

smartFEM

Analyse und Design elektrischer Antriebe

Rotor und Stator Topologien

smartFEM 2.014.00 – 22.01.2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Änderungen gegenüber früheren smartFEM Versionen	5
1.2	Öffnen von Simulationsmodellen	5
1.3	DFX Export	6
1.4	Minimale Symmetrien	6
1.5	Parameter	7
1.6	Versions-Nummer	7
1.7	voreingestellte Parameter für alle Topologien	8
1.7.1	Geometrieparameter	8
1.7.2	Basisparameter	9
1.7.3	Parameter der Gruppe „Elements“	10
1.8	Benutzerspezifische Geometrieelemente	12
1.8.1	Anwendung	13
2	Topologien	18
2.1	DXF-Import	18
2.2	Innenläufer Rotor	19
2.2.1	CR01b_Surface_Mount_Magnets	19
2.2.2	CR01c_Surface_Mount_Magnets_Displacement	20
2.2.3	CR02b_Embedded_Magnets	20
2.2.4	CR03b_Embedded_Magnets_NoOffset	21
2.2.5	CR04b_Embedded_Magnets_3Arcs	21
2.2.6	CR05b_Spoke_Magnet	22
2.2.7	CR06b_Spoke_Magnet_2	22
2.2.8	CR07b_Embedded_Magnets_3Arcs	23
2.2.9	CR08b_U-Magnet	23
2.2.10	CR12b_Arc_Shaped_Magnets	23
2.2.11	CR12c_Multiple_Arc_Shaped_Magnets	24
2.2.12	CR18d_Spoke_Magnet_3	24
2.2.13	CR19_V_Magnets	24
2.2.14	CR20d_V_Magnets	25
2.2.15	CR21a_Triple_V_Magnets	25
2.2.16	CR22b_Ring_Magnet	25
2.2.17	CR23b_Surface_mount_Segmented_Magnets	26
2.2.18	CR24_Spoke_Magnet_4_Undercut	26
2.2.19	CR28_Embedded_Block_Magnets	26
2.2.20	CR29_Embedded_Arc_Magnets	27
2.3	Topologien Innenläufer Stator	28
2.3.1	CS05b_Without_Pole_Shoe	28

2.3.2	CS06b_IEC_Based	28
2.3.3	CS07b_Short_Teeth	29
2.3.4	CS08b_Offset und CS08c_Offset.....	29
2.3.5	CS09c_1Phase_1Coil	30
2.3.6	CS15d_Parallel_Slots	30
2.3.7	CS18b_Added_Stator_Slots	30
2.3.8	CS25_Ring_Coils.....	31
2.3.9	CS26_U_Pole_Shanks	31
2.3.10	CS30_Unsymmetric_Inner_Radius	31
2.3.11	CS55_Single_Wire.....	32
2.3.12	CS56_MGPM_1Airgap.....	32
2.3.13	CS58_Segmented.....	32
2.3.14	CS59_Segmented.....	33
2.4	Außenläufer Rotor	34
2.4.1	OCR01b_Ring_Magnet.....	34
2.4.2	OCR02b_Rectangular_Magnets	34
2.4.3	OCR17c_Segmented_Magnets.....	35
2.4.4	OCR22b_V_Magnets.....	35
2.4.5	OCR23_Surface_Mount_Magnets	35
2.4.6	OCR23a_Surface_Mount_Magnets	36
2.4.7	OCR23b_Surface_Mount_Magnets	36
2.4.8	OCR23c_Surface_Mount_Magnets.....	36
2.5	Außenläufer Stator	37
2.5.1	OCS05c_Without_Pole_Shoe	37
2.5.2	OCS06b_3Arcs und OCS06c_3Arcs.....	37
	Wie OCS06b mit der Möglichkeit nicht parallele Zähne zu modellieren.	37
2.5.3	OCS22e_Parallel_Slots	38
2.5.4	OCS23a_Asymmetric_Pole_Shoe	38
2.5.5	OCS25_Ring_Coils	39
2.6	PM DC Motor.....	39
2.7	Synchronous Motor	40
2.7.1	CR30_Wound_Field_Winding	40
2.7.2	CR37_Field_Winding	40
2.8	SR Motor (Switched Reluctance Motor).....	41
2.8.1	CR25_Reluctance	41
2.8.2	CR32_Reluctance_Stepped.....	42
2.9	Sync. Reluctance Motor	43
2.9.1	CR31_Synchronous_Reluctance	43
2.9.2	CR33_2Pole_Synchronous_Reluctance	44

2.10	Universal Motor	45
2.10.1	CR26_Universal	45
2.10.2	CS29_Universal	45
2.11	PM- Maschinen mit magnetischem Getriebe	46
2.11.1	CS56_MGPM_1Airgap.....	46
2.12	Magnetisierung von Innenläufer Rotoren	47
2.12.1	MD01d_Outer_Coil (Magnetisierspule)	47
2.12.2	CS01c_Measure_Ring_Magnetization	47
3.1	Linearmotor	48
3.1.1	LM02c.....	48
3.1.2	LM021c.....	49
3.1.3	LM03c.....	49
3.1.4	LM04.....	50
3.1.5	LM10.....	50
3.1.6	LM11.....	51
3.1.7	LM422.....	51
3.1.8	LM544.....	52
3.1.9	LM60_Double_Airgap	52
4	Aktuator	53
4.1	LA04.....	53
4.2	LA_CADdata	53
5	Notizen	55

1 Einleitung

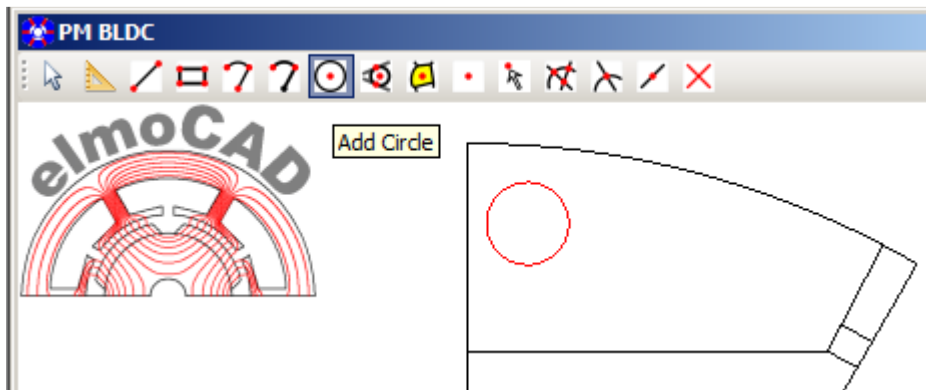
Die Modellierung der Geometrie erfolgt in smartFEM auf der Basis programmierter Rotor und Stator Topologien mit über die Tastatur veränderbaren alphanumerischen Parametern.

Ab der Version 2.1 bietet smartFEM zusätzlich die Möglichkeit, mit CAD Systemen im DXF-Format erstellte Rotor- und Statorgeometrien für rotierende Maschinen zu importieren. Dabei können alle Rotor- und Statortopologien gleichen Motortyps beliebig miteinander kombiniert werden.

Ab der smartFEM Version 2.11 können die programmierten Rotor- und Statortopologien mit benutzerspezifischen Geometrieelementen erweitert werden.

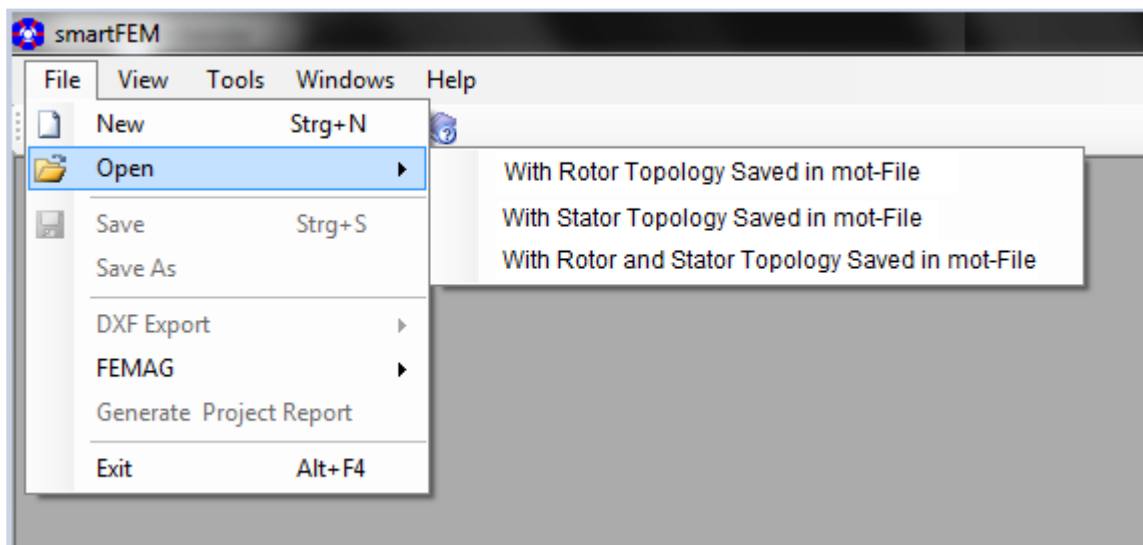
1.1 Änderungen gegenüber früheren smartFEM Versionen

In die mit den Rotor- und Statortopologien erstellten Geometrien können Benutzer zusätzlichen Geometrieelementen einzeichnen und damit die Geometriemodelle erweitern bzw. verändern. Dazu wurde ein Werkzeugkasten mit verschiedenen Schaltflächen zur Auswahl der möglichen Funktionen implementiert (siehe auch Textziffer 1.8):



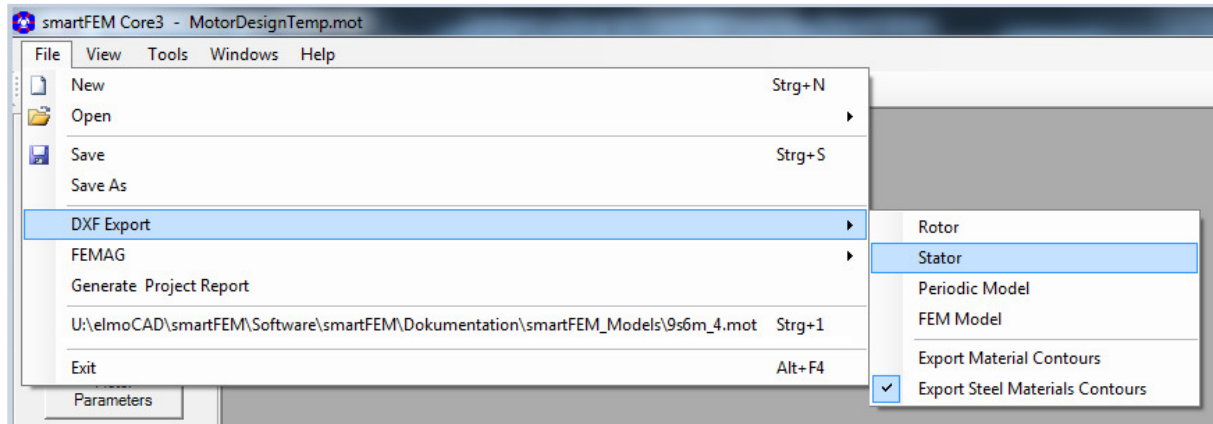
1.2 Öffnen von Simulationsmodellen

Beim Öffnen von Simulationsmodellen (mot-Dateien) lädt smartFEM automatisch die aktuellen Versionen der verwendeten Rotor- und Stator-Topologien. Dabei kann es vorkommen, dass nach dem Laden älterer Simulationsmodelle nicht alle Parameterwerte (z.B. Abmessungen, Knotendichten, etc.) korrekt angezeigt werden. Das Modell kann dann auch mit der jeweils im Modell gespeicherten Rotor- und/oder Stator-Topologie korrekt geöffnet und bearbeitet werden. Es stehen dann allerdings u.U. nicht alle Funktionen neuerer Topologie-Versionen zur Verfügung.



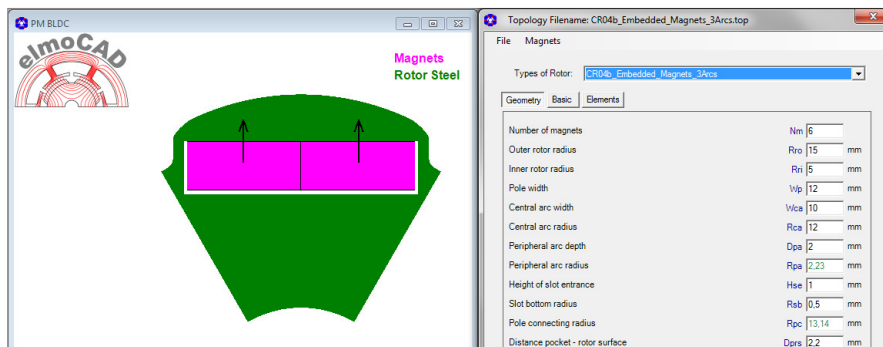
1.3 DFX Export

Es können nach Auswahl der entsprechenden Schaltfläche nur die Materialkonturen oder die Materialkonturen für „Steel“ exportiert werden.

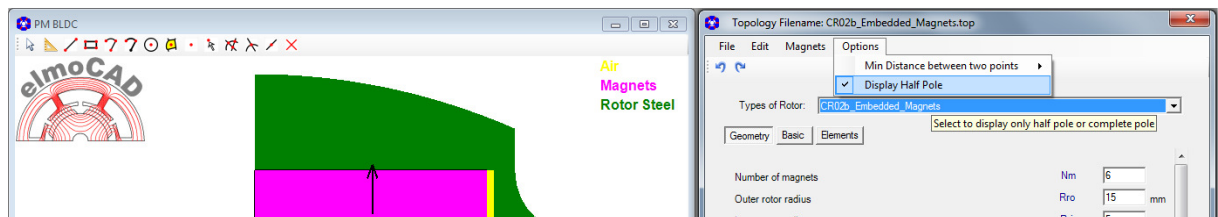


1.4 Minimale Symmetrien

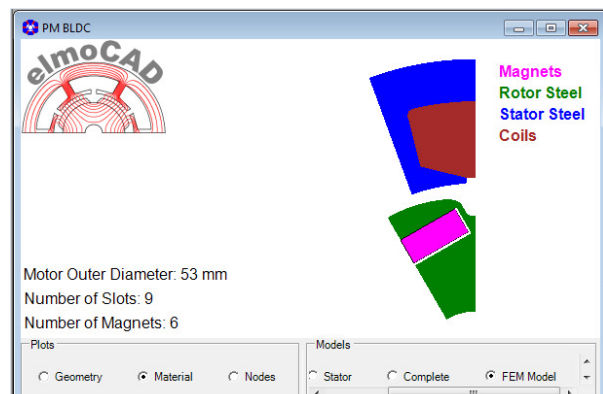
Bei allen Topologien wird während der Bearbeitung die vollständige Geometrie einer Polteilung angezeigt.



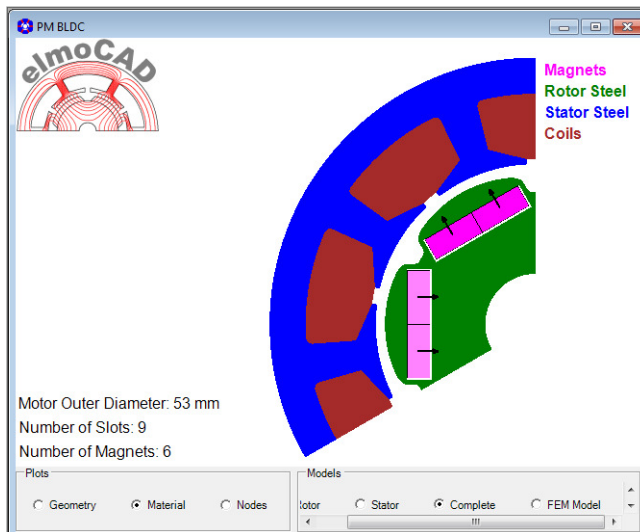
Der Benutzer kann im Menü "Options" auswählen, ob die ganze oder halbe Polgeometrie dargestellt werden soll (nur wenn die halbe Polgeometrie in der Topologie vordefiniert ist).



An den FEM-Solver wird jedoch die minimale Symmetrie der Geometrie übergeben. Bei Geometrien einer Polteilung, die zur y-Achse symmetrisch sind wird damit nur eine Polhälfte übergeben (die im ersten Quadranten dargestellt wird). Hierdurch werden Unsymmetrien im Netz des jeweiligen gesamten Pols durch Spiegelung vermieden.



Die für die Simulation erforderlich vollständige Geometrie (entsprechend einer BEMF-Periode) wird durch Spiegelung und Kopieren der minimalen Symmetrien erzeugt.



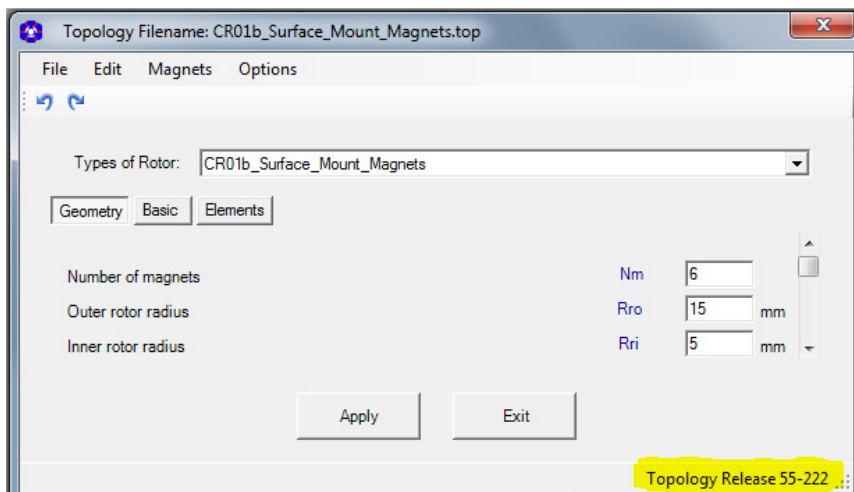
1.5 Parameter

Nicht verwendete Parameter werden ausgeblendet (noch nicht in allen Topologien implementiert).



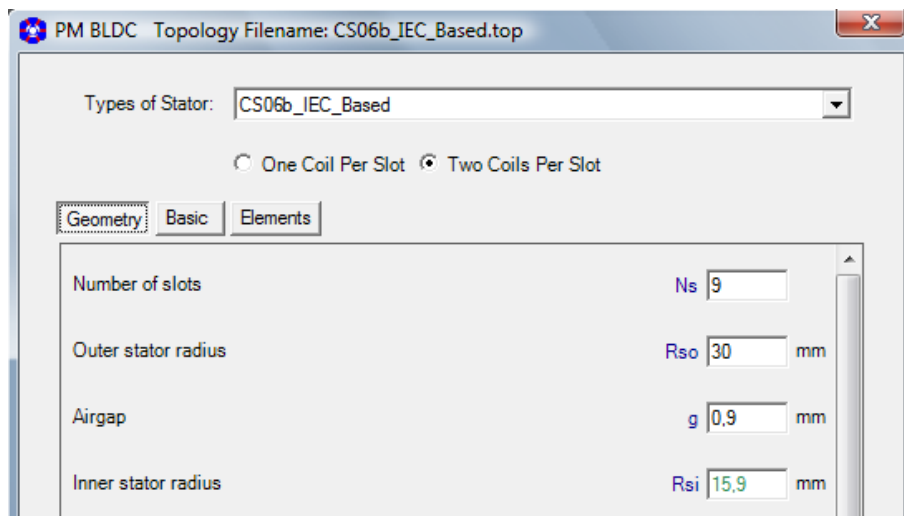
1.6 Versions-Nummer

Die Versions-Nummer der jeweiligen Topologie wird in der Statuszeile des Topologie-Fensters unten rechts angezeigt.



1.7 voreingestellte Parameter für alle Topologien

1.7.1 Geometrieparameter



Innenläufer

Rotor

- Anzahl Magnete $N_m = 6$
- Außenradius $R_{ro} = 15$ mm
- Innenradius $R_{ri} = 5$ mm

Stator

- Anzahl Nuten $N_s = 9$
- Außenradius $R_{so} = 26,5$ mm
- Luftspaltweite einseitig $g = 0,9$ mm
- Innenradius (berechnet) $R_{si} = R_{ro} + g$ mm

Außenläufer

Rotor

- Anzahl Magnete $N_m = 12$
- Außenradius $R_{ro} = 25$ mm
- Innenradius $R_{ri} = 20$ mm

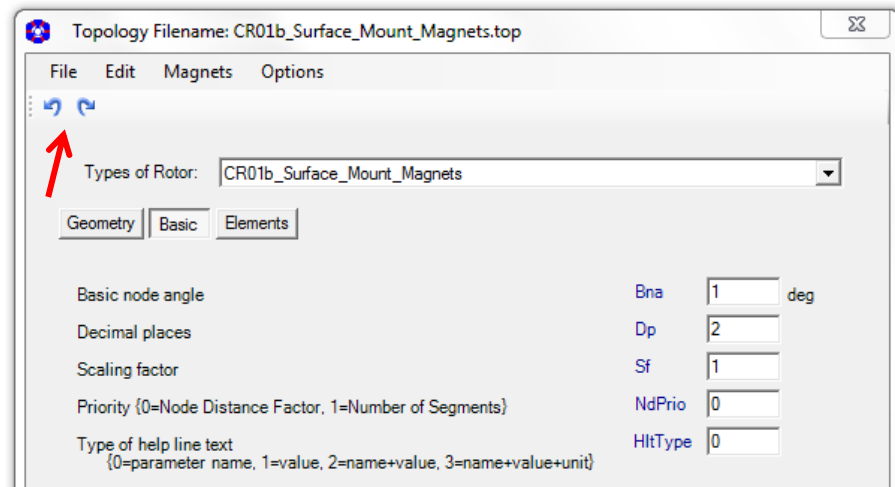
Stator

- Anzahl Nuten $N_s = 9$
- Luftspaltweite einseitig $g = 0,5$ mm
- Außenradius (berechnet) $R_{so} = R_{ri} - g$ mm
- Innenradius $R_{si} = 5$ mm

1.7.2 Basisparameter

Alle Topologien

UnDo und ReDo Schaltfläche



Bna = minimaler Winkelabstand zwischen zwei Knoten am dem zum Luftspalt gelegenen Innen- bzw. Außendurchmesser der Topologie

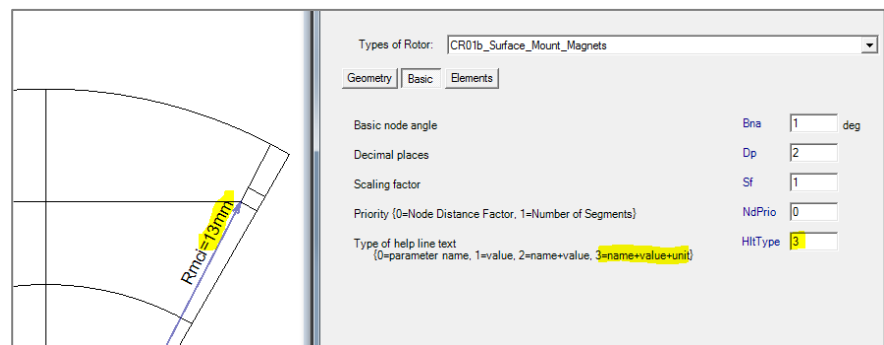
Dp = Anzahl der Nachkommastellen für alle Parameter.

Bei berechneten und nicht änderbaren Parametern wird intern mit der vollen Nachkommastellenanzahl gerechnet und nur für die Anzeige gerundet.

Sf = Skalierungsfaktor für alle eingebbaren Parameterwerte der Topologien.

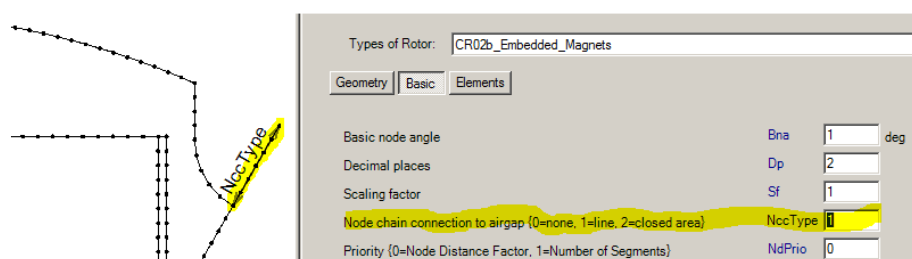
NdPrio = Angabe ob in der Parametergruppe „Elements“ der „Node distance factor“ oder die „Number of segments“ konstant bleiben sollen, wenn sich die Länge einer Linie bzw. eines Bogens ändert.

Type of help line text = die in den Geometriefenstern angezeigten Hilfsinformationen für Parameter können um weitere Informationen ergänzt werden.



Zusätzlich bei manchen Topologien:

NccType = Typ der Anbindung der Geometrie an den mittleren Luftspaltlayer an rechter und linker Sektorgrenze des Maschinenmodells.



1.7.3 Parameter der Gruppe „Elements“

Alle Topologien

Topology Filename: CR01b_Surface_Mount_Magnets.top

File Edit Magnets Options

Types of Rotor: CR01b_Surface_Mount_Magnets

Geometry Basic Elements

Display all elements 0

Line No. L 11

Node distance factor Ndist 1

Factor for nonlinear node distance $\{-1 \leq \text{fact.} \leq 1\}$ Nlin 0

Number of segments Nseg 15

Length l 4 mm

Angle α 90 deg

Start Point P1 26

End Point P2 11

Arc No. A 7

Node distance factor Ndist 1

Factor for nonlinear node distance $\{-1 \leq \text{fact.} \leq 1\}$ Nlin 0

Number of segments Nseg 24

Radius r 13 mm

Apex angle α 27.5 deg

Length l 6.24 mm

Center Point P0 0

Start Point P1 4

End Point P2 11

Curve No. C 0

Area No. Ar 2

Material {0=air, 1=steel, 2=magnet, 3=coil} Mat 1

Material No. $\{1 \leq \text{MatNo} \leq 9\}$ MatNo 1

Length in z-direction Lz/Lmot 100 %

Point No. P 22

Total number of points $\{-1=\text{set/reset display always}\}$
(mirrored point number = point number + 100)

P1 100

X-Coordinate x 2.85 mm

Y-Coordinate y 10.63 mm

Radius r 11 mm

Angle α 75 deg

P2 0

P3 0

Apply Exit

Topology Release 55-222

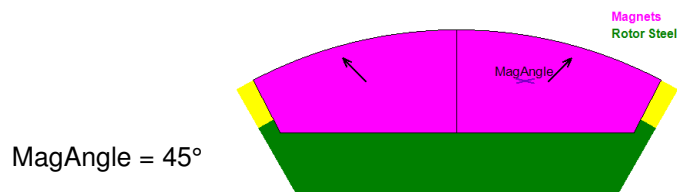
Für Flächenelemente die als „Magnet“ (Mat=2) definiert sind wird der Magnetisierungswinkel „MagAngle“ angezeigt (Nordpol).

