

MODELL FÜR DEN ENTWURF UND DIE ANALYSE VON PMSM UND ASM (MEAPA)

1 Allgemein

1.1 Modellierung

Das MEAPA setzt sich aus den zwei Metamodellen *Entwurf* und *Analyse* zusammen (Abb. 1). Ausgehend von Eingangsparametern werden in einem ersten Schritt des Metamodells *Entwurf* die Hauptabmessungen ermittelt. Sobald diese festliegen, werden im zweiten und dritten Schritt der Stator und Rotor entworfen. Als letzten Schritt des Metamodells *Entwurf* erfolgt die Nachrechnung der Maschine. Die Entwurfsparameter werden dann dem Metamodell *Analyse* übergeben und die Ströme und Spannungen mittels einem Motor- und Generatormodell für Betriebspunkte im gültigen Betriebsbereich berechnet. Abschließend werden die Verluste ermittelt und die Kennfelder erstellt, welche die Ausgangsparameter sind.

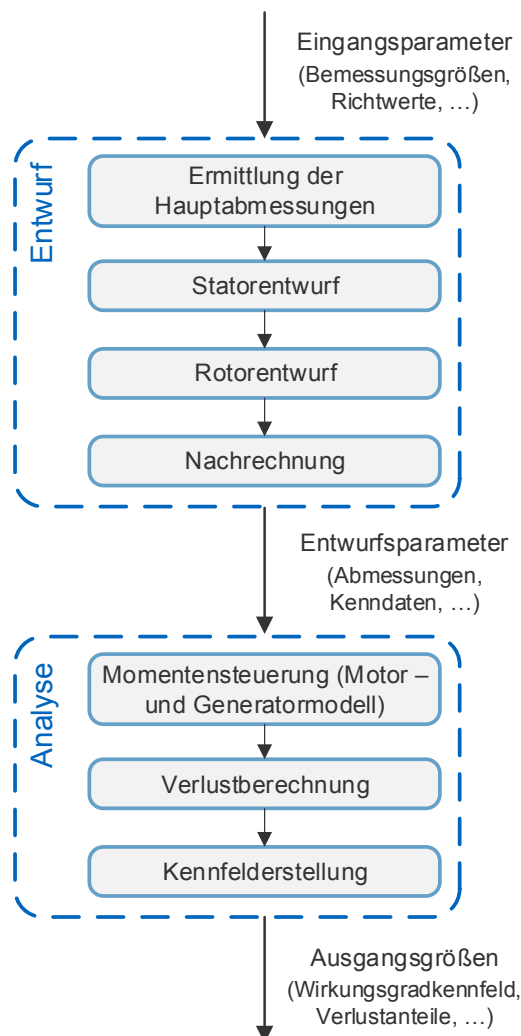


Figure 1: Modell für den Entwurf und die Analyse von PMSM und ASM (MEAPA)

1.2 Programmaufbau und Funktionen

Der Programmaufbau des Tools basiert auf dem MEAPA und ist in MATLAB implementiert. Analog zu den zwei Metamodellen *Entwurf* und *Analyse* ist das MEAPA-Tool ebenfalls in eine Entwurfs- und Analysekomponente unterteilt (Abb. 2). Beide Komponenten enthalten je zwei Hauptfunktionen für den Berechnungsgang der jeweiligen Maschinenart. Sowohl die Entwurfskomponente als auch die Analysekomponente verfügen über separate grafische Benutzeroberflächen (GUI), die den Benutzer durch den Entwurfs- und Analysevorgang führen. Die Funktionen, die lediglich für die internen Prozesse der grafischen Bedienoberfläche und das Datenhandling benötigt werden, sind nicht mit aufgeführt.

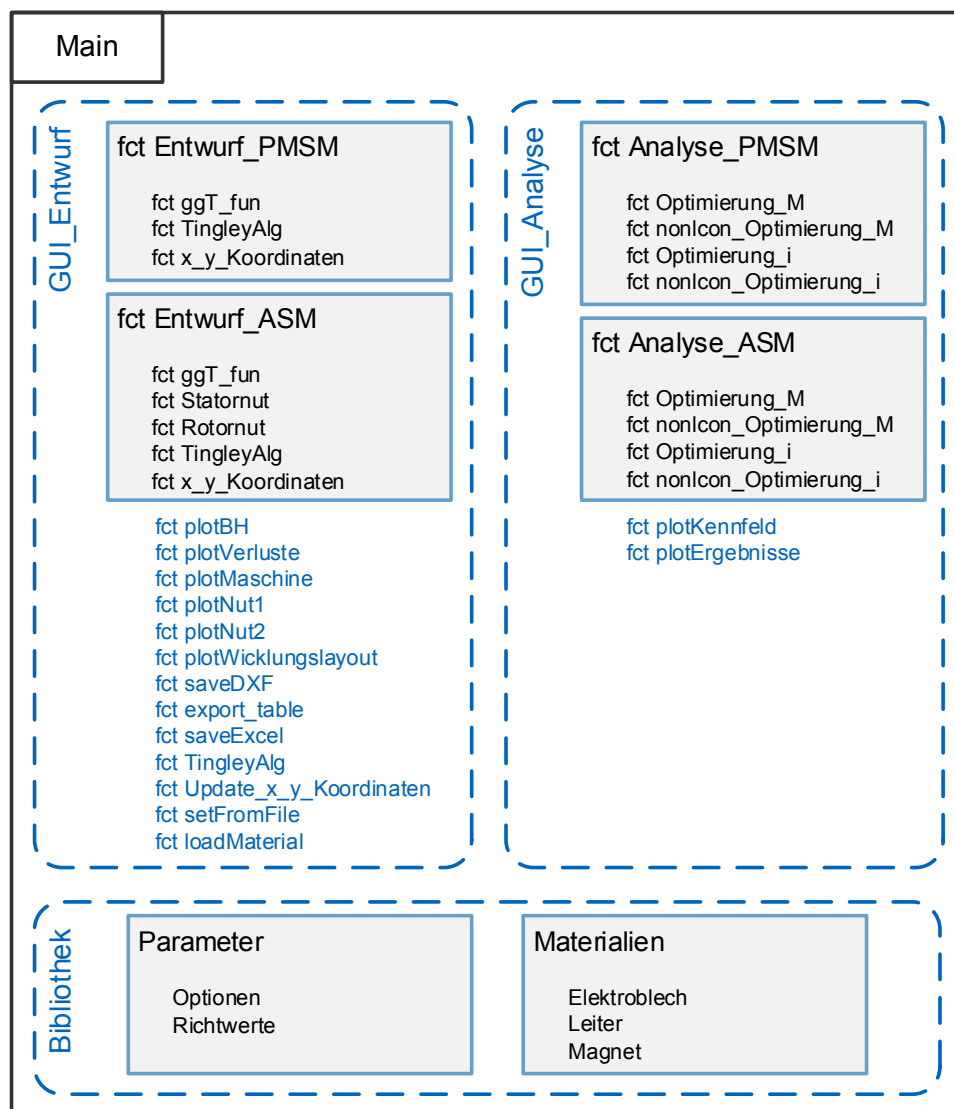


Figure 2: Funktionsaufbau MEAPA

Neben den beiden Hauptkomponenten existieren zwei Bibliotheken, die von der Entwurfs- und Analysekomponente genutzt werden können. In der Bibliothek *Parameter* werden unter anderem die der Literatur entnommenen Richtwerte maschinenabhängig hinterlegt. Die Kennwerte der Materialien werden in der Bibliothek *Materialien* gespeichert. Für die Elektrobleche sind dort beispielsweise Materialparameter, wie die *BH*- und Eisenverlustkurven, enthalten.

Weitere Bestandteile des MEAPA-Tools sind das Datenspeichersystem sowie zwei Schnittstellen. Mit dem Datenspeichersystem kann zu jedem Zeitpunkt der Maschinenentwurf zwischen gespeichert und später fortgesetzt werden. Zudem ist es dadurch möglich eine bereits entworfene Maschine aufzurufen und mit Änderungen erneut zu berechnen. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit der einfachen Archivierung der Ergebnisse. Als Schnittstellen werden ein Export von Geometriedaten in das CAD-Datenformat *dxf* sowie ein Export der Entwurfsergebnisse in eine Excel-Datei umgesetzt. Mit den CAD-Daten besteht dann die Möglichkeit, diese beispielsweise in ein FEM-Programm zu importieren und dort weitere Berechnungen durchzuführen. Dies ist vor allem für die IPMSM relevant, um die Quer- und Längsachseninduktivitäten exakt berechnen zu können.

