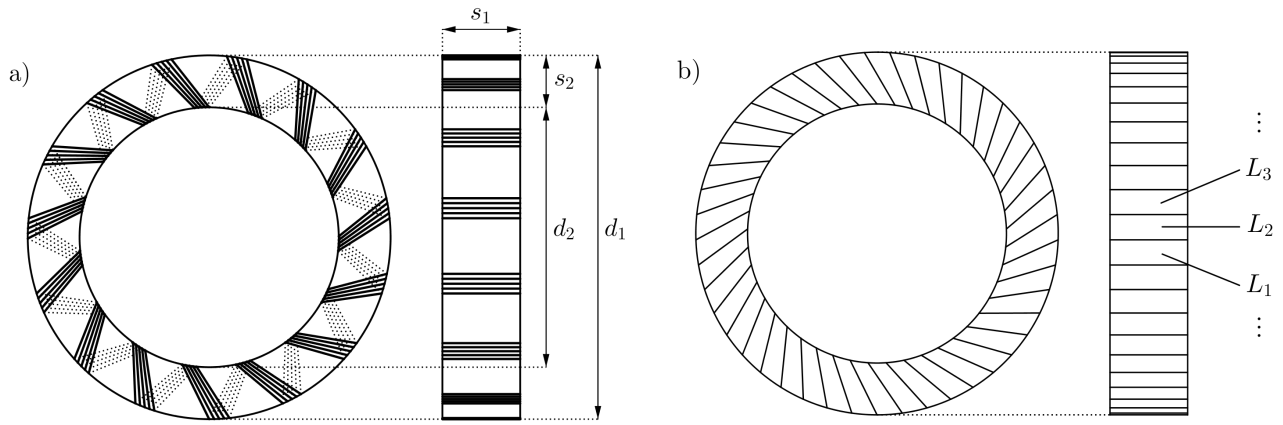


Abb. 3: a) Wicklung einer Phase mit $n = 15$ und $m = 5$. Die punktierten Linien in der axialen Ansicht (links) illustrieren den Draht auf der Rückseite.

b) Drei Phasen L_1, L_2 und L_3 gestaffelt.

Bei einer stromdurchflossenen, ideal gewickelten Ringspule, bei der der Draht den Kern vollständig und gleichmässig bedeckt, weist das Magnetfeld ausserhalb der Spule hauptsächlich axiale und radiale Komponenten auf, die vom Umlauf des Drahts um den Toroid herrühren. Die Magnetfeldkomponente in Umlaufrichtung beschränkt sich in diesem Fall auf das Innere der idealen Ringspule. Die Ringspule einer einzelnen Phase hingegen weist zwischen den Windungen Lücken auf. Zudem führen nie alle drei Phasen gleichzeitig den gleichen Strom. Damit weist die stromdurchflossene Spule auch ausserhalb eine optimal nutzbare Magnetfeldkomponente in Umlaufrichtung auf.

Bei dem in Abbildung 3 gezeigten Beispiel wird die Steigung der Windung beim Umlauf um den Toroid ausschliesslich an dessen Seiten angelegt, während der Draht innen und aussen parallel zur Toroidachse verläuft und damit nicht zur Steigung beiträgt. Alternativ kann die Steigung auch an andere Stellen verlagert werden. Bei einem reinen Scheibenläufermodell mit $s_1 \ll s_2$, bei dem die inneren und äusseren Magnete entfallen, kann die Steigung z.B. innen und/oder aussen angelegt werden. Falls über den steigungsbehafteten Drähten Magnete positioniert werden, so ist es vorteilhaft, die Steigung symmetrisch anzuordnen (z.B. wie in Abbildung 3a auf *beiden* Seiten des Toroids, oder aber innen *und* aussen). Damit kompensieren sich beim Betrieb die mittleren radialen oder axialen Kraftkomponenten auf die Magnete, welche nicht zur Rotation beitragen, gegenseitig. In Abschnitt 5 wird auf diesen Umstand noch etwas näher eingegangen.

4 Magnete

Die äusseren und inneren Magnete werden an dünnwandigen Hohlzylindern aus Stahl befestigt, die seitlichen Magnete auf kreisringförmigen Stahlscheiben. Um ein möglichst hohes Drehmoment zu erzielen, können in Übereinstimmung mit der Anzahl Windungen der Wicklung bis zu n Polpaare montiert werden.

Magnete über steigungsbehafteten Drähten werden im gleichen Steigungswinkel montiert, so dass die Längsachse eines über einer Phase zentrierten Magnets parallel zu den mittleren Drähten verläuft. In Abbildung 4 ist für die Wicklung aus Abbildung 3 die Positionierung der Magnete für 15 Polpaare illustriert. Links ist die Positionierung der Magnete auf den Hohlzylindern relativ zum Stator für eine Rotorposition dargestellt, bei der ein Pol über einer der Phasen liegt. Rechts ist die Positionierung und Polarisierung der seitlichen Magnete gezeigt. Die beiden seitlichen Scheiben sind identisch. Im axialen Vollschnitt in der Mitte ist die relative Positionierung der magnetbehafteten

Hohlzylinder und Scheiben sowie des Stators dargestellt, wobei zusätzlich der Träger der Wicklung sowie die Lager gestrichelt angedeutet sind. Im gezeigten Beispiel befindet sich der Träger in der Mitte zwischen den seitlichen Scheiben.

