



# **smartFEM**

**Analyse und Design elektrischer Antriebe**

**Benutzerhandbuch**

smartFEM 2.014 - 22.01.2025

**Copyright:** Alle Rechte an diesem Dokument und der zugrunde liegenden Software, insbesondere das Recht der Nutzung, der Bearbeitung und Umgestaltung, der Übertragung von Rechten, der Veröffentlichung, der Vervielfältigung, der Verbreitung, der Vorführung sowie der Wiedergabe durch Bild- und Tonträger vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung der elmoCAD Engineering GmbH.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>6</b>
<b>Einleitung .....</b>	<b>13</b>
<b>1 Installation.....</b>	<b>14</b>
1.1 .NET Framework.....	14
1.2 smartFEM.....	14
<b>2 Start und Einstellungen .....</b>	<b>17</b>
2.1 Start .....	17
2.2 Registrierung und Lizenzinformation .....	18
2.3 Einstellungen.....	19
2.3.1 smartFEM .....	19
2.3.1.1 Folders: Einstellungen der Verzeichnisse .....	19
2.3.1.2 Saving: Einstellungen für die Speicherung von Modellen.....	20
2.3.1.3 General: Allgemeine Einstellungen .....	21
2.3.1.4 GUI: setting for the graphical user interface.....	22
2.3.2 Projekt.....	23
2.3.3 Material Legende .....	23
<b>3 Entwickeln mit smartFEM.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Motorgeometrie .....</b>	<b>24</b>
3.1.1 Entwicklungsschritte .....	26
3.1.2 Rotor .....	27
3.1.2.1 Geometrieparameter .....	28
3.1.2.2 „EditGeometry“ – benutzerspezifische Geometrien .....	29
3.1.2.3 Plausibilitätsprüfungen .....	29
3.1.2.4 Basisparameter .....	31
3.1.2.5 Knotenkette .....	32
3.1.2.6 Anpassung von Knotenkette .....	33
3.1.3 Stator .....	34
3.1.4 Speichern, DXF- und FEMAG-Export.....	35
<b>3.2 Materialien .....</b>	<b>36</b>
3.2.1 Stator Wicklung.....	36
3.2.2 Stator und Rotor Eisen .....	37
3.2.3 Magnete .....	39
3.2.4 Relative Length.....	41
3.2.5 Material Explorer - Beschreibung nichtlinearer Materialkennlinien .....	42
3.2.5.1 Elektrobahn .....	42
3.2.5.2 Permanentmagnete.....	43
<b>3.3 Preprocessing .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4 Feldbilder (Plots).....</b>	<b>47</b>
3.4.1 Definition und Anzeige von Feldbildern .....	47
3.4.2 Modelldaten .....	49
3.4.3 Erzeugung von Feldbildern mit gleichem Layout.....	50
<b>3.5 Wicklungen .....</b>	<b>53</b>
3.5.1 Wicklungsparameter .....	54
3.5.2 Wickelschema.....	55
3.5.3 Phasendiagramm.....	57
<b>3.6 Motorparameter und Berechnungen.....</b>	<b>58</b>
3.6.1 Basis der Ergebnisberechnungen.....	58

---

3.6.2	Cogging Torque und BEMF .....	59
3.6.3	Expected Values .....	62
3.6.4	Nominal Torque + Inductance .....	63
3.6.4.1	Model Parameters Info .....	63
3.6.4.2	Phase Shifts .....	64
3.6.4.3	Calculation Parameters .....	64
3.6.4.4	Stator Coil Excitation - Current Parameters .....	67
3.6.5	Calculation .....	71
3.6.6	Dynamic Calculation .....	72
3.6.7	Postprocessing - Forces and Torque .....	77
3.6.7.1	Kraftberechnung .....	77
3.6.7.2	Torque .....	80
3.6.8	Postprocessing - Berechnung der Verluste (Loss Calculation) .....	82
3.6.8.1	Polynomkoeffizienten .....	85
3.6.8.2	Berechnung der Verluste für Linearmotoren .....	85
<b>3.7</b>	<b>Ld / Lq Identifikation .....</b>	<b>86</b>
<b>3.8</b>	<b>Berechnung spezieller Effekte .....</b>	<b>89</b>
<b>3.9</b>	<b>Grafische Darstellung und Auswertung der Ergebnisse .....</b>	<b>90</b>
3.9.1	Results .....	90
3.9.1.1	Cogging Torque und BEMF .....	90
3.9.1.2	Nominal Torque und Inductance .....	91
3.9.1.3	Dynamic .....	91
<b>3.10</b>	<b>Speichern und Laden der Simulationsmodelle .....</b>	<b>92</b>
<b>4</b>	<b>Add-ons .....</b>	<b>93</b>
<b>4.1</b>	<b>Motor Diagramme .....</b>	<b>94</b>
4.1.1	Durchführung der Berechnungen .....	98
4.1.2	Diagrammbeispiele .....	99
4.1.2.1	Drehmoment vs. Drehzahl .....	99
4.1.2.2	Wirkungsgraddiagramme als Konturplots .....	102
4.1.2.3	Torque Speed Feed Loop Tabelle (MTPA - Maximum Torque per Ampere) 104	
4.1.3	„Einfache“ Motor Diagramme .....	106
<b>4.2</b>	<b>Motor Steuerung .....</b>	<b>107</b>
<b>4.3</b>	<b>Allgemeine Konturplots .....</b>	<b>109</b>
<b>4.4</b>	<b>AC-Losses .....</b>	<b>110</b>
<b>5</b>	<b>Simulation im Batch .....</b>	<b>114</b>
<b>5.1</b>	<b>Beispiel für Batch-Datei mit sequentieller Durchführung der Simulationen .....</b>	<b>114</b>
<b>5.2</b>	<b>Export von Ergebnisdaten in eine Textdatei .....</b>	<b>117</b>
<b>5.3</b>	<b>Parallel Computing .....</b>	<b>118</b>
5.3.1	_Batch_MultiRun.bat .....	118
5.3.2	_Batch_StartMultiRun.bat .....	120
5.3.3	smartFEM .....	120
<b>6</b>	<b>Spezielle Module .....</b>	<b>121</b>
<b>6.1</b>	<b>PM - Magnetization - Inner Rotor .....</b>	<b>121</b>
6.1.1	Rotor und Magnetisierspule .....	121
6.1.2	Berechnung und Auswertung der Luftspaltinduktion und Remanenz .....	124
6.1.3	Verwendung von vormagnetisierten Rotoren in Motormodellen .....	126
<b>6.2</b>	<b>PM DC Brushed Motor .....</b>	<b>127</b>
<b>6.3</b>	<b>Synchronous Motor (fremderregt) .....</b>	<b>130</b>
6.3.1	Synchronous Motor - Field Plots .....	133

---

---

<b>6.4 Switched Reluctance Motor .....</b>	<b>134</b>
<b>6.5 Synchronous Reluctance Motor .....</b>	<b>137</b>
6.5.1 Synchronous Reluctance Motor PM-Assisted .....	138
<b>6.6 Universal Motor .....</b>	<b>140</b>
6.6.1 Berechnung der Kommutierungsreihenfolge „ <i>Commutation Sequence</i> “ .....	142
6.6.2 Berechnung des Drehmoments während der Kommutierung „ <i>Switching Torque</i> “ .....	143
6.6.3 Berechnung des Drehmoments im AC- oder DC-Betrieb „ <i>Motor Torque</i> “ .....	144
6.6.4 Berechnung der Rotorposition zur Positionierung der Bürsten .....	145
<b>6.7 PM - Linear Motor .....</b>	<b>146</b>
6.7.1 Modellbildung .....	146
6.7.2 Berechnung der Verluste .....	147
<b>6.8 Aktuator .....</b>	<b>149</b>
<b>7 Schnittstellen .....</b>	<b>153</b>
<b>7.1 Export von Ergebnisdaten als tabellarischer Text .....</b>	<b>153</b>
<b>7.2 Dokumentation „Project Report“ .....</b>	<b>154</b>
<b>7.3 FEMAG .....</b>	<b>156</b>
<b>7.4 CAD - DXF Import .....</b>	<b>157</b>
7.4.1 Topologien .....	157
7.4.2 DXF Import .....	157
7.4.3 Beispiele .....	163
7.4.3.1 Beispiel für eine Statorgeometrie .....	163
7.4.3.2 Beispiel für eine Rotorgeometrie mit Knotendichten .....	164
7.4.3.3 Beispiel einer Rotorgeometrie mit „ <i>SPLINE</i> “ .....	164
7.4.3.4 Beispiel für eine vollständige Statorgeometrie .....	165
7.4.3.5 Beispiel für eine vollständige Statorgeometrie mit Offset .....	165
7.4.4 Verwendung von Layern im CAD-Modell .....	166
7.4.5 Kennwörter und Parameter für Linear Motoren .....	167
7.4.6 Kennwörter and Parameter für Aktuatoren .....	169
7.4.7 Funktionsbeschreibung DXF-Import .....	172
7.4.8 Voraussetzungen und Fehlerhinweise .....	174
7.4.8.1 Freie Flächenelemente .....	174
7.4.8.2 Eindeutige Punkte .....	174
<b>7.5 DXF Export .....</b>	<b>175</b>
7.5.1 Export aus dem jeweiligen Topologiefenster .....	175
7.5.2 Export über das smartFEM Hauptmenü .....	177
<b>7.6 CASPOC .....</b>	<b>179</b>
<b>8 Notizen .....</b>	<b>181</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Fenster ‚Programme/Dateien durchsuchen‘ - Speicherort von setup.exe eingeben .....	14
Abb. 2: Installation smartFEM .....	14
<i>Abb. 3: Verzeichnis für Programmdateien.....</i>	<i>15</i>
Abb. 4: Verzeichnis benutzerspezifische Dateien .....	15
Abb. 5: smartFEM Logdatei.....	16
Abb. 6: smartFEM reparieren oder löschen .....	16
Abb. 7: smartFEM starten.....	17
Abb. 8: smartFEM Startbildschirm - Informationen zur installierten smartFEM Version .....	17
Abb. 9: Laden der Lizenzdatei.....	18
Abb. 10: Tools - smartFEM Settings - Einstellung der Verzeichnisse.....	19
Abb. 11: Tools - smartFEM Settings - Speicherung der Modelldaten .....	20
Abb. 12: Tools - smartFEM Settings - Allgemeine Einstellungen.....	21
Abb. 13: Tools - smartFEM Settings - GUI settings .....	22
Abb. 14: Tools - Project Settings.....	23
Abb. 15: Tools - Material Legend Settings .....	23
Abb. 16: Neues Motormodell anlegen .....	24
Abb. 17: Motor-Geometrie .....	24
Abb. 18: FEM-Modells mit minimaler geometrischer Symmetrie von Rotor und Stator.....	25
Abb. 19: FEM-Modell gezoomt.....	25
Abb. 20: Abstandsmessung.....	25
Abb. 21: Rotor - Geometrie und zugehörige Parameter .....	27
Abb. 22: Rotor bearbeiten - Geometrie Parameter .....	28
Abb. 23: Rotor bearbeiten - Darstellung der veränderten Geometrie .....	28
<i>Abb. 24: Rotor bearbeiten - Un-Do und Re-Do .....</i>	<i>29</i>
Abb. 25: Geometrie bearbeiten - User defined Elements .....	29
Abb. 26: Rotor bearbeiten - Magnet außerhalb Rotorgeometrie.....	30
Abb. 27: Basisparameter .....	31
Abb. 28: Knotenkette mit Anzeige des Basisknotenwinkels.....	32
Abb. 29: Knotenkette im Luftspalt .....	33
Abb. 30: Rotor-Geometrie - Darstellung der Knotenkette .....	33
Abb. 31: Rotor-Geometrie - Gruppe "Elements" .....	33
Abb. 32: Rotor-Geometrie - nichtlineare Knotenkette .....	34
Abb. 33: Stator bearbeiten.....	34
Abb. 34: Motorgeometrie speichern und exportieren .....	35
Abb. 35: Motorgeometrie speichern und exportieren .....	35
Abb. 36: Zuweisung der Materialeigenschaften .....	36
Abb. 37: Materialien - Stator mit Wicklungsparameter .....	36
Abb. 38: Materialien - Stator Parameter .....	37
Abb. 39: Materialien - Auswahlliste "Nicht-Lineare" Materialdaten .....	37
Abb. 40: Materialien - Zuweisung verschiedener Materialnummern „MatNo“ zu verschiedenen Flächen innerhalb einer Topologie .....	38
Abb. 41: Materialien - Magnete .....	39

Abb. 42: Materialien - Magnetisierung.....	39
Abb. 43: Materialien - Magnetisierungstabelle .....	40
Abb. 44: Materialien - Benutzer definierte Magnete .....	40
Abb. 45: Materialien - gemessene Magnetisierung.....	40
Abb. 46: Materialien - Zusatzparameter für gemessene Magnetisierungen .....	41
Abb. 47: Material Explorer - B(H) und Verlustdaten von Elektroband.....	42
Abb. 48: Material Explorer - Entmagnetisierungs-Kennlinie.....	43
Abb. 49: Preprocessing - Aufbau des FEM-Modells mit FEMAG.....	44
Abb. 50: Preprocessing - Show FEMAG .....	44
Abb. 51: Preprocessing - Netz und Knotenkette .....	45
Abb. 52: Preprocessing - Calculate and Mesh Shaft Area.....	45
Abb. 53: Preprocessing - Mesh and Calculate Shaft Area (2) .....	46
Abb. 54: Preprocessing - fehlerhafter Flusslinienverlauf.....	46
Abb. 55: Preprocessing - korrekter Flusslinienverlauf.....	46
Abb. 56: Field Plots - Field Plots Definition .....	47
Abb. 57: Field Plots - Magnetische Induktion mit überlagerten Flusslinien.....	47
Abb. 58: Field Plots - Entmagnetisierung .....	47
Abb. 59: Field Plots - Tabelle zur parametrischen Definition von Sets .....	48
Abb. 60: Field Plots - Modelldaten exportieren .....	49
Abb. 61: Field Plots - Beispiel exportierte Modelldaten.....	49
Abb. 62: Field Plots - Force in Airgap.....	50
Abb. 63: Field Plots - Definition von Sets .....	50
Abb. 64: Field Plots - Save Settings nach Festlegung des Bildinhalts.....	50
Abb. 65: Field Plots - Darstellung der Plots je Set .....	51
Abb. 66: Field Plots - Farbige Flusslinien.....	51
Abb. 67: smartFEM Settings – Farbauswahl und Orientierung von Flusslinien.....	52
Abb. 68: Field Plots – Copy Sets.....	52
Abb. 69: Field Plots – Tabelle mit Berechnungsergebnissen.....	52
Abb. 70: Wicklungseditor - Aufruf über die smartFEM Schaltfläche „Winding ...“ .....	53
Abb. 71: Wicklungseditor - Icon-/Textfarben und -größen in smartFEM Settings.....	53
Abb. 72: Wicklungseditor - Coils Parameters.....	54
Abb. 73: Wicklungseditor - Coils Parameter - Options.....	54
Abb. 74: Wicklungseditor - Wicklungsschema „Zwei-Schicht-Bruchlochwicklung“ mit Anzeige der Werte für Amplitude Flux Vector, Distribution-, Pitch und Winding-Faktor.....	55
Abb. 75: „Zwei-Schicht-Bruchlochwicklung Ober-/Unterlage“ „Ein-Schicht-Wicklung“ „Ringwicklung“ .....	55
Abb. 76: Wicklungseditor - benutzerspezifische Definition des Wicklungsschemas.....	56
Abb. 77: Wicklungseditor - Speichern bzw. Laden einer Wicklungsdefinition.....	56
Abb. 78: Winding Editor - Phasendiagramm .....	57
Abb. 79: Ersatzschaltbild Synchronmotor .....	58
Abb. 80: Ergebnisparameter als "Overview"-Tabelle .....	58
Abb. 81: Motor Parameters - Cogging Torque + BEMF .....	59
Abb. 82: "Apply, Exit" Motor Parameters.....	60
Abb. 83: Results - Ergebnisse Cogging Torque .....	61
Abb. 84: Beispiel für Beeinflussung der BEMF durch Schrägung.....	61

---

Abb. 85: Results - Expected Values .....	62
Abb. 86: Motor Parameters - Nominal Torque + Inductance .....	63
Abb. 87: Stator Coil Excitation - Constant Line Current .....	67
Abb. 88: Stator Coil Excitation - Sinus Shape Line Current .....	67
Abb. 89: Stator Coil Excitation - Id-Iq Effective Phase Current .....	67
Abb. 90: Stator Coil Excitation - Trapezoidal Shape Phase Current .....	67
Abb. 91: Stator Coil Excitation - Trapezoidal Shape Line Current .....	68
Abb. 92: Stator Coil Excitation - User Defined Phase Current .....	68
Abb. 93: Stator Coil Excitation - Phase Vector Currents Input Table .....	69
Abb. 94: Phase Vector Currents Input Table - Current Options .....	69
Abb. 95: "Apply, Exit, Reset Results" Motor Parameters .....	70
Abb. 96: Ergebnisdarstellung Nominal Torque mit sinusförmigem Strom .....	71
Abb. 97: Übersicht Calculation Results .....	71
Abb. 98: Motor Parameter für dynamische Berechnung stationären Betriebszustandes .....	72
Abb. 99: Verwendung von benutzerspezifischen Phasenspannungen .....	74
Abb. 100: Voltage Options .....	74
Abb. 101: Einstellung der Parameter für das Invertermodell .....	75
Abb. 102: Abbruchbedingungen für dynamische Berechnungen .....	75
Abb. 103: Dynamische Berechnung Drehmomentverlauf versus Rotorposition .....	76
Abb. 104: Grundlagen von Kraftvektoren .....	77
Abb. 105: Kraftberechnungen mit smartFEM .....	78
Abb. 106: Beispiel für Ergebnisse einer Kraftberechnung .....	78
Abb. 107: Beispiel 1 - Kräfteberechnung in .....	79
Abb. 108: Beispiel 2 - Kräfteberechnung in fünf Segmenten .....	79
Abb. 109: Postprocessing - Forces and Torque .....	80
Abb. 110: Postprocessing - Drehmomentdiagramm anzeigen .....	80
Abb. 111: Postprocessing - Plots von Drehmoment und Harmonischen .....	80
Abb. 112: Postprocessing - Auswahl zum Kopieren der Ergebnisdaten für das Drehmoment .....	81
Abb. 113: Motor Parameters - Auswahlfeld "Losses" .....	82
Abb. 114: Verlustberechnung - Parameter .....	82
Abb. 115: Loss Calculation - Add Speed Range .....	83
Abb. 116: Verlustberechnung - Magnets Segmentation .....	83
Abb. 117: Verlustberechnung - Beispiel Textdatei.pex .....	83
Abb. 118: Verlustberechnung - Durchführung der Berechnung .....	84
Abb. 119: Verlustberechnung - Ergebnisse .....	84
Abb. 120: Loss Calculation - Polynomkoeffizienten .....	85
Abb. 121: Verlustberechnung - Linearmotoren .....	85
Abb. 122: Ld/Lq - Erzeugung der Datensätze .....	86
Abb. 123: Ld/Lq - Ergebnistabelle .....	86
Abb. 124: Ld/Lq - Diagram Torque vs. Theta mit $i_s = \text{constant}$ .....	87
Abb. 125: Ld/Lq - Phasor Diagram .....	87
Abb. 126: Ld/Lq - Erzeugung einer Ergebnisdatei für CASPOC .....	88
Abb. 127: Simulationsmodell mit einem Magnet .....	89
Abb. 128: Änderung der Materialeigenschaften einzelner Flächenelements .....	89

---

Abb. 129: Grafische Darstellung und Auswertung der Ergebnisse .....	90
Abb. 130: Öffnen eines gespeicherten Simulationsmodells .....	92
Abb. 131: Add-ons - Aufrufmenü .....	93
Abb. 132: Motor Diagramme - Aufruf .....	94
Abb. 133: Motor Diagramme - Strom-Theta-Matrix und Ergebniswerte .....	94
Abb. 134: Motor Diagramme - Parameter für die Berechnung der Grafikdaten .....	95
Abb. 135: Motor Diagramme - Umrechnung UsDC <> UsLL_rms .....	96
Abb. 136: Motor Diagramme - Parameter die Erzeugung der Ld/Lq Sets .....	96
Abb. 137: Motor Diagramme - Loss Sets .....	97
Abb. 138: Motor Diagramme - Beispiel für Ordnerinhalt mit "Basis"- und "Verlust"-Modellen .....	97
Abb. 139: Motor Diagramme - smartFEM MultiRun mit Übersicht zum aktuellen Bearbeitungsstand für die Verlustberechnungen .....	98
Abb. 140: Motor Diagramme - Diagrammarten .....	99
Abb. 141: Motor Diagramme - Drehmoment vs. Drehzahl .....	99
Abb. 142: Motor Diagramme - Drehmoment vs. Drehzahl mit Luftspalt- und abgegebenem Drehmoment .....	100
Abb. 143: Motor Diagramme - Beispiel für Hervorheben eines einzelnen Graphen .....	100
Abb. 144: Motor Diagramme - Beispiel für "Undock Graph" .....	101
Abb. 145: Motor Diagramme - Beispiel für "Undock Graph" .....	101
Abb. 146: Motor Diagramme - Minimalwerte der Spannung als Funktion des Stromes .....	102
Abb. 147: Motor Diagramme - Wirkungsgrad bei minimalem Strom .....	102
Abb. 148: Motor-Diagramme - maximaler Wirkungsgrad .....	102
Abb. 149: Motor Diagramme - Diagrammwerte an der Mausposition .....	103
Abb. 150: Motor Diagramme - Einstellungen für Konturplots .....	103
Abb. 151: MotorDiagrams - Copy Torque Speed Feed Loop Table .....	104
Abb. 152: MotorDiagrams - Torque Speed Feed Loop Table .....	104
Abb. 153: MotorDiagrams - Plot2D "Efficiency Torque Speed Loop Table" .....	105
Abb. 154: Motor Diagramme - Parametereingabe für "Einfache Motordiagramme" .....	106
Abb. 155: Motor Diagramme - Beispiel "Einfaches" Motordiagramm Us vs. Is mit Speed = constant .....	106
Abb. 156: Motor Control - Eingabe der Berechnungsparameter .....	107
Abb. 157: Motor Control - Diagrammarten .....	107
Abb. 158: Motor Control - Ergebnisspeicher .....	107
Abb. 159: Motor Control - Diagramm "Flux Linkage Magnet vs. Is" .....	108
Abb. 160: Motor Control - Konturplot "Torque vs. Theta vs. Is" .....	108
Abb. 161: Motor Control - Ergebnisdaten .....	108
Abb. 162: Contour Plot - tabellarische Textdatei .....	109
Abb. 163: ContourPlot - Beispiel "Wirkungsgrad vs. Strom vs. Geschwindigkeit" .....	109
Abb. 164: AC-Losses - Nutmodell und Wicklungen .....	110
Abb. 165: AC-Losses - Source of Parameter .....	110
Abb. 166: AC-Losses - smartFEM Modell .....	110
Abb. 167: AC-Losses - Geometry Parameter "smartFEM Model" .....	111
Abb. 168: AC-Losses - Geometry Parameter "Input Data" .....	111
Abb. 169: AC-Losses - Material Parameter "smartFEM Model" .....	111
Abb. 170: AC-Losses - Material Parameter "Input Data" .....	112
Abb. 171: AC-Losses - Motor Parameter .....	112

---

Abb. 172: AC-Losses - Ergebnisse .....	112
Abb. 173: Parametervariationen - Beispiel Batch-Datei.....	116
Abb. 174: Parametervariationen - Beispiel Batch-Log-Datei.....	116
Abb. 175: Simulation im Batch: Exportierte Ergebnisdatei.....	117
Abb. 176: Parallel Computing - Zuweisung von Prozessorkernen.....	120
Abb. 177: PM-Magnetization - Beispiel Magnetisierungseinrichtung (Spule und Rotor) .....	121
Abb. 178: PM-Magnetization - Initialisierung    Abb. 179: PM-Magnetization - Magnet Material.....	121
Abb. 180: PM-Magnetization - Neukurve eines Neodym Eisen Bor Materials.....	122
Abb. 181: PM-Magnetization - Motor Parameters .....	122
Abb. 182: PM-Magnetization - Start der Simulation mit "Run Magnetization" .....	123
Abb. 183: PM-Magnetization - Induktionsverteilung.....	123
Abb. 184: PM-Magnetization - Remanence im Ringmagnet (gezoomt).....	123
Abb. 185: PM-Magnetization - Laden eines vormagnetisierten Rotormodells .....	124
Abb. 186: PM-Magnetisation - Modell zur Simulation der Induktion an der Rotoroberfläche .....	124
Abb. 187: PM-Magnetization - Plot der Induktionsverteilung .....	125
Abb. 188: PM-Magnetization - Luftspaltinduktion über Post-Processing berechnen.....	125
Abb. 189: PM-Magnetization - Luftspaltinduktion in Tabellenkalkulation ausgewertet .....	126
Abb. 190: PM-Magnetization - Motormodell mit vormagnetisiertem Rotor .....	126
Abb. 191: PM DC Motor - Initialisierung .....	127
Abb. 192: PM DC Motor - Beispiel eines Geometriemodells .....	127
Abb. 193: PM DC Motor - Wickelschema und Phasendiagramme .....	128
Abb. 194: PM DC Motor - Kommutierungssequenz .....	128
Abb. 195: PM DC Bürstenmotor - Bürstenposition.....	129
Abb. 196: Synchronous Motor - vier Pole.....	130
Abb. 197: Synchronous Motor - Initialisierung.....	130
Abb. 198: Synchronous Motor - Material Settings.....	130
Abb. 199: Synchronous Motor - Wicklungen .....	130
Abb. 200: Synchronous Motor - Rotor Coil Excitation.....	131
Abb. 201: Synchronous Motor - Calculation Types.....	131
Abb. 202: Synchronous Motor - Coils Excitation .....	131
Abb. 203: Synchronous Motor - Equivalent Circuit .....	131
Abb. 204: Synchronous Motor - BEMF Equivalent.....	131
Abb. 205: Synchronous Motor - Ergebnisse der "Nominal Torque ... Calculation".....	132
Abb. 206: Synchronous Motor - Rotor Coil Excitation in "Plots" .....	133
Abb. 207: Synchronous Motor - Excitation Sources.....	133
Abb. 208: Synchronous Motor - Flussdichten und Feldlinien.....	133
Abb. 209: SR Motor - Initialisierung.....	134
Abb. 210: SR Motor - Beispiel eines Geometriemodells .....	134
Abb. 211: SR-Motor - User Defined Phase Current .....	135
Abb. 212: SR-Motor - Bestimmung der Phasenlagen .....	135
Abb. 213: SR-Motor - Results.....	136
Abb. 214: Synchronous Reluctance Motor - Initialisierung .....	137
Abb. 215: Synchronous Reluctance Motor - 4-polig.....	137
Abb. 216: Synchronous Reluctance Motor - Beispiel Simulationsergebnisse .....	138

---

Abb. 217: Synchronous Reluctance PM-Assisted Motor - Rotortopologie.....	138
Abb. 218: Synchronous Reluctance Motor PM-Assisted - Beispiel Simulationsergebnisse .....	139
Abb. 219: Universal Motor - Initialisierung.....	140
Abb. 220: 2-poliger Universal Motor mit 24 Rotornuten .....	140
Abb. 221: Universal Motor - Plot der Induktion und Feldlinien .....	141
Abb. 222: Universal Motor - Motor Parameters.....	141
Abb. 223: Universal Motor - Lage der Wicklung 13.....	142
Abb. 224: Phasenlagen der Wicklungen .....	142
Abb. 225: Universal Motor - Transformer Voltage per Rotor Phase (Rotor Current = 0A) .....	143
Abb. 226: Switching Torque - Statorströme .....	143
Abb. 227: Switching Torque - Rotorströme .....	143
Abb. 228: Switching Torque – Drehmoment .....	144
Abb. 229: Motor Torque - Statorströme.....	144
Abb. 230: Motor Torque - Rotorströme .....	144
Abb. 231: Motor Torque - Drehmoment des AC-Motors .....	145
Abb. 232: Universal Motor - Positionierung der Bürsten .....	145
Abb. 233: PM-Linear Motor – Initialisierung .....	146
Abb. 234: PM-Linear Motor - Beispiel eines Geometriemodells .....	146
Abb. 235: PM - Linear Motor - Darstellung der Kräfte und Luftspaltinduktion.....	147
Abb. 236: PM – Linear Motor - periodische Modelle H3LM2 und H3LM3.....	147
Abb. 237: PM – Linear Motor - LM021c, Umschaltung periodisch / nicht periodisch.....	148
Abb. 238: PM – Linear Motor - Berechnung der Verluste .....	148
Abb. 239: Aktuator - CAD Zeichnung .....	149
Abb. 240: Actuator - smartFEM Modell nach DXF-Import.....	149
Abb. 241: Aktuator - ForcePath und MoveVector.....	150
Abb. 242: Aktuator - ForcePath, MoveVektor und Airgap.....	150
Abb. 243: Aktuator - Verbindung des beweglichen mit dem festen Geometrieteil.....	151
Abb. 244: Aktuator - Darstellung des „ForcePath“ in smartFEM.....	151
Abb. 245: Aktuator - Darstellung des „MoveVector“ mit Verschiebung des Kolbens.....	151
Abb. 246: Aktuator - Simulation und Ergebnisse .....	152
Abb. 247: Export von Ergebnisdaten als Text - Cogging Torque.....	153
Abb. 248: Export von Ergebnisdaten als Text - Model Data .....	153
Abb. 249: Projektbericht: Auswahl der Diagramme .....	154
Abb. 250: Projektbericht - Auswahl von Designparametern und Ergebnissen als Texte.....	154
Abb. 251: Projektbericht mit Microsoft® Word geöffnet .....	155
Abb. 252: FEMAG aus smartFEM heraus starten.....	156
Abb. 253: DXF-Import - Beispiel für den Import einer Statorgeometrie .....	158
Abb. 254: DXF-Import - Beispiel Statorgeometrie .....	163
Abb. 255: DXF-Import - Beispiel für eine Rotorgeometrie.....	164
Abb. 256: DXF-Import - SPLINES .....	164
Abb. 257: DXF-Import - vollständige Geometrie .....	165
Abb. 258: DXF-Import - Exzentrizität zwischen Rotor und Stator .....	165
Abb. 259: CAD Import - Verwendung von Layern.....	166
Abb. 260: DXF-Import Linear Motor - Basisparameter.....	168

Abb. 261: DXF-Import Linear Motor - Basisparameter "AirGapThickness", "AirGapIncrement".....	168
Abb. 262: DXF-Import Aktuator - Basisparameter.....	169
Abb. 263: DXF-Import Aktuator - CAD-Zeichnung mit ForcePath und MoveVector .....	169
Abb. 264: DXF-Import Aktuator - Force Path und MoveVektor in smartFEM (Geometry Plot).....	170
Abb. 265: DXF-Import Aktuator - ForcePath und MoveVector in smartFEM (Material Plot).....	170
Abb. 266: DXF-Import Aktuator - Richtung des "MoveVector" $\neq 0^\circ$ .....	171
Abb. 267: DXF-Import Aktuator - Rotation der Geometrie mit "MoveVector" in Richtung der x-Achse .....	171
Abb. 268: DXF-Import Aktuator - Kräfte in x- und y-Richtung bei unsymmetrischen Geometrien.....	171
Abb. 269: DXF-Import - Selektion der DXF- bzw.CSV-Datei .....	172
<i>Abb. 270: DXF-Import - Beispiel importierte Stator-Geometrie.....</i>	<i>172</i>
Abb. 271: DXF-Import - Informationen zu Geometrieelementen.....	173
Abb. 272: DXF-Import - Selektion eines Geometrieelementes .....	173
Abb. 273: DXF-Import - freie Flächenelemente.....	174
Abb. 274: DXF-Import - Minimum Distance of Points .....	174
Abb. 275: DXF Export - Topologie .....	175
Abb. 276: DXF Export - Darstellung in einem CAD System.....	176
Abb. 277: DXF-Export - smartFEM Layer im 2D-Modell des CAD-Systems .....	176
Abb. 278: DXF Export - Beispiel Stator Geometrie .....	177
Abb. 279: DXF Export - Selektion der Funktion .....	177
Abb. 280: DXF Export - Beispiel Kontur des Stator Blechpaketes.....	178
Abb. 281: DXF-Export - gesamtes Maschinenmodell .....	178
Abb. 282: DXF-Export: Materialkonturen .....	178
Abb. 283: CASPOC - Berechnungsparameter .....	179
Abb. 284: CASPOC - Speicherung der Ergebnisdaten.....	179
Abb. 285: CASPOC - Beispiel XML-Datei .....	180

## Einleitung

smartFEM dient zur Simulation von elektrischen Maschinen mit alphanumerischer bzw. grafischer Darstellung und Dokumentation der berechneten Kenngrößen. Dabei nutzt smartFEM für FEM-Simulationen und Analysen das FE-Programm FEMAG von Prof. Dr.-Ing. Konrad Reichert. Es werden numerische Verfahren zur Lösung von elektromagnetischen Feldproblemen mittels FEM und analytischen Methoden verwendet.

Mit smartFEM können folgende Maschinenmodelle (Motoren und Generatoren) simuliert werden:

- Permanent magnetisch erregt, bürstenlos, Gleichstrom (Innen-/Außenläufer) (BLDC)
- Permanent magnetisch erregt, Bürsten-Gleichstrom (Innenläufer)
- Permanent magnetisch erregt, linear
- Switched Reluctance
- Synchronous Reluctance
- Universal
- Magnetisierung von permanent magnetisch erregten Innenläuferrotoren

smartFEM wurde mit Microsoft® Visual Studio® .NET entwickelt und läuft auf Arbeitsplatzcomputern mit Microsoft® Windows Betriebssystemen:

- XP Professional Edition SP 2
- Vista™ Professional
- Windows 7,8, 10 (32 und 64 Bit)

Lieferumfang:

1 USB-Stick als Dongle mit folgenden gespeicherten Dateien:

- xxx.license                    Lizenz, muss in smartFEM License Control geladen werden
- setup.exe                    Anwendung zum manuellen Start der Installation.
- smartFEM.msi                Installationspaket (inkl. der zu der smartFEM Version passenden FEMAG Version)
- UserGuide\_de.pdf            Benutzer-Anleitung
- Topologies\_de.pdf            Beschreibung der Rotor und Stator Topologien

# 1 Installation

## 1.1 .NET Framework

Voraussetzung für die Installation von smartFEM ist das Vorhandensein einer Installation von Microsoft® .NET Framework 4.0. smartFEM überprüft das und gibt eine entsprechende Meldung, wenn dies nicht der Fall ist. Eine Version kann aus dem Internet vom Microsoft® Download Center herunter geladen und installiert werden.

## 1.2 smartFEM

Nach Einlegen der gelieferten CD in das CD-Laufwerk des Computers wird automatisch der Installationsprozess gestartet. Sofern dies nicht geschieht, muss die Installation manuell gestartet werden. Dazu wählen Sie aus dem Windows-Start-Menü die Schaltflächen „Start“ → „Ausführen“ und geben anschließend in das aufgeblendete Eingabefeld den CD-Laufwerksbuchstaben gefolgt von der Zeichenfolge „\setup.exe“ ein. Bei Lieferung per E-Mail geben Sie den Speicherort der entkomprimierten Datei „setup.exe“ ein

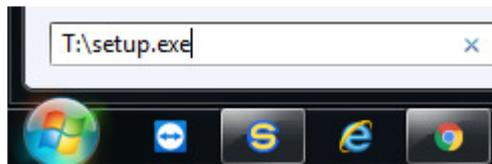


Abb. 1: Fenster ‚Programme/Dateien durchsuchen‘ - Speicherort von setup.exe eingeben

Nach Abschluss der Eingabe mit „Return“ wird das Installationsprogramm gestartet und der Benutzer zu allen erforderlichen Eingaben aufgefordert.

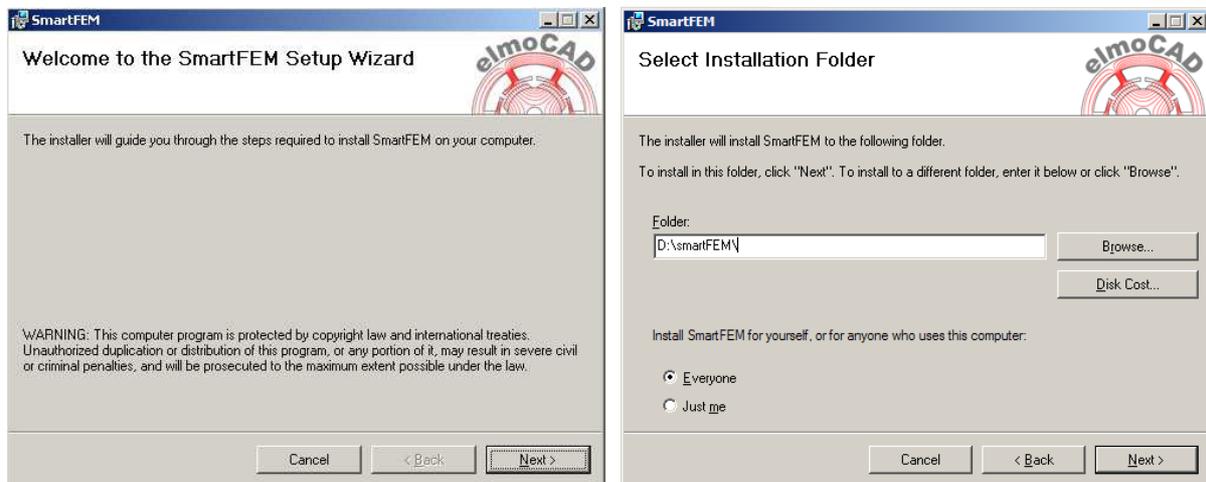


Abb. 2: Installation smartFEM

Bei erfolgreicher Installation wurden folgende Verzeichnisse und Dateien angelegt:

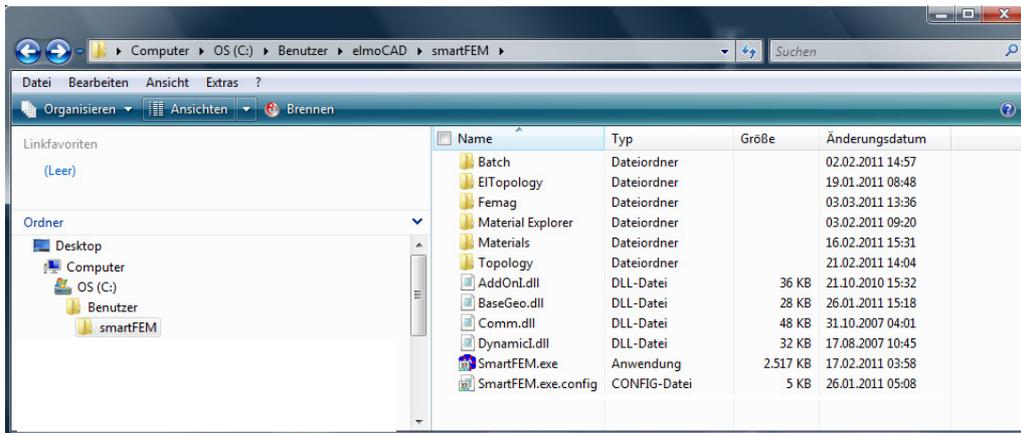


Abb. 3: Verzeichnis für Programmdateien

Die Verzeichnisse enthalten:

- ... \ smartFEM                    das Programm smartFEM.exe, zugehörige dll's und Benutzerhandbücher (\*.pdf).
- ... \ smartFEM \ Batch            Templates für die Durchführung von Berechnungen per Batch.
- ... \ smartFEM \ EITopology       Topologien für Leistungselektronik zur Dynamiksimulation.
- ... \ smartFEM \ Material Explorer    Programm und Konfigurationsdatei zur Beschreibung und Pflege von Materialdaten „Material Explorer“.
- ... \ smartFEM \ Materials        Materialdateien
- ... \ smartFEM \ Femag            das Programm wfemag.exe <sup>1)</sup>
- ... \ smartFEM \ Topology        dll's für Rotor- und Stator-Topologien.

<sup>1)</sup> Hinweis: Bei Installation unter Windows 7 muss das Verzeichnis mit wfemag.exe für schreibende Zugriffe parametrisiert sein, da wfemag.exe dort temporäre Dateien anlegt. Ggfs. ist dieses Verzeichnis in einen benutzerspezifischen Bereich zu kopieren. smartFEM kann auch auf einem beliebigen anderen Laufwerk und/oder Verzeichnis installiert werden, zu dem Benutzer Zugangsrechte besitzen.

Die benutzerspezifische smartFEM Konfigurationsdatei „user.config“ wird im aktuellen Benutzerverzeichnis gespeichert.

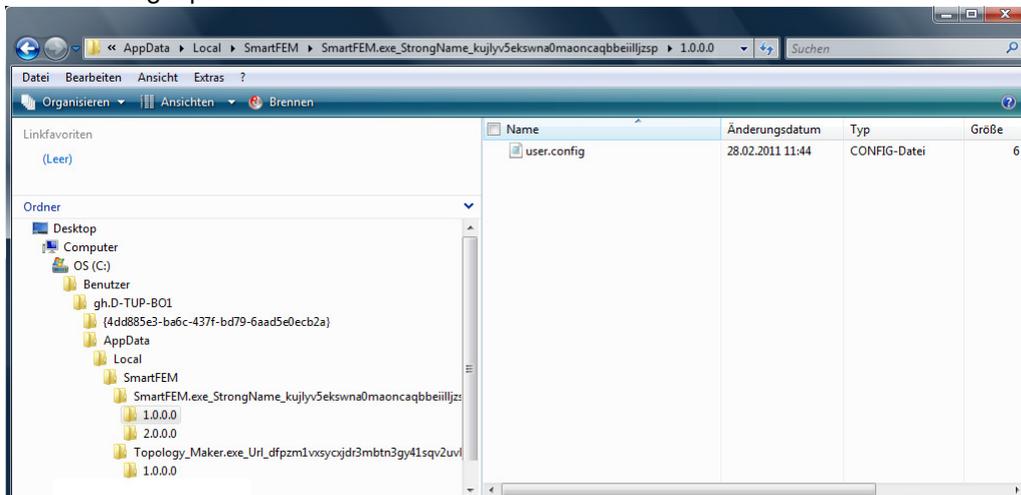


Abb. 4: Verzeichnis benutzerspezifische Dateien

Bei jedem Start von smartFEM wird im Verzeichnis „C:\Users\User\AppData\Local\Temp“ eine Log-Datei mit dem Namen „smartFEMLogFile.txt“ angelegt. Hier werden Informationen bei auftretenden Problemen gespeichert.

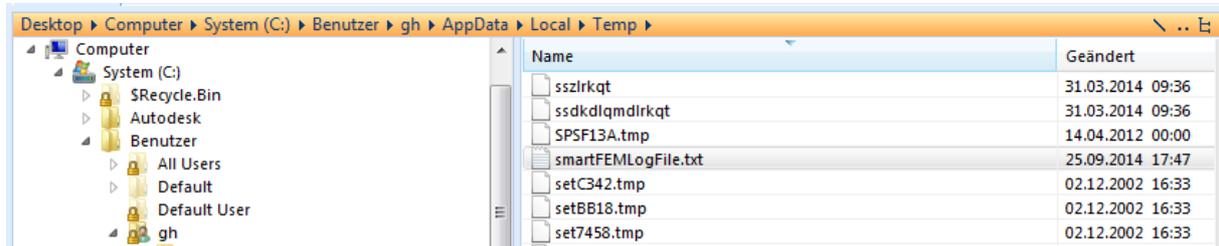


Abb. 5: smartFEM Logdatei

Um smartFEM vom Computer zu löschen oder zu reparieren kann setup.exe gestartet und die entsprechende Auswahl getroffen werden.

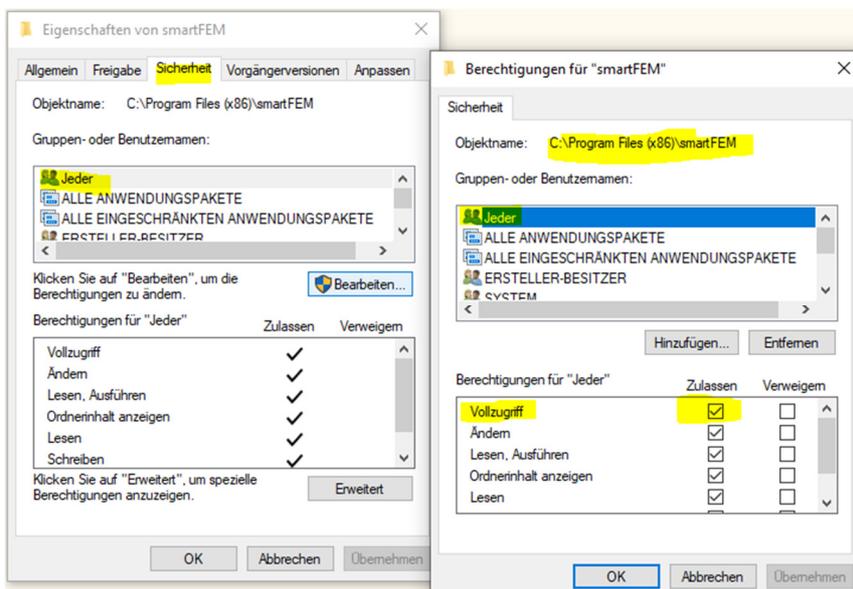
Es werden nur die Dateien gelöscht, die bei der Installation von smartFEM angelegt wurden.



Abb. 6: smartFEM reparieren oder löschen

### Berechtigungen unter Windows 10 und 11

Wenn **smartFEM** im Verzeichnis „C:\Programme(x86)...\“ installiert wird, dann muss **smartFEM** ein Benutzer mit Namen „**Jeder**“ mit den Berechtigungen „**Vollzugriff**“ zugewiesen werden. Anderenfalls verhindert Windows u.U. die korrekte Verwendung von **smartFEM**:



## 2 Start und Einstellungen

### 2.1 Start

smartFEM wird über die Schaltflächen des Windows Menü „Start“→„Alle Programme“→„smartFEM“→„smartFEM“ aufgerufen.



Abb. 7: smartFEM starten

Es erscheint der Startbildschirm. Über die Schaltflächen „Help“→„About...“ werden verschiedene Informationen über die installierte smartFEM Version angezeigt.

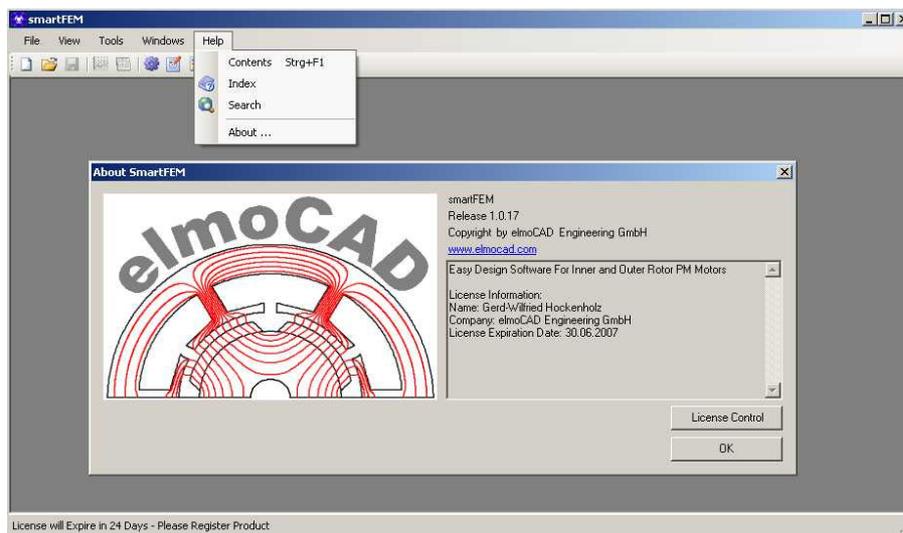


Abb. 8: smartFEM Startbildschirm - Informationen zur installierten smartFEM Version

## 2.2 Registrierung und Lizenzinformation

Nach der Installation steht smartFEM dem Benutzer 30 Tage lang uneingeschränkt zur Verfügung. Anschließend können keine Datenspeicherungsfunktionen mehr ausgeführt werden.

Kunden, die eine darüber hinaus gehende zeitlich beschränkte oder unbeschränkte Software-Nutzungslizenz erworben haben, können diese alternativ wie folgt verwenden:

- a) Bindung der Lizenz an einen USB-Stick. Damit kann smartFEM auf mehreren Rechnern installiert und nach Einstecken des USB-Sticks auf dem jeweiligen Rechner genutzt werden.

Die USB-Sticks werden von elmoCAD standardmäßig zusammen mit der smartFEM Software und Lizenzdatei ausgeliefert.

- b) Bindung der Lizenz an die MAC-Adressen von Computer, Festplatte oder Netzwerkdomäne gemäß Absprache:

- Erzeugung einer Lizenzdatei über die Kommandos „*License Control*“ → „*Write License Data*“
- Versand der erzeugten Lizenzdatei per E-Mail an [info@elmocad.de](mailto:info@elmocad.de)
- Einlesen der aktivierten und von elmoCAD aktivierten und per E-Mail zurückerhaltenen Lizenzdatei über die Kommandos „*Help*“ → „*About*“ → „*License Control*“ → „*Load*“

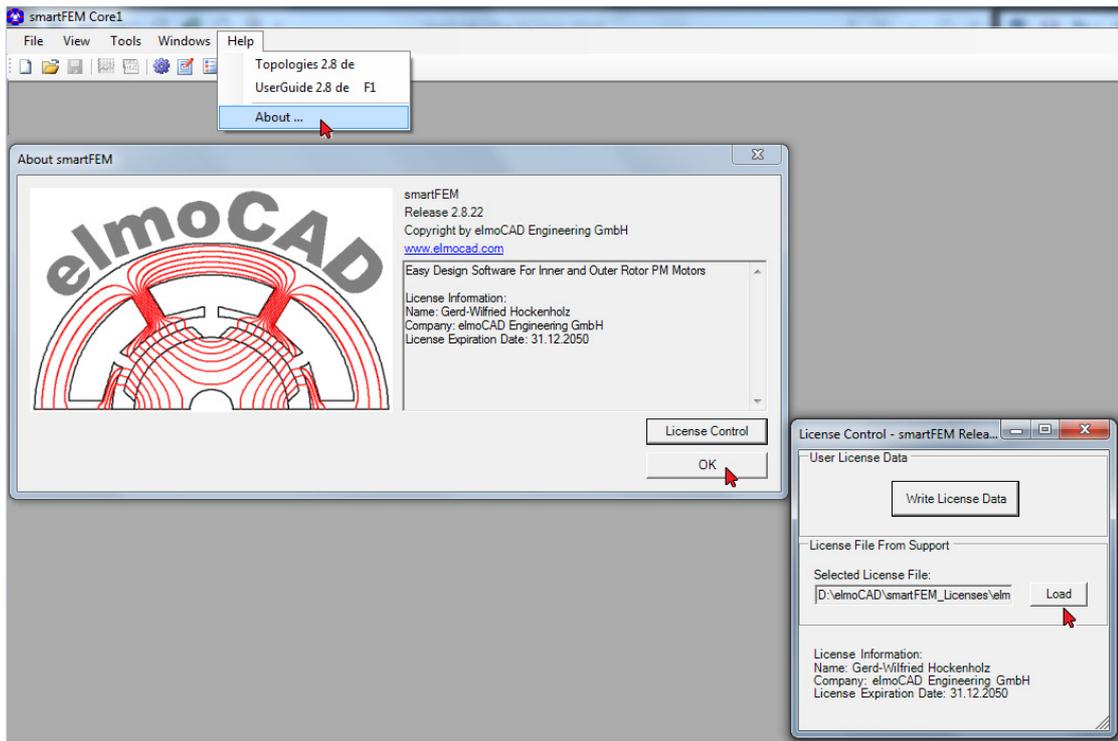


Abb. 9: Laden der Lizenzdatei

## 2.3 Einstellungen

### 2.3.1 smartFEM

Einstellungen für Programm- und Datenverzeichnisse, etc. werden über die Schaltflächen „Tools“→„... Settings“ angezeigt und können angepasst werden.

#### 2.3.1.1 Folders: Einstellungen der Verzeichnisse

- Geometry Topology Folder    dll-Dateien für Rotor- und Statortopologien
- Material Files Folder        Dateien für Materialdaten
- FEMAG Exe for smartFEM     Die mit smartFEM installierte FEMAG Version, mit der alle von smartFEM durchgeführten Simulationen gerechnet werden.
- User FEMAG Exe File         Eine vom Benutzer verwendete FEMAG Version für zusätzliche benutzerdefinierte Berechnungen. Dies kann auch eine andere Version als die von smartFEM verwendete sein.
- Default Working Directory    Aktuelles Arbeitsverzeichnis, in dem die Design Daten und Berechnungsergebnisse gespeichert werden.
- Electronic Topology Folder    dll-Dateien für Elektronikschaltungstopologien

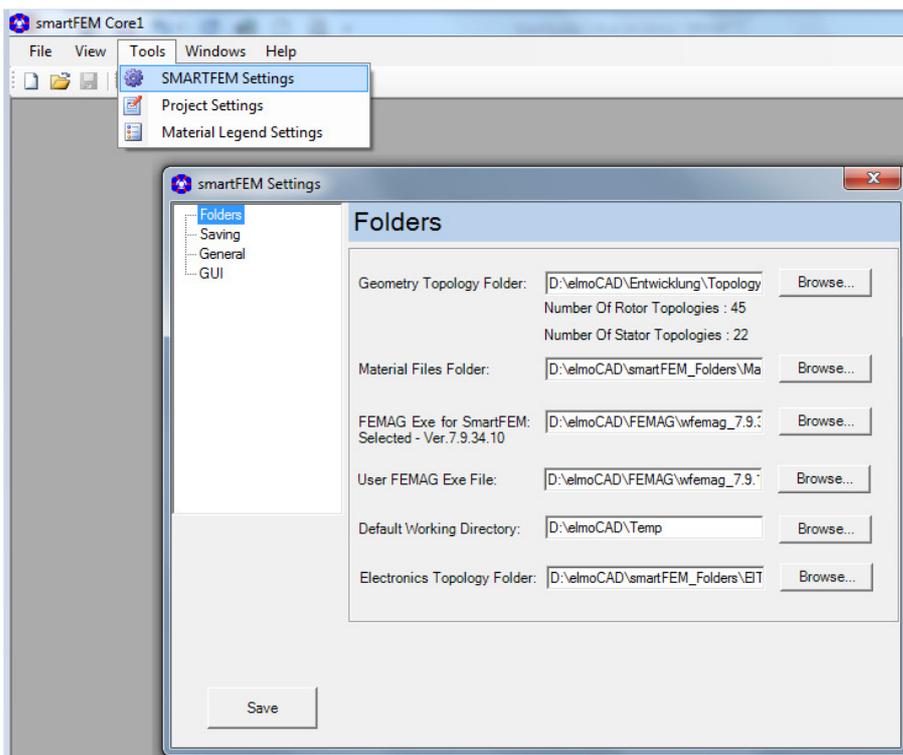


Abb. 10: Tools - smartFEM Settings - Einstellung der Verzeichnisse

### 2.3.1.2 Saving: Einstellungen für die Speicherung von Modellen

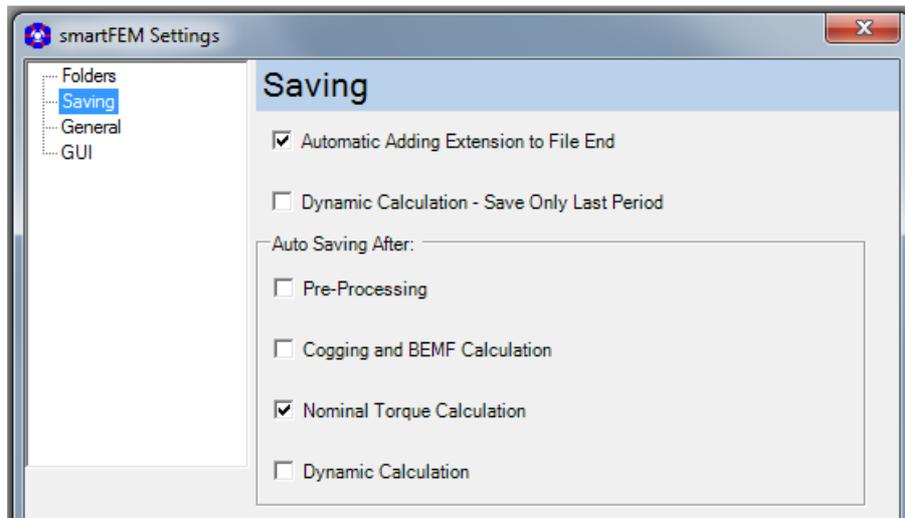


Abb. 11: Tools - smartFEM Settings - Speicherung der Modelldaten

Alle Modelldaten inkl. Berechnungsergebnisse werden in einer Datei \*.mot im XML-Format gespeichert. Bei Auswahl von:

- *„Automatic Adding Extension to File End“*  
Bei jedem Speichervorgang wird ein „\_“ und eine laufend aufsteigende Nummer an den Dateinamen angehängt, z.B. dateiname\_1.mot
- *„Dynamic Calculation - Save Only Last Period“*  
Es werden nur die Ergebnisdaten entsprechend der letzten BEMF Periode bei den dynamischen Berechnungen gespeichert.
- *„Auto Saving After“*  
Automatische Speicherung der Modelldaten nach jedem ausgewählten Berechnungsvorgang:
  - Pre-Processing
  - Cogging and BEMF Calculation
  - Nominal Torque and Inductance Calculation
  - Dynamic Calculation

### 2.3.1.3 General: Allgemeine Einstellungen

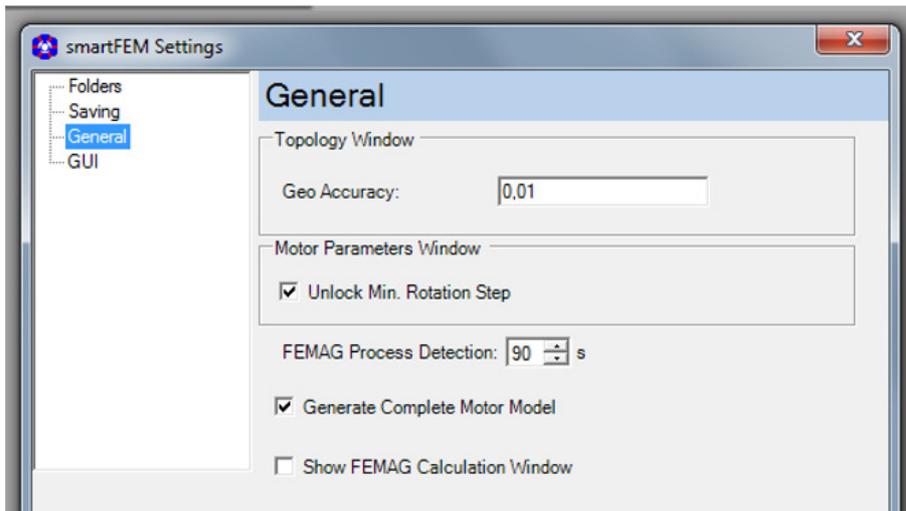


Abb. 12: Tools - smartFEM Settings - Allgemeine Einstellungen

#### Topologie Window:

Auswahl der Aktion für die „Return-Taste“:

- "Geo Accuracy"  
Alle Punkte von Zeichnungsobjekten wie Linie, Kreisbogen, etc., die innerhalb eines Kreises mit dem angegebenen Durchmesser liegen, werden als ein Punkt behandelt.

#### Motor Parameter Window:

- Freigabe für die Eingabe eines benutzerdefinierten „Min. Rotation Step“ im Fenster „Motor Parameters“.

#### FEMAG Process Detection:

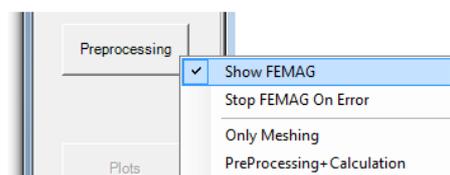
- Eingabe des Überwachungszeitraumes für einen laufenden FEMAG Prozess. Wenn innerhalb dieser Zeit FEMAG keine CPU-Zeit verbraucht, wird angenommen, dass die von FEMAG durchzuführenden Berechnungen abgeschlossen sind und Ergebnisdateien gespeichert wurden oder dass ein FEMAG Fehler aufgetreten ist und keine Ergebnisse vorliegen. In diesem Fall muss die Fehlerursache beseitigt und die Berechnung neu gestartet werden.

#### Generate Complete Motor Model

- Hier kann angegeben werden, ob im smartFEM Grafikfenster das vollständige Motormodell angezeigt werden kann. Dabei kann der Rotor dann in verschiedene Positionen gedreht werden. Es wird mehr Zeit für die Generierung der Geometrie benötigt.

#### Show FEMAG Calculation Window

- Hier kann angegeben werden, ob die FEMAG Fenster bei allen FEM-Berechnungen angezeigt werden oder nicht. Die Anzeige kann auch mit rechtem Mausklick auf die Schaltfläche bei den jeweiligen Berechnungen an- bzw. abgeschaltet werden.



Bei der FEMAG Version 7.9.34.10 werden generell keine Fenster angezeigt.

### 2.3.1.4 GUI: setting for the graphical user interface

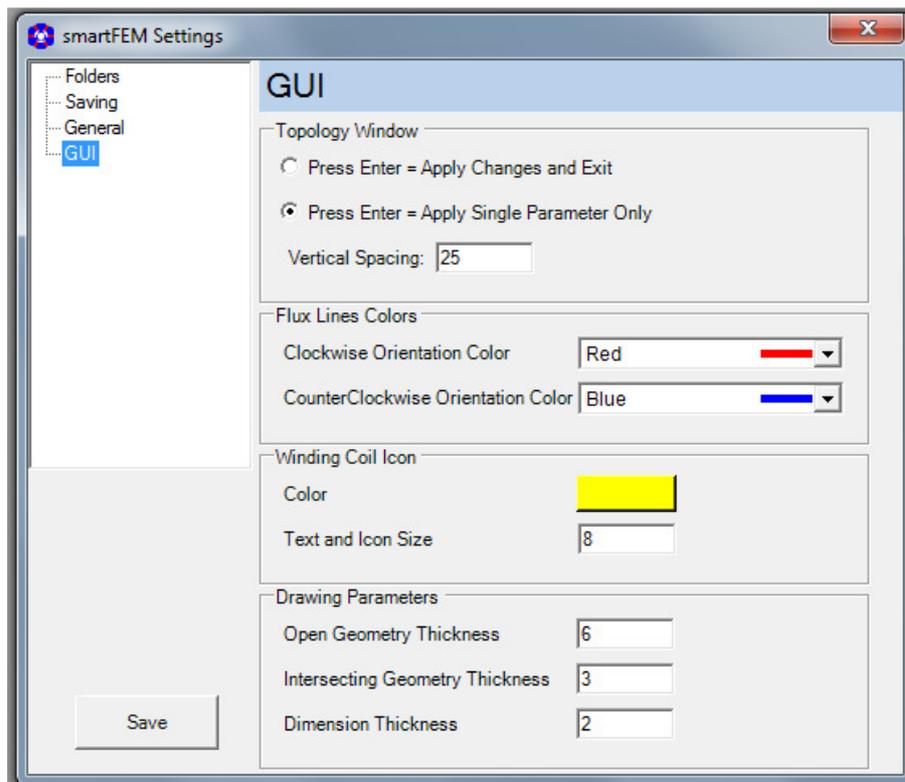


Abb. 13: Tools - smartFEM Settings - GUI settings

#### Topology Window:

Auswahl der Aktion bei Betätigen des "Return" Taste:

- "Apply Changes and Exit"  
Alle Änderungen übernehmen und die Topologie verlassen.
- "Apply Single Parameter Only"  
Den aktuellen Parameterwert des Parameterfeldes übernehmen, in dem sich der Cursor befindet. Der Cursor verbleibt in dem Parameterfeld.

#### Flux Lines Colors:

- Benutzerspezifische Definition der Farben von Flusslinien in "Plots". Die Voreinstellung ist schwarze Farbe.

#### Winding Coils Icon:

- Benutzerspezifische Definition der Farbe und Größe von Icons und Texte im Grafikfenster "Windings".

#### Drawing Parameters:

- Benutzerspezifische Definition der Liniendicke von "Open Geometry", "Intersecting Geometry" und "Dimension" Linien, Kreisbögen und Kurvenzügen..

### 2.3.2 Projekt

Mit den „*Project Settings*“ können zu einem Motordesign Projektinformationen wie z.B. Projektnummer, Projektname, etc. hinzugefügt werden. Sie werden u. a. in dem von smartFEM generierten Projektbericht angezeigt.

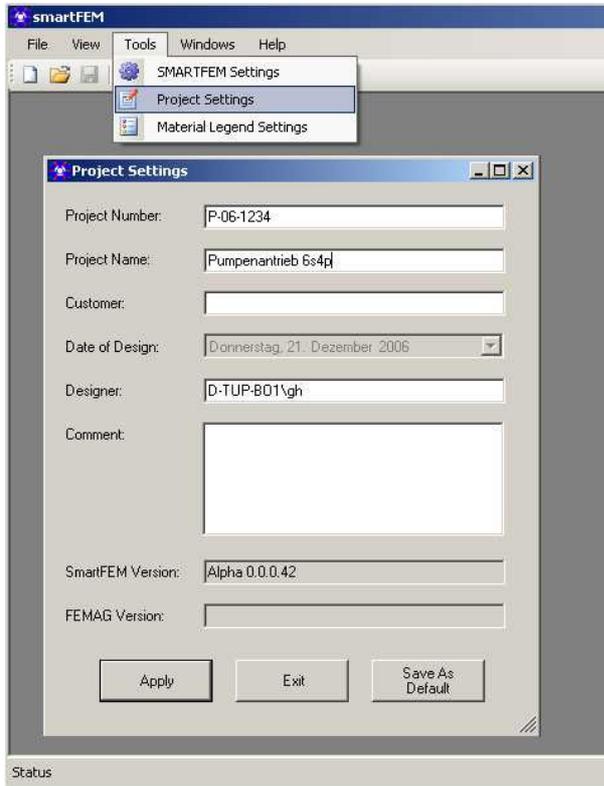


Abb. 14: Tools - Project Settings

### 2.3.3 Material Legende

Mit den „*Material Legend Settings*“ können die Farben und Bezeichnungen projektspezifisch für die im aktuellen Motordesign verwendeten Flächen eingestellt werden.

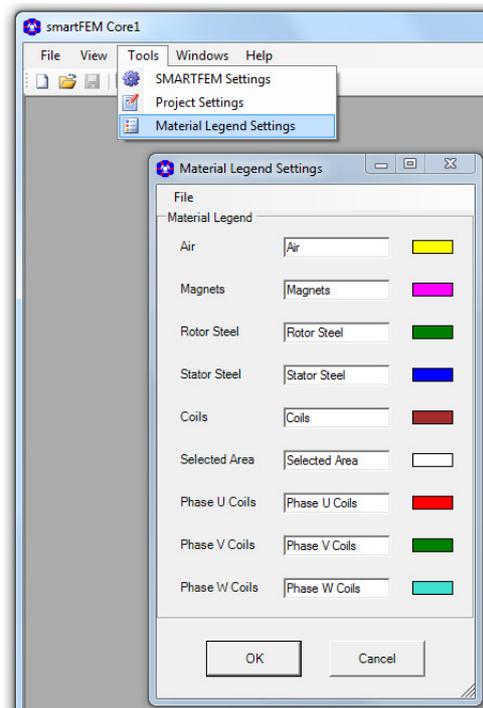


Abb. 15: Tools - Material Legend Settings

### 3 Entwickeln mit smartFEM

#### 3.1 Motorgeometrie

Nach dem Start von smartFEM und Auswahl des Menüs „File→New“ kann zwischen den Motortypen gewählt werden. Es werden nur die Motortypen angezeigt, für die Rotor- und Stator-Topologien im Topologie-Verzeichnis gespeichert sind.

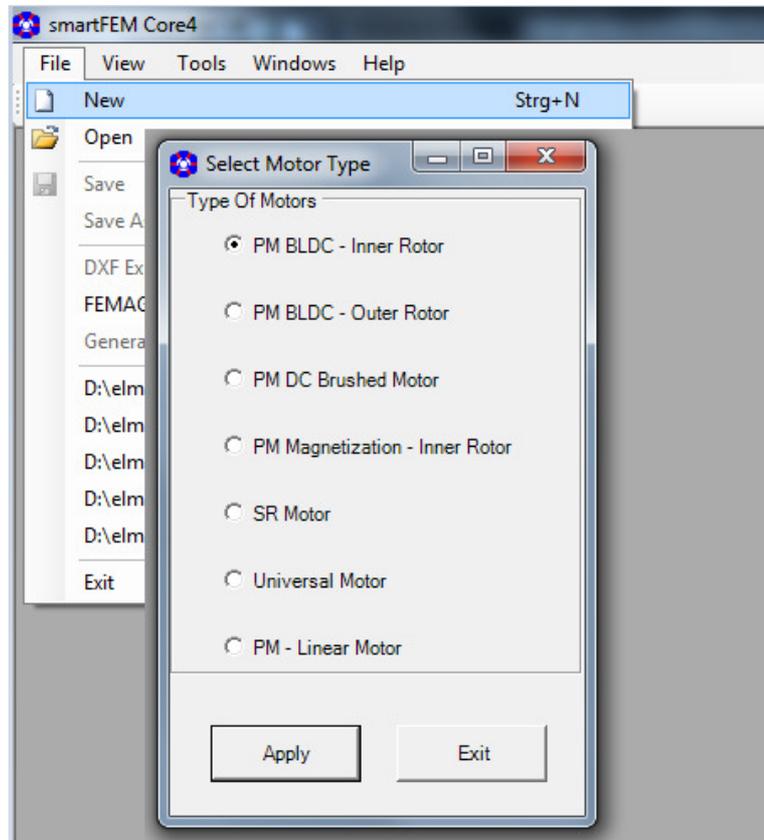


Abb. 16: Neues Motormodell anlegen

Nach Betätigung der Schaltfläche „Apply“ wird auf Basis der voreingestellten Parameter für Rotor- und Statorgeometrie ein Motormodell neu angelegt und die Motorgeometrie grafisch für eine BEMF Periode dargestellt.

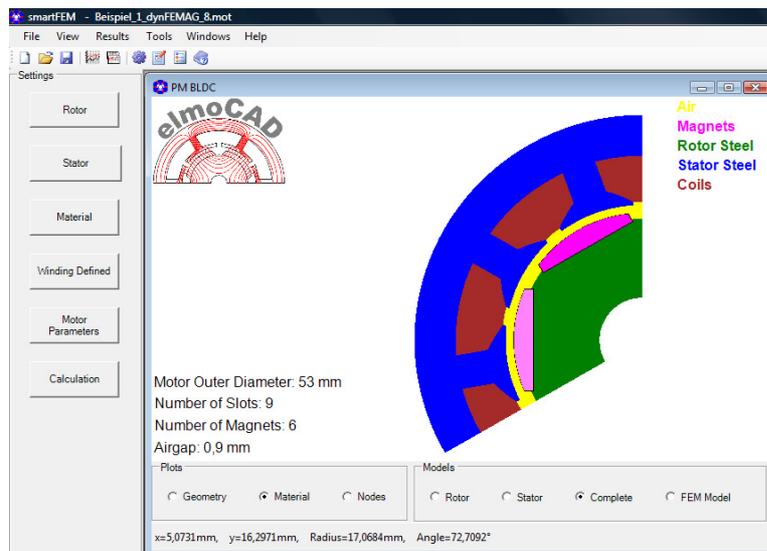


Abb. 17: Motor-Geometrie

Entsprechend der Auswahl im unteren Bereich des Geometriefensters werden weitere Ansichten der Geometrie mit verschiedenem Informationsgehalt dargestellt, z.B.:

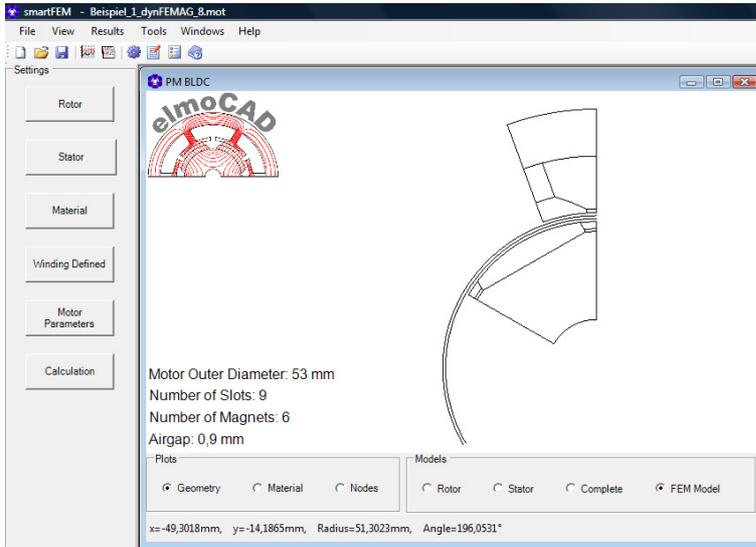


Abb. 18: FEM-Modells mit minimaler geometrischer Symmetrie von Rotor und Stator

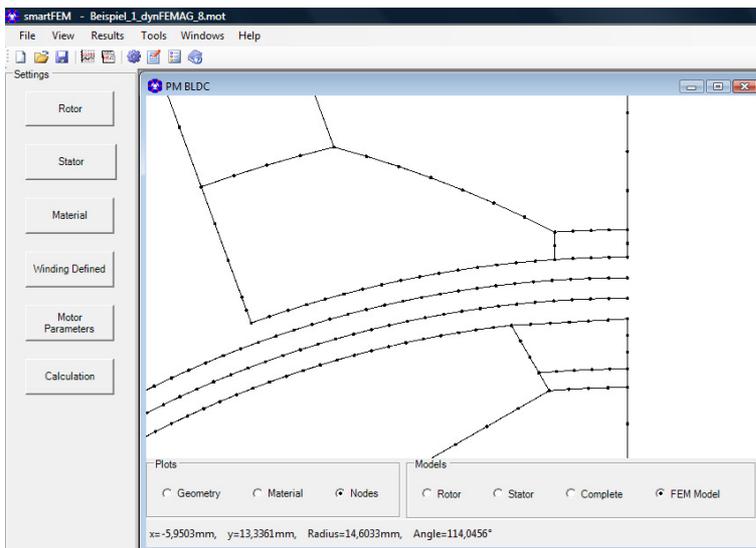


Abb. 19: FEM-Modell gezoomt

In allen Darstellungen kann nach Klick mit der linken Maustaste in ein Bereich anschließend durch Betätigung des Scrollrad beliebig tief gezoomt werden.

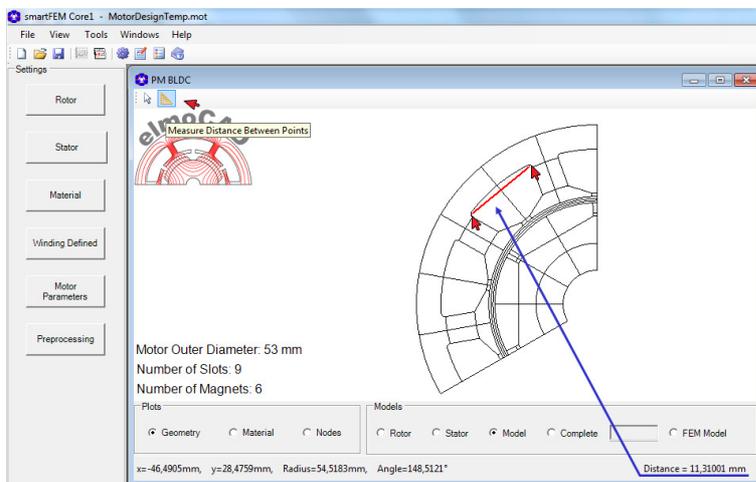


Abb. 20: Abstandsmessung

Nach Auswahl der Schaltfläche „Measure Distance Between Points“ können Abstandsmessungen zwischen zwei mit der Maus angeklickten Positionen durchgeführt werden.

### 3.1.1 Entwicklungsschritte

Die Entwicklung des Simulationsmodells bis zur Durchführung der ersten Simulation bzw. Berechnung erfolgt am Besten in folgenden Schritten:

- Definition der Rotorgeometrie
- Definition der Statorgeometrie  
Bei Außen- bzw. Innenläufermotoren wird der Innen- bzw. Außendurchmesser des Stators automatisch auf den Außen- bzw. Innendurchmesser des Rotors angepasst
- Auswahl der Materialien
- Eingabe des Wickelschemas und der Wicklungsparameter. Auf Basis der gewählten Pol-/Nut-Kombination von Rotor und Stator wird automatisch ein Wickelschema mit maximaler BEMF vorgeschlagen.
- Festlegung der Motor- und Berechnungsparameter

### 3.1.2 Rotor

Nach Anwahl der Schaltfläche „Rotor“ wird die Geometrie der gewählten Rotortopologie im Grafikfenster gezeichnet und in einem Popup-Fenster die zugehörigen Parameter in drei Gruppen „Geometry“, „Basic“ und „Elements“ angezeigt.

Sobald der Cursor in ein Parameterfelder mittels der Maus- oder „Tab“-Taste positioniert wird, werden parameterspezifische Bemaßungspfeile in der Grafik angezeigt.

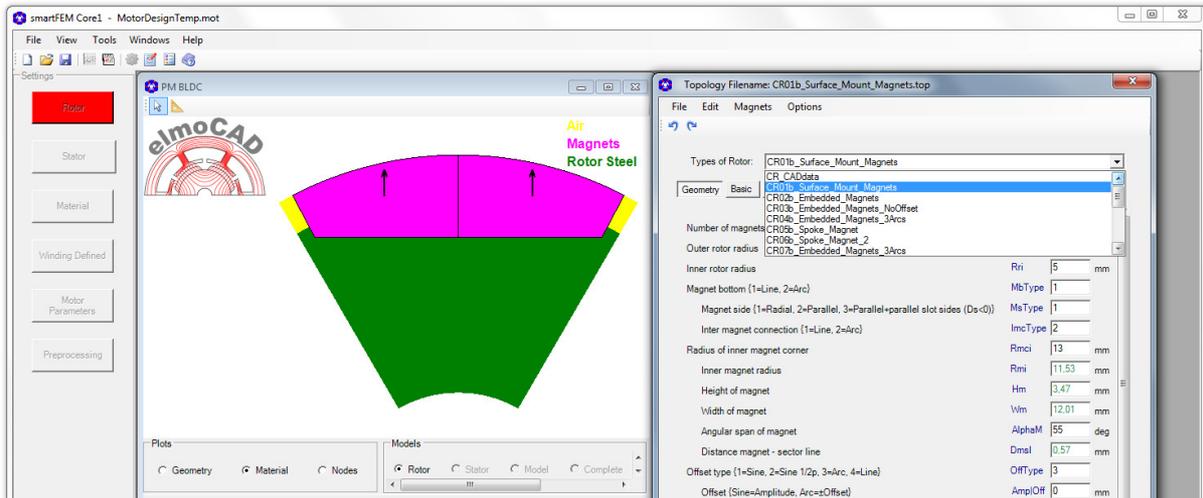


Abb. 21: Rotor - Geometrie und zugehörige Parameter

Nach Auswahl einer Topologie wird die Geometrie unmittelbar in dem Grafikfenster dargestellt und die zugehörigen alphanumerischen Parameter in dem Textfenster mit drei tabellarischen Gruppen (Reiter):

- „Geometry“ diese Parameter definieren die Geometrie auf Basis von kartesischen oder polaren Koordinaten von Punkten, die über Linien, Kreisbögen und Kurvenzüge miteinander verbunden sind.
- „Basic“ diese beschreiben allgemeine zur Geometrie gehörende Parameter.
- „Elements“ diese Parameter beschreiben Eigenschaften von Linien, Kreisbögen, Kurvenzügen, Flächenelementen und Punkten. Verschiedene Parameter können z.B. für die Parametrisierung von Knotenketten editiert werden.

