

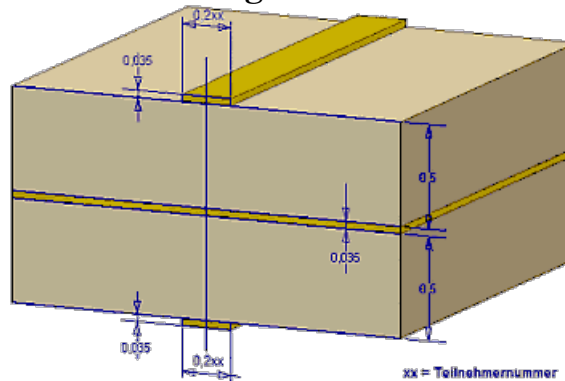
Software: FEM - Tutorial - Elektrostatik

Aus OptiYummy

↑

↔

3. Komplex im FEM-Tutorial Elektrostatisches Feld Autor: Dr.-Ing. Alfred Kamusella



*Das einzige Mittel, den Irrtum zu vermeiden, ist die Unwissenheit.
- Jean-Jacques Rousseau -*

1. Problemstellung

- Kapazitätsbelag eines Leiters

2. FEM als Diskretisierungsmethode

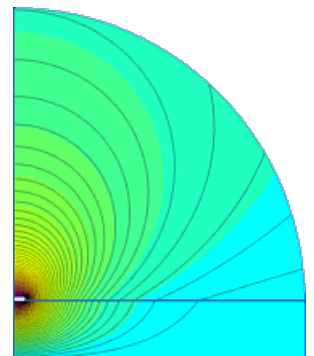
- Elementformen
- Ansatzfunktionen
- Potentialfeld-Analogien

3. Elektrostatisches Feld mit FEMM

- Erste Schritte im Programm FEMM
- Problemdefinition
- Geometrie-Modellierung
- Material und Properties
- Loads und Constraints
- Vernetzung, Berechnung und Auswertung
- Open Boundary Problems

4. FEM-Scripting und Parametrisierung

- Scriptsprachen für FEM (LUA in FEMM)
- Parametrisiertes Modellsript
- LUA-Script für Open Boundary Problem



5a. Elektrostatisches Feld mit thermischer Simulation in Autodesk Fusion 360

- Parametrisiertes CAD-Modell
- Elektrostatische Simulation

5b. Elektrostatisches Feld mit Z88Aurora -> nur zur Information!

- Modellbildung und -validierung mit Z88Aurora-Thermomodul
- Komplettes Analyse-Modell
- Strukturierte Vernetzung

Einzusendende Ergebnisse:

- Teilnehmer der Lehrveranstaltung **Praktische Einführung in die FEM** laden ihre Ergebnisse bitte bei Opal hoch.
- In einer vergleichenden tabellarischen Auswertung (Antwort-PDF) aller FE-Simulationen ist der "glaubwürdigste" Wert der Leiterzug-Kapazität zu ermitteln.
- Die in *Fusion 360* erstellte Konstruktion ist mittels **Datei > Exportieren > (Typ=*.f3d auf dem eigenen Computer)** als Fusion-Archivdatei zu speichern: **Leiter_xx.f3d**.
- Für den Upload bei Opal mit (**xx**=Teilnehmer-Nummer 01...99) ist ein Archiv-File **FEM3_xx** (als .zip) mit allen erforderlichen **FEMM-Dateien**, **LUA-Scripten**, der **Fusion-Konstruktion** und der **PDF-Datei** zu senden.
- Einsendeschluss ist die Nacht vor dem nächsten Übungskomplex. Die Nacht endet um 10:00 Uhr.

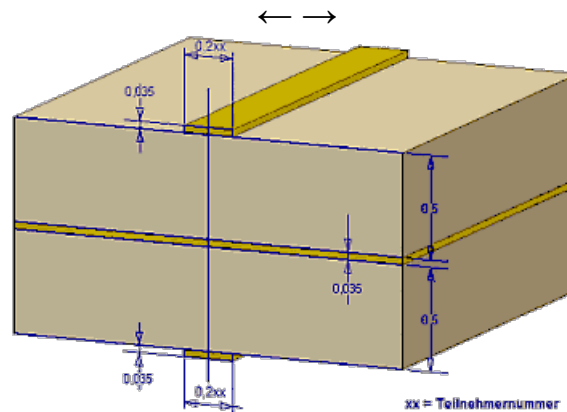
← →

Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrostatik&oldid=25725“

Software: FEM - Tutorial - Elektrostatik - Z88 - Kapazitaet

Aus OptiYummy

↑



Aufgabe: Kapazitätsbelag eines Leiters

Mehrebenen-Leiterplatten besitzen in der Mitte eine Masse-Fläche. Abstrahiert ergibt sich dabei obiger Aufbau:

- Die Kupferschichten sind jeweils 35 μm dick.
- Das Laminat FR4 zwischen Masse-Ebene und Leiterbahnen ist jeweils 0,5 mm dick.
- Die Breite einer Leiterbahn beträgt in Abhängigkeit von der Teilnehmernummer 0,2xx mm (xx=01...99).

Gesucht ist der Kapazitätsbelag einer Leiterbahn in Bezug auf die Masse-Ebene [pF/m]. Von den Materialien sind folgende Eigenschaften bekannt:

- Leiterplatten-Abmessung: > 100 mm x 160 mm
- Dielektrizitätskonstante $\epsilon_0 = 8,854\text{E-}12 \text{ (A}\cdot\text{s)/(V}\cdot\text{m)}$
- Luft: $\epsilon_r = 1$
- FR4-Laminat: $\epsilon_r = 4,7$
- Kupfer: $\epsilon_r = \infty$ (elektrischer Leiter!)

Achtung:

- Unterscheiden sich die Zahlenwerte in einem Modell um zu viele Größenordnungen, so rechnen die verwendeten Solver ungenau oder die Lösungen werden instabil.
- Ein typischer Anfängerfehler ist das grundsätzliche Verwenden einer großen Zahl als Ersatz für den Wert "Unendlich". Man sollte jedoch einen Wert wählen, welcher in Bezug auf die "normalen" Werte hinreichend groß ist.
- Da die normalen Werte für die Dielektrizitätskonstante bei $1\text{E-}12$ liegen, genügen Werte von z.B. $1\text{E-}6$ als Ersatz für Unendlich!



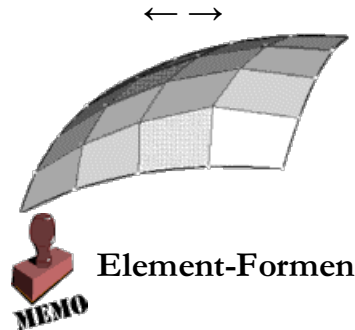
← →

Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrostatik_-_Z88_-_Kapazitaet&oldid=23813“

Software: FEM - Tutorial - Diskretisierung - Z88 - Elementformen

Aus OptiYummy

↑



Unsere Welt lässt sich in eine Objekt-Hierarchie gliedern, deren einzelne Objekte wir als Kontinuum betrachten können (solange wir uns nicht in atomare Strukturen hinunter begeben). Wir können (mit etwas Idealisierung) Objekte unterschiedlicher räumlicher Dimension unterscheiden:

- **1-dimensional:** Linienobjekte (z.B. Fäden) mit Anfangs- und Endpunkt
- **2-dimensional:** Flächenobjekte (z.B. Membranen) mit Randlinie und -punkten
- **3-dimensional:** Volumenobjekte (z.B. Quader) mit Mantelflächen, Kanten und Eckpunkten

Grenzen wir ein homogenes Teilsystem ab (z.B. aus einem einheitlichen Stoff bestehend), so lässt sich die Energiebilanz solch eines Teilsystems als partielle Differentialgleichung beschreiben. Der Zustand jedes Punktes dieses Kontinuums ist Funktion:

- eines Anfangszustandes,
- der verflorenen Zeit und
- der Wechselwirkung mit der Umgebung.

Für Spezialfälle lassen sich auf dem Niveau des Kontinuums diese Ansatzfunktionen (partielle DGL) formulieren und analytisch lösen (nur für einfachste Geometrien!). Um auch das Verhalten komplexerer Objekte numerisch berechnen zu können, geht man den Weg der Diskretisierung, d.h. man reduziert das Kontinuum auf die Behandlung endlich vieler Punkte.

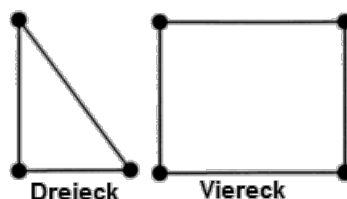
Die *Methode der Finiten Elemente* (**FEM**) ist ein Weg zur Diskretisierung:

- Reduktion auf geometrisch einfache Formen, die über wenige Eckpunkte definiert sind:

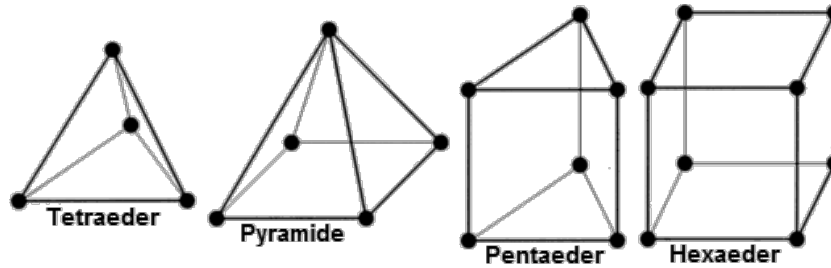
1-dimensional:



2-dimensional:



3-dimensional:



- Diese geometrischen Grundformen können in beliebig verzerrter Form benutzt werden. Dabei wird die Größe der zulässigen Verzerrung jedoch bestimmt durch die Gradienten der Spannungen (Gradienten des Potentialfeldes). So führen sehr spitze Winkel bzw. sehr schlanke Formen oft zu ungenauen Ergebnissen.
- Mit diesen geometrischen Grundformen werden z.B. gekrümmte Oberflächen durch Facetten ebener Teilflächen angenähert (Siehe oberstes Bild).
- Elemente erhalten in der Literatur üblicher Weise einen Kurzbezeichner, welcher sich aus ihrer geometrischen Form und der Anzahl ihrer Knoten ableitet (Zusätzlich zu den Eck-Knoten sind je nach gewählter Ansatz-Funktion weitere Knoten auf den Kanten bzw. in den Elementen erforderlich):

geom. Form	nur Eck-Knoten	mit Zusatz-Knoten
Dreieck	TRIA3	TRIA6
Viereck	QUAD4	QUAD8 / QUAD9
Tetraeder	TETRA4	TETRA10
Pyramide	PYRAM5	PYRAM13
Pentaeder	PENTA6	PENTA15
Hexaeder	HEX8	HEX20