1.3 Ordner- und Dateistruktur

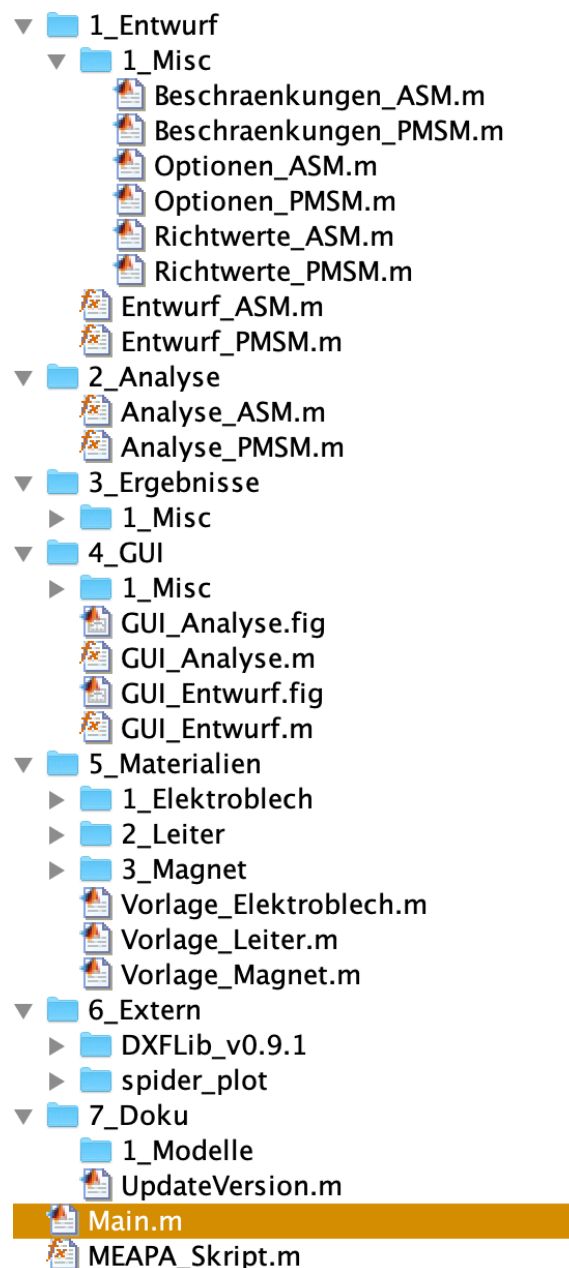


Figure 3: Ordnerstruktur MEAPA

1_ Entwurf

Die Hauptfunktionen für den Berechnungsgang des Entwurfs sind im Ordner *1_ Entwurf* gespeichert und werden im Kapitel 2 genauer beschrieben. Im Unterordner *1_ Entwurf/1_ Misc* sind die Parameterbibliotheken hinterlegt. Die Richtwerte im jeweiligen Skript bestehen immer aus einem max-, min- und Standard-Wert je Zeile. Bei mehreren Zeilen sind die unterschiedlichen Bedingungen für die Zeilen angegeben. In den Skripten *Optionen_xy* sind die implementierten und in der GUI dynamisch angezeigten Optionen gespeichert. Die Optionen zur Materialauswahl werden entsprechend der verfügbaren Materialbibliothek dynamisch geladen.

2_ Analyse

Im Ordner *2_ Analyse* sind die Hauptfunktionen der Berechnungsschritte für die Analyse hinterlegt. Die Analyse wird in Kapitel 3 detailliert vorgestellt.

3_ Ergebnisse

Die Ergebnisse des Entwurfs- und Analysevorgangs werden im Ordner *3_ Ergebnisse* entsprechend der zugehörigen ID der Datei abgespeichert. Im Unterordner *3_ Ergebnisse/1_ Misc* der Ergebnisse befindet sich die Vorlage für den Excel-Export.

Für eine Erweiterung der Excel-Datei bezüglich neuer Berechnungsgrößen müssen diese im Tabellenblatt *Formelzeichenverzeichnis* mit Formelzeichen, Bezeichnung und Einheit hinterlegt werden. Die Zuordnung zu den in die Tabellenblätter exportierten Daten erfolgt dann dynamisch.

4_ GUI

Die grafische Bedienoberflächen der Entwurfs- und Analysekomponente sind im Ordner *4_ GUI* abgelegt. Die GUI sind mit GUIDE erstellt worden. Eine Bearbeitung ist somit nur mit GUIDE zu empfehlen. Die Zuordnung und Auslesen der Eingaben wird in den zugehörigen *m*-files umgesetzt. Mit den Skripten in der Parameterbibliothek ist eine einfache Anpassung der Richtwerte und Optionen in der GUI möglich ohne den Code der GUI anpassen zu müssen.

5_ Materialien

Die Materialbibliothek enthält zum einen *mat*-Dateien, die je Material die zugehörigen Materialkennndaten enthalten. Zum Hinzufügen weiterer Materialien stehen die Vorlage-Skripte zur Verfügung. Damit können bequem die *mat*-Dateien für neue Materialien erzeugt werden. Es gilt die benötigten Materialparameter entsprechend der Vorlage einzutragen und das Skript anschließend durchzuführen. In jedem Skript sind mehrere Beispiele zur Orientierung enthalten.

6_ Extern

Die für den *dxg*-Export und die Darstellung des Eigenschaftsdiagramms benötigten externen Funktionen sind im Ordner *6_ Extern* gespeichert. Die Lizenzbedingungen für die Weiterverwendung und -verbreitung sind im jeweiligen Unterordner zu finden.

7_Doku

Im Ordner *7_Doku* ist die Dokumentation des MEAPA-Tools enthalten, sowie ein Skript zum Update der Header in allen *m*-files (Abschnitt 1.4).

1.4 Update Version

Für das Update der Header in allen *m*-files müssen alle *m*-files des MEAPA Tools geschlossen werden. Dann wird im *UpdateVersion*-Skript unter *newString* die neue Versionsnummer mit Bearbeiterkuerzel eingetragen. Anschliessend wird das *m*-file *UpdateVersion* gespeichert und ebenfalls geschlossen. Zuletzt muss im *Command Window* von MATLAB der Befehl *UpdateVersion* ausgeführt werden.

1.5 Start des Programms

Der Aufruf des Tools und damit der Start des Programms erfolgt mit der *Main*-Datei. In dieser werden automatisch die Pfade gesetzt und es kann ausgewählt werden, ob das Programm mit oder ohne GUI gestartet wird. Wenn das Programm ohne GUI ausgeführt werden soll, müssen die Eingangsparameter im *m*-file *MEAPA_Skript* definiert oder diesem übergeben werden.

HINWEISE für das *MEAPA_Skript*:

- Die Eingangsparameter können beliebig festgelegt werden, z.B. können die Bemessungswerte dem Skript übergeben werden, entsprechend muss der Bemessungswerte-Teil im *MEAPA_Skript* auskommentiert werden. Es muss allerdings nicht zwingend etwas übergeben werden.
- Wird das Skript ohne die *Main*-Datei benutzt, muss darauf geachtet werden, dass die Pfade korrekt gesetzt werden.
- Da keine Benutzeroberfläche zur Auswahl der Wicklung aufgerufen wird, kann nur der klassische Entwurf durchgeführt werden (keine Benutzerinteraktion notwendig).

2 Entwurf

Mit den Skripten *Entwurf_PMSM* und *Entwurf_ASM* wird eine PMSM bzw. ASM entsprechend der Bemessungswerte ausgelegt. Das Vorgehen für den elektromagnetischen Entwurf einer ASM ist in Abb. 4 nochmals grafisch dargestellt. Für die PMSM ergibt sich ein ähnliches Vorgehen.

