

**Adaptive und softwaregestützte Konstruktion  
von drehenden elektrischen Maschinen**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von Herrn Dipl.-Ing. Ralf Hinzelmann  
geb. am 27.03.1988 in Magdeburg

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Roland Kasper

Prof. Dr.-Ing. Christiane Beyer

Promotionskolloquium am 13.09.2021



## **Kurzreferat**

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur Digitalisierung und Verbesserung von Entwicklungsprozessen. Insbesondere richtet sie sich an Entwicklungsingenieure, die Elektromaschinen nach Kundenwunsch gestalten, die Fertigung planen sowie die Messung der Maschinen durchführen und bewerten. Dabei wird eine passende Maschine für den Kunden entwickelt, um den bestmöglichen Nutzen zu generieren. Dadurch kann beim Betrieb der Maschine Geld und Energie gespart werden und die Umwelt wird geschont. In dieser Arbeit werden PM-Synchronmaschinen und einer Sonderform dieser betrachtet, die Maschine mit Luftspaltwicklung, die am Lehrstuhl für Mechatronik des Instituts für Mobile Systeme der Fakultät für Maschinenbau entwickelt wurde. Der Entwicklungsprozess der Maschinen wird analysiert. Dabei werden die Möglichkeiten der modernen Softwarelandschaft beachtet. Es wird ein Konstruktionswerkzeug vorgestellt, das die komplexen Wechselwirkungen der mechanischen, elektrischen und thermischen Parameter der Maschine berücksichtigt. Das iterative Vorgehen bei der Entwicklung wird beschleunigt und teilweise automatisiert. Mithilfe dieses Ansatzes wurden zwei Generatoren entwickelt. Es entstand ein Generator mit Luftspaltwicklung für die Verwendung in Kleinwindkraftanlagen und ein Generator mit Luftspalt- und Nutenwicklung für den Einsatz in Kleinwasserkraftanlagen. Ziel ist die Anwendung der Konstruktionsmethodik in der Forschung sowie der Transfer in KMUs.

## **Abstract**

This work contributes to the digitization and improvement of development processes. In particular, it is aimed at development engineers who design electrical machines according to customer requirements, plan production and carry out and evaluate the measurement of the machines. The right machine will be developed for the customer in order to generate the best possible benefit. This saves money and energy when operating the machine and protects the environment. In this thesis, PM synchronous machines and a special form of them are considered, the machine with air gap winding, which was developed at the Chair of Mechatronics at the Institute for Mobile Systems in the Faculty of Mechanical Engineering. The machine development process is analyzed. The possibilities of the modern software landscape are taken into account. A design tool is presented that takes into account the complex interactions of the mechanical, electrical and thermal parameters of the machine and thus accelerates and partially automates the iterative process during development. With the help of this approach, two generators were developed. A generator with air gap winding for use in small wind power plants and a generator with air gap and groove winding for use in small hydropower plants were created. The aim is to use the construction methodology in research and transfer it to SMEs.



## Inhaltsverzeichnis

|   |      |
|---|------|
| Kurzreferat .....   | I    |
| Inhaltsverzeichnis .....  | III  |
| Abbildungsverzeichnis .....                                     | VII  |
| Tabellenverzeichnis .....                                       | IX   |
| Abkürzungsverzeichnis .....                                     | XI   |
| Formelzeichenverzeichnis.....                                   | XV   |
| Indexverzeichnis .....  | XVII |
|   |      |
| 1 Einleitung .....  | 1    |
| 1.1 Motivation .....  | 2    |
| 1.2 Problemstellung.....  | 3    |
| 2 Stand der Technik.....  | 5    |
| 2.1 PM-Synchronmaschine.....                                    | 6    |
| 2.1.1 Läufer .....  | 9    |
| 2.1.2 Lagerstelle .....   | 9    |
| 2.1.3 Gehäuse und Blechpaket.....                               | 10   |
| 2.1.4 Kühlung.....  | 11   |
| 2.1.5 Statorwicklung.....                                       | 13   |
| 2.1.6 Montage.....  | 24   |
| 2.1.7 Prüfung .....   | 25   |
| 2.2 Neuartige Maschine der OvGU .....                           | 25   |
| 2.2.1 Elektrische Maschine mit Luftspaltwicklung.....           | 25   |
| 2.2.2 Kombinationswicklung.....                                 | 29   |
| 2.2.3 Lagerung.....   | 30   |
| 2.2.4 Wickeltechnik .....                                       | 31   |
| 3 Grundlagen .....  | 35   |
| 3.1 Lean Development .....                                      | 35   |
| 3.1.1 Kontinuierlicher Verbesserungsprozess .....               | 36   |
| 3.1.2 Standardisierung.....                                     | 37   |
| 3.1.3 Fließ- und Pull-Prinzip.....                              | 38   |
| 3.1.4 Mitarbeiterorientierung und zielorientierte Führung ..... | 38   |
| 3.1.5 Null-Fehler-Prinzip .....                                 | 39   |

---

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.1.6 | Visuelles Management.....                                   | 39 |
| 3.1.7 | Frontloading.....   | 40 |
| 3.2   | Angewandte Entwicklungsmethodik.....                        | 40 |
| 3.2.1 | Entwicklungsprozess im Unternehmen.....                     | 41 |
| 3.2.2 | Entwickeln nach dem V-Modell .....                          | 43 |
| 3.3   | CAx-Software .....  | 44 |
| 3.3.1 | CAD-Software .....  | 44 |
| 3.3.2 | CAE- und Simulationssoftware.....                           | 46 |
| 3.3.3 | Datenbankmanagementsysteme.....                             | 47 |
| 3.3.4 | PDM-Software.....   | 49 |
| 3.3.5 | Software für die Auslegung von elektrischen Maschinen.....  | 52 |
| 4     | Softwaregestützter und adaptiver Konstruktionsprozess ..... | 55 |
| 4.1   | Entwicklungsprozess der Maschine .....                      | 56 |
| 4.2   | Anforderungen an den Prozess .....                          | 59 |
| 4.3   | Lösungsvarianten .....                                      | 60 |
| 4.4   | Vorzugsvariante.....  | 61 |
| 4.5   | Grobgestaltung .....  | 62 |
| 4.5.1 | Modellierung der aktiven Teile.....                         | 63 |
| 4.5.2 | Modellierung der passiven Teile.....                        | 65 |
| 4.5.3 | Modellierung des kinematischen Verhaltens .....             | 68 |
| 4.5.4 | Modellierung des thermischen Verhaltens.....                | 70 |
| 4.6   | Feingestaltung .....  | 72 |
| 4.7   | Strukturanalyse.....  | 73 |
| 4.8   | Kostenplanung.....  | 73 |
| 4.9   | Datenaustausch.....   | 76 |
| 4.10  | Versionierung .....   | 76 |
| 5     | Anwendung .....   | 77 |
| 5.1   | Windgenerator .....   | 77 |
| 5.1.1 | Stand der Technik.....                                      | 78 |
| 5.1.2 | Auslegung.....  | 79 |
| 5.1.3 | Konstruktion .....  | 85 |
| 5.1.4 | Fertigung.....  | 87 |
| 5.1.5 | Ansteuerung.....  | 88 |
| 5.1.6 | Messung .....   | 89 |
| 5.1.7 | Generatoreinheit .....                                      | 90 |

---

|       |                                    |     |
|-------|------------------------------------|-----|
| 5.2   | Wassergenerator .....              | 91  |
| 5.2.1 | Stand der Technik.....             | 91  |
| 5.2.2 | Auslegung.....                     | 92  |
| 5.2.3 | Konstruktion.....                  | 97  |
| 5.2.4 | Kostenplanung.....                 | 99  |
| 5.2.5 | Fertigung.....                     | 101 |
| 5.2.6 | Ansteuerung .....                  | 109 |
| 5.2.7 | Messungen .....                    | 109 |
| 6     | Zusammenfassung und Ausblick ..... | 113 |
| 7     | Literaturverzeichnis.....          | 117 |
| 8     | Anhang .....                       | 125 |



## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Elektrische Kommutierung und verketteter Generatorstern .....                | 6  |
| Abbildung 2: Schematischer Aufbau und Außenansicht eines Standardelektromotors .....      | 7  |
| Abbildung 3: Konzeptvergleich, Wasserkühlung und Verlauf der Kanäle im Motor .....        | 11 |
| Abbildung 4: Einordnung der Statorwicklung nach Wickelsystem" .....                       | 15 |
| Abbildung 5: Kupferlackdrahtspulen und Aufbau des Leitermaterials [30] S. 18, S. 106..... | 16 |
| Abbildung 6: Papiernutenisolation für drehende elektrische Maschinen .....                | 19 |
| Abbildung 7: Isolationssysteme für Maschinen mit Nutenwicklungen .....                    | 19 |
| Abbildung 8: Schematische Darstellung des Linearwickelns [37] S. 210 .....                | 21 |
| Abbildung 9: Linearwickeln, Spule mit Anwickelpfosten, Linearwickelmaschine .....         | 22 |
| Abbildung 10: Schematische Darstellung des Flyerwickelns [37] S. 213 .....                | 22 |
| Abbildung 11: Schematische Darstellung des Nadelwickelns [37] S. 215.....                 | 23 |
| Abbildung 12: Aufbau einer Maschine mit Luftspaltwicklung [24] S. 33 .....                | 26 |
| Abbildung 13: Vergleich der Maschinenprinzipien [24] S. 30.....                           | 27 |
| Abbildung 14: Konzeptvergleich Wasser- und Luftkühlung für Außenläufer .....              | 28 |
| Abbildung 15: Temperaturentwicklung von wasser- und luftgekühlten LSW-Maschinen .....     | 29 |
| Abbildung 16: Vergleich der magnetischen Flussdichte (B) von LSW -und KW-Maschine ...     | 30 |
| Abbildung 17: Schematische Darstellung der Achsen nach [47] inkl. Anpassungen .....       | 31 |
| Abbildung 18: Luftspaltwickelmaschine der OvGU im LEIRAMO-Setup [48] .....                | 34 |
| Abbildung 19: Gestaltungsprinzipien schlanker Produktentstehungsprozesse .....            | 35 |
| Abbildung 20: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [55] Bild 3.3 Seite 9.....        | 41 |
| Abbildung 21: Synthese der Ablaufschemen nach VDI 2206 und VDI 2221.....                  | 43 |
| Abbildung 22: Trend der Popularität von relationalen DBMS.....                            | 48 |
| Abbildung 23: PDM-Systemstruktur [64] .....   | 50 |
| Abbildung 24: Benutzeroberfläche einer PDM-Anwendung.....                                 | 50 |
| Abbildung 25: Ebenen des Entwicklungsprozesses mit Schnittstellen.....                    | 58 |
| Abbildung 26: Parametrierung der aktiven Teile im Querschnitt und Längsschnitt .....      | 63 |
| Abbildung 27: Generatorentwurf und vereinfachte geometrische Parametrierung .....         | 66 |
| Abbildung 28: Mechanisches Ersatzmodell.....  | 68 |
| Abbildung 29: Messung der Magnetkräfte und Modell der Exzentrizität .....                 | 69 |
| Abbildung 30: Permanent erregter Synchronmotor mit thermischem Modell in Simulink .....   | 70 |
| Abbildung 31: Subsystem thermisches Modell <sup>38</sup> .....                            | 71 |
| Abbildung 32: Leistungskennfeld des H-Darrieus-Rotors und Momentenkennfeld .....          | 80 |
| Abbildung 33: Regelungsstrategien und Einordnung Darrieus-Rotor [104].....                | 81 |
| Abbildung 34: Mill-4-all-Windkraftanlage und Anlage auf Trägerfahrzeug .....              | 82 |
| Abbildung 35: FE-Simulation des magnetischen Kreises und der Induzierten Spannung.....    | 84 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 36: Turm der Windkraftanlage und Windgenerator .....                           | 87  |
| Abbildung 37: Innerer Aufbau des Windgenerators .....                                    | 87  |
| Abbildung 38: Generatorwickelmaschine und fertiggestellter Generator .....               | 88  |
| Abbildung 39: Schematisches Blockschaltbild der Anlagenregelung mit Generator .....      | 88  |
| Abbildung 40: 50-kW-Motorenprüfstand mit montiertem Windgenerator .....                  | 89  |
| Abbildung 41: Vergleich der Leerlaufspannung der drei Phasen .....                       | 89  |
| Abbildung 42: 4-kW-Generatoreinheit im Halbschnitt und Außenansicht.....                 | 90  |
| Abbildung 43: Einordnung des uSW bezüglich anderer Turbinenarten.....                    | 92  |
| Abbildung 44: Prognostizierte Drehmomentkennlinie des uSW mit Darstellung der Anlage .   | 93  |
| Abbildung 45: CAD-Entwurf des Generators im Halbschnitt und aktive Teile der Maschine .  | 94  |
| Abbildung 46: Erste Iteration der elektromechanischen Auslegung.....                     | 95  |
| Abbildung 47: Zweite Iteration der elektromechanischen Auslegung.....                    | 96  |
| Abbildung 48: Anschlussschema einer Phase für Nenndrehzahlen 60 und 252 U/min .....      | 97  |
| Abbildung 49: Benutzungsoberfläche des Werkzeugs mit 1D-Eingabe und 3D-Ausgabe.....      | 98  |
| Abbildung 50: Isolationsvarianten der Nutenwicklung .....                                | 102 |
| Abbildung 51: Inlay-Morphologie und Vorzugsvariante mit Polyamid-Endkappe .....          | 103 |
| Abbildung 52: Wickelvorrichtung für die Fertigung des Wassergenerators .....             | 104 |
| Abbildung 53: Produktionsphasen der Statorwicklung.....                                  | 104 |
| Abbildung 54: Fertigung der Rundumisolation und vollständige Isolation .....             | 105 |
| Abbildung 55: Einziehen der Nutenwicklung und vollständig gefertigte Nutenwicklung ..... | 105 |
| Abbildung 56: Nutenverguss und folierter Stator .....                                    | 106 |
| Abbildung 57: Aufkleben der Luftspaltwicklung und vollständige Kombinationswicklung .... | 107 |
| Abbildung 58: Einkleben der doppelreihigen Magneten und fertiger Rotor mit Deckel.....   | 108 |
| Abbildung 59: Fügen des Generators auf einer Drehbank und fertiggestellter Generator ... | 109 |
| Abbildung 60: Leerlaufdrehmoment bei 20 U/min.....                                       | 110 |
| Abbildung 61: Prüfstand mit Wassergenerator und EMK bei 20 U/min.....                    | 110 |
| Abbildung 62: Spannung und Drehmoment im Gleichrichterbetrieb [112] Bild 8.....          | 111 |
| Abbildung 63: Software neutrale Zielstruktur des Konstruktionswerkzeugs .....            | 114 |

---

## Tabellenverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| Tabelle 1: Synthese der Isolierstoffklassen nach DIN EN 60085 (grau) und EN 60034-11:2004 (blau) und Extrapolation der Überlasttemperatur [27] ..... | 12  |
| Tabelle 2: Einteilung der Kühlverfahren nach DIN EN 60034-6.....   | 12  |
| Tabelle 3: Materialkennwerte und Preise von verschiedenen Metallen [30] S. 96 Tab. 2.1 ..  | 16  |
| Tabelle 4: Verarbeitungseigenschaften von Cu-ETP [30] S. 101.....  | 17  |
| Tabelle 5: Erlaubte Anzahl an Fehlstellen der Isolation nach EN 60317-0-1:2008, S.18 .....   | 18  |
| Tabelle 6: Vergleich von Software für die Auslegung von elektrischen Maschinen.....  | 53  |
| Tabelle 7: Einordnungsmatrix der Software des Entwicklungsprozesses .....  | 59  |
| Tabelle 8: Morphologischer Kasten der Software der Mechanik.....   | 61  |
| Tabelle 9: Drehzahlbereiche des Windgenerators.....  | 82  |
| Tabelle 10: Generatorkonzepte mit Außenläufer und verschiedenen Luftkühlungsvarianten  | 86  |
| Tabelle 11: Rohteilkonfigurator mit den Daten des Wassergenerators .....   | 99  |
| Tabelle 12: Kostentabelle mit den Daten des Wassergenerators .....   | 100 |
| Tabelle 13: Wirkungsgradkennfeld des Wassergenerators [112] Tabelle 8 .....  | 111 |



---

## Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Bedeutung  |
|-----------|--|
| 1D        | eindimensional                                   |
| 2D        | zweidimensional                                  |
| 3D        | dreidimensional                                  |
| AG        | Aktiengesellschaft                               |
| AM        | Additive Manufacturing                           |
| API       | Application Programming Interface                |
| B         | Bor  |
| BLDC      | Brushless DC Motor                               |
| CA        | Computer-Aided                                   |
| CAD       | Computer-Aided Design                            |
| CAE       | Computer-Aided Engineering                       |
| CAM       | Computer-Aided Manufacturing                     |
| CAX       | Computer-Aided x                                 |
| CCA       | Copper-Clad Aluminum                             |
| Co        | Kobalt   |
| Cu        | Kupfer   |
| DB        | Datenbank  |
| DIN       | Deutsches Institut für Normung                   |
| E         | elektrische                                      |
| ELISA     | Elektromobilität und Leichtbau in Sachsen-Anhalt |
| EMK       | elektromechanische Kopplung                      |
| EN        | Europäische Normen                               |
| EP        | Elektronikpartner                                |
| ERP       | Enterprise Resource Planning                     |
| FAG       | Fischers Aktien-Gesellschaft                     |
| Fe        | Eisen  |
| FE        | finite Elemente                                  |
| FEM       | Finite-Elemente-Methode                          |
| FMEA      | Failure Mode and Effects Analysis                |
| GmbH      | Gesellschaft mit beschränkter Haftung            |
| GUI       | Graphical User Interface                         |
| IC        | International Cooling                            |

---

| Abkürzung | Bedeutung  |
|-----------|--|
| IE        | International Efficiency   |
| IEC       | International Electrotechnical Commission  |
| IEEE      | Institute of Electrical and Electronics Engineers                                  |
| IESY      | Institut für elektrische Energiesysteme  |
| IM        | International Mounting   |
| IMS       | Institut für Mobile Systeme  |
| IP        | Ingress Protection   |
| IT        | Informationstechnik  |
| K         | Kommutierung   |
| KVP       | kontinuierlicher Verbesserungsprozess  |
| KW        | Kombinationswicklung   |
| LEIRAMO   | Ultra-Leichtbau-Radnabenmotor  |
| LSW       | Luftspaltwicklung  |
| Ltd.      | Limited, dt. Kapitalgesellschaft   |
| MG 1      | Motors and Generators 1 (NEMA Norm – Teil 1)                                       |
| MPP       | Maximum Power Point Tracking   |
| Nd        | Neodym   |
| NEMA      | National Electrical Manufacturers Association                                      |
| NW        | Nutenwicklung  |
| OvGU      | Otto-von-Guericke-Universität  |
| PDM       | Produktdatenmanagement   |
| PEP       | Produktentstehungsprozess  |
| PM        | Permanentmagnet  |
| PMSM      | Permanentmagnet-Synchronmotor  |
| Pt        | Platin   |
| QFD       | Quality Function Deployment  |
| RDBMS     | Relational Database Management System  |
| REFA      | Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation<br>und Unternehmensentwicklung |
| RNM       | Radnabenmotor  |
| RP        | Rapid Prototyping  |
| RRKL      | Radialrillenkugellager   |
| RWTH      | Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule                                       |
| S1        | Dauerbetrieb, konstante Belastung  |

---

---

| Abkürzung | Bedeutung   |
|-----------|---|
| SE        | Europäische Gesellschaft, international auch lateinisch Societas Europaea |
| SKF       | Svenska Kugellagerfabriken  |
| SLS       | selektives Lasersintern   |
| Sm        | Samarium  |
| SOP       | Start of Production   |
| SPS       | speicherprogrammierbare Steuerung   |
| SQL       | Structured Query Language   |
| uSW       | Universelles Staudruckwasserrad   |
| VDE       | Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.           |
| VDI       | Verein Deutscher Ingenieure   |
| WIG       | Wolfram-Inertgas-Schweißen  |
| ZIM       | Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand                                 |



## Formelzeichenverzeichnis

| Formelzeichen | Einheit                                 | Bezeichnung                            |
|---------------|---|--|
| A             | mm <sup>2</sup>                         | Fläche                                 |
| B             | T                                       | magnetische Flussdichte                |
| b             | mm                                      | Breite                                 |
| cos φ         | rad                                     | Phasenverschiebungswinkel              |
| D             | mm                                      | Durchmesser                            |
| d, δ          | mm                                      | Dicke, Schichtstärke                   |
| E             | J                                       | Energie                                |
| e             | mm                                      | Exzentrizität                          |
| f             | Hz, -                                   | Frequenz, Faktor                       |
| F             | N                                       | Kraft                                  |
| H             | A·m <sup>-1</sup>                       | magnetische Feldstärke                 |
| h             | mm                                      | Höhe                                   |
| I             | A                                       | elektrischer Strom                     |
| k             | -, €                                    | Maschinen-, Wandlungskonstante, Kosten |
| L             | H                                       | Induktivität                           |
| l             | mm                                      | Tiefe, Länge                           |
| M             | Nm                                      | Drehmoment                             |
|               | € h <sup>-1</sup>                       | Maschinenstundensatz                   |
| n             | -, -, U/min, rpm                        | Anzahl, Stückzahl, Drehzahl            |
| p             | -                                       | Polpaarzahl                            |
| P             | W, Nm·s <sup>-1</sup>                   | Leistung                               |
| Q             | cm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup>      | Zeitspanvolumen                        |
|               | kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup>      | Wärmestrom                             |
|               | m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>         | Volumenstrom                           |
| R             | Ω                                       | elektrischer Widerstand                |
| r             | mm                                      | Radius                                 |
| t             | mm, s                                   | Tiefe, Zeit                            |
| T, θ          | °C, K                                   | Temperatur                             |
| U             | V                                       | elektrische Spannung                   |
| u, v, w       | rad·s <sup>-1</sup> , m·s <sup>-1</sup> | Geschwindigkeit                        |
| V             | mm <sup>3</sup>                         | Volumen                                |
| w             | -                                       | Windungszahl                           |

| Formelzeichen | Einheit  | Bezeichnung                                     |
|---------------|--|---|
| $z$           | -  | Anzahl der aktiven Leiter pro Pol               |
| $\alpha$      | -  | Ausdehnungskoeffizient                          |
| $\lambda$     | $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ , -                       | spezifische Wärmeleitfähigkeit, Schnelllaufzahl |
| $\pi$         | -  | Kreiszahl                                       |
| $\rho$        | $kg \cdot m^{-3}$ , $\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$ | Dichte, spezifischer Widerstand                 |
| $\sigma$      | $(\Omega \cdot m)^{-1}$                              | elektrische Leitfähigkeit                       |
| $\phi$        | Wb   | magnetischer Fluss                              |
| $\omega$      | U/min  | Drehzahl  |

---

**Indexverzeichnis**

---

| Index | Bedeutung                            |
|-------|--------------------------------------|
| 0     | zum Zeitpunkt 0                      |
| a     | außen, axial                         |
| ab    | abgeführt                            |
| ag    | axial am Getriebe wirkend            |
| B     | Bremse                               |
| b     | Bandage                              |
| be    | Beschichtung                         |
| bp    | Blechkpaket                          |
| bt    | Bauteil                              |
| c     | Geschwindigkeit, Koerzitivfeldstärke |
| cu    | Kupfer                               |
| d     | Deckel                               |
| dan   | Deckel am Antriebsflansch            |
| dI    | Deckel 1                             |
| dII   | Deckel 2                             |
| eff   | effektiv                             |
| el    | elektrisch                           |
| f     | Flansch                              |
| fe    | Eisen                                |
| fem   | Daten aus Finite-Elemente-Berechnung |
| g     | Gewichtskraft, gesamt                |
| H     | magnetische Feldstärke               |
| hyst  | Hysterese                            |
| i     | innen                                |
| in    | induziert                            |
| iso   | Isolation                            |
| kin   | kinetisch                            |
| kühl  | Kühlung                              |
| l     | Luftspalt                            |
| L     | Lohnkosten, Lager                    |
| ls    | Lagersitz                            |
| lsw   | Luftspaltwicklung                    |

---

---

| Index | Bedeutung  |
|-------|--|
| m     | mittel   |
| M     | Montage, Maschine  |
| mag   | Magnet   |
| mat   | Material   |
| max   | maximal  |
| mech  | mechanisch   |
| mess  | Daten aus Messung  |
| min   | minimal  |
| nenn  | Nennbetriebspunkt, Auslegungspunkt                                 |
| ohm   | ohmsche  |
| opt   | optimal  |
| ph    | Phase  |
| prüf  | bezogen auf die Prüfung  |
| r     | Rotor, radial  |
| R     | Rüstzeit, Remanenz   |
| rg    | radial am Getriebe wirkend   |
| rms   | quadratischer Mittelwert, QMW, engl. <i>root mean square</i> , RMS |
| roh   | Rohteil  |
| S     | Spalt, Schicht, Sättigung  |
| st    | Stator   |
| stn   | Statornabe   |
| str   | Statorring   |
| sts   | Stundensatz  |
| stst  | Statorsteg   |
| stw   | Statorwelle  |
| T     | Turbine  |
| th    | thermisch, theoretisch, berechnet                                  |
| U     | Umgebung   |
| ü     | Überstand  |
| V     | Verlust  |
| W     | Wicklung, Windung, Wirbelstrom                                     |
| w     | Werkzeug, Geschwindigkeit  |
| W1    | Wand 1   |
| W2    | Wand 2   |

---

---

| Index    | Bedeutung           |
|----------|---------------------|
| wan      | Antriebswelle       |
| wm       | Montagewerkzeug     |
| zu       | zugeführt           |
| zy       | Zylinder des Rotors |
| $\Delta$ | Änderung            |

---



# 1 Einleitung

Am Lehrstuhl für Mechatronik der Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wird seit 2011 an einem innovativen Maschinenprinzip geforscht [1]. Dieses Prinzip wurde für den Einsatz in einem Pkw-Radnabenmotor (RNM) entwickelt. Es ermöglicht eine leichte Bauweise und ist daher für diese Anwendung geeignet. Dabei handelt es sich um eine drehende elektrische Maschine, die elektrisch kommutiert ist, also mit Impulsstrom, arbeitet und nach der Wirkweise einer Synchronmaschine [2] aufgebaut ist. Der gepulste Strom kann durch eine Block- oder Sinuskommütierung bzw. eine feldorientierte Regelung erzeugt werden. Diese Maschine nutzt die Lorentzkraft, da sich die Phasenleiter im Luftspalt zwischen Stator und Rotor befinden. Die Leiterkonfiguration wird im Folgenden als Luftspaltwicklung bezeichnet (LSW). Der Stator hat keine Nuten. Die Maschinen sind bisher als Außenläufer ausgeführt und besitzen einen Rotor, der mit Dauermagneten bestückt ist. Seit 2017 wird dieses Prinzip um eine unter der Luftspaltwicklung angeordnete Nutenwicklung ergänzt. Beide Wicklungen werden in Reihe geschaltet und im Folgenden als Kombinationswicklung (KW) bezeichnet. Die Windungszahl beträgt bei den Motoranwendungen eins.

In dieser Arbeit wird die Anwendung als Generator betrachtet. Die Generatoren sollen zur regenerativen Stromerzeugung eingesetzt werden. Solche Anlagen gibt es in drei verschiedenen Betriebsarten: Möglich ist zu einem die Inselösung, bei der die elektrische Energie in einem Akku gespeichert wird, da keine Netzanbindung vorhanden ist. Das findet zum Beispiel auf Berghütten, in Forschungsstationen, Kleingärten oder an anderen unerschlossenen Orten Anwendung. Eine andere Variante ist die Netzeinspeisung. Hierbei wird der gewonnene Strom an den Netzbetreiber verkauft. Zu diesem Zweck ist ein separater Stromzähler nötig. Die dritte Möglichkeit ist der Netzparallelbetrieb. Dies bedeutet, dass die Anlage an das öffentliche Netz angeschlossen ist. Bei Überproduktion wird Strom ins Netz eingespeist, während bei Unterproduktion die benötigte Energie aus dem Netz bezogen wird. Der Verbrauch einer Kilowattstunde Strom aus dem öffentlichen Netz kostet ca. 25 Eurocent. Die Vergütung für die Einspeisung einer Kilowattstunde Strom beträgt aber nur ca. 9 Eurocent. Wird der Strom selbst genutzt, können Kosten in Höhe von 25 Eurocent vermieden werden. Bei der Einspeisung dagegen werden 9 Eurocent Gewinn gemacht.

Als Anwendungsszenarien dienen hier die ‚Mill-4-all‘-Kleinwindkraftanlage und das universelle Staudruckwasserrad des Wachstumskerns ‚Fluss-Strom Plus‘ (siehe Kapitel 5). Dabei soll in der Arbeit die Entstehung des adaptiven und softwaregestützten Konstruktionsprozesses erläutert werden, der es ermöglicht, für die genannten Anlagen und weitere Anwendungen eine passende Generatorauslegung zu finden und diese zu realisieren (siehe Kapitel 4).

Außerdem wird auf die Fertigung der Generatorwicklung und ihres elektrischen Isolationssystems eingegangen. Zum Schluss werden Messungen des Wind- und Wassergenerators präsentiert und erläutert.

## 1.1 Motivation

Grundlage für jede Neuentwicklung bildet der Entwicklungsprozess, der zur Realisierung genutzt wird (siehe Kapitel 3). Dieser umfasst drei Abschnitte: die Entwicklungs-, die Konstruktions- und die Fertigungsphase. Früher wurden diese Phasen eigenständig und getrennt betrachtet, während sich heute zunehmend der Gedanke des ganzheitlichen Entwicklungsprozesses durchsetzt. Konstruktion bedeutet dabei, einen technischen Entwurf so auszuarbeiten, dass er gefertigt werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf diesen Bereich gelegt. Dabei wird nach der Methodik von Pahl/Beitz [3] vorgegangen und ähnliche Arbeitsweisen werden vorgestellt und verglichen (siehe Kapitel 3.2). Die Methode nach Pahl/Beitz erweist sich dabei als für die Gestaltung von technischen Systemen gut geeignet. Ziel ist es, durch den Einsatz einer entsprechenden Methodik ein möglichst gutes Ergebnis zu erzielen. Nach dem Paretoprinzip kann schon mit geringem Aufwand (20 %) eine ausreichende Lösung (80 %) ermittelt werden. Ziel der Methodik muss es also sein, entgegen der Annahme von Pareto, mit 25 % des Aufwandes eine 90 %-Lösung zu finden.

In zahlreichen Gesprächen mit Studierenden und Industriepartnern wurde deutlich, dass die Konstruktionsmethodik oder das wissenschaftliche Vorgehen im Allgemeinen als zusätzlicher Aufwand empfunden wird. Dies hat im Wesentlichen drei Gründe: Zum einen wird die Methodik nicht als flexibles und anpassbares Werkzeug verstanden, sondern als Abfolge von Prozessschritten dogmatisch abgearbeitet. So wird im speziellen Anwendungsfall mehr Aufwand betrieben, als nötig wäre. Zweitens wird die Absicherung des Konstrukteurs gegenüber dem Auftraggeber durch die Dokumentation der konsequenten methodischen Arbeitsweise unterschätzt. Drittens wird oft nicht die passende Methodik angewendet oder diese nicht richtig verstanden. Bei entsprechender Anwendung sind die Vorteile einer solchen Arbeitsweise offenkundig, denn sie bietet Kreativitätspotenzial. Wissen wird dokumentiert und weiterentwickelt. Gerade im Hinblick auf Folgeprojekte, die zeitlich versetzt sein können, und in Bezug auf den möglichen Ausfall von beteiligten Personen sowie sich ändernde Rahmenbedingungen des Marktes, ist dies von großer Bedeutung.

In manchen Bereichen ist das methodische Arbeiten notwendig. Besonders gilt dies im Rahmen der Zertifizierung von Unternehmensprozessen nach ISO 9001 [4]. Von steigender Bedeutung ist auch die Zertifizierung nach ISO 14001 [5], die die internationale Normung des Umweltmanagements im Unternehmen beschreibt. Außerdem gibt es Produktzertifikate wie das CE-Kennzeichen, das methodisches Arbeiten nach den EU-Richtlinien voraussetzt. Auch ist ein Trend zu Design-FMEAs (D-FMEA) erkennbar, was eine methodische Arbeitsweise der Fehlervermeidung beschreibt. Dieser Ansatz stammt aus der übergeordneten Denkweise des Entwicklungsprozesses, die unter dem Begriff Lean Development zusammengefasst werden kann und in Kapitel 3.1 näher erläutert wird.

---

Daraus lässt sich ableiten, dass das methodische Arbeiten im Bereich der Prozess- und Produktzertifizierung unerlässlich ist und es den langfristigen Erfolg und das produktive Arbeiten einer in der Entwicklung tätigen Firma oder Einrichtung begünstigt. Es ist unstrittig, dass eine solche Arbeitsweise ein Mindestmaß an dokumentierender Tätigkeit durch das beteiligte Personal verlangt, auch wenn diese Aufgaben im Allgemeinen als unattraktiv angesehen und deshalb oft vermieden werden. Der Einsatz von vorgefertigten Protokollen und Arbeitsanweisungen sowie Plänen kann die Prozesse unterstützen. Zeitgemäßer ist der Einsatz von Softwarewerkzeugen (siehe Kapitel 3.3). Diese Werkzeuge können dann nicht nur dem Konstrukteur bei der Erstellung und Dokumentation der Produktdaten helfen, sondern im gesamten Produktlebenszyklus genutzt werden. Die Verwendung von mobilen Geräten auf Basis von Cloud-Lösungen in der Produktion ist denkbar und wird von verschiedenen Firmen umgesetzt. Dieser Themenbereich wird aktuell unter der Bezeichnung ‚Industrie 4.0‘ diskutiert [6].

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines Konstruktionswerkzeugs erläutert, mit dessen Hilfe die oben erwähnten Generatoren konstruiert und gefertigt wurden. Außerdem werden die Ergebnisse der prototypischen Generatorfertigung und deren Vermessung vorgestellt und diskutiert.

## 1.2 Problemstellung

Bei der Entwicklung von neuartigen elektrischen Maschinen werden oft Anpassungen durchgeführt, da eine passende Auslegung umgesetzt werden soll. Die Auslegung ist Änderungen unterworfen, da sie an das Anwendungsszenario und die Umgebung angepasst werden muss. Auch das technische System der Maschine selbst wird ständig verbessert (siehe Kapitel 3.1.1). Dazu sind umfangreiche Kenntnisse zum Stand der Technik nötig (siehe Kapitel 2). Verbesserungen können dabei durch den Einsatz neuer Materialien, Halbzeuge und Zukaufteile, durch neue Verfahren oder die Änderung der Konstruktionsprinzipien geschehen. Die Zieldefinition einer Verbesserung muss je nach Anwendungsfall separat vorgenommen werden. So besteht zum Beispiel bei der RNM-Konstruktion das oberste Ziel darin, eine Gewichtsminimierung und einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen, wohingegen die Generatorkonstruktion durch die Kosten- und Lebensdauer- sowie die Umweltverträglichkeitsanforderungen dominiert wird. Die Konstruktion muss gewährleisten, dass die reale Ausführung der Auslegung möglichst nahekommt oder dieser im Idealfall genau entspricht. Hindernisse dabei sind Bauteile, die nur in bestimmten Normreihen vorhanden sind, sofern eine kostenintensive Spezialanfertigung vermieden werden soll. Hierzu zählen:

- Kugellager
- Schrauben
- Magneten
- Kupferlackdrähte / Leitermaterialien

- Elektrobleche (Schichtstärken/Materialien)
- Isolationsmaterial (Papier, Endkappen, Nutenkeile, Folien)
- Elektrische Klemmen und Verbindungselemente
- Zuleitungskabel
- Normgehäuse oder Halbzeuge für die mechanischen Maschinenteile

Die Realisierung einer kostengünstigen [7] und fertigungsgerechten [8] sowie in ihren elektrischen Eigenschaften (Drehmoment, Wirkungsgrad, Spannungslage) passenden Maschine ist eine komplexe Aufgabe. Der Dynamik des Weltmarktes und der Beschleunigung der Entwicklungszyklen von Produkten muss mit intelligenteren Lösungen begegnet werden, da der Einsatz von zusätzlichem Personal zu teuer wäre. Gerade am Standort Deutschland ist eine nachhaltige und kosteneffiziente Motorenproduktion nur so zu realisieren. Außerdem müssen kostengünstige und effiziente Fertigungsverfahren entwickelt werden, die die Produktion einer solchen Maschine erlauben. Daher ist es sinnvoll, einen adaptiven und softwaregestützten Konstruktionsprozess von neuartigen elektrischen Maschinen zu realisieren.

## 2 Stand der Technik

Drehende elektrische Maschinen haben in der heutigen Zeit eine hohe Bedeutung erlangt. Durch kontinuierliche Weiterentwicklung werden sie immer kompakter und effizienter und können so in zahlreichen neuen Anwendungsgebieten eingesetzt werden. In modernen Pkw sind oft mehr als 100 elektrische Maschinen verbaut. Drehende elektrische Maschinen sind Energiewandler, die im Motorbetrieb elektrische Energie ( $E_{el}$ ) in kinetische Energie ( $E_{kin}$ ) wandeln und umgekehrt im Generatorbetrieb. Energiewandlungsprozesse sind physikalische Prozesse und immer mit Verlusten ( $E_V$ ) behaftet. In dieser Arbeit wird der Generatorbetrieb betrachtet, deshalb gilt:

$$E_{el} = E_{kin} - E_V \quad \text{Gl. 2.1}$$

Die Verluste fallen in Form von Wärme hauptsächlich in der Wicklung und im Statorblechpaket an. Dies sorgt dafür, dass sich an der Maschine im Betrieb an verschiedenen Stellen unterschiedliche Temperaturen ausprägen. Die Verluste im Blechpaket können anhand der Datenblätter der Hersteller abgeschätzt werden. Die Verluste in der Wicklung sind nach dem ohmschen Gesetz zu berechnen:

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{Gl. 2.2}$$

Die Aufnahme der mechanischen Energie erfolgt über einen Wellenzapfen und die Abgabe der elektrischen Energie über passende Kabel. Die rotierenden elektrischen Maschinen lassen sich nach der Stromart, die durch die Ansteuerung bedingt wird, und nach der Wirkweise, die einen bestimmten Aufbau der Maschine beschreibt, gliedern (siehe Anhang 1).

Im Motorbetrieb ähnelt die hier betrachtete neuartige drehende elektrische Maschine einem mit Impulsstrom betriebenen bürstenlosen Gleichstrommotor. Diese Maschine ist elektrisch kommutiert und wird deshalb auch BLDC-Motor (engl. *brushless direct current motor*) genannt. Die vorliegende Arbeit behandelt den Generatorbetrieb, weshalb die Form des Stromes vom Verlauf des magnetischen Feldes im Stator abhängig ist. Daher kann die Maschine in diesem Zusammenhang als permanenterregte Synchronmaschine betrachtet werden. Die Läufer dieser Maschinen sind stets mit Permanentmagneten (PM) bestückt, weshalb auch die Bezeichnung PM-Synchronmaschine (PMSM) üblich geworden ist. BLDC-Motor und PM-Maschine unterscheiden sich nur durch ihre Ansteuerung, während sie im Aufbau und damit in den konstruktiven Eigenschaften gleich sind.

## 2.1 PM-Synchronmaschine

PM-Synchronmaschinen können als Innenläufer oder Außenläufer ausgeführt sein. Außerdem können sie als Radial- und Axialflussmaschine aufgebaut sein. Im Folgenden wird die Radialflussmaschine betrachtet, da sie gebräuchlicher ist, wobei es sich hier um die Ausführung als Innenläufer handelt. Die Maschine besteht aus einem Stator mit den Statorspulen und aus einem Rotor mit Dauermagneten. Besitzt der Rotor nur einen Süd- und einen Nordpol, hat er die Polpaarzahl ( $p$ ) eins und der Stator ist dann mit drei Phasenspulen bewickelt (U, V, W bzw. L1, L2, L3). Die Maschine wird im Motorbetrieb mit Wechselstrom betrieben [2]. Dieser kann entweder geregelt mit einer Blockkommutierung oder mit einer feldorientierten Regelung erzeugt werden oder direkt dem Stromnetz entnommen werden. Da heutzutage oft drehzahlregelte Antriebe verwendet werden, ist eine Steuerung nötig. Diese ist im einfachsten Fall eine B-6-Brücke (siehe Abbildung 1). Die Ansteuerung wird in dieser Arbeit nicht genauer betrachtet.

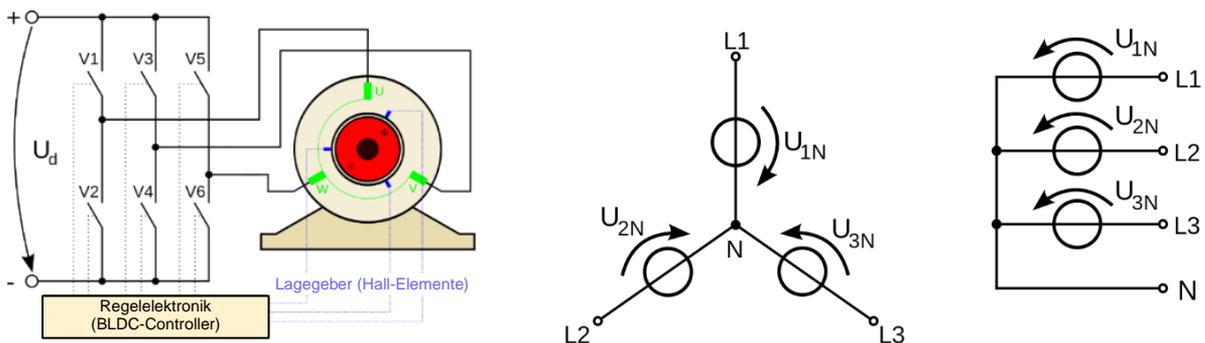


Abbildung 1: Elektrische Kommutierung<sup>1</sup> und verketteter Generatorstern<sup>2</sup>

Mit der Anzahl der Polpaare ( $p$ ) und der Frequenz ( $f$ ), mit der die Maschine versorgt wird, ergibt sich folgende Nenndrehzahl ( $n_{nenn}$ ) [2]:

$$n_{nenn} = \frac{f}{p} \quad \text{Gl. 2.3}$$

Daraus folgt, dass hochpolige Maschinen geringere Drehzahlen als niedrigpolige Maschinen haben oder dass diese mit einer höheren Frequenz versorgt werden müssen. Für die rotatorische mechanische Leistung ( $P_{mech}$ ), die dem Generator zugeführt wird, gilt folgender Zusammenhang [2]:

$$P_{mech} = \omega \cdot M, \text{ mit } \omega = 2\pi \cdot n_{nenn} \quad \text{Gl. 2.4}$$

<sup>1</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/B%C3%BCrstenloser\\_Gleichstrommotor#/media/File:EC-Motor.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/B%C3%BCrstenloser_Gleichstrommotor#/media/File:EC-Motor.svg) Stand 2020-11

<sup>2</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Verketteter\\_Generatorstern.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Verketteter_Generatorstern.svg) Stand 2020-11

Für die abgegebene elektrische Leistung gilt für sinusförmige Strom-, Spannungs- und Feldverläufe [2]:

$$P_{el} = \sqrt{3} \cdot U_{in} \cdot I_{in} \cdot \cos \varphi \quad \text{Gl. 2.5}$$

Wobei  $U_{in}$  die Strangspannung ist,  $I_{in}$  der Strangstrom und dem Wirkfaktor ( $\cos \varphi$ ). Der Faktor Wurzel 3 ergibt sich aus der Strangverkettung mit dem Sternpunkt bei einer Strangzahl ( $m$ ) von drei. Der Leistungsfaktor wird aus dem Phasenversatz von Strom und Spannung ermittelt, der von der Phaseninduktivität ( $L_{ph}$ ) und dem Phasenwiderstand abhängt [2]. Die induzierte Spannung steht in Relation zur Drehzahl und zur Polpaarzahl. Die von der Maschine im Generatorbetrieb abgegebene Spannung ist direkt proportional zur Drehzahl und zur Maschinenkonstante ( $k$ ) [2].

$$U_{iN} = k \cdot \omega - R \cdot I_{in} \quad \text{Gl. 2.6}$$

Je größer der induzierte Strom ist, desto größer ist das Drehmoment der Maschine (vgl. [2] Gl.1.20 ff.):

$$I_{in} \sim M_B \quad \text{Gl. 2.7}$$

Die Maschinen verfügen meist über ein Aluminiumgussgehäuse, in das das Blechpaket eingedrückt wird. In dem Blechpaket werden die Wicklungen eingebracht. Das Gehäuse ist beidseitig mit jeweils einem Lagerschild oder Deckel verschlossen.

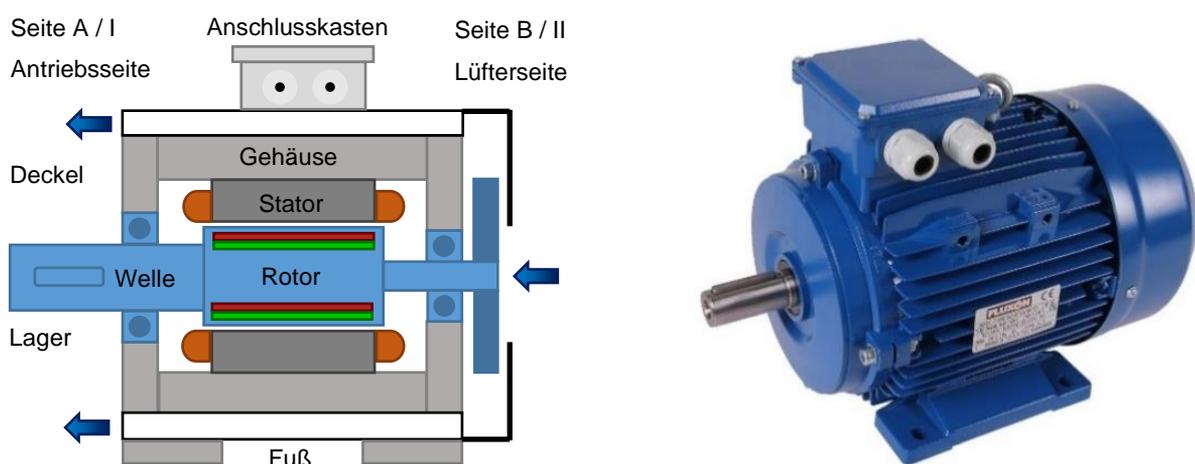


Abbildung 2: Schematischer Aufbau und Außenansicht eines Standardelektromotors<sup>3</sup>

<sup>3</sup> <https://valkenpower.com/3-phase-1500-rpm-motoren/elektromotor-4kw-1430rpm-400-690v-de-DE.html> Stand 2020-11

Die Lagerschilder sind häufig Aluminiumgussteile, die zentral über eine Aufnahmestelle für ein Kugellager verfügen. Im Betrieb werden die Lager warm. Hier entstehen zusätzlich zum Wandlungsprozess Lagerverluste ( $P_L$ ), die jedoch bei richtig dimensionierten Lagern in Relation zu den Wandlungsverlusten gering ausfallen. Kugellager sind hoch entwickelte Maschinenelemente und tribologisch optimiert, weshalb sie in sehr vielen Anwendungsfällen im Bereich der E-Maschinen zum Einsatz kommen [9]. Der Rotor oder Läufer der Maschine ist mit Dauermagneten alternierender Polung bestückt, sodass beim Umlauf des Rotors das benötigte Wechselfeld im Stator entsteht. Die hier dargestellte Maschine ist luftgekühlt (siehe Abbildung 2). Die Lüfterleistung ( $P_{kühl}$ ) geht als Verlustleistung in die Energiebilanz der Maschine ein [2]:

$$P_{el} = P_{mech} - P_V - P_{kühl} - P_L \quad \text{Gl. 2.8}$$

Die Wandlungsverluste ( $P_V$ ) untergliedern sich wie folgt [2]:

$$P_V = P_{V,ohm} + P_{V,hyst} + P_{V,w} \quad \text{Gl. 2.9}$$

Die ohmschen Verluste ( $P_{V,ohm}$ ) entstehen in der Wicklung, die Hysterese- ( $P_{V,hyst}$ ) und Wirbelstromverluste ( $P_{V,w}$ ) im Blechpaket. Der Wirkungsgrad ist der Quotient aus abgegebener und aufgenommener Leistung. Für eine elektrische Maschine im Generatorbetrieb ergibt sich der Wirkungsgrad wie folgt [2]:

$$\eta_M = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{mech} - P_V - P_{kühl} - P_L}{P_{mech}} \quad \text{Gl. 2.10}$$

Die Verlustleistungsanteile  $P_V$ ,  $P_{kühl}$  und  $P_L$  müssen so gering wie möglich gehalten werden, um möglichst viel Energie nutzbar zu machen. Die für diese Maschinen geltende Norm ist die DIN EN 60034 oder auch VDE 0530: ‚Drehende elektrische Maschinen‘. Hierbei handelt es sich um eine Normreihe mit ca. 30 Teilen, wovon nachfolgend die für die vorliegende Arbeit relevanten genannt werden. Der erste Teil enthält die wichtigsten Informationen und befasst sich mit der Bemessung und dem Betriebsverhalten dieser Maschinen [10]. Für die vorliegende Arbeit sind die Betriebsarten von Bedeutung, die von S1 bis S9 definiert sind, wobei die Einschaltzeit je nach betrachtetem Zeitintervall immer kürzer wird. In dieser Arbeit werden Maschinen für den S1-Betrieb ausgelegt. Diese Betriebsform kann auch als Dauerbetrieb bezeichnet werden, was bedeutet, dass die Maschine so ausgelegt ist, dass sie auch im Dauerbetrieb nicht überhitzen kann. Sie erreicht den thermischen Beharrungszustand, wenn sich die Maschine nicht mehr als zwei Kelvin pro Stunde erwärmt. Der fünfte Teil erläutert Schutzarten, die in Bezug zur Gesamtkonstruktion stehen, auch als IP-Code (engl. *ingress protection*) bekannt [11]. Im sechsten Teil werden die einzelnen Kühlverfahren und deren Klassifikation nach IC-Code (engl. *international cooling*) ausgeführt [12]. Im siebten Teil werden die

---

Bauarten der Motoren nach IM-Code (engl. *international mounting*) klassifiziert [13]. Im achten Teil werden die Anschlussbezeichnung und die Drehrichtung genormt. Im neunten Teil werden Geräuschgrenzwerte definiert [14]. Im elften Teil werden Maßnahmen für den thermischen Schutz erläutert [15]. In Teil fünfzehn werden die Steh-Stoßspannungspegel von Formspulen im Ständer erläutert. Eine weitere internationale Norm ist die NEMA MG 1 (engl. *motors and generators*). Hierbei handelt es sich um eine amerikanische Normung der National Electrical Manufacturers Association (NEMA).

### 2.1.1 Läufer

Läufer großer Synchronmaschinen bestehen aus einer Welle, auf der ein Blechpaket (siehe Kapitel 2.1.3) sitzt. Ein Blechpaket wird verwendet, da durch den Einfluss der Statorwicklungen im Betrieb auch Wirbelströme und somit Verluste entstehen können. Am Blechpaket werden Dauermagneten befestigt, wobei diese in der Regel knapp unter der Oberfläche eingebettet und verklebt sind. Zudem sind sie leicht angewinkelt, um mit möglichst geringem Einsatz des Seltenen-Erden-Magnetmaterials einen möglichst starken magnetischen Fluss zu erzielen. Dieser prägt sich kreisförmig aus, weshalb die Magneten als Quelle des Flusses in der Mitte orthogonal zu den Flusslinien angeordnet sind. Bei kleineren Läufern sind die Magneten teilweise als Pol-Segmente ausgeführt und außen auf den Läufer geklebt. Der Grundkörper des Läufers besteht dann aus einem Baustahl mit ausreichender Sättigungsmagnetisierung ( $B_s$ ). Aufgrund der Fliehkräfte, die auf die Magneten wirken, werden diese Rotoren bandagiert. Bei hohen Leistungsdichten werden die Magneten aus Neodym-Eisen-Bor- ( $Nd_2Fe_{14}B$ ) oder Samarium-Kobalt-Legierungen (SmCo) hergestellt. Bei niedrigeren Leistungsdichten hingegen kommen gesinterte Ferrite zu Einsatz. Die Magneten sind üblicherweise vernickelt oder mit Mehrschichtsystemen aus Nickel und Kupfer gegen Korrosion geschützt.

### 2.1.2 Lagerstelle

Standardmotoren verfügen über jeweils ein fettgeschmiertes Radialrillenkugellager (RRKL) an beiden Seiten des Läufers (siehe Abbildung 2) [16], [17]. Die Fettschmierung ist auf die Lebenszeit des Lagers ausgelegt, sodass dieses nicht nachgeschmiert werden muss. Die beiden Lager sind leicht vorgespannt, um Laufgeräusche und Verschleiß zu reduzieren [17]. Bei der Auslegung ist der Standardprozess anzuwenden, der aus den aktuellen Katalogen der Wälzlagerhersteller zu entnehmen ist [9], [18], [19]. Die Lagerstelle einer drehenden elektrischen Maschine hat nicht nur die Aufgabe der sicheren Führung des Läufers, sondern ist auch die Verbindungsstelle zwischen dem feststehenden und dem rotierenden Teil und somit immer auch eine dynamische Dichtstelle [20]. In dieser Funktion dient sie der Abdichtung des Innenraums der Maschine gegen unerwünschte Fremdmedien und deren Ableitung. Keine Dichtstelle dichtet dauerhaft, wenn sie Verschmutzungen ausgesetzt ist [21]. Deshalb werden Wirk-

prinzipien genutzt, damit sichergestellt ist, dass eventuell vorhandene Medien abgeleitet werden. Dies kann zum Beispiel durch Abweiser- oder Schleuderbleche geschehen, wobei eine Vielzahl von weiteren Lösungen denkbar ist [22]. Wichtige Auslegungsgrößen sind die dynamische Tragzahl und die Lebensdauer der Lager [23]. Die genauen Anforderungen und Auslegungskriterien müssen je nach Anwendungsfall festgelegt werden.

### 2.1.3 Gehäuse und Blechpaket

Die Gehäuse der Maschinen bestehen aus einem hohlen Aluminiumkörper mit Kühlrippen und den entsprechenden Deckeln zum Verschluss der Maschine an den Seiten. Das Gehäuse verfügt über Füße mit Schraubblaschen zur stehenden Montage auf dem Boden. Auch die Flanschmontage ist gebräuchlich. Hierbei ist ein Flansch mit entsprechendem Bohrbild zur Befestigung der Maschine am Deckel oder Gehäuse angearbeitet [13]. Bei der Herstellung dieser Bauteile kommen das Druckguss- oder das Stranggussverfahren zum Einsatz. Seltener werden Graugussteile verwendet. Die Gehäuseteile werden in den entsprechenden IEC-Normreihen (internationale elektrotechnische Kommission) angeboten. Das Blechpaket wird in diese Gehäuse eingepresst. Es besteht aus geschichteten dünnen Elektroblechen, was bedeutet, dass es aus dünnen, gestanzten oder gelaserten Blechlagen zusammengesetzt ist, die zueinander elektrisch isoliert sind. Die Isolation besteht aus dünnen Lackschichten. Diese ist nötig, um die Wirbelströme innerhalb der Lagen kleinzuhalten. Diese entstehen bei der Ummagnetisierung durch das umlaufende Magnetfeld im Betrieb der Maschine. Die Verluste lassen sich nach der Maxwell-Gleichung für parallel zur Blechrichtung durchströmte Eisen wie folgt berechnen [24]:

$$P_{V,w} = \frac{\pi^2 \cdot \sigma \cdot d^2}{6 \rho} B_{max}^2 \cdot f^2 \quad \text{Gl. 2.11}$$

Dabei ist  $\sigma$  die elektrische Leitfähigkeit und  $d$  die Stärke des Bleches. Die Dichte ( $\rho$ ) des Materials geht im Nenner ein. Des Weiteren müssen der maximale magnetische Fluss ( $B_{max}$ ) und die Frequenz ( $f$ ) der Ummagnetisierung (siehe Gleichung 2.2) bekannt sein. Generell gilt der Zusammenhang: Je größer die Drehzahl der Maschine oder je geringer die Verluste sein sollen, desto feiner muss geblecht werden. Das Grundmaterial des Bleches hat Einfluss auf die Hystereseverluste und muss je Anwendungsfall passend ausgewählt werden [24]:

$$P_{V,hyst} = k_H \frac{4 H_C}{\rho} B_{max} \cdot f \quad \text{Gl. 2.12}$$

Die Hystereseverluste beschreiben die Arbeit, die nötig wird, um die Weiss'schen Bezirke zu verschieben. Die Größe dieser Arbeit ist im B-H-Diagramm durch die von der Hystereseurve

eingeschlossene Fläche gekennzeichnet. Diese spannt sich in Form eines mittelpunktzentrierten Parallelogramms auf. Die y-Achse gibt den Wert für den Fluss ( $B$ ) an und die x-Achse den Wert der Feldstärke ( $H$ ). Die Größe des Parallelogramms wird von den Extremwerten des Flusses ( $B_{\max/\min}$ ) und von der Koerzitivfeldstärke ( $\pm H_c$ ) bestimmt. Die spezielle Form wird mit dem Faktor  $k_H$  berücksichtigt. Die Koerzitivfeldstärke ist ein Materialparameter, der angibt, wie groß die magnetische Feldstärke sein muss, um die zuvor bis zur Sättigungsdichte aufgeladene ferromagnetische Substanz vollständig zu entmagnetisieren [24].