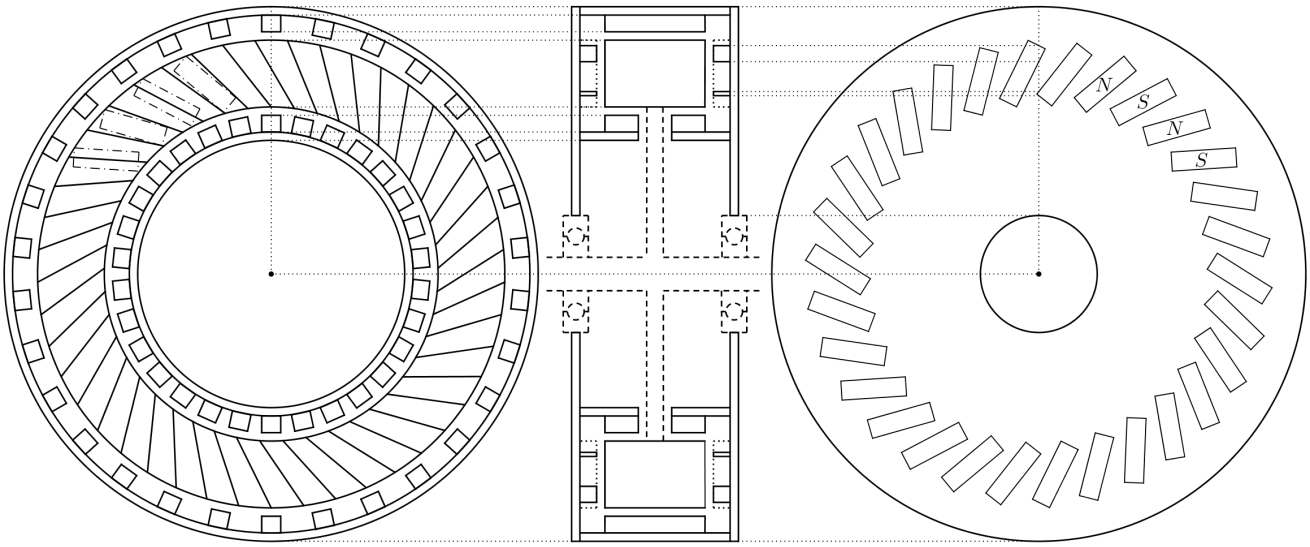


Abb. 4: *Links:* Die äusseren und inneren Magnete sind an dünnwandigen Hohlzylindern befestigt.
Rechts: Die seitlichen Magnete sind an kreisringförmigen Stahlscheiben befestigt.
Mitte: Im gezeigten Beispiel ist der Rotor aus einem äusseren und zwei inneren Hohlzylindern sowie zwei seitlichen Scheiben gefertigt. Der Wicklungsträger, die Lager und die Statorachse sind gestrichelt angedeutet.
Zur Verdeutlichung des Aufbaus: die seitlichen Scheiben werden in Bezug auf die Ansicht links auf der Vorder- und der Rückseite angebracht. Auf der Rückseite wird die Scheibe so wie rechts abgebildet montiert. Für die Vorderseite wird sie um 180° gedreht, so dass die mit Polen beschrifteten Magnete über den strichpunktierten Positionen zu liegen kommen.

Die Polarisierung der Magnete wird so gewählt, dass über einer Phase stets der gleiche Pol zum Draht zeigt. In Abbildung 5a ist die Polarisierung der inneren und äusseren Magnete für eine Position des Rotors gezeigt, bei der der Nordpol über einer der drei Phasen zentriert ist. Abbildung 5b zeigt die entsprechende Positionierung der seitlichen Magnete. Die punktierten Linien zeigen die Situation auf der Rückseite. Entsprechend der Situation in Abbildung 5a zeigt bei den Fett dargestellten Magneten der Nordpol zum Draht hin.

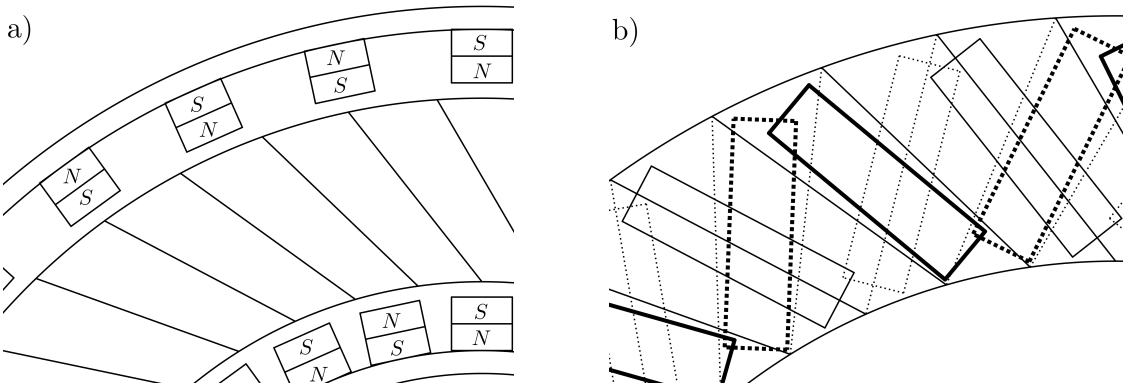


Abb. 5: Detailansicht:

a) Polarisierung der inneren und äusseren Magnete.

b) Positionierung der seitlichen Magnete (punktiert: Rückseite).

5 Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip des Motors kann mit dem Konzept der Lorentzkraft sehr einfach erklärt werden. Abbildung 6 zeigt einen Quadermagneten der Länge l sowie ein Leiterstück, welches über dem Nordpol und parallel zur Längsachse des Magneten verläuft. Die magnetische Flussdichte $\vec{B}$ des Magneten zeigt vom Nordpol weg nach oben. Dabei gehen wir der Einfachheit halber davon aus, dass der Abstand zwischen Leiterstück und Magnet genügend klein ist, womit sich das Leiterstück in einem näherungsweise homogenen $\vec{B}$-Feld befindet. Fliesst im Leiterstück gemäss Abbildung der Strom $\vec{I}$, so unterliegt es der nach rechts gerichteten Lorentzkraft

$$\vec{F}_{\mathrm{L}} = l \cdot \vec{I} \times \vec{B}\,,$$

wobei $\vec{a} \times \vec{b}$ das Vektorprodukt zweier Vektoren $\vec{a}$ und $\vec{b}$ bezeichnet.

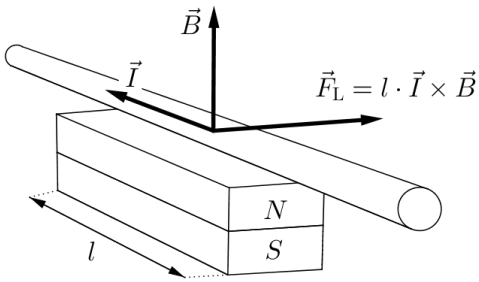


Abb. 6: Ein stromführendes Leiterstück im Magnetfeld eines Quadermagneten der Länge l. Aus dem Stromstärkenvektor $\vec{I}$ und der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ ergibt sich die Lorentzkraft $\vec{F}_{\mathrm{L}} = l \cdot \vec{I} \times \vec{B}$.

Gemäss dem Wechselwirkungsprinzip (3. Newtonsches Gesetz) erfährt der Magnet eine Kraft in entgegengesetzter Richtung nach links. Im Motor ist der Leiter Teil des Stators und damit fixiert, während der Magnet als Teil des Rotors beweglich ist und eine Beschleunigung erfährt.

