

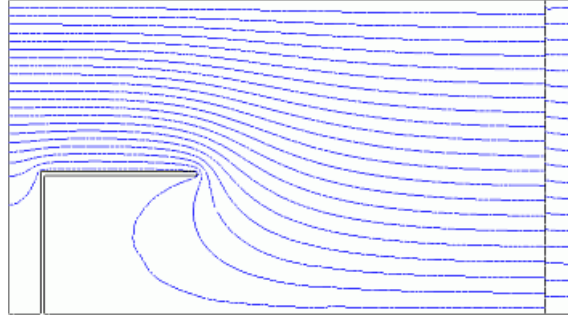
Software: FEM - Tutorial - Elektrofluss

Aus OptiYummy



← →

4. Komplex im FEM-Tutorial Elektrisches Flussfeld Autor: Dr.-Ing. Alfred Kamusella



*Jeder Fehler erscheint unglaublich dumm,
wenn andere ihn begehen.
- Georg Christoph Lichtenberg -*

1. Übungsbeispiel

- Dickschicht-Widerstand (Lasertrimmen)

2. Der ungetrimmte Widerstand

- Dimensionierung des ungetrimmten Widerstands
- Berechnung des L-Schnitts
- Simulationen zur Modell-Validierung:
 - FEMM - Current Flow Problem
 - FEMM - LUA-Script
 - Elektrisches Flussfeld in *Autodesk Fusion*
 - Elektrisches Flussfeld in *Z88Aurora* ← *nur zur Information!*

3. Lasertrimmen

- Simulation des Trimmens:
 - Manuelle Fein-Dimensionierung mit *Autodesk Fusion*
 - Manuelle Fein-Dimensionierung mit *Z88Aurora* ← *nur zur Information!*
 - FEMM-Script: Schnitt-Ergänzung
- Lösungssuche mit num. Optimierung
 - OptiY-Workflow mit Modell
 - Modell-Interface: Input-/Output-Files
 - Experiment-Konfiguration
 - Experiment-Durchführung

Einzusendende Ergebnisse:

- Teilnehmer der Lehrveranstaltung "**Praktische Einführung in die FEM**" laden ihre Ergebnisse bei Opal hoch.
- Die beiden in *Fusion 360* erstellten Konstruktionen sind mittels **Datei > Exportieren > (Typ=*.f3d auf dem eigenen Computer)** als Fusion-Archivdatei zu speichern: **R_ungetrimmt_xx.f3d** und **R_getrimmt_xx.f3d**.
- Die Ergebnisse für die individuell ermittelten Längen **b_k** und **L_s** des Trimm-Schnittes sind vergleichend in der bereitgestellten PDF-Datei zu notieren. Eventuelle Abweichungen zwischen den

Ergebnissen der beiden Modelle sind zu diskutieren.

- Für den Upload mit (**xx**=Teilnehmer-Nummer 01...99) ist **ein** Archiv-File **FEM4_xx** (als .zip) mit allen erforderlichen **FEMM-Dateien**, **LUA-Scripten**, **OptiY-Dateien**, den **Fusion-Konstruktionen** und der **Antwort-PDF** zu senden.
- Einsendeschluss ist die Nacht vor dem nächsten Übungskomplex. Die Nacht endet um 10:00 Uhr.

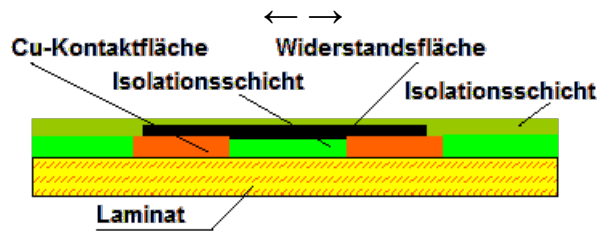
← →

Abgerufen von „https://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrofluss&oldid=25735“

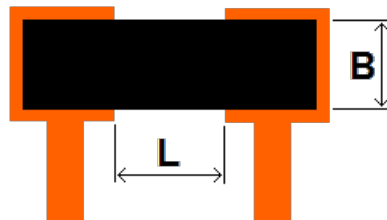
■

Software: FEMM - Stromfluss

Aus OptiYummy

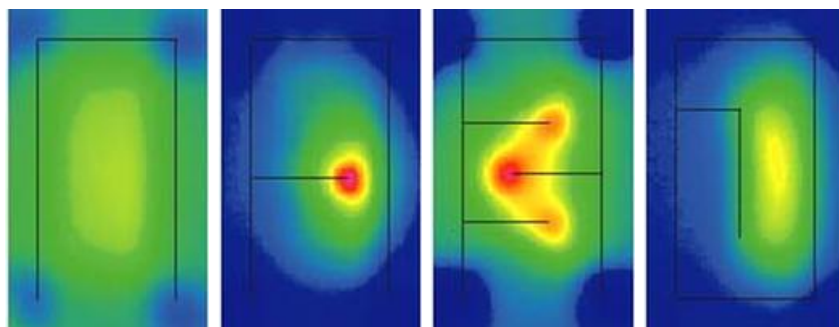


Mittels Siebdruck können elektrische Widerstände als Dickschichtwiderstände direkt auf Verdrahtungsträger gedruckt werden. Eine mögliche Variante zeigt obiges Bild. Die wirksame Widerstandsfläche wird durch die Länge (L) und die Breite (B) bestimmt. Die Widerstandspasten werden durch entsprechende Mischungsvorgaben auf den erforderlichen Widerstandswert eingestellt:



Der Druck auf die Kontaktflächen erfolgt als Rechteck. Ohne Abgleich ist dabei eine Genauigkeit des Widerstandswertes von ungefähr $\pm 30\%$ erreichbar. Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, ist das Lasertrimmen üblich. Dabei erfolgt eine definierte Verengung des Flussweges für den elektrischen Strom in einem Teilbereich, was zu einer Erhöhung des Widerstandswertes führt.

Wie z.B. in einer Veröffentlichung im Jahresforschungsbericht 2001 des Fraunhofer Instituts für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe (**IKTS**) mittels Infrarot-Aufnahmen gezeigt wird, führen einige Schnittformen dabei jedoch zu starken lokalen Erwärmungen der Widerstandsfläche ("senkrechter" Stromfluss):



Im Vergleich zum ungetrimmten Widerstand (1. Bild) verhält sich thermisch am günstigsten der L-Schnitt (4. Bild), der deshalb hier als Beispiel benutzt wird.

Man kann analytisch die Größe des erforderlichen Schnittes nur grob berechnen. Da das elektrische Feld sich auf Grund der Einschnitte in der Widerstandsschicht inhomogen ausbreitet, kann nur eine FEM-Berechnung genauere Ergebnisse liefern. Für die Ermittlung der erforderlichen Schnittgeometrie soll die Nennwert-Optimierung genutzt werden.

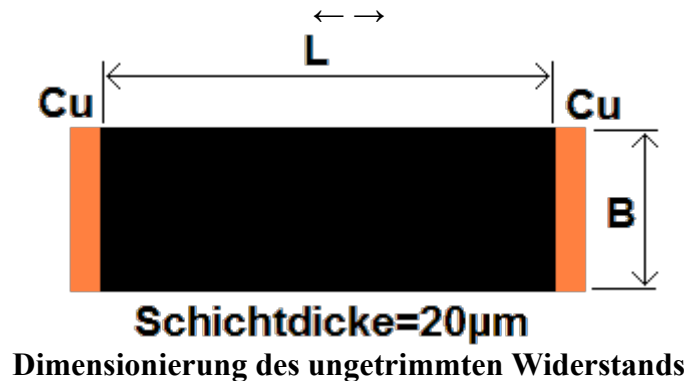
Abgerufen von „https://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Stromfluss&oldid=25730“

■

Software: FEMM - Stromfluss - Flächenwiderstand

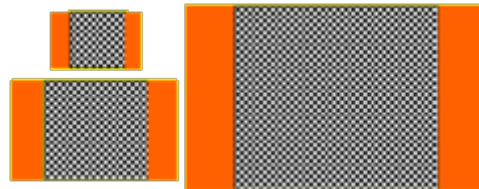
Aus OptiYummy

↑



Der Widerstand der Pasten wird als Flächenwiderstand R_F in Ω/\square angegeben:

- Dies ist auf den ersten Blick etwas ungewöhnlich, aber letztendlich sehr praktisch. Es bedeutet, dass unabhängig von der Größe eine quadratische Fläche immer den angegebenen Widerstand zwischen zwei gegenüberliegenden Seitenflächen besitzt.
- D.h., bei einem Flächenwiderstand von $100 \Omega/\square$ besitzen die folgenden Quadrate (unabhängig von ihrer Größe!) zwischen den Kontakten immer einen Widerstand $R_u=100 \Omega$:



- Die unterschiedlich großen Widerstände besitzen jedoch eine unterschiedliche maximal mögliche Verlustleistung.
- Widerstandspasten werden für eine definierte Schichtdicke mit meist dekadisch gestaffelten R_F -Werten angeboten:
 $20 \Omega/\square$; $100 \Omega/\square$; $1000 \Omega/\square$; $10000 \Omega/\square$; $100000 \Omega/\square$.
- Weicht die Widerstandsform vom Quadrat ab, so berechnet sich der ungetrimmte Widerstand R_u eines Rechtecks zu

$$R_u = R_F \cdot L/B$$

Durch Lasertrimmen soll aus dem ungetrimmten Widerstand R_u (Fertigungstoleranz σ_F) ein Widerstandswert R_N (mit der zulässigen Toleranz σ_{zul}) erzeugt werden:

- Durch das Trimmen wird der Widerstandswert vergrößert, d.h. der zu realisierende Widerstand R_N muss größer sein als R_u .
- Die folgende Ungleichung sichert, dass alle gefertigten Widerstände in den Sollbereich hinein getrimmt werden können:

$$R_u + \sigma_F \leq R_N - \sigma_{zul}$$

- Um ganz sicher zu gehen, wird die Streuung von σ_F auf R_N bezogen, so dass der Streubereich etwas

größer angesetzt wird, als er um den kleineren Widerstandswert R_u dann auftritt. Die zulässige Streuung von R_N wird so berücksichtigt, dass man möglichst wenig Trimmen muss, um einen zulässigen Widerstandswert zu erreichen. Damit ergibt sich für den zu druckenden (unabgeglichenen) Widerstandswert:

$$R_u = R_N \cdot (1 - \sigma_F/100) \cdot (1 + \sigma_{zul}/100)$$

- Im Gebiet des Widerstandes oberhalb der Trimmkerbe mit der verbleibenden Restbreite B_{getr} des Widerstands tritt die maximale Verlustleistung auf (Worst Case Resistor **WCR**). Meist wird die halbe Breite des Widerstands als max. Tiefe der Trimmkerbe angesetzt.
- Die Verlustleistungsdichte des Worst-Case-Resistors P_{WCR} kann aus der max. Verlustleistungsdichte der Paste P_{max} , der Widerstandsweite B_u und der Rest-Stegbreite $B_{getrWCR}$ berechnet werden:

$$P_{WCR} = P_{max} \cdot B_{getrWCR} / B_u$$

- Die minimal erforderliche Fläche A_W für den Widerstand ergibt sich dann aus der umzusetzenden Verlustleistung P_V und der Verlustleistungsdichte für den Worst-Case-Resistor:

$$A_W = P_V / P_{WCR}$$

- Aus dem Wert des ungetrimmten Widerstands R_u und einem zunächst vorgegebenem **L:B**-Verhältnis ergibt sich der Flächenwiderstand R_F . Wird eine gestreckte Rechteck-Form gewählt (**L>B**), so wird zuerst die Breite des ungetrimmten Widerstands berechnet (hier ohne Herleitung):

$$B_u = \sqrt{\frac{P_v \cdot R_F}{P_{WCR} \cdot R_u}}$$

- Die Länge ergibt sich aus dem gewählten B_u zu:

$$B_u = \frac{R_F \cdot L}{R_u}$$

Dies soll nun am Beispiel der Übung mit folgenden Werten nachvollzogen werden:

- $R_N = 240 \Omega$ (Nennwert nach Trimmen)
- $\sigma_{zul} = \pm 2\%$ (zulässige Toleranz von R_N)
- $\sigma_F = \pm 30\%$ (Fertigungsstreuung ungetrimmt)
- $P_V = 0,2 \text{ W}$ (Verlustleistung im Betrieb)
- $P_{max} = 6,2 \text{ W/cm}^2$ (max. Leistungsdichte der Paste)
- $R_F = \text{dekadisch gestuft}$ (Flächenwiderstand Paste)
- $B_{getrWCR} = 0,5 \cdot B_u$ (Trimmkerbe maximal)

Damit errechnet man die Schnittgeometrie:

1. *Ungetrimmter Widerstandswert*

$$R_u = 240 \Omega \cdot 0,7 \cdot 1,02 = 171,36 \Omega$$

2. *Max. zul. Leistungsdichte im Worst-Case-Resistor*

$$P_{WCR} = 0,5 \cdot 6,2 \text{ W/cm}^2 = 3,1 \text{ W/cm}^2$$

3. *Vorauswahl einer Paste (durch Wahl $L > B$)*

$$R_u = 171 \Omega \text{ mit } L/B = 1,71 \text{ ergibt } R_F = 100 \Omega/\square$$



4. *Breite ungetrimmter Widerstand*

$$\mathbf{B_u} = \sqrt{\frac{0,2W \cdot 100 \Omega/\square}{3,1W/cm^2 \cdot 171 \Omega}} \approx \mathbf{2,0 \text{ mm}}$$

(im optimalen Bereich $0,5 \text{ mm} < \mathbf{B_u} < 5 \text{ mm}$, deshalb kein Versuch mit $L < B$ erforderlich!)

5. Länge ungetrimmter Widerstand

$$\mathbf{L} = 171 \Omega \cdot 2,0 \text{ mm} / 100 \Omega/\square = \mathbf{3,42 \text{ mm}}$$

Siehe Hanke u.a.: „Baugruppentechologie der Elektronik - Band Hybridträger“, Verlag Technik 1994
ISBN 3341010998 , ISBN 9783341010990 

← →

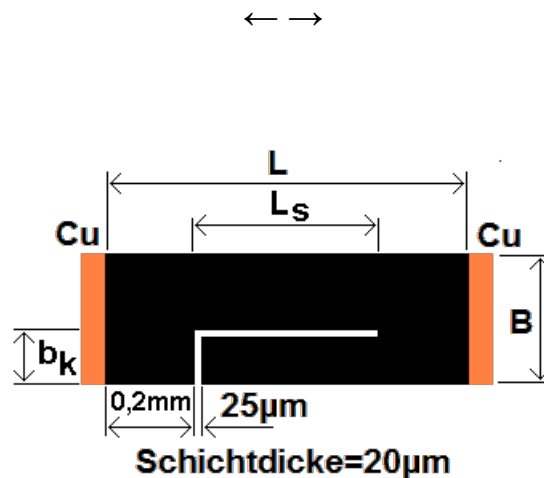
Abgerufen von „https://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Stromfluss_-_Flaechenwiderstand&oldid=25731“

■

Software: FEMM - Stromfluss - L-Schnitt

Aus OptiYummy

↑



Berechnung des L-Schnitts

Die durch den Abgleich erreichbare Genauigkeit ist sehr stark von der gewählten Geometrie abhängig. Zusätzlich beeinflusst werden durch die Geometrie der Temperaturkoeffizient, der Rauschindex und die Langzeitstabilität. Für eine Widerstandsgrundform $L/B=1,5...5$ erzielt man in funktioneller Hinsicht die besten Resultate mit dem L-Schnitt:

- Nach einer Einkerbung des Widerstands senkrecht zur Stromrichtung mit dem so genannten P-Schnitt, erfolgt längs zur Stromrichtung der so genannte L-Schnitt.
- Dieser L-Schnitt soll zur Erzielung bestmöglicher Eigenschaften möglichst lang werden:
 - Der P-Schnitt muss möglichst dicht neben einer Kontaktfläche beginnen (in der Praxis z.B. 0,2 mm).
 - Der erforderliche Knickpunkt zwischen P- und L-Schnitt muss anhand des konkreten Widerstands R_0 ermittelt werden. In der Praxis wird R_0 vor dem Trimmen durch Messen des erzeugten ungetrimmten Widerstands R_u ermittelt (Jeder Teilnehmer der Lehrveranstaltung benutzt in Abhängigkeit von seiner Teilnehmer-Nr. **xx** den Wert seines konkreten Widerstands, der -xx% vom Idealwert abweicht!).
 - Eine Möglichkeit ist unter Berücksichtigung von Druck- und Positioniertoleranzen (jeweils 5%) folgende Berechnung:

$$b_k/\text{mm} = B/\text{mm} \cdot [0,05 + 1,05 \cdot (1 - R_0/R_N)] + 0,2$$

- Die erforderliche Länge des L-Schnitts wird während des Trimmens durch Messung des aktuellen Widerstandswerts bestimmt.
- In Vorbereitung auf die spätere FEM-Simulation des Trimm-Vorgangs berechnen wir die Länge der Trimmkerbe b_k mit obiger Formel.