Die Geometrie kann im Grafikfenster dargestellt werden in Form von:

- gezeichneten Linien, Kreisbögen und Kurvenzügen
- farbige Flächenelemente entsprechend den Materialien
- Knotenketten

### 3.1.2.1 Geometrieparameter

In der Parametergruppe „Geometry“ werden die Geometrie beschreibenden Parameter angezeigt. Sobald der Cursor in ein Parameterfeld mit der Maus bzw. Tabulator-Taste positioniert wird, werden parameterspezifische Hilfslinien und -texte in der Grafik eingeblendet.

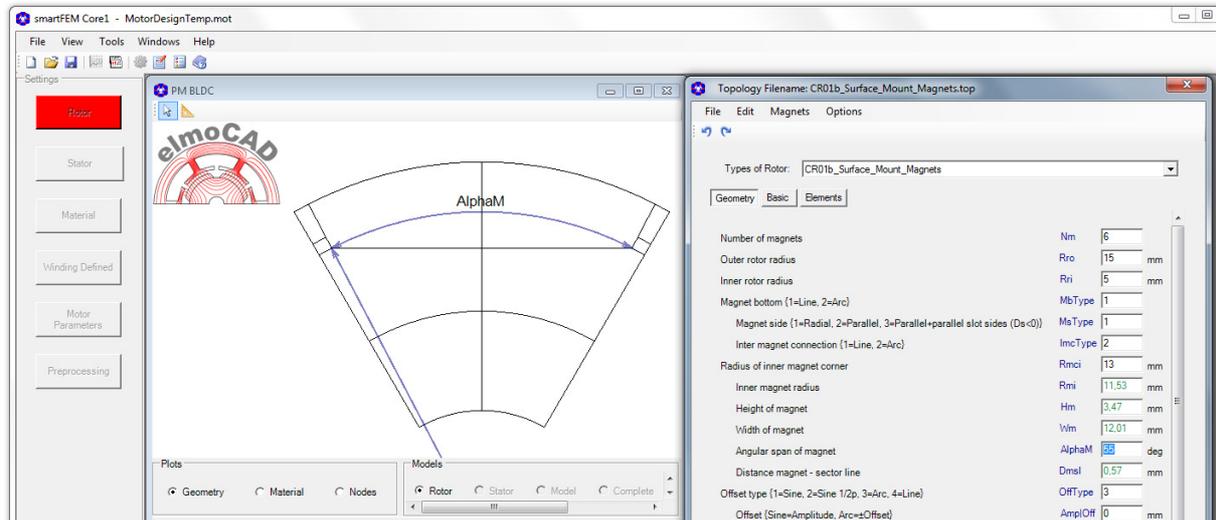


Abb. 22: Rotor bearbeiten - Geometrie Parameter

Jede Eingabe eines neuen Wertes (z.B. Magnetbreite) führt zu einer Neuberechnung der Geometrie, die unmittelbar im Grafikenster neu gezeichnet wird. Parameterfelder mit grüner Schrift enthalten berechnete Parameter, die der Information dienen und nicht verändert werden können.

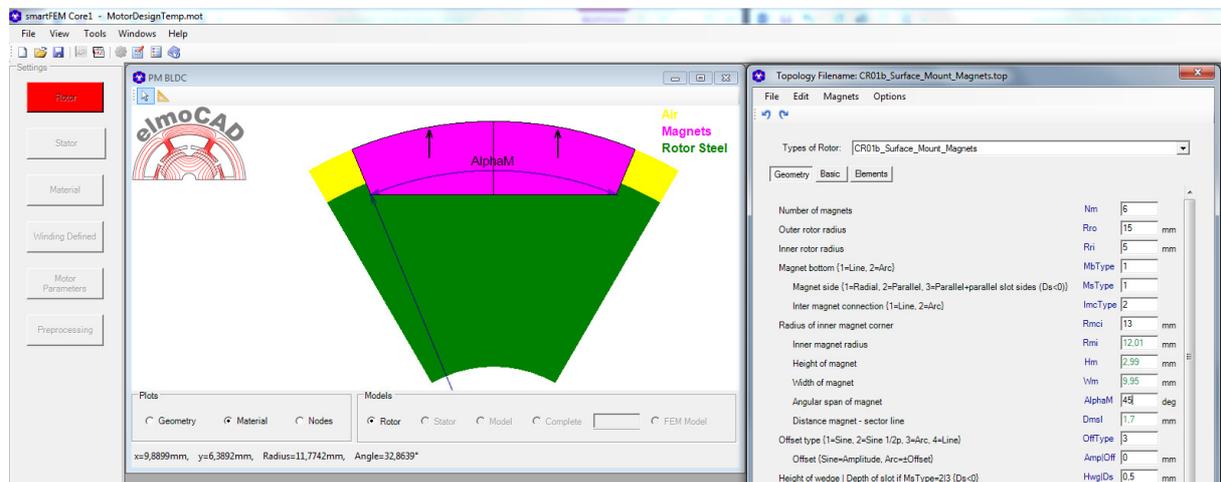
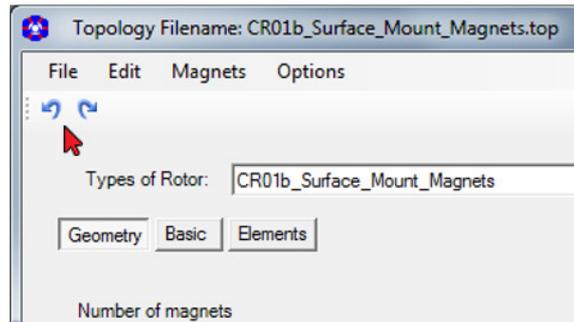


Abb. 23: Rotor bearbeiten - Darstellung der veränderten Geometrie

Parameter, die nach Aufruf der Topologie verändert wurden, werden erst durch Betätigung der Schaltfläche „Apply“ endgültig übernommen und gespeichert. Beim Verlassen der Parametereingabe über die Schaltfläche „Exit“ werden keine Änderungen übernommen und die ursprüngliche Geometrie wieder angezeigt.

Die Schaltflächen für „Un-Do“ und „Re-Do“ erlauben es dem Benutzer bei Fehleingaben auf vorherige Werte zurückzugehen.

Abb. 24: Rotor bearbeiten - Un-Do und Re-Do



### 3.1.2.2 „EditGeometry“ – benutzerspezifische Geometrien

Ab der Version 2.11 können in allen Standardtopologien benutzerspezifische Geometrielemente hinzugefügt und bearbeitet werden.

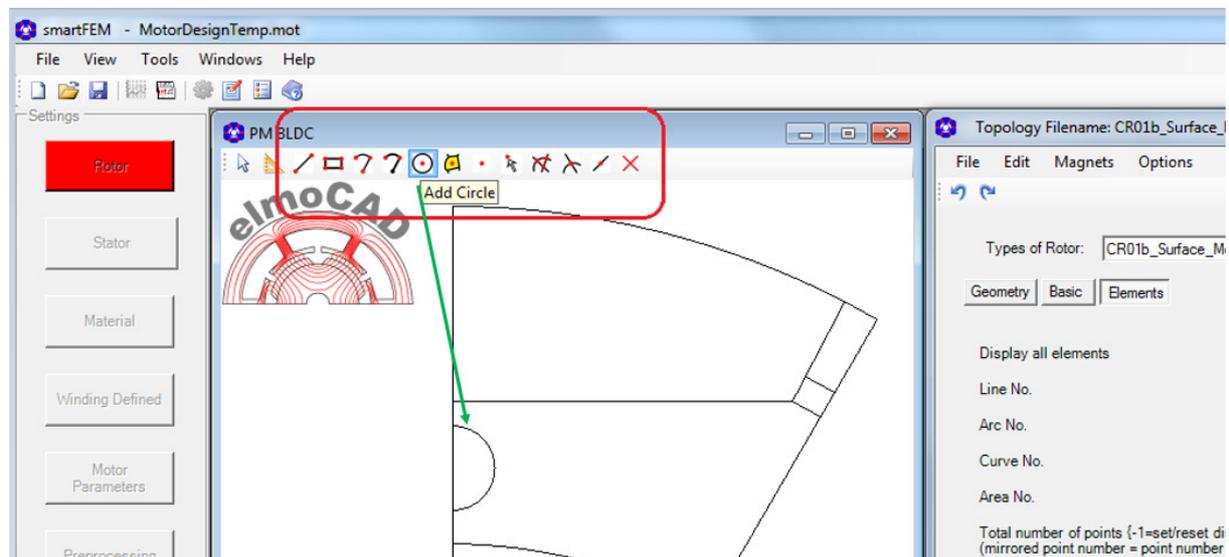


Abb. 25: Geometrie bearbeiten - User defined Elements

Einzelheiten dazu sind in dem Dokument „**Topologies 2.11.00 de.pdf**“ beschrieben, das über das Menü „*Help – About*“ geöffnet werden kann.

### 3.1.2.3 Plausibilitätsprüfungen

Zur Entwicklung einer Geometrie kann der Benutzer grundsätzlich in beliebiger Reihenfolge Parameterwerte eingeben, die auf Grund ihrer Abhängigkeit von anderen Werten zunächst nicht plausibel erscheinen, weil sie außerhalb des aktuell zulässigen Wertebereiches liegen. Eine Geometrie ist daher erst dann in sich konsistent, wenn alle Parameter mit korrekten Werten eingegeben wurden.

Alle Werte werden unmittelbar nach ihrer Eingabe einer Konsistenzkontrolle unterzogen. Je nach Art werden dabei festgestellte Unverträglichkeiten wie folgt behandelt:

- Bei Eingabe eines zu kleinen bzw. zu großen Wertes wird der Wert automatisch auf den zulässigen minimalen bzw. maximalen Wert zurückgesetzt. Beispiel: der Magnet kann nicht breiter sein als der Sektor des Rotors. Die Eingabe der Anzahl der Magnete hat eine höhere Priorität.

- Die von dem eingegebenen Wert beeinflussten Linien und Flächen werden in der Grafik mit den sich ergebenden Überschneidungen in roter Farbe dargestellt. Gleichzeitig wird die Schaltfläche „Apply“ in „Bad Geometrie“ umbenannt und die gesamte Schaltfläche ebenfalls rot gefärbt. Der Benutzer muss nun seine letzte Eingabe korrigieren oder andere Werte so verändern, dass die Geometrie keine Inkonsistenzen mehr aufweist.

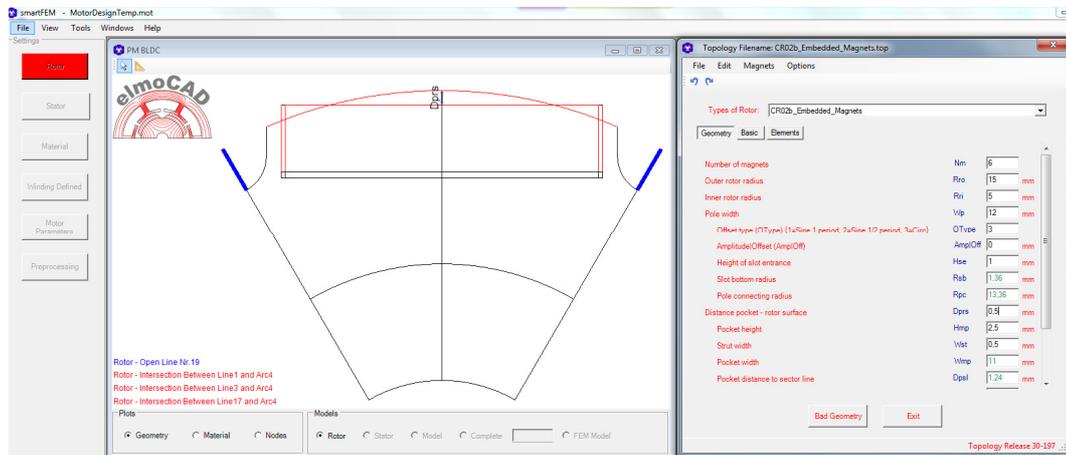


Abb. 26: Rotor bearbeiten - Magnet außerhalb Rotorgeometrie

- Offene Linien und Kreisbögen werden in blauer Farbe dargestellt. Sofern diese auf den Sektorlinien zum Luftspalt hin liegen stellt das kein Problem dar. Diese Linien dienen zur Anbindung des Rotors an den mittleren Luftspaltlayer. Sollten nach einem DXF-Import einer Rotor- oder Statorgeometrie weitere offene Linien bzw. Kreisbögen existieren, muss dies in der CAD-Zeichnung überprüft und behoben werden (siehe auch 7.4.2 DXF Import). Die Liniendicken können in „smartFEM Settings – GUI“ eingestellt werden.

### 3.1.2.4 Basisparameter

In der Parametergruppe „Basic“ werden die sogenannten Basisparameter angezeigt:

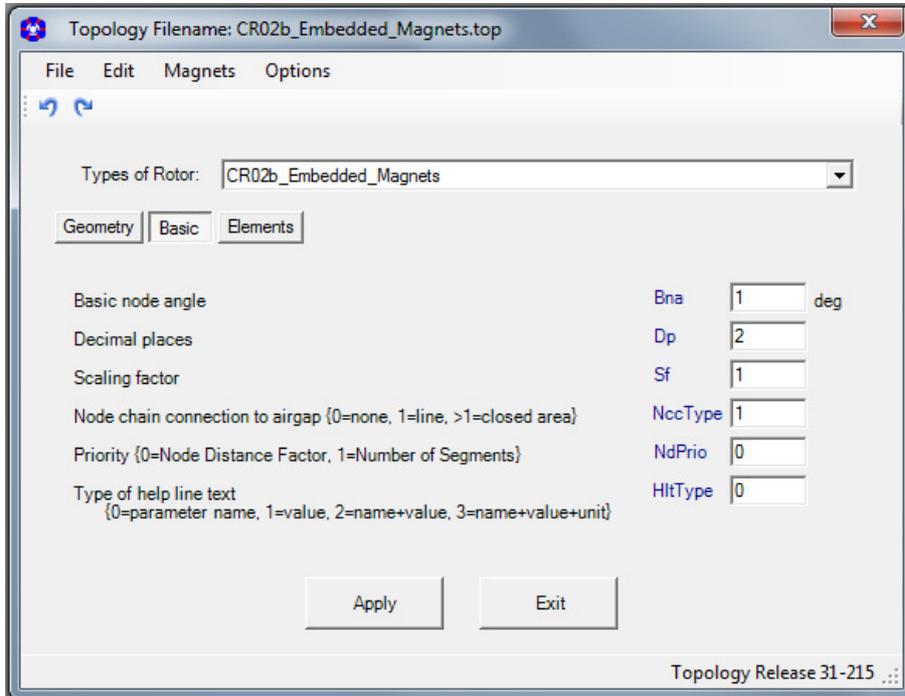


Abb. 27: Basisparameter

- Basic node angle                      minimaler Knotenabstand am Luftspalt in deg. Ein genaue Definition und Erläuterung erfolgt in 3.1.2.5
  - Decimal Places                            Anzahl der angezeigten Nachkommastellen  
Alle Parameter werden nach der Eingabe bzw. vor der Ausgabe entsprechend gerundet.
  - Scaling Factor                            Maßstab zur Vergrößerung bzw. Verkleinerung ausschließlich für die Rotorgeometrie. Alle Eingabeparameter werden mit diesem Faktor multipliziert.
- Ausnahme:
- Innen- bzw. Außenradius des Stators bei Innen- bzw. Außenläufer, die jeweils aus Außen- bzw. Innenradius des Rotors + Luftspalt berechnet werden. D.h. hier erfolgt eine Streckung der Statorparameter in radialer Richtung.
- Node chain connection to airgap    Hiermit kann die Anbindung der Geometrie an den Luftspalt gesteuert werden.
  - Priority                                    Steuerung ob der Eingabewert „Node Distance Factor“ oder „Anzahl Segmente“ auf den Kontenketten konstant gehalten wird.

### 3.1.2.5 Knotenkett

Basis für die zu den FEM-Berechnungen erforderliche Vernetzung sind die aus den Zeichnungselementen „Linie“, „Kreisbogen“ und „Kurvenabschnitt“ gebildeten Knotenkett. Dabei wird aus jedem Zeichnungselement eine Anzahl von Teilstücken (Segmente) als Linien gebildet, deren Anfang und Ende jeweils durch Knoten gekennzeichnet werden.

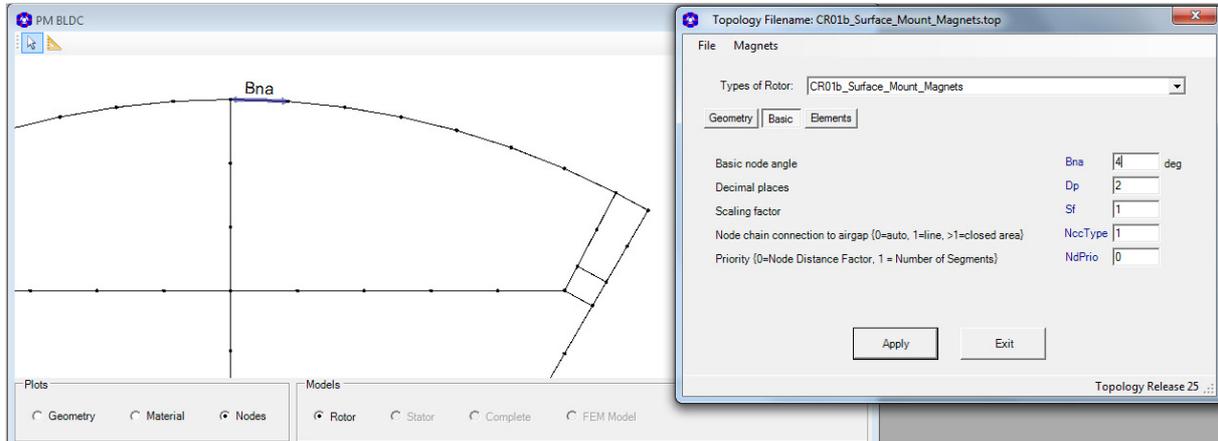


Abb. 28: Knotenkett mit Anzeige des Basisknotenwinkels

Die Anzahl der Linienstücke eines Zeichnungselementes ergibt sich zu:

- Rotierende Motoren:

$$\text{Number of Segments} = \text{Integer} \left( \frac{\text{element length}}{\text{Bna} \times \text{Node distance factor}} \right)$$

Bna = Base node angle [deg] oder auch Basisknotenwinkel

= Winkel zwischen 2 Knoten am Luftspalt

Node distance factor = Element spezifischer Faktor (Eingabe in Parameter Gruppe "Elements")

- Linearmotoren:

$$\text{Number of Segments} = \text{Integer} \left( \frac{\text{element length}}{\text{Bnd} \times \text{Node distance factor}} \right)$$

Bnd = Base node distance [mm] oder auch Basisknotenabstand

= Abstand zwischen 2 Knoten am Luftspalt

Node distance factor = Element spezifischer Faktor (Eingabe in Parameter Gruppe "Elements")

Basisknotenwinkel und elementabhängigen Faktoren sind für jede Topologie mit Werten vorbesetzt, die ein „gutes“ Netz für die FEM-Berechnungen ergeben.

Der Benutzer kann den Basisknotenwinkel bzw. Basisknotenabstand in der Parametergruppe „Basic“ anpassen. Er gilt für alle Zeichnungselemente. Die elementabhängigen Faktoren werden in der Gruppe „Elements“ für jedes Zeichnungselement individuell angepasst.

Die Einstellung des Knotenabstandes im mittleren Luftspaltlayer, der für eine genaue Kraftberechnung bedeutend ist, erfolgt in dem Dialog „Motor Parameters“ mit dem Parameter „Min. Rotation Step“ (siehe auch 3.6). Er sollte so gewählt werden, dass die Netzelemente möglichst quadratisch sind.

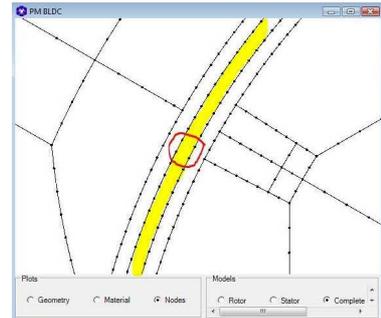


Abb. 29: Knotenkettens im Luftspalt

### 3.1.2.6 Anpassung von Knotenkettens

Beim Klick mit der rechten Maustaste auf ein Zeichnungselement (Punkt, Linie, Bogen) wird das Element mit zusätzlichen Informationen hervorgehoben.

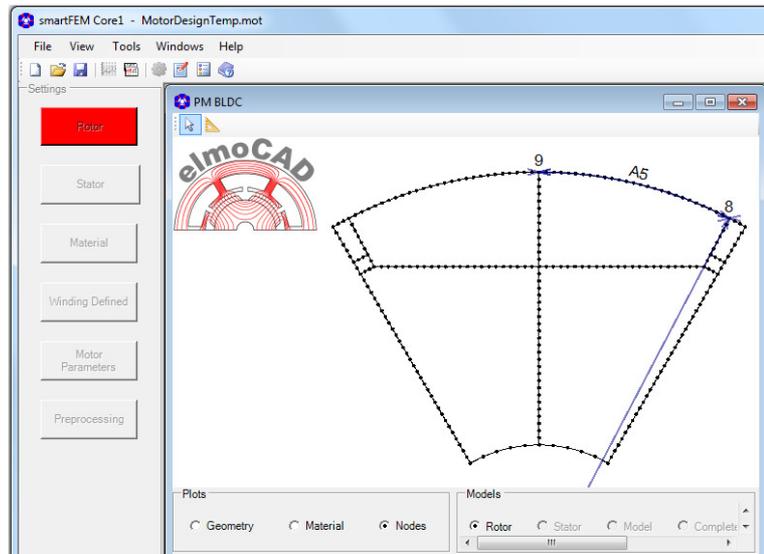


Abb. 30: Rotor-Geometrie - Darstellung der Knotenkettens

Gleichzeitig wird im Parameterfenster auf die Gruppe „Elements“ gewechselt, der Cursor in das entsprechende Parameterfeld positioniert und zusätzliche Informationen angezeigt.

Ein Element kann auch durch die Eingabe der Elementnummer ausgewählt werden.

Für das ausgewählte Element kann mit dem Parameter „Node distance factor“ der Knotenabstand als ein Vielfaches des Basisknotenabstandes eingegeben werden. Anschließend wird die Anzahl der Segmente berechnet. Bei Eingabe von „Number of Segments“ wird der „Node distance factor“ auf Basis dieser Anzahl korrigiert.

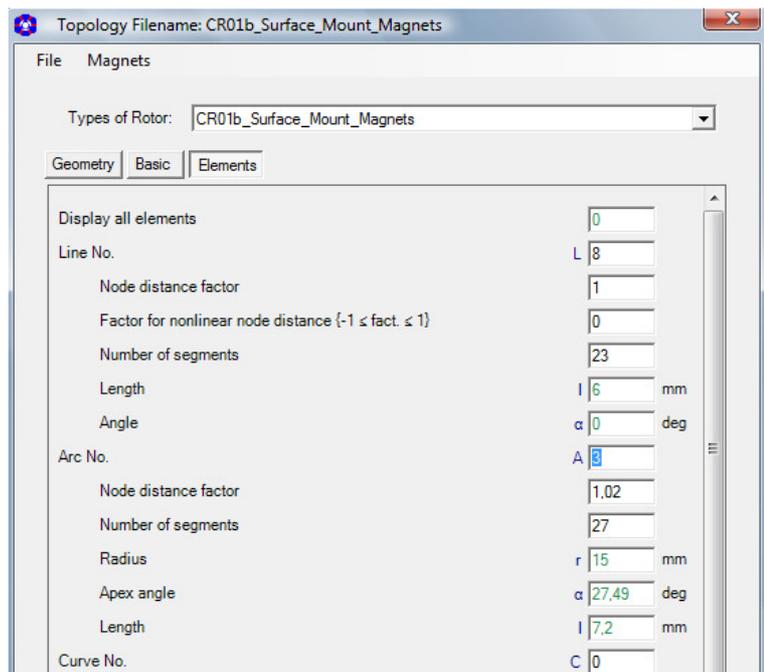


Abb. 31: Rotor-Geometrie - Gruppe "Elements"

Je nach Einstellung des Parameters „Priority“ in Parametergruppe „Basic“ wird bei einer Längenänderung des Elements der „Node distance factor“ oder „Number of segments“ konstant gehalten.

Bei Linien können mittels eines zusätzlichen Faktors  $-1 \leq \text{„Nonlinear node distance factor“} \leq 1$  nichtlineare Knotenabstände erzeugt werden, um die Knotenabstände am Anfang und Ende einer Linie an die jeweils benachbarten Elemente anzupassen. Durch Wechsel des Vorzeichens wird die Richtung der Knotenabstände umgekehrt.

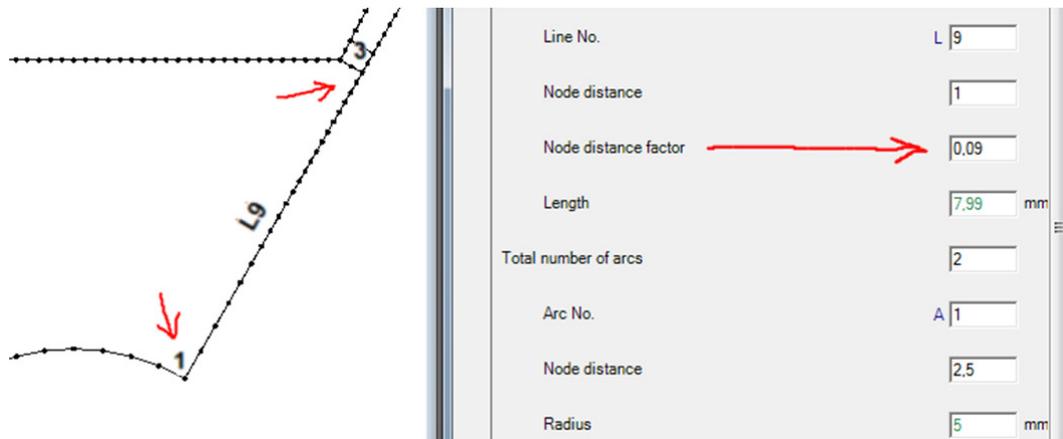


Abb. 32: Rotor-Geometrie - nichtlineare Knotenkette

### 3.1.3 Stator

Die Statorgeometrie wird entsprechend wie die Rotorgeometrie aufgerufen und bearbeitet. Auch hier stehen verschiedene Statortopologien zur Verfügung, aus denen der Benutzer auswählen kann.

Mit der Angabe „One Coil Per Slot“ bzw. „Two Coils Per Slot“ wird als Wicklungstyp „Ein-Schicht-“ bzw. „Zwei-Schicht-Bruchlochwicklung“ festgelegt. Bei einigen Statortopologien kann für „Zwei-Schicht-Bruchlochwicklungen“ neben der Lage in linker/rechter Nuthälfte auch Unter-/Oberlage mit gleich großen Flächeninhalten ausgewählt werden.

Die Bearbeitung der Knotenketten erfolgt analog wie beim Rotor.

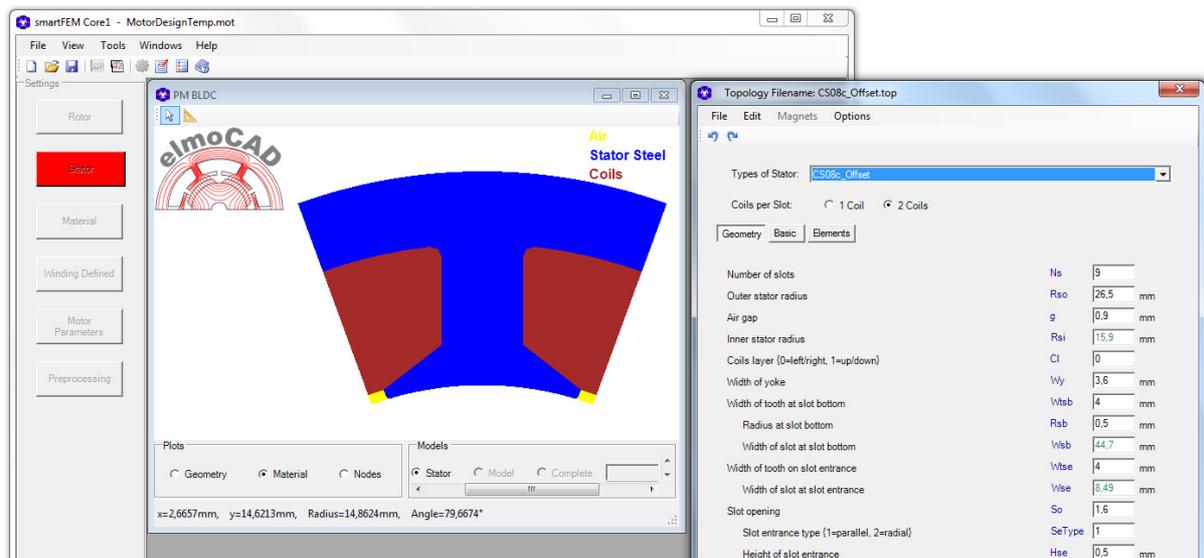


Abb. 33: Stator bearbeiten

### 3.1.4 Speichern, DXF- und FEMAG-Export

Nach Bearbeitung der Rotor- und Statorgeometrie kann das gesamte Modell gespeichert und die Geometrie in Formaten von FEMAG- und DXF-Dateien exportiert werden.

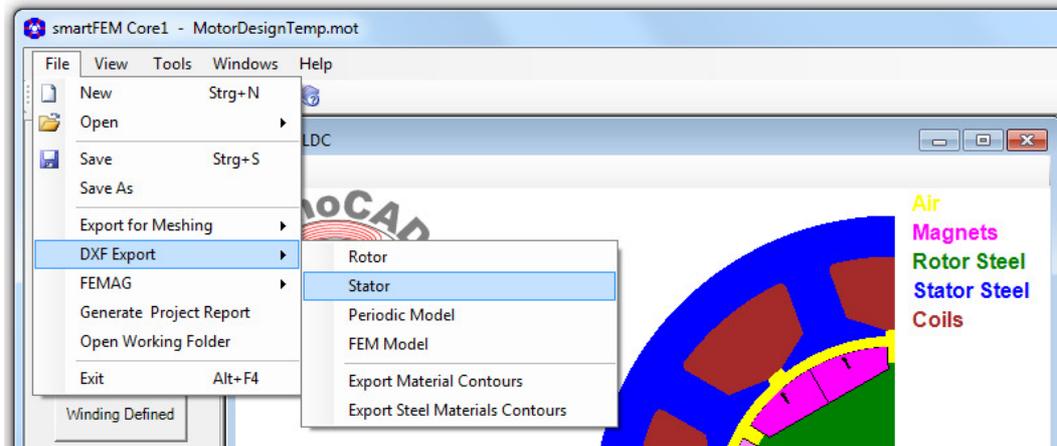


Abb. 34: Motorgeometrie speichern und exportieren

Alle Zeichnungselemente einer Topologie in eine DXF-Datei basierend auf den Spezifikationen der „AutoCAD® dxf-reference“ Dokumente exportiert werden:

- Rotor
- Stator
- Periodic Model
- FEM Model

Dabei kann zusätzlich angegeben werden ob nur Materialkonturen oder Konturen von Eisenmaterial exportiert werden soll.

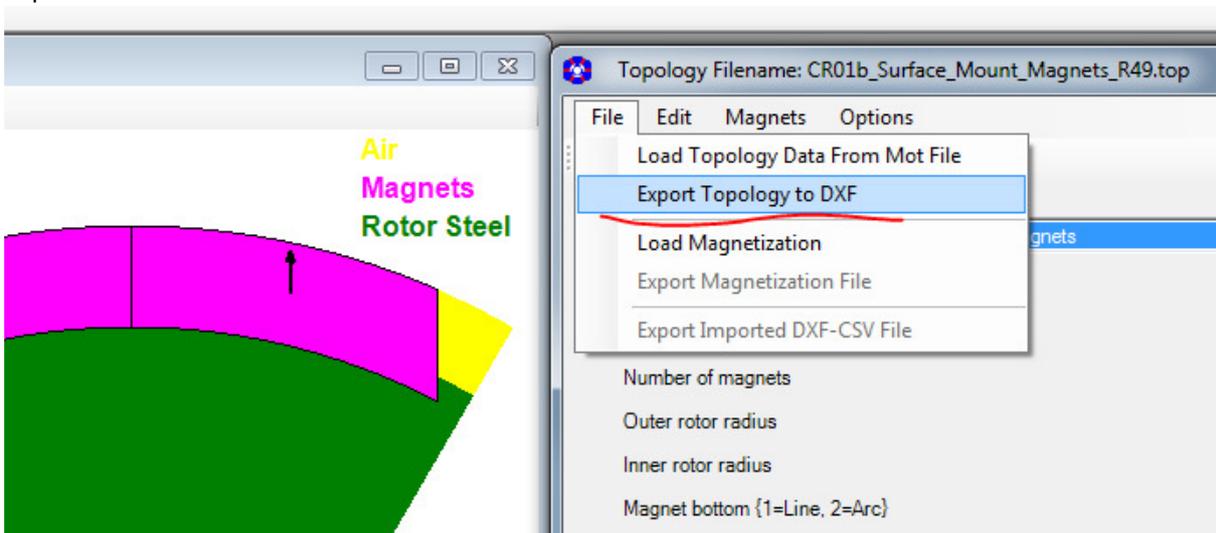


Abb. 35: Motorgeometrie speichern und exportieren

Weitere Einzelheiten sind in Kapitel „7.5 DXF Export“ beschrieben.

### 3.2 Materialien

Durch Klick mit der linken Maustaste auf die Schaltfläche „Material“ wird ein Popup-Fenster für die Zuweisung der Materialdaten für Elektrobleche, Magnete und Wicklungen geöffnet.

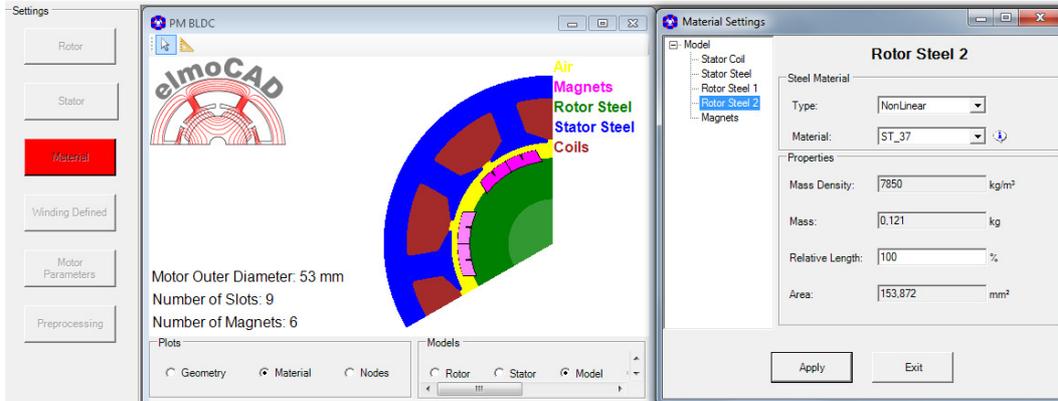


Abb. 36: Zuweisung der Materialeigenschaften

Die „Relative Länge“ der Materialien bezieht sich auf die Motorlänge = aktive Luftspaltlänge, die in „Motor Parameters“ angegeben ist. Sie wird zusammen mit der Materialdichte für die Berechnung von Massen und Trägheitsmomente benutzt und auch bei Berechnung von BEMF, Drehmomenten, etc. berücksichtigt.

#### 3.2.1 Stator Wicklung

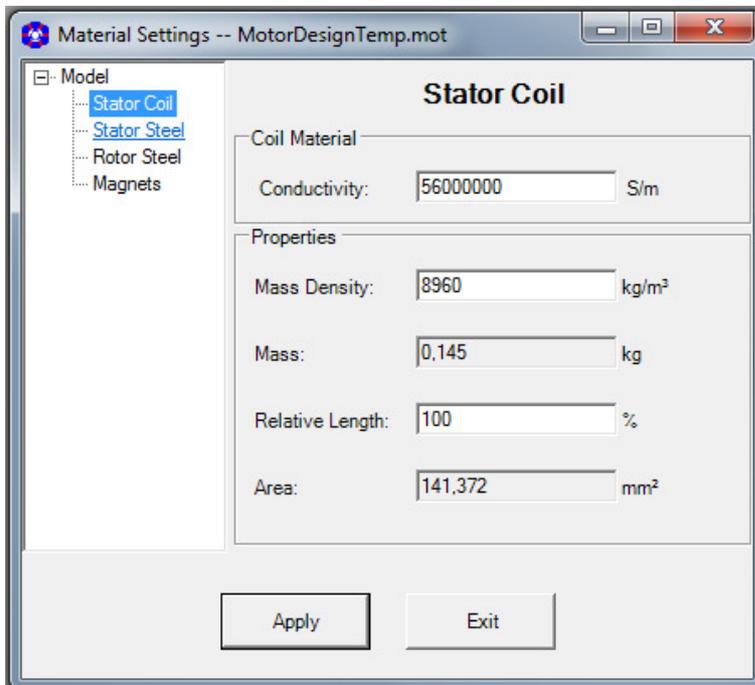


Abb. 37: Materialien - Stator mit Wicklungsparameter

Die Parameterwerte von „Leitfähigkeit“, „Dichte“ und „Relative Länge“ können editiert werden. Sie sind mit den Daten von Kupfer vorbesetzt.

### 3.2.2 Stator und Rotor Eisen

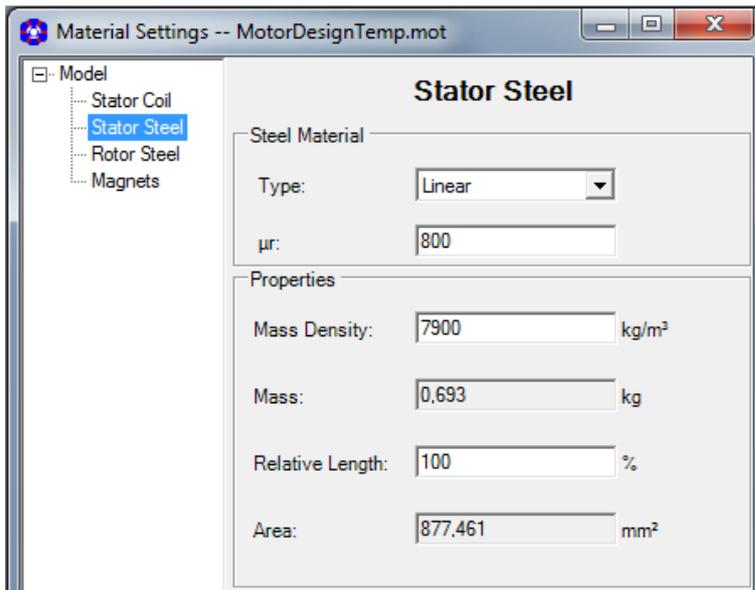


Abb. 38: Materialien - Statoreisen Parameter

Der Benutzer kann zwischen Materialtyp „Linear“ und *Nicht-Linear*“ auswählen:

- *“Linear”*  
Die Werte für *“μr”*, *“Dichte”* and *“Relative Länge”* können angegeben werden.
- *“Non-Linear”*  
Die in den *“smartFem Settings”* angegebenen Materialverzeichnis gespeicherten Dateien mit Materialdaten werden in einer Auswahlliste angezeigt und die entsprechende Datei kann ausgewählt werden.

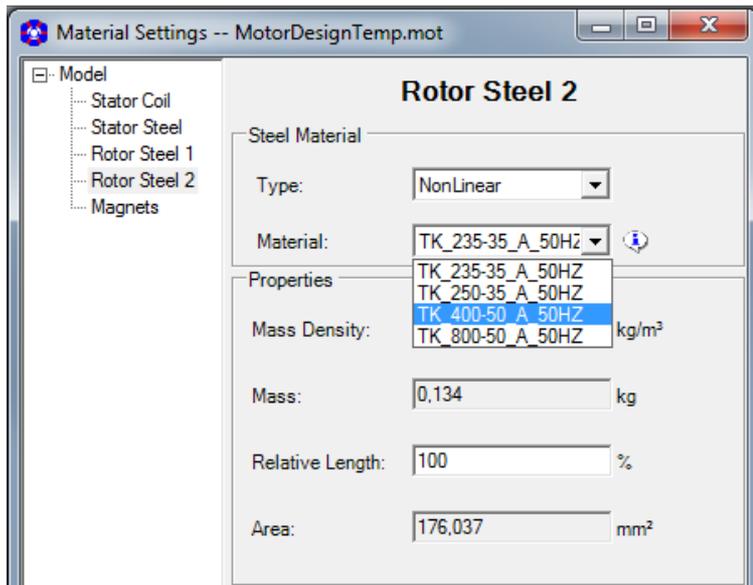


Abb. 39: Materialien - Auswahlliste *“Nicht-Lineare”* Materialdaten

Für die Zuweisung verschiedener Materialien in Rotor oder Stator Topologien können je Fläche unterschiedliche Materialnummern „MatNo“ in der Parametergruppe „Elements“ zugewiesen werden, wobei die Flächen dann in verschiedenen Farbabstufungen dargestellt werden. Dies muss als Erstens getan werden, bevor in „Materials“ die entsprechenden Materialdaten ausgewählt werden können.

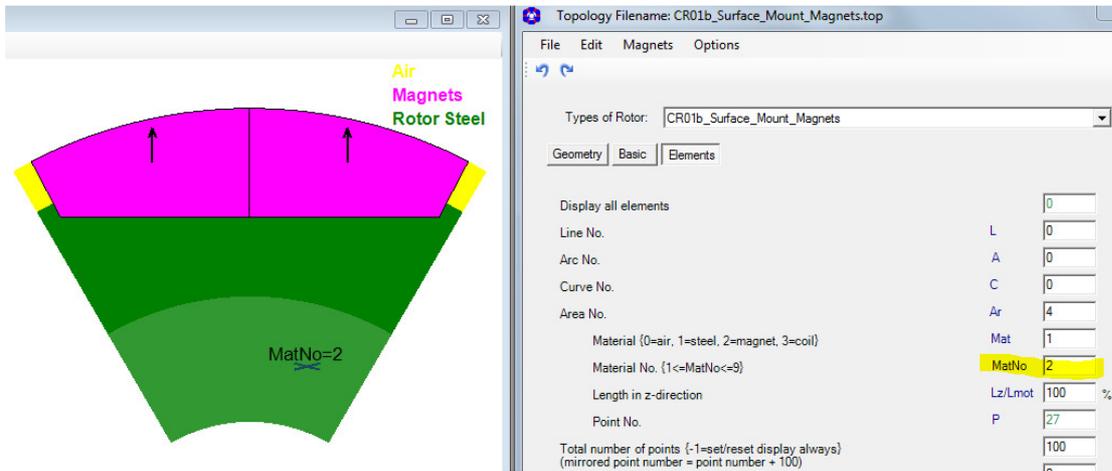


Abb. 40: Materialien - Zuweisung verschiedener Materialnummern „MatNo“ zu verschiedenen Flächen innerhalb einer Topologie

Die Erstellung und Pflege der Materialdateien mit BH-Kurven und Verlustwerten/-Koeffizienten kann mit dem Material Explorer (siehe 3.2.5 Material Explorer - Beschreibung nichtlinearer Materialkennlinien) erfolgen.

### 3.2.3 Magnete

Zur Beschreibung der Magnete für lineare Berechnungen werden Remanenzinduktion  $B_r$ , relative Permeabilität  $\mu_r$  und Leifähigkeit des verwendeten Magnetmaterials angegeben.

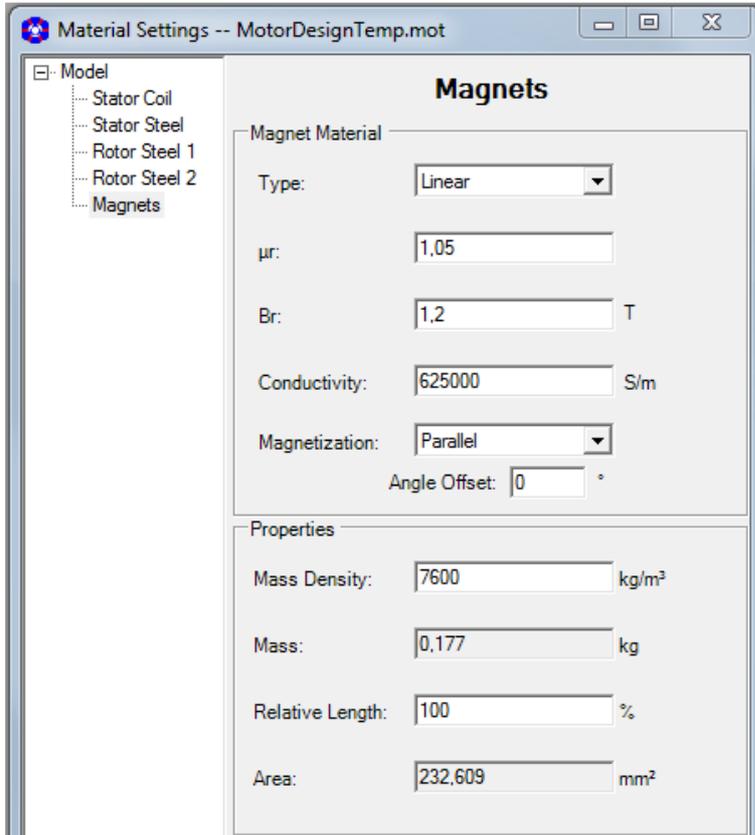


Abb. 41: Materialien - Magnete

Für nicht-lineare Berechnungen können die Entmagnetisierungskurve und Verlustdaten ebenfalls mit dem „Material Explorer“ beschrieben und in „Material“ werden.

Die Magnetisierungsrichtung kann mit „Parallel“, „Radial“, „Halbach“ und „User Defined“ festgelegt werden, wobei die Magnetisierungsrichtung im Grafikenfenster angezeigt wird.

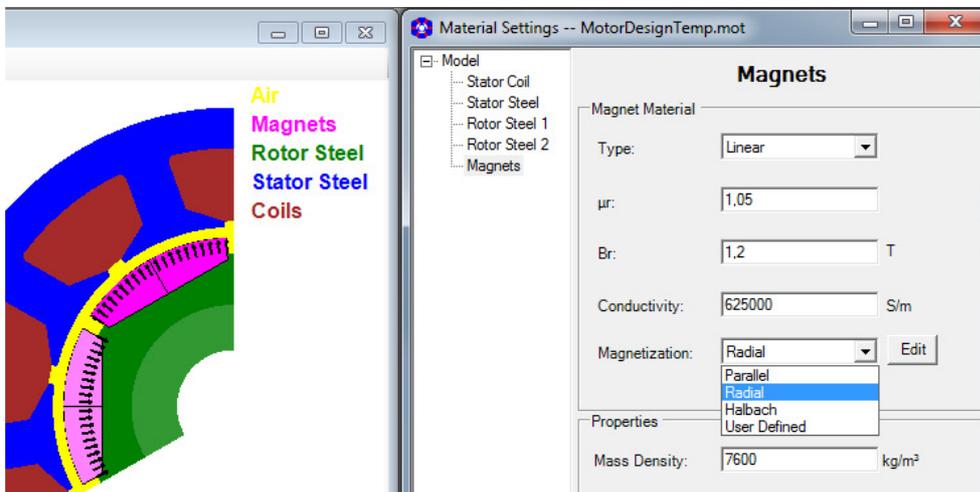


Abb. 42: Materialien - Magnetisierung

Für „Parallele“ Magnetisierung kann zudem ein Offsetwinkel zur Rotation der Magnetisierungsrichtung angegeben werden.

Für „Radiale“ Magnetisierung kann diese in einer Tabelle editiert, als Grafik dargestellt und in einer Datei \*.dat z.B. im Materialverzeichnis gespeichert werden. Die Magnetisierung wird automatisch auf die jeweilig gewählte Magnetbreite ( $W_m = 180^\circ$ ) angepasst.

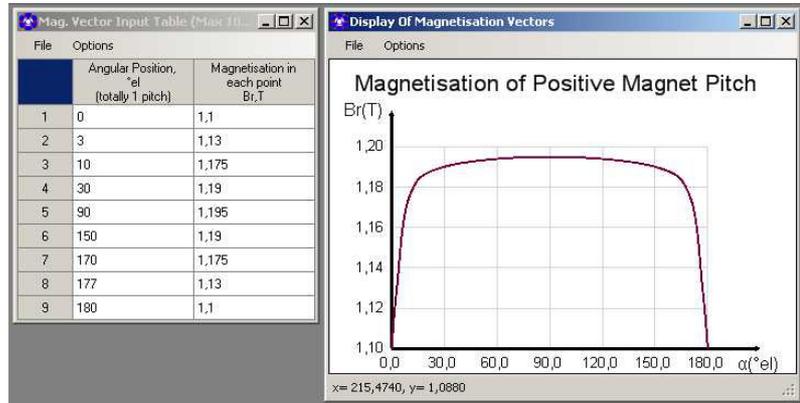


Abb. 43: Materialien - Magnetisierungstabelle

Bei „User Defined“ Magnetisierung kann für jeden einzelnen Magneten als weitere Parameter „North“ bzw. „South“, „Br“ und „μr“ in einer Liste editiert werden.

The figure shows the 'Magnets Definition' window with a table of magnet parameters:

Options	Mag. Type	Direction	Offset	Br_max	Muer	Vectors
No. 1	Radial	North	0	1,2	1,05	Default
No. 2	Radial	South	0	1,2	1,05	Default
No. 3	Parallel	North	0	1,2	1,05	Default
No. 4	Halbach	South	0	1,2	1,05	Default
No. 5	Radial	North	0	1,2	1,05	Default
No. 6	Radial	South	0	1,2	1,05	Default

Abb. 44: Materialien - Benutzer definierte Magnete

Zusätzlich besteht noch die Möglichkeit, gemessene Magnetisierungen von Ringmagneten einzulesen und für die Verwendung in smartFEM und FEMAG umzurechnen.

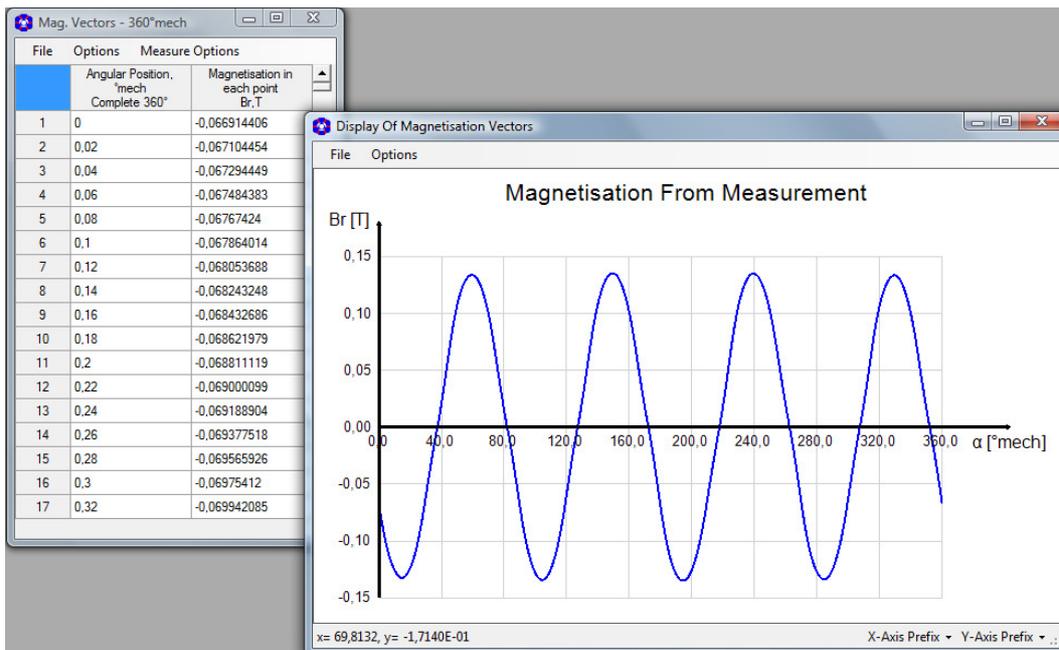


Abb. 45: Materialien - gemessene Magnetisierung

Zu den Messdaten müssen noch zusätzliche Parameter im Menü „Measure Options“ angegeben werden.

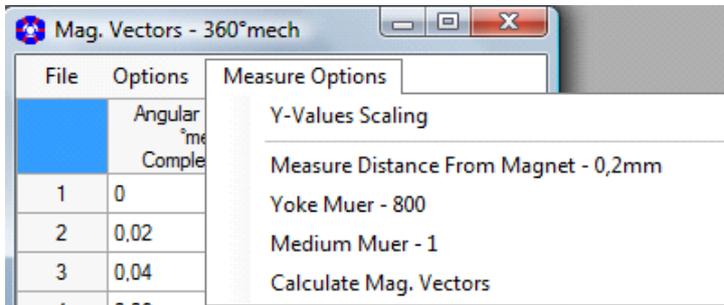
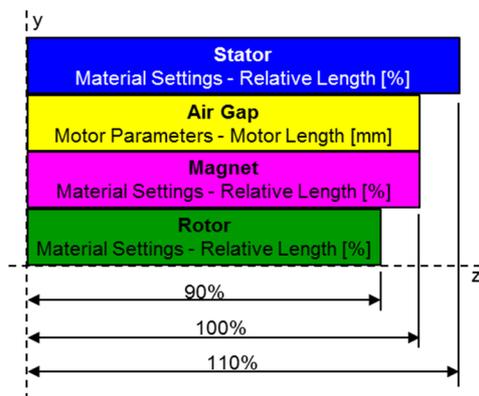


Abb. 46: Materialien - Zusatzparameter für gemessene Magnetisierungen

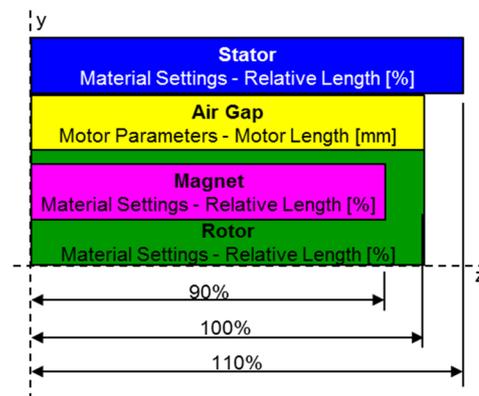
### 3.2.4 Relative Length

Für Permanentmagnete und Weicheisen können verschiedene magnetisch wirksame Längen in axialer Richtung (z-Achse) unter der Annahme berücksichtigt werden, dass der vom Magneten erzeugte Fluss im Rotor- und Statoreisen gleich bleibt. Als Referenzwert wird die **Länge des Luftspalts = 100%** angenommen.

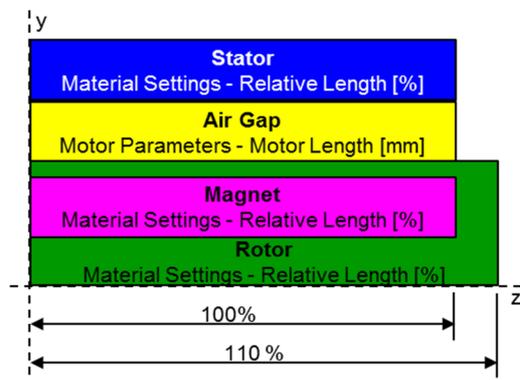
Beispiel 1: elektrische Maschine mit Oberflächenmagneten



Beispiel 2: elektrische Maschine mit eingebetteten Magneten



Beispiel 3: elektrische Maschine mit eingebetteten Magneten



Die Eingabe einer relativen Länge  $\neq 100\%$  für Wicklungen wird bei der Berechnung des Wicklungs-widerstandes berücksichtigt. Weiterhin wird die relative Länge bei der Berechnung der Massen bei allen Materialien berücksichtigt.

### 3.2.5 Material Explorer - Beschreibung nichtlinearer Materialkennlinien

Die Beschreibung der Materialeigenschaften für Elektrobleche und Permanentmagnete kann mit dem smartFEM „Material Explorer“ vorgenommen werden. Über eine Schnittstelle können die Materialdaten für die FEM Berechnungen mit FEMAG, JMAG, MAXWELL, SPEED und formatierte Textdateien für andere Tools exportiert werden.

Der Material Explorer wurde in Zusammenarbeit mit ThyssenKrupp Electrical Steel (TKES) in Bochum erstellt und ist bei TKES unter dem Namen PowerCore® Explorer unabhängig von smartFEM erhältlich.

Die Funktionalität ist in dem Dokument „User Guide PowerCore Explorer“ beschrieben.

#### 3.2.5.1 Elektroband

Bei der Installation von smartFEM werden die Daten von drei TKES-Standardmaterialien für nichtlineare Berechnungen mit smartFEM im Materialverzeichnis ...\\smartFEM\\Materials angelegt. Weitere Materialdaten aus dem Lieferprogramm von TKES sind bei TKES erhältlich.

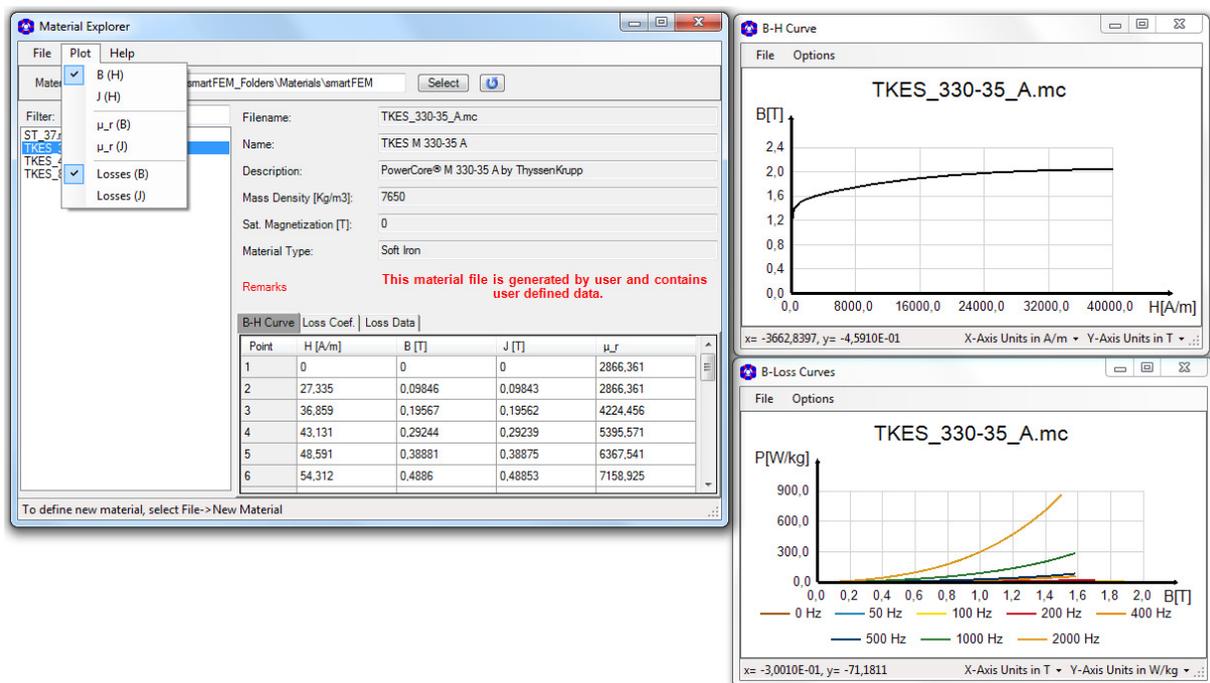


Abb. 47: Material Explorer - B(H) und Verlustdaten von Elektroband

### 3.2.5.2 Permanentmagnete

Neben Elektrobänd können mit dem Material Explorer auch nichtlineare „Entmagnetisierungs-Kennlinien“ von Permanentmagneten erfasst und als FEMAG spezifische mc-, mca- und txt-Dateien gespeichert werden. Dazu muss bei der Speicherung der Materialtyp „*Permanent Magnet*“ ausgewählt werden.

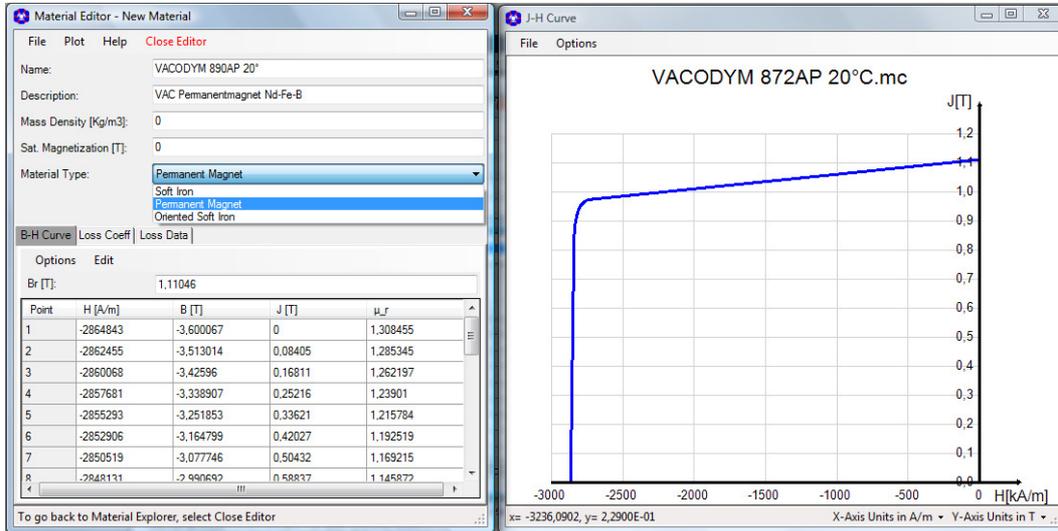


Abb. 48: Material Explorer - Entmagnetisierungs-Kennlinie

Derzeit müssen die Entmagnetisierungs-Kennlinien eines Materials für verschiedene Temperaturen einzeln erfasst und gespeichert werden.

Verlustkoeffizienten und -daten werden z. Z von smartFEM nicht verwendet. Zur Berechnung der Wirbelstromverluste in den Magneten wird die in „*Materials*“ eingegebene Leitfähigkeit verwendet.

Die Erfassung der Kennlinien von nicht magnetisiertem Magnetmaterial erfolgt analog der Kennlinien für Elektrobänd. Diese Daten werden bei der Simulation von Magnetisierungsvorgängen mit dem smartFEM Modul „*PM - Magnetization - Inner Rotor*“ verwendet.

### 3.3 Preprocessing

Voraussetzung für die Berechnung von Ergebnissen und deren Analyse mittels FEM-Simulation ist der Aufbau des FEM-Modells in FEMAG. Nach Betätigung der Schaltfläche „Preprocessing“ wird FEMAG gestartet, alle erforderlichen Informationen über Geometrie, Knotenketten und Materialien an FEMAG übergeben und der FEMAG-Prozess von smartFEM bis zur Feldberechnung mit der FEMAG-Menuefolge „Field Calculation“→„Calculate Once“ gesteuert.

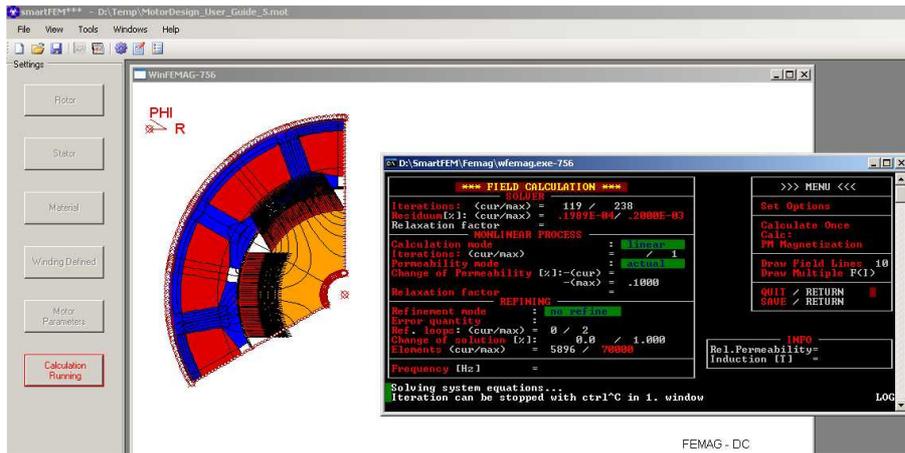


Abb. 49: Preprocessing - Aufbau des FEM-Modells mit FEMAG

Nach erfolgreichem Durchlauf des „Preprocessing“ wird in die Schaltfläche der Text „Calculation“ eingeblendet. Der Benutzer kann jetzt - sofern das zu diesem Zeitpunkt sinnvoll ist - eine erste FEM-Simulation mit Ermittlung des Cogging Torque durchführen (siehe 3.6.2 Cogging Torque und BEMF).

Das „Preprocessing“ kann nach rechten Mausklick auf die „Preprocessing“ Schaltfläche wie folgt gesteuert werden:

- Show/Hide FEMAG                      Zeigen/Verbergen der FEMAG Fenster.
- Stop FEMAG on Error                    FEMAG wird nach einem Fehler angehalten, damit der Benutzer die Fehlerursache ermitteln kann.
- Only Meshing                              Es wird nur die Vernetzung durchgeführt.
- PreProcessing+Calculation              Im Anschluss an das „Preprocessing“ wird automatisch die in Motor Parameters ausgewählte Berechnungsart durchgeführt.

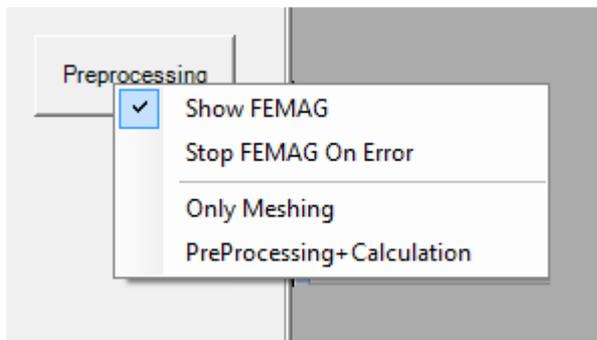


Abb. 50: Preprocessing - Show FEMAG

Nach dem das „*Meshing*“ erfolgreich abgeschlossen wurde, kann die Darstellung des Netzes über die Schaltfläche „*Plots*“ aufgerufen werden

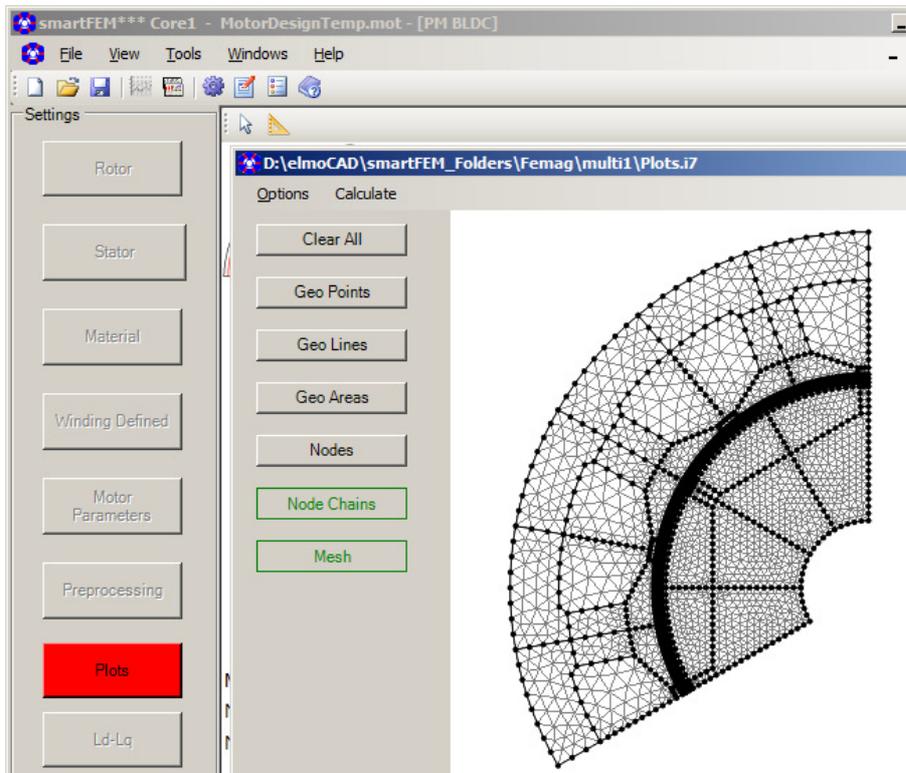


Abb. 51: Preprocessing - Netz und Knotenketten

Das „*Preprocessing*“ kann nach Optimierung des Netzes durch ein weiteres Betätigen der Schaltfläche „*Preprocessing*“ zu Ende geführt werden.

Sobald zu einem späteren Zeitpunkt eine Änderung in Motorgeometrie oder Material vorgenommen wird, wird der Schaltflächentext „*Calculation*“ automatisch auf „*Preprocessing*“ zurückgesetzt, alle Berechnungsergebnisse gelöscht und das Preprocessing muss erneut ausgeführt werden.

Für die Berechnung weiterer Ergebnisse z.B. BEMF, Torque, etc. muss das Motormodell mit Informationen über Wicklungen und weiteren Motorparametern vervollständigt werden.

Die Berechnung der Feldverteilung im Inneren des Rotors (Region < innerer Rotorradius  $R_{ri}$ ) kann bei vollständigen Maschinenmodellen (360°mech) erfolgen. Dazu muss in „*Motor Parameters*“ im Menü „*Options*“ „*Calculate and Mesh Shaft Area*“ gewählt werden.

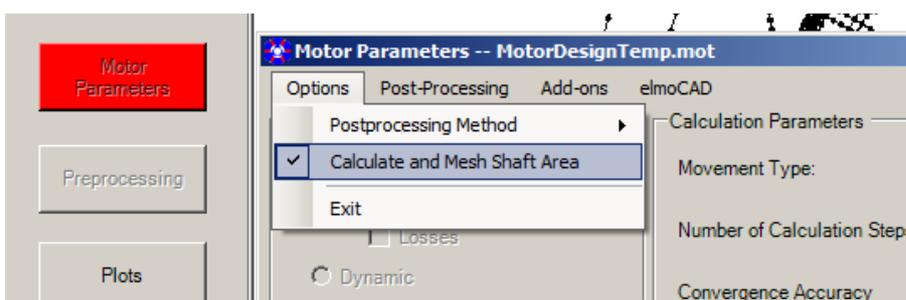


Abb. 52: Preprocessing - Calculate and Mesh Shaft Area

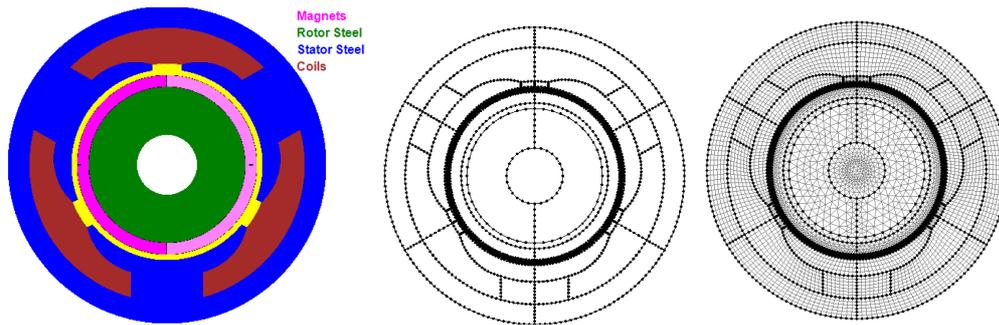


Abb. 53: Preprocessing - Mesh and Calculate Shaft Area (2)

Diese Art der Vernetzung ist nur für vollständige Maschinenmodelle möglich, da Femag in allen anderen Fällen Randbedingungen auf Rri benötigt.

**Hinweis:** Ohne diese innere Vernetzung wird die Feldverteilung bei 2-poligen Maschinen fehlerhaft berechnet!

fehlerhafter Flusslinienverlauf

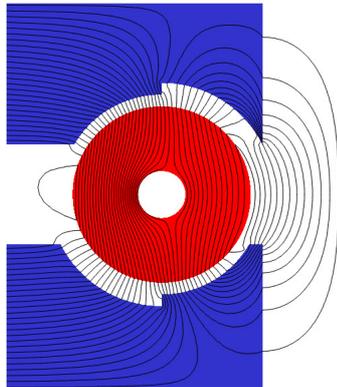


Abb. 54: Preprocessing - fehlerhafter Flusslinienverlauf

korrekter Flusslinienverlauf

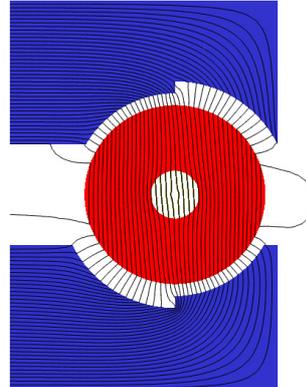


Abb. 55: Preprocessing - korrekter Flusslinienverlauf

### 3.4 Feldbilder (Plots)

#### 3.4.1 Definition und Anzeige von Feldbildern

Nach erfolgreicher Durchführung des „*Preprocessing*“ kann die Auslegung des magnetischen Kreises mit Hilfe von „*Plots*“ beurteilt werden. Dazu wird in dem Menü „Field Plots Definition“ unter „Plots - Define Picture“ aufgerufen:

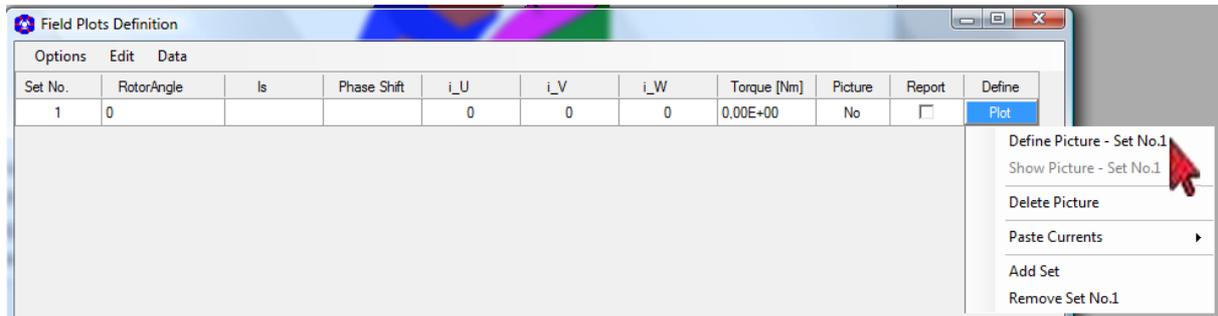


Abb. 56: Field Plots - Field Plots Definition

Nachdem sich das Plot Fenster geöffnet hat (ggfs. werden vorher von FEMAG noch Feldberechnungen vorgenommen), können die verschiedenen Plots ausgewählt und angezeigt werden:

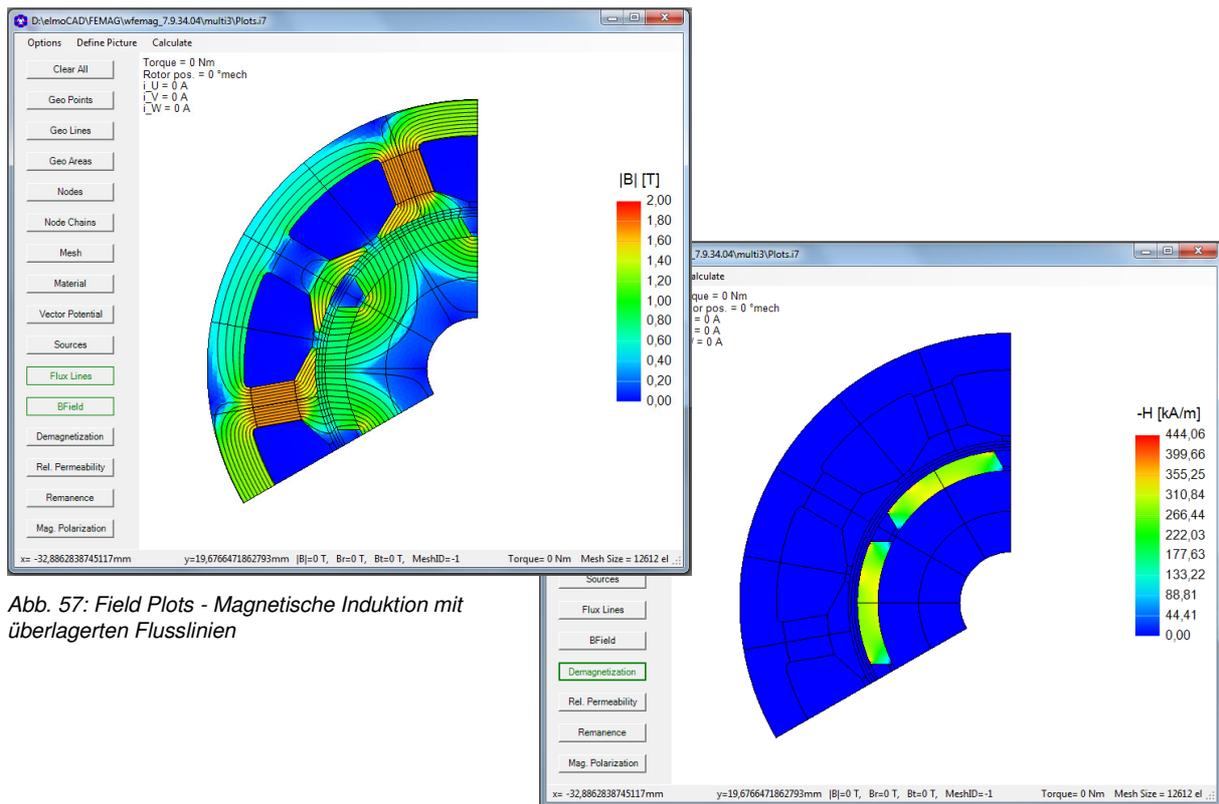


Abb. 57: Field Plots - Magnetische Induktion mit überlagerten Flusslinien

Abb. 58: Field Plots - Entmagnetisierung

Anzahl Flusslinien, Skalierung und weitere Parameter können nach Klick mit rechter Maustaste auf den Auswahlknopf angepasst werden.

Die Plots können sowohl auf den Bildschirm als auch in den Projektbericht ausgegeben werden. Dabei können alle Plots miteinander überlagert werden. Die Überlagerung wird durch einen weiteren Mausklick auf die entsprechende Schaltfläche wieder rückgängig gemacht. Die Anzahl der dargestellten

Flusslinien und die Minimal- bzw. Maximalwerte der Ergebnisskalierungen können nach Klick mit der rechten Maustaste auf die jeweilige Schaltfläche angepasst werden.

Weiterhin können Details mit Hilfe der bekannten Zoomfunktion beliebig tief betrachtet werden. Zusätzlich werden die x/y-Koordinaten des Mauszeigers und weitere Informationen in der Statuszeile angezeigt.

Der Benutzer kann aus folgenden Plots auswählen:

- Geometrie
  - Punkte
  - Linien
  - Flächen
- FEM-Basis
  - Knoten
  - Knotenketten
  - Vernetzung
  - Materialien
- Ergebnisberechnungen magnetischer Kreis
  - Vektor Potenzial
  - Stromdichten
  - Flusslinien
  - Magnetische Induktion
  - Entmagnetisierung
  - Relative Permeabilität
  - Remanenz
  - Magnetische Polarisierung

Eine größere Anzahl von Sets kann mit Hilfe der Funktion „*Parametric*“ erzeugt werden.