Für das in den Abbildungen 3-5 dargestellte Beispiel ist bei den inneren und äusseren Magneten $\vec{F}_{\mathrm{L}}$ tangential ausgerichtet, so dass die volle Kraft für eine Beschleunigung in Rotationsrichtung zur Verfügung steht. Für die seitlichen Magnete hingegen weist $\vec{F}_{\mathrm{L}}$ aufgrund des Neigungswinkels eine radiale Komponente auf. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt.

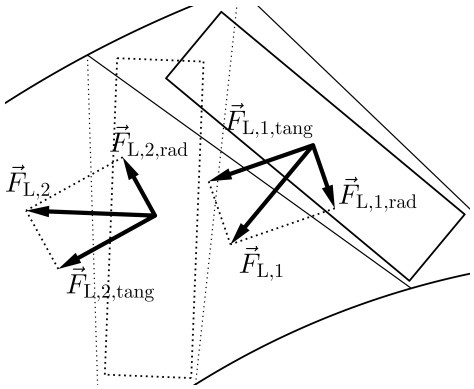


Abb. 7: Für das in den Abbildungen 3-5 dargestellte Beispiel weist die Lorentzkraft auf die seitlichen Magnete neben einer tangentialen Komponente $\vec{F}_{\mathrm{L},i,\mathrm{tang}}$ auch eine radiale Komponente $\vec{F}_{\mathrm{L},i,\mathrm{rad}}$ auf, die nicht zur Winkelbeschleunigung des Rotors beiträgt.

Auch wenn sich mittleren radialen Kraftkomponenten gegenseitig kompensieren, führen sie zu unerwünschten Scherungen im Rotor. Das gleiche gilt für axiale Kraftkomponenten, welche bei

einer Verlagerung der Wicklungssteigung von den Seiten an andere Stellen auftreten können. Diese Scherungen können vermieden werden, indem auf eine Positionierung von Magneten über steigungsbehafteten Drähten verzichtet wird. Andererseits ist es wünschenswert, den zur Verfügung stehenden Wicklungsdraht soweit wie möglich für die Erzeugung des Drehmoments zu nutzen. Werden keine Magnete über den steigungsbehafteten Drahtabschnitten positioniert, so sollte deren Länge minimiert werden. Andernfalls sollte der Steigungswinkel der Wicklung möglichst klein gewählt werden.

6 Messresultate von Prototypen

In diesem letzten Abschnitt sind einige Messreihen zu drei verschiedenen Prototypen zusammengestellt. Die Messungen wurden an einem konventionellen Motorprüfstand mit einem Präzisionsdrehmomentsensor durchgeführt. Als Stromquelle wurden stets LiPo-Akkumulatoren verwendet. Für jede Messreihe wird die Anzahl der in Serie geschalteten LiPo-Zellen angegeben, welche je eine Nennspannung von 3,3 V bzw. im voll geladenen Zustand eine Spannung von 4,2 V aufweisen.

Bei jeder Messreihe wurden bei steigender Last die Spannung U, die Stromstärke I, das Drehmoment M sowie die Drehzahl z gemessen. In den Messtabellen sind zudem die daraus berechneten Momentanwerte für die Eingangsleistung

$$P_{\text{ein}} = I \cdot U \,,$$

die Ausgangsleistung

$$P_{\text{aus}} = \frac{\pi}{30} \cdot M \cdot z$$

sowie den Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{\text{aus}}}{P_{\text{ein}}}$$

angegeben. Wir haben auf Berechnungen zur Fehlerfortpflanzung der Messungenauigkeiten verzichtet.

Zur Illustration der Messreihen haben wir Graphiken erstellt, in der die Messwerte für U, M und z in Abhängigkeit von I aufgetragen sind. Für jede der drei Grössen U, M bzw. z wurden zudem die Graphen der quadratischen (polynomialen) Regressionen $\hat{U}(\hat{I})$, $\hat{M}(\hat{I})$ bzw. $\hat{z}(\hat{I})$ eingezeichnet. Die Kurve zum Wirkungsgrad wurde aus den Regressionen berechnet, d.h.

$$\eta(\hat{I}) = \frac{\pi \cdot \hat{M}(\hat{I}) \cdot \hat{z}(\hat{I})}{30 \cdot \hat{U}(\hat{I}) \cdot \hat{I}} \,.$$

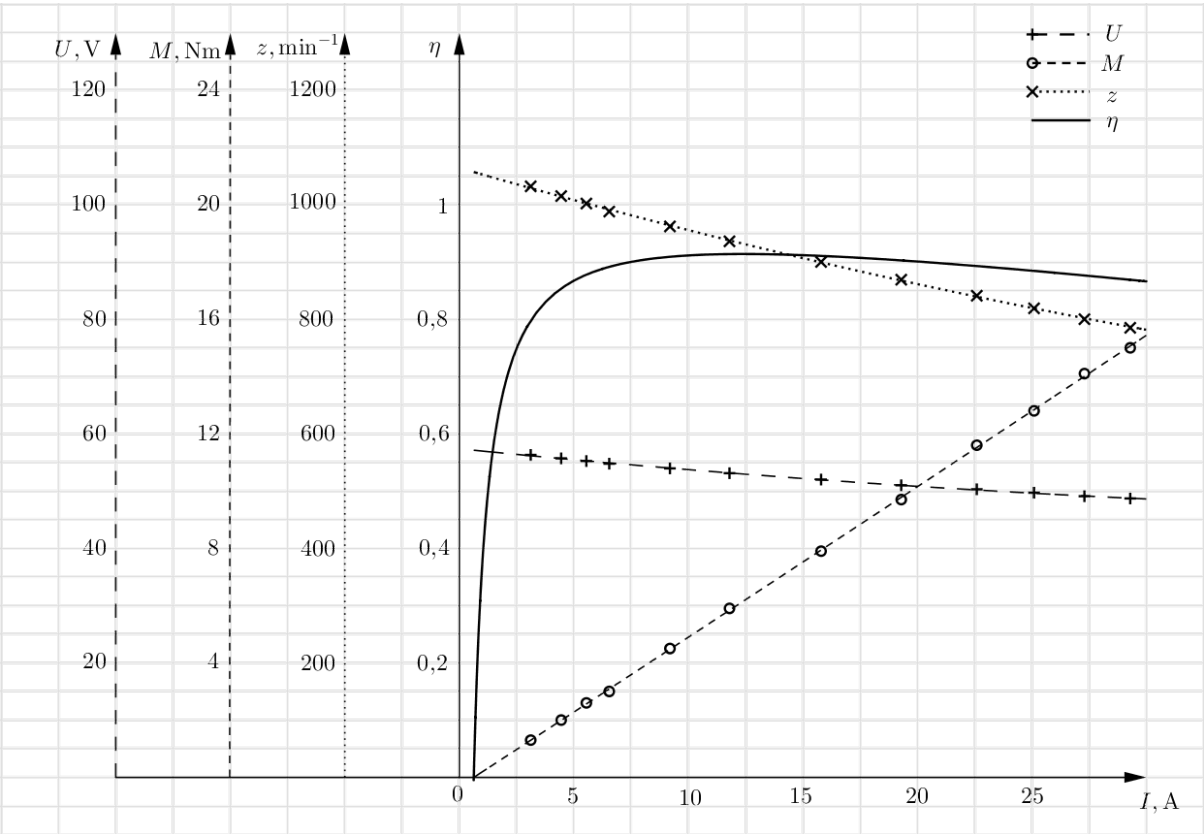
Mit Optimierungen können die typischen Drehzahlen und Drehmomente näher an die für eine gegebene Anwendung gewünschten Werte gebracht werden. Dabei können einerseits die Parameter wie in Abschnitt 2 dargelegt angepasst werden. Andererseits können Leistungsverluste durch eine präzisierte Bauweise und eine optimierte Lagerung verringert werden. Es ist durchaus denkbar, dass bei einer geeigneten Optimierung maximale Wirkungsgrade erzielt werden können, die über den hier präsentierten Werten liegen.