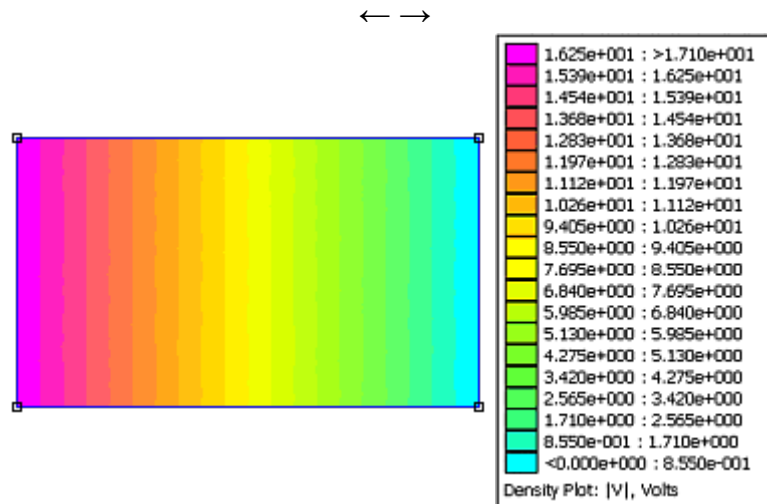
← →

■

Software: FEMM - Stromfluss - Current-Flow-Problem

Aus OptiYummy

↑



Simulation des ungetrimmten Widerstands
- Current Flow Problem -

Mit unseren Erfahrungen zur Simulation elektrostatischer Felder mittels FEMM sollte es nun kein Problem mehr darstellen, elektrische Flussfelder als "Current Flow Problem" in FEMM zu berechnen. Wir benutzen für das Modell "R_ungetrimmt.FEC" des ungetrimmten Widerstands die folgenden Werte:

- **Depth = 20 μm** (Schichtdicke)
 - **$R_u = 171 \Omega$** (Ungetrimmter Nennwert)
 - **$B_u = 2,0 \text{ mm}$** (Breite ungetrimmter Widerstand)
 - **$L = 3,42 \text{ mm}$** (Länge ungetrimmter Widerstand)
 - **$R_F = 100 \Omega/\square$** (Flächenwiderstand der Paste)
- Abweichung = -xx % (xx = Teilnehmer-Nr.)

Hinweis:

Der zu realisierende ungetrimmte Widerstand von $R_u=171 \Omega$ besitzt eine Fertigungstoleranz $\sigma_F=\pm 30 \%$. Wir arbeiten im Folgenden entsprechend der individuellen Teilnehmer-Nummer (xx) mit einem "konkreten" Widerstand R_0 , der sich aus $R_u=171 \Omega$ bei einer Abweichung von -xx% ergibt.

Für die Definition des Pasten-Materials im Finite-Elemente-Modell benötigen wir die spezifische Leitfähigkeit. Diese kann man über die Dimensionierungsgleichung aus dem Flächenwiderstand berechnen:

- Angenommen wird ein Quadrat mit der Kantenlänge B und der Dicke d (bei uns $d=20 \mu\text{m}$).
- Dieses besitzt den Flächenwiderstand der gewählten Paste.
- Wir müssen bei der Berechnung der konkreten spezifischen Leitfähigkeit κ die **Verringerung von R_F um xx%** berücksichtigen!

$$R_F = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{B}{\kappa \cdot B \cdot d}$$

$$\kappa = \frac{1}{R_F \cdot d}$$

Material-Eigenschaften:

- Das Pasten-Material wird über seine spezifische elektrische Leitfähigkeit κ [S/m] definiert, welche als σ_x bzw. σ_y bei Bedarf auch in die einzelnen Richtungen unterschiedlich groß angegeben werden könnte:

- Die elektrische Fluss-Domäne berücksichtigt nicht nur den ohmschen Widerstand der Materialien, sondern kann diese als komplexe **Impedanzen** mit ohmschen und dielektrischen Verlusten behandeln:
 - Die dielektrische Leitfähigkeit kann in Form einer richtungsabhängigen relativen **Permittivität** beschrieben werden.
 - Die richtungsabhängigen Umpolarisierungsverluste des **Dielektrikums** werden bei Bedarf als komplexe Zahlen beschrieben:

$$\varepsilon = |\varepsilon| \cdot (\cos \phi - j \cdot \sin \phi)$$
 - Der Winkel Phi der Zeigerdarstellung dieser komplexen Zahl ist der "Verlustwinkel". Anzugeben ist der Wert des Tangens dieses Winkels:

$$\text{loss tangent} = \frac{\sin \phi}{\cos \phi}$$

Geometrie, Netz, Randbedingungen:

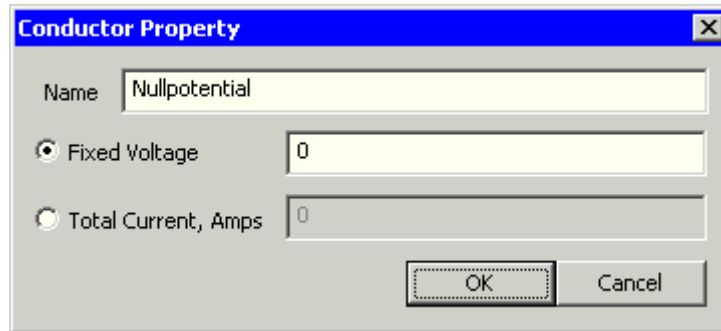
- Wichtig:** Man beachte die Hinweise zum **Abschalten des Smart Meshing!**
- Nur das Rechteck der aufgetragenen Paste ist in Form eines geeigneten FE-Netzes zu modellieren:



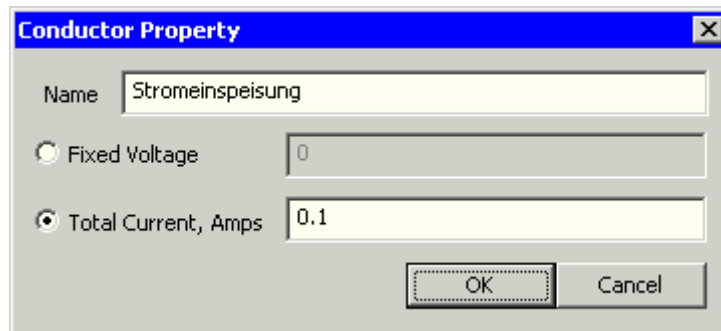
- Die Kontaktierung an den beiden Seiten sollte man jeweils über ein Leiterpotential (Conductor)

realisieren:

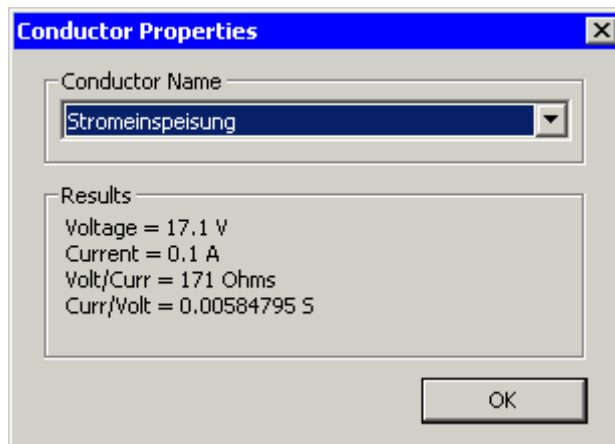
- Über die Conductor-Properties kann man entweder ein Spannungspotential oder einen Strom vorgeben.
- Es ist im Sinne der Widerstandsberechnung günstig, auf der einen Seite ein Nullpotential vorzugeben:



- Auf der anderen Seite speist man einen Strom ein. Dieser kann auf einen technisch sinnvollen Wert gesetzt werden. Bei 0.1 A sollte man sich bewusst sein, dass damit eine größere Verlustleistung als 0.2 W erreicht wird:



- Der Solver berechnet für jeden Leiter den jeweils fehlenden Wert von Spannung oder Strom. Zusätzlich werden die Quotienten aus Strom und Spannung im Sinne von Widerstand bzw. Leitwert gebildet:



- Es sollte ziemlich exakt der über die Dimensionierungsgleichung berechenbare Widerstandswert auch mit dem FEM-Modell berechnet werden!

← →

Abgerufen von „https://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Stromfluss_-_Current-Flow-Problem&oldid=25733“

▪

Software: FEMM - Stromfluss - LUA-Script

Aus OptiYummy

↑



Simulation des ungetrimmten Widerstands - LUA-Script -

In der vorherigen Übung (Elektrostatistisches Feld) haben wir Erfahrung mit der Entwicklung von LUA-Scripten gewonnen. Die vollständige Parametrisierung mit allen konstruktiv und technologisch relevanten Parametern soll auch diesmal das Ziel für den Aufbau eines scriptbasierten FEM-Modells darstellen. Die Prozess-Schritte, welche wir soeben auf dem Niveau der grafischen Bedienoberfläche ausführten, werden wir unter diesem Aspekt als LUA-Script entwickeln.

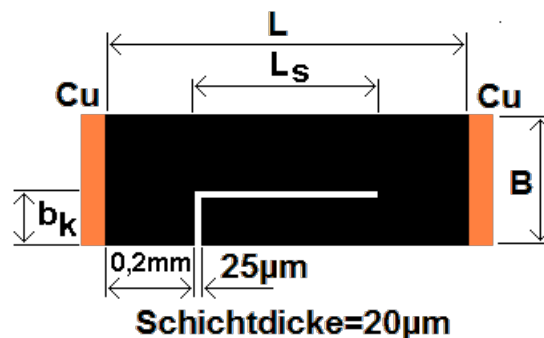
Infolge der knappen Übungszeit beschränkt sich die Script-Entwicklung wieder auf das Nachvollziehen der vorgegebenen Script-Abschnitte (*Copy & Paste*). Dazu öffnen wir einen geeigneten Script-Editor (z.B. Crimson-Editor) und die LUA-Konsole des FEMM-Programms:

Teilnehmer der Lehrveranstaltung speichern die neue Textdatei als **LaserTrimm_xx.LUA** (xx=Teilnehmer-Nr.).

Script-Entwicklung

1. Parameter:

Wir werden weitestgehend die kompletten Dimensionierungsrechnungen in den Parameter-Abschnitt integrieren. Dabei berücksichtigen wir sofort die Abmessungen der Trimmkerbe, obwohl sie erst später im FEM-Modell benötigt werden.



Man kann die "Parameter" in zwei Gruppen einteilen:

a) Funktionelle und technologische Parameter

Hier kann der Modell-Nutzer seine speziellen Anforderungen an den Widerstand und die technologischen Prozessgrößen in Form von Werten vorgeben:

```

-- Funktionelle und technologische Parameter
xx=00;      -- Teilnehmer-Nr. 00 bis 50
s=25;      -- Schnittbreite des Laser-Strahls [µm]
Ls=500;    -- aktuelle Länge L-Schnitt [µm]
bz=200;    -- Breite eines Zuschlags für Fertigung [µm]
d=20;      -- Schichtdicke in µm = Dicke 2D-Elemente
RF=100;    -- Nennwert Flächenwiderstand der Paste
[Ohm/Quadrat]
Pmax=6.2;  -- max. zul. Leistungsdichte in Paste [W/cm²]
RN=240;    -- Nennwert nach Trimmen [Ohm]
Szul=0.02; -- zulässige relative Toleranz von RN
PV=0.2;    -- max. Verlustleistung im Betrieb [W]
SF=0.3;    -- Fertigungsstreuung ungetrimmter Widerstand
(rel.)

```

b) Berechnete Geometrie- und Material-Parameter

Im Unterschied zur manuellen Dimensionierung werden im Folgenden die berechneten geometrischen Größen nicht gerundet. Da dies für die Fertigung keine Bedeutung hat, werden die berechneten "krummen" Werte verwendet:

```

-- Berechnete Geometrie- und Material-Parameter
Ru=RN*(1-SF)*(1+Szul);      -- notw. Nennwert ungetrimmter
Widerstand [Ohm]
PWCR=Pmax*0.5;             -- Leistungsdichte Worst-Case-
Resistor [W/cm²]
Bu= sqrt(PV*RF/(PWCR*Ru))*cm/um; -- Breite Widerstand [cm] ->
[µm]
L=Bu*Ru/RF;                -- Länge des Widerstands [µm]
R0=(1-xx/100)*Ru;          -- konkreter Wert ungetrimmter
Widerstand [Ohm]
bk=Bu*(0.05+1.05*(1-R0/RN))+bz; -- Breite der Trimmkerbe für
P-Schnitt [µm]
-- mit 5% Druck- und Pos.-
Toleranz und Zuschlag
Kappa=1/((1-xx/100)*RF*d*um); -- spez. Leitfähigkeit
(konkr. Teilnehmer) [S/m]
-- Kontrollausgabe auf die LUA-Konsole:
showconsole(); -- LUA-Konsole öffnen, falls Script als Datei
ausgeführt
print ("Ru      =",Ru," [Ohm] ");
print ("Bu      =",Bu," [µm] ");
print ("L       =",L," [µm] ");
print ("bk      =",bk," [µm] ");
print ("Kappa   =",Kappa," [S/m] ");
print ("R0      =",R0," [Ohm] -> 'Sollwert' vor dem Trimmen in
FEM-Rechnung!");

```

2. Definition des Problem-Typs

```
-- Definition des Problem-Typs
=====
create(3);          --
0=magnetic|1=electrostatic|2=heatflow|3=currentflow
ci_probdef("micrometers","planar",0,1e-8,d,30);
                -- 1e-8=Max.Fehler für Solver
                -- 30° =Min.Winkel für Netz
```

3. Geometrie

Die markanten Punkte der Geometrie sind laut folgender Skizze durchnummeriert:



```
-- Geometrie (alle Abmessungen in
µm!)=====
ci_seteditmode ("nodes") -- ungetrimmtes Rechteck
*****
x01= 0; y01= 0; ci_addnode (x01,y01);
x02= 0; y02= Bu; ci_addnode (x02,y02);
x03= L; y03= Bu; ci_addnode (x03,y03);
x04= L; y04= 0; ci_addnode (x04,y04);
ci_zoomnatural(); ci_zoomout(); -- Zoom einschließlich Kanten
im Bild
ci_seteditmode ("segments")
ci_addsegment ( x01,y01 , x02,y02 );
ci_addsegment ( x02,y02 , x03,y03 );
ci_addsegment ( x03,y03 , x04,y04 );
ci_addsegment ( x04,y04 , x01,y01 );
```

4. Material der Paste

Das Block-Label für die Definition des Pasten-Bereiches muss unabhängig von den Abmessungen immer innerhalb des Rechtecks liegen. Außerdem darf dieses Label nicht mit dem späteren L-Schnitt kollidieren. Deshalb wird das Label unterhalb des oberen Rechteck-Randes mittig platziert. Global soll eine automatische Vernetzung des gesamten Bereiches erfolgen. Nur an kritischen Stellen wird die Maschengröße an den Segmenten des Randes individuell angepasst:

```

-- Material fuer Widerstand (Mesh Size=Auto)
=====
-- ci_addmaterial ("name", ox, oy, ex, ey, ltx, lty)
      -- ox,oy = el.Leistfähigkeit [S/m]
      -- ex,ey = rel. el. Dielektrizitätskonst.
      -- ltx,lty= Umpolarisierungsverluste
  ci_addmaterial ("Paste", Kappa, Kappa, 1, 1, 0, 0); -- Paste
  ci_seteditmode ("blocks") -- Label wegen L-Schnitt mittig 1/10
vom oberem Rand
  x0_Paste= 0.5*L; y0_Paste= 0.9*Bu;
  ci_addblocklabel(x0_Paste, y0_Paste); ci_selectlabel
(x0_Paste,y0_Paste);
-- ci_setblockprop("blockname", automesh, meshsize, group);
  ci_setblockprop ("Paste"      , 1      , 0      , 0);
ci_clearselected();

```

5. Randbedingungen (Conductor Property)

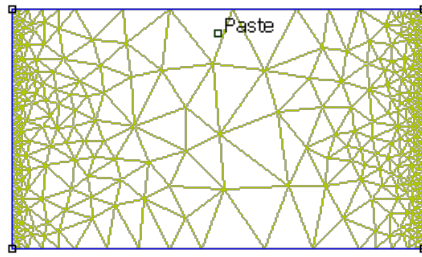
Segmente, welche mit Randbedingungen versehen sind, sollten hinreichend fein vernetzt werden. Unabhängig von den konkreten Abmessungen wird im Beispiel eine Maschengröße von 1/50 der Segmentlänge definiert:

```

-- Randbedingungen über Conductor Property mit Vorgabe
Maschengröße =====
--
-- ci_addconductorprop ("name", v, c, type: 1=v/0=c)
  ci_addconductorprop ("Null", 0, 0 , 1 );--
voltage
  ci_addconductorprop ("Strom", 0, 0.01 , 0 );--
current
  ci_seteditmode ("segments")
-- ci_selectsegment(x,y) -> Mitte xs,ys des Segments P1,P2
nutzen:
--          xs=x1+(x2-x1)/2;   ys=y1+(y2-y1)/2;
-- Links mit Nullpotential (SegL= 01...02)
  xs_L=x01+(x01-x02)/2;   ys_L=y01+(y02-y01)/2;
  ci_selectsegment(xs_L,ys_L);
--
ci_setsegmentprop("bound.",elem.size,automesh,hide,group,"cond.name")
  ci_setsegmentprop("<None>",Bu/50 , 0 , 0 , 0 ,
"Null");
  ci_clearselected();
-- Rechts mit Stromspeisung (SegR= 03...04)
  xs_R=x03+(x04-x03)/2;   ys_R=y03+(y04-y03)/2;
  ci_selectsegment(xs_R,ys_R);
  ci_setsegmentprop("<None>",Bu/50 , 0 , 0 , 0 ,
"Strom");
  ci_clearselected();

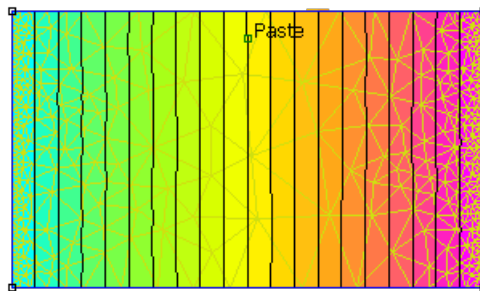
```


