

Thomas Schiefermair, BSc.

# Untersuchung zukünftiger Fertigungstechnologien für elektrische Antriebe

**Masterarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Master of Science

eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof., Dipl.-Ing., Dr. techn. Franz Haas

Institut für Fertigungstechnik

Graz, Jänner 2019

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift

# Kurzfassung

Hauptthemengebiet dieser Arbeit ist die Vereinfachung der Auswahl des passenden Elektromotortyps für die Elektrofahrzeugentwicklung unter Berücksichtigung neuester Entwicklungen in der Produktionstechnik.

Im ersten Abschnitt der Arbeit werden die theoretischen Grundlagen der Funktionsweise und die Fertigungsverfahren von Elektromotoren zusammengefasst.

Im Kapitel Herausforderungen werden Problemstellungen in der Entwicklung von Elektromotoren erläutert und im nachfolgenden Kapitel mögliche Lösungsansätze dargelegt.

Abschließend werden Flussdiagramme als Entscheidungshilfe bei der Elektromotorentwicklung vorgestellt. Die vorliegenden Flussdiagramme stellen die Abhängigkeiten der Elektromotoreigenschaften untereinander dar und ermöglichen somit einen einfachen Überblick und die Abschätzung von Auswirkungen von Entwicklungsentscheidungen auf die Produktionskosten.

Zusätzlich zu den Flussdiagrammen werden Herstellrouten für die einzelnen Elektromotortypen ermittelt und übersichtlich dargestellt.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Funktionsprinzip des Elektromotors . . . . .	4
2.2 Elektromotorbauformen . . . . .	5
2.2.1 Asynchronmotor . . . . .	5
2.2.2 Synchronmotor . . . . .	9
2.2.3 Reluktanzmotor . . . . .	12
2.2.4 Transversalflussmotor . . . . .	14
2.3 Vergleich der Elektromotoreigenschaften . . . . .	15
2.4 Elektromotorproduktion . . . . .	18
2.4.1 Fertigungsverfahren Stator . . . . .	20
2.4.2 Rotor . . . . .	23
<b>3 Herausforderungen</b>	<b>27</b>
3.1 Rohstoffverfügbarkeit . . . . .	27
3.2 Herstellkosten - Fertigung . . . . .	31
3.3 Elektromotorbaugröße . . . . .	34
<b>4 Lösungsansätze</b>	<b>37</b>
4.1 Reduktion der Baugröße . . . . .	37
4.1.1 Verbesserung der Elektromotorkühlung . . . . .	38
4.2 Optimierung Elektrobleche . . . . .	41
4.3 Reduktion der Seltene Erden . . . . .	46
4.3.1 Weiterentwicklung der Permanentmagnete . . . . .	47
4.3.2 Weiterentwicklung des Rotordesigns . . . . .	52
4.4 Soft Magnetic Composite . . . . .	54

## Inhaltsverzeichnis

<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>63</b>
5.1	Vereinfachte Motorauswahl . . . . .	63
5.1.1	Flussdiagramm Motorauswahl . . . . .	63
5.1.2	Asynchronmotor Rotor . . . . .	66
5.1.3	Synchronmotor Rotor . . . . .	68
5.1.4	Stator . . . . .	70
5.1.5	Elektrobleche . . . . .	71
5.2	Fertigungsroute . . . . .	72
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>77</b>
	<b>Literatur</b>	<b>81</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Elektromotor Funktionsschema Bill Drury Austin Hughes (2013). <i>Electric Motors and Drives - Fundamentals, Types and Applications</i> . London: Newnes. ISBN: 978-0-080-99368-3 . . . . .	4
2.2	Elektromotor Funktionsschema K. T. Chau (2015). <i>Electric Vehicle Machines and Drives - Design, Analysis and Application</i> . New York: John Wiley und Sons. ISBN: 978-1-118-75252-4 . . . . .	6
2.3	Asynchronmotor Drehmomentkennlinie Bill Drury Austin Hughes (2013). <i>Electric Motors and Drives - Fundamentals, Types and Applications</i> . London: Newnes. ISBN: 978-0-080-99368-3 . . . . .	7
2.4	ASM Antriebswirkungsgrad Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Andreas Binder (o.D.). <i>Systemauslegung elektrifizierter Triebstränge</i> . URL: <a href="https://docplayer.org/43613499-Systemauslegung-elektrifizierter-%20triebstraenge.html">https://docplayer.org/43613499-Systemauslegung-elektrifizierter-%20triebstraenge.html</a> . . . . .	8
2.5	Synchronmotor Funktionsschema K. T. Chau (2015). <i>Electric Vehicle Machines and Drives - Design, Analysis and Application</i> . New York: John Wiley und Sons. ISBN: 978-1-118-75252-4 . . . . .	9
2.6	Synchronmotor Drehmomentkennlinie Bill Drury Austin Hughes (2013). <i>Electric Motors and Drives - Fundamentals, Types and Applications</i> . London: Newnes. ISBN: 978-0-080-99368-3 . . . . .	10

## Abbildungsverzeichnis

2.7	SM Antriebswirkungsgrad Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Andreas Binder (o.D.). <i>Systemauslegung elektrifizierter Triebstränge</i> . URL: <a href="https://docplayer.org/43613499-Systemauslegung-elektrifizierter-%20triebstraenge.html">https://docplayer.org/43613499-Systemauslegung-elektrifizierter-%20triebstraenge.html</a> . . . . .	11
2.8	Reluktanzmotor Funktionsweise W. Ding u. a. (März 2017). »Comprehensive Research of Modular E-Core Stator Hybrid-Flux Switched Reluctance Motors With Segmented and Nonsegmented Rotors«. In: <i>IEEE Transactions on Energy Conversion</i> 32.1, S. 382–393. ISSN: 0885-8969. DOI: 10.1109/TEC.2016.2631248 . . . . .	12
2.9	Elektromotor Wirkungsgradvergleich Hartmut Janocha (2013). <i>Aktoren - Grundlagen und Anwendungen</i> . Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-662-00417-3 . . . . .	13
2.10	Transversalflussmotor Funktionsschema Zhao Wan u. a. (Juli 2015). »A novel transverse flux machine for vehicle traction applications«. In: <i>2015 IEEE Power Energy Society General Meeting</i> , S. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286494 . . . . .	15
2.11	Elektromotor Fertigungsprozess Achim Kampker (2014). <i>Elektromobilproduktion</i> . 2014. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-42022-1 . . . . .	19
2.12	Statorkerne F. Libert und J. Soulard (Apr. 2006). »Manufacturing Methods of Stator Cores with Concentrated Windings«. In: <i>2006 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives - PEMD 2006</i> , S. 676–680 . . . . .	21
2.13	Wicklungsverfahren Achim Kampker (2014). <i>Elektromobilproduktion</i> . 2014. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-42022-1 . . . . .	22



2.14	Wicklungsarten	
	A. M. EL-Refaie und T. M. Jahns (Mai 2005). »Optimal flux weakening in surface PM machines using fractional-slot concentrated windings«. In: <i>IEEE Transactions on Industry Applications</i> 41.3, S. 790–800. ISSN: 0093-9994. DOI: 10.1109/TIA.2005.847312 . . . . .	23
2.15	ASM Rotorbauformen	
	Bill Drury Austin Hughes (2013). <i>Electric Motors and Drives - Fundamentals, Types and Applications</i> . London: Newnes. ISBN: 978-0-080-99368-3 . . . . .	24
2.16	SM Rotorbauformen	
	Gurakuq Dajaku und Dieter Gerling (Dez. 2018). »Design of Permanent Magnet Machines for Hybrid Vehicles«. In: . . . .	25
3.1	Seltene Erden Ausblick	
	US Department of Energy (2011). <i>2011 Critical Materials Strategy</i> . URL: <a href="https://www.google.com/url?sa=t&amp;rct=j&amp;q=&amp;esrc=s&amp;source=web&amp;cd=1&amp;cad=rja&amp;uact=8&amp;ved=2ahUKEwiZ5NDRtJXfAhXC_ywKHfS3AQEQFjAAegQICBAC&amp;url=%20https%3A%2F%2Fwww.energy.gov%2Fsites%2Fprod%2Ffiles%2FDOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf&amp;usq=A0vVaw2Sf3Wu7Giu8j---5f07iDo">https://www.google.com/url?sa=t&amp;rct=j&amp;q=&amp;esrc=s&amp;source=web&amp;cd=1&amp;cad=rja&amp;uact=8&amp;ved=2ahUKEwiZ5NDRtJXfAhXC_ywKHfS3AQEQFjAAegQICBAC&amp;url=%20https%3A%2F%2Fwww.energy.gov%2Fsites%2Fprod%2Ffiles%2FDOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf&amp;usq=A0vVaw2Sf3Wu7Giu8j---5f07iDo</a>	
	Claudiu C. Pavel u. a. (2017). »Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric road transport applications«. In: <i>Sustainable Materials and Technologies</i> 12, S. 62–72. ISSN: 2214-9937. DOI: <a href="https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.01.003">https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.01.003</a> . URL: <a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993716300641">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993716300641</a> . . . . .	28
3.2	Produktionsmenge der Seltenen Erden	
	RPG Hobart M. King Ph.D. (2017). <i>REE - Rare Earth Elements and their Uses</i> . URL: <a href="https://geology.com/articles/rare-earth-elements/">https://geology.com/articles/rare-earth-elements/</a> . . . . .	29
3.3	Seltene Erden Preis	
	James Widmer, Richard Martin und Mohammad Kimiabeigi (März 2015). »Electric vehicle traction motors without rare earth magnets«. In: <i>Sustainable Materials and Technologies</i> 29. DOI: 10.1016/j.susmat.2015.02.001 . . . . .	30

## Abbildungsverzeichnis

3.4	SM Fertigungskosten Achim Kampker (2014). <i>Elektromobilproduktion</i> . 2014. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-3- 642-42022-1 . . . . .	32
3.5	Elektromotor Materialkosten James Widmer, Richard Martin und Mohammad Kimiabeigi (März 2015). »Electric vehicle traction motors without rare earth magnets«. In: <i>Sustainable Materials and Technologies</i> 29. DOI: 10.1016/j.susmat.2015.02.001 . . . . .	33
3.6	Bauraumeinschraenkung Lee Hutchinson (2013). <i>Review: Tesla Motors all electric Model S is fast but is it a good car</i> . URL: <a href="https://arstechnica.com/features/2013/10/review-tesla-model-s/3/">https://arstechnica.com/ features/2013/10/review-tesla-model-s/3/</a> . . . . .	35
4.1	Schematische Darstellung der Mantelkühlung und der direk- ten Wicklungskühlung Zhengyu Liu, Thomas Winter und Michael Schier (Jan. 2015). »Comparison of Thermal Performance between Direct Coil Cooling and Water Jacket Cooling for Electric Traction Motor based on Lumped Parameter Thermal Network and Experi- mentation«. In: . . . . .	38
4.2	Motorkühlung Temperaturverlauf Zhengyu Liu, Thomas Winter und Michael Schier (Jan. 2015). »Comparison of Thermal Performance between Direct Coil Cooling and Water Jacket Cooling for Electric Traction Motor based on Lumped Parameter Thermal Network and Experi- mentation«. In: . . . . .	39
4.3	Motorkühlung Tabelle Zhengyu Liu, Thomas Winter und Michael Schier (Jan. 2015). »Comparison of Thermal Performance between Direct Coil Cooling and Water Jacket Cooling for Electric Traction Motor based on Lumped Parameter Thermal Network and Experi- mentation«. In: . . . . .	40
4.4	Fertigungsablauf Stator Masao YABUMOTO u. a. (Juli 2003). »Electrical Steel Sheet for Traction Motors of Hybrid/Electric Vehicles«. In: . . . . .	42

4.5	Iron Core Losses Kwangyoung Jeong u. a. (Juli 2014). »Measurement of Stator Core Loss of an Induction Motor at Each Manufacturing Process«. In: <i>Journal of Electrical Engineering and Technology</i> 9, S. 1309–1314 . . . . .	43
4.6	Einfluss der Fertigung auf die elektrischen Eigenschaften E. Lamprecht, M. Hömme und T. Albrecht (Okt. 2012). »Investigations of eddy current losses in laminated cores due to the impact of various stacking processes«. In: <i>2012 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC)</i> , S. 1–8. DOI: 10.1109/EDPC.2012.6425097 . . . . .	44
4.7	Elektroblech Korngrenzen Masao YABUMOTO u. a. (Juli 2003). »Electrical Steel Sheet for Traction Motors of Hybrid/Electric Vehicles«. In: . . . . .	45
4.8	Eisenverluste M. Veigel u. a. (Sep. 2016). »Investigation of the impact of production processes on iron losses of laminated stator cores for electric machines«. In: <i>2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)</i> , S. 1–5. DOI: 10.1109/ECCE.2016.7855220	46
4.9	Seltene Erden Reduktion Toyota News Release (2018). <i>Toyota Develops New Magnet for Electric Motors Aiming to Reduce Use of Critical Rare-Earth Element by up to 50 %</i> . URL: <a href="https://newsroom.toyota.co.jp/en/corporate/21139684.html">https://newsroom.toyota.co.jp/en/corporate/21139684.html</a> . . . . .	47
4.10	Seltene Erden Korngröße Jin Woo Kim u. a. (2013). »Nd–Fe–B permanent magnets fabricated by low temperature sintering process«. In: <i>Journal of Alloys and Compounds</i> 551, S. 180–184. ISSN: 0925-8388. DOI: <a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.10.058">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.10.058</a> . URL: <a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838812018105">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838812018105</a> . . . . .	49

## Abbildungsverzeichnis

- 4.11 Seltene Erden Korngrenze  
Jin Woo Kim u. a. (2013). »Nd–Fe–B permanent magnets fabricated by low temperature sintering process«. In: *Journal of Alloys and Compounds* 551, S. 180–184. ISSN: 0925-8388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.10.058>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838812018105> . . . . . 50
- 4.12 Seltene Erden Two Layer  
Toyota News Release (2018). *Toyota Develops New Magnet for Electric Motors Aiming to Reduce Use of Critical Rare-Earth Element by up to 50 %*. URL: <https://newsroom.toyota.co.jp/en/corporate/21139684.html> . . . . . 51
- 4.13 Seltene Erden LaCe  
Toyota News Release (2018). *Toyota Develops New Magnet for Electric Motors Aiming to Reduce Use of Critical Rare-Earth Element by up to 50 %*. URL: <https://newsroom.toyota.co.jp/en/corporate/21139684.html> . . . . . 51
- 4.14 Seltene Erden Performance  
Toyota News Release (2018). *Toyota Develops New Magnet for Electric Motors Aiming to Reduce Use of Critical Rare-Earth Element by up to 50 %*. URL: <https://newsroom.toyota.co.jp/en/corporate/21139684.html> . . . . . 52
- 4.15 Rotorlayout mit einer Kombination aus Reluktanz- und Synchronmotor  
James Widmer, Richard Martin und Mohammad Kimiabeigi (März 2015). »Electric vehicle traction motors without rare earth magnets«. In: *Sustainable Materials and Technologies* 29. DOI: 10.1016/j.susmat.2015.02.001 . . . . . 53
- 4.16 SMC - Zeitliche Entwicklung  
L A. Dobrzański, M Drak und Ziębowicz Bogusław (Aug. 2007). »New possibilities of composite materials application—Materials of specific magnetic properties«. In: *Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL* 191, S. 352–355. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.029 55

- 4.17 SMC - Flussdichte Frequenzqang  
T Ueno u. a. (Apr. 2016). »Practical and potential applications of soft magnetic powder cores with superior magnetic properties«. In: S. 9–15 . . . . . 56
- 4.18 SMC Fertigungsablauf  
T Ueno u. a. (Apr. 2016). »Practical and potential applications of soft magnetic powder cores with superior magnetic properties«. In: S. 9–15 . . . . . 57
- 4.19 SMC vs. Elektroblech Festigkeit  
Högans (2017). *Högans Somaloy Material Data 2017*. URL: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiolcvQ\\_qvfAhUnM-wKHUzGBvEQFjAAegQICRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.hoganas.com%2Fglobalassets%2Fmedia%2Fsharepoint-documents%2FBrochuresanddatasheetsAllDocuments%2FSomaloy%20MaterialData\\_November\\_2016\\_1806HOG.pdf&usg=A0vVaw1a%20GcIrkmpigi6V7m1ph6MA](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiolcvQ_qvfAhUnM-wKHUzGBvEQFjAAegQICRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.hoganas.com%2Fglobalassets%2Fmedia%2Fsharepoint-documents%2FBrochuresanddatasheetsAllDocuments%2FSomaloy%20MaterialData_November_2016_1806HOG.pdf&usg=A0vVaw1a%20GcIrkmpigi6V7m1ph6MA)  
Voestalpine (2015). *ISOVAC Electrical Steel*. URL: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjdsCL\\_6vfAhWQ6qQKHdr7CskQFjACegQIABAC&url=http%3A%2F%2Fwww.voestalpine.com%2Fdivision\\_stahl%2Fcontent%2Fdownload%2F21450%2F639207%2Ffile%2Fvoestalpine\\_technical\\_terms\\_of\\_delivery\\_electrical\\_steel\\_EN\\_20171221.pdf&usg=A0vVaw22vRT2ft9G4VsOXHmRhXPi](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjdsCL_6vfAhWQ6qQKHdr7CskQFjACegQIABAC&url=http%3A%2F%2Fwww.voestalpine.com%2Fdivision_stahl%2Fcontent%2Fdownload%2F21450%2F639207%2Ffile%2Fvoestalpine_technical_terms_of_delivery_electrical_steel_EN_20171221.pdf&usg=A0vVaw22vRT2ft9G4VsOXHmRhXPi) . . . . . 59
- 4.20 SMC Bandage  
Simon-F Koch, Manuel Peter und Jürgen Fleischer (Dez. 2017b). »Lightweight Design and Manufacturing of Composites for High-performance Electric Motors«. In: *Procedia CIRP* 66, S. 283–288. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.274 . . . 60

## Abbildungsverzeichnis

4.21	SMC Transversalflussmotor DYNAX MG125-48 Schaeffler (2018). <i>Schaeffler Engineering Hybridbaukasten</i> . URL: <a href="https://www.google.com/url?sa=t&amp;rct=j&amp;q=&amp;esrc=s&amp;source=web&amp;cd=10&amp;cad=rja&amp;uact=8&amp;ved=2ahUKEwj-44CKhqzfAhUEK1AKHSaZCZ4QFjAJegQIAhAC&amp;url=https%3A%2F%2Fwww.schaeffler-engineering.com%2Ffileadmin%2Fassets%2FBroschueren_Dienstleistungen_PDF%2FSchaefflerEngineering_Hybridisierungsbakasten_DE.pdf&amp;usg=A0vVaw0zLL0uNrM4ErXnm_pc5lBH">https://www.google.com/url?sa=t&amp;rct=j&amp;q=&amp;esrc=s&amp;source=web&amp;cd=10&amp;cad=rja&amp;uact=8&amp;ved=2ahUKEwj-44CKhqzfAhUEK1AKHSaZCZ4QFjAJegQIAhAC&amp;url=https%3A%2F%2Fwww.schaeffler-engineering.com%2Ffileadmin%2Fassets%2FBroschueren_Dienstleistungen_PDF%2FSchaefflerEngineering_Hybridisierungsbakasten_DE.pdf&amp;usg=A0vVaw0zLL0uNrM4ErXnm_pc5lBH</a> . . . . .	61
4.22	DYNAX MG125-48 Leistungsdaten Schaeffler (2018). <i>Schaeffler Engineering Hybridbaukasten</i> . URL: <a href="https://www.google.com/url?sa=t&amp;rct=j&amp;q=&amp;esrc=s&amp;source=web&amp;cd=10&amp;cad=rja&amp;uact=8&amp;ved=2ahUKEwj-44CKhqzfAhUEK1AKHSaZCZ4QFjAJegQIAhAC&amp;url=https%3A%2F%2Fwww.schaeffler-engineering.com%2Ffileadmin%2Fassets%2FBroschueren_Dienstleistungen_PDF%2FSchaefflerEngineering_Hybridisierungsbakasten_DE.pdf&amp;usg=A0vVaw0zLL0uNrM4ErXnm_pc5lBH">https://www.google.com/url?sa=t&amp;rct=j&amp;q=&amp;esrc=s&amp;source=web&amp;cd=10&amp;cad=rja&amp;uact=8&amp;ved=2ahUKEwj-44CKhqzfAhUEK1AKHSaZCZ4QFjAJegQIAhAC&amp;url=https%3A%2F%2Fwww.schaeffler-engineering.com%2Ffileadmin%2Fassets%2FBroschueren_Dienstleistungen_PDF%2FSchaefflerEngineering_Hybridisierungsbakasten_DE.pdf&amp;usg=A0vVaw0zLL0uNrM4ErXnm_pc5lBH</a> . . . . .	61
5.1	Flussdiagramm zur Motorauswahl . . . . .	65
5.2	Asynchronmotor Rotor . . . . .	67
5.3	Synchronmotor Rotor . . . . .	69
5.4	Flussdiagramm Statoraufbau . . . . .	71
5.5	Elektrobleche . . . . .	72
5.6	Synchronmotor Herstellungsrute . . . . .	73
5.7	Asynchronmotor Herstellungsrute . . . . .	74
5.8	Reluktanzmotor Herstellungsrute . . . . .	75
5.9	Transversalflussmaschine Herstellungsrute . . . . .	76

# 1 Einleitung

Aufgrund der Tatsache von strengeren Abgasgesetzgebungen und der Verschiebung des Verkehrsaufkommens in Ballungszentren wird die Entwicklung von Elektromotorantrieben und Batterietechnologien weltweit vorangetrieben. Die Bandbreite der Elektromotorantriebe beginnt bei einem leichten Hybridantrieb und reicht bis zum rein elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeug.

Die Integration von Elektromotorantrieben in bestehende Antriebskonzepte stellt eine enorme Herausforderung für die Produktentwicklung dar. Bestehende Plattformen sollen möglichst kostengünstig für die neu entwickelten Batterien und Elektromotoren verwendet werden können. Der für die neuen Komponenten dadurch konstruktiv vorgesehene Bauraum ist meist sehr beschränkt.

Zusätzliche elektrische Allradantriebe werden in ehemaligen Differential-bauräumen untergebracht oder als Hybridantrieb direkt in die Schwungscheibe integriert. Bei reinen Elektrofahrzeugen müssen zusätzlich zu dem Elektromotor und der Elektronik große Batterien untergebracht werden.

Neben dem geringen Bauraum stellt vor allem die erwartete Leistungsfähigkeit eine enorme Herausforderung dar. Elektrofahrzeuge der Marke Tesla haben im Premiumsegment enorme Ansprüche an die Leistungsdaten für zukünftige Elektrofahrzeuge bei den Kunden geweckt.

Neben der maximalen Leistung ist in der Elektrofahrzeuganwendung zusätzlich der Wirkungsgrad des Antriebsstranges von großer Bedeutung, da neben der Batterie der Antriebswirkungsgrad einen großen Einfluss auf die Reichweite des Gesamtfahrzeuges hat.

## 1 Einleitung

Die Auswahl der passenden Motoren und der benötigten Fertigungsverfahren ist für die Elektroantriebsentwicklung, unübersichtlich, da die Entwicklung und Auslegung der Motortypen in der Literatur meist sehr allgemein und ohne Fokus auf die Automobilindustrie behandelt werden.

Die Elektromotorauswahl beeinflusst nicht nur den Motorbauraum, die Leistung und die Reichweite, sondern indirekt die gesamte Antriebsstruktur. Die Auswahl des passenden Elektromotors ist daher ein zentraler Punkt in der Elektrofahrzeugauslegung.

Fokus dieser Arbeit ist die Verwendung von Elektromotorantrieben im Kraftfahrzeug. Der Inhalt soll eine Hilfestellung für die zukünftige Entwicklung von Elektromotorantrieben an der TU Graz darstellen. Es wird daher im Zuge dieser Arbeit ein Flussdiagramm für die Typenauswahl von Elektromotorantrieben dargelegt und ein Überblick über mögliche Fertigungsverfahren von Elektromotorantrieben ausgearbeitet.

Für die Entwicklung von Elektromotorantrieben soll die Arbeit Auswirkungen der Fertigungsverfahren auf die Elektromotorentwicklung aufzeigen und mögliche Fertigungsalternativen vorschlagen. Weiters sollen die mit der Neuentwicklung von Antriebskomponenten verbundenen Risiken reduziert und die Umstellung auf die neue Technologie erleichtert werden.

Durch die Bewertung der unterschiedlichen Fertigungsverfahren und die Darstellung der Einflüsse der Fertigung auf den Gesamtwirkungsgrad des Elektromotors werden weitere Verbesserungen der Elektromotorantriebe speziell im Bereich der Optimierung von Fertigungsprozessen und Werkstoffeigenschaften erzielt.



## 2 Theoretische Grundlagen

Die theoretische Grundlage für die Rotation von Elektromotoren basierend auf dem Elektromagnetismus wurde bereits 1821 von Michael Faraday gezeigt. Das erste bekannte deutsche Elektroauto wurde 1888 von der Coburger Maschinenfabrik A. Flocken gebaut und mit dem Namen Flocken Elektrowagen bezeichnet.

Ende des 19. Jahrhunderts waren Elektrofahrzeuge mit 38% der Gesamtfahrzeuge weiter verbreitet als mit Benzin angetriebene Fahrzeuge. Die Elektrofahrzeuge galten als geräuscharm, zuverlässig und sicher.

Der Verbrennungsmotor war zu dieser Zeit unzuverlässiger wie der Elektroantrieb. Durch konstante Weiterentwicklung der Verbrennungsmortechnologie und der Stagnation in der Batterieentwicklung erreichte die Elektromobilbranche 1912 ihren Höhepunkt. Die viel größere Reichweite der mit Benzin angetriebenen Fahrzeuge und der günstig verfügbare Kraftstoff führten danach zum Niedergang der Elektrofahrzeuge und zum Aufstieg der heutigen kraftstoffbetriebenen Fahrzeuge.<sup>1</sup>

Weiterentwicklungen in der elektrischen Antriebstechnik, der Leistungselektronik und der Batterietechnologie sowie strengere Abgasgesetzgebungen haben zu einem Wiederaufleben von Elektrofahrzeugantrieben geführt.

Das Funktionsprinzip von Elektromotorantrieben ist bereits in der Literatur ausführlich beschrieben. Im Folgenden wird daher nur kurz auf die theoretische Funktionsweise der Elektromotoren eingegangen und der Fokus auf die Anwendung des Elektromotors im Kraftfahrzeug gelegt.

---

<sup>1</sup>Vgl. Kampker, 2014, Kapitel 2, S.3-5.

## 2.1 Funktionsprinzip des Elektromotors

Der Elektromotor basiert auf dem Prinzip des Elektromagnetismus und wandelt elektrische in mechanische Energie um. Umgekehrt kann dieses Prinzip im Elektrofahrzeug zum regenerativen Bremsen verwendet werden, indem der Elektromotor als Generator verwendet und mechanische Energie zurück in elektrische Energie gewandelt wird.

In [Abbildung 2.1](#) ist der schematische Aufbau eines Elektromotors dargestellt. Der einfachste Elektromotor besteht aus einer Spule, einem Kommutator und zwei Magneten. Die Drehbewegung des Elektromotors basiert auf der Interaktion – d.h. den Anziehungs- und Abstoßungskräften – zwischen der magnetischen Spule des Stators und dem Magnetfeld des Rotors.