← →

Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Diskretisierung_-_Z88_-_Elementformen&oldid=20127“

Software: FEM - Tutorial - Diskretisierung - Z88 - Ansatzfunktionen

Aus OptiYummy

↑

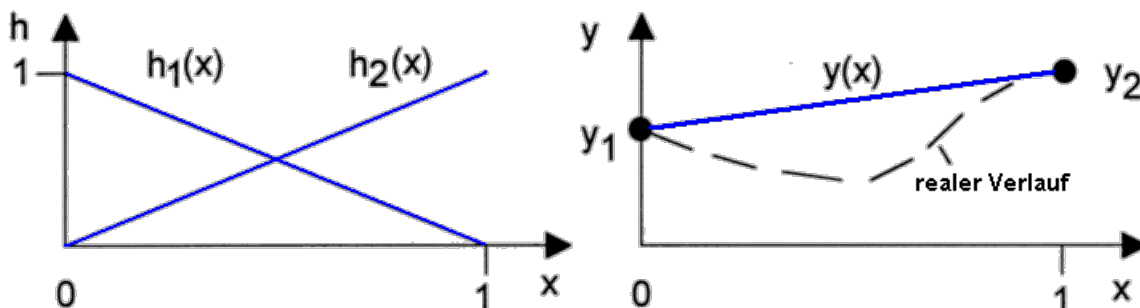


Ansatzfunktionen

Grundlagen

- Für die jeweilige Elementform werden nur die Potential-Werte ihrer Knoten-Punkte als so genannte **Primär-Ergebnisse** berechnet.
- Zusätzlich muss nun eine geeignete Funktion definiert werden, welche es ermöglicht, aus diesen Knoten-Potentialen für alle Punkte innerhalb des Elements einen eindeutigen (und sinnvollen) Wert zu berechnen (**Sekundär-Ergebnisse**).
- Man kann sich die Knoten als Stützstellen dieser Funktion vorstellen.
- Diese Funktion definiert man für *Finite Elemente* auf der Basis von **Ansatzfunktionen**.
- Von einer "**Ansatzfunktion**" spricht man, wenn sie folgende Bedingungen erfüllt (Nach [1]):
 1. Die Funktion ist auf dem ganzen Element definiert.
 2. Jedem Knoten des Elements ist eine Funktion zugeordnet.
 3. Am Knoten hat diese Funktion den Wert=1, an allen anderen Knoten des Elements hat sie den Wert=0.
 4. Für jeden Punkt des Elements hat die Summe aller Funktionen den Wert=1.
 5. An gemeinsamen Kanten (oder Flächen) zu benachbarten Elementen haben die Funktionen gemeinsamer Knoten an jedem Punkt den gleichen Wert (Stetigkeit).
- Üblich für den Begriff "Ansatzfunktion" sind auch:
 - **Formfunktion** (eng. form-function / shape-function)
 - Interpolationsfunktion (engl. interpolation-function)
 - Näherungsfunktion

Dies soll am Beispiel eines 1-dimensionalen Elements der Länge=1 für lin. Ansatzfunktionen verdeutlicht werden:



- Gegeben sind die Funktionswerte y_1 und y_2 an den Knoten des Stabes. Es werden zwei Ansatzfunktionen definiert:

$$h_1(x) = 1 - x$$

$$h_2(x) = x$$

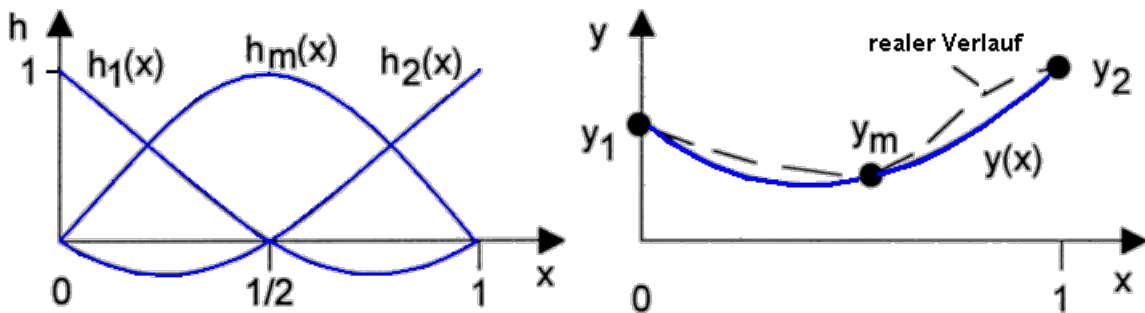
- Gewichtet mit den Knotenwerten y_1 und y_2 lautet die Elementfunktion

$$y(x) = y_1 \cdot h_1(x) + y_2 \cdot h_2(x)$$

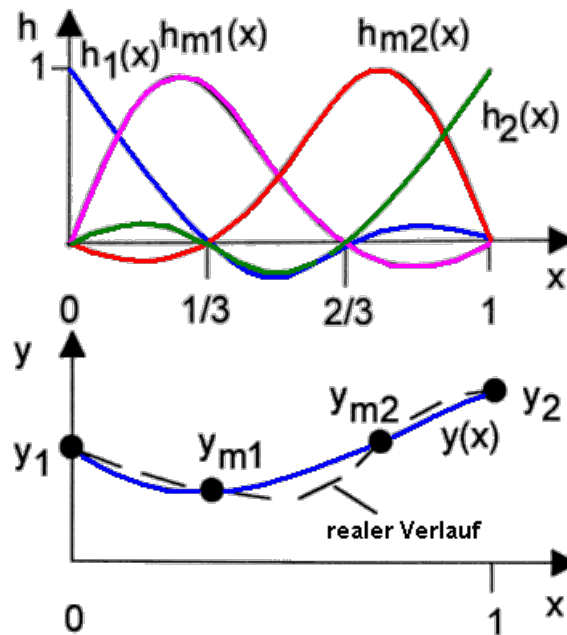
$$y(x) = y_1 \cdot (1-x) + y_2 \cdot x$$

Analog ist die Vorgehensweise bei höherwertigen Ansatzfunktionen:

- Quadratische (=parabolische) Ansatzfunktionen erfordern in der Mitte des Stabes einen zusätzlichen Knoten.
- Es werden für den Stab drei Ansatzfunktionen entsprechend der Knotenzahl gebildet.
- Diese sind so formuliert, dass Sie obigen Bedingungen genügen.



- Kubische Ansatzfunktionen erfordern zwei Zwischenknoten auf dem Stab:



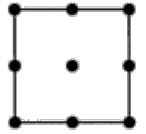
Je höherwertig die gewählte Ansatzfunktion ist, desto besser gelingt die Annäherung der interpolierten Werte an den realen Verlauf der physikalischen Größen. Dies betrifft sowohl die Spannungen (Potentiale) als auch die mechanischen Verformungen der Elemente unter Belastung. Allerdings steigt mit der erforderlichen Knotenzahl auch die Zeit für die Modellberechnung.

In der Praxis beschränkt man sich auf lineare und insbesondere quadratische Ansatzfunktionen. Zur Erreichung einer höheren Genauigkeit wählt man statt einer höheren Ansatzfunktion eine engere Vernetzung!

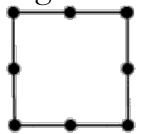
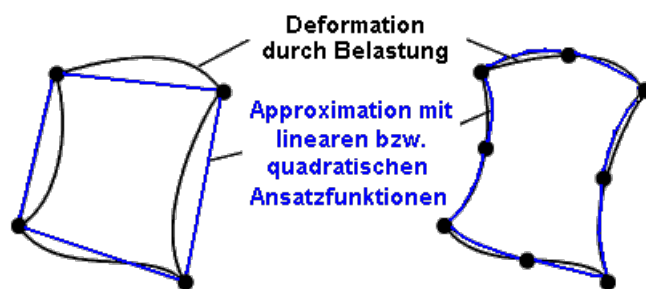
Für Spezialanwendungen haben sich neben den obigen Polynomansätzen weitere Ansatzfunktionen etabliert:

- Realisierung weicher Übergänge an den Elementgrenzen (ohne Knick), d.h. stetige Differenzierbarkeit auch über die Grenzen hinweg.
- trigonometrische Funktionen
- Im Element=konstant (Treppe über die Elemente) für schnell zu berechnende, riesige Netze (Strömungs- und Crash-Simulationen).
- usw. ...

Höherwertige Ansatzfunktionen erfordern auf den Elementen zusätzlich zu den Eck-Knoten noch Zwischenknoten auf den Kanten bzw. innerhalb der Elemente. Dies soll am Beispiel der quadratischen Ansatzfunktion für das Viereck-Element verdeutlicht werden:



- Der normale Polynom-Ansatz erfordert 5 zusätzliche Knoten.
- Die heute auch übliche Serendipity-Klasse benötigt im Unterschied zur Lagrange-Klasse keinen Innenknoten!
- Ein unter Belastung verformtes Viereck kann mit seinen gekrümmten Kanten bei Verwendung von Zwischenknoten besser approximiert werden:



[1] Steinbuch: Finite Elemente - ein Einstieg S.38
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 3-540-63128-3

Wirkung bei der Modellberechnung

- Die verwendeten Ansatzfunktionen fließen vollständig ein in das Gleichungssystem zur Berechnung der Knoten-Potentiale.
- D.h., je höherwertig die Ansatzfunktion gewählt wird, desto besser ist zwischen den Knoten die Approximation an die realen Potentialverläufe (Verschiebungen in der Mechanik).
- Man kann demzufolge gleiche Genauigkeiten mit einer gröberen Vernetzung erzielen. Diesem Vorteil wirkt jedoch die höhere Anzahl von Knoten pro Element wieder entgegen.
- Die benötigte Zeit für die Lösung des Gleichungssystems steigt quadratisch mit der Zahl der Unbekannten, welche proportional mit der Knotenanzahl steigt:
 - Für Potentialprobleme wird nur eine Unbekannte pro Knoten berechnet, in der Mechaniksimulation sind es 1 bis 6 Unbekannte (abhängig von den berücksichtigten Freiheitsgraden).
 - Demzufolge hat man bei Potentialproblemen mehr Spielraum für eine feinere Vernetzung.
 - Im Sinne der benötigten Berechnungszeit haben sich quadratische Ansatzfunktionen mit einer entsprechend feinen Vernetzung als optimal erwiesen.