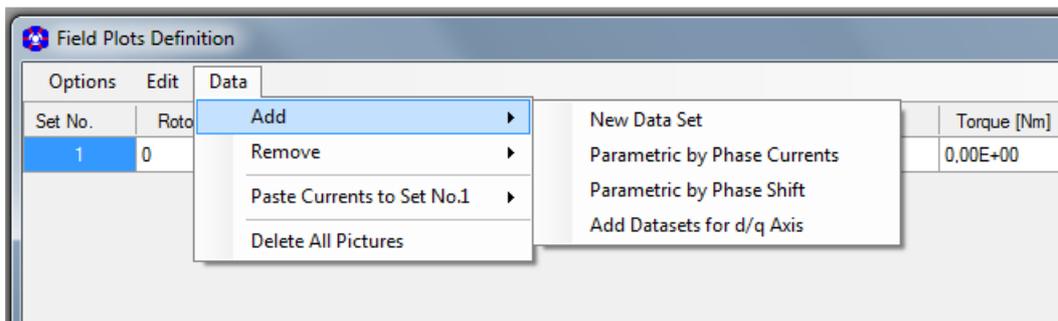


Abb. 59: Field Plots - Tabelle zur parametrischen Definition von Sets

Weiterhin kann der Benutzer mit entsprechenden FEMAG-Kenntnissen das erzeugte FEMAG-Modell mit FEMAG direkt bearbeiten bzw. auswerten (siehe 7.3 FEMAG).

### 3.4.2 Modelldaten

Zur benutzerdefinierten Auswertung können die Eigenschaften von Knoten und Netzelementen über das Clipboard exportiert werden:

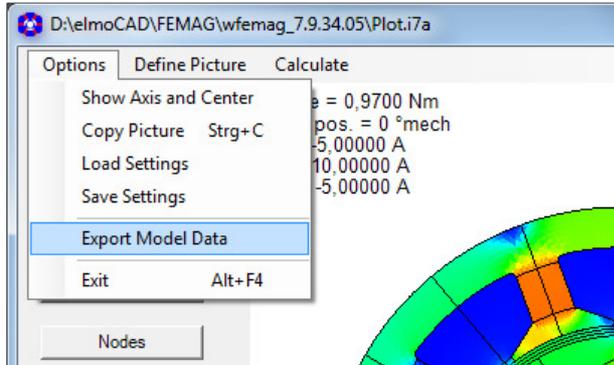


Abb. 60: Field Plots - Modelldaten exportieren

NODES PROPERTIES								
Nr.	X [mm]	Y [mm]	Rad [mm]	Angle [rad]	Vre [V/m]			
1	-2,55E-11	4,999999888	4,999999888	1,570796371	0			
2	-0,52264228	4,972609226	4,999999888	1,675516129	0			
3	-1,039557974	4,890738055	4,999999888	1,780235767	0			
4	0	8,999999613	8,999999613	1,570796371	-0,000953574			
5	-0,2617625	8,996193297	9,000000544	1,599885106	-0,000947984			
...	...	...	...	...	...			
...	...	...	...	...	...			
MESH PROPERTIES								
Nr.	Material	Area[mm2]	CenterR[mm]	InterAngle[*mech]	Br[T]	Bt[T]	Bs[T]	Nodes
1	RotorYoke	0,094855711	5,114084	146,6292893	0,001113491	-0,172096813	0,172100415	(783 48 47)
2	RotorYoke	0,094855713	5,282548	148,6280981	-0,000379586	-0,17678462	0,176785028	(783 526 48)
3	RotorYoke	0,053620981	8,740101	149,5313127	0,028053478	-0,751927743	0,752450881	(784 43 532)
4	RotorYoke	0,036313581	8,906621	148,9787244	0,023961995	-0,760617302	0,76099465	(784 42 43)
5	RotorYoke	0,036315428	8,906616	91,02122319	0,023654246	0,700147637	0,700547099	(785 7 8)
...	...	...	...	...	...			
...	...	...	...	...	...			
1383	Magnet1	0,027852678	13,00234	146,8191891	1,020952942	-0,461262713	1,120316116	(1386 574 575)
1384	Magnet1	0,027852653	13,12514	147,1621962	1,021633191	-0,473463444	1,126011549	(1386 620 574)
1385	Magnet1	0,021788364	14,85829	147,2623732	0,636300937	0,265874223	0,689614374	(1387 103 619)
1386	Magnet1	0,023175448	14,94144	146,9229567	0,426899132	0,059100694	0,43097072	(1387 102 103)
1387	Magnet1	0,023175551	14,94144	93,07703825	0,36248814	-0,116518681	0,380754848	(1388 49 50)
...	...	...	...	...	...			
...	...	...	...	...	...			
2719	Air	0,054310899	14,86109	90,41919031	-0,028352828	-0,236666066	0,238358363	(640 641 642 1995)
2720	Air	0,053398312	14,61132	90,41919034	-0,034010782	-0,163672559	0,167168896	(639 640 1995 1996)
2721	Air	0,052485521	14,36155	90,41919036	-0,029746282	-0,08789884	0,092795729	(638 639 1996 1997)
2722	Air	0,05157273	14,11179	90,4191904	-0,019442563	-0,028442925	0,034453059	(637 638 1997 1998)
2723	Air	0,050659939	13,86202	90,41919043	-0,00668296	0,003608685	0,007595036	(636 637 1998 1999)
...	...	...	...	...	...			
...	...	...	...	...	...			
2755	StatorYoke	0,089996783	22,44139	109,2922672	1,770401525	-0,049111997	1,771082592	(2015 659 662)
2756	StatorYoke	0,089996749	22,61428	109,7093078	1,698753324	0,003731617	1,698757423	(2015 658 659)

Abb. 61: Field Plots - Beispiel exportierte Modelldaten

Über „Calculate“ können Drehmoment, Radialkraft und der Winkel des Kraftvektors im Luftspalt berechnet werden. Gleichzeitig werden die Daten im Zwischenspeicher zur Verfügung gestellt.

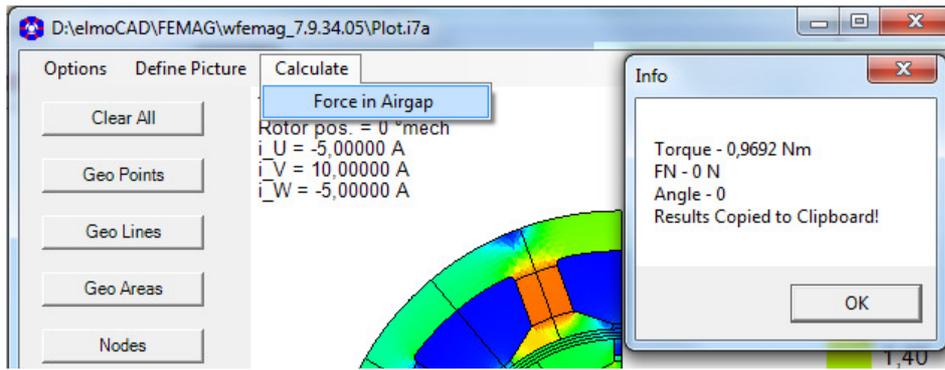


Abb. 62: Field Plots - Force in Airgap

### 3.4.3 Erzeugung von Feldbildern mit gleichem Layout

In der „Field Plots Definition“ Tabelle können mehrere Bilder für unterschiedlichen Rotorpositionen und Ströme definiert werden. Sie können jeweils einzeln über „Define“→“Picture“ mit jeweils anderem Inhalt festgelegt werden. Ströme können dabei manuell eingegeben oder für die ausgewählten Tabellenzeilen über den Dialog „Data“→„Paste Currents“ aus den Ergebnissen für „Expected values“, „Nominal Torque“ oder „Dynamic“ übernommen werden.

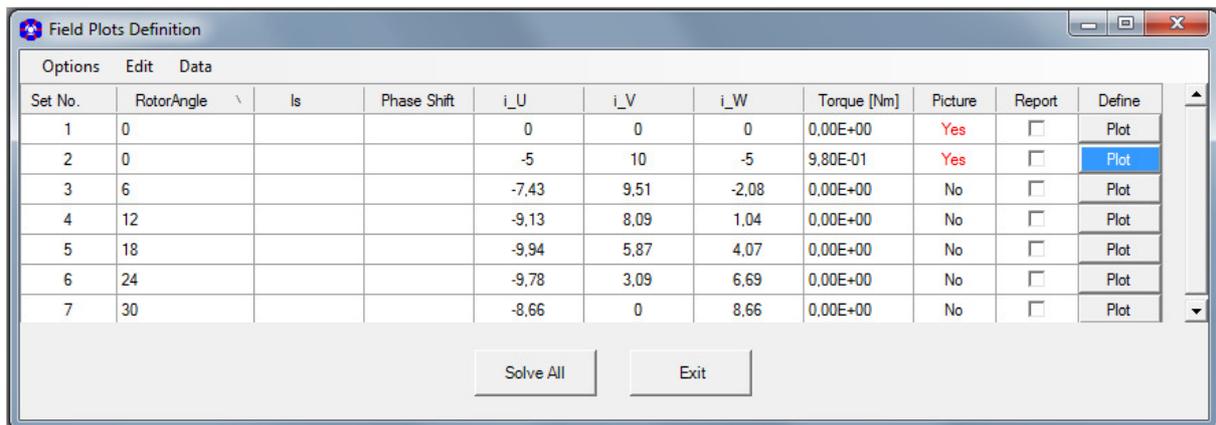


Abb. 63: Field Plots - Definition von Sets

Die Bilder können auch alle zusammen mit „Solve All“ erzeugt werden, wobei dann alle Bilder den gleichen Ausschnitt zeigen. Dazu muss allerdings zuvor die Settings eines Bildes über „Options“→“Save Settings“ und das Bild selbst mit „Define Picture“ gespeichert werden.

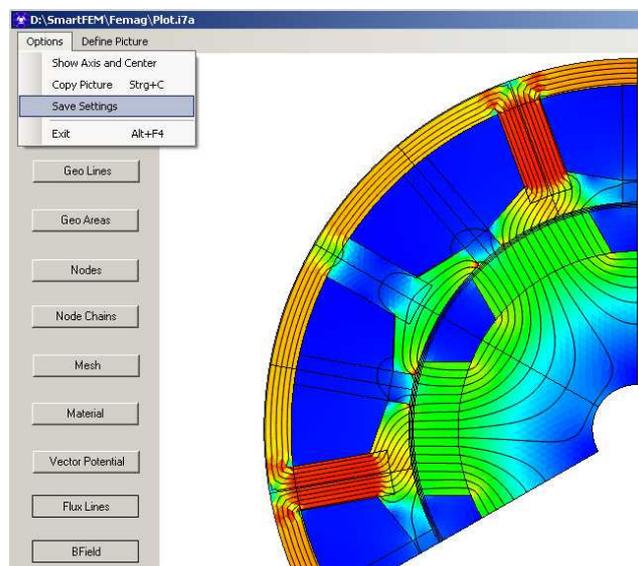


Abb. 64: Field Plots - Save Settings nach Festlegung des Bildinhalts

Wenn man anschließend in ein Bild mit „*Show Picture*“ aufruft und in der „*Field Plots Definition*“ Tabelle mit den Pfeiltasten auf- bzw. abwärts betätigt, werden alle Bilder nacheinander direkt gezeigt, so dass die Feldänderungen sehr gut beobachtet werden können. Mit Klick auf eine Spaltenüberschrift wird die Tabelle entsprechend den Spaltenwerten auf- oder abwärts sortiert.

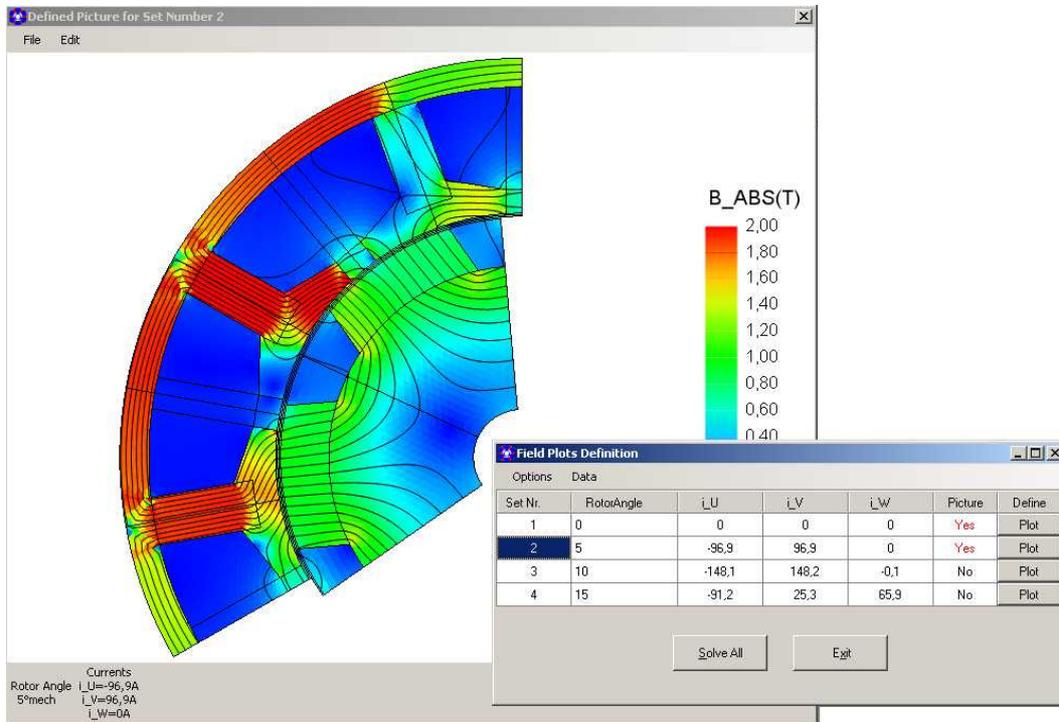


Abb. 65: Field Plots - Darstellung der Plots je Set

Flusslinien können in unterschiedlichen Farben dargestellt werden (Standardwert ist Schwarz/Weiß). Mit Klick der rechten Maustaste auf die Schaltfläche „*Flux Lines*“ öffnet sich ein entsprechendes Pop-Up Fenster, in dem u.a. Die Farben eingestellt werden können.

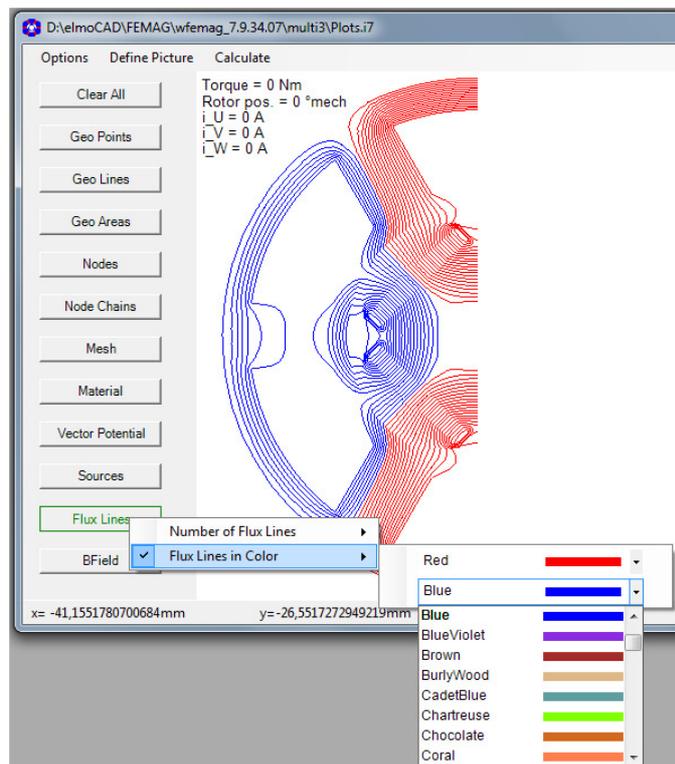


Abb. 66: Field Plots - Farbige Flusslinien

In den smartFEM Settings können die Farben für die Richtung der Flusslinien im und gegen den Uhrzeigersinn eingestellt werden.

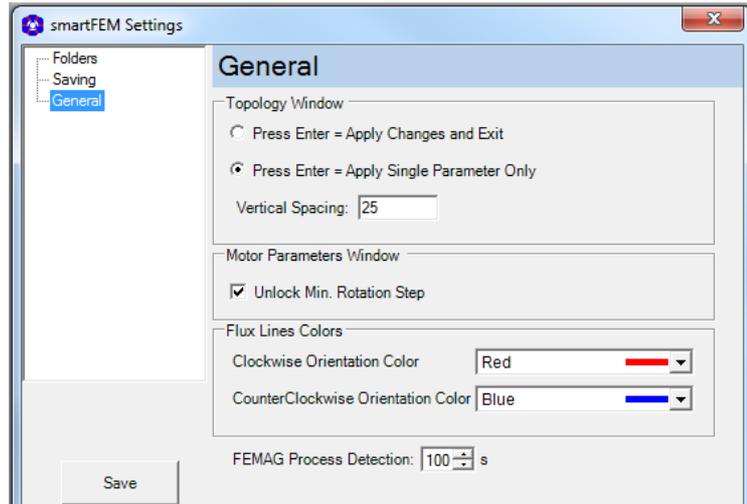


Abb. 67: smartFEM Settings – Farbauswahl und Orientierung von Flusslinien

Die Tabelle „Field Plots Definition“ kann mit allen Berechnungsergebnissen ins Clipboard kopiert werden:

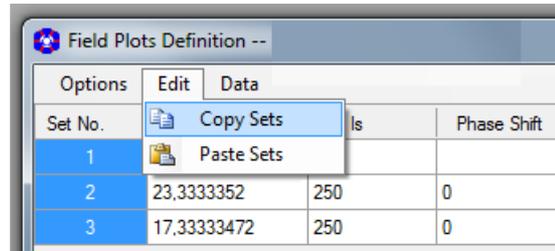


Abb. 68: Field Plots – Copy Sets

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	RotorAngle [Is [A]	Theta [°el]	i_U [A]	i_V [A]	i_W [A]	Torque [Nm]	Flux_U [Vs]	Flux_V [Vs]	Flux_W [Vs]	T/Is [Nm/A]	
2	0	250	0	-43,41	-191,5	234,9	1274,02588	0,203206	-0,247091	0,0518997	5,0961
3	23,3333352	250	0	0,0002947	-216,5	216,5	1270,30273	0,232939	-0,226686	0,00748404	5,0812
4	17,3333347	250	0	250	-125	-125	1296,38147	0,1333	0,1258	-0,2672	5,1855

Abb. 69: Field Plots – Tabelle mit Berechnungsergebnissen

### 3.5 Wicklungen

Zur Beschreibung der Wicklungen besitzt smartFEM einen Wicklungseditor. Sofern es zu der bis zu diesem Zeitpunkt beschriebenen Motorgeometrie mindestens ein zulässiges Wickelschema gibt wird die Schaltfläche „Winding Defined“ angezeigt und das Wickelschema als Default vorgegeben. Ansonsten wird der Text „Winding Not Defined“ in die Schaltfläche eingeblendet. Es können n-phasige Wickelschemata als Ein-/Zweischicht mit Ganz-/Bruchlochwicklungen und parallelen Wicklungsgruppen/Phase beschrieben werden.

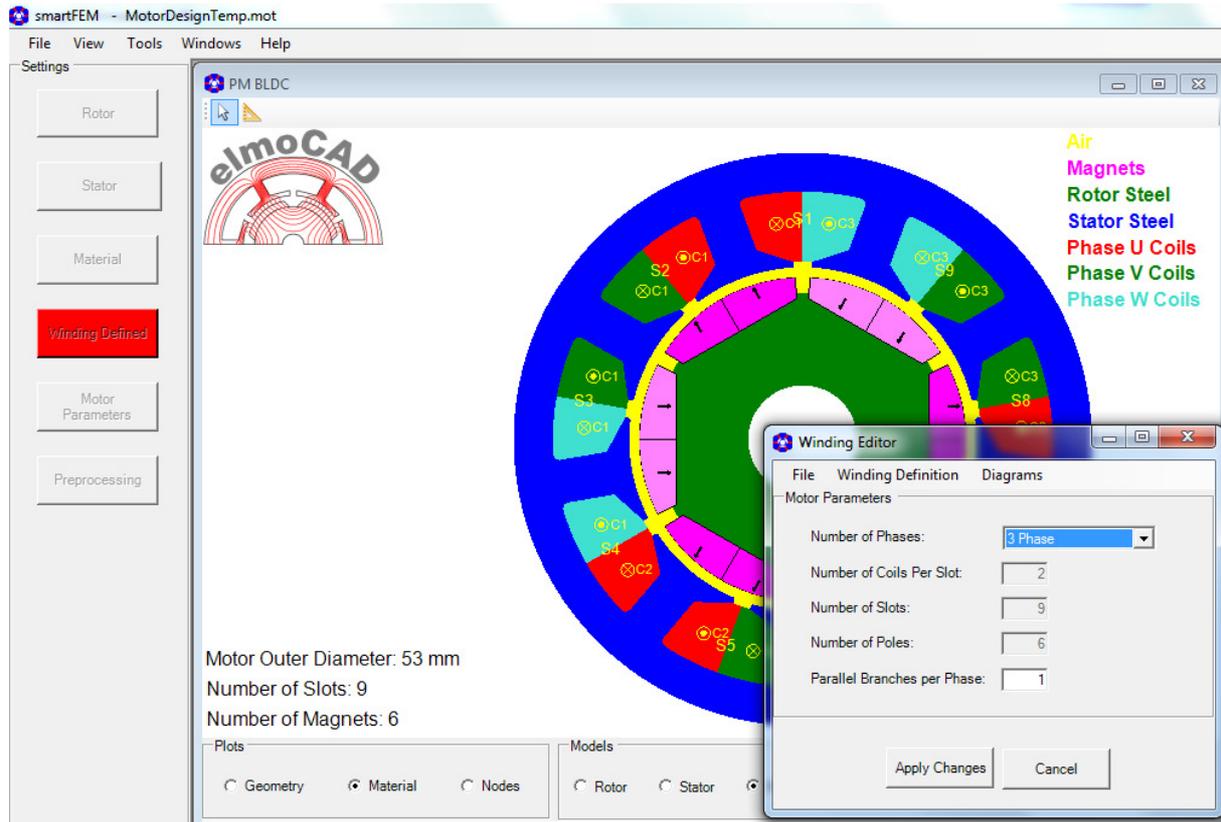


Abb. 70: Wicklungseditor - Aufruf über die smartFEM Schaltfläche „Winding ...“

Die Nummern der Nuten (S..) und der einzelnen Wicklungen (C..) werden inkl. Stromrichtung (in/out) in den Wicklungsflächen angezeigt.

Farben und Größen der Texte und Icons können in „smartFEM Settings – GUI“ eingestellt werden.

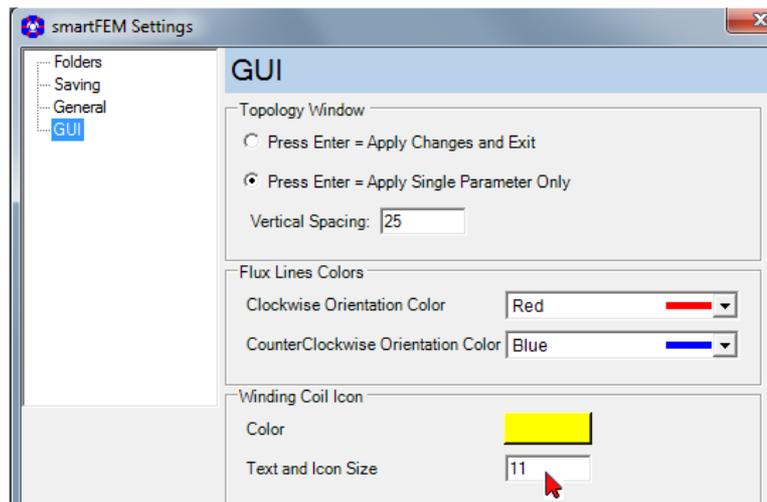


Abb. 71: Wicklungseditor - Icon-/Textfarben und -größen in smartFEM Settings

### 3.5.1 Wicklungsparameter

Über die Schaltflächen „Winding Definition“ → „Coils Parameter“ öffnet sich ein Pop-up-Fenster in dessen Eingabefelder der Drahtdurchmesser, die Windungszahl je Wicklung und je ein additiver Phasenwiderstand und -induktion eingegeben werden können.

Als Leitertyp können „rund“ oder „rechteckig“ ausgewählt werden.

Zusätzlich wird die für die Wicklung verfügbare Nutfläche je Nut und der Füllfaktor angezeigt. Der Füllfaktor berechnet sich aus:

$$\text{Fill Factor} = \text{Number Of Turns per Coil} * \frac{\text{Conductor Area}}{\text{Slot Area}}$$

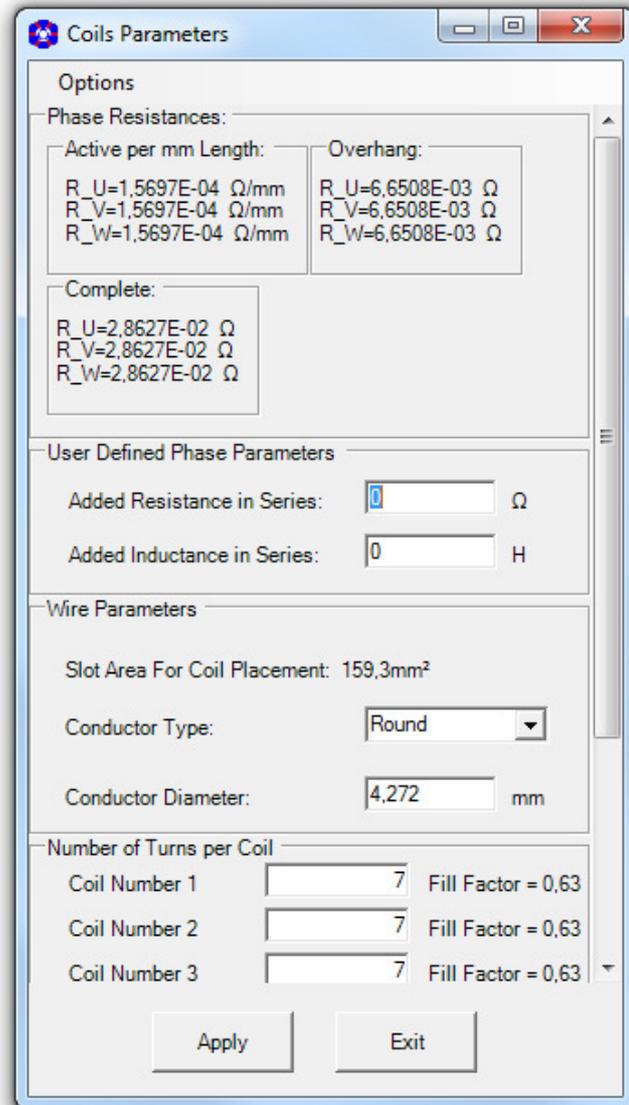


Abb. 72: Wicklungseditor - Coils Parameters

Mit Options wird ein weiteres Menü aufgeblendet. Es stehen dann Funktionen zur Angabe der Windungszahl, Berechnung der Anzahl Windungen bei einem vorgebbaren Füllfaktor und Berechnung des Leiterquerschnitts bei vorgebaren Werten für Füllfaktor und Windungszahl zur Verfügung.

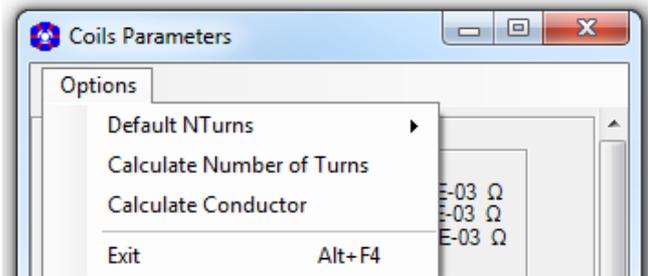


Abb. 73: Wicklungseditor - Coils Parameter - Options

### 3.5.2 Wickelschema

Über die Schaltflächen „Winding Definition“→“Winding Scheme“ kann das Wicklungsschema in einer Liste bearbeitet werden. Zur Unterstützung wird der gesamte Motor als Grafik angezeigt. Sofern ein zulässiges Wicklungsschema existiert, wird dieses als „Auto Winding“ angezeigt, wobei die Nuten entsprechend den Phasen farblich gestaltet sind. Die zu einem Eingabefeld gehörende Nutfläche, in der sich der Cursor befindet, wird in gelber Farbe dargestellt. Mit „Auto Winding“ wird das Wicklungsschema erzeugt, bei dem die maximale Spannung induziert wird.

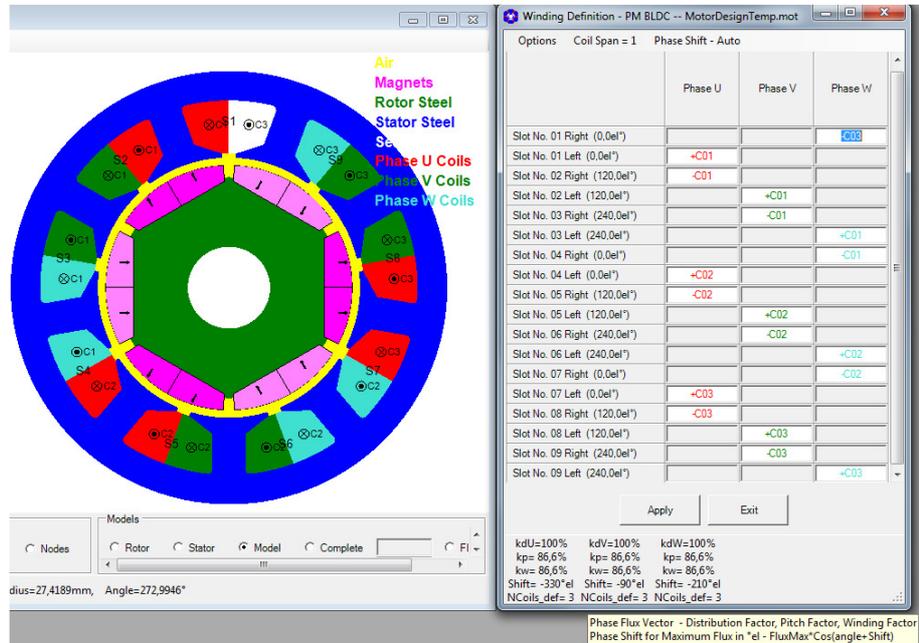


Abb. 74: Wicklungseditor - Wicklungsschema „Zwei-Schicht-Bruchlochwicklung“ mit Anzeige der Werte für Amplitude Flux Vector, Distribution-, Pitch und Winding-Faktor

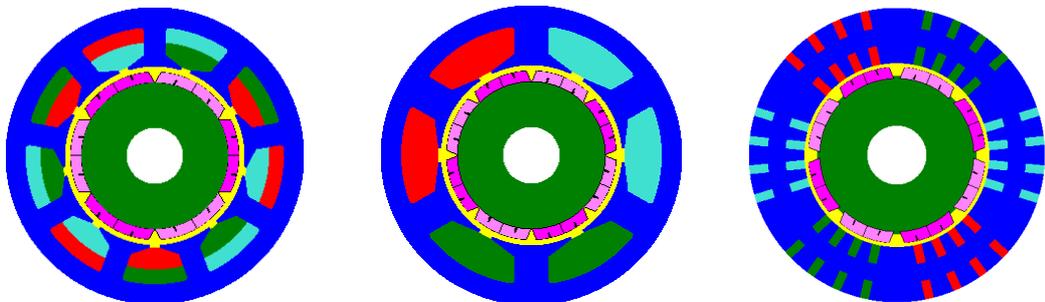


Abb. 75: „Zwei-Schicht-Bruchlochwicklung Ober-/Unterlage“ „Ein-Schicht-Wicklung“ „Ringwicklung“

„Options“:

- „Default Winding“: es wird wieder das Wicklungsschema angezeigt, mit dem das Fenster geöffnet wurde.
- „Auto Winding“: es wird automatisch das Wicklungsschema mit der maximalen BEMF ermittelt und angezeigt.
- „Symmetric Winding“: die Eingaben für die Phase U werden automatisch in die Phasen V und W mit einem Versatz von +120° el. übertragen.
- „Clear All“: das Wickelschema wird gelöscht und kann anschließend durch den Benutzer neu definiert werden. Durch Klick in ein Eingabefeld der Liste werden die noch nicht festgelegten Wicklungen angezeigt und können ausgewählt werden. Die entsprechende Nutfläche wird anschließend in der Farbe der jeweiligen Phase gefüllt.

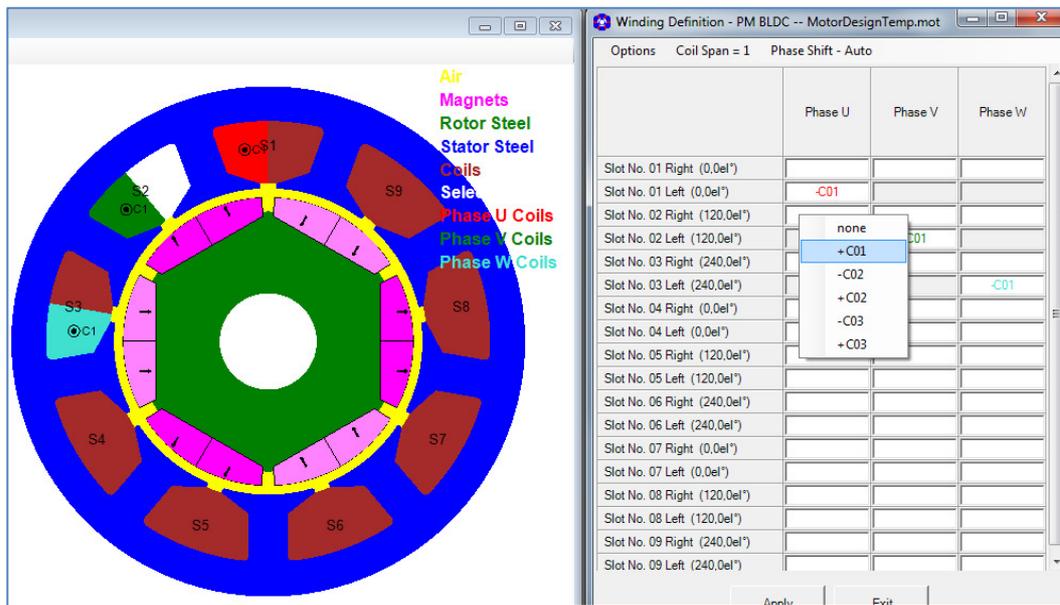


Abb. 76: Wicklungseditor - benutzerspezifische Definition des Wicklungsschemas

Ein von einem Benutzer definiertes Wicklungsschema wird durch „Apply“ übernommen. Die gesamte Wicklungsdefinition kann mit „File“→„Save Winding Definition“ in einer Datei gespeichert werden und später auch in anderen Motormodellen mit „File“→„Open Winding Definition“ verwendet werden.

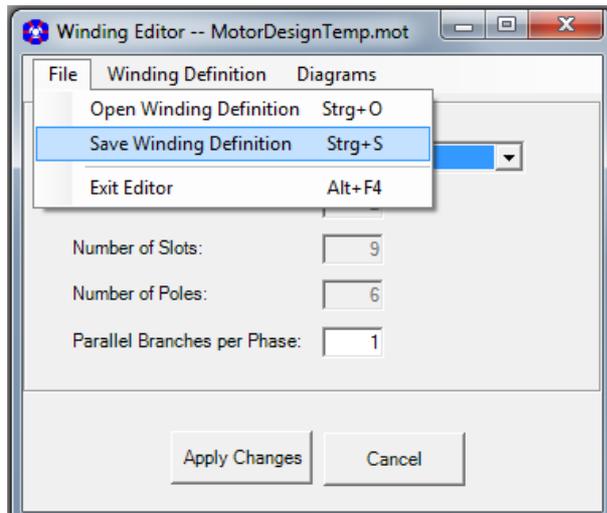


Abb. 77: Wicklungseditor - Speichern bzw. Laden einer Wicklungsdefinition

Der Wicklungseditor wird mit „Apply Changes“ verlassen, sofern die Wicklungsdefinition für das aktuelle Motormodell übernommen werden soll. Soll das aktuelle Motordesign nicht verändert werden, muss der Wicklungseditor über „Cancel“ verlassen werden.

### 3.5.3 Phasendiagramm

Über das Menü „Diagrams“ werden die Vektoren der Phasen und Wicklungen dargestellt. Damit kann der Benutzer auf einfache Weise das Wickelschema auf Fehler überprüfen.

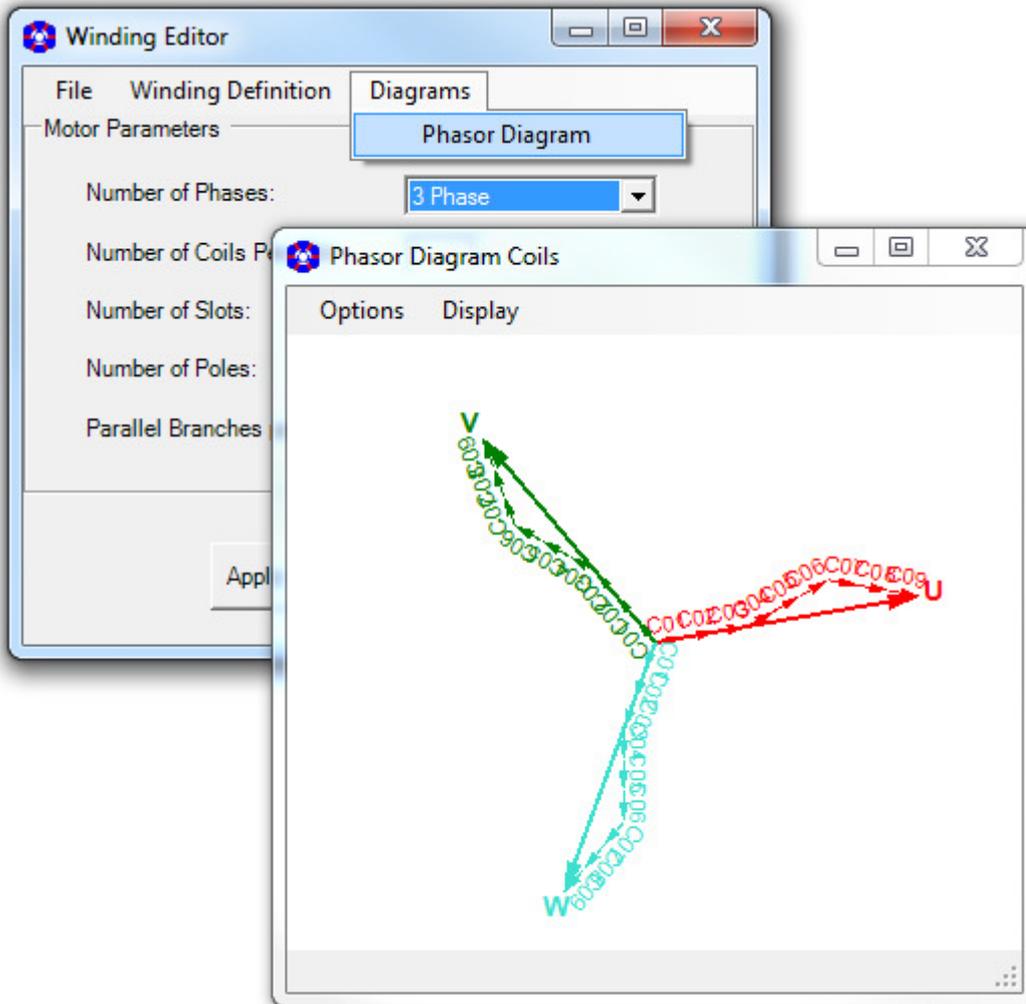


Abb. 78: Winding Editor - Phasendiagramm

### 3.6 Motorparameter und Berechnungen

Je nach durchzuführenden Simulationen und Berechnungen müssen verschiedene Motorparameter angegeben werden.

Alle Simulationen des Motors erfolgen rotorpositionsspezifisch, d.h. ausgehend von der grafisch dargestellten 0°-Normallage des Rotors wird der Rotor nach jedem Rechnungslauf um einen bestimmten Winkel gegen den Uhrzeigersinn gedreht, um dann die nächste Simulation durchzuführen. Vom Anwender können die Anzahl Rechenschritte und die Rechengenauigkeit als Abbruchbedingung vorgegeben werden.

Die Berechnungen werden über die Schaltfläche „Calculation“ ausgelöst. Bei Klick mit der rechten Maustaste auf die Schaltfläche können verschiedene Einstellungen entsprechend der Schaltfläche „Preprocessing“ vorgenommen werden.

#### 3.6.1 Basis der Ergebnisberechnungen

Basis für die Berechnung der Ergebnisse ist das einphasige Ersatzschaltbild eines Synchronmotors.

Bei dem ausgewiesenen Drehmoment „Torque With Applied Current“ handelt es sich um das „innere“ Drehmoment, da Eisen-, Magnet- und sonstigen Verluste die zu einer Reduzierung des Drehmoments an der Welle führen nicht berücksichtigt sind. Diese Verluste können für die gegebene Drehzahl über die Formel  $P = T \cdot \omega$  als Drehmomentverlust berechnet und in „Torque After Losses“ berücksichtigt werden.

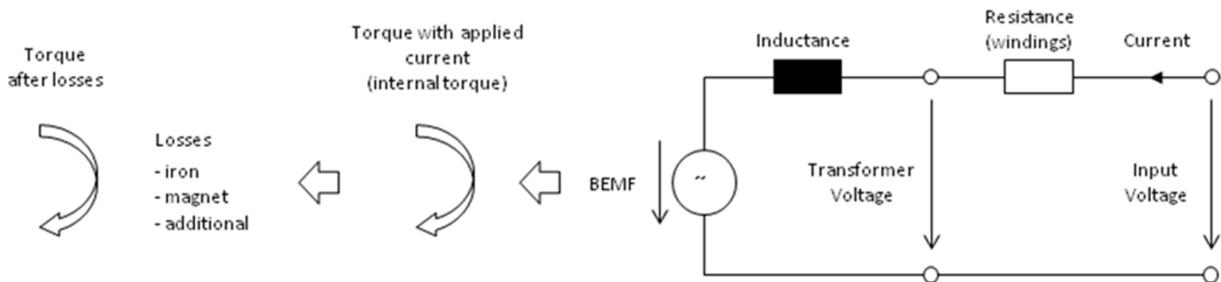


Abb. 79: Ersatzschaltbild Synchronmotor

In „Results“ wird unter dem Reiter „Overview“ eine Übersicht der verschiedenen Ergebnisparameter (z.B. Verluste, inneres/äußeres Drehmoment, Wirkleistung, Scheinleistung,  $\cos\phi$ , Wirkungsgrad, etc.) ausgegeben. Verluste werden nur dann berücksichtigt, wenn sie vorher berechnet wurden.

Speed [rpm]	PcoreR [W]	PcoreS [W]	Pmag[W]	Pex[W]	Pwdg[W]	Plosses [W]	Tout[Nm]
0	0	0	0	0	23,38506	23,38506	1,05070
500,0	,1352E-01	1,73750	,1815E-02	0	23,38506	25,13789	1,01722
1000,0	,3204E-01	4,47056	,7258E-02	0	23,38506	27,89492	1,00763
1500,0	,6714E-01	8,19396	,1633E-01	0	23,38506	31,66248	0,99800
2000,0	0,11183	12,86580	,2903E-01	0	23,38506	36,39172	0,98860
2500,0	0,16200	18,03782	,4536E-01	0	23,38506	41,63025	0,98101
3000,0	0,23470	23,90816	,6532E-01	0	23,38506	47,59324	0,97364
3500,0	0,32028	30,45571	,8891E-01	0	23,38506	54,24996	0,96649

Abb. 80: Ergebnisparameter als "Overview"-Tabelle

### 3.6.2 Cogging Torque und BEMF

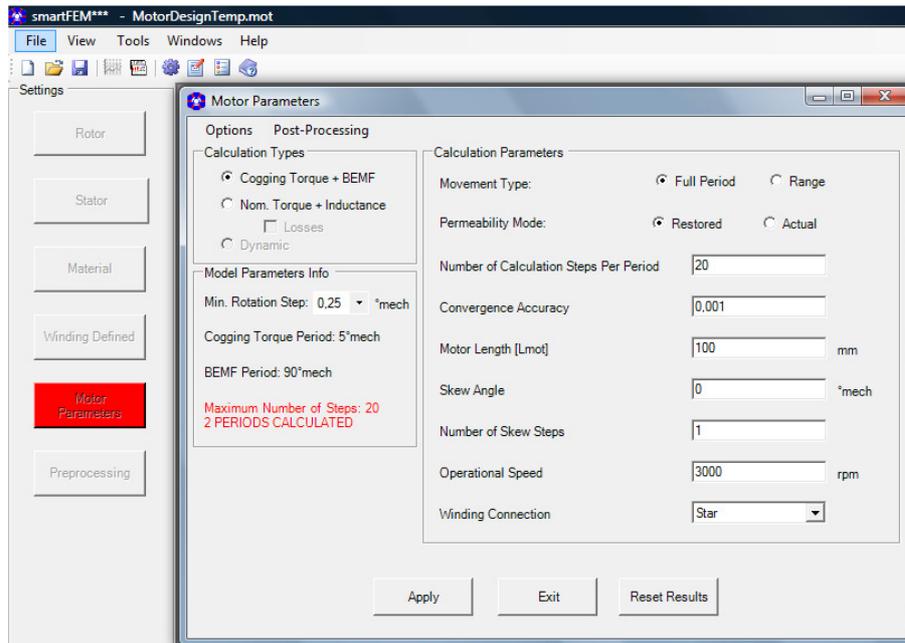


Abb. 81: Motor Parameters - Cogging Torque + BEMF

#### Model Parameters Info

- *Minimum Rotation Step  $x^\circ$  mech*  
Minimaler Drehwinkelschritt des Rotors in  $^\circ$ mech. Dies entspricht gleichzeitig dem Knotenwinkel im mittleren Luftspaltlayer zwischen Rotor und Stator. Über die Selection Box können in andere Werte ausgewählt werden. Die Einstellung sollte so erfolgen, dass sich möglichst quadratische Netzelemente im mittleren Luftspaltlayer ergeben, um eine hohe Genauigkeit der Kraft- bzw. Drehmomentberechnungen zu gewährleisten. Wenn in „smartFEM Settings - General“ die manuelle Eingabe von „Min. Rotation Steps“ freigegeben wurde, kann auch eine beliebige benutzerdefinierte Schrittweite angegeben werden.
- *Cogging Torque Period  $x^\circ$  mech*  
Rastmomentperiode in  $^\circ$ mech.
- *BEMF Period  $x^\circ$  mech*  
Periode der induzierten Spannung in  $^\circ$ mech.
- *Maximum Number Of Steps  $x$*   
Maximale Anzahl der Berechnungsschritte je Periode. Es werden 2 Perioden gerechnet.

#### Calculation Parameter

- *„Movement Type“*  
Es kann zwischen der Berechnung über die gesamte Periode oder einen Teilbereich der Periode gewählt werden. Bei Angabe eines Teilbereiches werden nur Cogging Torque und Flux berechnet.
- *„Permeability Mode“*  
Hiermit werden die Berechnungen in FEMAG gesteuert. Bei Auswahl von „Restored“ werden die Berechnungen bei jedem Schrittwinkel mit wischenschrittergebnis „Null“ gestartet. Bei „Actual“ wird mit dem Ergebnis der vorangegangenen Schrittwinkels gestartet. Dies hat einen Einfluss auf die Anzahl Iterationen und ggfs. auch auf die Genauigkeit der Rechenergebnisse. Das muss vom Anwender individuell bewertet und gewählt werden. „Restored“ ergibt auf alle

Fälle sehr gute Ergebnisse, benötigt aber u.U. erheblich mehr Iterationen und damit Rechenzeit.

- *“Number of Calculation Steps per period“*  
Die Berechnung von Cogging Torque + BEMF erfolgt über zwei Cogging Torque Perioden. Die Vorgabe des minimalen Rotordrehwinkels erfolgt in Abhängigkeit der Periodenlänge, um die Rechenzeiten in einer zur Genauigkeit des Kurvenverlaufs vertretbaren Größe zu halten.
- *„Convervation Accuracy“*  
Abbruchbedingung für die Berechnungsgenauigkeit der Permeabilitätsänderungen in FEMAG.
- *„Motor Length“*  
Motorlänge ohne Überhänge = Länge des Luftspalts (siehe auch *„3.2.4 Relative Length“*)
- *„Skewing“*  
Hiermit werden die Auswirkungen einer Optimierung mittels Schrägung von Rotor oder Stator berechnet. Angegeben werden der Gesamtwinkel der Schrägung und die Anzahl der Schrägungsschritte:

Skew Angle                    0 = keine Schrägung  
                                      n = Schrägung in °mech über die gesamte Motorlänge

Number Of Skew Steps    0 = keine Schrägung  
                                      1 = kontinuierliche Schrägung über den angegebenen Winkel  
                                      n = Anzahl gegeneinander versetzter Blechpakete,  
    das 1. Blechpaket befindet sich immer in der Position 0°mech !

Beispiel:

Skew Angle = 15 °mech

Number of Skew Steps = 4

Winkelversatz der Blechpakete zueinander =  $15 \text{ °mech} / (4-1) = 5 \text{ °mech}$

- *Operational Speed*  
Nenn Drehzahl des Motors in Umdrehungen pro Minute.
- *Winding Connection*  
Wicklungsschaltung „Stern“ bzw. „Dreieck“.

### **„Apply, Exit, Reset Results“**

Mit *„Reset Results“* werden vorherige berechnete Ergebnisse gelöscht, mit *„Apply“* werden die eingegebenen Daten übernommen und das Fenster geschlossen, mit *„Exit“* wird das Fenster geschlossen ohne dass die eingegebenen Daten zu übernommen werden.

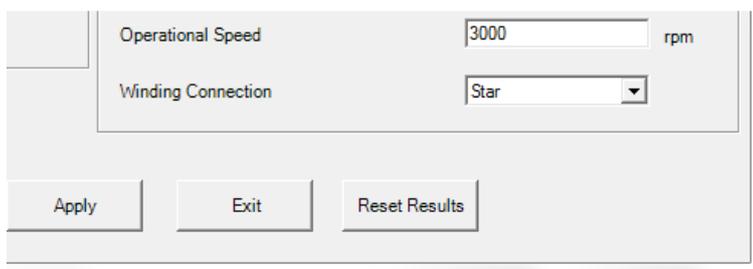


Abb. 82: "Apply, Exit" Motor Parameters

Sofern das Preprocessing bereits durchgeführt wurde, kann nun die Berechnung mit Betätigung der Schaltfläche *„Calculation“* gestartet werden.

Die Berechnungsergebnisse werden als Grafiken dargestellt. Sowohl Grafiken als auch die numerischen Ergebniswerte können über den Zwischenspeicher in andere Anwendungen kopiert werden.

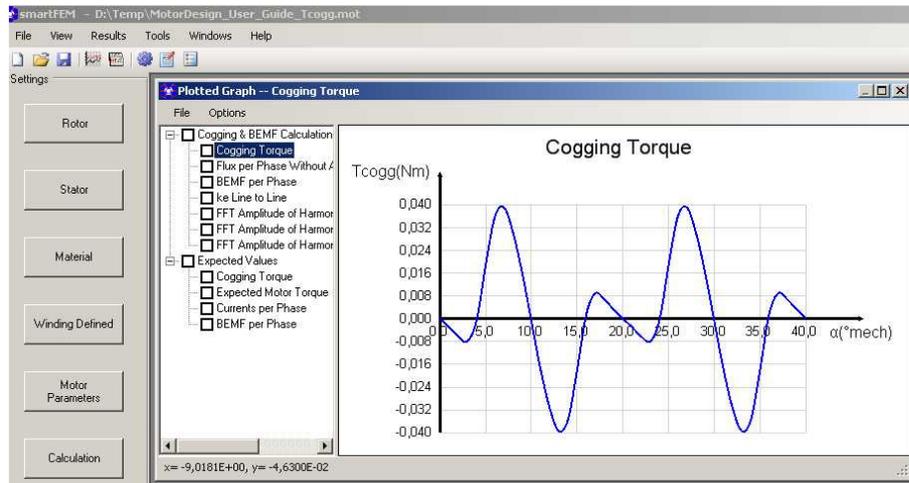


Abb. 83: Results - Ergebnisse Cogging Torque

Übersicht aller der nach einer „Cogging Torque + BEMF Calculation“ als Graphen darstellbaren Ergebnisse:

- Cogging & BEMF Calculation
  - Cogging Torque
  - FFT Amplitude of Harmonics for Cogging Torque
  - Flux per Phase Without Applied Current
  - FFT Amplitude of Harmonics for Flux of Phase U
  - BEMF per Phase
  - FFT Amplitude of Harmonics for BEMF of Phase U
  - BEMF Line to Line
  - FFT Amplitude of BEMF Line to Line UV
  - ke Line to Line
- Nominal Torque & Inductance Calculation
- Dynamic Calculation
- Expected Values

Da smartFEM den Fluss je Nut und Rotorposition ermittelt und speichert, werden bei Änderungen von Wickelschema, Motorlänge, Skew Angle, Skew Steps und Speed die Ergebnisse ohne weitere FEM-Rechnung ermittelt und unmittelbar nach Eingabe der geänderten Parameter dargestellt.



Abb. 84: Beispiel für Beeinflussung der BEMF durch Schrägung

### 3.6.3 Expected Values

Um eine schnelle Voraussage des zu erwartenden Drehmoments treffen zu können, wird das Drehmoment analytisch auf Basis der zuvor mittels FEM berechneten BEMF als „Expected Value“ ermittelt und angezeigt.

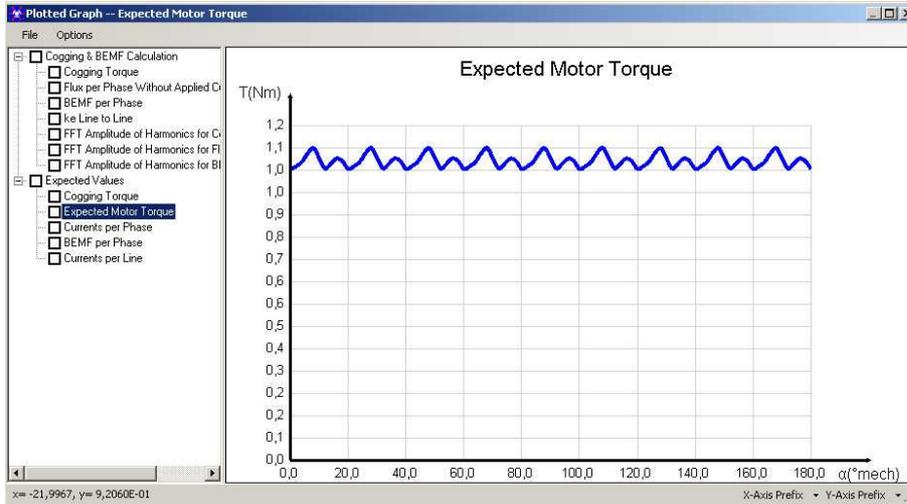


Abb. 85: Results - Expected Values

Die Berechnung erfolgt je nach Auswahl mit konstantem Strangstrom, sinusförmigem Strangstrom, trapezförmigem oder benutzerspezifischem Phasenstrom. Die Auswahl kann in dem Menue „Nominal Torque + Inductance Calculation“ „Coil Excitation - Current Parameters“ getroffen werden. Da keine zusätzliche FEM-Berechnung notwendig ist, werden die Ergebnisse unmittelbar angezeigt.

Übersicht aller der nach einer „Cogging Torque + BEMF Calculation“ unter „Expected Values“ als Graphen darstellbaren Ergebnisse:

- Cogging & BEMF Calculation
- Nominal Torque & Inductance Calculation
- Dynamic Calculation
- Expected Values
  - Expected Motor Torque
  - Cogging Torque
  - Currents per Phase
  - Currents per Line
  - BEMF per Phase

### 3.6.4 Nominal Torque + Inductance

Die Berechnung des Nominal Torque erfolgt in der Weise, dass in jeder Rotorposition die Drehmomente in unbestromten und in bestromten Zustand mittels FEM berechnet werden. Anschließend wird das Nominal Torque durch Differenzbildung ermittelt. Die Einstellung der Berechnungsparameter erfolgt in „Motor Parameters“.

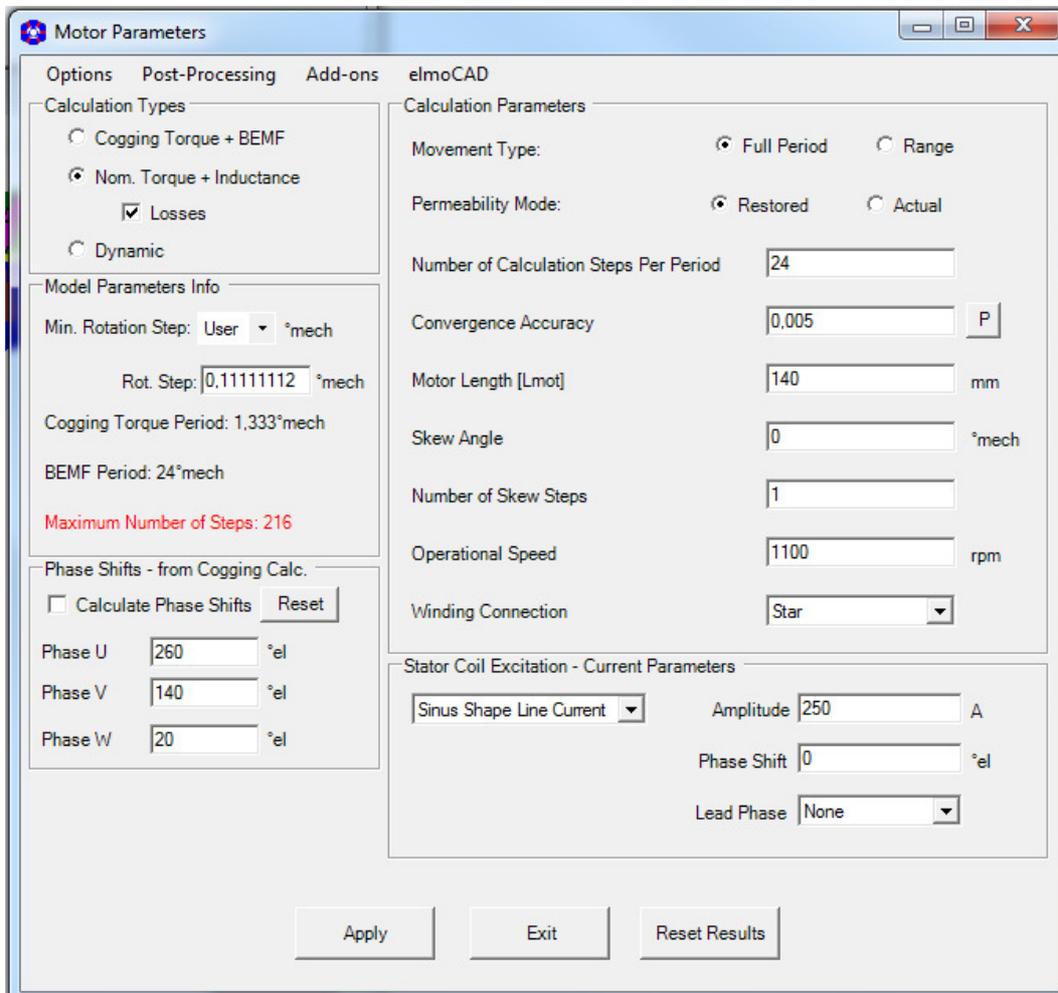


Abb. 86: Motor Parameters - Nominal Torque + Inductance

#### 3.6.4.1 Model Parameters Info

- *Minimum Rotation Step  $x^\circ\text{mech}$*   
Minimaler Drehwinkelschritt des Rotors in  $^\circ\text{mech}$ . (entsprechend 3.6.2)
- *Cogging Torque Period  $x^\circ\text{mech}$*   
Rastmomentperiode in  $^\circ\text{mech}$ .
- *BEMF Period  $x^\circ\text{mech}$*   
Periode der induzierten Spannung in  $^\circ\text{mech}$ .
- *Maximum Number Of Steps  $x$*   
Maximale Anzahl der Berechnungsschritte.

### 3.6.4.2 Phase Shifts

- from Cogging Torque + BEMF Calculation
- from Nominal Torque + Inductance Calculation

- Bei Durchführung der „Cogging Torque + BEMF Calculation“ werden auch die Phasenlagen zwischen den einzelnen Wicklungen ermittelt, die dann bei Auswahl der „Nominal Torque + Inductance Calculation“ angezeigt werden.
- Bei Auswahl der „Nominal Torque + Inductance Calculation“ werden die Phasenlagen angezeigt, sofern vorher eine „Cogging Torque + BEMF Calculation“ durchgeführt wurde.

Wenn keine „Cogging Torque + BEMF Calculation“ durchgeführt wurde, wird „Phase Shifts: Not Defined“ angezeigt.

Ist der Haken „Calculate Phase Shifts“ gesetzt, werden vor der Nominal Torque Rechnung automatisch die Phasenlagen neu berechnet.

Dazu wird für jede Phase eine Drehmomentberechnung mit Konstantstrom vorgenommen. Die Winkel (°el) der Maxima der Drehmomente entsprechen den Lagen der jeweiligen Phase. Anschließend wird die eigentliche „Nominal Torque + Inductance“ Berechnung durchgeführt.

- Bei den Maschinentypen „Switched Reluctance“ und „Universal Motor“ wird „Phase U/V/W: not defined“ angezeigt. Da diese Maschinentypen keine Magnete besitzen, kann auch keine BEMF und damit auch nicht die Phasenlagen der Wicklungen berechnet werden. Diese werden dann vor Durchführung der eigentlichen Drehmomentberechnung wie vorher beschrieben ermittelt. (Siehe auch 6.3 Switched Reluctance Motor)

### 3.6.4.3 Calculation Parameters

- *“Movement Type”*  
Es kann zwischen der Berechnung über die gesamte Periode oder einen Teilbereich der Periode gewählt werden.
- *„Permeability Mode“*  
Hiermit werden die Berechnungen in FEMAG gesteuert. Bei Auswahl von „Restored“ werden die Berechnungen bei jedem Schrittwinkel mit Zwischenschrittergebnis „Null“ gestartet. Bei „Actual“ wird mit dem Ergebnis der vorangegangenen Schrittwinkels gestartet. Dies hat einen Einfluss auf die Anzahl Iterationen und ggfs. auch auf die Genauigkeit der Rechenergebnisse. Das muss vom Anwender individuell bewertet und gewählt werden. „Restored“ ergibt auf alle Fälle sehr gute Ergebnisse, benötigt aber u.U. erheblich mehr Iterationen und damit Rechenzeit.
- *“Number of Calculation Steps per period”*  
Die Berechnung von Cogging Torque + BEMF erfolgt über zwei Cogging Torque Perioden. Die Vorgabe des minimalen Rotordrehwinkels erfolgt in Abhängigkeit der Periodenlänge, um die Rechenzeiten in einem zur Genauigkeit des Kurvenverlaufs vertretbaren Größe zu halten.
- *„Convergence Accuracy“*  
Abbruchbedingung für die Berechnungsgenauigkeit der Permeabilitätsänderungen in FEMAG.
- *„Motor Length“*  
Aktive axiale Luftspaltlänge

- „Skewing“  
Hiermit werden die Auswirkungen einer Optimierung mittels Schrägung von Rotor oder Stator berechnet. Angegeben wird der Gesamtwinkel der Schrägung und die Anzahl der Schrägungsschritte:

Skew Angle	0 = keine Schrägung n = Schrägung in °mech über die gesamte Motorlänge
Number Of Skew Steps	0 = keine Schrägung 1 = kontinuierliche Schrägung über den angegebenen Winkel n = Anzahl der Blechpakete, das 1. Blechpaket befindet sich immer in der Position 0 °mech!

Beispiel:

Skew Angle = 15 °mech  
Number Of Skew Steps = 4  
Winkelversatz der Bleche zueinander =  $15 \text{ °mech} / (4-1) = 5 \text{ °mech}$

**Achtung:** in der aktuellen smartFEM Version werden die Nominal Torque Berechnung und die Verlustberechnung nur für Skew Angle = 0° durchgeführt !

- „Operational Speed“  
Nenn Drehzahl des Motors in Umdrehungen pro Minute.
- „Winding Connection“  
Wicklungsschaltung „Stern“ bzw. „Dreieck“.

### 3.6.4.3.1 Skewing bzw. Rotor-/Statorschrägung

Die Schrägung der Rotorpole bzw. Statorzähne um eine Polteilung ist ein probates Mittel um Rastmomente und die Harmonischen der induzierten Phasenspannungen zu minimieren.

Neben der kontinuierlichen Schrägung kann z.B. der Rotor auch aus mehreren Scheiben in axialer Richtung aufgebaut werden (diskrete Schrägung):

- Dabei werden die einzelnen Scheiben gegeneinander um einen Winkel = Schrägungswinkel/Anzahl Scheiben verdreht.
- Die Schrägung mit unendlich vielen unendlich dünnen Scheiben entspricht dann der kontinuierlichen Schrägung.

Die Auswirkungen der Schrägung auf Rastmomente, etc. kann einfach in einem Excel-Tabellenblatt durch Superposition ermittelt werden.

In smartFEM werden die Ergebnisse nach Eingabe von Schrägungswinkel und Anzahl Scheiben (Anzahl Schritte) direkt angezeigt. Für kontinuierliche Schrägung ist die Anzahl Schritte = 1 einzugeben.

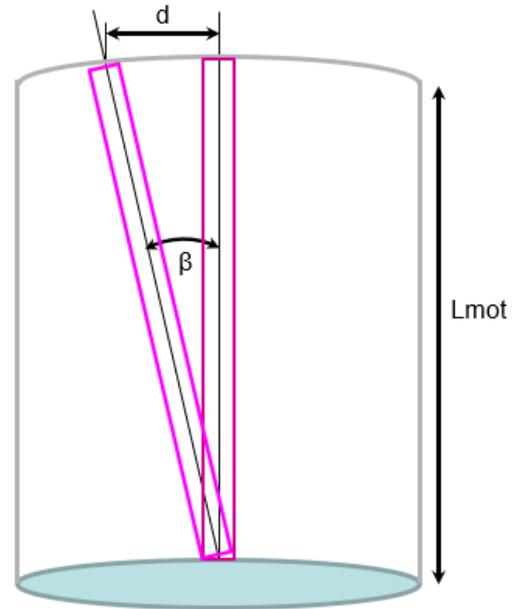
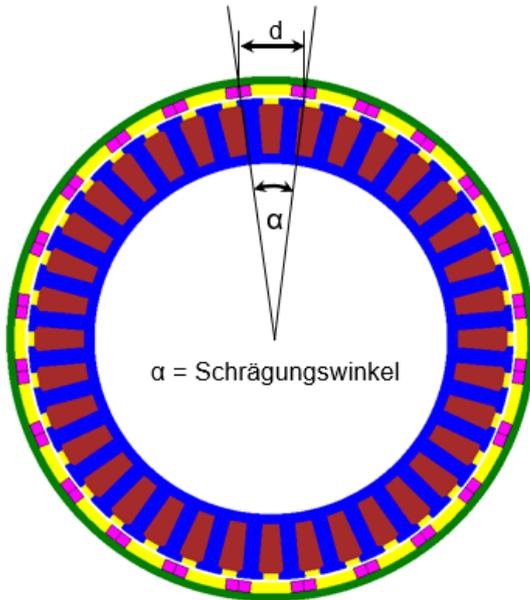
Definition:

$d = \alpha [^\circ\text{mech}] / 360^\circ * 2 * \text{Pi} * r_{\text{magnet}}$   
 = Abstand der Mittelpunkte der Magnetflächen vorne und hinten

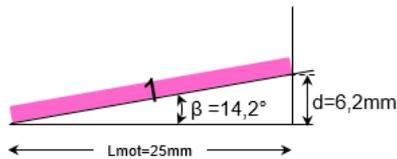
Beispiel:  
 $d = 5^\circ / 360 * 2 * \text{Pi} * 71,06\text{mm} = 6,2\text{mm}$

$\beta [^\circ] = d / (2 * \text{Pi} * L_{\text{mot}}) * 360^\circ$

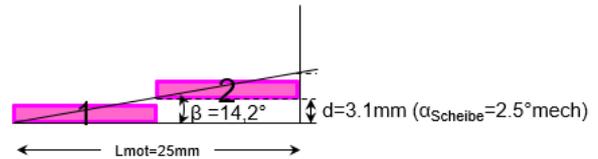
Beispiel:  
 $\beta = 6,2 / (2 * \text{Pi} * 25) * 360 = 14,2^\circ$



Beispiel mit  $\alpha = 5^\circ\text{mech}$   
 kontinuierliche Schrägung



diskretete Schrägung mit 2 Rotorscheiben



Rotor Positions & Skewing

Skew Angle =  $\alpha [^\circ\text{mech}]$   
 Number of Skew Steps = Anzahl der Rotorscheiben (NoSteps)  
 Step Width  $[^\circ\text{mech}]$  = Skew Angle / Number of Skew Steps

Beispiel mit  $\alpha = 5^\circ\text{mech}$

NoSteps	Step Width	Position je Step $[^\circ\text{mech}]$ = Verdrehwinkel je Rotorscheibe
2	$\alpha / 2 = 2,5^\circ\text{mech/step}$ ,	1.step $\alpha=0^\circ$ , 2.step $\alpha=2,5^\circ$
4	$\alpha / 4 = 1,25^\circ\text{mech/step}$ ,	1.step $\alpha=0^\circ$ , 2.step $\alpha=1,25^\circ$ , 3.step $\alpha=2,5^\circ$ , 4.step $\alpha=3,75^\circ$
8	$\alpha / 8 = 0,625^\circ\text{mech/step}$ ,	1.step $\alpha=0^\circ$ , 2.step $\alpha=0,625^\circ$ , 3.step $\alpha=1,25^\circ$ , ..., 8.step $\alpha=4,375^\circ$
16	$\alpha / 16 = 0,3125^\circ\text{mech/step}$ ,	1.step $\alpha=0^\circ$ , 2.step $\alpha=0,3125^\circ$ , 3.step $\alpha=0,625^\circ$ , ..., 16.step $\alpha=4,6875^\circ$
...		

NoSteps  $\gg 16$ steps  $\rightarrow$  kontinuierliche Schrägung, entspricht NoSteps = 1 in smartFEM

### 3.6.4.4 Stator Coil Excitation - Current Parameters

Es können verschiedene Stromkurvenformen eingegeben werden:

- konstanter Strom mit Angabe der Amplitude

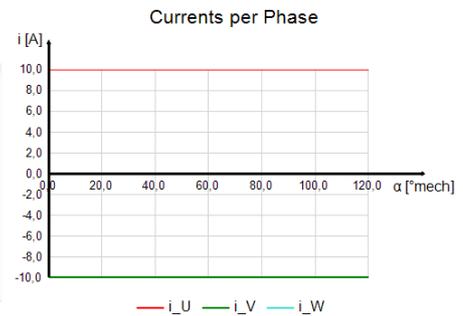
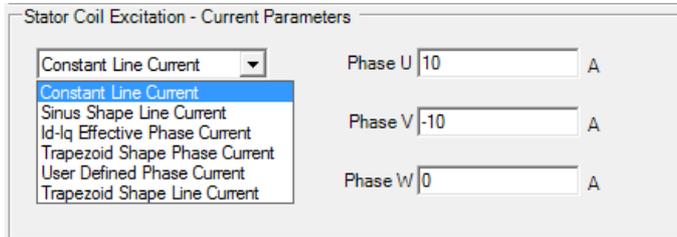


Abb. 87: Stator Coil Excitation - Constant Line Current

Wenn die Schaltfläche „Calculate Phase Shifts“ betätigt wird, wird vor der eigentlichen Nominal Torque Rechnung die Lagen aller Phasen ermittelt.

- sinusförmiger Strom mit Angabe von Amplitude und Phasenverschiebung zwischen Strom und BEMF je Strang:

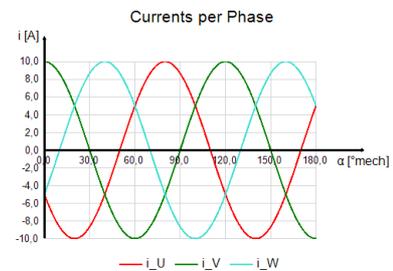
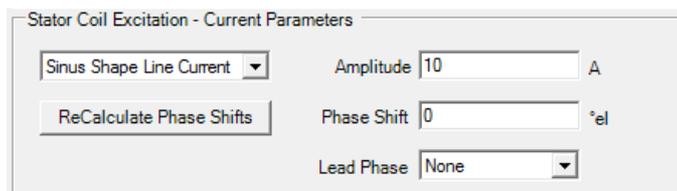


Abb. 88: Stator Coil Excitation - Sinus Shape Line Current

- Id-Iq mit Angabe der Ströme in d- und q-Achse:

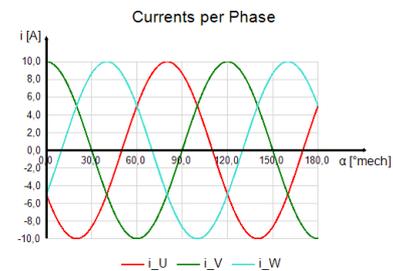
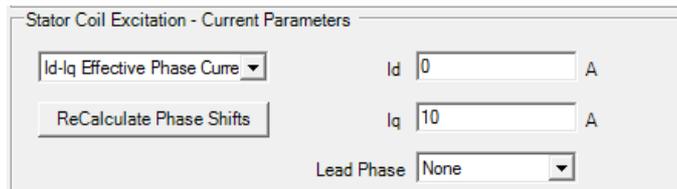


Abb. 89: Stator Coil Excitation - Id-Iq Effective Phase Current

- trapezförmige Kurvenform der Phasenströme mit Angabe von Amplitude, Phasenverschiebung und Funktionsbreite. Die Funktionsbreite ist der Bereich, in dem die Amplitude 100% beträgt. Dazwischen werden Flanken mit linearem An- bzw. Abstieg dargestellt:

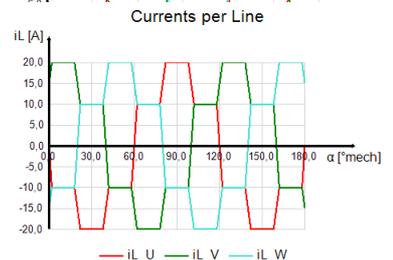
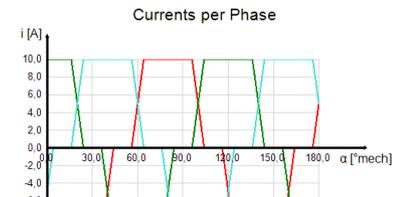
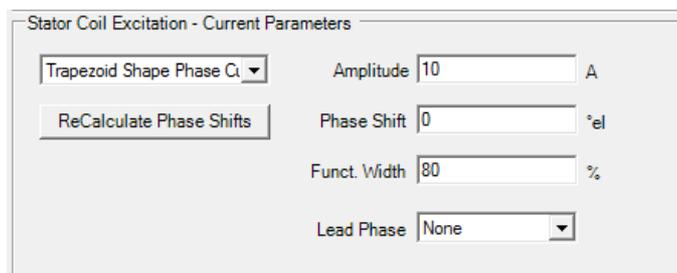


Abb. 90: Stator Coil Excitation - Trapezoid Shape Phase Current

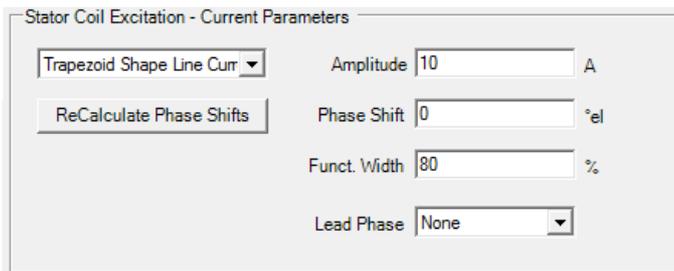
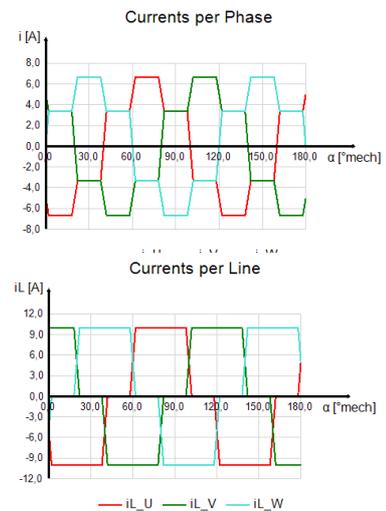


Abb. 91: Stator Coil Excitation - Trapeziod Shape Line Current



- „Lead Phase“

Für den Fall, dass sich aus Geometrie und/oder Wickelschema nicht symmetrische Phasenströme bzw. Phasenlagen der BEMF ergeben, die eine Phasenverschiebung ungleich  $360^\circ/\text{Gesamtanzahl\_Phasen}$  aufweisen. Kann eine Phase als Lead bzw. führend festgelegt werden. Die Ströme der anderen Phasen werden dann automatisch so definiert, dass sich eine gleiche Phasenverschiebung zwischen allen Strömen ergibt. Dies ist notwendig, um das Verhalten von gebräuchlichen Steuerungen zu simulieren, die keine unsymmetrischen Phasenverschiebungen erzeugen können.

Für den Fall, dass keine Lead Phase ausgewählt wird, werden die Phasenverschiebungen zwischen den Phasenströmen so definiert, wie sie sich aus der unsymmetrischen BEMF ergeben.

- benutzerspezifische Kurvenformen der Phasenströme:

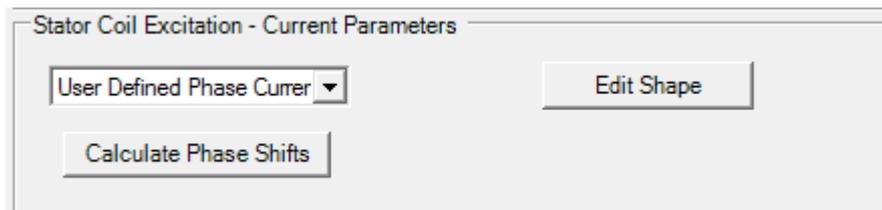


Abb. 92: Stator Coil Excitation - User Defined Phase Current

Über die Schaltfläche „Edit Shape“ können die entsprechenden Einstellungen vorgenommen werden. Als Default wird eine Tabelle mit sinusförmigem Stromverlauf angelegt.