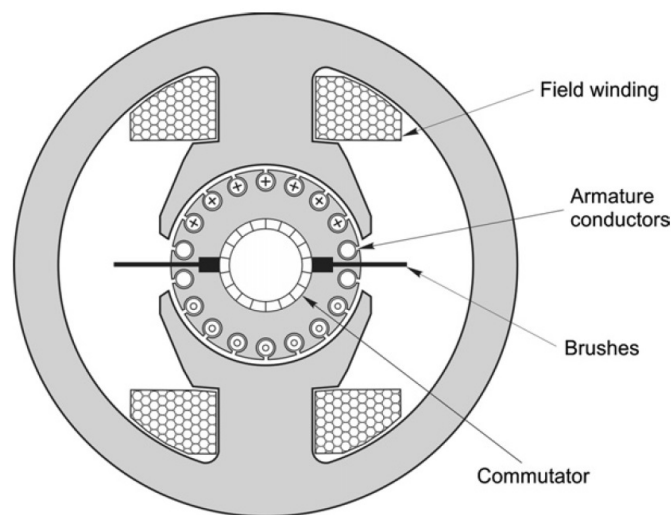


Abbildung 2.1: Elektromotor Funktionsschema<sup>2</sup>

Während der Drehbewegung erzeugt die stromdurchflossene Spule ein Magnetfeld und wird vom Magneten angezogen. Damit die Drehbewegung aufrechterhalten wird, ändert der Kommutator den Stromfluss in der Spule

<sup>2</sup>Quelle [Abbildung 2.1](#): Austin Hughes, 2013, Kapitel 3, S.74.

und polt damit die Richtung des Magnetfeldes um, sodass der Rotor vom nächsten Magnet angezogen wird. Durch die Umpolung dreht sich der Elektromotor und erzeugt ein Antriebsmoment, welches für die Anwendung im Kraftfahrzeug verwendet werden kann.

Am Anfang des 20. Jahrhunderts wurden, aufgrund der einfachen elektrischen Ansteuerung, in den ersten Elektrofahrzeugen Gleichstrommotoren verwendet. Durch die fortschreitende Entwicklung der Leistungselektronik und der damit verbundenen Ansteuerungsmöglichkeiten werden in den heutigen Elektromotorfahrzeugen Elektromotorkonzepte verwendet, die eine weitaus höhere Leistungsdichte als Gleichstrommotoren aufweisen.<sup>3</sup>

Im Folgenden werden die einzelnen Elektromotortypen und ihre Eigenschaften für die Anwendung im Kraftfahrzeug beschrieben.

## 2.2 Elektromotorbauformen

Die unterschiedlichen Elektromotortypen basieren alle auf dem gleichen Funktionsprinzip: es wird elektrische Energie in mechanische umgewandelt. Allerdings unterscheiden sich die einzelnen Motortypen im Aufbau und Layout. Im Folgenden wird auf den Asynchronmotor, den Synchronmotor und den Reluktanzmotor näher eingegangen.

### 2.2.1 Asynchronmotor

In [Abbildung 2.2](#) ist der schematische Aufbau eines Asynchronmotors dargestellt. Der Asynchronmotor besteht aus einem Stator und einem Rotor, der sich im Drehfeld des Stators dreht. Der Stator ist aus Elektroblechen und Wicklungen für das magnetische Drehfeld aufgebaut. Der Rotor besteht aus einer Welle und einem Rotorkäfig.

Die Drehbewegung des Rotors basiert auf einer Spannungsinduktion im Rotor. Die Spannung im Rotor wird durch das äußere magnetische Drehfeld erregt. Dreht sich der Rotor mit der gleichen Drehzahl wie das äußere

---

<sup>3</sup>Vgl. Austin Hughes, 2013, Kapitel 3, S.73 - S.80.

## 2 Theoretische Grundlagen

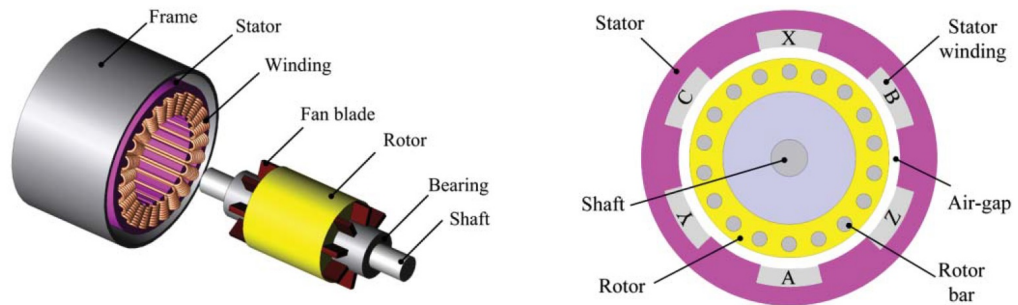


Abbildung 2.2: Elektromotor Funktionsschema<sup>4</sup>

Drehfeld, so wird keine Spannung induziert. Der Motor produziert kein Drehmoment bei synchroner Drehzahl.

Dreht sich der Rotor langsamer als das äußere Drehfeld, so ändert sich der magnetische Fluss im Rotor, wodurch eine Spannung induziert wird. Durch die induzierte Spannung wird ein Strom im Rotorkäfig hervorgerufen und ein Magnetfeld aufgebaut.

Die Differenz zwischen Synchrondrehzahl und Nenndrehzahl wird durch den Schlupf dargestellt. Bei einem kleinen Schlupf ist der Strom proportional zu der Änderungsrate des magnetischen Flusses. Das dabei entstehende Drehmoment ist proportional zum Schlupf.

In der Drehmomentkennlinie ist dies durch eine annähernd lineare Änderung ausgehend von der Synchronzahl bis zum Nennmoment bei Nenndrehzahl ersichtlich. Der Rotor läuft daher im Betrieb mit einer geringeren Drehzahl als der Synchrondrehzahl.

Bei steigender Drehzahldifferenz wird das Gegenfeld des Rotors erhöht, wodurch der Käfigstrom nicht mehr proportional zum Schlupf ansteigt. In der Drehmomentkennlinie erreicht das Drehmoment hierbei ein Maximum.

Die möglichen Betriebspunkte des Asynchronmotors liegen zwischen dem Kippmoment und der Synchrondrehzahl.

<sup>4</sup>Quelle [Abbildung 2.2](#): Chau, 2015, Kapitel 3, S.41.

## 2.2 Elektromotorbauformen

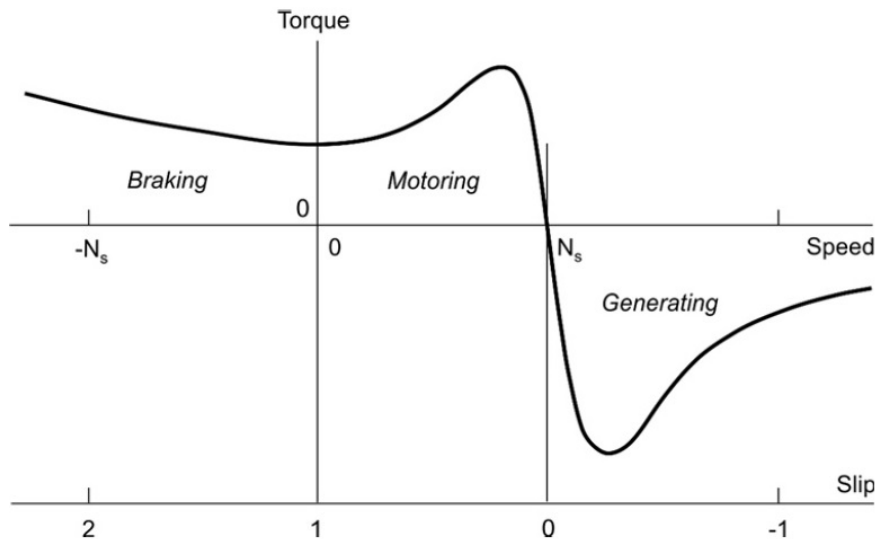


Abbildung 2.3: Asynchronmotor Drehmomentkennlinie<sup>5</sup>

Der Rotor des Asynchronmotors kann als Rotorkäfig oder als Schleifringläufer ausgeführt werden. Der Schleifringläufer wurde für den Einsatz am stationären Netz mit konstanter Frequenz entwickelt. Dieser Motortyp bietet die Möglichkeit bei konstanter Netzfrequenz ein hohes Anlaufmoment zu erzielen.<sup>6</sup>

Im Automobil wird die von der Batterie gelieferte Gleichspannung mithilfe eines Frequenzumrichters in eine Dreiphasenwechselspannung mit variabler Frequenz umgerichtet.

Da für die Ansteuerung des Asynchronmotors die Frequenz geregelt wird, kann die robustere und preiswertere Bauform des Käfigläufers im Asynchronmotor verwendet werden.

In [Abbildung 2.4](#) ist der gemessene Wirkungsgrad eines Asynchronmotors inkl. Frequenzumrichter dargestellt. Der dargestellte Asynchronmotor weist eine Leistung von 7.5 kW bei 1500 Umdrehungen auf.

<sup>5</sup>Quelle [Abbildung 2.3](#): Austin Hughes, 2013, Kapitel 6, S.188.

<sup>6</sup>Vgl. Austin Hughes, 2013, Kapitel 5, S.155 - S.156.

## 2 Theoretische Grundlagen

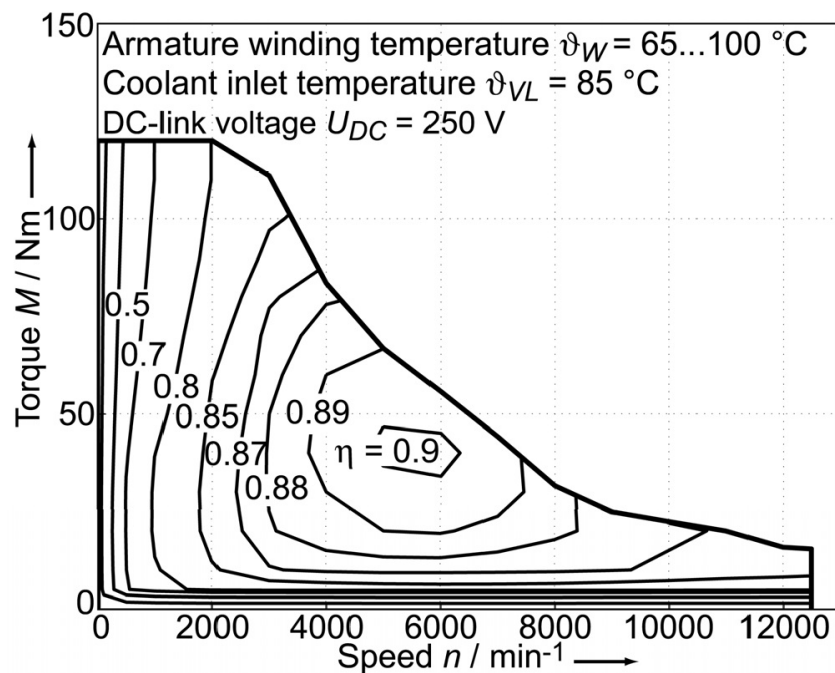


Abbildung 2.4: ASM Antriebswirkungsgrad<sup>8</sup>

Der Wirkungsgrad des gemessenen Asynchronmotors ist stark von der Drehzahl und der Last abhängig. Im optimalen Betriebspunkt wird ein Wirkungsgrad von 88% erreicht. Im für das Automobil relevanten Teillastbereich sinkt der Wirkungsgrad des Asynchronmotors auf die im Diagramm abgebildeten Werte.

Zur Verbesserung des Teillastwirkungsgrades kann der Asynchronmotor unter Feldschwäche betrieben werden. In dieser Betriebsart wird die Erregerleistung im Rotor und damit die gesamte Motorleistung reduziert.<sup>7</sup>

Der Wirkungsgrad des Asynchronmotors lässt sich durch den Betrieb unter Feldschwäche bei sehr niedrigen und sehr hohen Geschwindigkeiten verbessern.

<sup>7</sup>Vgl. Chau, 2015, Kapitel 3, S.55 - S.63.

<sup>8</sup>Quelle Abbildung 2.4: Binder, o.D., S.46.

### 2.2.2 Synchronmotor

In [Abbildung 2.5](#) ist der schematische Aufbau des permanenterregten Synchronmotors dargestellt. Der Stator besteht aus dem Stator Kern, der aus Elektroblechen aufgebaut ist und der Wicklung, die das magnetische Drehfeld erzeugt. Der Rotor besteht aus der Welle und den Permanentmagneten die das magnetische Feld des Rotors erzeugen.

Die permanente Erregung des Rotors hat gegenüber der elektromagnetischen Erregung den Vorteil, dass der Rotor einerseits robuster ausgeführt werden kann und andererseits durch den Wegfall der Erregerleistung ein höherer Wirkungsgrad erreicht werden kann.

Durch das konstante Erregerfeld im Rotor folgt dieser dem äußeren Drehfeld mit Synchrondrehzahl. Abhängig von der an der Welle angelegten Last ist das Feld des Rotors und des Stators um den Polradwinkel versetzt.<sup>9</sup>

In [Abbildung 2.6](#) ist die Drehmomentkennlinie des Synchronmotors dargestellt. Der Betriebspunkt des Synchronmotors befindet sich, je nach Last, entlang einer Vertikalen über der Synchrondrehzahl. Mit Hilfe des Frequenzumrichters kann die benötigte Synchrondrehzahl variabel eingestellt werden.

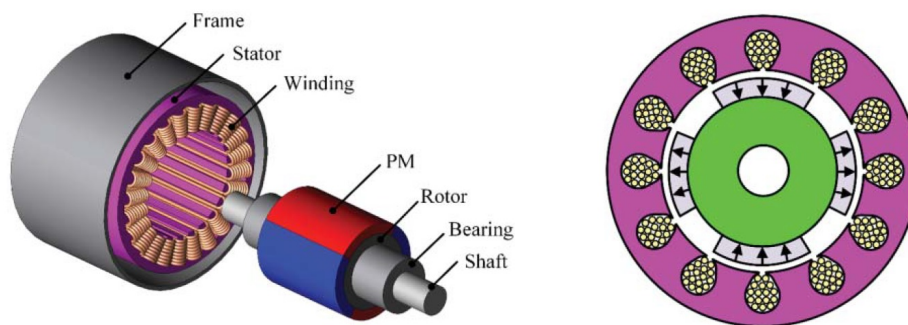


Abbildung 2.5: Synchronmotor Funktionsschema<sup>10</sup>

<sup>9</sup>Vgl. Chau, 2015, Kapitel 4, S.72-75.

<sup>10</sup>Quelle [Abbildung 2.5](#): Chau, 2015, Kapitel 4, S.73-74.

## 2 Theoretische Grundlagen

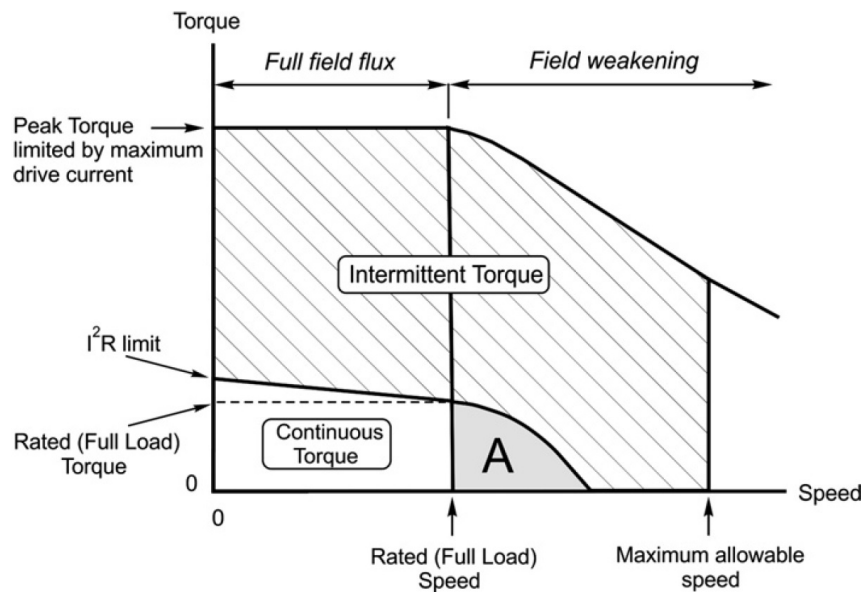


Abbildung 2.6: Synchronmotor Drehmomentkennlinie<sup>11</sup>

Das maximale Drehmoment ist, wie in [Abbildung 2.6](#) dargestellt, durch den maximalen Antriebsstrom begrenzt. Das zulässige Dauerantriebsmoment des Elektromotors ist, wie in [Abbildung 2.6](#) dargestellt, deutlich geringer als das kurzfristige, maximale Drehmoment.

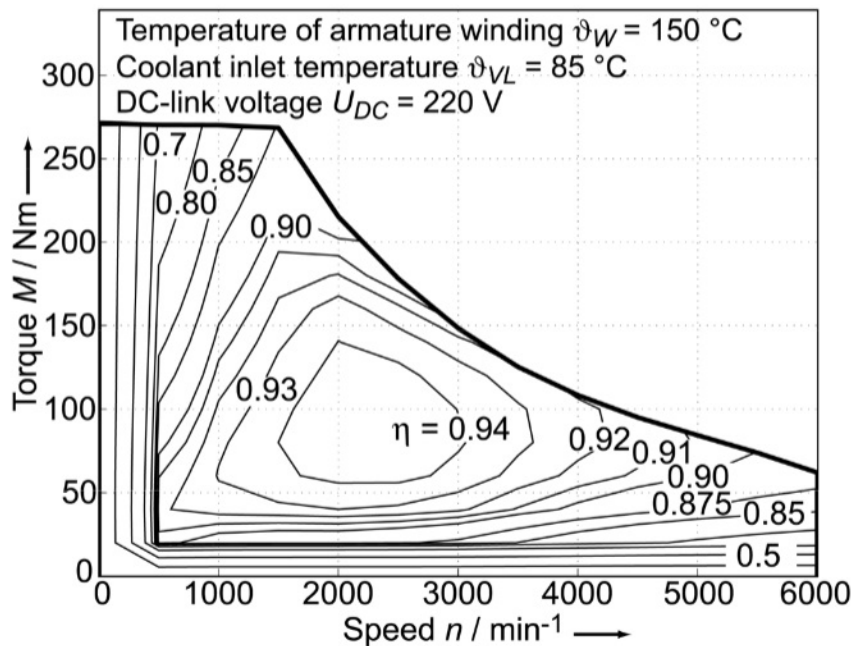
Bis zur Nenndrehzahl liefert der Elektromotor das Nennmoment. Ab der Nenndrehzahl wird das Drehmoment des Synchronmotors durch die maximale Motorleistung begrenzt und sinkt dadurch bei weiter steigender Drehzahl.

In [Abbildung 2.7](#) ist das Kennfeld eines Synchronmotors bei einer DC-Spannung von 220V und einer Kühlmittleinlasstemperatur von 85 ° Celsius dargestellt.

Im optimalen Betriebspunkt erreicht der Synchronmotor einen Wirkungsgrad von 94%. Im Teillastbereich sinkt der Wirkungsgrad des Synchronmotors stark ab.

<sup>11</sup>Quelle [Abbildung 2.6](#): Austin Hughes, 2013, Kapitel 7, S. 310.



Abbildung 2.7: SM Antriebswirkungsgrad<sup>12</sup>

Da im Elektrofahrzeug meist ein einstufiges Getriebe in Kombination mit dem Elektromotor verbaut wird, muss der Elektromotorantrieb für die tatsächlichen Betriebspunkte optimiert werden.

Im direkten Vergleich zum Asynchronmotor weist der Synchronmotor aufgrund des permanenterregten Rotors einen besseren Wirkungsgrad auf. Im Teillastbereich sinkt der Wirkungsgrad stärker als der Wirkungsgrad des Asynchronmotors, da der Synchronmotor nur eingeschränkt unter Feldschwäche betrieben werden kann.

In Elektrofahrzeugen mit einem permanenterregten Synchronmotor als Antrieb wird, aufgrund des starken Wirkungsgradabfalls, meist die maximale Geschwindigkeit knapp über dem zulässigen Autobahntempo beschränkt.

Neben dem Einsatzbereich muss die Temperatur der im Rotor verbauten Permanentmagnete begrenzt werden, da die verwendeten Werkstoffe stark

<sup>12</sup>Quelle [Abbildung 2.7](#): Binder, o.D., S.45.

## 2 Theoretische Grundlagen

temperaturempfindlich sind.<sup>13</sup> In dem Kapitel Herausforderungen wird detaillierter auf die Herstellung der Magnetwerkstoffe eingegangen.

### 2.2.3 Reluktanzmotor

Der Reluktanzmotor ist nach dem Prinzip der Änderung des elektrischen Widerstandes, der in der Elektrotechnik als Reluktanz bezeichnet wird, benannt.

In [Abbildung 2.8](#) ist der Reluktanzmotor schematisch dargestellt. Der Stator besteht wie beim Synchronmotor, aus dem Stator Kern und der Wicklung, die das magnetische Drehfeld erzeugt.

Der Rotor ist im Gegensatz zum Synchronmotor nur aus Elektroblech aufgebaut. Charakteristisch für den Reluktanzmotor sind, wie in [Abbildung 2.8](#) dargestellt, ausgeprägte Zähne im Rotor durch die der magnetische Fluss geleitet wird.

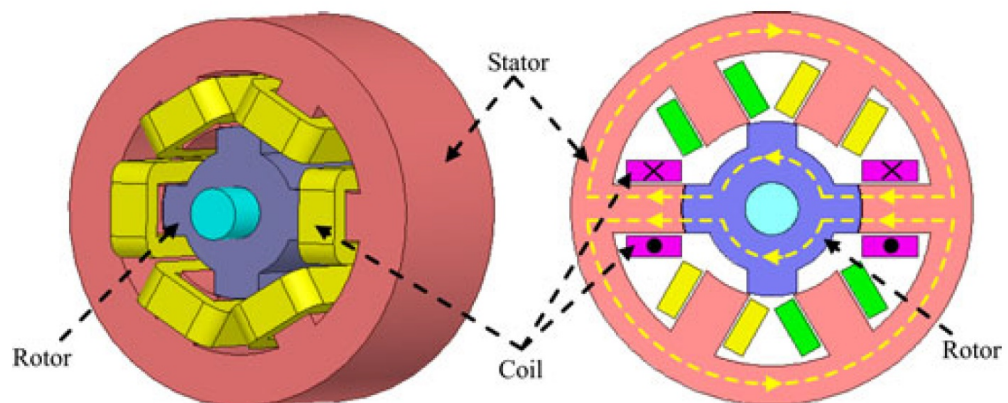


Abbildung 2.8: Reluktanzmotor Funktionsweise<sup>14</sup>

<sup>13</sup>Vgl. Chau, 2015, Kapitel 4, S.72.

<sup>14</sup>Quelle [Abbildung 2.8](#): Ding u. a., 2017, S.384.

## 2.2 Elektromotorbauformen

Durch die unterschiedliche Länge der Zähne und dem daraus resultierenden wechselnden Luftspalt ändert sich im Rotor über den Winkel der magnetische Widerstand. Der Rotor des Reluktanzmotors folgt dem Statorfeld, sodass der geringste Flusswiderstand entsteht.

Im Vergleich zum Asynchronmotor bietet die Bauweise des Reluktanzmotors Wirkungsgradvorteile, da kein Erregerfeld aufgebaut werden muss. Im Vergleich zum permanentenerregten Synchronmotor kann auf die Permanentmagnete im Rotor verzichtet werden, wodurch der Rotor kostengünstiger gefertigt werden kann.

Weiters ist aufgrund der einfachen Rotorbauweise aus Elektroblech, ein Einsatz des Reluktanzmotors bei sehr hohen Drehzahlen möglich.<sup>15</sup>

In [Abbildung 2.9](#) sind die Wirkungsgradkennfelder von dem Asynchronmotor, dem permanentenerregten Synchronmotor und dem Reluktanzmotors dargestellt. Im Diagramm ist jeweils der Bereich mit über 85% Wirkungsgrad eingezeichnet.

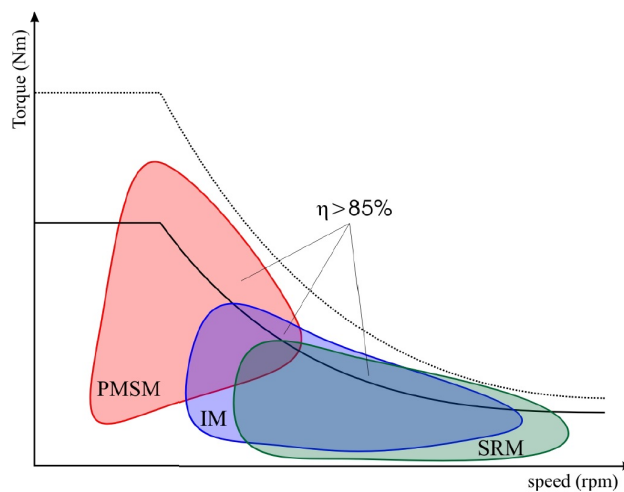


Abbildung 2.9: Elektromotor Wirkungsgradvergleich<sup>16</sup>

<sup>15</sup>Vgl. Chau, 2015, Kapitel 5, S.108-112.

<sup>16</sup>Quelle [Abbildung 2.9](#): Janocha, 2013.

## 2 Theoretische Grundlagen

Der permanenterregte Synchronmotor weist den höchsten Wirkungsgrad rund um den Nennpunkt auf. Der Asynchronmotor und der Reluktanzmotor weisen im Gegensatz dazu die höchsten Wirkungsgrade bei einer höheren Drehzahl auf.

Der magnetische Widerstand des Reluktanzmotors ändert sich im Laufe einer Umdrehung, wodurch es zu Schwankungen des magnetischen Flusses im Motor kommt. Die durch die Schwankungen des magnetischen Flusses hervorgerufenen Geräusche und Vibrationen müssen in der Automobilanwendung aufwendig gedämmt werden.<sup>17</sup>

### 2.2.4 Transversalflussmotor

Im Gegensatz zum Asynchron- bzw. Synchronmotor, die einen radialen magnetischen Fluss im Motor aufweisen, verläuft der magnetische Fluss im Transversalflussmotor transversal zur Rotorachse. Für den Transversalflussmotor gibt es unterschiedliche, konstruktive Ausführungen.

In [Abbildung 2.10](#) ist exemplarisch der Aufbau eines Transversalflussmotors dargestellt. Bei dem dargestellten Transversalflussmotor ist der Rotor zwischen den beiden Statorhälften angeordnet.

Die Wicklung des Stators ist entlang des Motorumfangs angeordnet. Durch die gedrehte Wicklung, entfallen die Wickelköpfe an den Motorenden, wodurch die Wicklungsverluste reduziert werden.

Der magnetische Fluss des Elektromotors wird, wie in [Abbildung 2.10](#) dargestellt, um die Wicklung und durch den Rotor gelenkt.

Je nach Bauform kann die Umlenkung des magnetischen Flusses mit Hilfe von Elektroblechen oder Soft Magnetic Composites erfolgen. Letztere werden im Kapitel Lösungsansätze näher beschrieben.

Im Transversalflussmotor werden der elektrische und der magnetische Aufbau voneinander getrennt, wodurch eine hohe Polpaarzahl und damit eine hohe Drehmomentdichte ermöglicht wird.

---

<sup>17</sup>Vgl. Chau, 2015, Kapitel 5, S.110.