6. Vernetzung und Berechnung



```
-- Vernetzung und Berechnung
=====
ci_saveas("LaserTrimm.fec"); -- Speichern in Ordner der LUA-
Datei
ci_createmesh(); --> nur gespeichertes Modell wird vernetzt!
ci_analyze(1); -- Solverfenster 1=minimiert / 0=sichtbar
ci_loadsolution(); -- öffnet Ergebnisfenster für Postprozess
```

7. Ergebnisse (Postprocessing)



```
-- Felddarstellung (normiert) und Widerstandsrechnung
=====
v,i = co_getconductorproperties("Strom");
R = v/i;
co_showmesh();
co_zoomnatural(); co_zoomout(); -- Zoom einschließlich Kanten
im Bild
-- co_showdensityplot(legend,gscale,upper_D,lower_D,type);
-- 0|1 0=color, min , max , 0=V|1=D|2=E
co_showdensityplot( 1 , 0 , 0 , v , 0 );
co_showcontourplot(20,0,v); -- blendet 20
Aequipotentiallinien ein
print ("R=", R, "[Ohm]") -- Werte in Outputfeld der
LUA-Konsole
print (" mit v=", v, "[V]");
print (" und i=", i, "[A]");
```

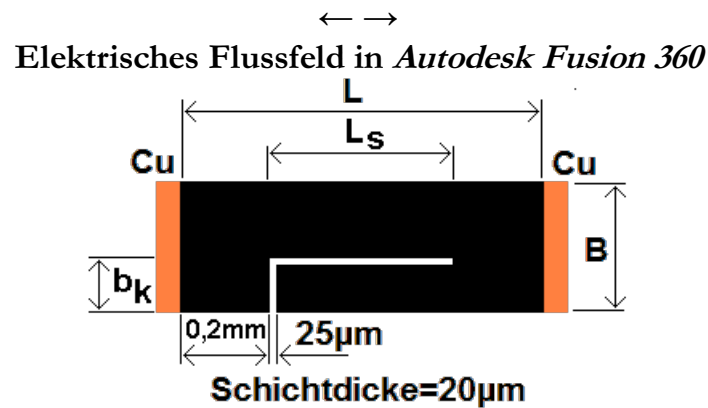
← →

■

Software: FEM - Tutorial - Elektrisches Flussfeld - Fusion

Aus OptiYummy

↑




Inhaltsverzeichnis

- 1 Projekt
- 2 Konstruktion des ungetrimmten Widerstandes
 - 2.1 Parameter und Dimensionierungsregeln
 - 2.2 Widerstandspaste: Modell-Geometrie und Material
 - 2.3 Modell-Validierung (Widerstandspaste)
- 3 Kupferkontakt zur Strom-Einspeisung
 - 3.1 Erweiterung der Modell-Geometrie
 - 3.2 Skalierung der Material-Parameter
 - 3.3 Modell-Validierung (Widerstandspaste mit Kupfer-Kontakt)

Projekt

- Mit unseren Erfahrungen aus den vorherigen Übungen erstellen ein neues Projekt und nennen es "**FEM4_in_CAD_xx**" (mit Teilnehmer-Nr. **xx=01...99**) und wählen es als aktives Projekt.
- **Wichtig:** In den Nutzer-Voreinstellungen soll die "**Vorgabeausrichtung beim Modellieren**" auf "**Z nach oben**" gesetzt sein, was der aktuellen Standard-Einstellung entspricht. Nach einer eventuell erforderlichen Umstellung der Richtung muss die "unbenannte" Konstruktion geschlossen werden, weil diese Voreinstellungen erst für neue Konstruktionen wirken!

Konstruktion des ungetrimmten Widerstandes

Wir speichern  die noch unbenannte Konstruktion unter dem Namen "**R_ungetrimmt_xx**" (mit Teilnehmer-Nr. **xx=01...99**):

- Anhand der Geometrie der ungetrimmten Widerstandspaste (Rechteckfläche ohne Kerbe) soll eine erste Validierung des Simulationsmodells erfolgen.
- Wir werden die Möglichkeiten der Parameter-Liste nutzen, um auf Grundlage der Dimensionierungsregeln eine vollständige Parametrisierung der kompletten Widerstandsgeometrie (einschließlich der Trimmkerbe) vorzunehmen.

Parameter und Dimensionierungsregeln

Innerhalb einer Konstruktion bietet die Parameterliste die Möglichkeit, auf Grundlage der Dimensionierungsregeln eine vollständige Parametrisierung der Geometrie vorzunehmen:

- In Analogie zu den Anweisungszeilen im **LUA-Script des FEMM** können wir nacheinander zuerst die vorgegebenen und dann die zu berechnenden Benutzerparameter hinzufügen.
- Die Syntax der mathematischen Operatoren in den Ausdrücken entspricht im Wesentlichen denen im LUA-Script.
- **Hinweise:**
 1. Die Reihenfolge der Parameter innerhalb der Parameterliste ist egal, jedoch müssen im Ausdruck verwendete Namen bereits definiert sein. Man sollte wegen der Übersichtlichkeit möglichst die gleiche Reihenfolge wie im LUA-Script wählen (welche dort der Berechnungsreihenfolge der Anweisungen entspricht).
 2. Unzulässige (da bereits vordefinierte) Parameter-Namen werden farblich (rot) markiert. Um weitestgehende Übereinstimmung mit dem LUA-Script zu erzielen, wird empfohlen, solchen Namen einen Unterstrich anzufügen (z.B. anstatt "s" → "s_").
 3. Einheiten können nachträglich innerhalb der Parameterliste nicht bearbeitet werden! Längen-Parameter sind deshalb sofort in der gewünschten Länge (z.B. **micron**, **mm**, **cm**) anzugeben. Alle anderen Parameter sind mit der Option "**Keine Einheiten**" zu definieren.
 4. Für jeden Parameter ist die verwendete Einheit im Kommentar zu ergänzen (z.B. "Schnittbreite des Laser-Strahls [μm]")
 5. Bei der Berechnung der Ausdrücke werden die Maßeinheiten berücksichtigt. Erfordert z.B. ein Ausdruck den Wert einer Länge in Meter, so ist dies entsprechend anzugeben: z.B. Schichtdicke **d** für spez. Leitfähigkeit **Kappa** [S/m] = $1 / ((1 - \text{xx} / 100) * \text{RF} * \text{d} / \text{m})$.
- Ursprünglich war geplant, dass jeder Übungsteilnehmer diese Parameterliste völlig selbstständig erstellt:
- Leider kann es insbesondere bei der Umrechnung in die gewünschte Längeneinheit zu undefinierten Syntax-Zuständen kommen. Dabei wird der Ausdruck nicht als fehlerhaft markiert, aber er rechnet nicht mehr und blockiert damit die Aktualisierung aller davon abhängigen Parameterwerte.
- Deshalb im Folgenden das Bild der kompletten Parameterliste:

Parameter	Name	Einheit	Ausdruck	Wert	Kommentare
Favoriten					
▼ Benutzerparameter +					
☆ Benutzerparameter	xx		0	0	Teilnehmer-Nr. 00 bis 50
☆ Benutzerparameter	s_	micron	25 micron	25.00	Schnittbreite des Laser-Strahls [μm]
☆ Benutzerparameter	Ls	micron	500 micron	500.00	aktuelle Länge L-Schnitt [μm]
☆ Benutzerparameter	bz	micron	200 micron	200.00	Breite eines Zuschlags für Fertigung [μm]
☆ Benutzerparameter	d	micron	20 micron	20.00	Schichtdicke [μm]
☆ Benutzerparameter	RF		100	100	Nennwert Flächenwiderstand der Paste [$\text{Ohm}/\text{Quadrat}$]
☆ Benutzerparameter	Pmax		6.2	6.2	max. zul. Leistungsdichte in Paste [W/cm^2]
☆ Benutzerparameter	RN		240	240	Nennwert nach Trimmen [Ohm]
☆ Benutzerparameter	Szul		0.02	0.02	zulässige relative Toleranz von RN
☆ Benutzerparameter	PV_		0.2	0.2	max. Verlustleistung im Betrieb [W]
☆ Benutzerparameter	SF		0.3	0.3	Fertigungsstreuung ungetrimmter Widerstand (rel.)
☆ Benutzerparameter	Ru		$\text{RN} * (1 - \text{SF}) * (1 + \text{Szul})$	171.36	notw. Nennwert ungetrimmter Widerstand [Ohm]
☆ Benutzerparameter	PWCR		$\text{Pmax} * 0.5$	3.1	Leistungsdichte Worst-Case-Resistor [W/cm^2]
☆ Benutzerparameter	Bu	micron	$\text{micron cm} / \text{micron} * \text{sqrt}(\text{PV}_ * \text{RF} / (\text{PWCR} * \text{Ru}))$	1940.34	Breite Widerstand [cm] -> [μm]
☆ Benutzerparameter	L	micron	$\text{Bu} * \text{Ru} / \text{RF}$	3324.97	Länge des Widerstands [μm]
☆ Benutzerparameter	R0		$(1 - \text{xx} / 100) * \text{Ru}$	171.36	konkreter Wert ungetrimmter Widerstand [Ohm]
☆ Benutzerparameter	bk	micron	$\text{Bu} * (0.05 + 1.05 * (1 - \text{R0} / \text{RN})) + \text{bz}$	879.704	Breite der Trimmkerbe für P-Schnitt mit Zuschlag [μm]
☆ Benutzerparameter	Kappa		$1 / ((1 - \text{xx} / 100) * \text{RF} * \text{d} / \text{m})$	500	spez. Leitfähigkeit (konkr. Teilnehmer) [S/m]
> Modellparameter					

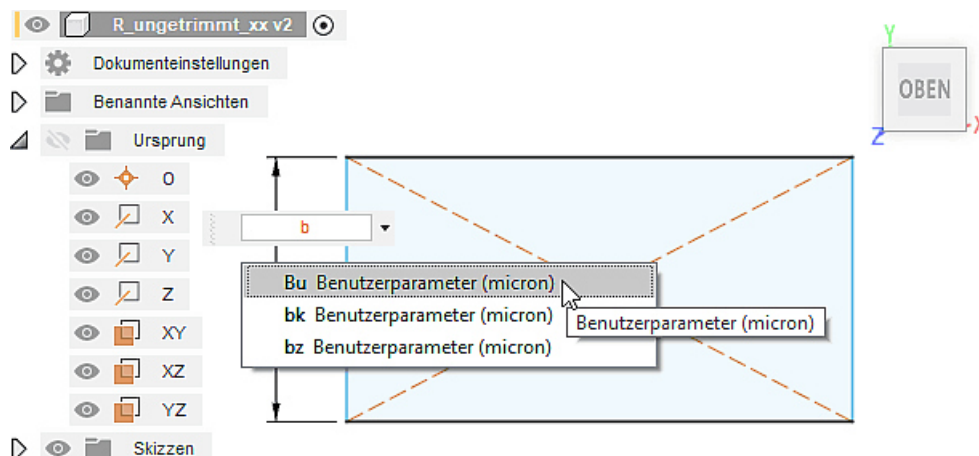
Widerstandspaste: Modell-Geometrie und Material

Die Anwendung der Analogiebeziehungen ist für das elektrische Flussfeld im *Autodesk Fusion 360* einfacher als beim elektrostatischen Feld, wenn man keine Metalle verwendet, weil dann kein Korrekturfaktor für die spezifische elektrische Leitfähigkeit erforderlich ist (Begrenzung der maximalen Wärmeleitfähigkeit auf $5E+03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})!$):

- Wir benötigen zumindest für die Validierung anhand des ungetrimmten Widerstandes im Vergleich zur analytischen Dimensionierungsgleichung des ohmschen Widerstands nur das Pasten-Material.
- Man kann sich auf eine rechteckige, **20 μm** dicke Schicht der Widerstandspaste beschränken.
- Auf die eine Kontaktseite legt man das Nullpotential und in die andere lässt man einen Strom von z.B. **1 A** hineinfließen. Der Wert des Spannungsabfalls $U=I\cdot R_u$ entspricht dann dem ohmschen Widerstand.

Die Skizze für die Rechteck-Fläche legen wir in die XY-Ebene des Ursprungsystems, die **20 μm -Extrusion** erfolgt dann in Z-Richtung:

- Bei der Bemaßung mit den Benutzer-Parametern erfolgt automatisch eine Umrechnung in mm-Werte.
- Bei der parametrischen Bemaßung ist zuvor die Eingabe mindestens eines Buchstabens erforderlich, bevor eine selektive Liste der unkommentierten Parameter-Namen angezeigt wird. Deshalb sollte man sich bereits vor der Bemaßung in der Parameter-Liste zu den benötigten Parametern kundig machen:



Entsprechend der **Analogiebeziehungen zwischen Potentialfeldern** entspricht der Wert der Wärmeleitfähigkeit der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit **Kappa** [$1/(\text{Ohm}\cdot\text{m})$]:

- Die Konfiguration des Modellmaterials "**Paste (leitend)**" erfolgt mit den Erfahrungen aus der elektrostatischen Analogie anhand eines optisch ähnlichen Metalls.
- Die spezifische elektrische Leitfähigkeit der Widerstandspaste entspricht dem individuell berechneten **Kappa**-Wert aus der Parameter-Liste (welcher jedoch nicht als Parameter-Name in das Material eingetragen werden kann!)
- Das Pasten-Material ist dem Pasten-Körper zuzuweisen.

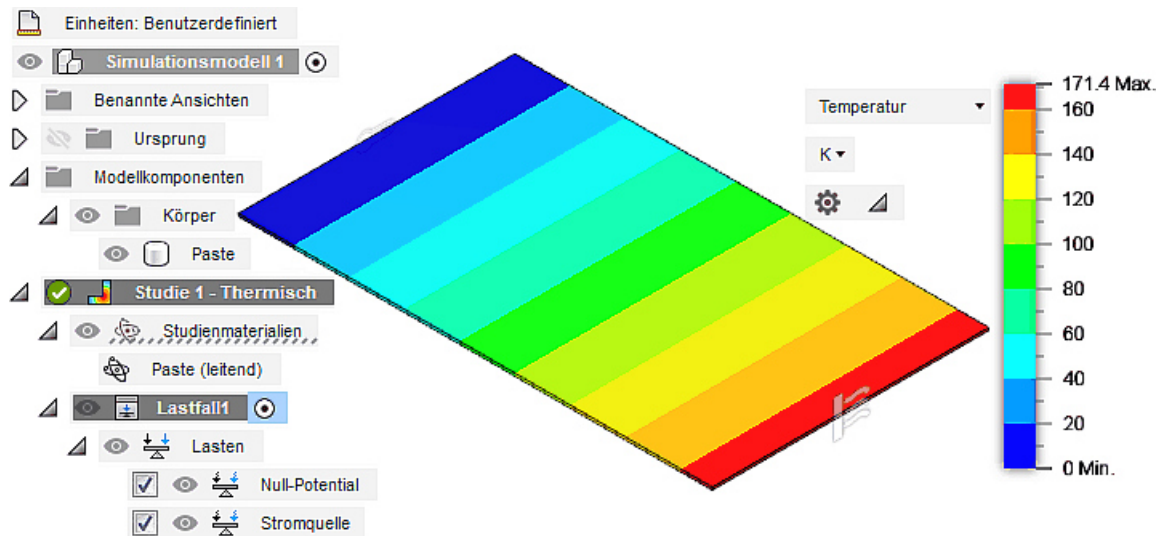
Modell-Validierung (Widerstandspaste)

Aufbauend auf unseren Erfahrungen ist es nun kein Problem für den Pasten-Bereich:

- ein qualitativ ausreichend gutes Netz zu generieren und
- die thermischen Lasten zur Nachbildung des Null-Potentials auf der einen Seite und einer Strom-

Einspeisung von **1 A** auf der anderen Seite zu definieren.