Area No.	Ar	<input type="text" value="1"/>
Material {0=air, 1=steel, 2=magnet, 3=coil}	Mat	<input type="text" value="2"/>
Material No. {1<=MatNo<=9}	MatNo	<input type="text" value="1"/>
Magnetisation Angle {0<=angle<360°, -888=calculated default value, -999=perpendicular to the longest side}	MagAngle	<input type="text" value="90"/> deg
Point No.	P	<input type="text" value="20"/>

Der Winkel kann wie folgt geändert werden:

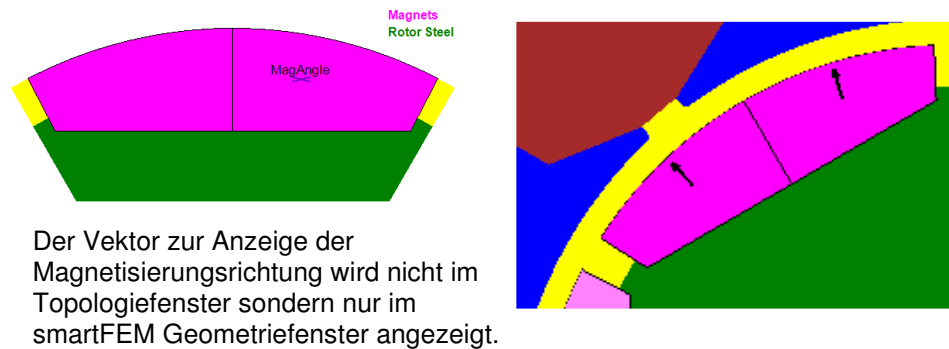
- $0 \leq \text{MagAngle} < 360^\circ$ mech benutzerdefiniert

Beispiel



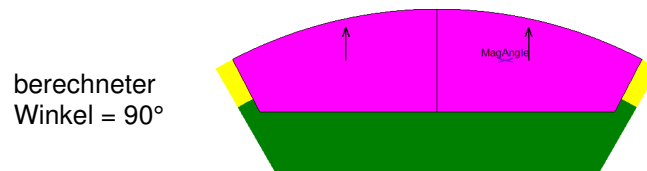
- MagAngle = -999 Magnetisierungswinkel senkrecht zur längsten Seite der Magnetfläche

Beispiel



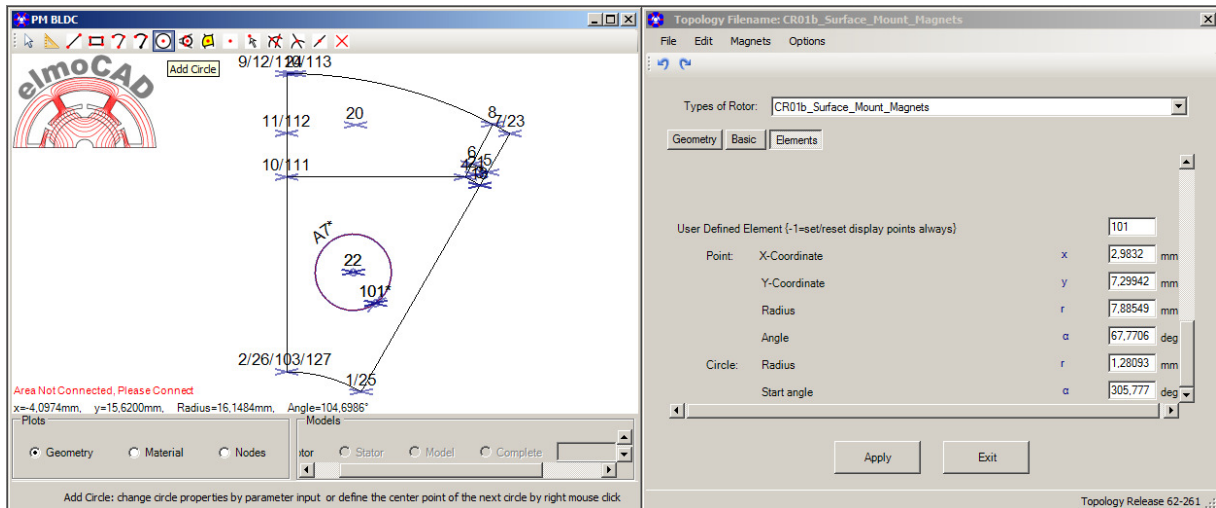
- MagAngle = -888 Magnetisierungswinkel wie durch die Topologie berechnet (default). Nach Eingabe von „-888“ wird der berechnete Winkel angezeigt.

Beispiel



1.8 Benutzerspezifische Geometrielemente

Zur Erweiterung bzw. Änderung der vordefinierten Geometrien werden verschiedene „**ToolTipButtons**“ (Schaltflächen) nach dem Öffnen einer Rotor- bzw. Statortopologie angezeigt (mit Ausnahme der Topologien für den CAD Import). Die Auswahl der ToolTipButtons erfolgt mit der **linken** Maustaste. Nach Auswahl eines ToolTipButtons wird die Geometrie nicht gespiegelt dargestellt. Dies kann auch für alle Darstellungen unter „**Options**“ gewählt werden. Für Bearbeitung der Geometry muss dann die **rechte** Maustaste benutzt werden. In der Statuszeile wird ein Text für die nächstmögliche Aktion angegeben.







Es stehen folgende Modes und ToolTipButtons zur Verfügung:

„**Select Mode**“ Mode nach dem Öffnen einer Topologie

	„Select Mode“	→	„Edit Mode“ verlassen, falls vorher eingeschaltet
	„Measure Distance Between Points“	→	Abstandmessung zwischen zwei mit der linken Maustaste angeklickten Positionen

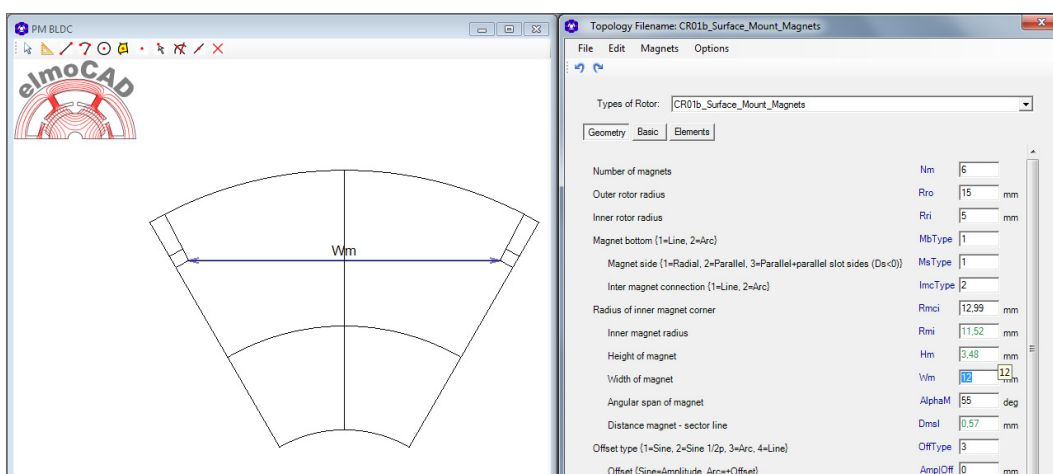
„**Edit Mode**“ Mode nach Auswahl einer der folgenden ToolTipButtons

	„Add Line“	→	Linie hinzufügen
	„Add Rectangle“	→	Rechteck hinzufügen
	„Add Arc“	→	Kreisbogen (Pcen, Psta, Pend) hinzufügen
	„Add Arc“	→	Kreisbogen (Psta, Pend, Radius) hinzufügen
	„Add Circle“	→	Kreis hinzufügen
	„Add Tangent Circle“	→	Tangentialen Kreisbogen hinzufügen (zwischen Linie-Linie, Line-Kreisbogen oder Kreisbogen-Kreisbogen)
	„Add Area“	→	einen Punkt zur Definition des Materials eines Flächenelementes hinzufügen
	„Add Point“	→	einen Punkt hinzufügen
	„Select Point“	→	einen Punkt auswählen, um dessen xy-Koordinaten zu verändern

	„Split All Intersections“	→	alle Linien, Kreisbögen und Kreise an deren Schnittpunkten auftrennen
	„Split Element at Intersection“	→	ein Element an einem Schnittpunkt auftrennen
	„Split Element At Mouse Position“	→	ein Zeichnungselement an der gewählten Mausposition auftrennen
	„Delete Element“	→	ein oder mehrere Zeichnungselemente löschen

1.8.1 Anwendung

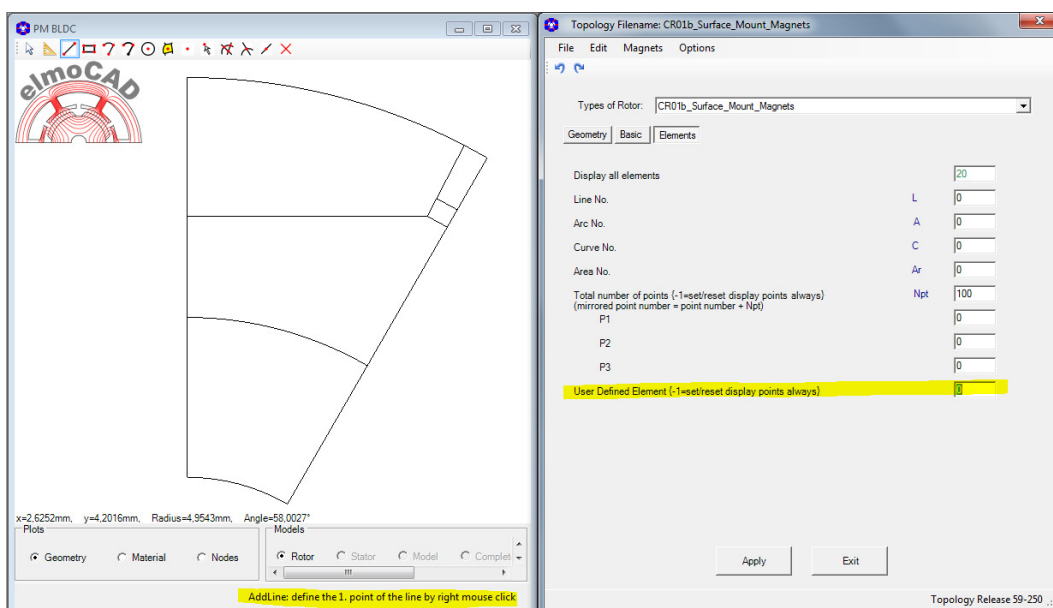
- Nach dem Öffnen einer Topologie befindet sich diese im „**Select Mode**“, d.h. es stehen wie in allen vorherigen smartFEM Versionen alle Funktionen zur Auswahl und Bearbeitung von Zeichnungselementen und Parametern zur Verfügung.



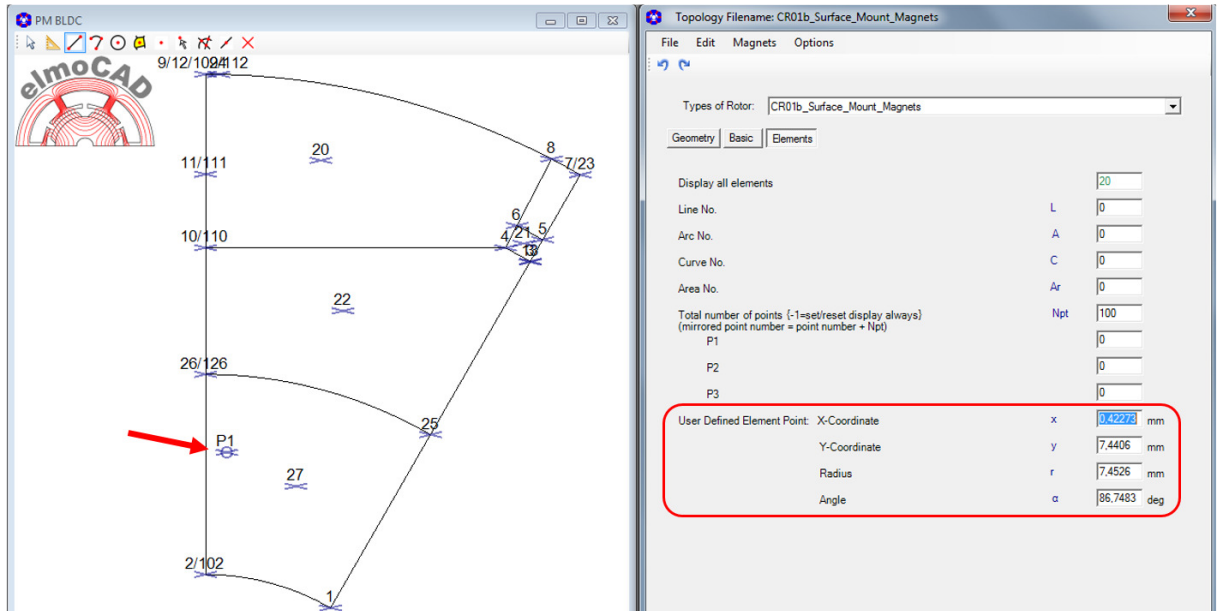
- Um die Geometrie zu erweitern bzw. bearbeiten werden die ToolTipButtons mit der linken Maustaste aktiviert. Es wird dann die nicht gespiegelte Geometrie (halber Pol) angezeigt.

Beispiel: „**AddLine**“

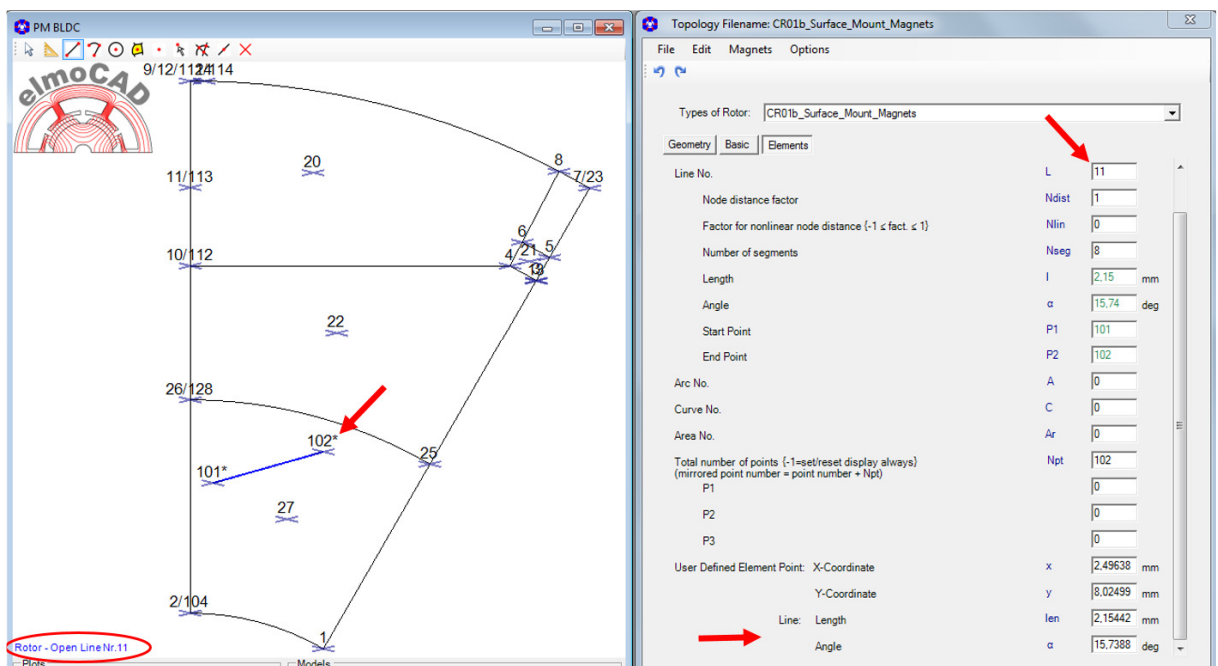
Anzeige der nicht gespiegelten Geometrie. Gleichzeitig wird die Parametergruppe „**Elements**“ geöffnet und zusätzliche Parameter für die Anpassung der xy-Koordinaten oder Radius/Winkel von benutzerspezifischen Punkten angezeigt, sobald diese definiert sind. Weiterhin wird in der Statuszeile ein Hilfetext für die nächst möglichen Aktionen zum Zeichnen des Elements ausgegeben:



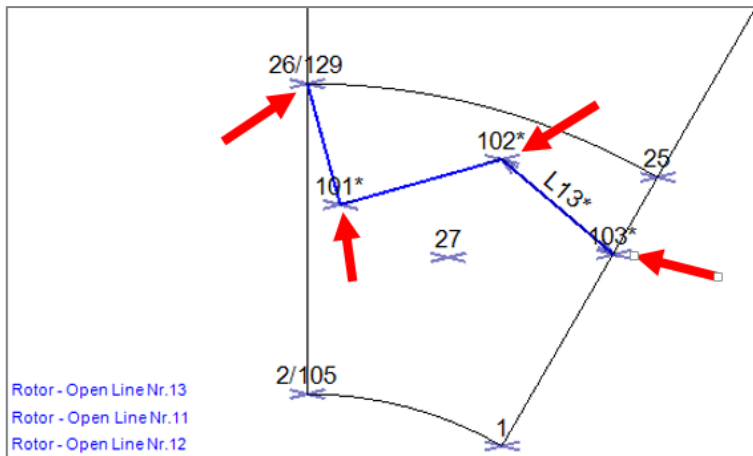
- Zur Bearbeitung der Geometrie wird die **rechte Maustaste** verwendet.
- Die Festlegung des Anfangspunktes der Linie erfolgt mit Klick der rechten Maustaste an der Position des Mauszeigers.. Der Punkt wird mit „P1“ gekennzeichnet. Die xy-Koordinaten sowie Radius und Winkel des Punktes werden in der Parameterliste angegeben und können mit numerischen Eingaben exakt an die gewünschte Position des Punktes angepasst werden.



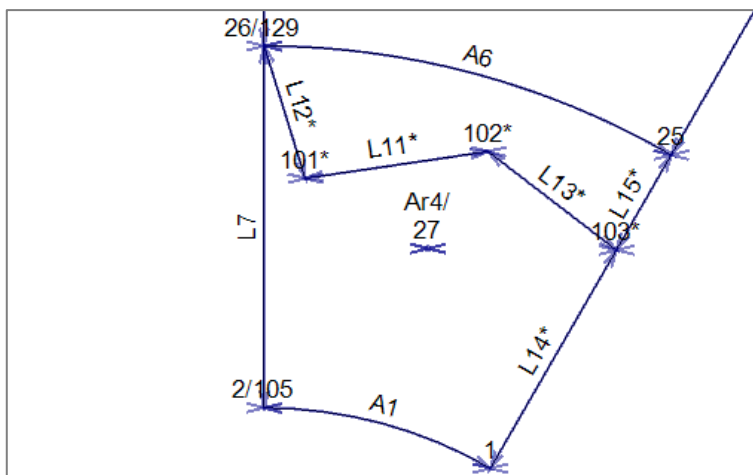
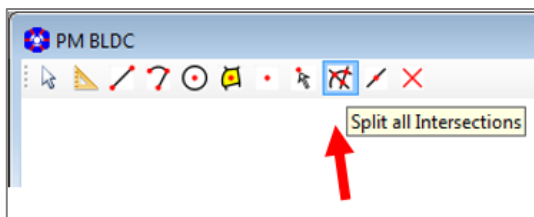
- Als Nächsten kann der Endpunkt der Linie mit der rechten Maustaste gewählt werden. Es werden jetzt die Nummern der Anfangs- und Endpunkte der Linie, die Linieninformationen in „Elements“ und ggfs. die Informationen über eine „Open Line“ und „Intersection“ mit anderen Linien/Kreisbögen angegeben. Länge und Winkel der Linie kann mit den entsprechenden Parametern verändert werden.



- Wenn weitere Linien hinzugefügt werden und dabei mit der Maus Punkte oder Positionen auf anderen Linien/Kreisbögen gewählt werden, sorgt die „Snap-Funktion“ dafür, dass die xy-Koordinaten der Punkte übernommen bzw. so berechnet werden, dass sie exakt auf dem jeweiligen Punkt bzw. Linie/Kreisbogen liegen.



Der gesamte Linienzug (Punkte 26-101-102-103) ist nur mit Punkt 26 an die Geometrie angebunden. Der Punkt 103 nicht. Dazu muss die Linie mit den Punkten 1-25 in Punkt 103 aufgetrennt werden, die Linie gelöscht und zwei neue Linien 1-103 und 103-25 angelegt werden. Dazu kann der ToolTipButton „**Split All Intersections**“ genutzt werden. Es werden dann alle Linien/Kreisbögen an Kreuzungspunkten und aufliegenden freien Punkten aufgetrennt und entsprechende neue Linien/Kreisbögen angelegt.

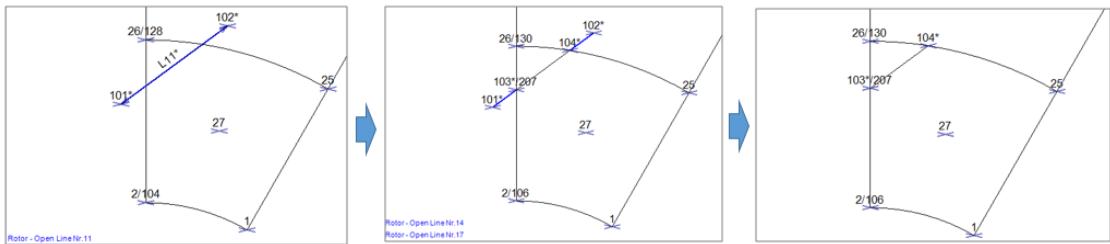


oder z.B.

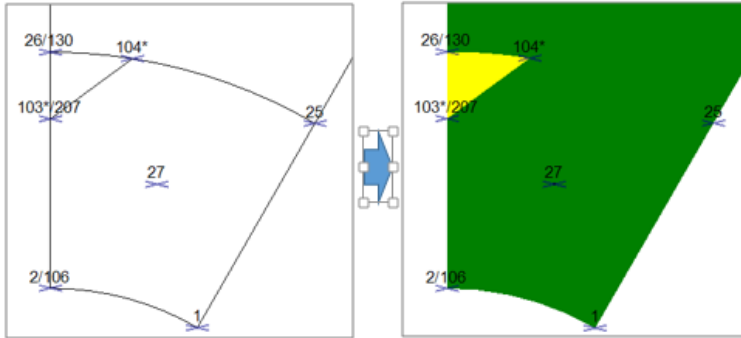
neue Linie mit Schnittpunkten

Split All Intersections,
→ 2 offene Linien entstehen

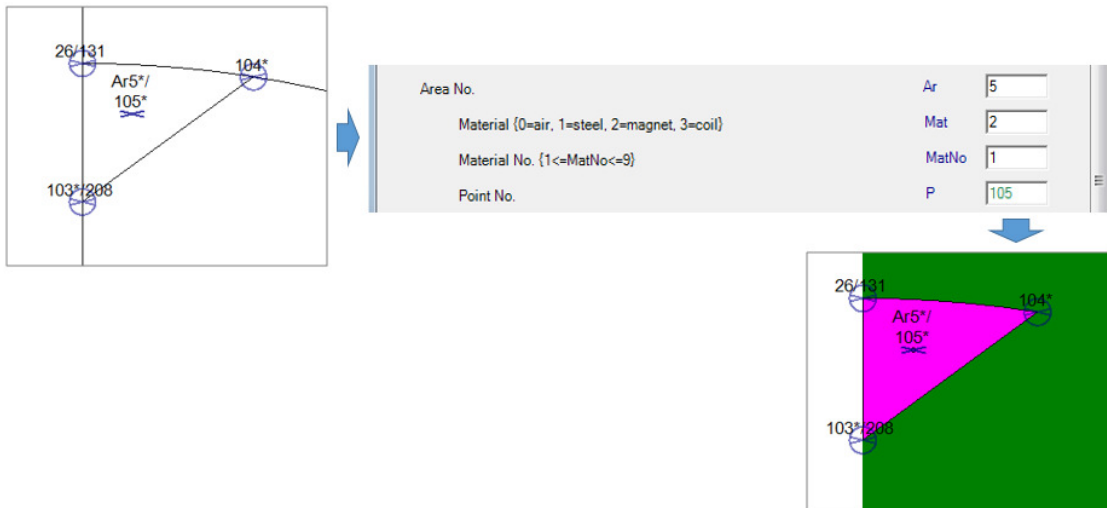
konsistente Geometrie



In der Materialansicht wird das neue dreieckige Flächenelement als Luft angezeigt.

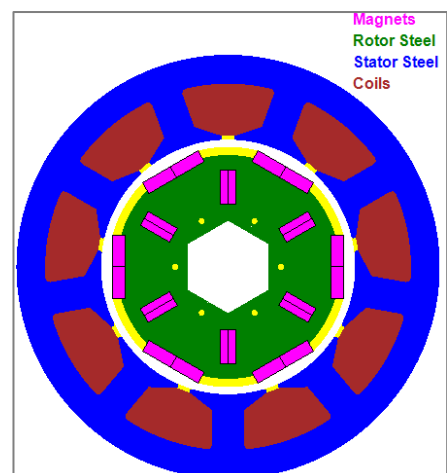


- Mit Hilfe des ToolTipButtons „**Add Area**“ kann das Dreieck als ein parametrierbares Flächenelement definiert und das gewünschte Material ausgewählt werden.



- Das Arbeiten mit Kreisbögen, Kreisen und freien Punkten erfolgt analog der Bearbeitung von Linien. Mit Hilfe dieser Funktionen können jetzt in smartFEM verfügbaren Rotor- und Statortopologien benutzer-spezifisch gestaltet werden.

Beispiel: zusätzliche Magnete und Löcher in die Rotortopologie CR01_Surface_Mount_Magnets



- WeitereToolTipButtons:

„Select Point“

für eine spätere Anpassung der xy-Koordinaten bzw. Radius/Winkel benutzerdefinierter Punkte.

„Split All Intersections“

um alle Linien/Kreisbögen an allen Schnittpunkten teilen zu können.

„Split Element At Intersection“

um einzelne Linien/Kreisbögen an Schnittpunkten teilen zu können.

„Split At Mouse Position“

um Linien/Kreisbögen z.B. für eine bessere Knoten-/Netzgestaltung zusätzlich zu teilen.

„Delete Element“

zum Löschen von Geometrieelementen, auch von durch die Topologie vorgegebenen Elementen.

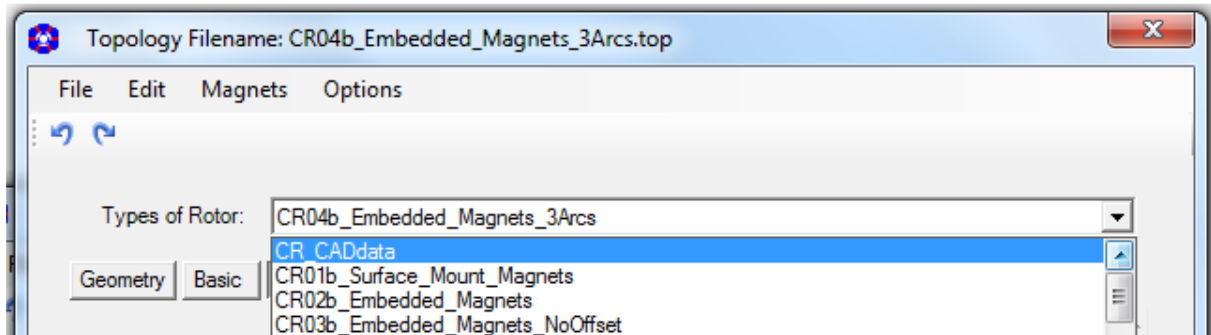
2 Topologien

2.1 DXF-Import

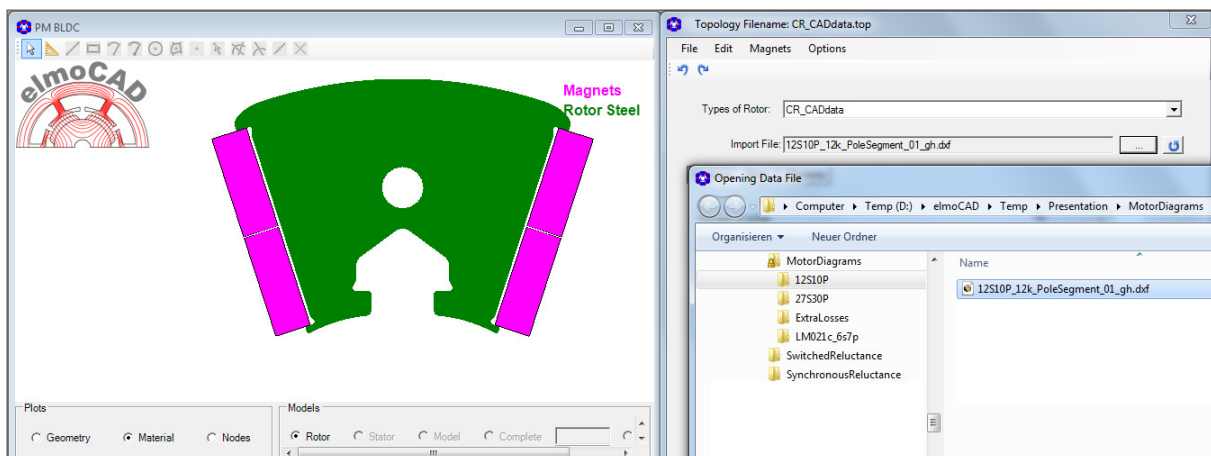
Für den Import von benutzerspezifischen Rotor- und Statorgeometrien stehen je Maschinenmodell eine Topologie für Rotor und Stator „xx_CADdata.top“ bzw. „LM_CADdata.tol“ zur Verfügung. Die Vorgehensweise ist im Benutzerhandbuch beschrieben.