## 2.3 Vergleich der Elektromotoreigenschaften

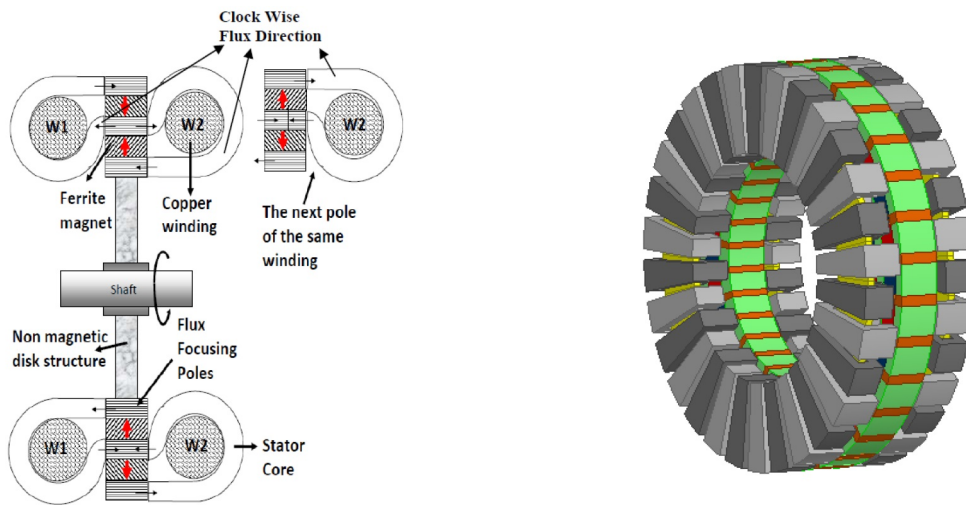


Abbildung 2.10: Transversalflussmotor Funktionsschema<sup>18</sup>

Neben der hohen Drehmomentdichte weist der Transversalflussmotor im Gegensatz zu anderen Elektromotorbauweisen ein geringes Rastmoment auf. Dadurch werden Geräusche und Vibrationen deutlich reduziert.<sup>19</sup>

## 2.3 Vergleich der Elektromotoreigenschaften

Im Zuge der Masterarbeit werden in einem ersten Schritt die Vorteile und Nachteile der häufigsten Elektromotortypen verglichen, um Schwachstellen und mögliche Verbesserungsansätze zu finden.

In der [Tabelle 2.1](#) sind die im vorigen beschriebenen Elektromotortypen und ihre Eigenschaften angeführt.

Als erster Punkt in der Beurteilung ist die Leistungsdichte der einzelnen Motortypen dargestellt. Die Leistungsdichte ist in der Elektrofahrzeuganwendung aufgrund des beschränkten Bauraumes bei der Umrüstung von

<sup>18</sup>Quelle [Abbildung 2.10](#): Wan u. a., 2015.

<sup>19</sup>Vgl. Tiller, 2013, S.77.

## 2 Theoretische Grundlagen

bestehenden Fahrzeugkonzepten, von großer Bedeutung in der Elektromotorauswahl.

Die Leistungsdichte der einzelnen Motortypen liegt zwischen 1.4-6.1 kW/kg. Der Asynchronmotor weist aufgrund der benötigten Erregerleistung und der dadurch größeren Statorwicklung, eine geringere Leistungsdichte und einen niedrigeren Wirkungsgrad als der permanenterregte Synchronmotor auf.

	IM	PM	SRM	TFM
<b>Power Density (kW/kg)</b> *@3000rpm, 30kW	1.4-2.5*	1.6-6.1*	1.8-2.6*	
<b>Material Cost (US\$/kW)</b>	~3	~5.2	~1.6	Similar to PM
<b>Costs in Series Production (€/kW)</b> <small>For a 30kW continuous, 45kW peak electric vehicle drive</small>	53.6€/kW @ 2000pieces 25.9€/kW @ 15.000 pieces 16.1€/kW @ 100.000 pieces	49.5€/kW @ 2000pieces 26.2€/kW @ 15.000 pieces 17.7€/kW @ 100.000 pieces		
<b>Optimum speed range</b>	wide speed range	limited speed range	wide speed range	wide speed range
<b>Stator</b>	Frame, Stator, Winding			Frame, Winding, SMC Stator
<b>Rotor</b>	Shaft, Rotor bar	Shaft, Magnets, Magnet Carrier, Magnet bandage	Shaft, electrical sheets	Shaft, Magnets, SMC Rotor
<b>Cooling</b>	Only Stator	Only Stator, <b>Magnets can overheat</b>	Only Stator	Only Stator
<b>Drawbacks</b>	Restricted overload capacity due to rotor losses	Expensive due to rare earth magnets, limited speed range	High torque ripple at low speeds, Acoustic noise	Expensive due to rare earth magnets, SMCs not fully developed

Tabelle 2.1: Elektromotoreigenschaften im Vergleich<sup>20</sup>

Der Synchronmotor weist aufgrund der Erregung des Rotors durch die Permanentmagnete den höchsten Wirkungsgrad und die höchste Leistungsdichte im Auslegungspunkt auf.

<sup>20</sup>Quelle Tabelle 2.1: Vgl. Zeraoulia, Benbouzid und Diallo, 2006.

<sup>20</sup>Quelle Tabelle 2.1: Vgl. Chau, 2015.

<sup>20</sup>Quelle Tabelle 2.1: Vgl. Finken und Hameyer, 2018.

<sup>20</sup>Quelle Tabelle 2.1: Vgl. Kapitel 4, S. 178 Kampker, 2014.

## 2.3 Vergleich der Elektromotoreigenschaften

In der Elektrofahrzeuganwendung wird der Elektromotor meist im Teillastbereich bei wechselnder Drehzahl betrieben. Aufgrund der konstanten Erregung des permanenterregten Synchronmotors muss dieser, um den Wirkungsgradvorteil nutzen zu können, möglichst nahe der Nenndrehzahl betrieben werden.

Beim Asynchronmotor kann im Betrieb die Erregerleistung reduziert werden, wodurch im Teillastbereich die Verluste im Rotor und durch Rückkopplungseffekte sinken.

Im Elektrofahrzeug kann diese Eigenschaft des Asynchronmotors verwendet werden, um eine hohe Motorleistung mit einem guten Wirkungsgrad im Teillastbereich zu kombinieren. Durch die günstigeren Herstellkosten des Asynchronmotors kann bei gleichen Kosten ein weitaus stärkerer Elektromotor eingebaut werden.

Vergleicht man die einzelnen Elektromotorarten in Bezug auf die Fertigung, so sind die Komponenten des Stators bei den 3 Typen sehr ähnlich. Im Rotor treten bei den einzelnen Motorarten die größten Unterschiede auf. Während im Asynchronmotor ein Rotorkäfig verbaut ist, werden im Synchronmotor Magnete verbaut. Im Reluktanzmotor besteht der Rotor hingegen nur aus einzelnen Elektroblechen.

Die drei verbreiteten Motortypen nutzen alle ein 2D Layout, da die verwendeten Elektrobleche nur in der Ebene optimale Eigenschaften aufweisen. Neuartige Motorkonzepte, die in Kombination mit neuartigen Werkstoffen entwickelt werden, ermöglichen hierbei neue Fertigungskonzepte, mit einem hohen Optimierungspotential in der Massenfertigung.<sup>21</sup>

Die im Vergleich angeführte Transversalflussmaschine versucht die Vorteile der einzelnen Motorkonzepte zu kombinieren, um ein Optimum für den Einsatz im Elektrofahrzeug zu erzielen.

Neben der Möglichkeit neuartige Motorkonzepte zu entwickeln, wird in der Masterarbeit zusätzlich eine Verbesserung von bestehenden Motortypen betrachtet. Speziell die Kühlung des Synchronmotors stellt bei steigender

---

<sup>21</sup>siehe Kapitel 4, Soft Magnetic Composite

## 2 Theoretische Grundlagen

Leistungsdichte ein Problem dar, da die im Rotor verbauten Magnete temperaturempfindlich sind. Im Kapitel Lösungsansätze wird näher auf die Motorkühlung eingegangen.

Als weiterer Punkt wurde die Abhängigkeit von bestimmten Rohstoffen von einzelnen Motortypen festgestellt. In der Masterarbeit wird sowohl im Kapitel Herausforderungen als auch im Kapitel Lösungsansätze auf die Rohstoffproblematik eingegangen.

In Summe weist jeder der einzelnen Motortypen unterschiedliche Vor- und Nachteile auf, die in [Tabelle 2.1](#) unter dem Punkt Drawbacks zusammengefasst sind.

### 2.4 Elektromotorproduktion

Im der Beurteilung der Eigenschaften der einzelnen Elektromotortypen werden die beiden wichtigsten Baugruppen, der Rotor und der Stator, betrachtet. Der gesamte Elektromotor kann in folgende Produktionsstufen unterteilt werden:<sup>22</sup>

1. Gehäuse
2. Stator
3. Welle
4. Rotor
5. Endmontage

Das Gehäuse des Elektromotors wird in der Serienproduktion im Druckguss hergestellt und anschließend spanend auf die benötigten Maße nachbearbeitet.

Für die Herstellung des Rotor- bzw. Statorpaketes wird das Elektrolech hergestellt. Im anschließenden Stanzprozess werden die benötigten Rotor- bzw. Statorquerschnitte gestanzt und paketiert.

Für die Herstellung des Stators werden die Polschuhe isoliert und bewickelt. Mit Hilfe der Imprägnierung wird die Wicklung im Stator fixiert.

---

<sup>22</sup>Vgl. Kampker, 2014, Kapitel 4, S. 135.



## 2.4 Elektromotorproduktion

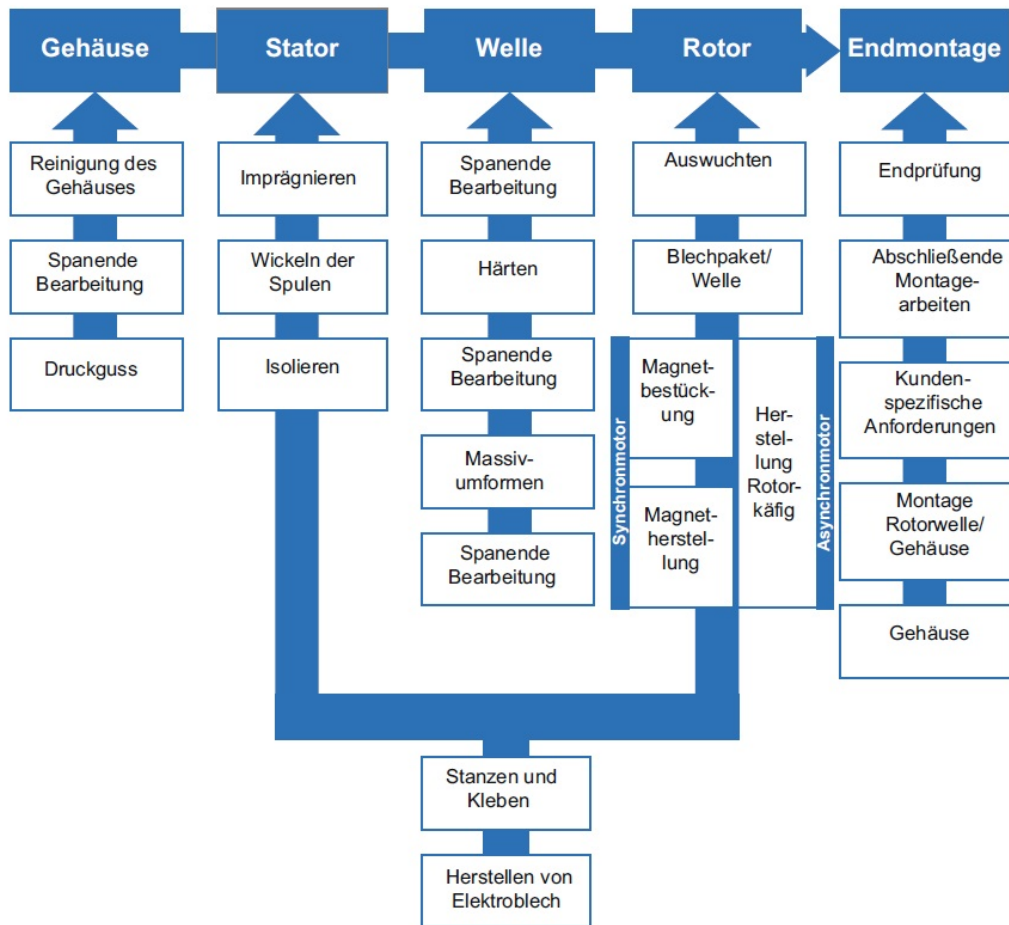


Abbildung 2.11: Elektromotor Fertigungsprozess<sup>23</sup>

Die Welle wird aus dem Rohmaterial gefertigt, gehärtet und anschließend zur Erreichung der benötigten Toleranzen spanend nachbearbeitet.

Der Rotor wird aus Elektroblech gefertigt und je nach Motortyp entweder mit Permanentmagneten bestückt oder als Rotorkäfig ausgeführt.

<sup>23</sup>Quelle [Abbildung 2.11](#): Kampker, 2014, Kapitel 4, S. 136.

## 2 Theoretische Grundlagen

Nach dem Auswuchten des Rotors kann dieser mit der Welle verbunden und in den Stator eingebaut werden.

Im Nachfolgenden wird die Fertigung des Rotors und des Stators näher betrachtet.

### 2.4.1 Fertigungsverfahren Stator

Die Fertigung des Stators mit einer hohen Wicklungsdichte und geringen Eisenverlusten stellt eine Herausforderung dar. Der hohe Fertigungsaufwand des Stators wird durch den Kostenanteil von 35% an den Gesamtkosten des Elektromotors dargestellt. Verursacht wird dieser Kostenanteil durch den aufwändigen Produktionsprozess und hohe Materialkosten.<sup>24</sup>

Zur Reduzierung der Wirbelstromverluste wird der Stator aus einzelnen Elektroblechen zusammengesetzt. Für die effiziente Fertigung der einzelnen Elektrobleche gibt es unterschiedliche Ansätze, die in [Abbildung 2.12](#) dargestellt sind.

Der Stator kann unsegmentiert aus Elektroblech in einem oder mehreren Teilschritten gestanzt werden. Die Blechausnutzung ist bei der unsegmentierten Fertigung des Statorkernelns sehr gering. 80 - 90% des Elektrobleches fallen bei diesem Verfahren als Verschnitt an. Die Kosten des Statorkernelns werden bei diesem Stanzverfahren maßgeblich durch die Motorgröße und den anfallenden Verschnitt bestimmt.

Alternativ kann der Statorkerneln aus einzelnen Segmenten zusammengesetzt werden. Eine Segmentierung des Stators in 120 Grad Segmente reduziert den Verschnitt auf 50 - 60%.

Mithilfe einer Spiral Laminierung des Statorkernelns kann der Stator, wie in [Abbildung 2.12](#) dargestellt, aus einem Blechstreifen gestanzt werden. Durch die bessere Ausnutzung des Elektrobleches sinkt der Verschnitt auf 20 - 40%.

---

<sup>24</sup>Kampker, 2014, S.148.

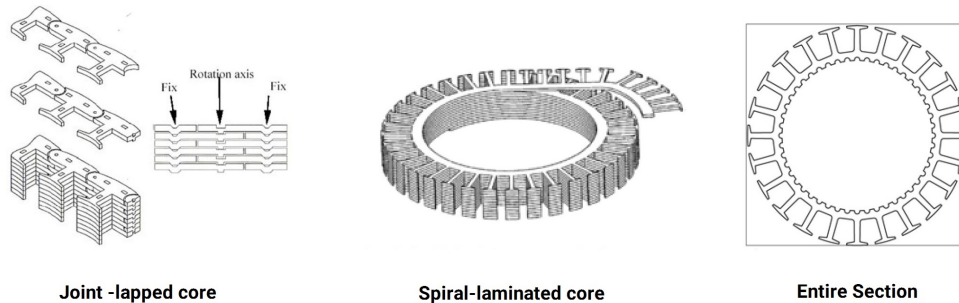


Abbildung 2.12: Statorkerne<sup>25</sup>

Ein Joint Lapped Core, wie in [Abbildung 2.12](#) dargestellt, reduziert den Verschnitt des Elektrobleches zusätzlich und ermöglicht eine einfachere Bewicklung des Statorkernes.

Die konstruktive Gestaltung des Statorkernes beeinflusst die möglichen Wicklungsarten und den erzielbaren Füllgrad der Wicklung.

In [Abbildung 2.13](#) sind exemplarisch, drei verbreitete Wicklungsverfahren zur Bewicklung von Statorkernen dargestellt.

Im Linearwickelverfahren wird die Wicklung durch Rotation des Wicklungskörpers aufgebracht. Durch die Rotation des Wicklungskörper können bei diesem Verfahren nur Wicklungskörper oder Statorsegmente bewickelt werden.

Im Flyerwickelverfahren rotiert der Flyer um den Spulenkörper und wickelt dadurch den Wicklungsdraht rund um den Spulenkörper. Das Nadelwickelverfahren wird verwendet, um einen geschlossenen Stator direkt zu bewickeln. Der Wicklungsdraht wird von einer Nadel geführt und an der benötigten Stelle abgelegt. Aufgrund des benötigten Platzes für die Nadel kann der Raum zwischen den Polen nicht vollständig genutzt werden.

Statorkerne von Asynchronmotoren werden meist mit dem Einziehwicklungsverfahren gefertigt, da für den Asynchronmotor eine verteilte Wicklung zur Glättung des Erregerstromes im Rotor verwendet wird. In [Abbil-](#)

<sup>25</sup>Quelle [Abbildung 2.12](#): Libert und Soulard, 2006.

## 2 Theoretische Grundlagen

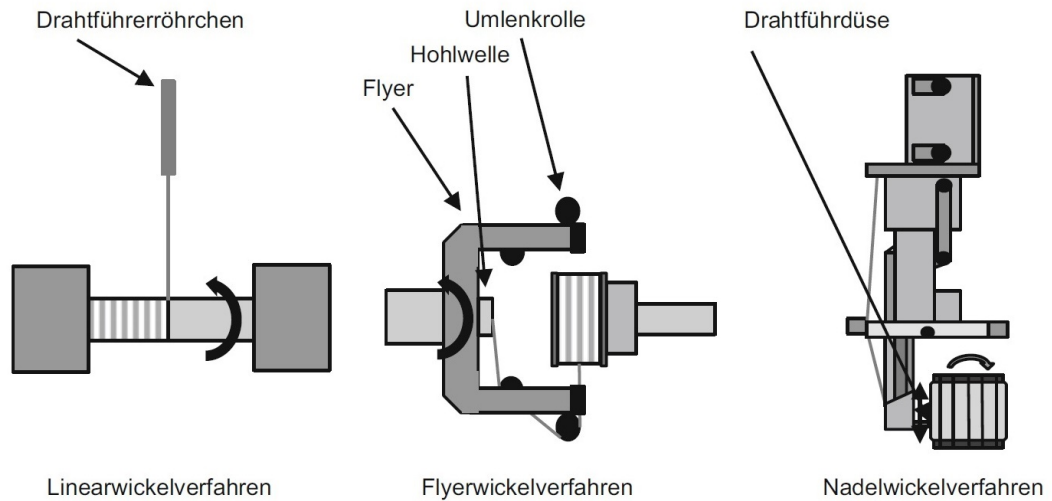


Abbildung 2.13: Wicklungsverfahren<sup>26</sup>

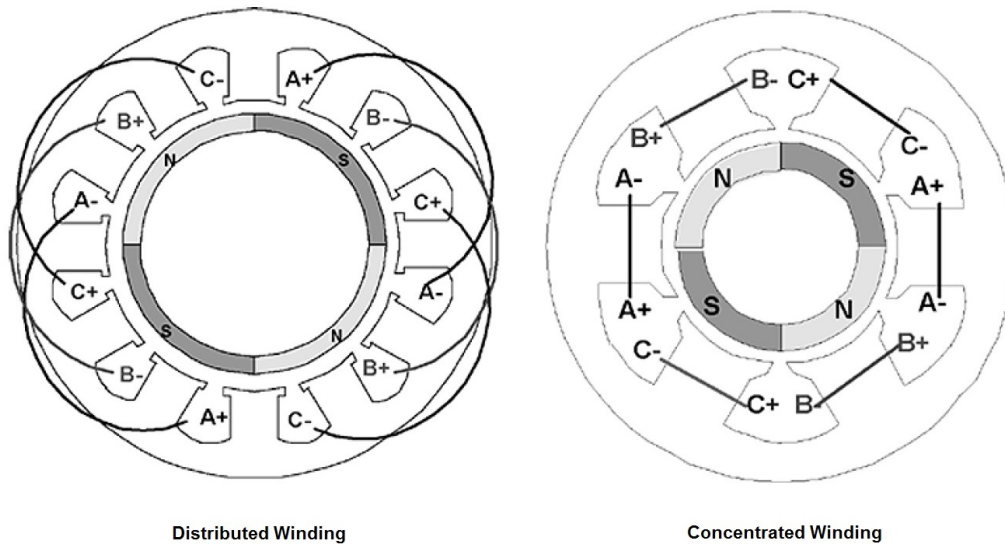
**Abbildung 2.14** sind sowohl die konzentrierte als auch die verteilte Wicklung dargestellt.

Bei der verteilten Wicklung wird nicht der einzelne Pol direkt bewickelt, sondern die Wicklung über mehrere Pole verteilt aufgebracht.

Im Einziehwicklungsverfahren werden außerhalb des Motors Luftspulen, mit Hilfe der Flyer- oder Linearwickeltechnik, gewickelt und danach mit einem Einziehwerkzeug in den Stator gezogen. Durch den Einziehvorgang können nur relativ dünne Drahtdurchmesser verwendet werden. Bei größer benötigten Drahtquerschnitten werden einzelne Stränge parallel geschaltet.

Aufgrund der für den Einziehvorgang benötigten loseren Wicklung, muss die Wicklung nach dem Einziehvorgang im Stator fixiert werden. Die verteilte Wicklung führt zu einem größeren Wickelkopf, wodurch die Kupferverluste im Stator im Vergleich zu der konzentrierten Wicklung erhöht sind.

<sup>26</sup>Quelle [Abbildung 2.13](#): Kampker, 2014, S.152.

Abbildung 2.14: Wicklungsarten<sup>27</sup>

### 2.4.2 Rotor

Der Rotor ist neben dem Stator die wichtigste Komponente des Elektromotors und treibt als drehendes Element die Abtriebswelle an. Im Folgenden werden der Aufbau und die Fertigung des Rotors für die beiden wichtigsten Motortypen, den Asynchron- und den Synchronmotor erläutert.

Der Aufbau des Rotors des Asynchronmotors ist in [Abbildung 2.15](#) dargestellt. Der Rotor des Asynchronmotors ist im Elektrofahrzeug meist als Kurzschlussläufer aufgebaut.

Schleifringläufer werden als Rotoren im Elektrofahrzeug aufgrund der höheren Wartungsanfälligkeit nicht eingesetzt und daher nicht näher beschrieben.

<sup>27</sup>Quelle [Abbildung 2.14](#): EL-Refaie und Jahns, 2005.

## 2 Theoretische Grundlagen

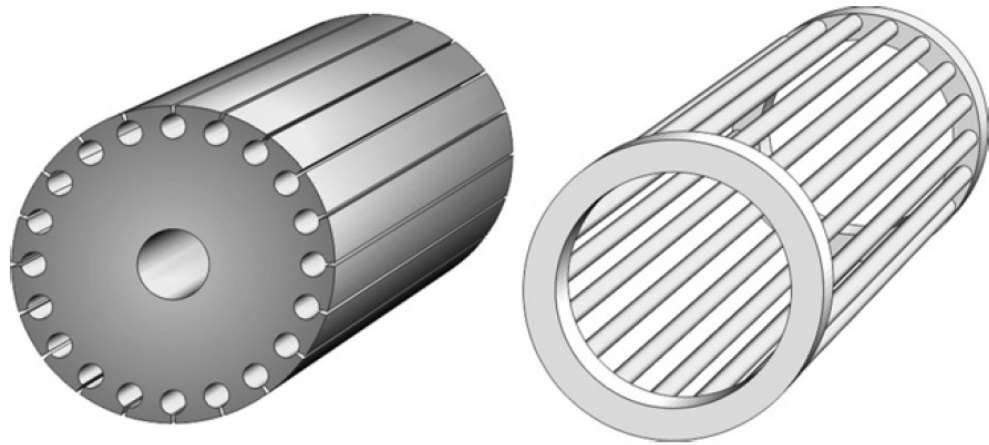


Abbildung 2.15: ASM Rotorbauformen<sup>28</sup>

Der Rotorkäfig kann mit Hilfe folgender Verfahren hergestellt werden:<sup>29</sup>

1. Druckguss
2. Hartlöten
3. Schweißen (Rührreibschweißen)

In der Großserienproduktion wird der Rotorkäfig meist im Druckguss hergestellt. Materialien für den Druckguss mit guten elektrischen Eigenschaften sind Aluminium und Kupfer.

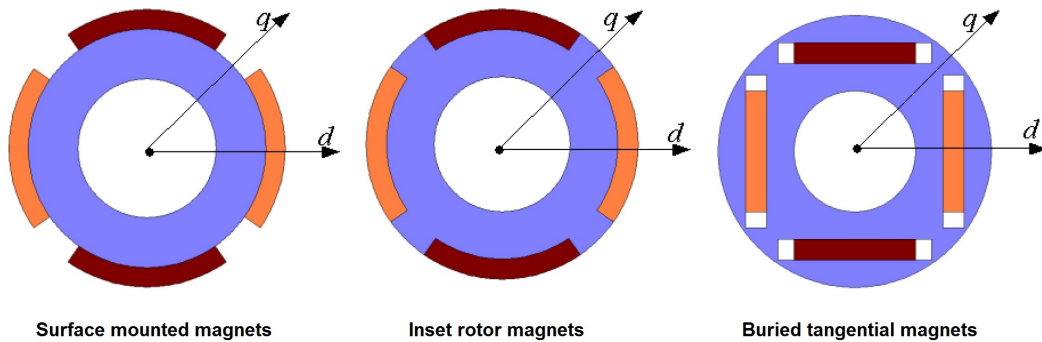
Aufgrund der hohen Schmelztemperatur von Kupfer, liegt die Kupferdruckgusstemperatur bei 1084 Grad. Die Lebensdauer der Kupferdruckgussform beträgt aufgrund der hohen thermischen Belastung etwa 100 Stück. Im Vergleich dazu hält eine baugleiche Spritzgussform, im Aluminiumdruckguss, durch die um 400 Grad niedrigere Druckgusstemperatur, etwa 50000 Schuss.<sup>30</sup>

---

<sup>28</sup>Quelle [Abbildung 2.15](#): Austin Hughes, 2013, Kapitel5, S. 155.

<sup>29</sup>Koch, Peter und Fleischer, 2017a.

<sup>30</sup>Kampker, 2014.

Abbildung 2.16: SM Rotorbauformen<sup>32</sup>

In der Elektrofahrzeuganwendung, mit der Anforderung von hoher Leistungsdichte ermöglicht ein Rotor aus Kupfer eine Reduktion der Rotorgröße um 30% (Quelle: NovelManufacturing Technologies for High Power Induction and Permanent Magnet Electric Motors).

Alternativ zum Druckguss kann der Rotorkäfig in der Serienproduktion aus Kupfer durch Rührreißschweißen hergestellt werden. Geschweißte Rotoren weisen die gleichen Widerstandswerte wie druckgegossene Rotoren auf.

Im Gegensatz zum Rührreißschweißen weisen gelötete Rotorkäfige einen höheren elektrischen Widerstand auf. Durch die große Fehleranfälligkeit des Hartlötprozesses, wird dieser für Rotorkäfige in der Prototypen- und Kleinserienfertigung verwendet.<sup>31</sup>

Der Rotor für Permanentenerregte Synchronmotoren kann in drei unterschiedlichen Varianten gefertigt werden. In [Abbildung 2.16](#) sind die einzelnen Varianten dargestellt. Hauptunterscheidungsmerkmal ist die Position der Permanentmagnete.

Die Permanentmagnete können wie folgt angeordnet sein:<sup>33</sup>

<sup>31</sup>GRANT, 2016.

<sup>32</sup>Quelle [Abbildung 2.16](#): Dajaku und Gerling, 2018.

<sup>33</sup>Vgl. Chau, 2015, Kapitel 4, S.73-74.

## 2 Theoretische Grundlagen

1. Oberflächenmontiert - Die Magnete werden direkt auf die Oberfläche des Rotors geklebt.
2. Oberflächenmontiert und teilweise vergraben - Die Magnete werden von außen in Nuten im Rotor geklebt.
3. Vergrabene Magnete - Die Magnete sind im Rotorblechpaket vergraben.