Prototyp 1:

Dieser Prototyp wurde ursprünglich als Nabenmotor für ein Elektrovelo konzipiert. Für diese Anwendung ist die Drehzahl allerdings zu hoch, während das Drehmoment eher zu niedrig ist.

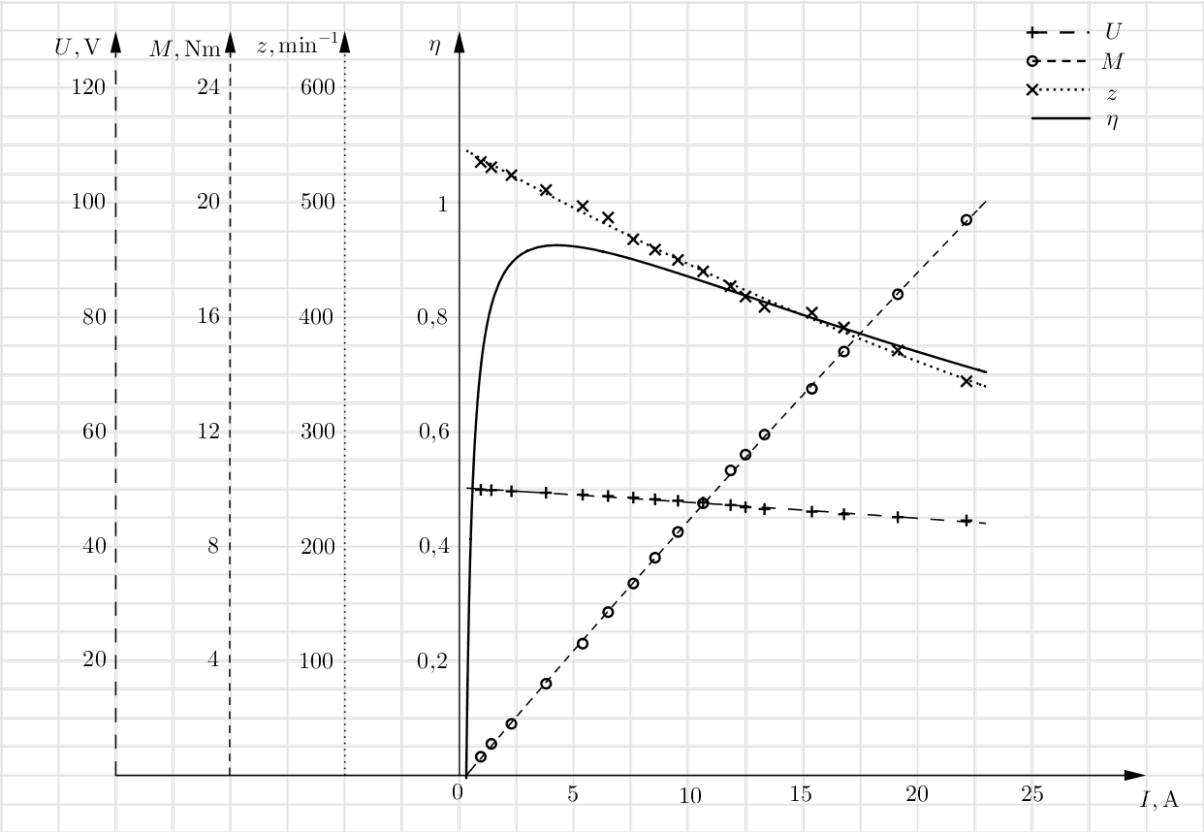
Dreieckschaltung mit 14 LiPo-Zellen in Serie $\left(k_\mathrm{V} \approx 18{,}5\,\frac{1}{\mathrm{min\,V}}\right)$:

U, V	I, A	P_{ein}, W	M, Nm	z, 1/min	P_{aus}, W	η
56.3	3.1	176	1.3	1032	140	0.80
55.7	4.5	248	2.0	1015	213	0.86
55.2	5.6	307	2.6	1002	273	0.89
54.8	6.6	359	3.0	988	310	0.87
54.0	9.2	496	4.5	962	453	0.91
53.1	11.8	627	5.9	936	578	0.92
52.0	15.8	822	7.9	900	745	0.91
51.0	19.3	984	9.7	869	883	0.90
50.3	22.6	1137	11.6	841	1022	0.90
49.7	25.1	1247	12.8	819	1098	0.88
49.1	27.3	1340	14.1	800	1181	0.88
48.7	29.3	1427	15.0	785	1233	0.86



Sternschaltung mit 12 LiPo-Zellen in Serie $\left(k_\mathrm{V} \approx 10{,}9\,\frac{1}{\mathrm{min\,V}}\right)$:

U, V	I, A	P_{ein}, W	M, Nm	z, 1/min	P_{aus}, W	η
49.9	0.9	47	0.7	536	36	0.78
49.8	1.4	70	1.1	531	61	0.88
49.6	2.3	113	1.8	524	99	0.87
49.4	3.8	187	3.2	511	171	0.92
49.0	5.4	264	4.6	497	239	0.91
48.8	6.5	317	5.7	487	291	0.92
48.5	7.6	369	6.7	468	328	0.89
48.2	8.6	412	7.6	459	365	0.89
48.0	9.6	458	8.5	450	401	0.87
47.7	10.7	507	9.5	440	438	0.86
47.2	11.9	559	10.7	427	476	0.85
46.8	12.5	585	11.2	418	490	0.84
46.5	13.3	620	11.9	409	510	0.82
46.1	15.4	709	13.5	404	571	0.81
45.6	16.8	766	14.8	391	606	0.79
45.1	19.2	863	16.8	371	653	0.76
44.5	22.2	986	19.4	344	699	0.71

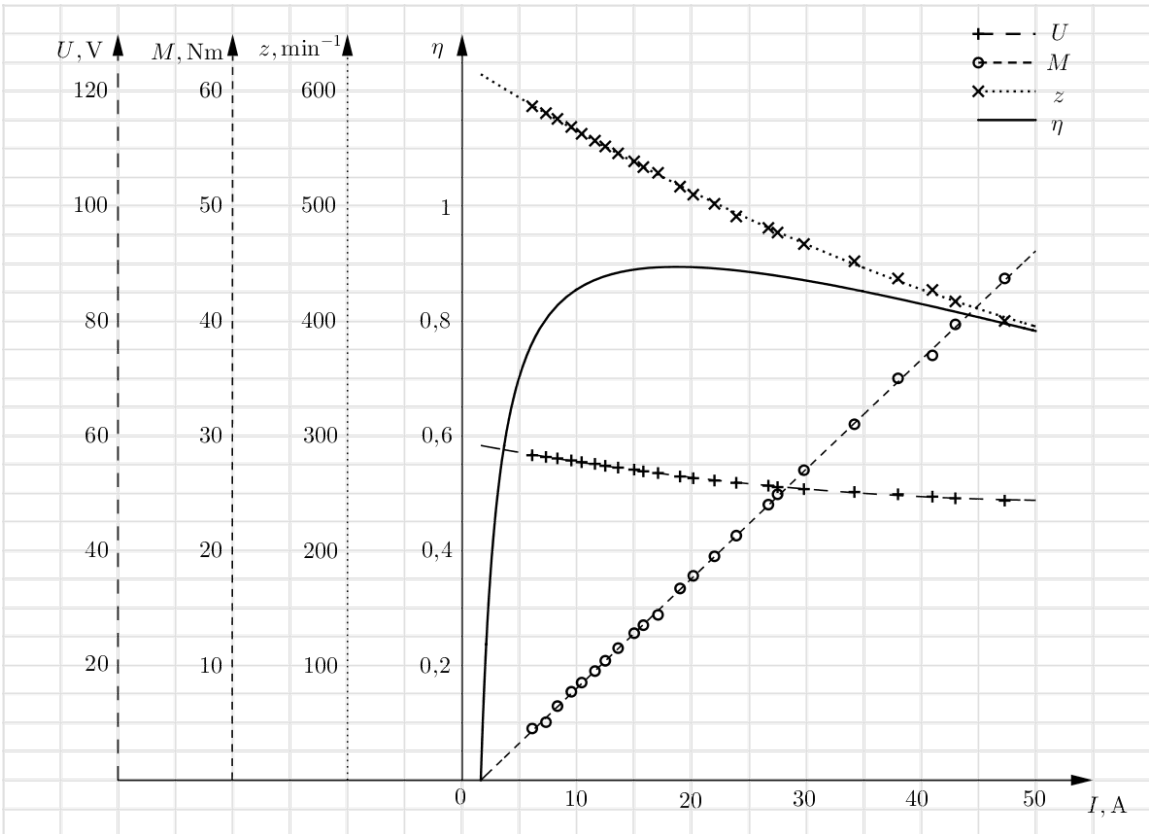


Prototyp 2:

Ein Felgenmotor für ein Elektrovelo. Sowohl die Drehzahl als auch das Drehmoment sind nahe an den für diese Anwendung gewünschten Werten.

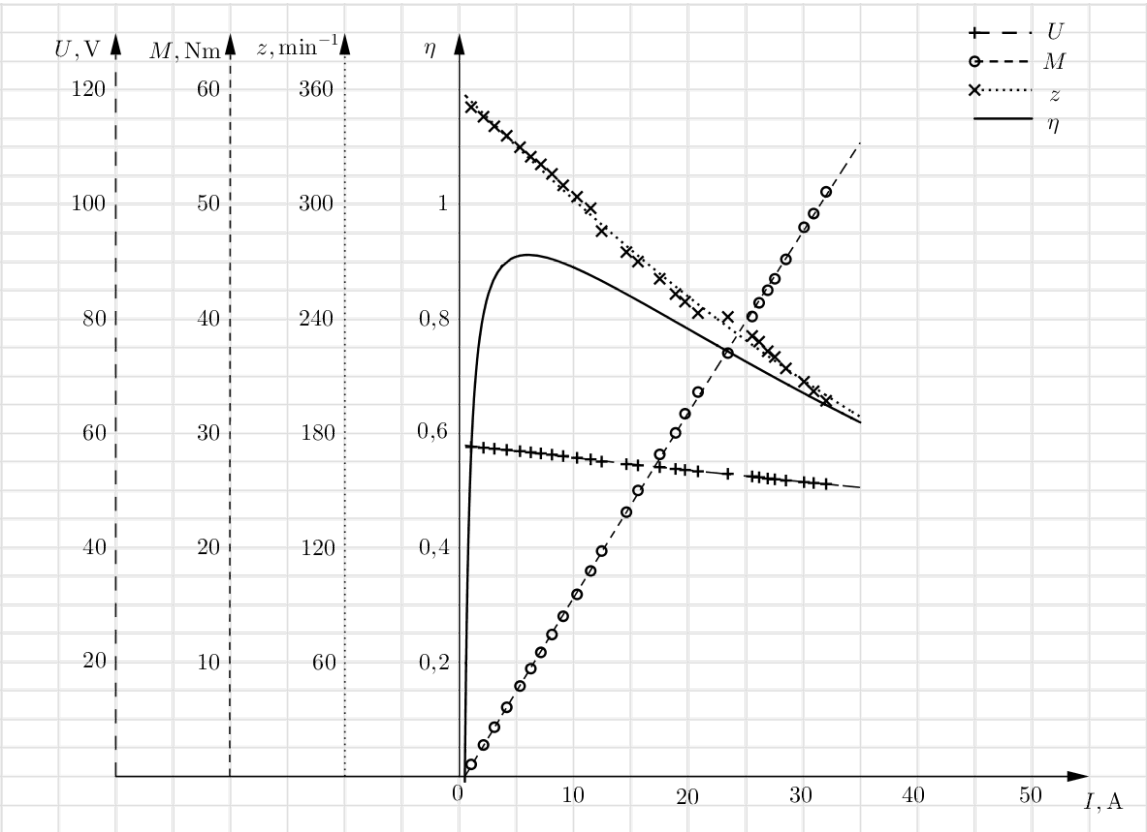
Dreieckschaltung mit 14 LiPo-Zellen in Serie $\left(k_\mathrm{V} \approx 10{,}5\,\frac{1}{\mathrm{min\,V}}\right)$:

U, V	I, A	P_{ein}, W	M, Nm	z, 1/min	P_{aus}, W	η
56.6	6.1	346	4.5	587	277	0.80
56.3	7.3	412	5.1	581	307	0.75
56.1	8.3	466	6.5	576	389	0.84
55.7	9.5	530	7.7	569	459	0.87
55.4	10.4	577	8.5	563	501	0.87
55.1	11.6	638	9.5	557	554	0.87
54.8	12.5	683	10.4	552	601	0.88
54.5	13.6	741	11.5	546	658	0.89
54.1	15.0	812	12.8	539	722	0.89
53.8	15.8	850	13.5	534	755	0.89
53.5	17.1	914	14.4	529	798	0.87
52.9	19.0	1005	16.7	517	904	0.90
52.6	20.2	1060	17.8	510	951	0.90
52.2	22.0	1148	19.5	502	1025	0.89
51.8	23.9	1238	21.3	491	1095	0.88
51.3	26.7	1370	24.0	481	1209	0.88
51.1	27.5	1404	24.9	477	1244	0.89
50.7	29.8	1511	27.0	467	1320	0.87
50.2	34.2	1717	31.0	452	1467	0.85
49.8	38.0	1892	35.0	437	1602	0.85
49.4	41.0	2025	37.0	427	1654	0.82
49.1	43.0	2111	39.7	417	1734	0.82
48.7	47.3	2304	43.7	400	1831	0.79



Sternschaltung mit 14 LiPo-Zellen in Serie $\left(k_\mathrm{V} \approx 6{,}2\,\frac{1}{\mathrm{min\,V}}\right)$:

U, V	I, A	P_{ein}, W	M, Nm	z, 1/min	P_{aus}, W	η
57.6	1.0	59	1.1	351	39	0.65
57.5	2.1	121	2.8	346	100	0.82
57.3	3.1	175	4.3	341	154	0.88
57.1	4.1	236	6.0	336	213	0.90
56.9	5.3	301	7.9	330	273	0.91
56.7	6.2	354	9.4	325	321	0.91
56.5	7.1	402	10.8	321	364	0.91
56.3	8.1	455	12.4	316	410	0.90
56.0	9.1	508	14.0	310	454	0.89
55.7	10.3	573	15.9	304	506	0.88
55.4	11.5	636	18.0	298	560	0.88
55.0	12.4	684	19.7	286	590	0.86
54.6	14.6	796	23.1	275	665	0.84
54.4	15.6	848	25.0	270	707	0.83
54.1	17.5	946	28.2	261	769	0.81
53.8	18.9	1015	30.0	253	796	0.78
53.6	19.7	1056	31.7	249	827	0.78
53.3	20.8	1111	33.6	243	855	0.77
52.9	23.5	1241	37.0	241	934	0.75
52.5	25.6	1341	40.2	231	972	0.73
52.3	26.2	1369	41.4	228	988	0.72
52.1	26.9	1403	42.5	223	992	0.71
51.9	27.6	1431	43.5	220	1002	0.70
51.7	28.5	1475	45.2	214	1013	0.69
51.5	30.1	1549	48.0	207	1040	0.67
51.3	30.9	1587	49.2	202	1041	0.66
51.1	32.0	1637	51.1	197	1054	0.64