Es muss eine passende Konfiguration aus Blechstärke ( $d$ ) und Materialeigenschaften ( $\rho$ ,  $\sigma$ ,  $H_c$ ) gefunden werden, um eine anforderungsgerechte Auslegung zu realisieren. Als Grundmaterial werden Eisen-Silizium-Legierungen verwendet. Es handelt sich um weichmagnetische Werkstoffe. Die genauen magnetischen, physikalischen und sonstigen Eigenschaften der Werkstoffe sind in den Normen: ‚Kaltgewalztes nicht kornorientiertes Elektroblech und -band im schlussgeglühten Zustand‘ [25] und ‚kornorientiertes Elektroblech und -band im schlussgeglühten Zustand‘ [26] enthalten. Die Bleche können dabei als Paket verbacken, verschweißt, verlötet oder durch Stanzpaketieren oder Einpressen form- oder kraftschlüssig fixiert sein. Manche Maschinen haben kein separates Mantelgehäuse um das Blechpaket, sondern es ist so ausgeführt, dass es als Teil des Gehäuses genutzt werden kann.

#### 2.1.4 Kühlung

Bei der Kühlung von elektrischen Maschinen lassen sich zwei Hauptgruppen unterscheiden: zum einen die luftgekühlten und zum anderen die wassergekühlten Maschinen. Erstere sind weiter verbreitet, da sie einfach im Aufbau und damit kostengünstig sind.

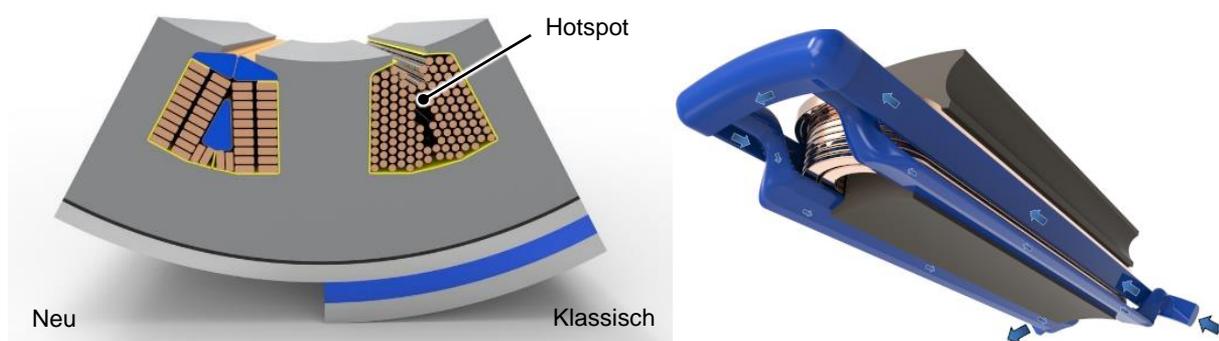


Abbildung 3: Konzeptvergleich, Wasserkühlung und Verlauf der Kanäle im Motor<sup>4</sup>

Die Wasserkühlung ist bei großen Maschinen und Maschinen mit hoher Leistungsdichte unabdingbar. Bei großen Maschinen kann die Wärme ab einem bestimmten Punkt nicht mehr ausreichend abgeführt werden, da die Spulen, in denen die Wärme entsteht, zu groß werden und damit auch der Wärmewiderstand zur Wärmesenke (den Kühlrippen). Das bedeutet, dass

<sup>4</sup> <https://sci-mo.de/scimo-motors/> Stand 2020-11

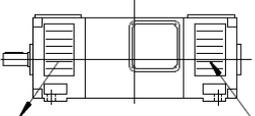
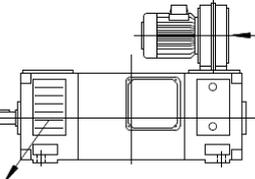
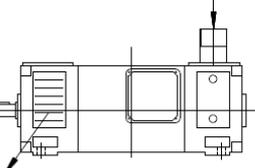
die Temperatur im Inneren schon sehr hoch ist, obwohl der Motor äußerlich noch kühl ist. Die höchste Temperatur (Hotspot) tritt bei konventionellen Maschinen im Inneren des Wickelpakets auf. Dort kann entweder mit Durchlüftung oder mit Wasserkühlung gearbeitet werden. Ein Beispiel einer solchen Kühlung stammt von der Firma SciMo – elektrische Hochleistungsantriebe GmbH aus Karlsruhe (siehe Abbildung 3). Die Maschinen werden außerdem nach der maximal zulässigen Temperatur klassifiziert. Dabei wird die maximale Temperatur angegeben, die im Dauerbetrieb von den Motorkomponenten ertragen werden kann. Zusätzlich werden Überlasttemperaturen genannt, die nur kurzfristig zulässig sind. Folgende Klassen sind definiert:

Tabelle 1: Synthese der Isolierstoffklassen nach DIN EN 60085 (grau) und EN 60034-11:2004 (blau) und Extrapolation der Überlasttemperatur [27]

| Kennung | Nominal | Wicklung | Überlast Wicklung |
|---------|---------|----------|-------------------|
|         | T in °C |          |                   |
| Y       | 90      | 105      | 200               |
| A       | 105     | 120      | 211               |
| E       | 120     | 135      | 221               |
| B       | 130     | 145      | 225               |
| F       | 155     | 170      | 240               |
| H       | 180     | 195      | 260               |
| N       | 200     | 215      | 290               |
| R       | 220     | 235      | 324               |
| -       | 250     | 265      | 396               |

Des Weiteren wird in der DIN EN 60034 Teil 6 Kühlung ein IC-Code eingeführt. Dieser klassifiziert alle konventionellen Kühlverfahren. In der folgenden Tabelle 2 sind verschiedene gebräuchliche Varianten und deren Klassifikation laut DIN gelistet:

Tabelle 2: Einteilung der Kühlverfahren nach DIN EN 60034-6

|       |   |  |
|-------|---|--|
| IC 01 |  | Schutzart IP 21 - IP 23<br>(Typ G...)<br><b>Eigeninnenkühlung</b><br>Hierbei wird die Kühlluft durch einen am Rotor angebrachten Lüfter durch den Motor geblasen.  |
| IC 06 |  | Schutzart IP 21 - IP 23<br>(Typ G..I)<br><b>Fremdinnenkühlung</b><br>Hierbei wird die Kühlluft durch ein Fremdluftgebläse durch den Motor geblasen.<br>Die Ansaugseite kann mit einem Staubschutzfilter versehen werden.   |
| IC 17 |  | Schutzart IP 21 - IP 23<br>(Typ G..)<br><b>Ein Rohranschlussstutzen für Fremdinnenkühlung</b><br>Hierbei wird die Kühlluft durch den Rohranschlussstutzen mittels eines separaten kundenseitig erforderlichen Fremdluftgebläses durch den Motor geblasen und tritt auf der anderen Seite in den freien Raum. |

### 2.1.5 Statorwicklung

Die Statorwicklung befindet sich in den Nuten des Blechpakets. Diese Spulen stellen den wichtigsten Teil der Maschine dar, da sie den Strom führen und so das Drehmoment erzeugen und den Wandlungsprozess realisieren. Über die Eigenschaften des Leitermaterials (siehe Abschnitt Leitermaterial), ihre Spannungsfestigkeit (siehe Abschnitt Elektrischer und mechanischer Schutz) und ihre Kühlbarkeit (siehe Kapitel 2.1.4) wird die Leistungsfähigkeit des Motors maßgeblich bestimmt. Die Spulenwickeltechnik (siehe Abschnitt Wickeltechnik) stellt, neben dem Konstruktionsprozess (siehe Kapitel 3), den zweiten Schwerpunkt der Arbeit dar. Statorwicklungen bestehen aus gewickeltem Leitermaterial. Die Anzahl der Windungen einer Spule unter einen gleichen magnetischen Pol wird als Windungszahl ( $n_w$ ) bezeichnet. Zusätzlich verfügen die Spulen immer über einen mechanischen und elektrischen Schutz. Die Phasenenden werden meist zu einem Anschlusskasten geführt und dort an einem Motorklemmbrett<sup>5</sup> angeklemt. Der Anschlusskasten ist an einem gut zugänglichen Punkt der Maschine befestigt (siehe Abbildung 2) [13]. Es werden meist dreiphasige Maschinen gebaut, die nach außen mithilfe von Brücken als Stern- oder Dreiecksschaltung angeschlossen sein können [2]. In manchen Fällen wird das Leitermaterial um einen nicht magnetischen Spulenkörper gespult und dieser wird dann eingesetzt (Einzelzahneinsteckspule). Dieser Körper dient als elektrischer und mechanischer Schutz der Spule zum Stator. Außerdem ist die Spule bei der Montage besser zu handhaben. Das Isolationssystem und der mechanische Schutz müssen möglichst dünn ausgeführt sein, um zum einen Leitermaterial mit großem Querschnitt in die Maschine bringen zu können und zum anderen die Wärmeableitung aus der Wicklung nicht zu sehr zu behindern. Große Leiterquerschnitte ( $A$ ) resultieren in einem geringen Phasenwiderstand ( $R_{ph}$ ) ([28] 16 ff.).

$$R_{ph} = \rho(T) \cdot \frac{l}{A} \quad \text{Gl. 2.13}$$

Die Länge des Leiters ( $l$ ) erhöht den Phasenwiderstand. Deshalb muss der Leiter so kurz wie möglich sein und die Wickelköpfe sollten nicht zu groß gestaltet werden. Ein sicherer, einfacher und reproduzierbarer Fertigungsprozess muss jedoch stets gewährleistet sein. Ein weiterer Einflussfaktor ist der spezifische elektrische Widerstand ( $\rho$ ). Dieser ist ein temperaturabhängiger Materialparameter.

$$\rho(T) = \rho(T_0) \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) \quad \text{Gl. 2.14}$$

---

<sup>5</sup> <https://www.industrystock.de/de/unternehmen/Motoren/Elektromotorenteknik/Motorenklemmbrett>  
Stand 2020-11

Bezugspunkt für die Berechnung ist eine Temperatur ( $T_0$ ) von 20 °C, da die Temperaturkoeffizienten ( $\alpha$ ) für diesen Wert bestimmt wurden. Für Kaltleiter steigt der Wert leicht an, wenn die Leitertemperatur steigt. Alle in der E-Maschinen-Technik gebräuchlichen Leitermaterialien weisen Kaltleitereigenschaften auf. Deshalb sollten die Wicklungen möglichst kühl bleiben, um geringe ohmsche Verluste im Betrieb und somit auch einen hohen Wirkungsgrad zu realisieren. Für die ohmsche Verlustleistung ( $P_{V,ohm}$ ) der Maschine gilt (vgl. [28] V7-Gl. 32 ff.):

$$P_{V,ohm} = 3 R_{ph}(T) \cdot I_{ph,eff}^2 \quad \text{Gl. 2.15}$$

Weitere Effekte, die den ohmschen Widerstand in Statorwicklungen beeinflussen, sind der Skin- und der Proximity-Effekt ([29] Kapitel 7.7).

Die Wickeltechnik und die Art und Ausführung der verwendeten Spulen prägen das Verhalten und die Güte jeder elektrischen Maschine maßgeblich. Deshalb soll hier ein kurzer Überblick über die gebräuchlichen Spulenformen und deren Eigenschaften gegeben werden. Der wichtigste Parameter ist der mechanische Füllfaktor ( $F$ ), der wie folgt definiert ist:

„Als Füllfaktor bezeichnet man in der Spulenwickeltechnik das Verhältnis der effektiven Querschnittsfläche der Kupferleiter inkl. Isolation zur theoretisch maximalen Querschnittsfläche des verfügbaren Wickelfensters (z. B. in einem Elektromotor, Transformator oder Relais).“<sup>6</sup>

Jede Spule wird gewickelt. Das Fertigungsverfahren ‚Wickeln mit Draht‘ ist in der DIN 8580 wie folgt definiert:

„Wickeln mit Draht ist Fügen eines Innenteils mit einem Draht durch dessen fortlaufendes Biegen um das Innenteil.“<sup>7</sup>

Es gibt dabei drei verschiedene Grundwicklungsarten:

- Wilde Wicklung
- Schraubenförmige Wicklung
- Orthozyklische Wicklung

Des Weiteren kann nach Wellenwicklung und Schleifenwicklung unterschieden werden, wobei Erstere meist verteilte Wicklungen und letztere konzentrierte Wicklungen sind. Die Einzelzahnspulenwicklung zählt auch zu den konzentrierten Wicklungen [30]. Es kann in Draht und Stabwicklungen unterschieden werden. Stabwicklungen werden entgegen ihrer Benennung nicht durch Wickeln von Draht nach DIN 8580 erstellt, sondern bestehen meist aus in den Stator eingesteckten Kupferstäben, die an den Seiten entsprechend kontaktiert werden. Ein Beispiel für Stabwicklungen sind die Hair-Pin-Wicklungen. Die Benennung Hair-Pin ist auf die

<sup>6</sup> Franz Spüntrup: Die Fachprüfung in den Elektroberufen. Verlag W. Girardet, Essen 1967, S. 79.

<sup>7</sup> Hagedorn 2016 Wickeltechnik S. 14 Abb. 1.3

haarspangenähnliche Form der Leiterstäbe zurückzuführen. Außerdem kann eine Unterscheidung anhand des Wickelsystems vorgenommen werden:

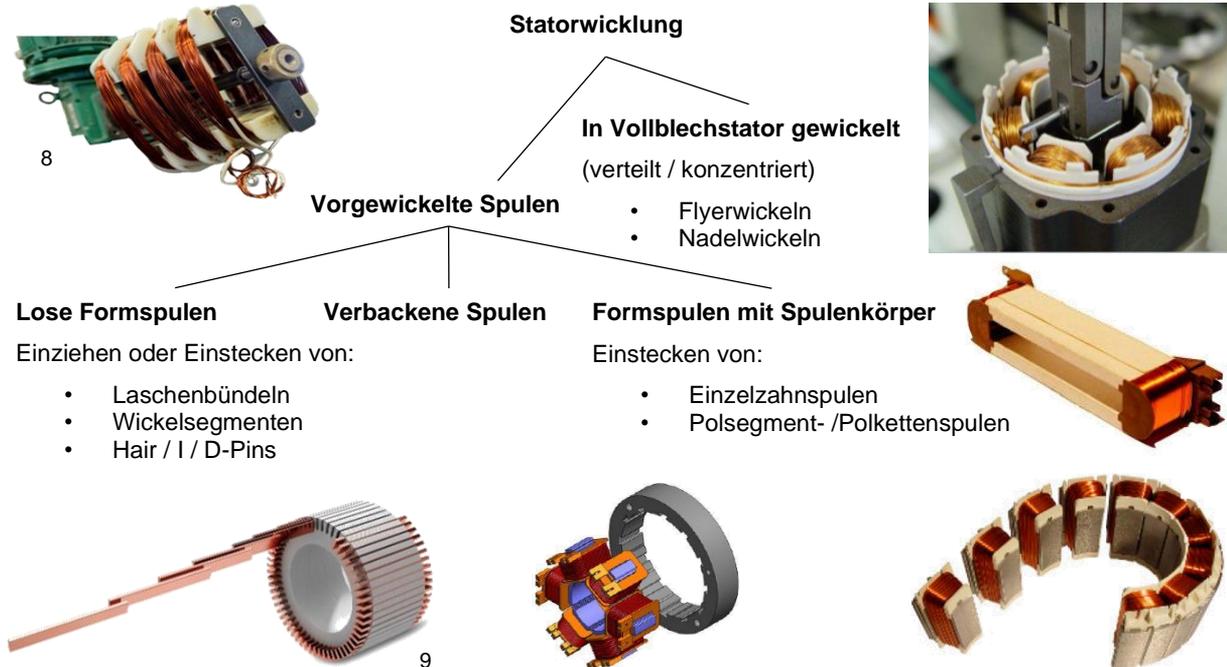


Abbildung 4: Einordnung der Statorwicklung nach Wickelsystem<sup>8,9,10</sup>

Die einzelnen Wickelverfahren werden im Abschnitt Wickeltechnik genauer beschrieben. Zudem existieren verschiedene Verschaltungsformen. Die Qualität der Statorwicklung bestimmt maßgeblich die Energieeffizienz der Maschine. Hierfür wurde eine Kennzeichnung eingeführt, die die Motoren in fünf IE-Klassen einteilt (engl. *international efficiency*) [31], [32]:

- IE1 - Standard Efficiency
- IE2 - High Efficiency
- IE3 - Premium Efficiency
- IE4 - Super Premium Efficiency

Die Messverfahren zur Bestimmung der Effizienz sind in der Norm 60034, Teil zwei, in den Blättern eins bis drei beschrieben [33], [34], [35]. Sonderfälle wie gegossene, geätzte oder gedruckte Spulen werden hier nicht betrachtet.

### *Leitermaterial*

Die Auswahl des Leitermaterials hat entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften der Wicklung sowie auf deren Herstellung. Als Leitermaterial wird oft Kupferlackdraht verwendet. Dabei

<sup>8</sup> <https://elektromotoren-blog.de/elektromotor-spulen-wickeln/> Stand 2021-11

<sup>9</sup> <https://www.wieland.com/en/solutions/mobility/powerful-e-mobility-solutions> Stand 2021-11

<sup>10</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Spulnwickeltechnik> Stand 2021-11

handelt es sich um einen mehrfach beschichteten Draht, der aus reinem Kupfer besteht und bei der Herstellung von Motorspulen und Transformatoren zum Einsatz kommt. Die Beschichtung dient der elektrischen Isolation des Drahtes und fördert dessen Wickelbarkeit sowie die Verarbeitbarkeit.

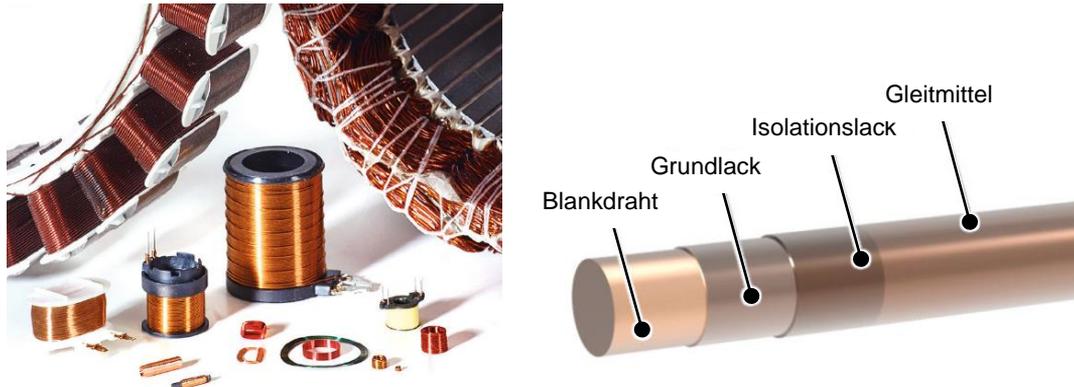


Abbildung 5: Kupferlackdrahtspulen und Aufbau des Leitermaterials [30] S. 18, S. 106

Als Leiterquerschnitt ist der Runddraht weit verbreitet, aber auch der Flachdraht ist in einigen Anwendungen zu finden. Dazu wird der Runddraht durch zwei Walzen gezogen und abgeflacht. Ein perfekter Quadratquerschnitt wird dadurch nicht erreicht. Das ist zwar möglich, aber für die meisten Anwendungen zu teuer. Sonderformen sind Profildrähte und Stäbe, wie sie für Hair-Pin-Wicklungen benötigt werden oder für Spezialantriebe mit hohen Wirkungsgraden. Meist wird für den Blankdraht Kupfer als Grundwerkstoff verwendet, wobei Aluminium ebenfalls möglich ist, da es günstiger und leichter ist und nur einen geringfügig höheren elektrischen Widerstand aufweist. Andere sehr gute Leiter sind Gold und Silber (Tabelle 3). Gold wird oft als Beschichtung für Kontaktstellen verwendet, da es als Edelmetall nicht korrodiert und so der Kontaktwiderstand langfristig gering bleibt. Kadmium-Beschichtungen sind für diesen Zweck gleichfalls geeignet, da sie zusätzlich ein gutes Gleit- und Schmierverhalten aufweisen.

Tabelle 3: Materialkennwerte und Preise von verschiedenen Metallen [30] S. 96 Tab. 2.1

| Metall    | Rel. Elektrische Leitfähigkeit | Rel. Wärmeleitfähigkeit | Rel. Wärmeausdehnung | Normierte Dichte | Normierte Kosten |
|-----------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------|------------------|
| Silber    | 106                            | 108                     | 112                  | 118              | 8917             |
| Kupfer    | <b>100</b>                     | <b>100</b>              | <b>100</b>           | <b>100</b>       | <b>100</b>       |
| Gold      | 72                             | 76                      | 100                  | 217              | 633333           |
| Aluminium | 62                             | 56                      | 135                  | 30               | 28               |

Je mehr zusätzliche Anforderungen dazu kommen und je höher diese gewichtet werden, kann es sinnvoll sein, niedrig oder höher legierte Werkstoffe (Messing, Zinnbronze) einzusetzen. Messing wird zum Beispiel für die Schrauben in Klemmbrettern verwendet. In den meisten

Anwendungsfällen wird reines Kupfer als Leiterwerkstoff verwendet. Hierbei gibt es vier verschiedene Sorten: Cu-OFE, Cu-HCP, CU-ETP, Cu-DHP<sup>11</sup>. Das Cu-ETP ist aufgrund seiner guten Kaltverformbarkeit und des PreisLeistungsverhältnisses ein oft verwendetes Leitermaterial. Nur hinsichtlich der Schweißbarkeit sind die anderen Werkstoffe überlegen. Wenn keine hohe Leitfähigkeit nötig ist und der Kostenaspekt eine Rolle spielt, kann auch Aluminium verwendet werden. Eine weitere Lösung ist der Materialverbund aus Kupfer und Aluminium. Hierbei wird ein Aluminiumdraht mit Kupfer beschichtet (engl. *copper-clad aluminium*, CCA). Der Skin-Effekt wird hier ausgenutzt, nach dem Leiter, die mit Wechselstrom beaufschlagt sind, im Inneren weniger Strom führen. Deshalb fällt die schlechtere Leitfähigkeit des Aluminiums im Inneren des Materialverbunds nicht ins Gewicht (siehe Anhang 2). Folgendes Fazit kann nach Hagedorn gezogen werden: „Die Verwendung von Kupfer in der Elektrotechnik beruht auf dem Verhältnis von Kosten zu spezifischer Leitfähigkeit. Die guten Umformeigenschaften des Materials ermöglichen eine gute Verarbeitung. Das sind die Gründe für die aktuelle Dominanz von Kupfer als Leitermaterial für die verschiedensten Arten von Spulen.“<sup>12</sup> Auch beim Cu-ETP müssen Unterschiede bei den oben genannten Eigenschaften berücksichtigt werden. Insbesondere bei der elektrischen Leitfähigkeit und der Festigkeit, die bei der mechanischen Bearbeitung entscheidend ist (siehe Tabelle 4). Die Festigkeit beeinflusst die nötigen Prozesskräfte bei der Verarbeitung des Drahtes. Außerdem wirkt sie sich, infolge des Aufspulens des Drahtes nach dessen Herstellung, auf die Rückfederrate und die im Draht vorhandenen Eigenspannungen aus.

Tabelle 4: Verarbeitungseigenschaften von Cu-ETP [30] S. 101

| <b>Festigkeitsklasse</b> | <b>Elektrische Leitfähigkeit in <math>m/\Omega mm^2</math></b> | <b>Zugfestigkeit <math>R_m</math> in <math>N/mm^2</math></b> | <b>0,2 % Streckgrenze <math>R_{p0,2}</math> in <math>N/mm^2</math></b> | <b>Brinellhärte HV</b> |
|--------------------------|--|--|--|------------------------|
| R200                     | 58   | 200-250  | max. 100   | 55                     |
| R220                     | 58   | 220-260  | max. 140   | 55                     |
| R240                     | 57   | 240-300  | max. 180   | 80                     |
| R290                     | 57   | 290-360  | max. 250   | 95                     |
| R360                     | 56   | min. 360   | 320  | min 110                |

Da das Leitermaterial zu einer Spule mit mehreren aufeinanderliegenden Windungen gewickelt werden soll, muss es elektrisch isoliert werden, sodass der Strom auch durch diese Windungen fließt und nicht den kürzesten Weg durch die Kontaktstellen der Leiterbahnen nimmt. Dazu werden die Drähte mit unterschiedlichen Materialien und Verfahren beschichtet. Das Beschichten der Drähte ist ein sehr aufwendiger und komplexer Prozess, auf den hier nicht

<sup>11</sup> <https://www.kupferinstitut.de/kupferwerkstoffe/> Stand 2020-11

<sup>12</sup> Handbuch der Wickeltechnik, S. 102 [30]

näher eingegangen wird. Im Ergebnis entsteht ein Draht, der elektrisch isoliert und korrosionsgeschützt ist und über eine Gleitschicht verfügt. Da zwischen zwei Drähten immer zwei Lacksysteme aufeinandertreffen, sind Fehlstellen zulässig (siehe Tabelle 5). Die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Position von zwei Fehlstellen überschneidet und so ein Kurzschluss entsteht, ist sehr gering. Eine perfekte Isolation ist schwer realisierbar, aber zum Beispiel bei öl- oder wassergefüllten Maschinen nötig.

Tabelle 5: Erlaubte Anzahl an Fehlstellen der Isolation nach EN 60317-0-1:2008, S.18

| Nenndurchmesser des Leiters in mm |                    | Höchstwert der Fehlerzahl je 30 m |           |        |
|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------|--------|
| Über                              | Bis einschließlich | Grad 1/1B                         | Grad 2/2B | Grad 3 |
| -                                 | 0,05               | 60                                | 24        | -      |
| 0,05                              | 0,08               | 60                                | 24        | 3      |
| 0,08                              | 0,125              | 40                                | 15        | 3      |
| 0,125                             | 1,6                | 25                                | 5         | 3      |

Die Isolation schränkt die Verarbeitungseigenschaften des Drahtes ein. So sind zum Beispiel Mindestbiegeradien einzuhalten, die meist im Bereich von drei bis fünf Mal der Drahthöhe, um die gebogen werden soll, liegen. Genaue Angaben müssen den Datenblättern der jeweiligen Herstellerfirmen entnommen werden. Werden mehrere dünne Adern von Kupferlackdraht zusammengewickelt, wird das Ergebnis Litze genannt. Diese Leiterform wird hier nicht betrachtet. Der theoretisch maximal zu erreichende Füllfaktor bei Runddraht ohne Isolation beträgt 78 % ( $\approx \pi/4$ ). In Realität ist der Füllfaktor daher deutlich geringer, kann aber durch das In-Form-Pressen etwas erhöht werden. Litze wird in der Hochfrequenztechnik eingesetzt, da durch die kleinen Querschnitte der Einfluss von Skin- und Proximity-Effekt minimiert werden kann.

#### *Elektrischer und mechanischer Schutz*

Vor dem eigentlichen Wickelvorgang müssen der mechanische und der elektrische Schutz der Wicklung zum Blechpaket gewährleistet sein. Aufgrund seiner Herstellung kann das Blechpaket scharfkantig sein und Unebenheiten besitzen, die aus dem minimalen Versatz der Blechlagen untereinander resultieren. Auf ein aufwendiges Nachbearbeiten des Blechpakets wird meist verzichtet und stattdessen kommt ein zusätzlicher mechanischer und elektrischer Schutz zum Einsatz.<sup>13</sup>

Bei der elektrischen Isolation der Statorspulen gibt es zwei unterschiedliche Systeme: Es wird in papierisolierte und endkappenisolierte Systeme unterschieden, außerdem gibt es Misch-

<sup>13</sup> <https://www.krempel-group.com/loesungen/elektroisolerstoffe/elektroisolerstoffe-fuer-motor/> Stand 2020-11

systeme. Das Papier wird zugeschnitten und vorgefalzt und in die Nut eingelegt. Es gibt verschiedene Funktionen und Varianten, je nachdem wie das Papier am Stator angebracht wird. Einige Beispiele sind in Abbildung 6 dargestellt:



Abbildung 6: Papiernutenisolation für drehende elektrische Maschinen<sup>14</sup>

Die verwendeten Papiere und die Presspappen bestehen aus Spezialpapier, das fester als normales Papier ist, da die Fasern mit Kunstharz imprägniert sind.<sup>15</sup> Es wird aus sehr fein gemahlenem Zellstoff hergestellt und muss frei von Fehlstellen sein. Außerdem wird es zur Isolation zwischen den Phasen oder den Wickelköpfen eingesetzt. Die zweite große Gruppe sind die durch Kunststoffendkappen isolierten Statorn. Diese sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Endkappen dienen nicht nur zum mechanischen und elektrischen Schutz der Wicklung, sondern verfügen über angeformte Elemente, die beim Wickeln und Terminieren des Drahtes helfen (siehe Abbildung 7). Kunststoffe sind als Isolationsmaterialien besonders geeignet, da sie sehr gute mechanische und elektrische Schutzeigenschaften aufweisen und gut zu verarbeiten sind.

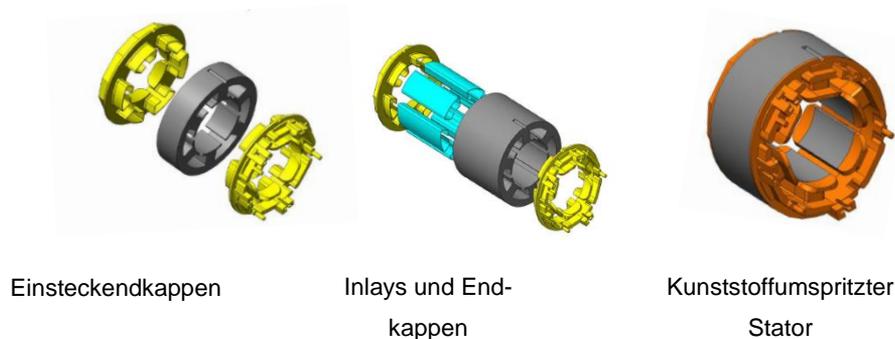


Abbildung 7: Isolationssysteme für Maschinen mit Nutenwicklungen<sup>16</sup>

In Anhang 3 sind einige gebräuchliche Kunststoffe aufgeführt. Die Güte der elektrischen Isolation und die entsprechenden Prüfvorschriften sind in der DIN EN 60034, Teil 1 beschrieben. Die wichtigste Prüfung neben der Isolationsmessung ist die Stehspannungsprüfung. Im Ge-

<sup>14</sup> <https://hauler-hermann.de/standards.php> Stand 2020-11

<sup>15</sup> <https://www.mueller-ahlhorn.com/de/maerkte-anwendungen/elektromotorenbau/> Stand 2020-11

<sup>16</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Spulnwickeltechnik>

gensatz zur Isolationsmessung, die nur mit 500 Volt durchgeführt wird, kann es bei der Stehspannungsprüfung zum Versagen der Wicklung durch Funkenschlag kommen [36]. Die Durchschlagsfestigkeit gibt an, welche nominale elektrische Feldstärke die Isolation maximal ertragen kann, ohne dass es zum Funkenschlag kommt. Die Durchschlagsspannung gibt an, wie groß die elektrische Feldstärke in dem Moment war, in dem die Isolation in Form eines Lichtbogens durchdrungen wurde, zum Beispiel während einer Prüfung. Der Wert wird in kV je mm angegeben, da er proportional zur Materialstärke steigt. Ob Teilentladungen toleriert werden können, muss fallabhängig entschieden werden. Sie deuten aber meist auf eine fehlerhafte Isolation hin und führen auf längere Sicht zu deren Versagen. Für die Höhe der Prüfspannung ( $U_{\text{prüf}}$ ) gilt folgende Formel [10]:

$$2 U_{\text{nenn}} + 1000 = U_{\text{prüf}} \quad \text{Gl. 2.16}$$

$U_{\text{nenn}}$  ist dabei die Nennbetriebsspannung der elektrischen Maschine. Die Durchschlagsfestigkeit der Isolation muss immer größer als die Prüfspannung sein. Die Durchschlagsspannung von 1 mm Luftstrecke beträgt ca. 1 kV. Der Wert ist abhängig von der Luftfeuchtigkeit, stellt aber einen Richtwert bei der Auslegung dar. Ein ideales Isolationsmaterial existiert nicht, da dieses gleichzeitig eine sehr große thermische Leitfähigkeit und eine kleine elektrische Leitfähigkeit besitzen müsste und diese beiden Eigenschaften zwangsläufig korrelieren. Das bedeutet, dass immer ein Kompromiss getroffen werden muss. Dieser besteht meist darin, dass die großen thermischen Widerstände der Isolationsschicht durch eine möglichst dünne Ausführung derselben kompensiert werden, da für den Wärmewiderstand ( $R_{\text{th}}$ ) eines Feststoffes gilt (vgl. [28] D29 GI-6 ff.):

$$R_{\text{th}} = \frac{\delta}{\lambda \cdot A} \quad \text{Gl. 2.17}$$

- $\delta$  = Schichtstärke der Isolation
- $\lambda$  = spezifische Wärmeleitfähigkeit
- $A$  = Fläche des Wärmedurchgangs

Die Wärme, die in der Wicklung hauptsächlich durch ohmsche Verluste entsteht, wird über den Stator abgegeben. Deshalb muss die dazwischenliegende Isolationsschicht so gut wie möglich wärmeleitend sein. Aus Gleichung 2.17 wird deutlich, dass dies durch eine sehr kleine Schichtstärke ( $\delta \downarrow$ ) sowie die Vergrößerung der spezifischen Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda \uparrow$ ) und der wirksamen Kontaktfläche zwischen Wicklung, Isolationsschicht und Statorblechpaket ( $A \uparrow$ ) erreicht werden kann. Um die Wicklung mechanisch zu sichern und die Kontaktfläche zu vergrößern, werden die meisten Wicklungen nach dem Wickeln mit Harzen vergossen (siehe Absatz Endbearbeitung).

### Wickeltechnik

Beim Wickeln des Drahtes können verschiedene Drahtprofile und bestimmte Verfahren eingesetzt werden. Standard ist das Wickeln oder Biegen um die kleinste Achse eines Profils (Flachwickeln), da diese den geringsten Biege­widerstand aufweist und der Draht sich daher selbstständig in diese Richtung bewegt. Das Biegen um die größere Achse wird dagegen Hochkantwickeln genannt. Dieses Verfahren ist mit zusätzlichem technologischem Aufwand verbunden. Neben dem manuellen Wickeln und dem Einziehen und Einstecken von vorgefertigten losen Spulen oder Leiterstäben gibt es drei verschiedene Varianten der automatisierten Herstellung von Statorwicklungen:

- Linearwickeln
- Flyerwickeln
- Nadelwickeln

Beim Linearwickeln werden Einsteckspulen gefertigt, während beim Flyer- und Nadelwickeln der Draht direkt in den Stator eingebracht wird. Diese Verfahren werden im Folgenden kurz erläutert.

Beim Linearwickeln handelt es sich um das Wickeln um einen runden Spulenkörper. In seltenen Fällen können die Körper auch eckig sein. Der Körper wird dabei fest in der Maschine eingespannt und um seine eigene Achse gedreht. Der Draht wird dann tangential meist durch ein Röhrchen zugeführt und an einem Parkierstift oder Anwickelpfosten oder in einer Öse befestigt. Die Zuführung wird dann mit dem sich aufspulenden Draht simultan durchgeführt, so dass der Draht lückenlos und sicher aufgebracht werden kann.

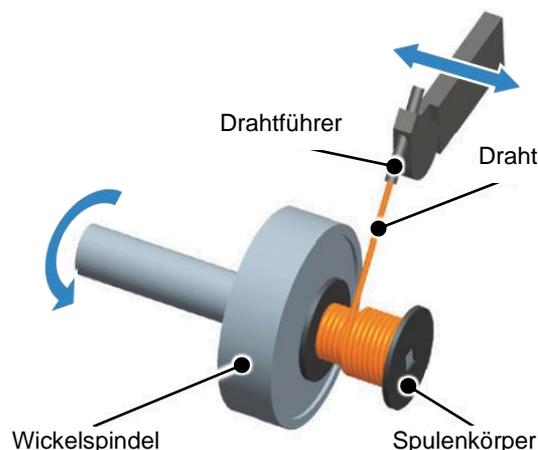


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Linearwickelns [37] S. 210

Ist das Ende des Spulenkörpers erreicht, wird die Spule nach einer vollständigen Drehung ein weiteres Mal rotiert, sodass eine zweite Lage entsteht. Dann erfolgt die Drahtzuführung in entgegengesetzter Richtung. Die Rotationsrichtung der Spule bleibt gleich. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die gewünschte Anzahl an Lagen aufgespult wurde. Ähnlich wie

bei der Geometrie eines Gewindes stellt sich mit der des Wickelkörpers und des Drahtes eine Verlegesteigung ein, die entscheidend für die Kalibrierung der jeweiligen Achsen ist. Wichtig ist, dass der Draht dabei unter Spannung steht und die Zuführung entsprechend der Verlegesteigung erfolgt.

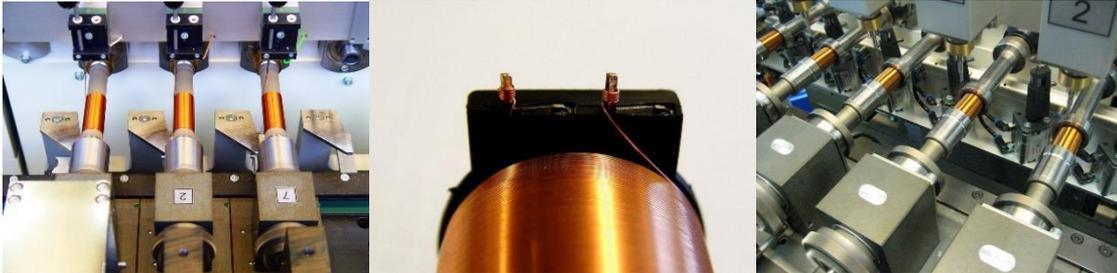


Abbildung 9: Linearwickeln, Spule mit Anwickelpfosten, Linearwickelmaschine

Am Ende werden die Drahtenden oft um einen Parkierstift gewickelt oder bei Durchmessern unter 0,3 mm einfach abgerissen. Die elektrische Kontaktierung erfolgt dann über Badlöten. Mit diesem Vorgang werden die Enden des Kupferlackdrahtes gleichzeitig abisoliert und verzinkt. Das Flyerwickeln wird meist zur Herstellung von verteilten Wicklungen angewendet. Das Verfahren eignet sich auch für Rotoren, da rotationssymmetrische Spulen gefertigt werden.

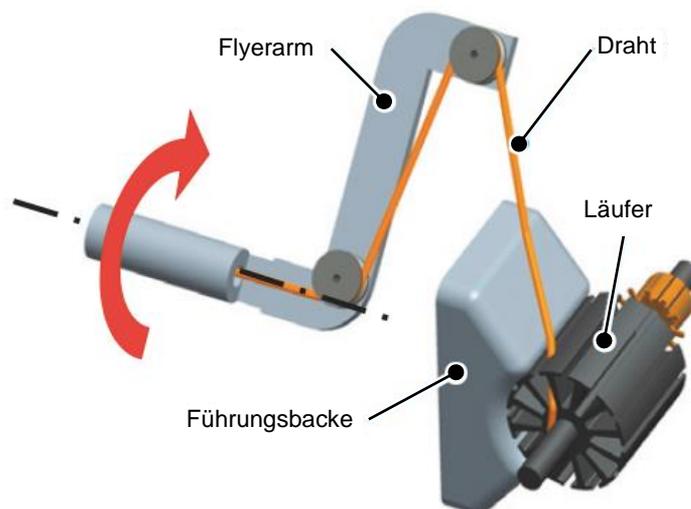


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Flyerwickelns [37] S. 213

Beim Flyerwickeln dreht sich ein Flyerarm um eine Achse, die senkrecht und mittig zur Motorachse steht. Durch den Arm hindurch wird der Draht zugeführt. Dies erfolgt kontinuierlich während der Rotation des Arms. Um dies zu ermöglichen, werden Umlenkrollen eingesetzt. Zugleich ist die Verwendung von Führungsröhrchen denkbar. Mit der Führungsbacke wird dann vorgegeben, in welche Nut der Draht eingelegt wird. Der Draht läuft über die Führungsbacke in die jeweilige Nut ein. Bei einer Umdrehung des Flyers wird genau eine Windung gefertigt, da der Draht oben einläuft und unten zurückgeführt wird. Von Vorteil ist dabei, dass hohe

Prozessgeschwindigkeiten erzielt werden können und damit eine effiziente und kostengünstige Fertigung realisiert wird. Nachteilig ist, dass der Draht nicht genau abgelegt und beim Zuführen verdreht wird. Außerdem muss die Führungsbacke für jeden Stator angepasst, d. h. neu gefertigt werden. Außerdem muss diese eine sehr geringe Oberflächenrauigkeit haben, um den Draht nicht zu beschädigen und Verschleiß zu minimieren.

Mit dem Nadelwickeln werden meist konzentrierte Statorspulen gefertigt. Dabei fährt der Nadelwickelkopf oszillierend durch den Stator und zieht den Draht mithilfe einer Nadel in die Nuten ein. Nach jedem Durchfahren des Stators muss dieser dann zur Position der gegenüberliegenden Nut gedreht werden. Er führt also eine Pendelbewegung aus. Die Nutbreite bzw. der Abstand zwischen den Polschuhen muss deshalb prinzipbedingt mindestens so groß sein, dass der Wickeldraht und die Drahtführerdüse hindurchpassen. Diese Anforderung limitiert die Geometrie der zu fertigenden Statoren. Das Verfahren ist etwas aufwendiger als das Flyerwickeln, da hier oszillierende Bewegungen eingesetzt werden. Massen müssen unter Aufwendung von Energie beschleunigt und verlangsamt werden, wohingegen beim Flyerwickeln eine kontinuierliche Rotationsbewegung ausreichend ist. Wie beim Flyerwickeln werden orthozyklische Spulen erstellt.

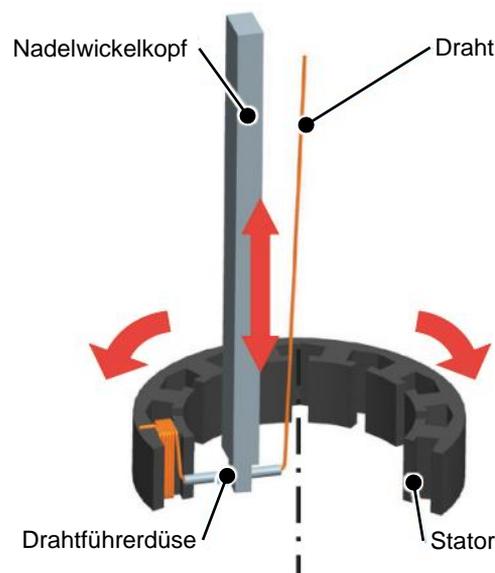


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Nadelwickelns [37] S. 215

Die Investitionskosten für vergleichbare Anlagen sind ähnlich, sodass folgendes Fazit gezogen werden kann: „Die Auswahl des korrekten Wickelverfahrens für ein bestimmtes Produkt wird durch die gegebenen technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen bestimmt. So werden in der Praxis neben den vorgestellten technischen Randbedingungen auch länderspezifisch verschiedene Lösungsvarianten sinnvoll sein, auch in Abhängigkeit des lokalen Lohnniveaus.“ [37]

### *Endbearbeitung*

Wenn die Wicklung fertiggestellt ist, wird diese meist mit Deckschiebern aus Papier abgedeckt und dann mit Nutenverschlussstäben aus Holz oder Kunststoff innerhalb der Nut mechanisch fixiert. Die Wicklung erhält dann vor Verkabelung und Montage ein Finishing oder eine Endbearbeitung durch verschiedene Verfahren und Verfahrenskombinationen. Meist werden zuerst die Wickelköpfe stabilisiert und dann wird die Wicklung imprägniert. Die Wickelköpfe können mit Garn vernäht oder mit Elektroband bandagiert werden. Die Garne und Bänder bestehen zumeist aus Glasfasern, da diese sehr reißfest, temperaturbeständig und tränkbar sind.<sup>17</sup> Manchmal werden spezielle Maßnahmen ergriffen, um die Wickelköpfe mechanisch zu sichern und zu formen. Dabei kommen Pressen und speziell geformte Stützbauteile zum Einsatz. Dadurch lässt sich auch das Wickelkopfpfeifen reduzieren. Hierbei handelt es sich um eine unerwünschte hörbare Schwingung der Leiter im Bereich der Wickelköpfe. Beim darauffolgenden Imprägnieren der Wicklung wird diese mit Epoxid-Gießharz behandelt. Als Verfahren sind das Träufeln, das Rolltauchen, das Heißtauchen, das Vertikaltauchen und der Statorvollverguss im Vakuum bekannt.<sup>18</sup> Dabei werden die Hohlräume in der Wicklung mit Harz gefüllt und die einzelnen Windungen miteinander verklebt. Das Aushärten geschieht meist unter Wärmeeinwirkung in einem Ofen. Besondere Formen der Endbearbeitung wie das Twisten und das Laserschweißen der Leiterstäbe bei Hair-Pin-Wicklungen, werden hier nicht betrachtet.

#### **2.1.6 Montage**

Bei der Montage werden Rotor und Stator gefügt. Das Zentrieren und Fixieren des Rotors im Stator ist ein wesentlicher Bestandteil des Fügens. Die Funktion des Zentrierens kann entweder in der Maschine an sich enthalten sein oder von einer externen Fügeeinrichtung übernommen werden. Nur wenn die Maschine den Rotor selbst im Stator führen kann, ist ein Fügen ohne externe Hilfsmittel möglich (ungeführtes Fügen).

Beim ungeführten Fügen besteht das Risiko, dass der Rotor durch die Magnetkräfte schlagartig in den Stator gezogen wird. Dies kann beide Bauteile beschädigen. Eine Möglichkeit besteht darin, den Rotor mit einem Kran abzulassen. Für kleinere Maschinen können die Linienachsen von Werkzeugmaschinen (Drehbank oder Fräsmaschine) genutzt werden. Es kann auch eine entsprechende Vorrichtung oder Maschine bzw. Roboter je nach Wunsch des Automatisierungsgrades verwendet werden. Firmen wie zum Beispiel die Emil Schmid Maschinenbau GmbH & Co. KG haben sich auf die Produktion solcher Anlagen spezialisiert.<sup>19</sup>

---

<sup>17</sup> <https://www.mueller-ahlhorn.com/de/produkte-materialien/material/klebebaender/> Stand 2020-11

<sup>18</sup> <https://www.bdtronic.de/impraegniieren/impraegniertechnologie/impraegniervverfahren/> Stand 2020-11

<sup>19</sup> <http://www.xpertgate.de/erzeugnis/elektromotoren.html> Stand 2020-11

Zu beachten ist, dass die Zugkraft der Magneten immer im Vorfeld berechnet oder abgeschätzt werden muss. Beim Fügen muss diese Kraft nach dem dritten newtonschen Gesetz beidseitig abgefangen werden. Sollte zum Beispiel ein Kran zum Fügen eingesetzt werden und der Läufer wird angehängt und der Stator auf den Boden gestellt und nicht fixiert, kann dieser nach oben gerissen werden, wenn die Magnetkraft das Eigengewicht des Stators und die Reibungskraft überschreitet. Asynchronmaschinen können meist ungeführt montiert werden. Bei PM-Maschinen sollte ganz auf ungeführtes Fügen verzichtet werden.

### **2.1.7 Prüfung**

Bevor die Maschine verkauft werden kann, werden je nach Anwendungsfall und Art der Fertigung verschiedene Prüfverfahren angewendet (End of Line'-Prüfung, EOL). Dazu zählen:

- Freigängigkeit des Rotors
- Isolationsprüfung
- Stehspannungsprüfung
- Phase-Phase-Schluss
- Erdschluss
- Typenprüfung (Überprüfen der geforderten Nennwerte)

Meist werden die Statoren nach dem Wickeln elektrisch geprüft. Darüber hinaus wird die Maschine nach ihrer Fertigstellung wiederum elektrisch geprüft.

## **2.2 Neuartige Maschine der OvGU**

An der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wird seit 2011 an einem neuen Maschinenprinzip geforscht [1], [38], [39]. Die Maschine mit Luftspaltwicklung stellt eine Sonderform des BLDC-Motors dar: Es handelt sich um eine Maschine, die unter Ausnutzung der Lorentzkraft ein Moment erzeugt. Die Wicklung liegt im Luftspalt zwischen Stator und Rotor und wird daher als Luftspaltwicklung bezeichnet. Da sie sich im magnetischen Feld befindet, entstehen in der Wicklung Wirbelströme, was eine Besonderheit dieser Maschine darstellt.

### **2.2.1 Elektrische Maschine mit Luftspaltwicklung**

Die Wicklung besteht aus drei Phasen, die als verteilte Wellenwicklung außen auf einem ungenutzten geblechten Statorring aufgebracht werden (siehe Abbildung 12). Die Wicklung besteht pro Phasenstrang aus einer gewissen Anzahl an parallel geschalteten Phasenleitern. Der Phasenstrang wird nur einmal unter jedem magnetischen Pol durchgeführt, weshalb die Windungszahl eins beträgt. Die Anzahl der parallel geschalteten Leiter pro Phasenstrang bestimmt sich aus der Größe der auftretenden Wirbelstromverluste im Kupfer. Einflussgrößen sind die Frequenz und die Feldstärke. Aufgrund der Lage zwischen Stator und Rotor muss die

Wicklung sehr flach ausgeführt werden. Durch die diskrete Lage der einzelnen Leiter des Phasenstranges auf dem Stator entstehen Spannungsdifferenzen im Phasenstrang. Diese gleichen sich innerhalb des Phasenstranges aus. Dieses Phänomen wird als Kreisstrom bezeichnet, wobei ein nach außen kaum messbarer Verlustanteil erzeugt wird. Durch das gezielte Tauschen der Leiter des Phasenstranges im Wickelkopf können die Spannungspotenziale jedoch größtenteils ausgeglichen werden. Ziel ist, dass jede Leiterbahn gleichverteilt an jeder möglichen Position im Strang liegt. Bei sieben Leitern muss also sechs Mal getauscht werden.

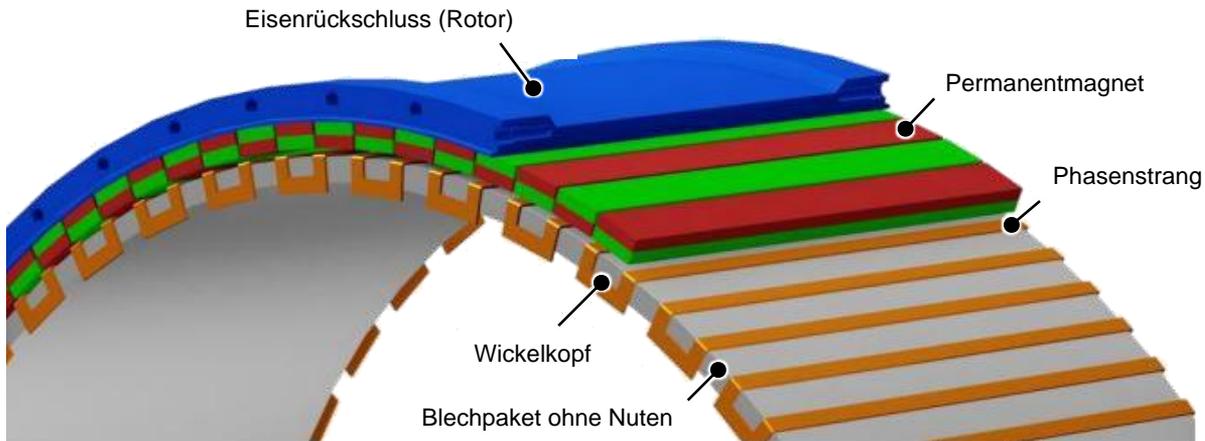


Abbildung 12: Aufbau einer Maschine mit Luftspaltwicklung [24] S. 33

Des Weiteren verfügt die Maschine außen über einen Rotor. Dies stellt besondere Anforderungen an ihre Nutzung. Der Rotor ist mit Magneten bestückt. Der Zylinder des Rotors dient nicht nur zur mechanischen Stabilisierung der Magneten, sondern auch als Eisenrückschluss für das magnetische Feld. Der Rotor zählt daher zu den aktiven Teilen der Maschine.

Die Unterscheidung zwischen aktiven und passiven Teilen beschreibt die Trennung zwischen jenen, die an der elektromechanischen Wandlung direkt beteiligt sind, wie oben beschrieben, und solchen, die nötig sind, um den sicheren Ablauf der Wandlung im jeweiligen Anwendungsfall zu gewährleisten:

- Aktive Teile (Wicklung, Magneten, Blechpaket und Eisenrückschluss)
- Passive Teile (tragende Struktur und Gehäuse, Wellen etc.)