Oberflächenmontierte Magnete müssen bei hohen Rotordrehzahlen durch eine zusätzliche Bandage gesichert werden. Vergrabene Magnete werden im Gegensatz zu Oberflächenmagneten durch das Blechpaket vor auftretenden Magnetfeldspitzen und mechanischer Beschädigung geschützt. Zentrifugalkräfte werden bei dieser Rotorbauform direkt vom Blechpaket aufgenommen.



## 3 Herausforderungen

Im Kapitel Theoretische Grundlagen wurden der Stand der Technik in der Elektromotorentwicklung beschrieben und die derzeitig verbreiteten Elektromotorarten verglichen.

Basierend auf den festgestellten Anforderungen lassen sich Herausforderungen in der Elektromotorenwicklung ableiten, die im Folgenden dargelegt sind.

### 3.1 Rohstoffverfügbarkeit

Die Serienfertigung von Elektromotoren für Elektrofahrzeuge setzt die Verfügbarkeit der benötigten Rohstoffe in ausreichender Menge am Produktionsstandort voraus. Der heute am weitesten verbreitete Elektromotortyp, der Synchronmotor, benötigt für die Fertigung der Permanentmagnete Rohstoffe, die zu den „Seltenen Erden“ gehören.

Der Anstieg des weltweiten Permanentmagnetverbrauchs ist in [Abbildung 3.1](#) dargestellt. Beginnend mit einem Verbrauch im Jahr 2010 im einstelligen Tonnenbereich bis zu einem prognostizierten Verbrauch 2020 von 12.000 Tonnen Permanentmagnete.

Die Legierung der heute verbreiteten Permanentmagnete für die Produktion von Elektromotoren besteht aus Neodym, Eisen und Bor. Die chemische Bezeichnung lautet  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ . Zusätzlich zu den drei Grundbestandteilen werden den Permanentmagneten noch weitere Stoffe zur Verbesserung der Eigenschaften zugesetzt.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Vgl. Chau, 2015, Kapitel 4, S.69-70.

### 3 Herausforderungen

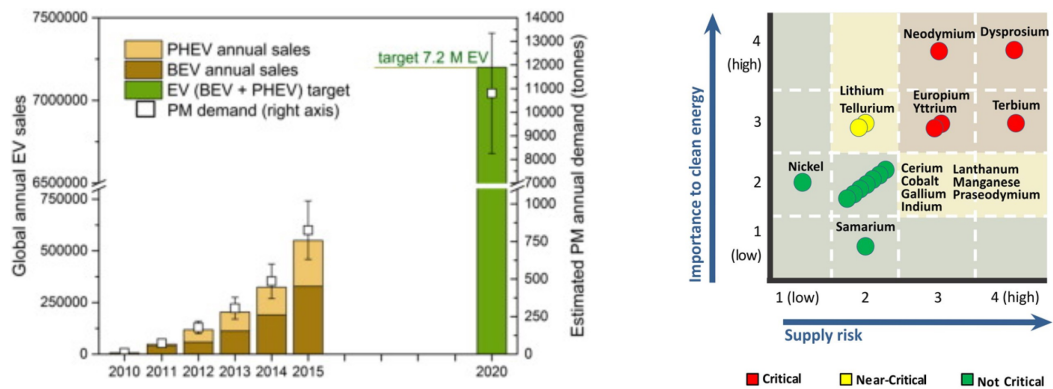


Abbildung 3.1: Seltene Erden Ausblick<sup>4</sup>

Dysprosium erweitert den nutzbaren Temperaturbereich der Permanentmagnete, wodurch der Einsatz im Rotor des Synchronmotors ermöglicht wird. Weiters reduziert eine erhöhte Einsatztemperatur die Möglichkeit einer thermischen Schädigung im Betrieb.<sup>2</sup>

Die Beimengung von Terbium erhöht die Koerzitivität der Permanentmagnete, wodurch die Magnete unempfindlicher gegen Magnetfeldspitzen, die zur Entmagnetisierung führen können, werden.<sup>3</sup>

Die Verbesserung der Koerzitivität ermöglicht eine kostengünstigere Fertigung des Rotors durch Oberflächenmontage oder eine bessere Ausnutzung der möglichen Flussdichte im Elektromotor.

In [Abbildung 3.1](#) sind die drei Rohstoffe Neodym, Terbium und Dysprosium bezüglich ihres Lieferrisikos und ihrer Bedeutung für die Elektrofahrzeugfertigung abgebildet. Terbium und Dysprosium weisen dabei ein sehr hohes Versorgungsrisiko auf.

Das hohe Versorgungsrisiko für die Rohstoffe der Elektromotorfertigung ist einerseits mit dem starken weltweiten Anstieg der Nachfrage nach Elek-

<sup>2</sup>Vgl. Fukuno, Hirose und Yoneyama, 1990.

<sup>3</sup>Vgl. PAN u. a., 2010.

<sup>4</sup>Quelle [Abbildung 3.1](#): Energy, 2011, S.4.

<sup>4</sup>Quelle [Abbildung 3.1](#): Pavel u. a., 2017.

### 3.1 Rohstoffverfügbarkeit

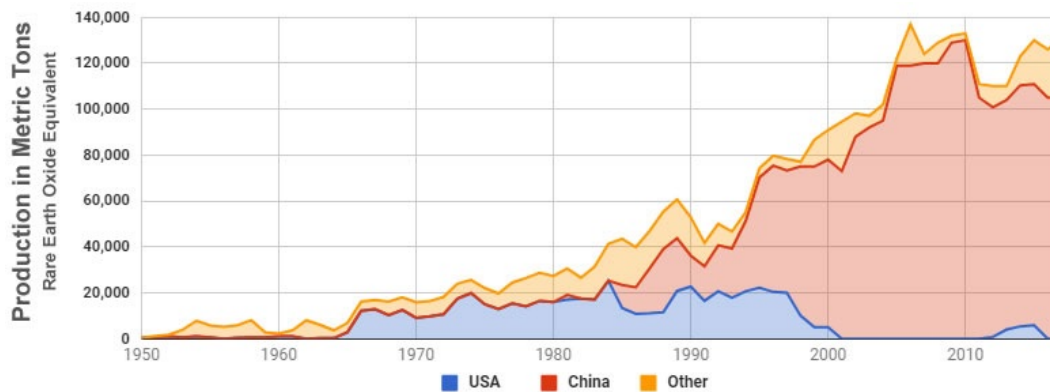


Abbildung 3.2: Produktionsmenge der Seltenen Erden<sup>6</sup>

trofahrfahrzeugen und dem einhergehenden starken Anstieg des Ressourcenverbrauchs begründbar.

Andererseits ist das Versorgungsrisiko der „Seltenen Erden“ durch eine politische Neuausrichtung der Exportpolitik der Volksrepublik China verursacht, da die chinesische Regierung die Wertschöpfung vom Verkauf der Rohstoffe auf den Verbrauch der Endprodukte verlagert.

Der Aufstieg der Volksrepublik Chinas zum weltweit führenden Produzenten begann mit dem Einstieg in den Abbau der Seltenen Erden in den 1980er Jahren. Die in China abgebauten Rohstoffe wurden kostengünstig am internationalen Markt angeboten.<sup>5</sup>

In [Abbildung 3.2](#) ist der Anstieg des Rohstoffabbaus der Seltenen Erden in der Volksrepublik China dargestellt. Anfang der 1990er Jahre wurde China zu dem führenden Produzenten von Seltenen Erden.

Durch die Entwicklung von günstiger Leistungselektronik wird eine einfache Regelung der Synchronmotoren in der industriellen Anwendung möglich und dadurch die weltweit produzierte Stückzahl stark erhöht. Der steigende weltweite Rohstoffverbrauch wird heute primär von der Volksrepublik China abgedeckt.

<sup>5</sup>Vgl. Hobart M. King, 2017.

<sup>6</sup>Quelle [Abbildung 3.2](#): Hobart M. King, 2017.

### 3 Herausforderungen

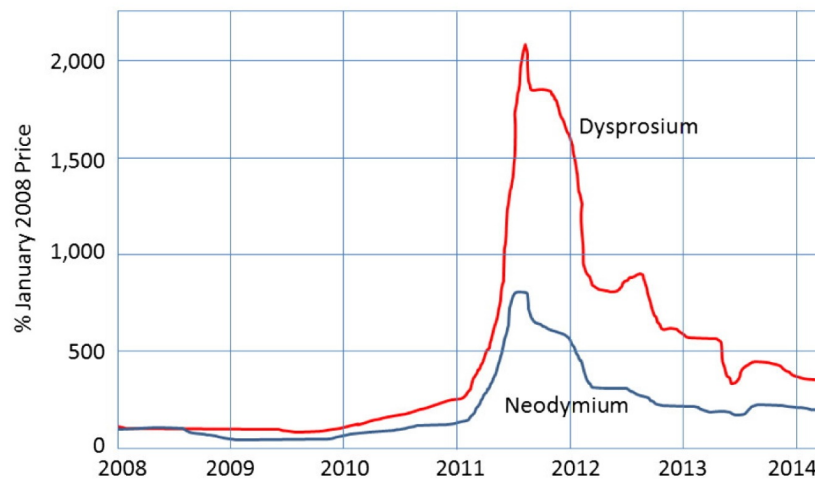


Abbildung 3.3: Seltene Erden Preis<sup>8</sup>

Zeitgleich mit dem starken Anstieg des Abbaus der Seltenen Erden in der Volksrepublik China wurde der Abbau in den USA aufgrund der steigenden Umweltauflagen und des niedrigen Weltmarktpreises unrentabel. In [Abbildung 3.2](#) ist der Ausstieg aus dem Abbau der Seltenen Erden in den USA zu sehen.

Die chinesische Regierung nutzte im Jahr 2010 die Monopolstellung in der Produktion von Seltenen Erden und schränkte deren Export als Rohstoff ein, um die Wertschöpfung im eigenen Land zu erhöhen und die Vormachtstellung in der Elektromobilproduktion zu festigen.<sup>7</sup>

In [Abbildung 3.3](#) ist der Preisanstieg der Seltenen Erden im Verlauf über die Zeit dargestellt. Dysprosium Oxid stieg im Zeitverlauf, durch den erhöhten Verbrauch des Minerals für Hochleistungssynchronmotoren im Elektrofahrzeug von 250 USD/kg im Jahr 2010 auf 2800 USD/kg im Jahr 2011.

Nach dem starken Preisanstieg begannen die Verbraucher der Seltenen Erden außerhalb der Volksrepublik Chinas über die Abhängigkeit der Rohstoffversorgung nachzudenken und Alternativen zu erforschen.

<sup>7</sup>Vgl. Hobart M. King, 2017.

<sup>8</sup>Quelle [Abbildung 3.3](#): Widmer, Martin und Kimiabeigi, 2015, S.4.

Bergbauunternehmen in den Vereinigten Staaten, Kanada und Australien evaluierten einst geschlossene Minen und begannen erneut mit dem Abbau von Seltenen Erden, die aufgrund des höheren Rohstoffpreises wieder rentabel wurden.<sup>9</sup>

Für die zukünftige Entwicklung und Produktion von Elektromotorplattformen in der Automobilindustrie ist die langfristige Versorgung mit den nötigen Rohstoffen entscheidend, da die Rohstoffpreise neben der Wahl des Elektromotortypes auch die Wahl des Produktionsstandortes beeinflussen.

## 3.2 Herstellkosten - Fertigung

Die Gesamtkosten des verwendeten Elektromotortyps sind ein wichtiges Auswahlkriterium in der Elektrofahrzeugentwicklung, da die wirtschaftliche Produktion von Elektromotoren aufgrund des aufwendigen Produktionsprozesses, eine Herausforderung darstellt.

Die für die Serienproduktion angestrebten Zielkosten liegen für einen 30 kW Traktionsmotor, wie in Abbildung dargestellt, bei 570 Euro. Die tatsächlichen Fertigungskosten, bei einer Jahresstückzahl von 2000 Stück, liegen bei 1483,92 Euro.<sup>10</sup>

In der [Abbildung 3.4](#) sind die Fertigungskosten auf die einzelnen Fertigungsschritte aufgeteilt. Die Aufteilung der Materialkosten ist in der Abbildung links oben dargestellt.

Der größte Materialkostenfaktor beim Permanentmagneten Synchronmotor sind die Permanentmagnete, die 46.6% der Materialkosten des Elektromotors ausmachen. Neben den Materialkosten verursachen die Magnete unter dem Punkt Magnetbestückung, d.h. dem Einbau der Magnete in den Rotorkern, zusätzliche Kosten.

Die Permanentmagnete sind ein Kostenfaktor der auch bei einer Steigerung der Stückzahl einen sehr hohen Anteil an den Gesamtkosten einnimmt und

---

<sup>9</sup>Vgl. Hobart M. King, 2017.

<sup>10</sup>Vgl. Kampker, 2014, S.176 - S.180.

### 3 Herausforderungen

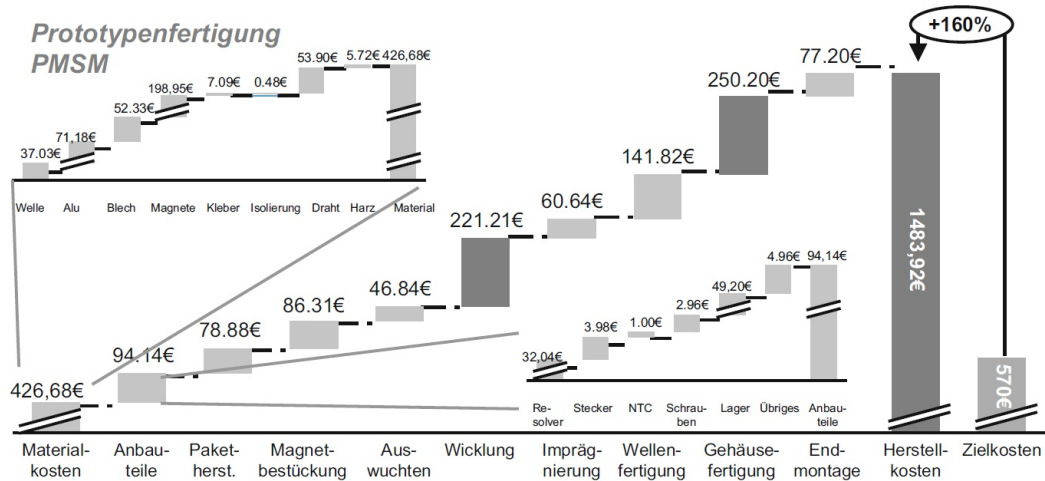


Abbildung 3.4: SM Fertigungskosten<sup>11</sup>

nur durch konstruktive Änderungen im Rotordesign verringert werden kann.

Den zweitgrößten Kostenanteil, mit 53.90 Euro, verursachen die Materialkosten des Kupferdrahtes, der für die Wicklung der Spulen benötigt wird. Neben den Materialkosten verursacht die Bewicklung des Statorkerneln zusätzliche Kosten von 221.21 Euro.

Die Elektrobleche, die für die Herstellung des Rotor- bzw. des Statorkerneln benötigt werden, verursachen Kosten von 52.33 Euro. Die Rotor- bzw. Statorkerne müssen neben der Herstellung der einzelnen Blechschnitte pakettiert werden. Gesamt verursacht die Herstellung der Rotor- bzw. Statorkerne Kosten von 131.21 Euro.

Neben der Herstellung der Kerne verursacht das Auswuchten, die Imprägnierung und die Assemblierung mit der Welle bzw. dem Gehäuse zusätzliche Kosten.

<sup>11</sup>Quelle [Abbildung 3.4](#): Kampker, 2014, S.181.

### 3.2 Herstellkosten - Fertigung

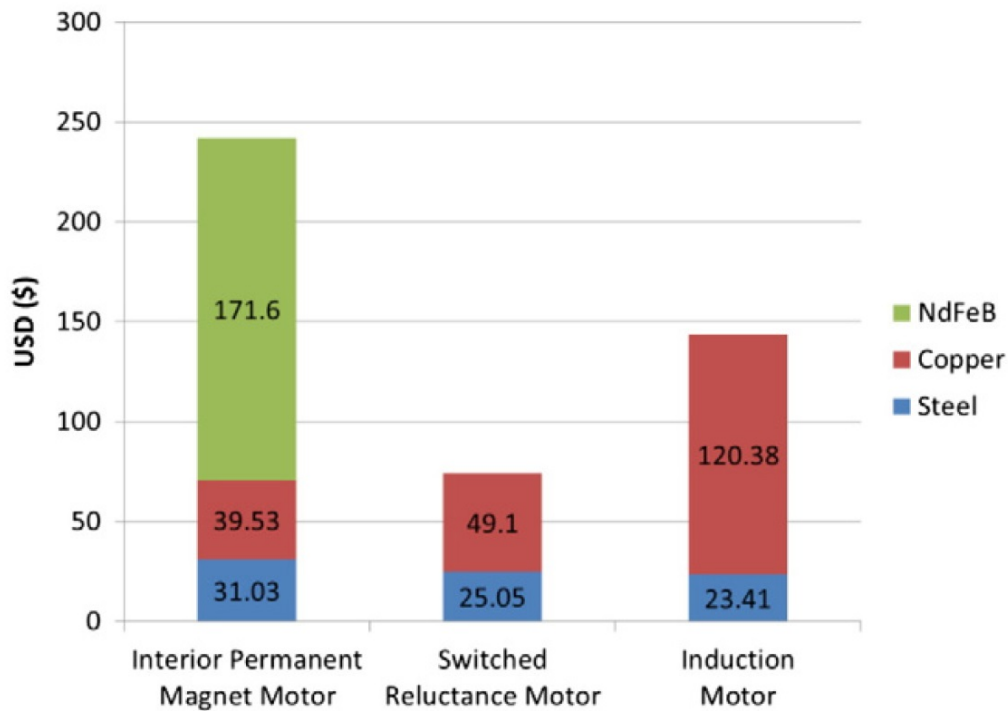


Abbildung 3.5: Elektromotor Materialkosten<sup>12</sup>

Ein Ansatz zur Kostenreduktion besteht in der Reduktion der Statorgröße durch eine Verbesserung des Motorlayouts und der Erhöhung der maximalen Flussdichte der Elektrobleche. Limitiert wird die Reduktion der Statorgröße durch die Elektromotorkühlung, da die thermische Belastung der Wicklung durch den Isolierlack limitiert ist.

Zusätzlich zur Reduktion der Statorgröße kann die Fertigung der Elektrobleche, die Paketierung und die Bewicklung des Stators optimiert werden, um die anfallenden Kosten in diesen Punkten zu senken.

Ein weiterer Ansatz zur Reduktion der Fertigungskosten des Elektromotors ist eine Erhöhung der Motordrehzahl zur Reduktion der Motorabmessungen. Die Drehzahl des Elektromotors wird durch das nachfolgende Getriebe limitiert. Eine Beurteilung der Motordrehzahl und den dabei auftreten-

<sup>12</sup>Quelle [Abbildung 3.5](#): Widmer, Martin und Kimiabeigi, 2015.

### 3 Herausforderungen

den Fertigungskosten hat gemeinsam mit der Auslegung des Getriebes zu erfolgen, um ein Kostenminimum zu erreichen.

Alternativ zu der Optimierung der Fertigung und Reduktion der Kosten bei dem permanent erregten Synchronmotor, besteht die Möglichkeit alternative Motortypen zu entwickeln.

In [Abbildung 3.5](#) sind die Materialkosten des permanent erregten Synchronmotors, des Reluktanzmotors und des Asynchronmotors nebeneinander dargestellt. Die Hauptkosten des permanent erregten Synchronmotors werden durch die Permanentmagnete verursacht. Der Reluktanzmotor und der Asynchronmotor verursachen aufgrund der geringeren Leistungsdichte höhere Kosten in der Kupferwicklung.

Zusammenfassend stellt die Kostenreduktion in der Elektromotorentwicklung in Hinblick auf die Überleitung in die Großserienproduktion einen wichtigen Entwicklungspunkt und eine Herausforderung dar. In den Lösungsansätzen werden zu den Fertigungskosten mögliche Entwicklungswege und Hilfen zur Vereinfachung der Elektromotorauswahl dargelegt.

### 3.3 Elektromotorbaugröße

Neben den Herstellkosten und den verwendeten Rohstoffen stellt die Limitierung des Bauraumes eine weitere Herausforderung in der Entwicklung von Elektrofahrzeugen dar, da Elektrofahrzeuge entweder von Grund auf neu entwickelt oder auf Basis von bestehenden Fahrzeugkonzepten aufgebaut werden.

Bei der Neuentwicklung von Elektrofahrzeugen können die Elektromotorantriebe direkt in der Entwicklung eingeplant werden. Bei der Umrüstung von bestehenden Fahrzeugkonzepten können meistens nur kleine Änderungen am Fahrzeug vorgenommen werden.

In [Abbildung](#) ist der Einbau der Elektromotoren im Tesla Model S dargestellt. Der Elektromotor ist dabei direkt zwischen den Reifen an der



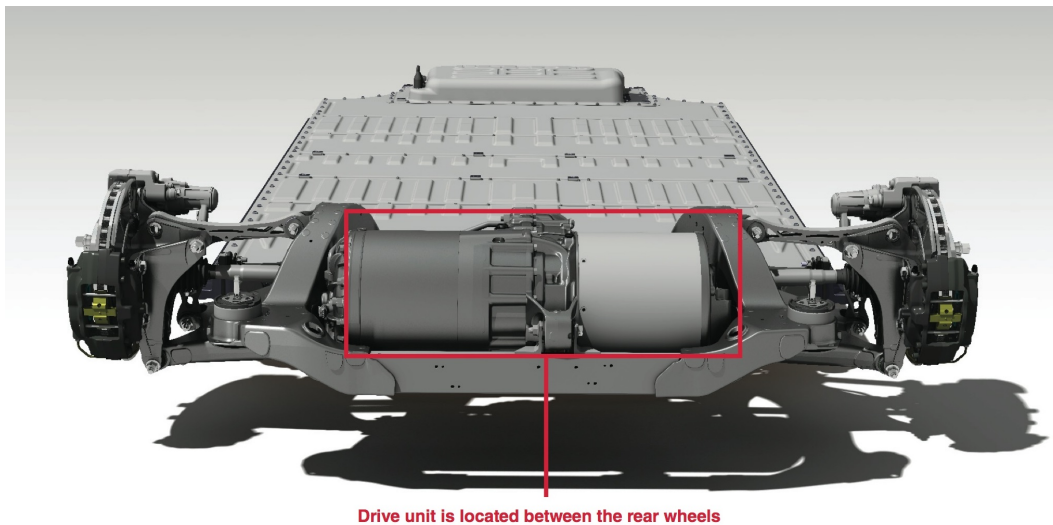


Abbildung 3.6: Bauraumeinschränkung<sup>13</sup>

Hinterachse montiert. Der im Tesla verfügbare Bauraum für den Elektromotor ist trotz der Neuentwicklung der Antriebsplattform eingeschränkt, da in der Plattformentwicklung auf Designfreiheit Wert gelegt wurde.

Bei bestehenden Fahrzeugkonzepten ist der zur Verfügung stehende Bauraum meist noch stärker limitiert, da in der Entwicklung kein Elektrofahrzeugantrieb vorgesehen wurde.

Ein möglicher Lösungsansatz in der Verkleinerung der Elektromotorgröße besteht in der Erhöhung der Motordrehzahl. Eine Erhöhung der Motordrehzahl zur Bauraumreduktion muss zusammen mit der Getriebeauslegung durchgeführt werden, um ein Optimum zwischen Motorgröße und der Getriebegröße zu finden.

Neben der direkten Bauraumeinschränkung erschwert das im PKW typische Fahrprofil die Elektromotorauslegung. Kurzzeitige, hohe Beschleunigungsleistungen stehen geringen Dauerleistungen gegenüber.

Abhängig vom angestrebten Fahrverhalten ergeben sich daher unterschiedliche Anforderungen an den Elektromotor. Es muss daher für den jeweiligen

<sup>13</sup>Quelle [Abbildung 3.6](#): Hutchinson, 2013.

### 3 Herausforderungen

Fahrzeugtyp ein Optimum zwischen Kosten, Effizienz und Beschleunigungsverhalten gefunden werden.

Die Auswahl des Elektromotortyps beeinflusst die Fertigungskosten, die Reichweite und in Zusammenhang mit dem Getriebe den beanspruchten Bauraum. Im Kapitel Lösungsansätze werden mögliche Lösungswege zur Optimierung der Elektromotorentwicklung vorgeschlagen.

## 4 Lösungsansätze

Für die im vorangegangenen Kapitel dargelegten Herausforderungen sind momentan unterschiedliche Lösungsansätze in der Entwicklung. Im Nachfolgenden soll eine Zusammenfassung der aktuellen Entwicklungen einen Überblick über mögliche Lösungsansätze für die Herausforderungen in der Elektromotorfertigung geben.

### 4.1 Reduktion der Baugröße

Der verfügbare Bauraum für den Elektromotoreinbau ist im Kraftfahrzeug, wie im Kapitel Herausforderungen dargelegt, limitiert.

Um die Maximalleistung des Elektromotors bei gegebenem Bauraum zu erhöhen, können die Verluste reduziert oder die Wärmeabfuhr verbessert werden. Verluste können durch Verbesserungen in den Elektroblechen, der Wicklung und der mechanischen Fertigung reduziert werden. Mögliche Fertigungsverfahren zur Reduktion der Verluste im Elektromotor werden im zweiten Unterpunkt beschrieben.

Die Verbesserung der Wärmeabfuhr ermöglicht sowohl eine Erhöhung der kurzfristigen Spitzenleistung als auch der Dauerleistung bei gleichen Elektromotorabmessungen. Neben der besseren Ausnutzung des Elektromotors schützt ein gutes thermisches Management empfindliche Elektromotorkomponenten vor temperaturbedingten Schädigungen.

## 4 Lösungsansätze

### 4.1.1 Verbesserung der Elektromotorkühlung

Der Stator von Elektromotoren wird mit Hilfe von einer Mantelkühlung gekühlt. Die Mantelkühlung erfolgt meist durch einen Spalt zwischen Stator und Getriebegehäuse. In [Abbildung 4.1](#) ist die Mantelkühlung dargestellt.

Die Abfuhr der in der Wicklung erzeugten Wärme erfolgt durch Wärmeleitung. Die Wärmeleitung wird durch den großen Abstand zwischen der Wicklung und dem Kühlmantel und der thermischen Leitfähigkeit des Statorpaketes beschränkt.

Im stationären Betrieb, für den die Mantelkühlung entwickelt wurde, ermöglicht diese eine kostengünstige Kühlung des Statorpaketes. Bei Betrieb des Elektromotors bei kurzfristigen Spitzenleistungen und niedriger Dauerleistung schränkt die Mantelkühlung die Maximalleistung des Elektromotors ein.