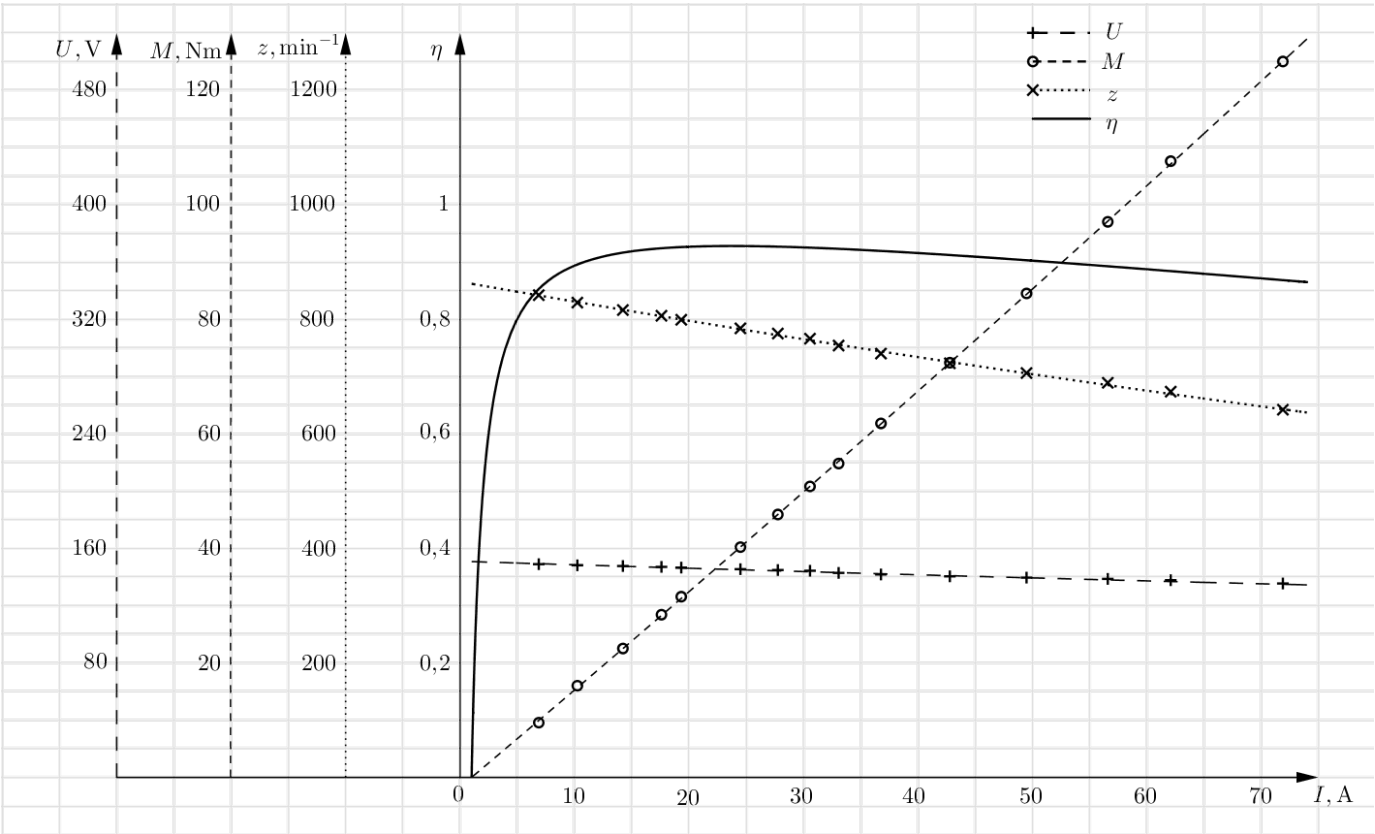


Prototyp 3:

Dieser Prototyp wurde konzipiert als Felgenmotor für leichte Fahrzeuge. Für eine Anwendung bei vierrädrigen Fahrzeugen würden zwei oder vier Räder mit je einem Motor ausgestattet. Je nach dem könnte der Antrieb auch über eine Achsenuntersetzung erfolgen.

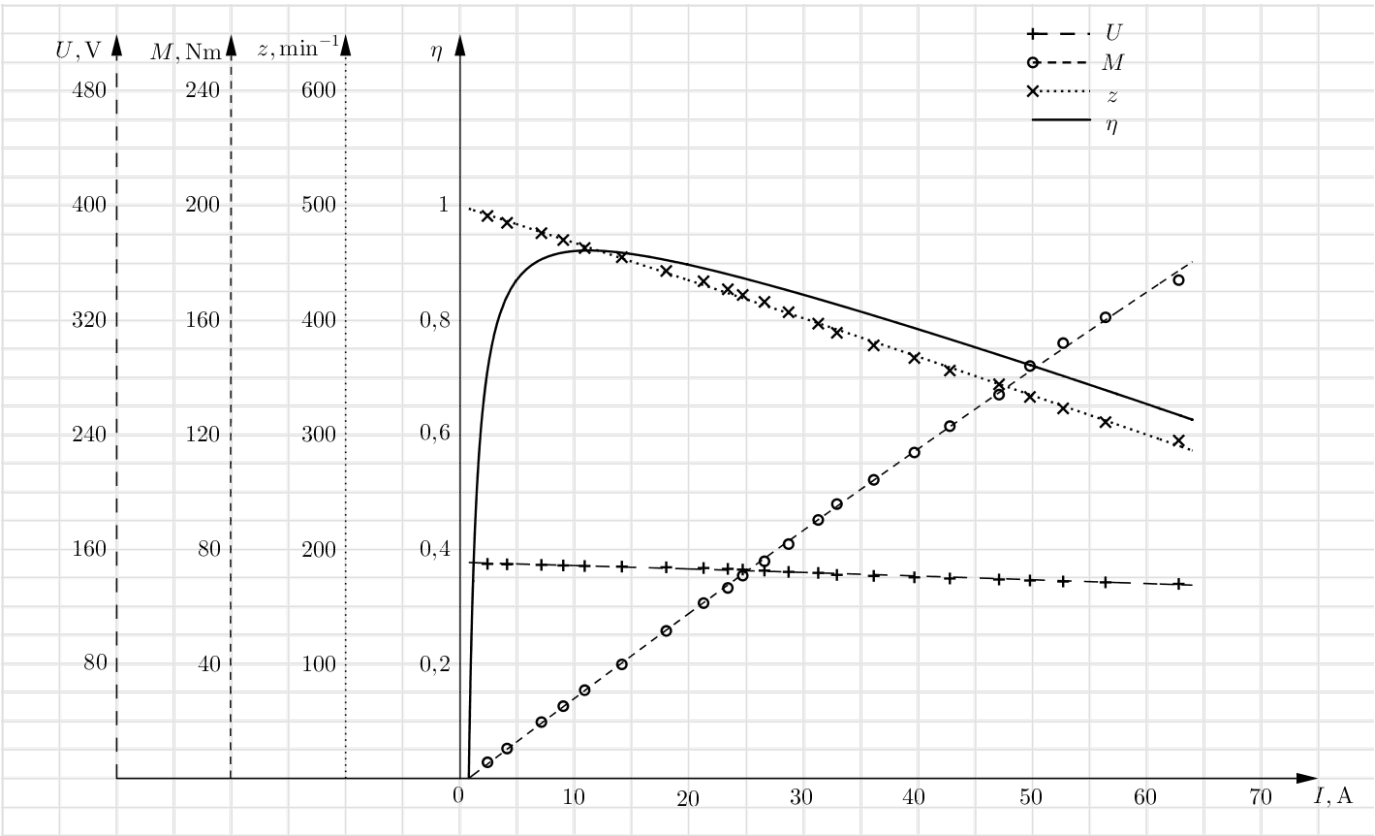
Dreieckschaltung mit 36 LiPo-Zellen in Serie $\left(k_\mathrm{V} \approx 5{,}7\,\frac{1}{\mathrm{min\,V}}\right)$:

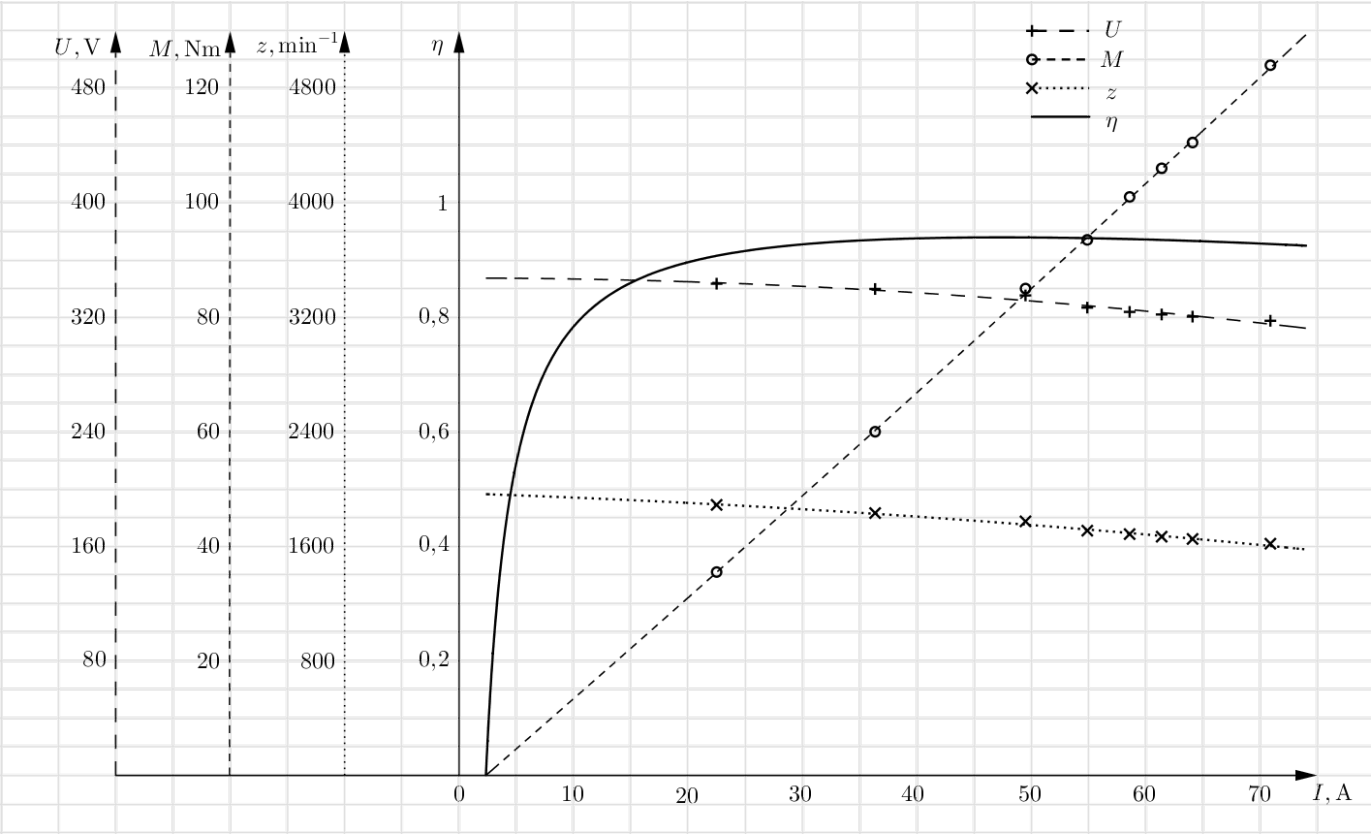
U, V	I, A	P_{ein}, kW	M, Nm	z, 1/min	P_{aus}, kW	η
149	6.9	1.02	9.6	842	0.84	0.82
148	10.3	1.52	16.0	829	1.39	0.92
148	14.2	2.10	22.5	816	1.92	0.92
147	17.6	2.59	28.4	806	2.40	0.93
147	19.3	2.83	31.6	799	2.64	0.93
145	24.5	3.56	40.2	784	3.30	0.93
145	27.8	4.02	45.9	775	3.73	0.93
144	30.6	4.41	50.8	766	4.07	0.92
143	33.1	4.72	54.8	754	4.33	0.92
142	36.8	5.21	61.8	740	4.79	0.92
140	42.8	6.01	72.4	723	5.48	0.91
140	49.5	6.91	84.5	706	6.25	0.90
139	56.6	7.84	97.0	689	7.00	0.89
138	62.1	8.55	108	674	7.59	0.89
135	71.9	9.74	125	642	8.40	0.86



Sternschaltung mit 36 LiPo-Zellen in Serie $\left(k_\mathrm{V} \approx 3{,}3\,\frac{1}{\mathrm{min\,V}}\right)$:

U, V	I, A	P_{ein}, kW	M, Nm	z, 1/min	P_{aus}, kW	η
150	2.4	0.36	5.6	491	0.29	0.80
150	4.1	0.61	10.4	485	0.53	0.86
149	7.1	1.06	19.7	476	0.98	0.92
149	9.0	1.34	25.2	470	1.24	0.92
148	10.9	1.61	30.8	463	1.49	0.92
148	14.1	2.09	39.8	455	1.90	0.91
147	18.0	2.66	51.5	443	2.39	0.90
147	21.3	3.13	61.2	434	2.78	0.89
146	23.4	3.42	66.5	427	2.97	0.87
146	24.7	3.60	70.8	422	3.13	0.87
145	26.6	3.86	75.8	416	3.30	0.86
144	28.7	4.14	81.8	407	3.49	0.84
144	31.3	4.49	90.3	397	3.75	0.84
142	32.9	4.68	95.8	389	3.90	0.83
141	36.2	5.11	104	378	4.13	0.81
140	39.7	5.57	114	367	4.37	0.78
140	42.8	5.97	123	356	4.59	0.77
139	47.1	6.54	134	344	4.83	0.74
138	49.8	6.88	144	333	5.02	0.73
138	52.7	7.25	152	323	5.14	0.71
137	56.4	7.72	161	311	5.24	0.68
136	62.8	8.53	174	295	5.38	0.63



Dreieckschaltung mit 84 LiPo-Zellen in Serie $\left(k_\mathrm{V} \approx 5{,}7\,\frac{1}{\mathrm{min\,V}}\right)$:

U, V	I, A	P_{ein}, kW	M, Nm	z, 1/min	P_{aus}, kW	η
343	22.5	7.7	35.5	1889	7.0	0.91
340	36.4	12.4	60.0	1832	11.5	0.93
335	49.5	16.6	85.0	1774	15.8	0.95
327	54.9	17.9	93.5	1709	16.7	0.93
324	58.6	19.0	101	1685	17.8	0.94
322	61.4	19.8	106	1667	18.5	0.94
320	64.1	20.5	111	1651	19.1	0.93
318	70.9	22.5	124	1618	21.0	0.93