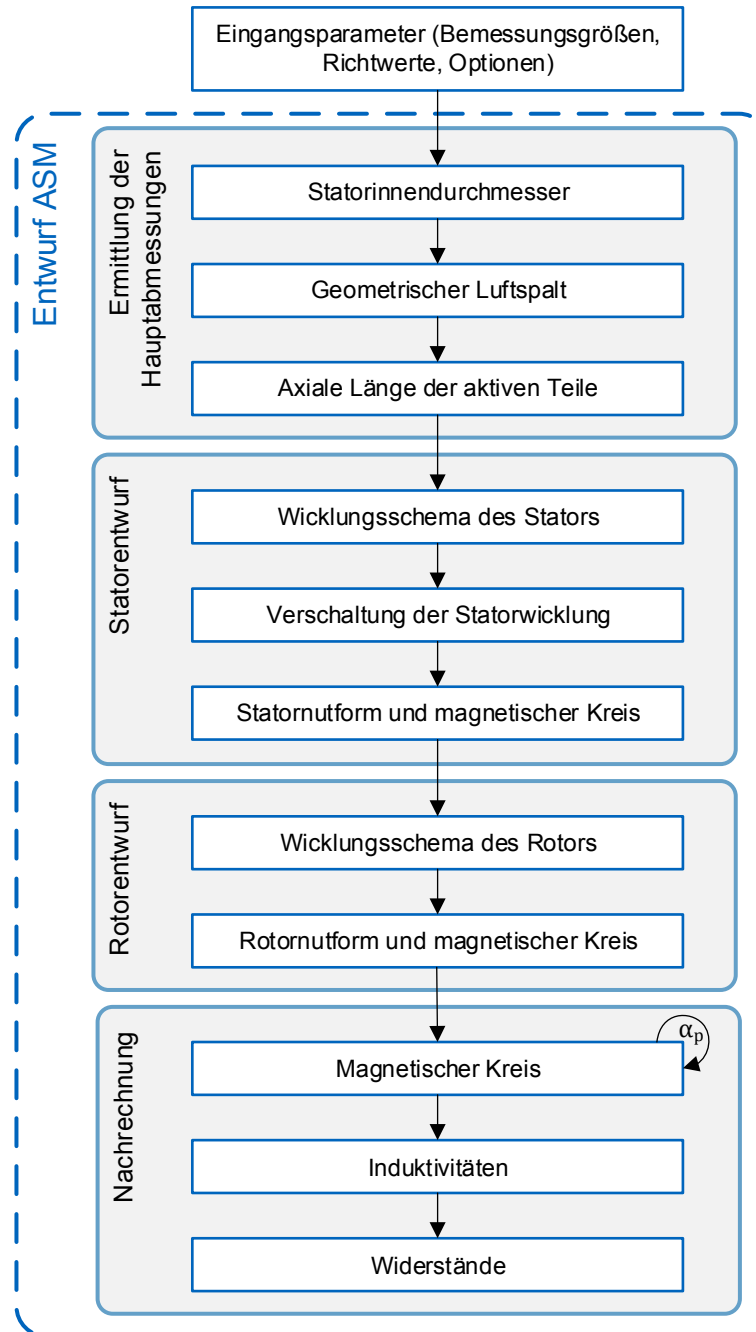


Figure 4: Entwurfsvorgang für die ASM

2.1 Aufbau der Skripte

Der Aufbau der Skripte für den jeweiligen Maschinentyp ist analog zum Vorgehen im Code sichtbar untergliedert. Zudem sind zu jeder verwendeten Formel die Quellen und getroffene Vereinfachungen oder Annahmen aufgeführt.

Nachfolgend sind die Inhaltsverzeichnisse der jeweiligen Entwurfs-Skripte aufgeführt. Die Hilfsfunktionen enthalten Funktionen, die beispielsweise für die Geometrie der Maschine benötigt oder mehrfach verwendet werden.

Inhaltsverzeichnis Entwurf ASM

- A) Preprocessing
- B) Ermittlung der Hauptabmessungen
 - B.1) Statorinnendurchmesser
 - B.2) Geometrischer Luftspalt und Rotoraußendurchmesser
 - B.3) Axiale Länge der aktiven Teile
- C) Statorentwurf
 - C.1) Wicklungsschema
 - C.2) Verschaltung
 - C.3) Nutform und magnetischer Kreis
- D) Rotorentwurf
 - D.1) Wicklungsschema
 - D.2) Nutform und magnetischer Kreis
- E) Nachrechnung
 - E.1) Nachrechnung des magnetischen Kreises
 - E.2) Induktivitäten
 - E.3) Widerstände
- F) Postprocessing
- G) Hilfsfunktionen

Inhaltsverzeichnis Entwurf PMSM

- A) Preprocessing
- B) Ermittlung der Hauptabmessungen
 - B.1) Statorinnendurchmesser
 - B.2) Geometrischer Luftspalt und Rotoraußendurchmesser
 - B.3) Axiale Länge der aktiven Teile
- C) Statorentwurf
 - C.1) Wicklungsschema
 - C.2) Verschaltung
 - C.3) Nutform und magnetischer Kreis
- D) Rotorentwurf
 - D.1) Magnetdimensionierung
 - D.2) Magnetpositionierung und magnetischer Kreis
- E) Nachrechnung
 - E.1) Induktivitäten
 - E.2) Widerstände
- F) Postprocessing
- G) Hilfsfunktionen

2.2 Programmstruktur - Statorentwurf

Die Vorgehensweisen für die drei unterschiedlichen Optionen des Statorentwurfs sind zu einer einheitlichen Programmstruktur auf gemeinsamer Code-Basis zusammengefasst und in die beiden Hauptfunktionen des Entwurfs integriert. Die Programmstruktur basiert auf dem optimierten Vorgehen für den Statorentwurf und ist in Abb. 5 und 6 dargestellt.

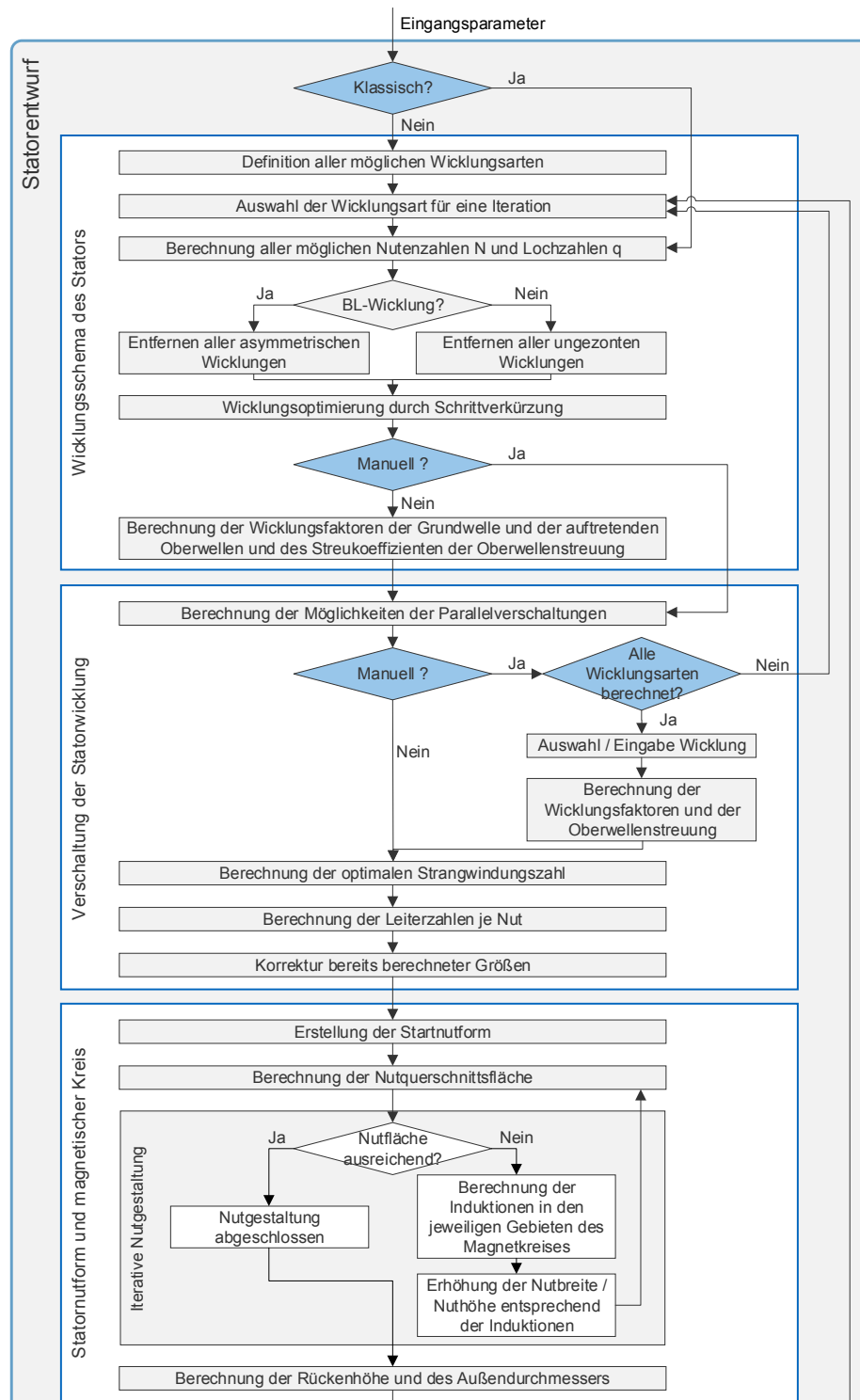


Figure 5: Programmstruktur Statorentwurf (Teil 1)

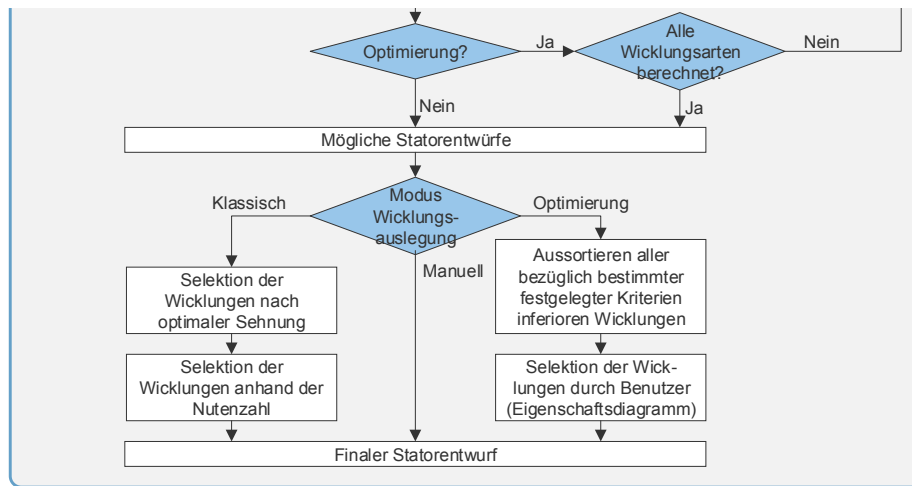


Figure 6: Programmstruktur Statorentwurf (Teil 2)

2.3 Programmstruktur - Iterative Nutgestaltung

Bei der iterativen Nutraumgenerierung mittels Nutraumbilanz wird die Nutform unter Beachtung optimaler Zahn- und Rückeninduktionen iterativ vergrößert, bis der erforderliche Nutquerschnitt erreicht ist. Die Bedingung für die iterative Nutgenerierung ist die Definition der Parameter, welche die Nutform eindeutig beschreiben. Es darf keine Überbestimmung der geometrischen Form auftreten. Im MEAPA-Tool ist eine trapezförmige Grundnutform implementiert, die durch die Parameter in Abb. 7 eindeutig beschrieben wird.