Für die am Institut für Mobile Systeme (IMS) entwickelte Luftspaltwicklung ist die Modellierung der elektromechanischen Wandlung im Motorbetrieb bereits publiziert worden [24]. Es wurde gezeigt, dass die Wandlungskonstante eine Funktion des wirksamen Radius ( $r_{m,ph}$ ), der Tiefe der aktiven Teile ( $t$ ), der Anzahl der magnetischen Pole ( $p$ ) und der magnetischen Flussdichte  $B(\varphi)$  ist. Letztere ist eine nichtlineare periodische Funktion in Abhängigkeit vom Rotationswinkel  $\varphi$ . Für eine stationäre Auslegung kann der nichtlineare periodische Verlauf anhand des verwendeten Gleichrichters gemittelt und so eine konstante magnetische Flussdichte  $\bar{B}$  verwendet werden. Darüber hinaus sollte für einen allgemeinen Ansatz auch die Windungszahl

( $n_w$ ) der Wicklung pro Schicht und die Anzahl der Schichten der Wicklung ( $n_s$ ) berücksichtigt werden. Bisher wurde aus fertigungstechnischen Gründen immer nur eine Schicht realisiert ( $n_s=1$ ). Um eine möglichst gute Auslegung finden zu können, soll dieser Freiheitsgrad offen gehalten werden. Die Wandlungskonstante  $k$  berechnet sich wie folgt [24]:

$$k = r_{m\_ph} \cdot t \cdot p \cdot \bar{B} \cdot n_w \cdot n_s \quad \text{Gl. 2.18}$$

Die Zusammenhänge der geometrischen Parameter werden in Kapitel 4.5 erläutert. Die induzierte Spannung ist direkt proportional zur Winkelgeschwindigkeit und zur Wandlungskonstante. Je größer diese Parameter sind, desto größer ist die induzierte Spannung (vgl. Gleichung 2.6). Aus dem Vergleich des Prinzips der Luftspaltwicklung mit klassischen Ansätzen ergibt sich folgendes Bild:

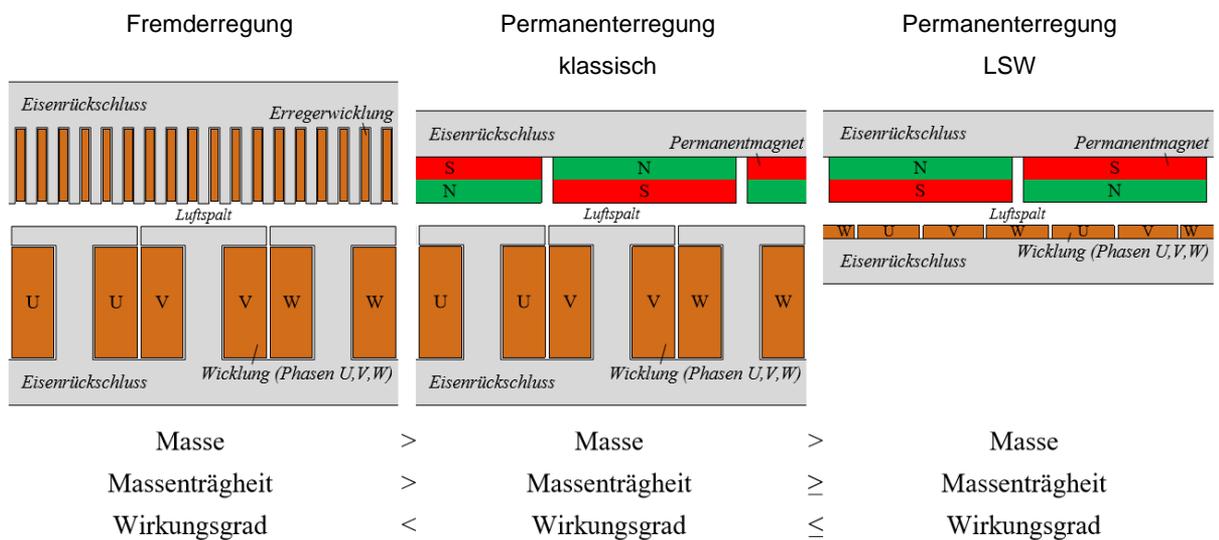


Abbildung 13: Vergleich der Maschinenprinzipien [24] S. 30

Aus der Darstellung wird deutlich, dass speziell im Bereich Kupfer- und Blechpaketmasse Einsparungspotenzial besteht. Ein Nachteil zeigt sich im Bereich des Luftspalts. Bei den klassischen Maschinen entspricht der magnetische Luftspalt ( $h_{l\_mag}$ ) dem mechanischen Luftspalt ( $h_l$ ). Das gilt jedoch nicht bei der LSW-Maschine, wo die Wicklung im Luftspalt liegt. Deshalb gilt für den magnetischen Luftspalt:

$$h_{l\_mag} = h_l + h_{lsw} \quad \text{Gl. 2.19}$$

Die Höhe der Luftspaltwicklung ( $h_{lsw}$ ) setzt sich aus der Höhe des Kupferleiters ( $h_{cu}$ ) inklusive Beschichtung ( $h_{be}$ ) und der Höhe des verwendeten Klebe- und Isolationssystems ( $h_k$ ) sowie der Höhe der Bandage ( $h_b$ ) zusammen.

$$h_{lsw} = h_{cu} + h_{iso} + h_k + h_b, \text{ mit } h_{iso} = 2 h_{be} \quad \text{Gl. 2.20}$$

Das Klebesystem kann dabei entweder nur aus einer Klebstoffschicht oder aus mehreren Schichten bestehen. In der DIN EN 60034 Teil eins ist festgelegt, dass die Wicklung zum Stator hin isoliert sein muss [10]. Deshalb wird eine doppelseitige Klebefolie benutzt. Das Trägermaterial dieser Folie realisiert den definierten Schutz gegen Spannungsdurchschlag und die Klebeschichten realisieren den Halt der Phasenleiter auf der Folie sowie der gesamten Wicklung auf dem Stator. Für jeden Anwendungsfall existiert ein Optimum aus der Höhe der Phasenleiter und der Größe des resultierenden magnetischen Flusses [40]. Dieses gilt es zu berechnen und dann in eine reale Konstruktion zu übersetzen. Der magnetische Fluss fällt mit der Vergrößerung des Luftspalts stark ab, wohingegen größere Leiterquerschnitte den ohmschen Widerstand reduzieren. Aufgrund der geringen Wicklungszahl der Luftspaltwicklung verfügt diese über eine sehr geringe Induktivität. Für die Kühlung dieser Maschine gibt es zwei Hauptkühlungsarten, die Luft- und die Wasserkühlung. Hier lässt sich vereinfacht das fouriersche Gesetz des Wärmedurchgangs an einer Wand anwenden (vgl. [28] D29 Gl-5):

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \frac{T_i - T_a}{\delta} \quad \text{Gl. 2.21}$$

Der Wärmestrom ( $\dot{Q}$ ) ist abhängig von der Fläche (A), die für den Wärmedurchgang zur Verfügung steht, von der Wärmeleitfähigkeit des Materials ( $\lambda$ ), das durchdrungen werden soll, und von dessen Stärke ( $\delta$ ) sowie vom Temperaturunterschied zwischen den beiden Seitenwänden. Wird zur Vereinfachung angenommen, dass  $T_i$  die Temperatur der Wicklung ( $T_w$ ) ist und  $T_a$  die Umgebungstemperatur ( $T_u$ ), werden die Unterschiede deutlich.

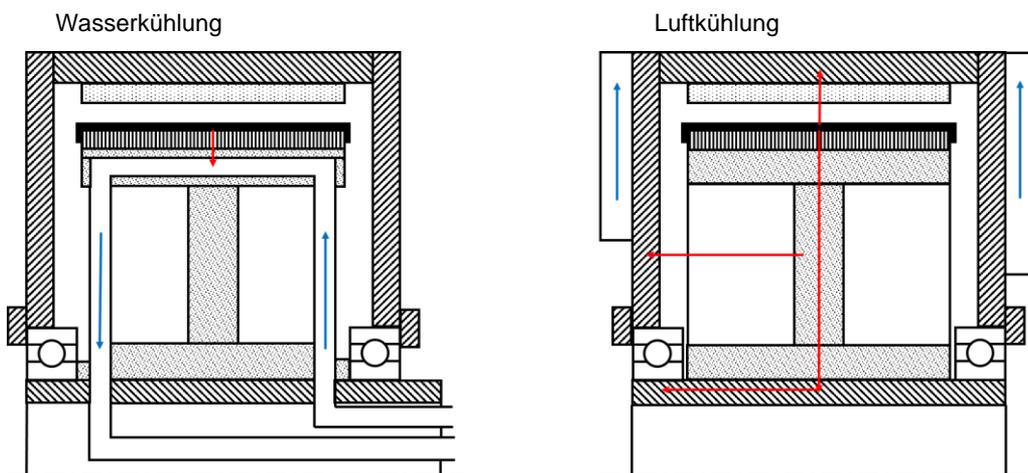


Abbildung 14: Konzeptvergleich Wasser- und Luftkühlung für Außenläufer

Die Länge der roten Linien in Abbildung 14 entspricht dem Wert  $\delta$ , die Fläche  $A$  dagegen der Oberfläche des Stators. Hier wird deutlich, dass die Wasserkühlung wesentliche Vorteile bietet: Der Wert  $\delta$  ist deutlich geringer und die Temperatur des Kühlwassers lässt sich einstellen. Das bedeutet, es kann sehr viel mehr Verlustleistung abgeführt werden. Außerdem ist die thermische Beharrungstemperatur sehr viel schneller erreicht, da nur der Stator unterhalb der Wicklung sowie der Rotor erwärmt werden, während bei der Luftkühlung die gesamte Maschine inklusive ihrer Umgebung (Luft und Anbauteile) erwärmt wird. Wird die Masse der sich erwärmenden Bauteile als Temperaturspeicher angenommen, ergeben sich folgende qualitative Aufheiz- (rot) bzw. Abkühlkurven (blau):

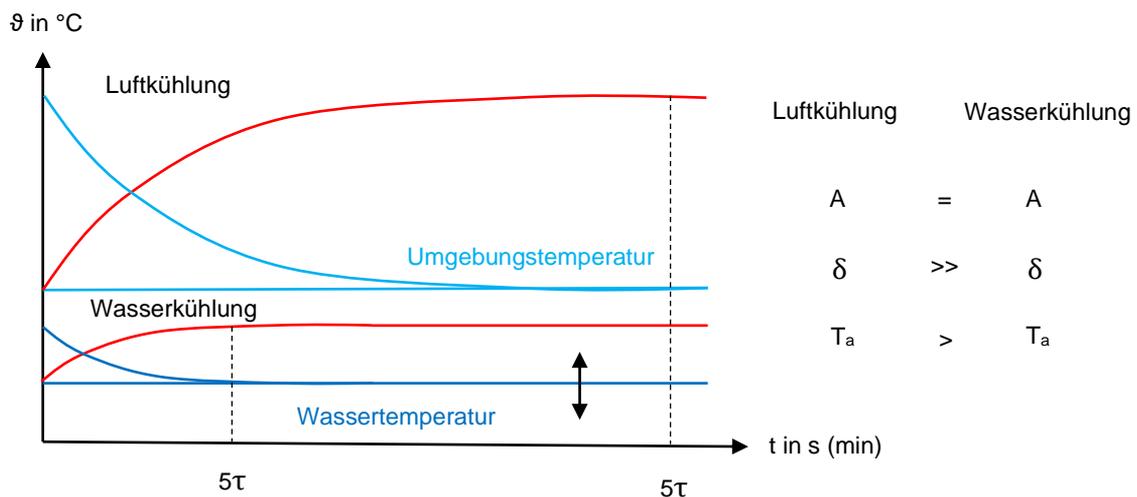


Abbildung 15: Temperaturentwicklung von wasser- und luftgekühlten LSW-Maschinen

Beim Vergleich wird angenommen, dass beide Maschinen die gleiche Baugröße und Masse haben. Es wird deutlich, dass die Maximaltemperatur bei der Luftkühlung deutlich später erreicht wird, da mehr Bauteile erwärmt werden. Außerdem ist die Maximaltemperatur immer mit der Temperatur der Umgebung verbunden, wohingegen bei der Wasserkühlung die Wassertemperatur, falls nötig, kontrolliert werden kann. Die Maximaltemperatur wird zudem eher erreicht.

### 2.2.2 Kombinationswicklung

Bei der Kombinationswicklung (KW) wird zusätzlich zur Luftspaltwicklung eine Wicklung in eine darunterliegende Nut eingelegt. Dieses Prinzip wurde 2016 vorgestellt [41]. Die Nutenwicklung wird mit Papier zum Stator isoliert und die Nut mit einem magnetischen Nutzenstab verschlossen. Dieser realisiert die Polschuhgeometrie (siehe Abbildung 16). Die Nutenwicklung (NW) wird mit der Luftspaltwicklung in Reihe geschlossen, um die Induktivität des Phasenstranges zu erhöhen. Außerdem wird so die Spannungslage der Maschine fast verdoppelt. Dies kann sich anwendungsspezifisch positiv oder negativ auswirken: Soll nur die Leistung

bei gleicher Spannungslage erhöht werden, bedeutet das, dass die Wicklung segmentiert werden muss. Im einfachsten Fall wird die Wicklung dann in zwei Hälften geteilt, die parallel geschlossen werden. Die Wicklung verfügt dann über einen Abgriff in der Mitte. Hier wird auch von einer Doppelsternschaltung gesprochen. Auch eine Dreiecksschaltung verringert die Spannungslage. Normalerweise wird ein Phasenstrang komplett über den Umfang verteilt.

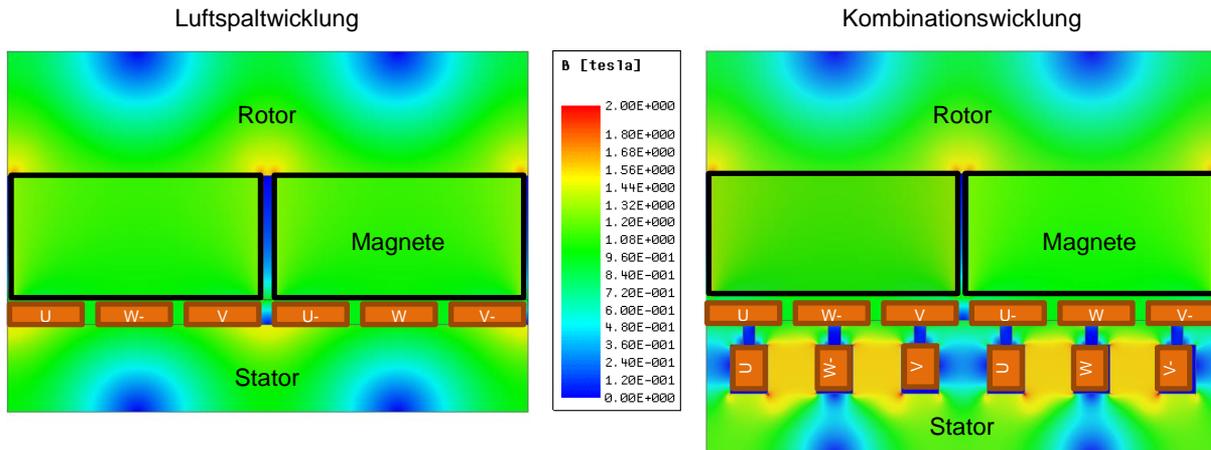


Abbildung 16: Vergleich der magnetischen Flussdichte (B) von LSW -und KW-Maschine

Durch die Verwendung einer zusätzlichen Wicklung wird das Gewicht der Maschine etwas erhöht, da mehr Kupfer- und Blechpaketmaterial benötigt wird. Die Leistung der Maschine kann dadurch jedoch deutlich gesteigert werden. Der Rotor bleibt unverändert, sodass dessen geringe Massenträgheit und hohe Dynamik erhalten bleiben.

### 2.2.3 Lagerung

Dieses Maschinenprinzip stellt besondere Anforderungen an die verwendeten Lager. Es gelten grundsätzlich ähnliche Bedingungen wie im Kapitel 2.1.2 erläutert, wobei einige Aspekte dazu kommen. Da die Wicklung im Luftspalt liegt, müssen der Rotor und der Stator sehr genau zueinander geführt werden. Dies ermöglicht einen sicheren Betrieb der Maschine mit hohem Wirkungsgrad. Aufgrund der ringförmigen Bauform können auch Dünnringlager eine Alternative zu normalen RRKL sein [42]. Zum Einsatz kamen bisher spezielle Kugellager, die eine hohe Steifigkeit und geringe Reibungswerte aufweisen [43], [44]. In einer vorangehenden Arbeit ist bereits eine umfassende Analyse des Einsatzes der Lager in einer Radnabenmotoranwendung durchgeführt worden [45], [46].

## 2.2.4 Wickeltechnik

Die Luftspaltwicklung stellt eine Sonderform dar. Sie kann nicht mit am Markt verfügbaren Wickelmaschinen und Verfahren gefertigt werden (siehe Kapitel Statorwicklung), weshalb für dieses Maschinenprinzip das Portalwickeln als eine Spezialwickeltechnik entwickelt und erprobt wurde. Eine Darstellung des schematischen Ablaufs der Portalwickeltechnik befindet sich im Anhang 4. Dieser schematische Ablauf wurde im IEEE-Beitrag 2016 veröffentlicht [47]. Bei der Entwicklung von neuen komplexen Fertigungsprozessen ist es wichtig, jeden Teilschritt genau zu kennen und diesen vorher zu visualisieren sowie, wenn möglich, in einem Projektteam auszuwerten.

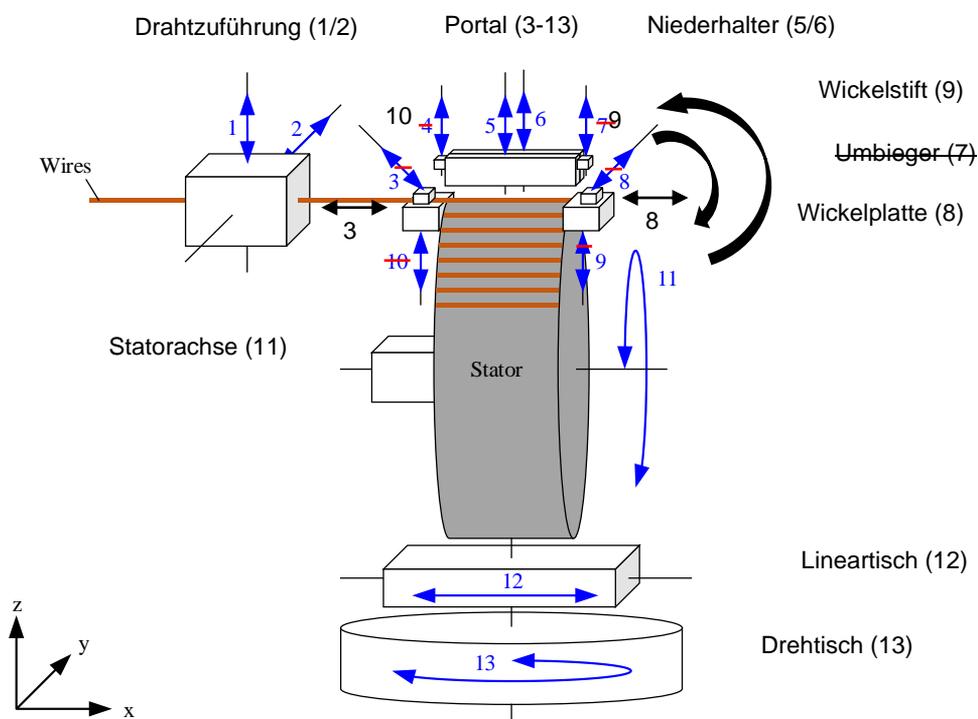


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Achsen nach [47] inkl. Anpassungen

Beim Portalwickeln wird der Draht möglichst schonend behandelt und wenig gebogen, meist nur um einen Stift mit einer Kinematik, die sicherstellt, dass die Bewegung um den Drehmittelpunkt dieses Stiftes verläuft. Darum sind mehrere Achsen nötig, um alle Bewegungen zu realisieren. In der folgenden Abbildung 18 ist die Entwicklung der Kinematik vom ersten getesteten Entwurf (blau) bis hin zur funktionstüchtigen Maschine (schwarz) dargestellt. Es wird deutlich, dass die Maschine mit einigen wenigen Anpassungen funktionstüchtig gemacht wurde. Die Drahtzuführung kann dabei den Draht anheben (1) und seitlich (2) ausrichten. Dies ist nötig, um den Draht beim Rotieren des Portals über ggf. schon vorhandene Phasen zu führen. Außerdem darf der Draht nicht auf die Klebefolie geraten, bevor er richtig positioniert ist. Das seitliche Ausrichten dient beim Ablegen des Drahts dazu, den Draht an den Stift, um den gewickelt werden soll, anzudrücken und ihn vorher mit einem kleinen Sicherheitsabstand

abzulegen. Sollte er im Bereich des Wickelstiftes liegen, kann der Draht beschädigt werden, da dieser im aktuellen Entwurf von oben abgesenkt wird (4/7). Die Drahtzuführung musste nicht angepasst werden, nur ihr Abstand zum Portal wurde variiert. Schließlich wurde die zuletzt gewickelte Bahn mithilfe eines Niederhalters (5/6) fixiert. Danach wurde der Stift in den Drehmittelpunkt des Drehtisches (13) gefahren, wobei ein Lineartisch (12) zum Einsatz kommt. Jetzt konnte das Portal gedreht werden, womit ein Wickelkopf entstanden ist. Dieser lag zunächst in der Ebene der Mantelfläche des Stators und ragte über den Rand des Stators hinaus. Gleiches gilt für die Leiterbahn, was dem Raumbedarf des Wickelstiftes geschuldet ist. Da dies ungünstig für die Stabilität und Kühlung der Wicklung ist, wurde der Wickelkopf inkl. dem Überstand der Leiterbahn in einem nächsten Schritt an die Seitenfläche des Stators angelegt. Das Vorhandensein des Linearanteils ist hier sogar vorteilhaft, da es so nicht zu einer Überlagerung mit der Biegung des Wickelkopfes kommt. Dies kann zu erhöhten Prozesskräften, Rückfederraten und zur Beschädigung der Beschichtung des Drahtes führen, was wiederum eine Beschädigung der Isolationsschicht unterhalb der Wicklung zur Folge haben kann. Zum Umbiegen wurden im ersten Entwurf die Achsen vier und sieben verwendet, indem von oben eine Gummi-/Kunststoffrolle den Kopf umbog. Dies hat sich jedoch als nicht zuverlässig erwiesen. Außerdem konnten die Köpfe so nicht überbogen werden. Dies führte zu einer zu hohen Rückfederung nach dem Entfernen der Andrückrolle. Um kühlbar zu sein, müssen die Köpfe aber gut anliegen, weshalb das Umbiegen bis zuletzt von Hand erfolgt ist. In der ersten Variante wurde der Wickelstift unten an einer Platte (9/10) befestigt. Und von schräg oben kam der Niederhalter (3/8), sodass die Wicklung beim Biegen von oben und unten eingefasst ist. Dies hatte aber mehrere Nachteile:

- Die Positionierung des Niederhalters und des Stiftes müssen zusammen eingestellt und für jede Wickelkopflänge manuell neu angepasst werden.
- Die kleinste Wickelkopflänge ist begrenzt durch den seitlichen Abstand der Stiftplatten zum Stator.
- Die Kraftübertragung und die Stabilität des Systems sind nicht groß genug.
- Die schräge Achse stellt die Höhe des Niederhalters ein (kein direkter Bezug).

Deshalb wurde, wie in Abbildung 18 dargestellt, der Niederhalter nach unten verlegt und seitlich verfahrbar gestaltet, sodass sehr kleine Wickelköpfe gefertigt werden können. Der Niederhalter hat jetzt die Funktion, die Wicklung von unten zu stützen und sollte deshalb als Wickelplatte bezeichnet werden. Das bedeutet, dass die Achsen neun und zehn von der vertikalen in eine horizontale Ausrichtung gedreht wurden. Außerdem lag der Führungswagen jetzt in der Arbeitsebene nicht wie zuvor um 90 Grad versetzt und konnte direkt an der Schiene montiert werden. Der abgewinkelte Führungswagen konnte entfallen, was auch die Stabilität erhöhte.

Der Wickelstift kommt in der aktuellen Variante von oben (4/7). Dadurch kann die Höhe des Wickelspaltes direkt eingestellt werden, da die beiden Achsen im Rechtenwinkel zueinanderstehen. Außerdem kann der Niederhalter nun beliebig nah an den Stator gefahren werden. Auf den Wickelstift kann nicht verzichtet werden, er ist aber nur als Halbkreis ausgeführt, um mit dem Drehpunkt so nah wie möglich an den Stator heranzukommen. Außerdem muss zwischen dem Wickelstift und dem Stator Platz für die zuvor gefertigten Wickelköpfe inkl. einem kleinen Sicherheitsabstand gelassen werden. Diese Länge definiert den Überstand der Phasenleiter über den Statorrand beim Wickelprozess. Nach jedem Fertigungszyklus eines Wickelkopfes dreht sich der Stator um den Winkel einer Polbreite weiter, sodass der nächste Mäander verlegt werden kann. Der Ablauf ist dann spiegelverkehrt zum vorherigen Durchlauf durchzuführen, da der Wickelkopf auf der gegenüberliegenden Seite gefertigt wird. Es ergibt sich also folgende Programmstruktur:

- Initialisierung (Motoren einstellen und Startpunkt finden)
- Start (erste Bahn legen)
- Wickelkopf (z. B. links)
- Wickelkopf (rechts)

Als Steuerung wurde die freiprogrammierbare Industriesteuerung<sup>20</sup> phyMOTION® der Firma Phytron GmbH verwendet. Das erste Programm wurde in der phyLOGIC® ToolBox<sup>21</sup> erstellt und dann einem Facharbeiter übergeben, der es kontinuierlich an verschiedene Anwendungsfälle anpassen und verbessern konnte. Die beiden Wickelkopfprogramme Wickelkopf links bzw. rechts müssen dann jeweils alternierend abgerufen werden, bis eine vollständige Umdrehung realisiert ist oder das Phasensegment gefertigt ist. Darüber hinaus wurden folgende Zusatzmodule für die Maschine entwickelt:

- Automatisierte Klebstoffdosiervorrichtung (Studentenprojekt/in Betrieb genommen)
- Laserscanner für die Online-Oberflächenüberwachung der gefertigten Wicklung (Studentenprojekt/Testbetrieb)
- Wasch- und Aktivierungsstraße (Konzept)
- Nutenwickelsystem (gefertigt/Test steht aus)

Zusätzlich wäre es sinnvoll, die Maschine um folgende Module zu erweitern:

- Konventionelle Spulenaufnahme mit Drahtzugregelung
- Automatische Applikationsvorrichtung für Folien/Bandagen
- Automatisiertes Handling des Stators (Roboter)

---

<sup>20</sup> <https://www.phytron.de/produkte/endstufen-controller/phymotionr/> Stand 2020-11

<sup>21</sup> <https://www.phytron.de/produkte/kommunikation-programmierung/phylogicr-toolbox/> Stand 2020-11

Die 2016 erstmals vorgestellte Wickeltechnik ist kontinuierlich weiterentwickelt worden. So ist eine maschinelle Wickelvorrichtung entstanden, die die einzelnen Kupferlackdrähte erst bündelt und dann über die Drahtzuführung dem Stator im Portal zuführt und den Draht unter Spannung hält, um die genaue Position und Lage der Phasenstränge auf dem Stator zu garantieren ( $\pm 0,075$  mm).

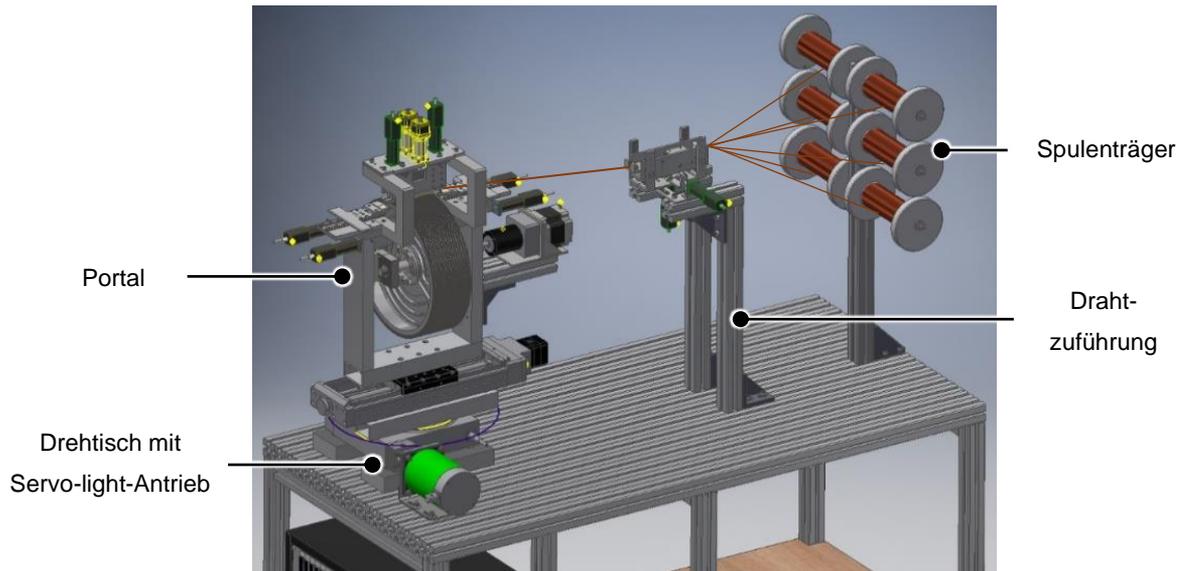


Abbildung 18: Luftspaltwickelmaschine der OvGU im LEIRAMO-Setup [48]

Der Aufbau der Maschine ist in Abbildung 18 dargestellt. Mit diesem Aufbau lässt sich eine maschinelle Fertigung von Luftspaltwicklungen realisieren. Die Bündel werden auf einer doppelseitig klebenden Folie befestigt, die zuvor auf dem Stator aufgebracht werden muss. Die Mäander der wellenförmigen Wicklung werden durch das Drehen des Statorportals unter dem Draht erzeugt. Dieses Prinzip hat die Firma SYMACON Maschinenbau GmbH Barleben genutzt, um eine industrietaugliche Maschine für die Kleinserienproduktion dieser Wicklungsformen zu realisieren.

Die Erweiterung zur Nutenwickelmaschine wurde nicht durchgeführt, da das Biegen des Drahtes im Stator vermieden werden soll. Eine dementsprechende Anpassung an der Wickelplatte wurde jedoch konstruiert und gefertigt, konnte aber nicht getestet werden, da andere Motoren hergestellt werden mussten. Die Firma SYMACON hat ebenfalls eine Nutenwickelvorrichtung für dieses Wickelprinzip entworfen. Es wäre sinnvoll, diese Varianten zu testen und zu vergleichen.

### 3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für die Arbeit relevanten methodischen Grundlagen erläutert. Dazu wird zuerst auf das Lean Development als übergeordnete Ebene der Produktentwicklung eingegangen. Diese Ebene enthält die Grundgedanken für die Realisierung der Prozesse. Die Strukturierung der Prozesse geschieht anhand der Entwicklungsmethodik, die in Kapitel 3.2 beschrieben wird. Am Ende werden die zur Realisierung nötigen Softwarewerkzeuge erläutert. Dort wird ein Überblick über die CAx-Software gegeben und es wird eine Einordnung anhand ihrer Anwendbarkeit für relevante Entwicklungsaufgaben vorgenommen.

#### 3.1 Lean Development

Diese Arbeit behandelt die Verbesserung von Konstruktionsprozessen, wobei Verbesserung als Steigerung von Effektivität und Effizienz verstanden wird. Das Grundprinzip der Konstruktionstechnik besteht darin, einfache, eindeutige und sichere Lösungen anzustreben [3]. Konstruktionsprozesse sind immer Unternehmensprozesse. Daher ist es sinnvoll, den Prozess nicht nur aus Sicht des Technikers, sondern auch aus Sicht des gesamten Unternehmens zu betrachten (siehe Kapitel 3.2.1). Dazu können die Hilfsmittel und Ansätze des Lean Management genutzt werden [49].



© Institut für Fabrikbetriebslehre und Unternehmensforschung, TU Braunschweig

Abbildung 19: Gestaltungsprinzipien schlanker Produktentstehungsprozesse

Lean Management bedeutet ‚schlanke Verwaltung‘ im Sinne einer möglichst kleinen und effizienten Struktur. Als Prinzip ist es maßgeblich für die Gestaltung von Unternehmensprozessen

und beschreibt Denkprinzipien, Methoden und Verfahren zur effizienten Gestaltung von Wertschöpfungsketten industrieller Güter [49].

Die Grundlagen dafür wurden in der Mitte des 20. Jahrhunderts von Toyota gelegt. Dabei gibt es drei Grundansätze: Lean Production, Maintenance und Administration. In den letzten Jahren wird das Lean-Thinking-Konzept aber auch auf die Produktentwicklung und den Produktentstehungsprozess (PEP) angewendet [50], wobei dann von Lean Development gesprochen wird. Die Kernidee besteht darin, bei der Wertschöpfung Verschwendung zu vermeiden. Alle nötigen Aktivitäten sollen optimal aufeinander abgestimmt werden. Perspektivwechsel sind sinnvoll, um Verbesserungspotenzial aufzudecken. Entscheidend ist, dass die Sicht des Kunden und die des Unternehmens aufeinander abgestimmt sind: Das Unternehmen möchte profitabel und wettbewerbsfähig sein. Der Kunde möchte ein möglichst sicheres und einfaches sowie kostengünstiges Produkt, das seine Anforderungen erfüllt. Es existieren sieben Gestaltungsprinzipien schlanker Produktentstehungsprozesse (siehe Abbildung 19), die im Folgenden näher erläutert werden.

### 3.1.1 Kontinuierlicher Verbesserungsprozess

Der Ansatz des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) stammt aus der Implementierung ganzheitlicher Produktionssysteme, kann jedoch sinnvoll adaptiert, auch für die Produktentwicklung genutzt werden. Dabei muss der gesamte Lebenszyklus des Produkts betrachtet werden, da die Kosten, die ein Produkt verursacht, schon im Produktentstehungsprozess festgelegt werden. Das Product-Lifecycle-Management befasst sich mit der Verwaltung der Informationen, die im Verlauf des Lebenszyklus eines Produkts relevant sind. Die Qualität des Verbesserungsprozesses ist dabei analog zum Entwicklungsprozess durch Innovation und Kreativität geprägt. Der Ablauf ist verwandt mit der Struktur des methodischen Entwickelns (siehe Kapitel 3.2), da beide Ansätze methodische Prozesse zur Lösungsfindung beschreiben. Der Ablauf eines KVP-Projekts ist wie folgt gegliedert<sup>22</sup>:

- Arbeitssystem festlegen und abgrenzen (Was soll verbessert werden?)
- Istzustand und Sollzustand anhand von Kennzahlen beschreiben
- Probleme beschreiben und bewerten (Häufigkeit pro Zeiteinheit oder Objekteinheit – Angebot, Auftrag, Los etc.)
- Probleme bewerten (Zeit, Geld, Energie, Stress pro Zeiteinheit)
- Problemanalyse (Ursachen, Zusammenhänge, Schnittstellen, Nebenwirkungen)
- Lösungsideen sammeln (z. B. Brainstorming)
- Lösungsideen bewerten und entscheiden
- Maßnahmen ableiten, Aufwand und Ertrag bewerten

---

<sup>22</sup> Ablauf laut: [https://de.wikipedia.org/wiki/Kontinuierlicher\\_Verbesserungsprozess](https://de.wikipedia.org/wiki/Kontinuierlicher_Verbesserungsprozess) Stand 2020-11

- Ergebnispräsentation vor dem Entscheidungsgremium
- Maßnahmen vereinbaren (Wer tut was bis wann?) und Ressourcen klären
- Maßnahmen umsetzen
- Erfolg prüfen

Jeder Prozess muss individuell gestaltet werden und ist nicht für andere Anwendungen adaptierbar.

Bekannte Methoden zur Realisierung des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses sind das Ideenmanagement und die A3-Methode, wobei darauf hier nicht näher eingegangen werden kann [51]. Der Gedanke der kontinuierlichen Verbesserung ist jedoch für jede Entwicklung relevant. Insbesondere im Bereich der Baureihenentwicklung stellt dieses Prinzip eine Garantie für nachhaltigen Erfolg der Produkte am Markt dar [52]. Gerade im Bereich der Unternehmenszertifizierung nach ISO 9001 Qualitätsmanagement und ISO 14001 Umweltmanagement wird der kontinuierliche Verbesserungsprozess gefordert [4], [5].

Dabei kann zwischen kunden- und konkurrenzgetriebenen Prozessen unterschieden werden: Der kundeninduzierte Prozess (Pull-Strategie) wird durch eine Anfrage des Kunden für ein bestimmtes Produkt ausgelöst. Der so angestoßene Entwicklungsprozess im Unternehmen führt zu einer verbesserten Version des Produkts. Der marktgetriebene Prozess (Push-Strategie) resultiert aus einer vergleichenden Betrachtung der Konkurrenzprodukte und der eigenen Produkte innerhalb des Unternehmens. So wird ermittelt, wo sich eine Verbesserung der eigenen Produkte lohnt. Außerdem gibt es die Möglichkeit, durch eine Analyse der Kostenstruktur der eigenen Produkte Verbesserungspotenzial aufzudecken (Wertanalyse). Ein Verbesserungsprozess im Bereich der Konstruktion kann auch als Anpassungskonstruktion bezeichnet werden.

### **3.1.2 Standardisierung**

Standardisierung in der Produktentwicklung ist nicht leicht umzusetzen, da es sich um individuelle Prozesse handelt. Wird jedoch der Prozess im Einzelnen untersucht, lassen sich repetitive und kreative Aufgaben finden. Laut Morgan und Liker können drei unterschiedliche Bereiche der Standardisierung unterschieden werden [53]: Der erste Bereich beschreibt die ‚Design-Standardisierung‘, wobei gleiche Komponenten, Plattformen und Produkte beschrieben werden. Dies kann auch unter dem Begriff modulare Konstruktion oder Baukastenkonstruktion zusammengefasst werden. Der zweite Punkt ist die ‚Prozessstandardisierung‘. Dabei werden die Aufgaben im Prozess und deren Reihenfolge festgelegt. Zum Beispiel sollte bei der CAD-Modellierung von komplexen Produkten berücksichtigt werden, wie die einzelnen Bauteile zum Modell-Koordinatensystem liegen. Es entstehen Arbeitsanweisungen, wobei stets sichergestellt werden muss, dass diese Festlegungen den kreativen Prozess nicht behindern, sondern von den beteiligten Personen als Hilfestellung empfunden werden. Nur so kann ein Mehrwert

erreicht werden, indem koordinative Prozesse verringert werden. Als dritter Punkt wird die ‚Standardisierung der Ingenieursqualifikation‘ beschrieben. Hier werden die Fähigkeiten und Fertigkeiten der beteiligten Ingenieure kategorisiert. Methoden zur Realisierung einer Standardisierung sind das Shopfloor Management, Kennzahlensysteme und die Projektkategorisierung.

### 3.1.3 Fließ- und Pull-Prinzip

Der Begriff stammt aus der Betriebswirtschaftslehre und ist laut Voigt definiert als „organisatorisches Prinzip der industriellen Produktion, bei dem ein in die elementaren Arbeitsgänge zerlegter Arbeitsprozess entsprechend der technologisch erforderlichen Fertigungsfolge linear hintereinander angewendet wird.“<sup>23</sup> Es beschreibt also eine sequenzielle Abfolge von Handlungen in einem Prozess.

Dagegen ist die Pull-Strategie, wie bereits im Kapitel 3.1.1 erläutert, durch eine parallele Bearbeitung verschiedener Aufgaben geprägt. In der vorliegenden Arbeit ist besonders das Pull-Prinzip von Relevanz. Bei der Push-Strategie wird ein Produkt für einen Markt entworfen, ohne den speziellen Bedarf zu kennen, während bei der Pull-Strategie ein Produkt auf Anfrage eines Kunden entwickelt wird. Wird das Pull-Prinzip in der Produktentwicklung eingeführt, müssen alle Informationen zur richtigen Zeit und in ausreichender Qualität am richtigen Ort zur Verfügung gestellt werden. Eine Verbesserung des Prozesses wird durch eine gleichmäßige Verteilung der Arbeiten erzielt. Die Bearbeitungszeit kann reduziert werden, da der Bearbeiter effizient arbeiten kann. Methoden zur Realisierung dieser Strategien sind die Prozesssynchronisation, das Simultaneous Engineering und die prozessorientierte Projektorganisation [54].

### 3.1.4 Mitarbeiterorientierung und zielorientierte Führung

Gegenseitiges Vertrauen und Offenheit sind im Gegensatz zur klassischen Mitarbeiterführung die Grundpfeiler der Mitarbeiterführung des Lean Development. So wird dem Mitarbeiter die Freiheit gewährt, sein Expertenwissen zu nutzen, um Schwachstellen und Missstände zu nennen und diese eigenständig zu beheben sowie Verbesserungen zu planen und zu realisieren. Die Möglichkeit, Kritik zu äußern und eine positive und konstruktive Kommunikationskultur sind essenziell, um den Mitarbeiter zu motivieren. Methoden zur Umsetzung dieses Ansatzes sind das Hoshin-Management und der Fehler- und No-Blame-Ansatz sowie die Qualifizierungsplanung [50].

---

<sup>23</sup> <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/fliessprinzip-33056> Stand: 2020-11

### 3.1.5 Null-Fehler-Prinzip

Im Lean Development ist das Null-Fehler-Prinzip ein grundlegender Ansatz. Dieser beschreibt die Fehlervermeidung im Allgemeinen sowie bei der Informationsverarbeitung. Insbesondere die Übergabe von Informationen im Produktentstehungsprozess muss sorgfältig, vollständig und durchgängig erfolgen. Falls bereits Fehler entstanden sind, müssen diese möglichst früh erkannt werden. Dies kann durch praktische Tests, unterstützt durch Rapid-Prototyping-Verfahren (RP), geschehen.

Werden diese Verfahren zur Serienproduktion von Bauteilen eingesetzt, wird von Additive Manufacturing (AM) gesprochen. Außerdem kann das Quality Function Deployment (QFD) angewendet werden. Es handelt sich um ein Verfahren der Qualitätssicherung, bei dem der Nutzen des Produkts für den Kunden betrachtet und optimiert wird. Alle Unternehmensbereiche werden mit einbezogen. Des Weiteren kann das Cardboard Engineering eingesetzt werden. Die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse oder kurz Auswirkungsanalyse (FMEA, engl. *failure mode and effects analysis*) stellt ebenfalls ein Werkzeug zur Fehlervermeidung im Entwicklungsprozess dar. Die Design-FMEA (D-FMEA) stellt sicher, dass das Produkt fertigungs- und montagegerecht entwickelt wird. Dies ist gerade bei komplexen Produkten oder Produkten, die aufwendig zu fertigen sind, sinnvoll. Dazu sollten alle beteiligten Personen an einen Tisch geholt werden.

### 3.1.6 Visuelles Management

Das visuelle Management steht für die sichtbare Ordnung im Produktentwicklungsprozess. Das Konzept stammt aus der Produktionsplanung. Dabei steht die Ordnung der Arbeitsplätze im Vordergrund, wohingegen sich die Produktentwicklung eher auf die Realisierung und die Steuerung von Informations- und Wissensflüssen konzentriert. Diese sind in der Produktentwicklung weniger leicht zu visualisieren, da sie oft digital ablaufen. Es ist aber sinnvoll, den Projektfortschritt sichtbar darzustellen. Die Darstellung sollte einen kontinuierlichen Soll-Ist-Vergleich enthalten und für alle Mitarbeiter einsehbar sein. Dazu können entsprechende Pläne im Besprechungsraum ausgehängt werden.

Eine weitere Methode ist die Visualisierung von Projekthalten durch das Obeya-Prinzip. Hierbei soll das Abteilungsdenken durchbrochen werden, indem alle Verantwortlichen in einem Büro entsprechender Größe untergebracht werden. Des Weiteren ist das Go-to-Gemba-Prinzip zu nennen, nach dem alle involvierten Personen sich direkt und unmittelbar an den Ort des Geschehens begeben sollen. Dies kann zum Beispiel am Arbeitsplatz eines Kollegen, in der Produktion, bei einer Partnerfirma oder beim Kunden sein. Als Letztes ist das 5S- (japanisch) oder 5A-Prinzip (deutsch) zu nennen. Hierbei wird durch Ordnung die Qualitätsbereitschaft erhöht und die Prozesse werden beschleunigt. 5A steht dabei für eine Folge von Anweisungen:

- Aussortieren
- Aufräumen (Arbeitsmittel ergonomisch anordnen)
- Arbeitsplatzsauberkeit
- Anordnung zur Regel machen
- Alle Punkte einhalten und verbessern

Werden diese Punkte beachtet, ist eine gewisse Ordnung am Arbeitsplatz gesichert, wobei zur Realisierung zudem eine genaue Planung der Arbeitsplätze und Arbeitsabläufe nötig ist. Sonst hat die ausführende Person nicht die Möglichkeit, auf eventuelle Planungsfehler zu reagieren. Deshalb muss in der Planungsphase eng mit dem Personal zusammengearbeitet werden und es sollten regelmäßige Absprachen während der Bearbeitung stattfinden.

### 3.1.7 Frontloading

Das Frontloading ist das wichtigste Prinzip des Lean Development. Es beschreibt den Versuch, in einer frühen Phase der Produktentwicklung möglichst viel Wissen einzubringen und mit einer weitsichtigen Planung künftige Verschwendungen gering zu halten. Dies basiert auf dem Wissen, dass die Kosten, die während des Produktlebenszyklus anfallen, schon früh in der Produktentwicklung bestimmt werden. Methoden für die Anwendung des Frontloading sind das Set-Based Engineering, Target Costing und die Lebenszyklusplanung. Insbesondere das Target Costing, auch Zielkostenrechnung, ist aufgrund seiner starken Kundenorientierung von Bedeutung [7]. Es eignet sich für die Weiterentwicklung, Differenzierung und Diversifizierung komplexer Produkte, die in mittleren Losgrößen gefertigt werden [54], weniger allerdings für komplette Neuentwicklungen.

Die Zielkostenrechnung erfolgt in drei Phasen: In der ersten Phase werden die Zielkosten festgelegt. Dies geschieht durch die Managementebene. Darauf folgt die Zielkostenplanungsphase, die durch die Produktentwicklung bestimmt wird. Die Letzte ist die Zielkostenerreichungsphase. Bei dieser Methode wird in der Produktentwicklung Wert darauf gelegt, dass bei dem Produkt eine vorher festgelegte Kostenschwelle nicht überschritten wird. Deshalb müssen kostenrelevante Daten schon früh im Entwicklungsprozess bekannt sein. Mit Kenntnis der Kosten der einzelnen Elemente des Produkts lassen sich Entscheidungen über den weiteren Fortgang des Prozesses besser treffen. Hierbei sollte besonderes Augenmerk auf große Kostenstellen gelegt werden.

## 3.2 Angewandte Entwicklungsmethodik

Für das Entwerfen von technischen Systemen haben sich zwei grundlegende Vorgehensweisen etabliert: Das ist zum einen das methodische Konstruieren nach Pahl/Beitz [3], das auf der Richtlinie VDI 2221 fußt [55], zum anderen das V-Modell nach Barry W. Boehm und der

VDI 2206 [56]. In der Praxis hat sich das V-Modell aber eher im Bereich der Softwareentwicklung durchgesetzt. In technischen Anwendungen dominiert die VDI 2221. Da in dieser Arbeit eine kombinierte Anwendung aus Prozess- und Produktentwicklung inklusive Softwareeinsatz betrachtet wird, werden beide Methoden berücksichtigt. Sie sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden, wobei Vor- und Nachteile aufgezeigt werden und die Eignung für den Anwendungsfall untersucht wird.

### 3.2.1 Entwicklungsprozess im Unternehmen

Um bei Entwicklungsprozessen eine gleichbleibende und hohe Qualität der Ergebnisse zu erreichen, wird ein Prozess benötigt, der dies garantiert. Außerdem soll das Produkt dem Stand der Technik entsprechen und wirtschaftlich sein. Um dies zu gewährleisten, wurden verschiedene Methoden entwickelt. Diese Methoden teilen sich auf verschiedene Schulen auf, die jeweils an unterschiedlichen Konstruktionslehrstühlen entstanden sind. Zu nennen sind die Ilmenauer, die Darmstädter und die Braunschweiger Schule. Der Grundprozess ist meist ähnlich, weshalb die einzelnen Schulen hier nicht näher erläutert werden.

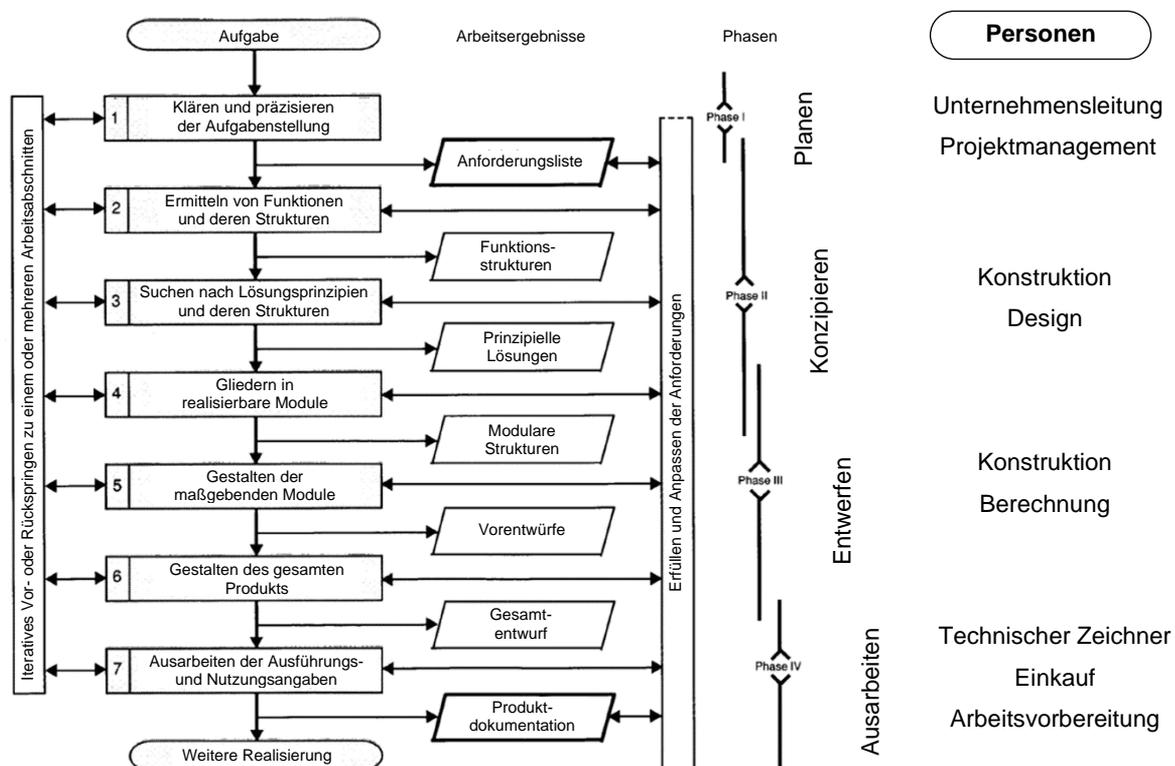


Abbildung 20: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [55] Bild 3.3 Seite 9

Beispielhaft wird hier vom Prozess nach Pahl/Beitz bzw. der VDI 2221 [57] ausgegangen. Der Prozess gliedert sich in mehrere Teilaufgaben, die zu verschiedenen Phasen gruppiert sind (siehe Abbildung 20). Im Folgenden soll der Prozess aus der Sicht eines Unternehmens dargestellt werden. Am Anfang stehen das Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung in der

Planungsphase. Dabei wird eine Anforderungsliste des Kunden (Pflichtenheft) von der Firma oder dem Auftragnehmer in ein Lastenheft übersetzt. Das Pflichtenheft stellt somit die Sicht des Auftraggebers dar und das Minimum der zu erbringenden Leistung.

Das Lastenheft enthält die detaillierte Beschreibung der gewünschten Funktionalität des Produkts. Auftragsnehmerseitig wird dieses Heft um die zur Realisierung nötigen unternehmensspezifischen Informationen und, falls vorhanden, durch Erfahrungswerte aus vorherigen Aufträgen oder Projekten erweitert. Des Weiteren muss dem Stand der Technik und, falls vorhanden, den entsprechenden Normen Rechnung getragen werden. Grundlegende Anforderungen an ein technisches System sind in der Maschinenrichtlinie enthalten [58]. Generell muss der Prozess der Definition der Anforderungen an das Produkt in enger Abstimmung zwischen beiden Partnern geschehen, um kostspielige nachträgliche Änderungen zu vermeiden. Das Lastenheft sollte so konkret wie möglich sein, damit der Auftragnehmer gegenüber dem Auftraggeber abgesichert ist. Deshalb sollten alle Punkte in Team-Meetings der beteiligten Mitarbeiter besprochen und mit Protokollen dokumentiert werden.

Dann folgt die Konzeptphase, in der die Gesamtaufgabe, die das Produkt erfüllen soll, in Teilfunktionen aufgeschlüsselt und daraus die Produktstruktur ermittelt wird. Im nächsten Schritt wird nach Lösungen für die einzelnen Teilfunktionen gesucht, wobei der morphologische Kasten zum Einsatz kommt: Danach werden die einzelnen Lösungen in realisierbare Module oder Baugruppen gegliedert. Damit ist die Konzeptphase abgeschlossen. Diese Phase ist dadurch gekennzeichnet, dass mehrere parallele Entwürfe gebildet werden, die miteinander konkurrieren, um die bestmögliche Lösung zu erzielen. Dabei sollten sinnvolle Meilensteine definiert werden, wobei der Kunde in den Entscheidungsprozess maßgeblich involviert werden sollte. Das wichtigste Merkmal, nach dem die Entwürfe unterschieden werden können, stellen die Kosten dar. Diese zu planen, ist ein wesentlicher Punkt der Produktentwicklung. Relevante Einflussgrößen sind die Fertigungstiefe und die Kosten der zugekauften Komponenten (Maschinenelemente, Motoren, Steuerungen).

Darauf folgt die Detaillierung: In dieser Phase werden die einzelnen Bauteile fertigungsgerecht gestaltet [59] und die einzelnen Elemente werden zum Gesamtentwurf zusammengeführt. Der Gesamtentwurf wird dann nachgerechnet und freigegeben [60]. Gegebenenfalls sind die entsprechenden Vorschriften zu beachten.

In der letzten Phase erfolgt die Ausarbeitung. Dies bedeutet, dass die Produktdokumentation [61], die Gebrauchsanleitung [62] und die Fertigungsunterlagen [63] erstellt werden. Handelt es sich um eine Variantenkonstruktion, kann meist die Fertigungsplanung, Fertigung und der Versand folgen. Handelt es sich jedoch um eine Neuentwicklung, ist der Konstruktionsprozess noch nicht als abgeschlossen zu betrachten, da eine Musterbau- und Erprobungsphase folgen muss. Zum Schluss stehen dann die Endabnahme sowie der Start der (Serien-)Fertigung ‚SOP‘.

### 3.2.2 Entwickeln nach dem V-Modell

Einen ähnlichen Ansatz bietet das V-Modell nach VDI 2206 [56]. Dieses Modell wurde zuerst in der Softwareentwicklung eingesetzt und wird mittlerweile auch in der Produktentwicklung von mechatronischen Systemen verwendet.

Zu begründen ist dies durch die gesteigerte Komplexität von mechatronischen Systemen in Bezug auf die mechanischen, elektrischen und informationstechnischen Komponenten. Der Ablauf der Entwurfsphase gleicht der zuvor erläuterten Methodik. Dabei kommt die Phase Systemintegration hinzu, in der das entworfene System getestet wird. Die fertigungstechnischen Aspekte sind in diesem Modell unterrepräsentiert. Ein Vorteil des Modells ist der domänenspezifische Entwurf, nach dem Mechanik, Software und Elektrik parallel entwickelt werden. Das bedeutet, dass der oben dargestellte Feinablauf des Prozesses um die Stränge Software und Elektrik erweitert wird.

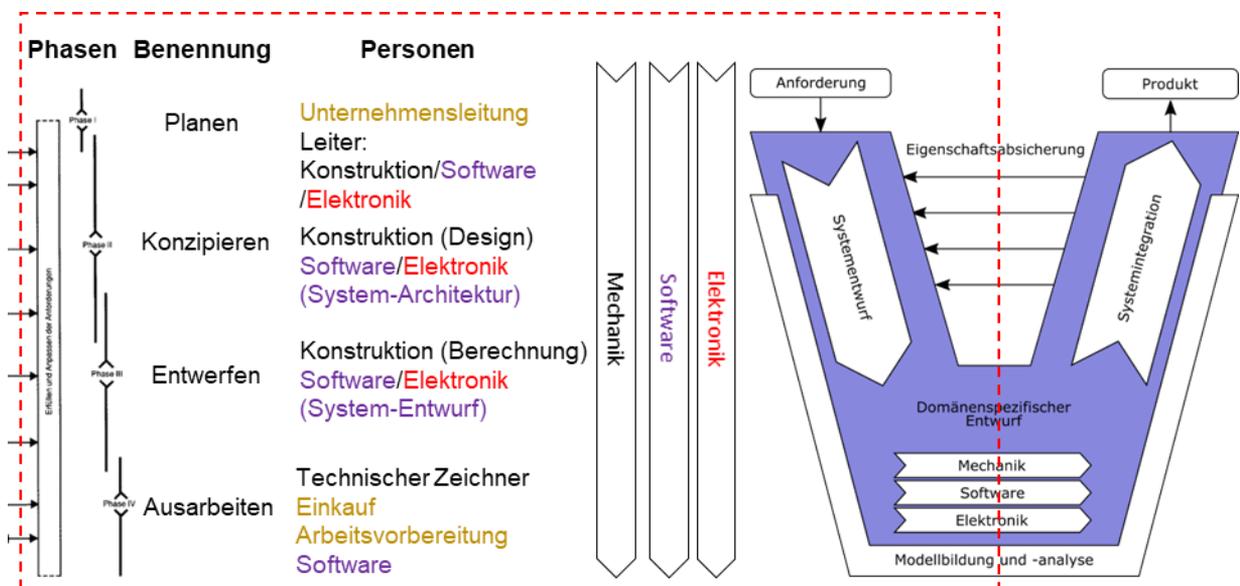


Abbildung 21: Synthese der Ablaufschemen nach VDI 2206 und VDI 2221

Dieser Ansatz steht dabei nicht im Widerspruch zur VDI 2221, denn die Organisation der Abläufe geschieht auf der übergeordneten Ebene des Lean Development. Im Speziellen sind das Fließ- und Pull-Prinzip mit den Methoden zur Realisierung der Prozesssynchronisation und das Simultaneous Engineering dafür relevant. Wie in Abbildung 21 dargestellt, entspricht die erste Phase ‚Systementwurf‘ des Ablaufschemas weitgehend dem Schema der Methodik nach VDI 2221. Dabei lassen sich auch die Unternehmensbereiche bzw. Personen jeweils den einzelnen Phasen zuordnen.