Beispiel: DXF-Import einer Rotor Geometrie

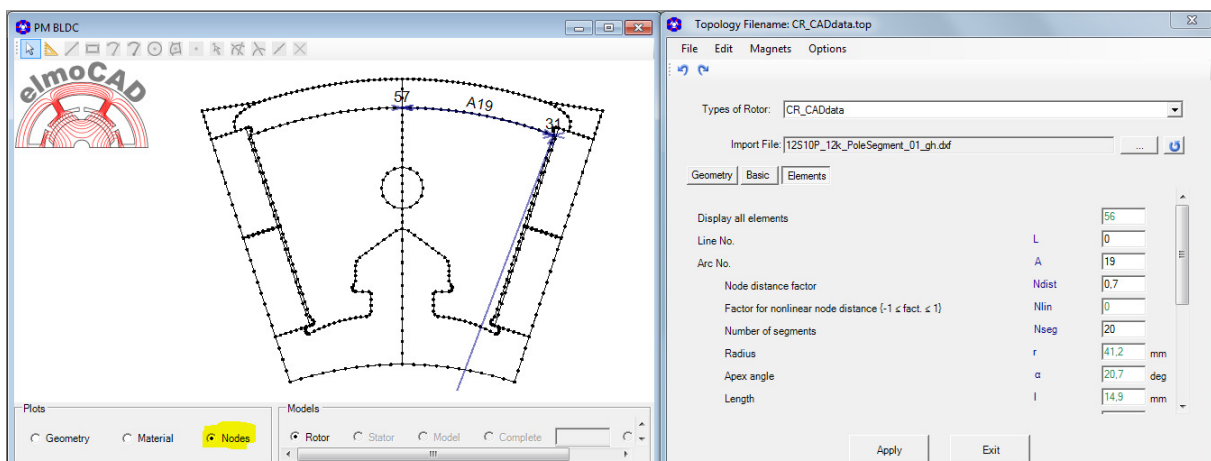
Schritt 1: Auswahl der Rotortopologie „CR_CADdata“



Schritt 2: Auswahl und Import der DXF-Datei.

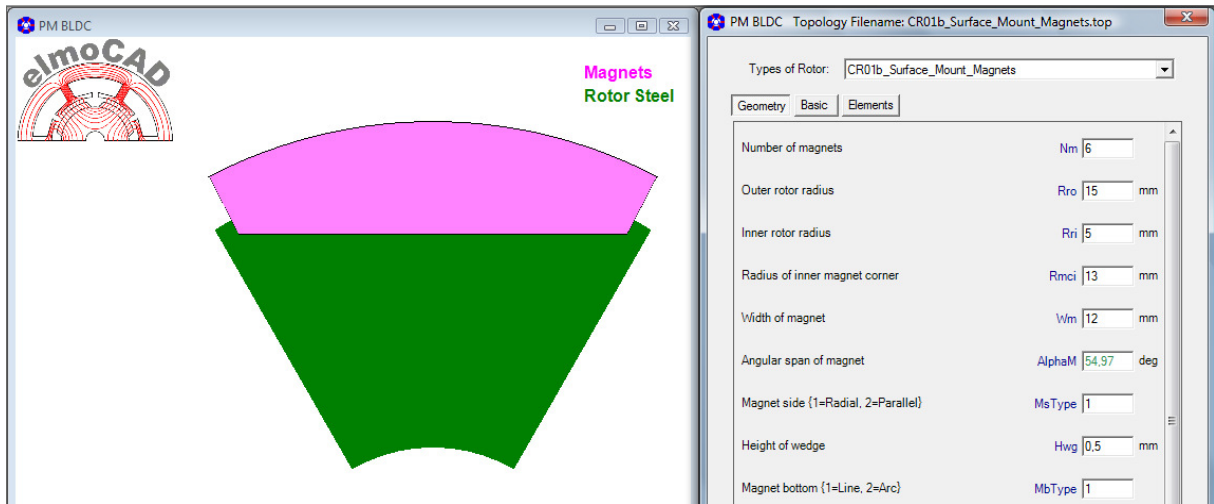


Schritt 3: sofern erforderlich Anpassung der Knotenkette und weiterer Parameter.



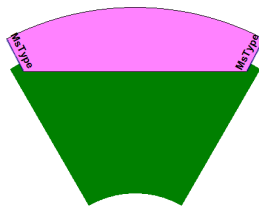
2.2 Innenläufer Rotor

2.2.1 CR01b_Surface_Mount_Magnets

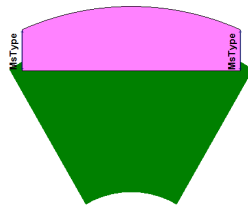


wählbare Eigenschaften

Magnetseite:

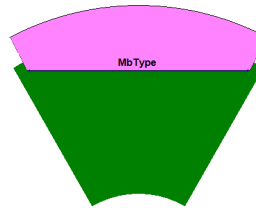


radial

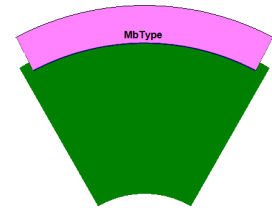


parallel

Magnetboden:

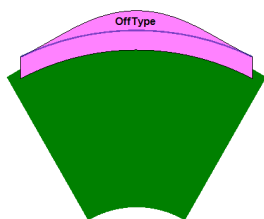


Gerade

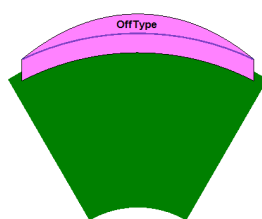


Kreisbogen

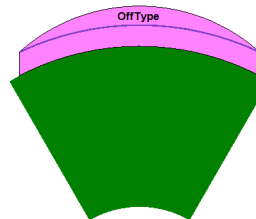
Offset Typ:



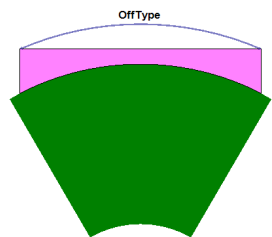
Sinus 1 Periode



Sinus 1/2 Periode

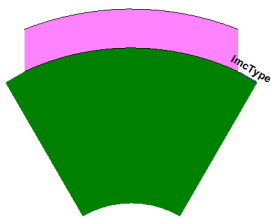


Kreisbogen

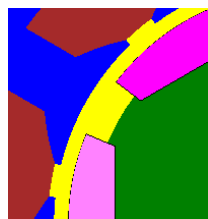


Gerade

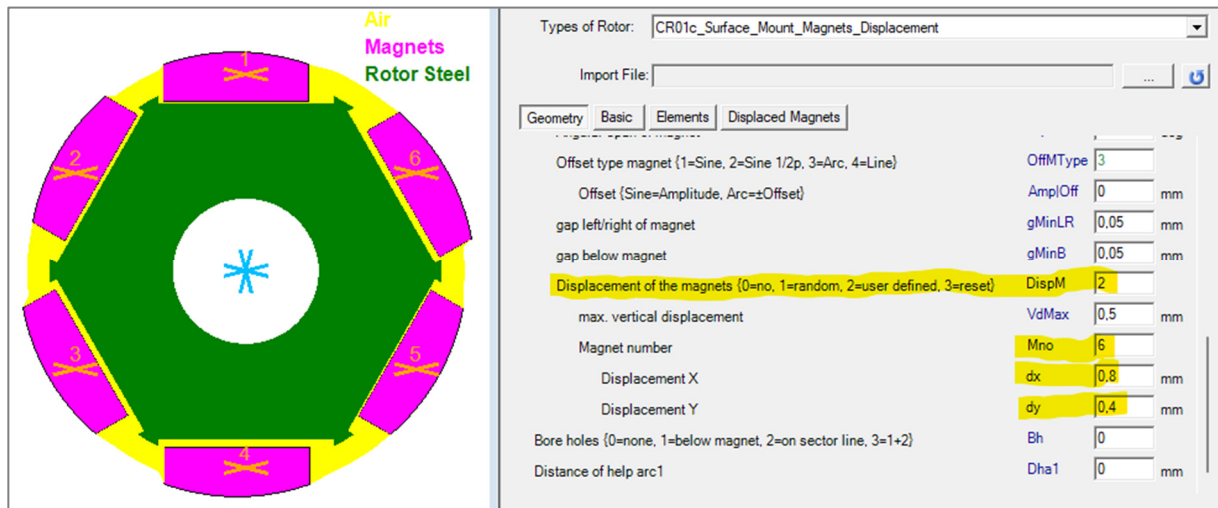
Verbindung Magnet-Magnet:



Gerade oder Kreisbogen



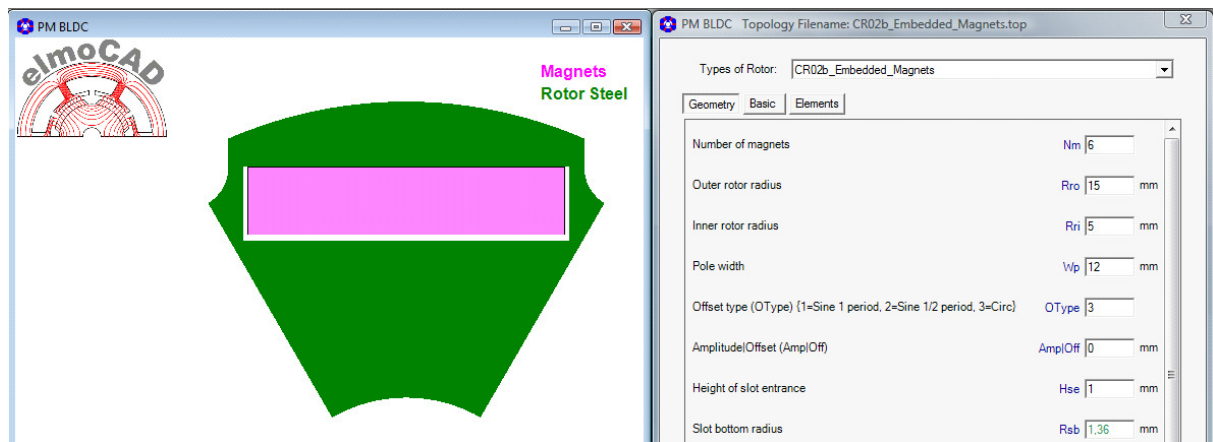
2.2.2 CR01c_Surface_Mount_Magnets_Displacement



Diese Topologie entspricht „2.2.1 CR01b_Surface_Mount_Magnets“ mit der Möglichkeit jeden einzelnen Magnet in x- und y- Richtung zu versetzen:

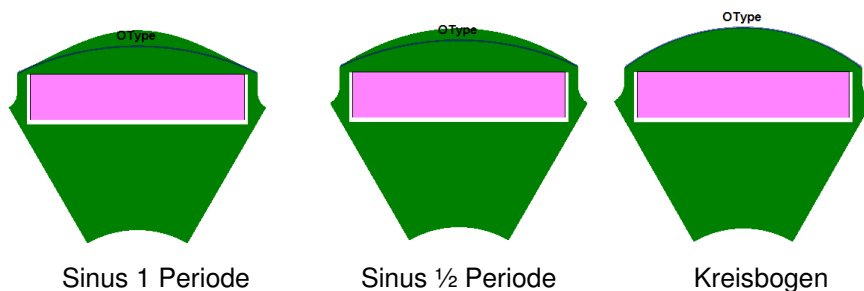
- DispM = 0 kein Versatz für alle Magnet
- 1 der Versatz wird für jeden Magneten per Zufall berechnet
 - 2 der Versatz kann manuell für jeden Magneten angegeben werden
 - 3 alle Versätze werden auf 0 zurückgesetzt

2.2.3 CR02b_Embedded_Magnets



wählbare Eigenschaften

Offset Typ:

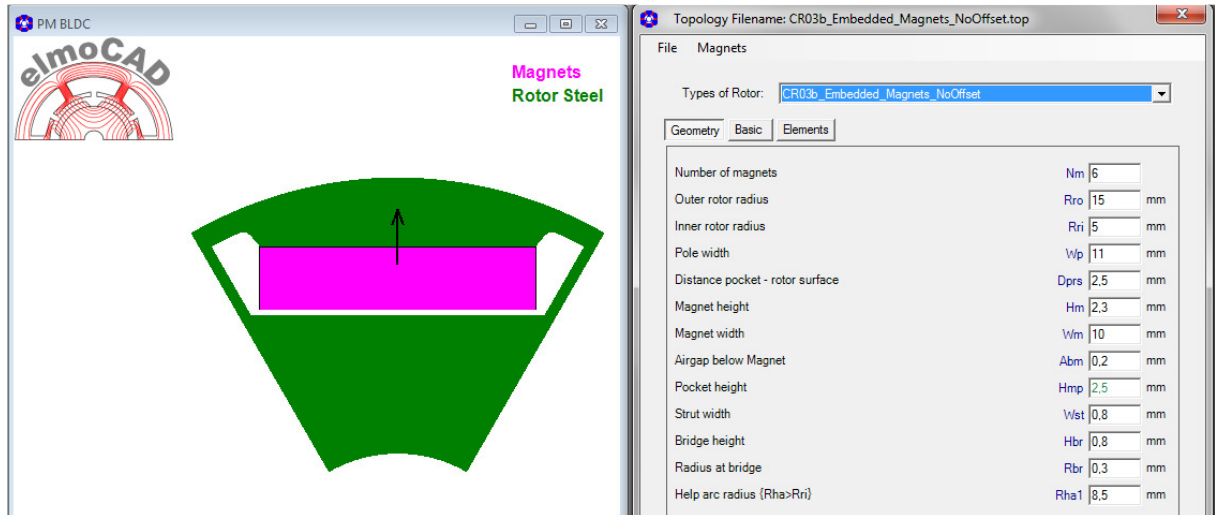


Sinus 1 Periode

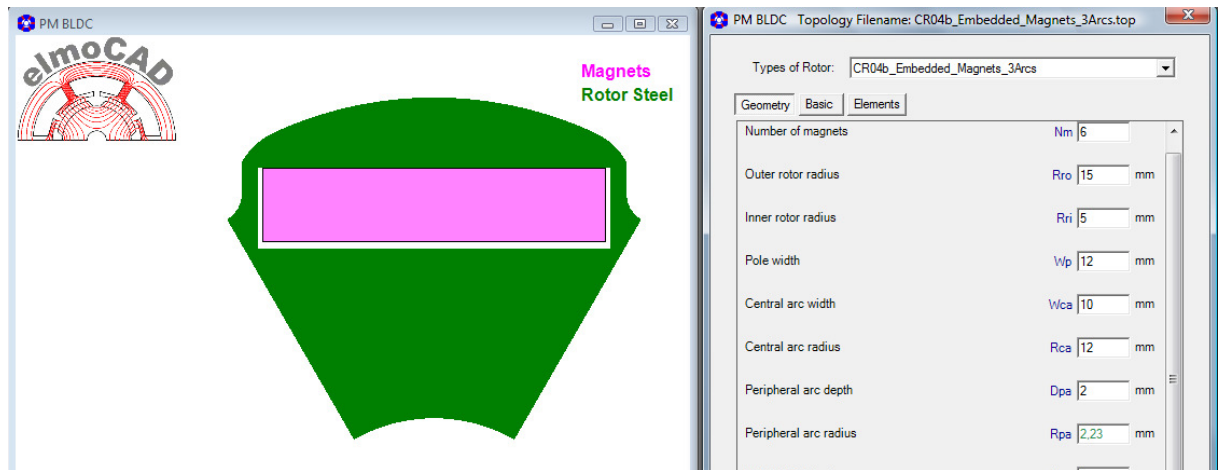
Sinus 1/2 Periode

Kreisbogen

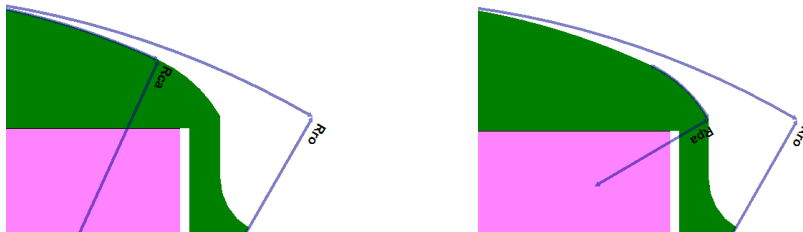
2.2.4 CR03b_Embedded_Magnets_NoOffset



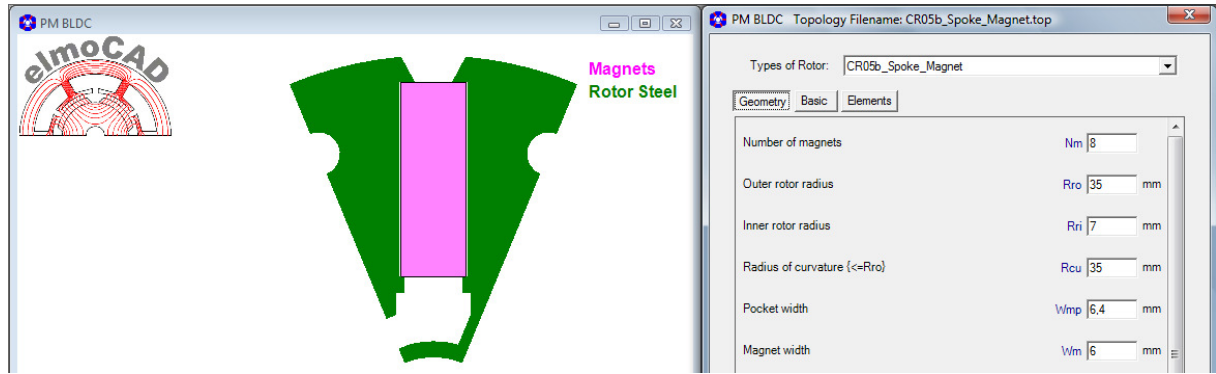
2.2.5 CR04b_Embedded_Magnets_3Arcs



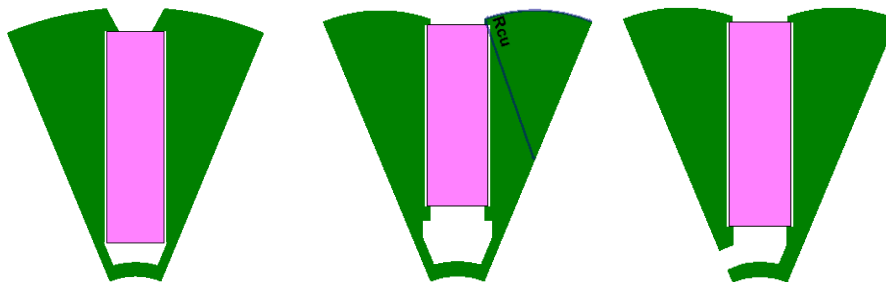
Die Rotoroberfläche wird mit 3 Kreisbögen modelliert, 1 zentraler und 2 periphere.



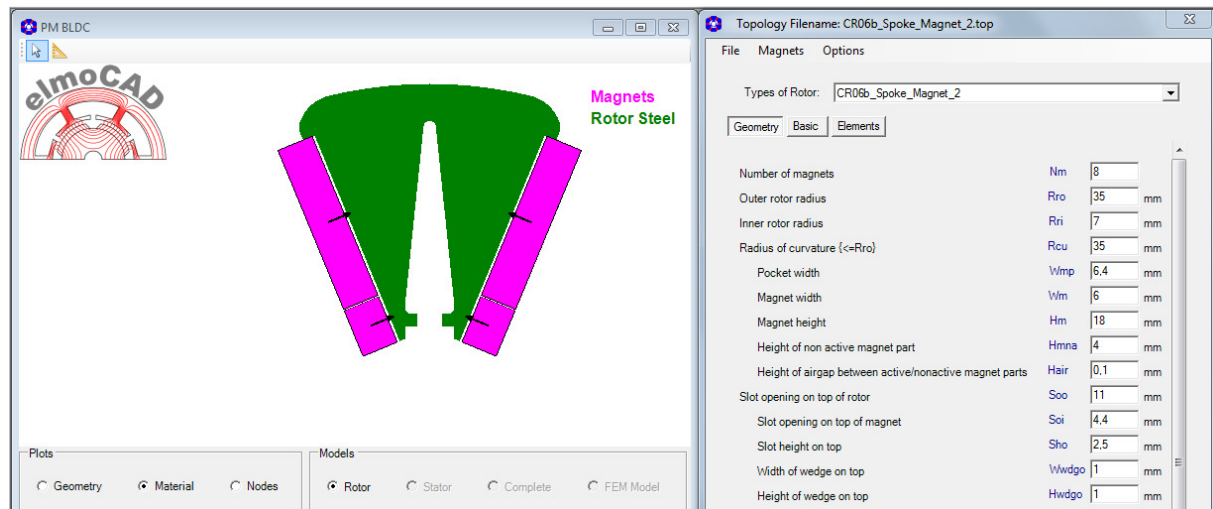
2.2.6 CR05b_Spoke_Magnet



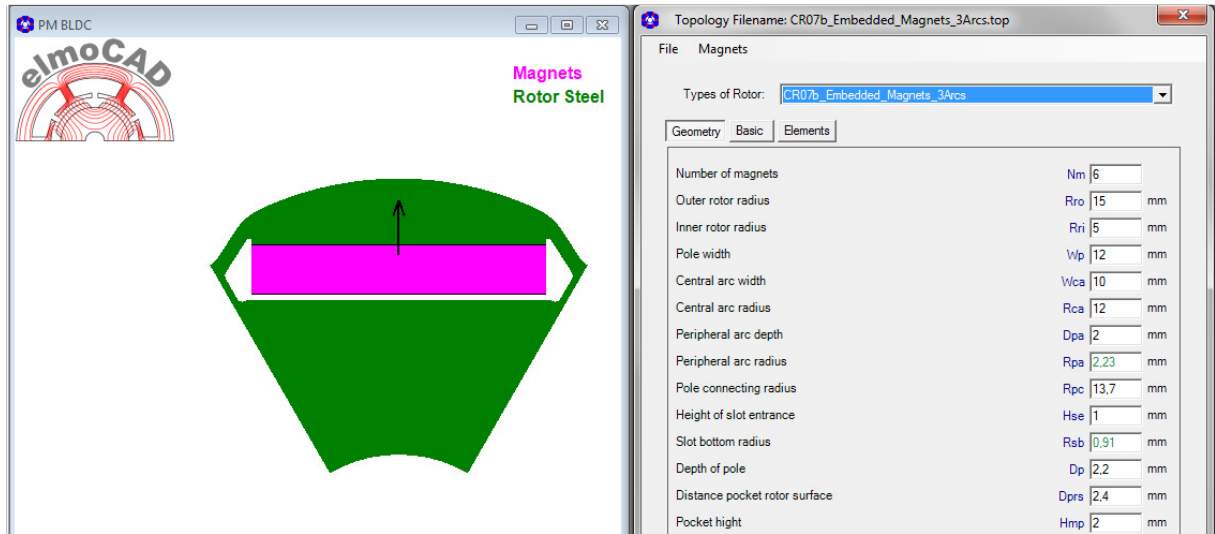
CR05b beinhaltet zusätzlich die Eigenschaften von CR18a