Die nach der Lösung angezeigte Maximaltemperatur repräsentiert den Spannungsabfall über dem ohmschen Widerstand. Dieser Wert entspricht bei einem Strom von **1 A** gleichzeitig dem aktuellen Widerstandswert in **Ohm**:

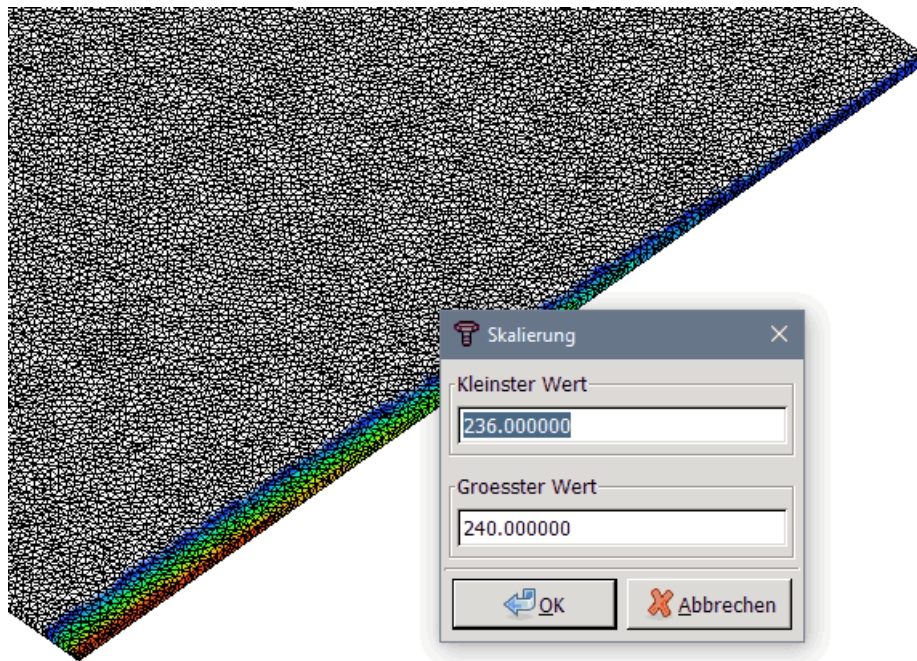


Das FEM-Modell funktioniert glaubwürdig, wenn der resultierende Widerstandswert "exakt" dem in der Parameter-Liste berechneten, individuellen Wert von **R₀** entspricht!

Kupferkontakt zur Strom-Einspeisung

Die direkte Einspeisung des Stromes in eine Kontaktfläche kann man für die Validierung des Pasten-Modells verwenden, weil sich zwischen beiden Kontaktflächen der Paste ein homogenes Feld aufbaut:

- Infolge der erforderlichen Trimmkerbe entsteht ein inhomogenes Feld innerhalb des Pastenbereiches.
- Dies hat keine Auswirkung auf das Null-Potential der einen Seite des Widerstandes, weil dieser Null-Wert als Randbedingung vorgegeben wird und nicht als Ergebnis der Simulation berechnet wird.
- Auf der anderen Seite des Widerstandes entsteht im Ergebnis der Berechnung jedoch kein einheitliches Kontaktpotential, wenn man den Strom direkt in die Kontaktfläche einspeist. Dies erkennt man im folgenden Bild einer Z88-Aurora-Simulation (welche in dieser Anleitung nur zur Information beschrieben ist):

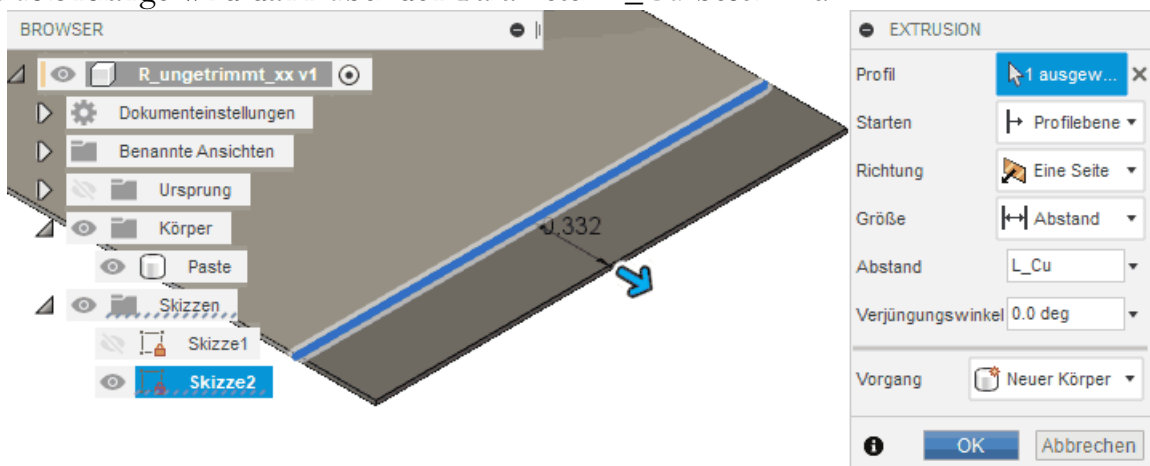


- Im Beispiel schwankt die Spannung um ± 2 V um den hypothetischen Mittelwert (entspricht ca. $\pm 1\%$).
- Um diesen Fehler zu vermeiden, muss man an dieser Kontakt-Fläche zur Strom-Einspeisung im Modell einen zusätzlichen Streifen Kupfer-Material vorsehen. Dieser sorgt auf Grund seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit für den erforderlichen Potentialausgleich.

Erweiterung der Modell-Geometrie

Beim Ergänzen des Kupfer-Kontaktes als weiteren Körper kommt es nicht auf genaue Maße an, solange die Funktion des Potentialausgleichs erfüllt werden kann:

- Wenn bei gleichem Querschnitt der Kupferkontakt eine Länge von $1/10$ der Pasten-Länge besitzt, wird der ohmsche Widerstand dadurch praktisch nicht vergrößert.
- Damit bei sich ändernder Widerstandsgeometrie eine automatische Anpassung der Kupfer-Kontaktlänge erfolgen kann, wird ein zusätzlicher Benutzer-Parameter $L_Cu=L/10$ definiert.
- Der Querschnitt des Kontaktes passt sich automatisch an, indem man die Skizze des Extrusionsprofils auf der Kontaktfläche der Paste platziert.
- Die Extrusionslänge wird dann über den Parameter L_Cu bestimmt:



Skalierung der Material-Parameter

Zusätzlich zum Modellmaterial **Paste (leitend)** muss ein Modellmaterial **Kupfer (leitend)** mit **Kappa_Cu=58E+6 S/m** definiert und dem Körper des Kontaktes zugewiesen werden.

Dadurch entsteht ein Problem, denn in der Materialbibliothek von *Autodesk Fusion 360* darf der Wert für die Wärmeleitfähigkeit nur in den Grenzen von **0,01 W/(m·K)** bis **5000 W/(m·K)** liegen. Damit kann man die **elektrische Leitfähigkeit Kappa** vom Isolator (**1E-16 S/m**) bis zum Graphen (**1E+8 S/m**) natürlich selbst bei Verwendung von Skalierungsfaktoren nicht innerhalb eines Modells abdecken:

- Bereiche mit elektrischen Isolatoren kann man im Modell meist aussparen (z.B. die Luft in der Trimm-Kerbe).
- Beträgt das Verhältnis der elektrischen Leitwerte verwendeter Materialien maximal **1:500 000**, so ist eine Skalierung der Materialparameter innerhalb des Modells möglich (im Beispiel **1:116 000**)
- Für den Skalierungsfaktor **K** sollte man möglichst **10-er Potenzen** anstreben (im Beispiel nicht möglich → Gefahr fehlerhafter Parameterwerte erhöht sich!).
- Bereiche sehr guter Leitfähigkeit (z.B. Kupferkontakte) müssen nicht unbedingt mit der exakten Leitfähigkeit konfiguriert werden, wenn darin auftretende Potentialunterschiede vernachlässigt werden können bzw. nicht interessieren. In solchen Fällen muss die Leitfähigkeit der "idealen" Leiter nur möglichst groß sein im Vergleich zu den eigentlich interessierenden Materialbereichen.

Für unser Beispiel gilt die letzte Annahme, sodass mit **K=1E-4** für Kupfer praktisch ein **Kappa_Cu=50E+6** verwendet werden kann, was fast der realen Leitfähigkeit entspricht:

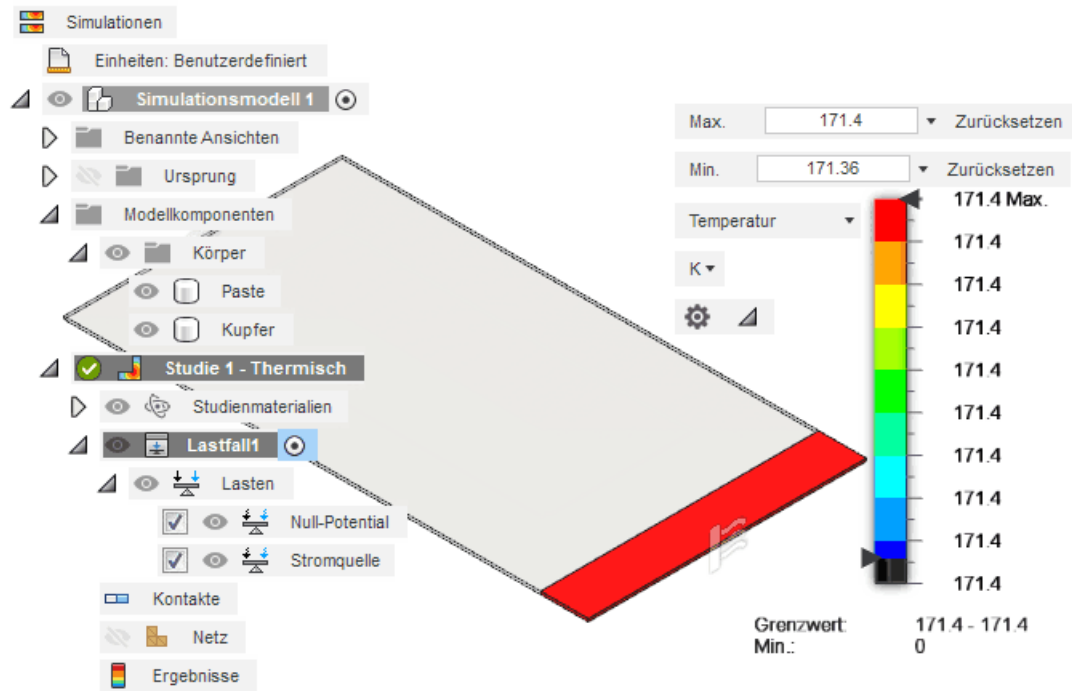
- Der Korrekturfaktor **K** ist auf alle betroffenen Modellmaterial-Parameter anzuwenden. Übersteigt für Leiterbereiche der Modell-Parameter seinen zulässigen Grenzwert, so ist dieser Grenzwert zu verwenden.
- Damit in den Simulationsergebnissen sofort die realen (unskalierten) Potentialwerte abgelesen werden können, sind eingespeiste Ströme (bzw. Stromdichten) ebenfalls mit dem Korrekturfaktor **K** zu multiplizieren.

Modell-Validierung (Widerstandspaste mit Kupfer-Kontakt)

Nach dem Ergänzen des Kontakt-Bereiches und dem Skalieren der Material-Parameter muss das Simulationsmodell entsprechend angepasst werden:

1. Verlegen der Strom-Einspeisung von der Kontaktfläche der Paste auf die Stirnfläche des Kupfer-Kontaktes (mit Berücksichtigung des Skalierungsfaktors!).
2. Erzeugen des Kontaktes zwischen dem Pasten- und dem Kupfer-Körper.
3. Erneute Vernetzung.
4. Lösen des Modells

Die Ergebnisse sollten "exakt" den gleichen Widerstandswert ergeben, wie ohne Kupfer-Kontakt. Innerhalb des Kupferkontaktes muss praktisch überall der gleiche Potentialwert existieren, was man z.B. durch eine günstige Skalierung der Legende sehr gut visualisieren kann:



Damit ist die Validierung des Simulationsmodells für den auch mittels Dimensionierungsgleichung berechenbaren Grenzfall des homogenen Feldes abgeschlossen. Wir können danach den Ergebnissen der FEM-Simulation auch für inhomogene Feldverläufe vertrauen, welche analytisch nicht mehr berechenbar sind!



Abgerufen von „https://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrisches_Flussfeld_-_Fusion&oldid=24123“

■

Software: FEM - Tutorial - Elektrisches Flussfeld - Z88

Aus OptiYummy

↑



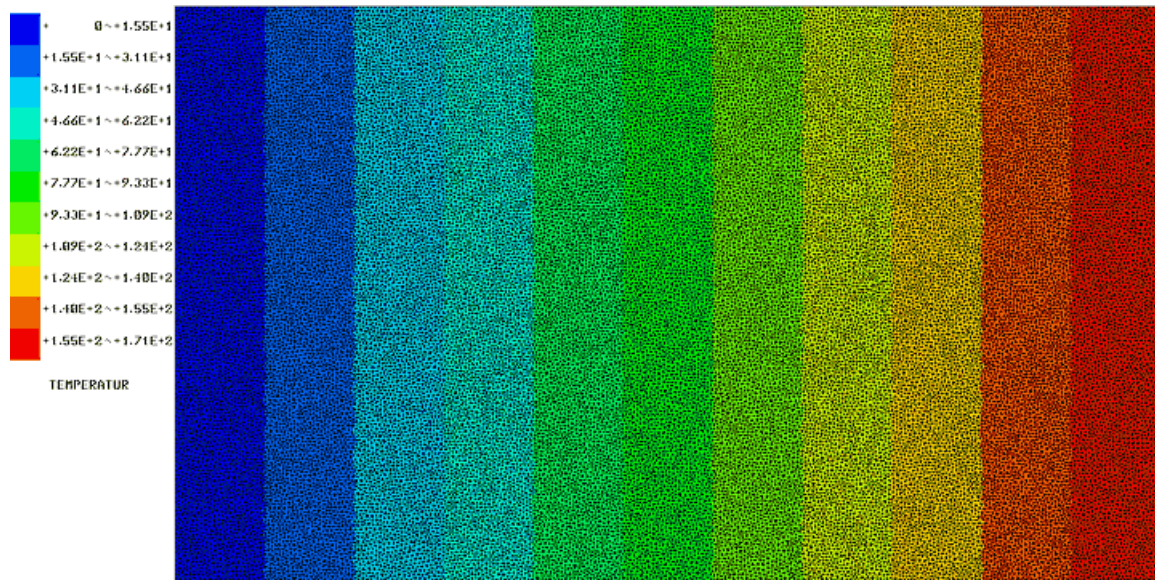
Elektrisches Flussfeld in Z88Aurora (Für Übungsteilnehmer nur zur Info!)

Die Anwendung der Analogiebeziehungen ist für das elektrische Flussfeld im *Z88Aurora* einfacher als beim elektrostatischen Feld, weil kein Korrekturfaktor für die spezifische elektrische Leitfähigkeit erforderlich ist:

- Wir benötigen zumindest für die Validierung anhand des ungetrimmten Widerstandes im Vergleich zur analytischen Dimensionierungsgleichung des ohmschen Widerstands keine unterschiedlichen Materialien.
- Man kann sich auf eine rechteckige, **20 µm** dicke Schicht der Widerstandspaste beschränken.
- Auf der einen Kontaktseite legt man das Nullpotential und in die andere Kontaktseite lässt man einen Strom von z.B. **1 A** hineinfließen. Der Spannungsabfall $U = I \cdot R_u$ entspricht dem Wert des ohmschen Widerstands.