### 3.3 CAx-Software

Die moderne Produktentwicklung zeichnet sich durch die Nutzung von CAx-Software aus. CAx-Systeme sind rechnergestützte Technologien, die zur Beschleunigung und Vereinfachung des Produktentwicklungsprozesses entwickelt wurden [64]. Das ‚CA‘ steht dabei immer für rechnergestützt (engl. *computer-aided*) und das ‚x‘ für die jeweilige Anwendung. Der erste große Teilbereich, der hier betrachtet wird, sind die CAD-Systeme (siehe Kapitel 3.3.1). Dabei handelt es sich um Software, die das händische Erstellen von Zeichnungen und Entwürfen digitalisiert. Besonders bei der Auslegung und Entwicklung von elektrischen Maschinen müssen verschiedene Berechnungen und Simulationen durchgeführt werden. Dies wird dann unter dem Begriff CAE (engl. *computer-aided engineering*) zusammengefasst (siehe Kapitel 3.3.2). Die so erstellten Daten müssen schließlich auch verwaltet werden, was durch Datenbankmanagementsysteme geschieht (siehe Kapitel 3.3.3). Anwendungsspezifischer ist aber die PDM-Software (siehe Kapitel 3.3.4), wobei ‚PDM‘ für Produktdatenmanagement steht. Die beiden Softwaregruppen werden im Folgenden kurz erläutert. Zum Schluss wird Software für die Auslegung von elektrischen Maschinen vorgestellt (siehe Kapitel 3.3.5).

#### 3.3.1 CAD-Software

CAD-Systeme sind Anwendungssysteme, die das rechnergestützte Modellieren, Gestalten und Konstruieren (engl. *design*) von Produkten sowie die Erstellung der Produktdokumentation ermöglichen [65]. Aktuell existiert eine große Anzahl von CAD-Programmen auf dem Markt, die in verschiedenen Branchen eingesetzt werden. Im Folgenden wird nur Software betrachtet, die im Bereich Maschinenbau Verwendung findet. In diesem Bereich sind AutoCAD, Inventor, CATIA, SolidWorks, NX, Solid Edge und Creo die geläufigsten Programme<sup>24</sup>. Sie werden im Folgenden kurz beschrieben, wobei die Informationen von den Internetseiten der Anbieter entnommen wurden<sup>25</sup>, um einen Überblick über die Eigenschaften, Stärken und Unterschiede herzustellen.

*Inventor und AutoCAD von Autodesk Inc.*

Autodesk Inc. ist ein amerikanisches Software-Unternehmen mit Sitz in San Rafael, Kalifornien. Inventor und AutoCAD sind jeweils weit verbreitete Konstruktionsprogramme dieses Herstellers. AutoCAD ist ein ebene-basiertes professionelles 2D-Zeichenprogramm, das mittlerweile zum Teil auch 3D-Modellierung unterstützt. Das Programm bietet branchenspezifische Funktionen und Bibliotheken. Im Gegensatz dazu wurde Inventor speziell für die parametrische 3D-CAD-Modellierung entwickelt<sup>26</sup>. Diese Software findet professionell in Maschinen-,

---

<sup>24</sup> <https://www.net-online.de/blog/cad/die-beste-cad-software/> Stand 2020-11

<sup>25</sup> <http://www.cad-programme.com/> Stand 2020-11

<sup>26</sup> <https://www.sculpteo.com/blog/2018/03/07/top-8-of-the-best-parametric-modeling-software> Stand 2020-11

Werkzeug- und Anlagenbaubranchen eine breite Anwendung. Zusätzlich bietet Autodesk verschiedene Erweiterungen und Module zur Installation an. Außer der parametrischen Modellierung unterstützt Inventor automatische Auslegungsfunktionen für Maschinenelemente wie Wellen und Schraubenverbindungen.

#### *Catia und SolidWorks von Dassault Systèmes*

Dassault Systèmes ist ein französischer Softwarehersteller, der Catia und SolidWorks auf den Markt gebracht hat. SolidWorks kennzeichnet sich durch seine benutzerfreundliche Bedienung und geringen Schulungsaufwand. Je nach Aufgabenstellung kann sein Funktionsumfang erweitert werden. Catia ist ein CAD-Programm von Dassault Systèmes, das für den Flugzeugbau entwickelt wurde, derzeit aber auch in vielen anderen Branchen eingesetzt wird. Das Programm ist in verschiedene Module (Workbenches) gegliedert und hat einen großen Funktionsumfang, der den gesamten Produktentwicklungszyklus abdeckt. Sowohl Catia als auch SolidWorks unterstützen parametrisches Modellieren.

#### *Solid Edge und NX der Siemens AG*

NX ist ein Softwarepaket der Siemens AG, das für CAD-, CAE- und CAM-Anwendungen entwickelt wurde. Mit einer großen Anzahl von Erweiterungen und Modulen lässt sich auch hier der gesamte Produktlebenszyklus abdecken. Ebenfalls von Siemens entwickelt wurde Solid Edge, das eine Alternative zu SolidWorks darstellt. Mit diesem 3D-CAD-Programm können verschiedene Abläufe in der Simulation, Konstruktion und Fertigung unterstützt werden. Außerdem ist Solid Edge im Vergleich zu älteren Versionen benutzerfreundlicher geworden. Beide Programme sind für die parametrische Modellierung geeignet, was eine grundlegende Anforderung für eine adaptive Konstruktion ist.

#### *Creo von PTC Inc.*

Creo ist eine weit verbreitete CAD-Software des amerikanischen Softwareherstellers PTC Inc. (früher Parametric Technology Corporation), mit der CAD-Modelle parametrisch erstellt werden können. Dieses professionelle, für 2D- und 3D-Konstruktionen geeignete Softwarepaket, das früher als Pro/ENGINEER bekannt war, kann bei der Lösung von verschiedenen technischen Problemen eingesetzt werden. Dazu wird eine Vielzahl von Erweiterungen und Modulen angeboten, die beim Bedarf erworben und installiert werden können.

### 3.3.2 CAE- und Simulationssoftware

Bevor ein Produkt auf den Markt kommt, muss es optimiert und geprüft werden. Dies gilt insbesondere für elektrische Maschinen, da durch die elektrischen Komponenten und beweglichen Teile ein Gefahrenpotenzial vorhanden ist. Zum Zweck der Prüfung und Optimierung kann eine Kombination aus CAD- und CAE-Software genutzt werden. Mit Hilfe von CAE-Systemen lassen sich verschiedene Produkteigenschaften vorhersagen, was beim Entwicklungsprozess zur Reduzierung der Durchlaufzeit und der Kosten führt [65]. Derzeit existiert eine große Anzahl von unterschiedlichen CAE- und Simulationsprogrammen. Dazu gehören zum Beispiel MATLAB, GNU Octave und Scilab [66]. Diese Programme werden im Folgenden kurz beschrieben. Es handelt sich jeweils um anwendungsunabhängige Berechnungssoftware. Außerdem gibt es eine Reihe anwendungsspezifischer CAE-Software, zu der Auslegungssoftware von Maschinenelementen wie Lager und Wellen zählen, wie die BEARINX-online Module der Schäffler-Gruppe. Auch SKF bietet verschiedene Berechnungstools an.

#### *Numerische Berechnungen*

Als Software für die numerische Berechnung kommen MATLAB, GNU Octave oder Scilab in Frage. MATLAB ist ein kommerzielles Programmpaket zur numerischen Berechnung und grafischen Darstellung der Berechnungsergebnisse. Das Programm verfügt über eine große Anzahl von unterschiedlichen Toolboxen. Eine davon ist Simulink, das für das Modellieren und Simulieren verschiedener Systeme verwendet wird. Aktuell wird MATLAB zunehmend in der Industrie und an Universitäten eingesetzt.

GNU Octave und Scilab gehören zu den Open-Source-Systemen, deren Quelltext frei verfügbar ist. Damit stellen sie die kostenlosen Alternativen zum kommerziellen MATLAB dar. Außerdem ist zu erwähnen, dass die GNU-Octave-Syntax weitgehend kompatibel zu MATLAB ist. Im Gegensatz dazu unterscheidet sich die Scilab-Syntax in einigen Fällen wesentlich von der MATLAB-Syntax. Beide Programme stellen wie MATLAB, verschiedene Toolboxen bereit. Die Xcos-Toolbox von Scilab ist dabei als Alternative zum oben erwähnten MATLAB Simulink zu betrachten.

#### *Online Engineering Tools*

Bei dieser Softwaregruppe handelt es sich meist um browserbasierte Anwendungen. Die Berechnungsparameter werden in einer bereitgestellten Eingabemaske im Browser eingetragen. Die eigentliche Berechnung läuft dann auf dem jeweiligen Server der Unternehmen ab. Zur Berechnung der Lagereigenschaften wird das Onlinetool ‚Bearing Calculator‘ von der Firma SKF angeboten. Separat gibt es das Tool ‚Lube Select‘ für die Auswahl des Schmierstoffs und

‚Seal Select‘ für die Auswahl der Dichtung sowie ‚Bearing Select‘ für die Lagerauswahl<sup>27</sup>. Weitere wichtige Onlinetools sind die BEARINX-online Module der Schäffler-Gruppe<sup>28</sup>. Generell unterstützen die Tools bei der Auslegung der Lagerung und deren Umgebung [45].

### *Finite-Elemente-Methode*

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein heute sehr weit verbreitetes numerisches Verfahren. Die bekanntesten Anwendungsbereiche sind die Festigkeits- und die Verformungsuntersuchung von Bauteilen. Auch in der Thermodynamik ist dieses Verfahren unerlässlich, zum Beispiel zur Berechnung von Temperaturverteilungen in Festkörpern. Deshalb ist die Methode gerade für das Auslegen von drehenden elektrischen Maschinen relevant. Bei diesem Verfahren wird das Verhalten von dreidimensionalen Objekten analysiert. Es wird angewendet, wenn die klassischen Methoden (z. B. die Balkentheorie) nicht mehr zum Ziel führen, da das betrachtete Objekt deutlich von der Idealform abweicht.

Der zu untersuchende Körper wird in endlich viele Teilgebiete (finite Elemente) unterteilt. Für diese Elemente und deren Wechselwirkung wird dann jeweils das Verhalten berechnet. Es entsteht ein komplexes System aus Differenzialgleichungen, die von den Tools gelöst werden können. Die Berechnungstools, die heute verwendet werden, benötigen dabei nur wenige Eingangsgrößen und berechnen vieles selbst. Daher muss der Bediener stets hinterfragen, ob die Eingaben plausibel sind und zu dem jeweilig verwendeten Solver passen. Weitere wichtige Definitionen, die der Bediener treffen muss, beziehen sich auf die Randbedingungen des Modells und die Parameter der Vernetzung (z. B. Tetraeder oder Quader etc.) sowie auf die Art der Belastung und deren Angriffspunkt.

Eine bekannte Open-Source-Software ist OpenFOAM. Die bekannteste kommerzielle Software ist ANSYS. Auch die Zusammenhänge der elektromechanischen Wandlung können von diesen Tools berechnet werden. Derzeit enthalten die meisten CAD-Systeme bereits eine FEM-Toolbox, wobei vielfach der Nastran-Solver verwendet wird.

### **3.3.3 Datenbankmanagementsysteme**

Soll ein softwaregestützter Konstruktionsprozess realisiert werden, fallen verschiedene Daten in verschiedenen Anwendungen an, die gespeichert und verwaltet werden müssen. Daher muss ein geeignetes Konstruktionswerkzeug immer gut in die IT-Landschaft des jeweiligen Unternehmens eingebettet sein. Die IT-Landschaft ist durch Datenbankmanagementsysteme geprägt, weshalb in diesem Kapitel die Grundlagen dieser Systeme erläutert werden.

---

<sup>27</sup> <https://www.skf.com/de/knowledge-centre/engineering-tools/index.html> Stand 2020-11

<sup>28</sup> <https://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/de/produkte-und-loesungen/industrie/berechnung-und-beratung/berechnung/index.jsp> Stand 2020-11

Laut Hermann ist ein Datenbankmanagementsystem als ein System für die Datenbankverwaltung zu beschreiben [67]. Die Daten werden in verschiedenen relationalen Datenbanken zusammengefasst. Zum Zweck der Bearbeitung dieser Datenbanken, die aus mehreren Beziehungen bestehen, wird ein relationales Datenbankmanagementsystem (RDBMS) eingesetzt. Dabei werden für die Abfrage und Speicherung der Daten einer Datenbank spezielle Datenbanksprachen verwendet. Eine weit verbreitete Datenbanksprache ist SQL, die von mehreren RDBMS unterstützt wird.

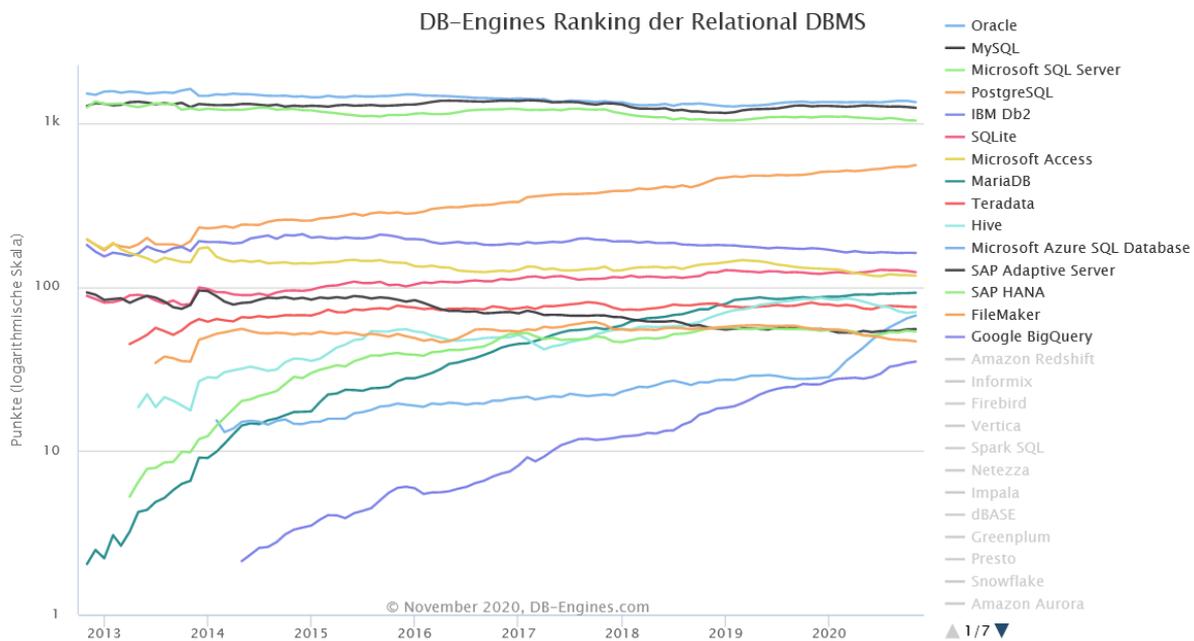


Abbildung 22: Trend der Popularität von relationalen DBMS<sup>29</sup>

Aktuell existiert eine große Anzahl verschiedener Datenbankmanagementsysteme, die sich voneinander unterscheiden. Das Internetportal DB-Engines befasst sich mit der Sammlung von aktuellen Informationen über Datenbankmanagementsysteme und stellt sie für den Vergleich zur Verfügung<sup>30</sup>. Mit dem DB-Engines-Ranking kann die Popularität eines Systems bezogen auf mehrere Parameter gemessen und bewertet werden. In der Abbildung 22 wird der Trend hinsichtlich der Popularität von relationalen Datenbankmanagementsystemen dargestellt. Die am häufigsten verwendeten Datenbankmanagementsysteme sind Oracle, MySQL, MS SQL Server, DB2, PostgreSQL und MS Access. Ein großer Softwareanbieter für Datenbanken ist die SAP SE mit Sitz in Walldorf bei Karlsruhe. Die Firma bietet Software zur Abwicklung sämtlicher Geschäftsprozesse an. Wichtige Produkte sind MaxDB, SAP ASE, SAP IQ, SAP HANA. Diese werden im Folgenden anhand der Vergleichsfunktion von DB-Engines einander gegenübergestellt.

<sup>29</sup> [https://db-engines.com/de/ranking\\_trend/relational+dbms](https://db-engines.com/de/ranking_trend/relational+dbms) Stand 2020-11

<sup>30</sup> <https://db-engines.com/de/ranking> Stand 2020-11

Die betrachteten DBMS erfüllen alle allgemeinen Verwendungszwecke eines relationalen Datenbankmanagementsystems und unterstützen die SQL-Datenbanksprache. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch die unterstützten Programmiersprachen, Betriebssysteme und Lizenztypen. Oracle gehört dabei zu den führenden Softwareanbietern von Datenbankmanagementsystemen. Das weltweit verbreitete kommerzielle RDBMS Oracle Database und das Open-Source-Datenbankmanagementsystem MySQL werden heute von vielen Unternehmen verwendet. Ein weiterer großer Softwarehersteller ist Microsoft, der kommerzielle RDBMS wie Microsoft SQL Server und Microsoft Access, anbietet. Obwohl beide Datenbankmanagementsysteme speziell für Windows entwickelt wurden, wird zurzeit MS SQL Server zusätzlich unter Linux unterstützt. Im Vergleich zu den obengenannten RDBMS steht für Benutzer von MS-Produkten eine deutlich kleinere Anzahl von Programmiersprachen zur Verfügung.

Ein anderer Open-Source-Vertreter von relationalen Datenbankmanagementsystemen ist PostgreSQL. Die Popularität des Systems von PostgreSQL Global Development Group steigt stetig. Im Gegensatz zu anderen Datenbankmanagementsystemen ist es auf mehreren Plattformen verfügbar, unterstützt aber eine kleinere Anzahl von Programmiersprachen. Das letzte kommerzielle RDBMS in der Rangliste ist DB2 von IBM, das oft im Großrechnerumfeld eingesetzt wird und alle gängigen Programmiersprachen unterstützt. Die relationalen Datenbankmanagementsysteme können auch als Basis von PDM-Systemen verwendet werden, die im folgenden Kapitel näher erläutert werden.

#### **3.3.4 PDM-Software**

Laut Vajna wird ein Produktdatenmanagementsystem als ein datenbankbasiertes technisches System beschrieben, das die Aufgabe hat, alle wichtigen Produktinformationen während des gesamten Entwicklungsprozesses zu speichern, zu verwalten und bereitzustellen [64]. Die Struktur eines PDM-Systems ist in Abbildung 23 dargestellt. Zur Verwaltung der Informationen werden die sogenannten Metadaten erstellt. Dabei handelt es sich um strukturierte Daten, die die Informationen über andere Daten wie Bauteilnummer, Versionsnummer, Dateiersteller und Erstellungsdatum enthalten. Diese werden in der Regel entweder den vorhandenen Objektdateien entnommen oder automatisch erstellt. Außerdem repräsentiert das PDM-System eine Zwischenanwendung für die im Entwicklungsprozess eingesetzten CAx-Systeme, mit der diese jeweils verbunden werden können. Des Weiteren können verschiedene Nutzdaten wie 3D-CAD-Modelle mithilfe von PDM-Systemen dargestellt werden. Hierfür ist es nicht mehr notwendig, die CAD-Software auszuführen. Die Produktdatenmanagementsysteme arbeiten nach dem Client-Server-Prinzip.

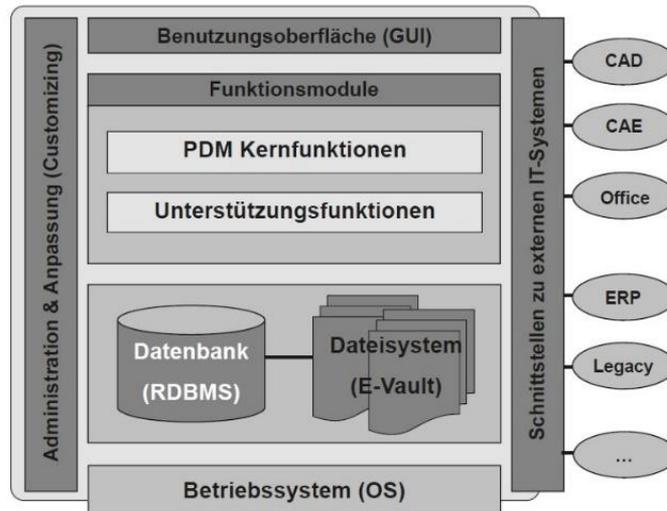


Abbildung 23: PDM-Systemstruktur [64]

Dadurch besteht die Möglichkeit, alle Daten unter Berücksichtigung von Zugriffsrechten innerhalb eines Netzes zu verteilen und bei Bedarf vom Server anzufordern. Wie oben erwähnt, werden in der Regel PDM-Systeme in Kombination mit relationalen Datenbankmanagementsystemen eingesetzt, die als Basis eines Produktdatenmanagementsystems angewendet werden.

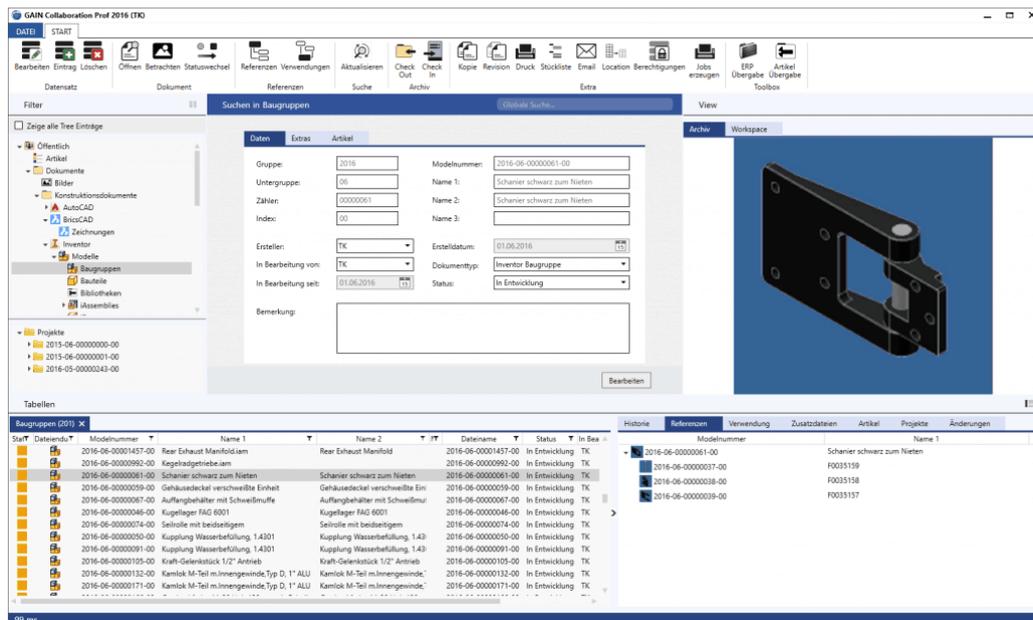
Abbildung 24: Benutzeroberfläche einer PDM-Anwendung<sup>31</sup>

Abbildung 24 stellt beispielhaft eine Bedienoberfläche eines PDM-Systems dar. Im Folgenden werden die gängigen PDM-Systeme kurz beschrieben<sup>32</sup>.

<sup>31</sup> <https://www.gain.de/pdm/pdm-software/> Stand 2019-10

<sup>32</sup> [https://www.gaip-beratung.de/service/pdm\\_plm\\_marktuebersicht](https://www.gaip-beratung.de/service/pdm_plm_marktuebersicht) Stand 2019-10

### *Gain Collaboration*

Gain Collaboration ist ein neutrales PDM-System von Gain Software GmbH. Die PDM-Software ist benutzerfreundlich und lässt sich mithilfe von grafischen Werkzeugen und Dialogfenstern den Bedürfnissen des Benutzers leicht anpassen. Außerdem ist Gain Collaboration ein Produktdatenmanagementsystem, das durch einen hohen Grad an Datensicherheit gekennzeichnet ist. Das Programm hat eine offene Architektur und lässt sich leicht an andere Fremdsysteme anschließen. Die Basis für Gain Collaboration bildet das kommerzielle RDBMS Microsoft-SQL-Server.

### *PRO.FILE*

Mit dem Einsatz von PRO.FILE von der PROCAD GmbH & Co. KG besteht die Möglichkeit, ein Produkt innerhalb kürzester Zeit zu entwickeln<sup>33</sup>. Das PDM-System unterstützt alle anderen gängigen CAx-Systeme und erfüllt sämtliche Zwecke eines neutralen Produktdatenmanagementsystems. Außerdem lassen sich mit PRO.FILE verschiedene Produktdaten und Berechnungsergebnisse während des Produktlebenszyklus leicht verwalten. PRO.FILE kann mit Microsoft SQL-Server verwendet werden.

### *Speedy*

Das neutrale Produktdatenmanagementsystem Speedy von MMH Software GmbH lässt sich optimal an die Prozessstruktur des Unternehmens anpassen<sup>34</sup>. Speedy ist leicht konfigurierbar und hat eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche, die sich an Windows-Standards orientiert. Das verkürzt die Einarbeitungszeit und gestaltet die Anwendung bequemer. Speedy wird zwar in der Regel mit MySQL eingesetzt, unterstützt aber auch alle anderen gängigen Datenmanagementsysteme wie MS Access, MS SQL-Server und Oracle.

### *Windchill*

Neben den oben genannten Softwareherstellern bietet auch PTC eine PDM-Lösung an<sup>35</sup>. Das Programm Windchill hat einen großen Funktionsumfang und kann als PDM-System eingesetzt werden. Die zentrale Ansicht von Daten erleichtert das Datenmanagement. Zudem ist der zeitliche Aufwand, um die benötigten Daten zu finden, gering. Windchill kann entweder mit Microsoft-SQL-Server oder mit Oracle eingesetzt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, wenn kein RDBMS eingesetzt wurde, eine Datenbank mit dem PTC Lösungsinstallationsprogramm zu erstellen und zu konfigurieren.

---

<sup>33</sup> <https://www.procad.de/pro-file-pdm-plm-software/> Stand 2020-11

<sup>34</sup> <https://www.speedy-pdm.de/> Stand 2020-11

<sup>35</sup> <https://www.ptc.com/de/products/plm/plm-products/windchill> Stand 2020-11

### *Vault*

Vault ist ein PDM-System, das von der Autodesk GmbH speziell für Autodesk-CAD-Systeme entwickelt wurde<sup>36</sup>. Mit Vault lässt sich zum einen der gesamte Entwicklungsprozess effizienter gestalten und zum anderen die Anzahl an Fehlern reduzieren. Das Produktdatenmanagementsystem wird durch seine einfache Konfigurierbarkeit und die hohe Datensicherheit zunehmend beliebter. Die Basis für Autodesk Vault bildet ein kommerzielles Datenbankmanagementsystem MS SQL-Server.

### **3.3.5 Software für die Auslegung von elektrischen Maschinen**

Für die Auslegung von elektrischen Maschinen existieren aktuell verschiedene Softwarelösungen, die eine große Anzahl an Berechnungswerkzeugen enthalten. Diese anwendungsspezifische CAE-Software ersetzt die Eigenentwicklung einer Berechnungslandschaft in den anwendungsoffenen CAE-Lösungen (siehe Kapitel 3.3.2). Von Nachteil ist jedoch, dass die Berechnungsgrundlage teilweise nicht offen zugänglich ist. Es sind außerdem nur die bekannten Standardmaschinenprinzipien zur Auslegung verfügbar. Außerdem entsteht durch den Einsatz dieser Software eine gewisse Abhängigkeit von der Firma, die diese vertreibt und wartet. Am Markt sind Auslegungsprogramme, wie Motor-CAD, ProMotor, Opera, FluxMotor, QuickField, Motoranalysis, Motorsolve, verfügbar (vgl. siehe Tabelle 6).

Der Umfang dieser Programme stellt den Ausgangspunkt für den in dieser Arbeit beschriebenen adaptiven und softwaregestützten Konstruktionsprozess dar. In der Tabelle 6 wird der Funktionsumfang dieser Programme dargestellt und verglichen. Die entsprechenden Informationen wurden den Homepages der Hersteller entnommen.

Motor Design Ltd. ist ein britisches Unternehmen, das seit 1998 Software für die Auslegung von elektrischen Maschinen entwickelt. Diese Firma vertreibt das Programm Motor-CAD. Das Softwarepaket für die thermische und elektromagnetische Analyse wird weltweit von zahlreichen Motorherstellern und Universitäten benutzt. Das Programm hat eine benutzerfreundliche Oberfläche und unterstützt eine große Anzahl an Motortypen.

Ein weiteres Programm zur Auslegung von elektrischen Maschinen ist ProMotor, eine von der RWTH Aachen entwickelte Softwareumgebung, die verschiedene notwendige Berechnungsmethoden aus mehreren physikalischen Teilgebieten zu einer Benutzerschnittstelle zusammenführt. Dadurch lässt sich der gesamte Entwicklungsprozess von Elektromotoren abbilden. ProMotor wird heutzutage erfolgreich in mehreren Industrieprojekten eingesetzt.

Opera ist ebenfalls für die Auslegung von drehenden elektrischen Maschinen geeignet. Das Programm stellt ein leistungsstarkes FE-Softwarepaket von Opera Simulation Software dar,

---

<sup>36</sup> <https://www.autodesk.de/products/vault/features> Stand 2020-11

das von Dassault Systèmes übernommen wurde. Die Software realisiert eine genaue Modellierung elektromagnetischer Felder für die geläufigen Arten von elektrischen Maschinen. Außerdem stellt sie eine große Anzahl von Modulen und Erweiterungen zur Verfügung, mit denen weitere Analysen und Berechnungen durchgeführt werden können.

Tabelle 6: Vergleich von Software für die Auslegung von elektrischen Maschinen

| Software \ Funktion | GUI | AB | FEM | GA | WS | EA | TA | KR | B | V | T | R | S |
|---------------------|-----|----|-----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|
| Motor-CAD           | X   | X  | X   | X  | X  | X  | X  | X  | X |   |   |   |   |
| ProMotor            | X   | X  | X   |    |    | X  | X  |    |   |   |   |   |   |
| Opera               | X   | X  | X   | X  | X  | X  | X  | X  |   |   |   |   |   |
| FluxMotor           | X   | X  | X   | X  | X  |    |    |    | X | X | X | X |   |
| QuickField          | X   | X  | X   |    |    | X  | X  |    |   |   |   |   |   |
| Motoranalysis       | X   | X  | X   | X  | X  | X  |    |    | X |   |   |   |   |
| Motorsolve          | X   | X  | X   | X  | X  | X  | X  |    | X | X |   | X | X |

GUI - Graphical User Interface

AB - analytische Berechnung

FEM - finite Elemente Methode

GA - Geometrieauslegung

WS - Wicklungsschema

EA - elektromagnetische Analyse

TA - thermische Analyse

KR - Kostenrechnung

B - eigene Bibliothek von Standardteilen

V - Vergleichsfunktion

T - Testdurchführung für die Bewertung von elektrischen Maschinen

R - erstellen von Reporten

S - Unterstützung von Skripten

Ein weiterer Vertreter von Motorauslegungsprogrammen ist FluxMotor von Altair Engineering. Altair Engineering ist ein führender amerikanischer Softwarehersteller, der unterschiedliche Softwarelösungen anbietet. FluxMotor wurde im Jahr 2017 auf den Markt gebracht und ist besonders für die Vorentwicklung von drehenden elektrischen Maschinen geeignet. Das Programm ermöglicht es dem Anwender, Motoren aus Standard- oder kundenspezifischen Teilen zu konstruieren und zu erstellen sowie intuitiv Wicklungen und Materialien hinzuzufügen. Mit seiner effizienten Arbeitsumgebung ist es möglich, einen Elektromotor innerhalb weniger Minuten zu erstellen und zu bewerten.

Ein anderes geeignetes Programm ist QuickField von Tera Analysis, das ebenfalls ein effizientes FE-Paket für die thermische und elektrische Simulation bietet. Das Programm wurde speziell für Windows entwickelt und kann laut Hersteller sofort nach der Installation ohne Schulung verwendet werden. QuickField findet Anwendung in unterschiedlichen Ingenieurbereichen und wird derzeit von mehreren Universitäten verwendet.

Für die Auslegung von elektrischen Maschinen kann auch MotorSolve von Mentor Graphics verwendet werden. Mithilfe unterschiedlicher Analysemodule und einer benutzerfreundlichen Oberfläche können verschiedene Simulationen und Berechnungen durchgeführt werden. Außerdem besitzt das Programm ein automatisiertes FE-Modul, das die Finite-Elemente-Analyse automatisch ablaufen lässt.

## 4 Softwaregestützter und adaptiver Konstruktionsprozess

Beim Entwickeln von elektrischen Maschinen gibt es drei verschiedene Ansätze<sup>37</sup>. Der einfachste Ansatz beruht darauf, die vorhandenen Standardblechschnitte zu nutzen und eine Wicklungsauslegung nach Kundenwunsch durchzuführen. Die zweite Variante besteht in der Wicklungsauslegung in Kombination mit der Berechnung des magnetischen Kreises und die dritte in der Optimierung der gesamten Maschine. In der vorliegenden Arbeit wird ein Prozess beschrieben und angewendet, der eine für den Anwendungsfall optimale Maschine hervorbringen soll. Der Prozess an sich ist komplex, weshalb eine gewissenhafte Durchführung von großer Wichtigkeit für die Ergebnisgüte ist. Es ist daher sinnvoll, diesen Prozess so weit wie möglich softwaregestützt zu gestalten.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass in den frühen Phasen nicht alle Eigenschaften des Produkts genau definiert sind. Nach dem Frontloading-Prinzip ist bekannt, dass die späteren Eigenschaften eines Produkts schon früh festgelegt werden. Dazu kommt, dass häufig Anforderungen vom Kunden geändert oder hinzugefügt werden [3], [65]. Insbesondere wenn das Produkt für eine Gruppe von Endnutzern gedacht ist, müssen die Eigenschaften in bestimmten Intervallen anpassbar sein. Eine Lösung kann es sein, bei der Gestaltung des Produkts modular vorzugehen (Baukastensystem, Baureihen), sodass durch das Anpassen einzelner Module den Änderungen Rechnung getragen werden kann. So kann das zeitaufwendige Anpassen der gesamten Struktur vermieden werden. Eine andere Lösung ist das parametrische Gestalten von Produkten [64], [68], [69]. Dieser Ansatz kann auch in Kombination mit einer modularen Gestaltung geschehen, um die größtmögliche Anpassbarkeit zu erreichen. Besonders bei der Entwicklung von elektrischen Maschinen sind die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Eigenschaften der Maschine zu berücksichtigen. Deshalb ist bei der Auslegung und Konstruktion iterativ vorzugehen, wodurch häufige Anpassungen am Entwurf notwendig sind [3], [65].

Dabei ist besonders die Wechselwirkung zwischen der mechanischen Struktur und dem thermischen Verhalten der Maschine von Bedeutung. Wird die Maschine auf einen bestimmten Nennbetriebspunkt (Strom, Spannung, Drehzahl, Drehmoment) ausgelegt, darf der thermische Beharrungszustand im Dauerbetrieb (S1) nie oberhalb der maximal zu ertragenden Temperatur der Wicklung liegen [10]. Kann die entworfene mechanische Struktur die Wärme nicht ausreichend ableiten, müssen die Nennleistung reduziert oder die mechanische Struktur angepasst werden. Dies kann zum Beispiel durch eine zusätzliche Verrippung des Stators der Maschine geschehen. Dies bewirkt eine Versteifung des Systems, weshalb der Stator bei glei-

---

<sup>37</sup> <https://www.emt-net.de/elektromotorenbau/motorenberechnung.html> Stand 2020-11

cher Steifigkeit leichter ausgeführt werden kann. Um diese und andere positive Wechselwirkungen nutzen zu können, ist es sinnvoll, die Auslegung und Konstruktion der Maschine parameterbasiert vorzunehmen [70].

In dieser Arbeit wird deshalb eine Lösung vorgestellt, die diese Effekte nutzbar macht und die Konstruktion der Maschine beschleunigt. Außerdem unterstützt die Lösung das Simultaneous Engineering [71], [72]. Ein dynamisches Motormodell, das auf relationaler Parameterbasis fußt, kann leicht an geänderte Rahmenbedingungen angepasst werden. Es handelt sich um ein erweitertes Digital Mock-Up [73], [74]. Auch Kundenwünsche können schnell bedient werden, was wiederum dem Gedanken des Lean Management entspricht [49]. Wird etwa die elektromechanische Auslegung verändert, kann das CAD-Modell mit der Anpassung der entsprechenden Variablen in Echtzeit nachgezogen werden. Ziel ist es, dass alle beteiligten Partner auf die gleiche Parameter-Bibliothek zugreifen, womit alle Modelle synchron wären. Allerdings müssten dann Schreib- und Zugriffsrechte vergeben und verwaltet werden, wofür ein DBMS und ein Administrator nötig sind. Das System müsste eingeführt und gewartet werden. Außerdem müssten die Mitarbeiter geschult werden und die Kommunikation müsste vereinheitlicht werden, was bei der hohen Anzahl an Variablen schwierig ist.

Die Anpassungen in einem Berechnungswerkzeug müssen dabei immer mit den Anforderungen des Kunden oder Auftraggebers übereinstimmen. Angesichts dessen ist gerade die Kommunikation mit dem Vertrieb von wesentlicher Bedeutung. Diese ist in einer Anforderungsliste dokumentiert. Zwar existieren Forschungsbestrebungen, die Daten aus Listen und anderen Dokumenten automatisiert in die Anforderungsliste zu übernehmen, dies wird hier jedoch nicht angestrebt.

#### **4.1 Entwicklungsprozess der Maschine**

Um das Potenzial eines softwaregestützten und adaptiven Konstruktionsprozesses aufzeigen zu können, muss zunächst der Ist-Stand, also die Funktion des Prozesses, beschrieben werden. Das übergeordnete Ziel besteht darin, die Kundenanfrage für eine spezielle Maschine in ein verkaufsfähiges Produkt umzusetzen. Den Startpunkt bildet die Anfrage eines Kunden für eine Maschine, die über den Vertrieb kommuniziert wurde – im besten Fall in Form einer Anforderungsliste. Diese Anfrage wird dann in einer Grobauslegungsebene geprüft, wobei die Grobauslegung einer Machbarkeitsprüfung des Wandlungsverhaltens der Maschine bei den gegebenen Rahmenbedingungen in einem MATLAB-Skript entspricht. Mit diesem Skript wird ein Parametersatz für die elektromechanisch aktiven Teile des Generators erzeugt.

Die Maschine wird über Gleichungen modelliert, die die elektromagnetischen Eigenschaften einer drehenden elektrischen Maschine mit Luftspaltwicklung abbilden [75]. Dazu wird ein Maschinenmodell in ANSYS Maxwell analysiert, zudem wird über Fourier-Analysen ein charak-

teristisches Verhalten des B-Feldes in Abhängigkeit vom Luftspalt und der Magnetstärke beschrieben. Das Ergebnis ist eine ideale Geometrie der aktiven Maschinenkomponenten im Nennbetriebspunkt [40]. Bei erfolgreicher Machbarkeitsprüfung muss die Grobauslegung dann in eine realisierbare Konstruktion übersetzt werden. Dabei kommt Autodesk Inventor zum Einsatz. Als Übergabeformat dient eine Wertetabelle.

Am Anfang jeder Konstruktion steht die Betrachtung der Schnittstellen zu anderen Systemen. Dazu lassen sich folgende Fragen formulieren: Wie ordnet sich die Konstruktion ins Gesamtsystem ein? Wo sind die Berührungspunkte? Welche Maße müssen übernommen werden? Welcher Bauraum steht zur Verfügung und welchen Umgebungsbedingungen ist die Konstruktion ausgesetzt?

Bei der Gestaltung der Maschine können die konstruktiven Rahmenbedingungen in vier Gruppen eingeteilt werden: Elektrik, Mechanik, Kinematik, Thermik. Die elektrische Schnittstelle wird durch die Strom- und Spannungslage im Nennbetriebspunkt sowie dessen Frequenz gebildet. Maßgebliche mechanische Schnittstellen sind die Befestigung der Statorwelle und die Ausführung der Kabeldurchführung sowie die Drehmomentübertragung (Welle- oder Flanschlösung) vom Antrieb auf die Maschine. Diese Elemente müssen je nach Anwendungsfall angepasst werden und bestimmen maßgeblich die weitere Gestaltung der Maschinenelemente. Für die Kinematik ist die Drehzahl relevant und der Umstand, dass die Maschine mit einem Außenläufer ausgestattet wird. Die thermischen Bedingungen sind vom Klima des Einsatzortes abhängig, womit den äußeren Anforderungen Rechnung getragen ist.

Dazu kommen interne Anforderungen, die aus dem Maschinenprinzip resultieren. Diese sind die Fertigungstoleranzen, die Art der Montage der Maschine und die Materialeigenschaften der aktiven Teile. Diese drei Eigenschaften sind für jedes aktive Teil miteinander verknüpft und müssen deshalb zusammen betrachtet bzw. aufeinander abgestimmt werden. Das Maschinenprinzip stellt außerdem spezielle Anforderungen an die Art der Kühlung und die Lagerung der Maschine.

Die hier betrachtete Maschine wurde mit einer Luftkühlung ausgestattet. Dies bedeutet, dass keine Kühlkanäle, sondern Kühlrippen vorgesehen werden mussten. Diese wurden zuerst im CAD geplant und mittels 1D-thermo-Modell in MATLAB Simulink nachgerechnet und ggf. angepasst. Dann wurden die Lager ausgelegt, wobei BEARINX-online zum Einsatz kam, um verschiedene Lagerkombinationen zu berechnen. Die beste Variante wurde dann ins CAD übernommen. Dann konnten die Deckel gestaltet werden. Da es sich um eine luftgekühlte Maschine handelt, hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Deckel mit Rippen zu versehen. Dies erhöht die Wärmeabfuhr aus dem Innenraum an die Umgebung, gleichzeitig bewirken die Rippen eine Verwirbelung der Luft im Innenraum, was die Wärmeübertragung zusätzlich verbessert. Im Anschluss wurde der Rotor gestaltet. Er wird an den Deckeln montiert und trägt die

Magneten und stellt gleichzeitig deren Eisenrückschluss dar. Er ist also am Wirkprinzip beteiligt, hat aber auch eine mechanische Funktion. Es folgte die Gestaltung des Stators. Dieser muss so aufgebaut sein, dass die Wärme, die in der Wicklung entsteht, abgeführt werden kann, weshalb seine Oberfläche so groß wie möglich sein muss. Zu diesem Zweck wurden Versteifungsrippen und Lüftungs- bzw. Erleichterungsbohrungen eingesetzt.

Nach Fertigstellung des ersten Grobentwurfs muss dieser fertigungstechnisch durchdacht werden und alle Verbindungsstellen müssen ausgelegt werden. Dabei können Schraubverbindungen, Pressverbindungen sowie form- oder stoffschlüssige Verbindungen zum Einsatz kommen. Zur besseren Dokumentation und sicheren Durchführung wurden Berechnungsskripte in Excel und Mathcad erstellt. Die Montierbarkeit und ggf. die Demontierbarkeit der Maschine müssen sichergestellt sein.

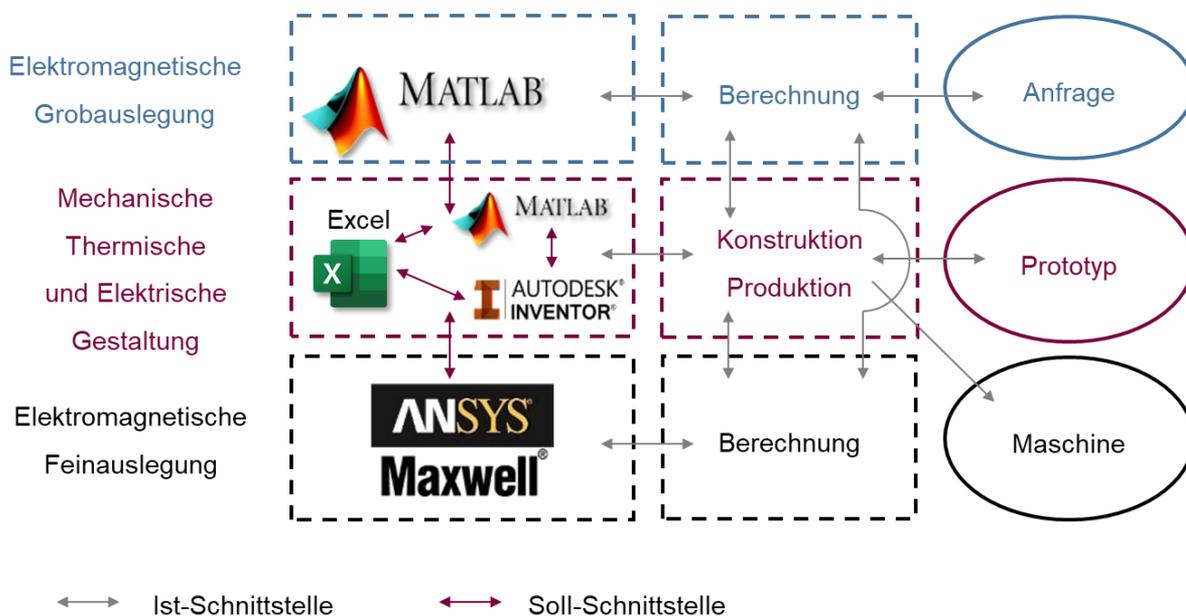


Abbildung 25: Ebenen des Entwicklungsprozesses mit Schnittstellen

Anschließend kann die Struktur per FE-Methode auf Stabilität geprüft werden. Ein weiteres wesentliches Ergebnis dieser Untersuchung ist die Änderung des Luftspalts zwischen Stator und Rotor: Eine möglichst kleine Veränderung des Luftspalts unter Last ist erstrebenswert, da eine Berührung des Rotors mit dem Stator einer Zerstörung der Maschine gleichkommt. Ist die Luftspaltänderung ausreichend gering und sind alle Bauteile ausreichend stabil, ist die Konstruktion abgeschlossen und es erfolgt die Nachrechnung der Geometrie der aktiven Maschinenteile in ANSYS Maxwell. Entsprechen die Ergebnisse den angestrebten Parametern, kann die Konstruktion zur Fertigung freigegeben werden. Dazu müssen die Fertigungsunterlagen erstellt werden, die Fertigung muss geplant und eingetaktet und alle Zukaufteile müssen bestellt werden. Für die Fertigung der Wicklung werden Werkzeuge benötigt, die ebenfalls entwickelt, gefertigt und ggf. angepasst werden müssen.

Aus der Abbildung 25 wird deutlich, dass sich jeweils eine Mensch-Mensch-Schnittstelle zwischen den einzelnen Entwicklungsebenen befindet. Dies begünstigt das Auftreten trivialer Fehler und erhöht die Durchlaufzeit des Prozesses. In dieser Arbeit wird die mittlere Ebene genauer betrachtet. Hier geht es um die Berechnungswerkzeuge und deren Datenmanagement sowie den Prototypenbau. Außerdem ist eine funktionale Betrachtung des Prozesses sinnvoll. Im Hinblick auf die verwendete Software ergibt sich folgendes Schema:

Tabelle 7: Einordnungsmatrix der Software des Entwicklungsprozesses

| Einordnung |                 |            | Software                           |                  |                           |
|------------|-----------------|------------|------------------------------------|------------------|---------------------------|
| Dimension  | Verfahren       | Funktion   | Mechanik                           | Elektrik         | Thermik                   |
| 0D         | Verwaltung      | PDM / ERP  | Vault / SAP / proALPHA / Windchill |                  |                           |
| 1D         | Grobgestaltung  | Analytik   | Mathcad / Maple / MATLAB / Excel   |                  |                           |
| 2D         | Feingestaltung  | Simulation | BEARINX                            | MATLAB           |                           |
| 3D         |                 | CAD        | Autodesk Inventor / TARGET 3001!   |                  |                           |
|            | Strukturanalyse | FEM        | ANSYS<br>Mechanical                | ANSYS<br>Maxwell | ANSYS<br>Thermal Analysis |

In dieser Tabelle sind alle verwendeten Programme und sinnvolle Ergänzungen (grau) aufgeführt. Dabei wird der Stand dokumentiert, der in diesem Kapitel beschrieben wurde und der die Ausgangslage für die Arbeit darstellt. Die Ausgangslage ist dadurch gekennzeichnet, dass zwischen den einzelnen Anwendungen keine Verknüpfungen vorhanden waren. Die Analytik- und die Simulationsebene der mechanischen Grobauslegung und das Datenmanagement waren nicht ausgeprägt. Für die Lagerberechnung wurde ein Auslegungsskript in Mathcad verwendet. Die 0D-Ebene ist auch nicht vorhanden, soll aber auch nicht implementiert werden. Der Vorteil einer solchen Ebene kann nur in einer Unternehmensstruktur wirksam werden.

## 4.2 Anforderungen an den Prozess

Ziel ist es, ebenenübergreifende Softwareschnittstellen (API, engl. *application programming interface*, wörtlich ‚Anwendungs-programmier-schnittstelle‘) zu nutzen und Verknüpfungen zu schaffen. Dazu müssen die Ebenen standardisiert werden, um sie kompatibel zu machen, was unter Berücksichtigung der drei Punkte nach Morgan und Liker (siehe Kapitel 3.1.2) geschieht. Ebenso müssen die Modellierung und die Berechnung standardisiert werden, was sich hier auf die Benennung der relevanten Berechnungsgrößen und deren Einheiten bezieht.

Die Verknüpfung der elektromechanischen Grobauslegung und der Konstruktion ermöglicht die anfragebedingte Echtzeitanpassung der aktiven Teile im CAD-Modell. So könnte einem potenziellen Kunden kurzfristig ein CAD-Grobentwurf der Maschine präsentiert werden. Im Gegenzug kann bei konstruktiv bedingten Materialänderungen der aktiven Teile die Änderung in der Maschinenauslegung (Wirkungsgrad/Leistung) angezeigt werden, was eine Target-Costing-Vorgehensweise ermöglicht. Dies steht jedoch im Widerspruch zur Feinauslegungsebene, da diese auch auf den Datensatz zugreifen würde. Eine Lösung ist die Verwendung von mehreren lokalen Datensätzen, die nur zu gewissen Zeitpunkten und unter Abstimmung der jeweiligen Personen synchronisiert werden – oder es werden mehrere Versionen von Datensätzen je Maschine und Entwicklungsstand verwendet. Dies erfordert ein umfassendes Versionsmanagement und bedeutet daher einen hohen Zusatzaufwand. Bei der Verwendung eines Datensatzes müssen Zugriffsrechte und Prioritäten definiert werden. Gleiches gilt für die Verknüpfung von Produktion und Konstruktion. Dies wird üblicherweise über einen Schreibschutz, der zur Fertigung freigegebenen Daten realisiert.

Damit wird deutlich, dass bei der Realisierung der ebenenübergreifenden Schnittstellen ein DBMS unabdingbar ist. Da die Implementierung zu aufwendig gewesen wäre, werden im Folgenden die Schnittstellen und die Software innerhalb des Konstruktionsprozesses betrachtet. Dabei sollen im Speziellen die Funktionsebenen der Mechanik verbunden werden. Das Ziel ist es, eine optimale Auslegung und Konstruktion zu finden. Die Zielgrößen dieser optimalen Auslegung variieren nach Anwendungsfall zwischen maximalem Drehmoment oder Wirkungsgrad oder minimalen Kosten oder Gewicht oder einer Kombination aus Zielgrößen. Bei mehreren Zielgrößen muss immer eine Gewichtung der einzelnen Größen erfolgen. Des Weiteren sollten die CAD-Ebene und die Analytik-Ebene mit einer einheitlichen Software für alle Anwendungsbereiche ausgestattet sein.

### **4.3 Lösungsvarianten**

Werden alle Anforderungen und die bereits vorgestellten Lösungsansätze sowie die vorhandene und vorgestellte Software berücksichtigt, ergeben sich eine Reihe von sinnvollen Kombinationen. Es wurden vier Lösungsvarianten gebildet. Die Variante 1 ist blau dargestellt und stellt eine Kombination aus Inventor, MATLAB und Excel dar. Diese Anwendungen werden derzeit im Entwicklungsprozess eingesetzt. Als PDM-System in dieser Kombination wäre auch Autodesk Vault sinnvoll. Bei der Einführung des PDM-Systems Vault wird ein Kompromiss eingegangen, da Autodesk mit seinen CAX-Anwendungen mehrere Anforderungen abdecken kann. Generell ist der Trend erkennbar, immer mehr Auslegungsfunktionen der Analytikenebene im CAD zu integrieren, womit kein Datenaustausch zwischen Inventor und Vault mehr notwendig ist. Für diesen Anwendungsfall erweist sich das jedoch als ungünstig, da die Designfeatures auch für andere Berechnungen zur Verfügung stehen sollen.

Tabelle 8: Morphologischer Kasten der Software der Mechanik

| Funktion |     | Lösungsvariante |          |                         |            |        |                    |                    |
|----------|-----|-----------------|----------|-------------------------|------------|--------|--------------------|--------------------|
|          |     | 1               | 2        | 3                       | 4          | 5      | 6                  | 7                  |
| Mechanik | A/S | Excel           | Maple    | MATLAB                  | GNU Octave | Scilab | Mathcad            |                    |
|          | CAD | AutoCAD         | Catia    | Creo                    | Inventor   | NX     | Solid Edge         | SOLIDWORKS         |
|          | FEM | ANSYS           | OpenFOAM | Creo Simulate Extension | Inventor   | Femap  | SE Simulation      | Simulation Premium |
|          | PDM | Excel           | PRO.FILE | Windchill               | Vault      | Speedy | Gain Collaboration |                    |

In Variante 2, hier grün dargestellt, wurden Creo, OpenFOAM, GNU Octave und Windchill betrachtet. GNU Octave und OpenFOAM sind frei erhältlich und bieten eine Vielzahl unterschiedlicher Toolboxes. Creo und Windchill stammen von einem Anbieter und sind deshalb gut kompatibel. Die zweite Variante kann als eine praktikable Alternative zur Variante 1 betrachtet werden.

Die rot hinterlegte Variante 3 stellt eine Kombination aus Catia, Scilab und PRO.FILE dar. Die Leistungsfähigkeit dieser CAx-Anwendungen ist unbestritten, weshalb sie die im aktuellen Entwicklungsprozess eingesetzten Anwendungen problemlos ersetzen können.

Die letzte betrachtete Möglichkeit wäre das Zusammenspiel aus SolidWorks, Mathcad und Speedy. Diese Variante ist gelb markiert und bietet mit ihrem riesigen Funktionsumfang ein großes Potenzial zur Realisierung des Konstruktionsprozesses.

#### 4.4 Vorzugsvariante

Variante 1 dient als ‚Benchmark‘. Da diese Software am Lehrstuhl verfügbar war, wurde das Werkzeug auch mit dieser Software aufgebaut. In einer studentischen Arbeit konnte gezeigt werden, dass aber gerade Variante zwei eine kostengünstige und praktikable Alternative darstellt [76]. Für eine Neugestaltung eines Konstruktionsprozesses ist Variante zwei daher als Vorzugsvariante zu betrachten. Es wurde eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt, ob es sinnvoll ist, das Werkzeug mit einem PDM-System zu verbinden. Der Aufwand wurde als sehr hoch eingeschätzt, weshalb die Daten zunächst in Excel gesammelt und verwaltet werden.

Dennoch konnte das Potenzial der anderen Varianten mit PDM-System aufgezeigt und abgewogen werden. Es wurde deutlich, dass es mit der vorhandenen Software möglich ist, ein adaptives Konstruktionswerkzeug aufzubauen.

Für den Konstruktionsprozess ist abhängig vom Komplexitätsgrad der Aufgabe und der Zielstellung sowie von den Gegebenheiten in der Organisationseinheit abzuwägen, welche Kriterien des Prozesses stärker gewichtet werden. So kann es zum Beispiel bei einer weniger komplexen Aufgabenstellung möglich sein, dass die Verwendung von Open-Source-Software günstiger ist, da sie alle nötigen Funktionalitäten abdeckt und dabei keine Kosten verursacht. Dann sollte aber sichergestellt werden, dass die nötigen Modelle immer auf der aktuellen Version laufen oder die passende Softwareversion je Modell vermerkt oder sogar separat auf den Servern des Unternehmens abgespeichert wird.

#### **4.5 Grobgestaltung**

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Verknüpfung und Vereinheitlichung der im Rahmen des Konstruktionsprozesses verwendeten Software erfolgt sind. Dabei wurden alle Parameter in einem Parametersatz an einem Ort gesammelt und stehen somit konsistent für alle Berechnungen und für die CAD-Modellierung zur Verfügung. Daraus kann ein Grobmodell der Maschine erstellt werden.

Als Programm für das Sammeln der Daten und Ergebnisse wurde Microsoft Excel verwendet, was eine spätere Migration zu Access erleichtert. Außerdem ist diese Software weit verbreitet, was einer universellen Anwendung zugutekommt. Es wurden zwei Parameterklassen verwendet, funktionale und Steuerungsparameter. Die funktionalen Parameter gliedern sich in elektrische, geometrisch/thermische sowie kinematische Parameter auf, wobei diese jeweils in Design- und Berechnungsparameter unterschieden werden. Designparameter sind dabei die Parameter, die die physische Ausprägung der Maschine beschreiben.