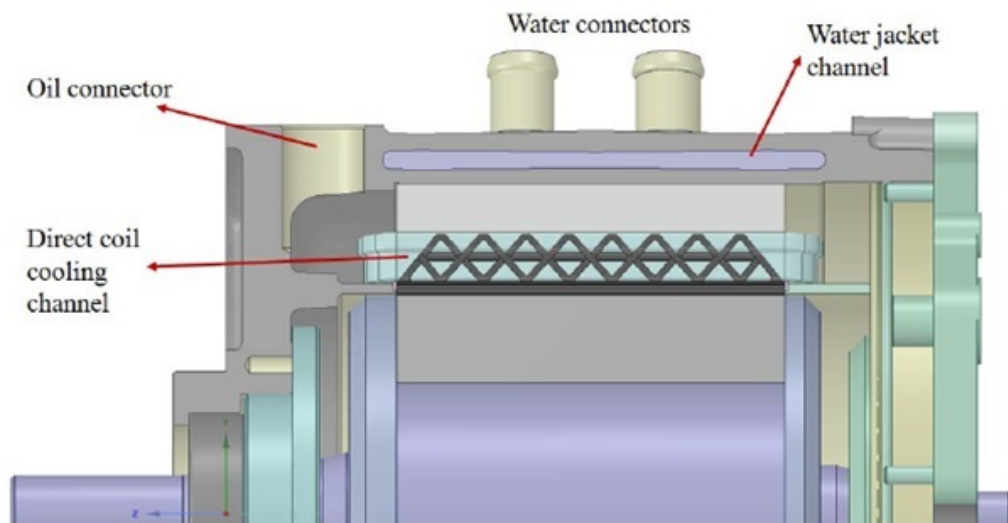
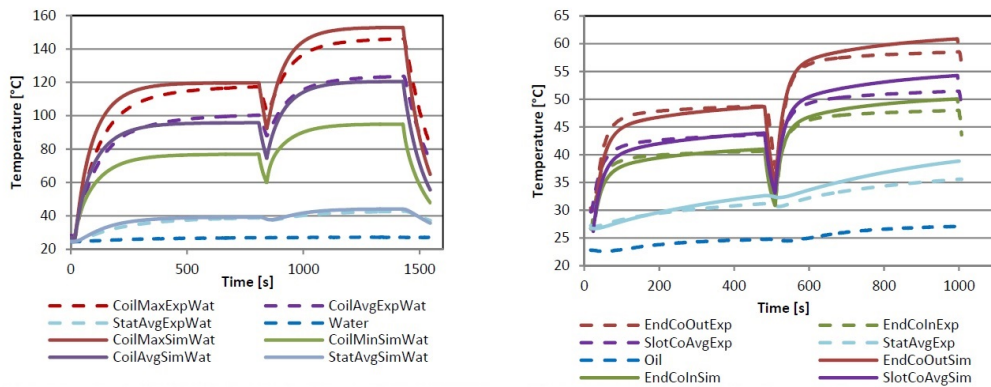


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Mantelkühlung und der direkten Wicklungskühlung<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Quelle [Abbildung 4.1](#): Liu, Winter und Schier, 2015, S.5.

## 4.1 Reduktion der Baugröße



Temperature behavior in water jacket cooled machine

Temperature behavior in direct coil cooled machine

Abbildung 4.2: Motorkühlung Temperaturverlauf<sup>2</sup>

Die direkte Kühlung der Wicklung durch Umströmung ist im Elektromotor durch den angestrebten hohen Kupferfüllgrad nicht möglich.

Bei dem in [Abbildung 4.1](#) dargestellten Kühlkonzept ist die Kupferwicklung als Rohr ausgeführt. Die Kühlflüssigkeit wird direkt durch die Kupferwicklung gepumpt.

In [Abbildung 4.2](#) ist einerseits der Temperaturverlauf mit Mantelkühlung und andererseits der Temperaturverlauf mit direkter Wicklungskühlung bei gleicher Leistung abgebildet.

Durch den höheren thermischen Widerstand der Mantelkühlung steigt die Maximaltemperatur auf 120° bzw. mit erhöhter Leistung auf 150° an. Im Vergleich dazu beträgt die Wicklungstemperatur bei direkter Kühlung 50° bzw. bei erhöhter Leistung 60°.

Die verbesserte Wärmeabfuhr senkt die Wicklungstemperatur und reduziert dadurch Wicklungsverluste, da diese vom elektrischen Widerstand abhängen und dieser mit der Wicklungstemperatur ansteigt. Der elektrische Widerstand der Wicklung reduzierte sich im Vergleich zum Referenzmotor mit Mantelkühlung um 18,5% .

<sup>2</sup>Quelle [Abbildung 4.2](#): Liu, Winter und Schier, 2015, S.6.

Table 3. Rated torque output of the prototype machine

Machine Speed [rpm]	Coil Cooled, Conti. Torque [Nm]	Water Jacket Cooled, Conti. Torque [Nm]
3000	110	29
6000	100	20

Abbildung 4.3: Motorkühlung Tabelle<sup>4</sup>

Neben einer Reduktion der elektrischen Verluste reduziert die direkte Wicklungskühlung den thermischen Widerstand des Referenzmotors um 80% . Als Nebeneffekt einer reduzierten Statortemperatur wird die Wärmeabfuhr des Rotors an den Stator verbessert.<sup>3</sup>

In [Abbildung 4.3](#) sind die erzielten Motordaten des in [Abbildung 4.1](#) dargestellten Referenzmotors abgebildet. Die Leistungsdaten des Referenzmotors wurden bei 3000 und 6000 Umdrehungen pro Minute ermittelt. Bei dem Baugleichen Elektromotor wurde durch eine Verbesserung der Wärmeabfuhr ein um 300% erhöhtes Dauerdrehmoment erzielt.

Die erzielbare maximale Spitzenleistung ist bei beiden Elektromotoren, aufgrund des gleichen mechanischen Aufbaus identisch. Eine Verbesserung der Motorkühlung verlängert den Zeitraum in dem die Spitzenleistung abgerufen werden kann.

Eine Verbesserung der Kühlung ermöglicht eine Erhöhung der Motordauerleistung bei gleichen Abmessungen, wodurch Traktionsantriebe deutlich kleiner dimensioniert werden können.

Für Beschleunigungsspitzen ermöglicht eine Verbesserung der Motorkühlung eine höhere Überlastfähigkeit des Elektromotors, wodurch der Elektromotor besser für hohe Spitzenleistungen geeignet ist.

<sup>3</sup>Vgl. Liu, Winter und Schier, 2015, S.5 - S.7.

<sup>4</sup>Quelle [Abbildung 4.3](#): Liu, Winter und Schier, 2015, S.7.

### 4.2 Optimierung Elektrobleche

Neben der Optimierung der Motorkühlung kann die Effizienz des Elektromotors durch eine Verbesserung der Elektroblechfertigung bei gleicher Geometrie verbessert werden, da die gemessenen Leistungsdaten der Elektrobleche im Datenblatt meist nicht erreicht werden.

Die im Datenblatt angeführten Eigenschaften der Elektrobleche werden laut „DIN EN 60404-2:2009-01: Magnetische Werkstoffe - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Elektroband und -blech“<sup>5</sup> mit Hilfe eines Epsteinrahmens bestimmt.

Im Messverfahren werden die magnetischen Eigenschaften des Elektrobleches ohne Eigenspannungen, mit einem Magnetfeld in eine definierte Richtung und mit einem sinusförmigen, magnetischem Feld gemessen.<sup>6</sup>

In der tatsächlichen Motoranwendung können die im Messaufbau dargestellten Eigenschaften nicht erreicht werden. In [Abbildung 4.4](#) sind die Fertigungsschritte zur Herstellung eines Statorkernes aus Elektroblech dargestellt. Zu jedem Fertigungsschritt sind in der [Abbildung 4.4](#) die Auswirkungen der Fertigung auf die Eigenschaften des Elektrobleches dargestellt.

Im ersten Fertigungsschritt, dem Stanzprozess, werden die Eigenschaften des Elektrobleches entlang der Schnittkante beeinflusst. Im darauffolgenden Verbindungsprozess der einzelnen Elektrobleche zum fertigen Statorpaket treten lokale Spannungen an den Fügenasen und Kurzschlüsse entlang der Schnittkanten auf.<sup>7</sup>

Die im Fertigungsprozess eingebrachten Spannungen können durch Spannungsarmglühen reduziert werden, wodurch allerdings auch die mechanischen Eigenschaften beeinflusst werden. Im anschließenden Wicklungs- und Einpressvorgang des Statorkernes in das Gehäuse werden zusätzliche Spannungen in den Statorkern eingebracht.

---

<sup>5</sup>Beuth, 2008.

<sup>6</sup>Vgl. Beuth, 2008.

<sup>7</sup>Vgl. Jeong u. a., 2014.

## 4 Lösungsansätze

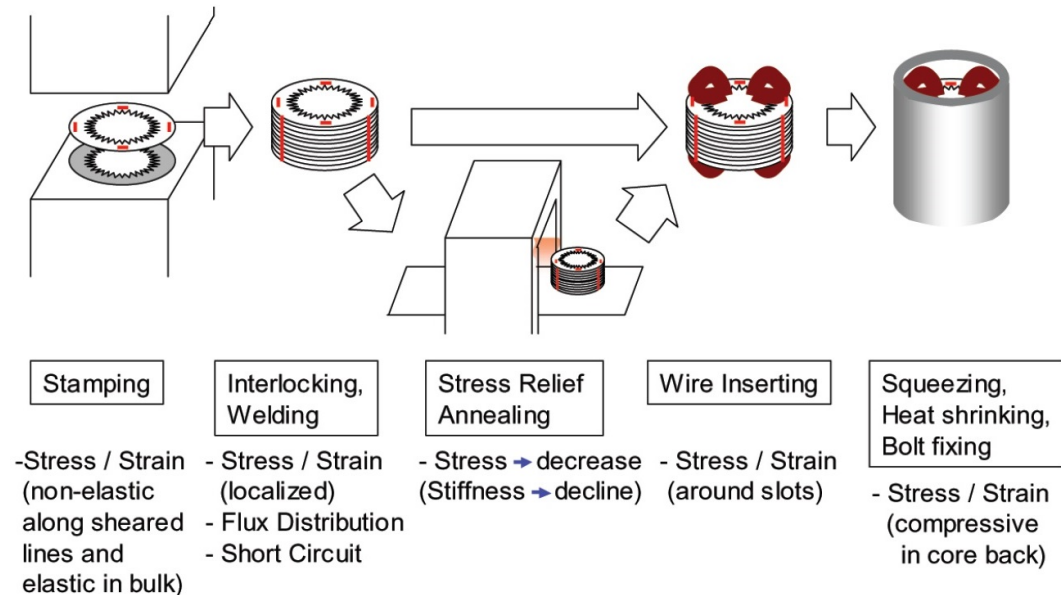


Abbildung 4.4: Fertigungsablauf Stator<sup>8</sup>

In der Elektromotorentwicklung werden meist Optimierungen der Statorgeometrie betrachtet. Die Auswirkungen der Fertigung auf die auftretenden Eisenverluste sind in Abhängigkeit vom magnetischen Fluss in [Abbildung 4.5](#) dargestellt.

Die grüne Linie stellt die Verluste des Elektrobleches im Rohzustand dar. Im Versuch wurden im Rohzustand die im Datenblatt angegebenen Werte erreicht.

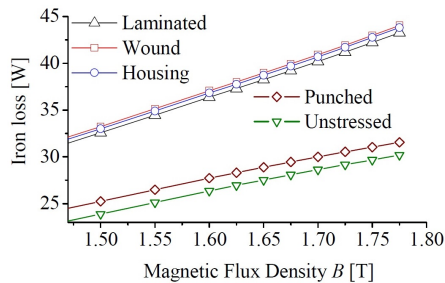
Durch den Stanzprozess werden die Eisenverluste im Blech um 6.28% bei 1.4 Tesla bzw. 4.54% bei 1.775 Tesla gegenüber dem Rohzustand erhöht.

Durch den Laminationsprozess werden die Eisenverluste im Stator um weitere 26.94 % bei 1.4 Tesla bzw. 37.1 % bei 1.775 Tesla erhöht. Die Bewicklung des Statorkernes verursacht eine Erhöhung der Verluste von 2.23 % bei 1.4

<sup>8</sup>Quelle [Abbildung 4.4](#): YABUMOTO u. a., 2003.



## 4.2 Optimierung Elektrobleche



B (T)	Process	Iron loss increment (%)
1.400	punching	6.28
	laminating	26.94
	winding	2.23
	housing	-0.8
1.775	punching	4.54
	laminating	37.1
	winding	1.77
	housing	-0.48

Increment of iron losses at each process

Abbildung 4.5: Iron Core Losses<sup>10</sup>

Tesla bzw. 1.77% bei 1.775 Tesla. Durch das Einpressen des Statorpaketes in das Gehäuse wurde eine Reduktion der Wirbelstromverluste von -0.8% bei 1.4 Tesla und -0.48 % bei 1.775 Tesla erzielt.<sup>9</sup>

Die Verluste in der Laminierung werden durch zwei Faktoren verursacht. Einerseits durch Grate an den Außenkonturen und andererseits durch Nasen, die zum Ausrichten der einzelnen Elektrobleche benötigt werden.

Grate an den Elektroblechen können durch einen Entgratungsprozess nach dem Stanzverfahren reduziert werden. Der zusätzliche Fertigungsschritt verursacht Fertigungskosten die bei kostengünstigeren Motoren meist eingespart werden müssen.

Die Ausrichtnasen werden zur Ausrichtung der einzelnen Bleche untereinander verwendet. In [Abbildung 4.6](#) sind die durch die Ausrichtnasen verursachten Unterbrechungen in der elektrischen Isolierung zwischen den einzelnen Elektroblechen abgebildet. Durch die verursachten Kurzschlüsse entstehen Wirbelströme, die Verluste im Blechpaket verursachen.

Der Einpressvorgang vom Stator Kern in das Motorgehäuse verursacht durch die Beschädigung der elektrischen Isolation im Einpressbereich und durch die elektrische Verbindung der einzelnen Bleche Wirbelstromverluste.

In [Abbildung 4.6](#) ist die Gefügestruktur eines eingepressten Stator Kernes dargestellt. Die einzelnen Elektrobleche werden durch das Statorgehäuse

<sup>9</sup>Vgl. Lamprecht, Hömme und Albrecht, 2012.

<sup>10</sup>Quelle [Abbildung 4.5](#): Jeong u. a., 2014.

## 4 Lösungsansätze

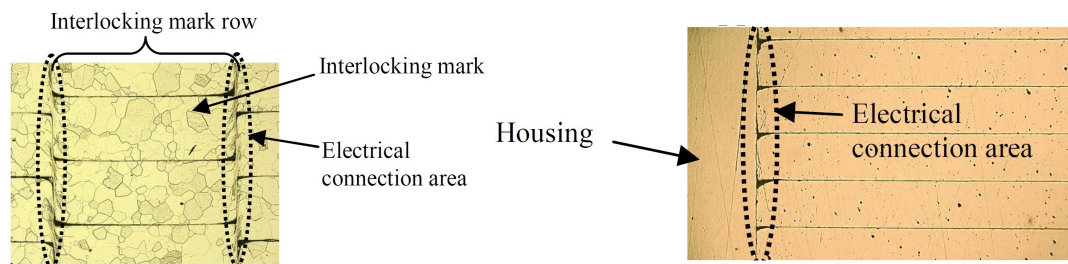


Abbildung 4.6: Einfluss der Fertigung auf die elektrischen Eigenschaften<sup>12</sup>

kurzgeschlossen.

Die Ursache für die Erhöhung der Wirbelstromverluste ist neben der Beschädigung der Isolierung auch eine Veränderung der Gefügestruktur durch den Stanzprozess.

In [Abbildung 4.7](#) ist der Ummagnetisierungsvorgang dargestellt. Ausgehend von einem unmagnetisiertem Bauteil wird ein Magnetfeld angelegt. Im ersten Schritt bewegt sich die Domängrenze. Nachdem sich die Domängrenzen ausgerichtet haben, geht das Elektroblech in Sättigung.<sup>11</sup>

Die für die Ummagnetisierung benötigte magnetische Kraft ist abhängig von der Gefügestruktur. Das Elektroblech wird im Fertigungsvorgang entlang der Schnittkanten beeinflusst.

In [Abbildung 4.7](#) sind auf der rechten Seite in Punkt a die Domänstrukturen der Stanzfläche von der Unterseite und in Punkt b die Domänstrukturen von der Oberseite dargestellt. Der Stanzprozess beeinflusst die Domänstrukturen ungefähr bis zur dreifachen Elektroblechdicke.<sup>13</sup>

Je nach Lage der elektrischen Kurzschlüsse und der auftretenden Magnetfeldstärken haben die Fehlstellen unterschiedlich starke Auswirkungen auf die Wirbelstromverluste im Eisenkern.

<sup>11</sup>Vgl. YABUMOTO u. a., 2003, S.117 - S.118.

<sup>12</sup>Quelle [Abbildung 4.6](#): Lamprecht, Hömme und Albrecht, 2012.

<sup>13</sup>Vgl. Lamprecht, Hömme und Albrecht, 2012.

## 4.2 Optimierung Elektrobleche

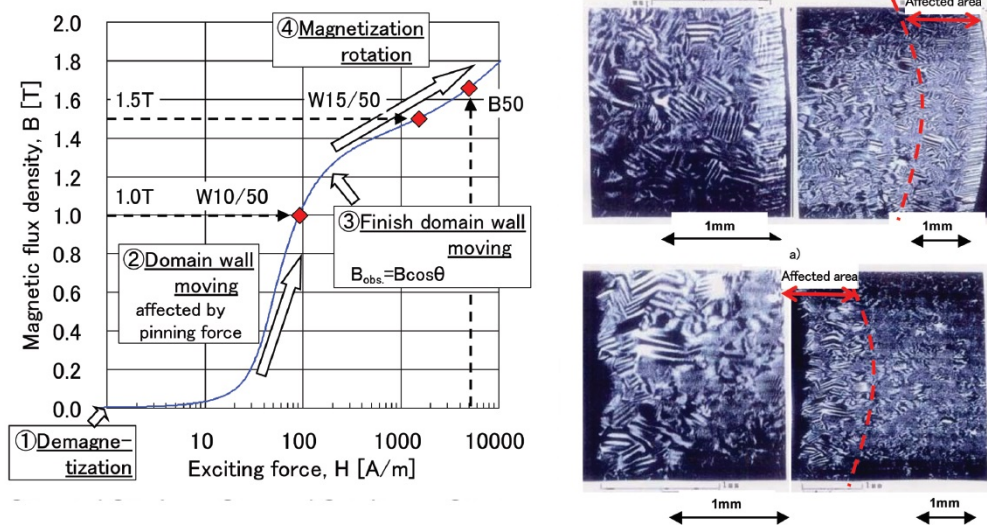


Abbildung 4.7: Elektrolech Korngrenzen<sup>15</sup>

In [Abbildung 4.8](#) sind die Verluste der einzelnen Fertigungsverfahren abhängig vom gewählten Laminationsverfahren dargestellt. Die in rot und blau dargestellten Linien sind zwei verschiedene Typen von Elektrolechen.

Gestanzte und verschweißte Statorkerne besitzen aufgrund der Verbindung durch die Schweißnaht die höchsten Verluste. Rein geklebte Statorkerne weisen die geringsten Verluste auf.

In der rechten Abbildung sind die Gesamtverlustanteile abhängig vom Fertigungsverfahren dargestellt. Die Materialverluste betragen im Fall des lasergeschweißten Statorkernes 36% der Gesamtverluste. Im Fall des geklebten Statorkernes betragen die Verluste durch das Material 64%.<sup>14</sup>

Da Fertigungsverfahren meist nur nach Stückzahl und Fertigungskosten verglichen werden, bietet eine weitergehende Bewertung der Fertigungsmöglichkeiten zusätzliche Einsparungspotentiale in der Elektromotorfertigung.

<sup>14</sup>Vgl. Veigel u. a., 2016.

<sup>15</sup>Quelle [Abbildung 4.7](#): YABUMOTO u. a., 2003.

## 4 Lösungsansätze

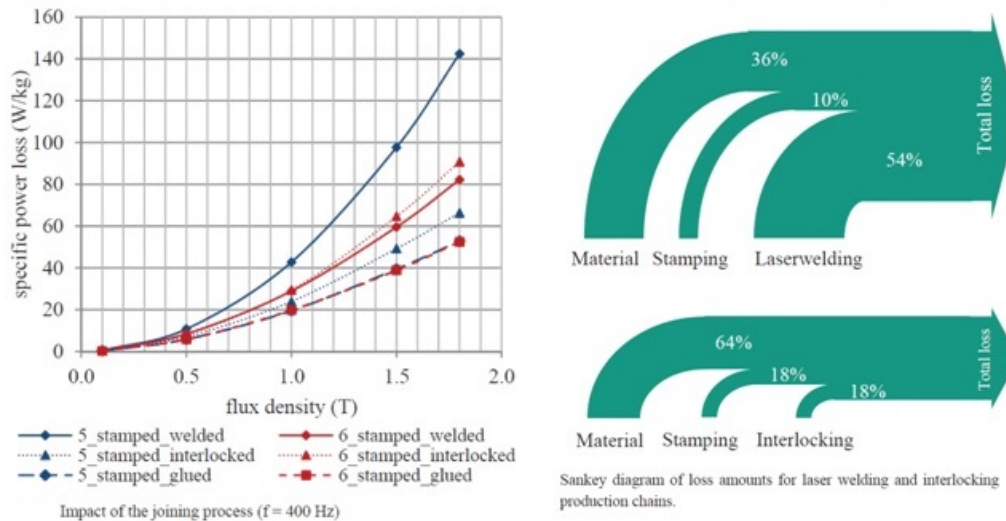


Abbildung 4.8: Eisenverluste<sup>16</sup>

Durch eine Reduktion der Verluste im Eisenkern kann entweder der Wirkungsgrad des Elektromotors verbessert werden oder in der Fertigung ein kostengünstigeres Elektroblech bei gleichen Motoreigenschaften verwendet werden.

### 4.3 Reduktion der Seltene Erden

Die Serienproduktion von Elektromotoren weist je nach Motortyp unterschiedliche Abhängigkeiten in der Rohstoffversorgung auf. Der heute am meisten verbreitete Motortyp, der Synchronmotor, ist stark von den seltenen Erden abhängig.

Eine Möglichkeit die Abhängigkeit der Fertigung von der Rohstoffversorgung zu verringern, besteht darin den Motortyp zu ändern und auf die

<sup>16</sup>Quelle [Abbildung 4.8](#): Veigel u. a., 2016.

## 4.3 Reduktion der Seltene Erden

seltene Erden: Terbium, Dysprosium und Neodymium zu verzichten.

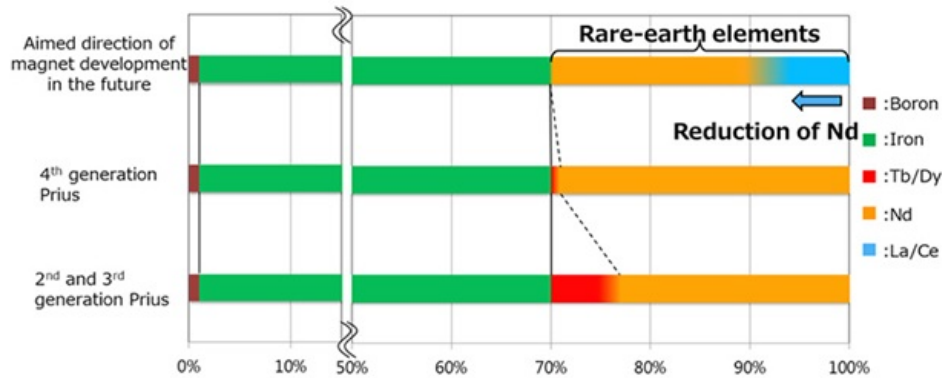


Abbildung 4.9: Seltene Erden Reduktion<sup>17</sup>

Eine weitere Möglichkeit besteht darin die Permanentmagnete so weiterzuentwickeln, dass in der Produktion weniger seltene Erden benötigt werden.

### 4.3.1 Weiterentwicklung der Permanentmagnete

Toyota arbeitet, wie in [Abbildung 4.9](#), dargestellt, daran die Abhängigkeit von Seltenen Erden durch fertigungstechnische Optimierungen zu reduzieren.

Im ersten Schritt wird ausgehend, von den in der 2. und 3. Generation verbauten Neodymagneten, der Terbium und Dysprosium Anteil reduziert. Im 2. Schritt wird von Toyota ein Teil des Neodymiums durch Lanthanum und Cerbium ersetzt, um die Produktionskosten zu senken und die Rohstoffabhängigkeit zu reduzieren.<sup>18</sup>

<sup>17</sup>Quelle [Abbildung 4.9](#): Release, 2018.

<sup>18</sup>Release, 2018.

## 4 Lösungsansätze

Element	Price USD / kg (2010-2018)	2th, 3th Generation		4th Generation		5th Generation	
		Prozent	Preis	Prozent	Preis	Prozent	Preis
Boron	11140	1	111,4	1	111,4	1	111,4
Iron	0,019-0,072	69	0,031	69	0,031	69	0,031
Terbium / Dysprosium	420-720 / 85-350	7	27,56	1	3,93	<0,1	<0,39
Neodymium	24-39	23	7,25	29	9,135	>21,9	6,90
Lanthanum / Cerium	2,1-3,9 / 1-4	0	0	0	0	8	0,22
Summe USD/kg			146,24		124,5		118,94

Tabelle 4.1: Materialkosten der Permanentmagnete, Zusammensetzung der Permanentmagnete laut Abbildung 4.9<sup>19</sup>

Da Toyota keine Fertigungs- bzw. Materialkosten für die jeweiligen Permanentmagnete angibt, wurde eine Bewertung der Materialkosten für die einzelnen Permanentmagnete durchgeführt.

In Tabelle 4.1 sind die Zusammensetzungen der einzelnen Permanentmagnete und die dazugehörigen Rohstoffpreise angeführt. Die Kosten der Permanentmagnete der 2. und 3. Generation des Prius betragen 146.24 USD/kg.

Die Rohstoffkosten, der in der 4. Generation verwendeten Permanentmagnete, betragen 124.5 USD/kg. Die Materialkosten wurden in diesem Schritt um 14.87 % reduziert.

Im darauffolgenden Entwicklungsschritt werden die Materialkosten auf 118.94 USD/kg reduziert. Wodurch eine weitere Senkung der Materialkosten um 4.46% erreicht wurde.

Die Weiterentwicklung der Neodymmagnete wird durch Optimierung der folgenden Punkte erreicht:

Eine Möglichkeit, die Temperaturbeständigkeit der Neodymmagnete zu erhöhen, besteht in der Korngrößenreduktion im Sinterprozess, da die Koerzitivität des Neodymmagneten hauptsächlich durch die Kornform, die Korngrenzen und Fehlstellen im Gefüge bestimmt wird.<sup>20</sup>

<sup>19</sup>Vgl. Chemicool.com, 2012.

<sup>19</sup>Vgl. chemicool.com, 2012.

<sup>19</sup>Vgl. contributors, 2018.

<sup>20</sup>Vgl. Kim u. a., 2013.

### 4.3 Reduktion der Seltene Erden

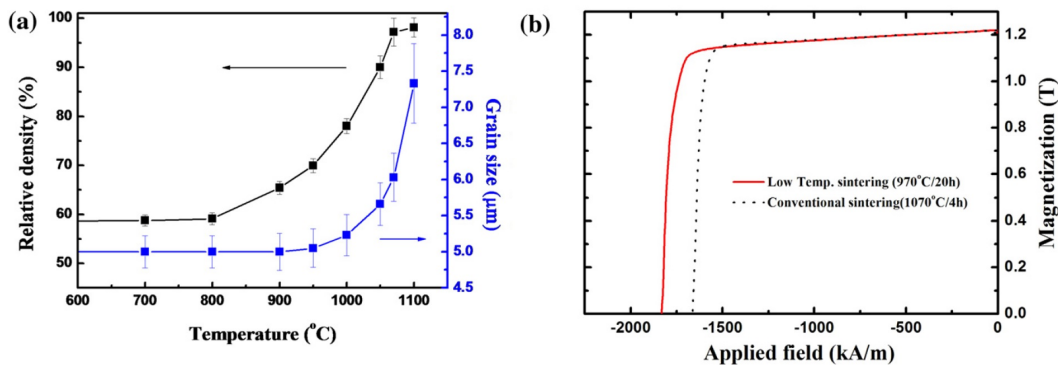


Abbildung 4.10: Seltene Erden Korngröße<sup>21</sup>

Um die Auswirkungen von einem langsamen, Niedrigtemperatur Sinterprozess auf die Koerzitivität zu untersuchen, wurde in [Abbildung 4.10](#) ein Vergleich der Demagnetisierungskurven bei unterschiedlichen Sinterprozessen betrachtet.