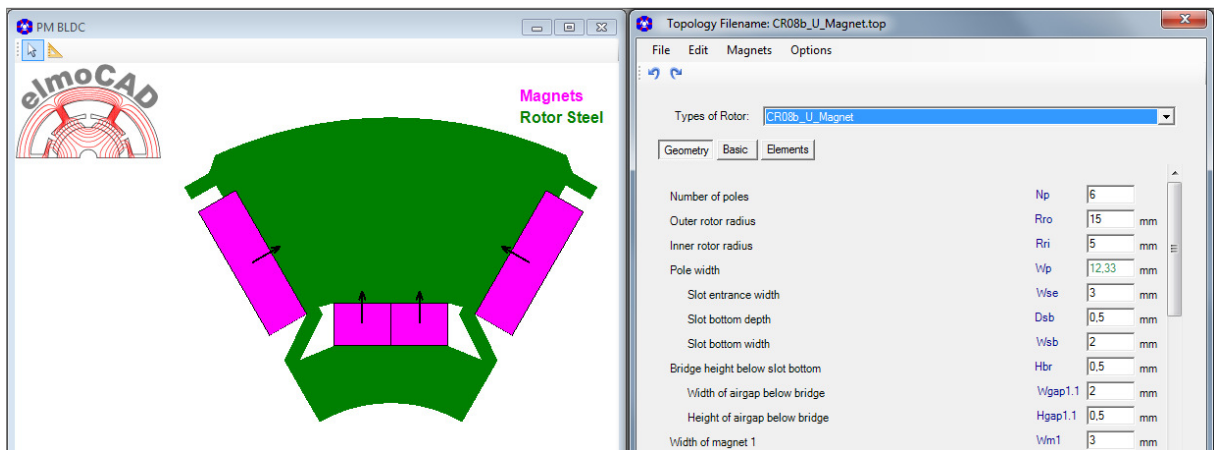
2.2.7 CR06b_Spoke_Magnet_2



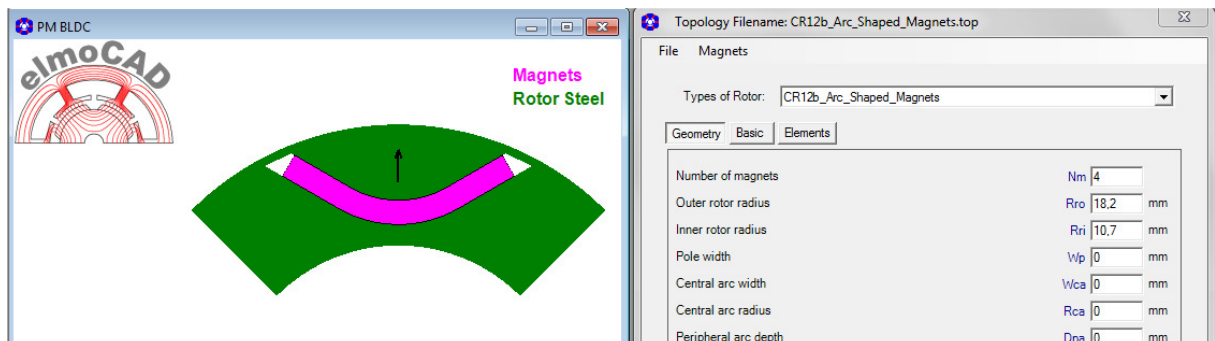
2.2.8 CR07b_Embedded_Magnets_3Arcs



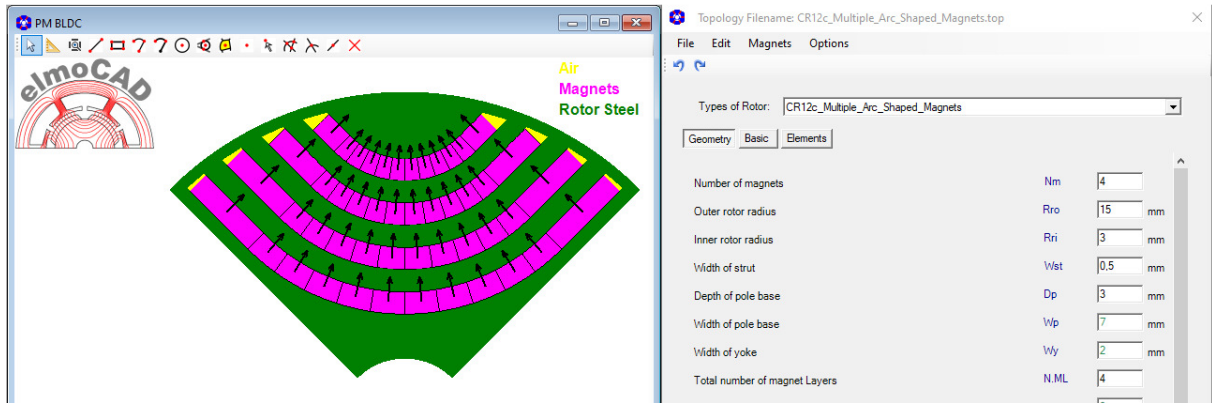
2.2.9 CR08b_U-Magnet



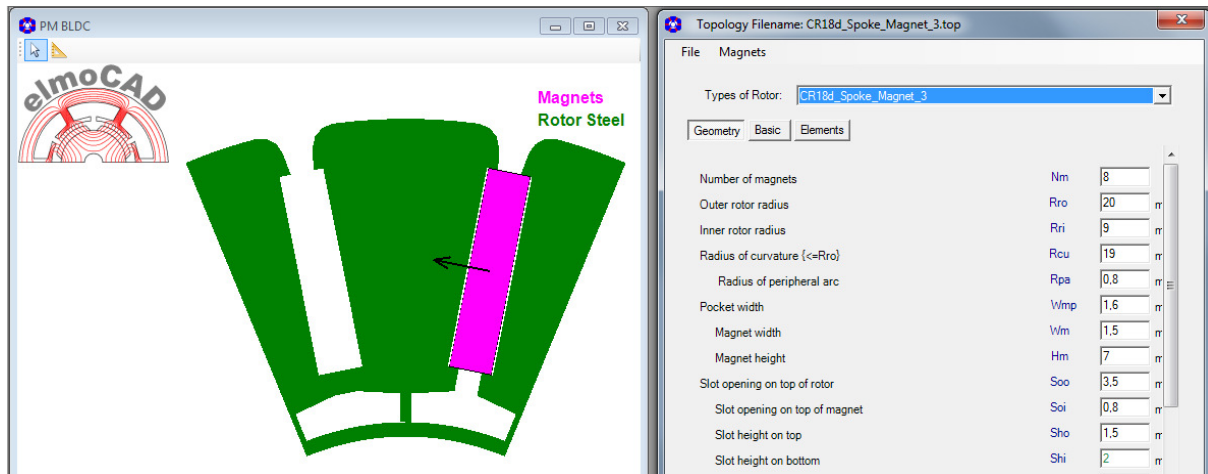
2.2.10 CR12b_Arc_Shaped_Magnets



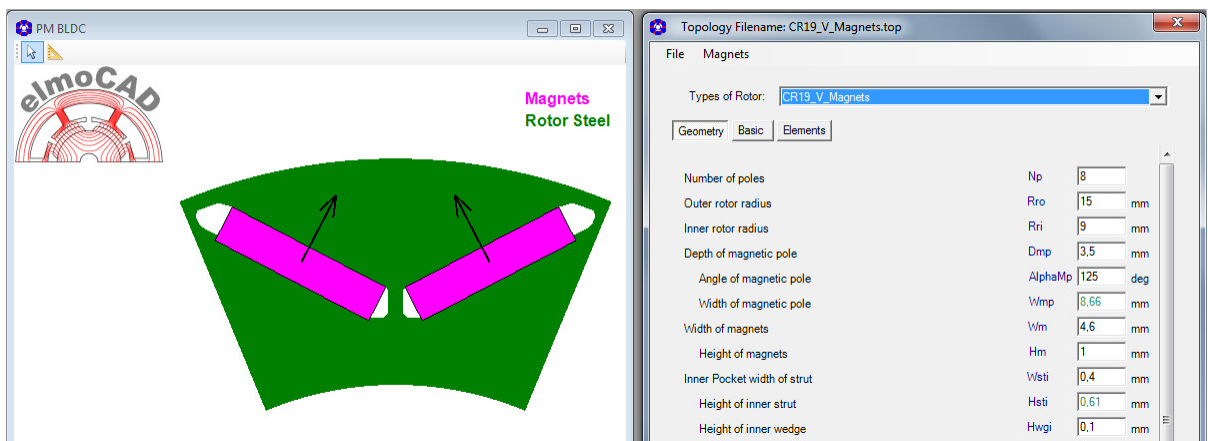
2.2.11 CR12c_Multiple_Arc_Shaped_Magnets



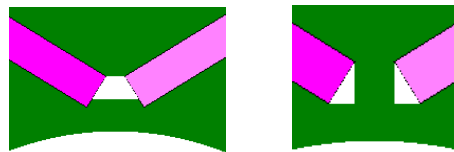
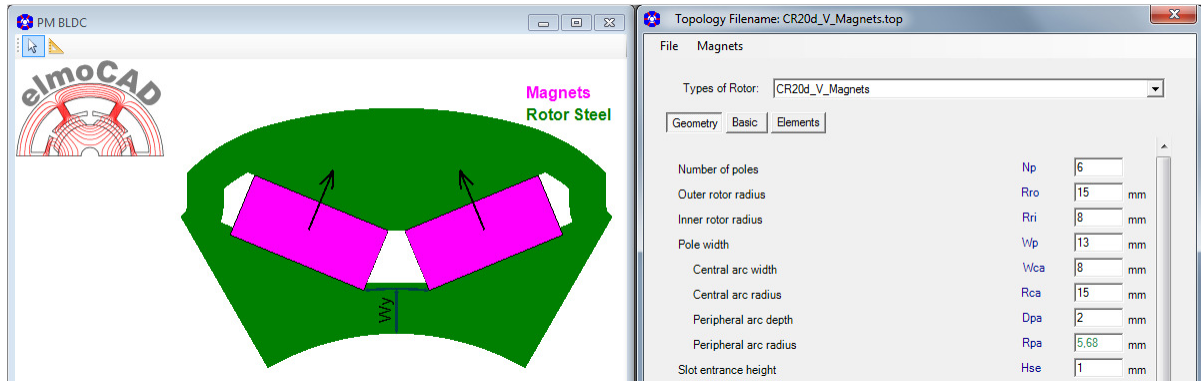
2.2.12 CR18d_Spoke_Magnet_3



2.2.13 CR19_V_Magnets

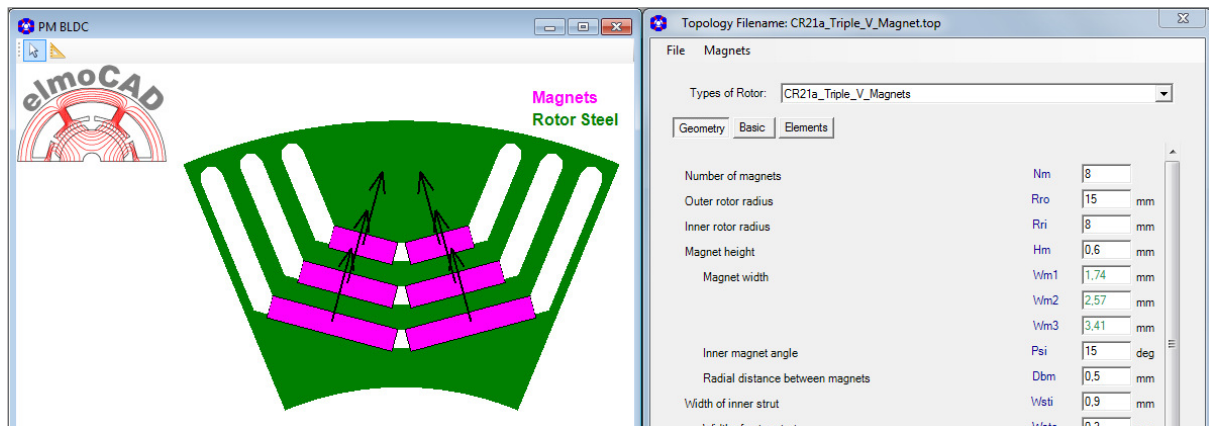


2.2.14 CR20d_V_Magnets

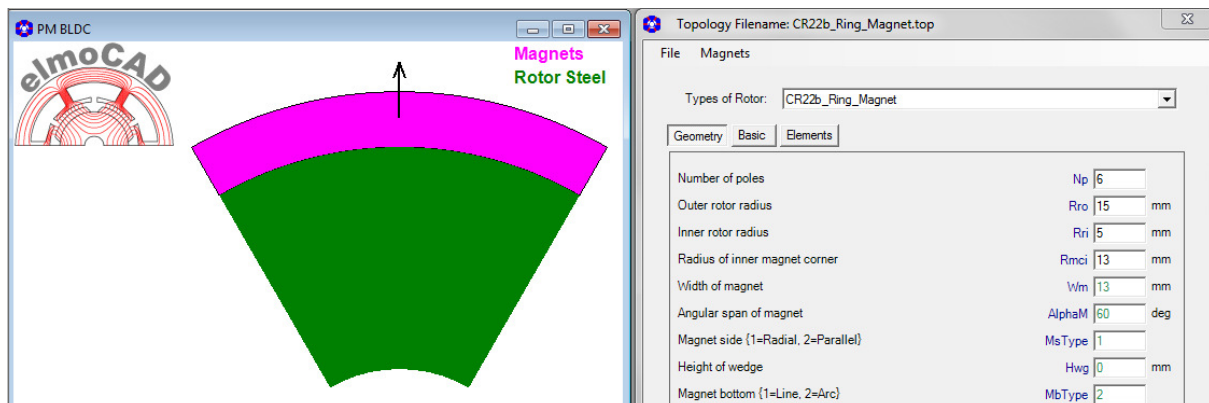


Wählbare Eigenschaften: mit/ohne Mittelsteg

2.2.15 CR21a_Triple_V_Magnets



2.2.16 CR22b_Ring_Magnet



2.2.17 CR23b_Surface_mount_Segmented_Magnets

The screenshot displays the elmoCAD interface for a PM BLDC motor. The main window shows a cross-section of a rotor with three magenta magnet segments mounted on a green rotor steel core. Arrows point to the magnets and the rotor steel. A legend in the top right identifies the magenta as 'Magnets' and the green as 'Rotor Steel'. To the right, a 'Magnets' parameter dialog is open, showing the following settings:

Parameter	Value	Unit
Number of poles	Np	6
Outer rotor radius	Rro	15 mm
Inner rotor radius	Rri	5 mm
Height of magnet	Hm	2 mm
Number of magnet segments	Nms	3
Width of magnet segments	Wms	4.14 mm
Width of struts between magnets	Wlst	0.1 deg
Angular span of magnet pole	AlphaMp	53.33 deg
Width of magnet pole	Wmp	13.46 deg
Inter pole connection (1=Line, 2=Arc)	IpcType	2
Radius of help arc (Rha>Rri)	Rha1	9 mm

2.2.18 CR24_Spoke_Magnet_4_Undercut

The screenshot displays the elmoCAD interface for a PM BLDC motor. The main window shows a cross-section of a rotor with a central magenta spoke magnet and four green rotor steel spokes. Arrows point to the magnet and the rotor steel. A legend in the top right identifies the magenta as 'Magnets' and the green as 'Rotor Steel'. To the right, a 'Magnets' parameter dialog is open, showing the following settings:

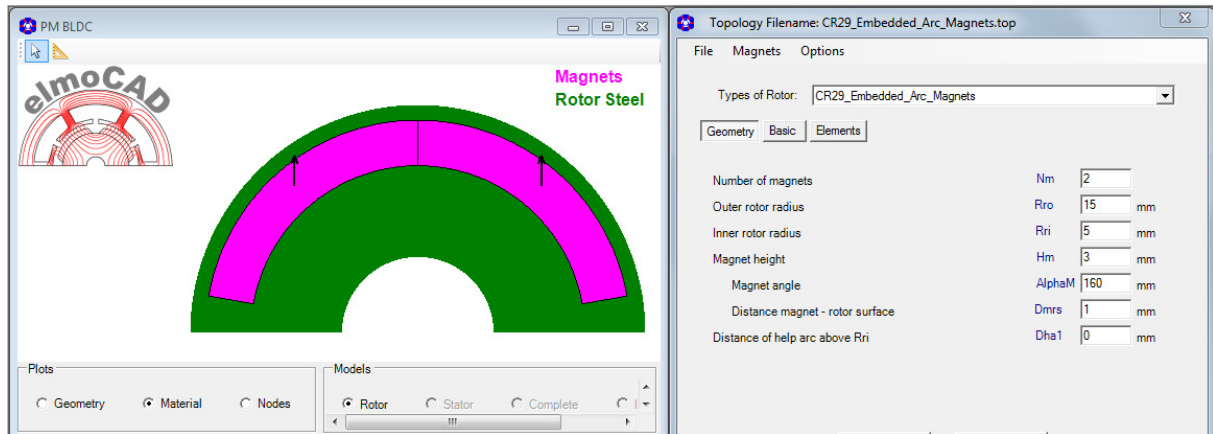
Parameter	Value	Unit
Number of magnets	Nm	8
Outer rotor radius	Rro	35 mm
Inner rotor radius	Rri	9 mm
Radius of curvature (<=Rro)	Rcu	25 mm
Pocket width	Wmp	6.4 mm
Magnet width	Wm	6 mm
Magnet height	Hm	18 mm
Slot opening on top of rotor	Soo	9 mm
Slot opening on top of magnet	Soi	0.8 mm
Slot height on top	Sho	3.5 mm
Radius at slot opening	Rsl0	4.27 mm
Width of wedge on top	Wwdgo	1.5 mm
Width of wedge on bottom	Wwdgi	0.5 mm
Height of wedge on bottom	Hwdgi	1.2 mm
Strut width	Wst	2 mm
Strut height	Hst	2 mm

2.2.19 CR28_Embedded_Block_Magnets

The screenshot displays the elmoCAD interface for a PM BLDC motor. The main window shows a cross-section of a rotor with two magenta block magnets embedded in a green rotor steel core. Arrows point to the magnets and the rotor steel. A legend in the top right identifies the magenta as 'Magnets', the green as 'Rotor Steel', and the white space as 'Air'. To the right, a 'Magnets' parameter dialog is open, showing the following settings:

Parameter	Value	Unit
Number of magnets	Nm	2
Outer rotor radius	Rro	15 mm
Inner rotor radius	Rri	5 mm
Magnet height	Hm	2.3 mm
Magnet width	Wm	15 mm
Width of air gap on top/bottom	MpAirGap	0.1 mm
Distance magnet pocket - rotor surface	Dmpsr	3 mm
Type of magnet pocket (0=without/with ears)	MpType	0
Distance of help arc above Rri	Dha1	0 mm

2.2.20 CR29_Embedded_Arc_Magnets



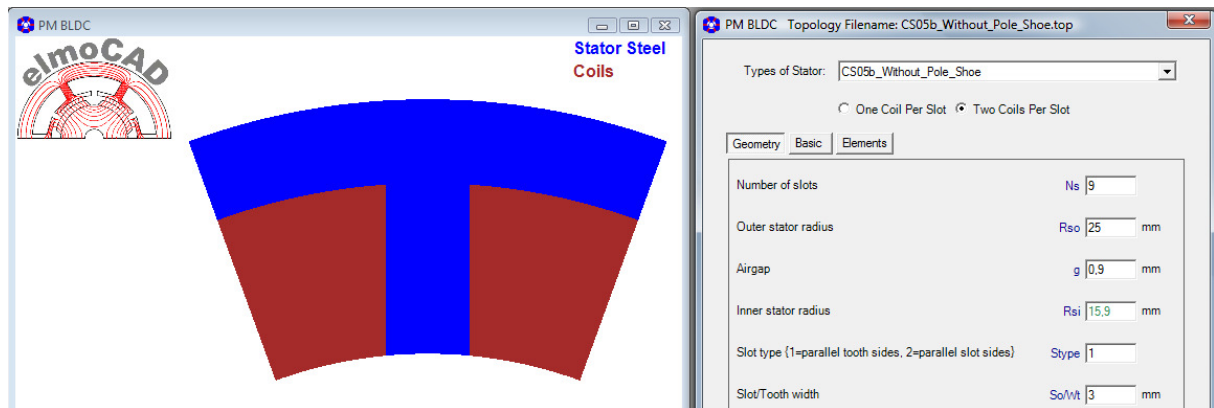
The screenshot displays the elmoCAD interface for a PM BLDC motor design. The main window shows a semi-circular rotor model with two embedded arc magnets (pink) and rotor steel (green). The legend indicates 'Magnets' in pink and 'Rotor Steel' in green. The parameter dialog box on the right is titled 'Topology Filename: CR29_Embedded_Arc_Magnets.top' and contains the following settings:

Parameter	Value	Unit
Number of magnets	Nm	2
Outer rotor radius	Rro	15 mm
Inner rotor radius	Rri	5 mm
Magnet height	Hm	3 mm
Magnet angle	AlphaM	160 mm
Distance magnet - rotor surface	Dmrs	1 mm
Distance of help arc above Rri	Dha1	0 mm

The dialog box also includes tabs for 'Geometry', 'Basic', and 'Elements', and a 'Types of Rotor' dropdown menu set to 'CR29_Embedded_Arc_Magnets'. The 'Plots' section at the bottom left shows 'Material' selected, and the 'Models' section at the bottom right shows 'Rotor' selected.

2.3 Topologien Innenläufer Stator

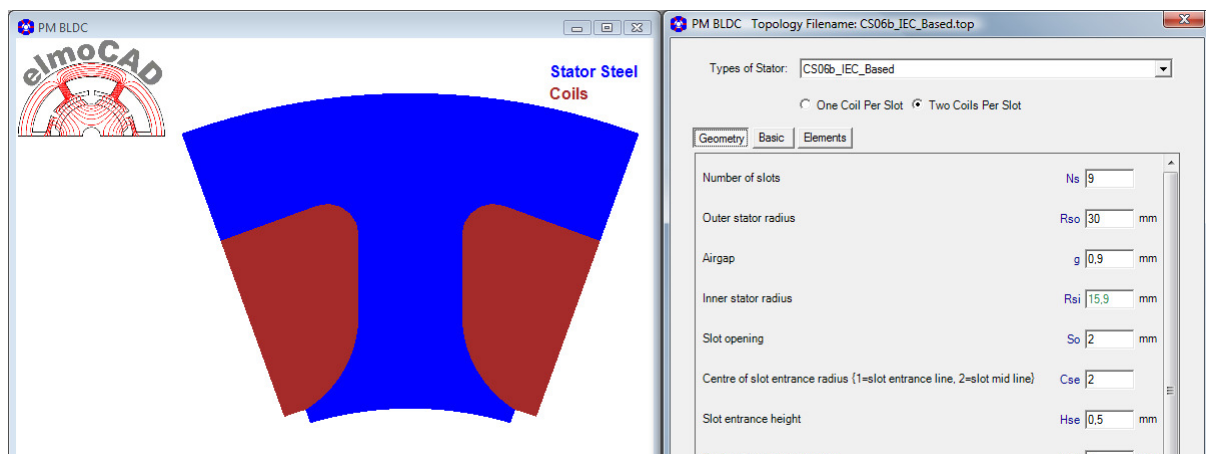
2.3.1 CS05b_Without_Pole_Shoe



Wählbare Eigenschaften: parallele Nut-/Zahnflanken

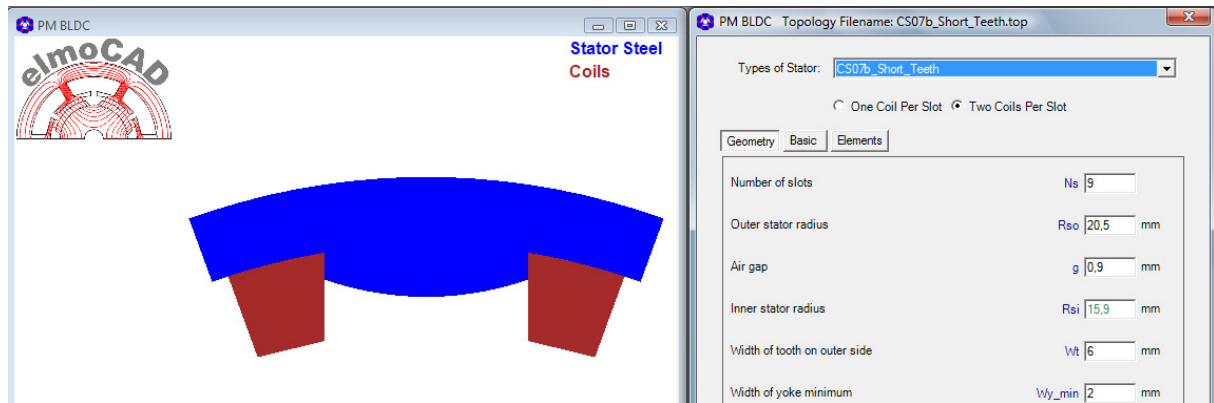


2.3.2 CS06b_IEC_Based

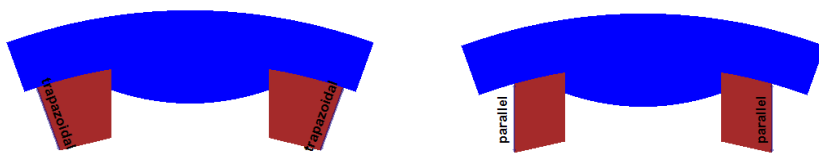


Es können die Maße aus den Blechschnittkatalogen verschiedener Stanzwerke eingegeben werden.

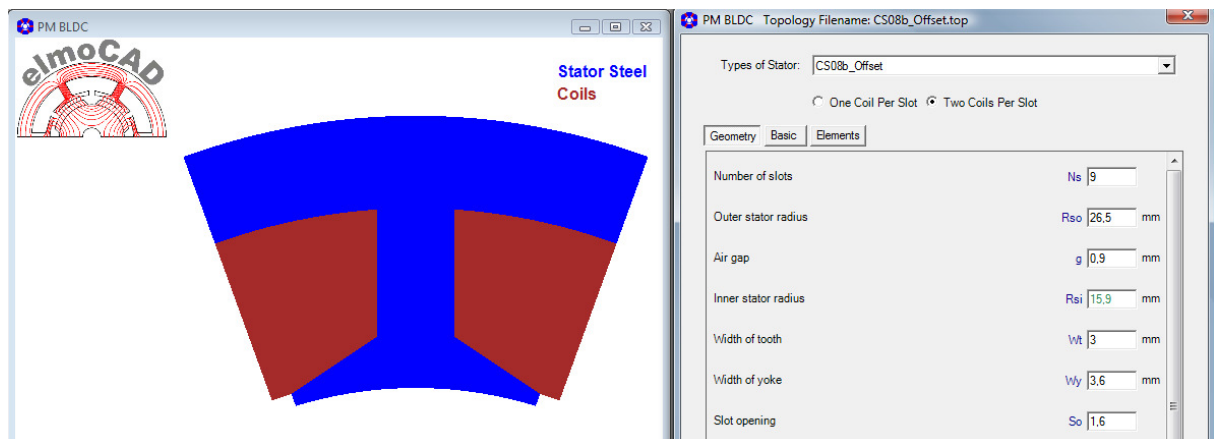
2.3.3 CS07b_Short_Teeth



wählbare Eigenschaften: trapezförmige / parallele Wicklungsflanken

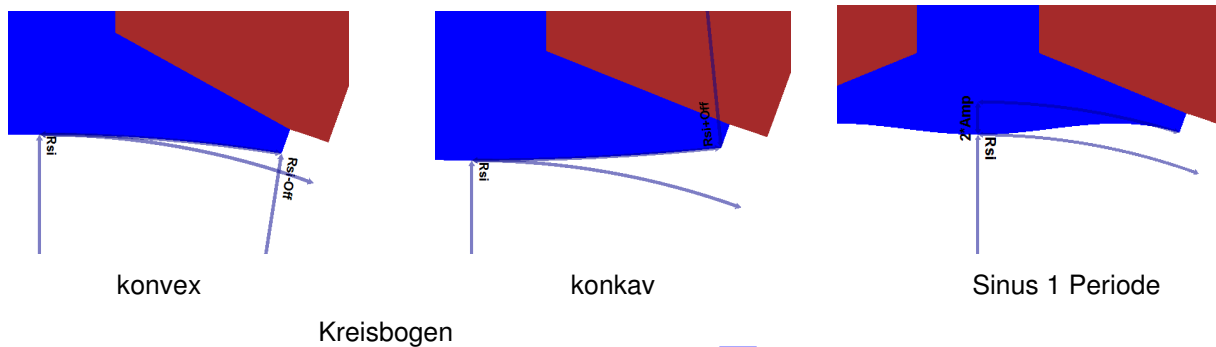


2.3.4 CS08b_Offset und CS08c_Offset

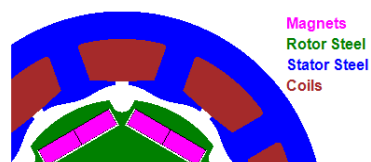


wählbare Eigenschaften (CS08c enthält gegenüber CS08b zusätzlich wählbare Eigenschaften)

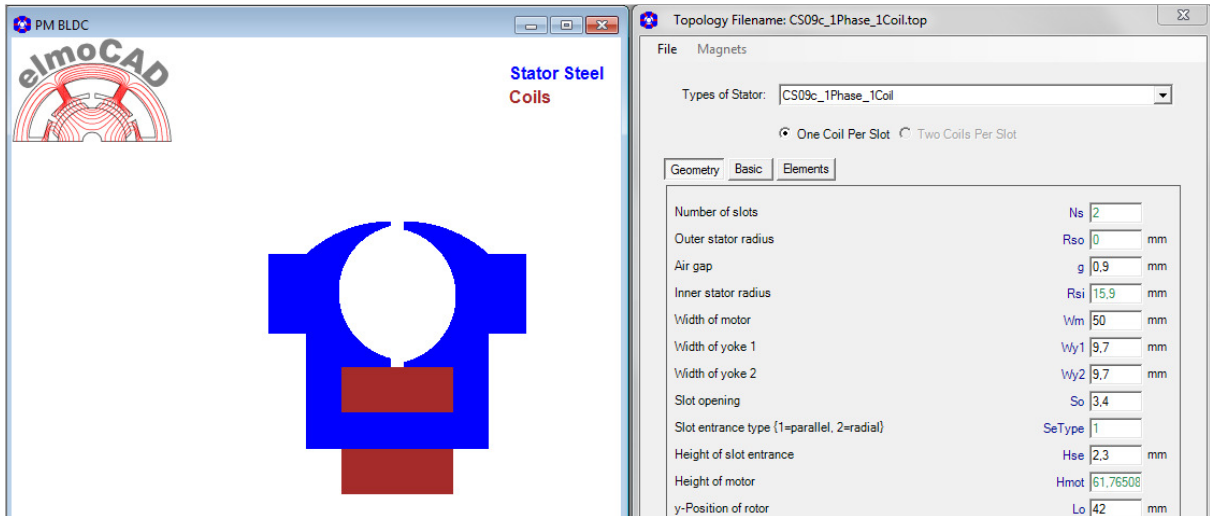
Offset Typ:



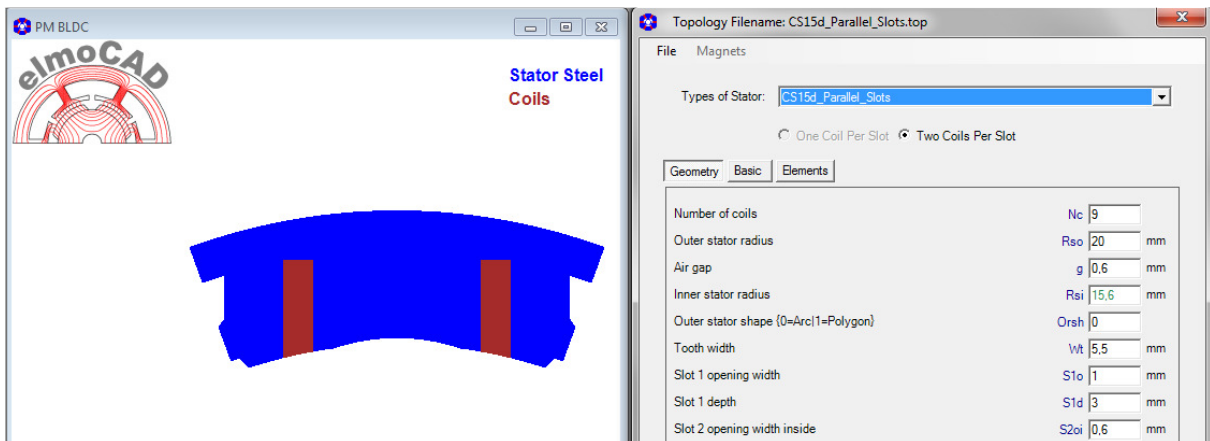
Beispiel: Darstellung der Motorgeometrie mit sinusförmigem Offset der Polschuhe



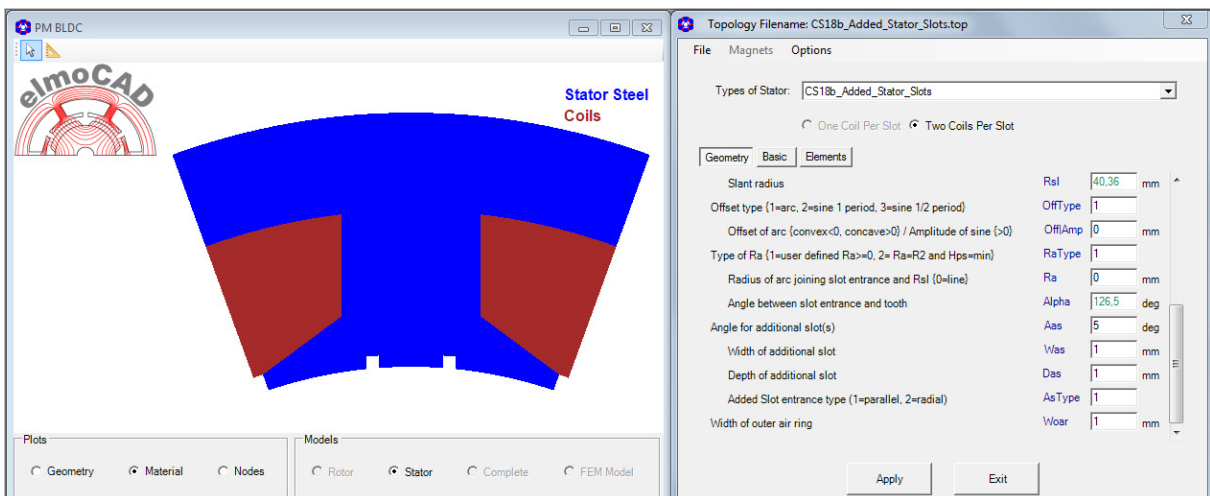
2.3.5 CS09c_1Phase_1Coil



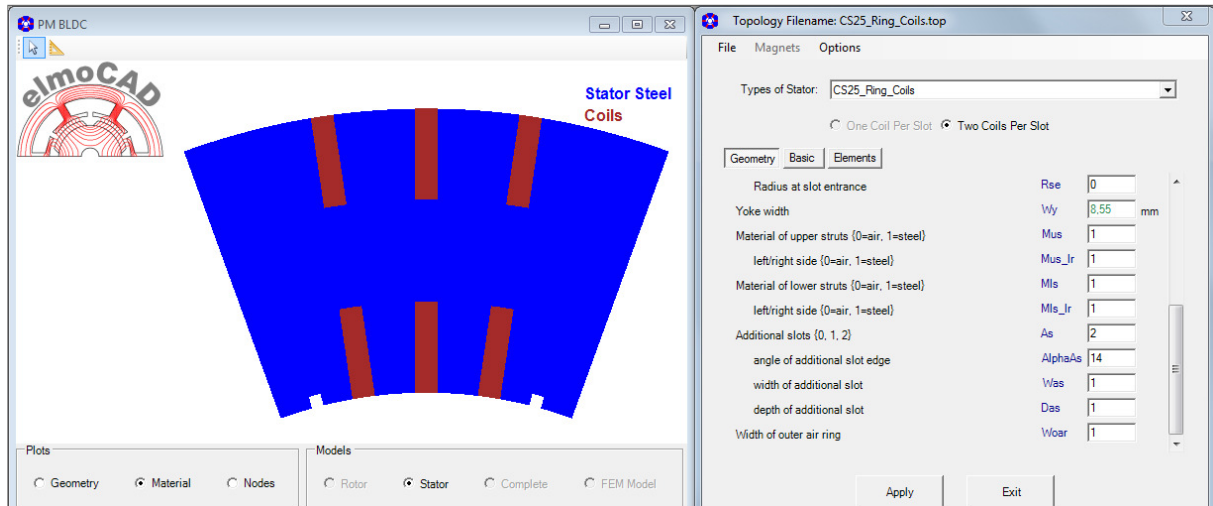
2.3.6 CS15d_Parallel_Slots



2.3.7 CS18b_Added_Stator_Slots

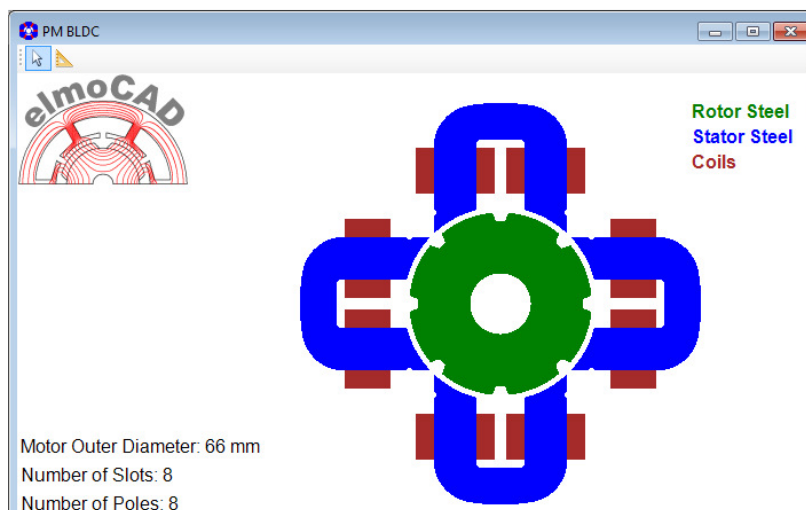


2.3.8 CS25_Ring_Coils



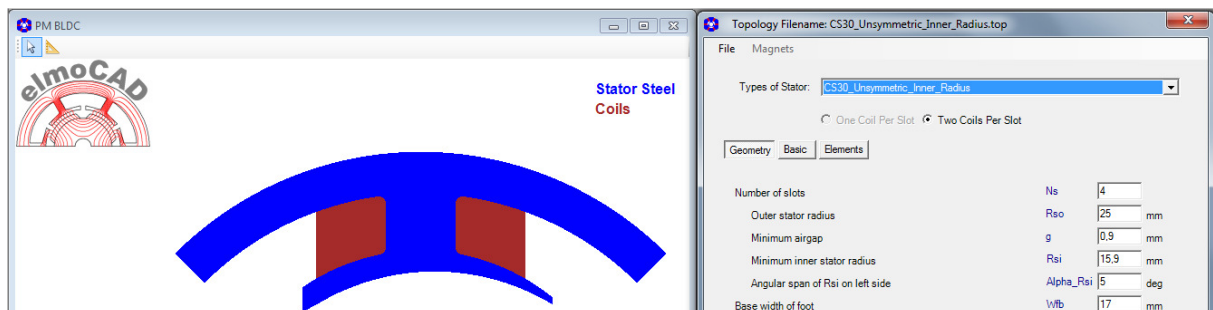
Neu: Design von zusätzlichen Nuten am Luftspalt zur Reduzierung des Rastmoments.

2.3.9 CS26_U_Pole_Shanks



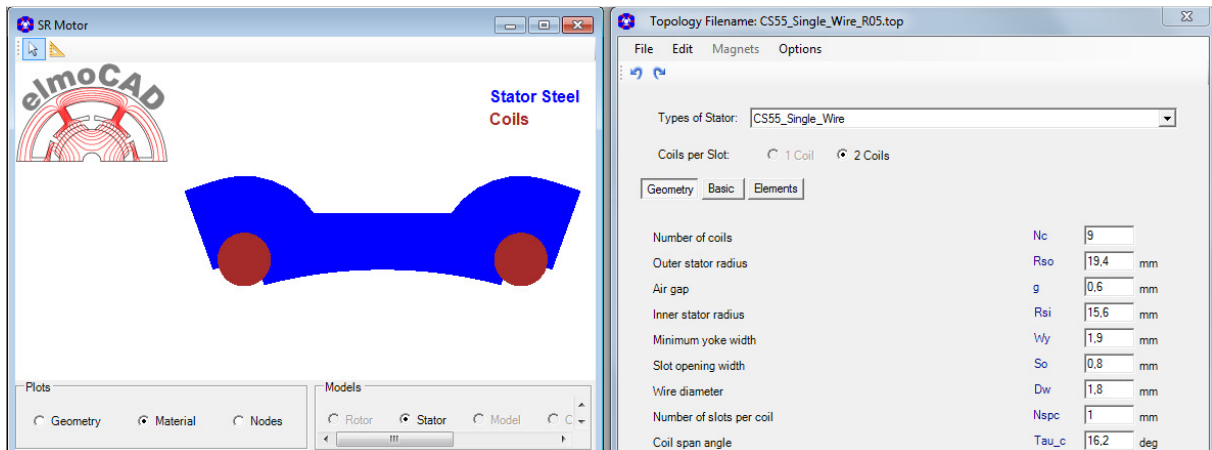
Dies ist ein spezielles Design eines Switched Reluctance Motors auch "Plusmotor" genannt basierend auf dem Patent EP 0 782 781 B1 (veröffentlicht 09.07.1997), untersucht in der Diplomarbeit von Stefan Weber (2002, TU Ilmenau).

2.3.10 CS30_Unsymmetric_Inner_Radius



Zum Design von 1- bzw. 2-phasigen Motoren

2.3.11 CS55_Single_Wire



2.3.12 CS56_MGPM_1Airgap

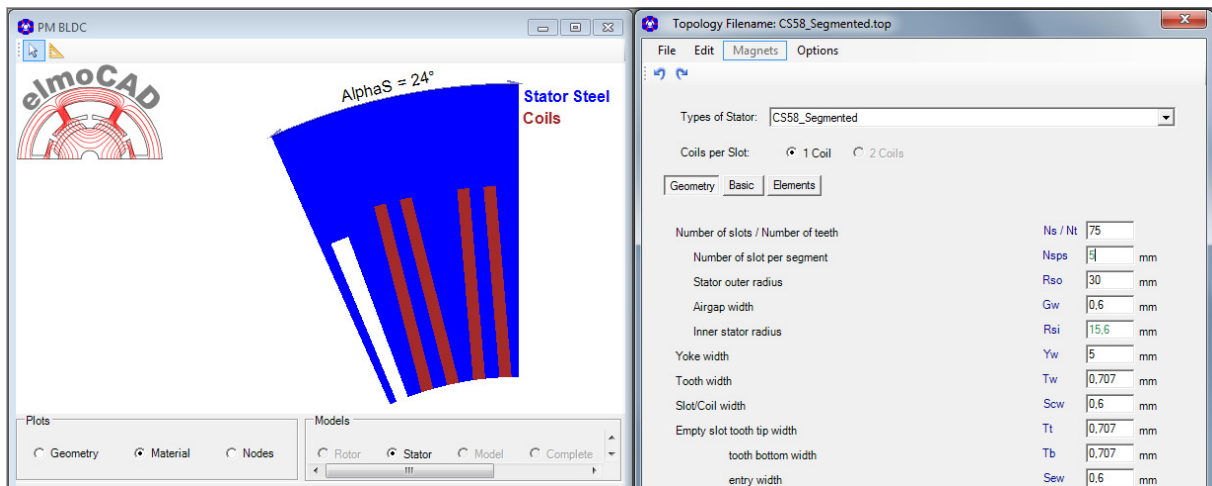
Magnetic Geared PM Machine (Siehe 2.11.1 Seite 46)

2.3.13 CS58_Segmented

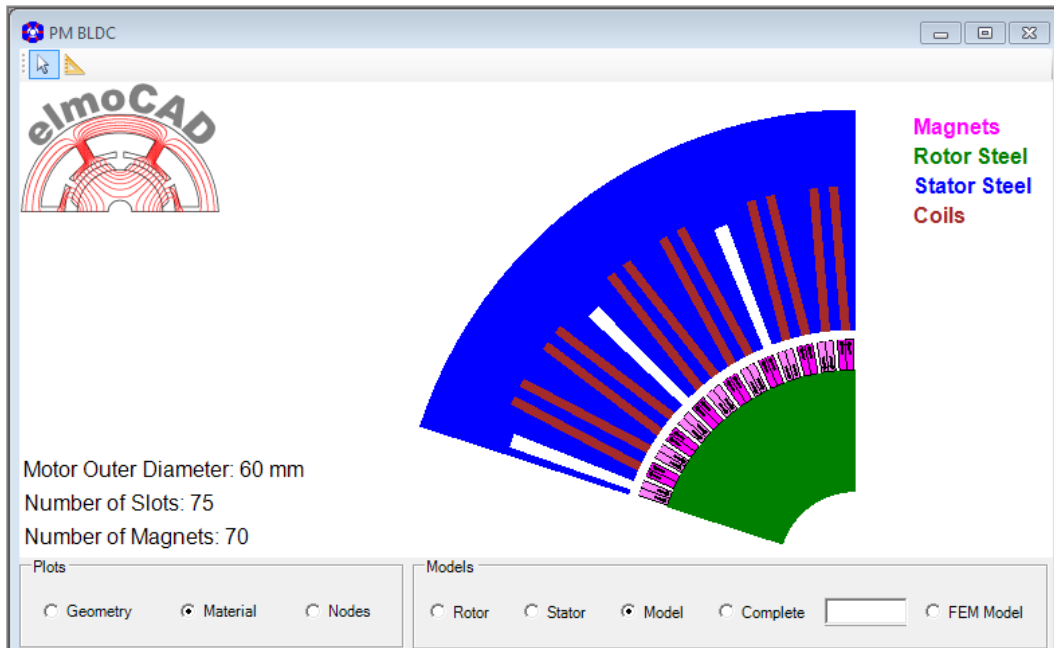
Hiermit können Statorsegmente mit mehreren geometrisch unterschiedlichen Statorpolen modelliert werden.

Beispiel:

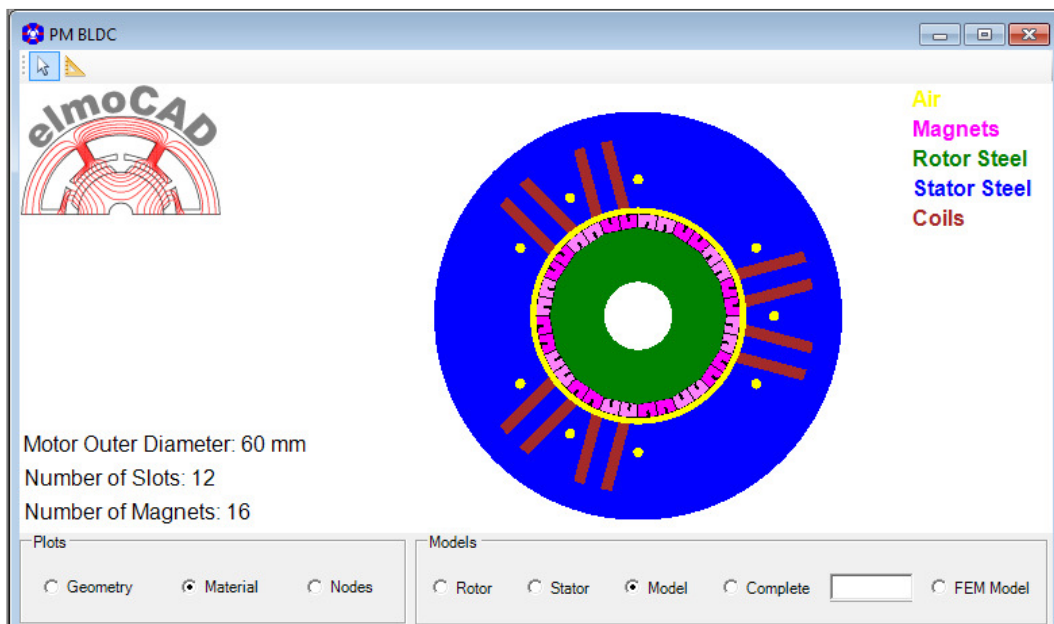
- 1 Segment mit je 5 Nuten (= 5 Statorpole) davon eine ohne Wicklung



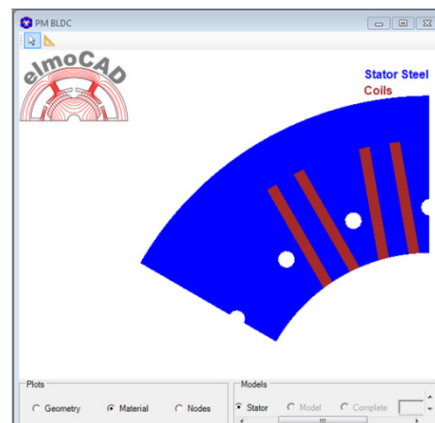
- bei 75 Statorpolen ergeben sich 15 Statorsegmente



2.3.14 CS59_Segmented

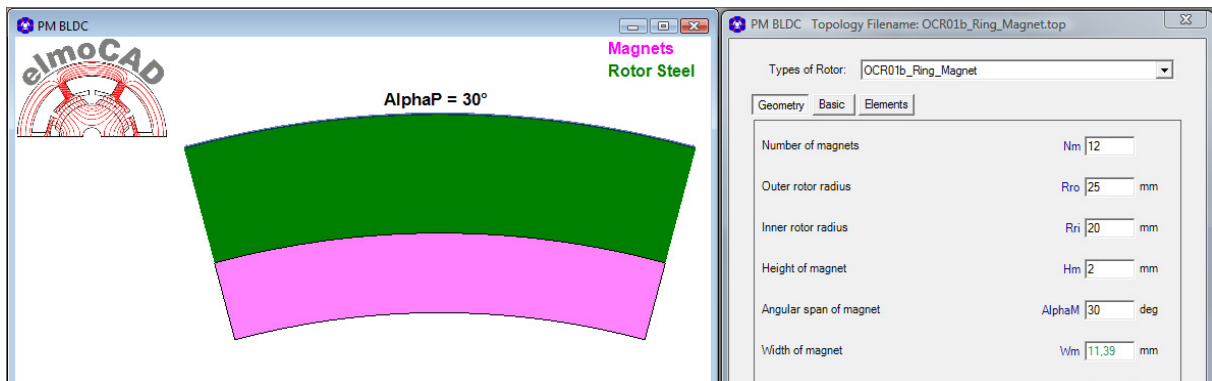


Wie 2.3.13 CS58_Segmented wobei das Segment nach links ohne Nuten vervollständigt wird.

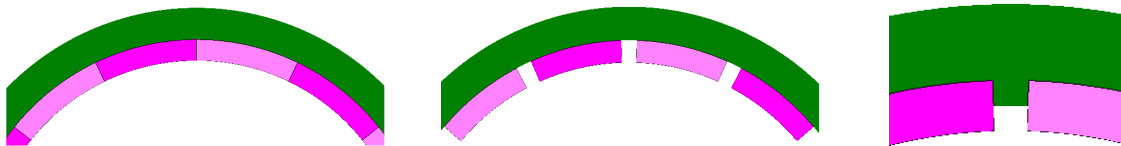


2.4 Außenläufer Rotor

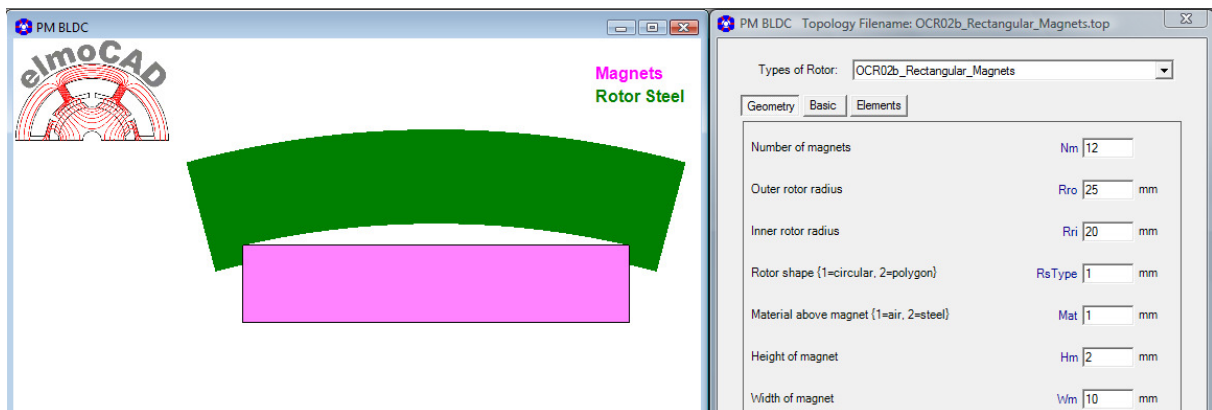
2.4.1 OCR01b_Ring_Magnet



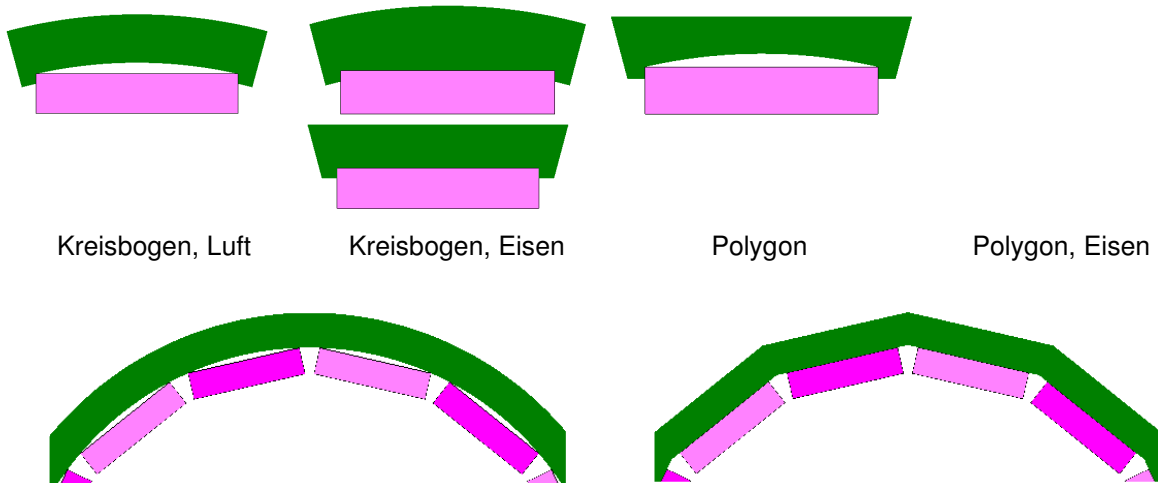
wählbare Eigenschaften: Magnetwinkel, Steg zwischen Magnete



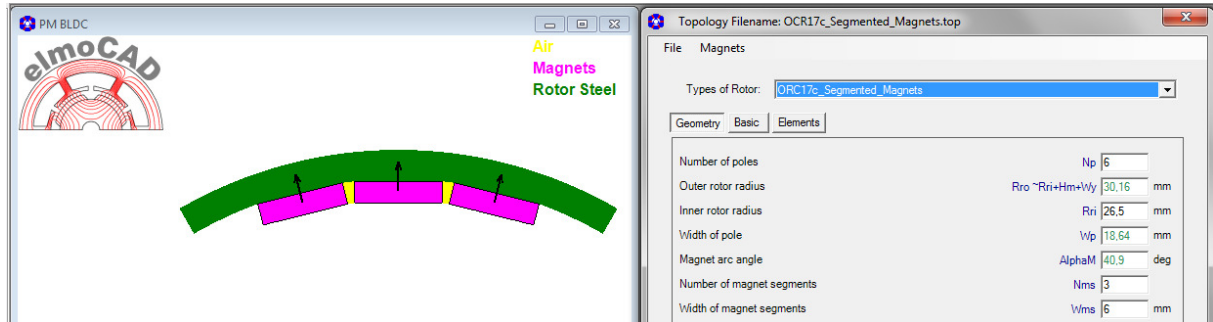
2.4.2 OCR02b_Rectangular_Magnets



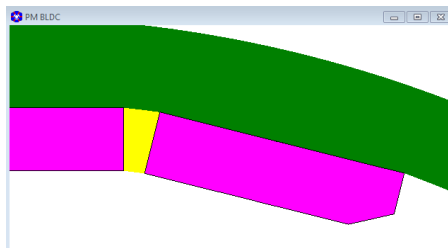
wählbare Eigenschaften: Rotor Oberfläche, Material oberhalb Magnet, Steg zwischen Magnete



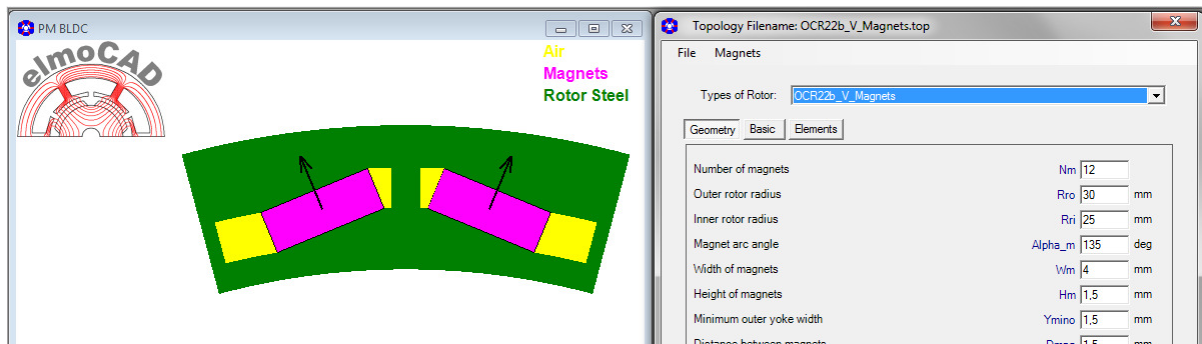
2.4.3 OCR17c_Segmented_Magnets



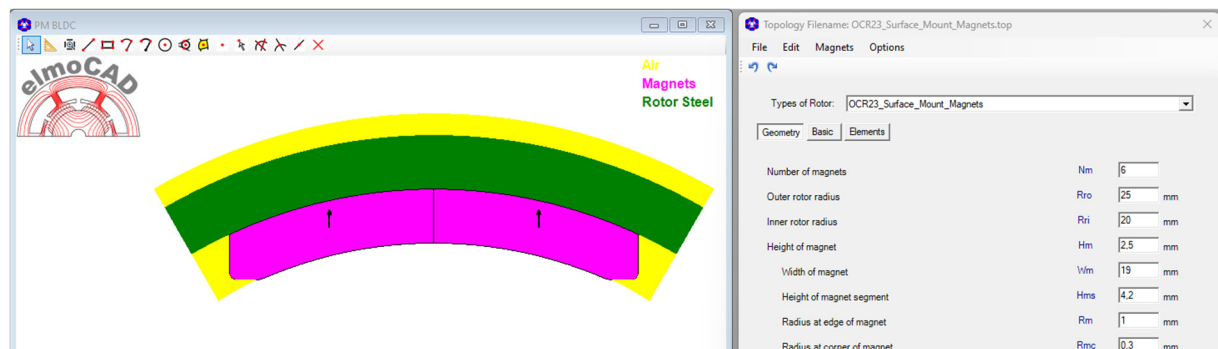
Mit abgeschrägten Magnetkanten rechts und links