← →

Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Diskretisierung_-_Z88_-_Ansatzfunktionen&oldid=23816“

Software: FEM - Tutorial - Diskretisierung - Z88 - Potentialfeld-Analogien

Aus OptiYummy



Potentialfeld-Analogien

Falls man eine physikalische Domäne mit einem FEM-System behandeln möchte, für welches dieses nicht konzipiert ist, kann man sich der Analogien zwischen den Domänen bedienen:

	Temperatur-Feld	Elektr. (Fluss-)Feld	Elektrostatistisches Feld
Potential	Temperatur [K]	elektrische Spannung [V]	el. statisches Potential [V]
Potential- gradient	Temperatur-Gradient [K/m]	el. Spannungsabfall [V/m]	Feldstärke [V/m]
Material- eigenschaft	Wärmeleitfähigkeit [W/(K·m)]	spez. el. Leitfähigk. [1/(Ohm·m)]	Dielektrizitätskonst. [(A·s)/(V·m)]
Flussgröße	Wärmestrom [W]	Elektrischer Strom [A]	elektrische Ladung [A·s]
Flussdichte "Flächenlast"	Wärmestromdichte [W/m ²]	Stromdichte [A/m ²]	dielekt. Verschiebung [(A·s)/m ²]

Die Berechnung der elektrischen Kapazität einer Leiter-Isolator-Geometrie gehört als Potentialproblem zur Domäne des elektrostatischen Feldes:

- Diese "Berechnungsart" ist im *Z88Aurora* und den meisten anderen auf die Strukturmechanik fokussierte FEM-Systemen nicht implementiert.
- Auf Grundlage des thermischen Solvers kann man jedoch mittels der Analogiebeziehungen trotzdem z.B. in *Z88Aurora* elektrostatische Probleme berechnen.

Hinweis:

- Im Rahmen dieser Übung nutzen wir den thermischen Solver des neuen CAD-Systems *Autodesk Fusion 360*, welches eine einfache Simulation auch von komplexen 3D-Geometrien ermöglicht.
- Die Nutzung des Thermo-Moduls von *Z88Aurora* erwies sich leider als extrem aufwändig (Abschnitt in der Übungsanleitung zurzeit nur als Zusatzinformation!).

Wichtig:

Frei verfügbare FEM-Programme zur Simulation elektro-magnetischer Felder sind meist auf 2D-Probleme beschränkt:

- Möchte man die Kosten für ein kommerzielles 3D-Programm (z.B. *ANSYS Elektromagnetik*)

vermeiden, so kann für einfachere elektrische 3D-Problemstellungen die Nutzung der Potentialfeld-Analogien in Betracht gezogen werden.

- Man erspart damit zwar Kosten, muss aber mit einigen Nachteilen leben:
 1. Thermo-Module behandeln thermische Probleme! → im Pre- und Postprozessor fehlen deshalb Funktionen für elektrische Aspekte (z.B. "Conductor Properties" in FEMM, Darstellung von Feldstärken, ...).
 2. Häufig existieren Einschränkungen bei der Definition der Randbedingungen, so dass man genau überlegen muss, mit welchen "Tricks" man zum angestrebten Ergebnis kommt.

Die Nutzung der Analogie zwischen Wärme und elektrischen Feldern in der FEM ist immer ein Kompromiss:

- In der Lehre resultiert daraus das wichtige Verständnis, dass unterschiedliche physikalische Probleme auf gleiche mathematische Modelle abgebildet werden können.
- In der kommerziellen Nutzung sollte man jedoch abwägen, ob die Kostenersparnis für ein zusätzliches kommerzielles 3D-Programm nicht durch Zeit- und Qualitätseinbußen bei der Erzielung der Ergebnisse vernichtet wird.

← →

Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Diskretisierung_-_Z88_-_Potentialfeld-Analogien&oldid=26827“

Software: FEMM - Elektrostatik - Einstieg

Aus OptiYummy

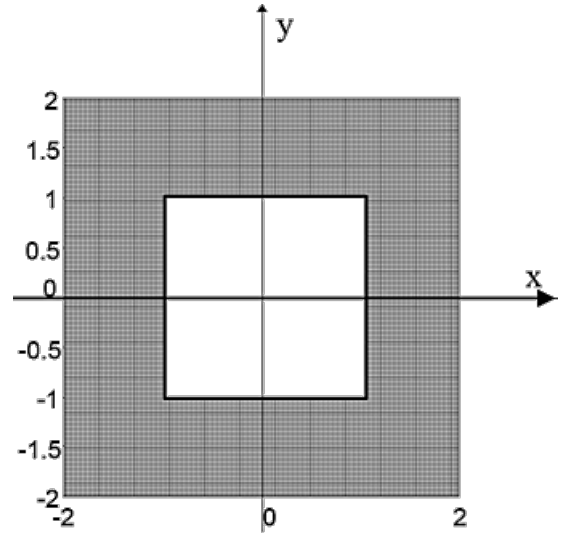


Erste Schritte im Programm FEMM





In Hinblick auf die Einarbeitung in die FEMM-Bedienung wird empfohlen, zuerst das Beispiel "*Capacitor with a Square Cross-Section*" im "**FEMM 4.2 Electrostatics Tutorial**" zu bearbeiten.

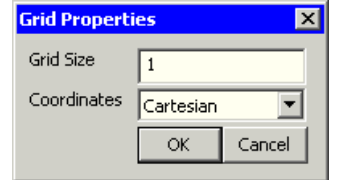
Hinweis: Links auf dieses und weitere Tutorials findet man auch in der FEMM-Programmgruppe im Windows-Startmenü.

Innerhalb und außerhalb des schraffierten Luftraums befindet sich jeweils eine Leitungselektrode. Gesucht wird der Kapazitätsbelag pro Meter. Das Problem ist also unserem Leiterzugproblem sehr ähnlich. Folgt man den Anweisungen in diesem Tutorial, so kann man kaum etwas falsch machen. Deshalb hier nur wenige Hinweise, um unnötige Fehler zu vermeiden:




■ Geometrie (Create Modell):

- Nutzt man den Cursor zur Koordinaten-Eingabe, so muss man zusätzlich zur Rasteranzeige  den Rasterfang  aktivieren.
- Als Rasterweite  sollte man im Beispiel 1 cm wählen. Die Zuordnung der Einheit folgt im Tutorial erst später.
- Über den entsprechenden Zoom-Button  platziert man die erzeugte Geometrie formatfüllend im Editorfenster.



■ Zuordnung von Properties zu Modellobjekten:

- Bevor man Objekte mit der rechten Maustaste selektieren kann, muss man grundsätzlich über die "Drawing Mode Toolbar Buttons"  die Objektklasse wählen, zu der das Objekt gehört.
- Bei der Platzierung der Modellobjekte wirkt ebenfalls der Rasterfang. Im Beispiel müsste man den Fang deaktivieren oder die Rasterweite verkleinern!
- Die Auswahl des Objekts erfolgt mit dem Cursor und der rechten Maustaste (Objekt "leuchtet" dann rot).
- Dann öffnet man den "Eigenschaftsdialog" durch Betätigen der Leertaste.

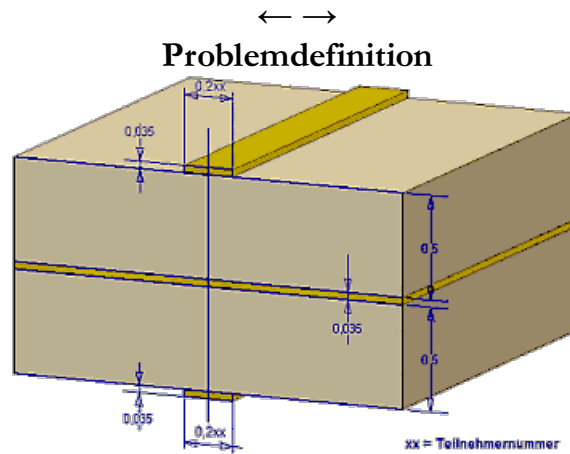
■ Ergebnisse und Modell:

- Das elektrostatische Modell besitzt den Datei-Typ **.FEE**.
- Die Ergebnisse werden nach der FEM-Berechnung in einer separaten Datei vom Typ **.res** gespeichert.
- Jede Datei wird in FEMM in einem separaten Fenster dargestellt (Umschalten der Ansicht durch Wahl des Fensters).




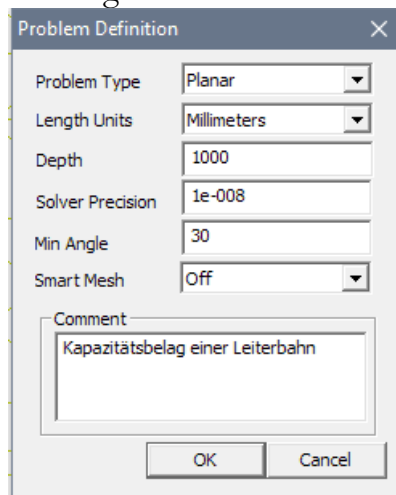
Software: FEMM - Elektrostatik - Problemdefinition

Aus OptiYummy



Es wird im Folgenden versucht, die Vorgehensweise und Begriffswelt des FEMM-Programms möglichst gut auf den "allgemeinen" FEM-Prozess abzubilden. Wir beginnen mit der Festlegung der physikalischen Domäne:

- Entsprechend dem Inhalt der Aufgabenstellung wählen wir nach dem FEMM-Start als Problembereich für das neue File  die elektrostatische Domäne.
- Danach sollte man sofort das **Problem** näher spezifizieren:
 - 2D-Problem (Planar)
 - Längeneinheit [mm] als sinnvolle Größenordnung in Hinblick auf die Objektmessungen (Längeneinheiten werden automatisch umgerechnet!)
 - Tiefe der 2D-Elemente muss 1000 mm betragen, damit man den Kapazitätsbelag sofort in [F/m] erhält.
 - Standardvorgaben für die Solver-Genauigkeit und die Vernetzungseigenschaften.