Ausgehend von dem Sinterpulver, mit einem Durchmesser von 5 µm steigt die mittlere Korngröße im Sinterprozess, wie in [Abbildung 4.10](#) dargestellt, mit der Sintertemperatur. Neben der mittleren Korngröße steigt die relative Dichte des gesinterten Permanentmagnetes.

Herkömmliche Neodymmagnete werden bei über 1000° industriell gesintert. Dadurch steigt die mittlere Korngröße, ausgehend vom Sinterpulver, des Permanentmagnetes.

In [Abbildung 4.10](#) auf der rechten Seite ist die Entmagnetisierungskurve der gesinterten Permanentmagnete dargestellt. Im Vergleich zu dem konventionell gesinterten Permanentmagnet steigt die für die Entmagnetisierung benötigte Feldstärke um 151kA/m.<sup>22</sup>

Toyota geht in der Verfeinerung der Korngröße noch einen Schritt weiter und reduziert die Korngröße, wie in [Abbildung 4.11](#) dargestellt, von 5 µm auf 0,25 µm. Dadurch erhöht sich die Korngrenzschicht um den Faktor 10,

<sup>21</sup>Quelle [Abbildung 4.10](#): Kim u. a., 2013.

<sup>22</sup>Vgl. Kim u. a., 2013.

## 4 Lösungsansätze

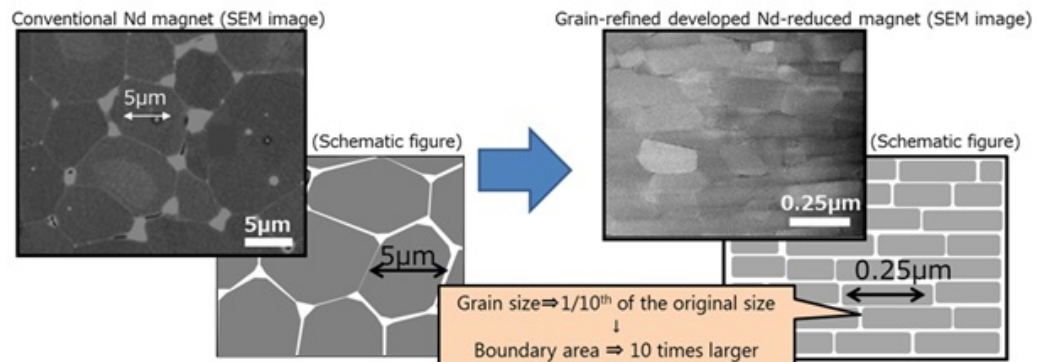


Abbildung 4.11: Seltene Erden Korngrenze<sup>23</sup>

wodurch die Koerzitivitätsfeldstärke ansteigt, ohne zusätzlich Dysprosium für die Produktion zu benötigen.

Von Seiten Toyotas wurden keine Daten über die Verbesserung der Demagnetisierungseigenschaften veröffentlicht. In der in [Abbildung 4.10](#) dargestellten Studie wurde eine Reduktion der Korngröße von  $7,3 \mu\text{m}$  auf  $5,5 \mu\text{m}$  beschrieben und dadurch eine Steigerung von  $1600 \text{ kA/m}$  um  $151 \text{ kA/m}$  auf  $1751 \text{ kA/m}$  erzielt. Dies entspricht einer 10% Steigerung der Koerzitivfeldstärke.

Als zweiten Innovationspunkt führt Toyota eine zweischichtige Kernstruktur an. Da die Koerzitivfeldstärke sehr stark durch die Korngrenze und Korngröße bestimmt ist optimiert Toyota die Kornproduktion vor dem Sinterprozess.

Im von Toyota entwickelten Korn ist die Neodymkonzentration an der Korngrenze erhöht und im Korninneren reduziert. Dadurch reduziert sich die benötigte Neodymmenge bei gleichbleibenden magnetischen Eigenschaften.

Als dritter Entwicklungspunkt wird der Kornkern durch eine Mischung von Lanthanum und Cerium als magnetisches Material ersetzt, ohne die magnetischen Eigenschaften des gesamten Permanentmagneten negativ zu beeinflussen.

<sup>23</sup>Quelle [Abbildung 4.11](#): Kim u. a., 2013.



### 4.3 Reduktion der Seltene Erden

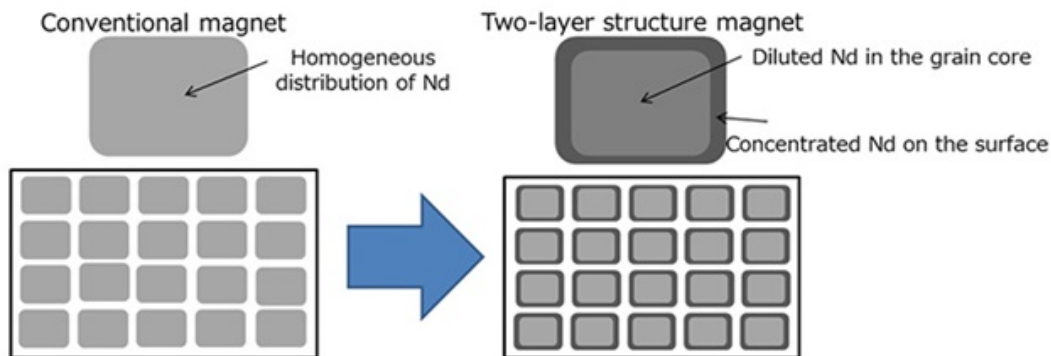


Abbildung 4.12: Seltene Erden Two Layer<sup>24</sup>

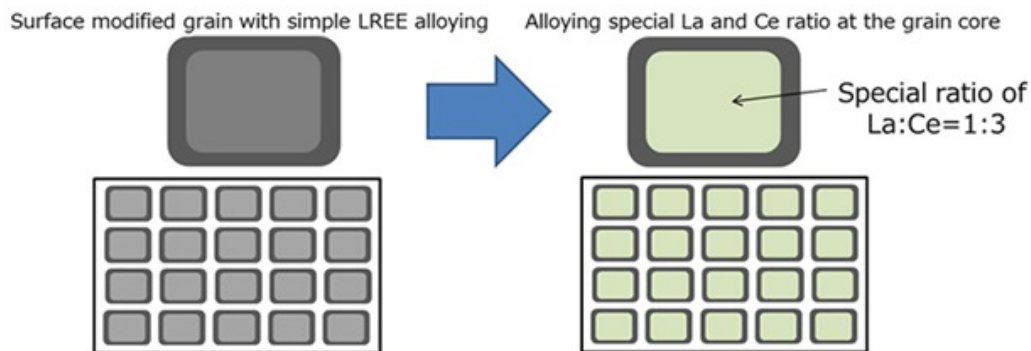


Abbildung 4.13: Seltene Erden LaCe<sup>26</sup>

Bei einfacher Beimengung von Lanthanum und Cerium sinkt die Koerzitivfeldstärke und die maximale Anwendungstemperatur sehr stark. Durch ein spezielles Mischungsverhältnis, nur im Kornkern, werden die Eigenschaften des Permanentmagneten nicht verändert.<sup>25</sup>

In [Abbildung 4.14](#) ist die erzielte Performance von den von Toyota entwickelten Permanentmagneten dargestellt. Der konventionelle Neodymmagnet hat bei 100° eine höhere Koerzitivität als der Magnet mit reduziertem

<sup>24</sup>Quelle [Abbildung 4.12](#): Release, 2018.

<sup>25</sup>Vgl. Release, 2018.

<sup>26</sup>Quelle [Abbildung 4.13](#): Release, 2018.

## 4 Lösungsansätze

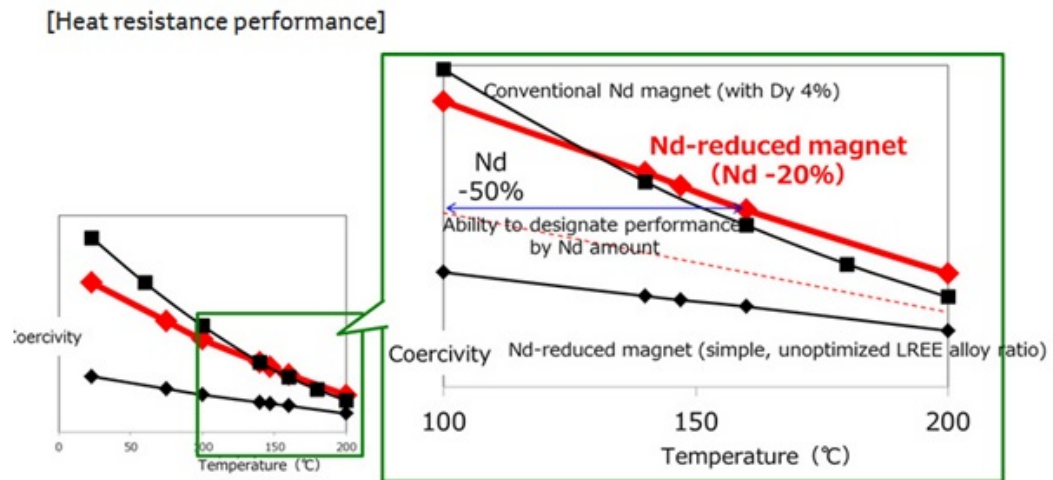


Abbildung 4.14: Seltene Erden Performance<sup>27</sup>

Anteil.

Bei der Anwendungstemperatur im Motor weist er allerdings eine höhere Koerzitivfeldstärke auf, wodurch die Substitution nicht nur die Kosten senkt, sondern auch die magnetischen Eigenschaften verbessert.

### 4.3.2 Weiterentwicklung des Rotordesigns

Neben der Verbesserung der Permanentmagnete wird momentan als zweiter Ansatz eine Verbesserung des Rotordesigns zur Reduktion des benötigten Magnetmaterials verfolgt. Durch die Verbesserung im Rotordesign können Kosten im Vergleich zum Grundmotor eingespart werden.

Die Reduktion der benötigten Permanentmagnete beruht auf einer Kombination des Synchronmotors und des Reluktanzmotors. Das Drehmoment des Synchronmotors wird mit Hilfe des magnetischen Feldes im Rotor

<sup>27</sup>Quelle [Abbildung 4.14](#): Release, 2018.

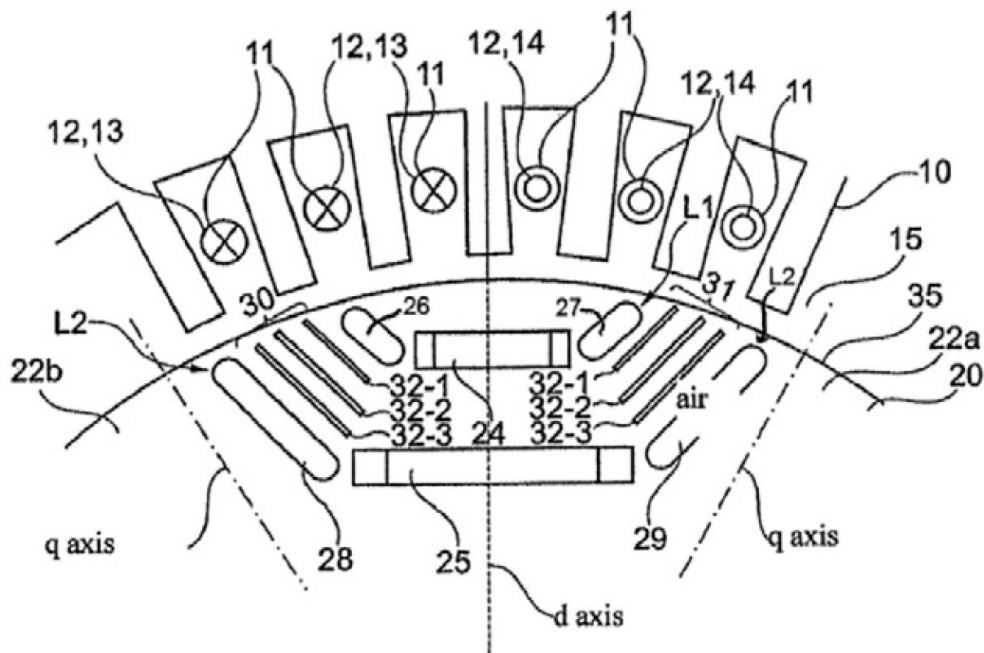


Abbildung 4.15: Rotorlayout mit einer Kombination aus Reluktanz- und Synchronmotor<sup>28</sup>

generiert. In einer Kombination zwischen Synchronmotor und Reluktanzmotor wird dem, durch die Permanentmagnete erzeugten Magnetfeld, die Reluktanzkraft überlagert.

In [Abbildung 4.15](#) ist der Rotoraufbau eines kombinierten Elektromotors dargestellt. Die Permanentmagnete sind in der Mitte der Abbildung, mit den Nummerierungen 24 und 25, dargestellt.

Die Nummern 26,27,28 und 29 bezeichnen Ausschnitte im Elektroblech, die zur Unterbrechung des Reluktanzflusses benötigt werden. Die mit 32 bezeichneten Elemente, lenken den, durch die Reluktanzkraft erzeugten magnetischen Fluss, durch den Rotor.

Der magnetische Pol des Synchronmotors wird senkrecht, entlang der in [Abbildung 4.15](#) dargestellten, d axis ausgebildet. In Summe stellt der Rotor

<sup>27</sup>Vgl. Widmer, Martin und Kimiabeigi, 2015.

<sup>28</sup>Quelle [Abbildung 4.15](#): Widmer, Martin und Kimiabeigi, 2015.

## 4 Lösungsansätze

daher eine Mischung aus einem permanent erregten Synchronmotor und einem Reluktanzmotor dar.

Im BMW i3 wird der dargestellte Rotor mit reduziertem Magnetmaterial verbaut. Der in [Abbildung 4.15](#) dargestellte Elektromotor erzeugt 125 kW und 250 Nm Drehmoment mit Hilfe von 1 kg Permanentmagnete.<sup>29</sup>

Im Vergleich dazu benötigt der permanent erregte Synchronmotor des Nissan Leaf, mit einer Spitzenleistung von 80 kW und einem Drehmoment von 280 Nm, 2 kg Permanentmagnete.<sup>30</sup>

Die Reduktion der Permanentmagnete und die Berechnung der Kombination von beiden Elektromotortypen, wurde ausgehend von einem permanent erregten Synchronmotor, mit Hilfe von Simulationen durchgeführt.

Für die Serienfertigung von Elektromotoren ist eine Kombination, der verbesserten magnetischen Materialien und des verbesserten Rotordesigns, eine Möglichkeit die Kosten zu senken, wobei eine Verbesserung der Eigenschaften und Reduktion der Verluste das Ziel ist.

### 4.4 Soft Magnetic Composite

Die beschriebenen Fertigungsverfahren betrachten die Fertigung der Rotor- bzw. Statorkerne mit Hilfe von Elektroblech. Die Entwicklung des Elektrobleches begann, wie in [Abbildung 4.16](#) dargestellt, Anfang 1900. Im Laufe der Zeit wurden die Eigenschaften der Elektrobleche ständig verbessert und verschiedene Blechlegierungen entwickelt.

Die Fertigung der Rotor- bzw. Statorkerne aus Elektroblech wurde optimiert, um eine gute Blechausnutzung und eine einfache Bewicklung der Kerne zu ermöglichen. Die benötigten Fertigungsschritte in der Herstellung von Kernen aus Elektroblech verursachen in der Serienfertigung trotz der Optimierungen hohe Kosten, die detailliert im Kapitel Herausforderungen aufgelistet sind.

---

<sup>29</sup>Vgl. Widmer, Martin und Kimiabeigi, 2015, S.9.

<sup>30</sup>Vgl. Widmer, Martin und Kimiabeigi, 2015, S.9.

## 4.4 Soft Magnetic Composite

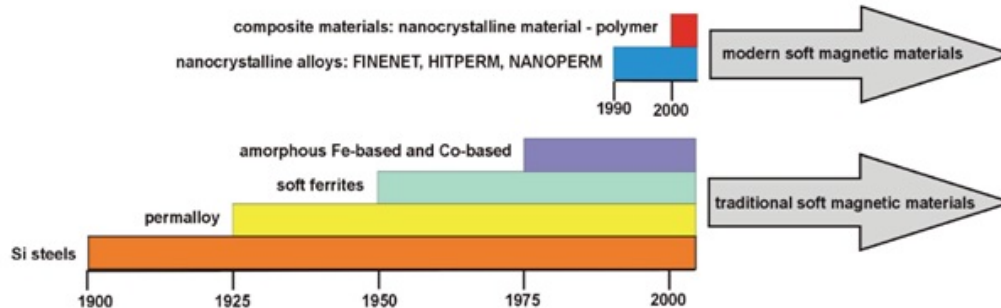


Abbildung 4.16: SMC - Zeitliche Entwicklung<sup>31</sup>

In der Motorenentwicklung limitiert der Einsatz von Elektroblech die Geometrie auf zweidimensionale Querschnitte, da für die Fertigung Schichten aus Elektroblech gestapelt und miteinander verbunden werden.

In der Massenproduktion der Elektronikindustrie wurden bereits in den 1950er Jahren Ferrite als Alternative zu Elektroblech entwickelt, da sich Bauteile aus Ferrit direkt im Sinterprozess fertigen lassen.

Ferrite werden in der Elektrotechnik für den Bau von Drosseln, Spulen und Transformatoren eingesetzt. Aufgrund der geringen maximalen Flussdichte eignen sich Ferrite nicht für den Einsatz im Elektromotor.<sup>32</sup>

Um die einfache Fertigung der Ferritkerne mit den elektrischen Eigenschaften der Elektrobleche zu kombinieren werden seit 1990 Soft Magnetic Composites, kurz SMC, entwickelt.

Stator- bzw. Rotorkerne, die direkt aus SMCs gefertigt werden, ermöglichen eine kostengünstige Fertigung bei sehr großen Stückzahlen. Im Gegensatz zu Elektroblech bieten SMCs isotrope magnetische Eigenschaften.

Stator- bzw. Rotorkerne, die für Elektrobleche mit anisotropen Eigenschaften entwickelt wurden, können daher, bei gleichen Eigenschaften, nicht direkt durch SMCs ersetzt werden.

<sup>31</sup>Quelle [Abbildung 4.16](#): A. Dobrzański, Drak und Bogusław, 2007.

<sup>32</sup>Vgl. A. Dobrzański, Drak und Bogusław, 2007.

#### 4 Lösungsansätze

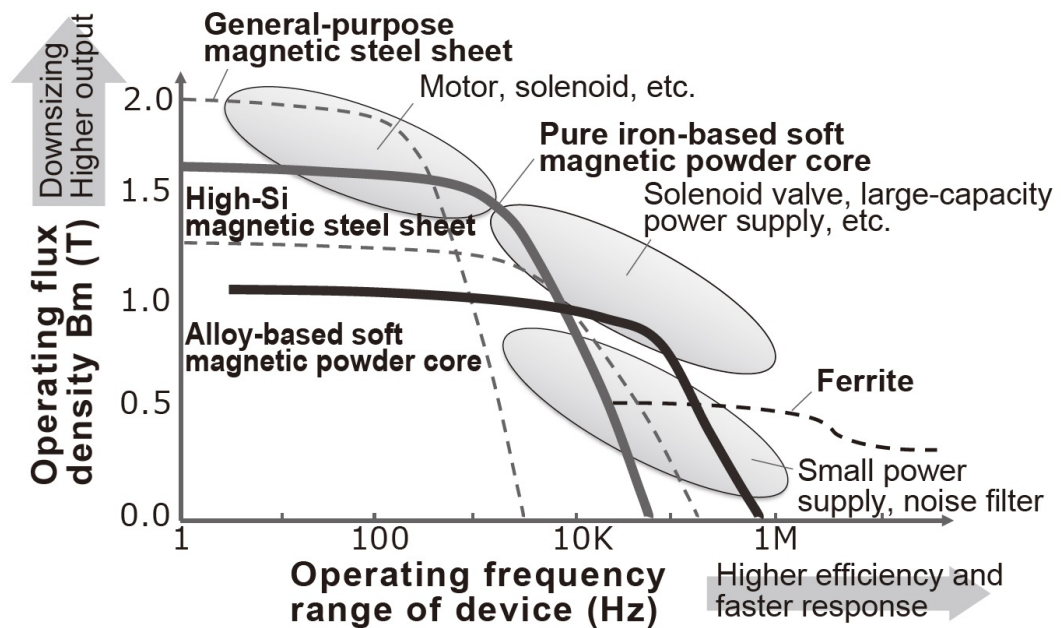


Abbildung 4.17: SMC - Flussdichte Frequenzgang<sup>33</sup>

In [Abbildung 4.17](#) ist die maximale Flussdichte der unterschiedlichen, weichmagnetischen Werkstoffe über die Frequenz aufgetragen. Elektrobleche weisen, wie in [Abbildung 4.17](#) dargestellt, eine sehr hohe magnetische Flussdichte bei niedriger Schaltfrequenz auf.

Für die in den theoretischen Grundlagen beschriebenen Motorlayouts, dem Asynchron- bzw. dem Synchronmotor, eignen sich die Elektrobleche aufgrund der hohen maximalen Flussdichte sehr gut.

Soft Magnetic Composites erreichen im Gegensatz zu den Elektroblechen eine geringere maximale Flussdichte. Die Flussdichte wird, im Gegensatz zum Elektroblech in alle Richtungen, isotrop erzielt.

Die geringere maximale Flussdichte lässt sich durch neuartige Motorlayouts, die den magnetischen Fluss dreidimensional lenken, kompensieren.

SMC Kerne werden im Sinterprozess aus Pulver hergestellt, wodurch im

<sup>33</sup>Quelle [Abbildung 4.17](#): Ueno u. a., 2016.

## 4.4 Soft Magnetic Composite

Vergleich zu Elektrolech der Produktionsaufwand und die Durchlaufzeit deutlich reduziert werden kann.

Für die Produktion von SMC Kernen wird ein Pulver, mit einer Partikelgröße von 50 bis 300  $\mu\text{m}$  erzeugt. Die einzelnen Partikel werden anschließend elektrisch isoliert. Die im Prozess erzielte Isolierfilmdicke liegt in einem Bereich von 20 bis 200 nm. Das hergestellte Pulver wird mit Schmiermittel und Binder gemischt und in die Form eingefüllt.

Anschließend wird das Pulver gepresst und bei 400° bis 800° Celsius wärmebehandelt. Im Gegensatz zum Sinterprozess werden die Partikel nicht verschmolzen, sondern durch den Isolationsfilm und das Bindemittel zusammengehalten. Die einzelnen Partikel sind im fertigen SMC Kern untereinander isoliert.

In [Abbildung 4.18](#) sind sowohl ein Kern aus Elektrolech und ein Kern aus SMC dargestellt. Der Stator Kern aus Elektrolech besteht aus einzelnen Blechschichten, die untereinander isoliert sind. Der Stator Kern aus Elektrolech kann den magnetischen Fluss nur zweidimensional entlang der Blechrichtung leiten.

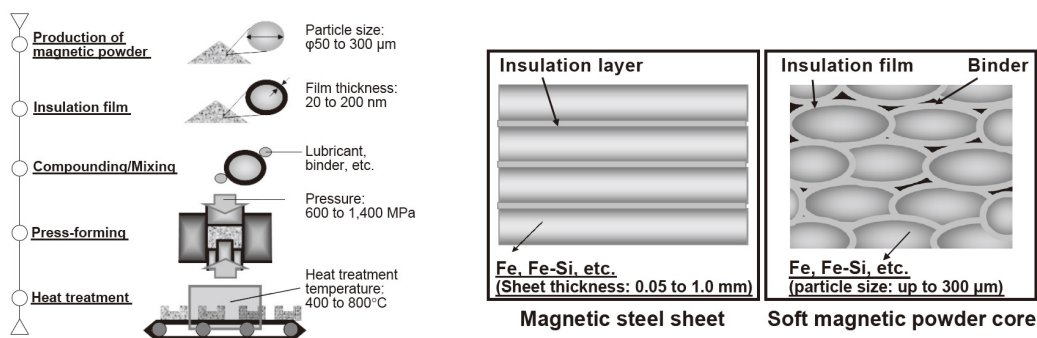


Abbildung 4.18: SMC Fertigungsablauf<sup>34</sup>

Der SMC Stator Kern besteht aus einzelnen Partikeln, die untereinander elektrisch isoliert sind. Der Werkstoff ist isotrop aufgebaut und kann daher

<sup>34</sup>Quelle [Abbildung 4.18](#): Ueno u. a., 2016.

## 4 Lösungsansätze

den magnetischen Fluss dreidimensional leiten. Die beiden Werkstoffe sind daher bezüglich ihrer Eigenschaften nicht direkt miteinander vergleichbar.

Neben den magnetischen Eigenschaften unterscheiden sich auch die mechanischen Eigenschaften der beiden Werkstoffe. Elektroblech bietet in Richtung der einzelnen Bleche eine hohe Zugfestigkeit und in Richtung der Laminierung eine geringe. In Rotorlayouts wird das Elektroblech immer in Richtung der Elektrobleche beansprucht.

Im Gegensatz zu dem Elektroblech bieten Rotorkerne, die aus SMC gefertigt sind, gleichmäßige, mechanische Eigenschaften. Da die einzelnen Partikel durch das Bindemittel und den Isolierfilm miteinander verbunden sind, ergibt sich eine niedrige Zugfestigkeit.<sup>35</sup>

Im Zuge der Masterarbeit wurden unterschiedliche Elektrobleche und SMC Werkstoffe bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften verglichen und in einem Diagramm dargestellt. Die Festigkeitswerte der einzelnen Werkstoffe sind in Korrelation zu dem jeweiligen E-Modul dargestellt, da der E-Modul der SMC Werkstoffe abhängig vom Mischungsverhältnis und variiert.

In [Abbildung 4.19](#) ist die Zugfestigkeit der ISOVAC Elektrobleche, hergestellt von der Voestalpine, in Rot dargestellt.

Für die SMC Legierung Somaloy des Herstellers Höganäs sind die einzelnen Druckfestigkeits- und Zugfestigkeitswerte des SMC Werkstoffs in [Abbildung 4.19](#) dargestellt.

Die Zugfestigkeitswerte der unterschiedlichen SMC Legierungen sind Blau und die Druckfestigkeitswerte Grün markiert.

Die Elektrobleche, des Typs Somaloy, weisen je nach Typ eine Streckgrenze von 310 bis 380 MPa auf. Die Zugfestigkeit der Elektrobleche liegt zwischen 380 und 505 MPa.<sup>36</sup>

Die Zugfestigkeit der SMC Kerne variiert, je nach Werkstoff, zwischen 10 und 70 MPa. Die Druckfestigkeitswerte der SMC Werkstoffe variieren zwischen 270 und 650 MPa.<sup>37</sup>

---

<sup>35</sup>Vgl. Ueno u. a., 2016.

<sup>36</sup>Vgl. Voestalpine, 2015.

<sup>37</sup>Vgl. Voestalpine, 2015.