Hierfür genügt ein mit einem Freemesh generiertes Tetraeder-Netz auf Basis einer importierten STEP-Datei:

- Wir konstruieren mittels eines CAD-Programms die Widerstandsschicht aus einem extrudierten Rechteck.
- Der Export der STEP-Datei **FEM4_Ru_xx.stp** (u ... ungetrimmt) in den lokalen CAD-Projektordner "**FEM4_CAD_xx**" sollte mit höchster Spline-Einpassgenauigkeit und dem Anwendungsprotokoll "214" erfolgen.
- Die Modell-Validierung des ungetrimmten Widerstands erfolgt im neuen Z88-Projekt "**FEM4_Z88_Ru_xx**".
- Beim Hinzufügen eines neuen Materials für die Widerstandspaste ist die Längeneinheit **mm** zu beachten!
- Für die Tetraeder-Vernetzung funktioniert im Beispiel anscheinend nur **Tetgen**:
 - "Netgen" stürzte bei der Vorbereitung der Übung ab!
 - Für die **20 µm** dicke Widerstandsschicht genügt eine Lage von Tetraeder-Elementen.
 - Es genügen lineare Tetraeder auf Grund der sehr feinen Vernetzung in der Fläche.
- Die Definition der Randbedingungen auf beiden Seiten der Widerstandsschicht ist unkompliziert (Siehe "*Elektrostatik*": *Modellbildung und -validierung mit Z88Aurora-Thermomodul*).
- Die Simulation mit dem PARDISO-Solver ergibt den folgenden Spannungsverlauf in der Widerstandsschicht:



Der sich aus der Definitionsgleichung $\mathbf{R}=\mathbf{U}/\mathbf{I}$ ergebende ohmsche Widerstandswert muss für die individuelle Teilnehmer-Nummer sehr genau mit dem analytisch berechneten Wert aus der Dimensionierungsgleichung $\mathbf{R}=\rho \cdot \mathbf{L}/\mathbf{A}$ übereinstimmen. Ursachen für Abweichungen sind z.B.:

- falsch berechneter Wert der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit anhand der Teilnehmer-Nummer
- falsche Berücksichtigung des verwendeten Maßsystems für den Wert der Leitfähigkeit
- falsche Maße im CAD-Modell

← →

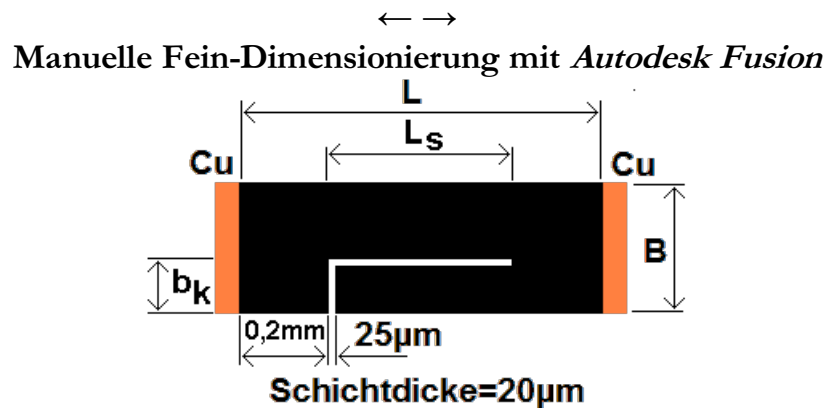
Abgerufen von „https://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrisches_Flussfeld_-_Z88&oldid=23899“

■


Software: FEM - Tutorial - Elektrisches Flussfeld - Fusion - Dimensionierung

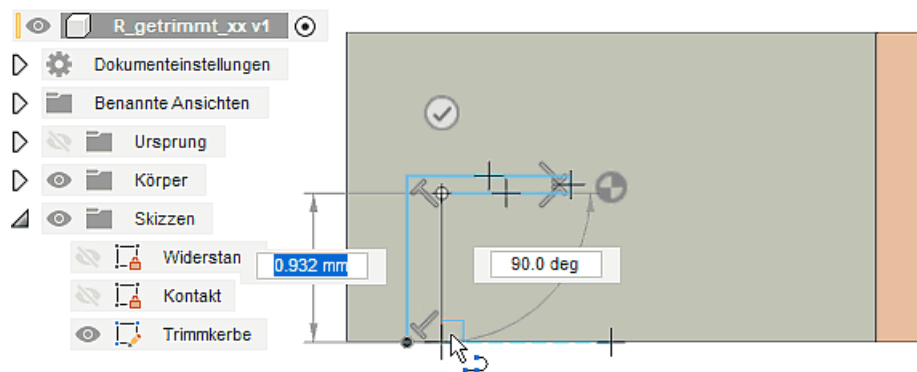
Aus OptiYummy

↑



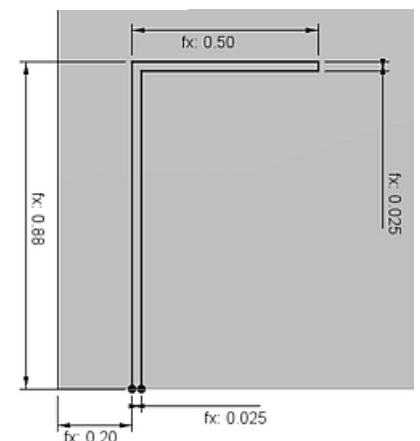
Um den Zustand der Modell-Validierung nicht zu zerstören, erstellen von der zuvor geschlossenen Konstruktion zuerst im gleichen Projekt eine Kopie und nennen sie "**R_getrimmt_xx**" (mit Teilnehmer-Nr. **xx=01...99**):

- Nach dem Öffnen dieser Kopie wechseln in die Umgebung **KONSTRUKTION** und erstellen eine neue Skizze für die "Trimmkerbe" auf der Oberfläche der Paste.
- In die Skizze zeichnen wir als Linie  ohne Berücksichtigung der Maße das Profil der Trimmkerbe:



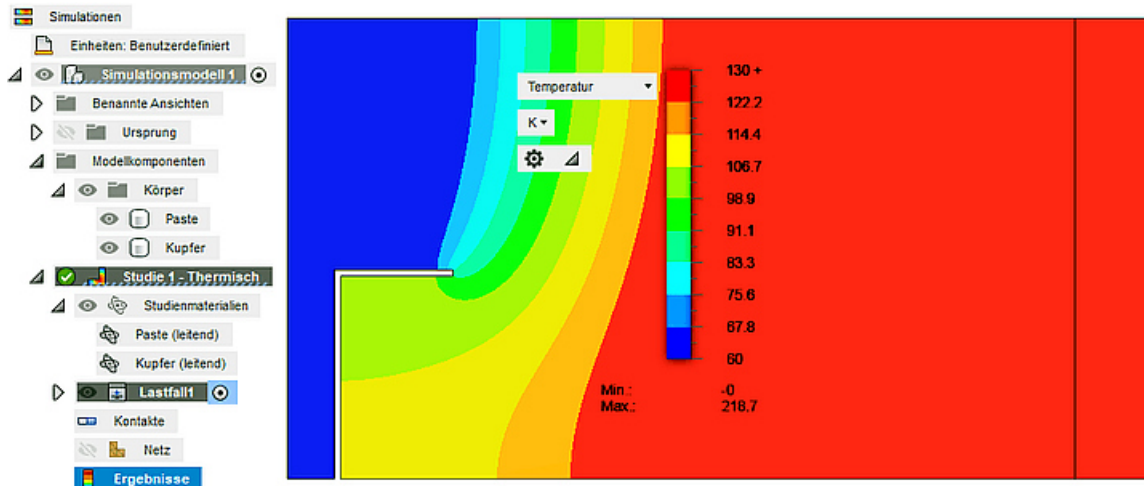
- Beim Zeichnen des Linienzuges ist die Nutzung der automatischen Fang- und Abhängigkeitsmechanismen kein Problem.
- Die Bemaßung der Kerbe erfolgt dann auf Grundlage der bereits definierten und berechneten Benutzer-Parameter. Für die Kerb-Länge **L_s** muss man einen vorläufigen Schätzwert annehmen, da eine analytische Berechnungsvorschrift nicht existiert.
- **Hinweis:** Die Skizze muss am Ende der Bemaßung vollständig bestimmt sein (gekennzeichnet durch das Schloss-Symbol!).

Nach Fertigstellen der Skizze erzeugen wir die Trimmkerbe durch **Extrusion** des Kerbprofils mit dem Vorgang "**Ausschneiden**" aus dem Objekt "Paste".



Der Wechsel in die Umgebung **SIMULATION** zeigt, dass mit Ausnahme des Netzes die Konfiguration des Experiments noch komplett erhalten ist:

- Eigentlich müsste man untersuchen, welchen Einfluss eine feinere Vernetzung am Ende der Trimmkerbe auf die Ergebnisse besitzt, weil dort die größten Potentialgradienten entstehen. Wir ersparen uns diesen Aufwand, welcher wahrscheinlich nur zu geringen Ergebnisänderungen führt.
- Stattdessen wählen wir bei den globalen Vernetzungseinstellungen für die Tetraeder-Elemente eine parabolische Ansatzfunktion, welche die Berechnungszeit nur unwesentlich verlängert, aber eine etwas höhere Genauigkeit verspricht. Die berechnete Maximalspannung vergrößert sich dadurch um ca. 0,1% im Vergleich zur linearen Ansatzfunktion.
- Die zusätzliche Aktivierung bogenförmiger Elemente bleibt ohne Auswirkung!
- Die folgende Darstellung des Potentialfeldes hebt die Details des Potentialfeld-Verlauf am Ende der Trimmkerbe durch eine geeignete Einstellung der Legenden-Grenzwerte hervor:



Im Beispiel ist der aktuelle Widerstandswert mit **218,7 Ω** noch zu klein. D.h., die Schnittlänge **L_S** muss verlängert werden. Für die Ermittlung einer hinreichend genauen Schnittlänge benötigt man exakt drei Simulationen:

1. mit "irgendeinem" Anfangswert für **L_S**
2. mit einem in die richtige Richtung veränderten Testwert
3. zur Überprüfung eines daraus linear inter- bzw. extrapolierten Ergebniswertes für **L_S**

Frage:

- Wie groß sind die Werte **b_k** und **L_S** des Trimmchnittes für das Erreichen des Soll-Widerstandswertes von **240 Ω** ?

← →

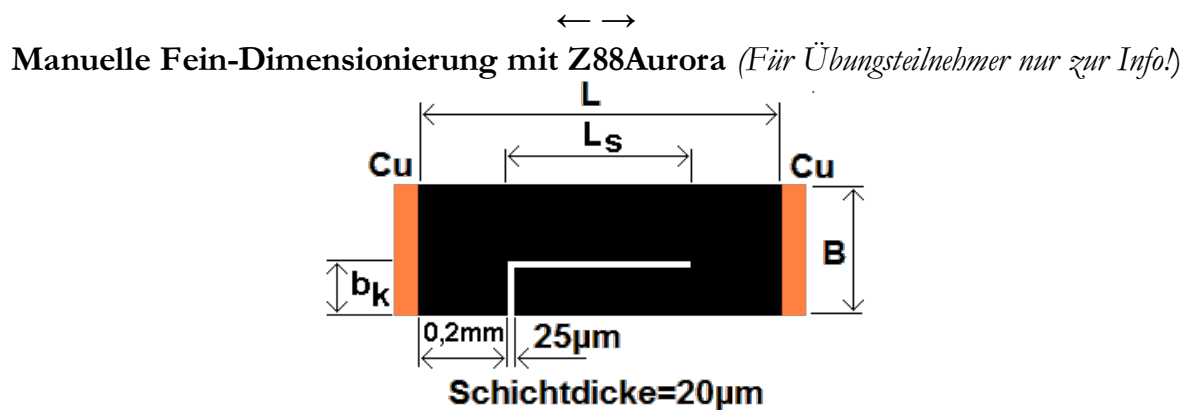
Abgerufen von „https://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrisches_Flussfeld_-_Fusion_-_Dimensionierung&oldid=23895“

▪

Software: FEM - Tutorial - Elektrisches Flussfeld - Z88 - Dimensionierung

Aus OptiYummy

↑

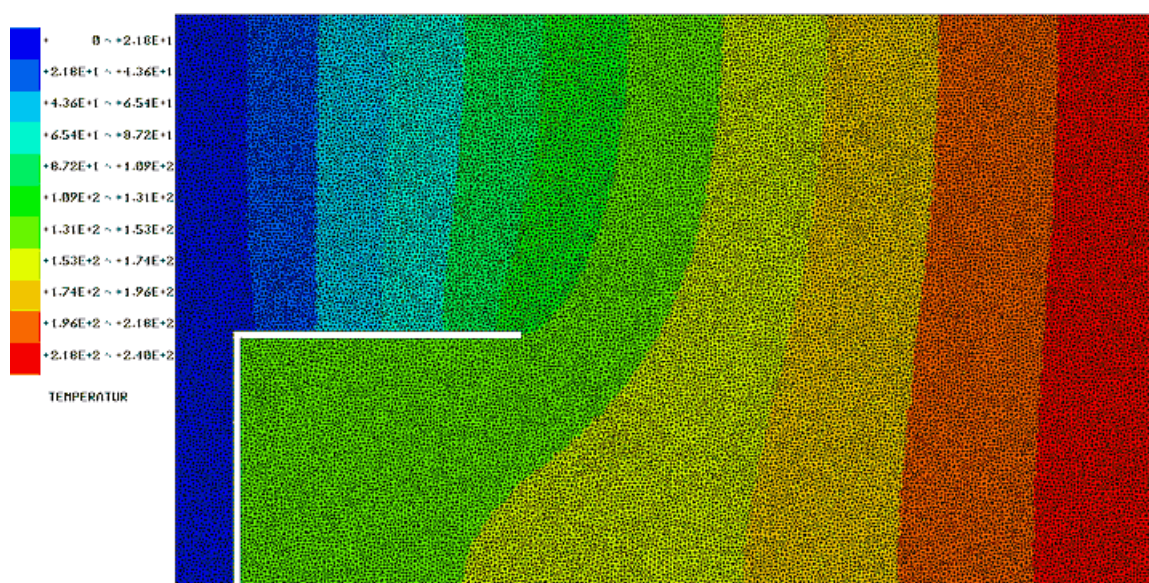


Um den Zustand der Modell-Validierung nicht zu zerstören, ergänzen wir im verwendeten CAD-Programm den L-Schnitt in einer Kopie der CAD-Datei und exportieren danach die STEP-Datei "FEM4_RN_xx.stp" (N ... Nennwert) wieder in den lokalen CAD-Projektordner "FEM4_CAD_xx".

- Die Berechnung der Einkerbungslänge b_k nehmen wir anhand der Dimensionierungsvorschrift vor:
$$b_k/\text{mm} = B/\text{mm} \cdot [0,05 + 1,05 \cdot (1 - R_0/R_{soll})] + 0,2$$
- Für die Länge L_s kann man mit irgendeiner Annahme beginnen (z.B. 1 mm).
- Es ist darauf zu achten, dass die Skizze für den Schnitt vollständig bestimmt ist!

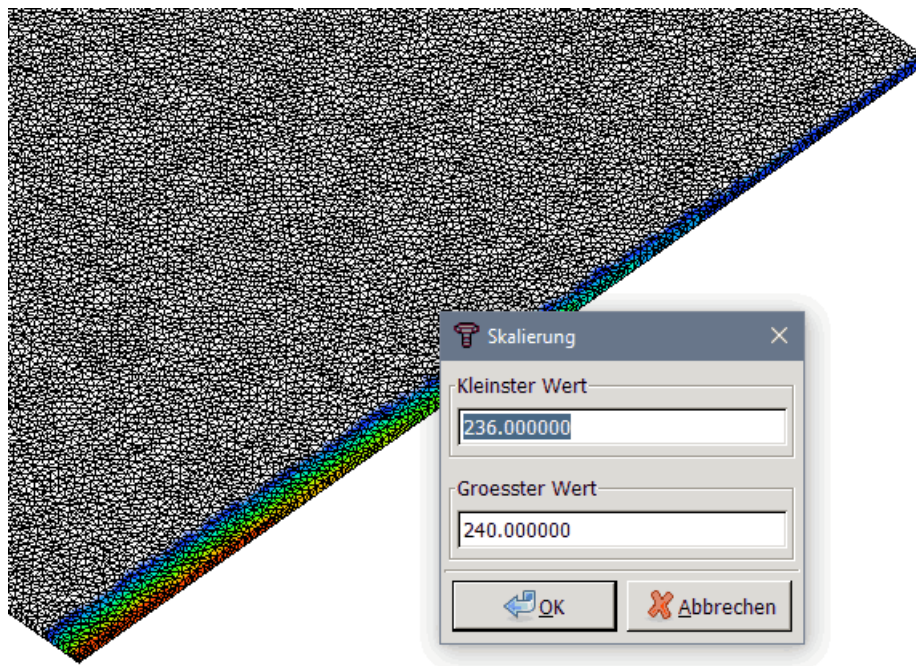
Die Simulation des aktuellen Widerstandes erfolgt in einem neuen Projekt-Ordner **FEM4_Z88_RN_xx**. Dabei ist die fehlende Symmetrie zu beachten:

- Die Einspeisung des Stroms sollte auf derjenigen Seite stattfinden, an welcher das elektrische Feld am homogensten ist, um die Spannungsdifferenzen an der Strom-Kontaktfläche möglichst gering zu halten:



- Die Spannungsdifferenzen an der Strom-Kontaktfläche kann man wieder mit der Filter-Funktion ermitteln (*Analog zur "Elektrostatik": Modellbildung und -validierung mit Z88Aurora-Thermomodul*). Im

Beispiel schwankt die Spannung um ± 2 V um den hypothetischen Mittelwert (entspricht ca. $\pm 1\%$):



- Hier fehlt an der Kontakt-Fläche zur Strom-Einspeisung im Modell ein zusätzlicher Streifen Kupfer-Material. Dieser würde auf Grund seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit für den erforderlichen Potentialausgleich sorgen.
- Als Workaround für das fehlende Material sollte man bei der Berechnung des aktuellen Widerstand im Beispiel einen um 1 % verringerten Wert der Maximalspannung benutzen!

Für die Ermittlung einer hinreichend genauen Schnittlänge benötigt man maximal drei Simulationen:

1. mit "irgendeinem" Anfangswert
2. mit einem in die richtige Richtung veränderten Testwert.
3. zur Überprüfung eines linear inter- bzw. extrapolierten Ergebniswertes für L_S

Frage:

- Wie groß sind die Werte b_k und L_S des Trimmchnittes für das Erreichen des Soll-Widerstandswertes von 240Ω ?