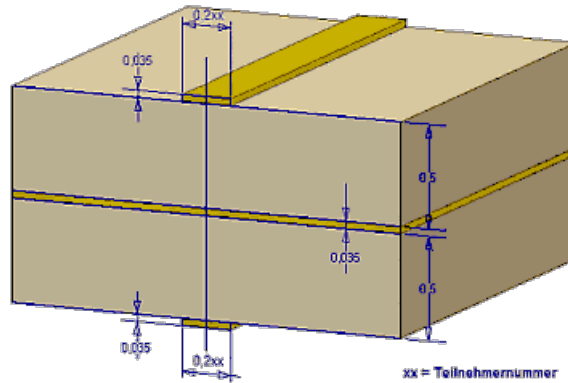
Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Problemdefinition&oldid=20659“

Software: FEMM - Elektrostatik - Geometrie

Aus OptiYummy

↑

↔ Geometrie-Modellierung



Noch einmal zur Erinnerung der abstrahierte Aufbau des Verdrahtungsträgers:

- Die Kupferschichten sind jeweils $35 \mu\text{m}$ dick.
- Das Laminat FR4 zwischen Masse-Ebene und Leiterbahnen ist jeweils $0,5$ mm dick.
- Die Breite einer Leiterbahn beträgt $0,2xx$ mm ($xx = 01$ bis 99).
- FR4-Laminat: $\epsilon_r = 4,7$

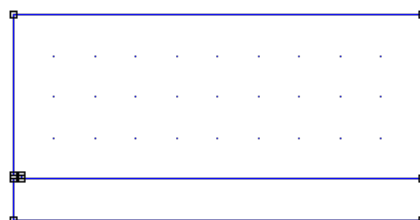
Alle FEMM-Modelle sind in einem Ordner "**FEM3_FEMM_xx**" zu speichern. In einem ersten FEMM-Modell "**Leiterplatte1_xx.FEE**" werden wir einen hinreichend großen Luftraum berücksichtigen, um damit das unendliche Feld zu erfassen:

- Wir modellieren nur die obere Hälfte des Verdrahtungsträgers.
- Unter Ausnutzung der Symmetrie genügt z.B. die rechte obere Verdrahtungsträger-Hälfte.




Es existieren einige Besonderheiten im FEMM-Programm:

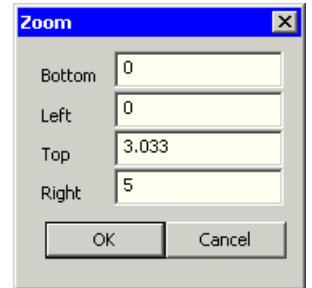
- In FEMM (Elektrostatik) wird nur das elektrische Feld in den Isolatoren berechnet. Leiter werden als feldfrei angenommen (als ideal leitend).
- Mittels geometrischer Objekte beschreibt man nur den betrachteten Raum für die Isolatoren (Luft/Laminat).
- Grenzen zwischen Isolator und Leiter werden im Sinne einer Randbedingung mit dem Leiter-Potential [V] belegt.
- Grenzen zum nicht betrachteten Raum müssen mit geeigneten Randbedingungen versehen werden.

In diesem Sinne beschreiben wir nun die Geometrie der Isolator-Bereiche:





1. Konfiguration des Arbeitsbereiches



- Anpassen des sichtbaren Koordinaten-Bereichs an die Objektgröße mittels **View > Keyboard**.
- Aktivieren der Rasteranzeige  und des Rasterfangs .
- Vorläufige Rastergröße  von 0.5 mm in Kartesischen Koordinaten.

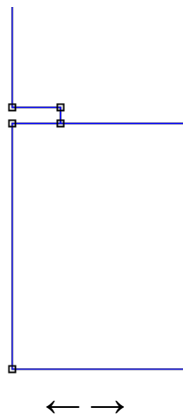
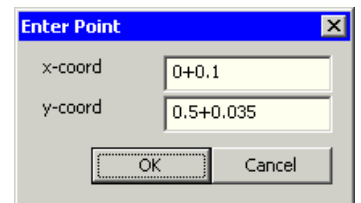


2. Laminat-Geometrie (Rechteck)

- Die 0.5 mm hohe Laminatschicht liegt direkt auf der X-Achse.
- Mit 5 mm Breite für die rechte Symmetriehälfte erfasst man die 10-fache Entfernung zwischen Masseschicht und Leiterbahn.
-  Definition der Eck-Knoten (linke Maustaste).
-  Definition der Kanten zwischen den Knoten.

3. Berücksichtigter Luftraum (und Leiterbahn)

- Im FEMAP-Modell hatten wir aufgrund der beschränkten Netzgröße nur ca. 1 mm Luft über dem Laminat berücksichtigt.
- Wir nehmen nun mindestens 2 mm, was dem 4-fachen Abstand zwischen Masseschicht und Leiterbahn entspricht.
- Den Bereich der Leiterbahn müssen wir von dem Luftraum aussparen.
-  Definition der Eck-Knoten
 - Den gemeinsamen Knoten zum Laminat kann man verwenden (nicht neu definieren!).
 - Die "krummen" Werte am Leiterzug sollte man manuell als Koordinaten eingeben:
 - Mit Cursor ohne Klick nächste Koordinate fangen (aktueller Wert sichtbar in Statuszeile!)
 - Tab-Taste öffnet die Koordinateneingabe mit aktuell gefangener Cursor-Position.
 - Die Werte kann man beliebig ändern. Da Formeln möglich sind, kann man damit Rechenfehler vermeiden (Siehe Bild).
-  Definition der Kanten zwischen den Knoten.
 - Die gemeinsame Kante zum Laminat kann man verwenden (nicht neu definieren!).
 - Zur Bearbeitung der Kanten um den winzigen Leiterzug sollte man die Zoom-Funktionen nutzen:

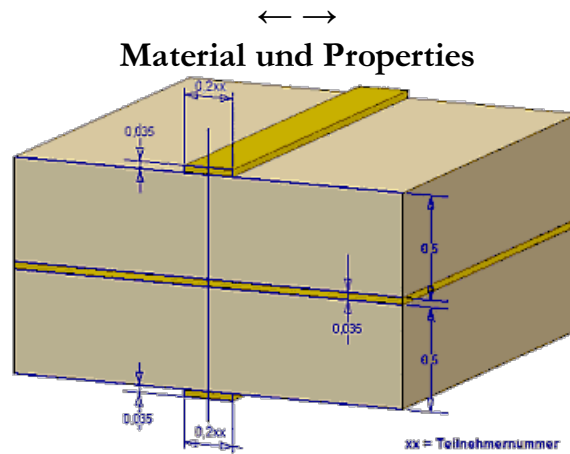




Software: FEMM - Elektrostatik - Material und Properties

Aus OptiYummy

↑

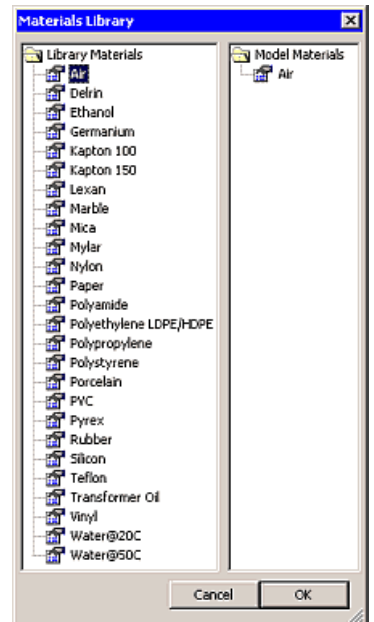


Hinweise:

- In den unterschiedlichen FEM-Systemen wird man mit unterschiedlichen Begriffshierarchien konfrontiert.
- In Programmen wie **ANSYS** steht "*Property*" für eine Kombination aus "*Material und Element-Typ*", denn in diesen allgemein gehaltenen Systemen kann man verschiedene Element-Typen in einem Modell verwenden.
- Im FEMM-Programm gibt es nur Dreieck-Elemente, wobei man sich durch die Wahl des Problems für den planaren oder axialsymmetrischen Element-Typ entscheidet.
- In FEMM werden Materialien geometrischen Bereichen zugeordnet (was ja nicht unlogisch ist!). Bei der Vernetzung erhalten die Elemente die Material-Eigenschaften ihres Bereiches.
- In FEMM steht "*Property*" allgemein für die "*Eigenschaft der konkreten Objektklasse*" (Material, Randbedingung, Koordinaten-Punkt, Leiterbereich, Außenbereich, Material-Bibliothek). Der Begriff wird also in seiner "natürlichen" Bedeutung verwendet (was ja auch nicht unlogisch ist!).

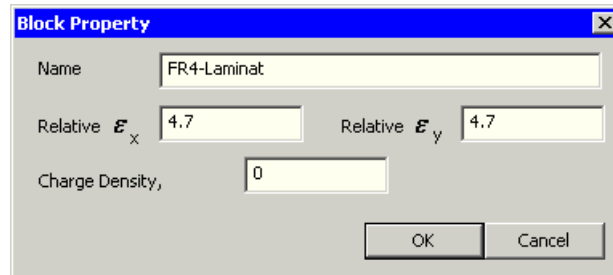
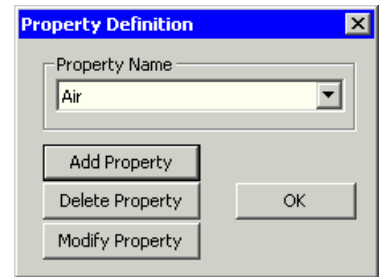
1. Modell-Material definieren:

- In elektrostatischen FEMM-Modellen definiert man nur die Materialien der Nichtleiter.
- Die benötigten Materialien müssen innerhalb des Modells als "Model Materials" definiert werden.
- Soweit wie möglich, sollte man diese Materialien der Materialbibliothek entnehmen (**Properties > Materials Library**).
- Mittels "Drag and Drop" kann man die Materialien aus der Bibliothek in das Modell kopieren.



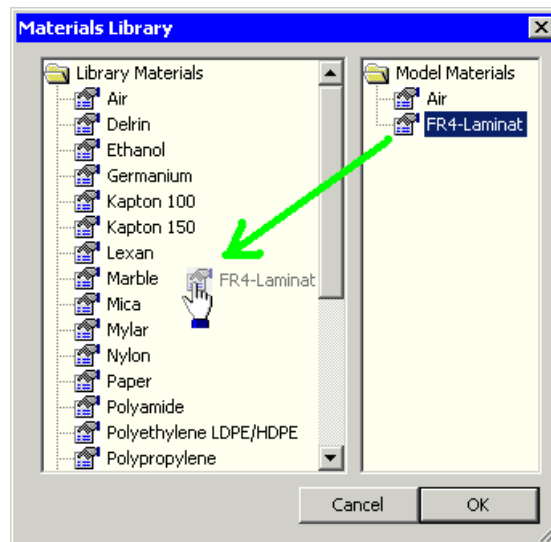
Leider finden wir darin nur die "Luft".