2.4.4 OCR22b_V_Magnets

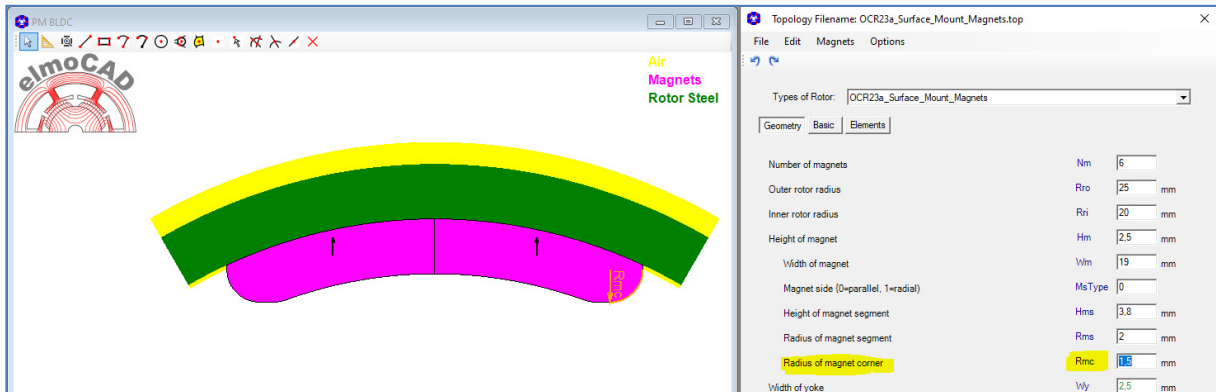


2.4.5 OCR23_Surface_Mount_Magnets

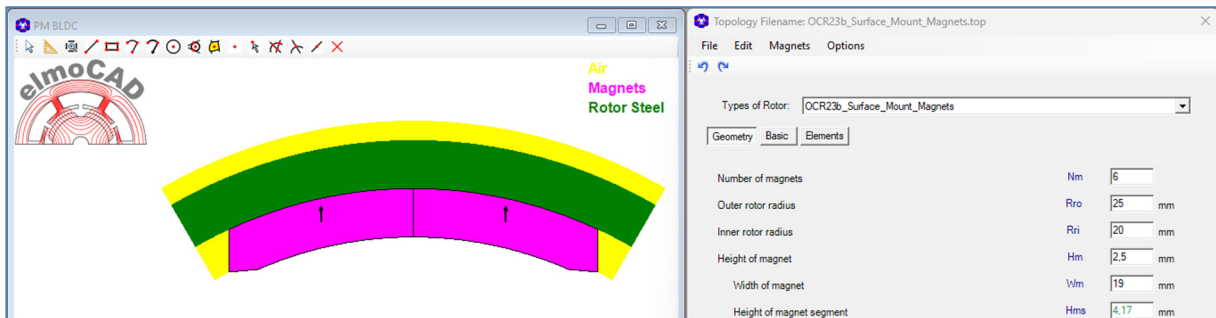


2.4.6 OCR23a_Surface_Mount_Magnets

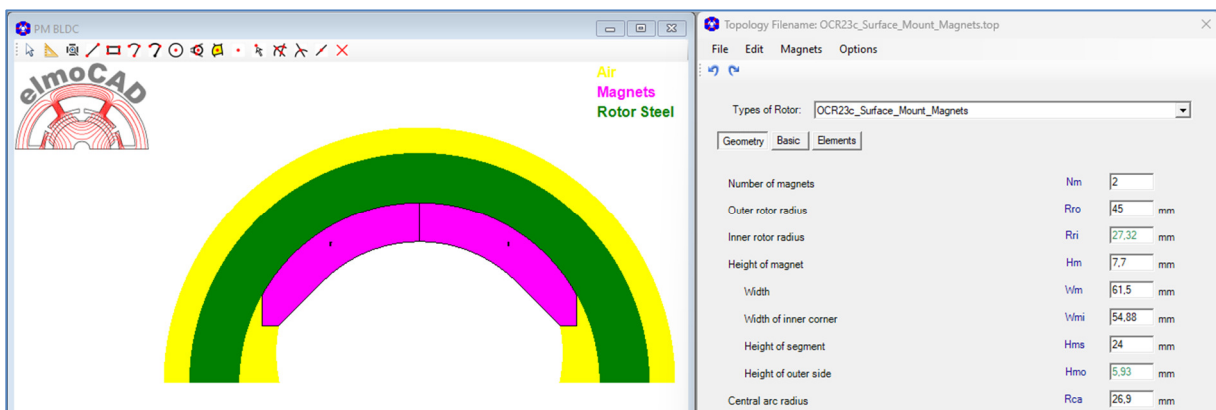
Diese Topologie wurde auf Basis der Topologie "OCR23_Surface_Mount_Magnets" mit dem neuen Parameter "Radius of Magnet Corner - Rmc" erstellt.



2.4.7 OCR23b_Surface_Mount_Magnets

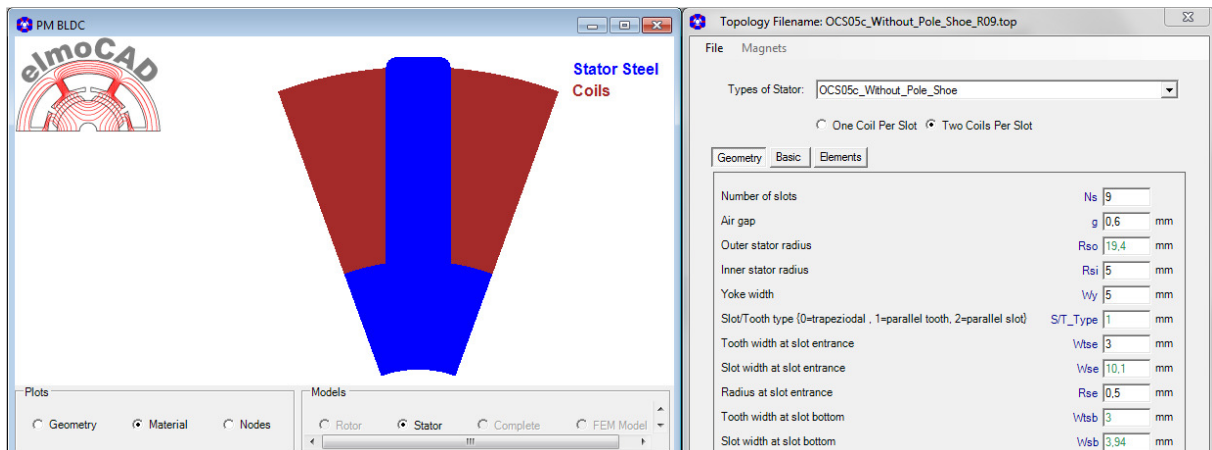


2.4.8 OCR23c_Surface_Mount_Magnets

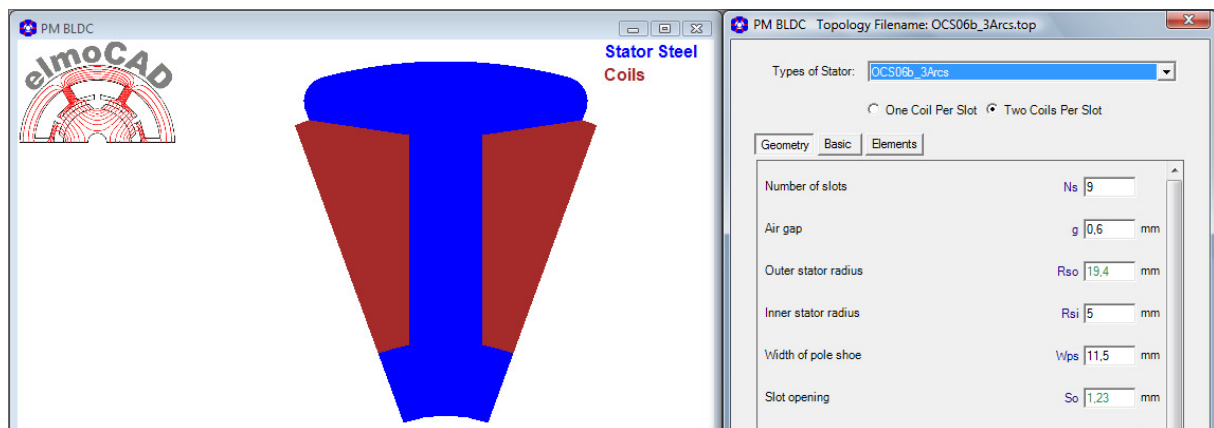


2.5 Außenläufer Stator

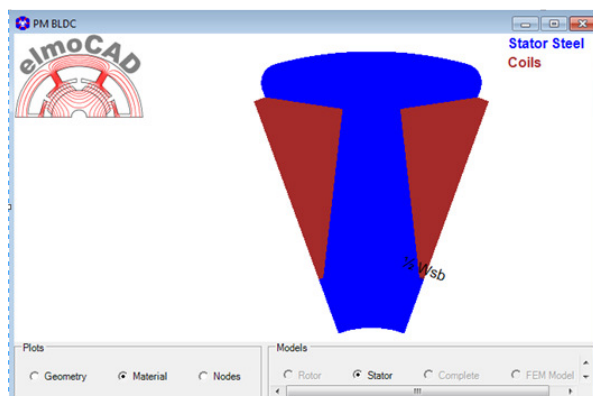
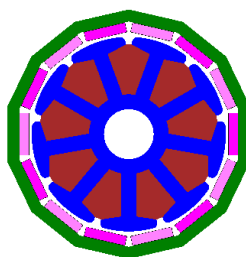
2.5.1 OCS05c_Without_Pole_Shoe



2.5.2 OCS06b_3Arcs und OCS06c_3Arcs

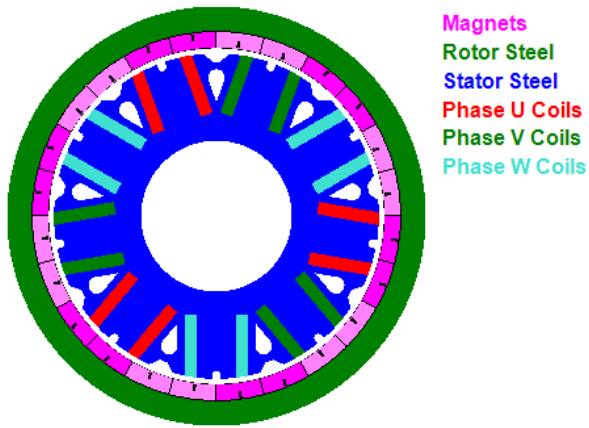
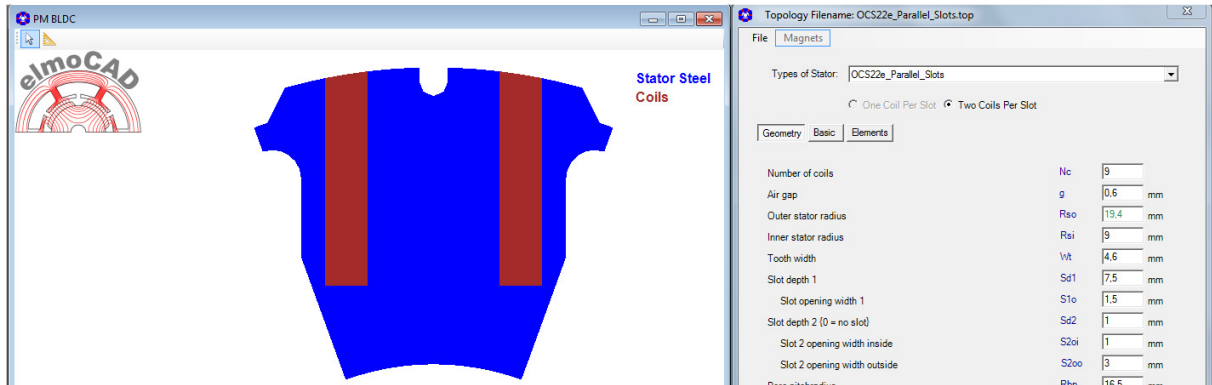


Darstellung einer Motorgeometrie

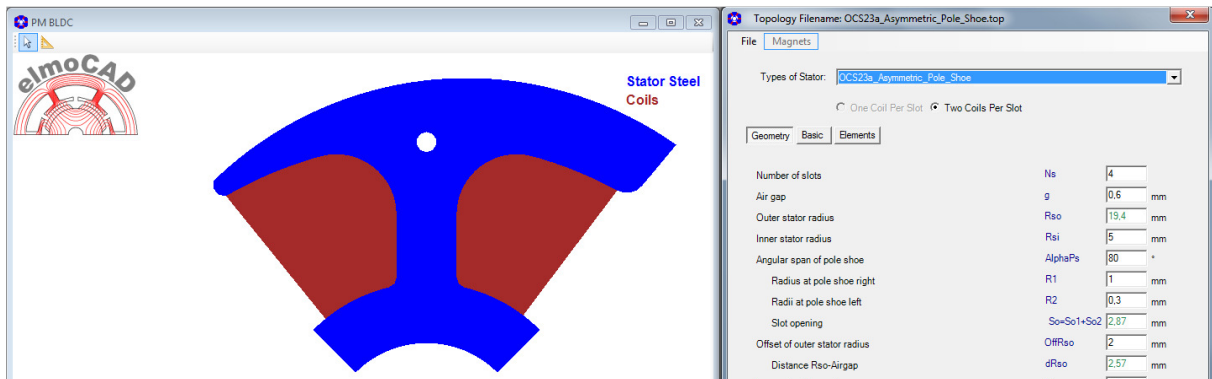


Wie OCS06b mit der Möglichkeit nicht parallele Zähne zu modellieren.

2.5.3 OCS22e_Parallel_Slots

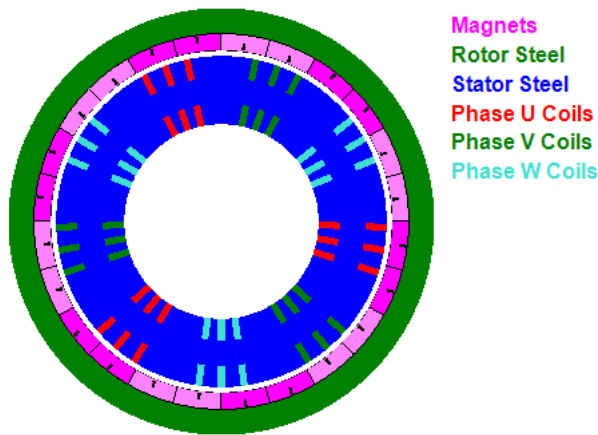
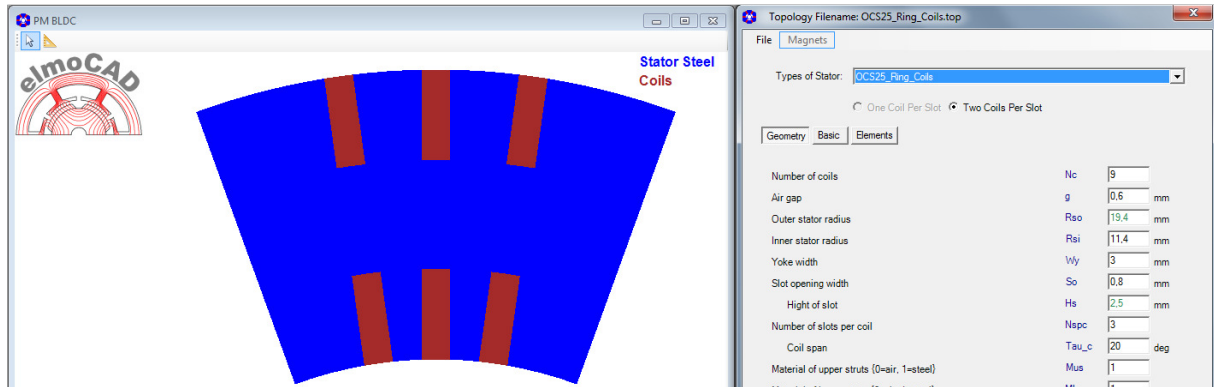


2.5.4 OCS23a_Asymmetric_Pole_Shoe



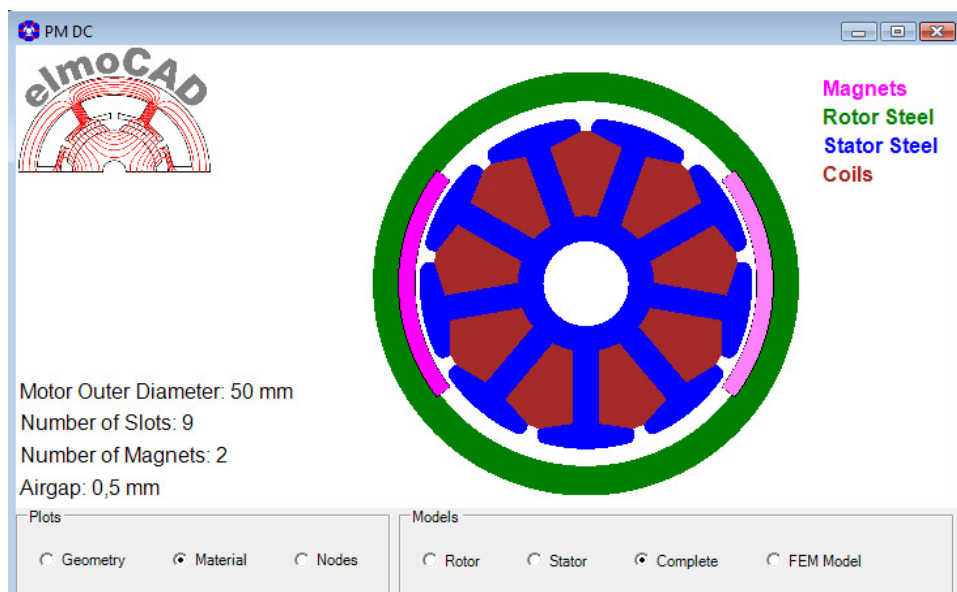
Zum Design von 1- bzw. 2-phasigen Motoren

2.5.5 OCS25_Ring_Coils



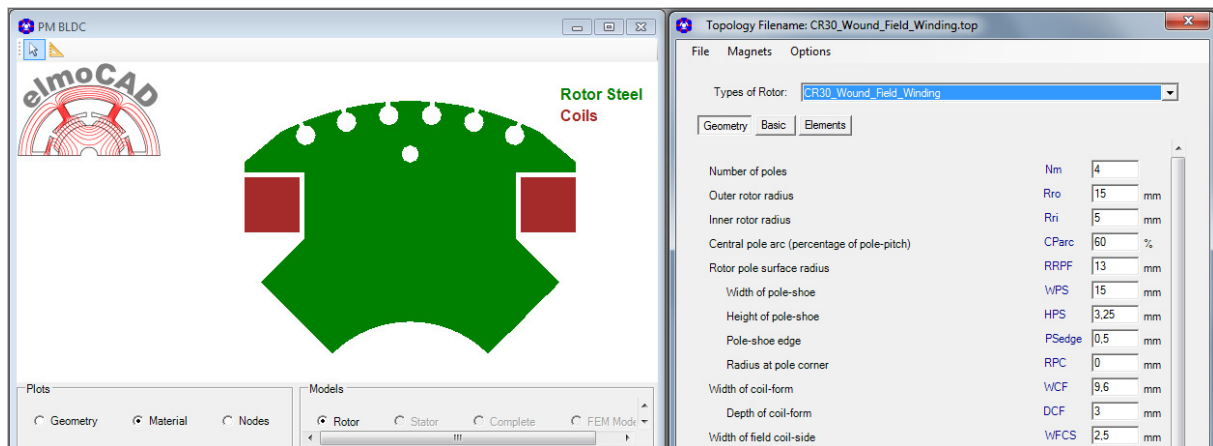
2.6 PM DC Motor

Die Topologien von Bürstenmotoren entsprechen denen der Außenläufermotoren.

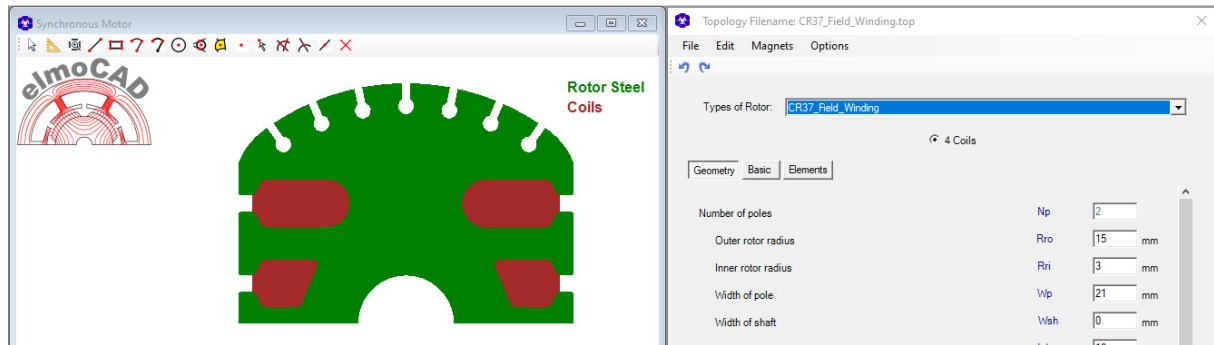


2.7 Synchronous Motor

2.7.1 CR30_Wound_Field_Winding



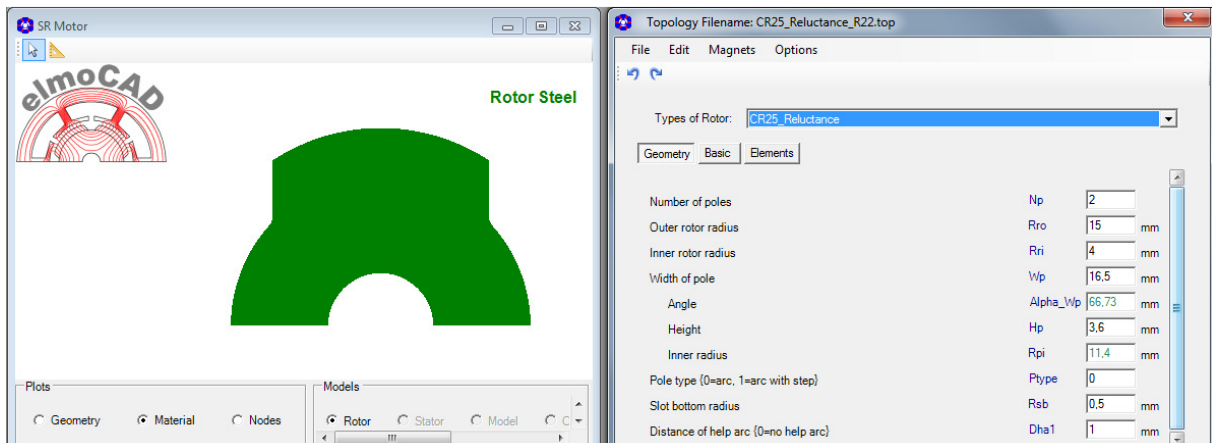
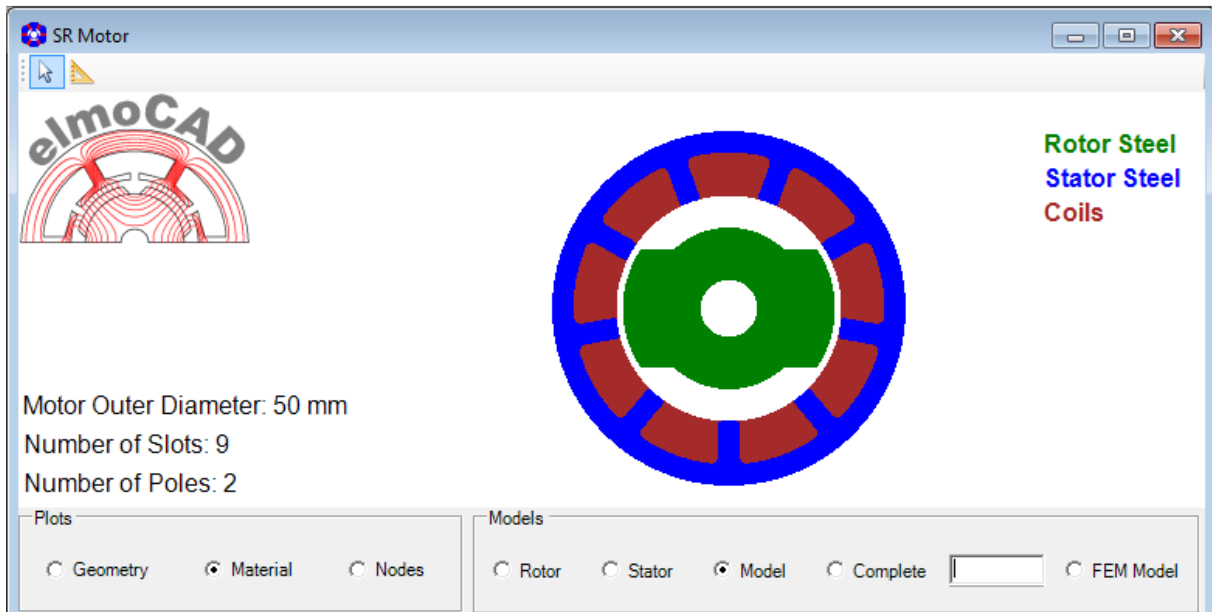
2.7.2 CR37_Field_Winding



2.8 SR Motor (Switched Reluctance Motor)

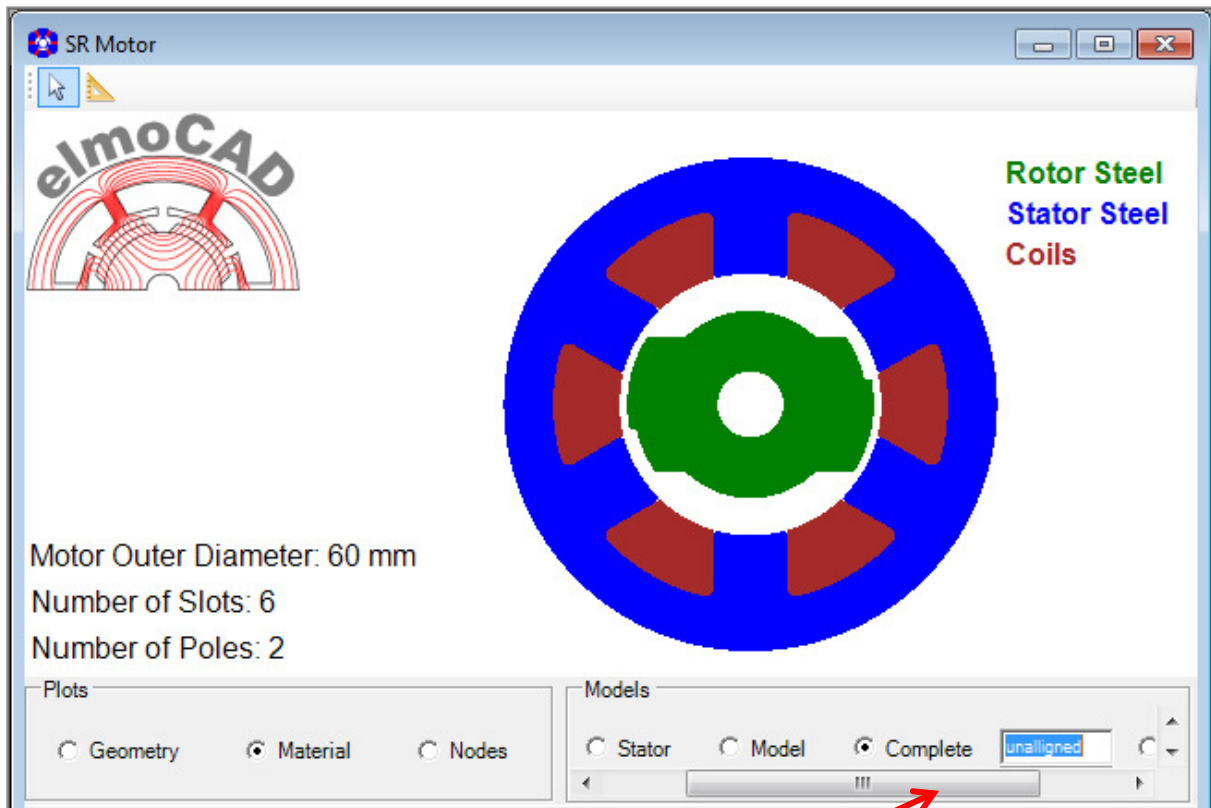
2.8.1 CR25_Reluctance

Mit dieser Topologie können 2-polige Reluctance Maschinen modelliert werden.