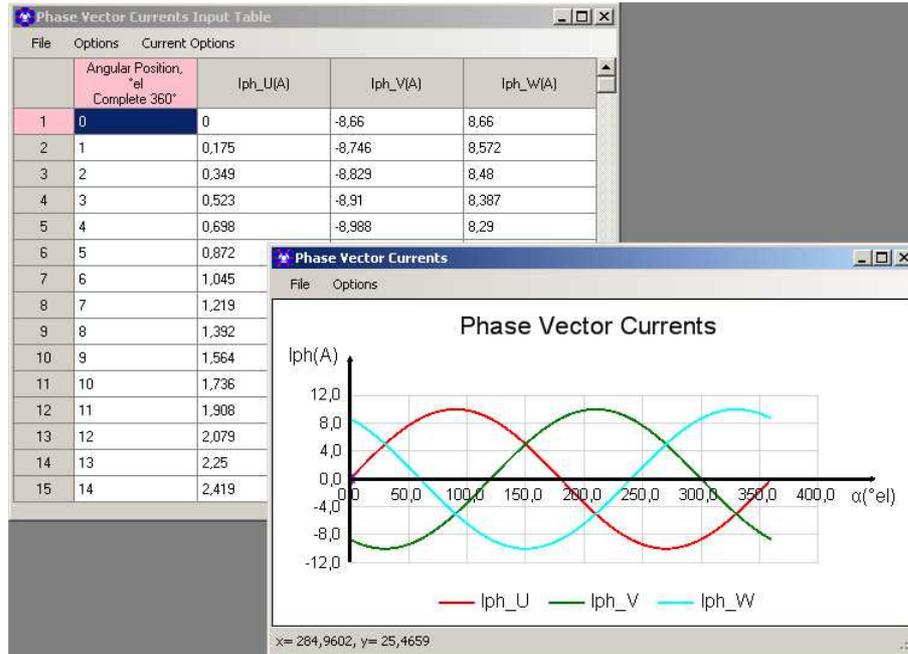


Abb. 93: Stator Coil Excitation - Phase Vector Currents Input Table

Der Benutzer kann die in der Tabelle enthaltenen Werte direkt verändern, Einstellungen über "Options" vornehmen oder mit Copy und Paste eine in einem anderen Tool erstellten Wertetabelle übernehmen.

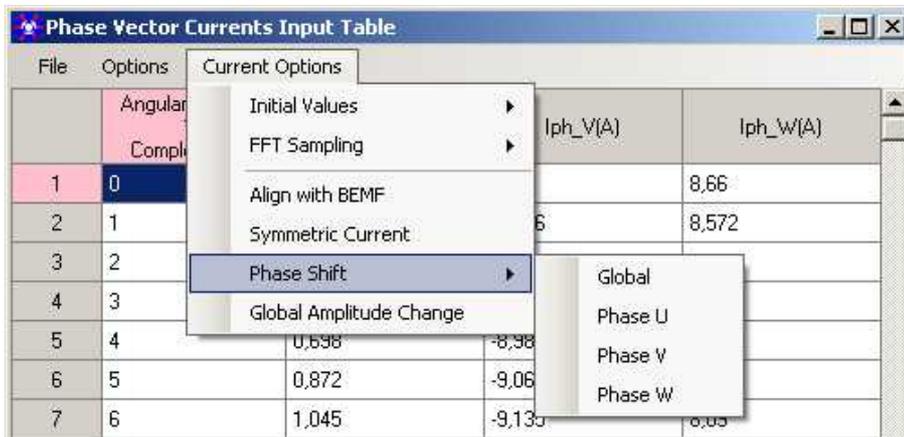


Abb. 94: Phase Vector Currents Input Table - Current Options

Mit "Current Options" sind folgende Einstellungen möglich:

- „Initial Values“: Speichern oder Laden der gespeicherten Wertetabelle
- „FFT Sampling“: Abtastrate für die Fourierzerlegung, Default = 1.000
- „Align with BEMF“: Einstellung der Phasenlagen der Stromkurvenformen entsprechend der BEMF je Phase
- „Symmetric Current“: In Phase U eingegeben Stromwerte werden in die anderen Phasen mit einer Phasenverschiebung von 120° und 240° kopiert.
- „Phase Shift“: Es kann eine Phasenverschiebung für alle oder jede Phase einzeln eingegeben werden.

„Global Amplitude Change“: Die Amplituden werden mit dem eingegebenen Faktor multipliziert.

**„Apply, Exit, Reset Results“**

Mit „Reset Results“ werden vorherige berechnete Ergebnisse gelöscht, mit „Apply“ werden die eingegebenen Daten übernommen und das Fenster geschlossen, mit „Exit“ wird das Fenster geschlossen ohne dass die eingegebenen Daten zu übernehmen werden.

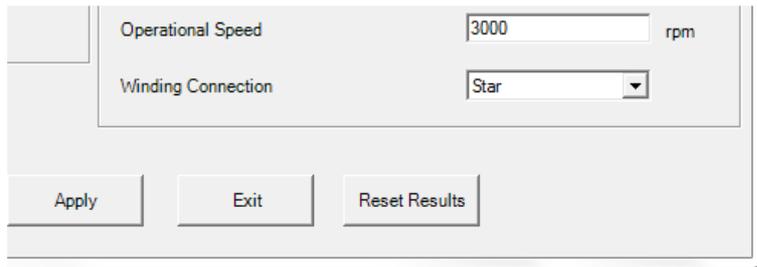


Abb. 95: "Apply, Exit, Reset Results" Motor Parameters

### 3.6.5 Calculation

Sofern das „Preprocessing“ bereits durchgeführt wurde, kann nun die Berechnung mit Betätigung der Schaltfläche „Calculation“ gestartet werden. Nach deren Durchführung können unterschiedliche Graphen dargestellt werden:

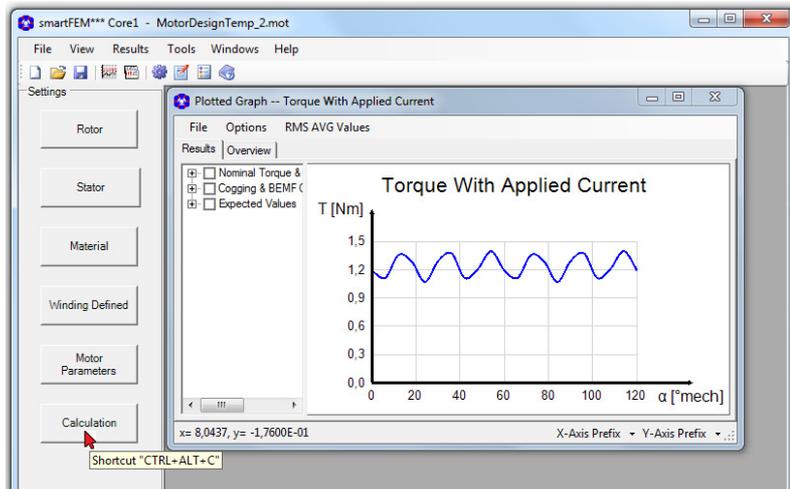


Abb. 96: Ergebnisdarstellung Nominal Torque mit sinusförmigem Strom

Übersicht aller der nach einer „Nominal Torque + Inductance Calculation“ als Graphen darstellbaren Ergebnisse:

- Cogging & BEMF Calculation
- Nominal Torque & Inductance Calculation
  - Torque With Applied Current
  - Cogging Torque
  - Force Vertical No Current
  - Reconstructed Cogging Torque
  - Currents per Phase
  - Currents per Line
  - Flux per Phase Without Applied Current
  - FFT Amplitude of Harmonics for Flux Without Current of Phase U
  - Flux per Phase With Applied Current
  - FFT Amplitude of Harmonics for Flux With Current of Phase U
  - Inductance per Phase
  - BEMF per Phase
  - FFT Amplitude of Harmonics for BEMF of Phase U
  - BEMF Line to Line
  - FFT Amplitude of BEMF Line to Line UV
  - $k_e k_t$  Line to Line
  - Input Voltage per Phase
  - FFT Amplitude of Input Voltage of Phase U
  - Input Voltage Line to Line
  - FFT Amplitude of Input Voltage Line to Line UV
  - Transformer Voltage per Phase
  - FFT Amplitude of Transformer Voltage of Phase U
- Dynamic Calculation
- Expected Values

Abb. 97: Übersicht Calculation Results

Sofern anschließend Skewing Parameter oder Motorlänge verändert werden, werden auch alle Kräfte und Drehmomente neu berechnet, ohne dass erneute FEM-Berechnungen erfolgen müssen. Nach Änderungen der Geometrie

### 3.6.6 Dynamic Calculation

Dynamische Berechnungen können für Motoranlauf und stationären Betriebszustand durchgeführt werden. Die Berechnungen werden auf Basis von Ersatzschaltbildern analytisch im Zeitschrittverfahren durchgeführt, wobei die Induktivitäten auch in Co-Simulation mit FEMAG ermittelt werden können.

The screenshot shows the 'Motor Parameters' dialog box with the following settings:

- Options:** Post-Processing
- Calculation Types:**
  - Cogging Torque + BEMF
  - Nom. Torque + Inductance
  - Losses
  - Dynamic
- Run Modes:**
  - Steady State
  - Start Up
- Phase Parameters Info:**
  - R<sub>U</sub>= 155,3 mΩ
  - R<sub>V</sub>= 155,3 mΩ
  - R<sub>W</sub>= 155,3 mΩ
  - L<sub>U</sub>= 190,65 μH
  - L<sub>V</sub>= 190,65 μH
  - L<sub>W</sub>= 190,65 μH
- System Info:**
  - Line to Line BEMF= 47,26 V (For Nominal Speed)
  - Estimated J<sub>r</sub>=0,5861E-04 kgm<sup>2</sup>
- Calculation Parameters:**
  - Motor Length [Lmot]: 100 mm
  - Skew Angle: 0 °mech
  - Number of Skew Steps: 1
  - Winding Connection: Star
- Dynamics Parameters:**
  - Input Voltage: 50 V
  - Use Phase Voltage (Buttons: Edit, Electronics)
  - Block Commutation: 120° °el
  - Control Firing Angle Delay: 0 °el
  - Start Up Rotor Position: 0 °mech
- Phase Parameters:**
  - Added Resistance Per Phase: 0 Ω
  - Added Inductance Per Phase: 0 H
  - Phase Inductances:  Coupled to Femag  User Defined
  - Inductance /mm /NTurns<sup>2</sup>: Average 6,25973713652941E-09 H/mm
- Calculation Stopping Criteria:**
  - Torque Steady State Reaching: 1 %
  - Stop on Speed: 0 rpm
  - Stop on Time: 0 ms
  - Stop at Rotor Position: 0 °mech
- Load Parameters:**
  - Rotor Moment of Inertia: 0,000586 kgm<sup>2</sup>
  - Load Torque: 1 Nm

Buttons at the bottom: Apply, Exit, Reset Results

Abb. 98: Motor Parameter für dynamische Berechnung stationären Betriebszustandes

„Run Modes“

- „Steady State“ für den stationären Betriebszustand
- „Start Up“ für den Motoranlauf.

„Phase Parameters Info“

- Widerstände  $R_U$ ,  $R_V$ ,  $R_W$  und Induktivitäten  $L_V$ ,  $L_U$ ,  $L_W$  aller Wicklungen, die zu einer Phase gehören
- Induzierte Klemmenspannung
- Trägheitsmoment des Rotors

“System Info”

- Line to Line BEMF (for Nominal Speed)
- Estimated  $J_r$

“Calculation Parameters”

- „Motor Length“  
Motorlänge ohne Überhänge
- „Skewing“  
Hiermit werden die Auswirkungen einer Optimierung mittels Schrägung von Rotor oder Stator berechnet. Angegeben wird der Gesamtwinkel der Schrägung und die Anzahl der Schrägungsschritte:

„Skew Angle“                      0 = keine Schrägung  
     n = Schrägung in °mech über die gesamte Motorlänge

„Number Of Skew Steps“ 0 = keine Schrägung  
     1 = kontinuierliche Schrägung über den angegebenen Winkel  
     n = Anzahl der Blechpakete,  
     das 1. Blechpaket befindet sich immer in der Position 0 °mech!

Beispiel:

Skew Angle = 15 °mech

Number Of Skew Steps = 4

Winkelversatz der Bleche zueinander =  $15 \text{ °mech} / (4-1) = 5 \text{ °mech}$

- „Winding Connection“  
Wicklungsschaltung „Stern“ bzw. „Dreieck“.

Dynamics Parameters

- „Input Voltage“  
Maximalwert einer angelegten konstanten Phasenspannung.
- Use Phase Voltage  
Anstatt der konstanten Phasenspannung „Input Voltage“ können auch benutzerspezifische Phasenspannungen verwendet werden. Dabei können je Phase Verlauf, Amplitude und Phasenwinkel beliebig eingestellt werden. Diese Funktion kann derzeit nur im „Run Mode“ „Steady State“ benutzt werden.

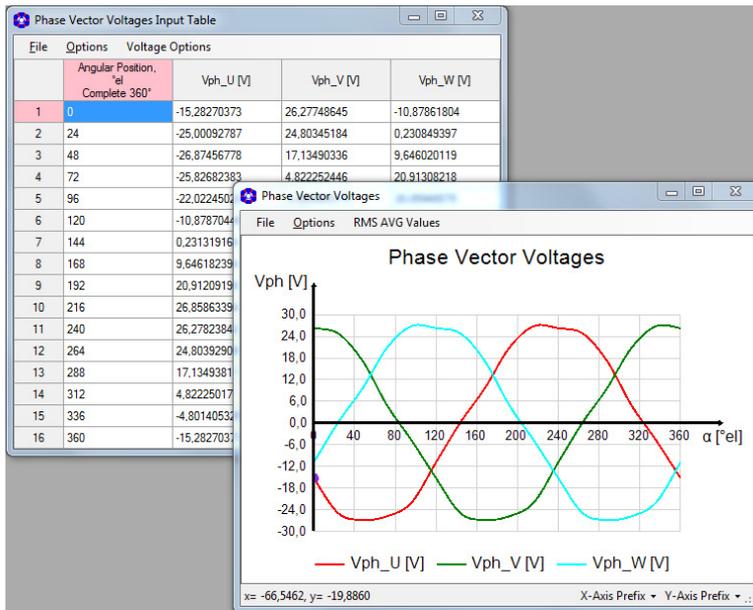


Abb. 99: Verwendung von benutzerspezifischen Phasenspannungen

Mit „Voltage Options“ können verschiedene Funktionen zur Anpassung der Spannungen vorgenommen werden:

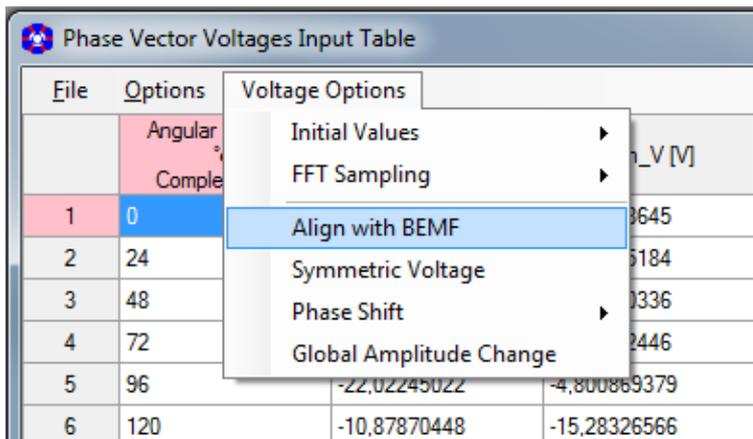


Abb. 100: Voltage Options

- „Initial Values“: Save, Restore
- „FFT-Sampling“: Eingabe eines Wertes, Default = 1.000
- „Align with BEMF“: Einstellung des gleichen Phasenwinkels wie BEMF
- „Symmetric Voltage“: Einstellung der Phasen V und W wie U jeweils um 120°el versetzt
- „Phase Shift“: Eingabe eines Phasenwinkels für alle Phasen gleich oder je Phase unterschiedlich
- „Global Amplitude Change“: Eingabe eines Multiplikationsfaktors zur Veränderung des Scheitelwertes der Spannung.

Mit „*Electronics*“ werden die Widerstände der Transistoren und Dioden des Inverters im Ersatzschaltbild und die Zeitschritte der Berechnungen vorgegeben. Damit kann mit guter Annäherung ein beliebiges PWM-Signal für die Eingangsspannung des Motors in 3-phasiger Sternschaltung verwendet werden.

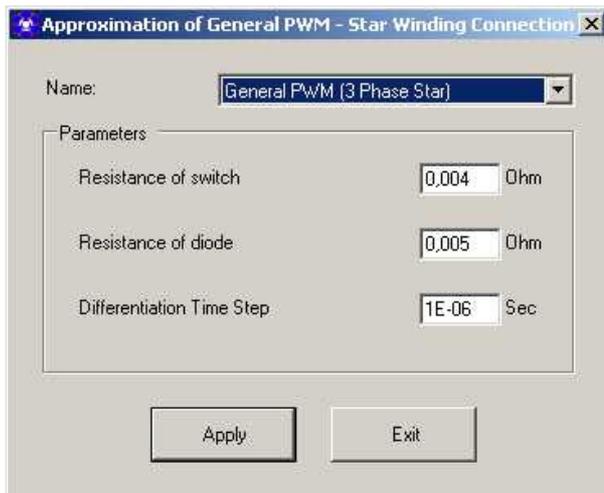


Abb. 101: Einstellung der Parameter für das Invertermodell

- „*Block Commutation*“  
Eingabe des elektrischen Winkels der Kommutierungsdauer 120°el oder 180°el.
- „*Control Firing Angle Delay*“  
Verzögerungswinkel für den Kommutierungszeitpunkt.
- „*Stop Calculation Criteria*“  
Abbruchbedingungen für die Beendigung der Berechnungen sind mit „Oder“ verknüpft und können ausgewählt und parametrisiert werden.

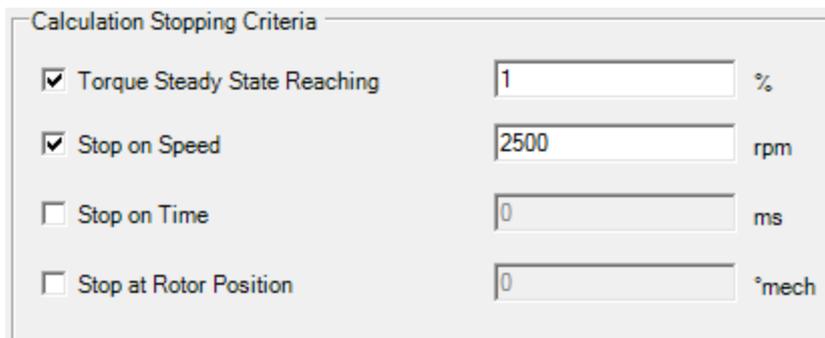


Abb. 102: Abbruchbedingungen für dynamische Berechnungen

#### Phase Parameters

- „*Added Resistance Per Phase*“  
Benutzerspezifischer Widerstand, der als Konstante zum Phasenwiderstand addiert wird.
- „*Added Inductance Per Phase*“  
Benutzerspezifische Induktivität, die als Konstante zur Phaseninduktivität addiert wird.
- „*Phase Inductances*“  
„*Coupled to FEMAG*“: die Induktivitäten werden rotorpositionsspezifisch über eine FEM-Berechnung mittels Co-Simulation durch FEMAG ermittelt.

„User Defined“: die Induktivität wird aus dem Wicklungsschema unabhängig von der Rotorposition berechnet und als Konstantwert vorgegeben.

Die Berechnungsergebnisse werden als Grafiken dargestellt. Sowohl Grafiken als auch die numerischen Ergebniswerte können über den Zwischenspeicher in andere Anwendungen kopiert werden (siehe auch 0 )

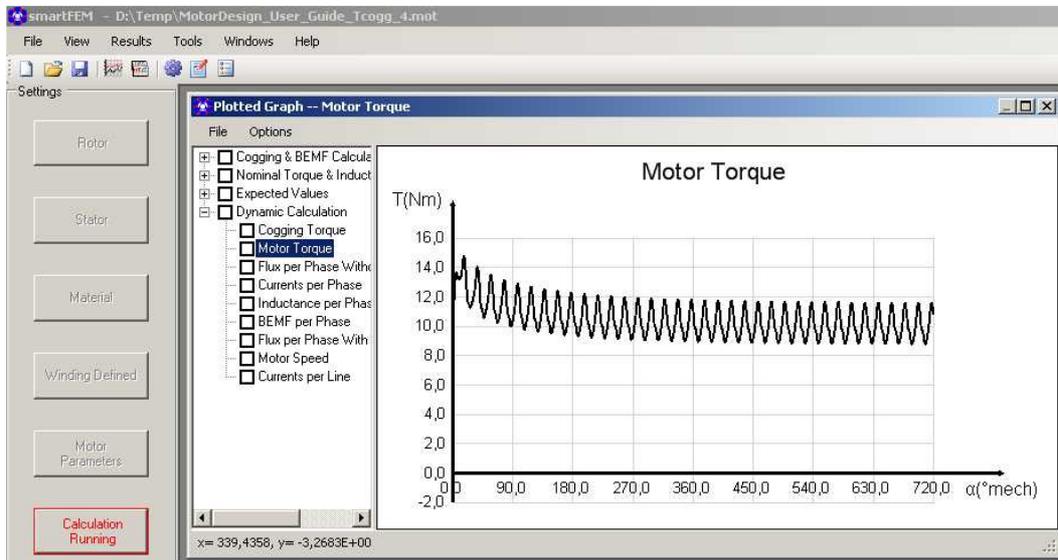


Abb. 103: Dynamische Berechnung Drehmomentverlauf versus Rotorposition

Übersicht aller der nach einer „Dynamic Calculation“ als Graphen darstellbaren Ergebnisse:

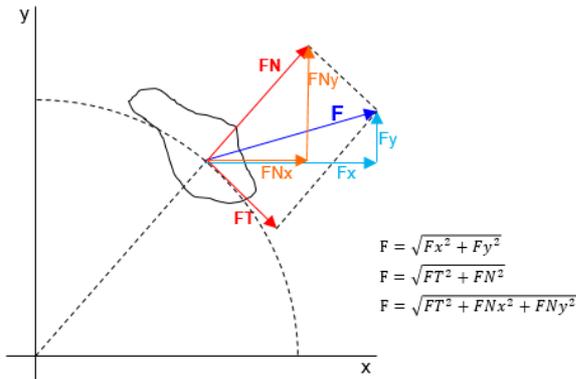
- Cogging & BEMF Calculation
- Nominal Torque & Inductance Calculation
- Dynamic Calculation
  - Motor Torque
  - Cogging Torque
  - Currents per Phase
  - Currents per Line
  - Flux per Phase Without Applied Current
  - Flux per Phase With Applied Current
  - Inductance per Phase
  - BEMF per Phase
  - Motor Speed
- Expected Values

### 3.6.7 Postprocessing - Forces and Torque

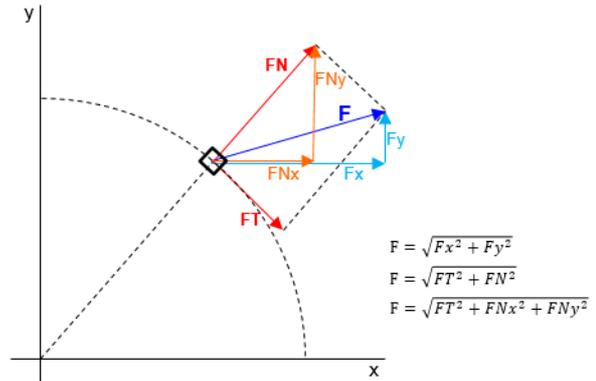
#### 3.6.7.1 Kraftberechnung

##### Grundlagen

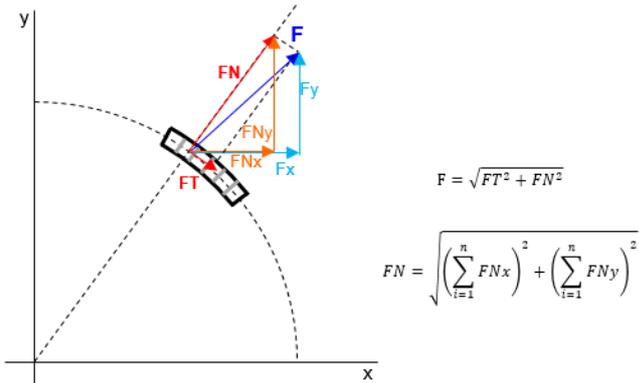
Kräfte in einer Fläche



Kräfte in einem Netzelement  
(Ringsegment ~ quadratisch bzw. rechteckig)



Kräfte in einem Segment bestehend aus n quadratischen Netzelementen



Anmerkung: der Kraftvektor F muss nicht unbedingt im Schwerpunkt des Segmentes liegen!

- F = Kraftvektor
- FT = tangentielle Komponente des Kraftvektors
- FN = normale (radiale) Komponente des Kraftvektors
- FNx = x-Komponente des Normal-Kraftvektors
- FNy = y-Komponente des Normal-Kraftvektors

Abb. 104: Grundlagen von Kraftvektoren

smartFEM ermöglicht die Berechnung der im mittleren Luftspaltlayer entstehenden Tangential- und Normalkräfte in wählbaren Segmenten.

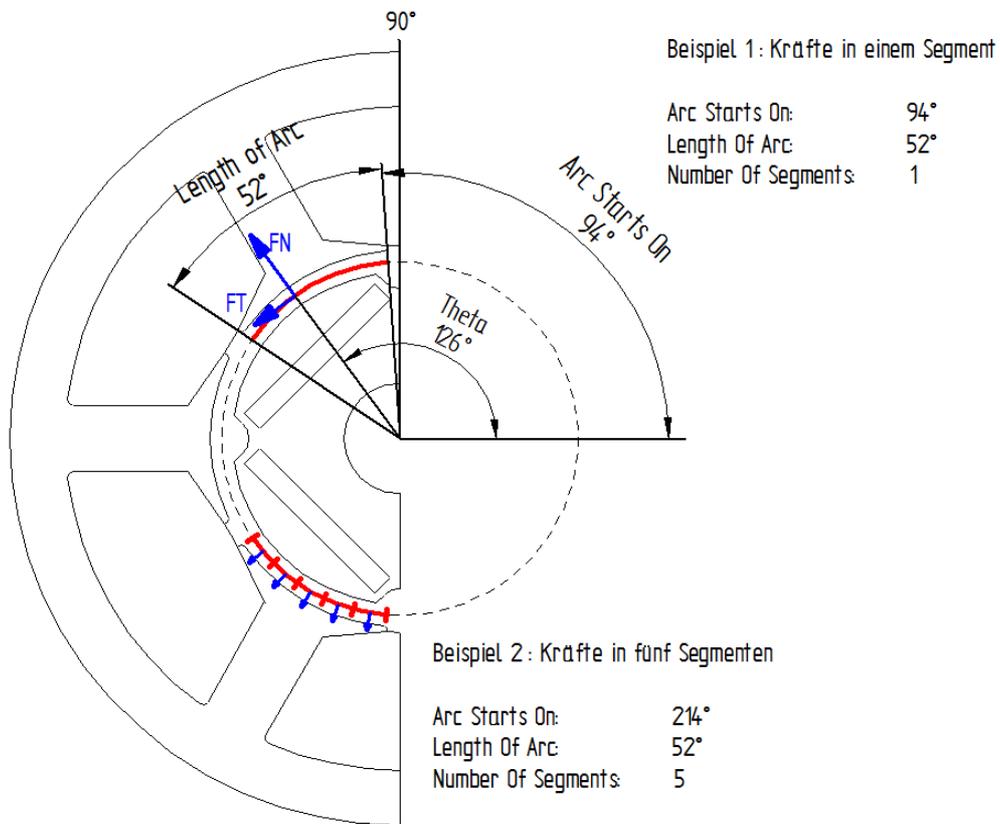


Abb. 105: Kraftberechnungen mit smartFEM

Beispiel: Ergebnisse einer Kraftberechnung für je einen Motor mit zentrischem und exzentrischem Rotor:

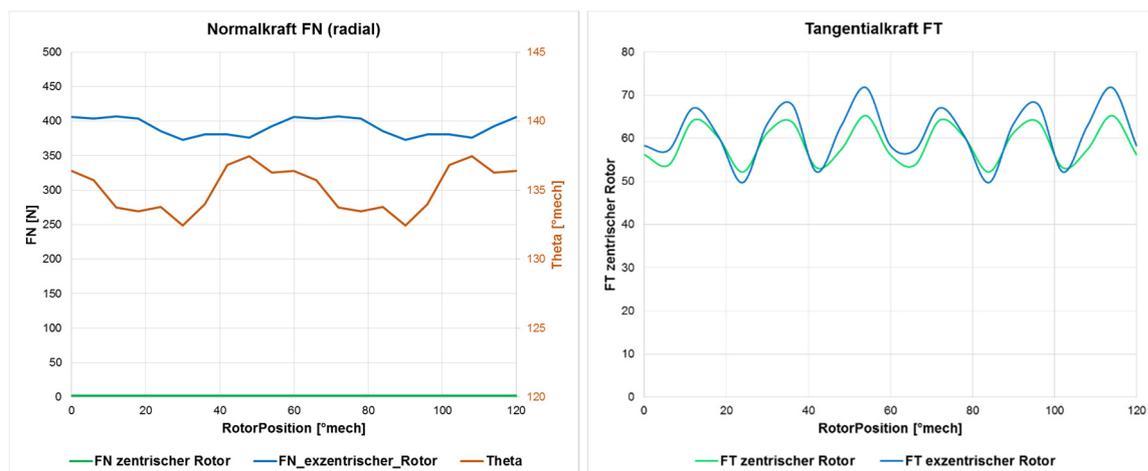


Abb. 106: Beispiel für Ergebnisse einer Kraftberechnung

Für die Parametereingabe und Ergebnisausgabe kann in dem Fenster „Motor Parameters“ über die Menüauswahl „Postprocessing“ das Fenster „Force Calculation“ geöffnet werden. Folgende Parameter können eingegeben werden:

- „Arc Starts on“  
Beginn des Bereichs für die Kraftberechnungen
  - „Lenght of Arc“  
Länge des Kreisbogens in dem die Kräfte berechnet werden
- Alle Winkel werden in Polar-Koordinaten angegeben
- „Number of Segments“  
Anzahl der jeweils gleichlangen Kreisbogensegmente, für die jeweils die Nominal- und Tangentialkraft berechnet wird
  - Auswahl „Cogging Torque“ oder „Nominal Torque“  
Festlegung, welche Feldberechnungsergebnisse als Basis für die Kräfteberechnungen verwendet werden. Bei Auswahl von „Nominal Torque“ werden die angegebenen Ströme berücksichtigt.

Die Ergebnisse werden in einer Tabelle angezeigt und können über das Menü „Options“ → „Copy Results“ über den Zwischenspeicher in andere Anwendungen kopiert werden.

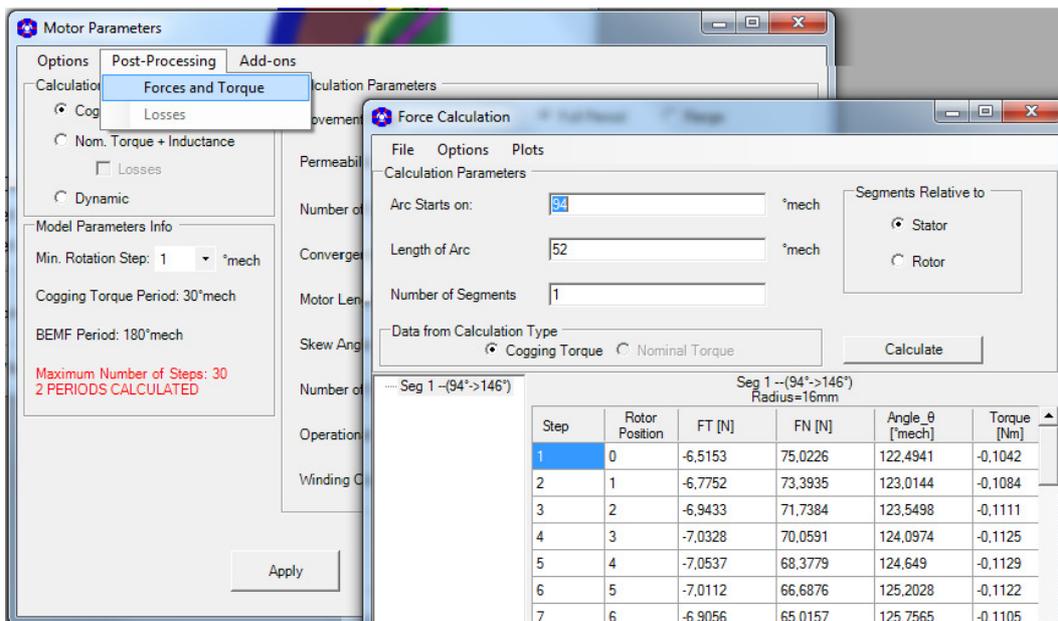


Abb. 107: Beispiel 1 - Kräfteberechnung in einem Segment

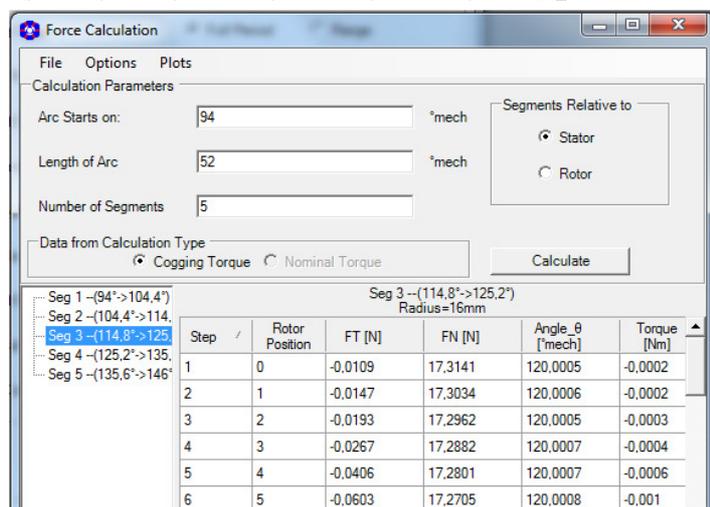


Abb. 108: Beispiel 2 - Kräfteberechnung in fünf Segmenten

### 3.6.7.2 Torque

Die Berechnungsergebnisse des Drehmoments in „Results“ werden von FEMAG auf drei signifikante Stellen gerundet. Da dies manchmal bei Auswertungen von Drehmomentschwankungen zu ungenauen Ergebnissen führt, wird das Drehmoment mit dieser Funktion mit einer höheren Anzahl der signifikanten Stellen berechnet und ausgegeben.

Dazu wird in „Postprocessing - Forces and Torque - Force Calculation“ die Kraftberechnung mit 1 Segment von 0° über eine Länge von 360° gerechnet.

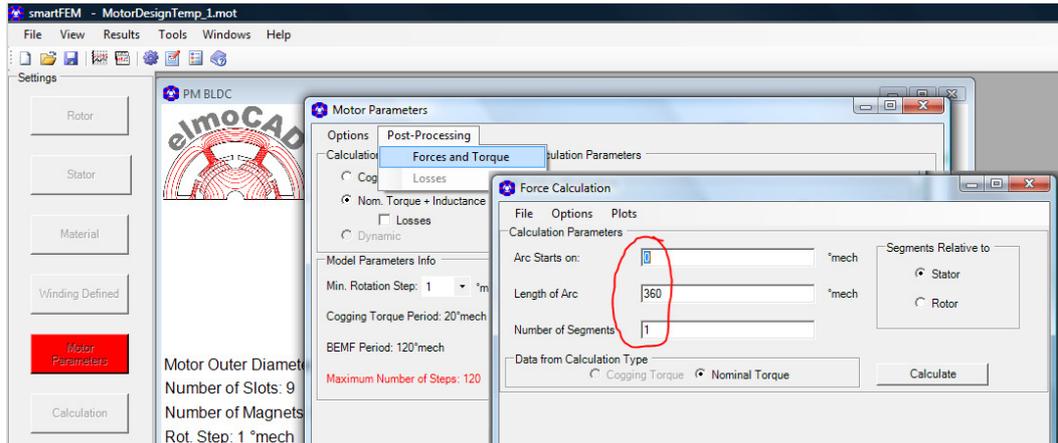


Abb. 109: Postprocessing - Forces and Torque

Anschließend können Plots des Drehmoments und seiner Harmonischen aufgerufen und ausgewertet werden.

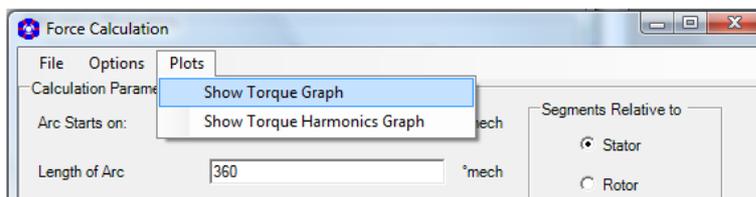


Abb. 110: Postprocessing - Drehmomentdiagramm anzeigen

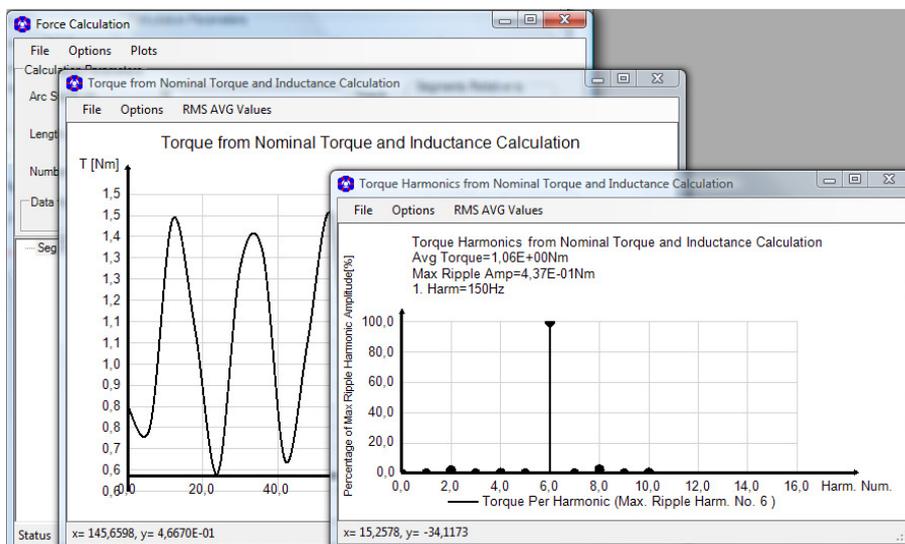


Abb. 111: Postprocessing - Plots von Drehmoment und Harmonischen

Über „Options - Copy Results“ können die Ergebnisdaten für das Drehmoment und die Luftspaltinduktion z.B. in eine Tabellenkalkulation zu speziellen Auswertungen kopiert werden.

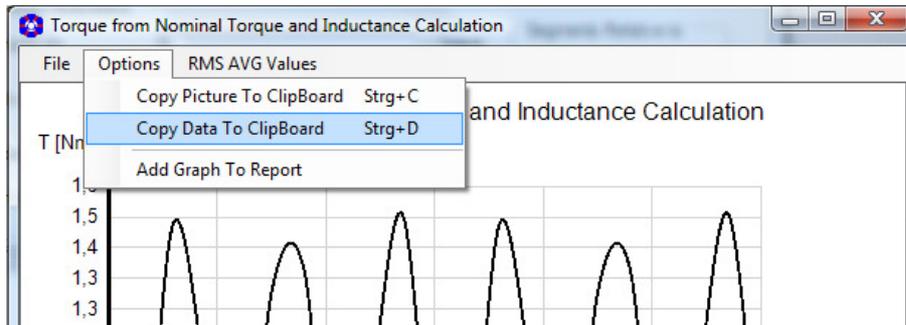


Abb. 112: Postprocessing - Auswahl zum Kopieren der Ergebnisdaten für das Drehmoment

### 3.6.8 Postprocessing - Berechnung der Verluste (Loss Calculation)

Mit smartFEM können Kupfer-, Eisen- und Magnetverluste im Rotor und im Stator berechnet werden. Die dafür notwendige Ermittlung und Speicherung von Basisdaten erfolgt zusammen mit der „Nominal Torque + Inductance“ Berechnung, sofern die Auswahl „Losses“ in „Motor Parameters“ getroffen wurde.

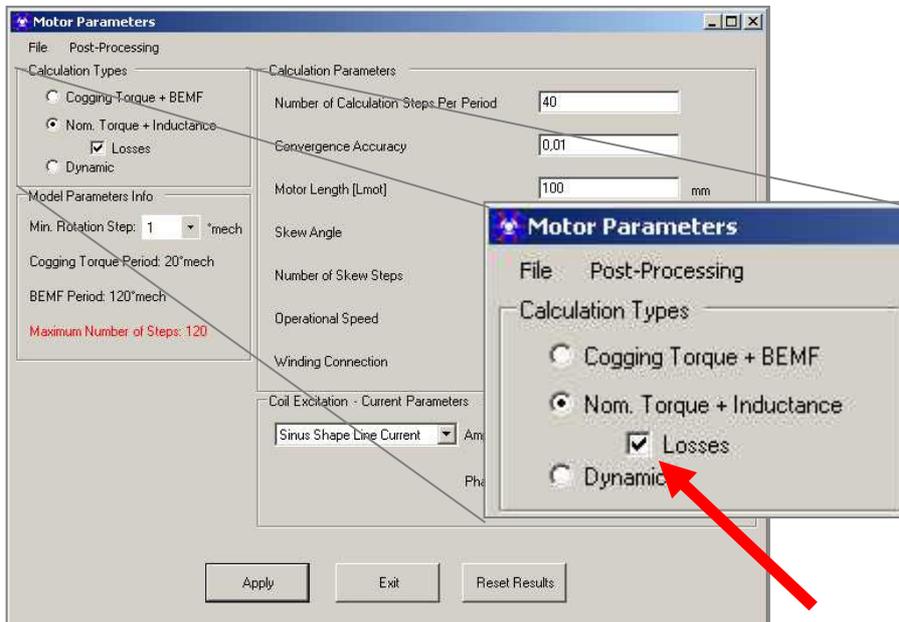


Abb. 113: Motor Parameters - Auswahlfeld "Losses"

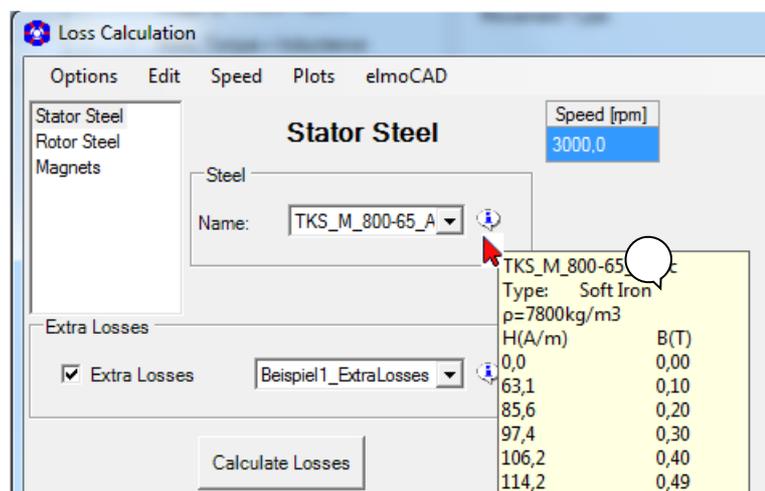
Mit Auswahl des Parameters „Losses“ werden die Induktionen für alle Netzelemente je Rotorposition gespeichert, was einen erhöhten Speicherplatzbedarf für das Motormodell zur Folge hat. Dafür kann der Benutzer anschließend die Verluste bei unterschiedlichen Drehzahlen und der Verwendung verschiedener Materialien sehr schnell ermitteln, ohne dass jeweils die länger dauernde „Nominal Torque + Inductance“ Berechnung ausgeführt wird.

Nach Durchführung „Nominal Torque + Inductance“ Berechnungen kann über das Menü „Postprocessing“ die Berechnung der Verluste erfolgen.

Im Fenster „LossCalculation“ werden die im Menü „Materials“ ausgewählten Materialdaten angezeigt, die als Basis für alle FEM-Berechnungen dienen. Es können auch andere Materialien ausgewählt werden. Die Verlustberechnung mit diesen Materialien dient jedoch ausschließlich zur überschlägigen Beurteilung, da als Induktion die Werte aus den FEM-Berechnungen mit der in „Materials“ gewählten Materialien verwendet werden. Gleiches gilt auch für die Leitfähigkeit der Magnete „Magnets Conductivity“.

Als Information werden die Werte der BH-Kurve angezeigt, sobald man mit der Maus auf das  zeigt.

Abb. 114: Verlustberechnung - Parameter



Über „Speed - Add Speed Range“ können weitere Drehzahlen für die Verlustberechnung angegeben werden.

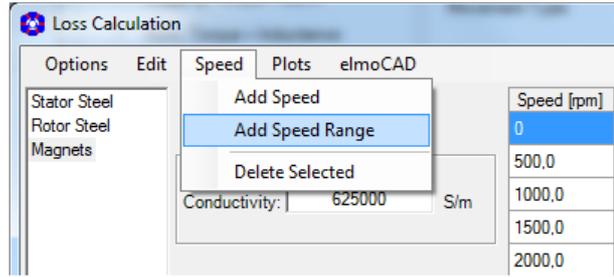
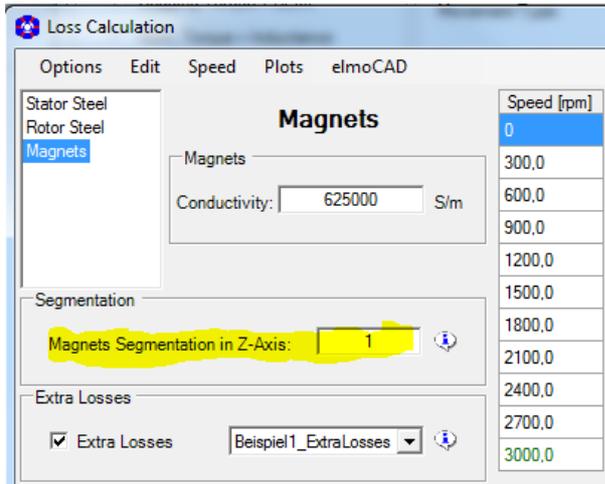


Abb. 115: Loss Calculation - Add Speed Range



Zusätzlich kann die Anzahl der Magnetsegmente in axialer z-Richtung angegeben werden.

Abb. 116: Verlustberechnung - Magnets Segmentation

Unter „Extra Losses“ kann eine Datei \*.pex mit Zusatzverlusten (z.B. Reibung, Lüfter, etc.) ausgewählt werden, sofern sie vorher als Textdatei erstellt und im Materialverzeichnis „...|smartFEM\Materials“ gespeichert wurde. Die Spaltentrennung muss mit dem Tabulatorzeichen „Tab“ erfolgen.

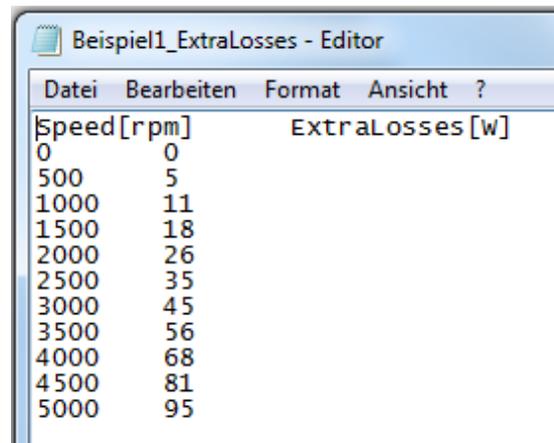
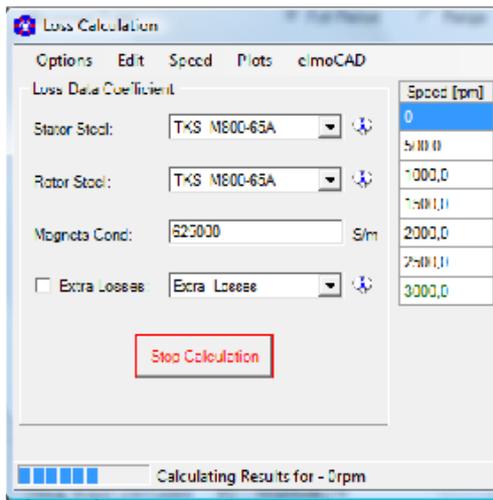


Abb. 117: Verlustberechnung - Beispiel Textdatei.pex



Nach Betätigen der Schaltfläche „Calculate Losses“ werden die Berechnungen ausgeführt. Während dieser Zeit erscheint die Schaltfläche „Calculating“.

Eine laufende Berechnung wird durch Betätigen der Schaltfläche „Calculating“ wieder abgebrochen.

Abb. 118: Verlustberechnung - Durchführung der Berechnung

Die Ergebnisse der Verlustberechnung werden unmittelbar nach ihrer Berechnung tabellarisch und in Plots über die Drehzahl angezeigt:

- Eisenverluste im Rotor
- Eisenverluste im Stator
- Magnetverluste
- Zusatzverluste
- Kupferverluste in den Wicklungen
- Plots mit den Verlustdichten
- Plots mit den Harmonischen der Rotor- und Statorverluste

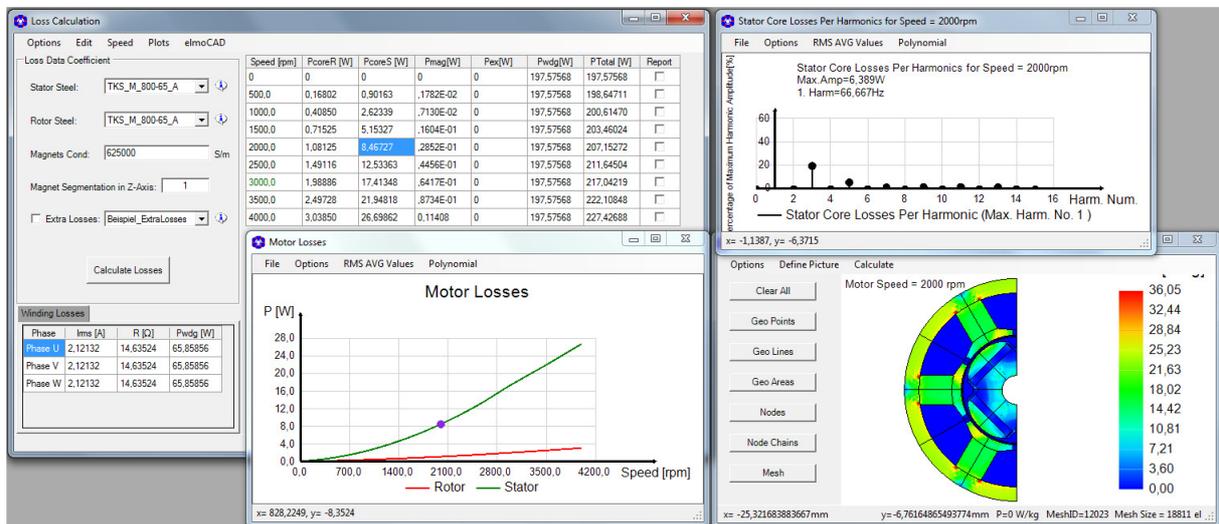


Abb. 119: Verlustberechnung - Ergebnisse

### 3.6.8.1 Polynomkoeffizienten

Für die Verlustkurven können die Koeffizienten (xy und invers yx) von Polynomen 3. bis 7. Ordnung berechnet und über das Clipboard kopiert werden, um mathematische Verlustmodelle in anderen Applikationen zu erstellen.

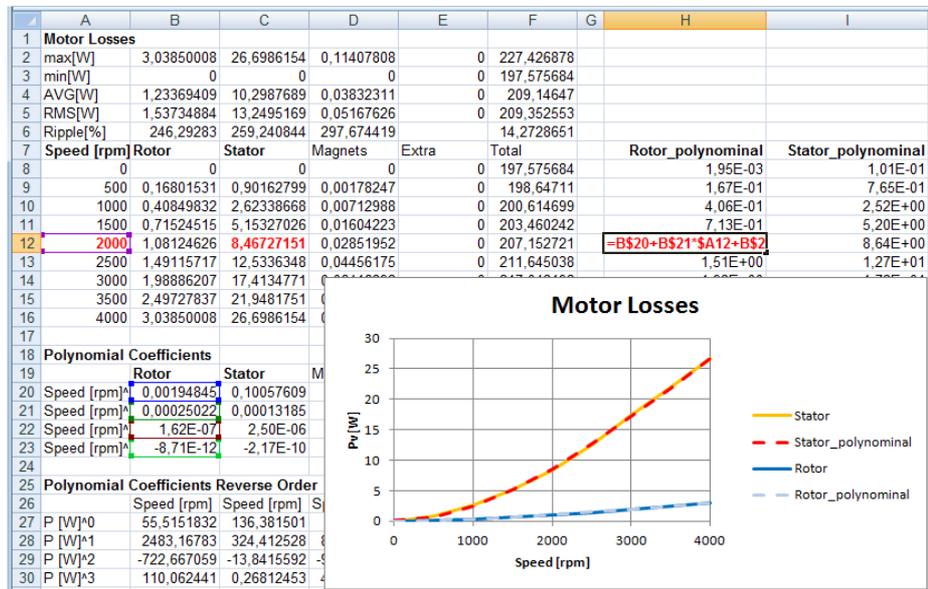
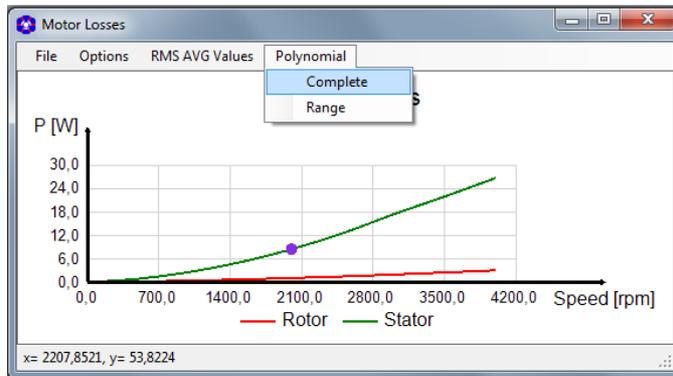


Abb. 120: Loss Calculation - Polynomkoeffizienten

### 3.6.8.2 Berechnung der Verluste für Linearmotoren

Die Berechnung von Verlusten erfolgt generell mit Hilfe von „Fourier Transformationen“, die nur für periodische Signale zulässig sind. Daher werden die Verluste für Linearmotoren werden nur für periodische Modelle mit negativer oder positiver Periodizität durchgeführt. Aus den in smartFEM verfügbaren nicht-periodischen Modellen werden für die Verlustberechnung periodische Modelle erzeugt.

Sofern Linearmotormodelle mittels DXF-Import in smartFEM erzeugt werden, muss dies vom Benutzer beim Design im CAD-Software berücksichtigen.

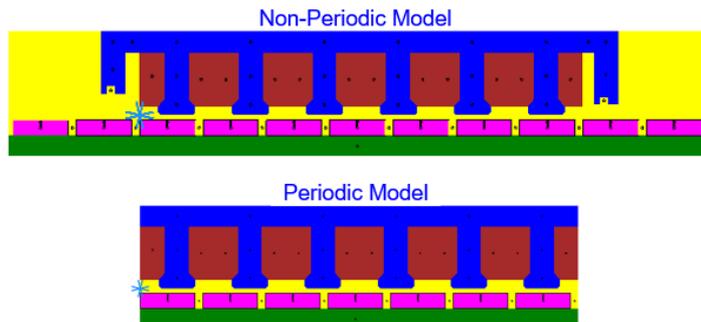


Abb. 121: Verlustberechnung - Linearmotoren

### 3.7 Ld / Lq Identifikation

Für eine feldorientierte Regelung von permanentmagnetisch erregten Synchronmaschinen werden häufig mittels der Park-/Clarke-Transformation ermittelte Tabellen der Ld und Lq Identifikationen verwendet. Diese Tabellen können in smartFEM über die Funktion „Ld/Lq“ berechnet werden. Als erstes muss dazu eine Tabelle mit Strömen und deren Phasenverschiebungen erstellt werden. Dies kann manuell Zeile für Zeile oder auch parametrisch über den Dialog „Data - Add - ...“ oder parametrisiert erfolgen. Für die Simulation einer feldorientierten Regelung mit dem für die Simulation von Leistungselektronik geeigneten Programm „CASPOC“ wird diese Tabelle automatisch erzeugt.

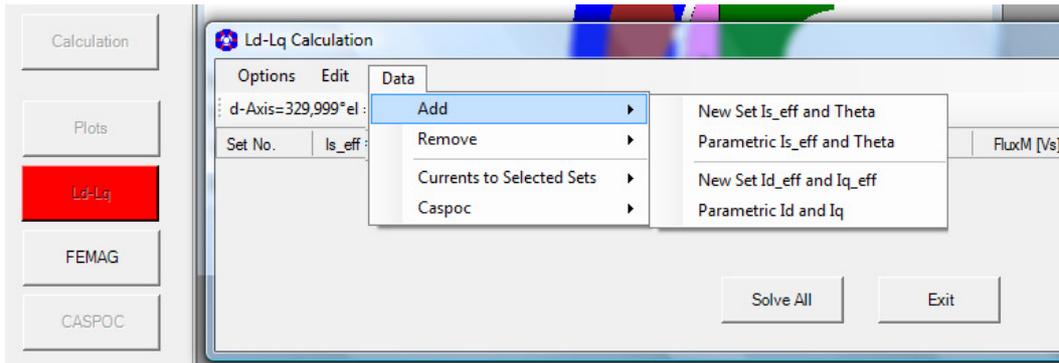


Abb. 122: Ld/Lq - Erzeugung der Datensätze

Die Datensätze können sowohl einzeln als auch alle automatisch nach Betätigung der Schaltfläche „Solve All“ berechnet werden.

Set No.	Is_eff [A]	θ[el]	Id_eff [A]	Iq_eff [A]	Ld [H]	Lq [H]	FluxM [Vs]	FluxD [Vs]	FluxQ [Vs]	TorqueFEM [Nm]	TorqueSync [Nm]	Solved
27	50	-15	-12.94	48.3	.5606E-03	.5671E-03	.1654E+00	.1582E+00	.2739E-01	359.685	359.502	Yes
28	50	0	0	50	.5551E-03	.5633E-03	.1654E+00	.1654E+00	.2817E-01	372.152	372.152	Yes
39	75	-75	-72.44	19.41	.5749E-03	.5787E-03	.1656E+00	.1239E+00	.1123E-01	144.857	144.618	Yes
40	75	-60	-64.95	37.5	.5731E-03	.5774E-03	.1655E+00	.1283E+00	.2165E-01	279.721	279.245	Yes
41	75	-45	-53.03	53.03	.5697E-03	.5753E-03	.1654E+00	.1352E+00	.3051E-01	395.373	394.665	Yes
42	75	-30	-37.5	64.95	.5649E-03	.5719E-03	.1653E+00	.1441E+00	.3714E-01	483.786	483.018	Yes
43	75	-15	-19.41	72.44	.5581E-03	.5673E-03	.1652E+00	.1543E+00	.4110E-01	539.008	538.425	Yes
44	75	0	0	75	.5499E-03	.5616E-03	.1651E+00	.1651E+00	.4212E-01	557.307	557.307	Yes
50	100	-75	-96.59	25.88	.5767E-03	.5813E-03	.1655E+00	.1098E+00	.1505E-01	193.306	192.782	Yes
51	100	-60	-86.6	50	.5742E-03	.5801E-03	.1654E+00	.1157E+00	.2901E-01	373.306	372.152	Yes
52	100	-45	-70.71	70.71	.5699E-03	.5773E-03	.1652E+00	.1249E+00	.4082E-01	527.271	525.613	Yes
53	100	-30	-50	86.6	.5636E-03	.5728E-03	.1650E+00	.1368E+00	.4961E-01	644.632	642.838	Yes

Abb. 123: Ld/Lq - Ergebnistabelle

Zu der Ergebnistabelle können dann verschiedene Diagramme ausgegeben werden.

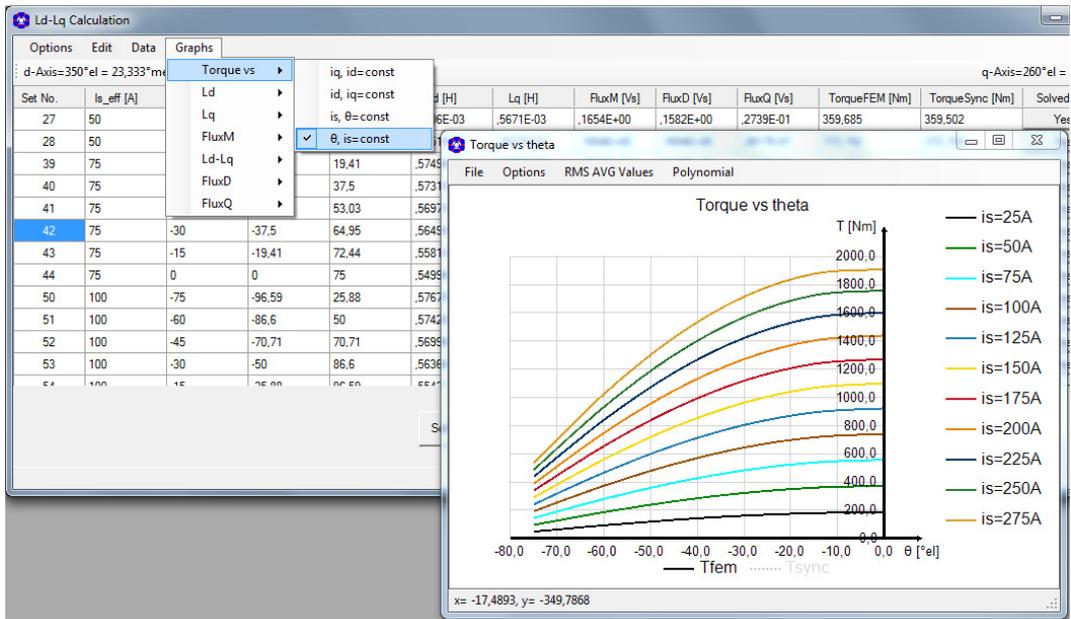


Abb. 124: Ld/Lq - Diagram Torque vs. Theta mit is=constant

Zu jeder selektierten Tabellenzeile kann das Phasendiagramm angezeigt werden.

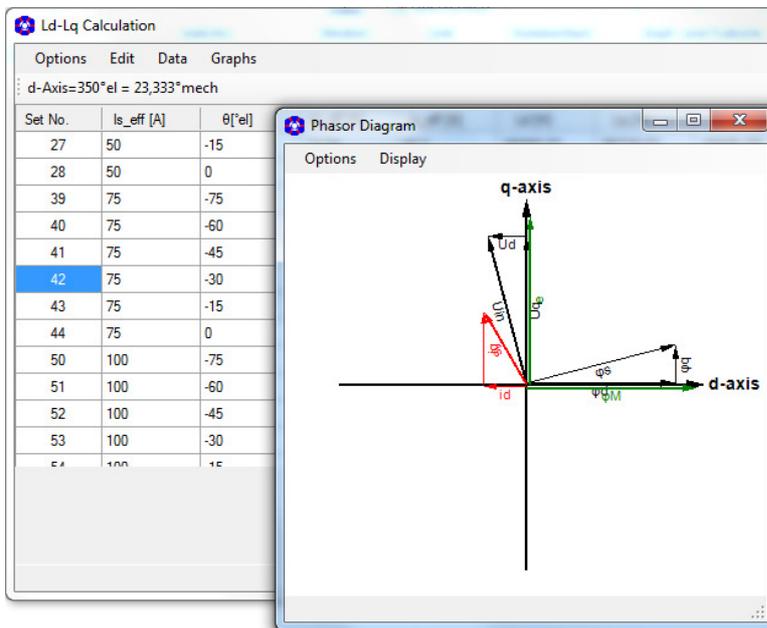


Abb. 125: Ld/Lq - Phasor Diagram

Die Ergebnistabelle kann mittels Dialog „Options - Copy Sets“ über den Zwischenspeicher in andere Softwareprogramme übernommen und dort verwendet werden.

Eine für das Programm CASPOC erzeugte Ergebnistabelle wird über den Dialog „Data - Caspoc - Export File“ in eine xml formatierte Datei gespeichert, die von CASPOC als Look-Up-Tabelle für die Elektroniksimulation verwendet wird.

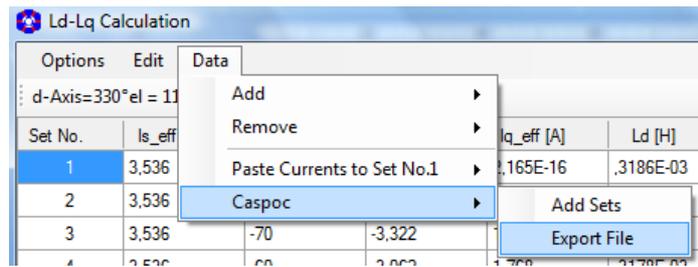


Abb. 126: Ld/Lq - Erzeugung einer Ergebnisdatei für CASPOC

### 3.8 Berechnung spezieller Effekte

Für die Berechnung und Untersuchung spezieller Effekte (z.B. Rastmoment, das durch einen einzelnen Magneten verursacht wird), gibt es die Möglichkeit, einzelnen Flächenelementen andere Materialeigenschaften zuzuweisen, z.B.:

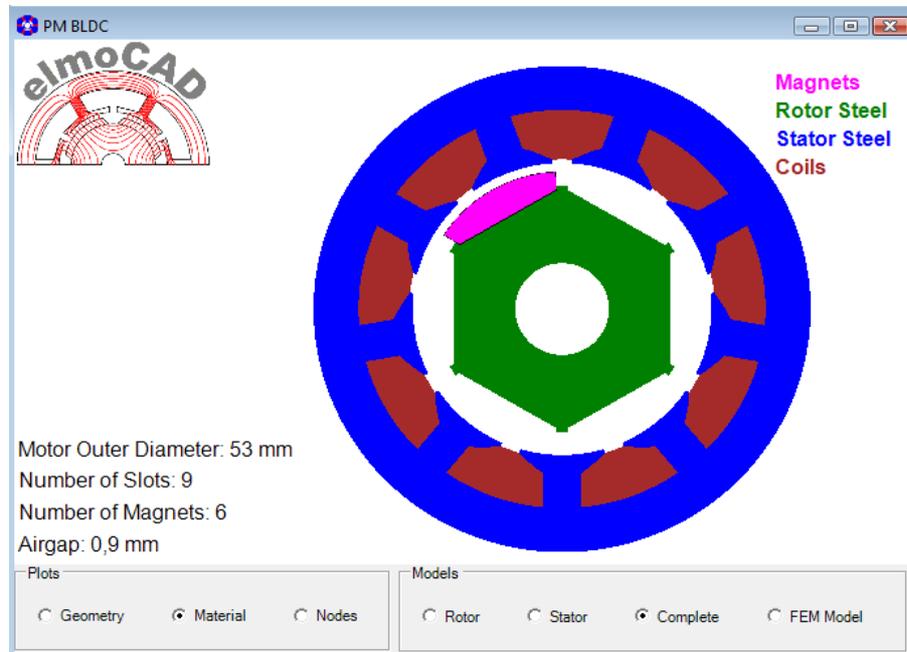
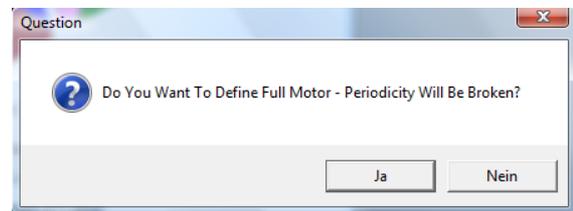


Abb. 127: Simulationsmodell mit einem Magnet

#### Achtung:

Dies hat zur Folge, dass das Motormodell nicht mehr den durch die in Rotor- und Statortopologie mit Anzahl der Magnete und Nuten vorgegebenen periodischen Symmetriebedingungen genügt. Die Ergebnisse beziehen sich daher nur auf diesen Spezialfall und können nicht auf das vollständige periodische Simulationsmodell übertragen werden. Ein Pop-Up-Fenster verlangt die Bestätigung.



Die Änderung der Materialeigenschaften einzelner Flächenelemente erfolgt dadurch, dass in der Darstellung „Geometry“ oder „Material“ das entsprechende Flächenelement mit der linken Maustaste angeklickt wird bei gleichzeitigem Drücken einer Tastenkombination „CTRL“, „ALT“, „Shift“:

- CTRL → Rotor Eisen
- ALT → Stator Eisen
- ALT + Shift → Magnet
- ALT + CTRL → Luft

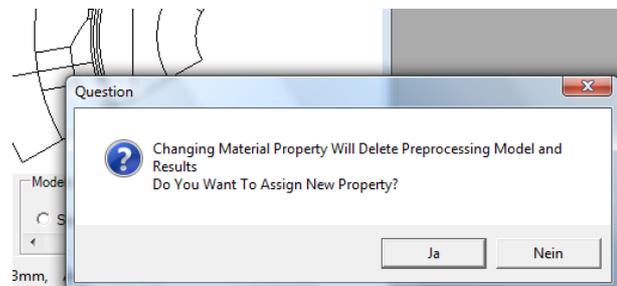


Abb. 128: Änderung der Materialeigenschaften einzelner Flächenelements

Bei Benutzung dieser Funktion erfolgt Hinweis, dass bei Ausführung der Funktion alle Ergebnisse zurückgesetzt werden und anschließend die Frage, ob ein „ganzes“ Motormodell aufgebaut werden soll.

### 3.9 Grafische Darstellung und Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden nach Durchführung einer über die Schaltfläche „*Calculation*“ gestarteten Berechnung automatisch in einem neuen Fenster in Form von Grafiken dargestellt. Sofern bereits Berechnungen durchgeführt wurden wird dies durch die Schaltfläche „*Results*“ in der oberen Menüzeile angezeigt. Durch Mausklick auf diese Schaltfläche wird das Fenster mit den Grafiken aufgeblendet.

Die einzelnen Grafiken werden durch Anklicken der entsprechenden Zeile im Menübaum des Grafikfensters auf der rechten Seite angewählt. Beim Setzen eines Hakens in ein Quadrat wird die zugehörige Grafik bei der Generierung des Projektberichts automatisch in den Bericht übernommen.

Über das Menue „*Options*“ können sowohl Grafiken als auch die berechneten Werte über den Zwischenspeicher in andere Anwendungen kopiert und dort weiter bearbeitet werden.

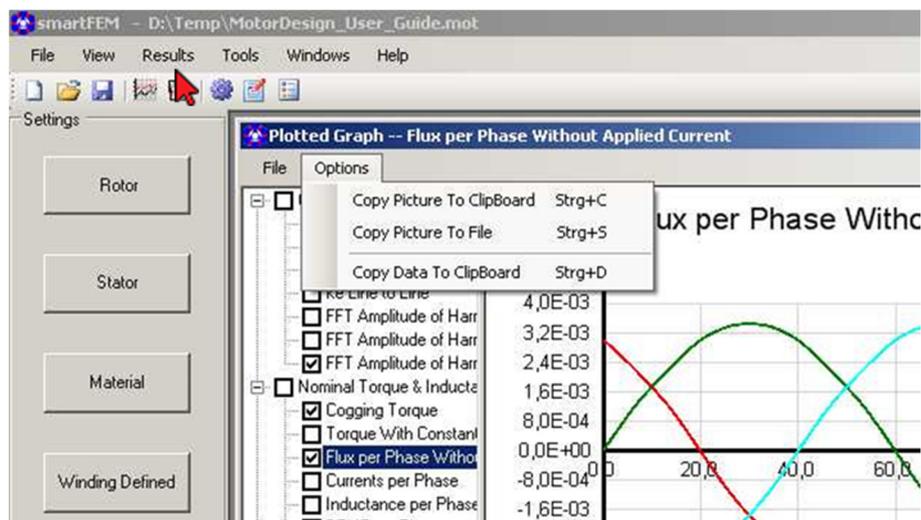


Abb. 129: Grafische Darstellung und Auswertung der Ergebnisse

#### 3.9.1 Results

Die Berechnungsergebnisse werden über die Schaltfläche „*Results*“ als Grafiken angezeigt. Sowohl Grafiken als auch Werte können über „*Options*“ → „*Copy Picture*“ bzw. „*Copy Data*“ in andere Applikationen kopiert werden. Im Einzelnen können folgende Grafiken angezeigt werden:

##### 3.9.1.1 Cogging Torque und BEMF

- Cogging Torque + BEMF
  - Rastmoment und Harmonische
  - Fluss je Phase ohne/mit Strom und Harmonische für Phase U
  - Induktivität je Phase
  - BEMF je Phase/Strang und Harmonische für Phase U/UV
  - $k_e$  je Strang
- Expected Values als analytische Berechnung der zu erwartenden Werte für
  - Expected Motor Torque
  - Cogging Torque
  - Phasenstrom, Strangstrom
  - BEMF je Phase

### 3.9.1.2 Nominal Torque und Inductance

Es können folgende Berechnungsergebnis angezeigt werden:

- Nominal Torque + Inductance  
Die Werte werden an Rotorpositionen innerhalb einer BEMF-Periode mit der in „*Motor Parameters*“ angegebenen Schrittweite berechnet.
  - Torque
  - Rastmoment (Cogging Torque)
  - Reconstructed Cogging Torque  
(Rückführung der Ergebnisse für das Rastmoment auf die Rotorpositionen innerhalb der Rastmomentperiode)
  - Phasenstrom, Strangstrom
  - Fluss je Phase ohne/mit Strom und Harmonische für Phase U
  - Induktivität je Phase
  - BEMF je Phase/Strang und Harmonische für Phase U/UV
  - $k_e$ ,  $k_t$  je Strang
  - Klemmenspannung je Phase/Strang und Harmonische für Phase U/UV
  - Transformer Spannung je Phase und Harmonische für Phase U

### 3.9.1.3 Dynamic

Im Einzelnen können folgende Grafiken angezeigt werden:

- Dynamic Calculation
  - Rastmoment
  - Magnetischer Fluss ohne Strom
  - Phasenströme
  - Induktivitäten
  - BEMF
  - Magnetischer Fluss mit Strom
  - Drehzahl
  - Strangströme

### 3.10 Speichern und Laden der Simulationsmodelle

Über das Menü „File -> Save“ und „File Save As“ können die Simulationsmodelle in beliebigen Verzeichnissen gespeichert werden. Als Default Ordner wird das im smartFEM Settings angegebene Verzeichnis angezeigt. Es werden alle Parameterwerte und Ergebnisse in einer „modellname.mot“ Datei gespeichert. Damit jedes Simulationsmodell in sich konsistent. Zusätzlich werden auch die verwendeten Topologie- und Materialdateien gespeichert.

Zum Öffnen von Simulationsmodellen gibt es mehrere Möglichkeiten:

- „File -> Open“  
Der Speicherort des Modells kann ausgewählt und das Modell geöffnet werden. Dabei werden automatisch die im Topologieverzeichnis enthaltenen Topologien geladen. Sollten Parameterwerte (Abmessungen, Knotendichten, etc.) in neueren Versionen der Topologien u. U. nicht korrekt angezeigt werden, kann das Modell auch mit den im Modell gespeicherten Topologien geöffnet werden.

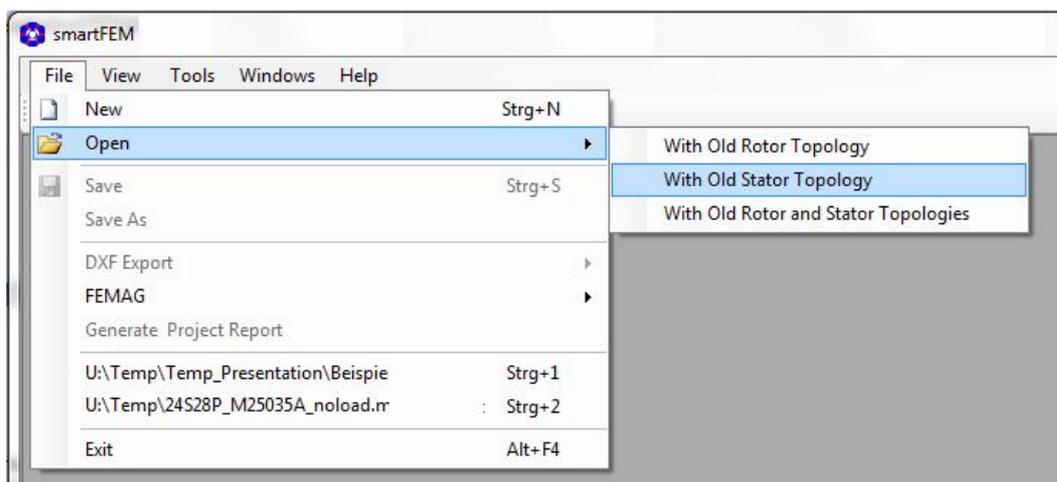


Abb. 130: Öffnen eines gespeicherten Simulationsmodells

- Mit „Strg + #“ wird das entsprechende Simulationsmodell direkt geöffnet. Es werden jeweils die zuletzt gespeicherten vier Modell-Dateien und ihre Pfade angezeigt.

## 4 Add-ons

Add-ons sind spezielle Module, die als Dateityp dll erstellt und in dem Verzeichnis „...|smartFEM\EITopology“ gespeichert werden. Sie werden von smartFEM dynamisch bei Aufruf des Menüs „Add-ons“ in „Motor Parameters“ erkannt und aufgelistet. Benutzer können auch eigene DLL's erstellen, sofern Sie die Schnittstelle kennen.

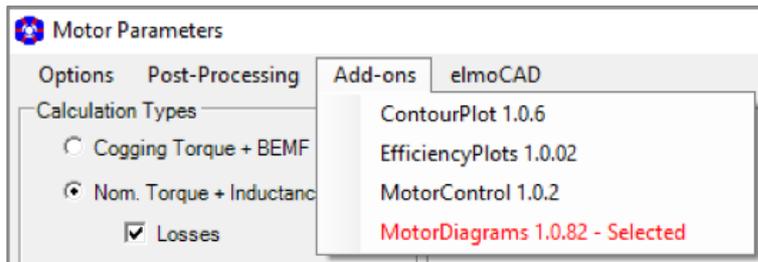


Abb. 131: Add-ons - Aufrufmenü

### 4.1 Motor Diagramme

Das Modul „MotorDiagrams“ ist ein spezielles Modul, mit dem Motor-Diagramme mit verschiedenen Grafiken wie z.B. „Drehmoment-Drehzahl-Diagramm“ erzeugt werden können. Die Basis dafür ist eine Ld/Lq-Matrix, wobei die Ergebnisse der einzelnen Ld/Lq-Sets in mathematischen Modellen mit Polynomen für die Erzeugung der Diagramme verwendet werden.

Der Aufruf für das Modul Motor-Diagramme erfolgt in „Motor Parameters“ über das Menü „Add-Ons - MotorDiagrams“.

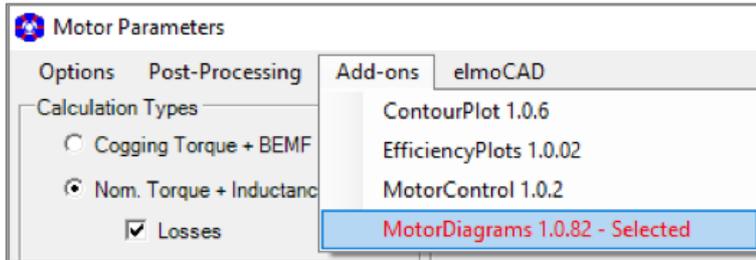


Abb. 132: Motor Diagramme - Aufruf

Die Berechnungen zur Erzeugung verschiedener Grafiken werden auf Basis einer vom Benutzer vorgegebenden Strom-Theta-Matrix durchgeführt.

Aus der Strom-Theta-Matrix werden entsprechende Sets für die Ld/Lq-Berechnungen generiert. Über die Ld/Lq-Identifikation hinaus werden je Ld/Lq-Set verschiedene weitere Ergebnisdaten berechnet.