- Zusätzliche Materialien kann man mittels **Properties > Materials** definieren.
 - Nach Wahl des Material-Namens kann man vorhandene Modell-Materialien Löschen oder mit anderen Eigenschaften versehen.
 - **Add Property** bietet die Möglichkeit, den Namen und die Kenngrößen für ein neues Material einzugeben.
 - IFR4-Laminat besitzt unabhängig von der Richtung eine relative Dielektrizitätskonstante von 4,7.
 - Das Material soll keine eigene Ladungsdichte besitzen.



2. Material-Bibliothek bearbeiten:

- Es ist ein Kinderspiel, die zusätzlich definierten Materialien in die Material-Bibliothek einzuspeichern.
- Man öffnet wieder die Material-Bibliothek (**Properties > Materials Library**).
- Dort zieht man z.B. das FR4-Laminat aus den Modell Materialien per "Drag and Drop" in die Library Materials.



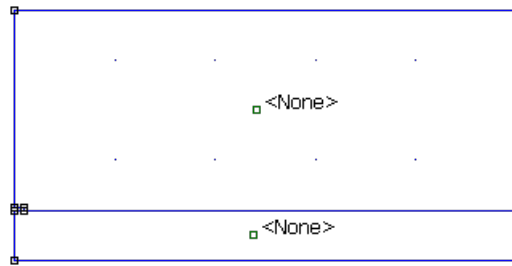
- **Achtung:**
 - Die Materialbibliotheken werden als .DAT-Files im Ordner `..\FEMMxx\BIN\` gespeichert. Das Ändern dieser Dateien funktioniert natürlich nur mit den erforderlichen Schreibrechten!
 - Dann funktioniert auch das Löschen von Materialien aus der Bibliothek mittels <Entf>-Taste.
 - Die Material-Bibliothek muss sich im selben Ordner befinden wie das FEMM-Programm und muss für die Elektrostatik **statlib.dat** heißen. Ansonsten findet FEMM die Bibliothek nicht!

3. Block Labels platzieren:

- Die unterschiedlichen, nicht leitenden Bereiche der Geometrie müssen mit Block Labels

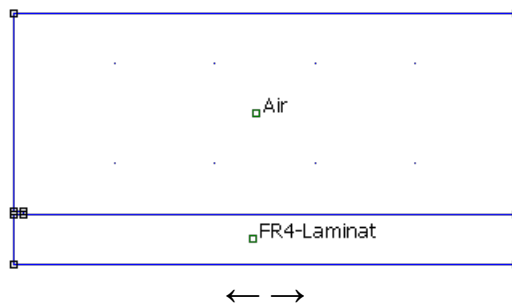
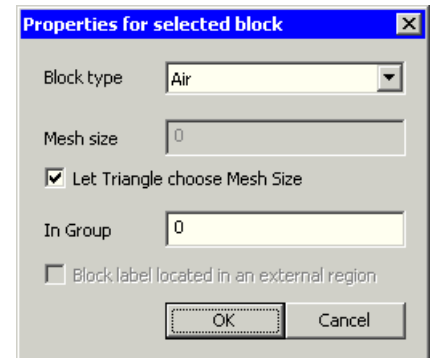
gekennzeichnet werden.

- Nur über diese Block Labels kann man dann die Bereiche mit Material-Eigenschaften versehen.
- Mit der linken Maustaste platzieren wir in jeden durch Linien begrenzten Bereich einen Block Label.
- Anfänglich haben die Labels noch keinen Namen und keine Eigenschaften (außer ihre Position):



4. Materialeigenschaften zuweisen:

- Nach Auswahl eines Blocklabels (mittels rechter Maustaste) gelangt man mittels der <Leertaste> zu den Eigenschaften des ausgewählten Blocks.
- Das Material wird als Blocktyp zugewiesen.
- Zusätzlich kann man angeben, wie dieser Bereich zu vernetzen ist. Wir lassen vorläufig den Netzgenerator "Triangle" die Maschengröße automatisch wählen.

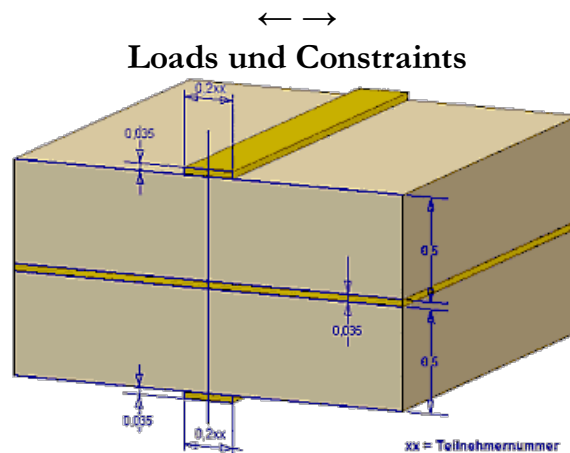


Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Material_und_Properties&oldid=25160“

Software: FEMM - Elektrostatik - Loads und Constraints

Aus OptiYummy

↑



Mittels des FEM-Modells wird das elektrostatische Feld in einem abgegrenzten, mit Isolator-Material belegten Raum-Bereich berechnet:

- Berechnet werden nur die Potentiale (Spannungen) in den Knoten des endlichen Netzes.
- Die Potentiale in den Knoten sind abhängig von:
 - den Material-Eigenschaften im unendlichen Raum.
 - der Verteilung von Ladungsmengen im unendlichen Raum.
 - vorgegebenen Potentialwerten in ausgewählten Raumbereichen.

Die Material-Eigenschaften des abgegrenzten Raumbereiches haben wir bereits in Form der Dielektrizitätskonstante beschrieben (Luft und Laminat).

Ladungen repräsentieren die *Loads* in der elektrostatischen Domäne. Für die Definition von Ladungen als Ursache des elektrostatischen Feldes stellt FEMM für alle Property-Klassen entsprechende Möglichkeiten bereit:

- für *Material* als Raum-Ladungsdichte [C/m^3]
- für allgemeine Grenzflächen zur Umgebung (*Boundary*) als Flächen-Ladungsdichte [C/m^2]
- für Grenzflächen zu einem Leiter (*Conductor*) als Gesamtladung der in sich zusammenhängenden Leiterfläche [C].
- für Knoten (*Points*) als Linien-Ladungsdichte [C/m]
- **Hinweis:**
 - Knoten beschreiben im planaren Fall Strecken (entlang der "Dicke") und
 - im axialsymmetrischen Fall Kreise (mit Radius um Y-Achse)!


Potentiale repräsentieren die *Constraints* in der elektrostatischen Domäne. FEMM bietet die Möglichkeit, für obige Objekte (außer für Material) Potentiale als Zwangsbedingungen zu definieren:

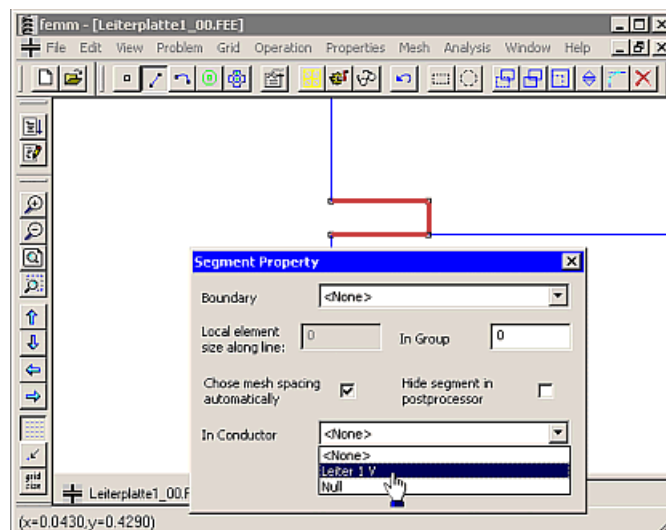
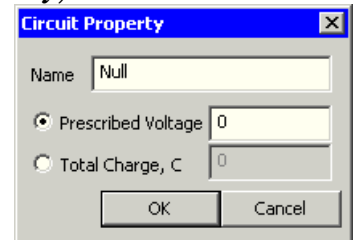
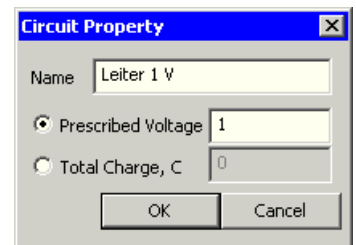
- Die Potentialvorgabe ist jeweils nur alternativ zur Ladungsdefinition möglich, um damit eine Überbestimmung des Gleichungssystems zu vermeiden.
- Die Potentialverteilung an den Rändern zum "unendlichen" Raum definiert man über so genannte *Boundary Conditions*. Das sind Gleichungen, welche den Verlauf der Feldlinien an den Rändern beschreiben (z.B. senkrecht oder asymptotisch zum Rand).
- Die Menge aller Potentialvorgaben dient als Randbedingung für das aus dem FE-Netz generierte

Differentialgleichungssystem.

Mit den bereitgestellten Möglichkeiten kann der Nutzer ausgehend von seiner konkreten Problemstellung sehr direkt die *Loads* & *Constraints* für das FE-Modell definieren:

- Im Beispiel des Kondensators ist es sicher sinnvoll, 1 Volt Potentialdifferenz zwischen den beiden Leitungselektroden vorzugeben.
- FEMM berechnet die Ladungen auf den Leitern, wenn man sie nicht vorgibt. Damit entspricht der Zahlenwert der Ladungsmenge [As] auf dem Leiter dem Wert der Kapazität [F], da $C=Q/U$.
- Definition der Leitungspotentiale (***Properties > Conductors > Add Property***):
 - Leiter-Potential 1 V
 - Null-Potential für Masse-Ebene

 Diese Leitungspotentiale weisen wir den entsprechenden Randsegmenten der Geometrie zu. Dafür markieren mit der rechten Maustaste alle Randsegmente der Leiterbahn und öffnen dann mittels <Leertaste> den Eigenschaftsdialog. Analog ist die Vorgehensweise für das Null-Potential auf dem Masse-Segment:



Hinweise:

- Man hätte die Leitersegmente auch mit einer *Boundary Condition* mit vorgegebener Spannung belegen können. Daraus würde der gleiche Feldverlauf berechnet. Der Vorteil der Verwendung der *Conductor Property* ist, dass für jeden Leiter vom FEMM-Solver automatisch die Ladung berechnet wird!
- Für Geometrie-Segmente, für die man keine *Boundary Condition* oder *Conductor Property* definiert, wird angenommen, dass die Feldlinien senkrecht auf den Rand treffen. Dies ist z.B. im Sinne der Symmetrie an der Y-Achse auch erforderlich!
- Den "unendlichen" Raum betrachten wir vorläufig noch nicht. Wir gehen davon aus, dass unser Luftraum den wesentlichen Teil des elektrostatischen Feldes erfasst.