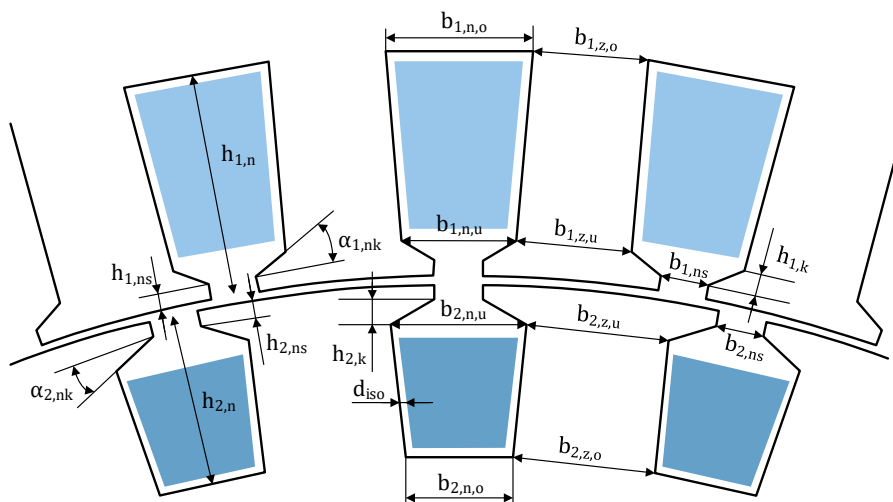


Figure 7: Nutabmessungen

Die Vorgehensweise zur iterativen Nutgenerierung zeigt Abb. 8. Durch die Struktur des gewählten Algorithmus wird die Nut immer an der Stelle der geringsten Induktion vergrößert. Dabei wächst die Nut erst in die Breite, bis die zulässigen Zahninduktionen erreicht sind. Danach erfolgt das Nutwachstum in die Höhe.

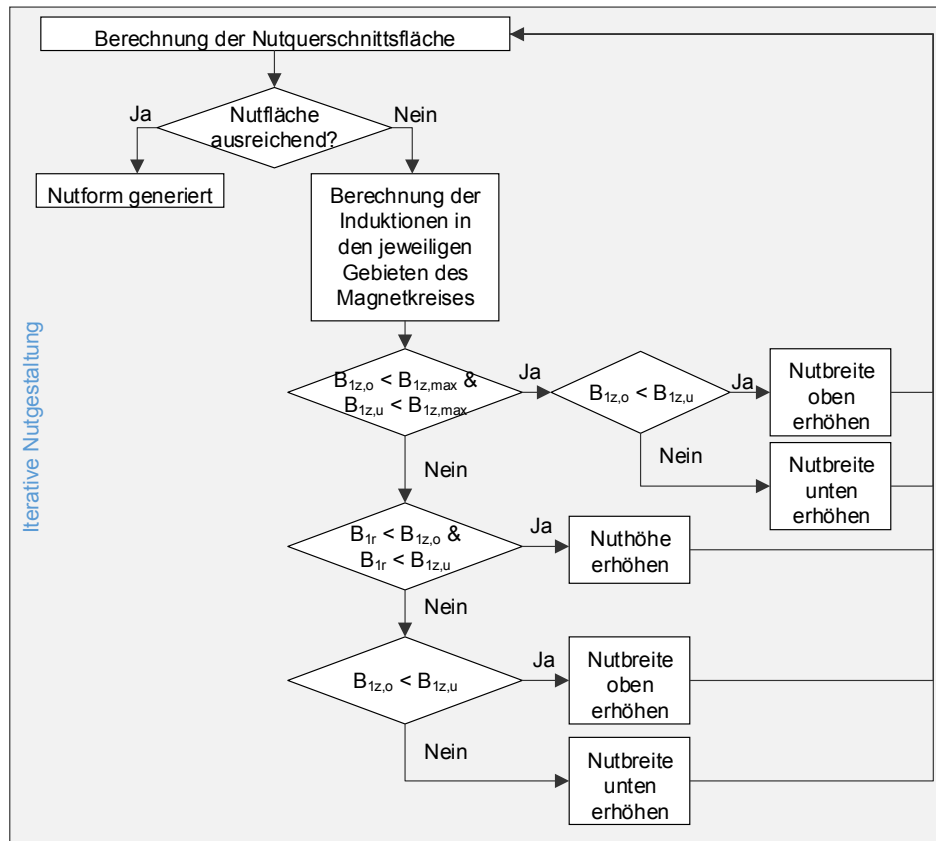


Figure 8: Iterative Nutgestaltung

2.4 Programmstruktur - Nachrechnung des magnetischen Kreises

Für die Nachrechnung des magnetischen Kreises wird eine Programmstruktur mit mehrstufigem Iterationsprozess verwendet, die in Abb. 9 dargestellt ist. Die Verschachtelung der zwei Iterationsschleifen dient dazu die Auswirkungen der Korrekturen rückzukoppeln und eine erneute Korrekturschleife zu initiieren.

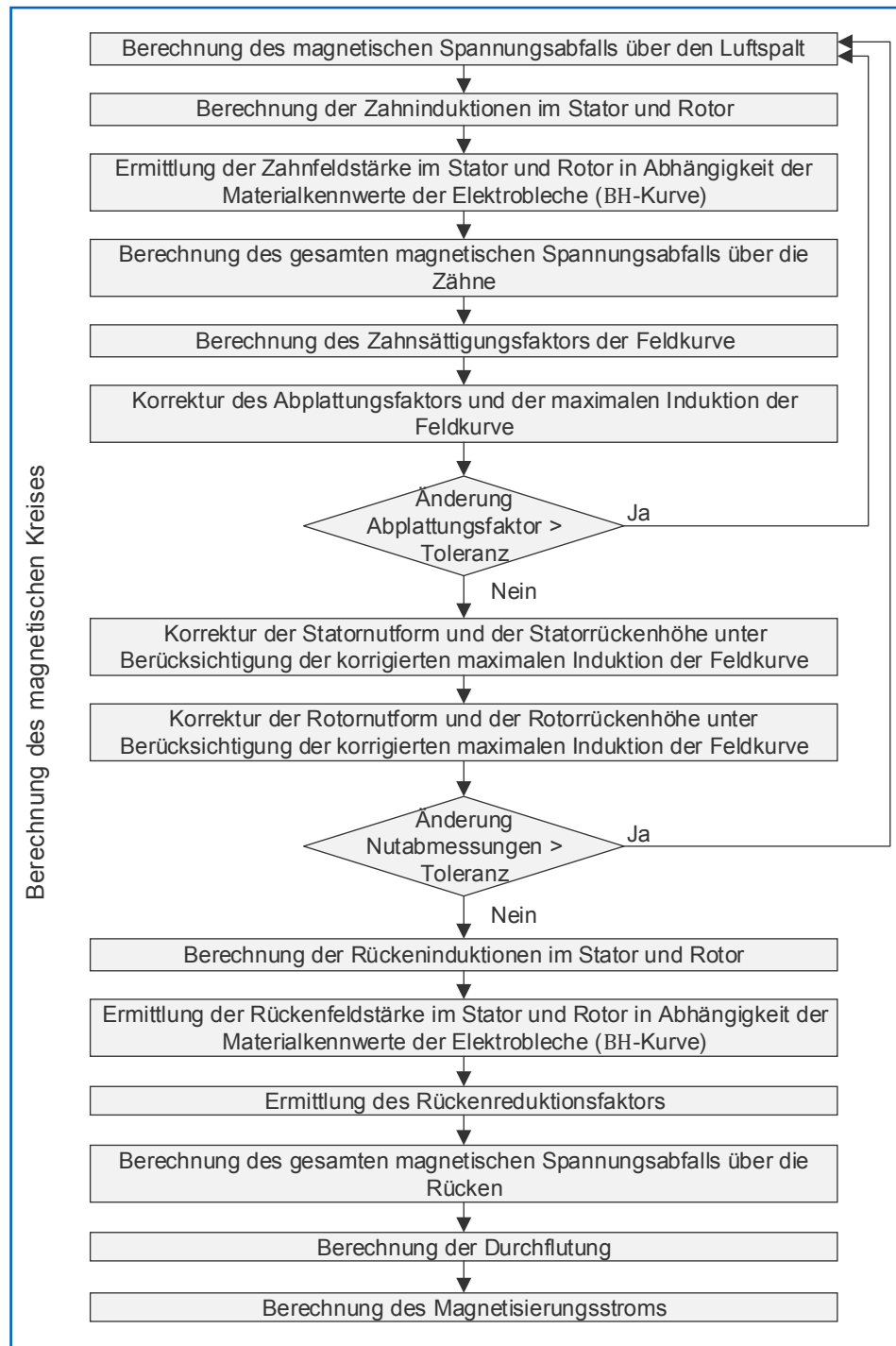


Figure 9: Programmstruktur für die Nachrechnung des magnetischen Kreises

2.5 Bedienoberfläche

Die Bedienoberfläche des Entwurfs teilt sich in zwei Hauptbereiche. Im Reiter *Eingabe* werden die Eingangsparameter für den Entwurf festgelegt. Der Reiter *Ergebnisse* ist variabel. Nach erfolgreich abgeschlossenen Entwurf werden dort ausgewählte Entwurfsgrößen sowie die Geometrie der Maschine angezeigt. Allerdings werden im Reiter *Ergebnisse* auch je nach ausgewähltem Modus der Wicklungsauslegung Zwischenschritte, die eine Eingabe bzw. Auswahl des Benutzers erfordern, dargestellt.