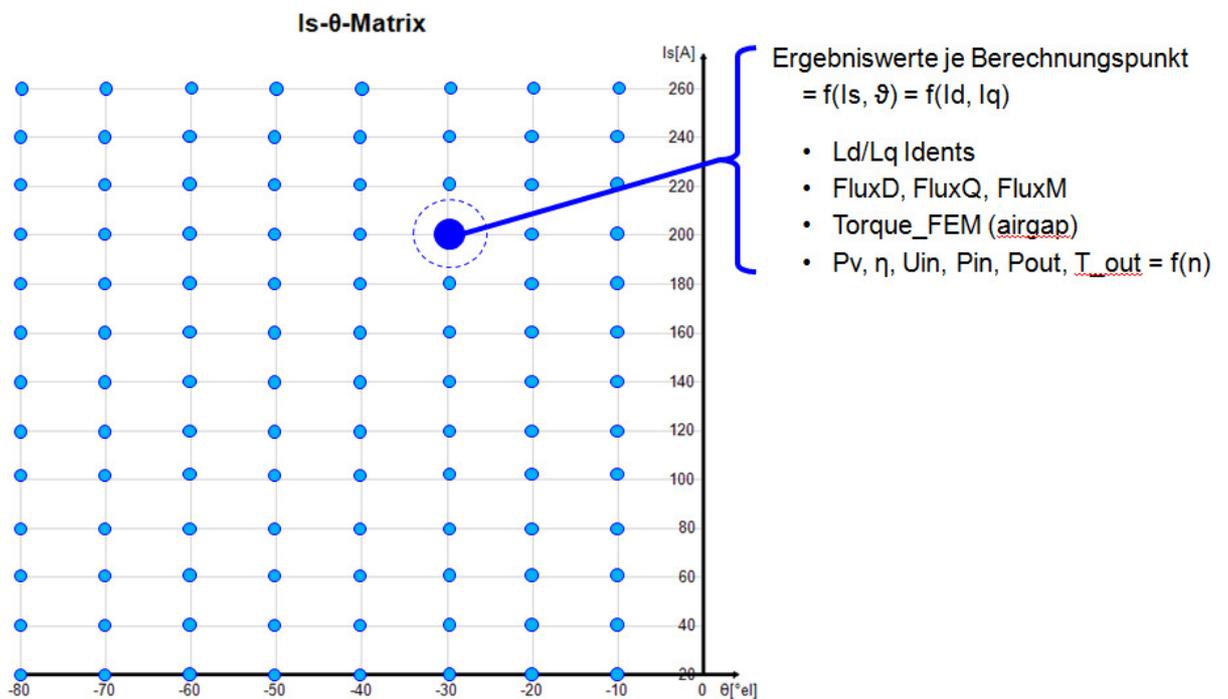


Abb. 133: Motor Diagramme - Strom-Theta-Matrix und Ergebniswerte

In dem Bildschirmfenster „Diagram“ werden die Parameter zur Erzeugung der Diagramme mit Berechnung der darzustellenden Graphen eingegeben.

Die Wicklungsverschaltung „Stern/Dreieck“ wird automatisch aus der Parameterangabe in den „Motor Parameters“ übernommen.

Bei Eingabe von „0“ (Null) werden die jeweiligen Werte aus den Ergebnissen der „Nominal Torque Calculation“ und den „Motor Parameters“ übernommen und angezeigt.

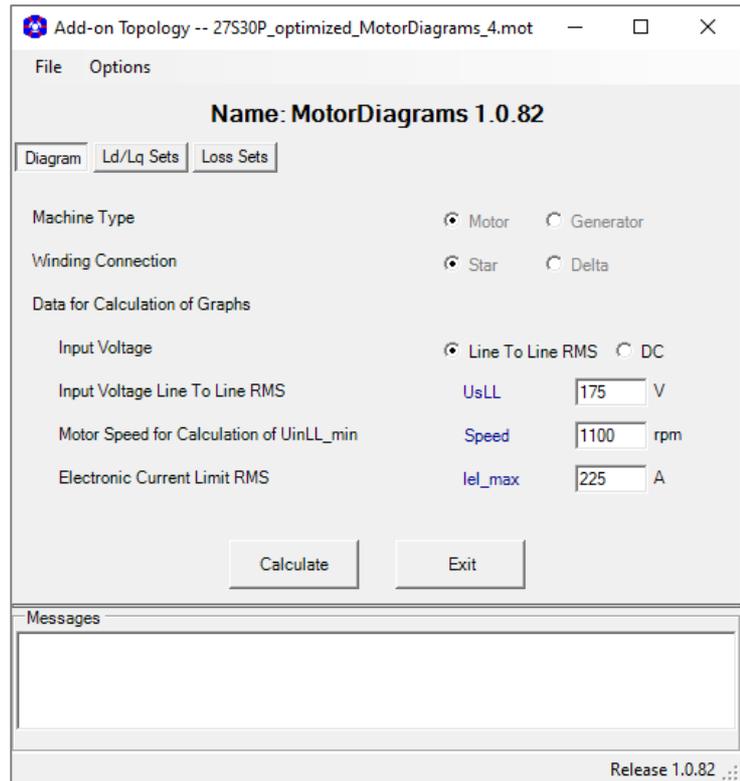
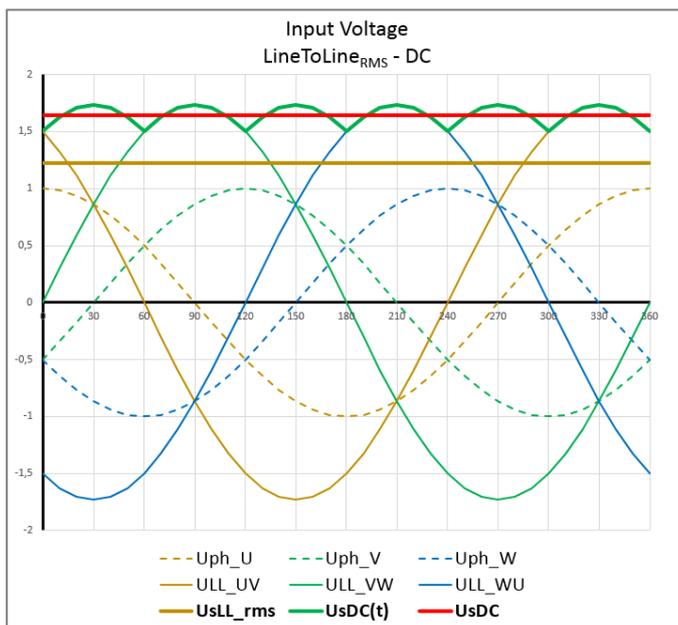


Abb. 134: Motor Diagramme - Parameter für die Berechnung der Grafikdaten

Bei Auswahl von *Input Voltage* = DC wird aus dem eingegebenen Wert *UsDC* die entsprechende „Input Voltage Line To Line RMS“ ermittelt und für die Berechnungen der Motordigramme verwendet:



$$UsDC = \text{Mittelwert}(UsDC(t))$$

$$= \hat{U}_{sLL} * \frac{1}{T} * \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sin(t) dt, T = \frac{\pi}{3}$$

$$= \frac{3 * \sqrt{2}}{\pi} * UsLL_{rms}$$

$$\cong 1,35 * UsLL_{rms}$$

$$\Rightarrow UsLL_{rms} = \frac{\pi}{3 * \sqrt{2}} * UsDC$$

$$\cong 0,74 * UsDC$$

Abb. 135: Motor Diagramme - Umrechnung  $Us_{DC} \leftrightarrow Us_{LL\_rms}$ 

In dem Bildschirmfenster „LdLq Sets“ werden die Parameter für Ströme und Phasenverschiebungen eingegeben, aus denen die Ld/Lq Sets für die Berechnung Ergebniswerte der Strom-Theta-Matrix erzeugt werden. Mit dem Typ „Simple“ werden einfache Motor Diagramme für einzelne Betriebspunkte berechnet.

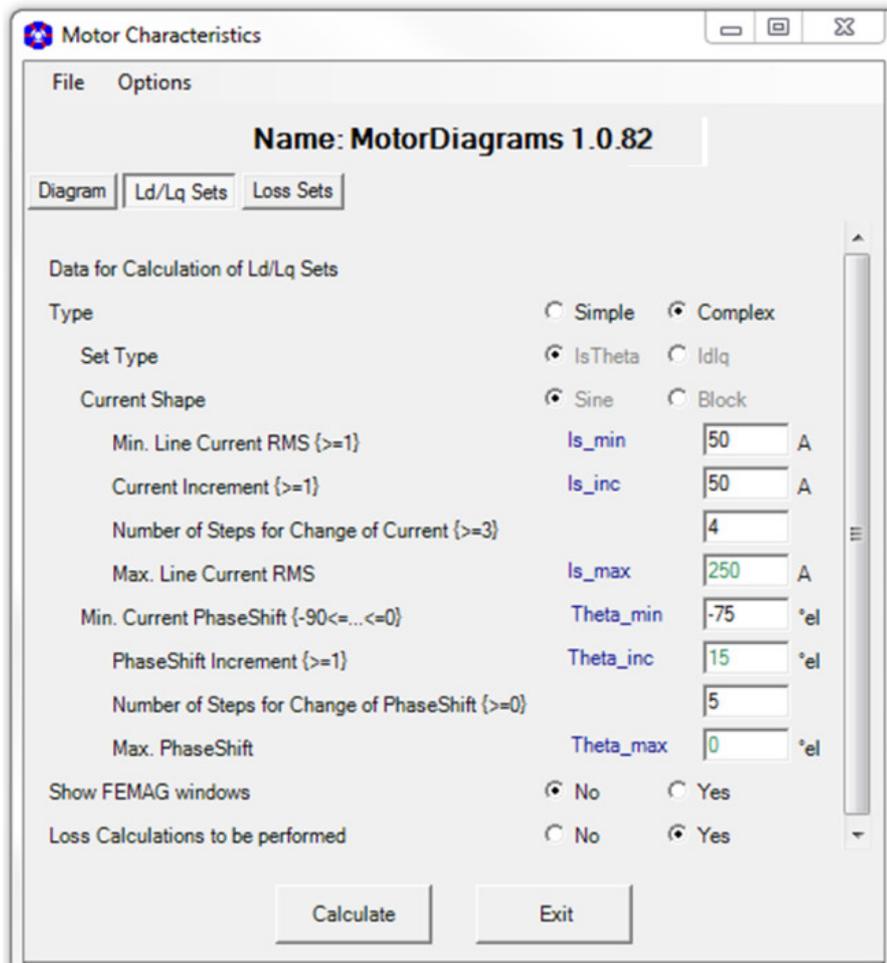


Abb. 136: Motor Diagramme - Parameter die Erzeugung der Ld/Lq Sets

Für die Berechnung der Verluste können die erforderlichen Parameter in dem Bildschirmfenster „Loss Sets“ eingegeben werden.

Abb. 137: Motor Diagramme - Loss Sets

Je Ld/Lq Set wird eine „Nominal Torque + Inductance Calculation“ mit anschließender Berechnung der Verluste durchgeführt.

Nach Berechnung der Verluste werden diese aus den einzelnen Modelldateien gelesen und ebenfalls in der „Basis“-Modelldatei gespeichert. Mit „*Re-Read Loss Data from Mot Files* = Yes“ werden die Verlustdaten erneut aus den Modelldateien gelesen.

Mit den eingegebenen Daten wird für jedes Ld/Lq-Set eine Modelldatei (mot-Datei) erzeugt und in dem in „*Working Folder*“ angegebenen Verzeichnis gespeichert. Sofern das Zeichen „\*“ angegeben ist wird das Verzeichnis verwendet, in dem auch das mit smartFEM geöffnete „Basis“-Modell gespeichert ist. Die jeweiligen Dateinamen werden zur Unterscheidung um die Ld/Lq Parameter Is und Theta ergänzt.

Name	Geändert	Größe	Typ
..	16.01.2015 15:42		Dateiordner
12S10P.mot	16.01.2015 12:50	27.292.384	MOT-Datei
12S10P_Is250_Theta75.mot	21.11.2014 14:42	137.275.575	MOT-Datei
12S10P_Is250_Theta60.mot	21.11.2014 14:42	137.295.392	MOT-Datei
12S10P_Is250_Theta45.mot	21.11.2014 14:41	137.373.965	MOT-Datei
12S10P_Is250_Theta30.mot	21.11.2014 14:41	137.481.746	MOT-Datei
12S10P_Is250_Theta15.mot	21.11.2014 14:40	137.600.077	MOT-Datei
12S10P_Is250_Theta0.mot	21.11.2014 14:40	137.655.491	MOT-Datei
12S10P_Is200_Theta75.mot	21.11.2014 14:39	137.116.842	MOT-Datei
12S10P_Is200_Theta60.mot	21.11.2014 14:39	137.250.716	MOT-Datei
12S10P_Is200_Theta45.mot	21.11.2014 14:38	137.315.431	MOT-Datei

Abb. 138: Motor Diagramme - Beispiel für Ordnerinhalt mit "Basis"- und "Verlust"-Modellen

#### 4.1.1 Durchführung der Berechnungen

Über die Schaltfläche wird die Erzeugung der Motor Diagramme ausgelöst und in folgenden Schritten durchgeführt:

Schritt 1: Sequentielle Erzeugung der Ld/Lq Sets aus den im Parameterfenster „Ld/Lq Sets“ angegebenen Daten. Dabei wird jeweils überprüft, ob der Set schon in der Ld/Lq Tabelle, die im smartFEM Hauptfenster über die Schaltfläche „Lq-Lq“ aufgerufen werden kann, enthalten ist und bereits berechnet wurde. Wenn das nicht der Fall ist, wird der Set in die Tabelle eingefügt und die Berechnung dieses Sets gestartet.

Schritt 2: Wenn alle Ld/Lq Sets berechnet sind, werden die Verlustberechnungen gestartet (d.h. Erzeugung der Modelldateien (mot-Dateien) je Ld/Lq Set und Durchführung der „Nominal Torque + Inductance Calculations“ mit anschließenden Berechnungen der Verluste. Dies erfolgt in parallelen Prozessen entsprechend der angegebenen Anzahl der dazu zu verwendenden Prozessor Kerne.

Im Fenster „smartFEM MultiRun“ wird eine Übersicht aller Ld/Lq Sets und deren aktueller Zustand bzgl. der Verlustberechnungen dargestellt. Hier kann auch noch die Anzahl der zu verwendenden Prozessorkerne von 1 bis maximal der in dem jeweiligen Rechner vorhandenen Kerne angepasst werden.

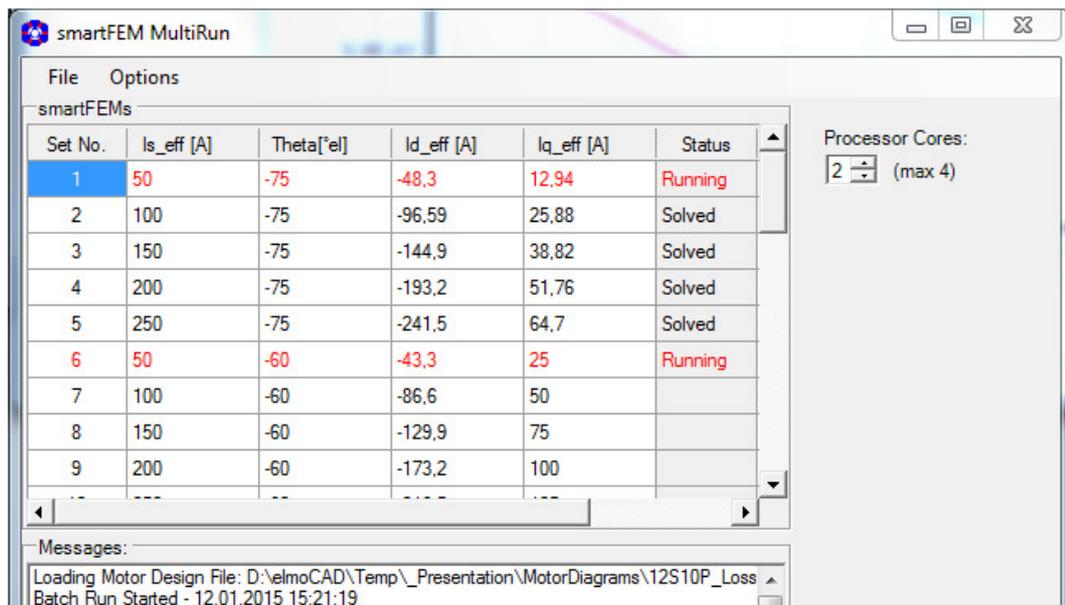


Abb. 139: Motor Diagramme - smartFEM MultiRun mit Übersicht zum aktuellen Bearbeitungsstand für die Verlustberechnungen

Die mit „MultiRun“ gestarteten smartFEM Prozesse laufen automatisch mit einer niedrigeren Priorität als der „smartFEM-Master- Prozess“, damit dieser nicht blockiert wird.

Schritt 3: Nach Abschluss von Schritt1 werden parallel zur Berechnung der Verluste die Motor Diagramme erzeugt. Sie können vom Benutzer bearbeitet werden und werden automatisch nach Berechnung der Verluste entsprechend ergänzt.

Basis sind die in dem Parameterfenster „Diagram“ eingegebenen Werte:

- Input Voltage Line to Line oder DC
- Motor Speed zur Berechnung der Mindestspannung Input Voltage Line to Line
- Electronic Current Limiter zur Strombegrenzung. Dies dient nur zur optischen Abgrenzung des Betriebsbereichs, der durch den jeweils maximalen Motorstrom erreicht werden kann.

Es werden folgende Diagramme generiert:

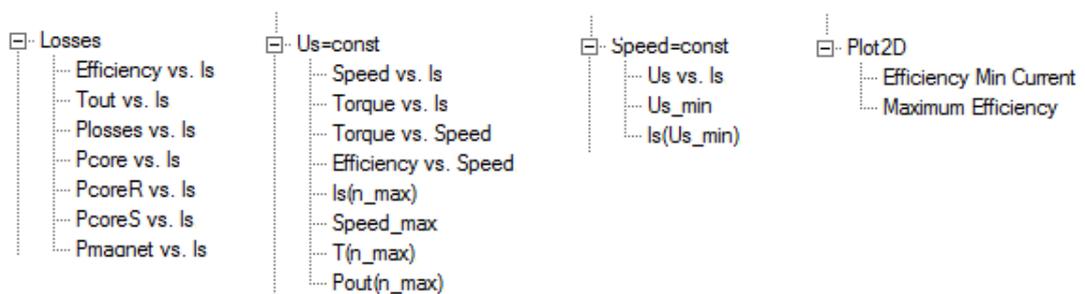


Abb. 140: Motor Diagramme - Diagrammarten

## 4.1.2 Diagrammbeispiele

### 4.1.2.1 Drehmoment vs. Drehzahl

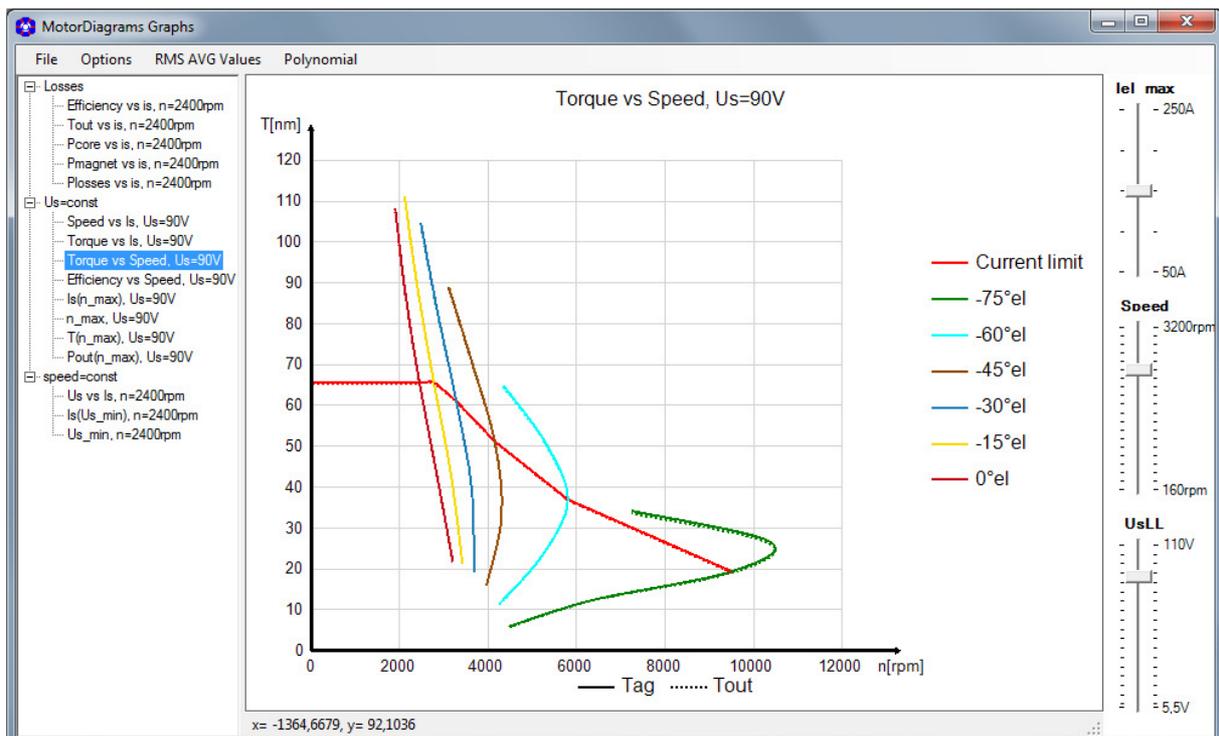


Abb. 141: Motor Diagramme - Drehmoment vs. Drehzahl

Die im Parameterfenster „Diagram“ eingegebenen Daten können nach Erzeugung der Diagramme mit in den Diagrammfenstern dargestellten Schiebern verändert werden, wobei die Diagramme sofort aktualisiert werden.

Die punktierten Linienzüge stellen die Kurvenverläufe nach Abzug der Eisen-, Magnet- und externen Verluste dar.

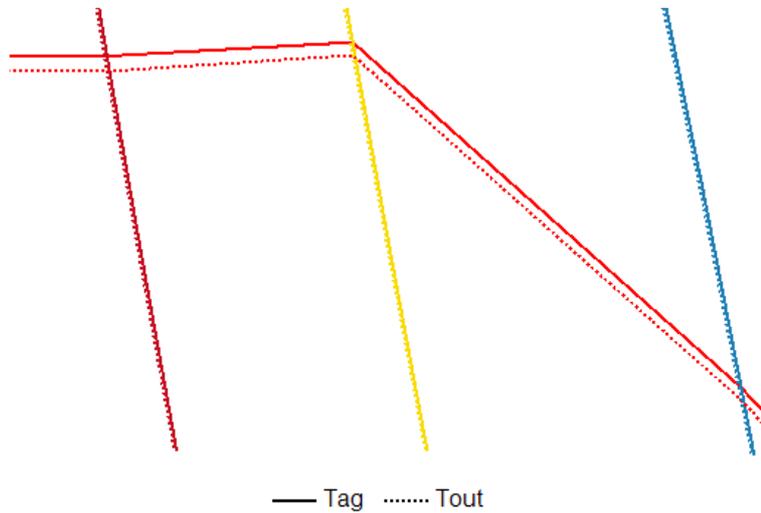


Abb. 142: Motor Diagramme - Drehmoment vs. Drehzahl mit Luftspalt- und abgegebenem Drehmoment

Mit der mittleren Maustaste bzw. dem Scrollrad können einzelne Graphen oder Gruppen hervorgehoben werden.

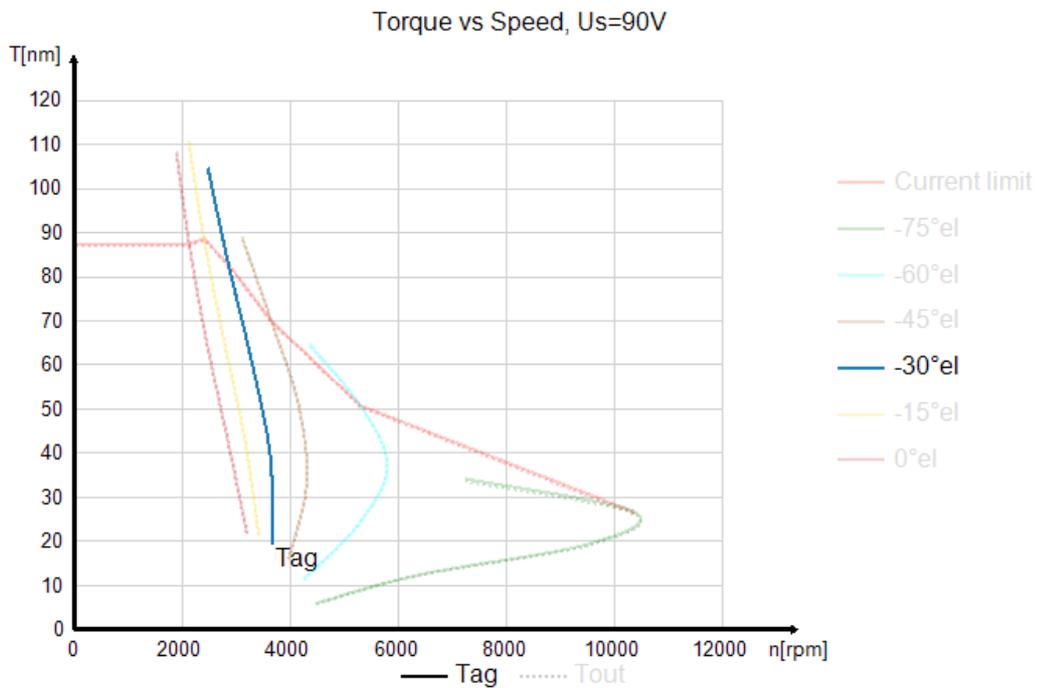


Abb. 143: Motor Diagramme - Beispiel für Hervorheben eines einzelnen Graphen

Jedes Diagramm kann für benutzerspezifische Anordnung auf dem Bildschirm vom Diagrammbaum gelöst werden.

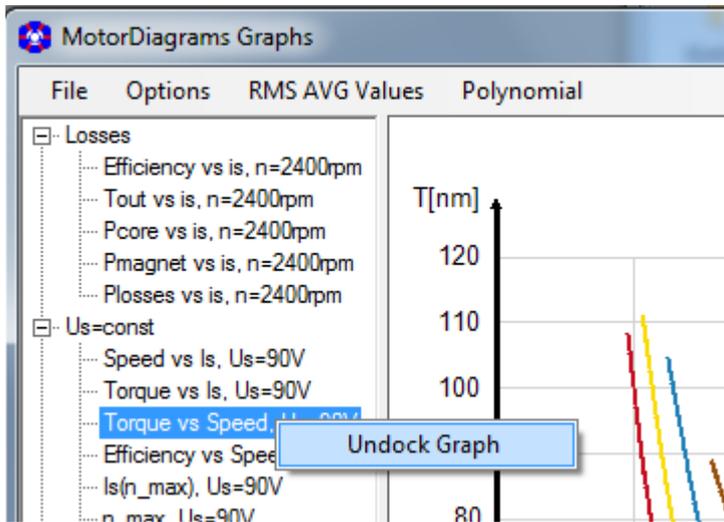


Abb. 144: Motor Diagramme - Beispiel für "Undock Graph"

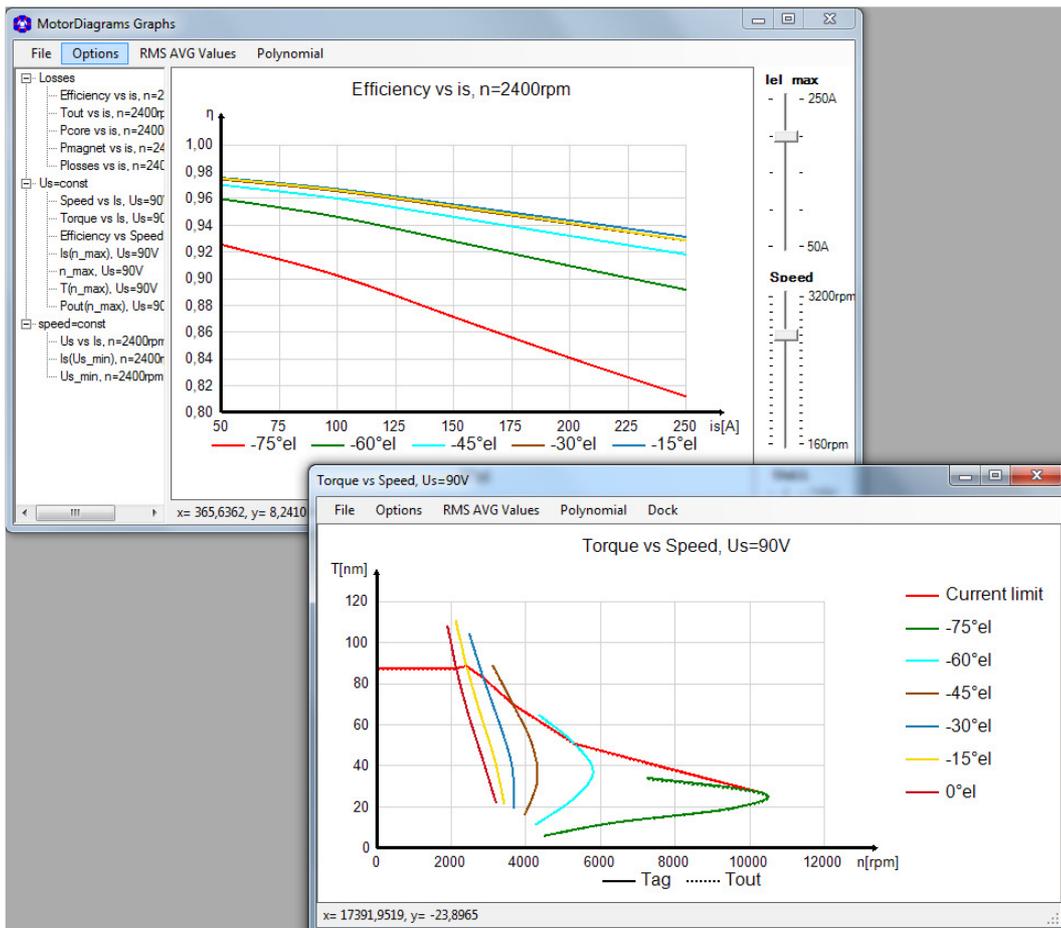


Abb. 145: Motor Diagramme - Beispiel für "Undock Graph"

In einigen Diagrammen werden zusätzlich Graphen für Minimalwerte von Strom und Spannung ausgegeben.

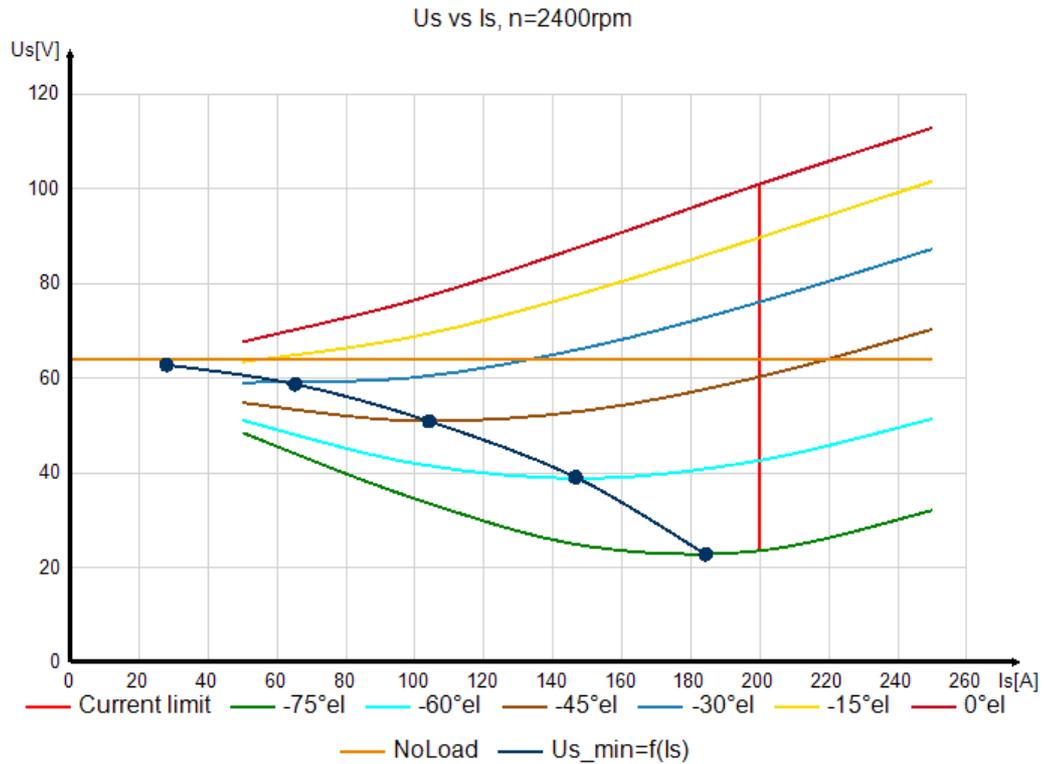


Abb. 146: Motor Diagramme - Minimalwerte der Spannung als Funktion des Stromes

#### 4.1.2.2 Wirkungsgraddiagramme als Konturplots

Zur Beurteilung des Wirkungsgrades als Funktion von Drehmoment und Drehzahl können zwei verschiedene Konturplots erzeugt werden:

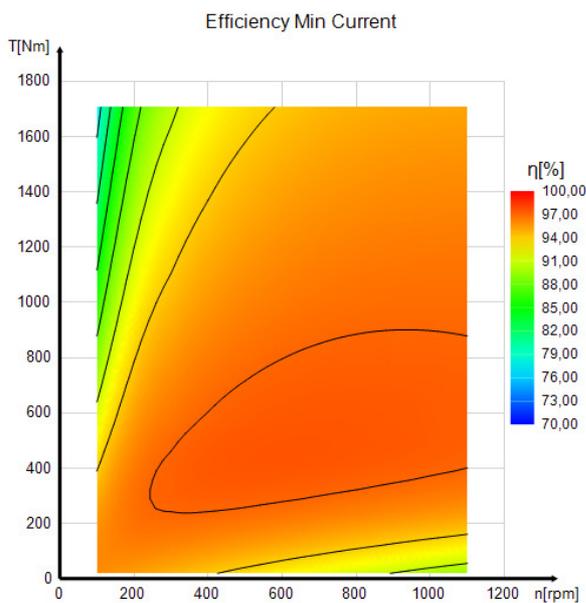


Abb. 147: Motor Diagramme - Wirkungsgrad bei minimalem Strom

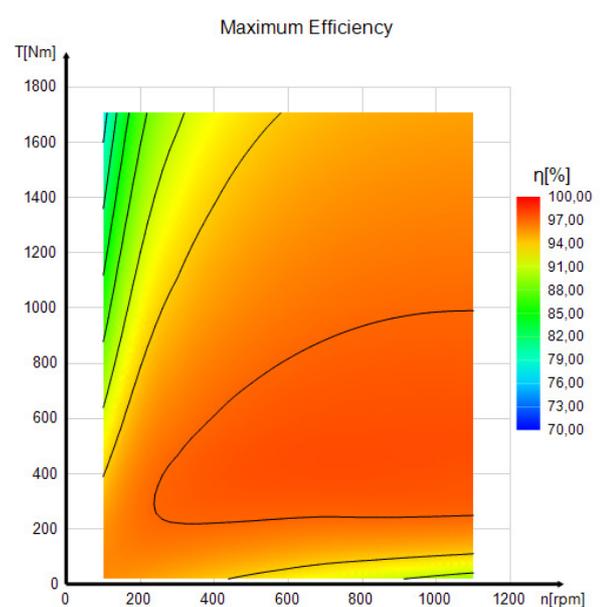


Abb. 148: Motor-Diagramme - maximaler Wirkungsgrad

In der Statuszeile werden die Diagrammwerte der jeweiligen Mausposition eingeblendet, z.B.  $x=336\text{rpm}$ ,  $y=331\text{Nm}$ ,  $\eta=97,3\%$

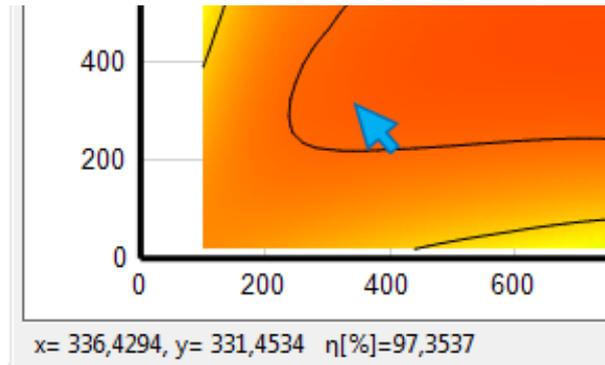


Abb. 149: Motor Diagramme - Diagrammwerte an der Mausposition

Mit Klick der rechten Maustaste in den Plot können verschiedene Einstellungen für den Plot vorgenommen werden. Der Name „Efficiency“ kann nicht verändert werden und wird nur smartFEM intern verwendet.

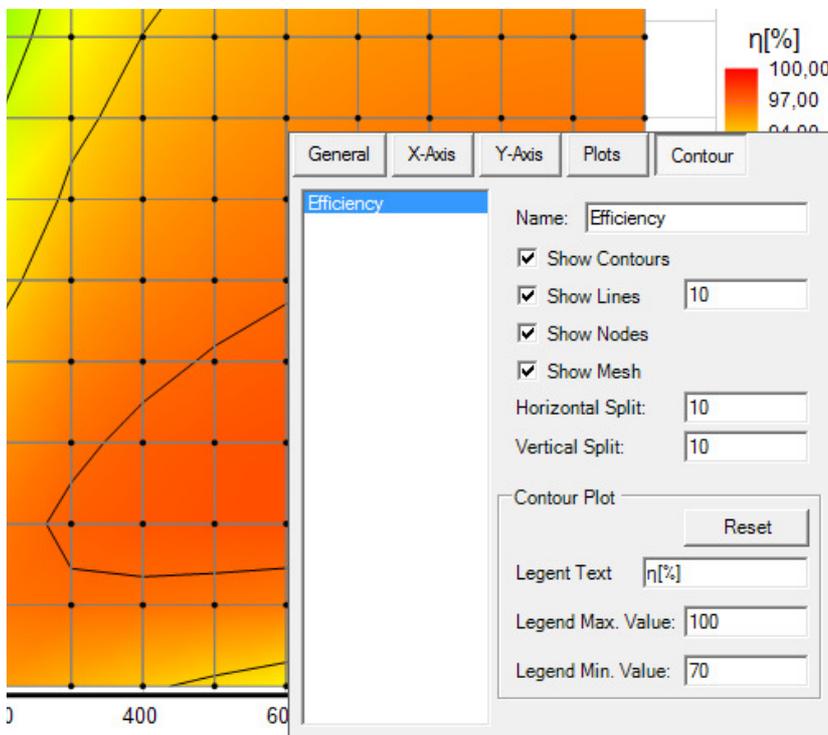


Abb. 150: Motor Diagramme - Einstellungen für Konturplots

### 4.1.2.3 Torque Speed Feed Loop Tabelle (MTPA - Maximum Torque per Ampere)

Um die Einstellparameter  $U_s$ ,  $I_d/I_q$ ,  $L_d/L_q$  und  $\Theta$  in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl bei minimalem Strom zu ermitteln, werden die Ergebnisse über das Menu „Options - Copy Torque Speed Feed Loop Table“ berechnet.

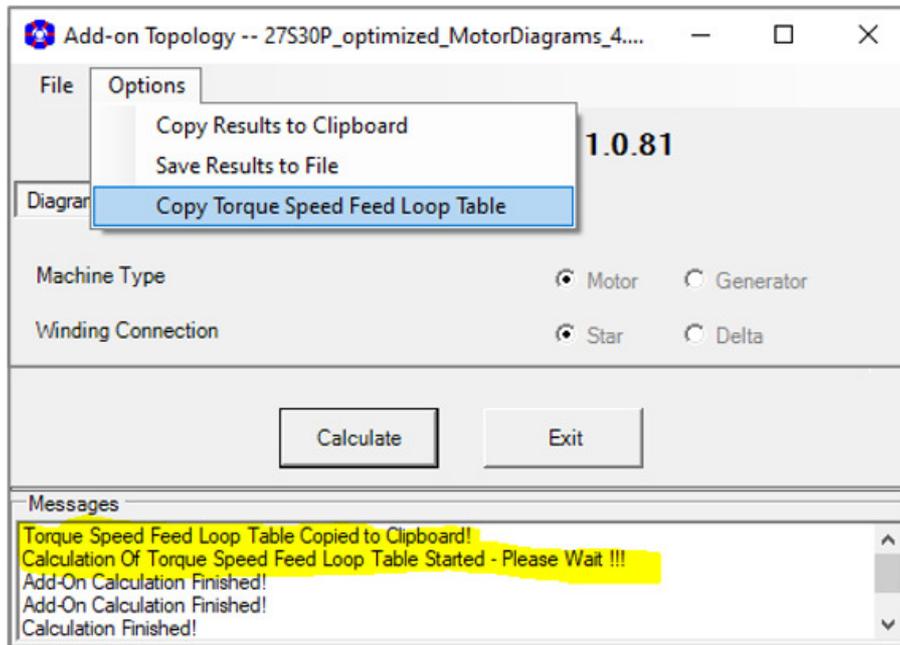


Abb. 151: MotorDiagrams - Copy Torque Speed Feed Loop Table

Nachdem die Berechnung der „Torque Speed Feed Loop Table“ durchgeführt wurde stehen die Daten im Clipboard zur Verfügung und können in anderen Anwendungen übernommen werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	O	P
1	Index	Tout [Nm]	n[rpm]	UsLL [V]	$\eta$ [%]	Is_eff [A]	Id_eff [A]	Iq_eff [A]	Ld [mH]	Lq [mH]		Theta[°el]
2	1	500	100	49,4	92,7	67,5	0,0	67,5	0,552	0,562	...	0
3	2	500	200	95,5	95,9	67,6	0,0	67,6	0,552	0,562	...	0
4	3	500	300	141,7	96,9	67,7	0,0	67,7	0,552	0,562	...	0
5	4	500	400	174,9	97,3	71,1	-22,3	67,5	0,560	0,568	...	-18,28
6	5	500	500	175,0	96,3	103,3	-79,6	65,9	0,572	0,579	...	-50,39
7	6	500	600	175,0	94,5	137,9	-120,3	67,5	0,575	0,583	...	-60,70
8	7	500	700	174,9	92,6	168,3	-153,2	69,6	0,577	0,585	...	-65,57
9	8	500	800	174,9	91,3	192,6	-179,2	70,6	0,578	0,586	...	-68,50
10	9	500	900	174,9	90,3	212,3	-200,1	70,9	0,578	0,587	...	-70,47
11	10	500	1000	174,9	89,5	228,6	-217,3	70,9	0,579	0,588	...	-71,92
12	11	500	1100	174,9	88,8	242,4	-231,8	70,8	0,579	0,588	...	-73,02
13	12	1000	100	55,2	86,5	136,7	0,0	136,7	0,527	0,553	...	0
14	13	1000	200	104,2	92,4	136,9	0,0	136,9	0,527	0,553	...	0
15	14	1000	300	153,2	94,5	137,2	0,0	137,2	0,527	0,553	...	0
16	15	1000	400	174,9	95,2	146,8	-54,8	136,2	0,552	0,567	...	-21,91
17	16	1000	500	174,9	94,1	183,5	-123,5	135,7	0,565	0,576	...	-42,30
18	17	1000	600	175,0	92,4	227,7	-181,8	137,1	0,570	0,580	...	-52,97
19	18	1000	700	175,0	90,7	270,8	-233,8	136,6	0,573	0,582	...	-59,71
20	19	1500	100	61,9	80,2	210,8	0,0	210,8	0,503	0,535	...	0
21	20	1500	200	114,9	88,6	211,2	0,0	211,2	0,503	0,535	...	0
22	21	1500	300	168,1	91,8	211,6	0,0	211,6	0,503	0,535	...	0
23	22	1500	400	174,9	92,1	239,6	-118,8	208,1	0,543	0,561	...	-29,71

Abb. 152: MotorDiagrams - Torque Speed Feed Loop Table

Zusätzlich steht dann in „MotorDiagrams Graphs“ ein zusätzlicher Plot2D „Efficiency Torque Speed Loop Table“ zur Verfügung:

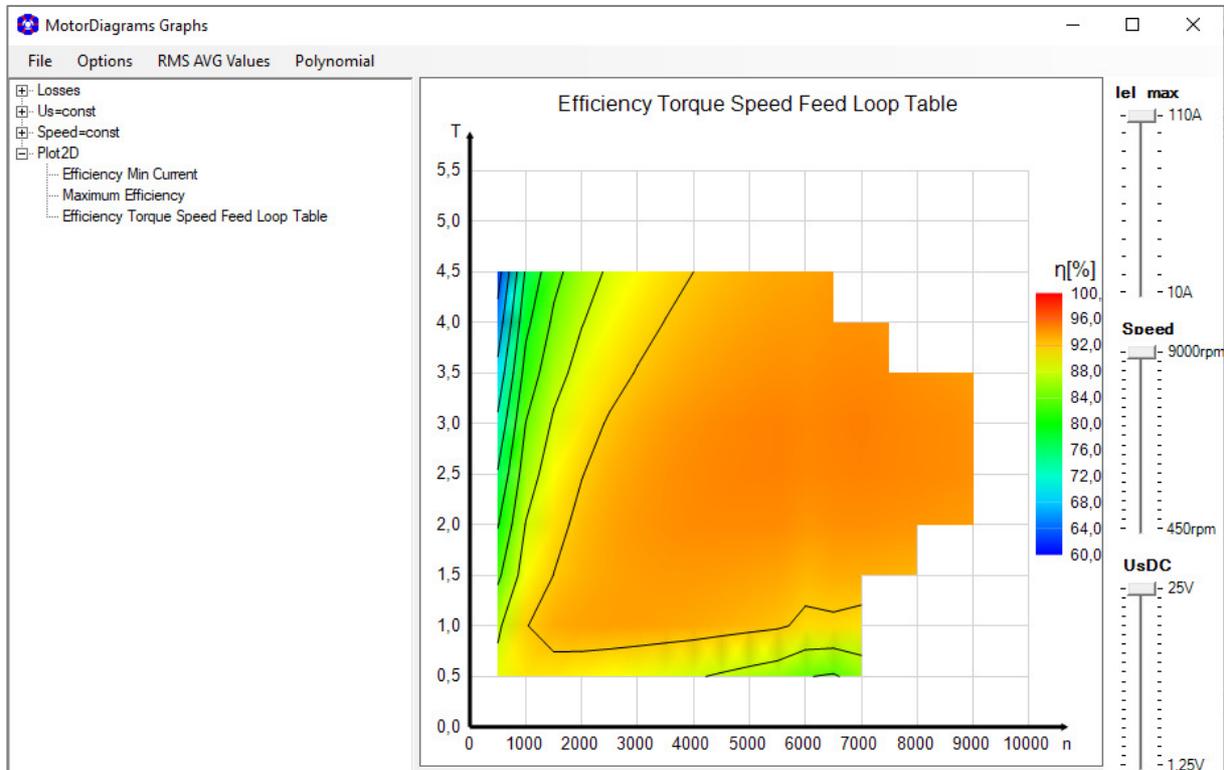
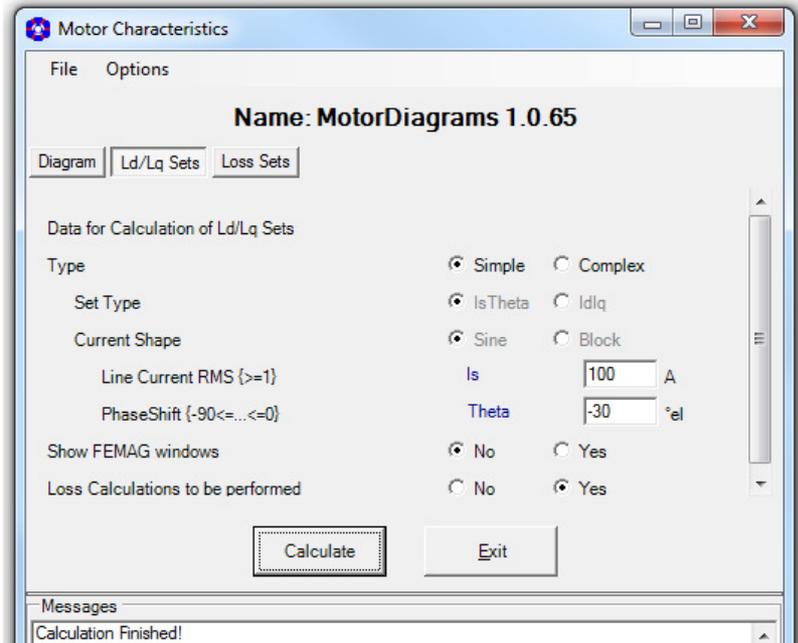


Abb. 153: MotorDiagrams - Plot2D "Efficiency Torque Speed Loop Table"

### 4.1.3 „Einfache“ Motor Diagramme

Für eine schnelle Beurteilung der Motoreigenschaften in einzelnen Betriebspunkten können „Einfache“ Motordiagramme erzeugt werden. Dazu muss in der Parametergruppe „Ld/Lq Sets“ „Simple“ ausgewählt werden, um dann die Daten für den entsprechenden Betriebspunkt einzugeben.



Es können folgende Diagramme erzeugt werden:

- [-] Us=const
  - ... Speed vs. Is
  - ... Torque vs. Is
  - ... Torque vs. Speed
- [-] Speed=const
  - ... Us vs. Is

Abb. 154: Motor Diagramme - Parametereingabe für "Einfache Motordiagramme"

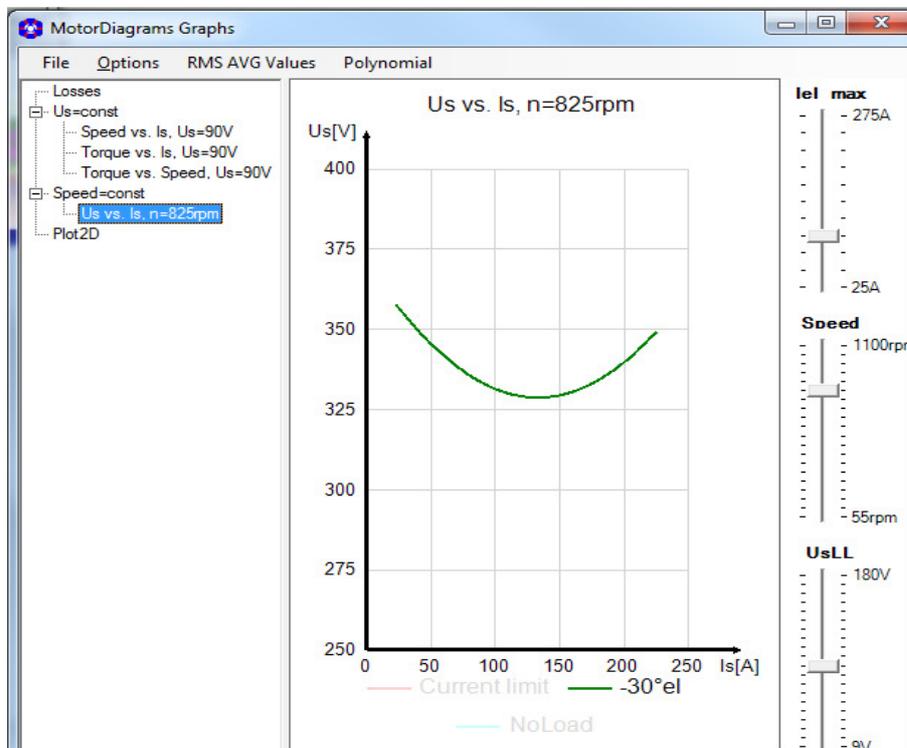


Abb. 155: Motor Diagramme - Beispiel "Einfaches" Motordiagramm Us vs. Is mit Speed = constant

## 4.2 Motor Steuerung

Zur Erzeugung von Daten für die Motorsteuerungselektronik dient das Add-On „MotorControl“. Nach Eingabe der Berechnungsparameter wird überprüft, welche Ld/Lq-Sets noch nicht gelöst sind und die entsprechenden Berechnungen dann ausgeführt.

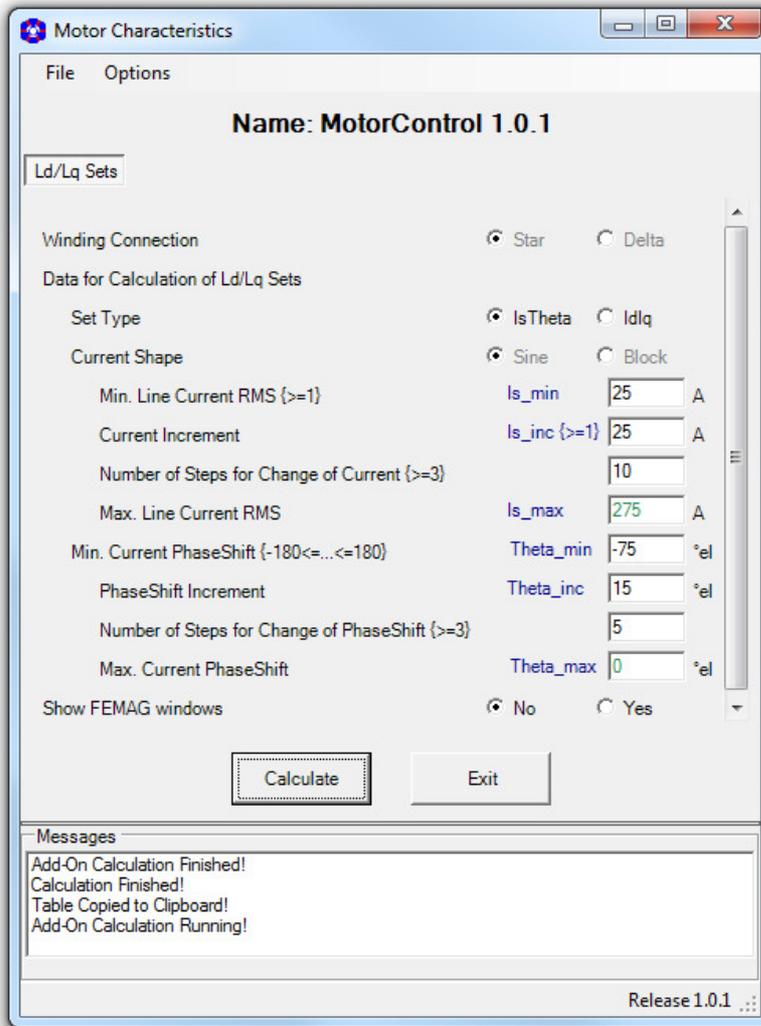


Abb. 156: Motor Control - Eingabe der Berechnungsparameter

Es werden verschiedene Plots erzeugt und die Ergebnisse können in den Zwischenspeicher und in einer Datei gespeichert werden.

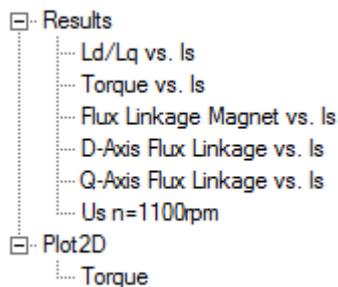


Abb. 157: Motor Control - Diagrammarten

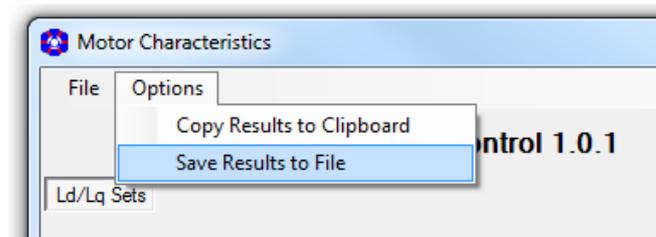


Abb. 158: Motor Control - Ergebnisspeicher

Diagrammbeispiele:

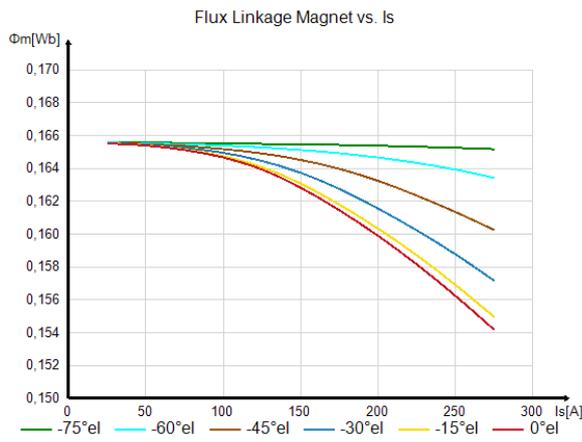


Abb. 159: Motor Control - Diagramm "Flux Linkage Magnet vs. Is"

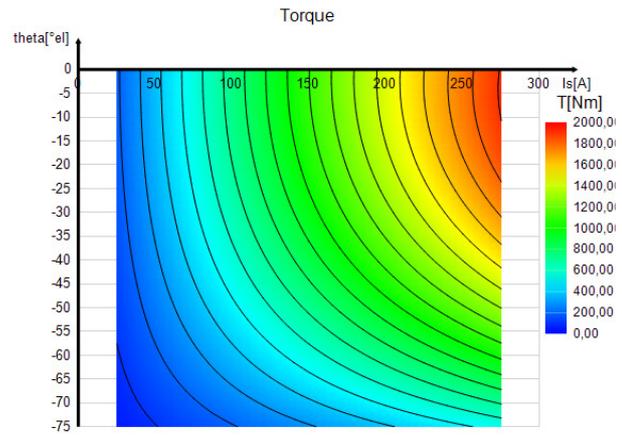


Abb. 160: Motor Control - Konturplot "Torque vs. Theta vs. Is"

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Index	Is_eff [A]	Theta[°el]	Id_eff [A]	Iq_eff [A]	Ld [H]	Lq [H]	FluxM_eff [Vs]	FluxD_eff [Vs]	FluxQ_eff [Vs]	TorqueFEM [Nm]
2	1	25	-75	-24,1	6,5	5,665E-04	5,709E-04	1,6560E-01	1,5192E-01	3,6938E-03	48,2
3	2	50	-75	-48,3	12,9	5,719E-04	5,752E-04	1,6557E-01	1,3795E-01	7,4438E-03	96,5
4	3	75	-75	-72,4	19,4	5,749E-04	5,787E-04	1,6556E-01	1,2391E-01	1,1233E-02	144,9
5	4	100	-75	-96,6	25,9	5,767E-04	5,813E-04	1,6552E-01	1,0982E-01	1,5046E-02	193,3
6	5	125	-75	-120,7	32,4	5,777E-04	5,837E-04	1,6550E-01	9,5743E-02	1,8886E-02	242,0
7	6	150	-75	-144,9	38,8	5,786E-04	5,857E-04	1,6547E-01	8,1644E-02	2,2738E-02	290,9
8	7	175	-75	-169,0	45,3	5,791E-04	5,872E-04	1,6543E-01	6,7537E-02	2,6595E-02	340,0
9	8	200	-75	-193,2	51,8	5,796E-04	5,881E-04	1,6539E-01	5,3424E-02	3,0443E-02	389,1

Abb. 161: Motor Control - Ergebnisdaten

### 4.3 Allgemeine Konturplots

Zur Erzeugung von Konturplots aus vom Benutzer zusammengestellten beliebigen Daten dient das Add-On „ContourPlot“.

Die Daten eines Konturplots müssen in einer tabellarischen Textdatei (\*.txt mit Tabulator getrennten Spalten oder im csv-Format) gespeichert sein. Die erste Zeile enthält Plot-, Spalten und Zeilenamen jeweils durch „\“ getrennt.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	i_eff\speed\eta	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
2		10	88,22	88,46	88,61	88,69	88,72	88,7	88,65	88,58
3		11	88,62	88,92	89,12	89,25	89,33	89,37	89,37	89,34
4		12	88,88	89,22	89,47	89,65	89,78	89,86	89,9	89,91
5		13	89,02	89,41	89,71	89,93	90,1	90,22	90,29	90,34
6		14	89,09	89,53	89,86	90,12	90,32	90,48	90,59	90,66
7		15	89,1	89,57	89,95	90,24	90,48	90,66	90,8	90,9
8		16	89,06	89,57	89,98	90,31	90,57	90,78	90,95	91,08
9		17	88,98	89,53	89,97	90,33	90,62	90,86	91,05	91,2
10		18	88,88	89,46	89,93	90,32	90,64	90,9	91,11	91,29
11		19	88,75	89,36	89,86	90,28	90,62	90,9	91,14	91,34
12		20	88,6	89,25	89,78	90,21	90,58	90,88	91,14	91,36

Abb. 162: Contur Plot - tabellarische Textdatei

Zur Erzeugung der Plots kann sowohl eine einzelne Textdatei oder auch ein Verzeichnis ausgewählt werden. Bei Angabe eines Verzeichnisses werden Plots von allen in dem Verzeichnis enthaltenen Dateien erzeugt.

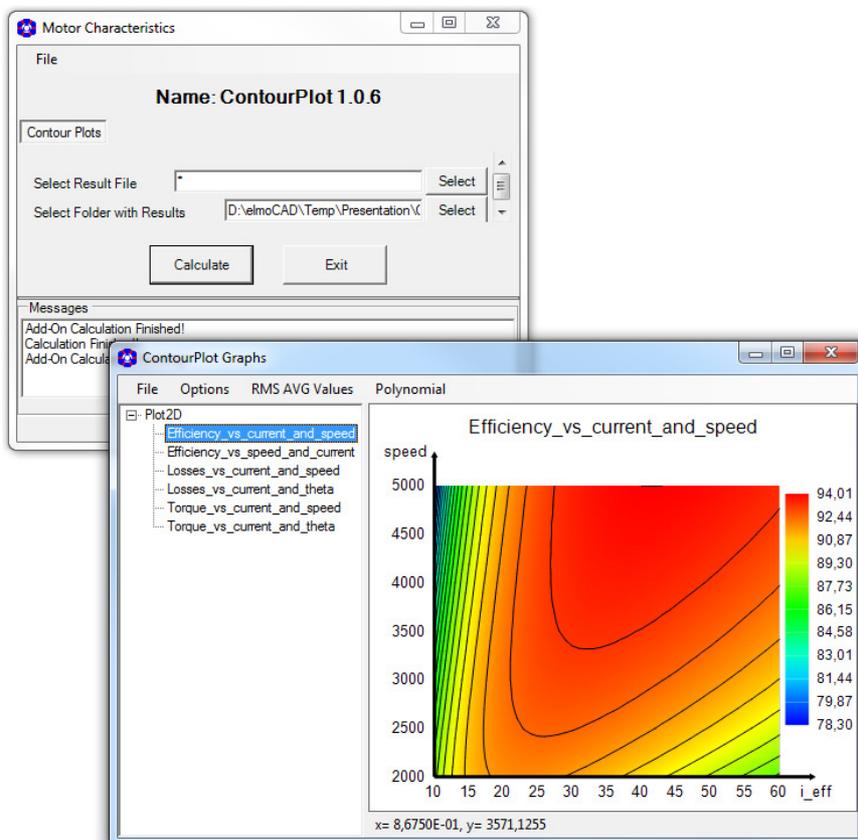


Abb. 163: ContourPlot - Beispiel "Wirkungsgrad vs. Strom vs. Geschwindigkeit"

#### 4.4 AC-Losses

Ermittlung der Wechselstromverluste in den Statorwicklungen die durch Skin- und Proximity Effekte hauptsächlich in großen elektrischen Maschinen hervorgerufen werden. Die Berechnungen erfolgen auf Basis der in *"Skin Effect in Large Polyphase Machines with Concentrated Windings"* von Falk Laube, Helmut Mosebach und Wolf-Rüdiger Candors angegebenen analytischen Algorithmen.

Für die Berechnung werden rechteckförmige Nuten mit Ein- und Zweischichtwicklungen und rechteckförmigen Leitern angenommen. Die Ströme  $I_1$  und  $I_2$  können unterschiedlichen Phasen gehören.

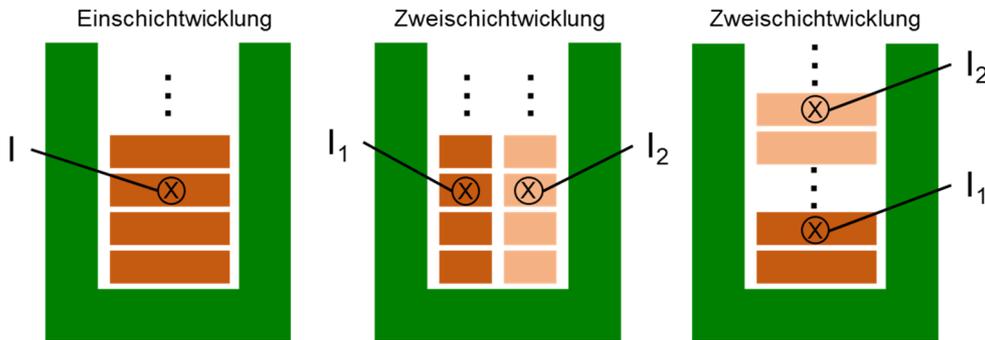


Abb. 164: AC-Losses - Nutmodell und Wicklungen

Gestartet wird das Modul in „MotorParameters“ über die Menüfolge „Add-ons - AC\_Losses“. In dem Tab „Basic“ kann angegeben werden, ob die für die Berechnungen erforderlichen Parameter manuell eingegeben werden oder von dem aktuell geöffneten smartFEM Maschinenmodell übernommen werden.

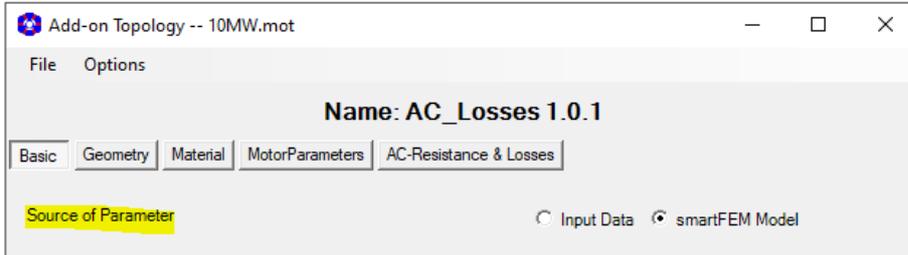


Abb. 165: AC-Losses - Source of Parameter

Nachfolgend werden die Parameter eines großen smartFEM Modells verwendet, dass nahezu rechteckige Statornuten aufweist:

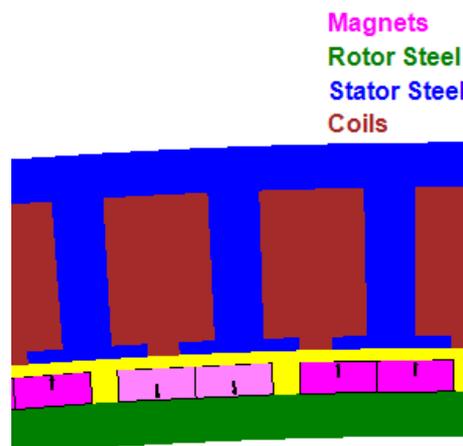


Abb. 166: AC-Losses - smartFEM Modell

Die aus dem smartFEM Modell übernommenen Daten werden in grüner Schrift dargestellt und können nicht verändert werden. Da im smartFEM Modell sind nicht alle benötigten Parameter vorhanden sind, müssen die entsprechenden Werte manuell ermittelt (ggfs. abgeschätzt) und ergänzt werden.

Für die Parameter in dem Tab „Geometry“ sind dies:

- Nutbreite
- Anzahl der Leiter übereinander
- Anzahl der Leiter nebeneinander

Abb. 167: AC-Losses - Geometry Parameter "smartFEM Model"

Sofern im Tab „Basic“ als „Source of Parameter“ „Input Data“ gewählt wurde, müssen bis auf „Number of Turns“ alle Parameter manuell ermittelt und eingegeben werden:

Abb. 168: AC-Losses - Geometry Parameter "Input Data"

„Material“ Parameter: „Conductivity at winding temperature“ wird aus den „Material“ Parameter des smartFEM Modells übernommen. Mit Angabe von „Conductivity at 20°C“ wird dann die Wicklungstemperatur errechnet, mit der das smartFEM Modell simuliert wurde.

Abb. 169: AC-Losses - Material Parameter "smartFEM Model"

Sofern in „Basic“ als „Source of Parameter“ „Input Data“ gewählt wurde, kann die Wicklungstemperatur bei der die Wechselstromverluste ermittelt werden ebenfalls manuell eingegeben werden. Die Leitfähigkeit bei dieser Temperatur wird dann berechnet.

Basic	Geometry	Material	MotorParameters	AC-Resistance & Losses
Slot				
Conductivity at 20°C	620	56	E+6 S/m	
Thermal coefficient	$\alpha$	3,93	E-3/K	
Winding temperature	T	93,873	°C	
Conductivity at winding temperature	6T	43,4	E+6 S/m	

Abb. 170: AC-Losses - Material Parameter "Input Data"

„MotorParameters“ werden immer von dem smartFEM Modell übernommen und dienen zur Information für den Anwender.

Basic	Geometry	Material	MotorParameters	AC-Resistance & Losses
Nominal Speed	n	10	rpm	
Frequency	f	16,666	Hz	
Line current rms	I <sub>rms</sub>	9422,9	A	
Phase shift of currents (2 coils per slot, different phases)	$\beta$	60	°el	

Abb. 171: AC-Losses - Motor Parameter

In dem Fenster „AC-Resistance & Losses“ werden die Ergebnisse für die Wechselstromwiderstände der Wicklung und die Wechselstromverluste ausgegeben.

The screenshot shows a 3D model of a motor slot with components color-coded: Air (white), Magnets (yellow), Rotor Steel (green), Stator Steel (blue), and Coils (red). The results window is titled "Name: AC\_Losses 1.0.1" and contains the following data:

Name: AC_Losses 1.0.1				
Basic	Geometry	Material	MotorParameters	AC-Resistance & Losses
SignificantDigits	Sd	5		
Phase Resistance				
at 20°C	R <sub>ph20</sub>	0,39269	mΩ	
at winding temperature T	R <sub>ph</sub>	0,50843	mΩ	
Total Average AC phase resistance	AC_R <sub>ph_avg</sub>	0,60469	mΩ	
AC resistance of one conductor at slot opening	AC_R <sub>con_ActLen_max</sub>	0,002803	mΩ	
Winding Losses (at selected Temperature)				
AC-Losses not included	P <sub>wdgT</sub>	135,41	kW	
Average AC-Losses	AC_Losses_avg	25,635	kW	
AC-Losses included	AC_P <sub>wdgT</sub>	161,04	kW	
Prefix of loss values (10 <sup>n</sup> Prefix (e.g. -3=mili, 0=base unit, 3=kilo)	PreFix_Losses	3		

Abb. 172: AC-Losses - Ergebnisse

Hinweis:

- Auf Grund des analytischen Modells und der zum Teil nicht korrekten geometrischen Abmessungen von Nut und Leitern in Bezug auf das smartFEM Modell stellen die Ergebnisse der Wechselstromverluste in den Leitern nur grobe Näherungswerte dar, die mit einem gewissen Fehler behaftet sind. Für genauere Ergebnisse müssen die Berechnungen transient durchgeführt werden. Dies ist mit dem aktuell verwendeten FEM Solver FEMAG für eine statische 2D-Simulation der elektromagnetischen Felder nicht möglich.

## 5 Simulation im Batch

Batch-Dateien ermöglichen die sequentielle und parallele Durchführung von mehreren Simulationen. Die jeweiligen Befehlszeilen für die durchzuführenden Simulationen können mit einem Texteditor erzeugt werden. Es ist keine bestimmte Reihenfolge der Parameter vorgeschrieben.

### 5.1 Beispiel für Batch-Datei mit sequentieller Durchführung der Simulationen

```
ECHO OFF
```

```
ECHO smartFEM Batch Mode running, press "CTRL+C" to stop Batch Mode
```

```
REM smartFEM Batch Commands for smartFEM Release 2.5.17 and higher
```

```
REM
```

```
REM [c:\...\]smartFEM.exe [help | /help | /?] [C:\...\]filename.mot -parameter
```

```
REM
```

```
REM If smartFEM.exe and/or mot-file are stored in the folders assigned with  
REM smartFEM settings, then the complete paths are optional.
```

```
REM
```

```
REM To display this file as help text [help//help/?] can be used.
```

```
REM Parameter:
```

```
REM
```

```
REM "filename.mot" must be the first parameter, others can be in random sequence.
```

```
REM General options:
```

```
REM
```

```
REM -log Text file with log information will be saved with name "filename.log"  
REM in the same folder as the mot-file .
```

```
REM
```

```
REM -hidefemag FEMAG windows will be closed and not shown.
```

```
REM
```

```
REM -multi1|multi2|... FEMAG will run on CPU (or Core) 1|2|...
```

```
REM Preprocessing options:
```

```
REM
```

```
REM -top Load mot file with rotor and stator topology saved in mot-file.
```

```
REM
```

```
REM -toprotor Load mot file with rotor topology saved in mot-file.
```

```
REM
```

```
REM -topstator Load mot file with stator topology saved in mot-file.
```

```
REM
```

```
REM -dxf Refreshing of both rotor and stator dxf-files is performed.
```

```
REM
```

```
REM -dxfroter Refreshing of rotor dxf-file is performed.
```

```
REM
```

```
REM -dxfstator Refreshing of stator dxf-file is performed.
```

```
REM
```

```
REM -nophaseshiftcalculation no phase shift calculation will be performed
```

```
REM Calculation options:
```

```
REM
```

```
REM -cogging Cogging Torque + BEMF Calculation.
```

```
REM
```

```
REM -nominal Nominal Torque + Inductance Calculation.
```

REM  
REM -is400:-40 Current sine excitation is\_rms=400A and phase\_shift\_theta=-40°el  
REM  
REM -iq306:-257 Current sine d/q excitation with iq\_rms=306A and id\_rms=-257A)  
REM  
REM -ldlq Calculation of user defined Ld/Lq sets.  
REM  
REM -losses Calculation of losses with smartFEM "Operational Speed" and  
REM Speed Range defined inside "MotorParameters-Postprocessing-  
REM Losses", loss results and loss data are saved.  
REM  
REM -onlylossresults Same as "-losses" but only loss results are saved.  
REM  
REM -ls=100[:200:300:...]  
REM Calculation of losses at different speed with named speed  
REM -ls=FirstSpeed and optional :SecondSpeed:ThirdSpeed:etc.  
REM  
REM -lsr=0:3000:11  
REM Calculation of losses at different speed with speed range  
REM -lsr=FirstSpeed>LastSpeed:NumberOfSteps.  
REM  
REM -ldlq Calculation of user defined sets of Ld/Lq.

REM Calculation results options:  
REM  
REM -export Run batch command and export results from mot-file  
REM to text file with name "filename.txt".  
REM  
REM -export exportfilename.txt Export of results to user defined "exportfilename.txt" file.  
REM  
REM -export folderwithmotfiles Run all batch command and export of results from each mot-file  
REM inside folder "...\\folderwithmotfiles" to "FolderResults.txt"  
REM saved in the same folder.  
REM  
REM -exportonlyoverview Run batch command and export only overview table results  
REM from mot-file to text file with name "filename.txt"  
REM  
REM -save [newmotfilename] Open mot-file, refresh results and save motfile optional  
REM with new mot-file name.

REM Preprocessing will be automatically performed if required.  
REM  
REM Nominal Torque Calculation will be automatically performed if losses option is selected.  
REM  
REM ! For correct Nominal Torque results phase angle between BEMF and  
REM ! Current has to be checked before calculations are performed, when  
REM ! Sinusoidal or User Defined Current is selected.

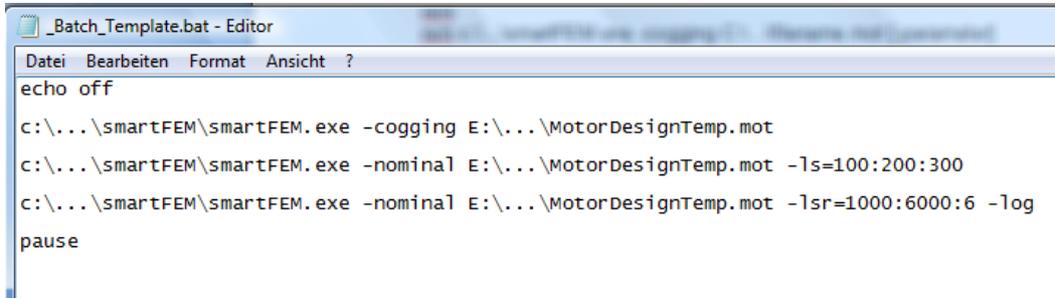
REM Examples:  
REM 1. Perform cogging calculation and write messages to log.  
REM D:\...\smartFEM.exe D:\elmoCAD\temp\MotorDesign.mot -cogging -log

REM 2. Perform nominal calculation and calculate losses for speed 7000 rpm  
REM D:\...\smartFEM.exe D:\elmoCAD\temp\MotorDesign.mot -nominal -ls=70000

REM 3. Perform nominal calculation and calculate losses for speed 0 rpm until 7000 rpm in steps  
REM of 1000 rpm for all mot files inside folder and export results to "FolderResults.txt"

```
REM D:\...\smartFEM.exe D:\elmoCAD\temp\modelfolder -export -nominal -losses -lsr=0:7000:8
```

```
ECHO OFF  
POPD  
PAUSE
```



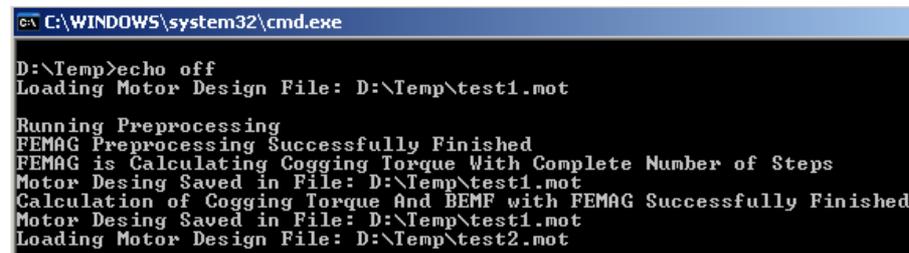
```
_Batch_Template.bat - Editor  
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?  
echo off  
c:\...\smartFEM\smartFEM.exe -cogging E:\...\MotorDesignTemp.mot  
c:\...\smartFEM\smartFEM.exe -nominal E:\...\MotorDesignTemp.mot -ls=100:200:300  
c:\...\smartFEM\smartFEM.exe -nominal E:\...\MotorDesignTemp.mot -lsr=1000:6000:6 -log  
pause
```

Abb. 173: Parametervariationen - Beispiel Batch-Datei

Wenn die mot-Dateien in dem mit „*smartFEM Settings*“ angegebenen Temp-Verzeichnis gespeichert sind, können die Pfadangaben entfallen.

Die Funktion „Preprocessing“ wird sofern erforderlich automatisch ausgeführt.

Nach Start der Batch-Datei wird ein DOS-Fenster geöffnet, in dem der Ablauf dokumentiert wird.



```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe  
D:\Temp>echo off  
Loading Motor Design File: D:\Temp\test1.mot  
Running Preprocessing  
FEMAG Preprocessing Successfully Finished  
FEMAG is Calculating Cogging Torque With Complete Number of Steps  
Motor Desing Saved in File: D:\Temp\test1.mot  
Calculation of Cogging Torque And BEMF with FEMAG Successfully Finished  
Motor Desing Saved in File: D:\Temp\test1.mot  
Loading Motor Design File: D:\Temp\test2.mot
```

Abb. 174: Parametervariationen - Beispiel Batch-Log-Datei

Das DOS-Fenster wird nach Abarbeitung aller Befehlszeilen geschlossen, sofern nicht das DOS-Kommando „pause“ in der letzten Befehlszeile verwendet wird. Die von smartFEM in das Dos-Fenster ausgegebenen Meldungen werden in einer log-Datei gespeichert, wenn der Parameter -log verwendet wurde.