← →

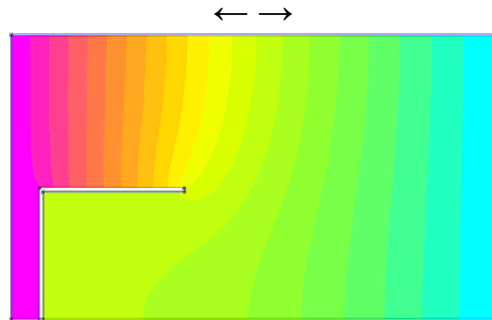
Abgerufen von „https://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrisches_Flussfeld_-_Z88_-_Dimensionierung&oldid=23914“

▪

Software: FEMM - Stromfluss - Schnittmodell

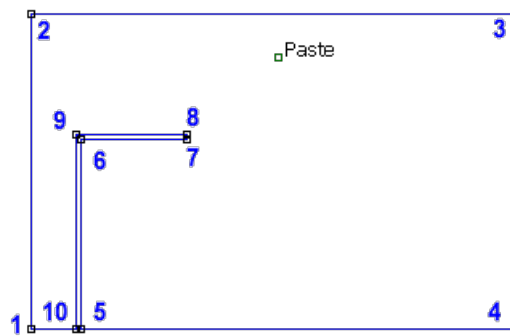
Aus OptiYummy

↑



Simulation des Trimmens - Schnittmodell

Das validierte Modell des ungetrimmten Widerstands erweitern wir um den L-Schnitt für das Trimmen. Die dafür erforderlichen Maße haben wir bereits als Parameter berechnet. Die komplette Anzahl von Eckpunkten wurde wie folgt nummeriert:



Geometrie-Erweiterung (P5..P10)

Die Linie P4-P1 muss auskommentiert werden:


```

-- Geometrie (alle Abmessungen in
µm!)=====
:
-- ci_addsegment ( x04,y04 , x01,y01 ); -- nur für
ungetrimmten Widerstand -
  ci_seteditmode ("nodes") -- kompletter L-Schnitt
*****
  x05= bz+s;      y05= 0;      ci_addnode (x05,y05);
  x06= bz+s;      y06= bk-s;   ci_addnode (x06,y06);
  x07= bz+Ls;     y07= bk-s;   ci_addnode (x07,y07);
  x08= bz+Ls;     y08= bk;     ci_addnode (x08,y08);
  x09= bz;        y09= bk;     ci_addnode (x09,y09);
  x10= bz;        y10= 0;     ci_addnode (x10,y10);
  ci_seteditmode ("segments")
  ci_addsegment ( x04,y04 , x05,y05 );
  ci_addsegment ( x05,y05 , x06,y06 );
  ci_addsegment ( x06,y06 , x07,y07 );
  ci_addsegment ( x07,y07 , x08,y08 );
  ci_addsegment ( x08,y08 , x09,y09 );
  ci_addsegment ( x09,y09 , x10,y10 );
  ci_addsegment ( x10,y10 , x01,y01 );
:

```

Vernetzungssteuerung

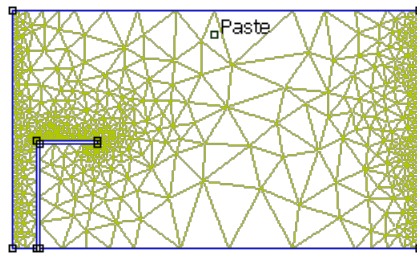
Global wurde über die Block-Property des Materialbereiches eine automatische Vernetzung gewählt. Nur an den Segmenten, wo unbedingt eine feinere Vernetzung erforderlich ist, soll dies über die zugehörigen Segment-Properties gesteuert werden. Kritisch ist das Ende des L-Schnittes (Segmente **A**=P7..P8 und **B**=P8..P9):

```

:
-- Vernetzung und Berechnung
=====
-- kritische Segmente des L-Schnitts enger vernetzen:
xs_A=x07+(x08-x07)/2; ys_A=y07+(y08-y07)/2; -- Ende des L-
Schnitts
ci_selectsegment(xs_A,ys_A);
ci_setsegmentprop("<None>",s/10 , 0 , 0 , 0 , "<None>");
ci_clearselected();
xs_B=x08+(x09-x08)/2; ys_B=y08+(y09-y08)/2; -- Oberkante L-
Schnitt
ci_selectsegment(xs_B,ys_B);
ci_setsegmentprop("<None>",Ls/50 , 0 , 0 , 0 , "<None>");
ci_clearselected();
:

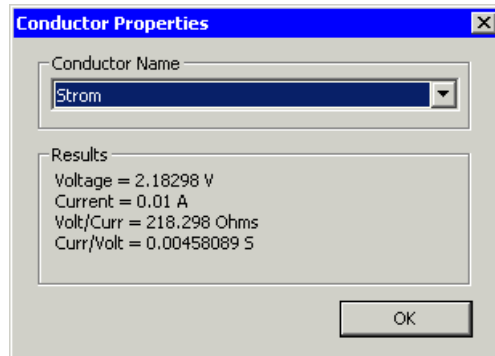
```

Damit ergibt sich ungefähr die folgende Netzqualität:



Berechnung und Ergebnisdarstellung

Mit dem bereits vorhandenem Script-Abschnitt erhält man den Widerstandswert, der als Ausgangslösung für die Suche nach der erforderlichen Schnittlänge dienen kann. Der Teilnehmer mit der Nr.00 verfügt z.B. bei $L_s=500 \mu\text{m}$ über einen Widerstand von 218 Ohm:



Man könnte relativ schnell durch schrittweise manuelle Veränderung der Schnittlänge L_s und Analyse des jeweiligen Simulationsergebnisses zu einem hinreichend genauen Wert für die erforderliche Schnittlänge gelangen. Wir wollen dieses einfache Beispiel jedoch nutzen, um im Folgenden die Lösung automatisiert mit Hilfe eines Optimierungstools zu finden. Dafür nutzen wir das Programm **OptiY**.



Abgerufen von „https://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Stromfluss_-_Schnittmodell&oldid=22498“

■

Software: FEMM - Stromfluss - OptiY-Workflow

Aus OptiYummy

↑



Simulation des Trimmens - OptiY-Workflow mit Modell -

Verfahren der numerischen Optimierung sind in der Lage, Extremwerte auf einer Zielfunktion zu finden. Kann man eine Zielfunktion für ein zu lösendes Problem definieren, so ist es möglich die Lösung dieser Problemstellung an ein Optimierungstool delegieren:

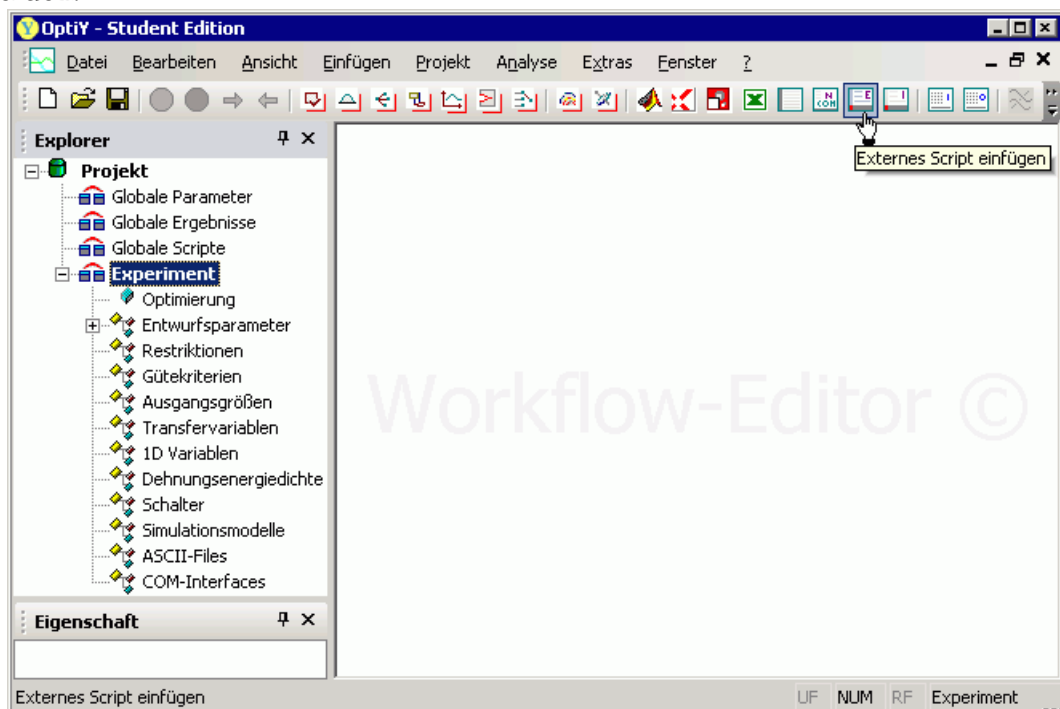
- Unser Problem ist sehr simpel - wir suchen die Schnittlänge L_s für die Erreichung eines vorgegebenen Widerstandswertes RN .
- Eine Zielfunktion sollte man als Distanz zur idealen Lösung definieren. D.h., der Zielfunktionswert **Abweichung** sollte im Beispiel Null werden, wenn ' R ' den Sollwert ' RN ' erreicht.
- Die "Fehlerquadrat-Summe" ist günstig (Positives Vorzeichen, Wichtung des Abstands und stetige Ableitung):

$$\text{Abweichung} = \text{sqr}(R - RN)$$


Wir nutzen als Optimierungstool **OptiY**, welches als **Trial Edition** zum **Download** bereitgestellt wird. Im Rahmen der Übung wird die Konfiguration des erforderlichen Optimierungsexperiments für den Einsteiger beschrieben. Vorkenntnisse zum Programm **OptiY** sind also nicht erforderlich.

Wichtig: Teilnehmer der **Lehrveranstaltung FEM** erhalten die zu nutzende Programm-Version vom Betreuer!

- Nach der wahrscheinlich problemlosen Installation unter Windows kann das Programm OptiY gestartet werden:

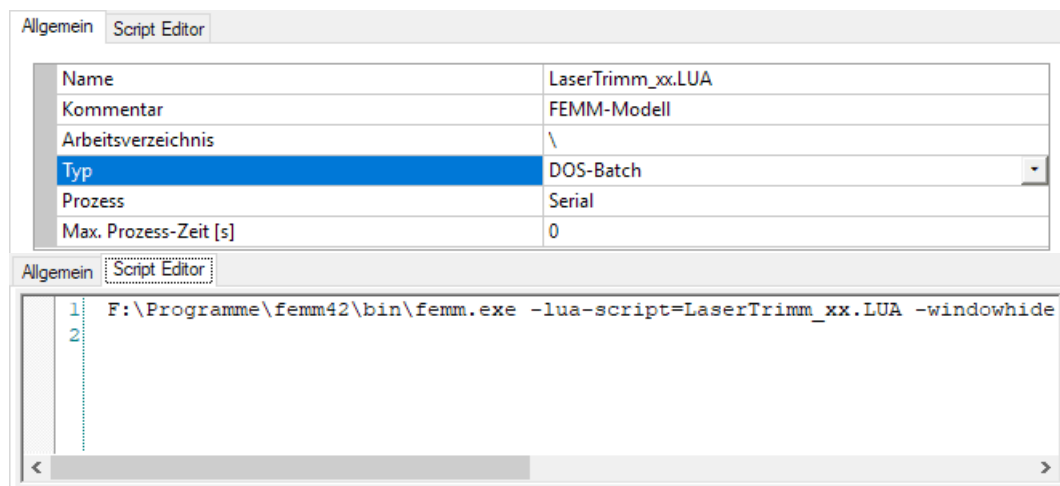


Mit dem **Workflow-Editor** (Menü **Einfügen**) von OptiY fügen wir unser LUA-Script des FEMM-**Simulationsmodells** als **Externes Script** an zentraler Stelle in den Workflow des Experiments ein:

- Über dieses Script muss das FEMM-Programm gestartet werden, welches dann seinerseits das LUA-Script ausführt.
- Die Ausführung des LUA-Scripts im FEMM kann man über das vom FEMM-Programm bereitgestellte ActiveX-Interface veranlassen.
- Ein Doppelklick auf das platzierte Symbol  öffnet den erforderlichen Konfigurationsdialog.
- **Achtung:** Als Arbeitsverzeichnis sollte man grundsätzlich nur \ (Backslash) anstatt einer absoluten Pfadangabe benutzen. Dann wird der Ordner benutzt, in dem die .OPY-Datei gespeichert ist.

Im OptiY werden mehrere Script-Sprachen unterstützt. Beispielhaft soll dies im Folgenden nur für das **DOS-Batch Script** demonstriert werden:

- Im fast in Vergessenheit geratenen Betriebssystem **MS-DOS** konnte man mit **BAT**-Dateien automatisiert eine Folge von MS-DOS-Kommandos ausführen. Das funktioniert auch noch unter Microsoft Windows:



```
C:\Programme\femm42\bin\femm.exe -lua-script=LaserTrimm_xx.LUA -windowhide
```

- Ist das FEMM-Programmverzeichnis nicht Bestandteil des Suchpfades (PATH), so kann die *femm.exe* nur mit der vollständigen Pfad-Angabe aufgerufen werden!
- **Hinweis:** Im PC-Pool findet man FEMM im Standardpfad der Installation: C:\femm42 , es **entfällt** also der Unterordner **Programme** im Pfad.
- Enthält der Programmpfad Leer- oder Sonderzeichen, so muss er in Anführungszeichen eingeschlossen werden (z.B.: "c:\Program Files\..\femm.exe").
- Der komplette Pfad der LUA-Datei muss nicht angegeben werden, wenn sich diese Datei im gleichen Ordner befindet, wie die OptiY-Projektdatei (.opy).
- Der Parameter **"-windowhide"** vermeidet während der Optimierung das periodische "Fenster-Geflacker" durch eine Unterdrückung des FEMM-Programmfensters.

Hinweise zum LUA-Script-Anpassung:

- Wird die Abarbeitung des LUA-Scripts über *DOS-Batch* veranlasst, so endet das FEMM-Programm

nicht selbstständig. Das LUA-Script muss deshalb abschließend um den *exit*-Befehl erweitert werden:

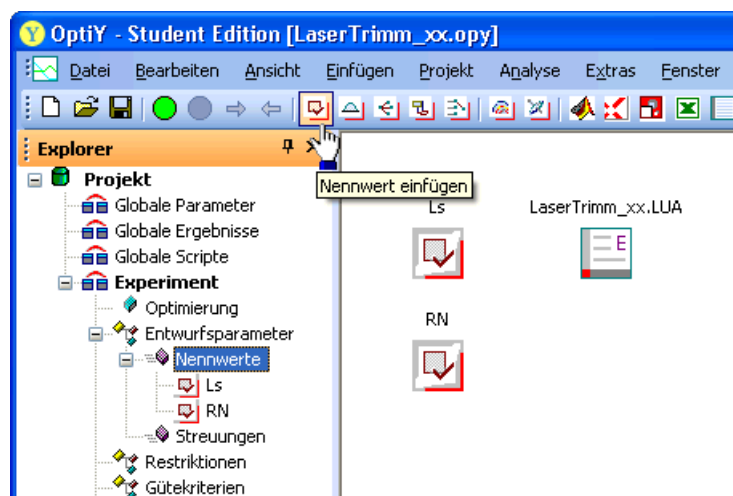
```
exit();
```

- Möchte man das gleiche LUA-Script ohne OptiY autonom im FEMM benutzen, so muss man natürlich diesen *exit*-Befehl "auskommentieren", damit das FEMM nach Script-Abarbeitung nicht sofort endet!
- Um die FEMM-Berechnung während der Optimierung wirklich ohne Fenster-Geflacker auszuführen, muss man zusätzlich noch das Öffnen der LUA-Console abschalten:

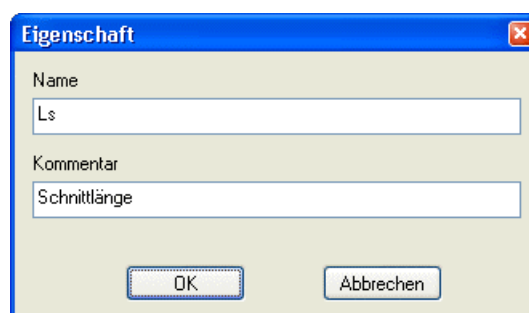
```
-- showconsole(); -- LUA-Console öffnen, falls Script als Datei ausgeführt  
hideconsole(); -- LUA-Console verstecken
```

Es ist möglich, im OptiY-Workflow die Verbindung mit allen Eingabe-Parametern des Modells herzustellen. Innerhalb dieser Übung beschränken wir uns aus Aufwandsgründen auf die zwei wesentlichen Parameter **Schnittlänge Ls** und **Sollwert RN**:

- Für jeden dieser Parameter ist im Workflow ein Nennwert einzufügen:



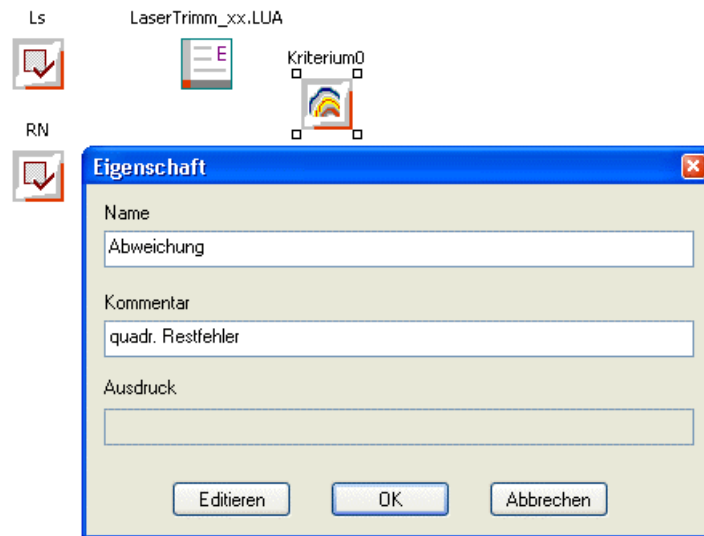
- Ein Doppelklick auf das generierte Symbol öffnet den Konfigurationsdialog für den Nennwert. Hier sollte man einen sinnvolle Namen und Kommentare vergeben. Der Name muss nicht, sollte aber mit dem Parameter-Namen im Modell übereinstimmen:



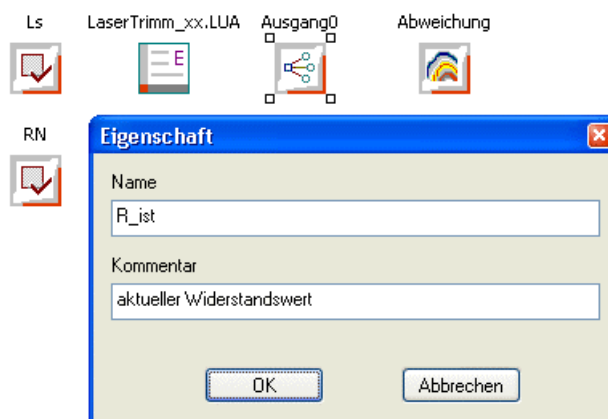
- Mit den noch fehlenden Verbindungen zwischen dem FEMM-Modell und den beiden im Workflow

definierten Nennwerten beschäftigen wir uns später!