Eingabe

Im Reiter *Eingabe* der Bedienoberfläche des Entwurfs gibt der Benutzer die Eingangsparameter für den Entwurf an. Die Bedienoberfläche der Eingabe ist in 10 dargestellt.

The screenshot displays the 'Eingabe' (Input) tab of the MEAPA-Tool interface. The interface is divided into several sections for parameter entry:

- Bemessungswerte** (Design Values): Includes fields for Nennleistung in kW (3), Nenndrehzahl in 1/min (1500), Nennspannung in V (400), Leistungsfaktor (1), and Strangzahl (3).
- Richtwerte - WARNING - Experts only** (Guideline Values): A section with a 'Reset to Default' button, containing fields for Relative Ankerlänge (1.45), Kanalbreite der Ventilationskanäle in m (0.01), Mittelwert der Luftspaltinduktion in T (0.58), and various stator and rotor parameters like Stromdichte, Ruckinduktion, Zahninduktion, Nutteilung, and Eisenverlustfaktor.
- Optionen Maschine** (Machine Options): Includes 'MaschinenAusführung' (Käfigläufer), 'Wicklung' (Schaltung: Dreieck, Spulenform Stator/Rotor: Runddraht, Nutform Stator/Rotor: Trapezform (eckig)), 'Kuehlung' (Kuehlungsart: Oberflaechenkuehlung), and material options for Stator and Rotor (Eisenmaterial: M800-50A, Leitermaterial: Kupfer for Stator, Aluminiumguss for Rotor) with temperature settings.
- Optionen Berechnung** (Calculation Options): Includes 'Modus Wicklungsauslegung' (Manuell / Austeilung) and 'Wicklungstyp'.

At the bottom, there are two buttons: 'Entwurf starten' (Start Design) and 'Weiter zu den Ergebnissen >>' (Continue to Results).

Figure 10: Eingabe der Eingangsparameter für den Entwurf

In einem ersten Schritt wird die gewünschte Maschinenart ausgewählt. Je nach gewählter Maschinenart werden dann in der Bedienoberfläche die entsprechenden Eingabefelder, die für den Entwurf benötigt werden, freigeschaltet sowie die Richtwerte und die zur Verfügung stehenden Optionen aus den Bibliotheken geladen.

Nach Auswahl der Maschinenart müssen die Bemessungsgrößen eingegeben werden und die Optionen der Maschine ausgewählt werden. Mit Auswahl der materialspezifischen Optionen

werden die jeweiligen Materialkennwerte aus der Bibliothek *Materialien* geladen. Über die "Plot *BH*-Kurve"-Schaltfläche und die "Plot Eisenverlust Kurve"-Schaltfläche können dann die Materialeigenschaften des Elektrolechs angezeigt werden.

Bei Bedarf können zudem die Richtwerte an die Anforderungen angepasst werden. Hierbei wird der Benutzer durch die Bedienoberfläche unterstützt, indem die Eingaben mit dem in der Parameter-Bibliothek *Richtwerte* hinterlegten Gültigkeitsbereich für den jeweiligen Richtwert abgeglichen werden. Wenn der eingegebene Wert die Grenzwerte für minimal und maximal zulässige Werte über- bzw. unterschreitet, wechselt die Hintergrundfarbe des Eingabefeldes von grün auf rot (Abb. 10). Der Gültigkeitsbereich kann durch Bewegen des Mauszeigers auf das jeweilige Eingabefeld des Richtwerts eingesehen werden. Die initial eingetragenen Richtwerte stellen einen durchschnittlichen Standardwert für jeden Parameter dar, sodass eine erste valide Dimensionierung ohne weitere Eingaben möglich ist.

Mit der "Entwurf starten"-Schaltfläche wird die Hauptfunktion *fct Entwurf_xy* der ausgewählten Maschinenart aufgerufen und der Entwurfsvorgang beginnt.

Modus Optimierung

Wenn bei dem Modus der Wicklungsauslegung die Option *Optimierung* gewählt wird, ist ein Zwischenschritt im Entwurfsvorgang notwendig. In diesem Zwischenschritt selektiert der Benutzer über ein Auswahlménü die Parameterkombination, die den Anforderungen am besten entspricht. Zur Visualisierung der unterschiedlichen Parameterkombinationen werden diese in Form eines Eigenschaftsdiagramms, in dem die Kriterien vergleichend aufgeführt sind, veranschaulicht. Nach der Auswahl einer Parameterkombination wird der Entwurf dann fortgesetzt.

Die Bedienoberfläche für die Option *Optimierung* ist in Abb. 11 dargestellt.

Modus Manuell

Analog zur Option *Optimierung* wird auch bei der Option *Manuell* ein Zwischenschritt im Entwurfsvorgang benötigt. In diesem kann der Benutzer aus einer der möglichen Wicklungskombinationen auswählen oder ein eigenes Wicklungslayout in Form eines Zonenplans eingeben. Das Wicklungslayout wird dann anhand einer generischen Maschine visualisiert. In Abb. 12 ist dies in der Bedienoberfläche dargestellt.

Bei der Eingabe des Wicklungslayout muss eine vorgegebene Notation eingehalten werden. Positive Spulenseiten werden mit einem Großbuchstaben und negative Spulenseiten mit einem Kleinbuchstaben gekennzeichnet. Für die drei Stränge sind die Buchstaben A, B und C zu wählen. Die nächste Nut muss mit dem Trennzeichen "|" abgegrenzt werden. Die Eingabe ist kompatibel zu dem Online Wicklungs-Berechnungs-Tool "Emetor" gestaltet, sodass eine einfache Übernahme möglich ist. Bei der manuellen Eingabe muss zudem die Wicklungsschrittverkürzung bzw. -verlängerung der Wicklung angegeben werden, damit eine Berechnung der Wicklungsfaktoren erfolgen kann.