## 5.2 Export von Ergebnisdaten in eine Textdatei

Die in „Results“ angezeigten Ergebnisdaten werden mit Hilfe des Batch-Befehls „-export“ in eine Textdatei exportiert, die wiederum in einer Tabellenkalkulation für weitere individuelle Berechnungen geöffnet werden kann. Es gibt zwei Möglichkeiten für den Export:

- a) Export der Ergebnisdaten eines Maschinenmodells (\*.mot Datei)

Kommando: -export c:\...\MotorDesign1.mot c:\...\MotorDesign1\_Results.txt

Sofern keine Pfade angegeben werden, wird die Exportdatei in dem Verzeichnis gespeichert, in dem sich die mot-Datei befindet.

- b) Export der Ergebnisdaten eines Maschinenmodells (\*.mot Datei)

Kommando: -export c:\...\MotorVarianten Exported\_Results.txt

In diesem Beispiel werden die Ergebnisse aller sich in dem Verzeichnis c:\...\MotorVarianten befindenden Maschinenmodelle in die Datei Exported\_Results.txt exportiert

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	k
1	Export\Motorvariante_1.mot										
2	Cogging Torque			Flux per Phase Without Applied Current				BEMF per Phase			
3	max[Nm]	0,0069		max[Vs]	0,2175558	0,2175558	0,2175558		max[V]	140,183844	140,
4	min[Nm]	-0,0071		min[Vs]	-0,21755811	-0,21755811	-0,21755811		min[V]	-140,121843	-140,1
5	AVG[Nm]	-4,48E-05		AVG[Vs]	7,52E-08	3,90E-08	-5,89E-09		AVG[V]	-3,95E-16	2,3
6	RMS[Nm]	0,00413039		RMS[Vs]	0,15234267	0,15234272	0,15234271		RMS[V]	95,8105534	95,81
7	Ripple[%]	-31274,4476		Ripple[%]					Ripple[%]		
8	$\alpha$ [°mech]	Tcogg[Nm]		$\alpha$ [°mech]	Flux_U[Vs]	Flux_V[Vs]	Flux_W[Vs]		$\alpha$ [°mech]	BEMF_U[V]	BEMF_
9	0	2,20E-05		0	0,18473868	-1,20E-05	-0,18472713		0	-70,0141698	139,7
10	0,5	0,0009475		0,5	0,18277686	0,00386484	-0,18664296		0,5	-71,3753281	139,5
11	1	0,001885		1	0,18078018	0,00774081	-0,18852372		1	-72,6993401	139,4
12	1,5	0,002775		1,5	0,17873583	0,01161468	-0,1903545		1,5	-74,0547646	139,5
13	2	0,003625		2	0,17666292	0,01548183	-0,19214937		2	-75,504705	139,6
744											
745											
746	Export\Motorvariante_3.mot										
747	Torque With Applied Current			Cogging Torque			Current per Phase				
748	max[Nm]	1,76		max[Nm]	0,00686		max[A]	2,99999998	2,99999998	2,99999998	
749	min[Nm]	1,49		min[Nm]	-0,0069		min[A]	-2,99271729	-2,99271721	-2,99271736	
750	AVG[Nm]	1,60333333		AVG[Nm]	-1,41E-05		AVG[A]	-9,18E-16	1,97E-17	1,24E-15	
751	RMS[Nm]	1,60602823		RMS[Nm]	0,00412153		RMS[A]	2,12132034	2,12132034	2,12132034	
752	Ripple[%]	16,8399168		Ripple[%]	-97419,7609		Ripple[%]				
753	$\alpha$ [°mech]	T[Nm]		$\alpha$ [°mech]	Tcogg[Nm]		$\alpha$ [°mech]	i_U[A]	i_V[A]	i_W[A]	
754	0	1,51		0	1,61E-05		0	-1,49968762	2,99999998	-1,50031326	
755	4	1,49		4	0,00637		4	-1,84670018	2,97085422	-1,12415517	
756	8	1,52		8	0,00465		8	-2,15776883	2,88388416	-0,72611668	
757	12	1,63		12	-0,00195		12	-2,42683896	2,74078258	-0,31394515	
758	16	1,74		16	0,00125		16	-2,64867343	2,54433479	0,10433697	

Abb. 175: Simulation im Batch: Exportierte Ergebnisdatei

### 5.3 Parallel Computing

Sofern auf einem PC mehrere Prozessorkerne vorhanden sind, können mittels Batch verschiedene Berechnungsläufe zur parallelen Abarbeitung auf die vorhandenen Prozessorkerne verteilt werden. Damit kann insbesondere dann erheblich an Rechenzeit eingespart werden, wenn z.B. eine Nominal Torque Calculation mehrere Stunden dauert.

Als beispielhafte Templates sind im Verzeichnis ...\\smartFEM\\Batch zwei Batchdateien enthalten.

#### 5.3.1 \_Batch\_MultiRun.bat

Hier werden wie in Batch.bat die Berechnungen definiert und festgelegt auf welchem Prozessorkern sie ablaufen sollen:

```
echo off
rem smartFEM calculations with different mot-files, whereby parallel
rem computing on the existing CPU's or Core's of the PC is performed
rem
rem This batch must bestarted via _Batch_MultiRunStart.bat
rem
.
.
.
rem Nominal Torque calculation will be automatically performed before
rem calculations if neccessary.
.
.
rem example:
rem      motfile-1 ... motfile-4 are running parallel on 4 cores
rem      motfile-5 ... motfile-8 are running parallel on 4 cores
rem
rem      motfile-5 is running in sequence after motfile-1 is finished
rem      motfile-6          "          motfile-2          "
rem      motfile-7          "          motfile-3          "
rem      motfile-8          "          motfile-4          "

set exepath=C:\\Users\\elmoCAD\\smartFEM
set motpath=C:\\Users\\elmoCAD\\Temp

set motfile-1=MotorDesignTemp_1.mot
set motfile-2=MotorDesignTemp_2.mot
set motfile-3=MotorDesignTemp_3.mot
set motfile-4=

set motfile-5=
set motfile-6=
set motfile-7=
set motfile-8=

if %1 == -multi1 goto :CPU1
if %1 == -multi2 goto :CPU2
if %1 == -multi3 goto :CPU3
if %1 == -multi4 goto :CPU4

Goto :End
```

```
rem *****
:CPU1
echo mot-file running on CPU1
echo on
%exepath%\smartFEM.exe -nominal %motpath%\%motfile-1% %1 -log -hidefemag
%exepath%\smartFEM.exe -nominal %motpath%\%motfile-5% %1 -log -hidefemag

Goto End

rem *****
:CPU2
echo mot-file running on CPU2
echo on
%exepath%\smartFEM.exe -nominal %motpath%\%motfile-2% %1 -log -hidefemag
%exepath%\smartFEM.exe -nominal %motpath%\%motfile-6% %1 -log -hidefemag

Goto End

rem *****
:CPU3
echo mot-file running on CPU3
echo on
%exepath%\smartFEM.exe -nominal %motpath%\%motfile-3% %1 -log -hidefemag
%exepath%\smartFEM.exe -nominal %motpath%\%motfile-7% %1 -log -hidefemag

Goto End

rem *****
:CPU4
echo mot-file running on CPU4
echo on
%exepath%\smartFEM.exe -nominal %motpath%\%motfile-4% %1 -log -hidefemag
%exepath%\smartFEM.exe -nominal %motpath%\%motfile-8% %1 -log -hidefemag

Goto End

rem *****
:End
pause
```

Der Batch ist entsprechend der auf dem jeweiligen PC verfügbaren Anzahl von Prozessorkernen anzupassen.

Dieser Batch muss mit `_Batch_StartMultiRun.bat` gestartet werden!

### 5.3.2 \_Batch\_StartMultiRun.bat

Batch ruft den vorher beschriebenen Batch \_Batch\_MultiRun.bat mehrfach entsprechend der definierten Anzahl Prozessorkerne ohne Warten auf vollständige Durchführung auf. Dabei wird jeweils der zu verwendenden Prozessorkern als Parameter übergeben.

Der Batch muss ebenfalls hinsichtlich der verfügbaren Anzahl von Prozessorkernen des PC's angepasst werden.

```

echo off
rem smartFEM calculations with different mot-files, whereby parallel
rem computing on the existing CPU's or Core's of the PC is performed
rem
rem This batch will start _Batch_MultiRunStart.bat where mot.files and
rem CPU's have to be assigned
rem

pushd

start /min C:\Users\elmoCAD\Temp\_Batch_MultiRun.bat -multi1
start /min C:\Users\elmoCAD\Temp\_Batch_MultiRun.bat -multi2
start /min C:\Users\elmoCAD\Temp\_Batch_MultiRun.bat -multi3
start /min C:\Users\elmoCAD\Temp\_Batch_MultiRun.bat -multi4

popd
exit

```

### 5.3.3 smartFEM

smartFEM kann auch gezielt mit folgendem Kommando auf einem bestimmten oder mehreren Prozessorkernen gestartet werden:

```
smartFEM.exe -multi# (# = Nummer des Prozessorkerns)
```

Damit können dann auch parallel ablaufende Simulationen durchgeführt werden.

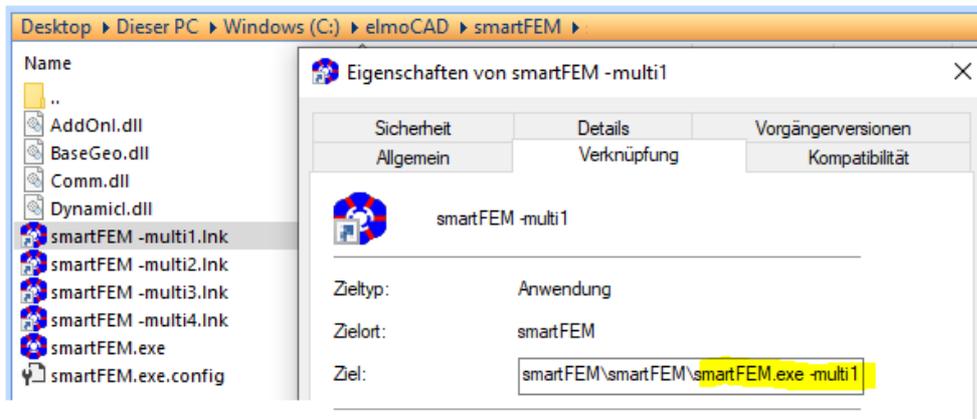


Abb. 176: Parallel Computing - Zuweisung von Prozessorkernen

## 6 Spezielle Module

### 6.1 PM - Magnetization - Inner Rotor

Der Motor Typ „PM - Magnetization - Inner Rotor“ dient zur Simulation der Aufmagnetisierung und der sich einstellenden Remanenz der Magnete eines Rotors, der mit unmagnetisiertem Magnetmaterial bestückt und anschließend mit Hilfe einer Magnetisierungsspule magnetisiert wird. Zur Berechnung der Remanenz sind zwei Verfahren implementiert: a) FEM-Berechnung mit FEMAG und b) analytische Berechnung, die dann verwendet werden kann, wenn der Eisenkern der Magnetisierungsspule nicht aus geblechtem Material besteht und sehr hohe Wirbelströme auftreten.

Es kann jeder in smartFEM selektierbare Rotor für Innenläufer verwendet werden. In einem ersten Schritt wird der Rotor wie gewohnt mit der entsprechenden Topologie modelliert.

#### 6.1.1 Rotor und Magnetisierungsspule

Zur Modellierung der Magnetisierungsspule ist in smartFEM eine entsprechende Statortopologie „MD...top“ enthalten. Die Anzahl Nuten entspricht automatisch der im Rotor definierten Anzahl Magnete.

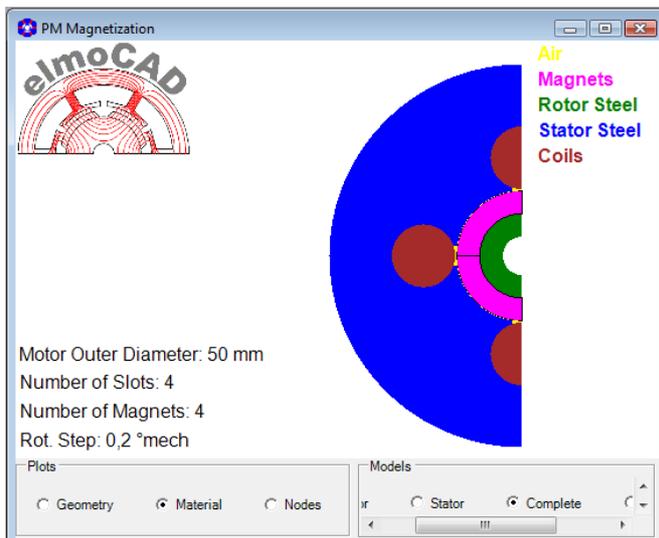


Abb. 177: PM-Magnetization - Beispiel Magnetisierungseinrichtung (Spule und Rotor)

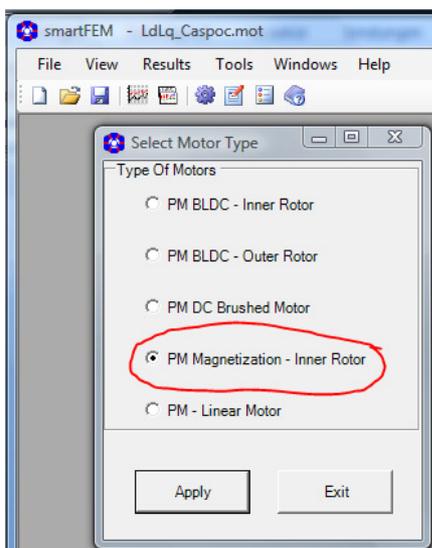


Abb. 178: PM-Magnetization - Initialisierung

Als Magnetmaterial muss in „Material“ eine Materialdatei selektiert werden, die als B(H) Kurve die Neukurve des Magnetmaterials vom Typ „Soft Iron“ im 1. Quadranten enthält.

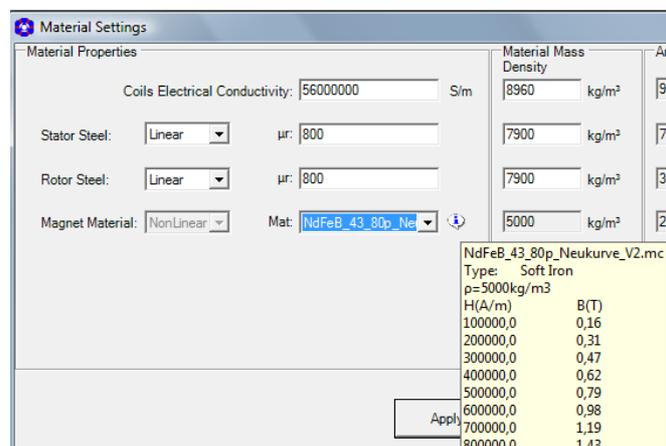


Abb. 179: PM-Magnetization - Magnet Material

Die Daten für eine entsprechende Neukurve B(H) kann mit dem in smartFEM enthaltenen Material Explorer bzw. PowerCore® Explorer erfasst werden.

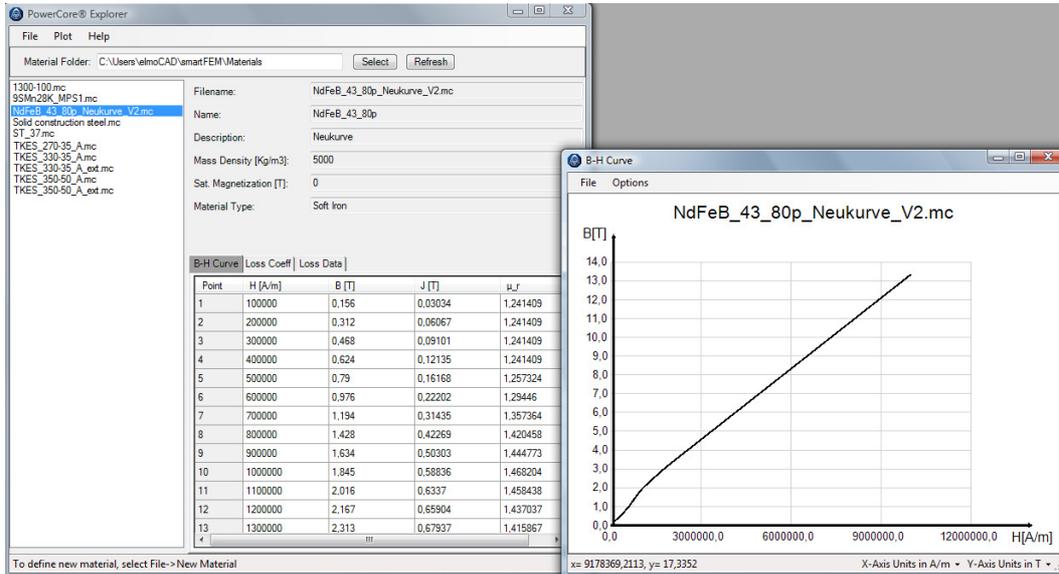


Abb. 180: PM-Magnetization - Neukurve eines Neodym Eisen Bor Materials

Im „Motor Parameters“ werden anschließend die Daten zur Simulation der Magnetisierung angegeben:

- Min. Rotation Step: minimaler Schrittwinkel für die Drehung des Rotors
- Convergence Accuracy: Abbruchkriterium für FEMAG Iterationen
- Magnetization Current: Amplitude des Magnetisierungsstroms
- Remanence by: FEMAG: die Remanenzinduktion wird durch FEMAG ermittelt  
MEXFile: die Remanenz wird in einer „Aufmagnetisierungs“-Tabelle vorgegeben.
- Nominal Remanence Brem: Nominale Remanenz bei dem gewählten Strom
- Anisotropy Mode: Isotrop bzw. Anisotrop

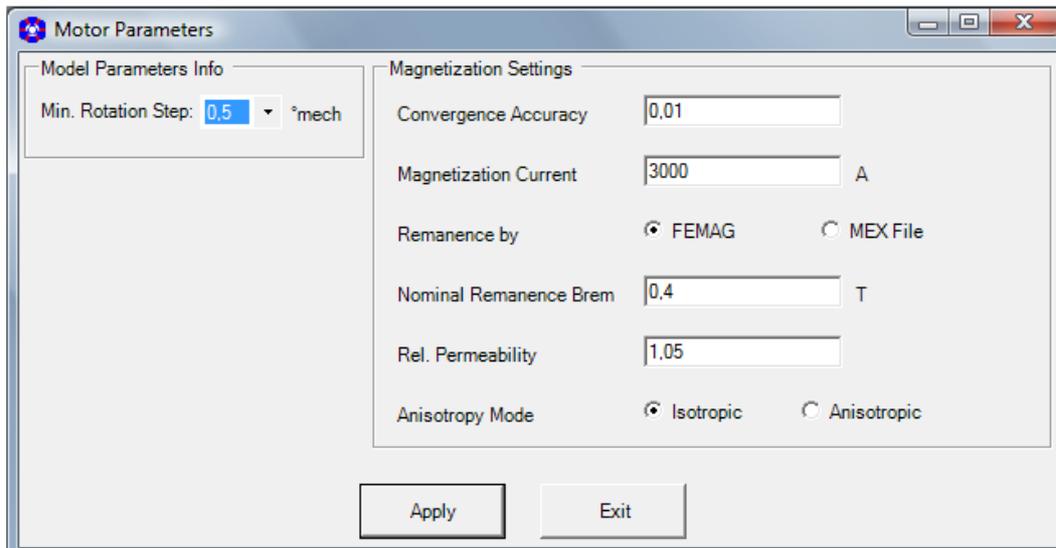


Abb. 181: PM-Magnetization - Motor Parameters

Nach Betätigen der Schaltfläche „Run Magnetization“ wird die Simulation gestartet.

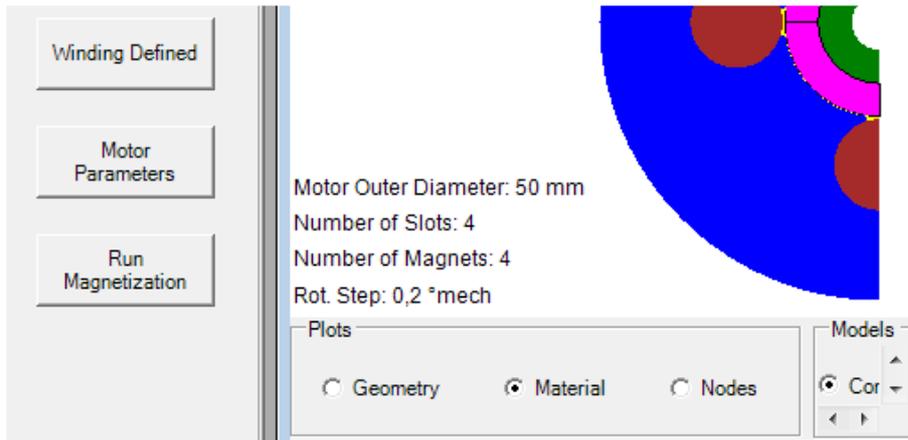


Abb. 182: PM-Magnetization - Start der Simulation mit "Run Magnetization"

Die Simulationsergebnisse können wie gewohnt in den Plots dargestellt und bearbeitet werden, z. B.:

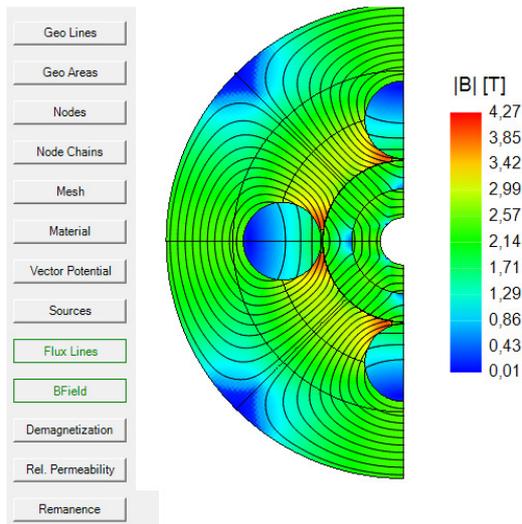


Abb. 183: PM-Magnetization - Induktionsverteilung

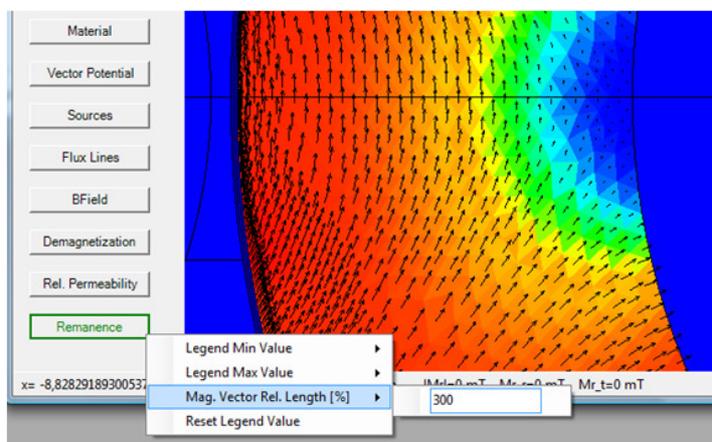


Abb. 184: PM-Magnetization - Remanence im Ringmagnet (gezoomt)

Die sich tatsächlich in einem bestimmten Abstand zur Magnetoberfläche in Luft einstellende Induktion kann nach dem Speichern des Simulationsmodells als \*.mot Datei in einem zweiten Schritt berechnet und dargestellt werden.

### 6.1.2 Berechnung und Auswertung der Luftspaltinduktion und Remanenz

Zur Beurteilung der Magnetisierung kann die Luftspaltinduktion von vormagnetisierten Rotoren mit Hilfe einer Statortopologie „Messring“ berechnet und dargestellt werden. Dazu wird in der Rotortopologie eines neuen Modells über den Dialog „File - Load Magnetization“ das vorher gespeicherte Simulationsmodell des vormagnetisierten Rotors geladen.

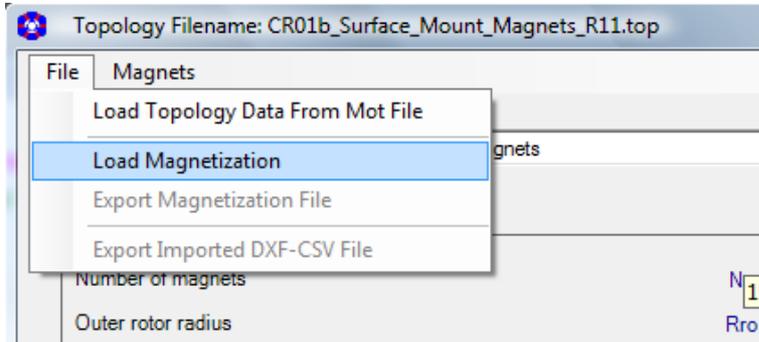


Abb. 185: PM-Magnetisation - Laden eines vormagnetisierten Rotormodells

Anschließend wird die Statortopologie „CS01\_Measure\_Ring\_Magnetization“ ausgewählt und entsprechend parametrisiert, so dass sie einer Einrichtung zur Messung der Remanzinduktion der Magnete entspricht. Der Abstand der Messsonde zum Magneten muss gleich dem Abstand des mittleren Luftspaltlayer sein, damit Messung und Simulationsergebnisse vergleichbar werden. Sofern die Messung in Luft erfolgt, sollte die Dicke des Statorrings ein Mehrfaches des Rotorradius betragen, um die Feldausbreitung in der Luft nicht durch die Randbedingungen eines zu schmalen Rings zu begrenzen.

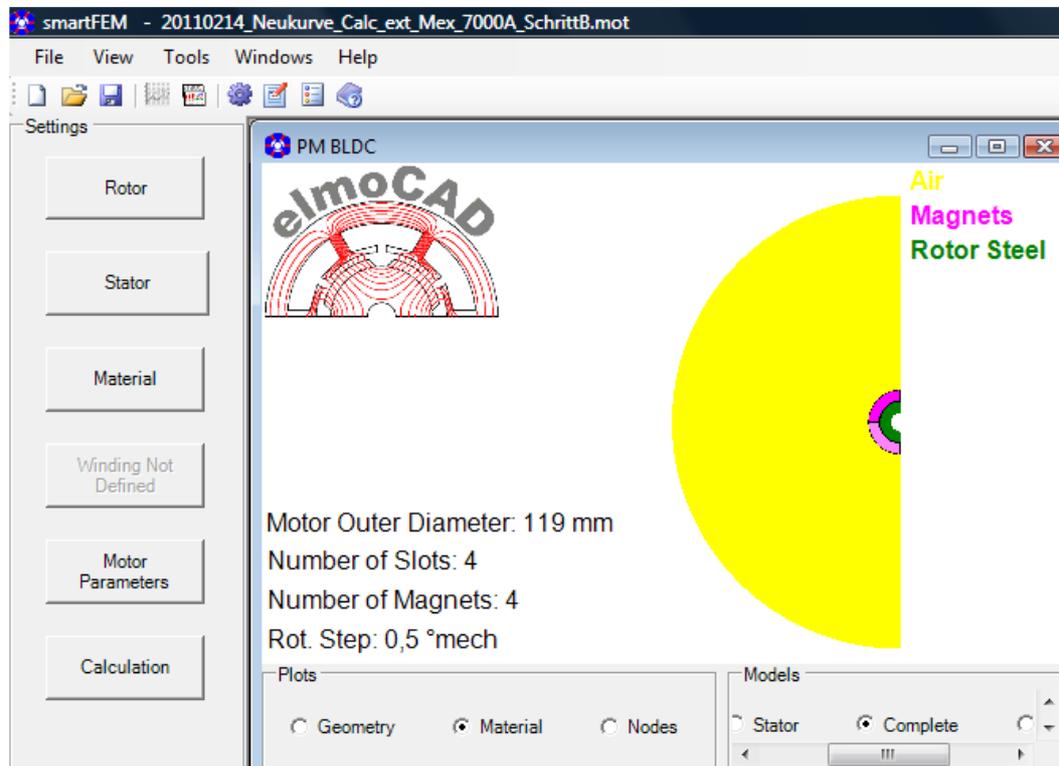


Abb. 186: PM-Magnetisation - Modell zur Simulation der Induktion an der Rotoroberfläche

Die Simulation wird über die Schaltfläche „Calculation“ gestartet. Anschließend können die Ergebnisse z. B. die berechnete Luftspaltinduktion sowohl mit dem Plot „BField“ ausgewertet als auch in „Motor Parameters“ mit „Postprocessing - Forces and Torque - Calculate“ berechnet werden.

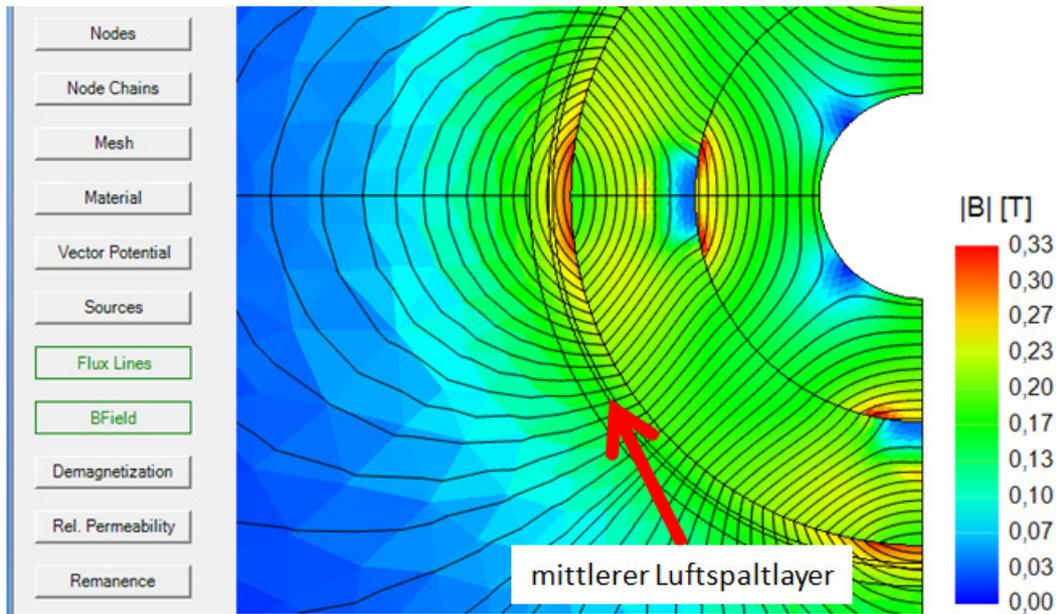


Abb. 187: PM-Magnetization - Plot der Induktionsverteilung

Die Remanenzinduktion der Magnete entspricht der in Abb. 112 dargestellten Auswertung.

Mit „Options - Copy Airgap B-Field Values to Clipboard“ können die Werte der Luftspaltinduktion (radial und tangential) über den Zwischenspeicher in eine Tabellenkalkulation zu weiteren Auswertungen kopiert werden.

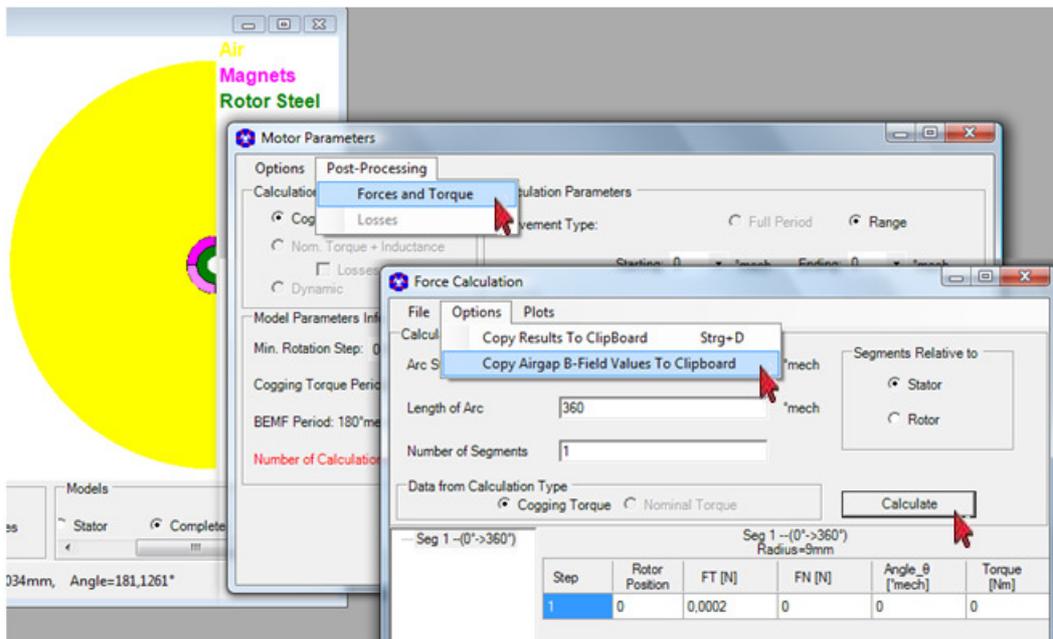


Abb. 188: PM-Magnetization - Luftspaltinduktion über Post-Processing berechnen

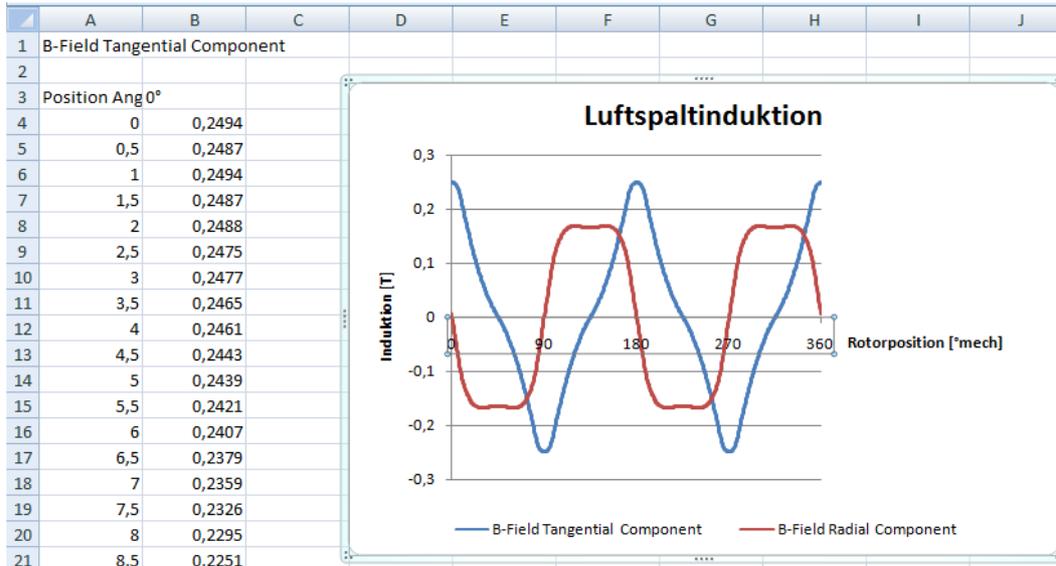


Abb. 189: PM-Magnetization - Luftspaltinduktion in Tabellenkalkulation ausgewertet

### 6.1.3 Verwendung von vormagnetisierten Rotoren in Motormodellen

Die als \*.mot Datei gespeicherten Simulationsmodelle von vormagnetisierten Rotoren können in Motormodellen verwendet werden. Dazu wird in der Rotortopologie über den Dialog „Options - Load Magnetization“ das entsprechende Rotormodell geladen (siehe Abb. 113).

Die Geometrieparameter des Rotors und das Magnetmaterial können nicht mehr geändert werden. Sofern das notwendig ist, muss dies wie in Tx. 6.1.1 erfolgen und der Rotor neu magnetisiert werden.

Alle anderen Funktionen zur Simulation des Motorenmodells mit vormagnetisiertem Rotor stehen wie gewohnt zur Verfügung.

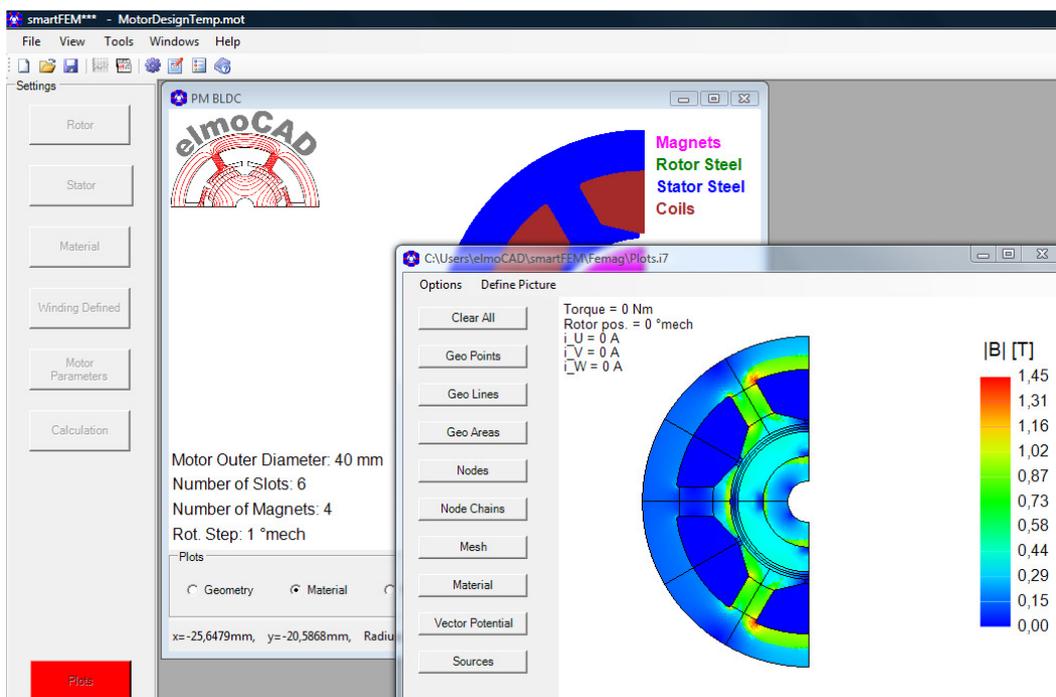


Abb. 190: PM-Magnetization - Motormodell mit vormagnetisiertem Rotor

## 6.2 PM DC Brushed Motor

Die Erstellung eines Simulationsmodells PM DC Brushed Motor wird über „File - New - Select Motor Type“ initialisiert. Die Topologien entsprechen denen der Außenläufermotoren. Es muss mindestens eine PM-BDLC Outer Rotor Topologie (\*.top) im Topologie-Verzeichnis gespeichert sein, damit der Menüpunkt „PM DC Brushed Motor“ angezeigt wird.

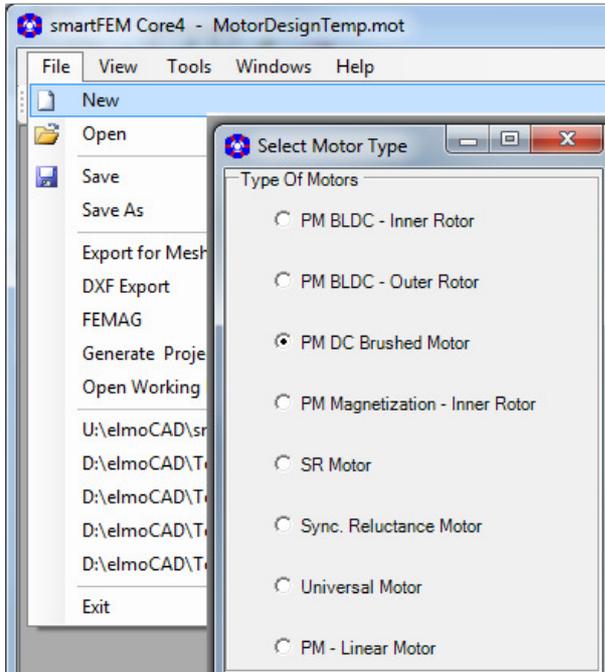


Abb. 191: PM DC Motor - Initialisierung

Es können alle Außenläufer Rotoren und Statoren ausgewählt werden.

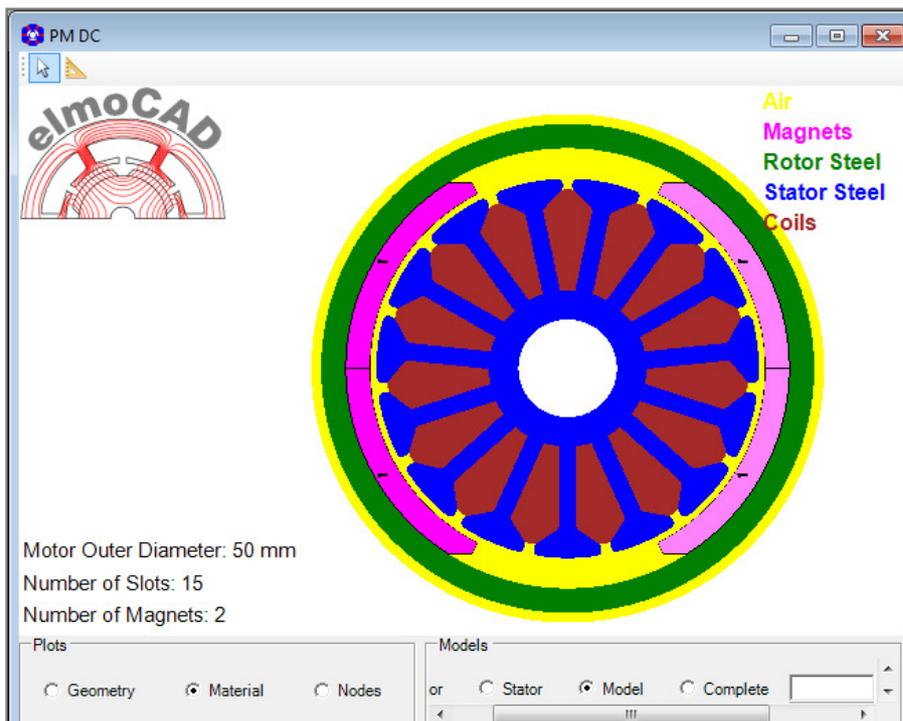


Abb. 192: PM DC Motor - Beispiel eines Geometriemodells

Der Wicklungseditor generiert automatisch ein Wickelschema, das auch manuell geändert werden kann und bietet die Möglichkeit verschiedene Phasendiagramme zu erzeugen.

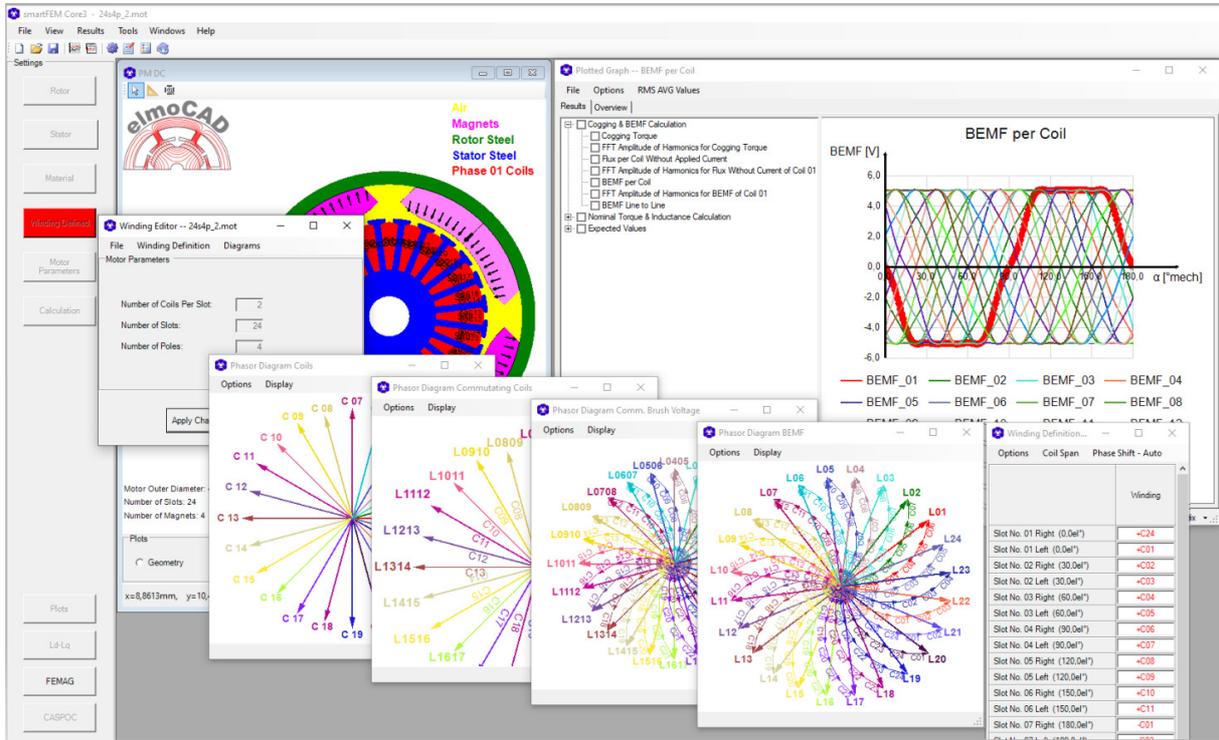


Abb. 193: PM DC Motor - Wickelschema und Phasendiagramme

Wickelschema, Wicklungsparameter, Line to Line Definition und Kommutierungssequenz können manuell angepasst werden.

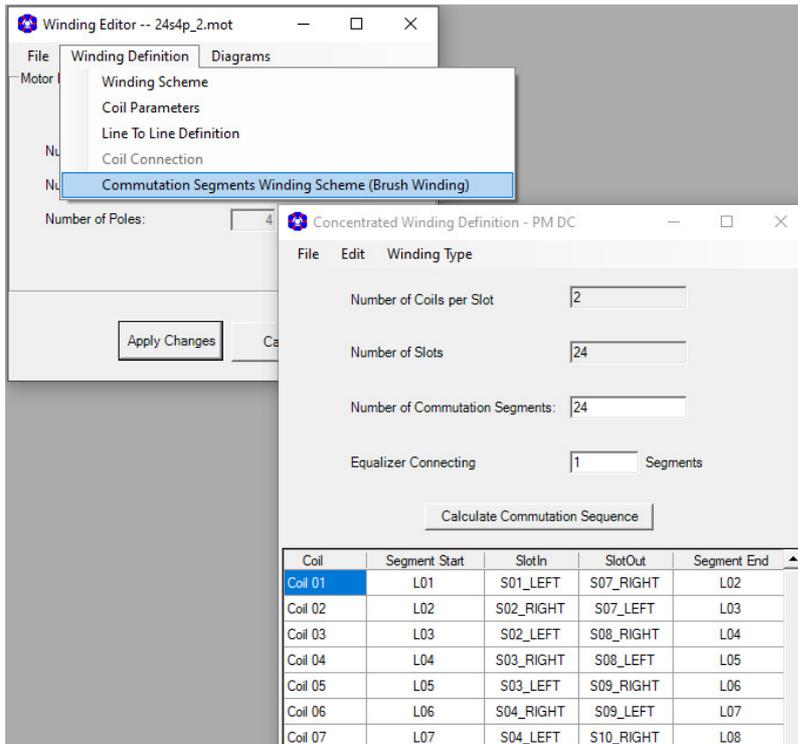


Abb. 194: PM DC Motor - Kommutierungssequenz

Die Position der Bürsten zu den Segmenten des Kommutators werden in „*MotorParameter*“ festgelegt.

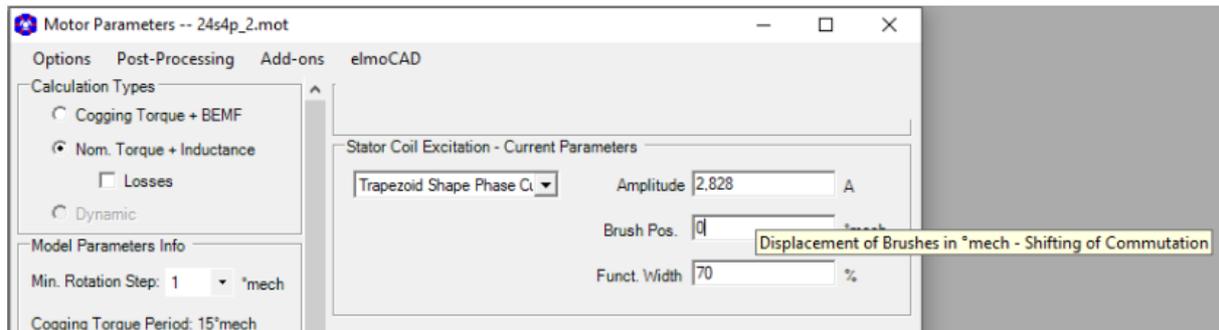


Abb. 195: PM DC Bürstenmotor - Bürstenposition

### 6.3 Synchronous Motor (fremderregt)

Die Erstellung eines Simulationsmodells für einen fremderregten „Synchronous Motor“ wird über die Menüfolge „File - New - Select Motor Type“ initialisiert. Die Stator Topologien entsprechen denen der „PM BLDC - Inner Rotor“ Motoren. Es muss mindestens eine Rotor Topologie (\*.top) mit Fremderregung im Topologie-Verzeichnis gespeichert sein, damit der Menüpunkt „Synchronous Motor“ angezeigt wird.

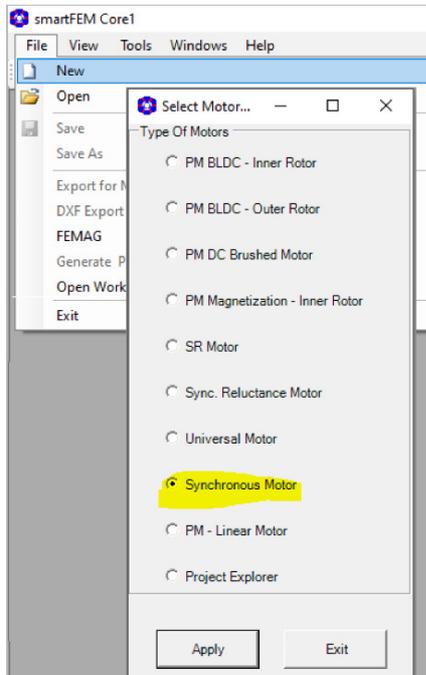


Abb. 196: Synchronous Motor - vier Pole

Abb. 197: Synchronous Motor - Initialisierung

In „Material“ kann die Leitfähigkeit des Materials der Rotorwicklungen angegeben werden. Default Wert ist Kupfer mit 56000000 S/m.

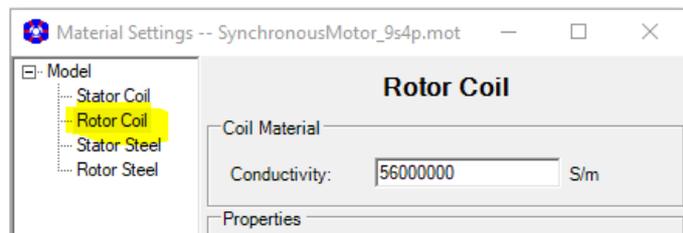
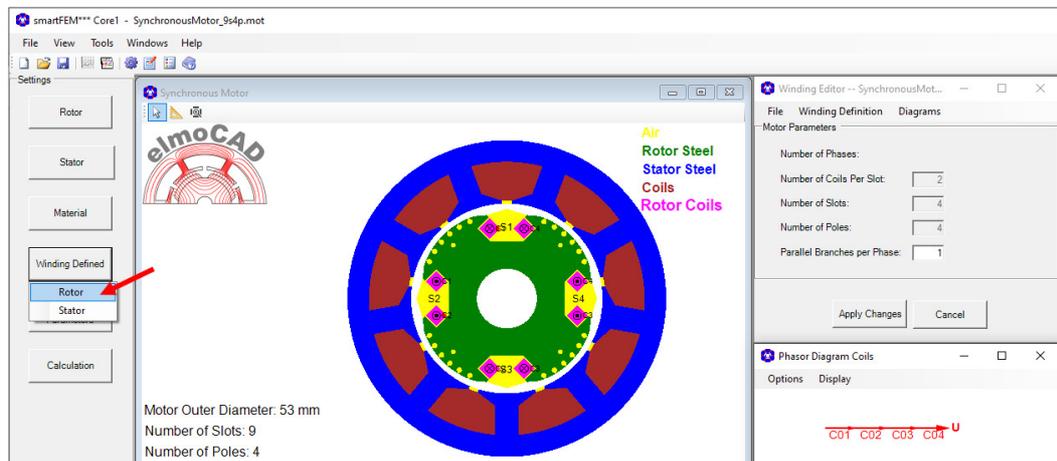


Abb. 198: Synchronous Motor - Material Settings

Die Wicklungsparameter können für Rotor und Stator getrennt eingestellt werden

Abb. 199: Synchronous Motor - Wicklungen



Die Erregung wird in „MotorParameters“ als Konstantstrom eingestellt.

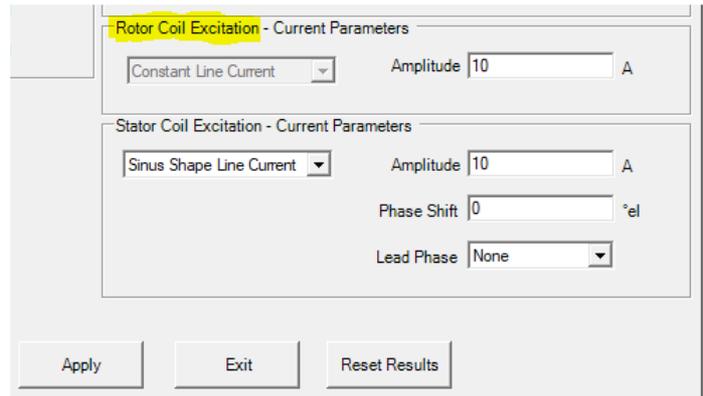


Abb. 200: Synchronous Motor - Rotor Coil Excitation

Es können alle Berechnungen wie bei „PM - BLDC - ...“ Motoren bis auf die „Cogging Torque + BEMF Calculation“ durchgeführt werden.

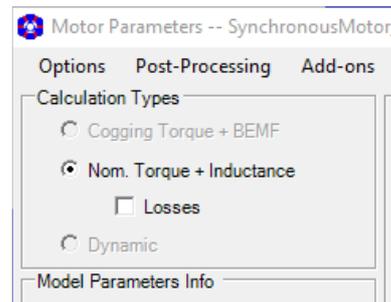


Abb. 201: Synchronous Motor - Calculation Types

Zur Ermittlung der BEMF muss eine eigene „Nominal Torque + Inductance Calculation“ mit Rotorstrom  $I_r > 0$  A und Statorstrom  $I_s = 0$  A durchgeführt werden.

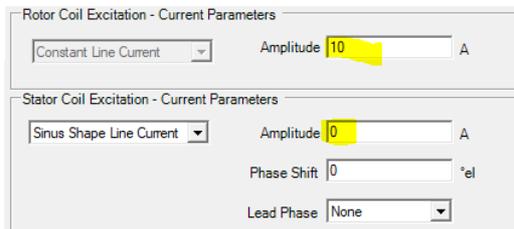


Abb. 202: Synchronous Motor - Coils Excitation

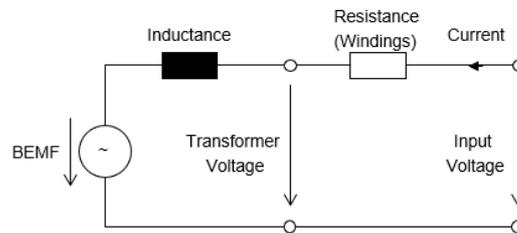


Abb. 203: Synchronous Motor - Equivalent Circuit

Das Ergebnis der „Transformer Voltage“ entspricht dann der BEMF.

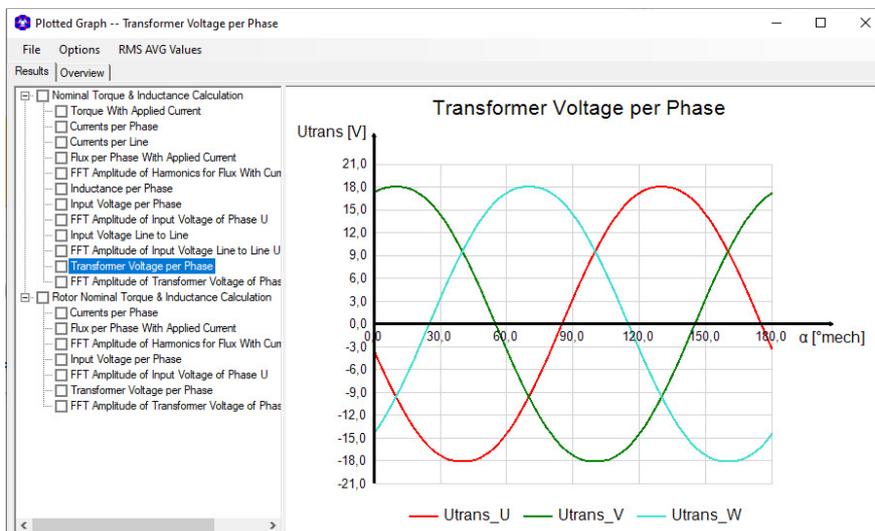


Abb. 204: Synchronous Motor - BEMF Equivalent

Die Berechnung der BEMF ist nicht zwingend notwendig. Alle Ergebnisse der „Nominal Torque + Inductance Calculation“ sind nach Durchführung der Berechnung in den „Results“ verfügbar.

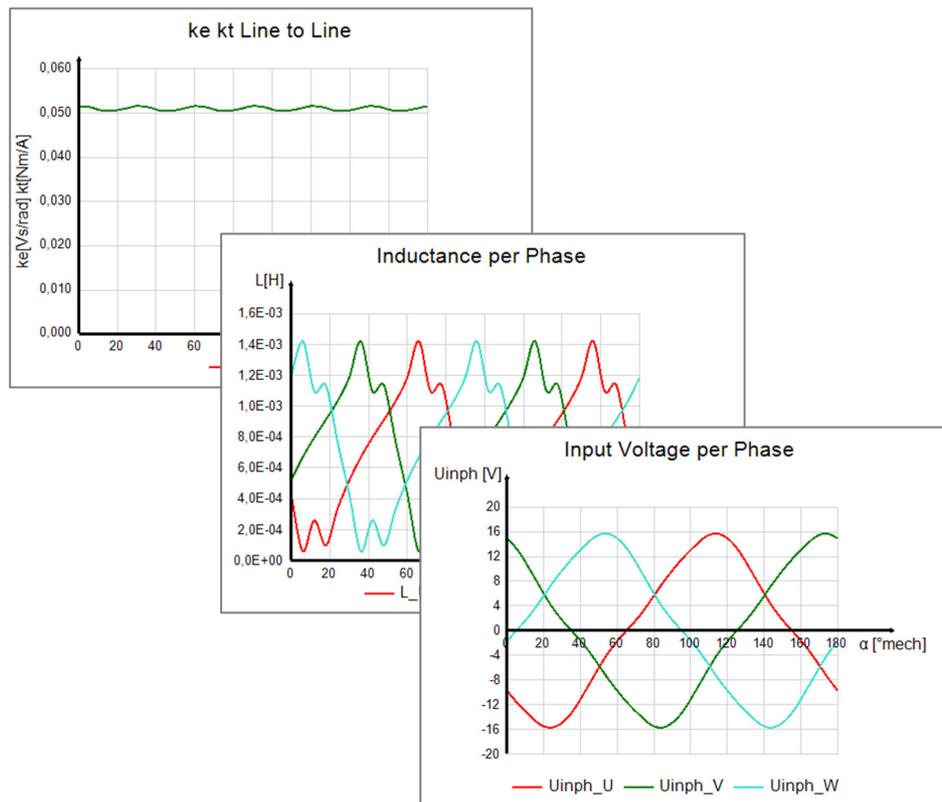
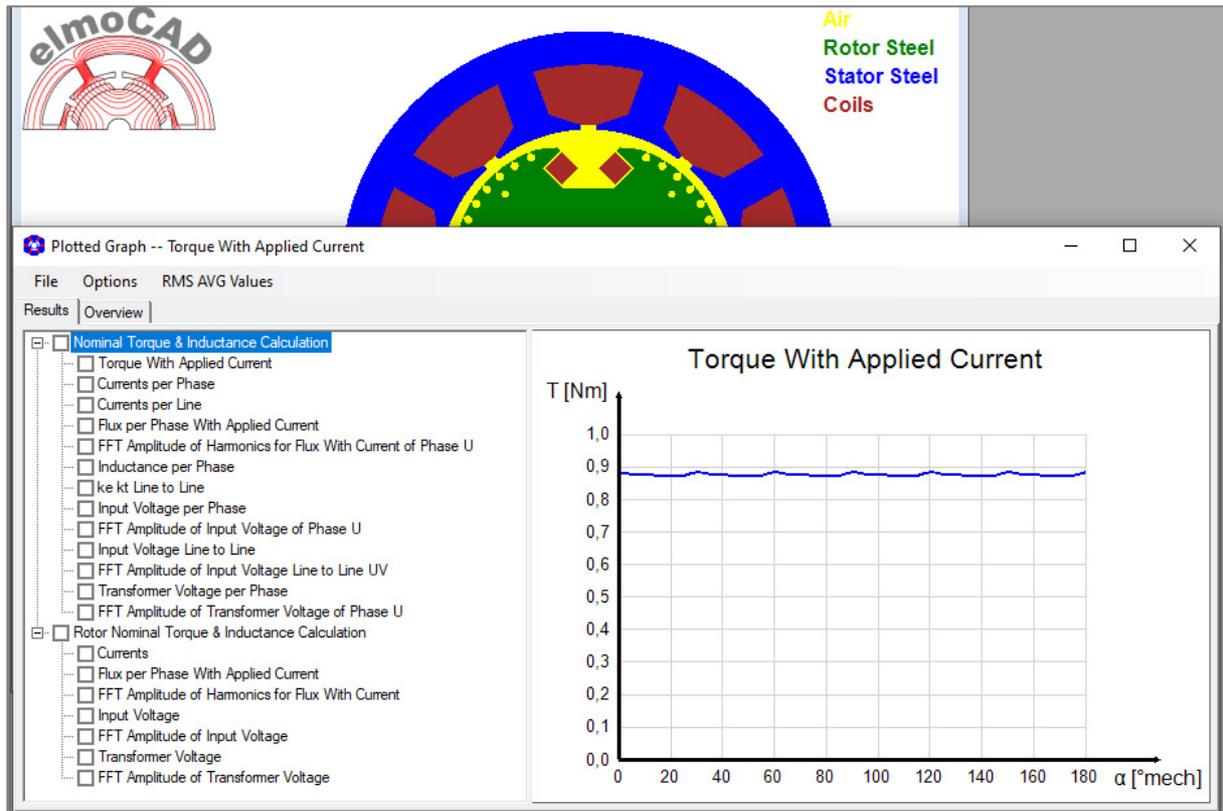


Abb. 205: Synchronous Motor - Ergebnisse der "Nominal Torque ... Calculation"

### 6.3.1 Synchronous Motor - Field Plots

In „Plots“ wird der Rotorstrom in der Spalte „i\_r“ manuell eingegeben oder über die Menüfolge „Data - Paste Currents to set No. # - source“ eingefügt.

Set No.	RotorAngle	Is	Phase Shift	i_U	i_V	i_W	i_r	Torque [Nm]	Picture	Report	Define
1	0	10	0	-1,736	9,397	-7,66	10	Rotor Current in [A]	No	<input type="checkbox"/>	Plot

Abb. 206: Synchronous Motor - Rotor Coil Excitation in "Plots"

Die Stromdichten werden entsprechend den Wickelschemata in den Rotor- und Statorwicklungen eingestellt und die Feldberechnungen durchgeführt.

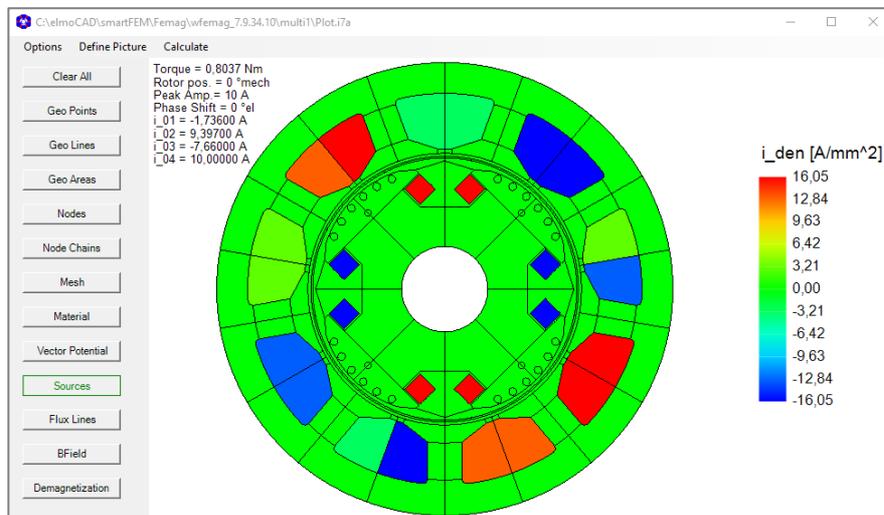


Abb. 207: Synchronous Motor - Excitation Sources

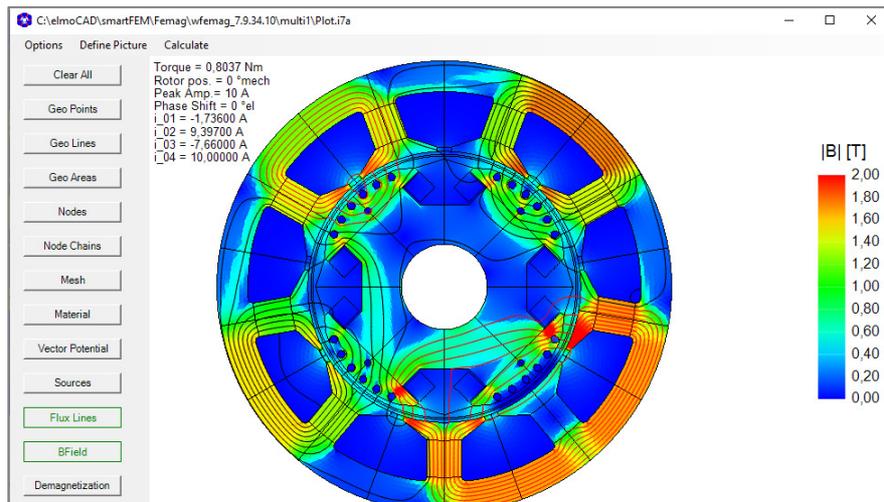


Abb. 208: Synchronous Motor - Flussdichten und Feldlinien

## 6.4 Switched Reluctance Motor

Die Erstellung eines Simulationsmodells SR Motor wird über „File - New - Select Motor Type“ initialisiert. Es muss mindestens eine SR Rotor Topologie (\*.top) im Topologie-Verzeichnis gespeichert sein, damit der Menüpunkt „SR - Motor“ angezeigt wird.

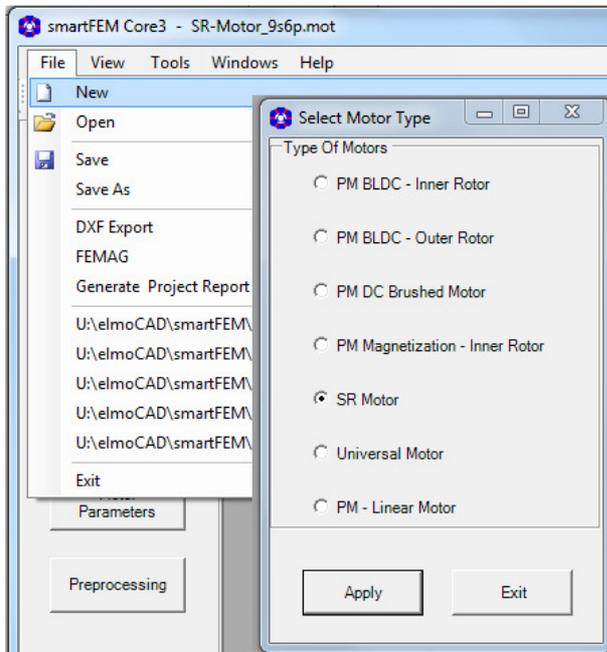


Abb. 209: SR Motor - Initialisierung

Die Rotor-Topologie eines SR-Motors unterscheidet sich gegenüber der eines PM-Motors dadurch, dass nur Rotoren ohne Magnete ausgewählt werden können.



Abb. 210: SR Motor - Beispiel eines Geometriemodells

In „Motor Parameters“ kann der Strom als „User Defined Phase Current“ vorgegeben werden.

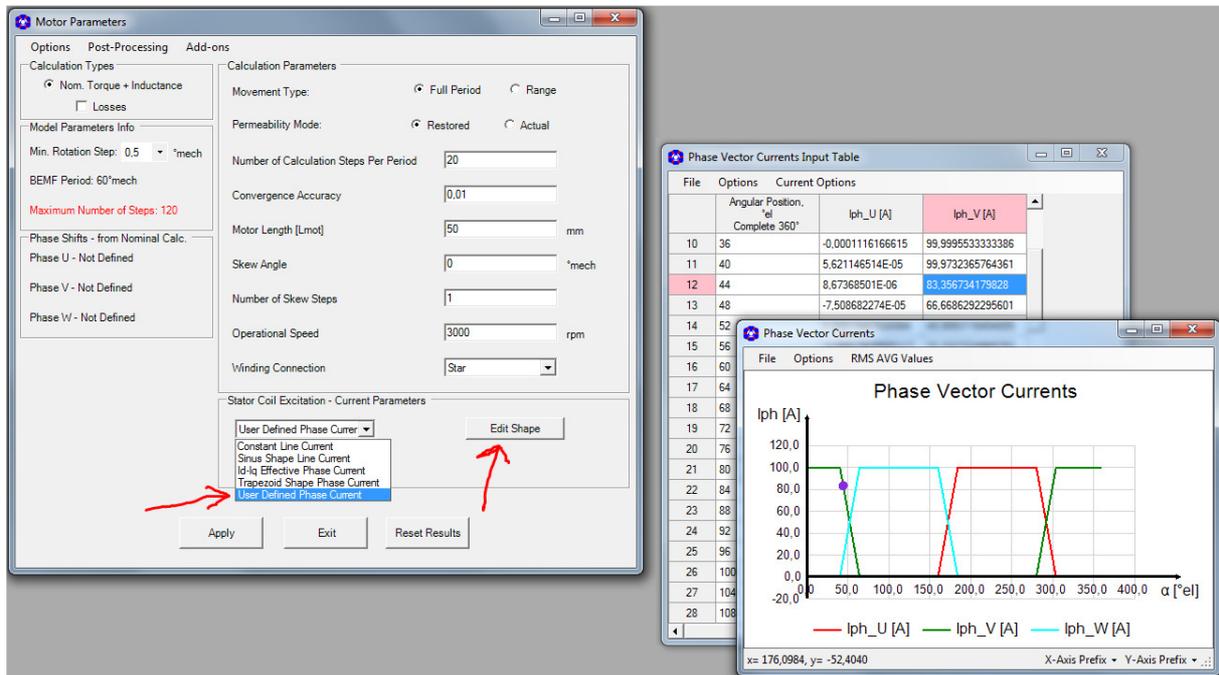


Abb. 211: SR-Motor - User Defined Phase Current

Da für den SR-Motor die Phasenlagen der Wicklungen nicht aus Motor-Topologie und Wickelschema bestimmt werden können, wird für jede Phase eine Drehmomentberechnung mit Konstantstrom durchgeführt. Die Maxima der Drehmomente entsprechen dann der jeweiligen Phasenlage. Zur Durchführung dieser Berechnung muss in Motor Parameters die Schaltfläche „ReCalculate Phase Current“ betätigt werden. Anschließend wird bei der nächsten „Nom. Torque + Inductance“ Berechnung vorab die Phasenlagen berechnet und in „Motor Parameters“ angegeben.

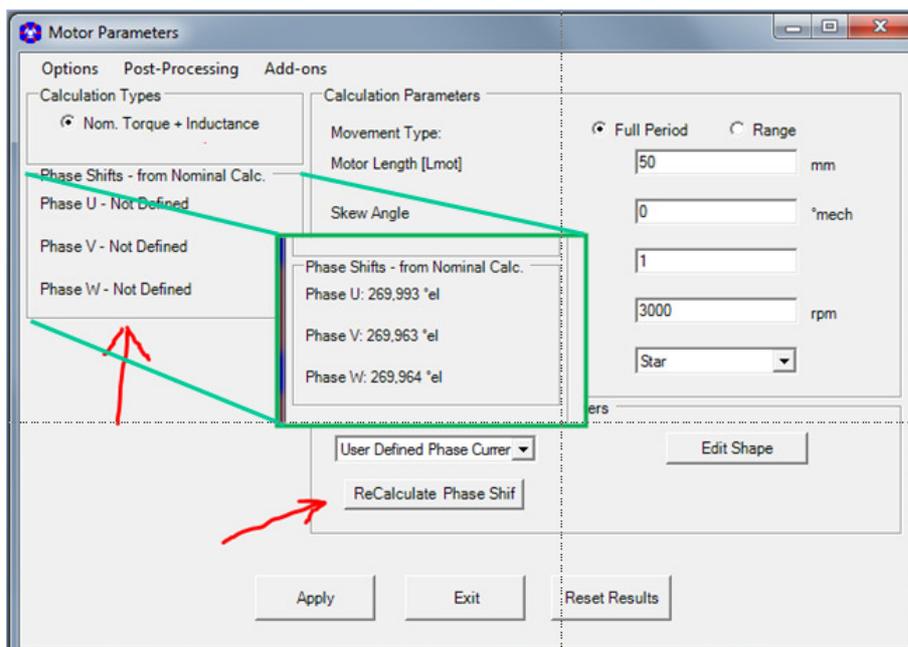


Abb. 212: SR-Motor - Bestimmung der Phasenlagen

Die Anzeige der Simulationsergebnisse erfolgt dann analog wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben.

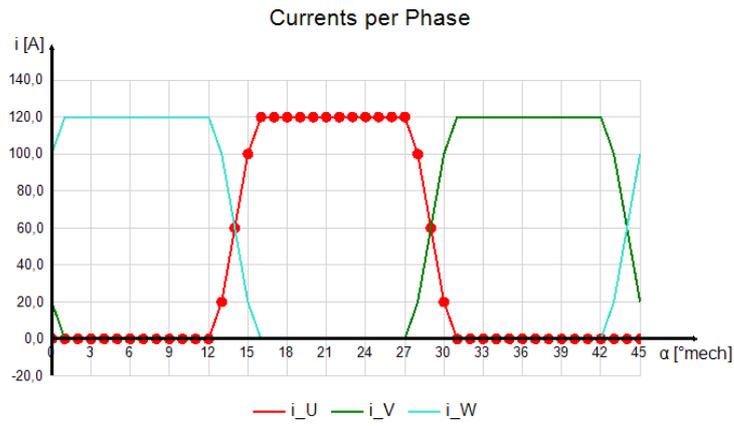
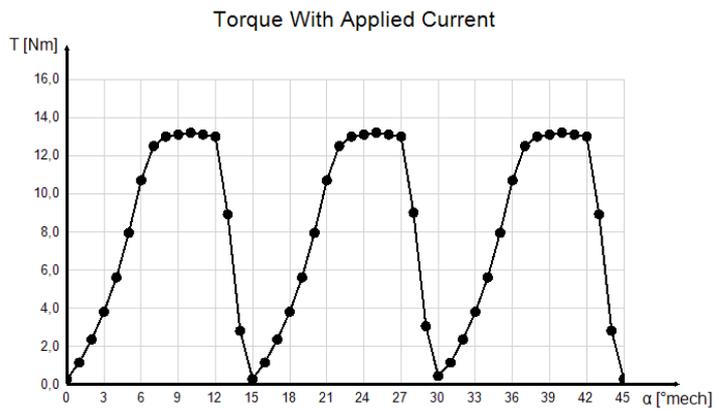


Abb. 213: SR-Motor - Results



## 6.5 Synchronous Reluctance Motor

Die Erstellung eines Simulationsmodells SR Motor wird über „File - New - Select Motor Type“ initialisiert. Es muss mindestens eine SR Rotor Topologie (\*.top) im Topologie-Verzeichnis gespeichert sein, damit der Menüpunkt „SR – Motor“ angezeigt wird.

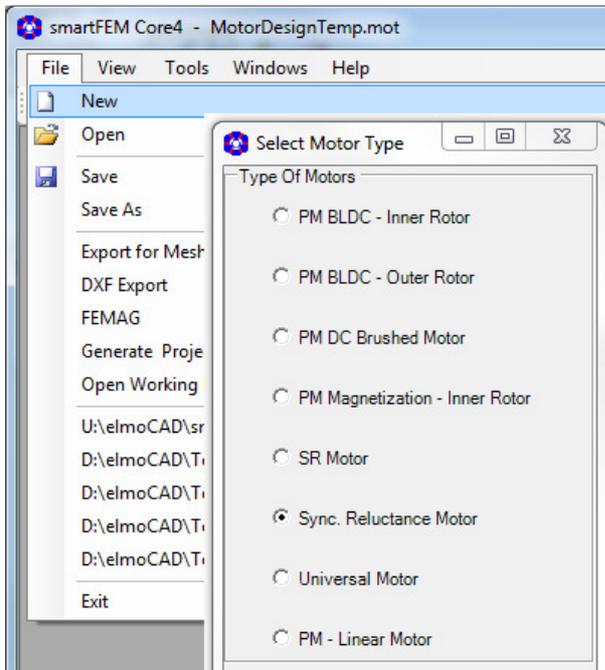


Abb. 214: Synchronous Reluctance Motor - Initialisierung

Es wird ein Motormodell mit 4 Polen und 4 Flussbarrieren (Rotor-Topologie CR\_31\_Synchronous\_Reluctance) mit Rotorlage in d-Achse angezeigt.

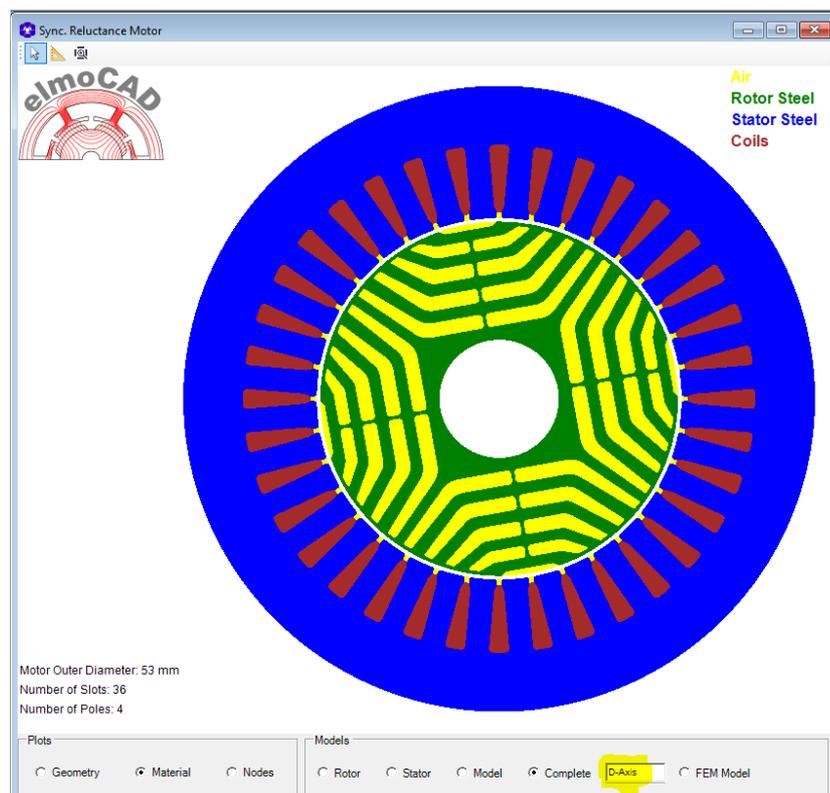


Abb. 215: Synchronous Reluctance Motor - 4-polig

Beispiel : Ergebnisse für „Torque vs.  $\theta$ “ aus parametrischen Ld/Lq Berechnungen mit dem Zeigerdiagramm für das Maximum des Drehmoments.