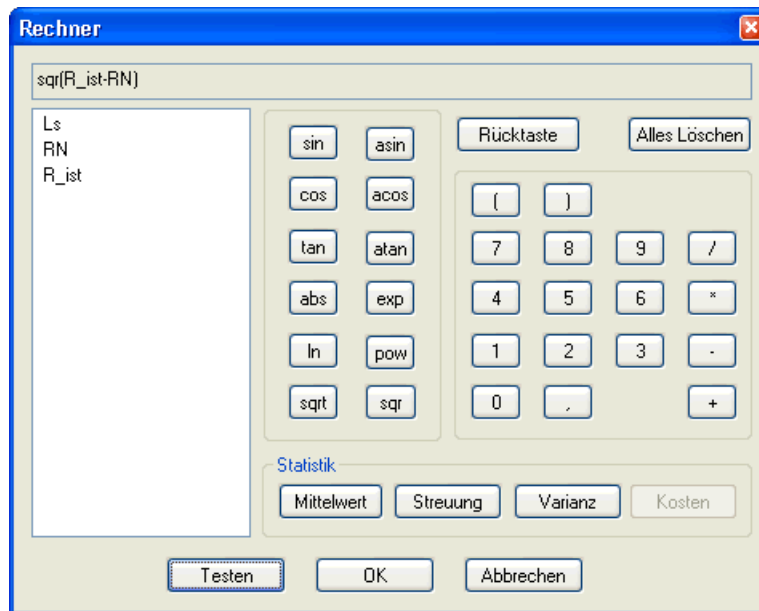
- Im OptiY-Workflow muss das Gütekriterium **Abweichung** als berechneter Wert der Zielfunktion zur Verfügung stehen (Einfügen: Gütekriterien):



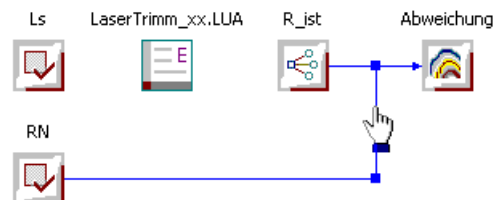
- Den Wert dieses quadratischen Restfehlers könnten wir auf dem Niveau des Workflows noch nicht berechnen. Dort steht bisher nur der Wert des Sollwerts **RN** zur Verfügung.
- Im OptiY-Workflow müssen alle in den Modellen berechneten Ausgangsgrößen zur Verfügung gestellt werden, die man für die Berechnung der Gütekriterien benötigt (Einfügen: Ausgangsgrößen):



- Nun kann man die **Abweichung** aus **RN** und **R_ist** berechnen. Nach erneutem Doppelklick auf das Kriterium **Abweichung** aktiviert man mit **Editieren** eine Art "Taschenrechner". Mit diesem klickt man die erforderliche Formel zusammen (Doppelklick zum Einfügen einer Workflow-Größe):



- Die Abhängigkeiten zwischen dem Gütekriterium und den zugrunde gelegten Größen widerspiegelt sich danach im Workflow. Man kann die Verbindungslinien mit dem Cursor noch an anschaulichere Positionen schieben:



Achtung: Den aktuellen Zustand des OptiY-Versuchsstands speichern die Teilnehmer der Lehrveranstaltung als Datei **LaserTrimm_xx.opy** mit **xx**=Teilnehmer-Nummer.



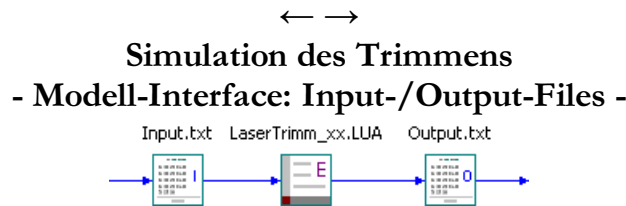
Abgerufen von „https://optiummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Stromfluss_-_OptiY-Workflow&oldid=25734“

■

Software: FEMM - Stromfluss - OptiY-Modellinterface

Aus OptiYummy

↑



Nun fehlt noch die Ankopplung der Nennwerte und der Ausgangsgröße an das FEMM-Modell. Dazu verlassen wir das OptiY und arbeiten wieder mit dem FEMM-Programm samt zugehörigem Script-Editor.

Es existieren unterschiedliche Varianten, wie ein Optimierungstool die Parameterwerte (*Input*) eines Modells modifizieren und auf die damit berechneten Ergebniswerte (*Output*) zugreifen kann. Eine sehr allgemeine und übersichtliche Methode ist die Benutzung von ASCII-Textdateien für den Input/Output eines Modells:

- Das Optimierungstool schreibt die aktuellen Parameterwerte an die dafür vorgesehenen Stellen in eine Textdatei.
- Aus dieser Textdatei erhält das Modell seine Werte für eine Simulationsrechnung.
- Die berechneten Ergebnisgrößen stehen nach der Simulationsrechnung wieder an definierter Stelle in einer Textdatei.
- Das Optimierungstool liest diese Ergebniswerte aus der Textdatei und berechnet daraus die erforderlichen Änderungen der Parameterwerte für eine weitere Verbesserung des Modellverhaltens.
- Der Zyklus beginnt dann von vorn, bis keine weitere Verbesserung mehr erreichbar ist.

Es ist im Allgemeinen besser, eine strikte Trennung zwischen Parametern (*Input-File*), Modell (*LUA-Script*) und Ergebnisgrößen (*Output-File*) vorzunehmen. In diesem Sinne soll das LUA-Script nun umgestaltet werden:

1. Input-Datei für Vorgabe-Parameter

Bisher sind die Input-Parameter Bestandteil des Modell-Scripts. Die Input-Parameter sollen als separate Textdatei gestaltet werden. Für diese Übung nennen wir die ASCII-Textdatei **Input_xx.txt** (mit **xx**=Teilnehmer-Nummer). Die Datenwerte in dieser Textdatei müssen so strukturiert werden, dass sowohl das Optimierungsprogramm als auch das Modellsript problemlos darauf zugreifen können:


```
s
25
Ls
500
bz
200
d
20
RF
100
Pmax
6.2
RN
240
Szul
0.02
PV
0.2
SF
0.3
```

Achtung: Die Teilnehmer-Nummer **xx** kommt hier nicht in die Input-Datei, sondern bleibt Bestandteil des Modells!

2. Einlesen der Daten im LUA-Script

Die ursprünglichen Parameterwerte sollte man mit Standardwerten versehen und auskommentieren. Damit weiß man auch später noch, um welche Parameter es sich handelt.

Achtung: Die Teilnehmer-Nummer **xx** darf nicht auskommentiert werden!

```

-- Funktionelle und technologische Parameter (Standardwerte)
xx=00; -- Teilnehmer-Nr. 00 bis 30
-- s=25; -- Schnittbreite des Laser-Strahls [µm]
-- Ls=500; -- aktuelle Länge L-Schnitt [µm]
-- bz=200; -- Breite eines Zuschlags für Fertigung [µm]
-- d=20; -- Schichtdicke in µm = Dicke 2D-Elemente
-- RF=100; -- Nennwert Flächenwiderstand der Paste [Ohm/Quadrat]
-- Pmax=6.2; -- max. zul. Leistungsdichte in Paste [W/cm²]
-- RN=240; -- Nennwert nach Trimmen [Ohm]
-- Szul=0.02; -- zulässige relative Toleranz von RN
-- PV=0.2; -- max. Verlustleistung im Betrieb [W]
-- SF=0.3; -- Fertigungsstreuung ungetrimmter Widerstand (rel.)
-- Parameter aus Textdatei einlesen mit Fehlertest
in = openfile("Input_xx.txt","r"); -- in LUA-Ordner Input-
Datei öffnen zum Lesen
if in then -- wenn Datei geöffnet, dann Werte einlesen
read(in, "*l");
s = read(in, "*l", "*n");
read(in, "*l");
Ls = read(in, "*l", "*n");
read(in, "*l");
bz = read(in, "*l", "*n");
read(in, "*l");
d = read(in, "*l", "*n");
read(in, "*l");
RF = read(in, "*l", "*n");
read(in, "*l");
Pmax = read(in, "*l", "*n");
read(in, "*l");
RN = read(in, "*l", "*n");
read(in, "*l");
Szul = read(in, "*l", "*n");
read(in, "*l");
PV = read(in, "*l", "*n");
read(in, "*l");
SF = read(in, "*l", "*n");
else print("Could not open Input_xx.txt"); end;
closefile(in);
-- Berechnete Geometrie- und Material-Parameter
:

```

Die Input-Zeilen mit den Parameter-Namen werden jeweils überlesen. Der auf der nächsten Zeile folgende Wert wird dem im Script definierten Parameter-Bezeichner zugewiesen.

Achtung: Es ist unbedingt zu überprüfen, ob nach der Verwendung einer Input-Datei mit den gleichen Parameter-Werten wirklich die gleichen Ergebnisse berechnet werden!

3. Output-Datei für Simulationsergebnisse

Die für die Bewertung der Simulation relevanten Ergebnisgrößen müssen ebenfalls in eine Textdatei geschrieben werden. In unserem Beispiel ist das nur der aus der aktuellen Parameterbelegung berechnete Widerstand der Anordnung:

```

:
print ("R=", R, "[Ohm]") -- Werte in Outputfeld der LUA-
Konsole
print (" mit v=", v, "[V]");
print (" und i=", i, "[A]");
out = openfile("Output_xx.txt", "w"); -- Output-Datei in LUA-
Ordner
write(out, "R=", "\n", R, "\n"); -- Name und Wert auf separate
Zeilen
closefile(out);

```

Die erforderlichen File-Operationen werden an das Ende des LUA-Scripts platziert.

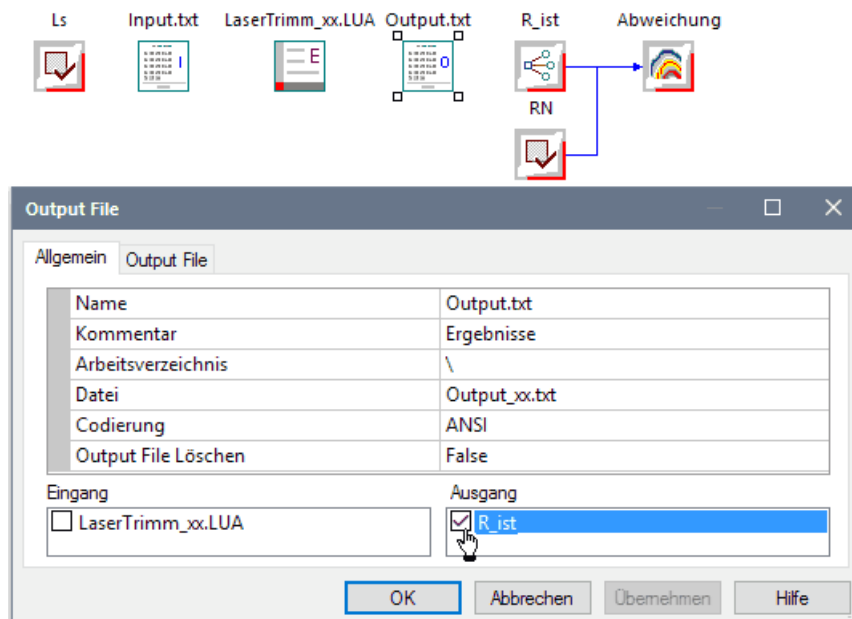
4. Verifizierung des Modells

Nach diesen Änderungen muss nach Ausführung des kompletten LUA-Scripts im FEMM in der Datei **Output_xx.txt** der richtige Wert für den aktuellen Widerstand stehen.

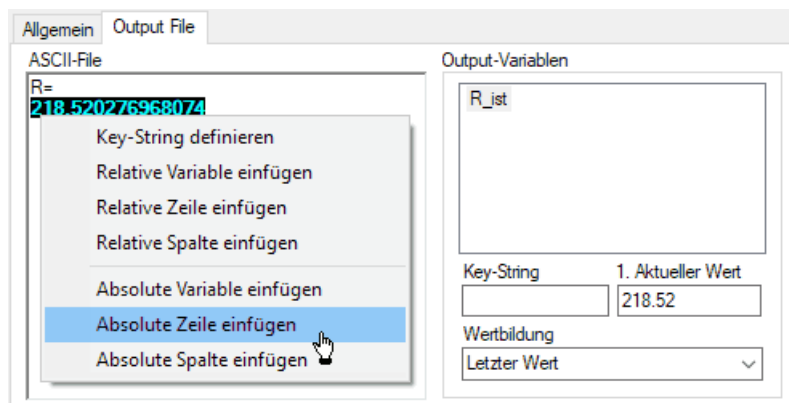
5. Einbindung in den OptiY-Workflow

Falls es nicht mehr geöffnet ist, so öffnen wir erneut OptiY mit der Datei **LaserTrimm_xx.opy** und ergänzen nun die fehlende Einbindung des Modells.

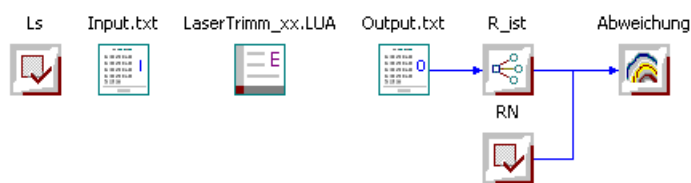
- Einfügen der Symbole von Input- und Output-File auf dem Workflow, Benennung und Zuordnung der konkreten ASCII-Textdatei:



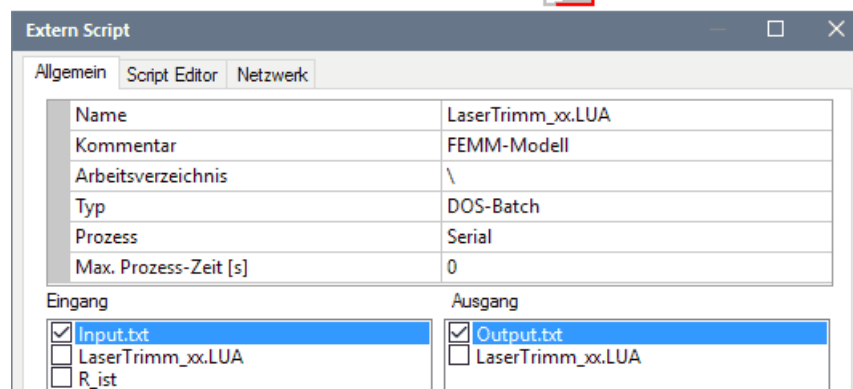
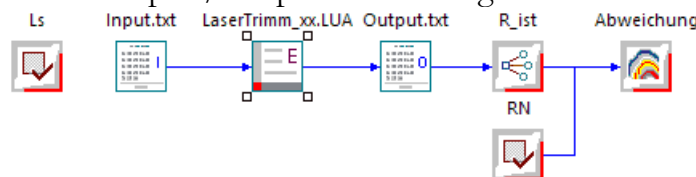
- **Wichtig:** Es muss als Datei die jeweilige bereits vorhandene .txt-Datei gewählt werden (nicht nur den Dateinamen manuell eintragen!).
- Bevor wir die Nennwerte des Workflows mit der Input-Datei verbinden, beginnen wir mit der Zuordnung der einen Output-Verbindung zur Output-Datei. Wir markieren dazu im Dialogfenster des Outputfiles die zu verbindende Größe **R_ist** und aktivieren damit das "Zuordnen":