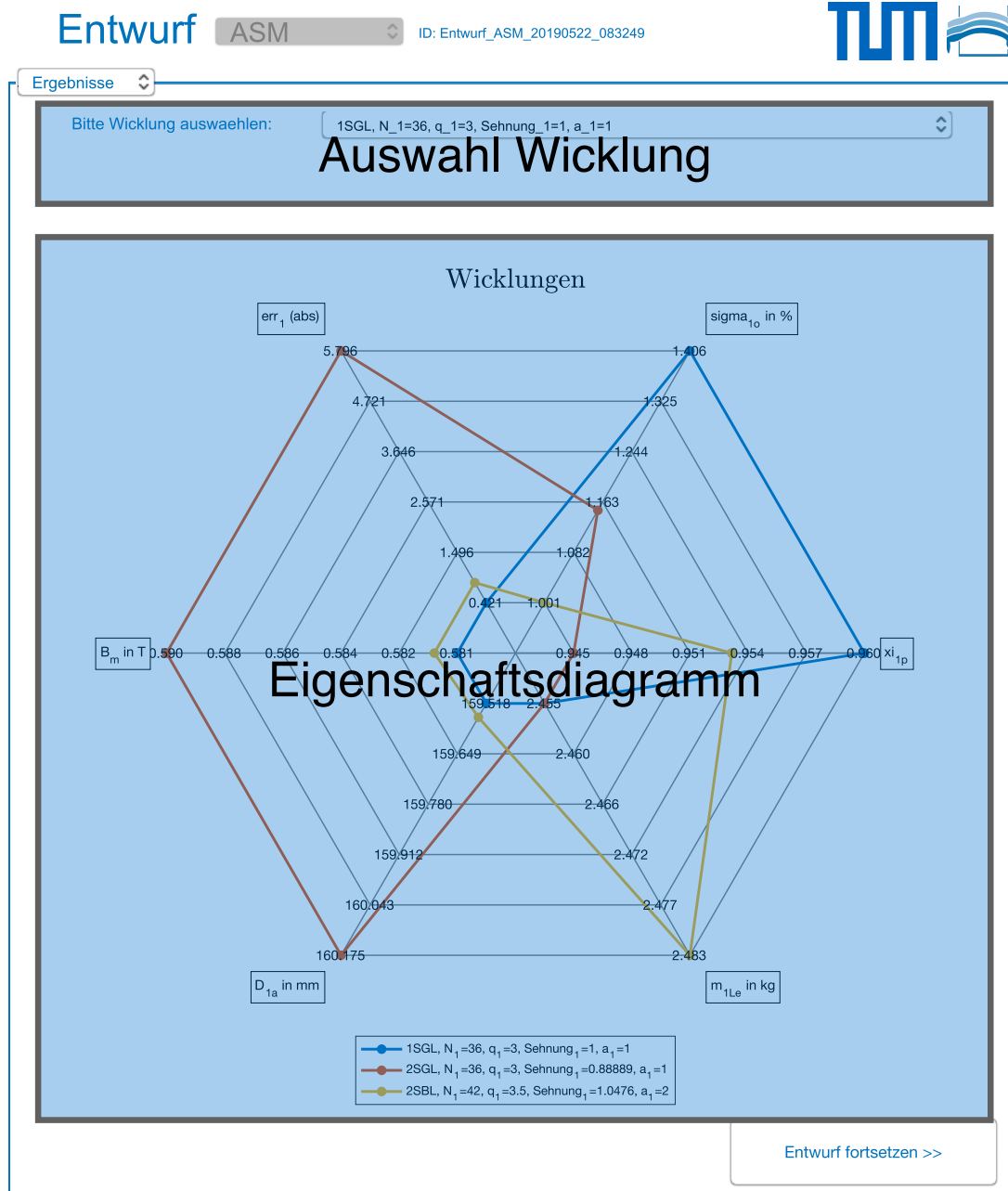


Figure 11: Option Optimierung - Vergleich der Wicklungen anhand bestimmter Kriterien in einem Eigenschaftsdiagramm

Ergebnisse

Sobald der Entwurfsvorgang abgeschlossen ist, werden im Reiter *Ergebnisse* der Bedienoberfläche des Entwurfs ausgewählte Ergebnisse sowie die Geometrie der Maschine angezeigt. Neben den relevantesten Hauptabmessungen, wie Statorinnendurchmesser oder ideale Länge, werden auch einige Maschinen-Kennzahlen dargestellt. Bei der Visualisierung der Geometrie kann zwischen der Gesamtansicht der Maschine, der Geometrie der Statornut und sofern vorhanden der Geometrie der Rotornut gewählt werden. Die Darstellung des Wicklungslayouts erfolgt analog zu dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Vorgehen.

Bei PMSM werden weitere Funktionen freigeschaltet. Es können beispielsweise die Werte

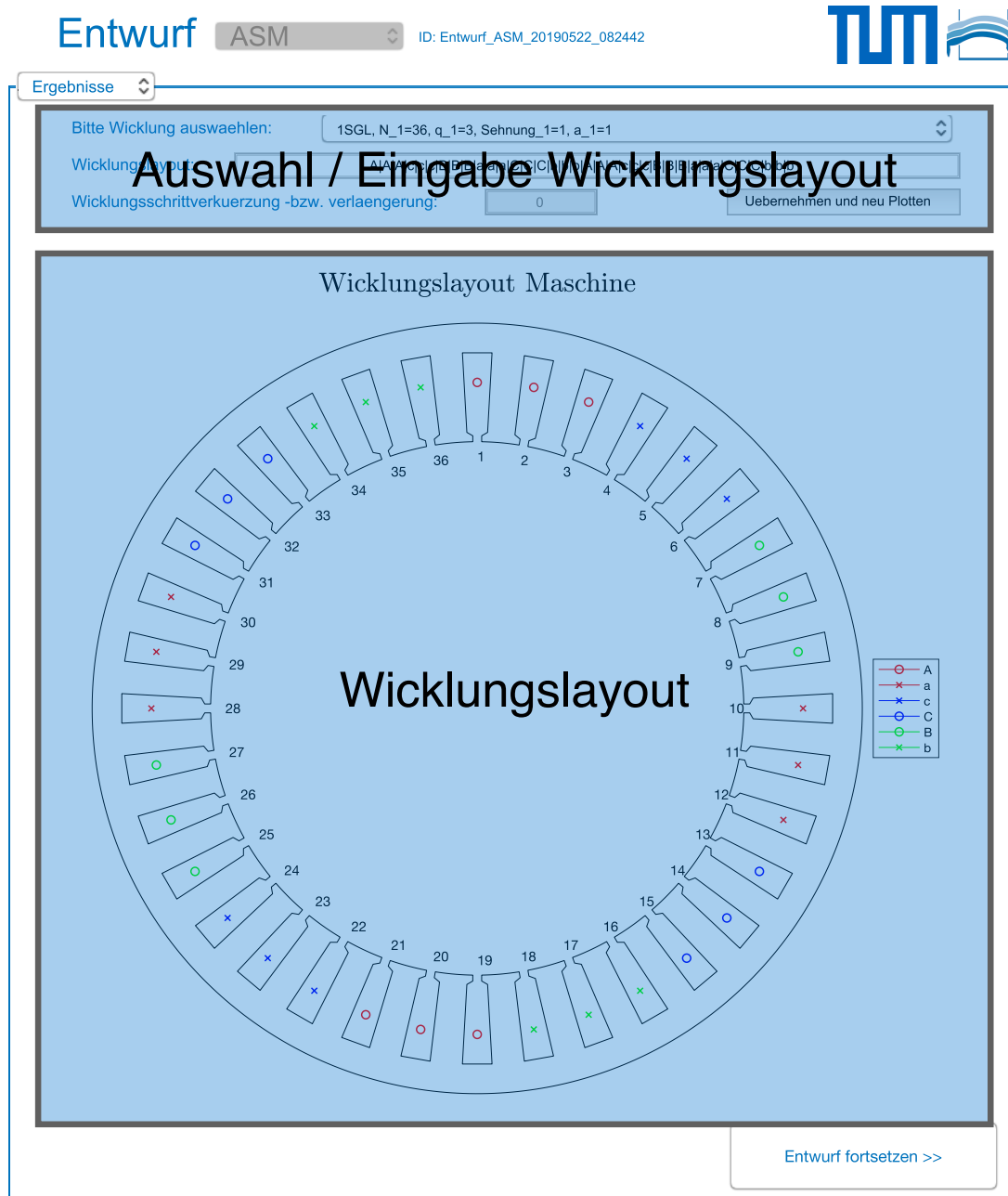


Figure 12: Option Manuell - Eingabe bzw. Auswahl einer Wicklung für den Entwurf

der Längs- und Querachseninduktivität und des verketteten Flusses der PM korrigiert werden. Dadurch ist es möglich, die aus einer FEM-Simulation erhaltenen Daten in das MEAPA-Tool zurück zu speisen und die analytischen Abschätzungen des Entwurfsvorgangs zu verbessern.

Eine weitere Funktion ist die Anpassung der Geometrie der Magnete und der Magnetanordnung. Hierbei ist zu beachten, dass für die angepasste Geometrie immer Werte für die Längs- und Querachseninduktivität und den verketteten Fluss der PM aus einer externen Berechnung anzugeben sind. Diese Werte können mit den exportierten CAD-Daten der angepassten Geometrie beispielsweise mittels eines FEM-Programms ermittelt werden.

In 13 ist die Bedienoberfläche der Entwurfsergebnisse für eine ASM dargestellt. Mit der "Weiter zur Analyse"-Schaltfläche wird der Berechnungsgang fortgesetzt und die Entwurfsgrößen der Analyse übergeben.