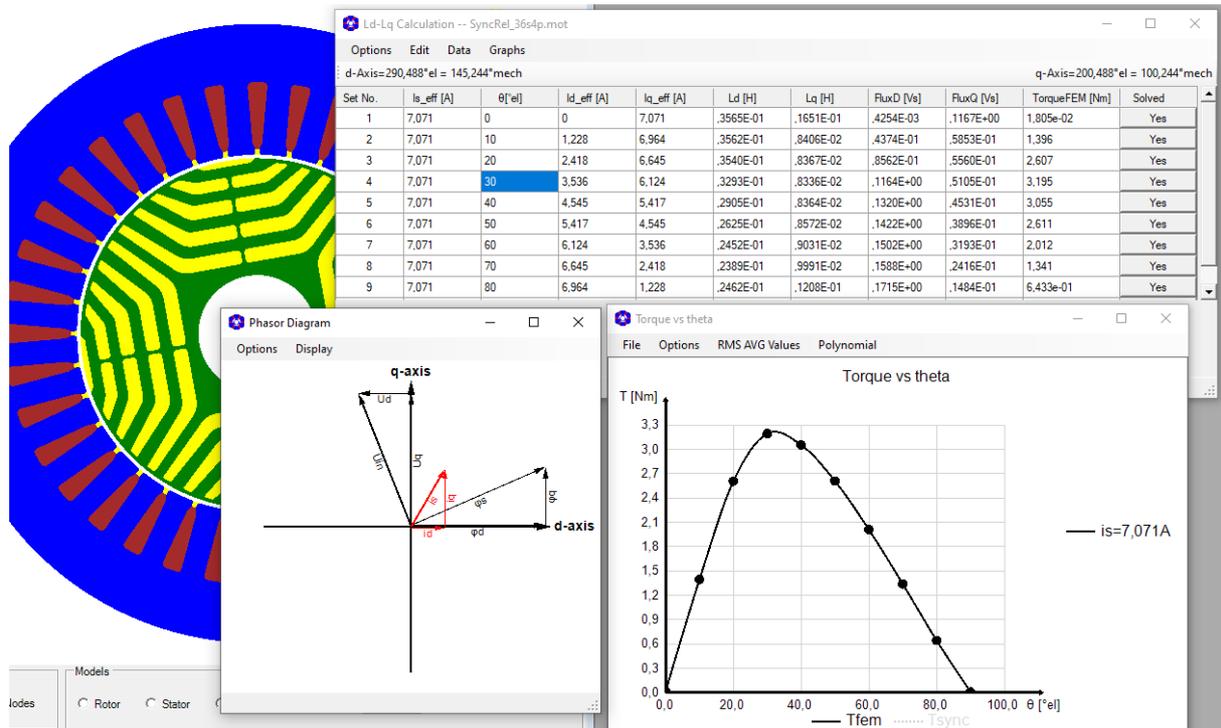


Abb. 216: Synchronous Reluctance Motor - Beispiel Simulationsergebnisse

### 6.5.1 Synchronous Reluctance Motor PM-Assisted

Dieser Motortyp ist in smartFEM als „PM BLDC - Inner Rotor“ definiert. Die Rotortopologie heißt „CR31\_Synchronous\_Reluctance\_PM\_Assisted“.

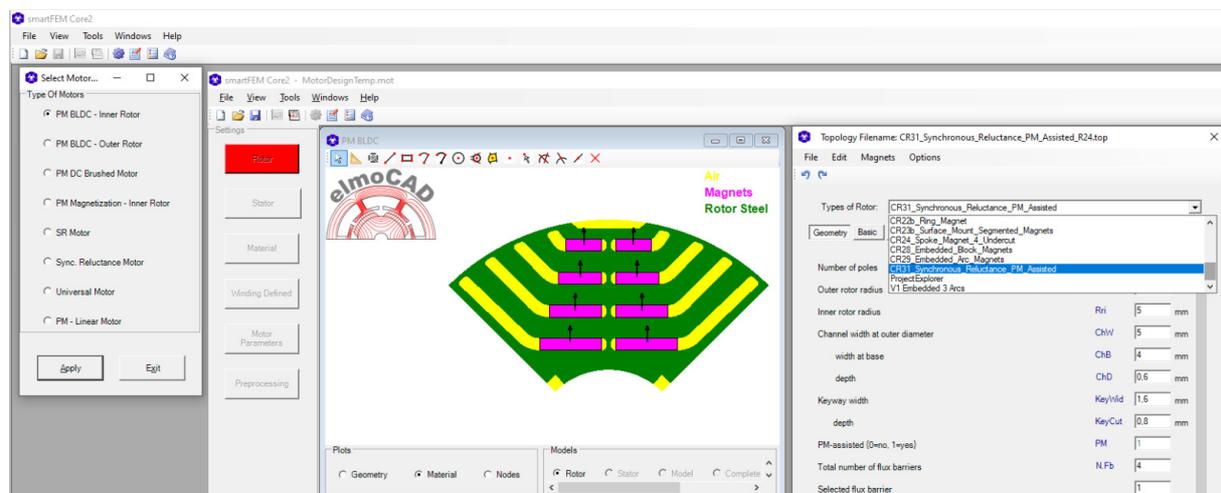


Abb. 217: Synchronous Reluctance PM-Assisted Motor - Rotortopologie

Beispiel : Ergebnisse für „Torque vs.  $\theta$ “ aus parametrischen Ld/Lq Berechnungen mit dem Zeigerdiagramm für das Maximum des Drehmoments.

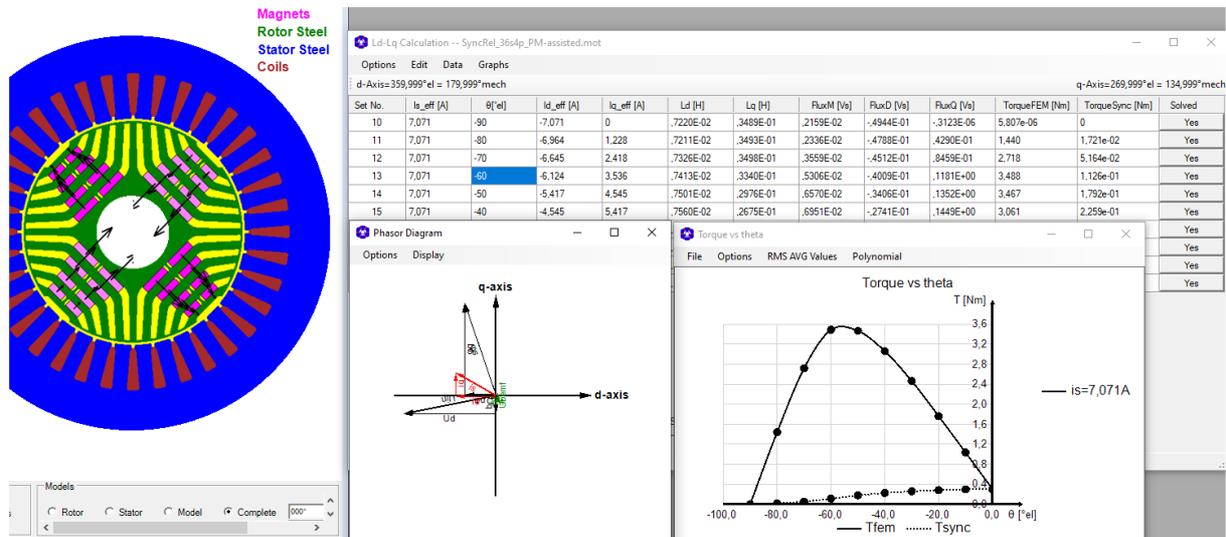


Abb. 218: Synchronous Reluctance Motor PM-Assisted - Beispiel Simulationsergebnisse

## 6.6 Universal Motor

Die Erstellung eines Simulationsmodells Universal Motor wird über „File - New - Select Motor Type“ initialisiert. Es muss mindestens eine Universal Rotor Topologie (\*.top) im Topologie-Verzeichnis gespeichert sein, damit der Menüpunkt „PM - Universal Motor“ angezeigt wird.

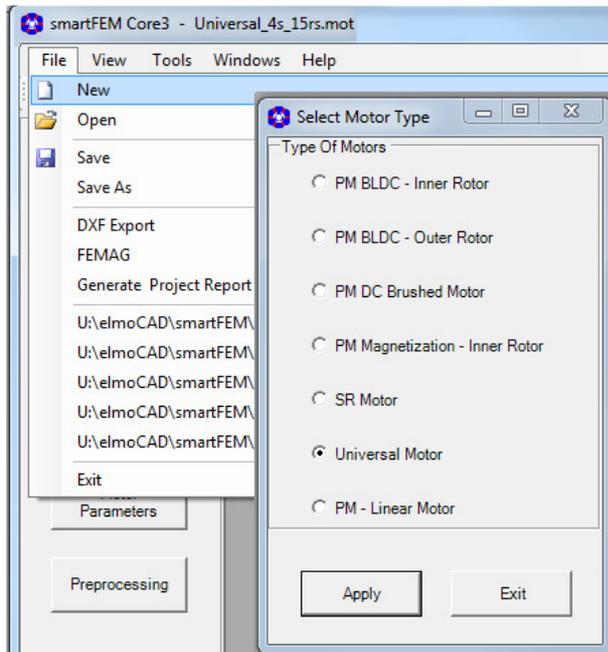


Abb. 219: Universal Motor - Initialisierung

Die Modellierung eines Universal Motors unterscheidet sich gegenüber der Modellierung der anderen Motorentypen nicht bis auf die für Rotor und Stator getrennten Wicklungen und die Einstellung in „Motor Parameters“.

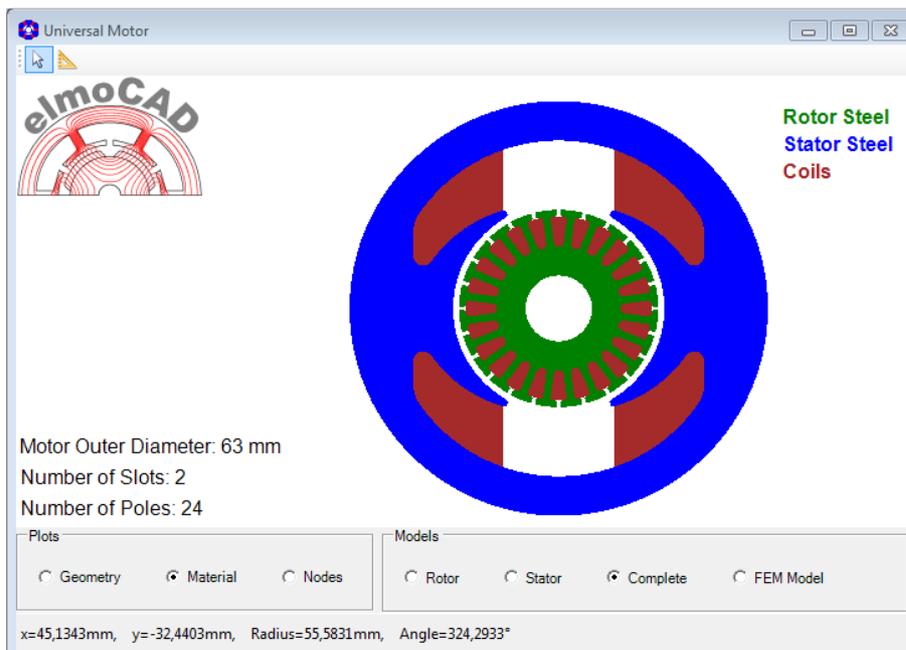


Abb. 220: 2-poliger Universal Motor mit 24 Rotornuten

Nach erfolgreichem „Preprocessing“ können folgende Berechnung durchgeführt werden:

- Erstellung von Plots der Flussdichte mit/ohne Rotor- (bzw. Anker-) und Statorströme zur Auslegung des magnetischen Kreises

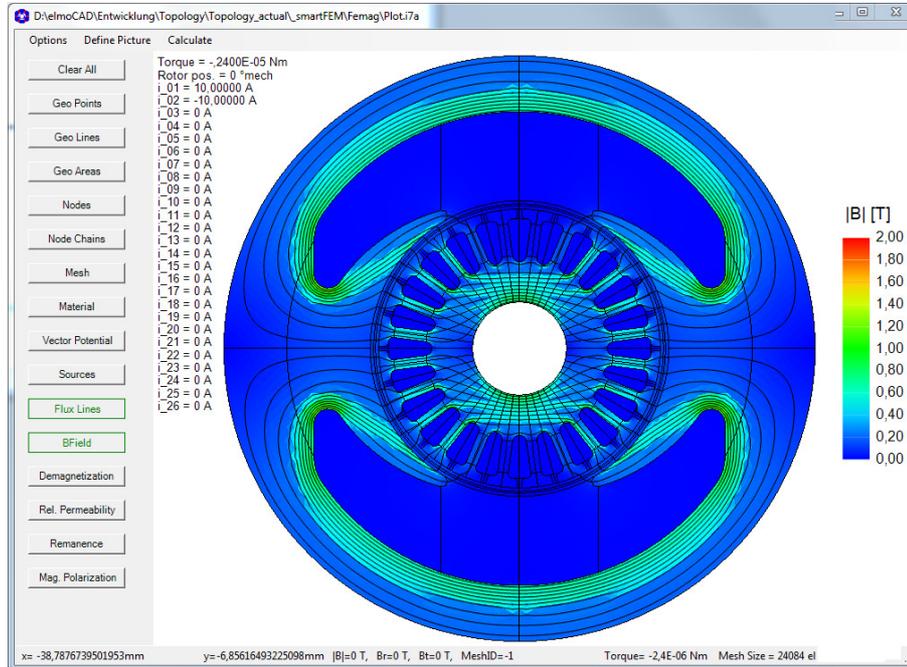


Abb. 221: Universal Motor - Plot der Induktion und Feldlinien

Über die Einstellungen in „Coil Excitation - Current Parameters“ können DC- und AC-Motoren simuliert werden. Die Simulation erfolgt in mehreren Schritten:

- Berechnung der Kommutierungsreihenfolge („Commutation Sequence“)
- Berechnung des Drehmoments während der Kommutierung („Switching Torque“)Ermittlung des Drehmoments
- Berechnung des Drehmoments im AC- oder DC-Betrieb („Motor Torque“)
- Berechnung der Rotorposition zur Positionierung der Bürsten

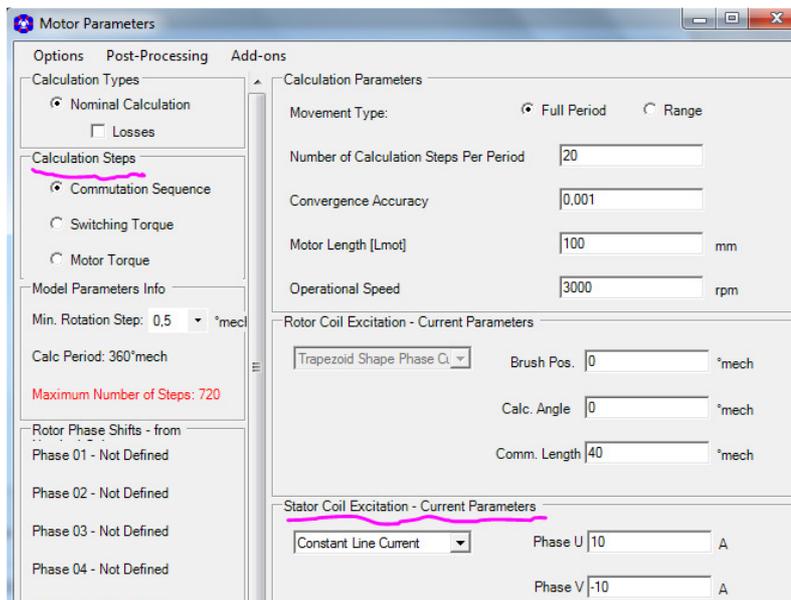


Abb. 222: Universal Motor - Motor Parameters

### 6.6.1 Berechnung der Kommutierungsreihenfolge „Commutation Sequence“

Da wegen der fehlenden Magnete „Cogging Torque + BEMF“ nicht ermittelt werden können, ist ausschließlich die „Nominal Calculation“ ohne/mit Verlustberechnung möglich. Zunächst werden in „Motor Parameters“ die grundlegenden Parameter eingestellt und als erster Simulationsschritt „Commutation Sequence“ gewählt. Mit Start „Apply“ und „Calculation“ werden folgende Berechnungen ausgeführt:

- Erregung der Feldwicklung mit DC Strom (Amplitude) bei hoher Ankerdrehzahl.
- Simulation ohne Ankerströme, um den Fluss pro Wicklung in Abhängigkeit des Wicklungsschemas zu ermitteln.
- Simulation mit Rotation des Ankers.
- Ermittlung der induzierten Spannung („Transformer Voltage“) in den Ankerwicklungen und deren Phasenlagen.
- Definition der Kommutierungssequenz auf Basis der induzierten Spannungen.
- Festlegung einer ersten Bürstenposition basierend auf der induzierten Spannung oder Fluss in den Wicklungen für eine vorgegebene Ankerposition (Wicklungen mit maximalem Fluss bzw. minimalen induzierter Spannung beginnen zu kommutieren).

Nach Durchführung dieses Simulationsschrittes werden in „Motor Parameters“ die Phasenlagen aller Wicklungen dargestellt. Wicklung Nr. 13 in Nut 01 rechts und Nut 13 links hat die Phasenlag 0° el.

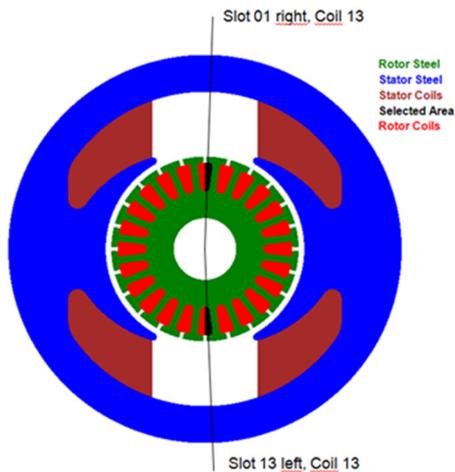


Abb. 223: Universal Motor - Lage der Wicklung 13

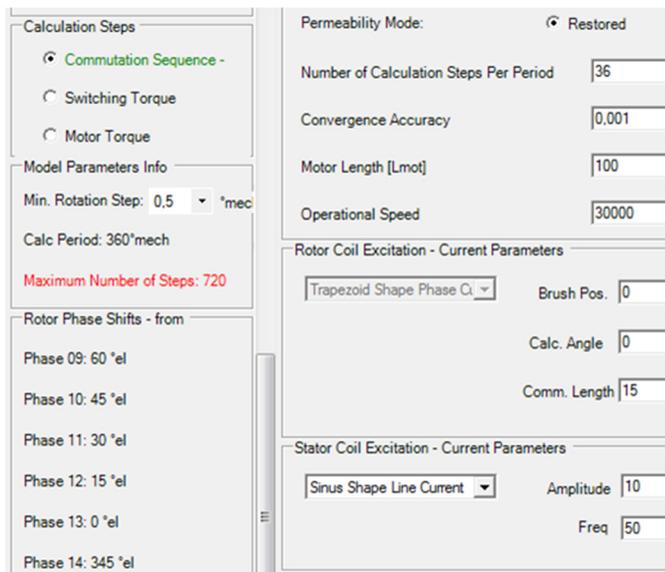


Abb. 224: Phasenlagen der Wicklungen

In „Results“ wird u.a. folgender Graph angezeigt:

„Transformer Voltage per Phase“: der Graph für Wicklung Nr. 13 (Phasenlage 0°el mit den einzelnen Berechnungspunkten) ist grün hervorgehoben dargestellt.

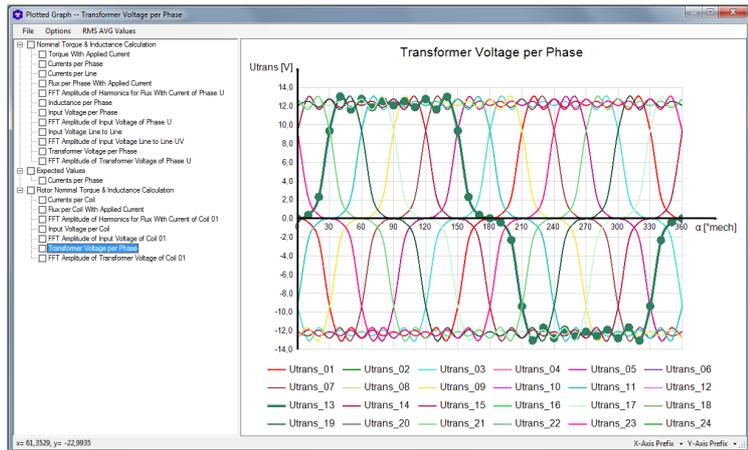


Abb. 225: Universal Motor - Transformer Voltage per Rotor Phase (Rotor Current = 0A)

### 6.6.2 Berechnung des Drehmoments während der Kommutierung „Switching Torque“

Die Einstellung hierzu erfolgt in „Motor Parameters - Calculation Steps“. In „Results“ können u.a. folgende Graphen angezeigt werden:

Die Berechnung erfolgt bei dem gewählten Beispiel mit 2 Statornuten und 24 Rotorwicklungen über die Rotor Positionen 0 - 15°mech.

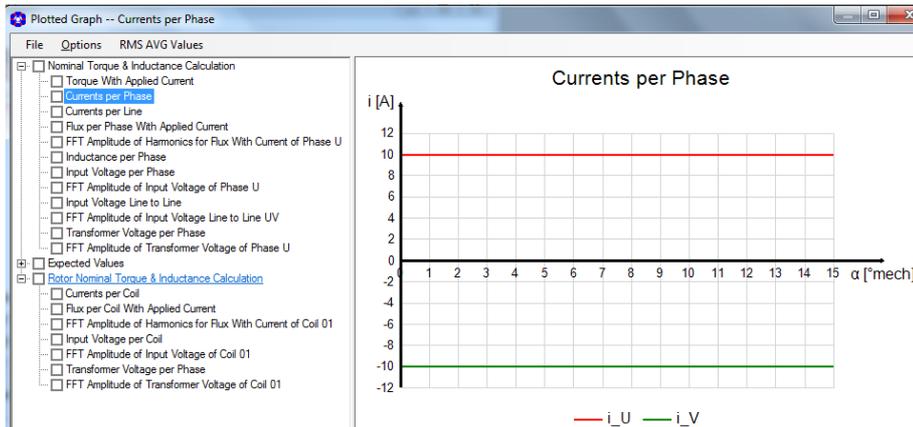


Abb. 226: Switching Torque - Statorströme

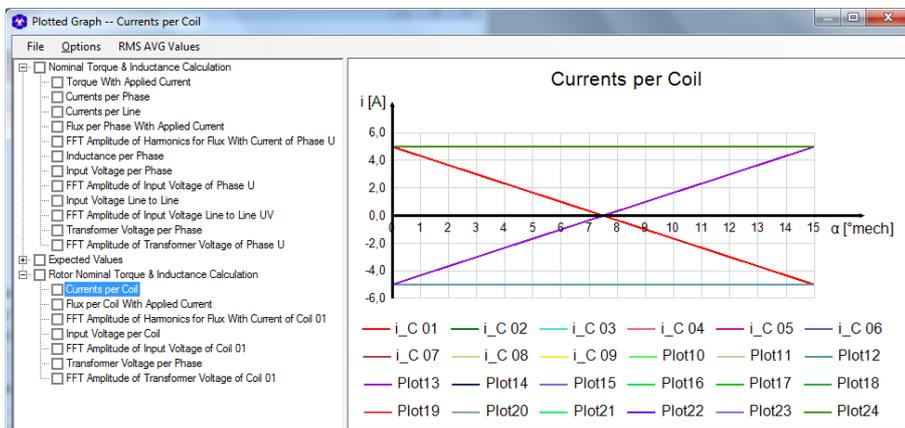


Abb. 227: Switching Torque - Rotorströme

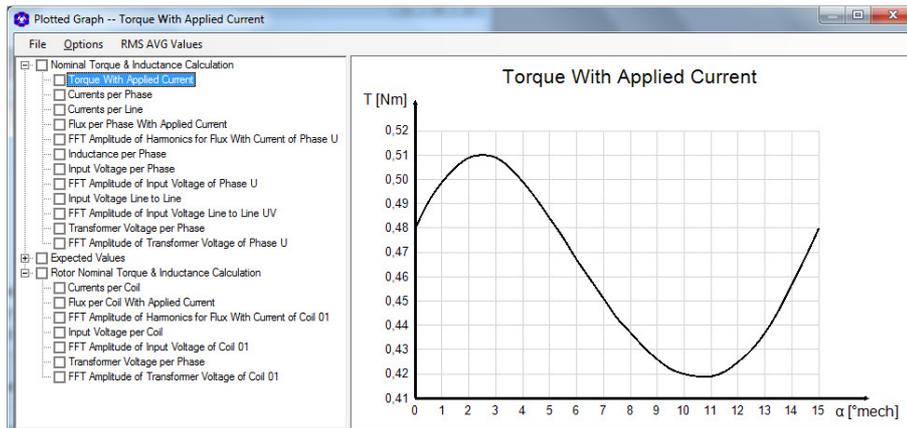


Abb. 228: Switching Torque – Drehmoment

### 6.6.3 Berechnung des Drehmoments im AC- oder DC-Betrieb „Motor Torque“

Für den DC-Betrieb muss in „Motor Parameters - Coils Excitation“ Konstantstrom gewählt werden. Für die nachfolgend angezeigten Ergebnisse wurde sinusförmiger Strom eingestellt, d.h. die Simulation wurde als AC-Motor durchgeführt.

Die Einheit der Abzisse wird jetzt im Zeitbereich angegeben - in dem Beispiel beträgt die Periode des sinusförmigen Statorstromes 20 ms entsprechend einer Frequenz von 50 Hz.

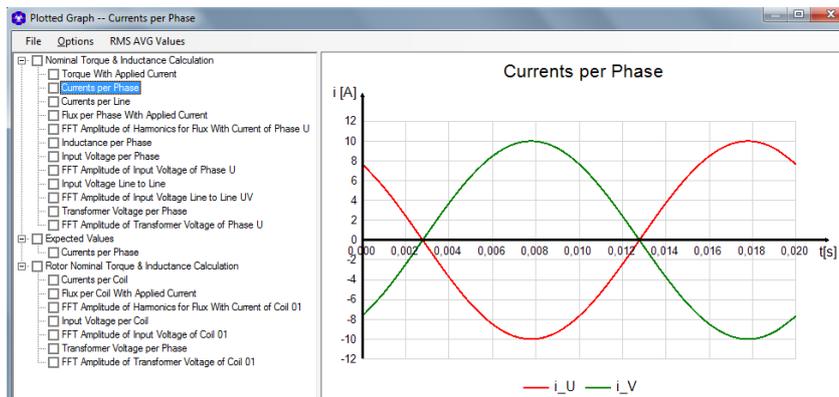


Abb. 229: Motor Torque - Statorströme

Die Rotorströme  $i_{C 01}$  bis  $i_{C 13}$  haben die gleiche Phasenlage. Die Rotorströme  $i_{C 14}$  bis  $i_{C 24}$  haben ebenfalls die gleiche Phasenlage aber um  $180^\circ$  gegenüber den vorher genannten versetzt.

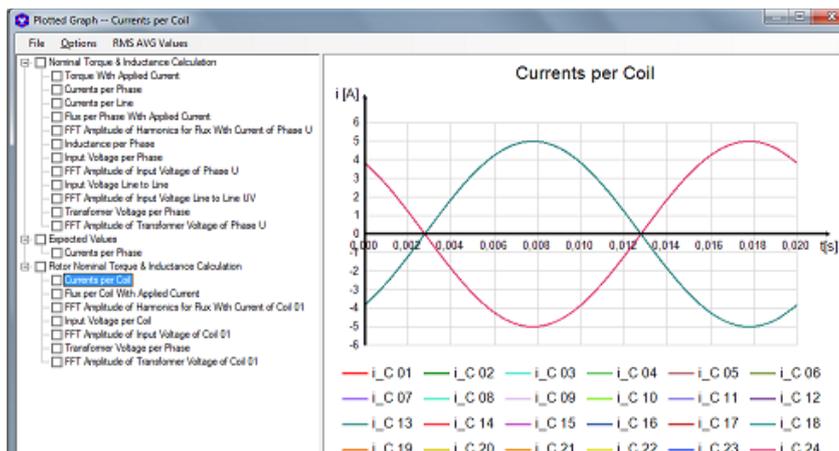


Abb. 230: Motor Torque - Rotorströme

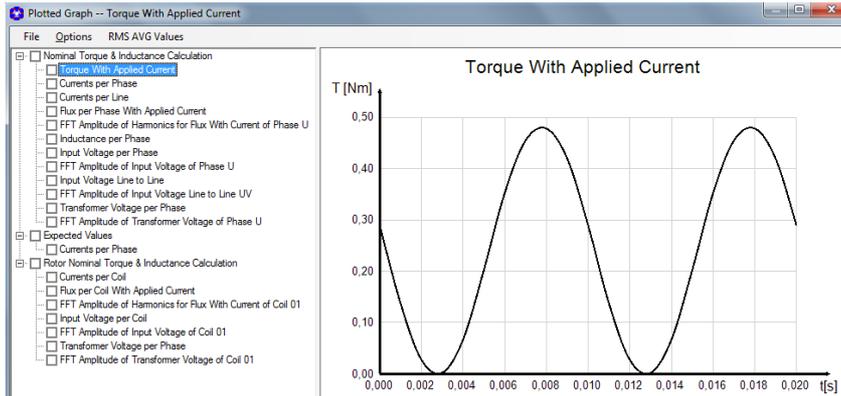


Abb. 231: Motor Torque - Drehmoment des AC-Motors

### 6.6.4 Berechnung der Rotorposition zur Positionierung der Bürsten

Für die Berechnung der optimalen Position der Bürsten können in „*Motor Parameters - Coil Excitation - Current Parameters*“ verschiedene Bürstenpositionen, Berechnungswinkel und Kommutierungslängen eingestellt werden. In „*Calculation Steps*“ wird „*Motor Torque*“ ausgewählt. Die Ergebnisse werden nach erfolgter Berechnung wie gewohnt in den Diagrammen unter dem Menü „*Results*“ angezeigt.

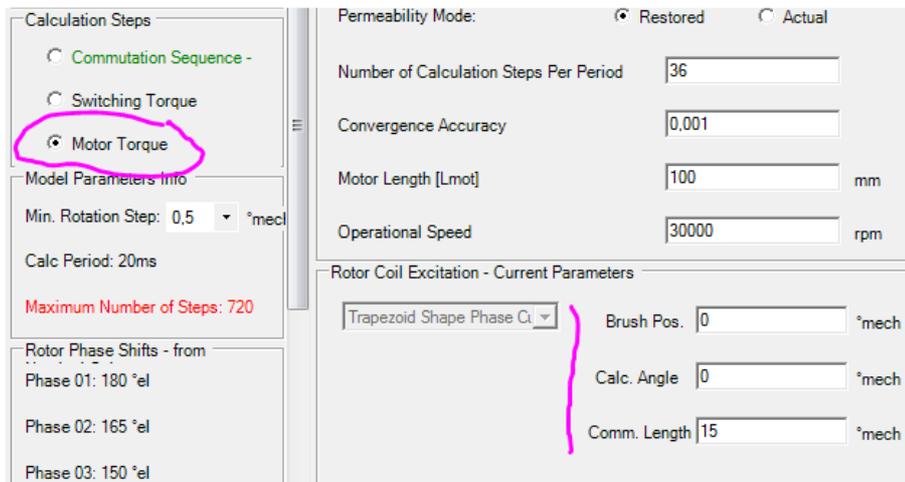


Abb. 232: Universal Motor - Positionierung der Bürsten

## 6.7 PM - Linear Motor

Die Erstellung eines Simulationsmodells Linear Motor wird über „File - New - Select Motor Type“ initialisiert. Es muss mindestens eine Linear Motor Topologie (\*.tol) im Topologie-Verzeichnis gespeichert sein, damit der Menüpunkt „PM - Linear Motor“ angezeigt wird.

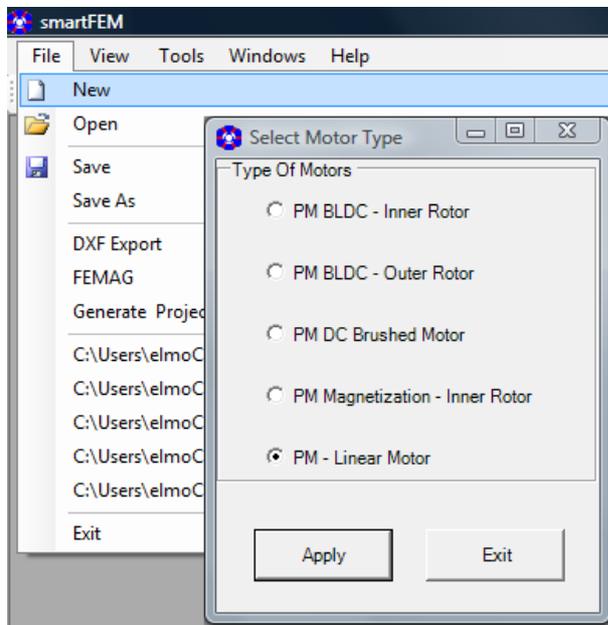


Abb. 233: PM-Linear Motor – Initialisierung

### 6.7.1 Modellbildung

Die Modellierung eines Linear Motors unterscheidet sich gegenüber der Modellierung der anderen Motorentypen nur dadurch, dass Rotor- und Statorgeometrie in einer Topologie „Geometry“ parametrisiert werden. Alle anderen Funktionen sind gleich - ausgenommen die Berechnung der Eisen und Magnetverluste und Motor Diagramme.

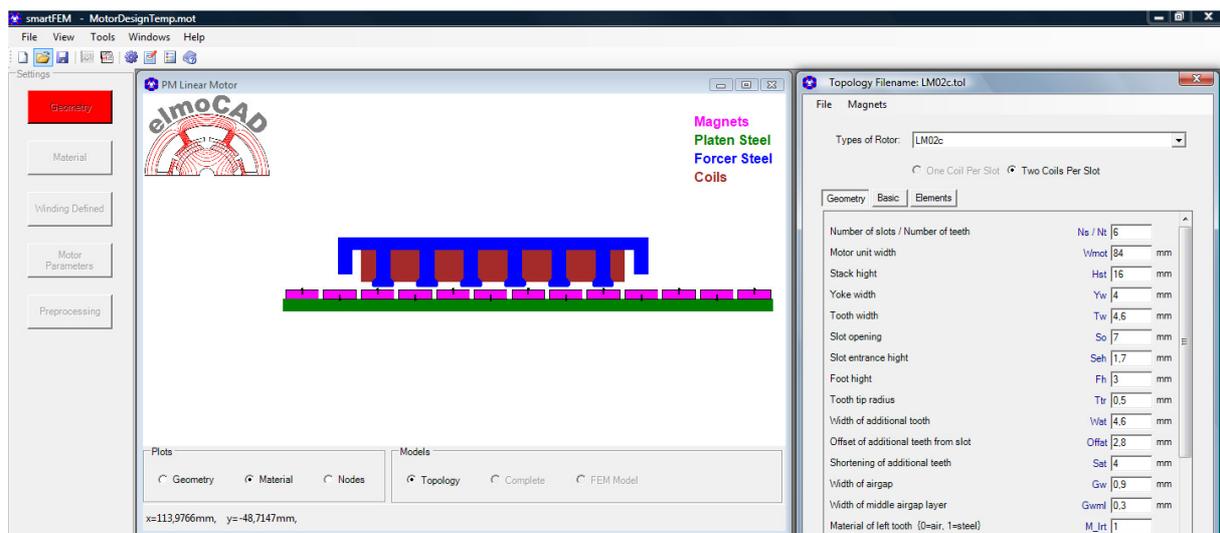


Abb. 234: PM-Linear Motor - Beispiel eines Geometriemodells

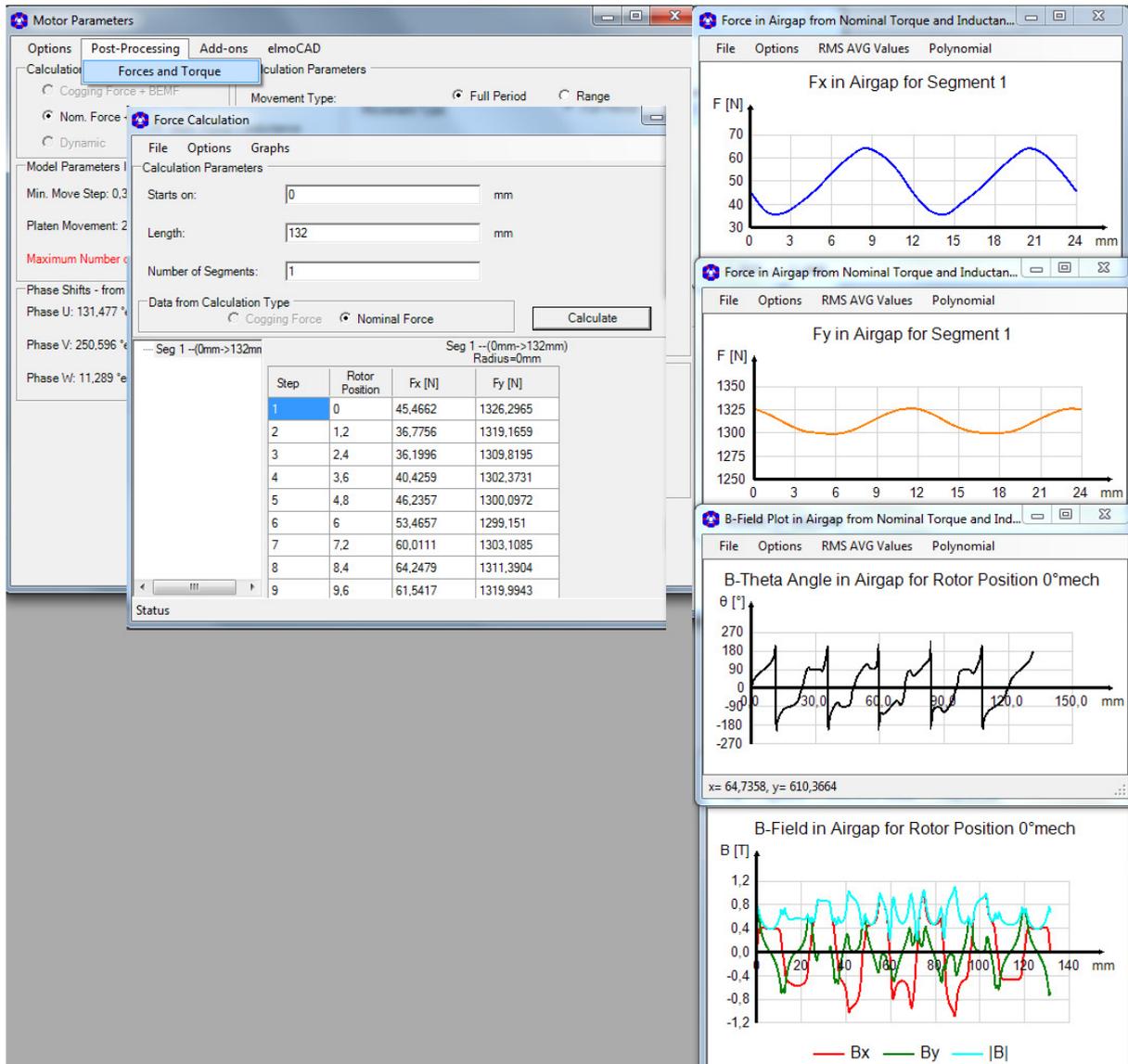


Abb. 235: PM - Linear Motor - Darstellung der Kräfte und Luftspaltinduktion

### 6.7.2 Berechnung der Verluste

Die Berechnung der Verluste von Linearmotoren erfolgt nur für periodische Modelle, da nur hierfür Fourier Transformationen durchgeführt werden können.

Folgende Topologien sind periodisch bzw. können zwischen periodisch und nicht periodisch umgeschaltet werden.

- „H3LM2 Linear motor - periodic“
- „H3LM3 Linear motor - full slot winding - periodic“

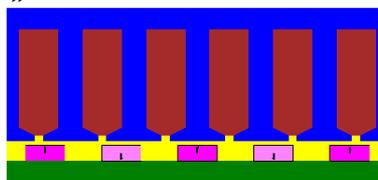
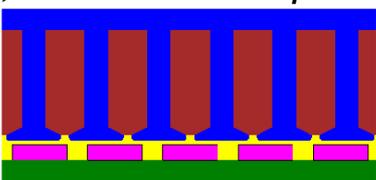


Abb. 236: PM – Linear Motor - periodische Modelle H3LM2 und H3LM3

- „LM021c“

In der Parametergruppe „Geometry“ wurde der Parameter „Type of Model“ eingeführt, mit dem zwischen nicht-periodischem und periodischem Modell umgeschaltet werden kann. Dabei werden beim periodischen Modell die nicht-periodischen Geometrieanteile weggelassen.

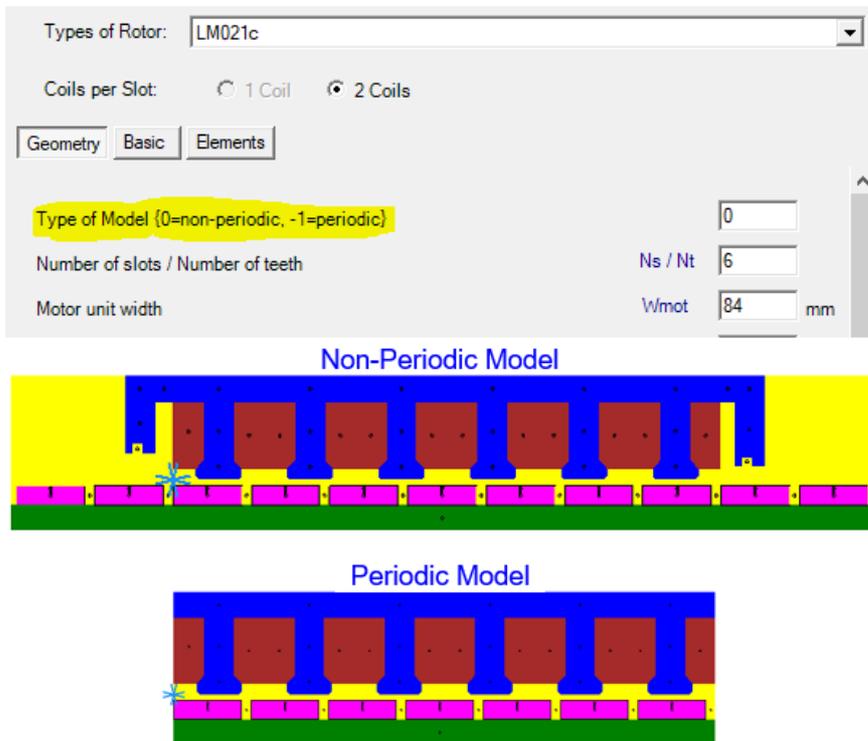


Abb. 237: PM – Linear Motor - LM021c, Umschaltung periodisch / nicht periodisch

- „LMxxx“

Die weiteren Linearmotor Topologien werden nach und nach entsprechend erweitert.

Die Berechnung der Verluste erfolgt wie bei den rotierenden Maschinen, indem „Losses“ in „Motor Parameters“ ausgewählt wird und nach durchgeführter „Nominal Force + Inductance“ Berechnung die Verluste in „Postprocessing“ ermittelt werden.

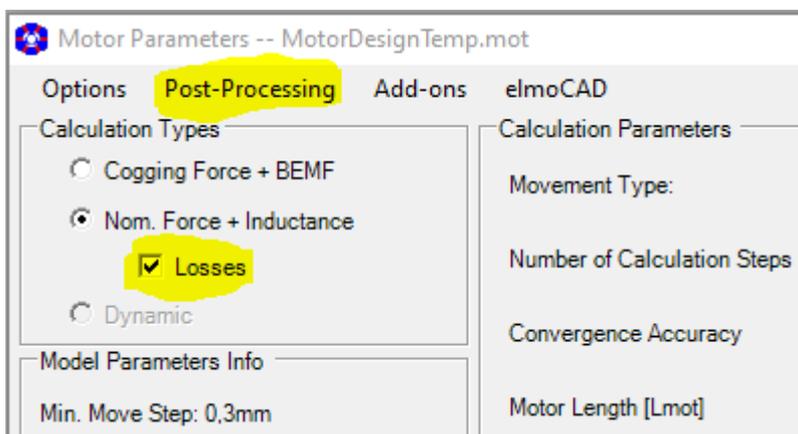


Abb. 238: PM – Linear Motor - Berechnung der Verluste

## 6.8 Aktuator

Geometriemodelle von Aktuatoren wie z.B. Ventile können entsprechend den DFX-Importregeln mit CAD-Programmen erstellt und nach dem DXF-Import in smartFEM simuliert werden.

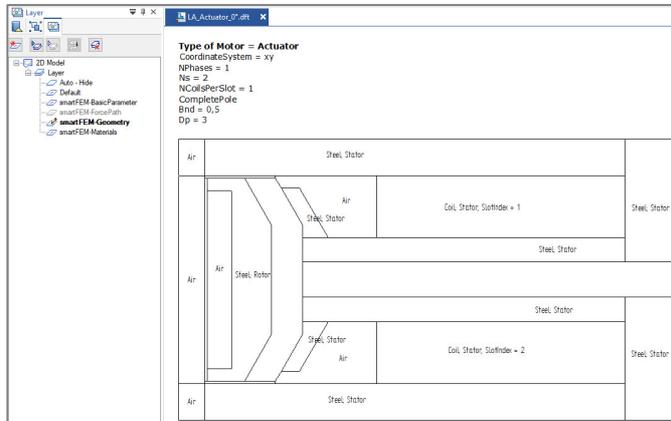


Abb. 239: Aktuator - CAD Zeichnung

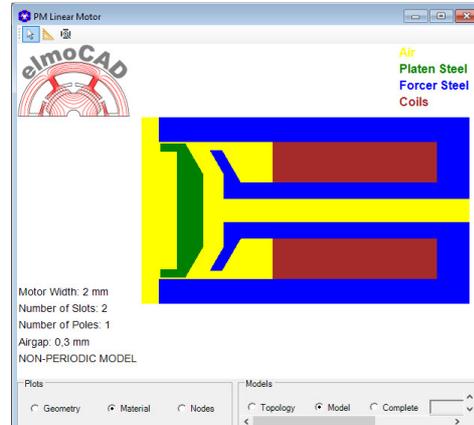


Abb. 240: Aktuator - smartFEM Modell nach DXF-Import

In der CAD Zeichnung müssen folgende Basis Parameter als Text enthalten:

- „**Type of Motor = Actuator**“
- „**CompletePole = True/False**“ oder „**CompletePole**“ bzw. „**HalfPole**“

Weitere Parameter können optional angegeben werden:

- „CoordinateSystem = xy“ (Defaultwert, wenn nicht angegeben) oder „... = rz“ für rotationssymmetrische Modelle
- Zusätzliche Parameter entsprechend anderen Maschinenmodellen wie z.B.: NPhases, Ns, NCoilsPerSlot, Bnd, Dp, etc.

Die Aktuatoren werden z.Z. wie Linearmotoren behandelt. Der Maschinentyp „Actuator“ wird zu einem späteren Zeitpunkt als eigener Typ verfügbar sein. Der Topologienname für den DFX-Import lautet „**LA\_CADdata**“.

Für die Ermittlung der auf den beweglichen Teil (auch „Kolben“ genannt) wirkenden Kräfte muss der Integrationsweg „**ForcePath**“ in der Zeichnung als Polygonzug enthalten und mit dem entsprechenden Text gekennzeichnet sein. Sofern die Kräfte an unterschiedlichen Positionen des Kolbens berechnet werden sollen muss zusätzlich eine Linie als Richtungsvektor enthalten und mit dem Text „**MoveVector**“ gekennzeichnet sein. Die Bewegung des Kolbens für die unterschiedlichen Positionen wird ausgehend vom Anfangspunkt des Vektors in Richtung Endpunkt vorgenommen. Der maximal mögliche Weg entspricht der Vektorlänge. Die Bewegung entlang Kreisbögen bzw. Kurven wird in zukünftigen smartFEM Versionen verfügbar sein.

Zu Festlegung des Ursprungs P(0,0) muss ein Punkt an eine entsprechende Stelle gezeichnet werden die z.B. auf der Mittellinie mit  $y=0$  [ $P(0,0) = P(x,0)$ ].

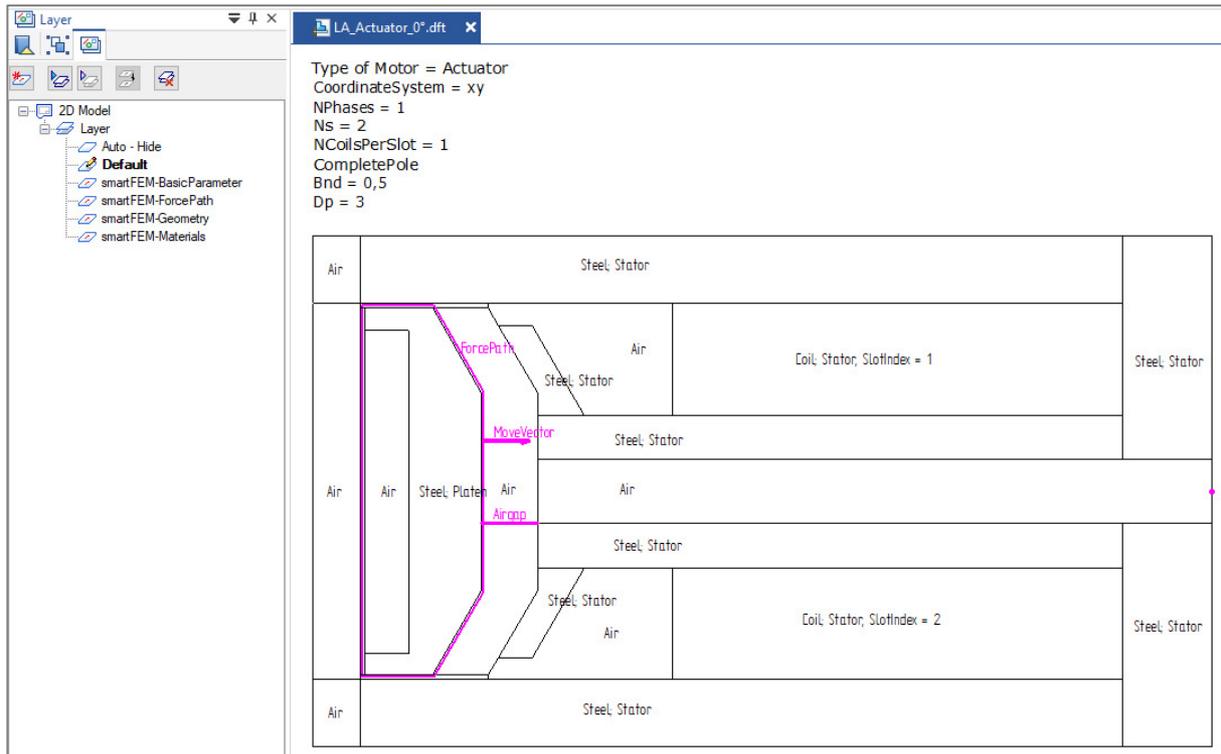


Abb. 241: Aktuator - ForcePath und MoveVector

Der Polygonzug „ForcePath“ muss um das beweglich Aktuator-Teil herum entgegen dem Uhrzeigersinn vollständig in Luft verlaufen.

Der „MoveVector“ kann an einer beliebigen Stelle positioniert werden. Es werden alle Geometrielemente in smartFEM bei Bewegung an eine andere Position verschoben, die innerhalb des „ForcePath“ liegen.

Der Luftspalt wird durch den Anwender definiert und kann optional als Linie mit der Textbezeichnung "Airgap" gezeichnet werden. Die Länge wird nach dem DXF-Import als Parameter angegeben und in dem Grafikfenster gekennzeichnet.

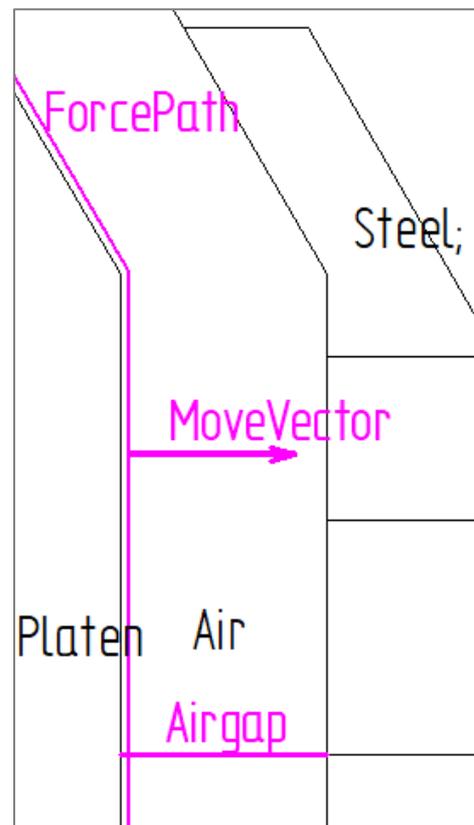


Abb. 242: Aktuator - ForcePath, MoveVektor und Airgap

Die Geometrie des beweglichen Geometrieteils muss mindestens mit einer Linie an den festen Teil der Geometrie angebunden sein, da es wegen der Vernetzung keine freien Flächenelemente geben darf.

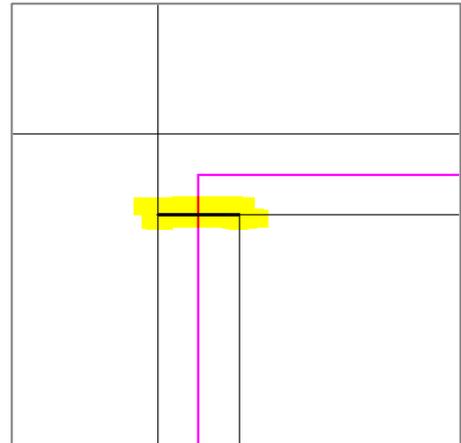


Abb. 243: Aktuator - Verbindung des beweglichen mit dem festen Geometrieteil

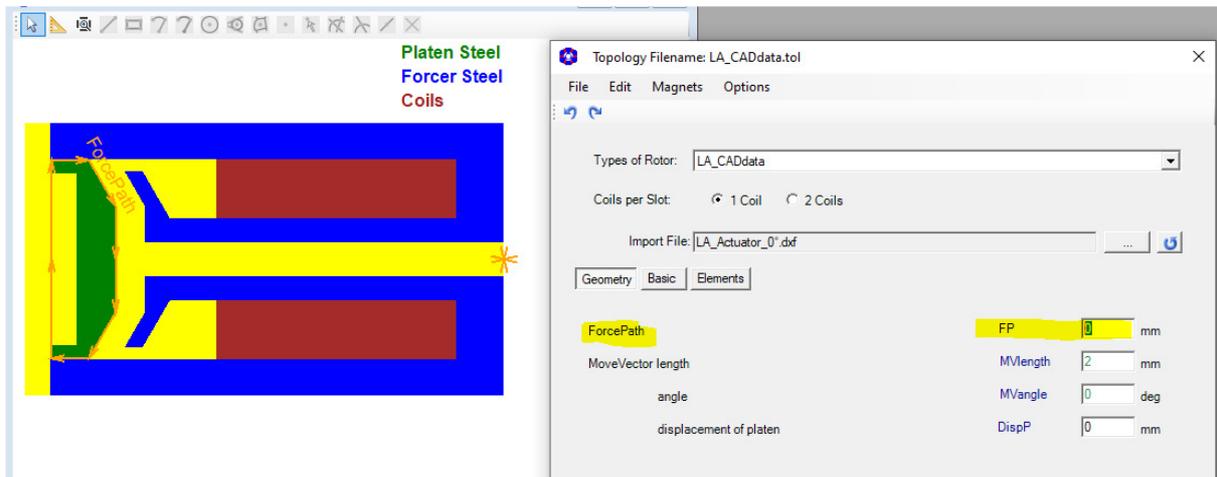


Abb. 244: Aktuator - Darstellung des „ForcePath“ in smartFEM

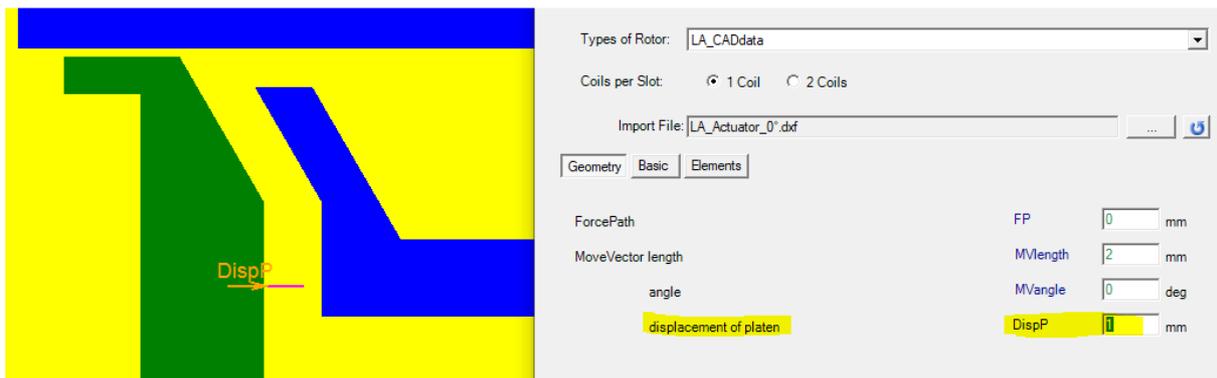


Abb. 245: Aktuator - Darstellung des „MoveVector“ mit Verschiebung des Kolbens

Ergebnisse nach „Nominal Torque“ und „Plot“ Berechnungen:

- Kräfte in Richtung des „MoveVector“ vs. „Displacement“
- Felddiagramme

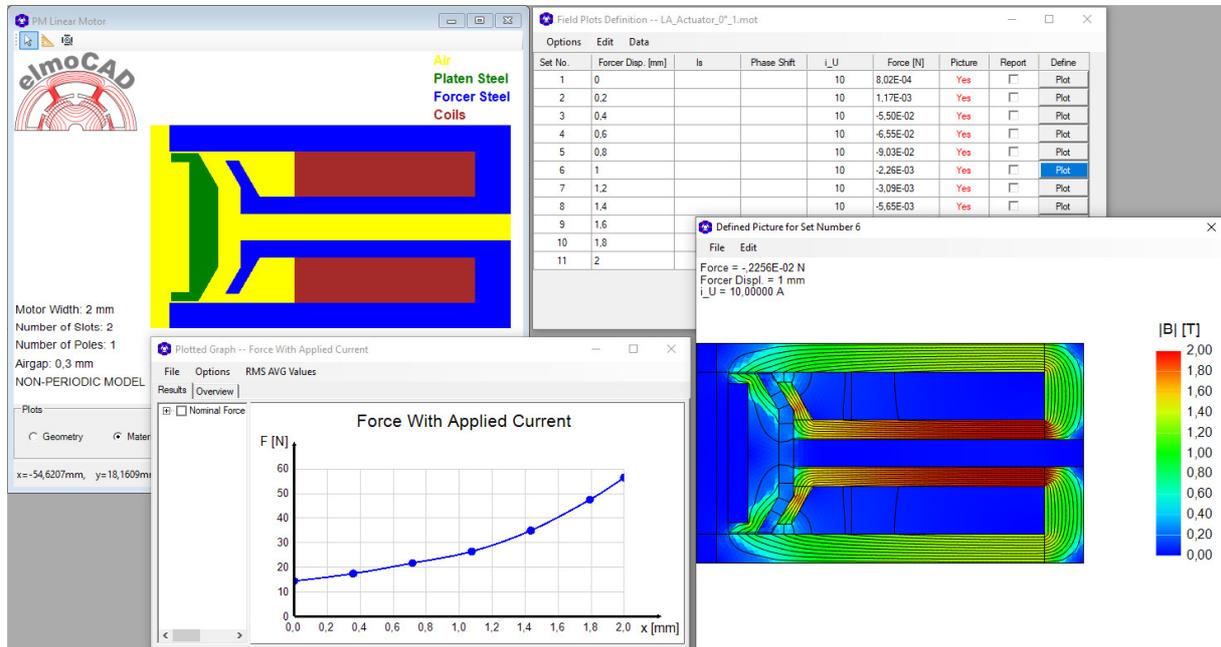
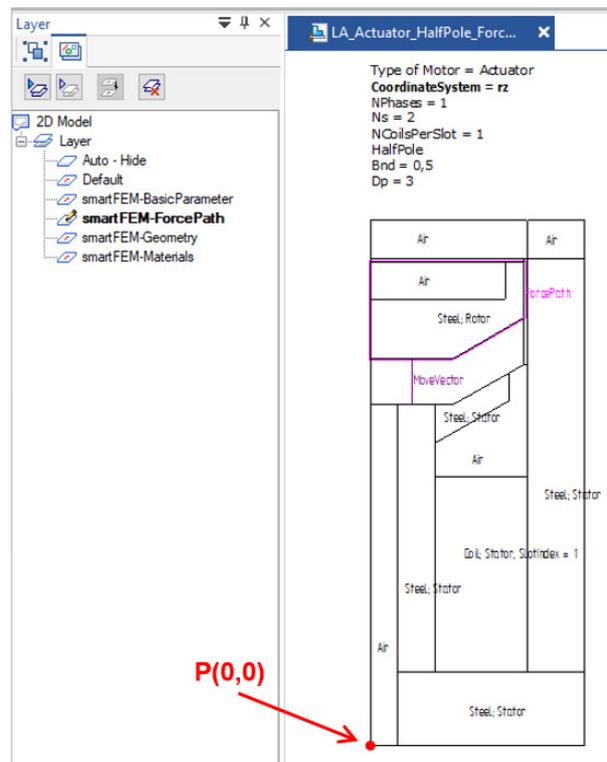


Abb. 246: Aktuator - Simulation und Ergebnisse

Für rotationssymmetrische Aktuatoren wird nur eine halbe Geometrie ausgehend von der Mittellinie bzw. Symmetrielinie mit  $x=0$  nach rechts mit  $x>0$  gezeichnet werden. Der Ursprungspunkt  $P(0,0)$  sollte an die untere linke Ecke gezeichnet werden. Es muss dann auch der Basisparameter „CoordinateSystem = rz“ angegeben werden.

**Diese Funktion ist noch nicht implementiert!**



## 7 Schnittstellen

### 7.1 Export von Ergebnisdaten als tabellarischer Text

Alle Ergebnisdaten können über das ClipBoard per Copy/Paste in andere Softwaretools kopiert werden und teilweise auch direkt in tabellarischen Textdateien gespeichert werden.

Beispiele:

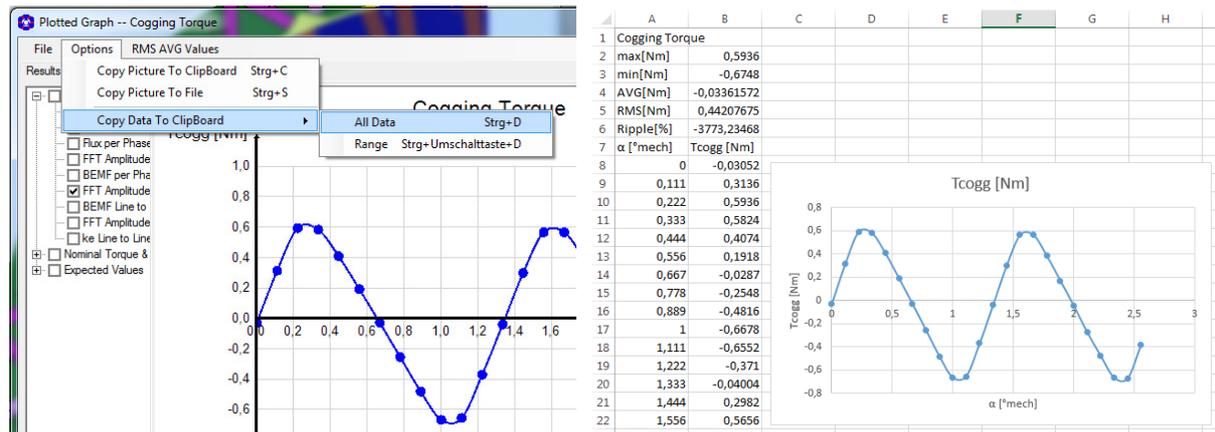


Abb. 247: Export von Ergebnisdaten als Text - Cogging Torque

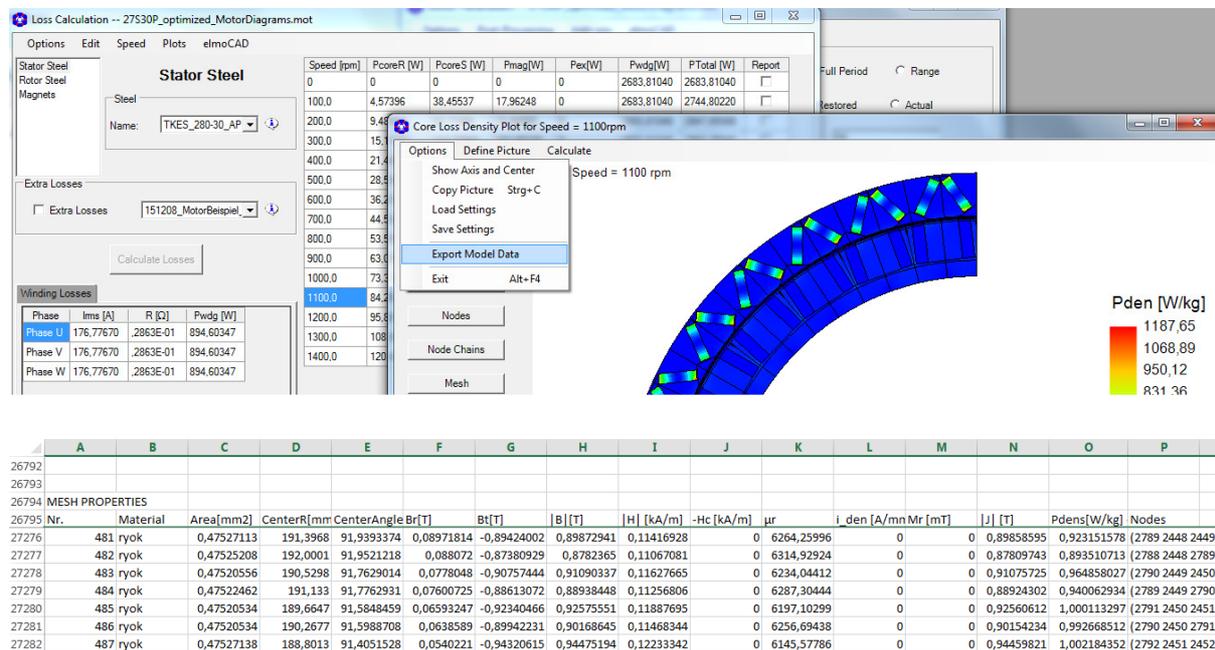


Abb. 248: Export von Ergebnisdaten als Text - Model Data

## 7.2 Dokumentation „Project Report“

smartFEM bietet die Möglichkeit über die Menüfolge „File“→“Generate Project Report“ einen Projektbericht zu generieren, der im RTF-Format gespeichert wird und mit gängigen Textprogrammen weiterbearbeitet werden kann. Die Berichtsinhalte (Designdaten, Berechnungsergebnisse und Grafiken) können benutzerspezifisch ausgewählt werden.

Die Auswahl der Diagramme erfolgt bei den entsprechenden Simulationsergebnissen.

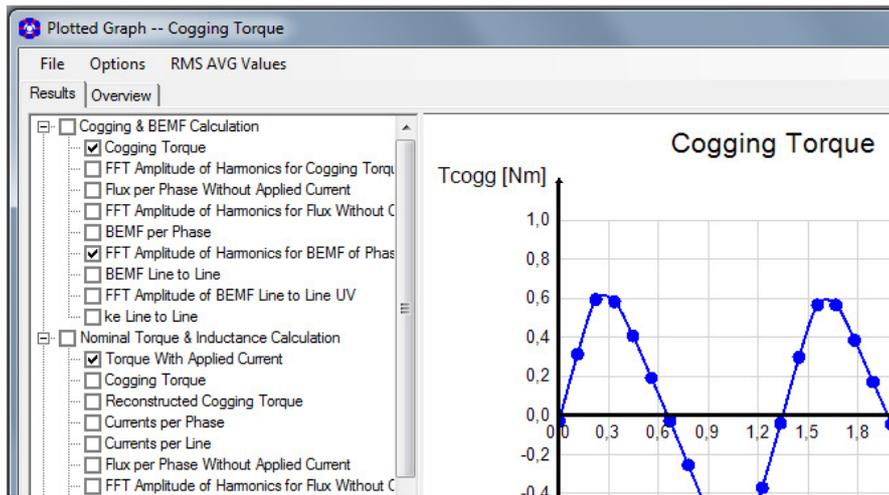


Abb. 249: Projektbericht: Auswahl der Diagramme

Die Auswahl von Diagrammen generell, einzelner Designparametern und Berechnungsergebnisse als Text erfolgt in einem PopUp-Fenster nach Anklicken des Menüs “Generate Project Report“:

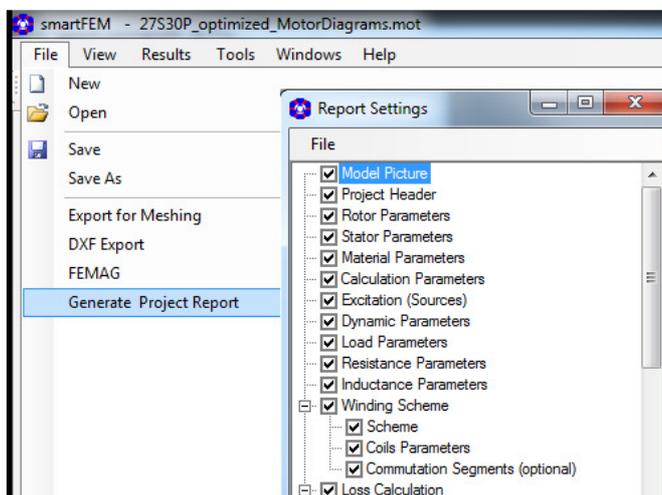


Abb. 250: Projektbericht - Auswahl von Designparametern und Ergebnissen als Texte

Beispiel:

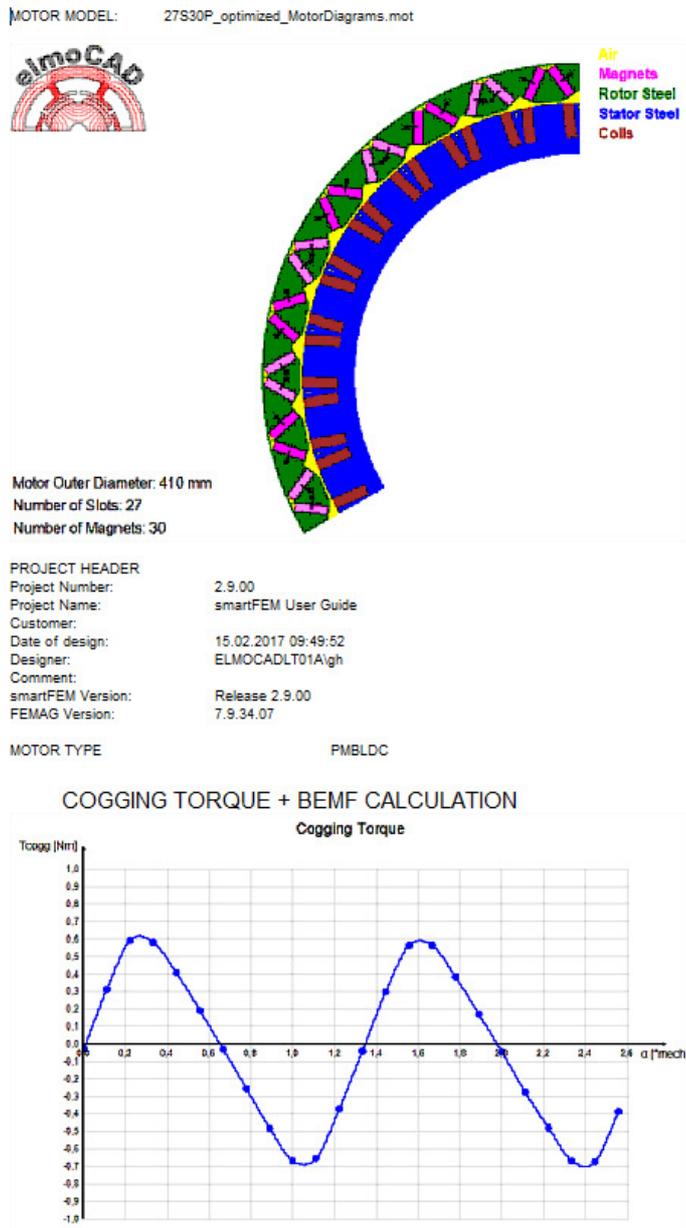


Abb. 251: Projektbericht mit Microsoft® Word geöffnet

### 7.3 FEMAG

smartFEM benutzt FEMAG zur numerischen Berechnung aller Ergebnisse, die auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) ermittelt werden. Dazu übergibt smartFEM an FEMAG alle erforderlichen Informationen und steuert alle FEMAG Prozesse

- zur Erstellung des für Analyse und Auswertung der numerischen Berechnungen erforderlichen Simulationsmodells - ausgelöst durch Betätigung der Schaltfläche „*Preprocessing*“.
- zur Durchführung aller Analysen und Auswertungen - ausgelöst durch Betätigung der Schaltfläche „*Calculation*“

smartFEM übernimmt seinerseits aus den FEMAG Ergebnisdateien alle relevanten Daten für weitere Berechnungen, Auswertungen und grafische Darstellungen.

Laufende FEMAG Prozesse können jederzeit durch Betätigung der Schaltfläche „*Calculation Running*“ kontrolliert abgebrochen werden, ohne dass Daten verloren gehen.

Der Benutzer kann FEMAG in der Version, die er unter mit der Menüfolge „*Tools* → *smartFEM Settings* → *User FEMAG Exe File*“ eingestellt hat, jederzeit direkt durch Betätigung der Schaltfläche „*FEMAG*“ starten. Bei Klick mit der rechten Maustaste auf die Schaltfläche wird ein Auswahlménü angeboten:

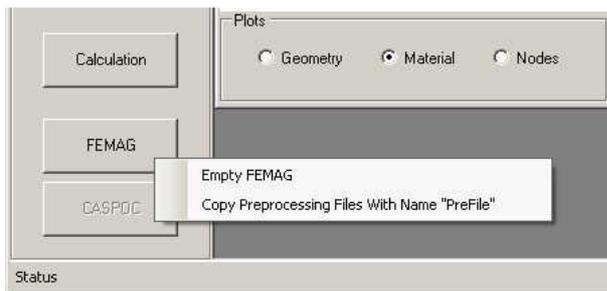


Abb. 252: FEMAG aus smartFEM heraus starten

- „*Empty FEMAG*“  
FEMAG wird gestartet. Der Benutzer kann ein neues FEMAG Modell erstellen oder ein bereits bestehendes weiterbearbeiten.
- „*Copy Preprocessing Files With Name „PreFile“*“  
Das aktuelle smartFEM Modell wird unter den Namen „*Prefile.a7*“ und „*PreFile.i7*“ als Kopie im angegebenen FEMAG Verzeichnis zur Verfügung gestellt. Gleichzeitig wird FEMAG gestartet und der Benutzer kann das Modell mit den FEMAG Kommando „*Select Input File*“ laden und bearbeiten. Vom Benutzer durchgeführte Änderungen an dem Modell und Auswertungen werden von smartFEM nicht übernommen.

## 7.4 CAD - DXF Import

### 7.4.1 Topologien

Für den Import von mit CAD-Systemen erstellten 2D Rotor- und Statorgeometrien wurden spezielle Topologien realisiert, die den Import von Geometriedaten im DXF oder CSV Format ermöglichen:

- „PM BLDC - Inner Rotor“
  - o **CR\_CADdata.top**
  - o **CS\_CADdata.top**
  
- „PM – BLDC Outer Rotor“, „PM DC - Brushed Motor“
  - o **OCR\_CADdata.top**
  - o **OCS\_CADdata.top**
  
- „Synchonus Motor“
  - o **Sync\_CADdata.top**
  
- „SR Motor“
  - o **SR\_CADdata.top**
  
- „Sync. Reluctance Motor“
  - o **SyncRel\_CADdata.top**
  
- „Universal Motor“
  - o **UR\_CADdata.top**
  
- „Linear Motor“
  - o **LM\_CADdata.top**
  
- „Actuator“
  - o **LA\_CADdata.top**

Sie werden zunächst wie die „normalen“ Topologien aufgerufen bevor die Importdatei selektiert werden kann.

### 7.4.2 DXF Import

Basis für die Implementierung der DXF-Schnittstelle ist die Dokumentation „AutoCAD\_2011\_dxf\_reference\_v.u.25.1.01“ von Autodesk, Inc., USA.

Aus den DXF-Dateien werden die Entities „ARC“, „CIRCLE“, „LINE“, „LWPOLYLINE“, „POINT“, „MTEXT“, „TEXT“ und „SPLINE“ mit den für smartFEM relevanten Daten selektiert und daraus alle für die Simulation erforderlichen Informationen generiert:

- POINT: Der Ursprung P(0) des smartFEM Koordinatensystems hat die Koordinaten  $x = 0$  und  $y = 0$  und ist gleichzeitig Mittelpunkt aller Rotor- und Statorgeometrien.

**Achtung:**

Sofern der Ursprung der mit einem CAD-System in eine DXF-Datei exportierten Koordinaten nicht im Mittelpunkt der Rotor- bzw. Statorgeometrie (= Schnittpunkt der rechten und linken Sektorlinie des Pols) liegt, muss mit dem CAD-System ein zusätzlicher Punkt in diesem Punkt erzeugt werden.

- ARC,  
CIRCLE,

- LINE,
- SPLINE: Aus den selektierten Informationen werden jeweils die Anfangs- und Endpunkte, bei Kreisen und Kreisbögen zusätzlich die Mittelpunkte und bei SPLINES zusätzlich die Kontrollpunkte mit Berücksichtigung eines „PickPunktRadius“ generiert und von 1 bis n nummeriert.
- TEXT: Die zur Erzeugung der Geometrie in smartFEM benötigten zusätzlichen Informationen müssen als Texte in der Zeichnung enthalten sein.