## 4.4 Soft Magnetic Composite

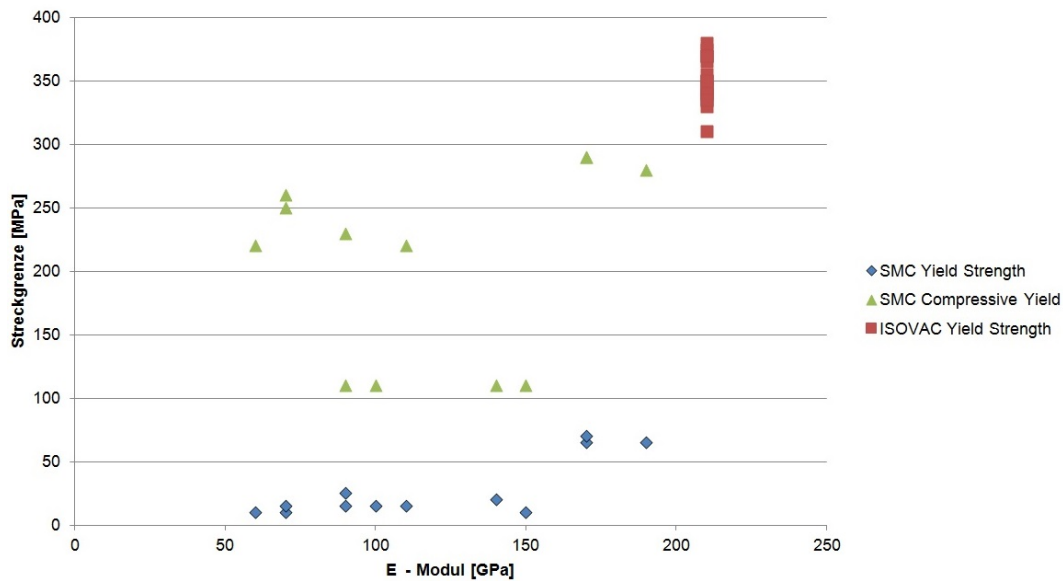


Abbildung 4.19: SMC vs. Elektroblech Festigkeit<sup>38</sup>

SMC Rotorkerne, die in Elektromotoren, eingesetzt werden, müssen bei hohen Drehzahlen konstruktiv gestützt werden. Oberflächenmontierte Permanentmagnete werden bei hohen Drehzahlen, aufgrund der geringen Festigkeit, mit Hilfe von einer Bandage befestigt.

In [Abbildung 4.20](#) ist eine Rotorbauweise für zukünftige SMC Rotoren dargestellt. Der Rotor ist in einer Verbundbauweise gefertigt. Zur Lagerung des Rotors wurden an beiden Wellenenden Stahleinlagen mit der Welle aus Kohlefaser verbunden.

Der Rotorkern aus SMC Material ist auf einem Kunststoffträger montiert und mit der Welle verbunden. Die Permanentmagnete sind auf dem SMC Magnetträger montiert und mit einer Aramidfaser als Bandage befestigt. Die Bandage stützt hierbei sowohl die Permanentmagnete als auch den SMC Rotor.

<sup>38</sup>Högans, 2017, Quelle [Abbildung 4.19](#):

<sup>38</sup>Quelle [Abbildung 4.19](#): Voestalpine, 2015.

#### 4 Lösungsansätze

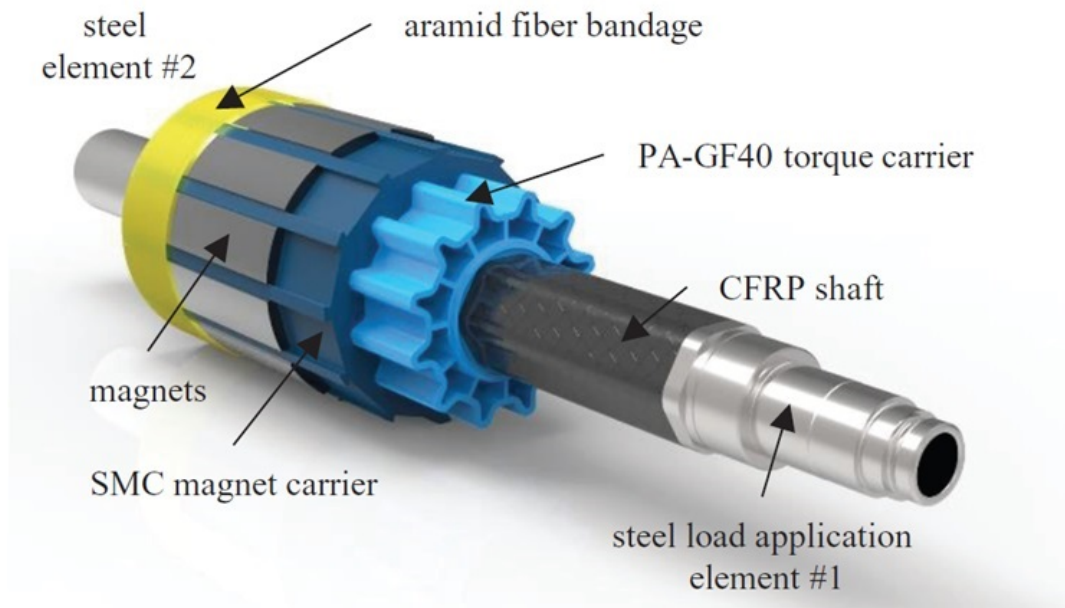


Abbildung 4.20: SMC Bandage<sup>39</sup>

Mit Hilfe der Kombination von SMC und der Welle aus Kohlefaser wurde für den schnell laufenden Rotor eine Gewichtsreduktion erzielt. Dies ist speziell für die erhöhte Dynamik in Automobilanwendungen wichtig.

Zur Effizienzsteigerung bei dem Einsatz von SMC Werkstoffen sind neuartige Motorkonzepte notwendig. In [Abbildung 4.21](#) ist ein Transversallflussmotor aus SMC Werkstoffen abgebildet. Der Motor, Type DYNAX MG125-48V, wird für Hybridantriebsstränge angeboten.

Der abgebildete Motor, wird im Gegensatz zu den im Elektrofahrzeug eingesetzten Antriebsmotoren bei einer Bordspannung von 48 Volt betrieben, wodurch höhere Verluste aufgrund der hohen Motorströme auftreten.

In [Abbildung 4.21](#) ist der Systemwirkungsgrad des Antriebsmotors mit der Motorelektronik abgebildet. Der maximale Wirkungsgrad liegt bei 90%. Im Teillastbereich sinkt der Wirkungsgrad deutlich.

<sup>39</sup>Quelle [Abbildung 4.20](#): Koch, Peter und Fleischer, 2017b.

## 4.4 Soft Magnetic Composite

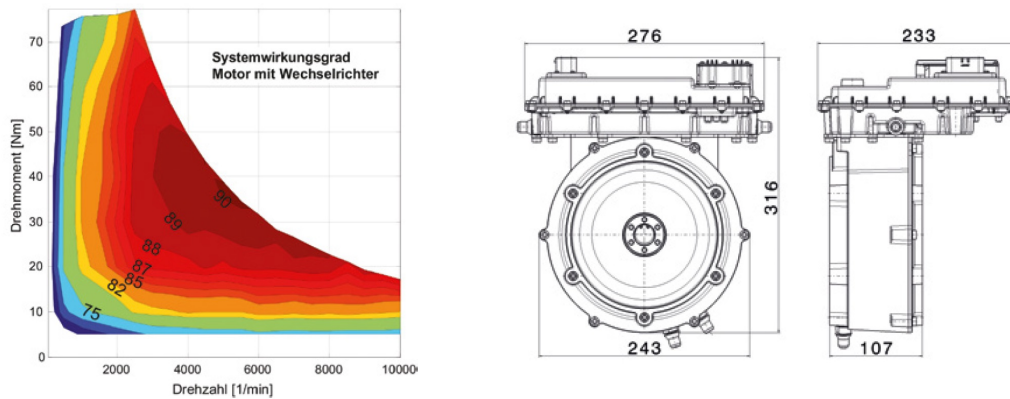


Abbildung 4.21: SMC Transversalfussmotor DYNAX MG25-48<sup>40</sup>

	DYNAX®MG25-48
Leistungselektronik	integriert
Versorgungsspannung DC	42 V – 58 V
Leistung maximal	25 kW (bei 58 V)
Dauerleistung	20 kW
Maximaldrehmoment	75 Nm
Maximaldrehzahl	10.000 U/min
Gewicht	14 kg

Abbildung 4.22: DYNAX MG25-48 Leistungsdaten<sup>41</sup>

Auf der rechten Seite der [Abbildung 4.21](#) sind die Abmessungen des Elektromotors abgebildet. Der Elektromotor hat einen Durchmesser von 243 mm und eine Tiefe von 107 mm.

In [Abbildung 4.22](#) sind die Leistungsdaten des Elektromotors dargestellt. Der Elektromotor weist eine Maximalleistung von 25 kW und eine Maximaldrehzahl von 10.000 U/min auf. Das Gesamtgewicht der Motor Elektronik Kombination beträgt 14 kg.

<sup>40</sup>Quelle [Abbildung 4.21](#): Schaeffler, 2018.

<sup>41</sup>Quelle [Abbildung 4.22](#): Schaeffler, 2018.



# 5 Ergebnisse

Basierend auf den in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Fertigungsmöglichkeiten und Herausforderungen werden im Zuge der Masterarbeit Ablaufdiagramme erstellt. Die Diagramme sollen einerseits die Abläufe in der Fertigung übersichtlich darstellen und andererseits die Auswahl des für die Anwendung passenden Motortyps erleichtern.

## 5.1 Vereinfachte Motorauswahl

Im Gegensatz zu den heute verbreiteten Verbrennungsmotoren gibt es im Elektromotorbereich noch keine etablierten Standards. Die Auswahl des für die Anwendung passenden Elektromotortyps ist daher eine zentrale Entscheidung in der Elektromotorenentwicklung.

Die im folgenden Kapitel dargestellten Flussdiagramme gehen dabei speziell auf die in den vorangegangenen Kapiteln dargelegten Anforderungen für den Einsatz im Kraftfahrzeug ein und vereinfachen die Motorauswahl.

### 5.1.1 Flussdiagramm Motorauswahl

In [Abbildung 5.1](#) ist zur leichteren Beurteilung ein Überblick über die einzelnen Eigenschaften der Motortypen und die Auswirkungen auf die Entwicklung dargestellt.

Im ersten Schritt werden die geometrischen Einschränkungen des Elektromotors festgelegt. Zylindrische Motoren können mit allen Motortypen gefertigt werden.

## 5 Ergebnisse

Scheibenförmige Motoren, die z.B.: in der Schwungscheibe als Hybridantrieb integriert sein können, werden im Idealfall als Synchronmotor mit permanenterregtem Rotor ausgeführt. Asynchronmotoren bieten bei dieser Bauform aufgrund der stark verkürzten Rotorstäbe nur einen sehr schlechten Wirkungsgrad.

Im nächsten Schritt wird im Punkt Geometrie die Wichtigkeit der Leistungsdichte beurteilt. Synchronmotoren bieten aufgrund des permanent erregten Rotors die höchste Leistungsdichte.

Bauformen, bei denen der Rotor, durch das Statormagnetfeld erregt wird, bieten aufgrund der Fremderregung eine geringere Leistungsdichte.

Im zweiten Punkt steht die Effizienz zur Auswahl. Synchronmotoren bieten aufgrund des permanent erregten Rotors einen sehr guten Wirkungsgrad bei einem bestimmten Betriebspunkt. Im Kraftfahrzeug wird der Motor meist im Teillastbereich, bei einer vom optimalen Betriebspunkt abweichenden Drehzahl, betrieben.

Für den Teillastbereich bieten Elektromotortypen mit einem fremderregten Rotor, aufgrund des erweiterten Feldschwächebetriebes einen guten Wirkungsgrad.

Im nächsten Punkt stehen die benötigten Ressourcen zur Auswahl. Wie im vorangegangenen Kapitel dargelegt, unterliegen die "Seltene Erden"-Restriktionen in der Verfügbarkeit und schwankenden Rohstoffpreisen.

Speziell in der Motorentwicklung, für eine Automobilplattform, sind die für die Fertigung benötigten Ressourcen zu berücksichtigen. Neben dem aktuellen Preis ist hierbei zusätzlich die langfristige Verfügbarkeit und der Produktionsstandort in die Planung einzubeziehen.

Die Motorleistung und die zulässige Überlastleistung werden im nächsten Punkt ausgewählt. Synchronmotoren bieten die größte Überlastmöglichkeit. Allerdings werden hierfür vermehrt "Seltene Erden" für Temperaturfestigkeitserhöhung der Permanentmagnete benötigt, da ansonsten eine Demagnetisierung und damit eine permanente Schädigung des Elektromotors auftreten kann.

## 5.1 Vereinfachte Motorauswahl

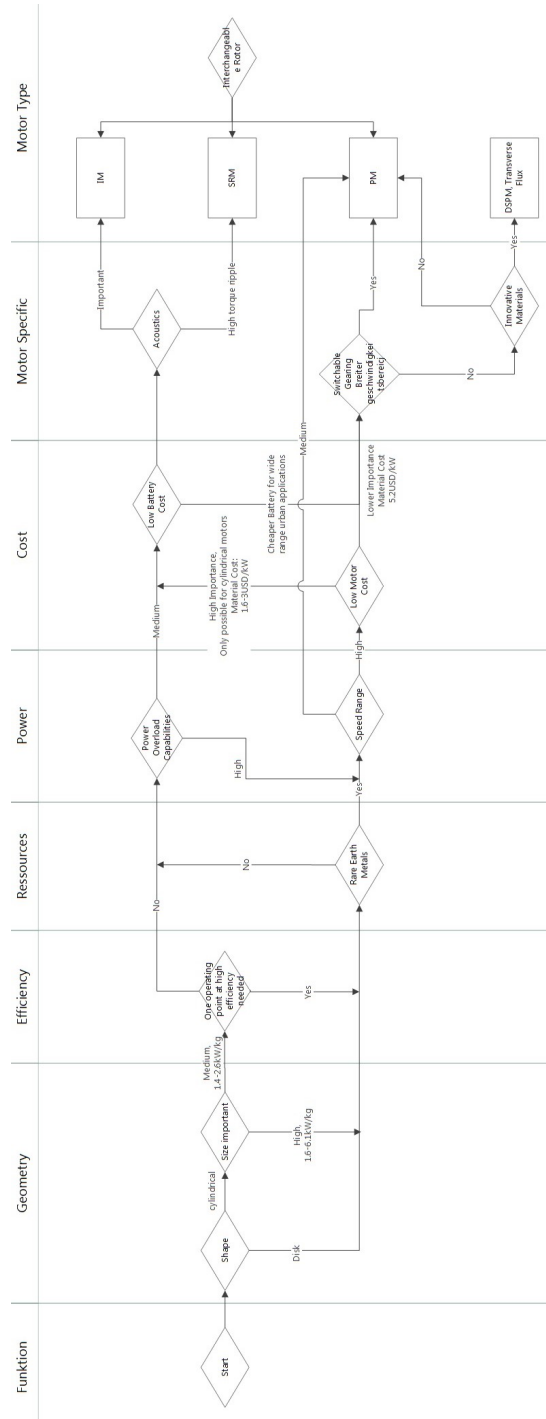


Abbildung 5.1: Flussdiagramm zur Motorauswahl

## 5 Ergebnisse

Asynchronmotoren und Reluktanzmotoren sind aufgrund des Aufbaus ohne Permanentmagnete weniger temperaturempfindlich und daher robuster als Synchronmotoren.

Der Geschwindigkeitsbereich, indem der Motor eingesetzt wird, ist für die Auswahl des Elektromotors wichtig. Synchronmotoren bieten bei einem beschränkten Drehzahlbereich einen sehr guten Wirkungsgrad, während andere Elektromotortypen ein breiteres Geschwindigkeitsspektrum bei einem guten Wirkungsgrad abdecken.

Die Kosten des Elektromotors und der Batterie sind stark voneinander abhängig. Zusätzlich beeinflusst werden beide Komponenten durch die Aerodynamik des Fahrzeuges, dem angestrebten Geschwindigkeitsbereich und der benötigten Reichweite.

Eine Erhöhung der Elektromotoreffizienz führt zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs und damit direkt zu Einsparungen in der Batterie bei gleicher Reichweite. Umgekehrt kann bei einer teureren Batterie ein günstigerer Elektromotor verbaut werden.

Zwischen Asynchronmotor und Reluktanzmotor ist der Hauptunterscheidungspunkt die Akustik. Der Reluktanzmotor ist aufgrund der Drehmomentschwankungen im Fahrzeug hörbar und muss verstärkt schallisoliert werden.

Zwischen dem permanenterregten Synchronmotor und neueren Designs ist bei einem hohen Geschwindigkeitsbereich die Einbaumöglichkeit eines Getriebes entscheidend für einen guten Wirkungsgrad. Alternativ kann der Wirkungsgrad durch den Umstieg auf ein anderes Elektromotorlayout verbessert werden.

### 5.1.2 Asynchronmotor Rotor

In [Abbildung 5.2](#) ist das Flussdiagramm für den Rotor des Asynchronmotors dargestellt, dessen Aufbau stark vom Rotortyp abhängig ist.



## 5.1 Vereinfachte Motorauswahl

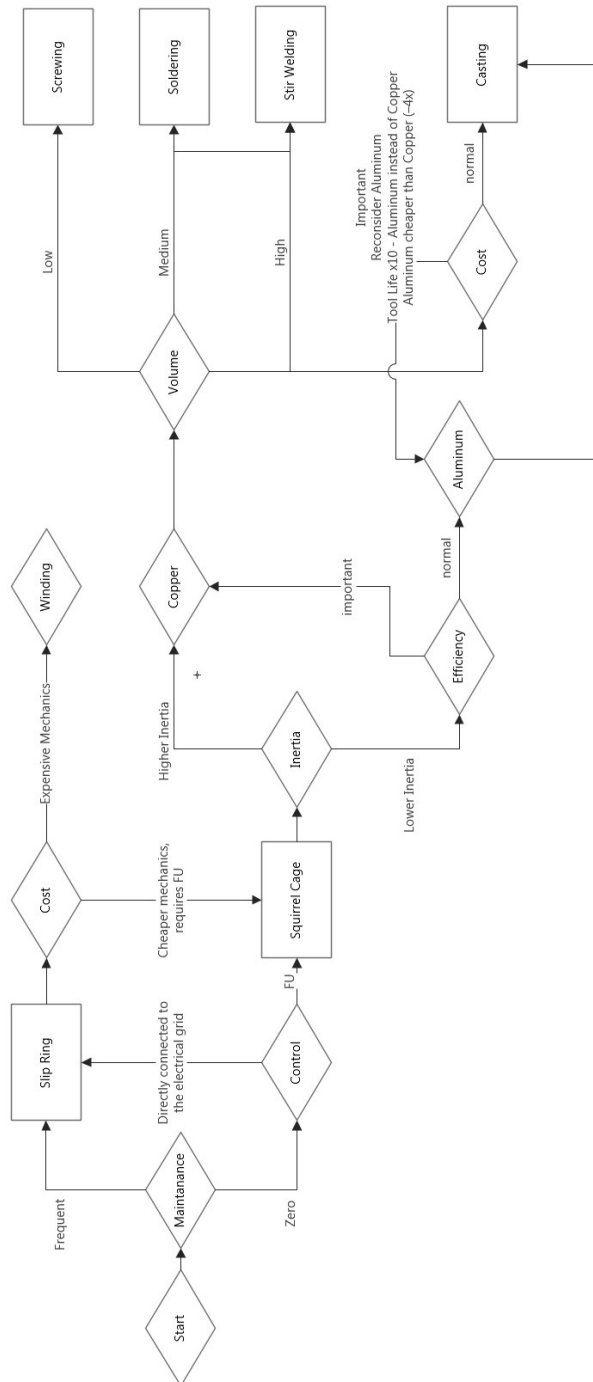


Abbildung 5.2: Asynchronmotor Rotor

## 5 Ergebnisse

Im stationären Betrieb werden meist Schleifringläufer verbaut. Im Kraftfahrzeug werden aufgrund der einfacheren Bauweise und geringeren Wartungsanfälligkeit Käfigläufer eingebaut.

In der Fertigung des Rotors besteht die Möglichkeit, den Rotor aus Aluminium oder Kupfer aufzubauen. Aluminium bietet dabei ein geringeres Massenträgheitsmoment, mit dem Nachteil einer geringeren Rotoreffizienz.

Die Wahl des Rotorwerkstoffes hat dabei Auswirkungen auf die Fertigung. Rotoren aus Aluminium und Kupfer können im Gussverfahren in der Massenproduktion hergestellt werden. Die Gussformen für Aluminium sind dabei ungefähr um den Faktor 10 langlebiger als die Gussformen für Kupfer. Dadurch entstehen in der Serienfertigung deutliche Preisunterschiede.

Alternativ können die Rotorstäbe, je nach Produktionsvolumen geschraubt, gelötet oder mit Reibschweißen verbunden werden. Schrauben wird bei sehr kleinen Produktionsvolumen eingesetzt. Lötten reduziert aufgrund der schlechteren Leitfähigkeit des Lotes die Effizienz. Reibschweißen stellt für ein breites Spektrum an Produktionsvolumina eine mögliche Alternative zu den anderen Fertigungsverfahren dar.

### 5.1.3 Synchronmotor Rotor

In [Abbildung 5.3](#) ist das Flussdiagramm des Synchronmotors dargestellt.

Die bekannteste Form des Synchronmotors ist der permanenterregte Synchronmotor. Alternativ kann das Rotormagnetfeld des Synchronmotors mit Hilfe von Wicklungen erzeugt werden oder der Rotor des Synchronmotors als Reluktanzmotor ausgeführt werden.

Aufgrund des höheren Wirkungsgrades und des ruhigeren Laufes wird meist der permanenterregte Rotor eingebaut. Im Flussdiagramm in [Abbildung 5.3](#) ist die Entscheidungsmöglichkeit zwischen den drei Rotortypen dargestellt.

Beim permanenterregten Synchronmotor beeinflusst die Position der Magnete die Fertigungskosten. Je tiefer die Magnete im Blechpaket vergraben

## 5.1 Vereinfachte Motorauswahl

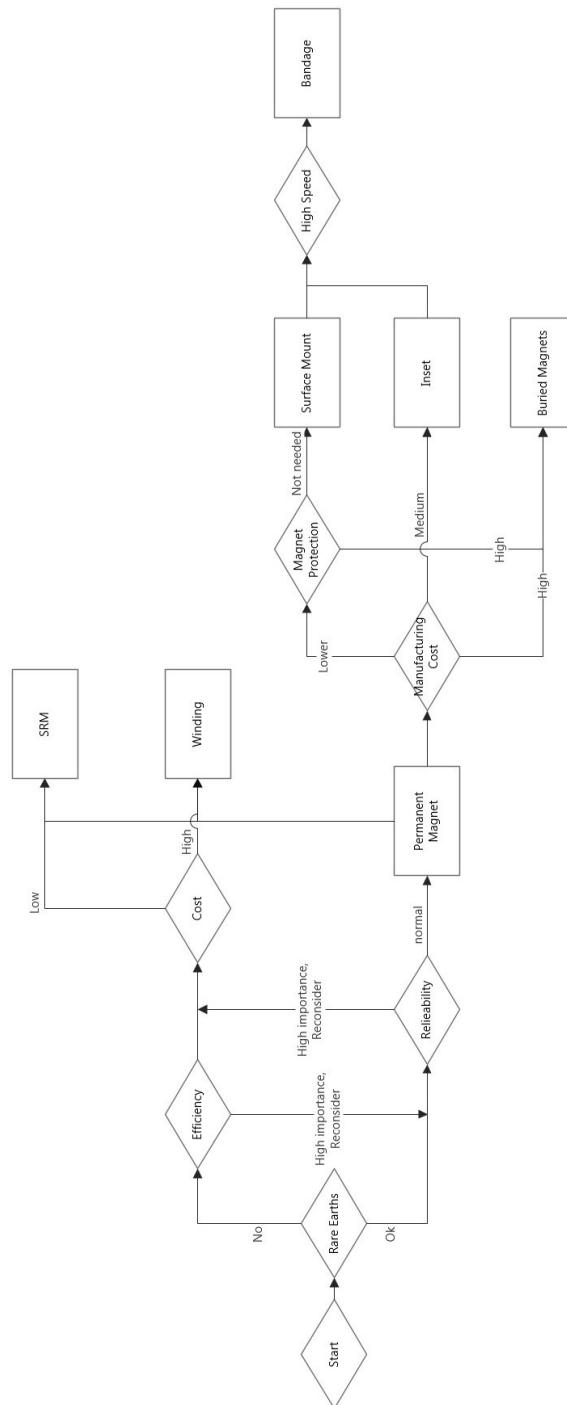


Abbildung 5.3: Synchronmotor Rotor

## 5 Ergebnisse

werden, desto besser sind diese gegen Magnetfeldspitzen geschützt. Die Fertigung des Rotors mit vergrabenen Magneten ist allerdings, um einiges aufwendiger, als die Fertigung eines Rotors mit Oberflächenmagneten.

Bei Magneten, die an der Oberfläche montiert sind, muss bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten zusätzlich eine Bandage angebracht werden, um die Magnete am Rotor zu fixieren.

### 5.1.4 Stator

Der Aufbau des Stators unterscheidet sich bei Asynchron- und Synchronmotor hauptsächlich durch die Wicklung. Beim Asynchronmotor wird zur Glättung des Erregerfeldes meist eine verteilte Wicklung verwendet. Beim Synchronmotor werden im Gegensatz dazu konzentrierte Wicklungen verwendet.

Im Flussdiagramm, dargestellt in [Abbildung 5.4](#), sind die unterschiedlichen Fertigungsmöglichkeiten dargestellt. Grundsätzlich kann zwischen dem Aufbau eines geschlossenen und eines segmentierten Stators unterschieden werden.

Der geschlossene Stator bietet aufgrund des durchgehenden magnetischen Flusses einen besseren Wirkungsgrad als der segmentierte, in dem der magnetische Fluss zwischen den Polschuhen durch die Segmente unterbrochen ist.

Die Wicklungsarten und dabei auch die Zeit, die für die Wicklung benötigt wird, ist vom Aufbau des Stators abhängig. Bei der Nadelwicklung wird die Wicklung mit Hilfe einer Nadel in den Nutschlitz eingebracht, um den Draht an der gewünschten Stelle zu wickeln.

Bei der Einziehwicklung wird eine Luftspule außerhalb des Motors gewickelt und mit einem speziellen Dorn in den Motor eingebracht. Durch die hierbei eingezogene, verteilte Wicklung wird ein erhöhter Raumbedarf benötigt.

## 5.1 Vereinfachte Motorauswahl

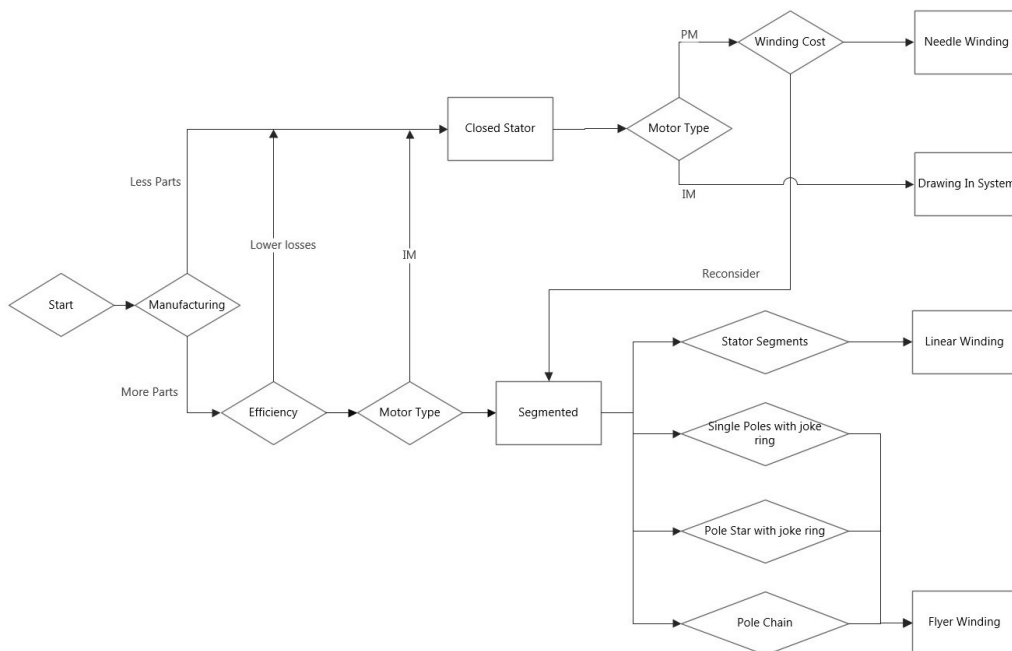


Abbildung 5.4: Flussdiagramm Statoraufbau

Bei der Linearwickeltechnik wird der Draht durch Rotation des Spulenkörpers gewickelt. Der gewickelte Spulenkörper wird danach in den Stator eingebracht.