Auf dem ersten Tabellenblatt (Spreadsheet) werden alle Designparameter abgelegt. Dieses Blatt ist ausgeblendet, da es für den Benutzer keine Bedeutung hat. Aus diesem Tabellenblatt werden die Parameter von Autodesk Inventor und MATLAB abgerufen. Die Blätter 2 bis 4 enthalten die Eingabemasken für die jeweiligen funktionalen Parameterklassen sowie in einigen Fällen außerdem VBA-Skripte zur automatischen Berücksichtigung von Normen. Die Skripte werden bei Änderungen in den Masken automatisch ausgeführt. Das fünfte Blatt ist als gekoppeltes Maschinendatenblatt erstellt. Auf A4-Format ausgedruckt enthält es alle für den Anwender wichtigen Maschineninformationen, basierend auf dem aktuellen Stand des hinterlegten Motorgrobmodells. Die weiteren Blätter enthalten Konstruktionsdaten wie Wertetabellen und Normreihen.

Die geometrische Feinmodellierung geschieht in Autodesk Inventor. Dabei wurde die Funktion für das Einlesen von Parametern aus Excel benutzt. Die Lagerberechnung erfolgt analytisch

in Excel und kann dann mit ‚BEARINX-online Easy Friction‘ nachgerechnet werden. ‚Easy Friction‘ ist browserbasiert und kann deshalb nicht auf den Parametersatz zugreifen. Für die thermische Analyse wurde ein 1-D-Widerstandsmodell mit Quellen, Senken und Massen in MATLAB Simulink aufgebaut und verknüpft.

#### 4.5.1 Modellierung der aktiven Teile

Die Modellierung beginnt mit der Definition der Parameterbeziehungen der aktiven Teile. Die wichtigsten Eigenschaften einer elektrischen Maschine ist das Verhalten von Spannung und Strom bezüglich des Drehmoments und der Drehzahl. Diese Größen sind über die Wandlungskonstante verknüpft (Gl. 2.18 in Gl. 2.6):

$$U_{iN} = (r_{m\_ph} \cdot t \cdot p \cdot \bar{B} \cdot n_W \cdot n_S) \cdot \omega - R \cdot I_{in} \quad \text{Gl. 4.1}$$

Da hier ein Generator modelliert wird, sind Drehmoment und Drehzahl von dem Anwendungsfall her definiert. Der Nennbetriebspunkt wird analytisch anhand der Gleichungen aus Kapitel 2 berechnet. Alle anderen Maschinenparameter müssen so definiert werden, dass der gewünschte Nennbetriebspunkt erreicht wird. Der Startparameter ist der Innendurchmesser des Eisenrückschlusses ( $r_{i\_fe}$ ). Dort werden die Magneten von innen befestigt, wobei dieses Maß den Aufbau der gesamten Maschine bestimmt.

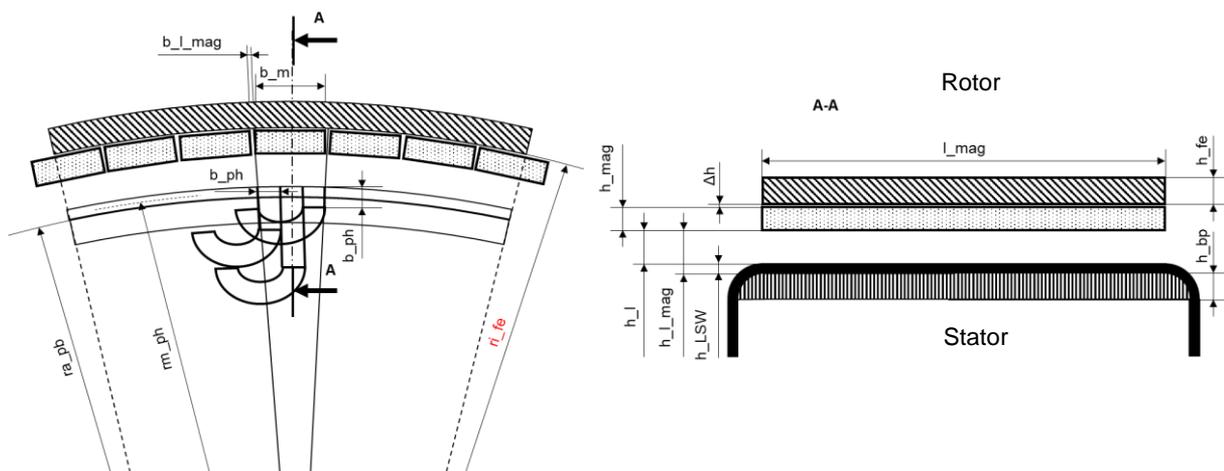


Abbildung 26: Parametrierung der aktiven Teile im Querschnitt und Längsschnitt

Von dort ausgehend werden die aktiven Teile und der Stator nach innen ausgelegt und nach außen der Rotor und die Deckel. Meist wird das Maß so gewählt, dass der vorhandene Bau- raum maximal ausgefüllt wird. Denn je größer der Hebelarm für die elektromechanische Wandlung ist, desto günstiger wird das Verhältnis von Volumen zu Leistung. Die Auslegung geschieht in der Mitte eines Magneten, da dort der kleinste Luftspalt zwischen Stator und Rotor auftritt (siehe Schnitt A-A in Abbildung 26). Dieser soll so klein wie möglich sein, dennoch muss die sichere Funktion der Maschine in jedem möglichen Betriebszustand gewährleistet

bleiben. Je feiner der Luftspalt eingestellt werden soll, desto genauer müssen alle Maschinenteile toleriert werden. Der Luftspalt ist hier das Schließmaß. Deshalb muss jedes Einzelmaß berücksichtigt werden, um ihn einzustellen. Der Zusammenhang zwischen den Einzelmaßen und dem Schließmaß wird Toleranzkette genannt [77]. Aus diesem Grund ist es wichtig, bereits früh in der Planungsphase die Toleranzen zu berücksichtigen. Dazu wurden verschiedene Methoden von S. von Praun vorgestellt [78]. Durch Simulation und Tests hat sich gezeigt, dass ein Luftspalt ( $h_l$ ) von 0,5 mm in vielen Anwendungsfällen eine gute Lösung darstellt. Mit der Breite der Magneten ( $b_{mag}$ ) und dem Radius ( $r_{i_{fe}}$ ) ergibt sich der Wert  $\Delta h$ . Dieser beschreibt den Abstand zwischen den rechteckigen Magneten und dem gekrümmten Eisenrückschluss. Bei der Montage der Magneten wird dort der Klebstoff appliziert. Mit der Höhe der Magneten ( $h_{mag}$ ) und der Höhe des Blechpakets ( $h_{bp}$ ) sowie der Größe des magnetischen Luftspalts ( $h_{l_{mag}}$ ) nach Gleichung 2.19 und 2.20 ergibt sich folgende Formel für den Außendurchmesser des Stators:

$$r_{a_{st}} = r_{i_{fe}} - \Delta h - h_{mag} - h_{l_{mag}} - h_{bp} \quad \text{Gl. 4.2}$$

Mit der Länge der Magneten ( $l_{mag}$ ) wird die Tiefe der Maschine bestimmt. Zur Wahl der Polpaarzahl wird die Breite des Spalts zwischen den Magneten ( $b_s$ ) benötigt.

$$p = \frac{r_{i_{fe}} \cdot 2 \pi}{b_{mag} + b_s} \quad \text{Gl. 4.3}$$

Die Polpaarzahl muss ein gerader und ganzzahliger Wert sein. Soll eine bestimmte Polpaarzahl realisiert werden, kann dies durch die Abstimmung der beiden Parameter  $r_{i_{fe}}$  und  $b_{mag}$  geschehen. In Simulationen wurde ermittelt, dass der Wert  $b_s$  zwischen 0,5 und 0,6 mm liegen sollte, soll ein hoher Wirkungsgrad bei geringer Masse erzielt werden.

Dann folgt die Definition der Parameter der Luftspaltwicklung. Dazu zählen die Höhe der verwendeten Bandage, die Höhe des Kupferlackdrahtes inklusive Isolationslack, die Anzahl der einzelnen Leiter pro Strang und die Höhe der Klebefolie. Diese Folie besteht aus einer Isolationschicht in der Mitte und zwei Klebstoffschichten außen. Die untere Klebstoffschicht hält die Folie am Stator fest und die obere trägt die Luftspaltwicklung. Unterhalb der Folie liegt das Blechpaket mit dem Außendurchmesser ( $r_{a_{bp}}$ ). Bei der Kombinationswicklung kommen noch die Parameter hinzu, die die Nut beschreiben. Es muss nur die Tiefe der Nut unterhalb von  $r_{a_{bp}}$  definiert werden. Die anderen Werte leiten sich aus der Geometrie des gewünschten Leiterquerschnitts und dessen Isolation ab. Die Höhe und die Breite des Drahtes sowie von dessen Isolation und die Dicke des Papiers sind die Eingabegrößen.

Die Art der elektrischen Verschaltung der Leiter innerhalb einer Phase wurde auch in der Maske berücksichtigt. Dabei kann entschieden werden, ob die Drähte pro Strang in Reihe oder parallel geschaltet werden sollen und ob es mehrere Schichten gibt.

Da nun alle Parameterbeziehungen abgebildet sind, ist es möglich, über den integrierten Solver die Drahtgeometrie ( $h_{cu}$ ) bezüglich des Wirkungsgrades zu optimieren. Ein weiteres notwendiges Maß ist der Luftspalt zwischen den Phasensträngen ( $b_{l,ph}$ ). Dieser wird von der Fertigungstoleranz der Wicklung bestimmt, die wiederum von der Qualität des Wickelprozesses, also von der verwendeten Wickelmaschine abhängig ist (siehe Kapitel 2.2.4). Der Füllfaktor der Wicklung richtet sich danach, wie dicht die Kupferdrähte gepackt werden können. Aus den genannten Parametern werden erforderliche Größen für die Auslegung der Maschine berechnet und angezeigt:

- minimale Luftspalthöhe (Erwärmungsrechnung und Kinematikbetrachtung)
- Füllfaktor der Wicklung
- Masse und die Verlustleistung der aktiven Motorteile

Ein besonderes Feature ist die Berücksichtigung der Option ‚gebaute Pole‘, bei der ein magnetischer Pol aus mehreren Magneten der gleichen Polarisierung zusammengesetzt wird. Dies wird dann von Bedeutung, wenn der Wert  $\Delta h$  zu groß wird, was bei Maschinen mit geringer Polpaarzahl oder kleinem Durchmesser der Fall ist.

#### 4.5.2 Modellierung der passiven Teile

Die Modellierung der aktiven Teile bildet die Grundlage für die geometrische Modellierung der passiven Teile. Zuerst wurde ein vereinfachter Grundentwurf der Maschine gewählt (siehe Abbildung 27), der in Excel umgesetzt wird. Dieser einfache Entwurf stellt für viele Anwendungsfälle eine geeignete Lösung dar und ist damit vielseitig einsetzbar. Das Grundprinzip der Konstruktionstechnik, einfache, eindeutige und sichere Lösungen anzustreben, ist damit berücksichtigt [3].

Die mechanische Auslegung teilt sich in vier Pfade (siehe Abbildung 27): den Auslegungspfad des Rotors (blau) und den Auslegungspfad des Stators (rot) sowie dem Pfad der Statorwelle (grün) und dem Wellenflansch (gelb). Der Statorpfad startet beim Innenradius des Blechpakets ( $r_{i,bp}$ ). Der Außendurchmesser des Stators ( $r_{a,st}$ ) entspricht dem Innendurchmesser des Blechpakets. Der Pfad des Rotors startet beim Radius  $r_{i,fe}$ . Alle Pfade sind über die kinematische Auslegung der Kugellager miteinander verbunden. Entlang der einzelnen Pfade sind auch die Toleranzen zu berücksichtigen. Es handelt sich um Toleranzketten. Zuerst wird der gelbe Pfad des Wellenflansches beschrieben. Er überträgt an der A-Seite der Maschine das Drehmoment auf den Rotor. Die Wellenausführung ist hier am geläufigsten, auch wenn die Flanschausführung vorteilhaft wäre, da der Wellenflansch entfallen könnte und die Lagerschale direkt mit Flansch ausgeführt werden könnte. Positiv ist, dass der Wellenflansch austauschbar ist und der Entwurf somit leicht an unterschiedliche Nabengrößen angepasst werden kann. Allerdings ist die Flanschgröße von der Größe der Lagerschalen bzw. des Innendurchmessers des zwei-

ten Deckels ( $D_{i\_dll}$ ) abhängig. Gibt es keine äußeren Randbedingungen, können die Abmessungen der Welle ( $D_{a\_wan}$ ,  $l_{wan}$ ) der Norm DIN 748-1 entnommen werden [79]. Außerdem muss die Stärke des Deckels ( $h_{dan}$ ) definiert werden.

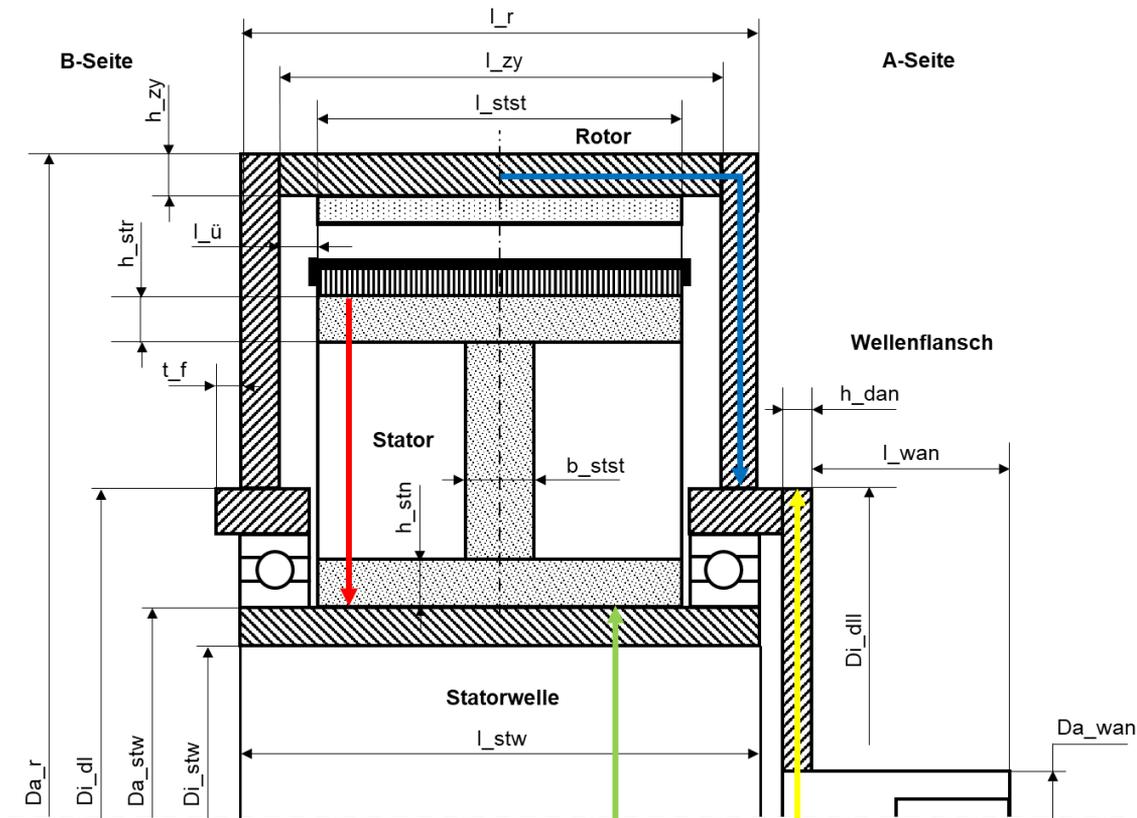


Abbildung 27: Generatorentwurf und vereinfachte geometrische Parametrierung

Als Zweites wird der grüne Auslegungspfad der Statorwelle beschrieben. Die Statorwelle (Index: *stw*) dient als tragendes Element der Maschine. An der B-Seite der Maschine kann die Welle nach außen so verlängert werden, dass sie in einer Haltenabe befestigt werden kann. Eine Flanschausführung wäre ebenfalls denkbar. Die Länge der Welle ist abhängig von der Rotorlänge. Bei der Feingestaltung im CAD können konstruktive Rahmenbedingungen jedoch für Unterschiede sorgen. Die Statorwelle ist als Hohlwelle ausgeführt. Die Leistungs- und Signalleitungen werden durch diese Welle in die Maschine geführt. Dabei wird der Bohrungsdurchmesser ( $D_{i\_stw}$ ) anhand der Stärke der Zuleitungskabel bestimmt, die wiederum laut VDE je Stromstärke festgelegt ist [80]. Die Stromstärke wird den elektrischen Parametern entnommen. Der Außendurchmesser ( $D_{a\_stw}$ ) der Welle wird mithilfe eines VBA-Skriptes so ausgelegt, dass die Welle über dieselbe Torsionssteifigkeit wie die Antriebswelle verfügt. Der dafür nötige Außendurchmesser wird neben dem Eingabefeld als Richtwert angezeigt. Dabei wird es dem Bediener überlassen, den Wert zu wählen, falls andere Randbedingungen beachtet werden müssen. Auch für die Bohrung in der Hohlwelle kommt eine VBA-Auswahlhilfe zum Einsatz, die den Minimalplatzbedarf der Kabel anzeigt. Oft ist es sinnvoll, die Bohrung etwas über das

geometrische Minimum hinaus zu vergrößern, um die Verkabelung zu erleichtern. Dann wird angezeigt, um wie viel der Außendurchmesser der Welle vergrößert werden müsste, um die gleiche Torsionssteifigkeit zu erreichen. Nach Anpassung der Parameter kann die Auswirkung auf das Gewicht der Gesamtstruktur bewertet werden. Solche Parametervariationen können mit dem Werkzeug in wenigen Minuten realisiert werden.

Nun wird der Pfad des Rotors erläutert. Die Gesamtlänge des Rotors ( $l_r$ ) setzt sich aus der Länge des Statorstegs ( $l_{stst}$ ) und dessen seitlicher Luft zum Deckel sowie der Stärke der Deckel zusammen.

$$l_r = l_{stst} + 2 l_{\ddot{u}} + 2 h_d, \text{ mit } l_{stst} = l_{mag} + 2 r_{min} \quad \text{Gl. 4.4}$$

Der Abstand  $l_{\ddot{u}}$  muss so gewählt werden, dass genügend Platz für die Wickelköpfe vorhanden ist und diese nicht die rotierenden Deckel berühren. Der Wert  $r_{min}$  sollte immer genauso groß oder etwas größer als der Mindestbiegeradius der Drähte sein und ist dem Datenblatt des Wickeldrahtes der Luftspaltwicklung zu entnehmen. Er entspricht meist dem Drei- bis Vierfachen der Höhe des Drahtes ( $h_{cu}$ ). Die Stärke der Deckel ( $h_d$ ) wird nach Erfahrungswerten ausgewählt bzw. geschätzt und später nachgerechnet. Für den Außendurchmesser der Maschine ( $D_{a,r}$ ) gilt:

$$D_{a,r} = r_{i,fe} + h_{zy}, \text{ mit } h_{zy} \geq h_{fe} \quad \text{Gl. 4.5}$$

Dies bedeutet, dass das Zylinderrohr des Rotors mindestens so stark sein muss wie laut elektromagnetischer Auslegung vorgesehen, aber stärker ausgeführt werden kann, sollte das konstruktiv nötig sein. Dies kann zum Beispiel der Fall sein, wenn große Kräfte auftreten, die über den Rotor geleitet werden müssen. Mit der Stärke der Lagerschale des Deckels ( $h_f$ ) und den Daten des Lagers lassen sich die Deckel gestalten. Außerdem wird der Überstand der Lagerschalen ( $t_f$ ) benötigt. Zum Schluss müssen das Material der Magneten und des Zylinders sowie der Deckel gewählt werden.

Nun kann der Stator ausgelegt werden. Dieser besteht aus dem Statorring und der Statornabe sowie dem Statorsteg, der beide verbindet. Als Erstes wird die Stärke des Statorrings ( $h_{str}$ ) definiert. Damit ergibt sich der Außendurchmesser des Statorstegs. Der Innendurchmesser des Statorstegs wird anhand der Stärke der Statornabe ( $h_{stn}$ ) und des Außendurchmessers der Statorwelle bestimmt. Mit der Definition der Breite des Statorstegs ( $b_{stst}$ ) ist die Grobparametrierung des Stators abgeschlossen, sodass noch die Materialien zugewiesen werden müssen. Schließlich kann eine auf dem Grobmodell basierende Gesamtmasse des Systems an-



Lage der Rotationsachse des Rotors zum Stator. Hierbei müssen stets die Maße im eingebauten Zustand betrachtet werden. Die Maßhaltigkeit des Bauteils vor dem Einbau stellt ein notwendiges, aber nicht ausreichendes Kriterium für die Maßhaltigkeit der Maschine im Zusammenbau dar. Daraus folgt, dass eine Exzentrizität oder ein Rundlauffehler auftritt. Dann entsteht eine Magnetkraft ( $F_{\text{mag}}$ ), die in Richtung der Exzentrizität wirkt, da die Magnetkräfte mit kleiner werdendem Abstand zunehmen, wohingegen die Gegenkraft auf der gegenüberliegenden Seite abnimmt. Ist der Zusammenhang zwischen Luftspalt und Magnetkraft im Anwendungsbereich bekannt, lässt sich dann über die Subtraktion zweier Flächenintegrale die Kraft bestimmen. Diese kann entweder statorfest sein, liegt ein statischer Achsversatz vor oder rotorfest mitrotieren, wenn ein Rundlauffehler vorliegt. Die Haftkraft von Magneten beschreibt die Zugkraft, die ein Magnet auf ein ferromagnetisches Objekt ausübt, wenn kein Luftspalt zwischen den beiden Körpern vorhanden ist.

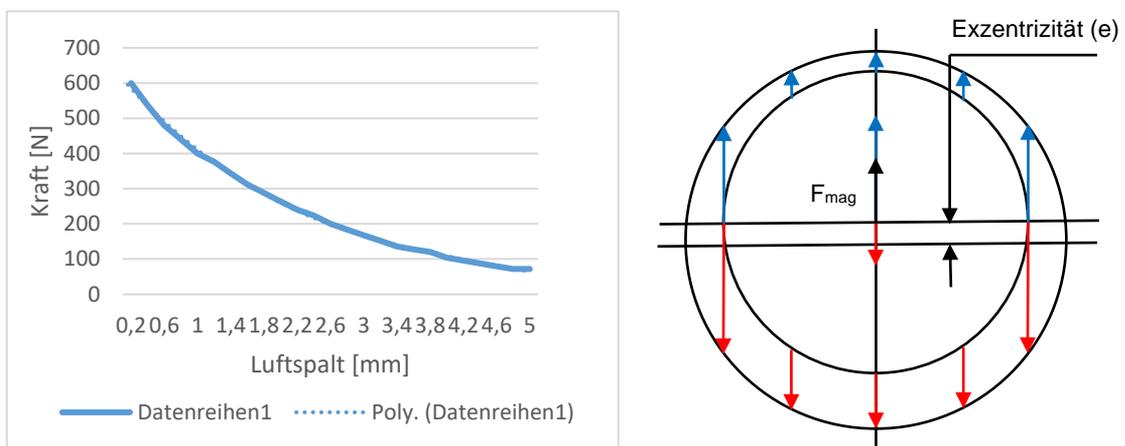


Abbildung 29: Messung der Magnetkräfte und Modell der Exzentrizität

Wie in der Abbildung 29 dargestellt, wird die Magnetkraft, je weiter dieser von seinem ferromagnetischen Gegenpart entfernt wird, exponentiell geringer. Das bedeutet, wenn die Exzentrizität ansteigt, steigt auch  $F_{\text{mag}}$  exponentiell an. Wird die Kraft so groß, dass durch die Verformung des Rotors der Luftspalt an einer Stelle nicht mehr vorhanden ist, kann die Wicklung im Betrieb zerstört werden. Geschieht dies im Stillstand der Maschine, haftet der Rotor fest am Stator und die Maschine lässt sich nicht starten. Bei der Berechnung muss die größere Kraft, die am kleineren Luftspalt (blau) entsteht, um die kleinere Gegenkraft (rot) reduziert werden, die der ersten Kraft auf der anderen Seite entgegenwirkt. Wenn alle Kräfte bestimmt sind, können die Lager ausgelegt werden. Der Lagerabstand und der Mindestdurchmesser der Welle werden der mechanischen Modellierung entnommen. Wird ein Standardlager nach einem Katalog ausgewählt, kann direkt die vereinfachte Lebensdauerformel angewendet und mit der angestrebten Lebensdauer verglichen werden. Des Weiteren findet eine Abschätzung der Lagerreibung nach Stribeck statt [8]. Um eine genauere Aussage treffen zu können, müssen die Werte der Statorwelle und die berechneten Kräfte sowie die Betriebsbedingungen in

‚easy Friction‘ übertragen werden. Startpunkt sollte immer ein einfaches Kugellager sein. Erst wenn dieses in seinen Eigenschaften nicht mehr für den Anwendungsfall ausreichend ist, muss die Verwendung eines Speziallagers (z. B. Schrägkugellager, Vierpunktlager oder Kegelrollenlager) geprüft werden. Ein anderer Ansatz ist die Entkopplung des Rotors von der Kraftleitung [86]. Dies bedeutet einen zusätzlichen konstruktiven Aufwand und führt zu einem komplexeren Aufbau der Maschine. Ob die Vorteile gegenüber einer Standardlösung überwiegen, muss je nach Anwendungsfall geprüft werden.

#### 4.5.4 Modellierung des thermischen Verhaltens

Für die thermische Modellierung wird mithilfe der Simscape-Bibliothek ein 1-D-Widerstandsmodell in MATLAB Simulink aufgebaut. Dazu wurde bereits ein Beispiel von der Firma MathWorks zur Verfügung gestellt:

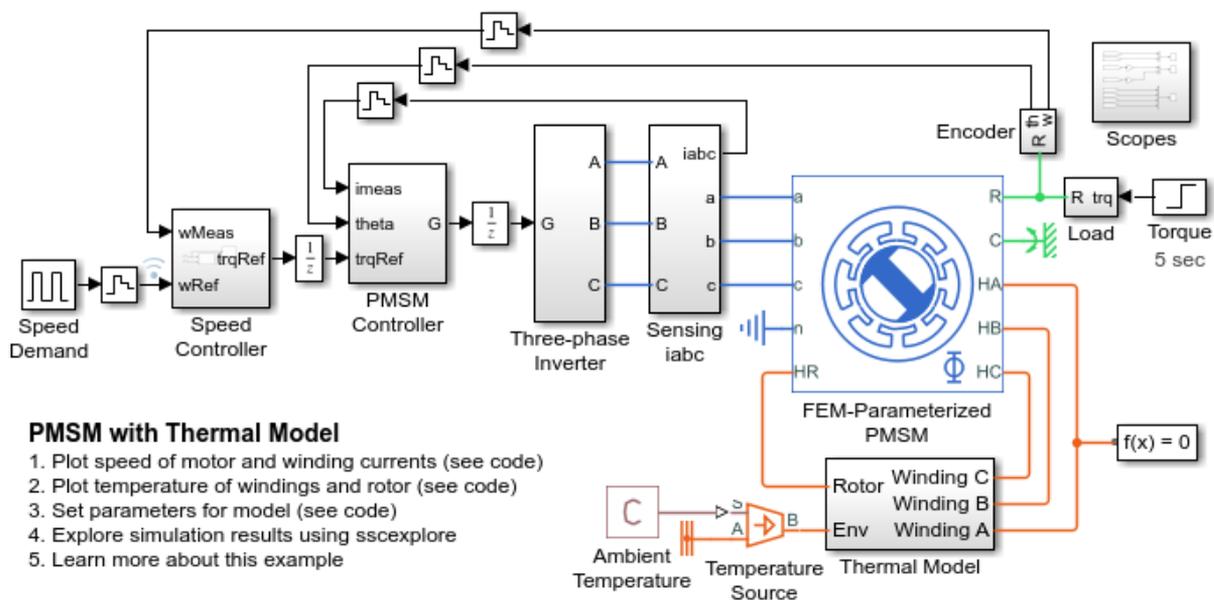


Abbildung 30: Permanent erregter Synchronmotor mit thermischem Modell in Simulink<sup>38</sup>

In diesem Modell ist das Verhalten einer permanent erregten Synchronmaschine und deren thermisches Verhalten abgebildet. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der thermischen Modellierung (siehe Abbildung 30, orange). Im Speziellen kann die Struktur des thermischen Modells mit verschiedenen Schaltblöcken realisiert werden.

Wichtige Blöcke sind zum Beispiel: Convection, Radiative Heat Transfer und Thermal Mass. Diese Blöcke werden so verschaltet, dass die Hauptwärmeströme abgebildet werden. Wärmequelle ist die Wicklung. Von dort aus muss die Wärme zur Umgebung hin abgeführt wer-

<sup>38</sup> <https://de.mathworks.com/help/phymod/sps/examples/pmsm-with-thermal-model.html> Stand: 2020-11

den. Bei der Wasserkühlung ist, wie oben bereits erläutert, der Wärmedurchgang zu den Kühlkanälen entscheidend. Die anderen Wärmeströme können vernachlässigt werden. Bei der Luftkühlung müssen verschiedene Hauptwärmeströme berücksichtigt werden.

Ein wichtiger Wärmestrom fließt über den Stator und dessen Rippen durch die Innenraumluft zum Deckel und dann zur Umgebung. Ein anderer passiert den Luftspalt, um in den Rotor und dann zur Umgebung zu gelangen.

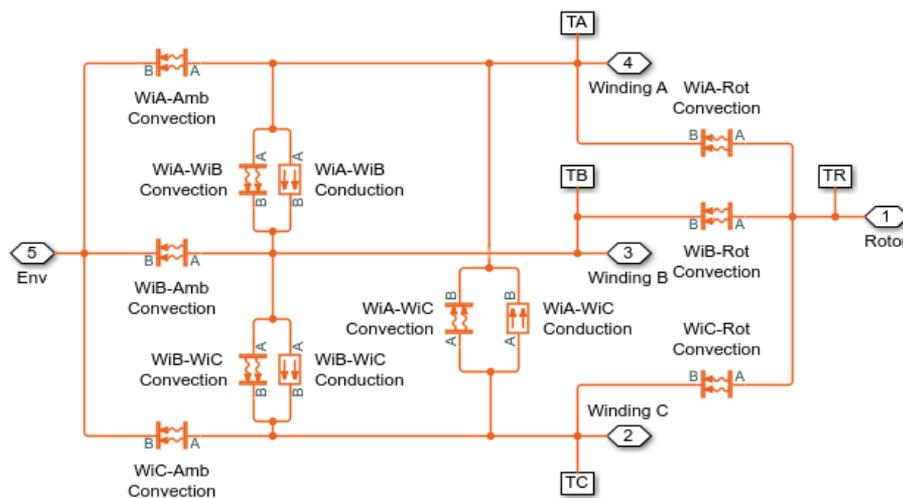


Abbildung 31: Subsystem thermisches Modell<sup>38</sup>

Der letzte relevante Wärmestrom fließt vom Stator in die Welle und dann über die Befestigungs- und Antriebsseite zur Umgebung. Wichtige Einflussgrößen für die Wärmeentstehung sind der elektrische Widerstand ( $R$ ) der Wicklung und der Strom ( $I$ ), der durch die Wicklungen fließt. Für die Verlustleistung ( $P_V$ ) gilt folgende Formel:

$$P_V = R \cdot I^2 \quad \text{Gl. 4.6}$$

Wird eine Sternschaltung vorgenommen und der Widerstand einer Phase ( $R_{ph}$ ) verwendet und werden der Verkettungsfaktor und die Sinusform des Stroms berücksichtigt, ergibt sich folgende Formel für die ohmsche Gesamtverlustleistung ( $P_{V,ohm}$ ) in Bezug auf den gleich gerichteten Nennstrom:

$$P_{V,ohm} = 3 R_{ph}(T) \cdot \left( \frac{I_{nenn}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right)^2 \quad \text{Gl. 4.7}$$

Das Verhalten der anderen elektromechanischen Verlustanteile wurde durch eine Regressionsanalyse in Excel annähernd ermittelt. Dazu wurden die ersten Ergebnisse der Feinauslegung aus ANSYS verwendet. Eine analytische Modellierung anhand der Gleichungen 2.11 und 2.12 wäre ebenfalls möglich. Die Verlustleistung wird dabei gleichmäßig am Umfang ver-

teilt aufgebracht. Das verwendete thermische Modell ist jedoch deutlich komplexer als in Abbildung 31 dargestellt, da bei der Erstellung alle Besonderheiten einer elektrischen Maschine mit Luftspaltwicklung berücksichtigt wurden. Dies wird hier nicht erläutert, da der Aufbau des Modells dem Aufbau des mechanischen Grobmodells in Excel entspricht. Im Initialisierungsskript lädt das MATLAB-Modell alle aktuellen Parameter aus dem Auslegungswerkzeug, so können verschiedene Varianten schnell berechnet und verglichen werden. Die mechanischen und thermischen Parameter sind direkt gekoppelt und werden im Excel-Auslegungswerkzeug in einer Maske dargestellt. Um den thermischen Beharrungszustand für den S1-Betrieb zu bestimmen, werden die Parameter in MATLAB Simulink eingelesen und das 1-D-Widerstandsmodell berechnet die Wärmeflüsse durch die jeweiligen Bauteile. Das Thermomodell muss durch Erwärmungsmessungen an Mustergeneratoren validiert werden. Außerdem werden Steuerungsparameter verwendet, die es ermöglichen, die thermische Berechnung aus der Excel-Bedienoberfläche heraus zu steuern. So können zum Beispiel Temperaturpfade unterdrückt oder hinzugefügt werden, um das Modell so realitätsnah wie möglich zu gestalten. Die Temperaturen werden dann manuell wieder nach Excel exportiert. Dieser Vorgang könnte in Zukunft durch ein Skript automatisiert werden.

#### 4.6 Feingestaltung

Die Feingestaltung erfolgt auf der CAD-Ebene. Hier werden die Parameter der analytischen Ebene mit dem CAD-Modell verbunden, sodass ein vollparametrisches Modell entsteht. Dazu wird Autodesk Inventor verwendet. Alle Bauteile werden vollparametrisch erstellt, indem jedes einzelne Bauteil mit Excel verbunden wird. So sind diese Parameter auch für Berechnungen in Inventor verfügbar. Die Beziehungen in der Generatorbaugruppe können ohne Parameter erstellt werden, da die Abhängigkeiten im Excel-Parametersatz bereits berücksichtigt sind. Maschinenelemente wie Schraubenverbindungen werden mit dem Konstruktionsassistenten in Autodesk Inventor ausgelegt.

Wie im Kapitel Modellierung erwähnt, werden Formfaktoren eingeführt, die mit den passenden Designparametern multipliziert werden. So werden die Maße definiert, die für die Feingestaltung benötigt werden. Ein Formfaktor wird zum Beispiel mit der Breite des Lagers ( $b_{I/II}$ ) multipliziert, um die Länge des Lagersitzes ( $l_s$ ) zu bestimmen. Der Lagersitz muss etwas länger als das Lager sein, da noch eine Montagehilfe in Form einer Fase und Platz für die axiale Sicherung benötigt werden. Diese kann zum Beispiel als Sicherungsring nach DIN 471 ausgeführt sein. Die Formel für die Länge des Lagersitzes ergibt sich dann wie folgt:

$$l_{s\ I/II} = b_{I/II} (1 + f_{ls}) \quad \text{Gl. 4.8}$$

Die Passfedern an der Antriebs- und Befestigungswelle könnten auch automatisch mit Skripten ausgelegt werden [87]. Ob dies nötig ist oder ob eine featurebasierte Lösung im CAD-

System verwendet werden sollte, ist vom Anwendungsfall abhängig [88]. Die Schraubenverbindungen wurden featurebasiert in Inventor ausgeführt und berechnet. Wurde das gesamte Modell erstellt und die Materialien wurden zugewiesen, kann die genaue Gesamtmasse durch Inventor berechnet werden. Ist diese zu hoch, müssen im Werkzeug zum Beispiel die Wandstärken angepasst werden.

#### 4.7 Strukturanalyse

Das Modell kann mit dem FEM-Modul von Autodesk Inventor analysiert werden. Das geschieht in der Umgebung ‚Belastungsanalyse‘<sup>39</sup>, die den Nastran-Solver verwendet.<sup>40</sup> Dabei wurde nach dem von Autodesk empfohlenen Verfahren vorgegangen, wie im Artikel ‚Belastungsanalyse‘ beschrieben (siehe Anhang 5).

#### 4.8 Kostenplanung

Basierend auf dem Frontloading-Ansatz wird im Folgenden der Aufbau einer Kostenplanungsebene erläutert [89]. Mit der Auslegung einer drehenden elektrischen Maschine werden deren Eigenschaften und geometrische Form zu einem großen Teil bereits am Anfang eines Forschungsprojekts oder eines kundenspezifischen Entwicklungsauftrags fixiert. Nachträgliche Änderungen sind sehr zeitaufwendig und damit auch kostenintensiv. Deshalb ist es wichtig, möglichst viele kostenrelevante Informationen und Anforderungen möglichst schon bei der Auslegung der Maschine zu berücksichtigen. Dazu zählen die verwendeten Materialien und Werkzeuge sowie die nötigen Halbzeuge und Normteile. Außerdem sollte ein strukturierter und beschleunigter Entwicklungsprozess realisiert werden können, um angesichts globaler Märkte konkurrenzfähig zu bleiben. Aus diesem Grund wurde eine Kostenplanungsebene entwickelt, die mithilfe von Datenbanken und verschiedenen Parameterbeziehungen die Maschinenkosten vorkalkuliert. Die Ebene nutzt, wie oben erläutert, die elektrischen, mechanischen, kinematischen sowie die thermischen Daten der Maschine. Zusätzlich müssen Daten über die Fertigung und das beteiligte Personal beachtet werden. Bei der Fertigung sind die zur Verfügung stehenden Maschinen und Werkzeuge relevant.

Der offensichtliche Nutzen einer solchen Ebene besteht in der Dokumentation sowie im Vergleich der anfallenden Kosten. Verschiedene Fertigungsvarianten können abgewogen und große Kostenstellen aufgedeckt werden. So können Schwerpunkte für die zukünftigen Entwicklungen definiert werden. Im Speziellen kann das Kosteneinsparungspotenzial, das sich aus dem Einsatz von passenden Halbzeugen ergibt, aufgezeigt werden. Es kann geprüft werden, ob es sinnvoll ist, die Auslegung der Maschine bezogen auf dem wirksamen Hebelarm

---

<sup>39</sup> <https://knowledge.autodesk.com/de/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/DEU/Inventor-Help/files/GUID-61F01A5D-7E54-45A1-9698-7BB11F0AEE94-hm.html> Stand: 2020-11

<sup>40</sup> <https://www.autodesk.de/products/inventor-nastran/overview> Stand: 2020-11

und die Tiefe so zu variieren, dass eine optimale Nutzung von Halbzeugen möglich ist. So kann eine Auslegung mit einem guten Kosten-Nutzen-Verhältnis gefunden werden. Außerdem kann ein quantitativer Vergleich zwischen verschiedenen Fertigungsvarianten der Statoren der Maschine durchgeführt werden.

Die Kostenebene wird dabei als Hilfsmittel für die Generatorauslegung erstellt und soll nicht als betriebswirtschaftlich genaue Kostenrechnung verstanden werden. Ob sie später dafür genutzt werden kann oder einen Nutzen für diesen Bereich hat, kann beim Einsatz in der jeweiligen Struktur geprüft werden. Es ist auch zu prüfen, ob bereits vorhandene betriebswirtschaftliche Daten genutzt werden können. Es könnten zum Beispiel Preisentwicklungen von Zulieferteilen dokumentiert und interpoliert werden und Variantenvergleiche aus schon gefertigten Maschinen abgeleitet werden [90].

Im Folgenden wird eine Kalkulation basierend auf dem Maschinenstundensatz aufgebaut. Für die Kalkulation der Kosten werden umfangreiche Daten von relevanten Halbzeugen, Werkstoffen und Fertigungsverfahren benötigt. Dafür wurden die Daten verschiedener Produzenten ermittelt und durch den Quervergleich verschiedener Produktionsprogramme und Normen validiert [91], [92], [93], [94], [95], [96]. Firmen, die Informationen zur Verfügung gestellt haben, sind die Salzgitter Mannesmann Stahlhandel GmbH, die AGT Deutschland GmbH; die MEWA GmbH bei Wanzleben, die Weinmann Aach AG, die AMARI Metall GmbH. Bei der Werkstoffauswahl wurden Baustähle nach Norm DIN EN 10027-2 ausgewählt. Für die Aluminiumteile wurde die Legierung AlMgSi1 präferiert, da es sich um sehr gebräuchliche Werkstoffe im Maschinenbau handelt.

Zusätzlich wurde eine Bibliothek weiterer Werkstoffklassen erstellt, die unter anderem Daten zu Magnetwerkstoffen, Kupferwerkstoffen und Elektroblechen enthält. Diesen Werkstoffen wurden keine Halbzeugdaten hinterlegt, da die spezielle Geometrie, die aus der Verwendung der Luftspaltwicklung resultiert, eine Spezialanfertigung bedingt. Für die Kalkulation konnten aber Erfahrungswerte aus vorherigen Bestellungen und Studien genutzt werden [97]. Um die stückzahlabhängigen Kosten von Normteilen zu bestimmen, wurden online Angebote auf den Webseiten diverser Firmen erstellt. Für die Kugellagerkosten müssen jeweils die lokalen Vertriebspartner der Lagerhersteller kontaktiert werden. Da hier eine normgerechte mechanische Auslegung angestrebt wird und die Kosten geringgehalten werden sollen, wird angenommen, dass spezielle Werkstoffe sowie hochtechnologische Fertigungsprozesse die Kosten unnötig erhöhen. Deshalb werden diese hier nicht betrachtet.

Die Kleinwasserkraft- und Windkraftanlagen begrenzen die maximale Stückzahl der zu produzierenden Generatoren, da es sich um Nischenanwendungen handelt. Die Kosten werden daher für Prototypen- und Kleinserienfertigung berechnet.

Dafür wurden acht Rohteilklassen definiert, außerdem elf Bearbeitungsverfahren klassifiziert. Jede dieser Klassen enthält dabei Daten zu Maschinenstundensätzen, Rüstzeiten, Lohnkosten des ausführenden Personals und einen relativen Wert für das Zeitspanvolumen. Der relative Wert beschreibt in diesem Zusammenhang einen Richtwert, der benötigt wird, um die Qualität der Halbzeugauswahl zu bestimmen. Ein korrekter Wert kann nicht ermittelt werden, da dafür diverse Fertigungsparameter bekannt sein müssen, die in der Planungsphase einer neuen Maschine noch nicht vorliegen. Werden in Zukunft Projekte mit Fertigungsunternehmen realisiert, können diese Parameter genauer definiert werden.

Nachdem die Daten in das Modell eingelesen, konsolidiert sowie in Datenklassen strukturiert wurden, können Auswahlalgorithmen geschrieben werden. Diese durchsuchen die Halbzeugtabellen auf Basis der vorherigen Auswahl einer Rohstoff- und Halbzeugklasse. Ein passendes Halbzeug wird nun vorgeschlagen oder es wird angezeigt, welcher Parameter nicht mit den jeweiligen Normreihen vereinbar ist. Nun kann ein passendes Bearbeitungsverfahren ausgewählt werden. Dann werden aus dem Volumen des Rohteils ( $V_{roh}$ ) die Materialkosten ( $k_{mat}$ ) berechnet. Aus der Volumendifferenz von Rohteil und Bauteil können mit dem Zeitspanvolumen ( $Q$ ) und dem Maschinenstundensatz ( $M_{sts}$ ) die Maschinenkosten ermittelt werden. Aus der Summe von Maschinenkosten, Materialkosten und den stückzahlbezogenen Rüst- sowie Werkzeugkosten ( $k_w$ ) können die Stückkosten ( $k$ ) kalkuliert werden. Dazu werden die Lohnkosten ( $k_L$ ), die Rüstzeit ( $t_R$ ) und die geplante Stückzahl ( $n$ ) des Bauteils benötigt.

$$k(n) = V_{roh} \cdot k_{mat} + \frac{(V_{roh} - V_{bt})}{Q} \cdot M_{sts} + \frac{t_R}{n} \cdot k_L + \frac{k_w}{n} \quad \text{Gl. 4.9}$$

Die Kosten werden so für jedes Bauteil bestimmt. Die Summe aus Stückkosten ( $k(n)$ ), Montagekosten ( $k_M$ ) und den stückzahlabhängigen Montagewerkzeugkosten ( $k_{wm}$ ) ergibt die Gesamtkosten ( $k_g$ ).

$$k_g(n) = \sum k(n) + \sum k_M + \sum \frac{k_{wm}}{n} \quad \text{Gl. 4.10}$$

Für die Bewertung der unterschiedlichen Herstellungsverfahren des Stators wurden Referenzangebote aus vorherigen Projekten von der ACTech GmbH und der citim GmbH in die Datenbank eingetragen. Dazu wurde eine Eingabemaske erstellt, in der alle Bauteile aufgelistet sind und die als Rohteilkonfigurator bezeichnet wird. Innerhalb dieser Maske können alle zuvor erläuterten Einstellungen vorgenommen werden. Des Weiteren wurde eine Kostenübersichtstabelle angelegt, in der die Normteil-, Montage- und Montagewerkzeugkosten eingetragen werden können.

#### **4.9 Datenaustausch**

Für den Austausch der Daten mit externen Firmen oder Projektpartnern wurde ein automatisches Datenblatt erstellt (siehe Anhang 7). Dort sind die wichtigsten externen Generatorparameter abgelegt. Außerdem sind wesentliche Eigenheiten einer Maschine mit Luftspaltwicklung vermerkt, Daten, die in einen Typenschild enthalten sind, sowie zusätzliche Information über die Zuleitungskabel und die Pin-Belegung der Daten/Messleitung. Diese können bei der Fertigung abweichen, weshalb die Informationen auch bei der Fertigung der Maschine zugänglich sein und berücksichtigt werden müssen.

#### **4.10 Versionierung**

Mit dem Ablegen der Designparameter auf der ersten Seite der Excel-Datei können Zwischenstände festgehalten werden, indem diese Seite separat und ohne Verknüpfung abgespeichert wird. Aktuell können diese Speicherstände nicht wieder zurück ins Werkzeug übernommen werden, da dafür ein Skript geschrieben werden müsste. Deshalb ist es sinnvoller, die ganze Datei als Zwischenstand abzuspeichern. Um die gespeicherten Zwischenstände zu laden, muss die aktuelle Excel-Datei im Ordner des Werkzeuges durch die gewünschte Version ersetzt werden.

---

## 5 Anwendung

Die zuvor erläuterte Vorgehensweise des softwaregestützten und adaptiven Konstruktionsprozesses wurde im Rahmen der Projekte ‚Mill-4-all‘ und ‚Wachstumskern Fluss-Strom Plus‘-Verbundprojekt 5 entwickelt und angewendet. Dafür wurde zunächst im Projekt ‚Mill-4-all‘ ein Generator mit einer Luftspaltwicklung für eine Windkraftanlage entwickelt. Im Laufe dieses Projekts ist die Idee entstanden, die nötigen Berechnungen computergestützt und parametrisch durchzuführen und zu dokumentieren. In diesem Zusammenhang wurde die analytische Ebene des Werkzeugs aus Kapitel 4 aufgebaut. Der Generator wurde fertiggestellt und ausgeliefert.

Mit Beginn des Projekts ‚Wachstumskern Fluss-Strom Plus‘- Verbundprojekt 5 sollte ein Wasserkraftgenerator mit Kombinationswicklung realisiert werden. Dazu wurde die analytische Ebene mit der CAD-Ebene verknüpft, um das Wissen aus dem Vorgängerprojekt nutzen zu können. Im Folgenden werden die Projekte und ihr Verlauf kurz erläutert, wobei auch der Einsatz der Software erklärt wird. Abschließend erfolgt jeweils die Validierung der Auslegung durch die Messung der Maschinen am Prüfstand.

### 5.1 Windgenerator

In einer Zeit, in der die fossilen Brennstoffe zunehmend knapp und damit teurer werden, rücken die erneuerbaren Energien verstärkt in das öffentliche Interesse. Deutschland nimmt auf diesem Sektor eine Vorreiterrolle ein, besonders hinsichtlich der Technologie und bei Systemlösungen. Erneuerbare Energien sind jedoch nicht überall in gleichem Maße verfügbar. Es gibt Regionen, in denen der Wind nicht ausreichend weht. Damit die Energiewende erfolgreich gestaltet werden kann, müssen daher neue Stromtrassen gebaut werden und es muss in den Ausbau des Verteilerstromnetzes investiert werden.

Um dieses Problem zu entschärfen, gibt es die Möglichkeit der dezentralen Energieversorgung, worunter die verbrauchernahe Erzeugung der elektrischen Energie zu verstehen ist. Dies kann durch Windkraft-, Photovoltaik- und Biomasseanlagen oder durch Blockheizkraftwerke geschehen. Die Energie wird nachhaltig und dezentral erzeugt. Durch das Nutzen der erzeugten Energie kann Geld gespart werden und das Stromnetz wird entlastet. Je eingespeister Kilowattstunde können 9 Eurocent eingenommen werden, wohingegen das Vermeiden des Beziehens einer Kilowattstunde Strom aus dem öffentlichen Netz mit ca. 25 Eurocent verrechnet wird.

Kleinwind- und Wasserkraftanlagen können zur Stromerzeugung dienen. Für Privathaushalte sind Anlagen bis 5 kW sinnvoll, wobei das individuell überprüft werden muss. Beim Betrieb einer Kleinwindkraftanlage sind zum Beispiel verschiedene Randbedingungen zu beachten: Zunächst muss ein passender Standort vorhanden sein. Dann müssen Windmessungen

durchgeführt werden, um die Wirtschaftlichkeit abzuschätzen. Eine Anlagenart ist auszuwählen, ebenso wie eine standorts- und anwendungsspezifische Anlagenleistung. In jedem Bundesland sind andere Regelungen und Genehmigungsverfahren zu beachten [98], [99].

Um die Markteintrittshürden zu reduzieren, wurde im ‚Mill-4-all‘-ZIM-Projekt (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) eine Anlage entwickelt, die robust, leicht zu regeln und genehmigungsfrei ist. Außerdem realisiert die Anlage eine hohe Energieausbeute bei einer geringen Masthöhe von ca. 10 Metern. Der Zielpreis dieser 4-kW-Anlage beträgt 12 000 €. Eine solche Anlage kann sich an geeigneten Standorten innerhalb von 10 Jahren amortisieren. Mit einer vorgesehenen Lebensdauer von 20 Jahren könnten also 24 000 € Stromkosten vermieden werden. Das entspricht einem Gewinn von 12 000 €.

Zum Einsatz kommt ein H-Darrieus-Rotor. Dabei handelt es sich um einen Rotor mit einer vertikalen Drehachse. Diese Rotoren stellen besondere Ansprüche an den verwendeten Generator, da das Drehmoment nicht konstant ist und der Rotor nicht von allein in den Arbeitspunkt fahren kann. Daher wird eine dynamische Regelung der Windkraftanlage benötigt. Der für Kleinwindkraftanlagen typische windgeführte Betrieb wird mit einer Drehmomentbegrenzung erweitert. Konventionelle Megawatt-Anlagen haben oft eine starre Netzkopplung und sind deshalb auf eine konstante Drehzahl angewiesen [98]. Eine leistungsoptimierte Steuerung ist dann nur über aerodynamische Anpassungen möglich, die bei einem Darrieus-Rotor nicht umsetzbar sind.

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein neuartiger Generator konzipiert, ausgelegt, konstruiert und aufgebaut [100]. Verschiedene Betriebsstrategien mit variabler Drehzahl wurden diskutiert und mit detaillierten Modellen simuliert. Die neuartige Maschine arbeitet nicht nur als Generator, sondern zum Start der Windturbine kurzzeitig auch als Motor. Dafür wurden eine Kommutierungseinheit und eine Steuerung entwickelt.

Probleme bei der neuartigen elektrischen Maschine bestehen in der geringen Induktivität und der begrenzten Überlastbarkeit zum Beispiel beim Notbremsen der Anlage. Lösungen für diese Problemstellungen werden in diesem Kapitel vorgestellt.

### 5.1.1 Stand der Technik

In vielen Kleinwindkraftanlagen kommen PM-Synchronmaschinen zum Einsatz [98]. Sie kennzeichnen sich durch hohe Wirkungsgrade und Leistungsdichten sowie eine lange Lebensdauer. Aktuell gibt es verschiedene Forschungsprojekte, die sich mit der Verwendung der Transversalfeldmaschine befassen [2] S. 351 ff., [101]. Die Maschinen werden meist direkt an den Rotor angeschlossen. Selten kommen Riementriebe zum Einsatz, um die Drehzahl ( $n$ ) der Generatorwelle zu erhöhen; dann können konventionelle niedrigpolige Synchronmaschinen verwendet werden ( $n_{\text{nenn}} = 2500$  bis  $5000$  U/min). Bei direktlaufenden Generatoren ist die Nenndrehzahl starr an die Drehzahl der Windturbine gekoppelt, die prinzipbedingt sehr niedrig

ist ( $n = 150$  bis  $300$  U/min). Daher müssen die Maschinen entweder hochpolig oder mit hoher Windungszahl ausgeführt werden. Dabei wird entweder viel Magnetmaterial oder viel Kupfer benötigt und die maximalen Wirkungsgrade sind begrenzt ( $< 85\%$ ).

Die meisten Maschinen sind als Innenläufer ausgeführt, wobei die hochpoligen Varianten der Radialflussmaschine oft in Ringbauform gefertigt sind. Die Axialflussmaschinen werden vielfach in China produziert, da sie einen hohen Anteil an Dauermagneten enthalten. Der Rotor besteht meist aus zwei Deckeln, in denen die Eisenrückschlüsse eingelegt und befestigt sind. Auf dem Eisenrückschluss werden jeweils Magnetkreissegmente mit alternierender Polung aufgeklebt. Es werden zwei dieser Deckel benötigt, damit sich ein Feld zwischen den Magnetkreissegmenten ausbilden kann. Im großen Luftspalt zwischen den Deckeln (oft  $> 10$  mm) ist der Stator angeordnet. Dieser besteht in der Regel aus einer selbsttragenden Kupferwicklung. Die Kühlung dieser innen liegenden Wicklung ist häufig nicht möglich, was die maximale Leistung solcher Maschinen einschränkt.

Für den hier betrachteten Leistungsbereich sind diese Maschinen weit verbreitet. Gerade in Entwicklungsländern oder in dünn besiedelten Regionen, wo Strom nicht flächendeckend zur Verfügung steht, werden solche Maschinen häufig mit primitiven Mitteln hergestellt.

### 5.1.2 Auslegung

Für die Generatoranwendung sind die Auslegungskriterien Kosten, Wirkungsgrad, Robustheit sowie Leistung entscheidend. Das bedeutet, dass den Kunden eine möglichst kostengünstige und einfache Maschine mit gutem Wirkungsgrad und ausreichender Leistung zur Verfügung gestellt werden muss. Dazu sind Kriterien wie eine effiziente Fertigung, eine sinnvolle Materialwahl und geeigneter Materialeinsatz notwendig.

Um die elektrische Auslegung des Generators vornehmen zu können, muss zuerst die ausreichende Generatorleistung bestimmt werden. Um die Eigenschaften des Generators möglichst gut an die Windturbine anpassen zu können, wurde daher ein Leistungskennfeld der Windturbine erstellt. Dazu wurden Simulationsdaten des Instituts für Strömungsmechanik verwendet [102]. Die verschiedenen Simulationsdaten für verschiedene konstante Windgeschwindigkeiten wurden verknüpft und es entstand ein komplettes Kennfeld, das für weitere Simulationen in MATLAB Simulink verwendet werden konnte. Dabei wurden, wie in Abbildung 32 dargestellt, die Windgeschwindigkeit ( $v$ ), die Drehzahl ( $\omega$ ) der Turbine und jeweils die zugehörigen Leistungen ( $P$ ) und Momente ( $M$ ) betrachtet. Die standortspezifische Turbulenzintensität wurde bei den folgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt [103].