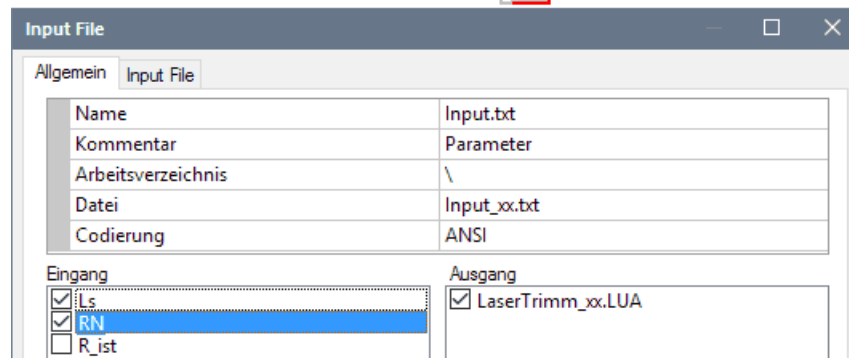
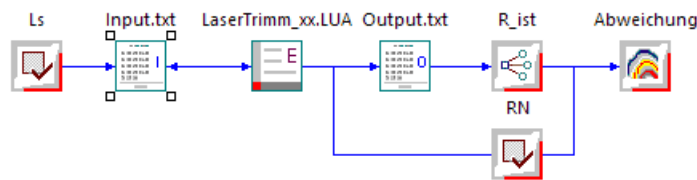
- Wir definieren die Position des Zahlenwertes über die absolute Zeilenposition innerhalb der Datei:
 - Wir markieren dazu die gesamte Zahl. Der Klick mit der rechten Maustaste führt zum Definitionsmenü.
 - Der Zahlenwert wird mittels **Absolute Zeile einfügen** der Ausgangsgröße ***R_ist*** zugeordnet.
- Die Zuordnung der Workflow-Ausgangsgröße ***R_ist*** zur Output-Datei widerspiegelt sich im Workflow:



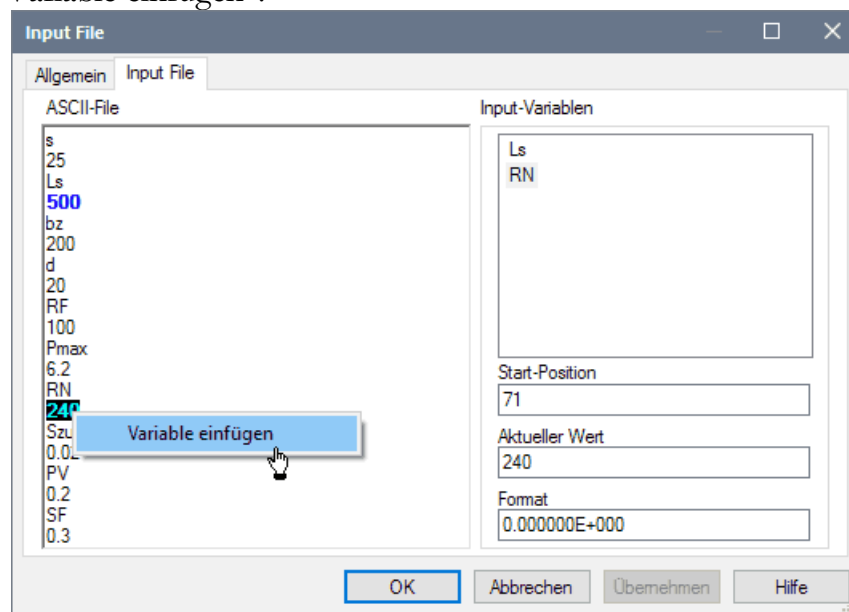
- Die im Workflow noch fehlende Anbindung der In- und Outputdateien an das Modell wollen wir nun nachholen. Dazu öffnen wir durch Doppelklick den Script-Dialog zu ***LaserTrimm.LUA*** und markieren die entsprechenden Input-/Output-Verbindungen:



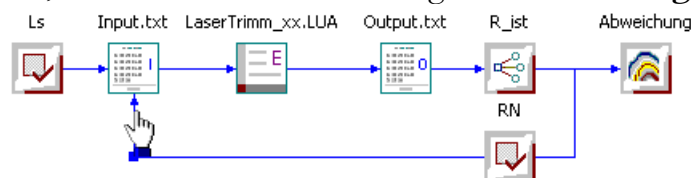
- Es fehlt noch die Zuordnung der Schnittlänge ***Ls*** und des Nennwiderstands ***RN*** zur Input-Datei. Nach Doppelklick auf ***Input.txt*** markiert man diese Input-Verbindungen:



- Danach muss über den Button der **Zuordnen**-Dialog aufgerufen werden. Hier erhält OptiY die Information, wo die beiden Parameter-Werte in die Input-Datei einzutragen sind. Die Zuordnung innerhalb der Input-Datei funktioniert nach dem gleichen Schema, wie in der Output-Datei (Input-Variable wählen und zugehörigen Wert markieren). Jedoch existiert im Menü der rechten Maustaste nur die Funktion "Variable einfügen":



- Leider führt die automatische Trassierung der **RN**-Verbindungen zu einem falschen Eindruck vom Datenfluss. Das kann man manuell korrigieren, indem man eine Verbindungslinie auswählt und die Marker sinnvoll verschiebt. Im Beispiel erkennt man danach auch im Workflow, dass **RN** sowohl in die Input-Datei geschrieben, als auch für die Berechnung der **Abweichung** verwendet wird:



Damit ist der Workflow für das Optimierungsexperiment fertig. Im nächsten Schritt werden wir das Experiment konfigurieren.



Abgerufen von „https://optiymmy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Stromfluss_-_OptiY-Modellinterface&oldid=24870“

■

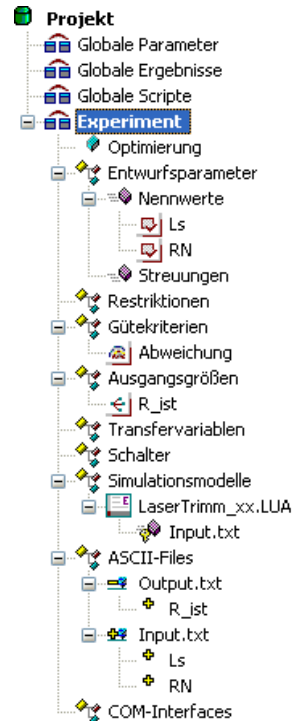
Software: FEMM - Stromfluss - OptiY-Experimentkonfiguration

Aus OptiYummy



Simulation des Trimmens - Experimentkonfiguration

Parallel zur Erstellung der Workflow-Grafik entstand in Form einer Baumstruktur die Grundlage für die Konfiguration eines Experiments innerhalb des OptiY-Projektes. Nach Wahl einer Komponente in der Baumstruktur erscheinen die zugehörigen Parameter im Eigenschaft-Fenster:



1. Optimierungsverfahren

- Wir nutzen das Hooke-Jeeves-Verfahren. Dieses ermittelt durch Abtastschritte die aktuelle Steigung der Zielfunktion im Arbeitspunkt und bewegt sich dann in Richtung des steilsten Abstiegs bis zum Minimum.
- Die Schrittweite dieser Abtastschritte wollen wir manuell beeinflussen.
- Wir wählen vorläufig 100 Simulationsläufe. Bei Bedarf kann man diesen Wert dann verändern.
- Das Optimierungsverfahren soll nicht selbst entscheiden, wann das Optimum erreicht ist:

Eigenschaft	
Optimierung	
Automatischer Stop	False
Optimierungsschritte	100
Startschrittweite	Manuell
Verfahren	Hooke-Jeeves-Verfahren

2. Entwurfparameter (Nennwerte)

- Hier kann man aus Sicht des Optimierungsverfahren zwei Typen von Entwurfparametern unterscheiden (Variable / Konstante). Bei der Schnittlänge **Ls** handelt es sich um eine Variable. Ihr Wert soll automatisch solange verändert werden, bis der Istwert **R_{ist}** des Widerstands mit dem vorgegebenen Sollwert **RN** übereinstimmt.
- Alle Wert-Angaben sind in Mikrometer. Das sollte man als Einheit eintragen, auch wenn OptiY die Maßeinheit nirgendwo berücksichtigt.
- Der Wert von **Ls** kann sich kontinuierlich ändern. Das wird mit "Genauigkeit=0" beschrieben.
- Als Startwert ist ein sinnvoller Wert > Null zu wählen. Die zulässige Unter-/Obergrenze richtet sich hier nach der Geometrie des Objekts.
- Der kleinstmögliche Startwert für die Abtastschrittweite wird durch das "Rauschen" der Modellberechnung bestimmt. Dieses liegt bei FEM-Modellen mit sich ändernden Netzen durchaus im Bereich von 1%.
- Eine zu große Abtastschrittweite erfasst nicht mehr die Details der Zielfunktion und kann lokale Anstiege nicht mehr identifizieren. Im Beispiel wurde die Startschrittweite auf 1% des Startwertes gesetzt:
- Der Soll-Nennwert **RN** von 240 Ohm darf vom Optimierungsverfahren nicht verändert werden (Typ=Konstante).
- Die Einheit **Ohm** sollte unbedingt eingetragen werden:

Eigenschaft	
Nennwert Daten	
Name	Ls
Einheit	µm
Kommentar	Schnittlänge
Werte	
Wert	500
Startschrittweite	5
Untergrenze	0
Obergrenze	1500
Genauigkeit	0
Typ	Variable

Eigenschaft	
Nennwert Daten	
Name	RN
Einheit	Ohm
Kommentar	Nenn-Sollwert
Werte	
Wert	240
Typ	Konstante

3. Maßeinheiten komplettieren

Für das Gütekriterium **Abweichung** [Ohm²] und die Ausgangsgröße **R_ist** [Ohm] sollte man die Maßeinheiten ergänzen:

Eigenschaft	
Kriterium Daten	
Name	Abweichung
Einheit	Ohm ²
Kommentar	quadr. Restfehler
Werte	
Gewichtsfaktor [0..1]	1
Optimierungsziel	Minimieren
Letzter Wert	0

Gewichtsfaktor=1 hat nur eine Bedeutung, wenn die Gesamtgüte sich aus mehreren gewichteten Gütekriterien zusammensetzt.



Abgerufen von „https://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Stromfluss_-_OptiY-Experimentkonfiguration&oldid=20384“

■

Software: FEMM - Stromfluss - OptiY-Experimentdurchführung

Aus OptiYummy

↑

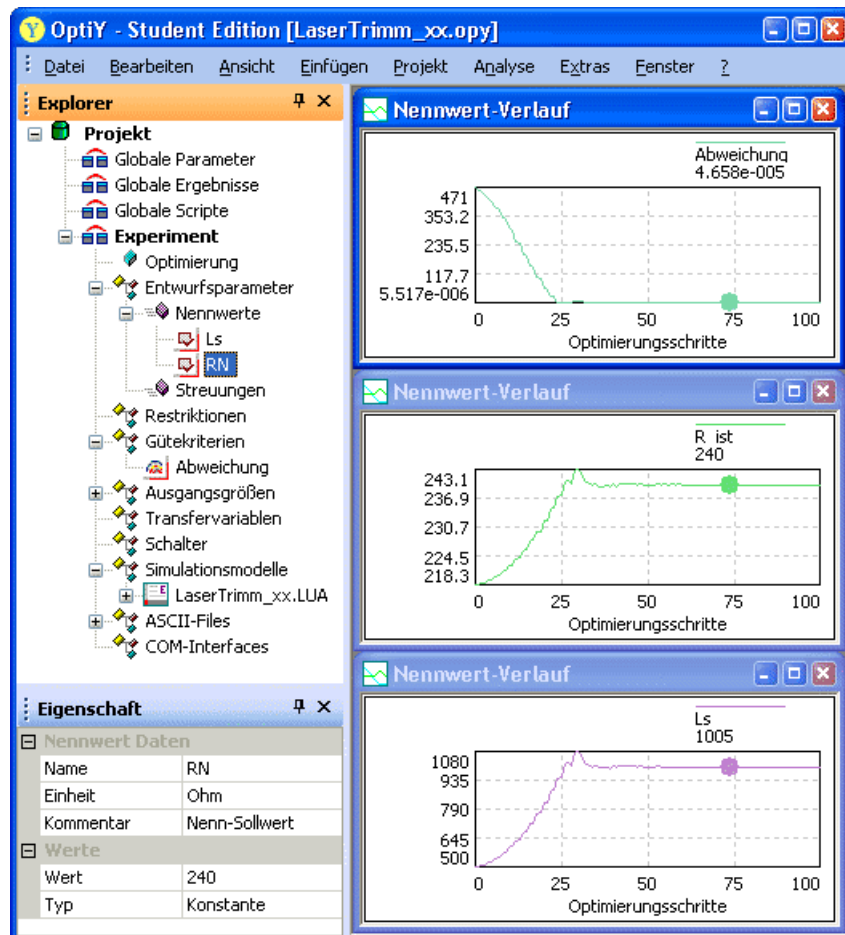


Simulation des Trimmens - Experimentdurchführung

1. Visualisierung des Experimentverlaufs

- Bisher wird der Grafikbereich von OptiY durch das Fenster des Workflows belegt. Dieses kann man nun schließen (**Ansicht > Workflow**).
- Dann zieht man mit dem Cursor per *Drag&Drop* die interessierenden Experimentgrößen in den Grafikbereich (z.B. **Ls**, **R_{ist}**, **Abweichung**). Dabei ist es hier günstig, für jede Größe ein Fenster vorzusehen (immer neben vorhandenen Fenstern ablegen!).
- Eine übersichtliche Anordnung erhält man meist durch **Fenster > Nebeneinander**.

2. Start des Experiments

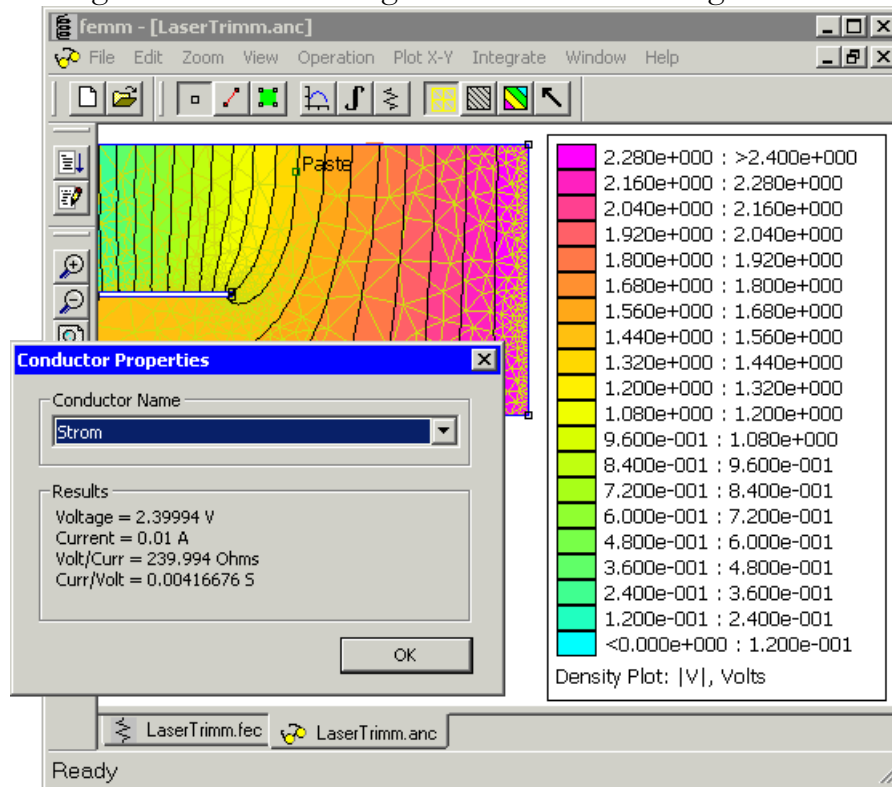


Die Suche der optimalen Lösung beginnt nach dem Starten der Optimierung (**Projekt > Start** [F5]). Wenn der Aufruf von FEMM funktioniert und die Verbindungen zu den Input-/Output-Dateien richtig hergestellt wurden, sollte nach ca. 50 Schritten die optimale Schnittlänge **Ls** gefunden sein. Stößt der zu optimierende Nennwert **Ls** bei der Suche z.B. an seine obere Grenze, so kann diese im geometrisch-funktionell sinnvollen Maße erhöht werden. Wird innerhalb möglicher Grenzwerte keine Lösung mit der Abweichung=Null gefunden, so gibt es keine solche Lösung, das Modell ist falsch oder die Ziele wurden falsch formuliert!

3. Auswertung des Experiments

- Die Werte der Optimal-Lösung erhält man über **Analyse > Bestwert > Parameter anzeigen**
- Mit diesen Werten kann man einen einzelnen Aufruf des Simulationsprogramms starten (**Analyse > Bestwert > Simulation durchführen**). Jedoch wird das FEMM-Programm nach der Abarbeitung des Scripts sofort wieder beendet:
 - Die Werte des Optimums stehen jetzt aber in der Datei **Input.txt**.
 - Falls das LUA-Script mit exit-Kommando endet, muss dieses "auskommentiert" werden!
 - Wir starten das FEMM-Programm im Windows-Betriebssystem und öffnen darin unser LUA-Script zur Ausführung. Nun stehen alle Ergebnisse im FEMM-Programm zur Verfügung:

Name	Werte	Einheit	Kommentar
Ls	1005.31	µm	Schnittlänge
RN	240	Ohm	Nenn-Sollwert
Abweichung	5.51686e-006	Ohm ²	quadr. Restfehler



- Im Rahmen dieser Übung **nicht** durchführen: Die optimale Lösung kann man im OptiY auch als Startwert für weitere Experimente übernehmen (**Analyse > Bestwert > Parameter übernehmen**).
- Als einzusendendes Ergebnis speichern die Teilnehmer der Lehrveranstaltung im OptiY die Datei des Versuchsstands mit dem dargestellten Lösungsverlauf.

← →

Abgerufen von „https://optiummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Stromfluss_-_OptiY-Experimentdurchfuehrung&oldid=20386“

■