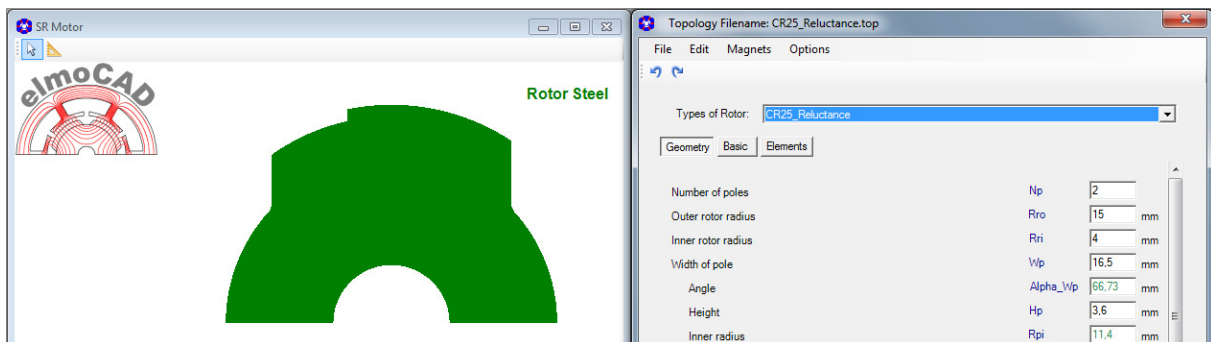


2.8.2 CR32_Reluctance_Stepped

Mit dieser Topologie können 2-polige Reluctance Maschinen modelliert werden, wobei der Rotor eine Stufe am Außenradius besitzt, die für eine definierte Anlaufrichtung des Motors sorgt.



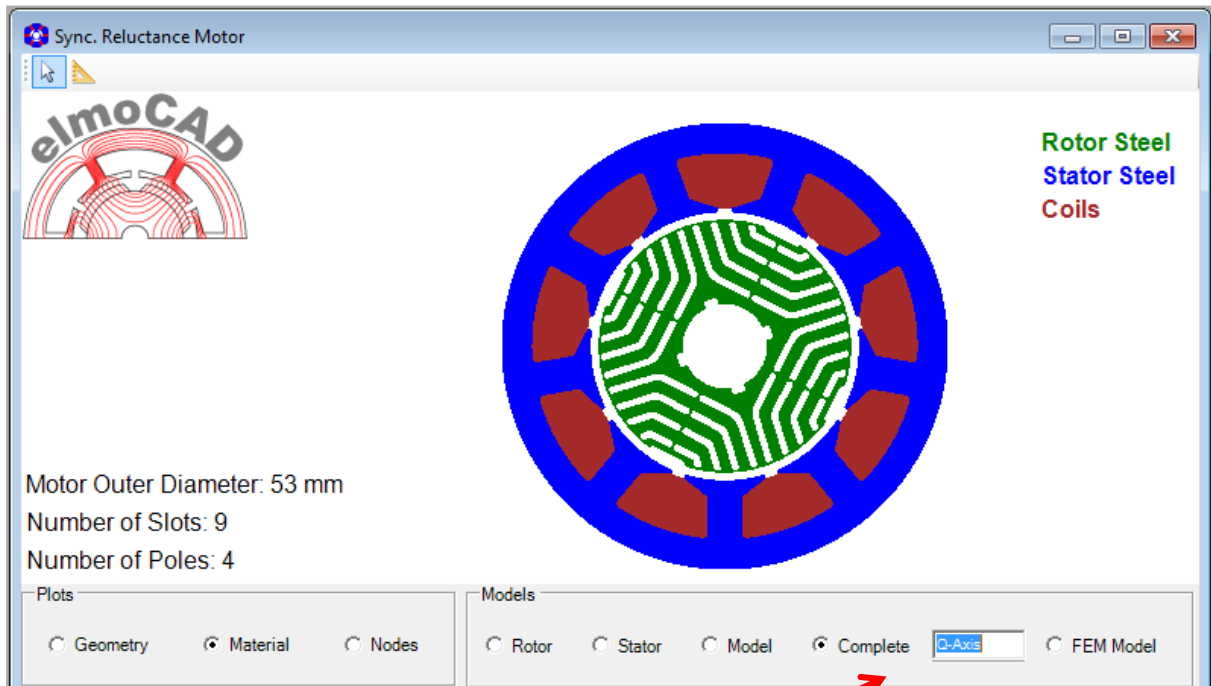
In der Darstellung „Complete“ kann der Rotor in die aligned-/unaligned-Achse oder beliebige andere Winkel gedreht werden.



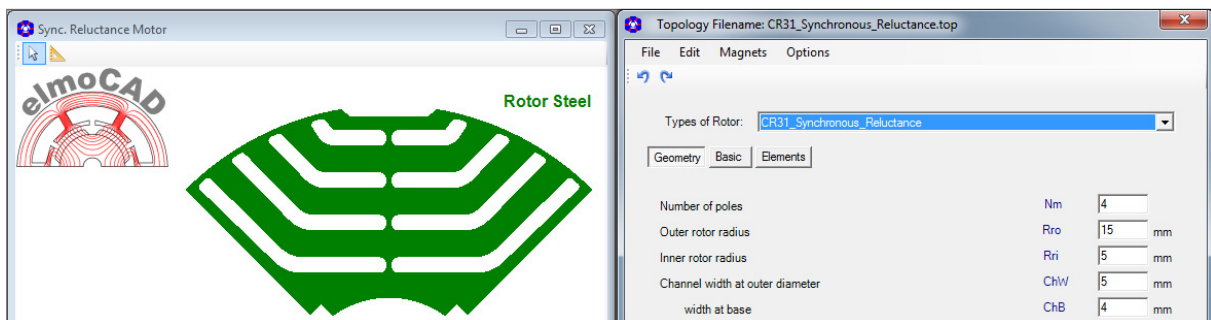
2.9 Sync. Reluctance Motor

2.9.1 CR31_Synchronous Reluctance

Mit dieser Topologie können 4-polige Synchronous Reluctance Maschinen mit 1 – 4 Flussbarrieren modelliert werden.

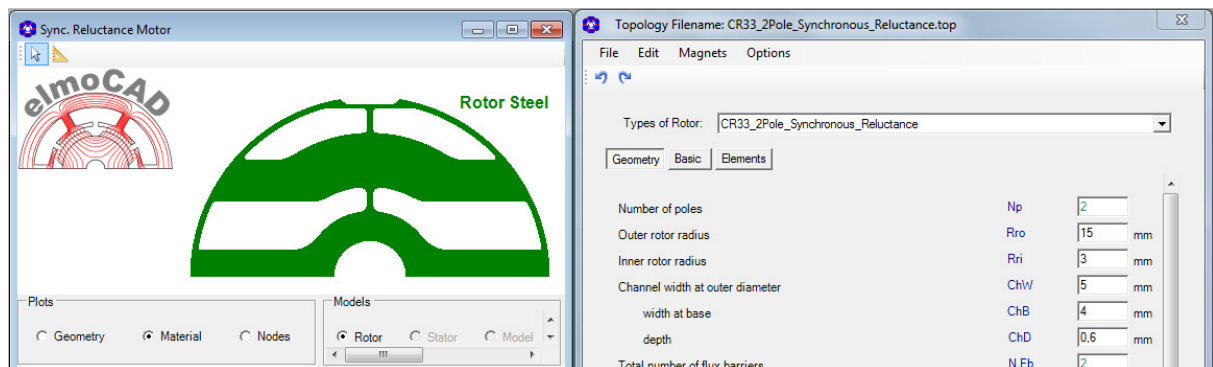


In der Darstellung „Complete“ kann der Rotor in die D-/Q-Achse oder beliebige andere Winkel gedreht werden.

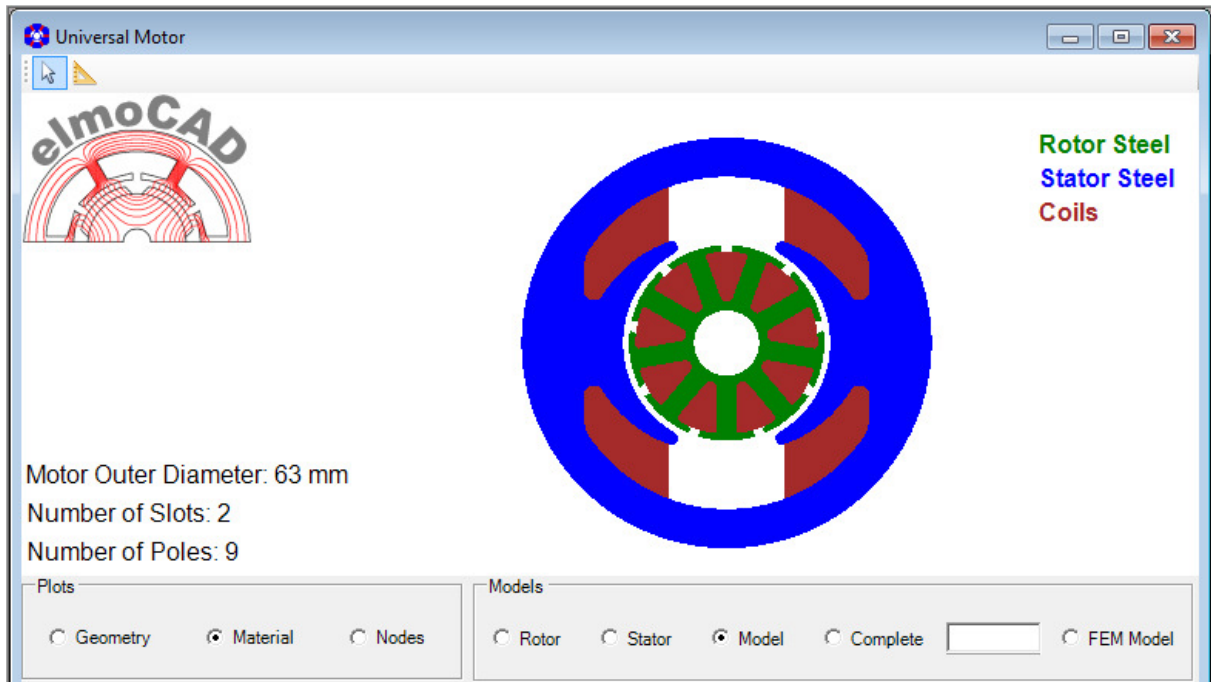


2.9.2 CR33_2Pole_Synchronous Reluctance

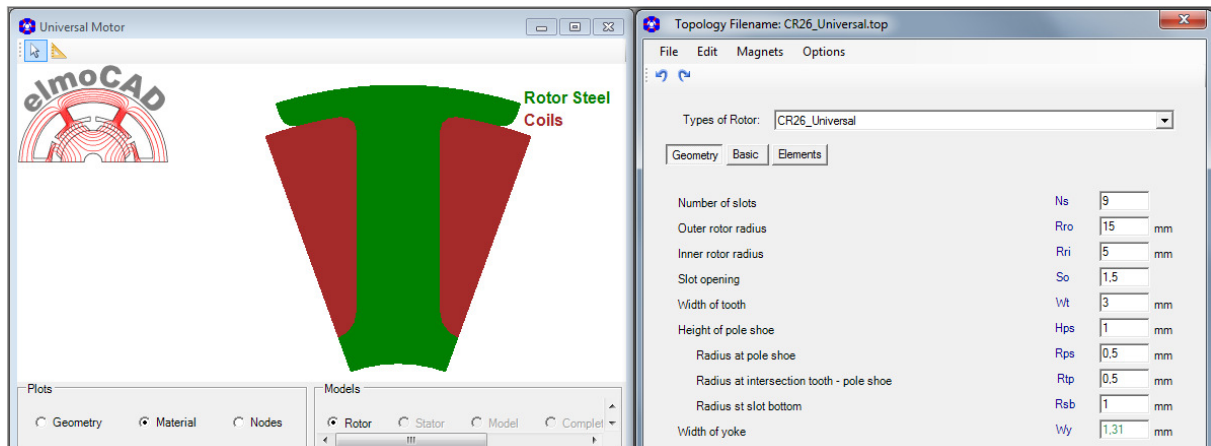
Mit dieser Topologie können 2-polige Synchronous Reluctance Maschinen mit 2 Flussbarrieren modelliert werden.



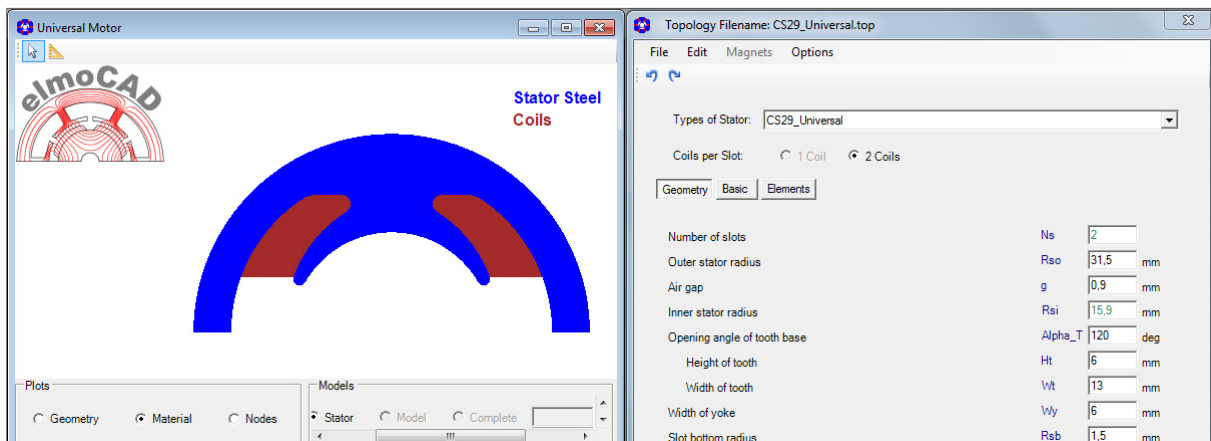
2.10 Universal Motor



2.10.1 CR26_Universal



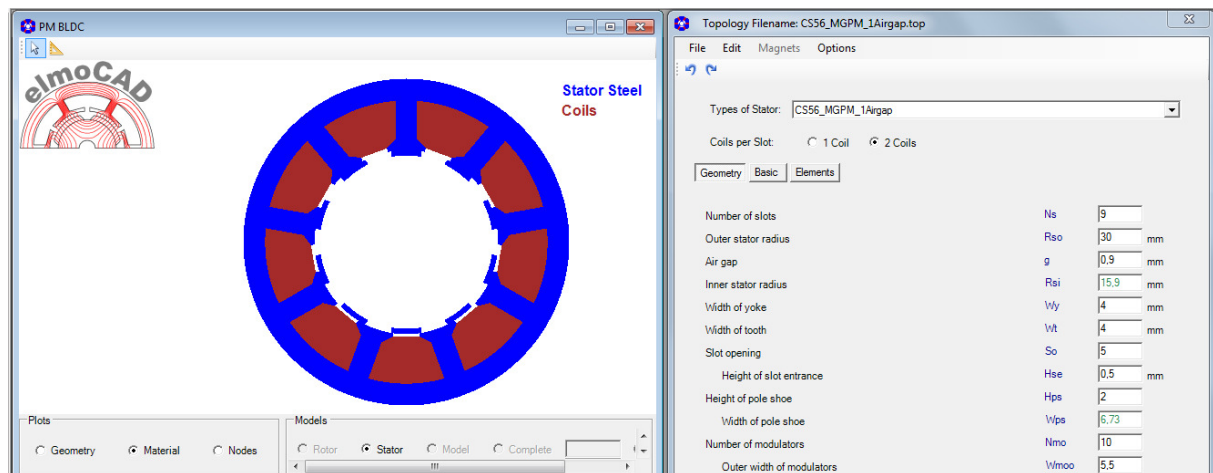
2.10.2 CS29_Universal



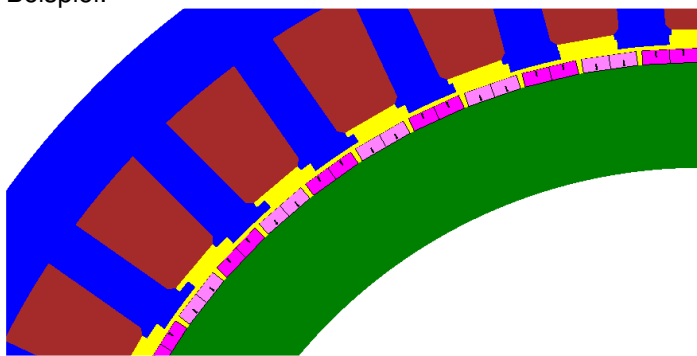
2.11 PM- Maschinen mit magnetischem Getriebe

2.11.1 CS56_MGPM_1Airgap

Mit dieser Topologie können Magnetic Geared Permanent Magnet Maschinen mit einem Luftspalt modelliert werden. Literaturhinweis: "Comparison and Analysis of Magnetic-Geared Permanent Magnet Electrical Machine at No-Load" Xiping Liu, Dong Chen, Liang Yi, Chao Zhang, Min Wang (DOI 10.2478/ae-2014-0047)

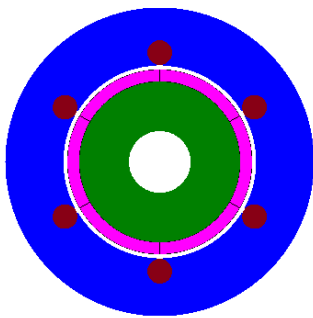
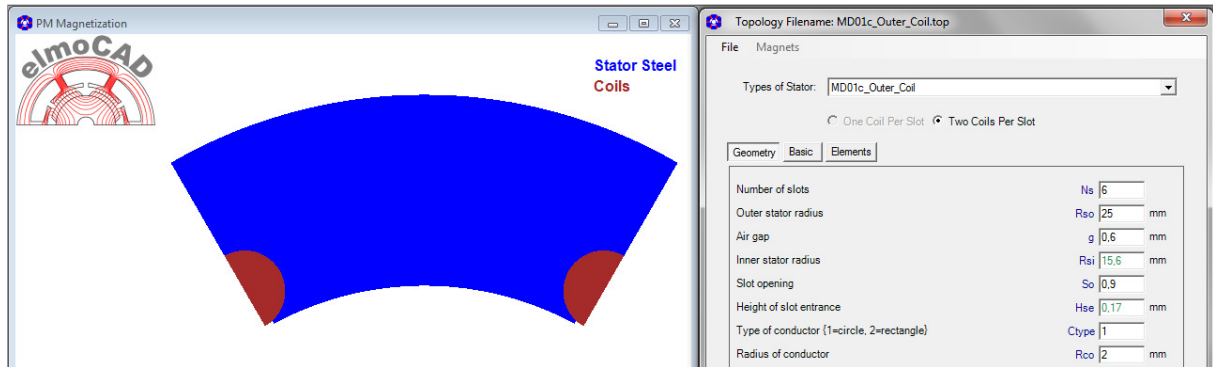


Beispiel:



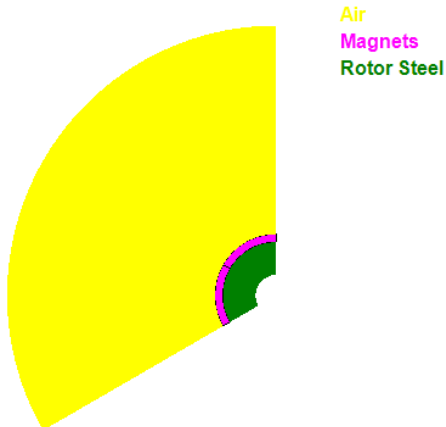
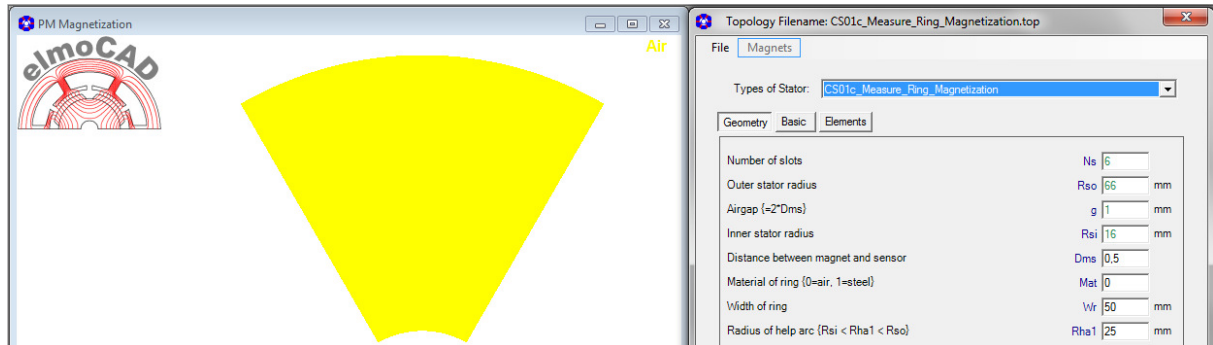
2.12 Magnetisierung von Innenläufer Rotoren

2.12.1 MD01d_Outer_Coil (Magnetisierspule)



Darstellung der Magnetisierspule mit Ringmagnet

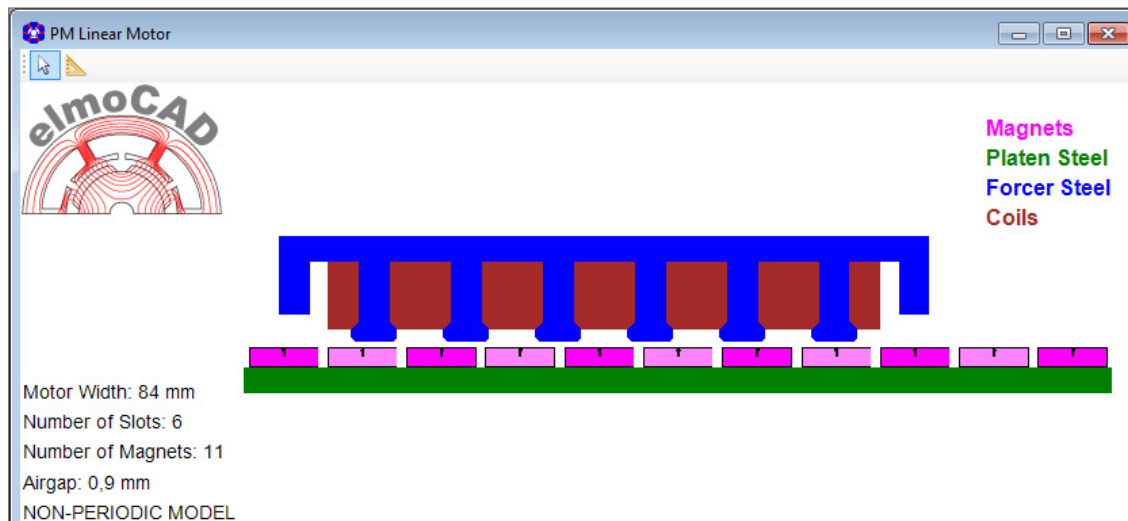
2.12.2 CS01c_Measure_Ring_Magnetization



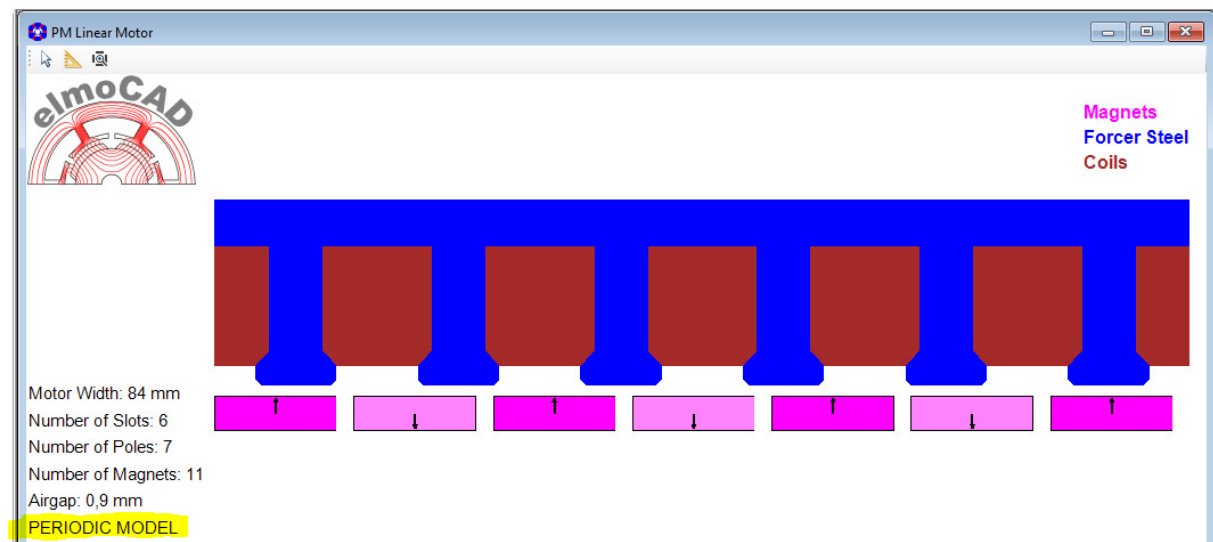
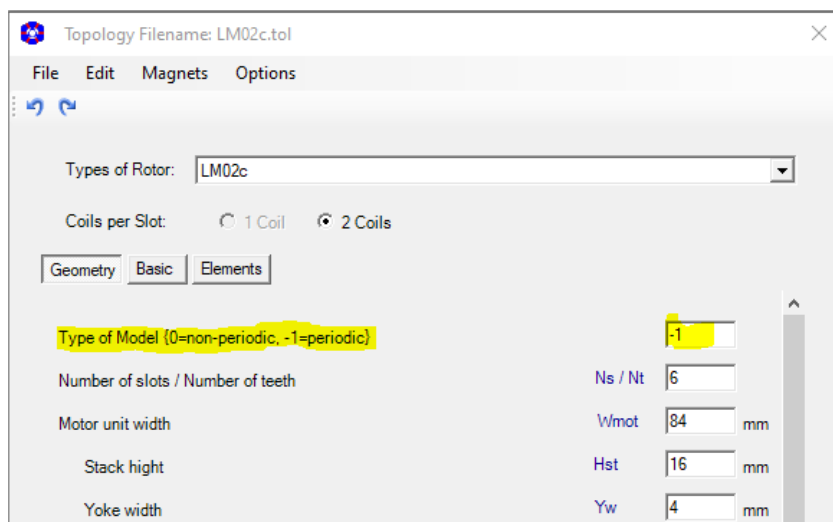
Um die Induktion des magnetisierten Magneten berechnen zu können, wird ein „Stator“ als Ring aus Luft modelliert und die Induktion im Luftspalt zwischen Rotor und „Stator“ ermittelt.