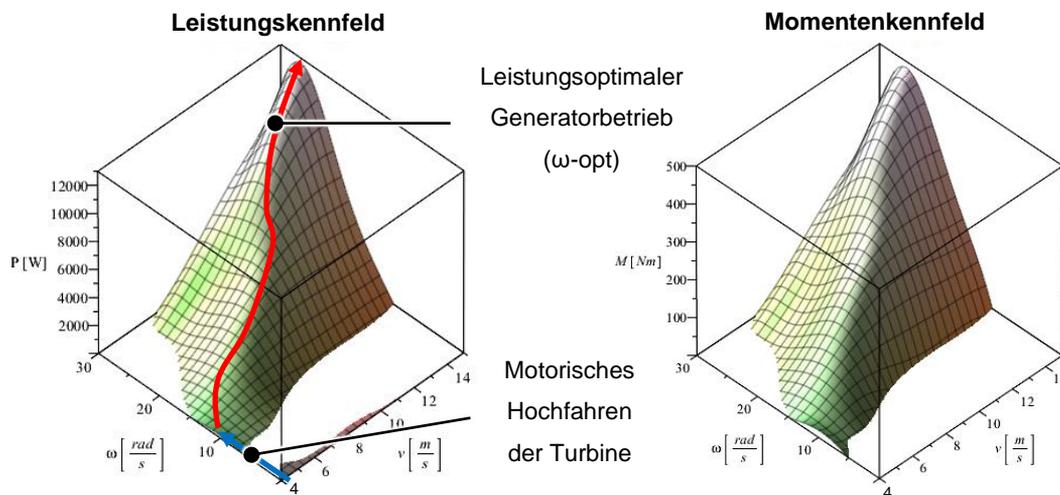


Abbildung 32: Leistungskennfeld des H-Darrieus-Rotors und Momentenkennfeld

Die typischen Eigenschaften eines Darrieus-Rotors sind in den Kennfeldern erkennbar. Erst ab einer Drehzahl von ca. 100 Umdrehungen je Minute und einer Windgeschwindigkeit von 4 Meter je Sekunde (Cut-in-Geschwindigkeit) kann Energie gewonnen werden. Das bedeutet, dass die elektrische Maschine die Turbine erst auf eine Drehzahl von ca. 100 Umdrehungen je Minute im Motorbetrieb hochfahren muss. Wenn diese Drehzahl erreicht ist und die Windgeschwindigkeit größer als 4 m/s ist, kann in den Generatorbetrieb umgeschaltet werden. Das bedeutet auch, dass zuvor eine Steuerung auf Basis einer Windmessung entscheiden muss, ob der Rotor hochgefahren werden soll. Dann beginnt der windgeführte Betrieb. Hier wird die Drehzahl des Rotors so angepasst, dass die maximale Leistung bei den gegebenen Windbedingungen entnommen werden kann. Dies wird als MPP-Tracking (engl. *maximum power point tracking*) bezeichnet. In Windkraftwechselrichtern, die am Markt verfügbar sind, sind oft nur Polynom-Kennlinien über die Angabe von mehreren Stützpunkten programmierbar. Dies setzt aber genaue Kenntnisse über den verwendeten Rotor voraus. Der Motorbetrieb des Generators ist dort nicht vorgesehen. Der windgeführte Betrieb der Turbine wird durch deren mechanische Belastbarkeit begrenzt. Die maximal ertragbare Drehzahl des Rotors beträgt 300 Umdrehungen je Minute und die maximal ertragbare Windgeschwindigkeit im Generatorbetrieb liegt bei 13 Metern je Sekunde (Cut-out-Geschwindigkeit). Aus den Kennfeldern wird deutlich, dass die Leistungsaufnahme des Generators über die maximale Windgeschwindigkeit limitiert wird. Die maximal zur Verfügung stehende Leistung beträgt ca. 10 kW.

Es gibt verschiedene Betriebsstrategien für Kleinwindkraftanlagen mit Vertikalachse, wobei zwischen leistungsoptimalem und drehmomentgeregeltem Betrieb sowie dem Betrieb mit konstanter Drehzahl unterschieden werden kann. In Abbildung 33 ist analog zu Abbildung 32 der leistungsoptimale Betrieb mit  $\omega$ -opt/hoch bezeichnet dargestellt.

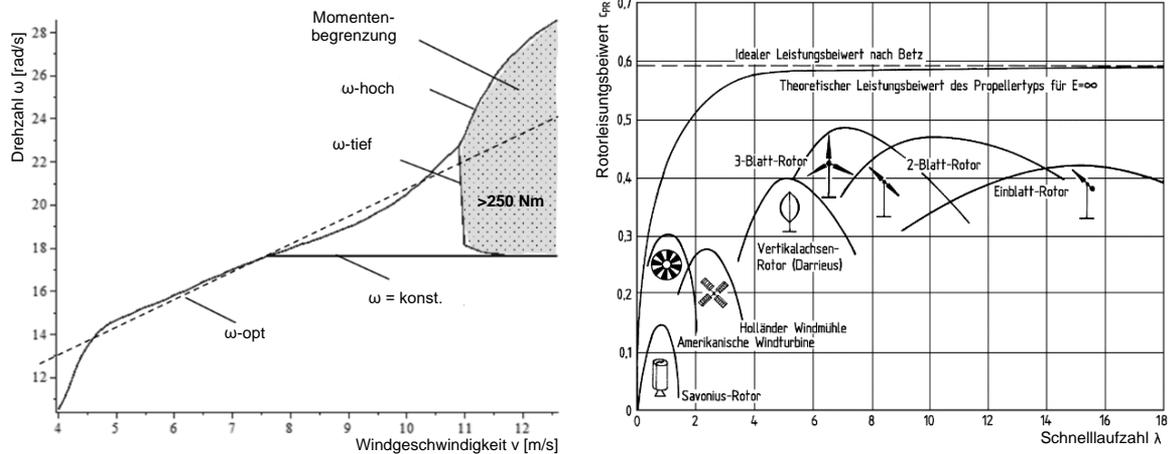


Abbildung 33: Regelungsstrategien und Einordnung Darrieus-Rotor [104]

In der Abbildung 33 auf der rechten Seite ist die Einordnung des Darrieus-Rotors nach der Schnelllaufzahl ( $\lambda$ ) und dem Rotorleistungsbeiwert ( $c_{PR}$ ) im Vergleich mit anderen Rotortypen dargestellt. Die Schnelllaufzahl gibt das Verhältnis von Umfangsgeschwindigkeit ( $u$ ) zu Windgeschwindigkeit ( $v$ ) an [104].

$$\lambda = \frac{u}{v} \quad \text{Gl. 5.1}$$

Der Leistungsbeiwert  $c_{PR}$  gibt den Anteil der Gesamtwindleistung an, der durch die Turbine nutzbar gemacht wird. Dieser ist nach Betz maximal 59 % [105].

Werden nun die statistischen Windverteilungskurven, die durch eine Weibull-Verteilung beschrieben und für jeden Standort spezifisch sind, betrachtet und exemplarisch für einen guten Standort auf die Rotorleistung bezogen, so lässt sich feststellen, dass die Zeitanteile, in denen mehr als 4 kW mechanische Leistung gewandelt werden müssen, statistisch sehr gering ausfallen [98]. Für die Jahresenergieausbeute sind sie nicht relevant. Die Kosten für einen größeren Generator erscheinen daher nicht gerechtfertigt. Des Weiteren müssten die Steuerung und der Wechselrichter größer dimensioniert werden, was zusätzlich die Kosten erhöhen würde. In einer Jahresertragsabschätzung konnte gezeigt werden, dass für eine solche Anlage ein Generator mit 4-kW-Nennleistung bei einer Drehzahl von 170 Umdrehungen je Minute eine gute Lösung darstellt. Dabei wurden ein momentengeregelter Betrieb und eine mittlere Windgeschwindigkeit von 5 m/s zugrunde gelegt. Um die theoretischen Simulationen zu validieren, wurden Messungen auf dem Flugplatz Bautzen durchgeführt. Dabei wurde, wie in Abbildung 34 zu sehen ist, die Windkraftanlage auf einem mobilen Trägerfahrzeug bewegt, um verschiedene konstante Anströmverhältnisse einstellen zu können. Es hat sich gezeigt, dass die Simulationsergebnisse eine ausreichend genaue Beschreibung der Windkraftanlage liefern.



Abbildung 34: Mill-4-all-Windkraftanlage und Anlage auf Trägerfahrzeug

Die Kleinwindkraftanlage mit H-Darrieus-Rotor soll im Generatorbetrieb eine elektrische Leistung von 4 kW dauerhaft wandeln können. Der Generator soll für den Drehzahlbereich zwischen 50 und 300 Umdrehungen je Minute ausgelegt werden. Dieser Bereich unterteilt sich in einen Nennbereich, der durch 50 bis 170 Umdrehungen je Minute definiert ist, und in einen Überlastbereich, der zwischen 170 und 300 Umdrehungen je Minute liegt.

Tabelle 9: Drehzahlbereiche des Windgenerators

| Benennung   | Intervall                          | Bedeutung        |
|-------------|------------------------------------|------------------|
| Gesamt      | $50 \leq n \leq 300 \text{ U/min}$ | Rotorauslegung   |
| Motorstart  | $0 \leq n \leq 100 \text{ U/min}$  | Motorbetrieb     |
| Nenn/Arbeit | $50 \leq n \leq 170 \text{ U/min}$ | Generatorbetrieb |
| Überlast    | $170 < n \leq 300 \text{ U/min}$   | Bremsenauslegung |

Die maximale Drehzahl entspricht einer Winkelgeschwindigkeit von  $\omega = 17,8 \text{ rad/s}$ . Bei einer idealen Betrachtung ohne Verlustleistung entspricht die zugeführte mechanische Leistung ( $P_{\text{mech}}$ ) der abgeführten elektrischen Leistung ( $P_{\text{el}}$ ):

$$P_{\text{mech}} = \omega \cdot M = U \cdot I \quad \text{Gl. 5.2}$$

$$M = \frac{P_{\text{el}}}{\omega} = \frac{4000}{17,8} = 224,7 \text{ Nm} \quad \text{Gl. 5.3}$$

Ein Drehmoment ( $M$ ) von 224,7 Nm muss gewandelt werden. Eines der zentralen Auslegungskriterien für den Windgenerator ist die Effizienz. Der dominierende Verlustanteil während der elektromechanischen Wandlung ist die ohmsche Verlustleistung in der Wicklung. Diese besitzt

eine quadratische Abhängigkeit vom elektrischen Strom und wird direkt durch den elektrischen Widerstand der Luftspaltwicklung beeinflusst. Aus diesem Grund wurde ein im Vergleich zu herkömmlichen Wicklungen, relativ großer und am Markt verfügbarer  $1,5 \text{ mm}^2$ -Flachdraht ( $1 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm}$ ) gewählt. Der elektrische Widerstand der Luftspaltwicklung fällt demnach sehr gering aus. Des Weiteren wurde die elektrische Stromdichte des Generators gezielt gering dimensioniert, da eine Luftkühlung realisiert werden soll. Die räumlichen Randbedingungen wurden voll ausgenutzt und es wurden starke Permanentmagnete verwendet, um eine möglichst große Wandlungskonstante ( $k$ ) zu erzielen. Diese stellt zum einen die Abhängigkeit zwischen induzierter Spannung und Winkelgeschwindigkeit und zum anderen jene zwischen elektrischem Strom und Drehmoment dar. Je größer die induzierte Spannung ist, desto geringer sind der elektrische Strom sowie die ohmsche Verlustleistung des Generators. Auch das Außenläuferkonzept trägt zu einer großen Wandlungskonstante bei, da es einen größeren wirksamen Radius ( $r_{m\_ph}$ ) als bei Innenläuferkonzepten ermöglicht.

Die Länge der Magnete wurde auf 100 mm festgelegt, da diese Größe am Markt verfügbar ist. Aufgrund der Geometrie der Permanentmagnete und des Innendurchmessers des Rotors können insgesamt 67 Magnetpolpaare verbaut werden (siehe Gleichung 4.3). Das heißt, es müssen insgesamt 134 Magneten eingeklebt werden. Pro Magnetpol beträgt die Anzahl der aktiven Leiter ( $z$ ) neun. Die letzte Dimensionierungsgröße ist die magnetische Flussdichte ( $\bar{B}$ ). Diese wird durch einen möglichst kleinen Luftspalt zwischen Rotor und Stator begünstigt. Für die Dimensionierung wird zunächst von einer mittleren magnetischen Flussdichte von 0,55 Tesla für den 2 mm großen Luftspalt ausgegangen. Hierbei handelt es sich um den magnetischen Luftspalt (siehe Gleichungen 2.19 und 2.20). Die exakte Bestimmung von  $\bar{B}$  wird anschließend mithilfe einer FE-Simulation vorgenommen, auch die induzierte Spannung in den Leitern wird dabei dargestellt. Das theoretische Ergebnis ist eine Wandlungskonstante von 14,86 Weber (Wb). Dies bedeutet, dass 14,86 V Spannung je Radiant pro Sekunde in der Luftspaltwicklung induziert werden. Durch die Mittelung der magnetischen Flussdichte ( $\bar{B}$ ) ist die mittlere induzierte Spannung ( $U_{in}$ ) ebenfalls konstant. Bei einer dauerhaften Winkelgeschwindigkeit von 17,8 rad/s würde demnach ein theoretisches Spannungspotenzial ( $U_{in\_th}$ ) von 264,53 V in die Luftspaltwicklung des Generators induziert werden. Um in diesem Betriebspunkt eine elektrische Leistung von 4 kW zu wandeln, wird ein elektrischer Strom ( $I$ ) von 15,12 A (bei idealer Betrachtung ohne Verluste) benötigt. In jedem der insgesamt 67 magnetischen Kreise des Windgenerators sind vereinfacht folgende magnetischen Widerstände vorhanden: ein Rotor-Eisenrückschluss, zwei Permanentmagnete, zwei Luftspalte, 18 Kupferleiter und ein Stator-Eisenrückschluss.

Die Bestimmung der Wandstärken der beiden Eisenrückschlüsse erfolgte anhand einer stationären FE-Simulation in ANSYS Maxwell. Hierfür wurde ein 2D-Modell verwendet, das die in

Kapitel 4.5.1 erläuterten geometrischen Randbedingungen berücksichtigt. Des Weiteren wurden gängige und am Markt verfügbare Materialien für die Eisenrückschlüsse eingesetzt. Für den Rotor-Eisenrückschluss wurde ein Eisenwerkstoff mit einer magnetischen Sättigung von 1,9 Tesla ausgewählt [106]. Für den Stator-Eisenrückschluss wurde ein gängiges Blechpaket M250-35A verwendet. Die Eisenverluste sind bei der geringen Drehzahl sehr niedrig, die Maschine überhitzt somit auch bei der Überlastdrehzahl von kurzzeitig 300 U/min nicht. Für beide Materialien wurde eine nichtlineare Kommutierungskurve nach Kallenbach in der FE-Simulation hinterlegt [106]. Die Permanentmagnete besitzen eine Remanenzflussdichte ( $B_R$ ) von 1,3 Tesla.

In Abbildung 35 auf der linken Seite ist das Ergebnis der FE-Simulation für die magnetische Flussdichte des magnetischen Kreises dargestellt. Die Wandstärke des Rotor-Eisenrückschlusses wurde auf 4 mm ausgelegt. Eine geringere Wandstärke ohne Sättigungseffekte wäre möglich, ist jedoch nicht sinnvoll, da hier die Masse kein Auslegungskriterium ist. Zusätzlich wäre die Fertigung aufwendiger und damit wären die Kosten höher. Mit Hilfe der FE-Simulation konnte gezeigt werden, dass eine Wandstärke des Stator-Eisenrückschlusses von 3 mm zur magnetischen Flussführung genügen würde.

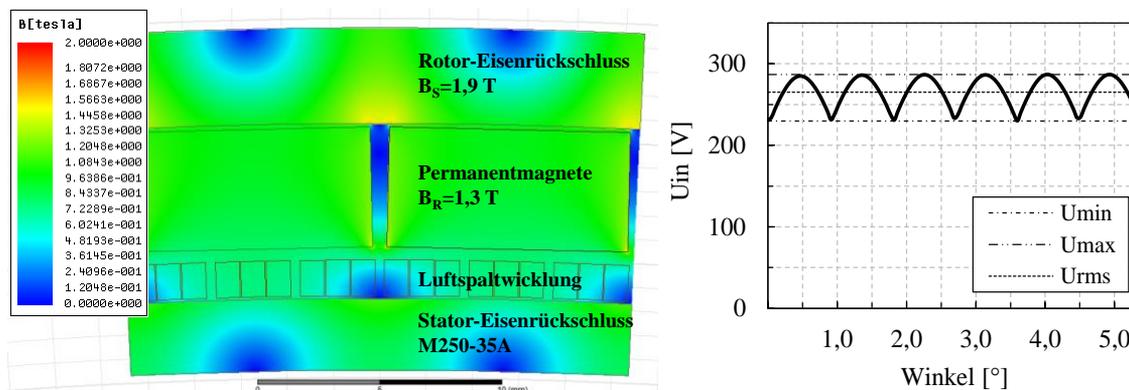


Abbildung 35: FE-Simulation des magnetischen Kreises und der induzierten Spannung

Der Verlauf der induzierten Spannung wurde anhand einer transienten FEM-Simulation analysiert. Hierfür wurde ein 3D-Modell in ANSYS Maxwell aufgebaut und zeitdiskret simuliert. Das Ergebnis ist in Abbildung 35 auf der rechten Seite für einen Luftspalt von 2,65 mm und 2 mm dargestellt. Die neun Einzelleiter wurden in drei symmetrische Phasen eingeteilt und jeweils in Reihe geschaltet. Der elektrische Gleichspannungsverlauf der induzierten Spannung  $U_{in}$  ist bei einer Winkelgeschwindigkeit von  $\omega = 17,8$  rad/s dargestellt. Dieser resultiert aus der Verwendung einer klassischen Sechspulsgleichrichter-Schaltung für die drei Phasen. Die Extremwerte liegen bei  $U_{min} = 229,8$  V und  $U_{max} = 286,8$  V. Der Effektivwert beträgt  $U_{rms} = 265,1$  V. Die Verschaltung der dreiphasigen Luftspaltwicklung erfolgt in einer klassischen Sternschaltung. Jede Phase besteht aus drei Einzelleitern, die mäanderförmig,

siehe [107], über dem gesamten Umfang des Stators gleichmäßig verteilt werden, so dass sich unter jedem Magnetpol ein Leiterabschnitt einer Phase befindet.

Um die Wandlungskonstante  $k$  so groß wie möglich zu gestalten, werden die drei einzelnen Leiter einer Phase in Reihe geschaltet. Aus der Reihenschaltung der Einzelleiter folgt, dass die induzierte Spannung der drei Leiter pro Phase aufsummiert wird. Der elektrische Widerstand wird jedoch bei dieser Verschaltungsvariante dreimal so groß. Um dieser Verdreifachung entgegenzuwirken, wurde die Querschnittsfläche der Einzelleiter sehr groß dimensioniert, so dass geringe ohmsche Verlustleistungen resultieren. Der Windgenerator verwendet permanent drei Phasen für die elektromechanische Leistungswandlung. Daraus resultiert ein gleich gerichtetes elektrisches Spannungspotenzial aus insgesamt neun elektrischen Leitern pro Magnetpol.

In Abbildung 35 (rechts) ist der gleich gerichtete induzierte Spannungsverlauf für den ausgelegten magnetischen Kreis bei einer Winkelgeschwindigkeit von  $\omega = 17,8 \text{ rad/s}$  dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass die analytische Auslegung nach der Gleichung 2.18 sehr gut mit der FE-Simulation übereinstimmt. Der Fehler beträgt lediglich  $\Delta U_{\text{in}} = |U_{\text{in,th}} - U_{\text{rms}}| = 0,57 \text{ V}$  und ist prozentual zum Ergebnis der FE-Simulation, mit 0,21 %, relativ gering.

### 5.1.3 Konstruktion

Die Konstruktion des neuartigen Generators ist in Zusammenarbeit mit der Grossenhainer Maschinenbau GmbH entstanden<sup>41</sup>. Zur Kommunikation der Anforderungen wurde eine umfassende Anforderungsliste erstellt, die im Verlauf des Projekts durchgängig aktualisiert wurde. In Designreviews wurde die Konstruktion im Projektteam abgestimmt. Die technischen Anforderungen an den Generator gliedern sich in zwei Hauptgruppen: zum einen die Anforderungen, die aus der Verwendung der Luftspaltwicklung resultieren, und zum anderen jene, die sich aus der Anwendung in der Windkraftanlage ergeben. Die Anforderungen, die das Prinzip der Luftspaltwicklung stellt, sind bereits umfassend durch die Forschung am ELISA-Radnabenmotor (Landesinitiative: ‚Elektromobilität und Leichtbau in Sachsen-Anhalt‘) des IMS dokumentiert worden [108]. So konnten diese leicht adaptiert verwendet werden. Des Weiteren wurden Anforderungen aus den Rahmenbedingungen des Projekts entnommen. Zusätzlich zu den Normen für drehende elektrische Maschinen wurden Vorschriften berücksichtigt, die beim Aufbau einer Kleinwindkraftanlage zu beachten sind. Eine wichtige Norm ist die DIN EN IEC 61400-2, Sicherheit kleiner Windenergieanlagen [109], [110].

Zur Realisierung eines Windgenerators mit Luftspaltwicklung bieten sich mehrere mögliche Ansätze an. Durch das Prinzip der Luftspaltwicklung sind Varianten mit Außenläufer bevorzugt worden, da die Fertigung einer innenliegenden Wicklung noch nicht realisierbar ist. Außerdem

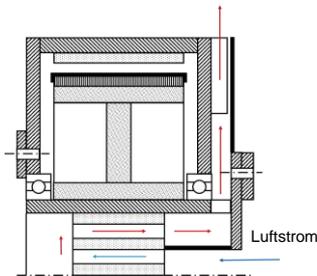
---

<sup>41</sup> <https://metalltechnik-grossenhain.de> Stand 2020-11

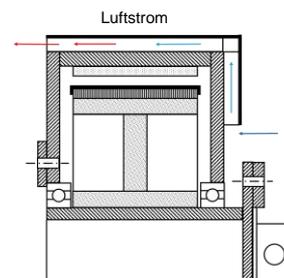
musste eine Luftkühlung verwendet werden, da die Kühlung mit Wasser zusätzliche externe Baugruppen erfordert, die in dem Projekt nicht erwünscht waren. Mit diesen Rahmenbedingungen wurde eine Funktionsstruktur erstellt. Die Funktionen wurden in einem morphologischen Kasten mit möglichen Lösungen unterlegt. Dann wurden verschiedene Varianten erstellt, von denen die wichtigsten in Tabelle 10 dargestellt sind:

Tabelle 10: Generatorkonzepte mit Außenläufer und verschiedenen Luftkühlungsvarianten

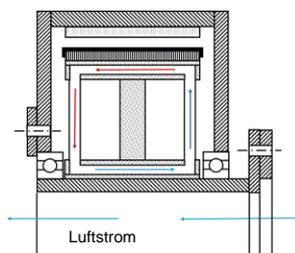
1) Generator mit innenliegendem Wärmetauscher



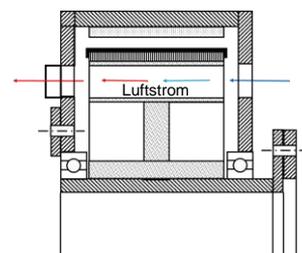
2) Generator mit umlaufender Lüfterhaube



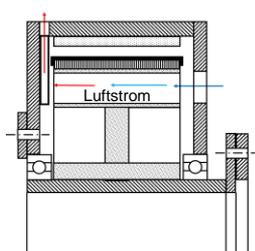
3) Generator mit Wärmeübertragungsrohren  
(Heatpipes)



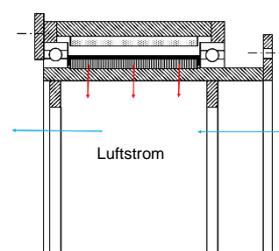
4) Generator mit Axialventilator und offenem Gehäuse



5) Generator mit Radialventilator und offenem Gehäuse



6) Ringgenerator mit Direktkühlung



Aus der Bewertung der Varianten nach VDI 2225 hat sich ergeben, dass das Generatorkonzept 5 mit Radialventilator und offenem Gehäuse die meisten Vorteile birgt. Dieses Konzept wurde zusammen mit der Anforderungsliste an die Konstruktionsabteilung der Firma Großenhainer Maschinenbau GmbH übergeben. Nach drei Design Reviews hat sich der Aufbau des Windgenerators und dessen Halterung so ergeben, wie er in Abbildung 36 und Abbildung 37 dargestellt ist.

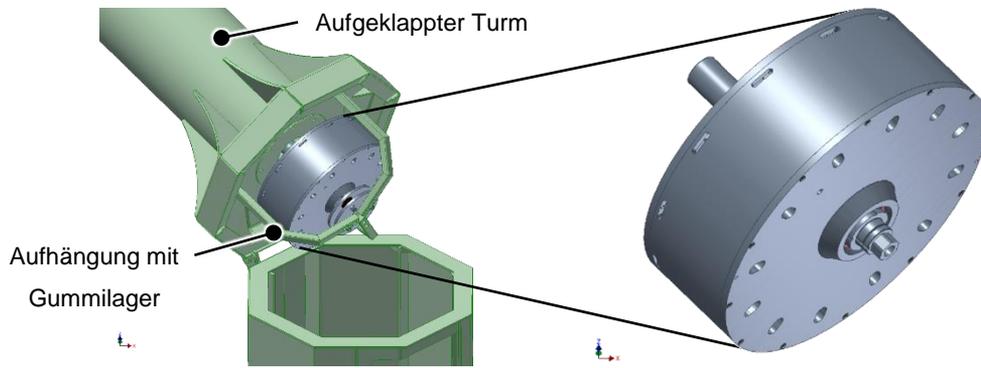


Abbildung 36: Turm der Windkraftanlage und Windgenerator

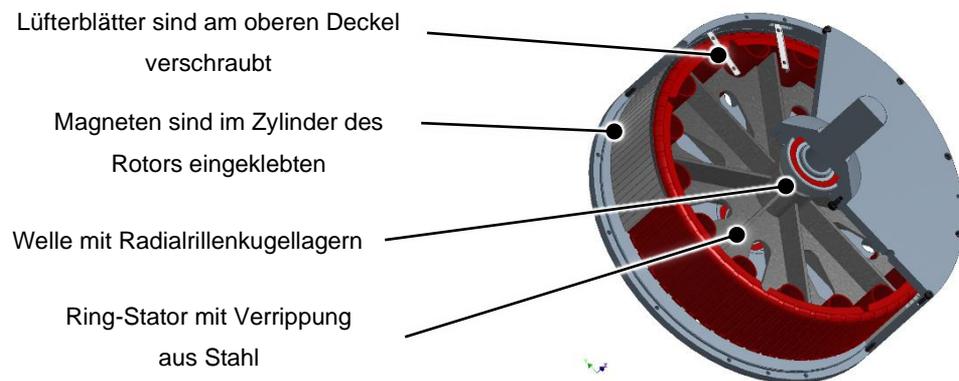


Abbildung 37: Innerer Aufbau des Windgenerators

#### 5.1.4 Fertigung

Die mechanischen Komponenten des Generators wurden bei der Firma Großhainer Maschinenbau GmbH hergestellt. Die Fertigung der Hochkant-Kupferwicklung und ihre Verschaltung wurden an der Otto-von-Guericke-Universität realisiert. Dazu wurde eine Wickelmaschine konstruiert und gefertigt. Die Besonderheit der Wickelmaschine ist die hochpräzise und stabile Positionierung des Stators, die über einen Schrittmotor mit einem Harmonic-Drive-Stellgetriebe erzielt wird (Abbildung 38). Zur Applikation der Wicklung wurden mehrere magnetische Schablonen benutzt, die im SLS-3D-Druckverfahren (Selektives Lasersintern) aus Polyamid hergestellt worden sind. Die eingesetzten Magneten wurden so ausgewählt, dass durch die Haftkraft ein sehr geringer Klebespalt eingestellt wird, ohne dabei die Drähte zu beschädigen. Durch die Verwendung mehrerer Schablonen konnte die Prozesszeit verkürzt werden. Außerdem wurde ein Hybridklebstoff verwendet, der eine geringe Aushärtezeit mit hoher Festigkeit und chemischer sowie thermischer Beständigkeit vereint (LOCTITE 4090).

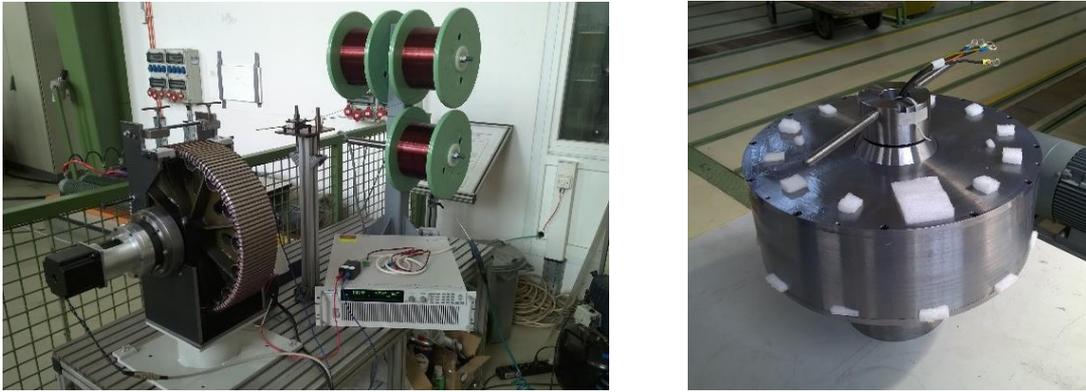


Abbildung 38: Generatorwickelmaschine und fertiggestellter Generator

### 5.1.5 Ansteuerung

Die Ansteuerung des Generators wurde von der Firma EP:Böttcher nach Vorlagen des IMS aufgebaut. Dabei mussten der motorische und der generatorische Betrieb realisiert werden. Im Motorbetrieb wird unter Verwendung einer Blockkommutierung (K) und einer Hall-Sensor-Platine, wie sie am Lehrstuhl für Mechatronik entwickelt wurden [24], die Windturbine gestartet. Der schematische Aufbau der Anlagensteuerung ist in Abbildung 39 dargestellt.

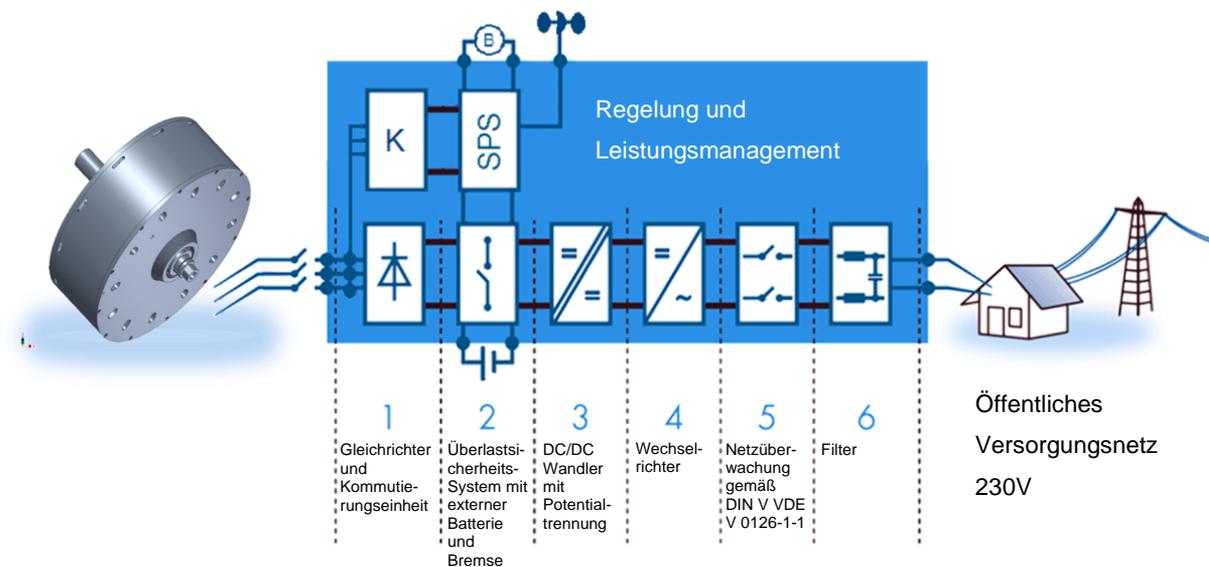


Abbildung 39: Schematisches Blockschaltbild der Anlagenregelung mit Generator<sup>42</sup>

Eine besondere Herausforderung besteht darin, dass der Generator die Anlagenregelung mit übernehmen muss. Dazu erhält die Steuerung Input-Signale von der Betriebsführungseinheit der Anlage, die als WAGO-SPS ausgeführt ist. Signale wie ‚Turbine starten‘ und ‚Notbremsung‘ werden von der SPS an die Steuerung weitergegeben. Die Programmierung der SPS

<sup>42</sup> <https://www.all-electronics.de/wp-content/uploads/migrated/document/146695/855iee0410-sieb-meyer-aeocon.pdf>, Blockschaltbild aeocon, Seite 3, Stand 2020-11

erfolgte durch die Ventego AG, wofür die Messdaten vom Flugplatzversuch verwendet wurden. Für die Nutzung der elektrischen Energie werden ein Wechselrichter und ggf. eine Einspeisevorrichtung bzw. bei Inselbetrieb ein Laderegler für die Batterie benötigt. Der Wechselrichter sorgt dafür, dass der Strom netzkonform zur Verfügung steht und von allen Verbrauchern genutzt werden kann.

### 5.1.6 Messung

Zur Validierung der Simulationen aus Kapitel 5.1.2 wurde der Generatorprototyp am 50-kW-Motorenprüfstand des Lehrstuhls für Mechatronik am Institut für Mobile Systeme vermessen, wie in Abbildung 40 dargestellt.

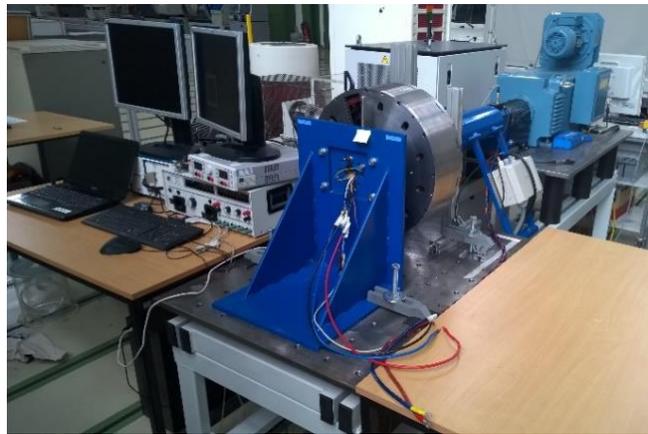


Abbildung 40: 50-kW-Motorenprüfstand mit montiertem Windgenerator

Zuerst wurde die Leerlaufspannung der drei Phasen bei Nenn Drehzahl gemessen ( $U_{1,2,3\_Mess}$ ). Es zeigte sich, wie in Abbildung 41 ersichtlich, dass eine gute Übereinstimmung mit den zuvor in ANSYS Maxwell simulierten Werten erzielt wurde ( $U_{1,2,3\_FEM}$ ). Die Wicklung wurde sehr symmetrisch appliziert. Um das komplette Leistungskennfeld messen zu können, ist die Steuerung notwendig, die von der Firma EP:Böttcher aufgebaut wird. Zudem konnte die Antriebsmaschine des Prüfstandes bei den niedrigen Drehzahlen nicht das nötige Moment aufbringen.

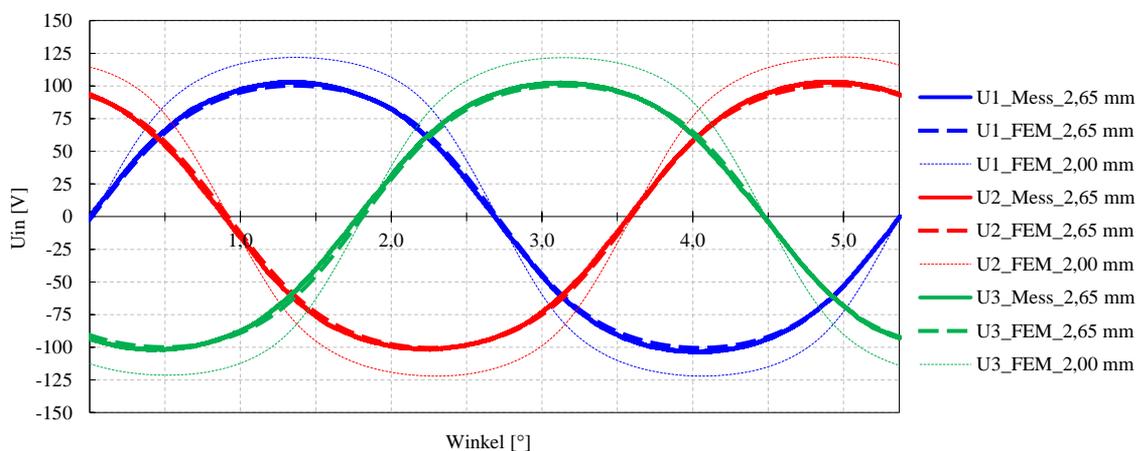


Abbildung 41: Vergleich der Leerlaufspannung der drei Phasen

Fertigungsbedingt konnte die gewünschte Luftspalthöhe von 2 mm nicht realisiert werden. Der reale Luftspalt des Prototyps beträgt 2,65 mm. Dies wirkt sich negativ auf die Betriebseigenschaften aus. In einer nachträglichen Simulation konnte gezeigt werden, dass die realisierte Maschine die simulierten Eigenschaften gut abbildet. In Abbildung 41 wird deutlich, dass  $U_{1,2,3}$  gemessen und simuliert mit dem realen Luftspalt von 2,65 mm genau identisch sind. Rechnet man mit der geforderten Luftspalthöhe von 2 mm, werden die nötigen Spannungswerte erreicht.

### 5.1.7 Generatoreinheit

Wie in Abbildung 42 dargestellt, wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Ecoligent ein verbessertes Konzept für eine Generatoreinheit mit integriertem Rotorlager und Bremse entwickelt. Der Generator kann oben am Turm der Windkraftanlage verbaut werden. Damit wird der Aufbau einer solchen Anlage stark vereinfacht und es können Kosten eingespart werden. Dieser Generator wurde so gestaltet, dass er durch ein Baukastensystem erweiterbar ist. Damit ist eine Leistungsstaffelung von 4 bis 12 kW realisierbar. Außerdem wurde ein Aluminiumguss-Stator gestaltet, der die Serienfertigung des Generators begünstigt.

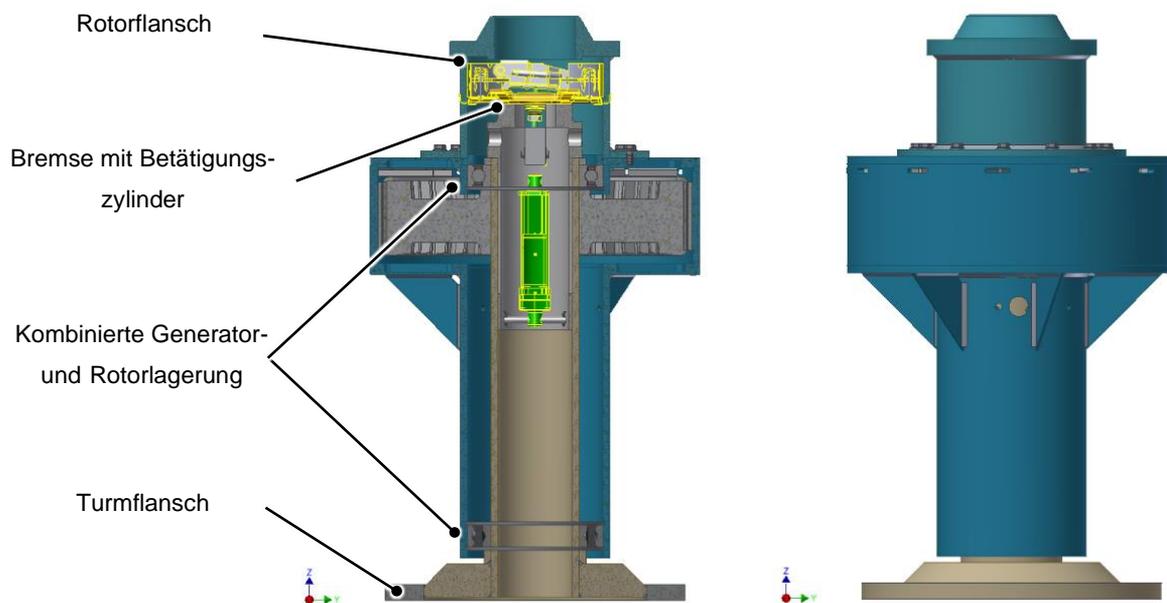


Abbildung 42: 4-kW-Generatoreinheit im Halbschnitt und Außenansicht

## 5.2 Wassergenerator

Im Netzwerk Fluss-Strom Plus wurden verschiedene kleine Wasserkraftanlagen entwickelt und zur Marktreife gebracht<sup>43</sup>. Diese sollen der dezentralen Stromversorgung dienen. Im Rahmen dieses Projekts hat der Lehrstuhl für Mechatronik die Aufgabe, einen Spezialgenerator und dessen Steuerung zu entwickeln, der bei sehr geringer Drehzahl betrieben werden soll. Dabei soll eine elektrische Leistung von bis zu 10 kW erzeugt werden können. Die Wasserkraftanlagen sollen an Flüssen betrieben werden, weshalb die Turbinendrehzahl durch die geringe Fallhöhe und Fließgeschwindigkeit des Wassers limitiert ist. Bei diesem Generator soll das neue Maschinenprinzip der Luftspaltwicklung in Kombination mit einer klassischen, auf den Anwendungsfall angepassten Nutenwicklung zum Einsatz kommen. Diese Konfiguration wird als Kombinationswicklung bezeichnet. Thema dieses Kapitels ist die Auslegung der Maschine in Wechselwirkung mit den Anforderungen des geplanten Standorts der Anlage [111]. Außerdem werden die mechanische Fertigung der Wicklung und die Montage der Maschine beschrieben [48].

Die Fertigung der Generatorbauteile wurde von der Firma Großenhainer Maschinenbau GmbH übernommen. Diese wird aber nicht genauer beschrieben, da keine besonderen Verfahren zum Einsatz kamen. Die Entwicklung der Steuerung wurde von der Ematik GmbH übernommen. Der Generator ist für die Anwendung im universellen Staudruckwasserrad (uSW) der Firma Krause Bauplanung ausgelegt worden. Die Koordination der einzelnen Projektpartner und eine offene Kommunikation der Ergebnisse stellt einen wichtigen Teil der Projektarbeit dar.

### 5.2.1 Stand der Technik

Die derzeit als Wassergenerator eingesetzten Maschinen sind durch folgende Spezifikationen gekennzeichnet:

- Asynchronmaschine mit Getriebe
- ca. 1500 U/min, 5...10 kW
- Wirkungsgrad < 90 %

Alternativ finden getriebelose Torquemotoren Anwendung mit:

- ca. 5 kW
- 80 ... 100 U/min
- Wirkungsgrad > 85 % (vgl. Sanho SHF770)

Das Lastenheft des Projekts orientiert sich an den erwähnten Maschinenkennwerten. Es ist jedoch eine höhere Energieeffizienz gefordert:

---

<sup>43</sup> <http://www.flussstrom.exfa.de/> Stand: 2020-11

- getriebelose Anwendung
- ca. 10 kW,  $n \leq 30$  U/min
- Wirkungsgrad  $> 90$  %.

Die angestrebten Parameter orientieren sich an den Anwendungen Kaskade, fischfreundliches Wehr und universelles Staudruckwasserrad. Die Wahl fiel auf diese Objekte, weil hier eine gute Anpassung an die wassertechnischen Parameter und ein Austausch der genutzten Generatoren möglich ist. So können die verschiedenen Generatorarten auf den Anlagen verglichen werden.

## 5.2.2 Auslegung

Um eine gute und wirtschaftliche Maschinenauslegung vornehmen zu können, musste zuerst die Bemessungsleistung des Generators festgelegt werden. Dazu werden Daten zum geplanten Standort sowie zur Turbinenform und den entsprechenden Betriebseigenschaften benötigt. Außerdem wurden verschiedene Einsatzszenarien berücksichtigt.

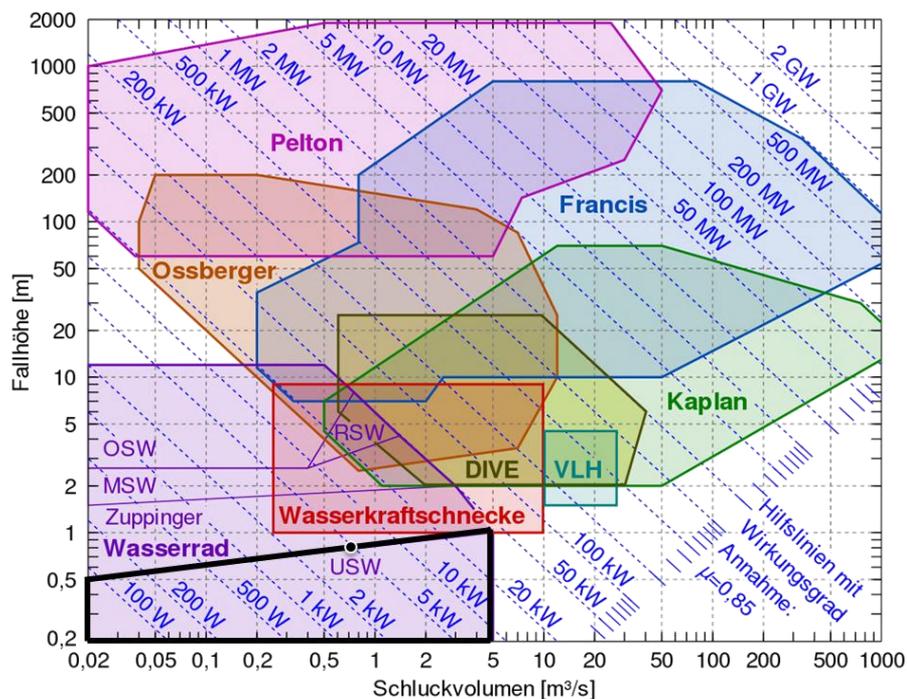


Abbildung 43: Einordnung des uSW bezüglich anderer Turbinenarten<sup>44</sup>

Der Generator soll an einer Staudruckmaschine betrieben werden. Diese Maschinen wandeln den Staudruck des Wassers in eine rotierende Bewegung um. Diese Bewegung ist durch eine bestimmte Drehzahl und ein bestimmtes Moment charakterisiert. Die Regelung der Maschine

<sup>44</sup>[https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserturbine#/media/Datei:Kennfeld\\_Wasserturbinen.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserturbine#/media/Datei:Kennfeld_Wasserturbinen.svg) Stand 2019-12

geschieht über die Anpassung des Wasserniveaus im Zufluss. Die Wirkungsweise der Maschine basiert auf dem hydrostatischen Prinzip. In der Literatur wird das Staudruckwasserrad mit einem mittelschlächtigen Wasserrad verglichen. Maßgeblich für das entstehende Moment sind der Volumenstrom  $Q$ , die Dichte des strömenden Mediums  $\rho$  sowie der Hebelarm und die Richtungsänderung, die das Wasser in der Turbine erfährt (siehe Anhang 6).

Die theoretische Leistung des Laufrades ( $P_{th}$ ) ergibt sich aus der Drehzahl ( $n$ ) und dem Drehmoment ( $M_T$ ), das durch das Wasser aufgebracht wird:

$$P_{th} = \omega \cdot M_T = \frac{2}{60} \cdot \pi \cdot n \cdot M_T, \text{ mit } [\text{Nm} \cdot \text{s}^{-1} = \text{W}] \quad \text{Gl. 5.4}$$

Für das universelle Staudruckwasserkrafttrad am geplanten Standort wird eine Turbinendrehzahl von 20 Umdrehungen je Minute und ein Moment ( $M_T$ ) von 3820 Nm prognostiziert. Am Standort existiert eine Fallhöhe von ca. 7,5 Metern.

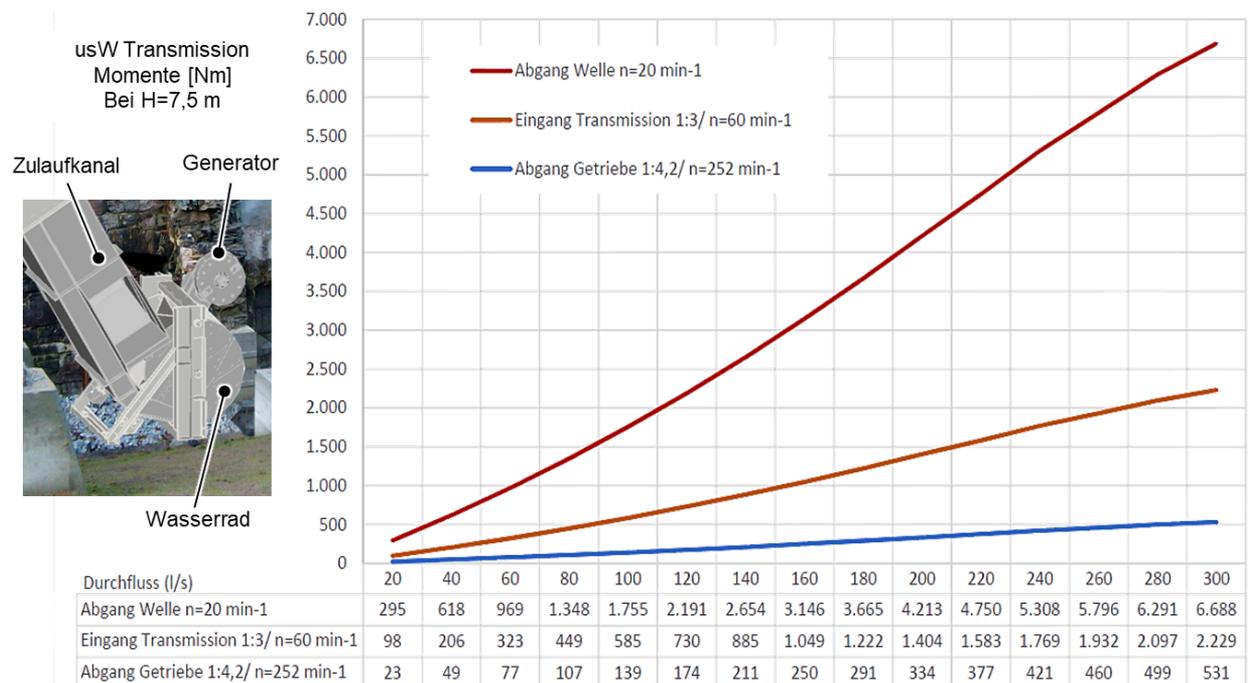


Abbildung 44: Prognostizierte Drehmomentkennlinie des uSW mit Darstellung der Anlage<sup>45</sup>

Das Wasserrad wird zuerst im Leerlauf auf Drehzahl gebracht. Dann wird der Generator zugeschaltet. Dabei wird mit einem Drehzahleinbruch auf zwei Drittel der Leerlaufdrehzahl gerechnet. Anlagenbedingt wird ein Vorgelege eingesetzt, um die Generatorachse von der Wasserradachse zu entkoppeln. Dies ist nötig, um den Generator gegen Hochwasser zu schützen. Der Generator wird über dem Wasserrad angeordnet und mit einem Kettentrieb verbunden. Die Übersetzung beträgt aus Generatorsicht nur 1:3, um einen möglichst geringen Verschleiß

<sup>45</sup> Angaben und Abbildung von Krause Ingenieurbüro für Bauplanung, [www.krause-plauen.de](http://www.krause-plauen.de) Stand: 2016-11

an den Getriebeteilen sicherzustellen. Der Generator wird also bei 60 Umdrehungen je Minute betrieben. Es ergibt sich ein Drehmoment von 885 Nm an der Generatorwelle. Auch diese reduzierte Anforderung stellt bereits eine Herausforderung dar, der Windgenerator wurde für ein Antriebsmoment von nur ca. 200 Nm ausgelegt. Dies bedeutet eine Steigerung um den Faktor 4 zum Vorgängerprojekt.

Für den Anwendungsfall wurden drei mögliche Einsatzszenarien erarbeitet: Zuerst wurde ein großer 10-kW-Generator vorgeschlagen. Dieser wäre jedoch für viele Standorte überdimensioniert. Als Zweites wurde eine Variante mit zwei koppelbaren 5-kW-Generatoren durchgerechnet. Als dritte Lösung wurde ein leistungsumschaltbarer 5-kW-Generator in Erwägung gezogen. Diese Variante basiert auf einer intelligenten Spulenauslegung, die es ermöglicht, mittels Umschaltens der Phasenleiter einen zweiten Nennbetriebspunkt mit niedrigerer Spannungslage zu fahren. Dadurch kann der Generator bei 252 U/min betrieben werden, was die elektrische Leistungsabgabe auf 10 kW steigert. In einer Vorbetrachtung wurden ein Zwei- und ein Dreiphasensystem untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung für den Anwendungsfall geprüft. Außerdem wurde geprüft, ob die Kombinationswicklung in diesen Systemen realisierbar ist. Dazu wurden verschiedene Probekörper hergestellt und bewickelt. Dabei hat sich herausgestellt, dass ein Dreiphasensystem besser geeignet ist und als Kombinationswicklung fertigbar ist. Die Grobauslegungsdaten der elektromechanischen Ebene wurden in das Konstruktionswerkzeug eingetragen und die analytischen Berechnungen und Auslegungen konnten durchgeführt werden. Nun wurde mit der Feingestaltung begonnen, indem das CAD-Modell verknüpft wurde. Wie im Kapitel 4.6 dargestellt, wurden dazu die Maße in den Bauteilskizzen in Inventor mit Formeln und Formfaktoren definiert. Ein frühes Stadium der Feingestaltung ist in Abbildung 45 dargestellt:

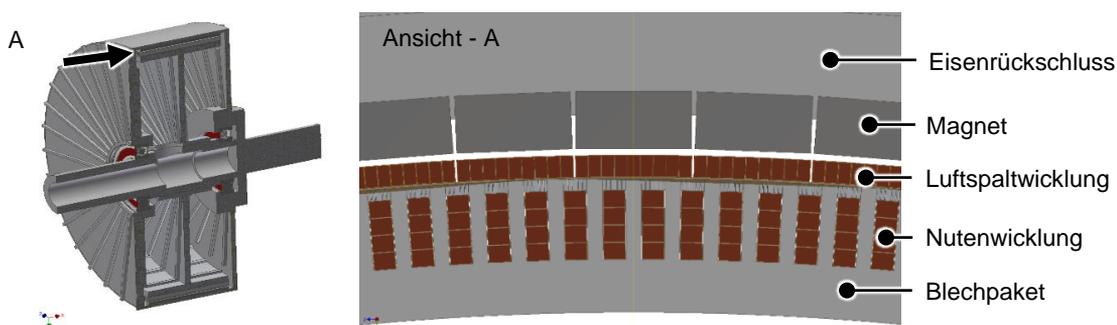


Abbildung 45: CAD-Entwurf des Generators im Halbschnitt und aktive Teile der Maschine

Eine Besonderheit des Entwurfs besteht darin, dass Nuten im Rotor vorgesehen sind, in die die Magneten eingesetzt werden können. Das Werkzeug wurde um die Geometrieparameter der Kombinationswicklung erweitert. Die Berechnungsformeln und die Parameterbeziehungen mussten aktualisiert werden. Besonderes Augenmerk wurde auf die neuen Verschaltungsmöglichkeiten der Statorspulen gelegt. Die Luftspaltwicklung muss mit der Nutenwicklung in

Reihe geschaltet werden, um die Spannung und die Induktivität zu erhöhen. In den Motoranwendungen ist die Wicklungszahl meist eins. Für die Generatoranwendung hat sich die Wicklungszahl Drei als günstig erwiesen, aufgrund der geringen Drehzahlen der betrachteten Turbinen. Deshalb wurden drei Leiter pro Phase für die Luftspaltwicklung vorgesehen. Da die induzierte Spannung pro Leiter in der Nutenwicklung etwas geringer ausfällt, wurden dort vier Leiter eingesetzt, um die gleiche Spannungslage zu erreichen. Die Leiterquerschnitte wurden dabei so konfiguriert, dass die elektrischen Widerstände von Luftspaltwicklung und Nutenwicklung gleich waren.

Im Werkzeug wurde die Parametrierung ausgehend von den aktiven Teilen von innen nach außen vorgenommen (siehe Kapitel 4.5). Die abstrakten Grobauslegungsdaten wurden somit in eine konkrete geometrische Form überführt. Bei der Halbzeugauswahl wurden Normreihen sowie Fertigungstoleranzen berücksichtigt.