← →

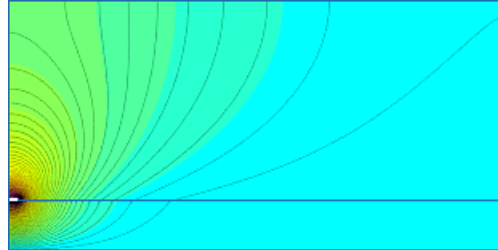
Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Loads_und_Constraints&oldid=20137“

Software: FEMM - Elektrostatik - Netz und Berechnung

Aus OptiYummy



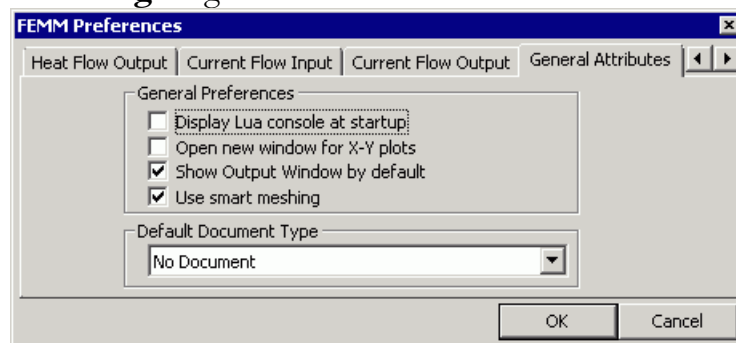
Vernetzung, Berechnung und Auswertung




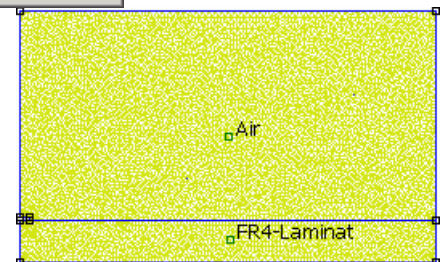
1. Automatische Vernetzung:

Wir hatten für alle Bereiche des Modells eingestellt, dass der Vernetzungsgenerator "Triangle" selbst die erforderliche Maschengröße ermitteln soll:

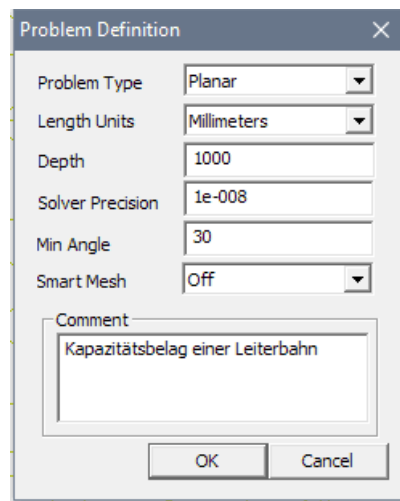
- Mit der Version **FEMM 4.2** vom **11. April 2012** wurde unter **Edit > Preferences** als Neuerung das abschaltbare **Smart Meshing** eingeführt:




- **Hinweis:** Diese Standardvorgabe für das Smart Meshing kann man nur dauerhaft umschalten, wenn man das FEMM-Programm als Administrator ausführt. Anderenfalls bleibt die Umschaltung ohne Wirkung!
- Deshalb wurde mit der Version **FEMM 4.2** vom **25. Feb. 2018** in der **Problem-Definition** die **Smart Meshing-Option** ergänzt, welche nur für die aktuelle Modell-Datei wirkt und nicht von Administrator-Rechten abhängt.
- Standardmäßig ist **Smart Meshing** aktiv und führt nach Aufruf des Netzgenerators  zu nebenstehendem Netz mit ca. 4000 Knoten. Ist dies nicht der Fall, sollte man in der Problem-Definition **Smart Meshing = on** setzen und erneut vernetzen.
- Solange man FEMM nur für einzelne, manuell gestartete Simulationen benutzt, ist trotz der feinen Vernetzung des **Smart Meshing** die resultierende Rechenzeit für 2D-Probleme nicht störend.
- Das **Smart Meshing** verfeinert das Netz an allen Ecken, weil an Eck-Knoten die größten Feldgradienten zu erwarten sind. Die globale Vernetzung ist ebenfalls sehr fein (Teilung von ca. 50 in Bezug auf Umrundungslinien von Bereichen).
- Man gelangt damit automatisch zu einem Netz mit sehr guter Genauigkeit für die Simulationsergebnisse.

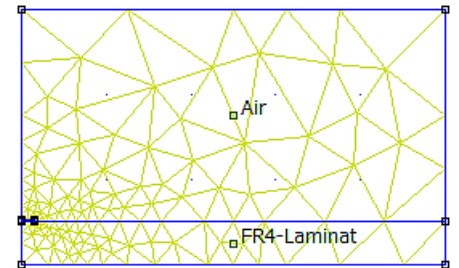


Wir werden im Folgenden das **Smart Meshing** abschalten (falls es noch aktiv ist):









1. Nur durch manuelle Steuerung der Vernetzung kann man ein Gefühl für die Auswirkungen der Vernetzungsdichte entwickeln.
2. Bei Einbindung des FEMM-Programms in eine Analyse-/Optimierungsumgebung, ergeben sich sehr viele Modellberechnungen. Dazu ist im Sinne der Berechnungszeit ein Kompromiss zwischen Vernetzungsdichte und Berechnungsgenauigkeit erforderlich.

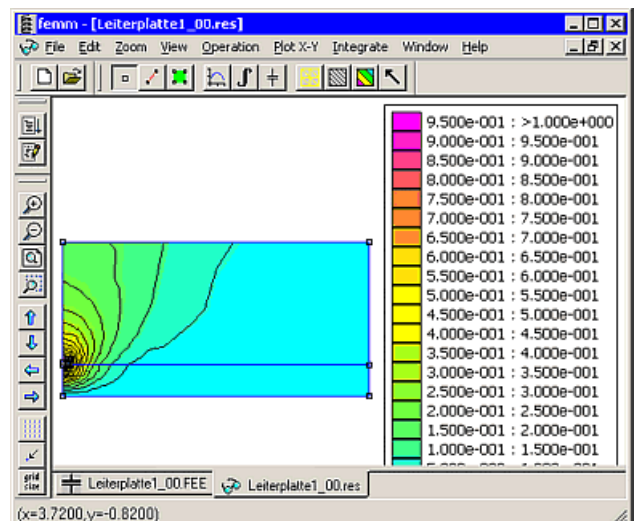
Mit inaktivem *Smart Meshing* führt der Aufruf des Netzgenerators  zu einem Netz mit ca. 140 Knoten, wenn man für die Materialbereiche und Liniensegmente die automatische Wahl der Elementgröße aktiviert hat:



- Die Teilung entlang der Umriss-Linien beträgt jetzt 1 bis 5.
- Der Vernetzungsgenerator berücksichtigt damit auf Grund der kleinen Geometriesegmente die erforderliche feinere Vernetzung um die Leiterbahn.
- In größerer Entfernung von der Leiterbahn wird die Vernetzung ziemlich grob.
- Interessant ist, wie genau die Simulationsergebnisse dieser automatischen Vernetzung sind.

2. Berechnung und Felddarstellung:

- Nach Betätigen von  muss man bei schnellen Rechnern schon sehr schnell hinschauen, damit man die Fortschrittsbalken der Berechnung nicht übersieht.
- Die Berechnungsergebnisse werden nicht automatisch visualisiert.
- Erst nach Betätigen von  erscheint in einer separaten Datei "*Leiterplatte1_xx.res*" der Ergebnisplot.
- Standardmäßig wird das Potentialfeld als Contour-Darstellung ausgegeben:
 - Die Legende zeigt im Beispiel die Farbskala von 0 bis 1 V.
 - Mittels     kann man die Darstellung der Ergebnisse umfassend konfigurieren.
 - Ein Einblenden der Equipotential-Linien zeigt, dass die grobe Vernetzung doch zu gewissen Ungenauigkeiten im Feldverlauf führt.




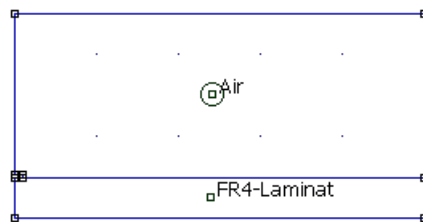
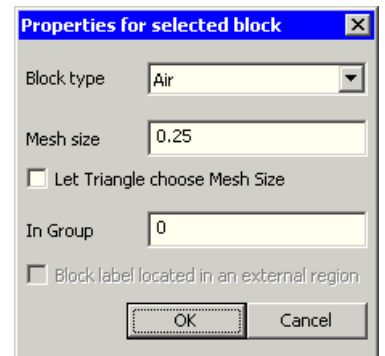
3. Auswertung:


- Als Ergebnis der FEM-Berechnung interessiert uns der Kapazitätsbelag der Ebene.
- Über **View > Conductor Props** erhält man die berechnete Ladung für jeden einzelnen Leiter.
- Die Summe aller Conductor-Ladungen muss im Beispiel Null sein, da keine weiteren Ladungen existieren. Die gesamte Geometrie erscheint aus großer Entfernung demzufolge als ungeladen!
- Die angezeigte Leiter-Ladung repräsentiert die eine Hälfte der Kapazität zwischen Leiterbahn und Massefläche.
- Wir werden uns diesen Wert merken und im Folgenden mit den Ergebnissen feinerer Netze vergleichen.