Bei der Flyerwickeltechnik wird der Draht durch einen Flyer rund um den Polschuh gewickelt.

Die Wickeltechnik ist dabei abhängig vom verwendeten Statortyp und beeinflusst direkt die Herstellungskosten des Stators.

### 5.1.5 Elektrobleche

Der Rotor und der Stator eines Elektromotors werden mit Hilfe von geschichtetem Elektroblech aufgebaut. Wie im Flussdiagramm, in ??, dargestellt ist, werden die Elektrobleche in der Serienproduktion gestanzt. Für

## 5 Ergebnisse

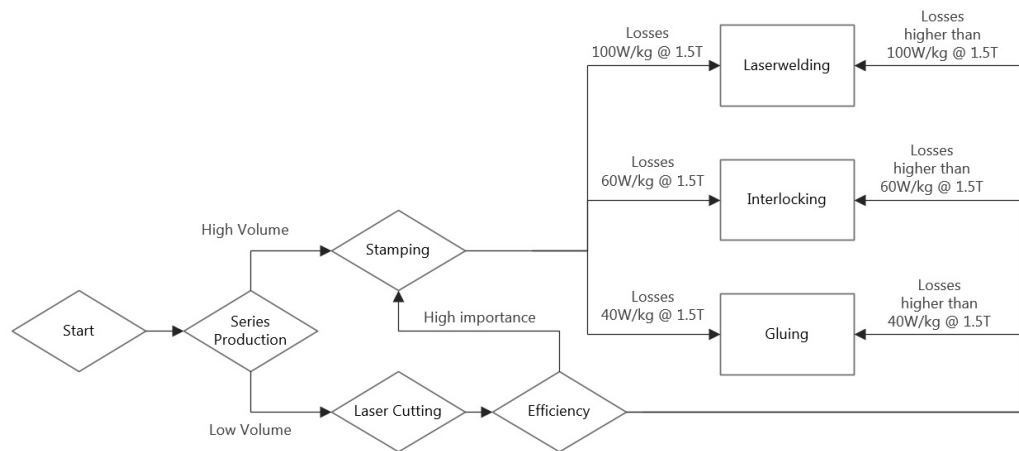


Abbildung 5.5: Elektrobleche

die Kleinserie oder Prototypenfertigung werden die Elektrobleche meist lasergeschnitten.

Der gewählte Fertigungsprozess beeinflusst dabei die Eigenschaften der verwendeten Elektrobleche. Neben dem Fertigungsprozess werden die Eigenschaften der Elektrobleche auch durch den anschließenden Fügeprozess beeinflusst.

Die Elektrobleche werden verschweißt, durch ineinandergreifende Vertiefungen ausgerichtet oder miteinander verklebt. Je nach Fertigungsprozess entstehen unterschiedliche Verluste, die durch den Wegfall der Isolierung zwischen den Elektroblechen entstehen.

Je nach Lage der Kurzschlüsse und dem an dieser Stelle auftretenden magnetischen Fluss, ergeben sich unterschiedlich starke Auswirkungen auf den Motorwirkungsgrad.

### 5.2 Fertigungsrute

Zur übersichtlichen Darstellung der Herstellungsrute der in der Masterarbeit vorgestellten Elektromotoren wurden Übersichtsbilder erstellt.

## Herstellungsrouten permanenterregter Synchronmotor (PMSM)

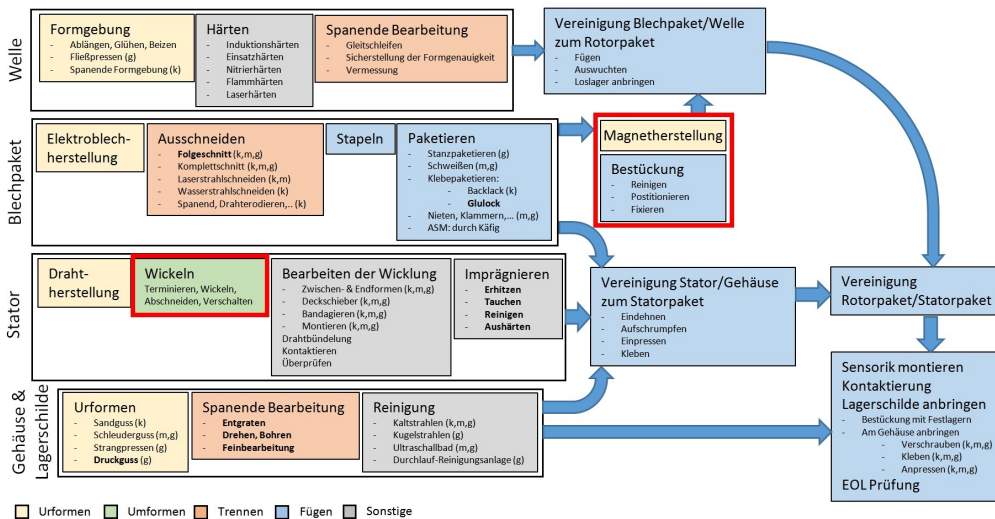


Abbildung 5.6: Synchronmotor Herstellungsrouten

In [Abbildung 5.6](#) ist die Herstellungsrouten für den permanenterregten Synchronmotor dargestellt. Die Herstellungsrouten des Synchronmotors ist auf Subprozesse aufgeteilt, in denen die jeweiligen Baugruppen fertiggestellt werden.

Die Welle wird im Schritt „Formgebung“ mit den angeführten Fertigungsverfahren bearbeitet, bis der Rohling anschließend gehärtet werden kann. Nach dem Härtevorgang werden die Wellensitze nachbearbeitet und die Welle zur Qualitätskontrolle vermessen.

Für das Blechpaket wird das Elektroblech hergestellt und auf die benötigte Form zugeschnitten. Die einzelnen Elektrobleche werden zu einem Kern gestapelt und paketierte.

Für die Fertigstellung des Rotors wird das Rotorblechpaket mit der Welle verbunden und mit den Permanentmagneten bestückt. Oberflächenmontierte Permanentmagnete werden mit einer Bandage gestützt und die Welle anschließend gewuchtet.

Die Herstellrouten des in [Abbildung 5.7](#) dargestellten Asynchronmotors

## 5 Ergebnisse

### Herstellungsrouten Asynchronmotor (ASM)

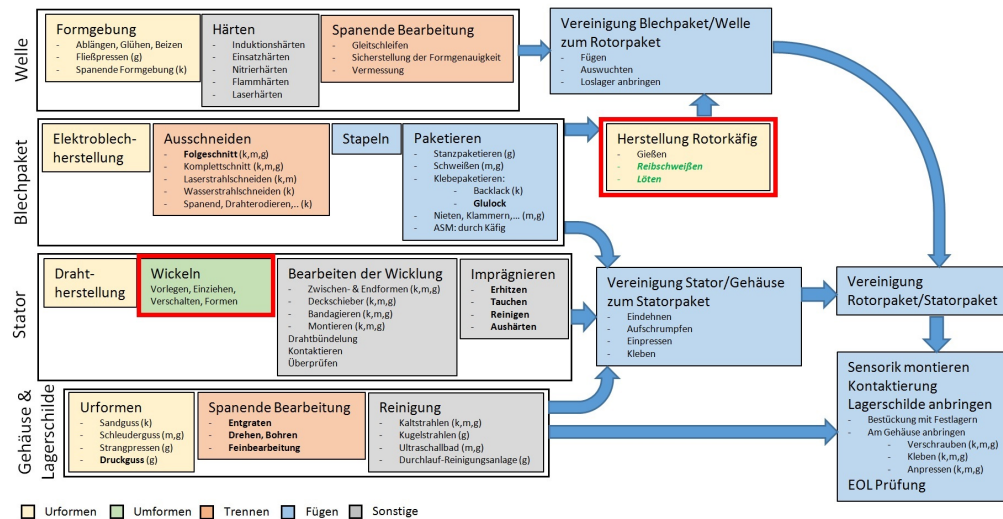


Abbildung 5.7: Asynchronmotor Herstellungsrouten

unterscheidet sich in der Fertigung des Rotors und in der Bewicklung des Stators vom permanenten Synchronmotor.

Der Rotorkäfig des Asynchronmotors wird gegossen oder aus einzelnen Elementen zusammengefügt und anschließend verschweißt oder verlötet.

Für die Bewicklung des Stators wird der Kupferdraht hergestellt und anschließend auf die Statorpole gewickelt. Die Wicklung wird kontaktiert, überprüft und zur Fixierung im Stator imprägniert.

Der Asynchronmotor und der permanenten Synchronmotor unterscheiden sich zusätzlich durch die unterschiedlichen Wicklungsarten. Im Asynchronmotor wird die Wicklung über mehrere Pole verteilt aufgebracht und daher meist außerhalb des Motors vorgewickelt und anschließend in den Elektromotor eingezogen. Im Synchronmotor wird jeder Pol einzeln bewickelt.

Das Gehäuse wird im Urformverfahren hergestellt, spanend bearbeitet und gereinigt. Im darauffolgenden Schritt wird der Stator mit dem Gehäuse zu dem Statorpaket vereinigt.



## 5.2 Fertigungsroute

### Herstellungsrute Reluktanzmotor

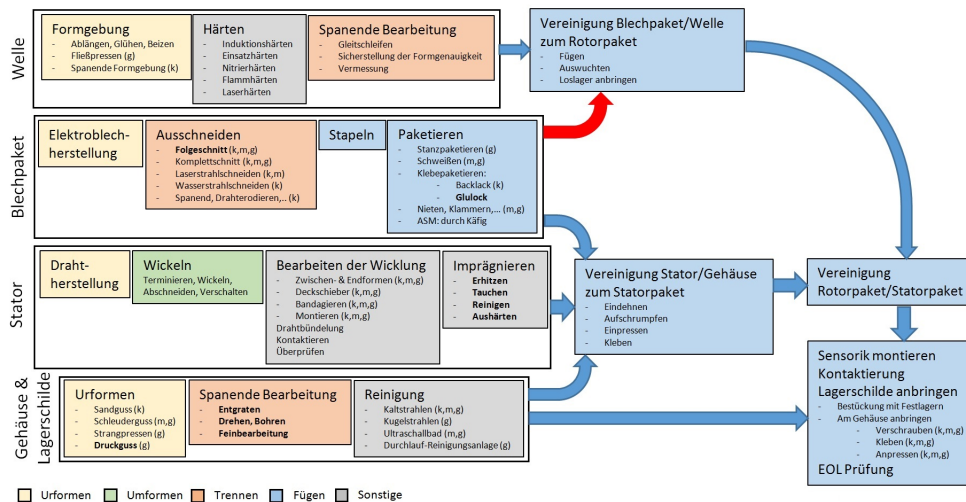


Abbildung 5.8: Reluktanzmotor Herstellungsrute

Anschließend wird der Rotor in das Statorgehäuse eingesetzt. Nach der Montage der Lagerschilde und der abschließenden Prüfung ist der Fertigungsdurchlauf abgeschlossen. Die Gesamtkosten der Fertigung werden durch die Summe der einzelnen Fertigungsschritte verursacht.

Die Herstellungsrute des Reluktanzmotors ist in [Abbildung 5.8](#) dargestellt. Der Produktionsprozess des Reluktanzmotors ist bis auf den Rotor ident mit dem permanentenerregten Synchronmotor.

Der Rotor des Reluktanzmotors wird aus einzelnen Elektroblechsegmenten zusammengefügt und anschließend mit der Welle verbunden.

In [Abbildung 5.9](#) ist die Herstellroute einer Transversalflussmaschine, gefertigt aus SMC, dargestellt.

Das SMC Pulver wird hergestellt und gemischt. Anschließend werden der Rotor und der Stator gepresst und gebacken. Anschließend wird der Stator bewickelt und der Rotor mit den Permanentmagneten bestückt.

Das Gehäuse für den Transversalflussmotor wird gegossen, spanend bearbeitet und anschließend gereinigt. Der Rotor und der Stator werden danach

## 5 Ergebnisse

### Herstellungsrute Transversalfussmaschine (mit SMC)

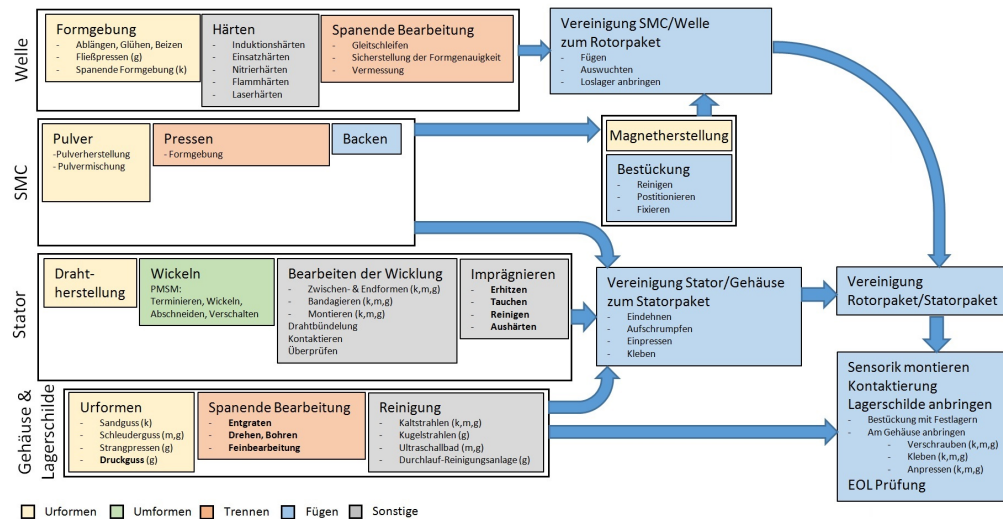


Abbildung 5.9: Transversalfussmaschine Herstellungsrute

mit dem Gehäuse vereinigt.

Der Umfang der Produktion ist für die einzelnen Elektromotortypen ähnlich.

Kostensenkungen in der Produktion können durch eine Reduktion der Elektromotorbaugröße und damit einhergehend einer Reduktion des Materialbedarfs und der Dauer der Fertigungsschritte erfolgen.

SMC Werkstoffe ermöglichen eine Vereinfachung der Rotor- und Stator kern Fertigung. Durch den Wegfall der aufwendigen Blechpaketierung können in diesem Bereich der Fertigung die Produktionskosten gesenkt werden.

## 6 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es einen Überblick über Herausforderungen und mögliche Lösungsansätze in der Serienfertigung von Elektromotoren darzustellen und basierend auf diesen Erkenntnissen Ablaufdiagramme für die Elektromotorfertigung zu erstellen. Der Fokus der Betrachtung ist auf den Einsatz der Elektromotoren im Kraftfahrzeug gelegt.

Im Zuge der Arbeit wurden die Abhängigkeiten der Elektromotoreigenschaften, der Fertigungsverfahren und der Fertigungskosten untereinander dargestellt und mögliche neuartige Fertigungsverfahren für die Serienfertigung aufgezeigt.

Basierend auf den Erkenntnissen wurden Flussdiagramme für die einzelnen Produktionsstufen erstellt. Für die im Kapitel Theoretische Grundlagen behandelten Elektromotortypen wurden Herstellungsrouten erstellt.

Die vorliegende Masterarbeit ist im Kontext der anderen Arbeiten rund um die E-Achse zu sehen, die gemeinsam die Grundlage für einen E-Achs Konfigurator darstellen.

Neben dem Elektromotor, der eine wichtige Grundlage für die gesamte Achse bildet, werden Masterarbeiten zum thermischen Management und Getriebelayout behandelt.

Der E-Achs Konfigurator soll in der Entwicklung von neuen Antriebskonzepten etablierte Prozesse und mögliche Alternativen aufzeigen und damit den Entwicklungsprozess beschleunigen.



# Appendix



# Literatur

- A. Dobrzański, L. M. Drak und Ziębowicz Bogusław (Aug. 2007). »New possibilities of composite materials application—Materials of specific magnetic properties«. In: *Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL* 191, S. 352–355. DOI: [10.1016/j.jmatproc.2007.03.029](https://doi.org/10.1016/j.jmatproc.2007.03.029) (siehe S. 55).
- Austin Hughes, Bill Drury (2013). *Electric Motors and Drives - Fundamentals, Types and Applications*. London: Newnes. ISBN: 978-0-080-99368-3 (siehe S. 4, 5, 7, 10, 24).
- Beuth (2008). *Magnetische Werkstoffe - DIN EN 60404-1 und DIN EN 60404-2*. Beuth Vertrieb (siehe S. 41).
- Binder, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Andreas (o.D.). *Systemauslegung elektrifizierter Triebstränge*. URL: <https://docplayer.org/43613499-Systemauslegung-elektrifizierter-%20triebstraenge.html> (siehe S. 8, 11).
- Chau, K. T. (2015). *Electric Vehicle Machines and Drives - Design, Analysis and Application*. New York: John Wiley und Sons. ISBN: 978-1-118-75252-4 (siehe S. 6, 8, 9, 12–14, 16, 25, 27).
- Chemicool.com (2012). *Boron - Chemicool Periodic Table*. URL: <https://www.chemicool.com/elements/boron.html> (siehe S. 48).
- chemicool.com (2012). *Iron - Chemicool Periodic Table*. URL: <https://www.chemicool.com/elements/iron.html> (siehe S. 48).
- contributors, Wikipedia (2018). *Prices of elements and their compounds*. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Prices\\_of\\_elements\\_and\\_their\\_compounds&oldid=871913485](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Prices_of_elements_and_their_compounds&oldid=871913485) (siehe S. 48).
- Dajaku, Gurakuq und Dieter Gerling (Dez. 2018). »Design of Permanent Magnet Machines for Hybrid Vehicles«. In: (Siehe S. 25).

## Literatur

- Ding, W. u. a. (März 2017). »Comprehensive Research of Modular E-Core Stator Hybrid-Flux Switched Reluctance Motors With Segmented and Nonsegmented Rotors«. In: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 32.1, S. 382–393. ISSN: 0885-8969. DOI: 10.1109/TEC.2016.2631248 (siehe S. 12).
- Energy, US Department of (2011). *2011 Critical Materials Strategy*. URL: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiZ5NDRtJXfAhXC\\_ywKHfS3AQEQFjAAegQICBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.energy.gov%2Fsites%2Fprod%2Ffiles%2FDOE\\_CMS2011\\_FINAL\\_Full.pdf&usg=A0vVaw2Sf3Wu7Giu8j---5f07iDo](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiZ5NDRtJXfAhXC_ywKHfS3AQEQFjAAegQICBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.energy.gov%2Fsites%2Fprod%2Ffiles%2FDOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf&usg=A0vVaw2Sf3Wu7Giu8j---5f07iDo) (siehe S. 28).
- Finken, Thomas und Kay Hameyer (Dez. 2018). »Design of Electric Motors for Hybrid-and Electric-Vehicle Applications«. In: (Siehe S. 16).
- Fukuno, A, K Hirose und T Yoneyama (Juni 1990). »Coercivity mechanism of sintered NdFeB magnets having high coercivities«. In: *Journal of Applied Physics* 67, S. 4750–4752. DOI: 10.1063/1.344800 (siehe S. 28).
- GRANT, GLENN J (2016). *Novel Manufacturing Technologies for High Power Induction and Permanent Magnet Electric Motors*. URL: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjhcPkjZXfAhWUhaYKHaqMCqIQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fenergy.gov%2Fsites%2Fprod%2Ffiles%2F2016%2F06%2Ff33%2Fpm004\\_grant\\_2016\\_o\\_web.pdf&usg=A0vVaw2Puqg1hdrtpDJGTlydwvmF](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjhcPkjZXfAhWUhaYKHaqMCqIQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fenergy.gov%2Fsites%2Fprod%2Ffiles%2F2016%2F06%2Ff33%2Fpm004_grant_2016_o_web.pdf&usg=A0vVaw2Puqg1hdrtpDJGTlydwvmF) (siehe S. 25).
- Hobart M. King Ph.D., RPG (2017). *REE - Rare Earth Elements and their Uses*. URL: <https://geology.com/articles/rare-earth-elements/> (siehe S. 29–31).
- Högans (2017). *Högans Somaloy Material Data 2017*. URL: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiolcvQ\\_qvfAhUnM-wKHUzGBvEQFjAAegQICRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.hoganas.com%2Fglobalassets%2Fmedia%2Fsharepoint-documents%2FBrochuresanddatasheetsAllDocuments%2FSomaloy%20MaterialData\\_November\\_2016\\_1806HOG.pdf&usg=A0vVaw1a%20GcIrkmpigi6V7m1ph6MA](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiolcvQ_qvfAhUnM-wKHUzGBvEQFjAAegQICRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.hoganas.com%2Fglobalassets%2Fmedia%2Fsharepoint-documents%2FBrochuresanddatasheetsAllDocuments%2FSomaloy%20MaterialData_November_2016_1806HOG.pdf&usg=A0vVaw1a%20GcIrkmpigi6V7m1ph6MA) (siehe S. 59).
- Hutchinson, Lee (2013). *Review: Tesla Motors all electric Model S is fast but is it a good car*. URL: <https://arstechnica.com/features/2013/10/review-tesla-model-s/3/> (siehe S. 35).



- Janocha, Hartmut (2013). *Aktoren - Grundlagen und Anwendungen*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-662-00417-3 (siehe S. 13).
- Jeong, Kwangyoung u. a. (Juli 2014). »Measurement of Stator Core Loss of an Induction Motor at Each Manufacturing Process«. In: *Journal of Electrical Engineering and Technology* 9, S. 1309–1314 (siehe S. 41, 43).
- Kampker, Achim (2014). *Elektromobilproduktion*. 2014. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-42022-1 (siehe S. 3, 16, 18–20, 22, 24, 31, 32).
- Kim, Jin Woo u. a. (2013). »Nd–Fe–B permanent magnets fabricated by low temperature sintering process«. In: *Journal of Alloys and Compounds* 551, S. 180–184. ISSN: 0925-8388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.10.058>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838812018105> (siehe S. 48–50).
- Koch, Simon-F, Manuel Peter und Jürgen Fleischer (Dez. 2017a). »Light-weight Design and Manufacturing of Composites for High-performance Electric Motors«. In: *Procedia CIRP* 66, S. 283–288. DOI: [10.1016/j.procir.2017.03.274](https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.274) (siehe S. 24).
- Koch, Simon-F, Manuel Peter und Jürgen Fleischer (Dez. 2017b). »Light-weight Design and Manufacturing of Composites for High-performance Electric Motors«. In: *Procedia CIRP* 66, S. 283–288. DOI: [10.1016/j.procir.2017.03.274](https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.274) (siehe S. 60).
- Lamprecht, E., M. Hömme und T. Albrecht (Okt. 2012). »Investigations of eddy current losses in laminated cores due to the impact of various stacking processes«. In: *2012 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, S. 1–8. DOI: [10.1109/EDPC.2012.6425097](https://doi.org/10.1109/EDPC.2012.6425097) (siehe S. 43, 44).
- Libert, F. und J. Soulard (Apr. 2006). »Manufacturing Methods of Stator Cores with Concentrated Windings«. In: *2006 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives - PEMD 2006*, S. 676–680 (siehe S. 21).
- Liu, Zhengyu, Thomas Winter und Michael Schier (Jan. 2015). »Comparison of Thermal Performance between Direct Coil Cooling and Water Jacket Cooling for Electric Traction Motor based on Lumped Parameter Thermal Network and Experimentation«. In: (Siehe S. 38–40).

## Literatur

- PAN, Minxiang u. a. (Dez. 2010). »Effect of Terbium addition on the coercivity of the sintered NdFeB magnets«. In: *Journal of Rare Earths* 28, S. 399–402. DOI: 10.1016/S1002-0721(10)60300-6 (siehe S. 28).
- Pavel, Claudiu C. u. a. (2017). »Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric road transport applications«. In: *Sustainable Materials and Technologies* 12, S. 62–72. ISSN: 2214-9937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.01.003>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993716300641> (siehe S. 28).
- EL-Refaie, A. M. und T. M. Jahns (Mai 2005). »Optimal flux weakening in surface PM machines using fractional-slot concentrated windings«. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 41.3, S. 790–800. ISSN: 0093-9994. DOI: 10.1109/TIA.2005.847312 (siehe S. 23).
- Release, Toyota News (2018). *Toyota Develops New Magnet for Electric Motors Aiming to Reduce Use of Critical Rare-Earth Element by up to 50 %*. URL: <https://newsroom.toyota.co.jp/en/corporate/21139684.html> (siehe S. 47, 51, 52).
- Schaeffler (2018). *Schaeffler Engineering Hybridbaukasten*. URL: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj-44CKhqzfAhUEK1AKHSaZCZ4QFjAJegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.schaeffler-engineering.com%2Ffileadmin%2Fassets%2FBroschueren\\_Dienstleistungen\\_PDF%2FSchaefflerEngineering\\_Hybridisierungsbauelemente\\_DE.pdf&usq=A0vVaw0zLL0uNrM4ErXnm\\_pc51BH](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj-44CKhqzfAhUEK1AKHSaZCZ4QFjAJegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.schaeffler-engineering.com%2Ffileadmin%2Fassets%2FBroschueren_Dienstleistungen_PDF%2FSchaefflerEngineering_Hybridisierungsbauelemente_DE.pdf&usq=A0vVaw0zLL0uNrM4ErXnm_pc51BH) (siehe S. 61).
- Tiller, Stefan (2013). *Soft Magnetic Composites in the development of a new compact transversal flux electric motor*. URL: <https://www.pm-review.com/powder-metallurgy-review-archive/powder-metallurgy-review-vol-2-no-3-autumn-2013/> (siehe S. 15).
- Ueno, T u. a. (Apr. 2016). »Practical and potential applications of soft magnetic powder cores with superior magnetic properties«. In: S. 9–15 (siehe S. 56–58).
- Veigel, M. u. a. (Sep. 2016). »Investigation of the impact of production processes on iron losses of laminated stator cores for electric machines«. In: *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, S. 1–5. DOI: 10.1109/ECCE.2016.7855220 (siehe S. 45, 46).
- Voestalpine (2015). *ISOVAC Electrical Steel*. URL: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&>

- [uact=8&ved=2ahUKEwjdsCL\\_6vfAhWQ6qQKHdr7CskQFjACegQIABAC&url=http%3A%2F%2Fwww.voestalpine.com%2Fdivision\\_stahl%2Fcontent%2Fdownload%2F21450%2F639207%2Ffile%2Fvoestalpine\\_technical\\_terms\\_of\\_delivery\\_electrical\\_steel\\_EN\\_20171221.pdf&usg=AOvVaw22vRT2ft9G4VsOXHmRhXPi](http://www.voestalpine.com/division_stahl/content/download/21450/639207/file/voestalpine_technical_terms_of_delivery_electrical_steel_EN_20171221.pdf) (siehe S. 58, 59).
- Wan, Zhao u. a. (Juli 2015). »A novel transverse flux machine for vehicle traction applications«. In: *2015 IEEE Power Energy Society General Meeting*, S. 1–5. DOI: [10.1109/PESGM.2015.7286494](https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286494) (siehe S. 15).
- Widmer, James, Richard Martin und Mohammad Kimiabeigi (März 2015). »Electric vehicle traction motors without rare earth magnets«. In: *Sustainable Materials and Technologies* 29. DOI: [10.1016/j.susmat.2015.02.001](https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.02.001) (siehe S. 30, 33, 53, 54).
- YABUMOTO, Masao u. a. (Juli 2003). »Electrical Steel Sheet for Traction Motors of Hybrid/Electric Vehicles«. In: (Siehe S. 42, 44, 45).
- Zeraouia, M., M. E. H. Benbouzid und D. Diallo (Nov. 2006). »Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study«. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 55.6, S. 1756–1764. ISSN: 0018-9545. DOI: [10.1109/TVT.2006.878719](https://doi.org/10.1109/TVT.2006.878719) (siehe S. 16).