Zusätzlich ist es in diesem Stadium möglich, die Formgebung des gesamten Generators im CAD zu betrachten, da diese mit dem Werkzeug verknüpft ist. Ein adaptiver und softwaregestützter Generatorentwurf steht somit zur Verfügung. Zur Validierung des Entwurfs wurden die aktiven Teile in ANSYS Maxwell importiert und nachgerechnet. Relevante Größen sind dabei der Verlauf des B-Feldes, die in den Leitern induzierte Spannung, die Höhe des Rastmoments und die Verlustleistung im Vollblechschrittstator und in den Drähten. Im Gegensatz zu der normalen Luftspaltwicklung wird hier ein genutetes Blechpaket verwendet. Durch den diskreten Verlauf des B-Feldes durch das Blechpaket entsteht ein Rastmoment. Dessen maximale Höhe ist auf ca. 2 % des Nennmomentes der Maschine zu begrenzen [10]. Die Ergebnisse der ersten Iteration sind in Abbildung 47 dargestellt:

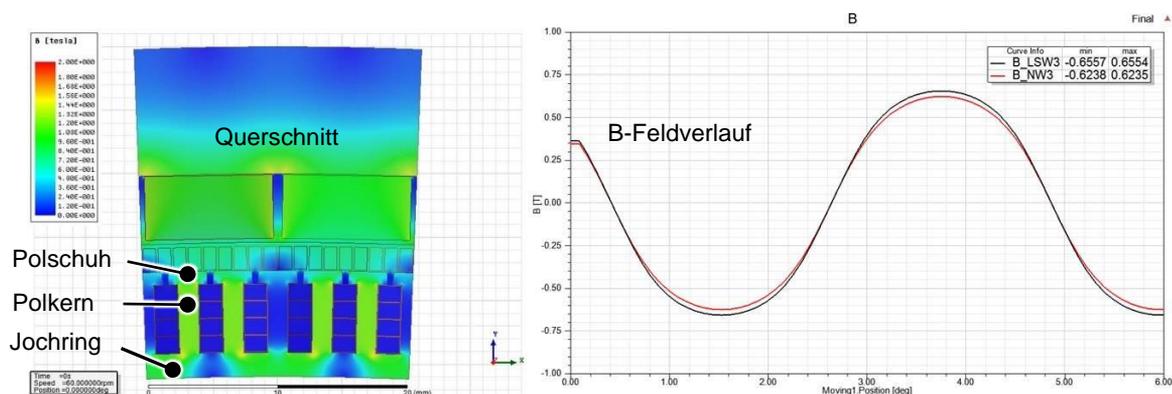


Abbildung 46: Erste Iteration der elektromechanischen Auslegung

Es hat sich gezeigt, dass die geforderten Parameter eingehalten werden können. Die induzierte Spannung ist erwartungsgemäß in den Leitern der Nutenwicklung etwas geringer. Hier besteht Verbesserungspotenzial, da die maximale Feldstärke in den Polkernen deutlich unterhalb der Sättigungsmagnetisierung liegt. In diesem Fall könnten die Leiterquerschnitte in der

Nut erhöht werden, um die ohmschen Verluste zu reduzieren. Außerdem mussten die Polschuhe vom Polkern getrennt ausgeführt werden, um die Drähte von oben in die Nut einlegen zu können. Dies ist eine Grundanforderung beim Wickeln mit Wickeldraht. Ein seitliches Einschleiben von einzelnen Leiterstäben, wie es von Hair-Pin-Wicklungen bekannt ist, wurde dabei ausgeschlossen. Diese Teilung wurde durch ein geblechtes Nuteninlay realisiert. Der Aufbau des geblechten Inlays wird weiter unten im Kapitel Fertigung beschrieben.

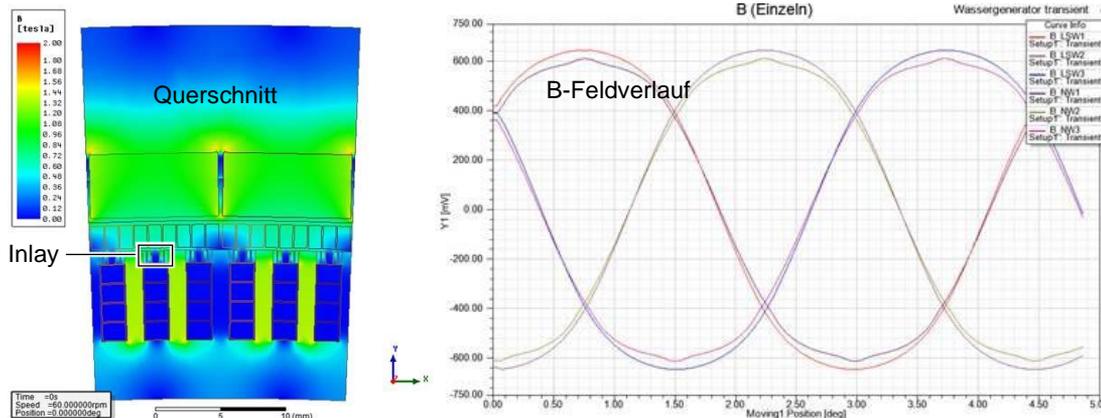


Abbildung 47: Zweite Iteration der elektromechanischen Auslegung

In der zweiten Iteration wurde eine passende Auslegung gefunden, die als Grundlage für die weitere Detaillierung des Entwurfs genutzt wird. Bei dieser wurden die Polkerne, wie beschrieben, etwas dünner ausgeführt. Außerdem wurde die Längsblechung der Inlays modelliert. Zuerst wurde die Verschaltung der Statorwicklungen geplant: Wie bereits erwähnt, müssen die Statorspulen so verschaltet werden, dass sich die Induktivität und die induzierte Spannung erhöhen und gleichzeitig das angestrebte Spannungsniveau bei Nenndrehzahl erreicht werden kann. Die nötige Leiteranzahl und Anordnung sowie die entsprechende Querschnittsfläche wurden in der Grobauslegung bestimmt. Für die Verschaltung der Leiter wurden Keramiklusterklemmen verwendet. Diese können Temperaturen bis zu 350 °C ertragen und sind preisgünstig. Der Sternpunkt wurde mit einer Sternpunktschiene realisiert und in der Maschine am Stator befestigt. Der Anschluss der Phasen wird über ein 6-poliges Motorklemmbrett vorgenommen, das in einem Motorklemmkasten am Ende der Befestigungswelle montiert wird. Dazu müssen die Phasenanschlüsse und die Messleitungen in der Maschine zugentlastet und durch die Hohlwelle nach außen geführt werden. Für den Betrieb am Prüfstand wird jedoch kein wasserdichter Anschlusskasten benötigt. Die beiden unterschiedlichen Verschaltungsarten der Wicklung sind in der folgenden Abbildung 48 dargestellt.

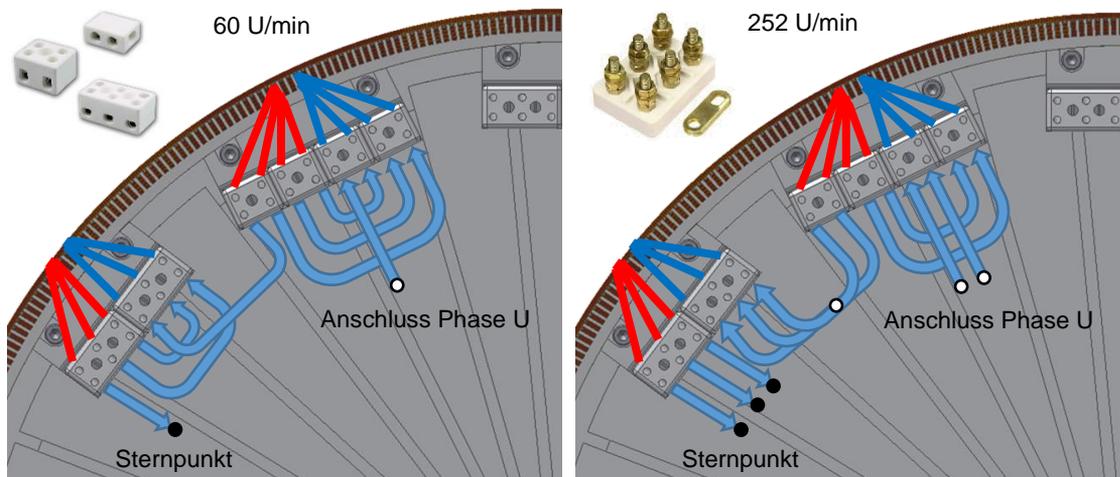


Abbildung 48: Anschlussschema einer Phase für Nenndrehzahlen 60 und 252 U/min

Die Luftspaltwicklung wurde mit drei Leitern pro Strang bewickelt und benötigte daher eine 6-polige Anschlussklemmenleiste, für Phaseneingang (blau) und Phasenausgang (rot). Die Nutwicklung wurde mit vier Leitern ausgeführt und deshalb mit einer 8-poligen Klemme angeschlossen.

### 5.2.3 Konstruktion

Es ist davon auszugehen, dass die Maschinen meist im Freien aufgestellt werden, weshalb ein wasserdichtes Gehäuse zu verwenden ist. Laut Anforderungsliste ist ein Gehäuse mit mindestens dem IP-55-Standard vorgeschrieben. Daher kann nur eine indirekte Luftkühlung oder eine Wasserkühlung des Stators realisiert werden. Die Verwendung einer Wasserkühlung wurde von den am Projekt beteiligten Anlagenbetreibern aufgrund des Zusatzaufwandes ausgeschlossen. Der Wärmeaustausch muss deshalb über Kühlrippen, also über Konvektion und Wärmedurchgang, geschehen. Da eine luftgekühlte Ausführung betrachtet wird, beeinflussen die geometrische Form der Maschine und die verwendeten Werkstoffe maßgeblich die Wärmeabfuhr aus dem System und somit die sich an den Bauteilen einstellende Temperatur.

Dabei erweist sich die Betrachtung des thermischen Verhaltens der Maschine bei gleichzeitiger Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften als aufschlussreich. Mithilfe des thermischen Modells konnte gezeigt werden, dass ein dünnwandiger verrippter Stator vorteilhafte thermische Eigenschaften aufweist. Das Gewicht des Stators konnte reduziert und die strukturell bedingte Wärmeabfuhr gleichzeitig gesteigert werden. Das zugrunde liegende Modell ermöglicht eine beschleunigte normgerechte, mechanische und thermische Auslegung. Während der Arbeit mit dem Werkzeug kann der Bediener alle Eingaben und Berechnungen über Eingabemasken steuern. In der folgenden Darstellung (Abbildung 49) ist die Benutzungsoberfläche (GUI) des Werkzeugs dargestellt:



des Maschinenmodells in weniger als 10 Minuten zu realisieren. Der so generierte Generatorentwurf wurde schließlich zur fertigungstechnischen Überarbeitung und Produktion an die Firma Metalltechnik Großenhain übergeben.

#### 5.2.4 Kostenplanung

Wie in Kapitel 4.8 erläutert, wurde im Konstruktionswerkzeug eine Kostenplanungsebene integriert. Im vorliegenden Kapitel soll die entsprechende Anwendung für den Wassergenerator beschrieben werden. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die Fertigung eines Generatorprototyps, wie er im Projekt ‚Fluss-Strom Plus‘ realisiert wurde. Die Stückzahl (n) in der Berechnung ist also eins. Mit dem Rohteilkonfigurator wird jedem Bauteil ein passendes Rohenteil zugeordnet:

Tabelle 11: Rohteilkonfigurator mit den Daten des Wassergenerators

**Kostenrechnung**      Geplante Stückzahl:       Statorbauform:

| Rohteilkonfigurator |                 |              |                       |          |                    |                      |                   |
|---------------------|-----------------|--------------|-----------------------|----------|--------------------|----------------------|-------------------|
|                     | Name            | Rohteilart   | Bearbeitungsverfahren | Material | Werkzeugkosten [€] | Bearbeitungszeit [h] | Bauteilkosten [€] |
| Stator              | Schweißnaht     | Draht        | Schweißen             | AlMgSi1  | 0                  | 6,50                 | 686,63            |
|                     | Statorwelle     | Rohr         | Drehen                | S355     | 0                  | 1,94                 | 197,93            |
|                     | Statornabe      | Rohr         | Drehen                | AlMgSi1  | 0                  | 0,46                 | 49,93             |
|                     | Statorsteg      | Platte       | Drehen                | AlMgSi1  | 0                  | 5,68                 | 571,27            |
|                     | Statorrohr      | geschw. Rohr | Drehen                | AlMgSi1  | 0                  | 7,60                 | 764,09            |
|                     | Rippen          | Blech        | Sägen                 | AlMgSi1  | 0                  | 0,78                 | 81,71             |
|                     | Stator gefräst  | Blech        | Fräsen                | AlMgSi1  | 0                  | 54,23                | 5426,85           |
|                     | Stator gegossen | Pulver       | Sandguss              | AlMgSi1  | 3500               | 8,00                 | 4388,02           |
| Rotor               | Antriebswelle   | Rund         | Drehen                | S355     | 0                  | 0,80                 | 83,37             |
|                     | Antriebsflansch | Rohr         | Drehen                | S355     | 0                  | 0,71                 | 74,34             |
|                     | Lagerschale I   | Rohr         | Drehen                | S355     | 0                  | 0,37                 | 41,05             |
|                     | Lagerschale II  | Rohr         | Drehen                | S355     | 0                  | 0,37                 | 41,05             |
|                     | Lagerschlid I   | Blech        | Drehen                | AlMgSi1  | 0                  | 6,99                 | 702,38            |
|                     | Lagerschlid II  | Blech        | Drehen                | AlMgSi1  | 0                  | 6,99                 | 702,38            |
|                     | Rotorrohr       | Rohr         | Drehen                | S235     | 0                  | 5,38                 | 541,81            |

In der Tabelle sind die einzelnen Bauteile des Stators blau markiert. Die Variante mit gefrästem Stator ist grün hinterlegt und jene des gegossenen Stators rot. Die gefräste Variante ist am zweit teuersten, da der Stator hier aus einem massiven Aluminiumblock gefräst werden muss, was eine sehr hohe Bearbeitungszeit zur Folge hat. Die gegossene Variante ist noch etwas teurer, da eine Gussform hergestellt werden muss. Der geschweißte Stator wurde daher als kostengünstigste Variante identifiziert. Nur die Statorwelle muss in allen drei Fällen aus Stahl gefertigt werden, wobei eine Drehbank zum Einsatz kommt. Alle Rotorteile, in der Tabelle braun hinterlegt, werden ebenfalls auf der Drehbank hergestellt, obwohl zum Teil auch Bohrungen und Rippen zu fertigen sind. Das muss vorher erfolgen oder die entsprechenden Teile müssen in einem Dreh-Fräszentrum hergestellt werden.

Zur Kostenkalkulation des Generators wurden alle benötigten Daten aus den Projektunterlagen in die Kostentabelle eingetragen:

Tabelle 12: Kostentabelle mit den Daten des Wassergenerators

| Kostentabelle        |               |                 |  |                    |                   |                  |
|----------------------|---------------|-----------------|--|--------------------|-------------------|------------------|
| Name                 | Anzahl [Stk.] | Einzelpreis [€] | Montagezeit je Stück [h <sup>1</sup> ] | Werkzeugkosten [€] | Montagekosten [€] | Gesamtkosten [€] |
| Stator               | 1             | 2351,56         | 2,00                                   | 0                  | 59,36             | 2410,92          |
| Rotor                | 1             | 2186,37         | 2,00                                   | 500                | 59,36             | 2745,73          |
| Nutenwicklung        | 1             | 2793,6          | 80,00                                  | 2424,27            | 2374,30           | 7592,17          |
| Luftspaltwicklung    | 1             | 2038,57         | 80,00                                  | 2407,27            | 2374,30           | 6820,14          |
| Magneten             | 162           | 14              | 0,08                                   | 100                | 400,66            | 2768,66          |
| Blechkpaket          | 1             | 1000            | 4,00                                   | 51,65              | 118,71            | 1170,36          |
| Kugellager           | 2             | 68,55           | 0,50                                   | 0                  | 29,68             | 166,78           |
| Passfedern           | 2             | 8,91            | 0,03                                   | 0                  | 1,78              | 19,60            |
| Schrauben            | 92            | 11,94           | 0,03                                   | 0                  | 91,01             | 1189,49          |
| Sicherungsringe      | 1             | 4,05            | 0,08                                   | 0                  | 2,37              | 6,42             |
| Preis pro Generator: |               |                 |  |                    |                   | <b>24890,28</b>  |

Die Gesamtkosten für den Generator betragen demnach 24890,28 €. Der Anteil der Materialkosten an den Gesamtkosten ist mit 3,17 % vergleichsweise gering. Der Anteil der Bauteilkosten beträgt jedoch 18,23 %. Somit sind der Einfluss der Fertigungsverfahren und deren Parameter dominant. Wie zuvor erläutert, konnten diese Parameter jedoch nur abgeschätzt werden, eine genauere Betrachtung der Einflüsse der Halbzeuge ist hingegen nicht möglich.

Das äußere Aluminiumrohr des Stators (Statorrohr) ist nicht in den Fertigungsprogrammen der betrachteten Hersteller enthalten und muss separat hergestellt werden, was einen zusätzlichen Fertigungsschritt darstellt. Aus diesem Grund ist das Rohr im Vergleich mit den anderen Halbzeugen des Stators am teuersten. Alle aufgelisteten Halbzeuge des Stators müssen durch Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) verbunden werden. Danach muss der Lauf zwischen Wellen- und Blechkpaketsitz durch Drehen in einer Aufspannung hergestellt werden. Die Kosten des Stators nehmen dann einen Anteil von 9,44 % bezogen auf die Generatorgesamtkosten ein. Erst bei höheren Stückzahlen ist zu erwarten, dass ein Gießen des Stators zu geringeren Stückkosten führen wird. Das Fräsen aus dem Vollen sollte vermieden werden, da dort nur geringe Skalierungseffekte durch die Serienfertigung zu erwarten sind. Die Bauteilkosten des Rotors machen insgesamt einen Anteil von 8,78 % bezogen auf die Generatorgesamtkosten aus, wobei jeweils günstige Halbzeuge in den Lieferprogrammen verfügbar sind. Ein weiterer Kostenfaktor sind die Neodym-Eisen-Bor-Magnete. Deren Preisentwicklung hängt von der Weltmarktsituation ab und soll hier nicht weiter betrachtet werden. Der Hauptkostentreiber ist die Fertigung der Kupferwicklungen, die mit 57,9 % an den Gesamtkosten zu Buche schlägt. Soll auch für das Statorrohr ein passendes Halbzeug verwendet werden, müsste der wirksame Hebelarm der Maschine um ca. 50 mm auf 200 mm verkleinert werden. Die Maschine muss also verlängert werden, um die gleiche Wandlungskonstante zu realisieren.

Um den Längenzuwachs zu berechnen, muss eine Skalierungsregel hergeleitet werden. Dazu kann die Gleichung 4.3 in die Gleichung 2.18 eingesetzt werden:

$$k = r_{m\_ph} \cdot l \cdot \bar{B} \cdot n_W \cdot n_S \cdot \frac{r_{i\_fe} \cdot 2 \cdot \pi}{b_{mag} + b_S} \quad \text{Gl. 5.5}$$

Der mittlere Radius der Phase und der Innenradius des Eisenrückschlusses sind sehr ähnlich, woraus sich folgende Skalierungsregel für eine Maschine mit Luftspaltwicklung ergibt:

$$l_1 \cdot r_1^2 = l_2 \cdot r_2^2 \quad \text{Gl. 5.6}$$

Errechnet wird ein Längenzuwachs von 112,5 mm, sodass die gesamte Maschine um ca. 50 % verlängert werden müsste. Der Kostenzuwachs in den anderen Bauteilen übersteigt die Kosteneinsparung durch die Verwendung eines passenden Halbzeugs für das Statorrohr wesentlich. Der Wirkradius hat einen dominanten Einfluss auf die Maschinenkonstante. Falls der Bauraum vorhanden ist, sollten immer Maschinen mit einem hohen Radius-zu-Länge-Verhältnis ausgelegt werden. Dies spart Material und ist günstig für die elektromechanische Wandlung. Ausschließlich die Lagerung der Rotoren wird aufwendiger. Bei Maschinen mit einem sehr kleinen Radius-zu-Länge-Verhältnis kann die Biegesteifigkeit der Rotoren das limitierende Kriterium sein.

### 5.2.5 Fertigung

Zur normgerechten Gestaltung des Generators wurden alle relevanten Normen von der Normstelle der Universitätsbibliothek Magdeburg bereitgestellt (siehe Kapitel 2.1). Die mechanische Fertigung der Generatorbauteile hat die Firma Metalltechnik Großenhain übernommen. Um wickeln zu können, werden die mechanischen Bauteile des Stators benötigt. Dessen Geometrie (Außendurchmesser, Tiefe, Nutung des Blechpaketes) hängt stark von der elektromechanischen Auslegung des Generators ab. Deshalb mussten die endgültigen Maße mit der Firma Metalltechnik Großenhain abgestimmt werden, da die aufwendigen Auslegungs- und Optimierungsrechnungen noch liefen, während bereits die fertigungstechnische Optimierung begonnen hatte.

Anfang des Jahres 2017 war dann der Stator mit Blechpaket in der endgültigen Geometrie gefertigt und wurde von der Firma Metalltechnik Großenhain nach Magdeburg übersendet. Allerdings waren Nacharbeiten am Blechpaket erforderlich, da aus fertigungstechnischen Gründen auf ein Verbacken der Bleche verzichtet worden war. Dies sollte beim Einlegen der Nutenwicklung dafür sorgen, dass die Bleche sich ausrichten können und so ein maximaler Füllfaktor erzielt wird. Die Bleche müssen dann mit Zugstangen verschraubt und nachträglich von unten vergossen werden. Aus Gründen der Wärmeleitung und der Zentrierung des Blechpaketes konnte diese Lösung aber nicht weiterverfolgt werden. Das Blechpaket wurde mit

Blechstreifen ausgerichtet und zentriert und dann mit gut wärmeleitfähigem Epoxidharz von innen vergossen. Dazu mussten mittig durch das Statorrohr Bohrungen eingebracht werden. Zur Realisierung der Nutenwicklung wurden fünf verschiedene Nutenisolutionsvarianten erarbeitet (siehe Abbildung 50). Variante A ist durch die Verwendung von Isolationslack gekennzeichnet. In Wickelversuchen hat sich jedoch herausgestellt, dass diese Variante keinen ausreichenden Schutz gegen Spannungsdurchschlag bietet. Außerdem hat es sich als schwierig erwiesen, die Nut gleichmäßig zu beschichten. In der Variante B wird mit einer einseitig klebenden Isolierfolie gearbeitet. Das Trägermaterial der Folien zeichnet sich durch eine hohe Durchschlagsfestigkeit bei sehr geringen Schichtstärken aus. Dabei hat sich jedoch gezeigt, dass die Folie bei minimaler mechanischer Beanspruchung durch scharfe Bauteilkanten oder mechanische Partikel Fehlstellen entwickelt, die zu Spannungsdurchschlägen führen. In den Varianten A und B müssen die Drähte in der Nut verklebt werden. Dieser Prozess ist nicht definiert durchführbar. In Variante C kommt hingegen konventionelles Isolationspapier zum Einsatz, womit die geforderte Spannungsfestigkeit nachgewiesen werden konnte. Außerdem ließ sich durch die Wahl einer passenden Materialstärke des Papiers eine leichte Presspassung realisieren, die den Draht in der Nut stabilisiert.

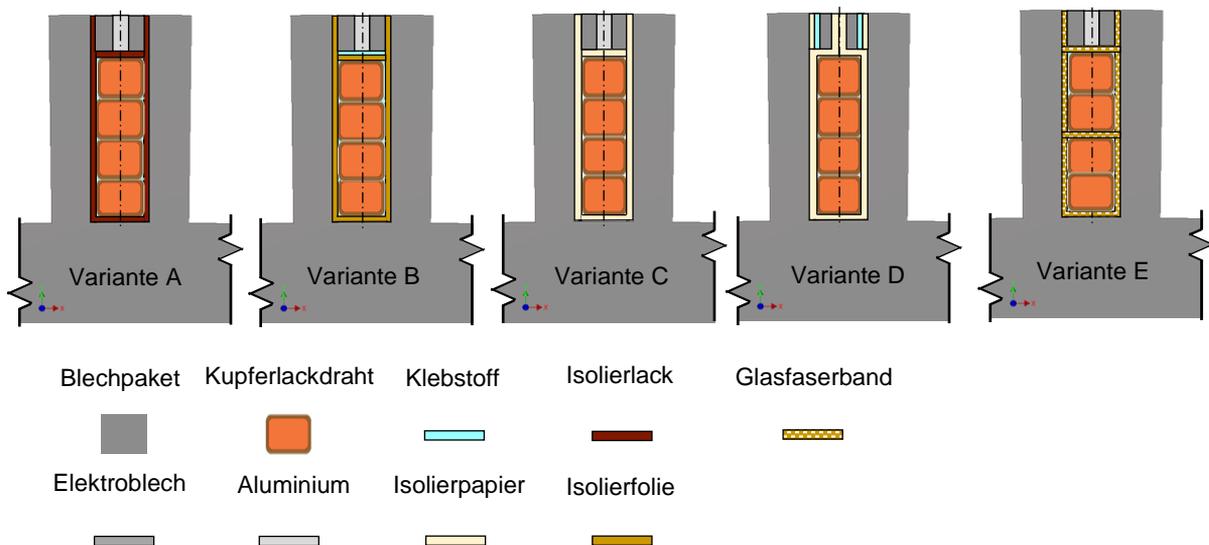


Abbildung 50: Isolutionsvarianten der Nutenwicklung

In der Variante D wird das Isolationspapier mittels zwei Elektrolechstreifen oberhalb der Drähte verstemmt. Diese Konfiguration bietet den Vorteil, dass die Wirbelstromverluste, die im Mittelteil des Inlays entstehen, entfallen. In der Variante E wird der Kupferdraht mit Glasfaserband umwickelt und in die Nut eingebracht. Es ist auch denkbar, die Nut zuvor mit dem Band zu bestücken und den Draht dann einzulegen. Glasfaserbänder lassen sich gut verarbeiten und sind tränkbar. Der Isolationsschutz während der Verarbeitung ist jedoch nicht ausreichend.

Zusätzlich zu den Isolationsvarianten gibt es mehrere Varianten für die Ausführung der Nuteninlays. In der folgenden Darstellung (Abbildung 51) sind verschiedene relevante Kombinationen dargestellt.

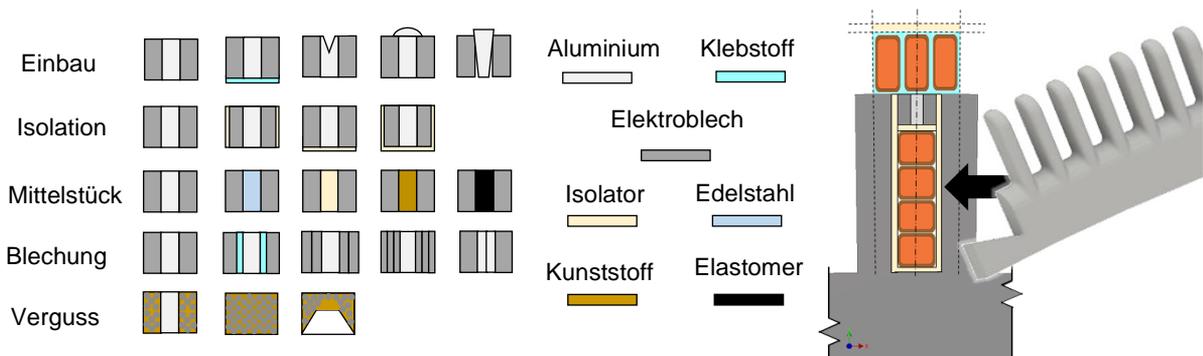


Abbildung 51: Inlay-Morphologie und Vorzugsvariante mit Polyamid-Endkappe

In Tests mit verschiedenen Inlayvarianten hat sich gezeigt, dass für den Einbau das Eindrücken mit leichtem Übermaß, also ein Einstemmen, die beste Lösung darstellt. Die Isolation wird durch das Einlegen eines Papierstreifens als Deckschieber über der Wicklung realisiert. Als Mittelstück wurde ein Aluminiumstreifen gewählt. Dieser kann beim Einstemmen des Inlays leicht nachgeben und somit Formabweichungen im Blechpaket entsprechend ausgleichen. Außerdem wird nach der Fertigstellung der Nutenwicklung das Blechpaket leicht angeschliffen und gesäubert, um eine definierte Oberflächenrauheit zu erhalten. So wird eine durchgehend metallische Oberfläche generiert, die die Applikation der Luftspaltwicklung erleichtert. Die Seitenstreifen der Inlays wurden nicht weiter unterteilt, da bei der geringen Drehzahl (60 U/min) keine großen Wirbelstromverluste entstehen. Da die Elektrobleche nur in speziellen Normdicken hergestellt werden, konnte die optimale berechnete Konfiguration nicht realisiert werden. Falls nicht kornorientierte Bleche nach EN 10303 verwendet werden sollen, lassen sich feine Abstufungen in der Blechung realisieren. In Fertigungsversuchen hat sich jedoch gezeigt, dass die Herstellung so feiner Blechstreifen sehr aufwendig und teuer ist. Des Weiteren ist die Weiterverarbeitung sehr schwierig, da sich insbesondere die Paketierung und das Verkleben oder Verbacken der Streifen aufwendig gestalten. Daher wurden aus zwei verschiedenen starken Blechen (0,35 mm und 0,65 mm) und zwei geeigneten Papierdicken (80 µm und 130 µm) vier Vorzugsvarianten gebildet. Diese wurden wiederum in ANSYS Maxwell modelliert und bewertet. Die Gesamtverlustleistung im Eisenmaterial beträgt lediglich 1,24 W und jene im Mittelstück 1,98 W. Des Weiteren wurde die Inlaygeometrie variiert, um das Rastmoment zu minimieren. Dabei hat sich gezeigt, dass eine Mittelstückbreite von 1,1 mm und eine Inlayhöhe von 1 mm (maximal möglicher Wert) das geringste Rastmoment erzeugen. Dieses entspricht ungefähr 0,5 % des Nenndrehmomentes von ca. 900 Nm.

Bei dieser Simulation wurde insbesondere der Einfluss der Isolation zwischen Inlay und Blechpaket untersucht. Hier ist eine mechanisch stabile und damit dickere Isolationsschicht nötig,

da die Isolation die Kräfte beim Einstemmen des Inlays ertragen können muss. Die Bandage der Luftspaltwicklung ist bisher noch nicht betrachtet worden und wird in der Vorzugsvariante mit dargestellt. Zur Fertigung der Statorwicklung wurde eine Wickelvorrichtung entworfen und aufgebaut. Die automatisierte Wickelmaschine (siehe Kapitel 2.2.4) konnte nicht verwendet werden, da der Generator für diese zu groß ist. Als Grundlage diente die Wickelvorrichtung, die zur Herstellung des Windgenerators genutzt wurde. Diese wurde deutlich vergrößert und massiver ausgeführt. Die Presse am Portal stellt dabei die wichtigste Erweiterung dar (siehe Abbildung 52).

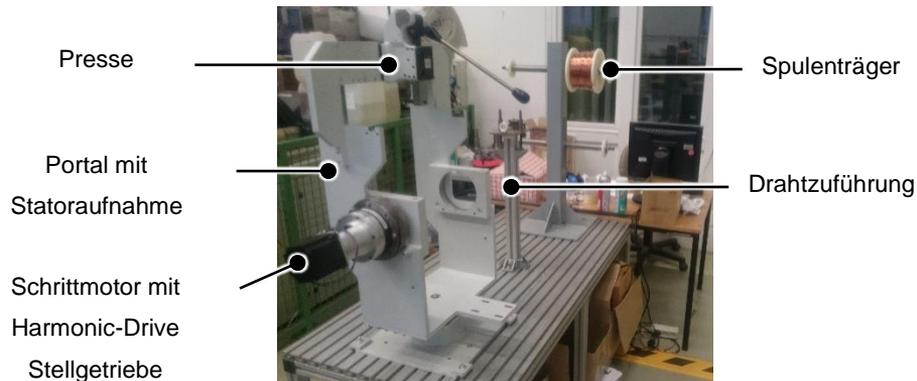


Abbildung 52: Wickelvorrichtung für die Fertigung des Wassergenerators

Die benötigten Teile wurden von der Firma Metalltechnik Großenhain gefertigt. Der Ablauf des Wickelprozesses wurde nach dem Wickelschema aus Kapitel 2.2.4 realisiert. Dabei wurden die Drahtrollen am Spulenträger befestigt. Der Draht wird über eine Drahtzuführung zum Portal geleitet. Dort wurde der Stator eingespannt und über einen Harmonic-Drive-Stelltriebemotor jeweils so weitergedreht, dass der nächste Phasenstrang aufgelegt werden konnte. Die Presse dient dazu, den Draht mit verschiedenen Einziehwerkzeugen definiert in die Nut einzubringen bzw. auf den Stator zu positionieren. Auf der oben beschriebenen Vorrichtung konnte die Fertigung der Statorwicklungen sowie das Einkleben der Magneten realisiert werden. Die Fertigung der Wicklung gliedert sich in vier Phasen:



Abbildung 53: Produktionsphasen der Statorwicklung

Die Verwendung von Nutenkästen zur Isolation hat sich als nicht durchführbar erwiesen. Daher wurde die Isolation der Wicklung durch eine Papierrundumisolation in radialer Richtung und durch Polyamid-Endkappen in axialer Richtung realisiert (siehe Abbildung 54 rechts). Die Isolation wurde vor dem eigentlichen Wickelvorgang am Statorblechpaket angebracht. Dabei muss sichergestellt sein, dass die Endkappen an den Rändern des Stators mit Papier bedeckt sind, um die notwendige Durchschlagsfestigkeit zu erzielen und darüber hinaus den Anforderungen an Luft- und Kriechstrecken gemäß EN 60664-1:2007 bzw. VDE 0110-1 gerecht zu werden.

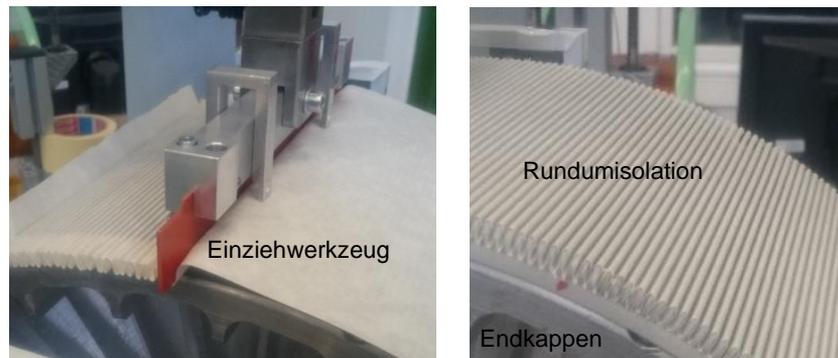


Abbildung 54: Fertigung der Rundumisolation und vollständige Isolation

Die Rundumisolation wurde mithilfe der Presse und einem Einziehwerkzeug direkt vom Band in die Nuten eingezogen (siehe Abbildung 54 links). Die Endkappen-Segmente wurden aus Polyamid per SLS-Rapid-Prototyping-Verfahren hergestellt und seitlich angeklebt. Danach wurde das überschüssige Papier abgetrennt. Das Blechpaket musste, um Durchschläge zu verhindern, vorher abgeschliffen werden. Zum Einziehen der Nutenwicklung wurde ein kombiniertes Presswerkzeug entwickelt (siehe Abbildung 55: links). Dieses Werkzeug realisiert die Wickelkopfformung, drückt gleichzeitig die zuvor erzeugte Wickelbahn ein und fixiert diese, sodass die Bahn beim Formen der Wickelköpfe nicht verrutschen kann.

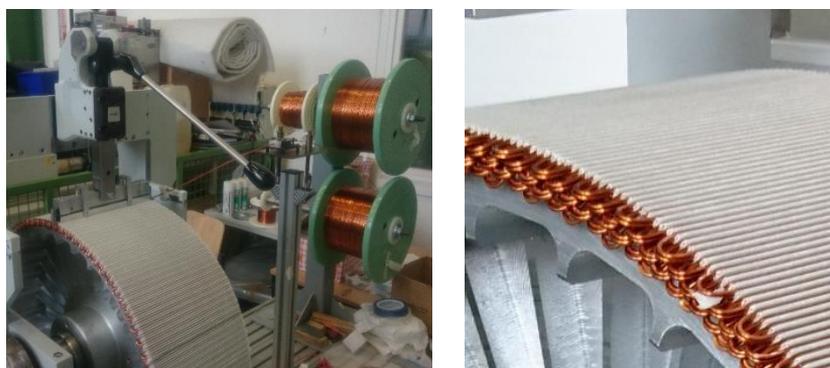


Abbildung 55: Einziehen der Nutenwicklung und vollständig gefertigte Nutenwicklung

Zuerst wurden zwei Drähte gleichzeitig verarbeitet, was jedoch Probleme verursacht hat: Die Wickelköpfe bauen höher auf, da immer zwei Drähte übereinanderliegen (siehe Abbildung 55

rechts). Außerdem zeigte sich der Prozess fehleranfällig und musste oft unterbrochen werden, wenn sich die Drähte verkantet hatten. Bei der Stehspannungsprüfung kam es zudem zu Durchschlägen am Nutgrund durch das Papier hindurch. Daher wurde jeder Draht einzeln eingezogen. Dies wiederum hat sich als sehr sicherer Prozess erwiesen und der Stator konnte zügig bewickelt werden, obwohl insgesamt fast doppelt so viele einzelne Prozessschritte erforderlich waren.

Nachdem die Nutenwicklung fertiggestellt war, wurde der Stator für die Fertigung der Luftspaltwicklung vorbereitet. Ziel dieses Verfahrens ist es, so wenig Nachbearbeitungsschritte wie möglich durchzuführen, sodass nach dem Wickeln nur die Inlays eingebracht werden müssen und die Luftspaltwicklung direkt appliziert werden kann. In Abbildung 51 wurden verschiedene Inlayvarianten vorgestellt. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Vorzugsvariante nicht zu fertigen ist, da sie aus drei separaten Metallstreifen bestand, die jeweils einzeln gehandelt und befestigt werden mussten. Es wurde ein Presswerkzeug entwickelt, das die Streifen aufnehmen kann. Mit einem Ausschubmechanismus realisiert das Werkzeug die gezielte Montage der Streifen. Dieser Prozess hat sich zwar als grundsätzlich durchführbar erwiesen, war aber nicht sauber für die hohe Anzahl der Nuten reproduzierbar. Jeder zweite Versuch war nicht zielführend oder lieferte nicht die erwünschte Qualität, weshalb dieser Ansatz aus Zeitgründen verworfen werden musste. Für eine Serienfertigung bietet er allerdings hohes Potenzial, insbesondere wenn die Blechstreifen vorher oder direkt im Werkzeug vom Band oder Coil abgetrennt werden.

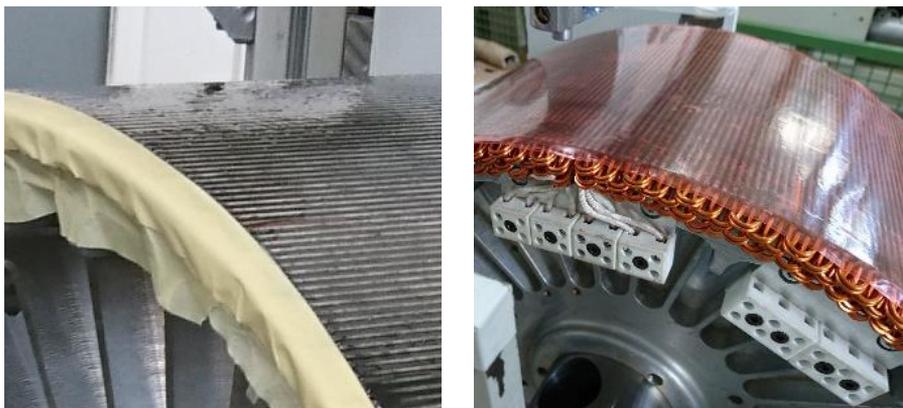


Abbildung 56: Nutenverguss und folierter Stator

Parallel dazu wurde vom Radnabenmotorteam eine Vergusstechnik entwickelt, bei der die Nuten gleichmäßig mit einem eisenpulverhaltigem Vergussharz gefüllt wurden. Dessen magnetische Permeabilität  $\mu$ , auch magnetische Leitfähigkeit, im ausgehärteten Zustand muss dabei so eingestellt werden, dass das Rastmoment minimal, aber gleichzeitig die elektromechanische Kopplung (EMK) nicht geschwächt wird. Außerdem muss es durchschlagsfest sein, da es direkt mit der Wicklung in Berührung kommt. Mit diesem Vergussmaterial wurde der Stator komplett versiegelt (siehe Abbildung 56 links). Danach wurde der Stator abgeschliffen und mit

einem doppelseitigen Klebeband foliert. Dies diente im Folgenden zur Befestigung der Luftspaltwicklung. Die ausschließliche Verwendung von Klebstoff konnte nicht umgesetzt werden, da sich damit die Anforderungen an Prozesszeit und -sicherheit sowie an Durchschlagsfestigkeit nicht erfüllen ließen. Die Enden der Nutenwicklung wurden in den dafür vorgesehenen Klemmleisten befestigt (siehe Abbildung 56 rechts).

Zur Fertigung der Luftspaltwicklung wurde ein weiteres Werkzeug entwickelt, das die Wickelköpfe formt und die Wicklung leicht andrückt, sodass diese beim Formen der Köpfe nicht verrutschen kann. Dazu wird der Stator je Bahn einmal um 180 Grad um seine Hochachse gedreht. Die Positionierung des Wickelstranges zum Stator wurde dabei durch eine Nut im Werkzeug realisiert (siehe Abbildung 57 links). Die Wickelköpfe wurden jeweils auf der Seite gefertigt, die zur Drahtzuführung ausgerichtet ist. Das Wickeln der Luftspaltwicklung mit mechanischen Platzhaltern, die auf der Klebefolie platziert werden müssen, hat sich als nicht durchführbar erwiesen. Die Fertigung der Platzhalter in den nötigen Toleranzen und das nachträgliche Entfernen derselben von der Folie hat sich als zu aufwendig herausgestellt.



Abbildung 57: Aufkleben der Luftspaltwicklung und vollständige Kombinationswicklung

Die drei Phasen wurden gefertigt und danach wurde die Wicklung bandagiert und mit Epoxidharz vergossen. Die Bandage über der Wicklung wurde nachträglich entfernt, um den Luftspalt zwischen Stator und Rotor so klein wie möglich ausführen zu können. Beim Vergießen wurden zwei Pt100-Temperatursensoren an den Wickelköpfen eingelegt. Diese sind meist ein bis zwei Grad wärmer als die Wicklung auf dem Stator, da die Wickelköpfe sich an einigen Stellen gegenseitig überlappen. Bei der Kombinationswicklung kommt hinzu, dass unter der Luftspaltwicklung bereits die Nutenwicklung liegt. Dies erhöht zusätzlich die Temperatur der Wickelköpfe.

Dann wurde die Luftspaltwicklung an die Klemmleiste angeschlossen. Die Klemmleisten wurden verkabelt, um die Reihenschaltung zu realisieren (siehe Abbildung 48). Zusätzlich wurde eine Messleitung eingebaut, um die Einzel-EMKs der Wickelstränge messen zu können. Nachdem die Statorwicklungen gefertigt waren, wurden die Magneten in den Rotor eingeklebt. Der Rotor war ohne Nuten für die Magneten gefertigt worden, weshalb die Wickelmaschine

für die Positionierung eingesetzt werden musste. Diese Lösung war von der Firma Metalltechnik Großenhain bevorzugt worden. Alle nötigen Vorrichtungsteile wurden zuvor konstruiert und von der Firma Metalltechnik Großenhain gefertigt. Dann konnte die Wickelvorrichtung zum Magnetkleben umgebaut werden:

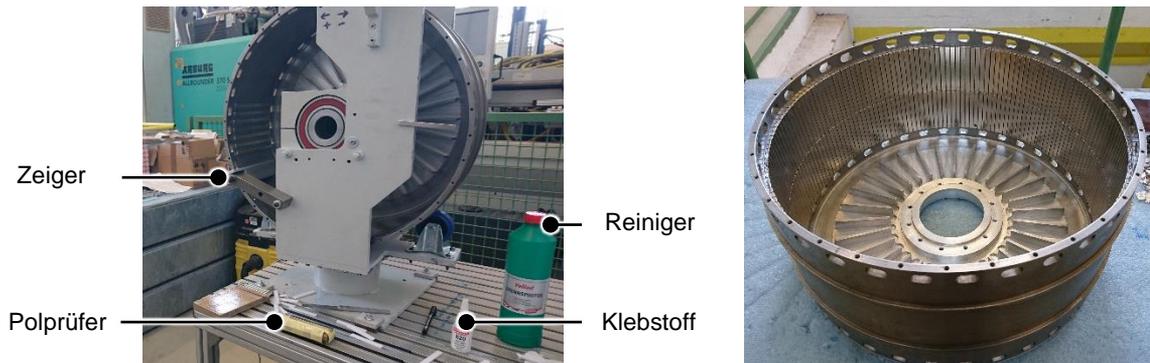


Abbildung 58: Einkleben der doppelreihigen Magneten und fertiger Rotor mit Deckel

Eine Besonderheit des Wassergenerators stellt seine Tiefe dar. Mit einer Statorlänge von 200 mm ist er doppelt so tief wie die meisten bisher gefertigten Maschinen, weshalb die Magneten zweireihig verlegt wurden (siehe Abbildung 58 rechts). Dies war ohne Probleme zu realisieren. Beim Kleben wurden zuerst die Magneten einer Magnetisierungsrichtung auf der Vorrichtung eingesetzt (Abbildung 58 links). Dabei wurde der Magnet zuvor gereinigt und dann mit einem Polprüfer in die richtige Lage gebracht, anschließend mit Klebstoff bestrichen. Auch der Rotor wurde leicht mit Klebstoff benetzt, sodass sichergestellt werden konnte, dass der Klebstoff zwischen Magnet und Rotor gelangt. Dann wurde der erste Magnet entlang des Zeigers von Hand eingebracht. Mit dem Zweiten wurde ebenso verfahren. Dann konnte der Rotor weitergedreht werden, sodass die Magnetreihe vom Zeiger weg nach oben fuhr. Die Magneten der anderen Magnetisierungsrichtung wurden nachträglich in die Lücken geschoben, wofür keine Vorrichtung mehr benötigt wurde. Abstandshalter in Form von dünnen, nicht magnetischen Metallstreifen sichern bei diesem Vorgang die mittige Position der Magneten. Die axiale Ausrichtung wurde durch einen kleinen Bund im Rotor gewährleistet. Alle Magneten wurden an diesen herangeschoben.

Aufgrund der Maße des Generators konnte er nicht auf der vorhandenen Montagevorrichtung gefügt werden, weshalb zwei Alternativen diskutiert worden waren: zum einen das Fügen auf einer Fräsmaschine und zum anderem das auf einer Drehbank. Die zweite Variante hat den Vorteil, dass die Führung des Supports und das Dreibackenfutter zur Aufnahme des Stators genutzt werden können. Außerdem sind die benötigten Adapterbauteile leichter zu fertigen. Deshalb wurde die zweite Variante gewählt und der Stator am Dreibackenfutter sowie der Rotor mit einem Halte deckel am Support der Drehbank befestigt. Der Halte deckel wurde zuvor am Backenfutter ausgerichtet, um die Fluchtung der beiden Teile sicherzustellen (siehe Abbildung 59 links).

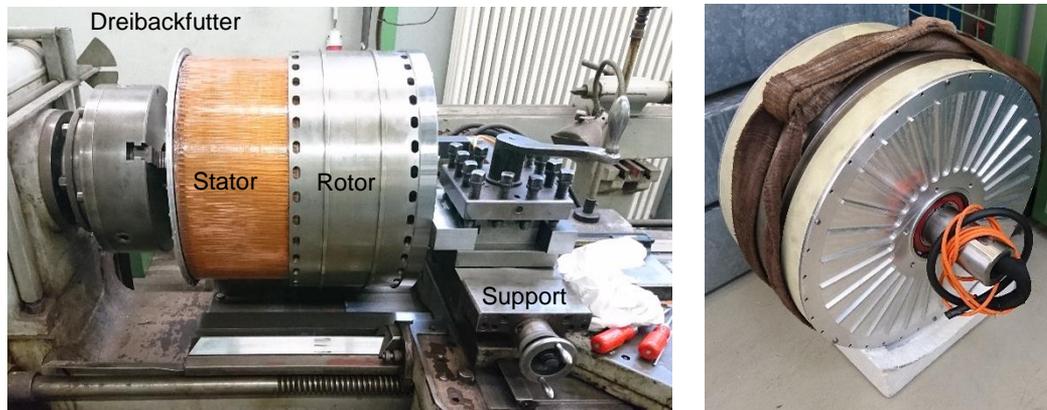


Abbildung 59: Fügen des Generators auf einer Drehbank und fertiggestellter Generator

Nach dem Fügen war die Fertigung des Wassergenerators abgeschlossen und die Messungen konnten vorbereitet werden (Anschlussplan siehe Anhang 8).

### 5.2.6 Ansteuerung

In Zusammenarbeit mit der Ematik GmbH ist für den Generator ein Ansteuerungs- und Sicherheitskonzept entwickelt worden. Zudem wurde die Firma beauftragt, für die Netzeinspeisung und die Betriebsführung sowie die Anlagensicherheit einen Schaltschrank zu konfigurieren. Beim Entwurf und der Realisierung des Schaltschranks mussten die besonderen Eigenschaften eines Generators mit Kombinationswicklung beachtet werden: Dazu zählen die Induktivität der Maschine und die Frequenz des einzuspeisenden Wechselstroms. Bei 60 U/min ergibt sich eine Frequenz von 81 Hz und bei 252 U/min stellt sich eine Frequenz von 340,2 Hz ein. Die Steuerung soll außerdem ein MPP-Tracking (Maximum Power Point) realisieren. Dabei variiert die Steuerung den Betriebsstrom so lange, bis der Punkt der maximalen Leistungsabgabe gefunden wird. Die Netzeinspeisung basiert auf einem 10-kW-Wechselrichter, der für Photovoltaikanlagen entwickelt wurde. Zusätzlich enthält der Steuerschrank Lastwiderstände, um im Fehlerfall das ungeregelte Durchgehen des Generators zu verhindern.

### 5.2.7 Messungen

Mittels einer statischen Messung mit einem Hebel (0,5 m) und einem elektrischen Kraftmessgerät wurde ein Losbrechmoment des Stators im Läufer von ca. 17 Nm ermittelt. Der Stator wurde um 360 Grad gedreht, um dessen Freigängigkeit zu ermitteln. Diese lag vor, somit konnte mit dem Hauptteil der Messung begonnen werden. Der Stator wurde im Läufer gedreht, da es sich um einen Außenläufer handelt und diese Variante deshalb leichter zu realisieren ist (siehe Abbildung 59). Die EMK- und Leerlaufmessung wurde auf dem Prüfstand des Lehrstuhls für Mechatronik durchgeführt.

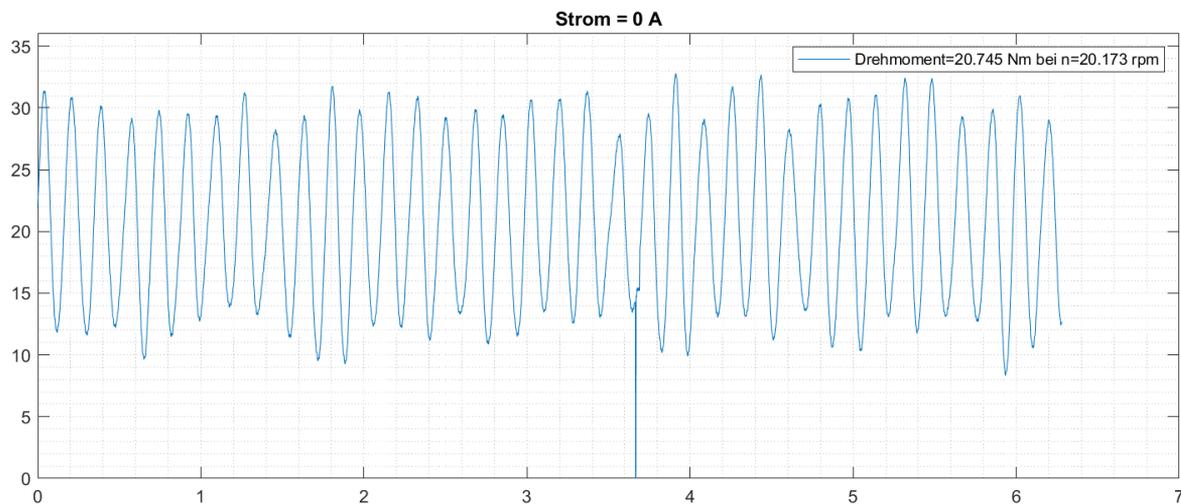


Abbildung 60: Leerlaufdrehmoment bei 20 U/min

Der Wassergenerator wurde dann an einem Prüfstand des IESY der Otto-von-Guericke-Universität vermessen [112]. Dieser bestand aus einer Antriebsmaschine der RAMME Electric Machines GmbH, einer elastischen Ausgleichskupplung und dem Generator. Dabei wurde die Drehzahl der Antriebsmaschine geregelt und über eine Widerstandskaskade wurden verschiedene Lastpunkte eingestellt.

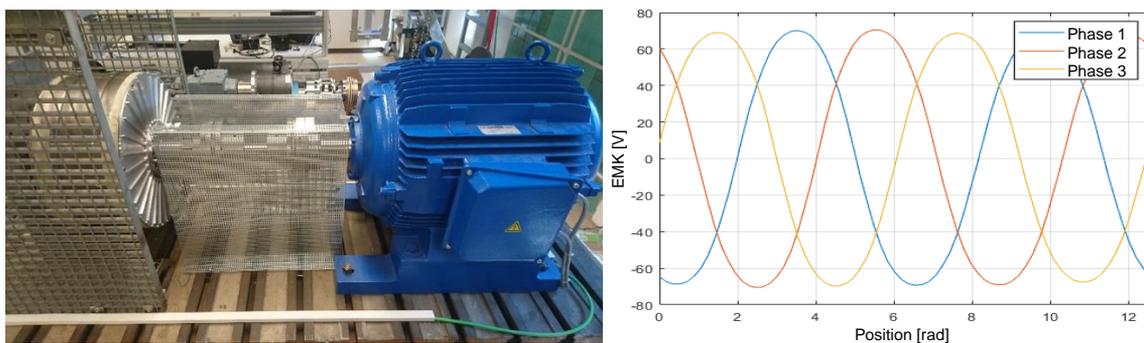


Abbildung 61: Prüfstand mit Wassergenerator und EMK bei 20 U/min

Bei der Messung wurden der geregelte Strom der Antriebsmaschine sowie die Leistung des Generators je Phase sowie die Temperatur des Generators aufgezeichnet. Aus dem K-Faktor der Antriebsmaschine (74,2) und dem Strom abzüglich der Leerlaufverluste der Antriebsmaschine konnte die mechanische Leistung bestimmt werden, die der Generator aufgenommen hat. Aus der Division der abgegebenen elektrischen Leistung des Generators mit der aufgenommenen mechanischen Leistung wurde schließlich dessen Wirkungsgrad ermittelt.