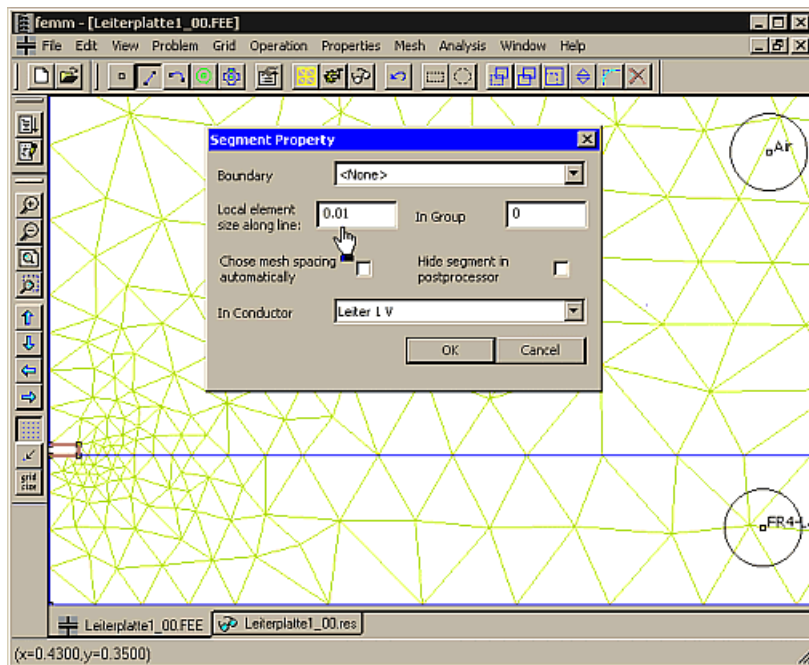


4. Vernetzungssteuerung:

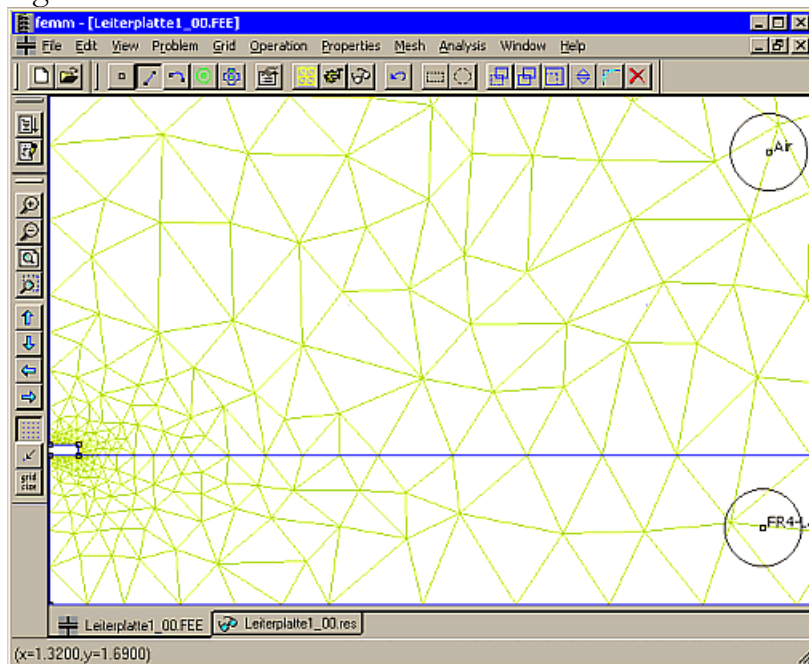
- Die Umschaltung zwischen Ergebnis- und Modelldatei kann über die unteren Register des Grafikfensters vorgenommen werden.
- Innerhalb der Modelldatei steuert man den Vernetzungsgenerator über die Eigenschaften der Block-Label :
 - Mit rechter Maustaste Block-Label markieren und mit <Leertaste> Eigenschaftsdialog aufrufen.
 - Die eingetragene Maschengröße wird nach dem Quittieren des Eigenschaftsdialogs als Kreis entsprechender Größe um die Block-Marke symbolisiert:



- Über die Block-Label kann man global für den zugehörigen Block die Maschengröße steuern. Im Beispiel wurde ein Wert von 1/10 der Modellhöhe von **2,5 mm** gewählt, sodass ca. zehn Elementschichten in Richtung der kleinsten Modellausdehnung entstehen.
- Mit der globalen Vernetzung der Materialbereiche wird aber nicht automatisch an den kritischen Stellen genauer vernetzt.
-  Es ist deshalb im Beispiel wichtig, an der Grenze zur Leiterbahn den Vernetzungsautomatismus für die entsprechenden Linien-Segmente abzuschalten. Dazu markiert man mit der rechten Maustaste die drei Linien-Segmente der Leiterbahn und aktiviert mit der <Leertaste> den Eigenschaftsdialog:



- Nach erneuter Vernetzung erzielt man mit obiger Elementgröße von **0.01 mm** (entspricht ca. 1/10 des längsten Segmentes) entlang der Leiter-Begrenzungslinien eine bedeutend feinere Vernetzung. Die globale Vernetzung wird dadurch nicht verändert:



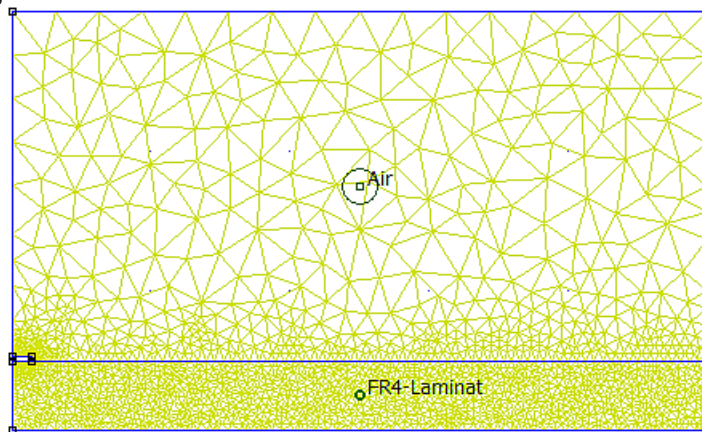
- Wenn man insbesondere die kritischen Stellen feiner vernetzt, wird sich der ermittelte Kapazitätswert einem Grenzwert nähern:
 - Der Grenzwert wird ca. 3% unterhalb des mit dem automatisch generierten Netz ermittelten Kapazitätswert liegen.
 - Das erscheint nicht viel, aber man muss beachten, dass es sich hierbei um eine integrale, globale Größe handelt.
 - Die an kritischen Stellen ermittelten Feldstärken unterscheiden sich in wesentlich größerem Maße. Dies wäre z.B. für die Untersuchung der Durchschlag-Festigkeit entscheidend.
 - Ab einem gewissen Grenzwert bringt eine weitere Verfeinerung des Netzes und eine zusätzlich Erhöhung der Solvergenauigkeit keine Vorteile in Hinblick auf die erreichbare Ergebnisgenauigkeit. Es steigt nur noch die Rechenzeit!

Fragen für Teilnehmer der Lehrveranstaltung:

- Wie klein sollte man die Maschengrößen für die Leitersegmente und Material-Blöcke wählen, damit

sich das Ergebnis der Kapazitätsberechnung praktisch nicht mehr ändert? Die getroffene Wahl ist anhand einer Versuchsreihe zu dokumentieren (Tabelle in bereitgestellter PDF), welche den Zusammenhang zwischen Maschengrößen und berechnetem Kapazitätswert widerspiegelt.

- **Hinweise zum Vorgehen (Verfeinerung beginnend an den kritischen Stellen):**
 1. Zuerst Elementgröße auf den drei Linien-Segmenten des Leiterzuges gemeinsam verkleinern, bis die Auswirkungen auf die Kapazität vernachlässigbar sind (Bitte nicht zu große Schritte wählen. Den Startwert Stück für Stück zu halbieren ist eine sinnvolle Vorgehensweise).
 2. Die Elementgröße auf den nicht ganz so kritischen zwei waagerechten Linien-Segmenten des Leiterzuges wieder vergrößern, bis daraus merkliche Auswirkungen auf die berechnete Kapazität resultieren.
 3. Mit der ermittelten optimalen Vernetzung der Leiterzug-Begrenzung den kritischeren Materialbereich des FR4-Laminats schrittweise feiner vernetzen, bis die Auswirkungen auf die berechnete Kapazität vernachlässigbar bleiben.
 4. Testweise den unkritischen Luftbereich etwas feiner vernetzen, um eventuelle Einflüsse der Luft noch zu berücksichtigen:



- **Achtung:** Zu feine Netze sorgen bei FEMM für ein Streuen der Ergebnisse um etwa 1%. Eine eindeutige Konvergenz lässt sich dann nicht mehr feststellen. Deshalb bitte folgende Punkte beim Verfeinern beachten:
 - Das Netz sollte in keiner Einstellung feiner als $1e-4$ mm sein (besser $1e-3$ mm).
 - Bei Änderungen von etwa 0,3% zwischen zwei Werten kann man annehmen, dass dies keine nennenswerte Änderung im Sinne der Aufgabe mehr ist.
- Mit den ermittelten "optimalen" Maschengrößen ist das Modell zu konfigurieren und abschließend zu simulieren.
- Gegen welchem Betrag konvergiert der Wert für den vollständigen Kapazitätsbelag einer Leiterbahn in Bezug auf die Masse-Ebene im FEMM mit diesem Modell-Ansatz?
- Senden Sie die mit diesen Werten konfigurierte Modelldatei **Leiterplatte1_xx.FEE** als Teil der Lösung.
- Die Datei ***.res** ist sehr groß und sollte nicht mitgeschickt werden. Die Ergebnisse sind aus der Modelldatei jederzeit reproduzierbar!

← →

Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Netz_und_Berechnung&oldid=26829“

Software: FEMM - Elektrostatik - Open Boundary Problems

Aus OptiYummy

↑



Open Boundary Problems

Die Finite Element Methode setzt die Verwendung eines endlichen Netzes voraus. Mit dem Netz kann also nur ein abgegrenzter Raumbereich mittels partieller Differentialgleichungen modelliert werden. Nun existieren aber viele Feldprobleme, bei denen das Ergebnis der Simulation wesentlich von der Ausbreitung des Feldes im "unendlichen" Raum abhängt:

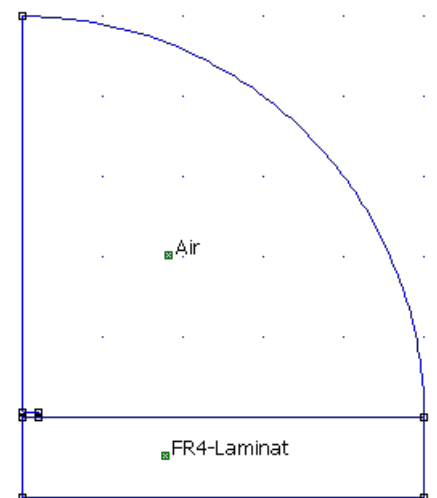
- Das Streufeld einer Magnetspule bestimmt wesentlich die Induktivität.
- Der elektrische Widerstand oder die elektrische Kapazität zwischen weit voneinander entfernten Elektroden wird wesentlich durch die Ausbreitung des elektrischen Feldes bestimmt.