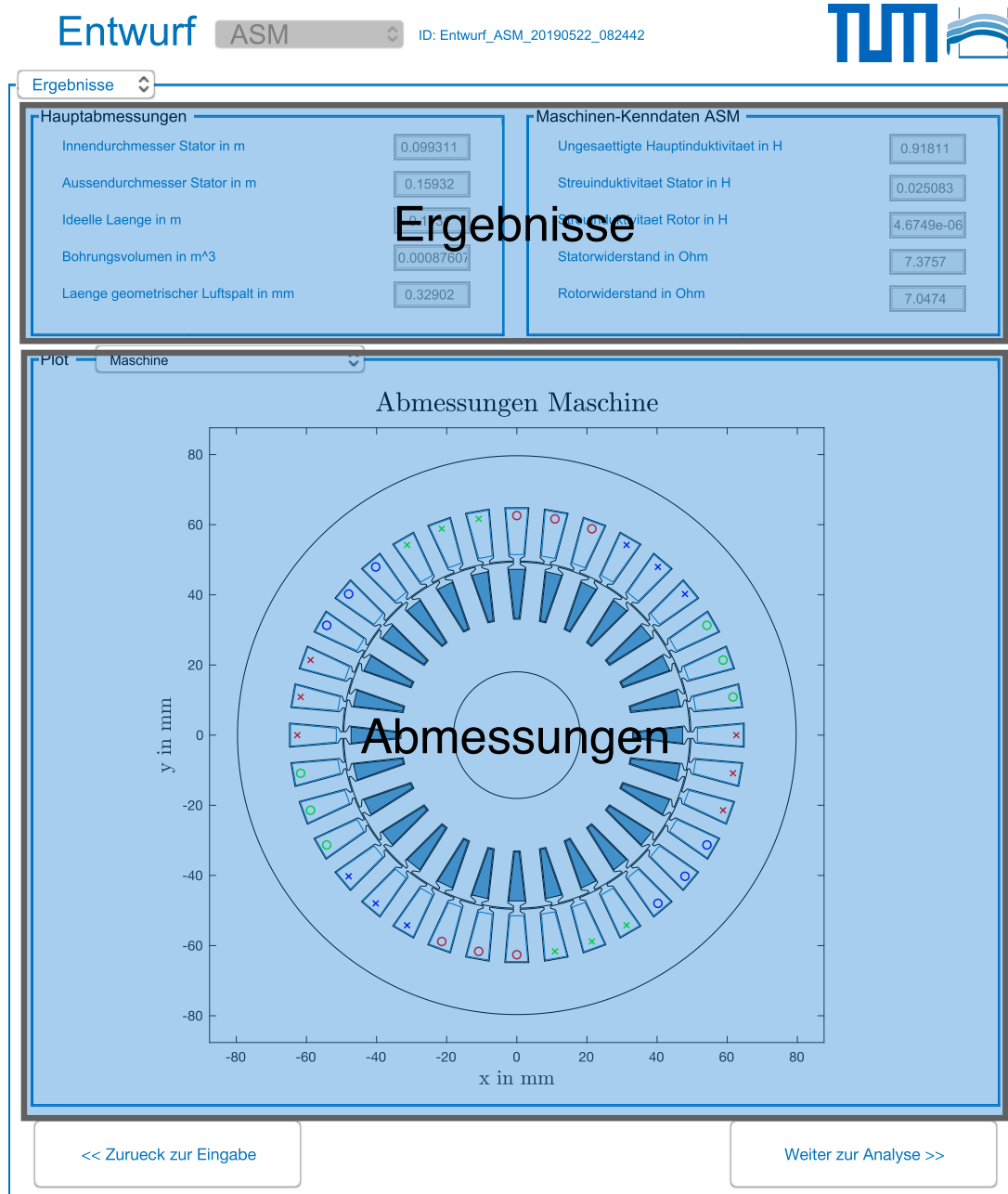


Figure 13: Ergebnisse des Entwurfsvorgangs und Darstellung der Geometrie

3 Analyse

Mit der Analyse werden Kennfelder für die vorher ausgelegte Maschine berechnet. Dazu werden zuerst die Ströme und Spannungen mittels eines Motor- bzw. Generatormodells berechnet. Dann werden die einzelnen Verlustanteile ermittelt. Zuletzt entsteht das Wirkungsgradkennfeld.

3.1 Aufbau der Skripte

Der Aufbau der Skripte für den jeweiligen Maschinentyp ist analog zum Vorgehen im Code sichtbar untergliedert. Die Herleitung und Erläuterung des Motor- bzw. Generatormodells sind den Arbeiten von Jonathan Erhard zu entnehmen.

Den Skripten liegen lineare und stationäre Betrachtungen zugrunde. Zudem erfolgt keine thermische Überprüfung o.ä. Der Nutzer ist deswegen angehalten die Maschine nur mit realistischen Angaben zu speisen (i_{\max} und u_{\max}).

V/A: lineare & stationäre Betrachtung:

- keine Sättigung
- keine Kreuzkopplung der Induktivitäten
- Induktivitäten sind nicht stromabhängig
- keine Dynamik
- verketteter Fluss der PM konstant

Nachfolgend sind die Inhaltsverzeichnisse der Analyse-Skripte aufgeführt. Die Hilfsfunktionen enthalten die Funktionen für die Optimierungsprobleme und deren nichtlinearen Nebenbedingungen und werden mehrfach verwendet.

Inhaltsverzeichnis Analyse ASM und PMSM

- A) Preprocessing
- B) Momentensteuerung
 - B.1) Motormodell
 - B.2) Generatormodell
- C) Verlustberechnung
- D) Kennfelderstellung
- E) Postprocessing
- F) Hilfsfunktionen
 - F.1) Optimierung_M
 - F.2) Optimierung_i

3.2 Bedienoberfläche

In der Bedienoberfläche *Analyse* kann der Benutzer zum einen die Eingangsparameter für die Analyse festlegen und zum anderen werden die berechneten Kennfelder angezeigt. Die Bedienoberfläche ist in Abb. 14 dargestellt.

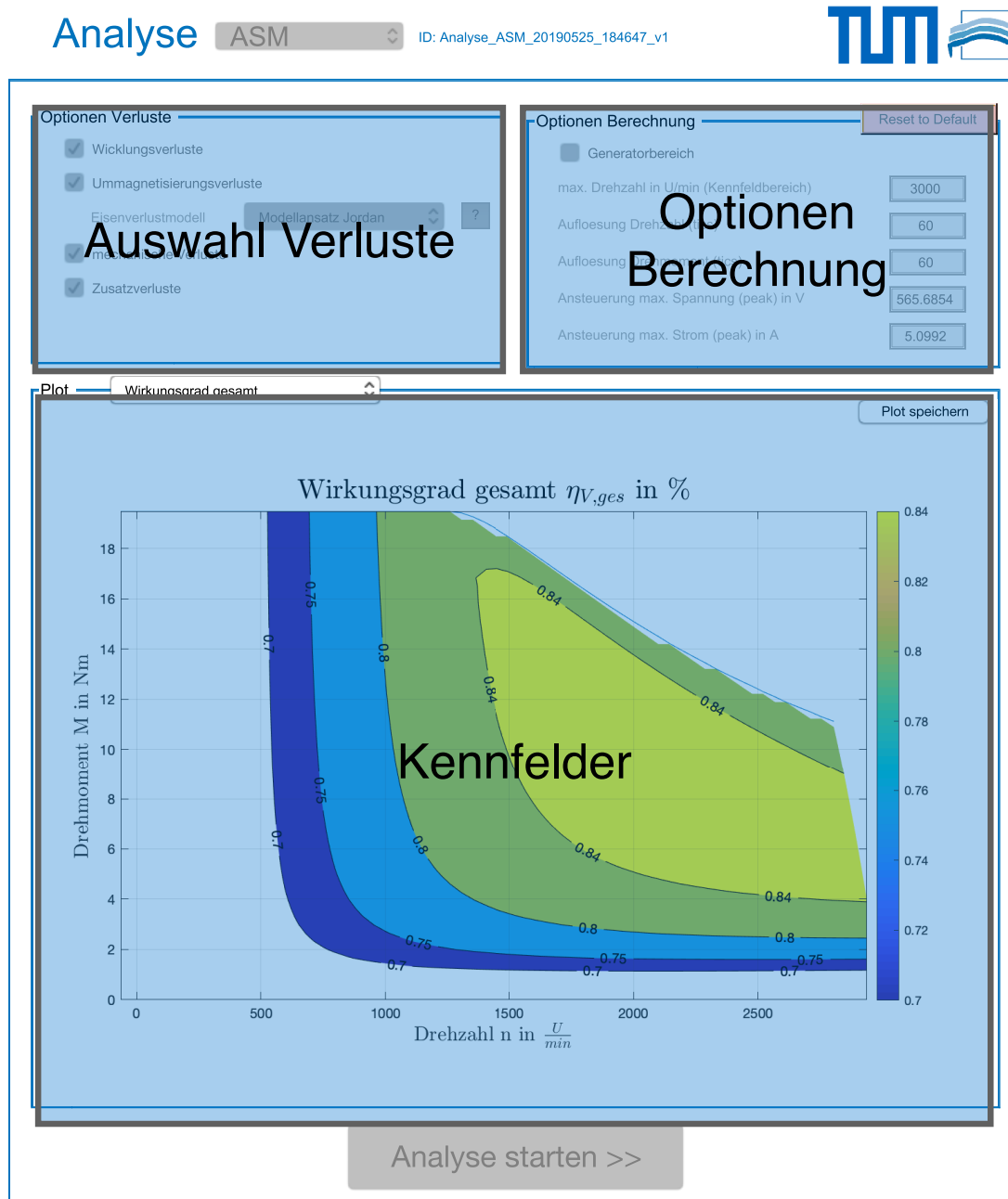


Figure 14: Eingabe der Eingangsparameter und Darstellung der Ergebnisse für die Analyse

Die Optionen umfassen die Auswahl der Verluste und Einstellungen für die Berechnung der Kennfelder. In der Bedienoberfläche können die Verlustanteile selektiert werden, die bei der Berechnung des Wirkungsgrads berücksichtigt werden sollen. Für die Berechnung der Eisenverluste kann bei Bedarf das Eisenverlustmodell angepasst werden. Bei den Optionen, welche die Berechnung betreffen, können der Generatorbereich aktiviert und die maximale Drehzahl des Kennfeldbereichs festgelegt werden. Die Analyse der Maschine erfolgt bis zu der maximalen

Drehzahl. Mit den zwei Eingangsparametern *Auflösung Drehzahl* und *Auflösung Drehmoment* wird der Abstand zweier Betriebspunkte im Gitter definiert. Eine höhere Auflösung ist mit einer höheren Anzahl an Berechnungen verbunden, wodurch unmittelbar die Rechenzeit ansteigt. Die zwei Ansteuerungsparameter legen die Strom- bzw. Spannungsgrenzen fest. Durch Variation kann die Maschine mit unterschiedlichen Grenzen betrieben werden, um beispielsweise einen eventuellen Überlastbetrieb zu testen. Hier erfolgt nochmals der Hinweis, dass dem Modell einige Vereinfachungen und keinerlei thermische Untersuchungen zugrunde liegen und daher die Werte mit Bedacht angepasst werden sollten. Die eingetragenen Standardwerte entsprechen den Nennwerten der Maschine.