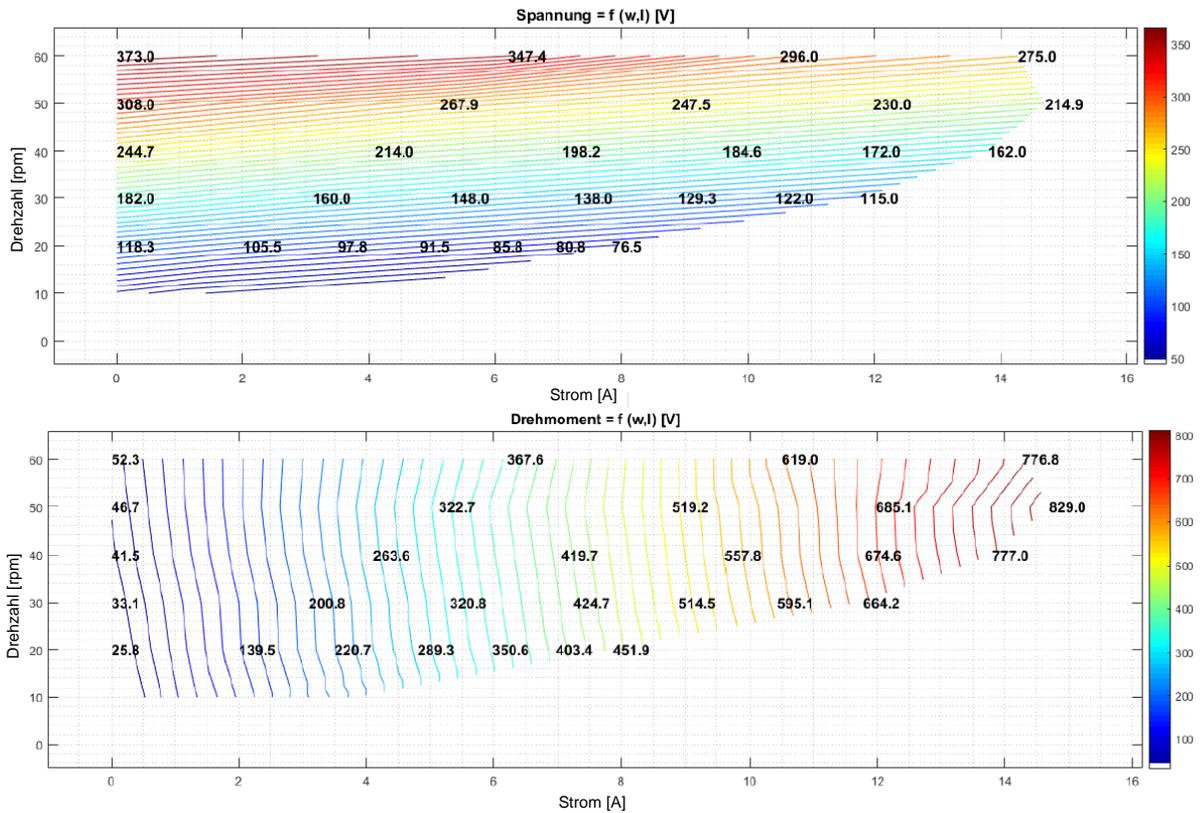


Abbildung 62: Spannung und Drehmoment im Gleichrichterbetrieb [112] Bild 8

In der folgenden Tabelle sind die Wirkungsgrade des Generators je Drehzahl und Strom aufgetragen:

Tabelle 13: Wirkungsgradkennfeld des Wassergenerators [112] Tabelle 8

| $\eta$ [%] | 0 A | 5 A   | 10 A  | 15 A  | 20 A  |
|------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 20 U/min   | 0   | 74,69 | 56,43 | 35,78 | 13,56 |
| 40 U/min   | 0   | 83,51 | 77,65 | 67,52 | 55,86 |
| 60 U/min   | 0   | 87,1  | 85,01 | 76,56 | 67,11 |

Die Messungen haben gezeigt, dass der angestrebte Wirkungsgrad von über 80 % erreicht wurde, jedoch die Leistung bei 60 U/min nicht komplett abgebildet werden konnte. Dies lag an der Begrenzung der Widerstandskaskade. Es hätten noch geringere Widerstände eingestellt werden müssen, um die 900 Nm zu erreichen. In der Messung wurden 829 Nm erreicht. Falls passende Widerstände vorhanden wären, würde die Lastmaschine limitieren, da sie schon jetzt in der Strombegrenzung war. Der Generator müsste an einem stärkeren Prüfstand oder einem starken Wasserrad getestet werden, um das Verhalten bei großen Momenten zu untersuchen.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in den Forschungsschwerpunkt: ‚Energieeffizienz & Erneuerbare Energien; Forschung & Innovation (themenspezifisch)‘ des Energieforschungsprogramms des Bundes ein. Im Speziellen können die beschriebenen Generatoren den inhaltlichen Aspekten ‚Energiewende‘ und ‚Energieerzeugung‘ zugeordnet werden. Durch den Einsatz der hier entwickelten Generatoren in Kleinwindkraft- oder in Kleinwasserkraftanlagen, die im Fluss-Strom Netzwerk entwickelt wurden, kann dezentral und nachhaltig Strom erzeugt werden (Übersicht der Generatorparameter siehe Anhang 9).

In den Projekten wurde die Weiterentwicklung der Luftspaltwicklung zur Kombinationswicklung unterstützt, was dazu geführt hat, dass die Leistung auf gleichem Bauraum deutlich erhöht werden konnte. Dazu wurden ein Windgenerator mit Luftspaltwicklung und ein Wassergenerator mit Kombinationswicklung hergestellt. Die Generatoren wurden gefertigt und bewickelt. Eine passende Wickeltechnologie wurde entwickelt und erprobt.

In Messungen konnte gezeigt werden, dass die Generatoren die Anforderungen erfüllen. Um bei niedrigen Drehzahlen eine passende Spannungslage zu gewährleisten, wurden verschiedene Verschaltungsformen der Wicklung analysiert. Dabei hat sich gezeigt, dass eine Windungszahl von drei für die Luftspaltwicklung und eine Windungszahl von vier für die Nutenwicklung passend sind. Es wurden keine Leiter parallel geschaltet. Das bedeutet, dass jeder Leiter den kompletten Phasenstrom trägt, was hohe Anforderungen an den Wickelprozess stellt.

Des Weiteren haben sich die Maße der Statoren und der Leiterquerschnitte der Drähte als nicht kompatibel mit der vorhandenen Wickelmaschine erwiesen. Daher wurden neuartige Fertigungsvorrichtungen für die Bewicklung großer Statoren mit stärkeren Drähten entwickelt, gefertigt und erfolgreich getestet sowie passende Klebe- und Isolationssysteme entwickelt. Das Bewickeln der Generatoren wurde größtenteils manuell vorgenommen, weshalb in Folgeprojekten das Potenzial für die Automatisierung geklärt werden muss.

Die Generatoren wurden passend für den jeweiligen Anwendungsfall ausgelegt, wofür ein adaptives Konstruktionswerkzeug entwickelt wurde. Das Konstruktionswerkzeug verfügt über einen vergleichbaren Funktionsumfang wie die am Markt verbreitete Spezialsoftware. Es bietet ein Excel-GUI, eine analytische Berechnungsebene, eine CAD-Anbindung und die Möglichkeit der Strukturanalyse. Eine Geometrieauslegung wird vorgenommen, Elemente des Wicklungsschemas werden berücksichtigt, eine thermische Analyse kann durchgeführt werden. Zudem wurde ein Kostenberechnungs- und Verwaltungselement vorgestellt, das im Werkzeug eingebettet ist. Dabei wurden verschiedene Kostenberechnungsvarianten abgewogen und es wurde eine Maschinenstundensatzrechnung mithilfe von Halbzeug- und Materialdatenbanken in der analytischen Ebene implementiert. Der Einfluss der geplanten Stückzahl

auf den Maschinenpreis kann damit analysiert werden, außerdem lassen sich sinnvolle Fertigungsverfahren und mechanische Auslegungsvarianten bezüglich der zu erwartenden Kosten bewerten.

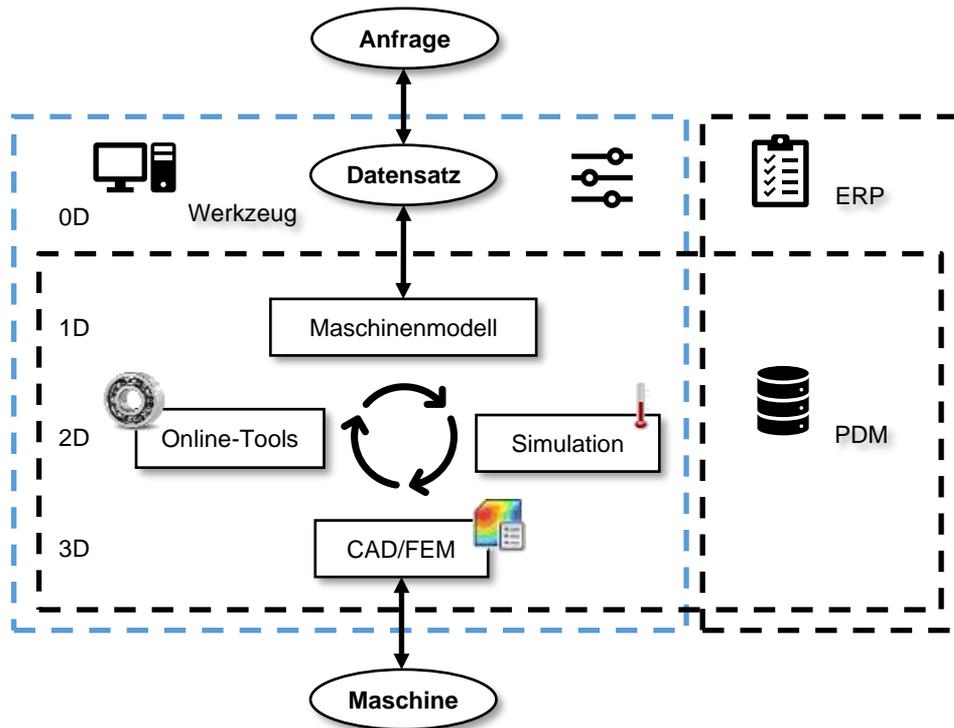


Abbildung 63: Software-neutrale Zielstruktur des Konstruktionswerkzeugs

Im Vergleich zu anderen Werkzeugen am Markt fehlt die elektromagnetische Auslegung. Diese kann jedoch unter Verwendung des Parametersatzes leicht verknüpft werden. Ein Datenblatt des aktuellen Entwicklungsstandes kann ausgedruckt oder abgelegt werden.

Das Konstruktionswerkzeug sollte dabei von einem Konstrukteur bedient werden. Nach einer kurzen Anlernphase können komplexe Auslegungsvorgänge sicher und schnell bewältigt werden, was Entwicklungskosten sparen und eine hohe Qualität der entwickelten Maschinen sichern kann. Dennoch sollte das Werkzeug von einem Softwareentwickler in regelmäßigen Abständen und nach Vorgaben der Entwicklungsabteilung gewartet und aktualisiert werden. Normen müssen angepasst werden und Funktionen müssen ggf. erweitert oder aktualisiert werden. Durch die vereinfachte analytische Abbildung der elektromagnetischen Ebene können diese Berechnungen in einem bestimmten Bereich und abhängig vom Anwendungsfall vermieden werden.

Werden immer mehr Erfahrungen aus der Fertigung von verschiedenen Prototypen und Kundenanfragen in die analytische 1D-Ebene des Werkzeugs integriert, können diese Daten die Ergebnisse der Auslegung verbessern. In den Konstruktionsdatenbanken liegen dann nicht mehr nur Wertetabellen von Normreihen, sondern auch Informationen über die elektromagnetischen Zusammenhänge vor. So bietet sich das Werkzeug besonders für KMUs an, die die

Entwicklung von modularen Baureihen anstreben. Die Gültigkeitsbereiche der analytischen Näherung der komplexen Zusammenhänge müssen dabei immer genau definiert sein bzw. berücksichtigt werden. Es muss im Vorfeld geprüft werden, ob die Softwarelandschaft des jeweiligen Unternehmens sich für ein solches Vorgehen eignet.

Verbesserungspotenzial besteht in Bezug auf das Datenhandling. Das realisierte Werkzeug könnte in eine relationale Datenbankstruktur eingebettet werden. So könnte zum Beispiel Microsoft Access verwendet werden, um für die Auswahlprozeduren SQL-Befehle nutzen zu können. Zudem ist zu prüfen, ob das Modell in ein PDM/ERP-System eingebunden werden kann. Es ist außerdem denkbar, die Kostenrechnung für die Serienfertigung zu erweitern. Dazu müssten umfangreiche Daten zu Fertigungsprozessen des jeweiligen Unternehmens hinterlegt werden. Um die Qualität der Kostenberechnung zu erhöhen, könnten in Zukunft Webinhalte mit der Power-Query-Funktion in der Datenbank verarbeitet werden, um zum Beispiel aktuelle Stahl- und Aluminiumpreise von entsprechenden Webseiten der Zulieferer abzurufen. Bearbeitungsverfahren könnten nach dem REFA-Katalog definiert werden und es könnte ein Plausibilisierungsalgorithmus für die Auswahl des Bearbeitungsverfahrens entwickelt werden.



---

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] R. Kasper, W. Heinemann und N. Borchardt, „Elektromotor mit eisenloser mäanderförmiger Luftspaltwicklung“. Otto-von Guericke-Universität Magdeburg, Anmeldenr.: P201122, Offenlegung: 28.02.2013 Patent DE102011111352A1, 29.08.2011.
- [2] R. Fischer, elektrische Maschinen, 14. Hrsg., München: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [3] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen und K.-H. Grote, Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung, 7. Hrsg., Berlin: Springer Verlag, 2007.
- [4] DIN, „Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen (ISO 9001:2015)“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015-11.
- [5] DIN, „Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 14001:2015)“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015-11.
- [6] S. Reinheimer, Industrie 4.0, Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele, 1. Hrsg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [7] E. Hering, Kostenrechnung und Kostenmanagement für Ingenieure, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2005.
- [8] M. Molitor, K.-H. Grote, H. Herold und B. Karpuschewski, Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, Bd. 8, Aachen: Shaker Verlag, 2008.
- [9] SKF, Hauptkatalog (Das Wälzlagerhandbuch für Studenten), 6000 DE Hrsg., Göteborg: Svenska Kullagerfabriken AB, 2006-08.
- [10] DIN, „Drehende elektrische Maschinen - Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten (IEC 60034-1:2010, modifiziert)“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [11] DIN, „Drehende elektrische Maschinen - Teil 5: Schutzarten aufgrund der Gesamtkonstruktion von drehenden elektrischen Maschinen (IP-Code) - Einteilung (IEC 60034-5:2000 + Corrigendum 2001 + A1:2006)“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007-09.
- [12] DIN, „Drehende elektrische Maschinen - Teil 6: Einteilung der Kühlverfahren (IC-Code) (IEC 60034-6:1991)“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1996-08.
- [13] DIN, „Drehende elektrische Maschinen - Teil 7: Klassifizierung für Bauarten, der Aufstellungsarten und der Klemmkastenlage (IM-Code) (IEC 60034-7:1992 + A1:2000)“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001-12.

- 
- [14] DIN, „Drehende elektrische Maschinen - Teil 9: Geräuschgrenzwerte (IEC 60034-9:2003, modifiziert + A1:2007); Deutsche Fassung EN 60034-9:2005 + A1:2007,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.
- [15] DIN, „Drehende elektrische Maschinen - Teil 11: Thermischer Schutz (IEC 60034-11:2004),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2005-04.
- [16] J. Gerstenberg, „Wälzlagerschmierung mit Fett bei niedrigen Temperaturen,“ 2000.
- [17] FAG Kugelfischer, Wälzlager in Elektromaschinen.
- [18] FAG Kugelfischer, Wälzlagerkatalog, Schweinfurt: Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG, 2014-04.
- [19] P. Eschmann, Das Leistungsvermögen der Wälzlager, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1964.
- [20] W. Haas, „Grundlehrgang Dichtungstechnik“.
- [21] T. Kunstfeld, „Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radialwellendichtungen,“ Stuttgart, 2005.
- [22] Freudenberg Simirt GmbH & Co. KG, Technisches Handbuch-Simmerringe, 2007.
- [23] DIN, „Wälzlager - Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer (ISO 281:2007),“ Beuth-Verlag GmbH, Berlin, 2010-10.
- [24] N. Borchardt, "Modellierung, elektromechanische Auslegung und Validierung eines Radnabenmotors mit nutenloser Luftspaltwicklung und hoher gravimetrischer Leistungsdichte," Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 2014.
- [25] DIN, „Kaltgewalztes nicht kornorientiertes Elektroband und -blech im schlussgeglühten Zustand; Deutsche Fassung EN 10106:2015,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016.
- [26] DIN, „Kornorientiertes Elektroband und -blech im schlussgeglühten Zustand; Deutsche Fassung EN 10107:2014,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014.
- [27] DIN, „Elektrische Isolierung - Thermische Bewertung und Bezeichnung (IEC 60085:2007),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008-08.
- [28] K.-H. Grote und J. Feldhusen, Dubbel, 23 Hrsg., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [29] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, 2 Hrsg., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 1999.
- [30] J. Hagedorn, F. Sell-Le Blanc und J. Fleischer, Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren, Ein Beitrag zur Energieeffizienz, Springer Vieweg, 2016.

- 
- [31] DIN, „Drehende elektrische Maschinen - Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren (IE-Code) (IEC 60034-30-1:2014),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014.
- [32] DIN, „Drehende elektrische Maschinen - Teil 30-2: Wirkungsgrad-Klassifizierung von Wechselstrommotoren mit variabler Drehzahl (IE-Code) (IEC/TS 60034-30-2:2016),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016.
- [33] DIN, „Drehende elektrische Maschinen - Teil 2-1: Standardverfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades aus Prüfungen (ausgenommen Maschinen für Schienen- und Straßenfahrzeuge) (IEC 60034-2-1:2014),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014.
- [34] DIN, „Drehende elektrische Maschinen - Teil 2-2: Besondere Verfahren zur Bestimmung der Einzelverluste großer elektrischer Maschinen aus Prüfungen - Ergänzung zu IEC 60034-2-1 (IEC 60034-2-2:2010),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [35] DIN, „Drehende elektrische Maschinen - Teil 2-3: Besondere Verfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades von umrichter gespeisten Wechselstrommotoren (IEC 2/1841/CD:2016),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016.
- [36] DIN, „Sicherheit von Maschinen - elektrische Ausrüstung von Maschinen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.
- [37] G. Spur, K. Feldmann und V. Schöppner, Fügen, Handhaben, Montieren, München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [38] R. Kasper, W. Heinemann und N. Borchardt, „Elektromotor mit eisenloser Wicklung“. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Anmeldenr.: PCT/DE2012/000140 Patent WO 2013/029579 A2, 16 02 2012.
- [39] R. Kasper und N. Borchardt, „Elektrische Maschine“. Otto-von Guericke-Universität Magdeburg Deutschland Patent DE 102016100744 B3, 2016.
- [40] N. Borchardt and R. Kasper, "Nonlinear design optimization of electric machines by using parametric Fourier coefficients of air gap flux density," *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, p. 645–650, 2016.
- [41] R. Kasper und N. Borchardt, „Boosting power density of electric machines by combining Two different winding types,“ *IEEE*, 2016.
- [42] Schaeffler-Gruppe-INA, Dünnringlager, 2011.
- [43] M. Breuer, „Theoretische und experimentelle Bestimmung der Wälzlagersteifigkeit,“ VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2003.

- 
- [44] T. Stahl, „Einfluss von Drehzahl und Lastkollektiven auf die Entwicklung, von Reibmoment und Temperatur in Wälzlagern (VDI-Bericht),“ VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2011.
- [45] R. Hinzelmann, „Wälzlagerungen in Radnabenantrieben,“ Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 2013-06.
- [46] SKF-Publikation, Wälzlager in Kraftfahrzeugen (Handbuch), SKF Kugellagerfabriken Schweinfurt.
- [47] N. Borchardt, R. Kasper and R. Hinzelmann, "Winding Machine for Automated Production of an Innovative Air-Gap Winding for Lightweight Electric Machines," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, no. 21, pp. 1509-1517, Juni 2016.
- [48] R. Hinzelmann, F. Höhne und R. Kasper, „Wickeltechnologie für Wassergenerator,“ in *14. Magdeburger Maschinenbau Tage*, Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, 2019, pp. 172-181.
- [49] W. Pfeiffer und E. Weiß, *Lean Management: Grundlagen der Führung und Organisation lernender Unternehmen*, Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, 1992.
- [50] U. Dombrowski, *Lean Development, Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen*, 1 Hrsg., Berlin: Springer Vieweg, 2015.
- [51] C. Kostka und S. Kostka, *Der Kontinuierliche Verbesserungsprozess. Methoden des KVP.*, Bd. 22, München: Hanser, 2006.
- [52] T. Hoffmann und S. Balbierz, *Das KVP-Arbeitsbuch für kleine und mittlere Unternehmen*, Sternenfels: Verlag Wissenschaft und Praxis, 2010.
- [53] J. Morgan und J. Liker, *The Toyota Product Development System – Integrating People, Process, and Technology*, New York, 2006.
- [54] H. Dinger, *Target Costing: Praktische Anwendung im Entwicklungsprozess*, München/Wien: Carl Hanser Verlag, 2002.
- [55] P. u. M. VDI-Fachbereich, „Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung VDI 2221 Blatt 1,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019-11.
- [56] VDI, „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme (VDI 2206),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004-06.
- [57] P. u. M. VDI-Fachbereich, „Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse VDI 2221 Blatt 2,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019-11.
- [58] EU, „Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG,“ 2006.

- 
- [59] U. Fischer, Tabellenbuch Metall, 45 Hrsg., V. G. & C. K. Nourney, Hrsg., Haan-Gruiten: Verlag Europa Lehrmittel, 2011.
- [60] E. Haibach, Betriebsfestigkeit, 3. Auflage Hrsg., Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [61] DIN, „Technische Produktdokumentation 03/2002, 08/1978, 10/1981,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2002-03.
- [62] DIN, „Erstellen von Gebrauchsanleitungen - Gliederung, Inhalt und Darstellung - Teil 1: Allgemeine Grundsätze und ausführliche Anforderungen Gliederung, Inhalt und Darstellung (EN 82079-1),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012-09.
- [63] H. Hoischen und W. Hesser, Technisches Zeichnen, Ausgabe 33. Hrsg., Berlin: Cornelsen Verlag.
- [64] S. Vajna, C. Weber, H. Bley und K. Zeman, CAx für Ingenieure, Eine praxisbezogene Einführung, 2 Hrsg., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [65] S. Vajna, Integrated Design Engineering, Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung, 1 Hrsg., Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.
- [66] F. Thuselt und F. P. Gennrich, Praktische Mathematik mit MATLAB, Scilab und Octave, Für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Berlin: Springer Spektrum, 2013.
- [67] F. Herrmann, Datenorganisation und Datenbanken, Praxisorientierte Übungen mit MS Access 2016, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [68] S. Vajna, M. Schabacker und R. Schmidt, „Methodisches Parametrisieren in der Produktmodellierung,“ in *Konstruktionstechnik - Motor künftiger Innovationen*, 22. Kolloquium Konstruktionstechnik, 1999.
- [69] Y. Yamasaki, „Konstruktionshilfsmittel für die parametrische Konstruktion,“ RWTH, Aachen, 2007.
- [70] R. Hinzemann, A. Zörnig, N. Borchardt und R. Kasper, „Parametrisches Konstruktionswerkzeug für die Gestaltung von elektrischen Maschinen mit Luftspaltwicklung,“ in *KT 2016, 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik*, Aachen, Shaker Verlag, 2016, pp. 222-230.
- [71] K. Ehrlenspiel und H. Meerkamm, Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, 6 Hrsg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017.
- [72] H.-J. Bullinger und J. Warschat, Forschungs- und Entwicklungsmanagement : simultaneous engineering, Projektmanagement, Produktplanung, rapid product development, Stuttgart: B. G. Teubner Verlag, 1997.
- [73] ISO, „Technische Produktdokumentation (TPD) - Allgemeine Anforderungen an "digital mock-up" für mechanische Produkte,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015-01.
-

- [74] R. Markworth, „Entwicklungsbegleitendes Digital Mock-Up im Automobilbau,“ Shaker Verlag, Berlin, 2003.
- [75] N. Borchardt und R. Kasper, „Model of electrical machines based on exponential fourier approximation of magnetic air gap flux density and inductance,“ *IEEE*, 2016.
- [76] V. Staver, „Erweiterung eines Konstruktionstools für die thermische, elektrische und mechanische Auslegung von elektrischen Maschinen mit Luftspaltwicklung,“ Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 2018-09.
- [77] DIN, „Statistische Tolerierung - Begriffe, Anwendungsrichtlinien und Zeichnungsangaben,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1974-08 .
- [78] S. von Praun, „Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess,“ Herbert Utz Verlag GmbH, München, 2002.
- [79] DIN, „Zylindrische Wellenenden; Abmessungen, Nenndrehmomente (DIN 748-1),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1970-01.
- [80] VDE, „Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen, Teil 4: Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung in und an Gebäuden und von flexiblen Leitungen (DIN VDE 0298-4),“ VDE Verlag GmbH, Berlin, 2013-06.
- [81] Brändlein, P. Eschmann, Hasbargen und Wiegand, Die Wälzlagerpraxis: Handbuch für die Berechnung und Gestaltung von Lagerungen, korrig. 3. Auflage Hrsg., Vereinigte Fachverlage, 1998.
- [82] A. Palmgren, Grundlagen der Wälzlagertechnik, 3. Hrsg., Stuttgart: Franckh-Verlag, 1950.
- [83] FAG Kugelfischer, „Publikationssammlung“.
- [84] H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch und J. Voßiek, Roloff/Matek Maschinenelemente Normung, Berechnung, Gestaltung (Formelsammlung mit Tabellenbuch), 20. Hrsg., Wiesbaden: VIEWEG+TEUBNER, 2011.
- [85] A. Böge und W. Böge, Technische Mechanik, 33 Hrsg., Berlin: Springer Verlag GmbH, 2019.
- [86] R. Hinzemann, „Konstruktion einer Variante eines elektrischen Radnabenmotors mit ausgleichender Kupplung für Pkw,“ Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 2012.
- [87] DIN, „Mitnehmerverbindungen ohne Anzug; Paßfedern, Nuten, hohe Form,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1968-08.
- [88] VDI, „Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Featuretechnologie (VDI 2218),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003-03.

- 
- [89] R. Hinzelmann, S. Perekopskiy, A. Zörnig und R. Kasper, „Konstruktionswerkzeug für die Kostenplanung und normgerechte Gestaltung von drehenden elektrischen Maschinen mit Luftspaltwicklung,“ in *KT 2017, Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik*, Essen, Universität Duisburg-Essen, 2017, pp. 203-212.
- [90] G. Schramm, „Digitalen Stahlrends auf der Spur,“ *Konstruktion*, Mai 2017.
- [91] DIN, „Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011-04.
- [92] DIN, „Warmgewalzte Rundstäbe aus Stahl - Maße, Formtoleranzen und Grenzabmaße (DIN EN 10060),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004-02.
- [93] DIN, „Bezeichnungssysteme für Stähle - Teil 2: Nummernsystem,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015-07.
- [94] DIN, „Aluminium und Aluminiumlegierungen - Bänder, Bleche und Platten - Teil 2: Mechanische Eigenschaften,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016-10.
- [95] DIN, „Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013-12.
- [96] ATG Deutschland GmbH, „Flachstahl Lieferprogramm,“ ATG Deutschland GmbH, Mülheim an der Ruhr.
- [97] N. Borchardt, D. Brüggemann, R. Kasper, T. Hiller, A. Jacob, F. Odenthal, A. Siebert und T. Waßmann, „Fertigungskostenkalkulation eines innovativen Radnabenmotors,“ Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 2014.
- [98] R. Gasch und J. Twele, *Windkraftanlagen – Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*, 7. Aufl. Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [99] P. Otter und M. Pehnt, „Pilotstudie zur Akzeptanz vertikaler Windenergieanlagen,“ Heidelberg GmbH, Heidelberg, 2009.
- [100] R. Hinzelmann, „Generator mit eisenloser Wicklung für Kleinwindenergieanlagen,“ in *Magdeburger Maschinenbautage*, Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, 2015.
- [101] S. Hieke, M. Stamann, D. Lagunov und R. Leithold, „Two-phase transverse flux machine with disc rotor for high torque low speed application,“ *19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, 09 11 2017.
- [102] L. Daroczy, G. Janiga and D. Thévenin, "Computational fluid dynamics based shape optimization of airfoil geometry for a H-rotor using a genetic algorithm," *Optim.* 50, pp. 1483-1499, 2018.

- [103] L. Daroczy, G. Janiga, K. Petrasch, M. Webner und D. Thévenin, „Comparative analysis of turbulence models for the aerodynamic simulation of H-Darrieus rotors,“ *Energy* 90, pp. 680-690, 07 2015.
- [104] E. Hau, Windkraftanlagen, Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit, 4 Hrsg., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2008.
- [105] A. Betz, Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen, V. & Ruprecht, Hrsg., Staufen: Ökobuch Verlag, 1994.
- [106] E. Kallenbach, R. Eick, P. Quendt, T. Ströhla, K. Feindt, M. Kallenbach und O. Radler, Elektromagnete – Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendungen, 4. Aufl. Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [107] N. Borchardt, B. Penzlin and R. Kasper, "Mechatronic model of a novel slotless permanent magnet DC-motor with air gap winding design," *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 9-12 Juli 2013.
- [108] A. Zörnig, „Bericht über die Konstruktion des Radnabenmotors mit Luftspaltwicklung,“ Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 2013.
- [109] DIN, „Teil 2: Anforderungen für kleine Windenergieanlagen,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015-05.
- [110] A. Bergmann, Normgerecht errichten, betreiben, herstellen und konstruieren, Erläuterungen zu den Normen der Reihe DIN EN 61400 (VDE 0127) und DIN EN60076-1 (VDE 0532-76-16) und unter Berücksichtigung der VDE-Anwendungsregel VDE-AR-N 4105 und weiterer Regelwerke, 2 Hrsg., Berlin: VDE Verlag GmbH, 2015.
- [111] R. Hinzemann, N. Kovacs, N. Borchardt und R. Kasper, „Generator mit Kombinationswicklung zur regenerativen Energiegewinnung aus Wasserkraft,“ in *Magdeburger Maschinenbautage*, Magdeburg, 2017.
- [112] M. Schmidt, R. Hinzemann und R. Kasper, „Skriptbasierte FEM Modellbildung und messtechnische Auswertung eines Wassergenerators mit Kombinationswicklung,“ in *14. Magdeburger Maschinenbautage*, Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, 2019, pp. 85-94.
- [113] H.-U. Giersch, elektrische Maschinen. Prüfen, Normung, Leistungselektronik, Stuttgart: B. G. Teubner, 2003.
- [114] J. Giesecke, S. Heimerl und E. Mosonyi, Wasserkraftanlagen, Planung, Bau und Betrieb, 6 Hrsg., Springer Vieweg GmbH, 2014.

## 8 Anhang

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Anhang 1 | Einteilung der drehenden elektrischen Maschinen ..... | 1  |
| Anhang 2 | Materialkennwerte Kupfer .....                        | 2  |
| Anhang 3 | Materialkennwerte Kunststoff .....                    | 3  |
| Anhang 4 | Ablaufschema Luftspaltwickeln .....                   | 4  |
| Anhang 5 | Belastungsanalyse .....                               | 5  |
| Anhang 6 | Turbinendurchströmung .....                           | 8  |
| Anhang 7 | Datenblatt Wassergenerator .....                      | 9  |
| Anhang 8 | Anschlussplan des Wassergenerators .....              | 10 |
| Anhang 9 | Übersicht der Generatorparameter .....                | 11 |



## Anhang 1 Einteilung der drehenden elektrischen Maschinen

Tabelle: Einteilung der drehenden elektrischen Maschinen<sup>46</sup> [2], [113]

| <b>Wirkweise</b>              | <b>Kommutatormaschine</b>  | <b>Asynchronmaschine</b>                                     | <b>Synchronmaschine</b>  | <b>Beispielhafte Einsatzbereiche</b>   |
|-------------------------------|--|--|--|--|
| <b>Stromart</b>               |  |  |  |  |
| <b>Gleichstrom</b>            | Gleichstrommaschine,<br>Reihenschlussmaschine,<br>Nebenschlussmaschine |  |  | Feinwerktechnik  |
| <b>Wechselstrom</b>           | Einphasen-Reihenschlussmotor   | Spaltpolmotor,<br>Kondensatormotor,<br>Repulsionsmotor       | Reluktanzmotor   | E-Werkzeuge und<br>Haushaltsgeräte,<br>kleinere Pumpen,<br>Feinwerktechnik   |
| <b>Dreiphasenwechselstrom</b> |  | Asynchronmaschine,<br>Schleifringläufermotor,<br>Linearmotor | <b>Synchronmaschine,</b><br>Schenkelpolmaschine,<br>Vollpolmaschine,<br>Kaskadenmaschine | Industrieantriebe,<br>Großpumpen,<br>Fördertechnik,<br>Turbogeneratoren<br>in Kraftwerken,<br>hochdynamische<br>Antriebe für Werkzeugmaschinen |
| <b>Impulsstrom</b>            |  |  | Bürstenloser<br>Gleichstrommotor,<br>Schrittmotor,<br>Lavet-Schrittmotor                 | Hochdynamische<br>Antriebe, Positionierantrieb, Uhrentechnik   |

<sup>46</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische\\_Maschine](https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische_Maschine) Stand 2019-12

## Anhang 2 Materialkennwerte Kupfer

Tabelle: Vergleich: Aluminium, Kupfer und kupferbeschichtete Leiter nach [30] S. 102

|                                | <b>Kupfer</b>                  | <b>Aluminium</b>                       | <b>CCA (10 %)</b>               |
|--------------------------------|--------------------------------|--|---------------------------------|
| Vorkommen der Erde             | 0,01 %                         | 7,75 %                                 | -                               |
| Dichte                         | 8,92 g/m <sup>3</sup>          | 2,70 g/m <sup>3</sup>                  | 3,63 g/m <sup>3</sup>           |
| Schmelzpunkt                   | 1083 °C                        | 658 °C                                 | 658 °C                          |
| Wärmeausdehnung                | 17,0 x 10 <sup>-6</sup> 1/K    | 23,5 x 10 <sup>-6</sup> 1/K            | -                               |
| Wärmeleitfähigkeit             | 385 W/mK                       | 230 W/mK                               | 240 W/mK                        |
| Spez. Wärmekapazität           | 382 J/(kg K)                   | 896 J/(kg K)                           | 862 J/(kg K)                    |
| E-Modul                        | 13,0 x 10 <sup>4</sup> MPa     | 7,1 x 10 <sup>4</sup> MPa              | -                               |
| Elektrische Leitfähigkeit – DC | > 58,58 m/(Ω mm <sup>2</sup> ) | > 35,67 m/(Ω mm <sup>2</sup> )         | > 37,35 m/(Ω mm <sup>2</sup> )* |
| El. Leitfähigkeit –AC (>5MHz)  | > 58,58 m/(Ω mm <sup>2</sup> ) | > 35,67 m/(Ω mm <sup>2</sup> )         | > 58,58 m/(Ω mm <sup>2</sup> )  |
| Preis (Stand 2014)             | 5,741 €/kg                     | 1,416 €/kg                             | 3,6 €/kg – 13,7 €/kg            |
| Schweißbarkeit                 | Gut                            | Schlecht                               | Gut                             |
| Oxidationsrate                 | Gering                         | Hoch                                   | Gering                          |
| Umformbarkeit                  | Gut                            | – Biegefestigkeit<br>– Langzeitfließen | – Biegefestigkeit               |

## Anhang 3 Materialkennwerte Kunststoff

Tabelle: Beispielhafter Vergleich verschiedener Kunststoffeigenschaften [30] S. 55

|            | Dichte            | Zugfestigkeit     | Bruchdehnung | E-Modul            | Durchschlagsfestigkeit | Feuchtigkeitsaufnahme | Temperaturbereich | Wärmebeständigkeit |
|------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|
| Einheit    | g/cm <sup>3</sup> | N/mm <sup>2</sup> | %            | kN/mm <sup>2</sup> | kV/mm                  | %                     | °C                | °C                 |
| Kunststoff | DIN 53479         | DIN 53455         | DIN 53455    | DIN 53457          | DIN 53481              | Bei Normklima         |                   | DIN 53461          |
| PE         | 0,95              | 24                | >200         | 1                  | 80                     | 0                     | -100 ... 80       | 48                 |
| PP         | 0,91              | 33                | 800          | 1,3                | 55-90                  | 0,1                   | +10 ... +100      | 65                 |
| PS         | 1,04              | 55                | 40           | 3,2                | 43                     | <0,1                  | -10 ... 80        | 86                 |
| PA         | 1,14              | 50 ... 80         | 50 ... 160   | 1,5 ... 3          | 80 ... 150             | 2,5 ... 3             | -40 ... +100      | 95                 |
| PC         | 1,2               | >60               | >80          | 2,3                | 35                     | 0,2                   | -40 ... +135      | 138                |
| POM        | 1,41              | 70                | 75           | 3                  | 35                     | 0,17                  | -20 ... 90        | 124                |
| PVC        | 1,36              | 65                | 20           | 3                  | 20                     | <0,1                  | -10 ... +55       | 61                 |
| PET        | 1,37              | 74                | >20          | 3                  | >70                    | 0,2                   | -20 ... +100      | 74                 |
| PEEK       | 1,32              | 160               | 50           | 3,6                | 20                     | 0,2                   | +250              | 182                |
| PSU        | 1,24              | 72                | >50          | 2,5                | >40                    | 0,25                  | -40 ... 150       | 175                |
| PES        | 1,37              | 85                | 20 ... 40    | 2,9                | 63                     | 0,8                   | +180              | 215                |
| PAI        | 1,45              | 120               | 5            | 5,8                | 24                     | 2,5                   | +250              | 280                |
| PPS        | 1,35              | 90                | 8            | 35 ... 42          | 50µm<br>- 10kV         | -                     | -20 ... 220       | 240                |
| LCP        | 1,4               | 180 ... 240       | 3,4          | 10 ... 40          | 32                     | 0,3                   | 250               | 300                |

## Anhang 4 Ablaufschema Luftspaltwickeln

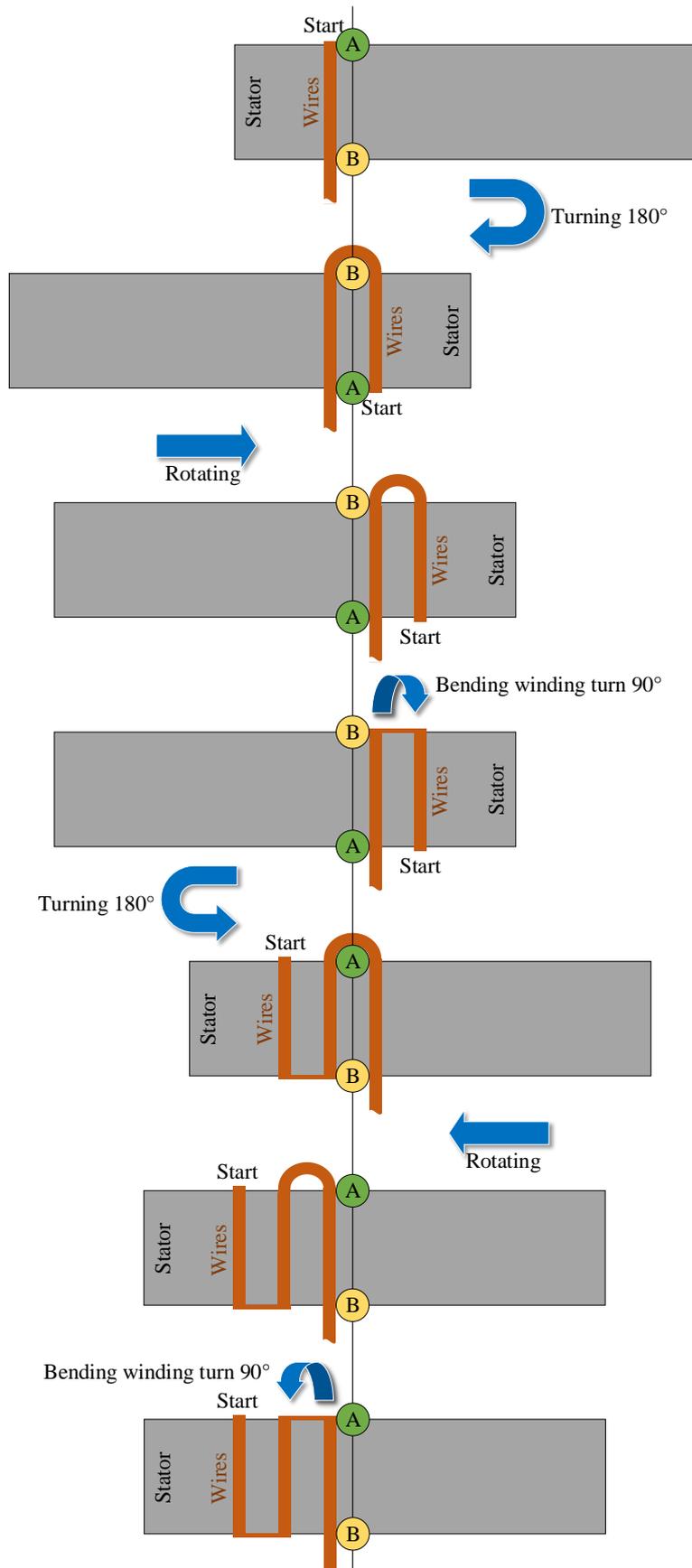


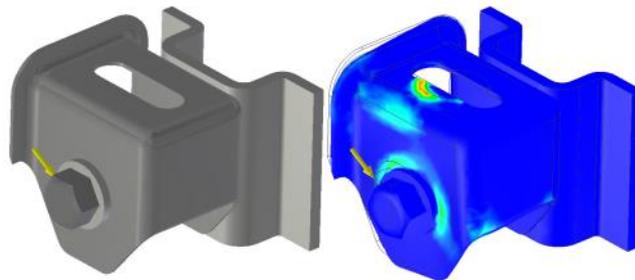
Bild: Schematischer Ablauf des Luftspaltwickelns in Draufsicht [47]

## Anhang 5 Belastungsanalyse

Vorgehen laut Autodesk:

„Eine Belastungsanalyse kann dabei helfen, die besten Konstruktionsalternativen für ein Bauteil oder eine Baugruppe zu bestimmen. Mit ihrer Hilfe können Sie bereits in einer frühen Phase der Entwurfsplanung sicherstellen, dass eine Konstruktion unter der zu erwartenden Belastung zufriedenstellend funktioniert, ohne zu brechen oder sich zu verformen.“

Bild: Belastungsanalyse Modell mit Krafteinleitung, Modell mit Spannungsverlauf



Für die Belastungsanalyse werden zwei Arten von Simulationen verwendet:

- Bei der statischen Analyse werden die Traglastbedingungen ausgewertet.
- Bei der Modalanalyse werden die Eigenfrequenzmodi, einschließlich starrer Bauteilbewegungen, ausgewertet.

Nachdem Sie eine Simulation erstellt und festgelegt haben, welche Parameter ausgewertet werden sollen, führen Sie die Simulation aus. Während der Simulation werden folgende Schritte ausgeführt:

- Erstellen die Fälle.
- Durchführen der geometrischen Modellierung
- Ermitteln der automatischen Kontakte
- Generieren von Netzen
- Berechnen des Modells für jeden Datenpunkt

Nach der Simulation werten Sie die Ergebnisse im Grafikbereich aus.

Die Simulation erzeugt einen Satz FEM-Ergebnisse für alle definierten Parameterkombinationen.

Bild: Belastungsanalyse Grundmodell, Modell mit Netz, verformtes Modell



Baugruppenelemente und Schweißkonstruktionen werden unterstützt. Alle für diese Elemente verwendeten Parameter können in einer Simulation der parametrischen Bemaßungen eingeschlossen werden, einschließlich Schweißnähte.

Schweißkörper werden in die Liste der Körper aufgenommen, auf Kontakt ausgewertet und mit einem Netz versehen. Verwenden Sie für Schweißverbindungen, bei denen Flächenkontakte nicht geschweißt sind, nach Möglichkeit den Kontakttyp Getrennt. Nicht geschweißte Flächenkontakte sind nicht optimal verbunden. Hierzu muss ggf. ein automatischer Kontakt bearbeitet oder ein Kontakt manuell hinzugefügt werden.

Neben dem Dialogfeld Belastungsanalyse - Einstellungen stehen zur Unterstützung Ihrer Simulation eine Parametrische Tabelle und ein Simulationshandbuch zur Verfügung.

Typisches Verfahren der Belastungsanalyse:

- **Festlegen der Erwartungen** Bestimmen Sie das zu erwartende physische Verhalten anhand eines Konzeptmodells.
- **Vorverarbeitung** Definieren Sie Material- und Umgrenzungsbedingungen (Lasten und Abhängigkeiten), und legen Sie die Kontaktbedingungen sowie die Netzeinstellungen fest.
- **Auflösung** Führen Sie die Simulation aus, um Ihre mathematische Darstellung aufzulösen und die Lösung zu generieren. Um eine Lösung zu finden, wird das Bauteil in kleinere Elemente unterteilt. Das Lösungsmodul zählt das individuelle Verhalten aller Elemente zusammen. Es prognostiziert das Verhalten des gesamten physischen Systems durch Auflösen einer Reihe simultaner algebraischer Gleichungen.
- **Nachverarbeitung** Rufen Sie die Ergebnisse ab, und werten Sie sie aus.
- **Überprüfen der Erwartungen** Bei der Nachbearbeitung werden die Ergebnisse der Lösung untersucht, um die Eingaben zu optimieren.
- **Schlussfolgerung** (Eingaben optimieren) Entsprechen die Ergebnisse den Erwartungen?

Lautet die Antwort JA, ist die Analyse abgeschlossen.

Lautet die Antwort NEIN, ändern Sie die Eingaben, um die Ergebnisse zu optimieren. Hierzu können Sie unter anderem die geometrische Komplexität reduzieren, fragwürdige Geometrie entfernen, Belastungen oder Abhängigkeiten entfernen oder den Analysetyp ändern. Diese Feinabstimmung ist ein in hohem Maße interaktiver Prozess.“

<https://knowledge.autodesk.com/de/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/DEU/Inventor-Help/files/GUID-61F01A5D-7E54-45A1-9698-7BB11F0AEE94-hm.html> Stand 2019-12

## Anhang 6 Turbinendurchströmung

Es ergibt sich folgende Formel für das Drehmoment einer durchströmten Turbine [114]:

$$M_T = \rho \cdot Q \cdot (\bar{c}_{2u} \cdot r_2 - \bar{c}_{3u} \cdot r_3), \text{ [Nm]} \quad \text{Gl. 8.1}$$

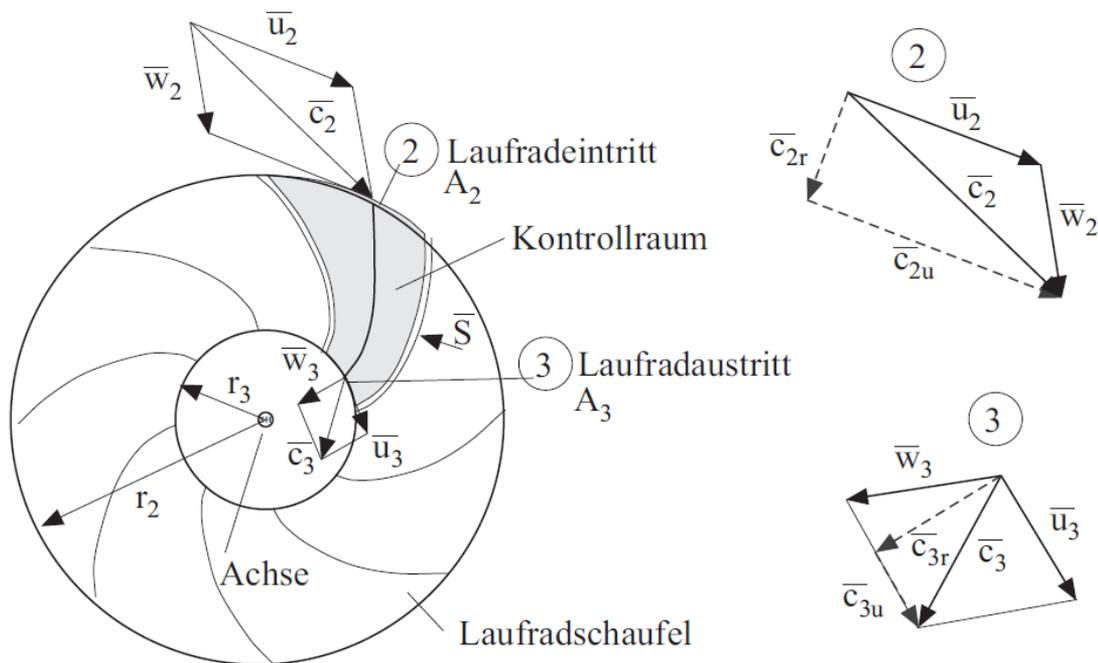
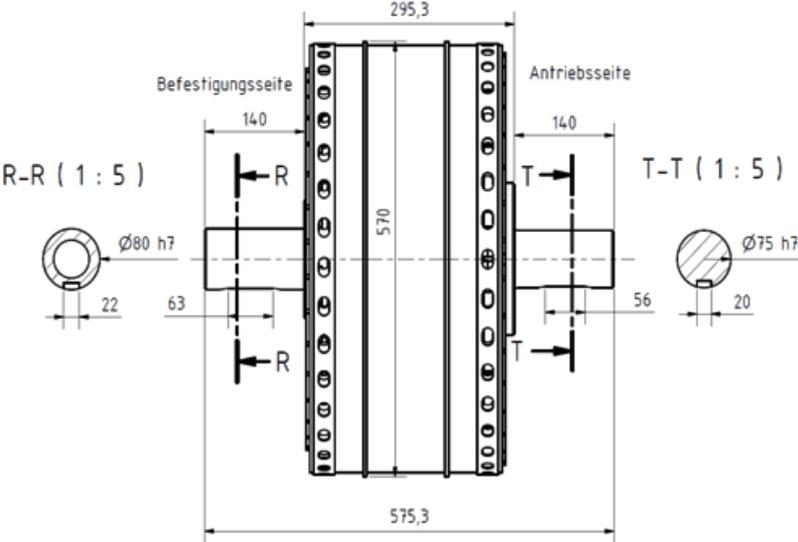


Bild: Definitionsskizzen für die Turbinendurchströmung [114] S. 536 Abb. 14.5

## Anhang 7 Datenblatt Wassergenerator

| Generator - Projekt Fluss-Strom Plus   |          |       |       |                    |             |      |        |          |
|--|----------|-------|-------|--------------------|-------------|------|--------|----------|
|   |          |       |       |                    |             |      |        |          |
| <b>Typenschild</b>   |          |       |       |                    |             |      |        |          |
| No.  | FSP.1    |       | 2017  |                    | Typ         |      |        | -        |
| P  | 4600     | W     | Duty  | S1                 | Cos φ       | 0,99 | m (kg) | 146      |
| n  | 60       | U/min | η     | 81                 | % f (Hz)    | 81   | IC     | 4A1A     |
| U1   | 190      | V     | I1    | 15                 | A 3~Y       |      | IM     | (B) 5002 |
| U2   |          | V     | I2    |                    | A 3~        |      | IP     | 23/55    |
| Hersteller: IMS / Metalltechnik / EMB  |          |       |       | VDE-0530           |             | Cl.  |        | H        |
| <p>           Maximale Wicklungstemperatur: <b>130°C</b>      Stückzahl: <b>1</b> Stk.<br/>           Maximaltemperatur Magneten: <b>130°C</b>      Kosten: <b>24890,28 €</b><br/>           Induktivität bei 100 kHz: ~ <b>1400 μH</b><br/>           Phasenwiderstand: ~ <b>2428 mΩ</b> </p>   |          |       |       |                    |             |      |        |          |
| <p>            In mit Styropor gefüllter Kiste verschicken.<br/>           Generator darf <b>nicht</b> geöffnet oder demontiert werden, da sonst die Wicklung beschädigt werden kann.<br/>           Generator ist als <b>Außenläufer</b> ausgeführt.<br/>           Alle Teile rotieren außer der Hohlwelle an der Befestigungsseite.         </p> |          |       |       |                    |             |      |        |          |
| <b>Leistungsanschluss</b>  |          |       |       | <b>Pinbelegung</b> |             |      |        |          |
| Nr.  | Funktion |       | Farbe | Nr.                | Pinbelegung |      |        |          |
| 1  | -        |       | -     | 1                  | -           |      |        |          |
| 2  | -        |       | -     | 2                  | -           |      |        |          |
| 3  | -        |       | -     | 3                  | -           |      |        |          |
| 4  | -        |       | -     | 4                  | -           |      |        |          |
| 5  | -        |       | -     | 5                  | -           |      |        |          |
| 6  | -        |       | -     | 6                  | -           |      |        |          |
| 7  | -        |       | -     | 7                  | -           |      |        |          |
|    |          |       |       |                    |             |      |        |          |
| Erstellt von: Hinzelmann   |          |       |       | Stand: 16.11.2020  |             |      |        |          |

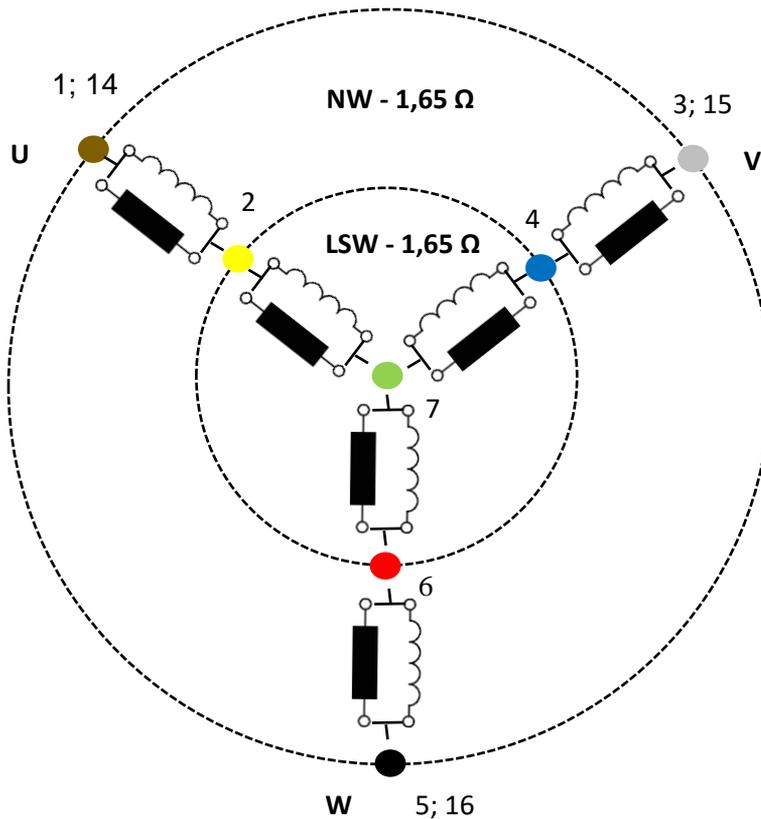
## Anhang 8 Anschlussplan des Wassergenerators

Tabelle 1: Messleitung (orange), 10x0,14mm<sup>2</sup> 2x0,5mm<sup>2</sup>

| Pos. | Belegung  | Farbe                        |   |
|------|-----------|------------------------------|---|
| 1    | U NW Ein  | Braun (0,5 mm <sup>2</sup> ) |  |
| 2    | U Mitte   | Gelb                         |  |
| 3    | V NW Ein  | Grau                         |  |
| 4    | V Mitte   | Blau                         |  |
| 5    | W NW Ein  | Schwarz                      |  |
| 6    | W Mitte   | Rot                          |  |
| 7    | Stern     | Grün                         |  |
| 8    | PT100.1.1 | Braun                        |  |
| 9    | PT100.1.2 | weiß                         |  |
| 10   | PT100.2.1 | Lila                         |  |
| 11   | PT100.2.2 | Rosa                         |  |
| 12   | -         | Weiß (0,5 mm <sup>2</sup> )  |  |
| 13   | Schirm    | auf Statormasse              |   |

Tabelle 2: Leistungsanschluss des Generators (schwarz,4x 4 mm<sup>2</sup>)

| Pos. | Belegung          | Farbe     |   |
|------|-------------------|-----------|---|
| 14   | U                 | Braun     |  |
| 15   | V                 | Grau      |  |
| 16   | W                 | Schwarz   |  |
| 17   | Schutzleiter (PE) | Grün/Gelb |  |



## Anhang 9 Übersicht der Generatorparameter

### Windgenerator



$P_{\text{mech}}$  4 kW  
 $n$  170 U/min

### Wassergenerator



5 kW  
 60 U/min

### S1-Betrieb

IP22 – Kühlung mit Umgebungsluft

$T_{\text{max}}$  ca. 100°C

### Wicklung:

|     |         |         |
|-----|---------|---------|
| LSW | $w = 3$ | $w = 3$ |
| NW  | -       | $w = 4$ |
| Mk  | 10      | 60      |

### Mechanischer Aufbau:

|        |                                   |   |
|--------|-----------------------------------|---|
| Stator | geschweißt/Stahl                  | gefräst/Aluminium                       |
| Welle  | gedreht/Stahl                     | gedreht/Stahl                           |
| Paket  | gewickeltes Band<br>mit Klemmring | Laserbleche<br>mit Zugstangen befestigt |
| Rotor  | Stahl komplett                    | Stahl und Deckel Aluminium              |