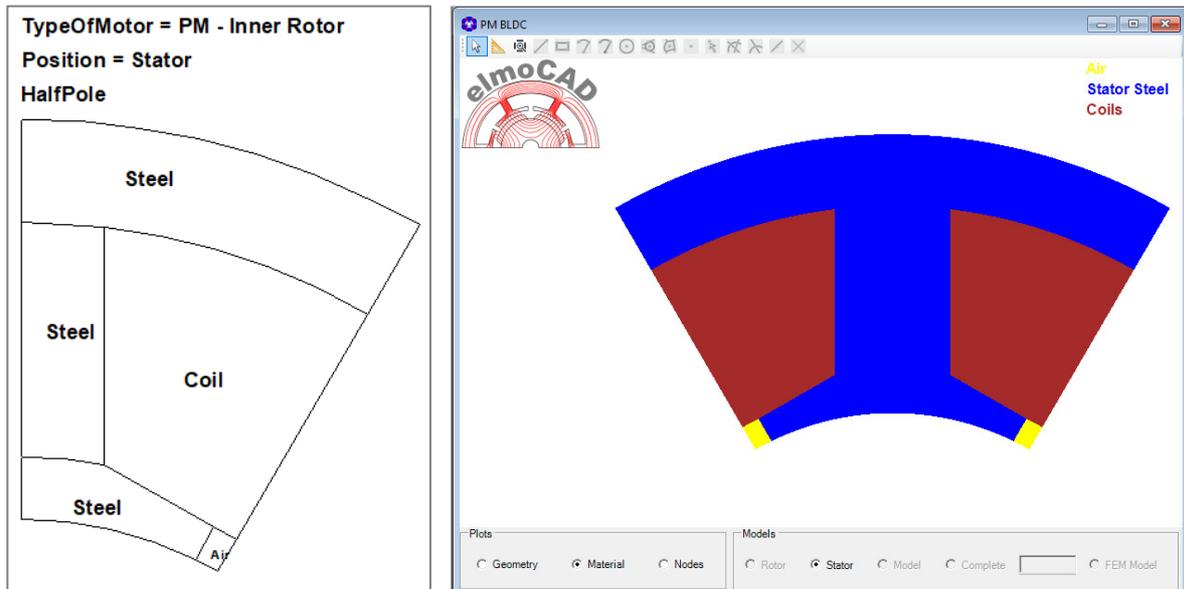


Abb. 253: DXF-Import - Beispiel für den Import einer Statorgeometrie

Folgende Kennwörter und Parameter müssen obligatorisch oder können optional als "TEXT" in der CAD-Zeichnung enthalten sein:

**Obligatorische Kennwörter und Parameter**

Kennwort	Parameter	Beschreibung
Type of Motor	= PM - Inner Rotor	Motortyp: PM BLDC - Inner Rotor
	= PM - Outer Rotor	PM BLDC - Outer Rotor PM DC – Brushed Motor
	= SR - Motor Inner Rotor	SR Motor
	= Sync. Reluctance Motor - Inner Rotor	Synchronous Reluctance Motor
	= Universal Motor	Universal Motor
	= PM - Linear Motor	PM - Linear Motor
	= Actuator	Aktuator

Position	= Rotor  = Stator	Geometrietyp: Rotor  Stator  Hinweis: Bei Linearmotoren sind Geometrien unterhalb des Luftspaltes als „Rotor“ festgelegt, oberhalb als „Stator“.
----------	-------------------------	---

**Optionale Kennwörter und Parameter**

Kennwort	Parameter	Beschreibung
Nicht verwendete Kennwörter haben den Wert = False	[...] = default Wert, wenn kein Parameter definiert ist	
HalfPole	[= True]	Die Geometrie beschreibt einen halben Pol und wird im FEM-Modell gespiegelt.
CompletePole	[= True]	Die Geometrie beschreibt einen ganzen Pol und wird im FEM-Modell nicht gespiegelt.
	[= [True;] Asymmetric]	Die Geometrie beschreibt einen ganzen geometrisch unsymmetrischen Pol
MirrorPole	[= True]	Die Polgeometrie wird im FEM-Modell an der linken Polgrenze gespiegelt.
	= False	Die Polgeometrie wird nicht gespiegelt
SegmentedGeometry	[= True]	Eine segmentierte Geometrie mit n Polen pro Segment.
CompleteGeometry	[= True]	Die vollständige Geometrie mit allen Stator- bzw. Rotorpolen (360°mech). Sie kann <b>nicht-symmetrisch</b> in Bezug auf die einzelnen Pole und damit <b>nicht-periodisch</b> in Bezug auf die BEMF sein. Sie wird ohne Veränderungen in das FEM-Modell übernommen. Die FEM-Berechnungen erfolgen über 360°mech Rotation des Rotors.
	[= True; Periodic]	Die vollständige Geometrie ist periodisch in Bezug auf die BEMF. Die FEM-Berechnungen laufen über die BEMF-Periode [°mech].
CoordinateSystem	[= xy]	Die Geometrie ist in der xy-Ebene beschrieben.
	= rz	Die Geometrie ist rotationssymmetrisch.

Zur Beschreibung der Materialtypen von Flächen müssen folgende Texte enthalten sein. Die Verankerungspunkte der Textboxen müssen in den entsprechenden Flächenelementen liegen. Mehrere Parameter müssen durch Semikolon „;“ getrennt werden. Es ist keine bestimmte Reihenfolge der Parameter vorgeschrieben.

Die auf diese Weise definierten Flächen können im Geometriefenster der Topologie mit der Maus ausgewählt und bearbeitet werden. Flächen, für die kein Materialtyp definiert wurde, werden als Luft definiert und können nicht bearbeitet werden.

<b>Kennwort</b>	<b>Parameter</b>	<b>Beschreibung</b>
Magnet	[; MaterialNo = #] oder [; MatNo = #]  [; MagAngle = #.##]	Material = Magnet  Material Nummer entsprechend den in „Materials“ definierten Materialdaten  Winkel der Magnetisierungsrichtung in Bezug auf die x-Achse [°mech]
Steel	[; MaterialNo = #] oder [; MatNo = #]  [; Length = #.##]	Material = Elektroblech  Material Nummer entsprechend den in „Materials“ definierten Materialdaten  Relative Länge in axialer z-Richtung [% der Motorlänge Lmot]
Coil	[; MaterialNo = #] oder [; MatNo = #]  [; SlotSideIndex = #]	Material = Wicklung  Material Nummer entsprechend den in „Materials“ definierten Materialdaten  Angabe auf welcher Seite in der Nut die Wicklung liegt
[Air]		Material = Luft

### **Optionale Parameter**

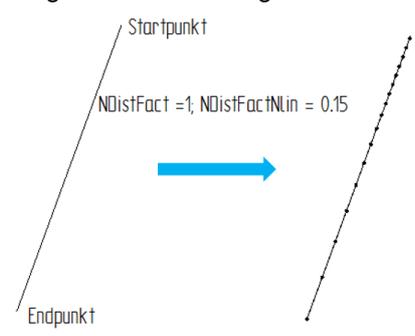
Folgende Texte können enthalten sein. Sofern keine Angaben enthalten sind, ermittelt smartFEM diese Werte automatisch aus den selektierten Geometriepunkten.

#### **Hinweis:**

Außenradien müssen dem maximalen bzw. minimalen Abstand zwischen Mittelpunkt und der Außen- bzw. Innenkontur der jeweiligen Geometrie entsprechen. Bei nicht kreisförmigen Konturen, können die Radien an den Sektorlinien der Polsegmente unter Umständen nicht aus den Geometriepunkten ermittelt werden. In diesem Fall müssen sie angegeben werden.

Kennwort	Parameter	Beschreibung
Rro =	#.###	Außenradius Rotor
Rri =	#.###	Innenradius Rotor
Rso =	#.###	Außenradius Stator
Rsi =	#.###	Innenradius Stator
Np =  alternativ Ns = bzw. Nm =	##  ## ##	Anzahl Pole für Rotor bzw. Stator entsprechend „Position“  Anzahl Statornuten Anzahl Magnetpole

Knotenabstände bzw. Anzahl Segmente können für Linien und Kreisbögen wie folgt angegeben werden. Die Textboxen müssen so positioniert werden, dass die Verankerungspunkte möglichst nahe an den jeweiligen Linien bzw. Kreisbögen liegen.

NDistFact = oder NDist =	##### (default: 1.0)	Faktor zur Festlegung der Knotendichte = $Bna * NDistFact = Bna * NDist$ . Die Anzahl der Segmente ergibt sich aus $NSeg = Length / NDistFact$ .
NDistFactNlin = oder NlinDist =	##### (default: 0.0=)	<p>Faktor zur Festlegung einer nicht linearen Knotendichte auf Linien. Die Anzahl der Segmente NSeg wird berechnet.</p> <p>Bei positivem Faktor und Positionierung der Textbox näher an den Endpunkt der Linie erfolgt die Verteilung der Knotendichte von gering nach hoch in Richtung von Start- nach Endpunkt, bei negativem Faktor oder Positionierung näher am Startpunkt in umgekehrter Richtung.</p> 

NSeg =	###	Anzahl der Segmente, in die Linien, Kreisbögen und Kurven durch die Knoten unterteilt werden. NDistFact wird berechnet.
--------	-----	---

**Weitere optionale Parameter**

	Parameter	Beschreibung
MiddleSlotLine		Kennzeichnung der Linie, die bei unsymmetrischen Geometrien die Nut in rechte und linke Nutseite teilt.
NCoils = NCoilsPerSlot =	1 oder 2, default = 2	Ein-, Zwei- oder Mehrschichtwicklung (Wicklung in linker/rechter Nuthälfte bei Zweischichtwicklung)
CoilsLayer =	UpDown  RingCoils	Wicklung in oberer/unterer Nuthälfte (nur bei Zweischichtwicklung)  Ringwicklung um den Statorrücken
NSlotsPerSegment	##	Anzahl der Nuten je Segment bei segmentierten Geometrien („ <i>SegmentedGeometry</i> “)
NPhases =	##, default = 3	Anzahl der Phasen
Bna =	#####, default: = 1.0°mech	BasisKnotenWinkel = minimaler Winkel zwischen zwei Knoten am Luftspalt.
Bnd =	#####, default: = 0.3mm	BasisKnotenAbstand = minimaler Abstand zwischen zwei Knoten am Luftspalt
Dp =	#, default = 2	Anzahl Nachkommastellen für die Rundung der eingegebenen und angezeigten Parameterwerte

Mit dem CAD Programm „*Solid Edge 2D-Drafting*“ von Siemens PLM Software können Texte auch mittels einer Textblase den jeweiligen Linien, Kreisbögen, etc. zugeordnet werden.

## 7.4.3 Beispiele

### 7.4.3.1 Beispiel für eine Statorgeometrie

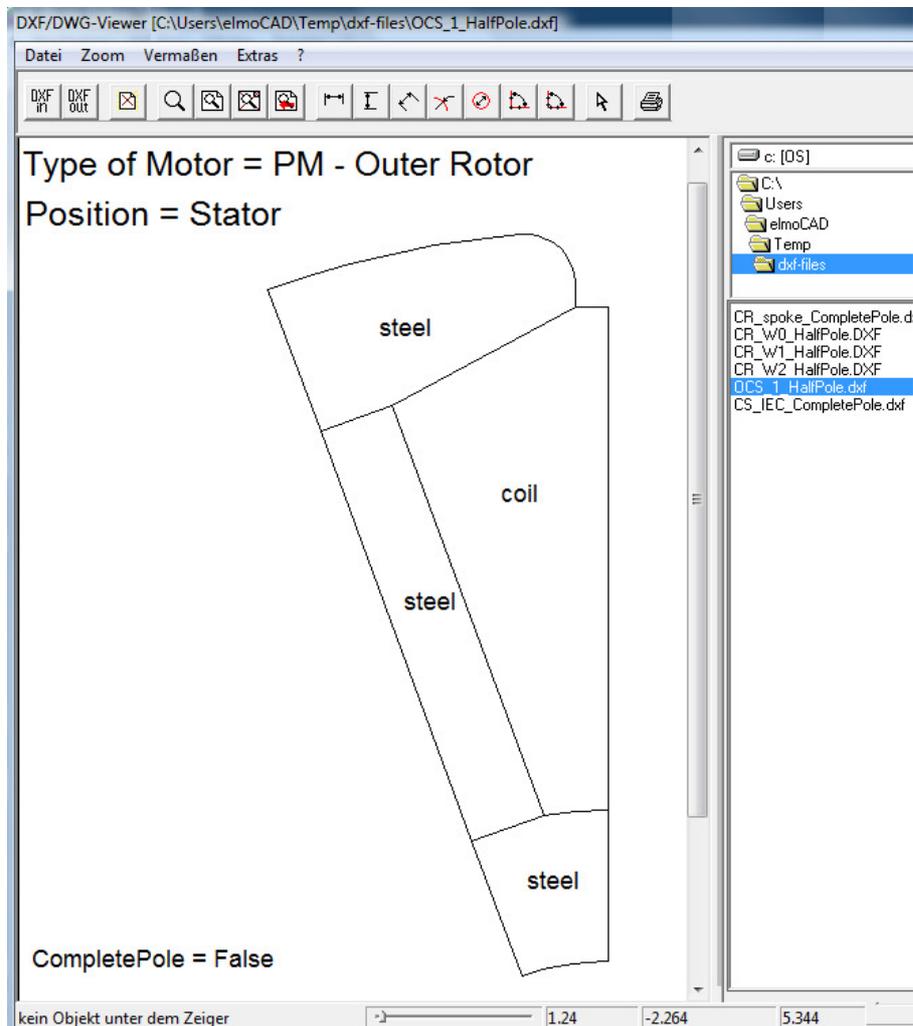


Abb. 254: DXF-Import - Beispiel Statorgeometrie

smartFEM erkennt die Lage in der  $xy$ -Ebene und dreht die Topologie so, dass sie wie die „normalen“ Standard Topologien angezeigt werden.

### 7.4.3.2 Beispiel für eine Rotorgeometrie mit Knotendichten

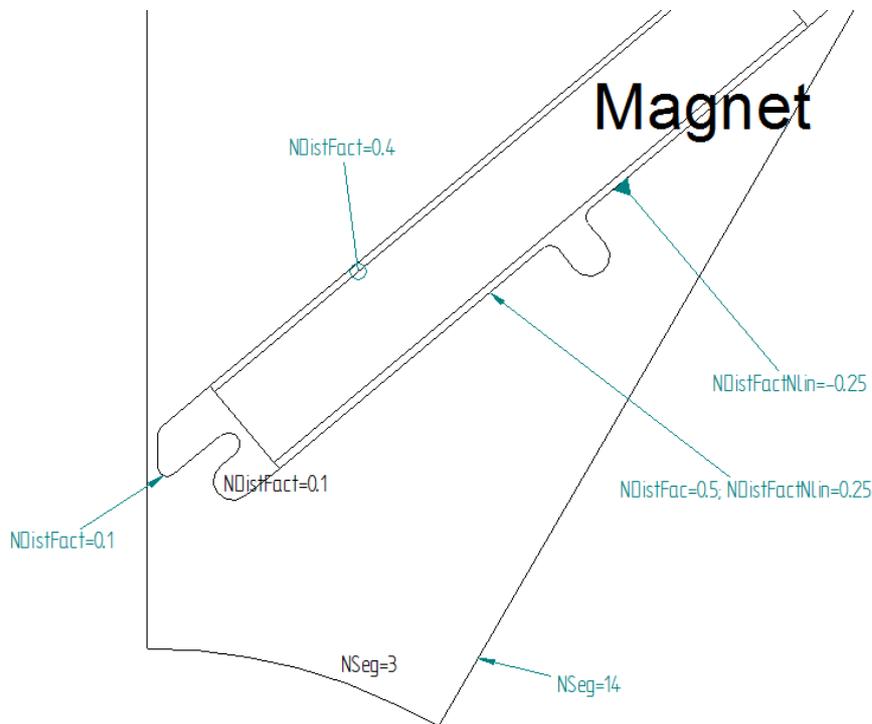


Abb. 255: DXF-Import - Beispiel für eine Rotorgeometrie

Anordnung der Informationen über Knotendichten mittels Textboxen und Textblasen. Textblasen können z.Z. nur in Solid Edge 2D-Drafting von Siemens PLM Software verwendet werden und können unterschiedliche Anfangs-/Endsymbole (z.B. Pfeil, Kreis, etc. ohne abknickende Linien) enthalten.

### 7.4.3.3 Beispiel einer Rotorgeometrie mit „SPLINE“

In CAD-Zeichnungen können „Splines“ mit n Kontrollpunktes und einem Grad < n für alle Rotor- und Statorgeometrien enthalten sein.

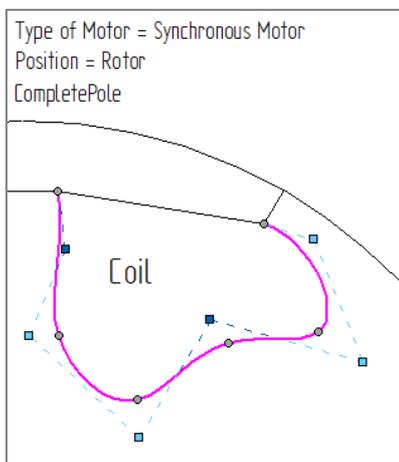
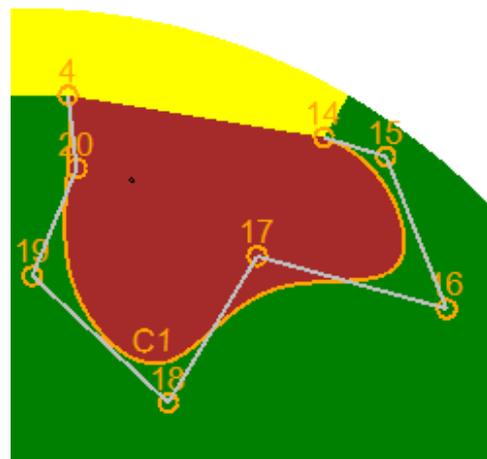


Abb. 256: DXF-Import - SPLINES



Darstellung des Splines in smartFEM als Kurve „C1“ und Kontrollpunkten

### 7.4.3.4 Beispiel für eine vollständige Statorgeometrie

TypeOfMotor = PM - Inner Rotor  
 Position = Stator  
 CompleteGeometry  
 Ns=6; NPhases=3; NCoils=2

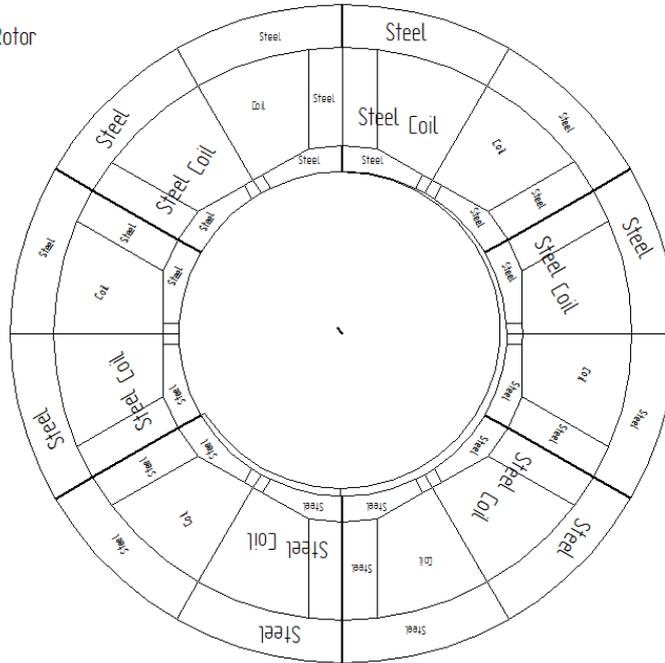


Abb. 257: DXF-Import - vollständige Geometrie

### 7.4.3.5 Beispiel für eine vollständige Statorgeometrie mit Offset

Sofern im Nullpunkt einer Statorgeometrie eine Linie gezeichnet wird, wird in smartFEM eine Exzentrizität zwischen Rotor und Stator entsprechend Länge und Richtung der Linie erzeugt.

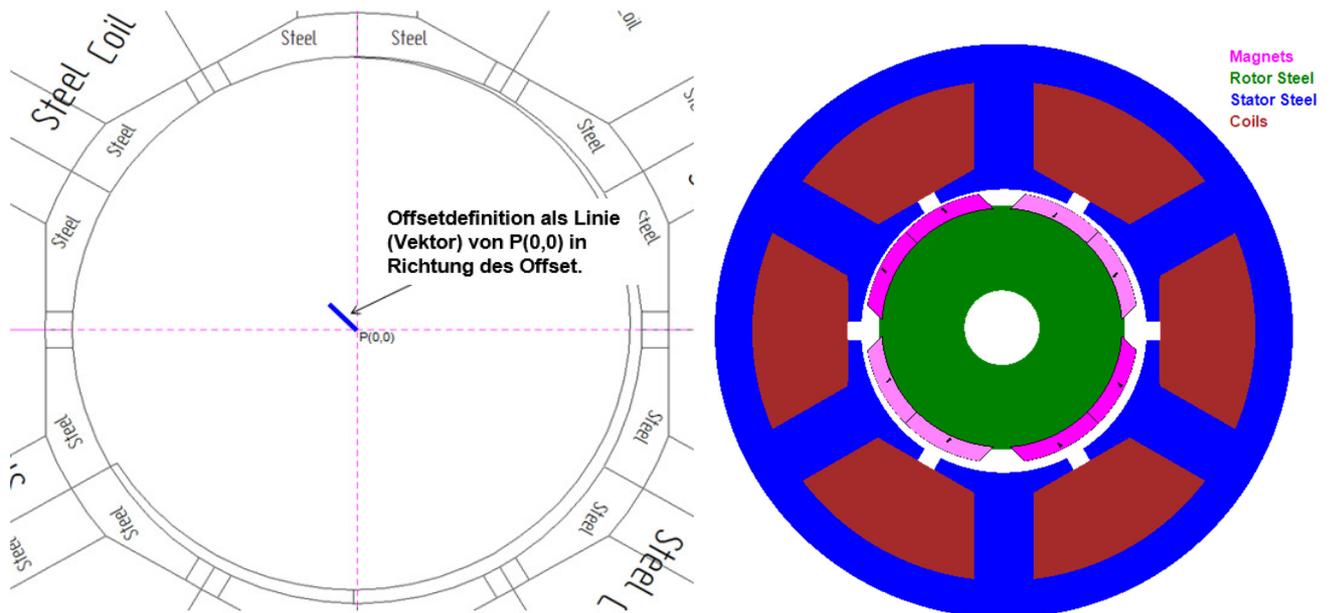


Abb. 258: DXF-Import - Exzentrizität zwischen Rotor und Stator

#### 7.4.4 Verwendung von Layern im CAD-Modell

Sofern das CAD-Modell mehr Informationen als die für den dxf-Import notwendigen enthalten soll (z. B. Hilfslinien, Bemaßungen, etc.), müssen Layer verwendet werden. Dabei müssen die für den DXF-Import nach smartFEM erforderlichen Zeichnungsobjekte und Texte in Layern enthalten sein, die ihrerseits das Wort „smartFEM“ enthält. Es können mehrere „smartFEM“-Layer definiert werden. Alle anderen Informationen müssen in anderen Layer abgelegt werden. Sofern keine Layer verwendet werden, darf das CAD-Modell nur die für den smartFEM DXF-Import erforderlichen Informationen enthalten.

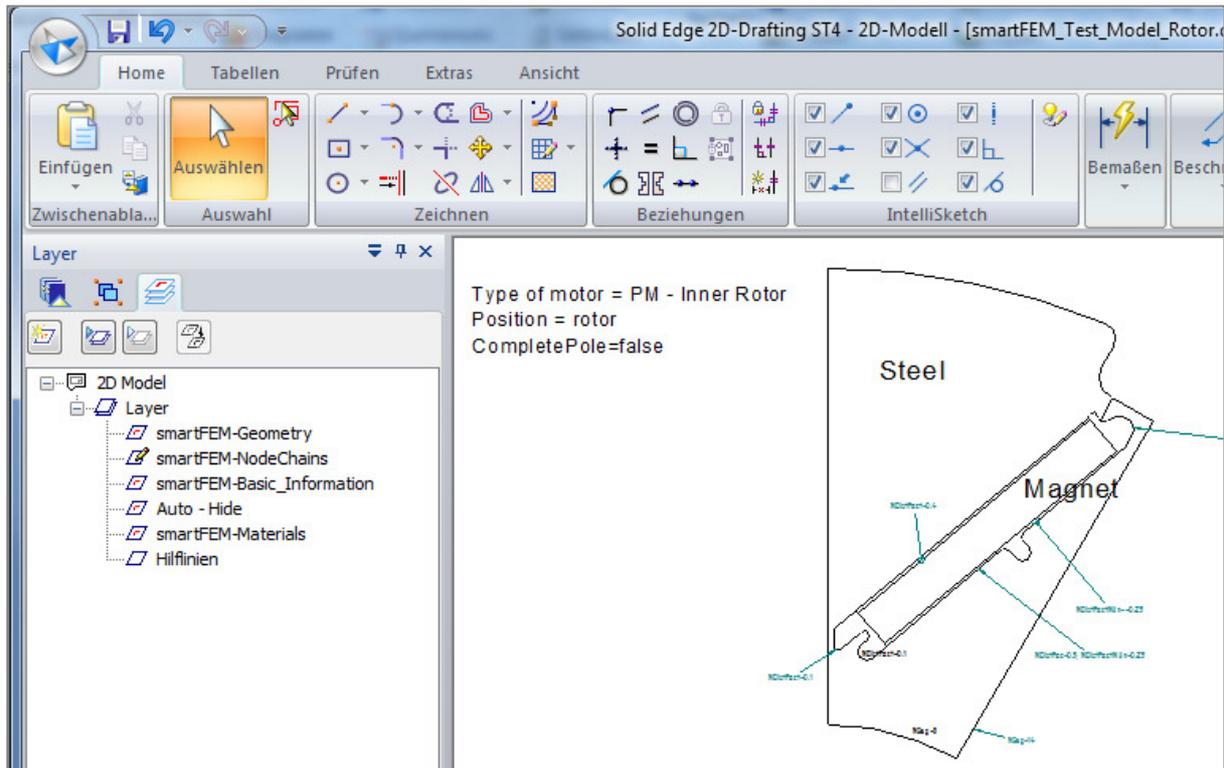


Abb. 259: CAD Import - Verwendung von Layern

### 7.4.5 Kennwörter und Parameter für Linear Motoren

Topologien für Linear Motoren bestehen immer aus der Stator- und Rotorgeometrie. Definitionsgemäß muss sich die Rotorgeometrie unterhalb der Stator- und Luftspaltgeometrien befinden. Zur Identifikation von Geometrie- und Motorparametern müssen verschiedene Information als „*Basic Parameter*“ in der DXF-Zeichnung enthalten sein. Die Verankerungspunkte der Texte müssen sehr nah an die entsprechenden Punkte positioniert werden.

#### Obligatorische Kennwörter und Parameter

Kennwort	Parameter	Beschreibung
Ns oder NsComplete	= #	Gesamtanzahl der Nuten.
NCoils oder NCoilsPerSlot	= {1; 2}, default = 2	Ein-/Zweischichtwicklung.
Np oder NpMotor	= #	Anzahl Pole innerhalb der aktiven Motorlänge.
NpComplete	= #	Gesamtanzahl der Pole.
MotorLength	= P <sub>1</sub> : P <sub>2</sub>	Geometriepunkte, die die aktive Motorlänge kennzeichnen.
MotorStartsXCoord	= P <sub>3</sub>	Geometriepunkt zur Kennzeichnung der x-Koordinate des ersten linken Punktes der Statorgeometrie.
SlotPitchLength	= P <sub>4</sub> : P <sub>5</sub>	Geometriepunkte, die die Länge eines Statorpols kennzeichnen.
SlotStartsXCorrd	= P <sub>6</sub>	Geometriepunkt zur Kennzeichnung der x-Koordinate des ersten linken Punktes des ersten linken Statorpols.
AirGapThickness	= P <sub>7</sub> : P <sub>8</sub>	Geometriepunkte, die die Luftspaltweite kennzeichnen.

#### Optionale Kennwörter und Parameter

Kennwort	Parameter	Beschreibung
AirGapIncrement	= P <sub>9</sub> : P <sub>10</sub>	Höhe mittleren Luftspaltlayers = Knotenabstand der oberen und unteren Linie des mittleren Luftspaltlayers. Wenn nicht in DXF-Datei gesetzt, dann wird wie folgt AirGapIncrement berechnet:  $\text{AirGapIncrement} = \text{AirGapThickness} / 3$

Beispiel:

**LM10 2CoilsPerSlot**

- |                                   |                                 |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Type of Motor = PM - Linear Motor | Legende                         |
| NsComplete = 6                    | = Gesamtzahl Nuten              |
| Ncoils = 2                        | = Ein-/Zweischichtwicklung      |
| NpMotor = 7                       | = Anzahl Pole aktive Motorlänge |
| NpComplete = 11                   | = Gesamtzahl Pole               |
| Bnd = 0,6                         | = BasicNodeDistance             |
| P0 or P(0,0)                      | = Origin P10,0l                 |
| MotorLength = P1 : P              | = AbslvP1-xP2l                  |
| MotorStartsXCoord = P             | = xP6                           |
| SlotPitchLength = P3 : P4         | = AbslvP3-xP4l                  |
| SlotStartsXCoord = P5             | = xP5                           |
| AirGapThickness = P7 : P8         | = AbslvP7-xP8l                  |
| AirGapIncrement = P9 : P10        | = AbslvP9-xP10l                 |
| AirGapYCoord = P11                | = yP11                          |

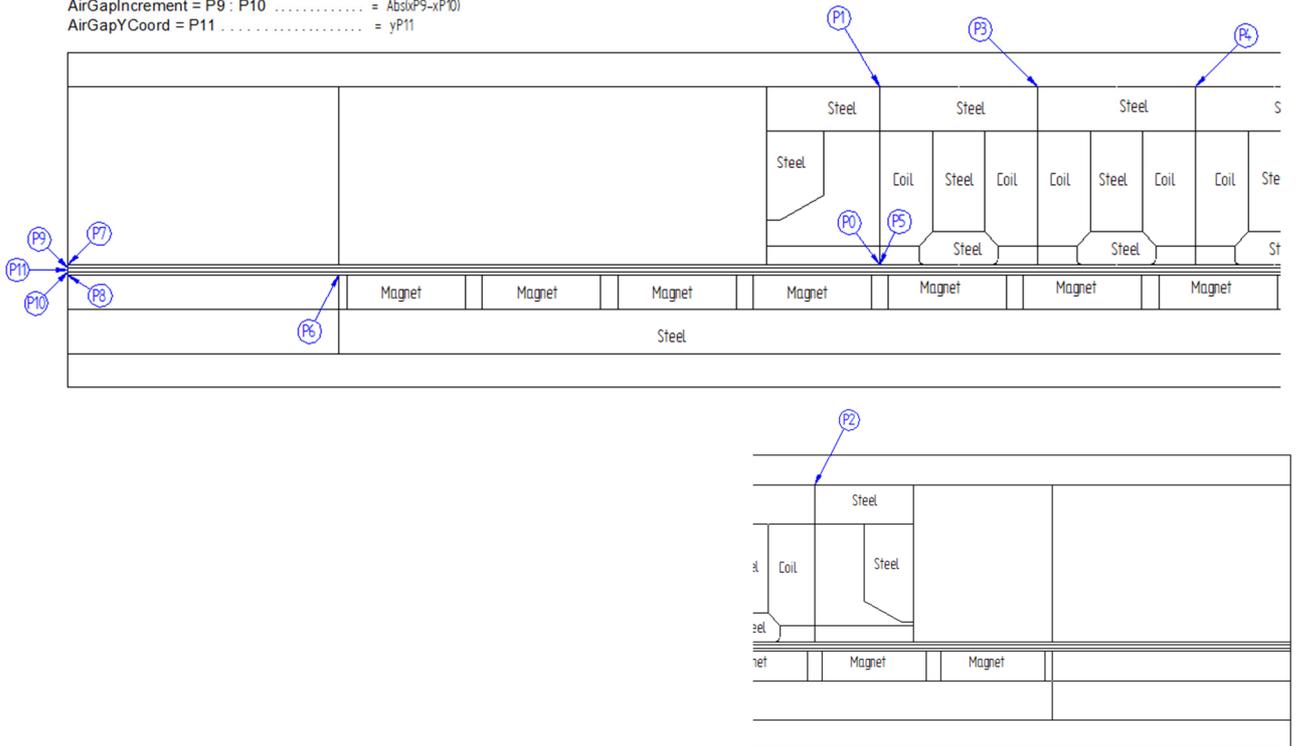


Abb. 260: DXF-Import Linear Motor - Basisparameter

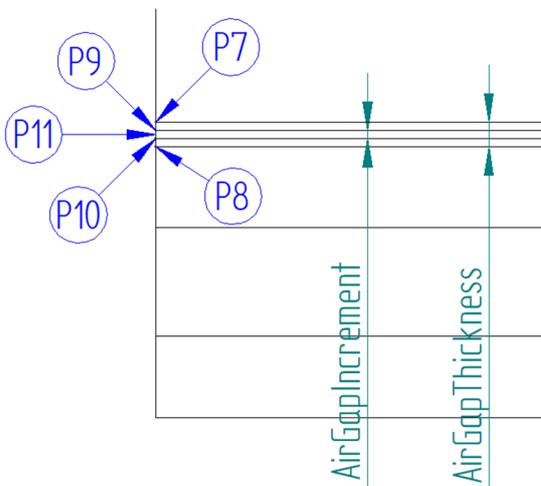


Abb. 261: DXF-Import Linear Motor - Basisparameter "AirGapThickness", "AirGapIncrement"

### 7.4.6 Kennwörter and Parameter für Aktuatoren

Kennwort	Parameter	Beschreibung
Type of Motor	= Actuator	Modelltyp
[CoordinateSystem]	= [xy   rz] (xy=default)	Koordinatensystem xy oder rotations-symmetrisch
NPhases	= #	Anzahl Phasen
Ns	= #	Anzahl Nuten
NCoilsPerSlot	= #	Anzahl Wicklungen pro Nut
CompletePole oder HalfPole	[= False   True]	vollständige oder halbe Geometrie (erforderlich für KoordinatenSystem = rz)
ForcePath		Linien, die den Pfad für die Berechnung der auf den Kolben wirkenden Kräfte kennzeichnen.
MoveVector		Line zur Kennzeichnung des Vektors für die Bewegungen des Kolbens.

Abb. 262: DXF-Import Aktuator - Basisparameter

Beispiel:

(siehe auch 6.7 Aktuator)

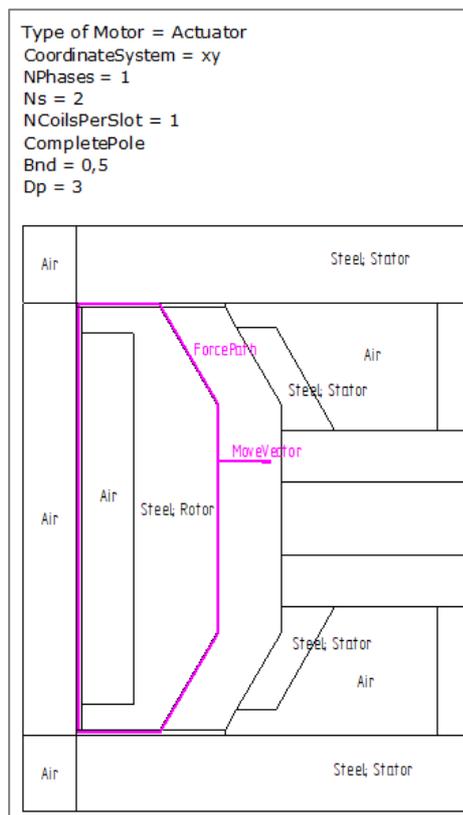


Abb. 263: DXF-Import Aktuator - CAD-Zeichnung mit ForcePath und MoveVector

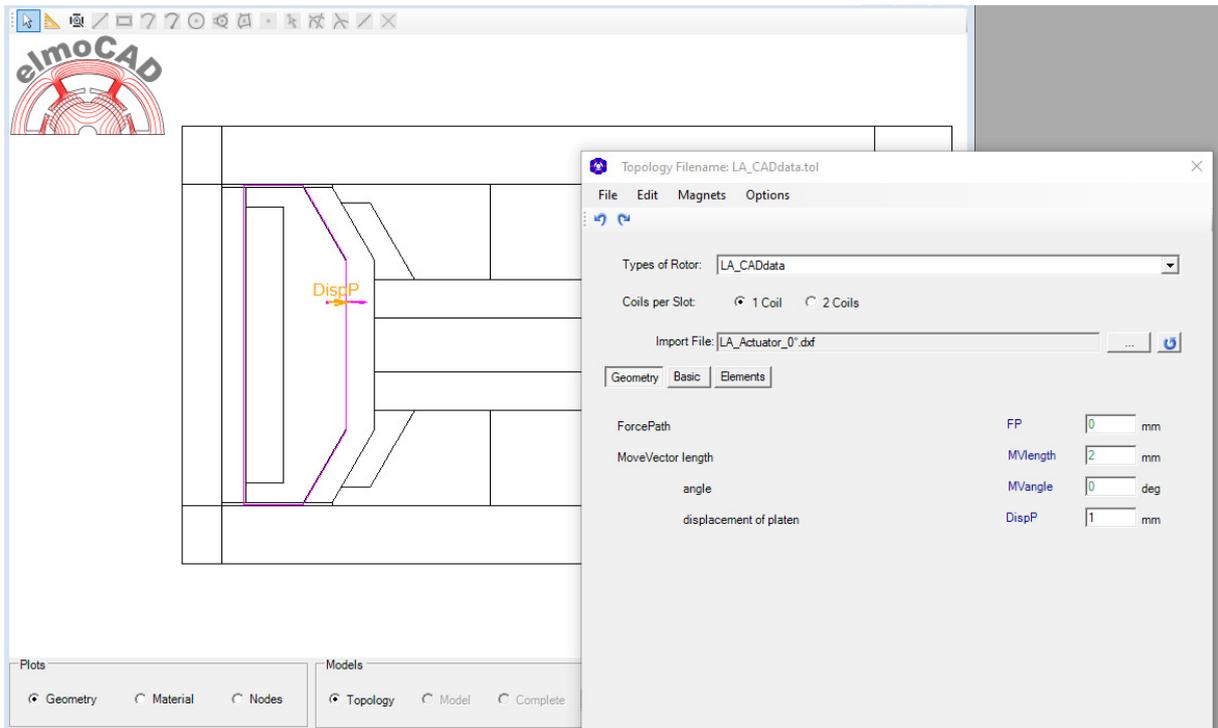


Abb. 264: DXF-Import Aktuator - Force Path und MoveVektor in smartFEM (Geometry Plot)

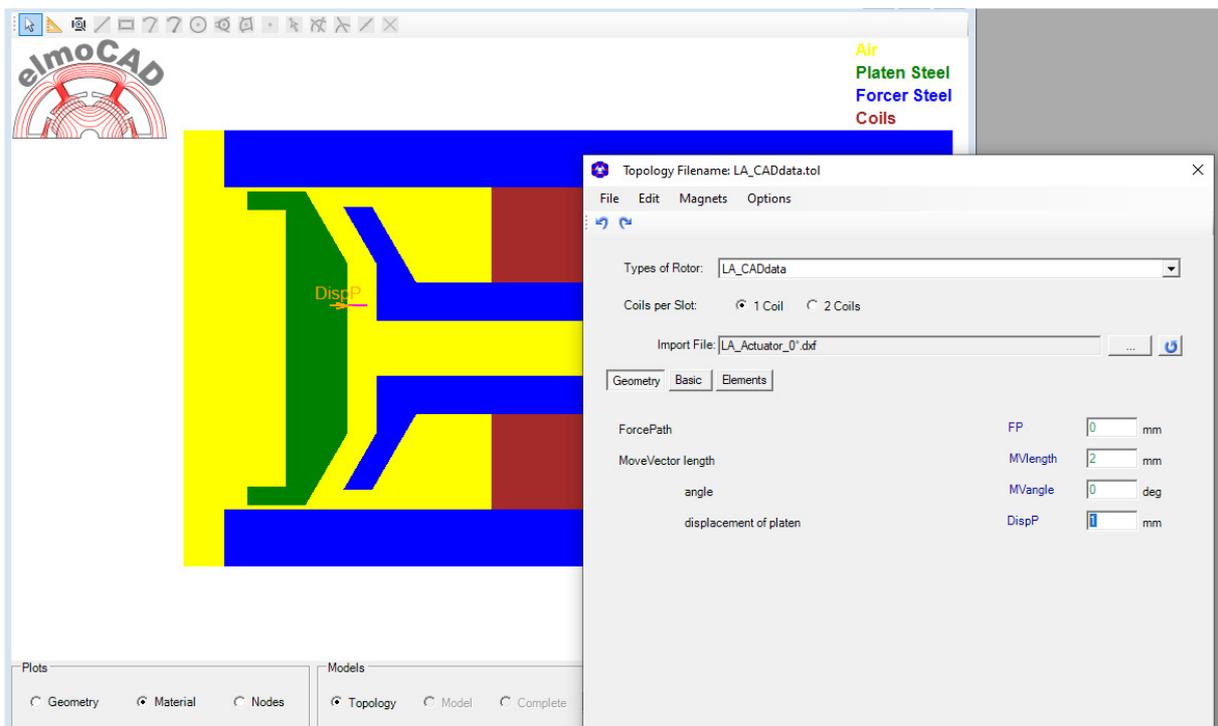


Abb. 265: DXF-Import Aktuator - ForcePath und MoveVector in smartFEM (Material Plot)

Nach dem DXF-Import wird die Geometrie des Aktuators wie in der CAD Zeichnung angezeigt.

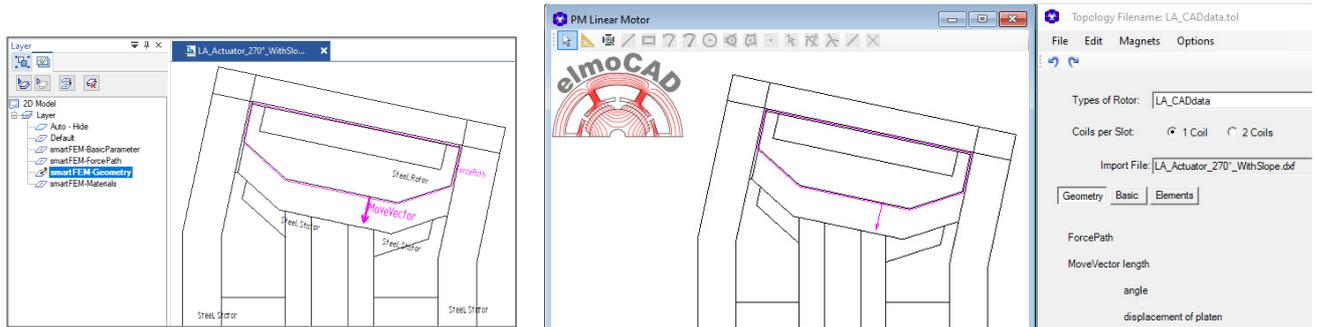


Abb. 266: DXF-Import Aktuator - Richtung des "MoveVector"  $\neq 0^\circ$

Nach "Apply" wird die Geometrie automatisch so rotiert, dass der "MoveVector" in Richtung  $0^\circ$  mech (x-Achse) liegt und damit die in x- und y-Richtung wirkenden Kräfte berechnet werden können (x-Richtung = Bewegungsrichtung).

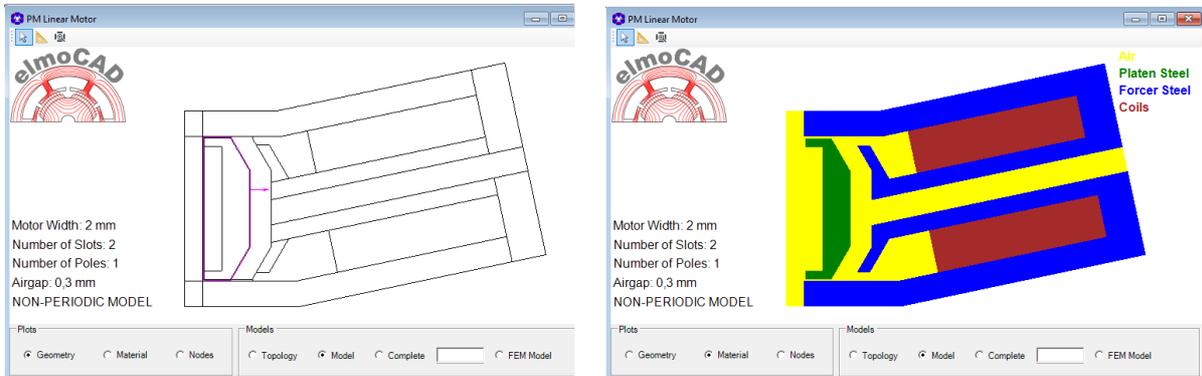


Abb. 267: DXF-Import Aktuator - Rotation der Geometrie mit "MoveVector" in Richtung der x-Achse

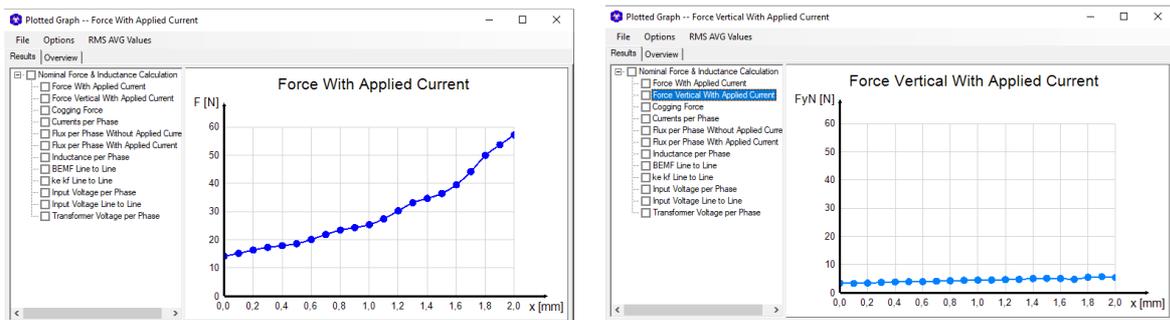


Abb. 268: DXF-Import Aktuator - Kräfte in x- und y-Richtung bei unsymmetrischen Geometrien

### 7.4.7 Funktionsbeschreibung DXF-Import

Nach Selektion der Topologie CAD\_Rotor bzw. CAD\_Stator werden zunächst ein leeres Geometrie- und Parameterfenster angezeigt und ein Auswahlfenster zur Selektion einer DXF- oder CSV-Datei angezeigt.

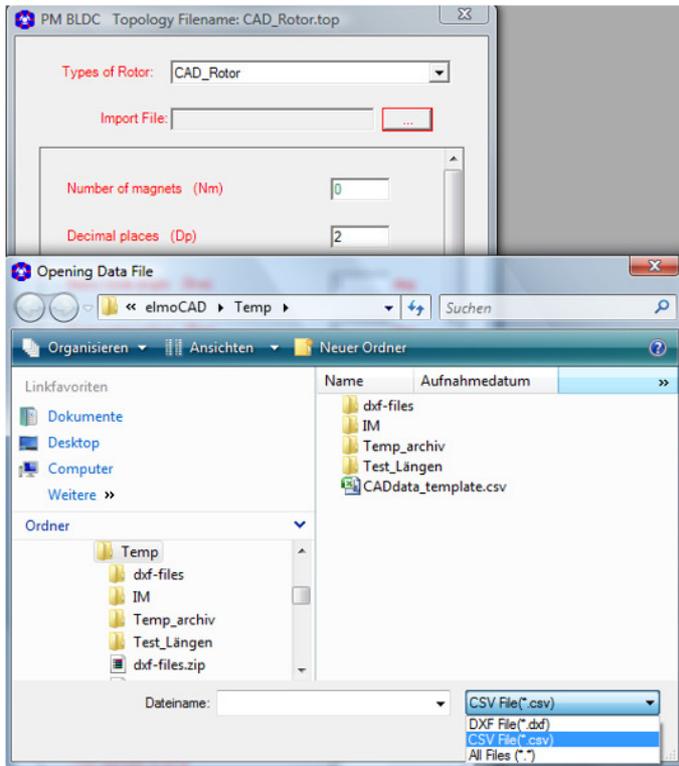


Abb. 269: DXF-Import - Selektion der DXF- bzw.CSV-Datei

Nach Auswahl der entsprechenden Datei erfolgt der Import mit Aufbau der Geometrie und Anzeige der Parameterliste:

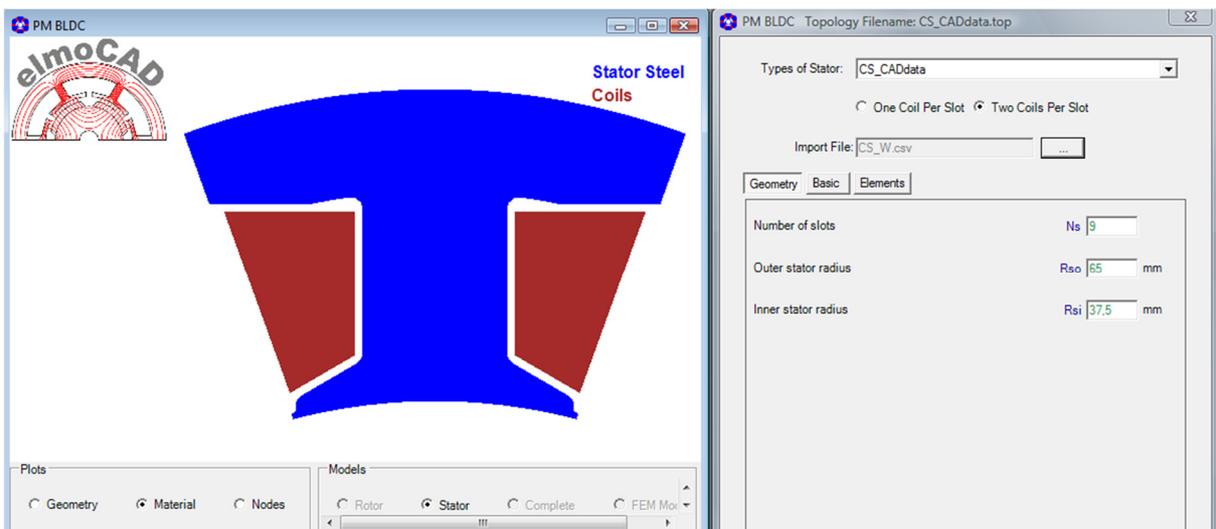


Abb. 270: DXF-Import - Beispiel importierte Stator-Geometrie

Die Informationen zu einzelnen Linien, Kreisbögen, etc. können durch Eingabe ihrer Indexnummer angegeben werden. Neben den numerischen Informationen in der Parameterliste werden kontext-sensitive Hilfsinformationen im Grafikfenster aufgeblendet.

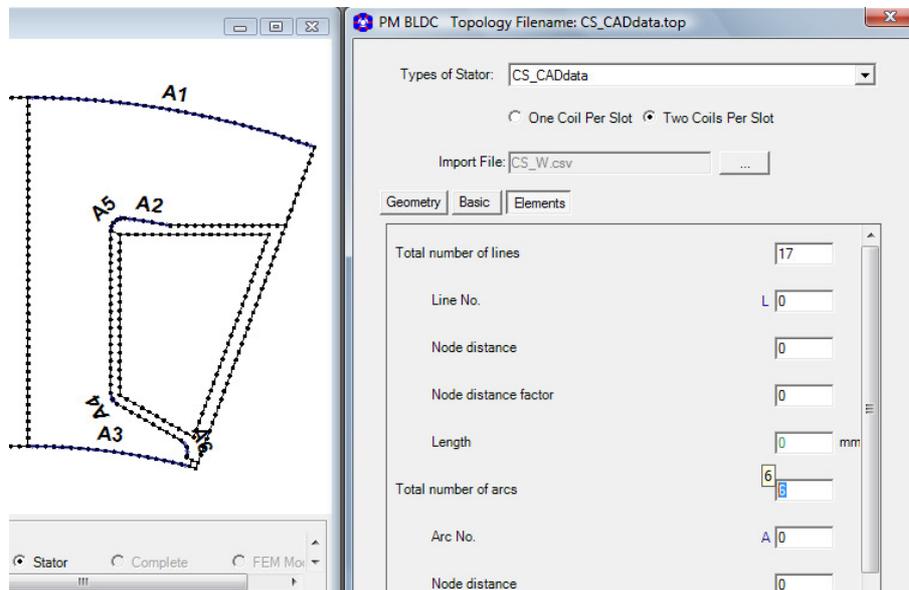


Abb. 271: DXF-Import - Informationen zu Geometrieelementen

Durch Eingabe der Linien-, Bogen-, Area- und Punktnummern werden zusätzliche Informationen angezeigt. Dabei können die Kontenabstände können für jedes Element verändert werden.

Beispiel:

- Kreisbogen: A5
- Mittelpunkt: 16
- Startpunkt: 18
- Endpunkt: 17
- Faktor für minimalem Knotenabstand: 0,5 (Knotenabstand = Faktor \* Basisknotenabstände)
- Radius: 1 mm
- Öffnungswinkel: 97,73°

In der Darstellung „Geometry“ und „Nodes“ des Grafikfensters können einzelne Elemente auch mit rechtem Mausklick auf das entsprechende Element selektiert werden.

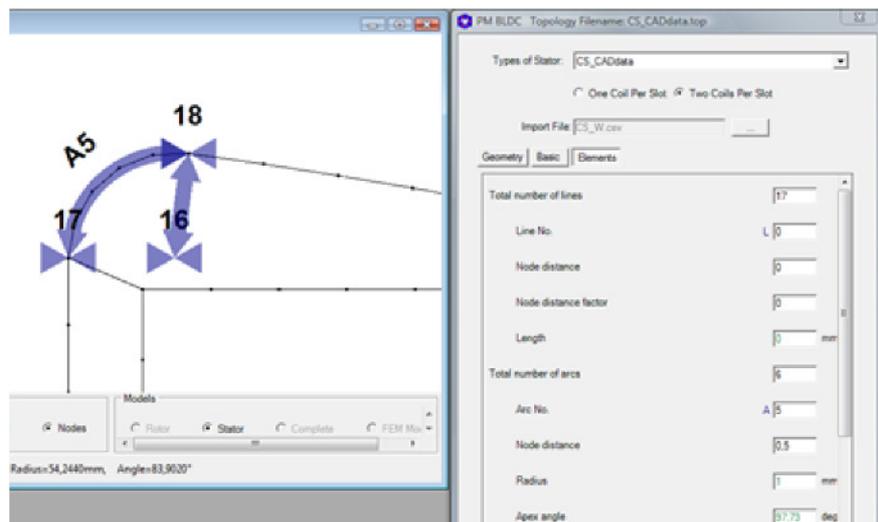


Abb. 272: DXF-Import - Selektion eines Geometrieelementes

### 7.4.8 Voraussetzungen und Fehlerhinweise

Bei der Erstellung von DXF oder CSV Dateien sind folgende Punkte zu beachten, damit smartFEM ein simulationsfähiges Geometriemodell aufbauen kann.

#### 7.4.8.1 Freie Flächenelemente

In den Geometrien dürfen keine Flächenelemente (Inseln) enthalten sein, die nicht durch eine Verbindung mittels Linie oder Kreisbogen an ein anderes Flächenelement angebunden sind.

Falls das dennoch der Fall ist, wird das entsprechende Flächenelement in der Geometriedarstellung mit roter Umrandung dargestellt, eine Fehlermeldung ausgegeben und die Schaltfläche „Bad Geometry“ anstelle „Apply“ angezeigt. Es **muss** dann eine Verbindung in CAD-Zeichnung hergestellt und der Import erneut durchgeführt werden.

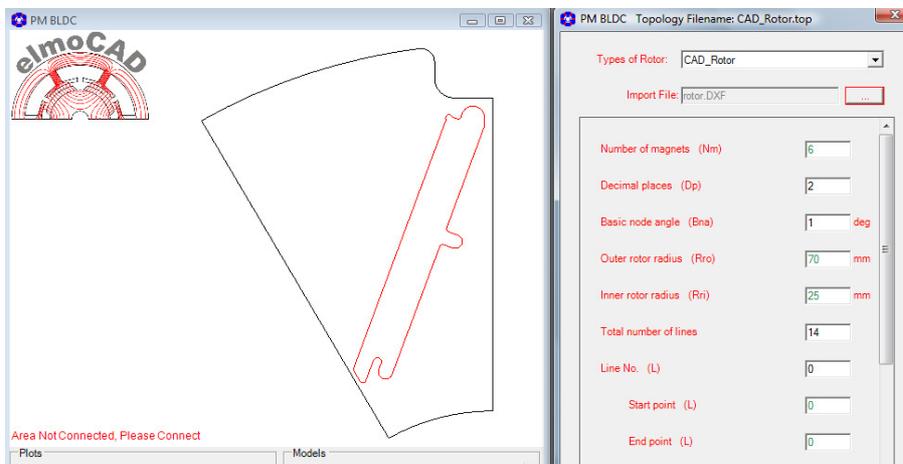


Abb. 273: DXF-Import - freie Flächenelemente

#### 7.4.8.2 Eindeutige Punkte

Rundungsdifferenzen bei der Erzeugung der DXF- bzw. CSV-Dateien können beim Import dazu führen, dass gleiche Punkte u.U. leicht unterschiedliche xy-Koordinaten aufweisen und dann als zwei Punkte erkannt werden. Um dies zu verhindern, kann in der Parametergruppe „Basic“ der minimale Abstand „MinDist“ zwischen zwei Punkten als Parameter angegeben werden. yx-Koordinaten die zueinander einen kleineren Abstand aufweisen, werden als ein Punkt erkannt.

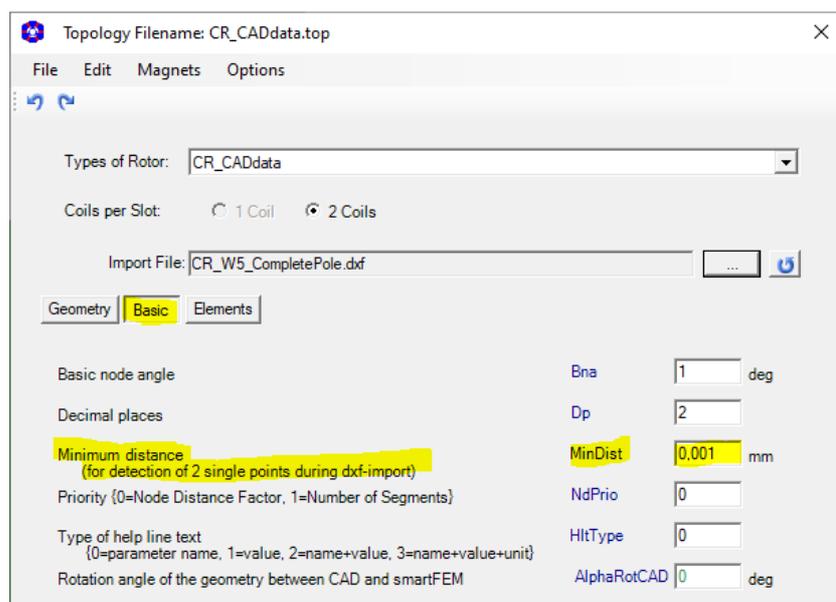


Abb. 274: DXF-Import - Minimum Distance of Points

## 7.5 DXF Export

Die mit smartFEM erstellten Geometrien können auf zweierlei Arten im dxf-Format exportiert werden, um sie mit anderen Programmen weiterverwenden zu können:

- Export aus dem jeweiligen Topologiefenster

Komplettes Geometriemodell inkl. aller zugehöriger Information als Texte für z.B. CAD-Systeme für Änderungen von Geometrie und/oder Textparametern mit anschließendem Re-Import in smartFEM

- Export über das smartFEM Hauptmenü

Verschiedene Arten des Geometriemodells für z.B. CNC-Maschinen zur Blechschnitterzeugung

### 7.5.1 Export aus dem jeweiligen Topologiefenster

Diese Funktion wird über das im Topologiefenster angegebene Menü „File - Export Topology to DXF“ aufgerufen.

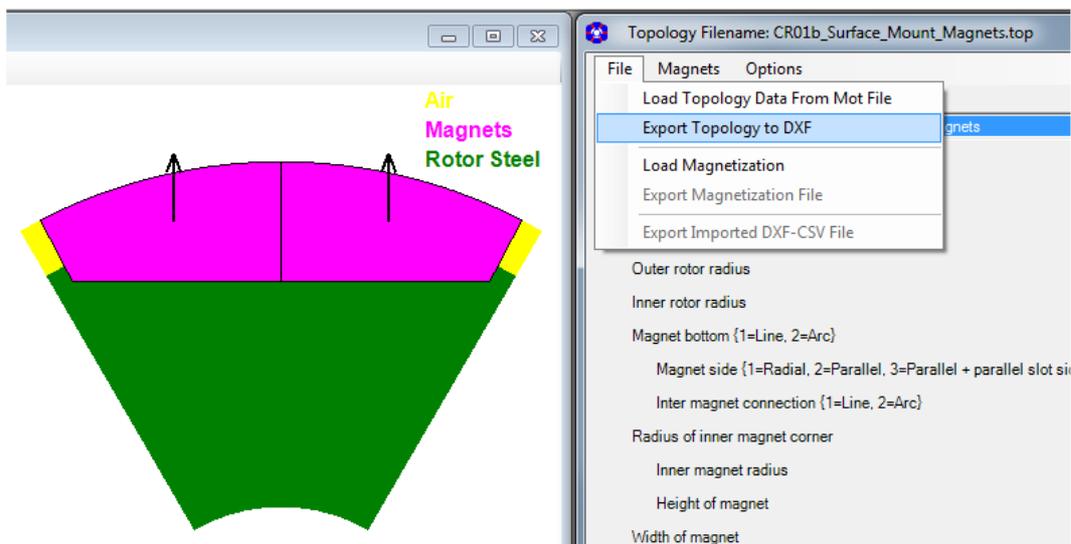


Abb. 275: DXF Export - Topologie

Anschließend kann der Benutzer angeben, in welchem Verzeichnis die DXF Datei gespeichert werden soll. Für die jeweiligen Informationstypen werden verschiedene Layer mit dem Begriff „smartFEM...“ angelegt. Die Textgrößen der Knotendichten werden den jeweiligen Längen der Linien und Kreisbögen angepasst.

Nach dem Öffnen in einem CAD-System können Geometrie und Textparameter verändert werden und nach dem Abspeichern als DXF-Datei wieder in smartFEM mit der entsprechenden CADdata Topologie (in diesem Beispiel CR\_CADdata) importiert werden.

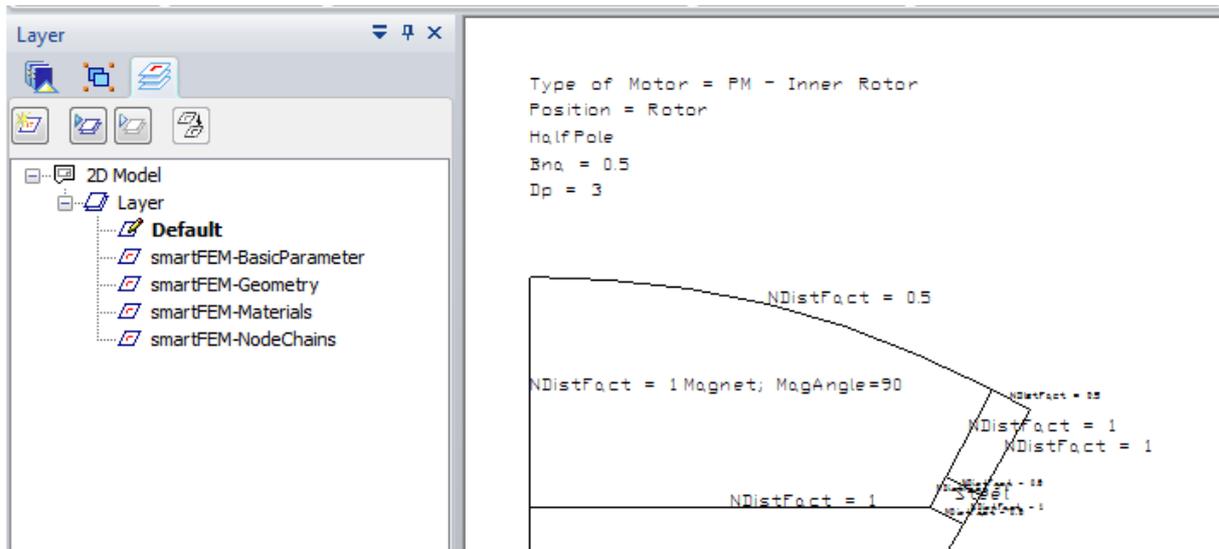


Abb. 276: DXF Export - Darstellung in einem CAD System

In dem 2D-Modell des CAD-Systems können beliebige Zeichnungs- und Textinformationen enthalten sein. Die für den Import in smartFEM erforderlichen Informationen und nur diese müssen bzw. dürfen in Layern enthalten sein, die den Text „smartFEM“ enthalten.

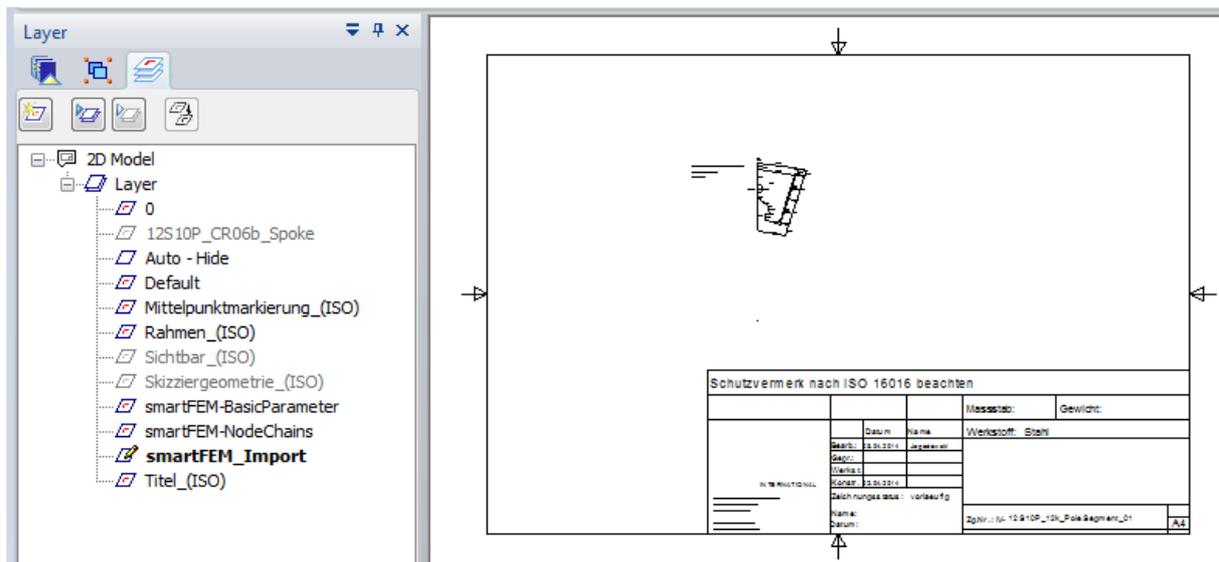


Abb. 277: DXF-Export - smartFEM Layer im 2D-Modell des CAD-Systems

## 7.5.2 Export über das smartFEM Hauptmenü

Mit dieser Funktion werden ausschließlich Geometriedaten entsprechend der jeweiligen Ansicht im smartFEM Geometriefenster in eine DXF Datei exportiert:

- Rotor
- Stator
- Periodisches Modell
- FEM-Modell

zusätzlich, z.B. für die Programmierung von CNC-Maschinen

- Export Material Contours
- Export Steel Material Contours

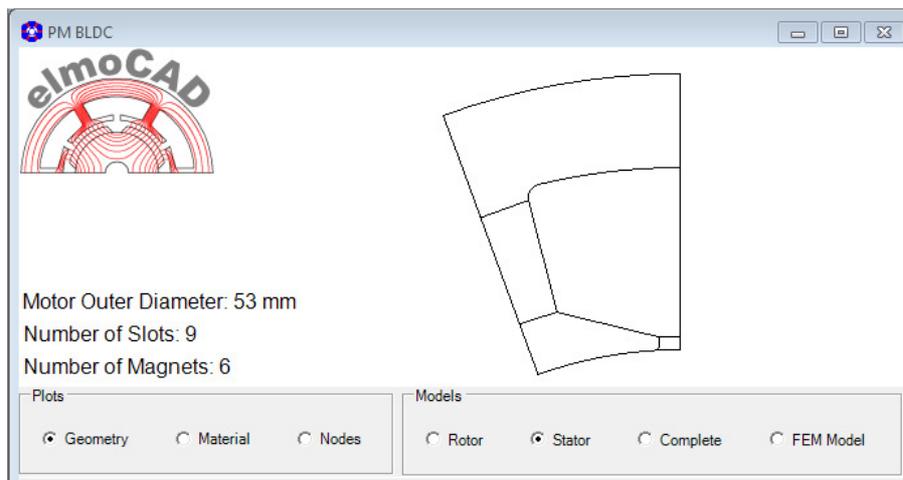


Abb. 278: DXF Export - Beispiel Stator Geometrie

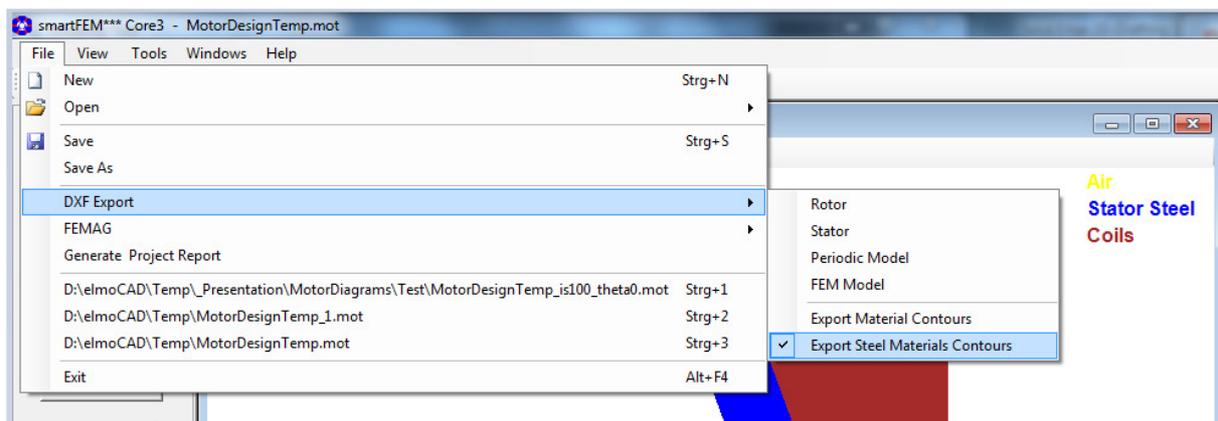


Abb. 279: DXF Export - Selektion der Funktion

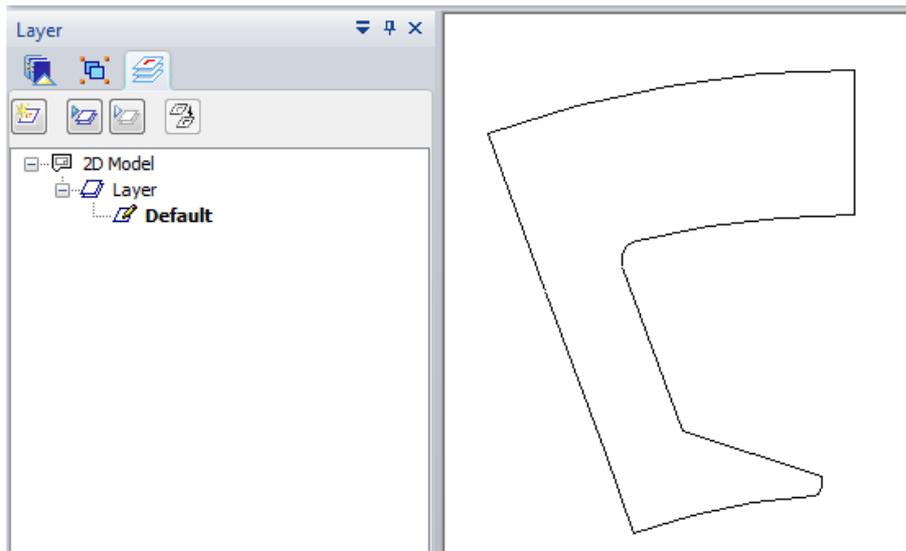


Abb. 280: DXF Export - Beispiel Kontur des Stator Blechpaketes

Zum Export des gesamten Modells muss über die Schaltfläche „Winding Defined“ der Wicklungseditor geöffnet werden. Es wird anschließend das ganze Modell dargestellt und kann mit „File – DXF Export – Periodic Model“ exportiert werden. Überflüssige Zeichnungslinien müssen in einem CAD-System entfernt werden, um z.B. nur die Kontur weiterverarbeiten zu können.

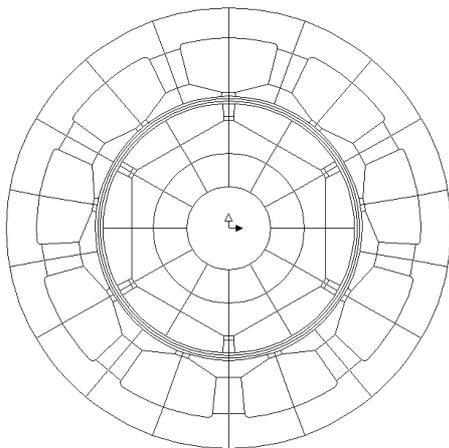


Abb. 281: DXF-Export - gesamtes Maschinenmodell

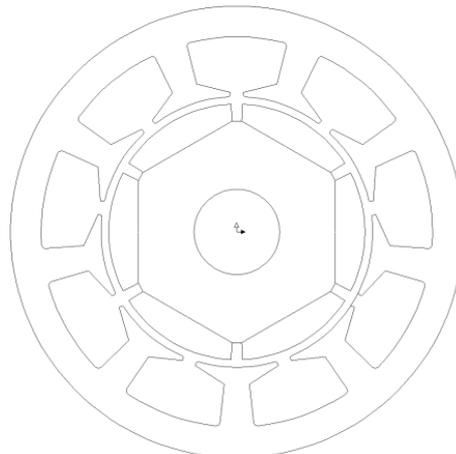


Abb. 282: DXF-Export: Materialkonturen

## 7.6 CASPOC

Zur Simulation der Motorenregelung in dem Simulationstools für Leistungselektronik CASPOC<sup>1</sup> können die für die Ld/Lq Berechnung erforderlichen Parametern direkt über den Dialog „Data - Caspoc - Add Sets“ erzeugt und anschließend mit „Solve All“ berechnet werden.

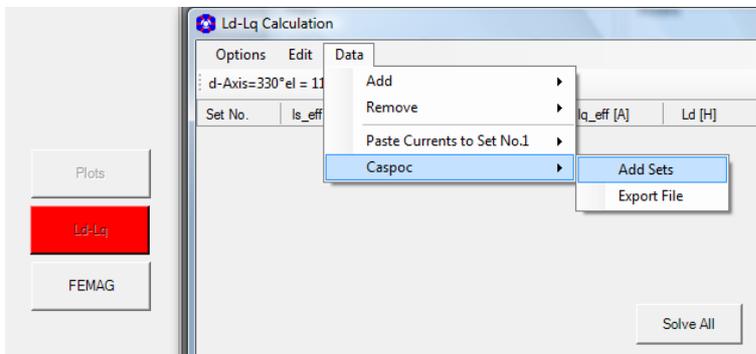


Abb. 283: CASPOC - Berechnungsparameter

Anschließend kann die erzeugte Ergebnistabelle mit weiteren Ergebnisdaten in eine Datei im XML-Format gespeichert werden, die direkt von CASPOC verarbeitet werden kann.

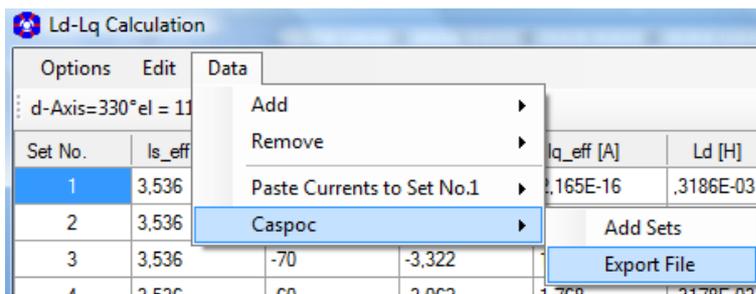


Abb. 284: CASPOC - Speicherung der Ergebnisdaten

Die Datei enthält folgende Daten::

### Motorparameter

- Statorinduktivität Ld
- Statorinduktivität Lq
- Wicklungswiderstand
- Trägheitsmoment des Rotors
- Polpaarzahl

### Datentabelle1

- Rotorposition [°mech]
- Phasenverschiebung Strom [°el] (nicht benutzt = 0)
- Amplitude des Stroms (nicht benutzt = 0)
- Drehmoment (= Rastmoment)
- ke1 Spannungskonstante Phase U
- ke2 Spannungskonstante Phase V
- ke3 Spannungskonstante Phase W
- Flussverkettung 1
- Flussverkettung 2
- Flussverkettung 3

<sup>1</sup> CASPOC ist ein Produkt von Simulation Research, NL - Alphen aan den Rijn

Datentabelle2

- Rotorposition [ $^{\circ}$ mech] (= 0)
- Phasenverschiebung Strom [ $^{\circ}$ el]
- Amplitude des Stroms
- Drehmoment
- ke1 Spannungskonstante Phase U (nicht benutzt = 0)
- ke2 Spannungskonstante Phase V (nicht benutzt = 0)
- ke3 Spannungskonstante Phase W (nicht benutzt = 0)
- Ld
- Lq
- Flussverkettung 3 (nicht benutzt = 0)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	name	name2	value si	description	name3	name4	lookupdata row 1	lookupdata row 2	lookupdata row 3
2	1	Ld	0,000321801	Stator inductance d Axis					
3	2	Lq	0,000422774	Stator inductance q Axis					
4	3	Rs	0,155299601	Winding Resistance					
5	4	J	0,0001	Rotor Inertia					
6	5	p	3	Number of Pole Pairs					
7					0	Rotor Position( $^{\circ}$ mech)	0	0,017453293	0,034906585
8					1	Theta Current( $^{\circ}$ el) not used set to zero	0	0	0
9					2	Current Amplitude(A) not used set to zero	0	0	0
10					3	Temperature(Celcius)	20	20	20
11					4	Cogging Torque(Nm)	0,007046272	-0,006898098	-0,02323248
12					5	Ke1(Vs/rad)	-0,002313303	-0,002547804	-0,002780866
13					6	Ke2[Vs/rad]	0,00464771	0,004647788	0,004647385
14					7	Ke3[Vs/rad]	-0,00231503	-0,002080147	-0,00184546
15					8	FluxLinkage1(Vs)	0,013270199	0,012865044	0,012420811
16					9	FluxLinkage2(Vs)	-8,72E-07	0,000773758	0,001548392
17					10	FluxLinkage3(Vs)	-0,013269248	-0,013635474	-0,013962494
18					0	Rotor Position( $^{\circ}$ mech) set to zero	0	0	0
19					1	Theta Current( $^{\circ}$ el)	1,745329252	1,745329252	2,268928028
20					2	Current Amplitude(A)	20	10	10
21					3	Temperature(Celcius)	20	20	20
22					4	Torque(Nm)	1,38	0,686	0,551
23					5	Ke1(Vs/rad) not used set to zero	0	0	0
24					6	Ke2(Vs/rad) not used set to zero	0	0	0
25					7	Ke3(Vs/rad) not used set to zero	0	0	0
26					8	Ld(H) FluxLinkage1(Vs) used for Ld	0,000336764	0,000321772	0,00031937
27					9	Lq(H) FluxLinkage2(Vs) used for Lq	0,000414097	0,000423871	0,00042504
28					10	FluxLinkage3(Vs) not used set ot zero	0	0	0

Abb. 285: CASPOC - Beispiel XML-Datei

## 8 Notizen