Mit der "Analyse starten"-Schaltfläche startet die Berechnung der Kennfelder. Die Vollastkennlinie wird mit der Funktion *fct Optimierung_M* berechnet. Je nach Maschinenart sind in der Funktion die angepassten Systemgleichungen hinterlegt. In der Funktion *fct nonlcon_Optimierung_M* sind maschinenabhängig die Nebenbedingungen des Optimierungsproblems eingetragen. Die Berechnung der Ströme für die Betriebspunkte erfolgt dann durch Lösen des Optimierungsproblems, das in den Funktionen *fct Optimierung_i* und *fct nonlcon_Optimierung_i* implementiert ist. Beide Optimierungsprobleme sind durch einfache Anpassung der Betriebsgrenzen sowohl für die Berechnung des motorischen als auch des generatorischen Betriebsbereichs geeignet. Bei der Berechnung der Ströme wird die Optimierung beschleunigt, indem die aus den vorherigen Schritten ermittelten Ströme als Startwerte herangezogen werden.

Nach der Berechnung der Ströme werden die restlichen Größen sowie die Verluste ermittelt und anschließend in Form von Kennfeldern in der Bedienoberfläche dargestellt. Über ein Auswahlménü kann sich der Benutzer das gewünschte Kennfeld anzeigen lassen. Zudem kann das jeweilige Kennfeld über die "Plot speichern"-Schaltfläche als "figure" im Ergebnisordner gespeichert werden.

4 Sonstiges

4.1 Changelog

Versionsnummer	Bearbeiter	Änderungen
v0.1	(je)	-
v0.2	(je)	-
v0.3	(je)	-
v0.4	(je)	<ul style="list-style-type: none">• Inkompatibilitäten bei Benennung der Dateien in Windows behoben• Abschätzung der Längs- und Querinduktivitäten wieder hinzugefügt
v0.5	(je)	<ul style="list-style-type: none">• Excel-Export gefixt
v0.6	(je)	<ul style="list-style-type: none">• Skript-Modus hinzugefügt zur Umgehung der GUI
v0.7	(je)	<ul style="list-style-type: none">• Bugfixes
v0.8	(je)	<ul style="list-style-type: none">• Rückkopplung der ausgewählten Eisenblechparameter in GUI• Warnhinweis Induktivitäten• Warnhinweis Überschreitung Richtwerte der Induktionen

4.2 Zusammenhang der Modelle / Programmstruktur

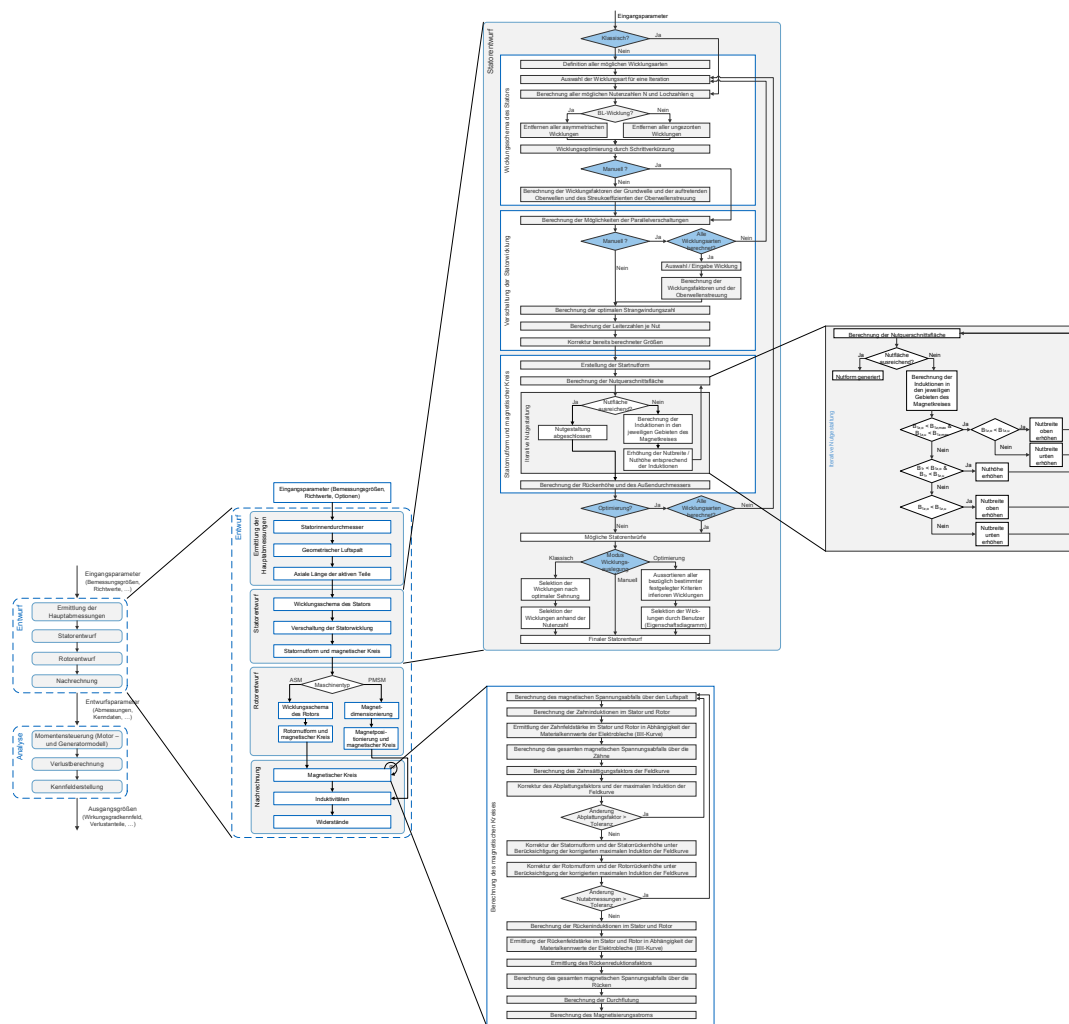


Figure 15: Zusammenhang der Modelle / Programmstruktur

4.3 Kurzüberblick Verbesserungen ggü. Modell Horlbeck

Allgemein

- lückenlose Dokumentation im Code, in Form dieser Kurzanleitung und in Form der Arbeiten von Jonathan Erhard
- ein Tool für ASM und PMSM
- strukturierter und einfach gehaltener Aufbau
- vollständige grafische Bedienoberfläche
- Daten für Elektrolech basieren auf realen Daten der Herstellerangaben
- Export der Ergebnisse zu Excel und "dxf"
- Datenspeichersystem

Entwurf

- Ermittlung der Hauptabmessungen ähnlich, hauptsächlich Entfernen der "Magic Numbers" aus Code → vollständig über GUI parametrierbar
- Statorentwurf vollständig überarbeitet:
 - Wicklungsentwurf und Verschaltung entsprechend neuartigen Entwurfsvorgang, darin u.a. enthalten:
 - * Verwendung nur der tatsächlich möglichen Sehnungen
 - * Tatsächlicher Entwurf/Auteilung der Wicklungen
 - * 3 Optionen der Wicklungsberechnung:
 - Auswahl der "besten" Wicklung (Optimierung)
 - Auswahl manuell (Manuell)
 - Auswahl automatisch (Automatik)
 - * Erweiterung der Wicklungskombinationen durch Berücksichtigung von Bruchlochwicklungen (inkl. Zahnspulenwicklungen)
 - Iterative Nutgenerierung und genaue Parametrierung der Nutgeometrie
- Rotorentwurf PMSM:
 - Varianten Magnetanordnung im Rotor hinzugefügt (SPMSM, IPMSM)
 - Genaue Parametrierung der Magnetgeometrie + Variation in GUI
 - Rückkopplung der tatsächlichen Induktivitäten aufgrund der Abmessungen und Geometrie der PM möglich durch:
 - * grobe Abschätzung nach empirischen Formeln
 - * Korrektur der Werte in GUI nach FEM-Berechnung

- Rotorentwurf ASM:
 - Unstimmigkeiten beim Rotorentwurf aufgelöst
 - Iterative Nutgenerierung und genaue Parametrierung der Nutgeometrie
- Nachrechnung:
 - Nachrechnung des magnetischen Kreises anders gestaltet:
 - * Zweifache Korrekturschleife zur verbesserten Nachrechnung
 - * Anpassung der Zahngeometrie und Ausgabe einer Warnung falls die voreingestellten Richtwerte überschritten werden
 - * Ungenauigkeiten bei Ermittlung des Rückenreduktionsfaktors umgangen
 - Berechnung der Streuinduktivitäten auf Basis der tatsächlichen Nutabmessungen bzw. Oberwellen
- Vollständige Beschreibung der Geometrie der Maschine → "dxf"-Export

Analyse

- Gleichungen der feldorientierten Regelung bilden Basis für das Motor- bzw. Generatormodell → Stromminimale Optimierung
- Eisenverlustmodell nach Jordan (+ tatsächliche Elektroblechparameter)
- Generatorbetrieb