3.1 Linearmotor

3.1.1 LM02c

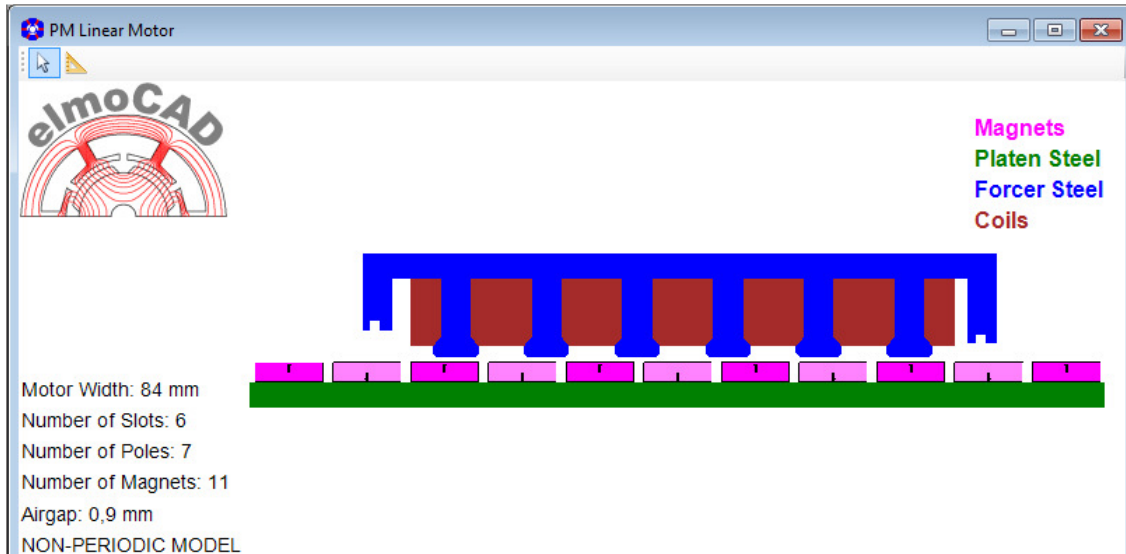


Mit dem Parameter „Type of Model (0=non-periodic, -1=periodic)“ kann zwischen der nicht-periodischen und periodischen Geometrie gewählt werden. Diese Funktion steht in verschiedenen Linearmotor-Topologien zur Verfügung. Verluste können nur bei periodischen Linearmotor-Modellen näherungsweise berechnet werden.

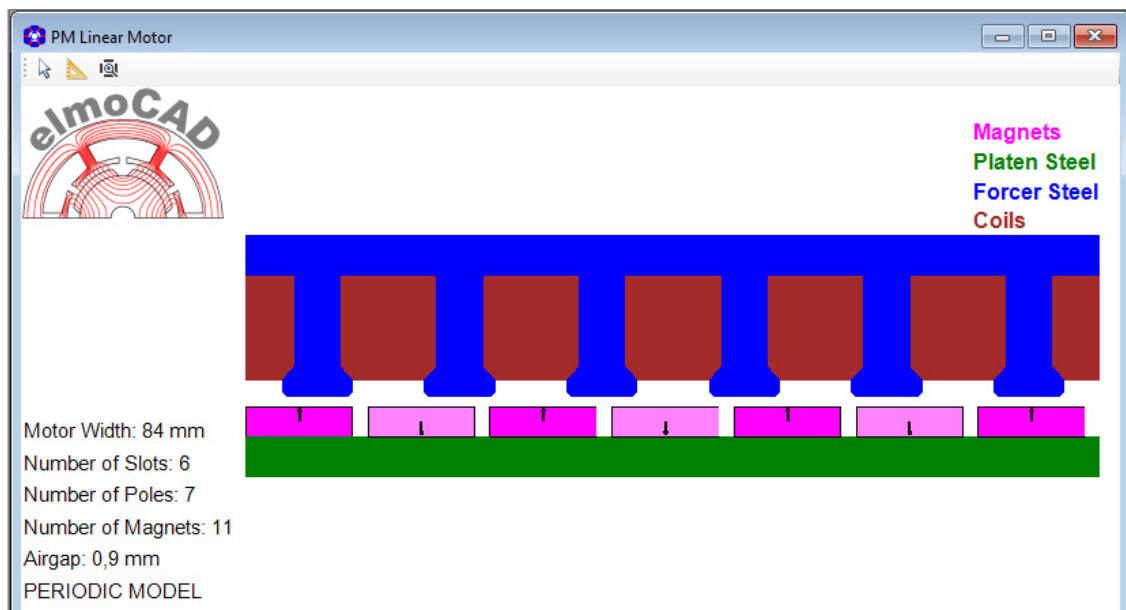


3.1.2 LM021c

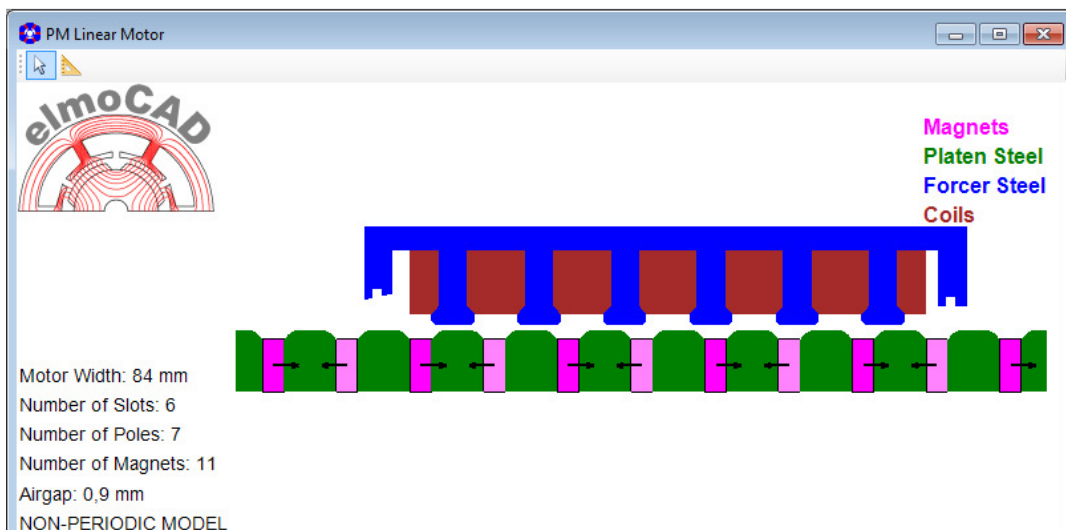
Ersetzt die Topologie LM02c mit zusätzlichen Erweiterungen



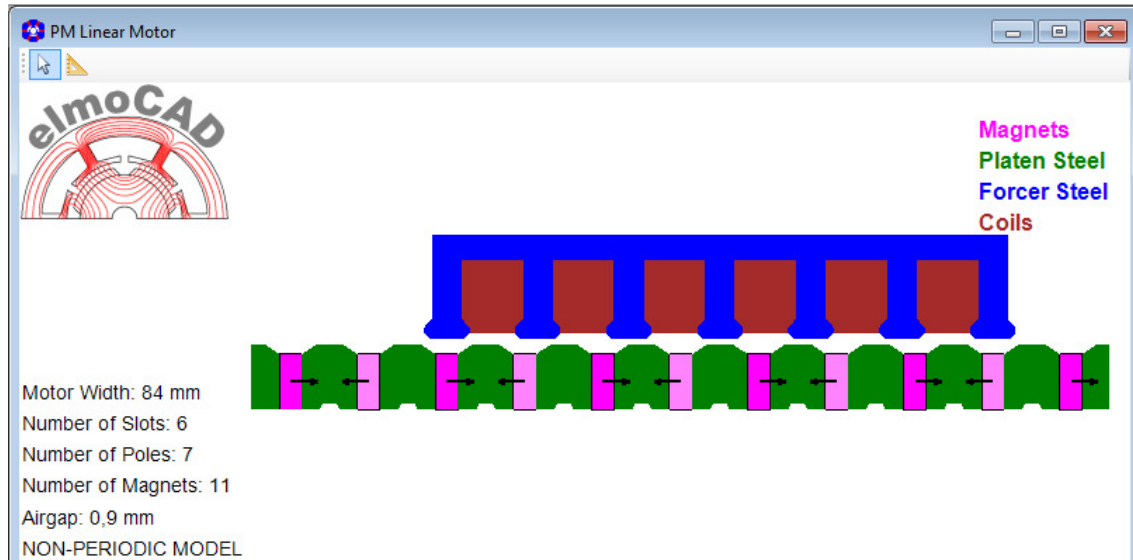
LM021 als periodisches Modell für die Berechnung von Verlusten



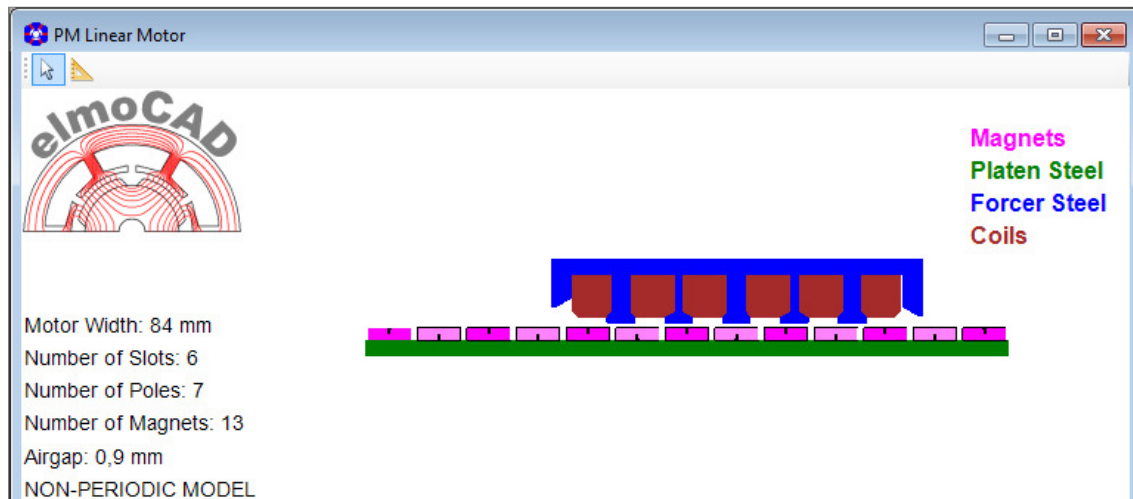
3.1.3 LM03c



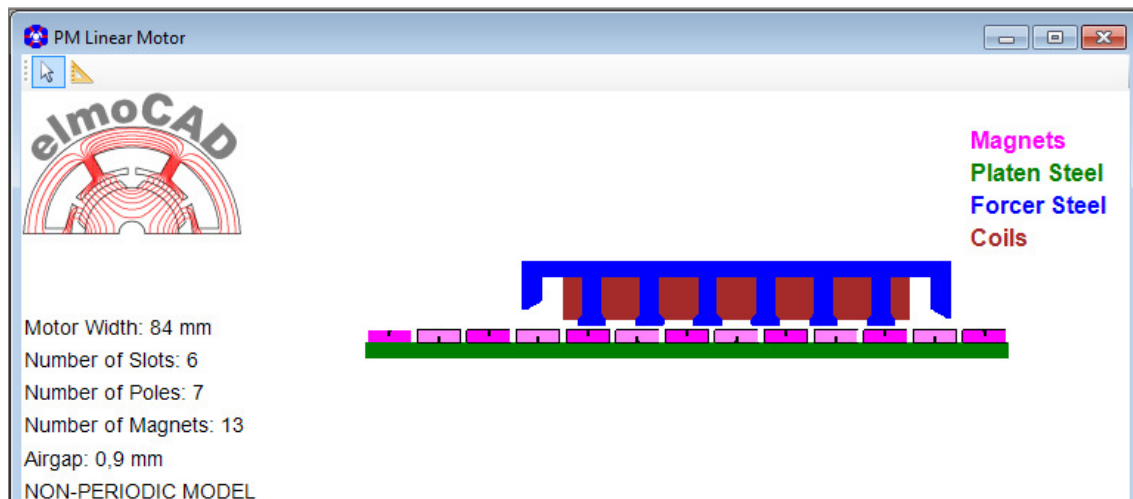
3.1.4 LM04



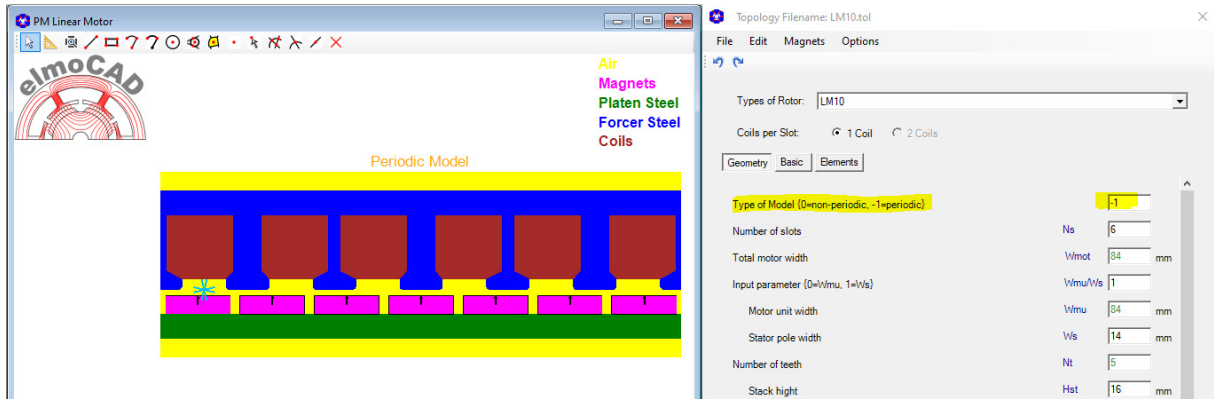
3.1.5 LM10



Mit Einschichtwicklung und optional unterschiedlichen Zahnbreiten zwischen den Phasen



Mit Zweischichtwicklung und gleichen Zahnbreiten.

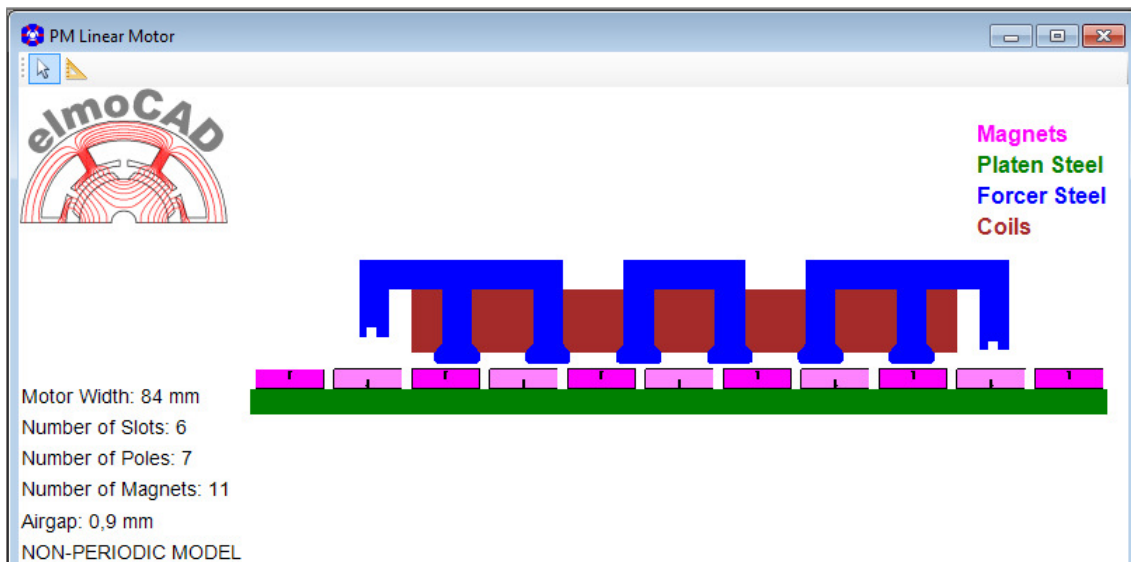


Mit unterschiedlich breiten Zähnen als "periodische" Geometrie dargestellt. Damit ist u.a. auch die Berechnung von Eisen- und Magnetverlusten möglich.

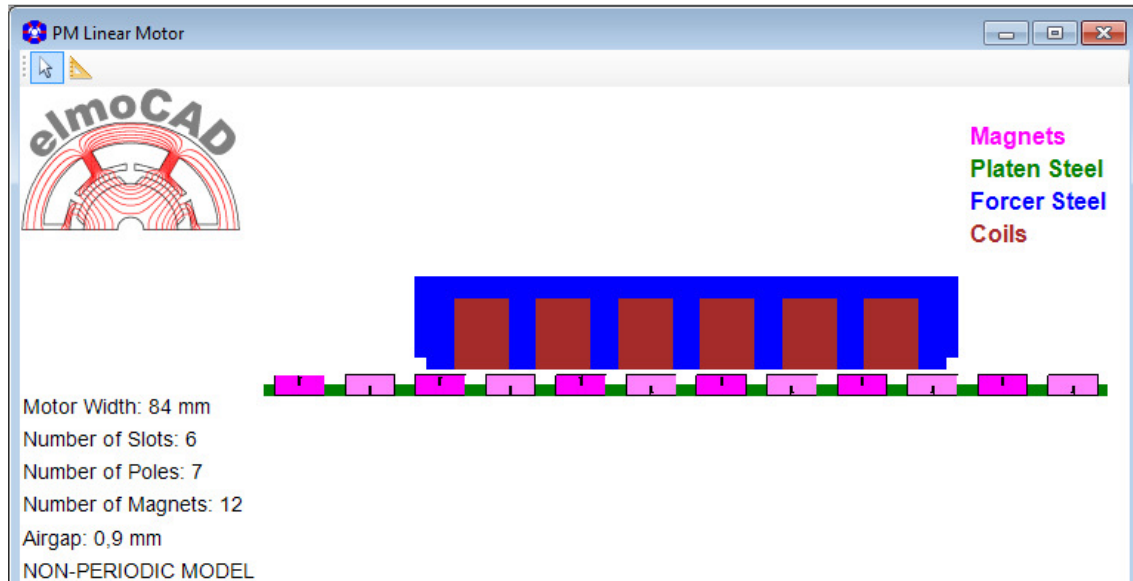
3.1.6 LM11



3.1.7 LM422

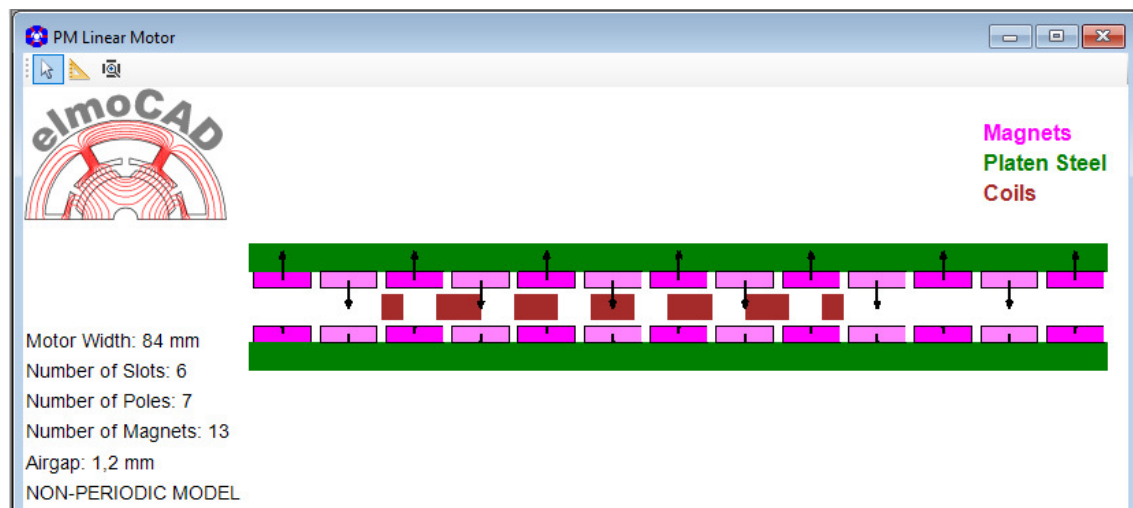


3.1.8 LM544



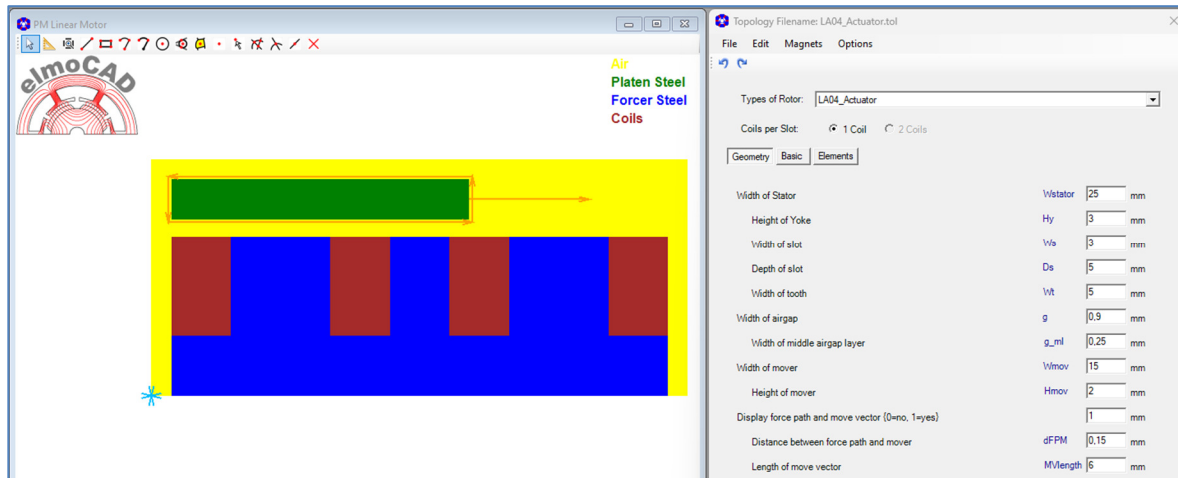
3.1.9 LM60_Double_Airgap

Mit eisenlosem Stator und Zweischichtwicklung



4 Aktuator

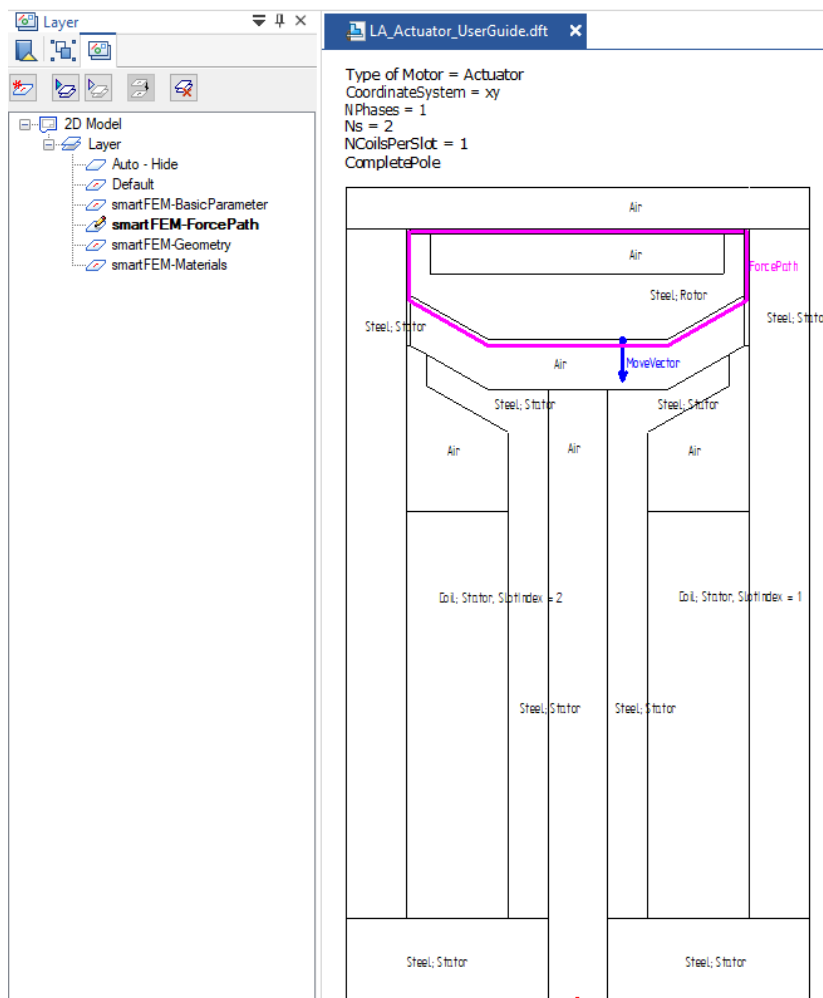
4.1 LA04



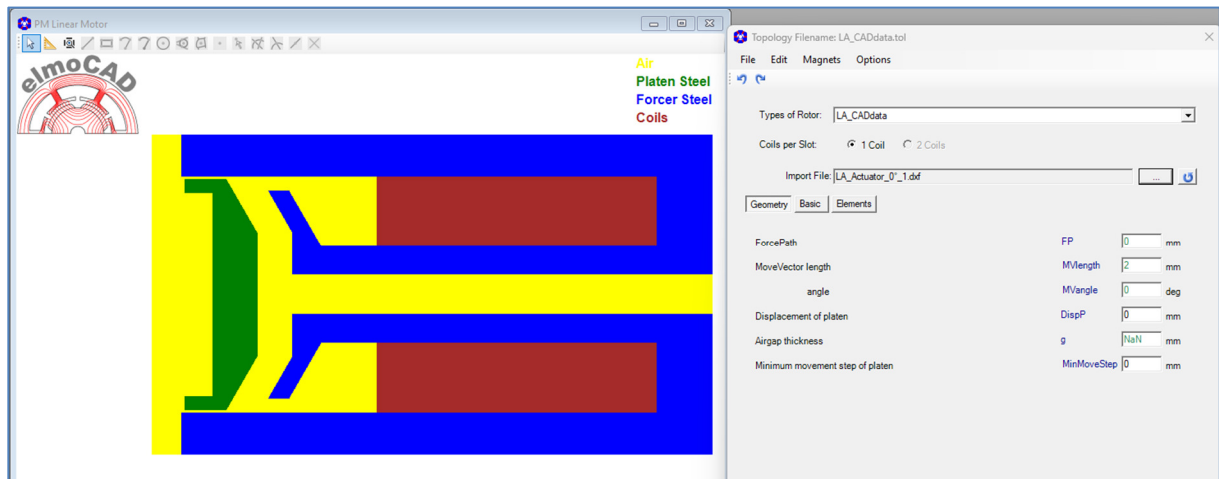
4.2 LA_CADdata

Aktuatoren besitzen im Allgemeine sehr kundenspezifische Geometrien. Über die Topologie „**LA_CADdata**“ können die mit CAD-Programmen erstellten Geometrien von Aktuatoren mit DXF-Import in smartFEM dargestellt und simuliert werden.

Beispiel:



Darstellung in smartFEM nach DXF-Import



Die importierte Geometrie wird in smartFEM so gedreht, dass die Bewegungsrichtung horizontal in x-Achse liegt, um die horizontalen und vertikalen Kräfte berechnen zu können.

5 Notizen