Hinreichend großes FE-Netz:



- Diese einfachste Methode zur Berücksichtigung des "unendlichen" Raumes haben wir im Modell *Leiterplatte1_xx* angewendet.
- Hinreichend weit von der eigentlichen Objektgeometrie entfernt zieht man eine Grenze.
- Diese Grenze muss so weit entfernt sein, dass die Anteile des Feldes außerhalb der Grenze vernachlässigt werden können.
- Ein Richtwert besagt, dass diese Grenze mindestens 5-Mal so weit vom Zentrum der Objektgeometrie entfernt sein soll, wie der maximale Abstand der Objektränder von diesem Zentrum.
- Für diese Grenze ist dann automatisch definiert, dass z.B. für das elektrostatische Feld die Äquipotentiallinien senkrecht auf diesen Rand treffen.
- Damit existiert kein Feld außerhalb der Grenzen!

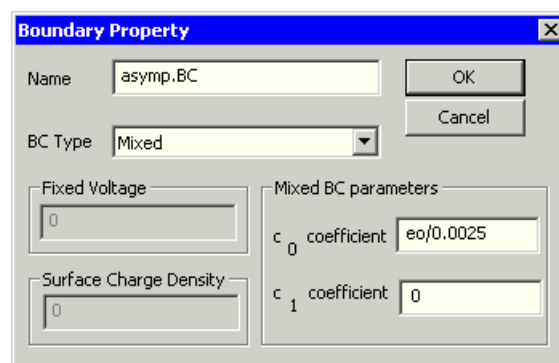
Open Boundary Conditions:

- Über Randbedingungen kann man definieren, welche Wirkung der Raum außerhalb der Grenzen auf das Feld innerhalb der Grenzen ausüben soll.
- Im Beispiel wollen wir den "unendlichen" Luftraum nachbilden, in den sich das Streufeld der Leiterbahn erstreckt.
- Die richtigen Randbedingungen sind entscheidend für die Genauigkeit der Modellberechnung.
- Sowohl die Geometrie der Grenze als auch das konkrete Feldproblem muss man bei der Formulierung der Zwangsbedingungen für den Feldverlauf beachten.
- In FEMM wird dafür als "Boundary Property" der *Boundary Condition Type "Mixed"* bereitgestellt:
 - Dieser setzt als Grenzgeometrie den Kreis voraus (entspricht der Kugel im axialsymmetrischen Fall).
 - Die Koeffizienten der Zwangsbedingung berechnet man anhand der konkreten Geometrie und der Art des Feldproblems.



Mit einem neuen Modell *Leiterplatte2_xx* werden wir nun diese anspruchsvollere Methode für die Berücksichtigung des "unendlichen" Raumes verwenden:

- Wir speichern unser bisheriges Modell unter dem neuen Namen.
- Die interessierende Geometrie (Leiterbahn) muss näherungsweise im Zentrum des Kreises liegen.
- Es gilt für den Radius der Sphäre hier ebenfalls der Richtwert vom 5-fachen Wert des Objekt-Radius.
- Wir ersetzen den rechteckigen Luftraum durch einen 90°-Kreisbogen mit einem Radius von **2.5 mm**:
 - Markieren der zu löschenden Knoten und Löschen mit <Entf>.
 - Dabei werden daran hängende Linien-Segmente ebenfalls gelöscht.
 - Das Block-Label "Air" bleibt dabei erhalten.
 - Verändern der Laminat-Breite durch Verschieben  von Laminat-Knoten auf x=2.5 mm.
 - Kreisbogen  zwischen Endpunkt Laminatoberfläche und Knoten auf der y-Achse.
- Die Randbedingung muss zuerst definiert werden, bevor man sie dem Kreisbogen zuweisen kann:
 - Über **Properties - Boundary** fügt man mittels **Add Property** eine neue Randbedingung hinzu.
 - Der Name ist frei wählbar, z.B. "Asymp.BC"
 - Wir wählen den *Boundary Condition Type* "Mixed"



- Die Eingabefelder für c_0 und c_1 gehören zu einer Formel, welche den Potentialverlauf an der Grenzfläche beschreibt:

$$\epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial V}{\partial n} + c_0 V + c_1 = 0$$


- $c_1=0$ darf hier nicht verändert werden.
- ϵ_r für Luft ist 1
- $\epsilon_0=8.85418781762e-012$ As/Vm
- c_0 berechnet man für Luft aus Permittivität ϵ_0 , dem Radius r_0 der Grenzsphäre und einem Faktor n , welcher Problemabhängig ist:

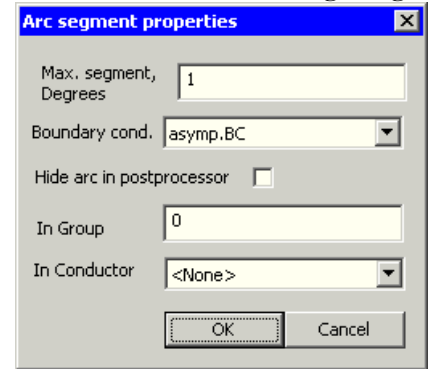
$$c_0 = \frac{\epsilon_0 n}{r_0}$$

- **Für n gilt in der Elektrostatik:**
 - $n=1$: *planares Problem mit Dipol-Ladungsverteilung* in der Geometrie. Das bedeutet, die Geometrie erscheint aus großer Entfernung als ladungsloser "Punkt".
 - $n=1$: *axialsymmetrisches Problem mit Netto-Aufladung* der Geometrie. Das bedeutet, die Geometrie erscheint aus großer Entfernung als Punktladung.
 - $n=2$: für die beiden anderen Problem-Varianten
- Wir müssen für unser Beispiel $n=1$ benutzen!
- In Form der Lua-Scriptsprache von FEMM tragen wir für c_0 einen Ausdruck ein:
 - Dabei muss man unabhängig von der gewählten Maßeinheit des Problems [mm] den Wert des Radius $r_0=2.5$ mm in [m] angeben:

$$eo/0.0025$$
 - eo steht für den Wert der Permittivität ϵ_0 .
- Nach dem Schließen des Dialogfensters werden die Ausdrücke in den Wert-Eingabefeldern berechnet und durch den resultierenden Zahlenwert ersetzt. D.h., beim nächsten Aufruf dieses

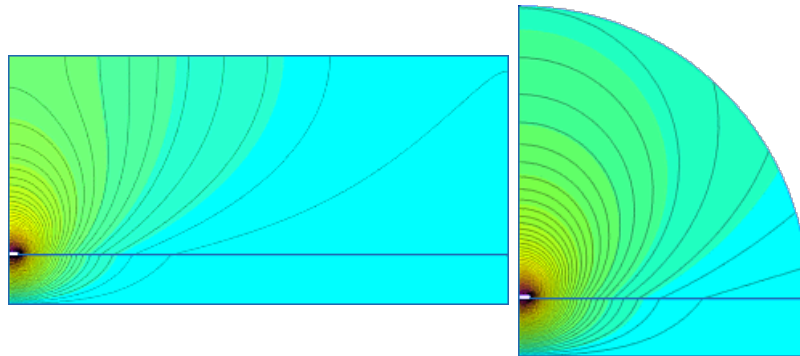
Property-Dialogs (z.B. zum *Modifizieren*), wird der ursprüngliche Ausdruck nicht mehr angezeigt!

- Diese Randbedingung soll nun der Grenzfläche zugewiesen werden:
 - Man muss in den Kreissegment-Modus wechseln  und den zugehörigen Viertelkreis auswählen durch Anklicken mit der rechten Maustaste.
 - Nach Betätigen der Leertaste gelangt man in den Dialog, der die Zuordnung der Randbedingung gestattet.



Der weitere Prozess verläuft nun wie im vorherigen Modell:

- Sämtliche Properties einschließlich der Vernetzungsparameter müssten noch vom Vorgänger-Modell erhalten sein.
- Die Simulation sollte ziemlich exakt den gleichen Kapazitätsbelag ergeben, wie mit dem vorherigen Modell.
- Allerdings unterscheidet sich bei genauerem Vergleich der Feldverlauf in der Luft in größerer Entfernung von der Leiterbahn:



- Die gewählte Randbedingung beschreibt die Verhältnisse des Streufeldes wesentlich besser!

Beachte:

- Die bedeutend größere Ausdehnung des Laminats (nach "rechts") wird im Beispiel nicht durch die asymptotische Randbedingung berücksichtigt!
- Die Feldlinien gehen dort senkrecht durch den Netzrand, der dadurch resultierende Fehler ist jedoch praktisch nicht spürbar.

Frage für Teilnehmer der Lehrveranstaltung:

- Gegen welchem Betrag konvergiert der Wert für den vollständigen Kapazitätsbelag einer Leiterbahn in Bezug auf die Masse-Ebene im FEMM mit diesem Modell-Ansatz?
- Senden Sie das mit diesen Werten konfigurierte Modelldatei **Leiterplatte2_xx.FEE** als Teil der Lösung.
- Die Datei ***.res** ist wieder sehr groß und sollte nicht mitgeschickt werden. Die Ergebnisse sind aus der Modelldatei jederzeit reproduzierbar!





Software: FEMM - Elektrostatik - LUA-Scripting

Aus OptiYummy



Scriptsprachen für FEM (LUA in FEMM)

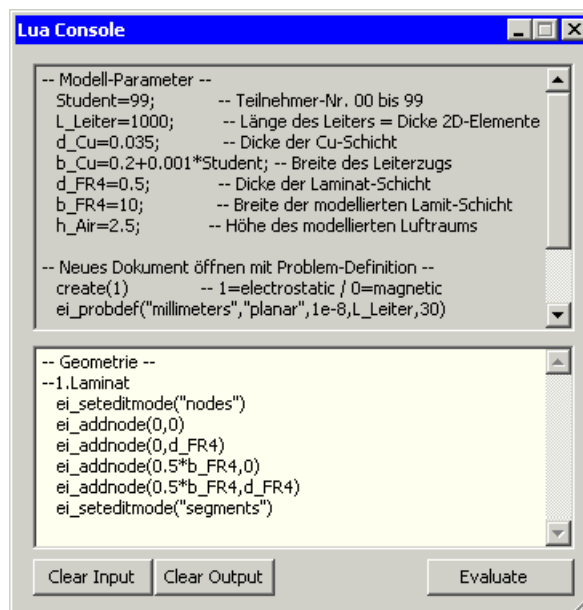
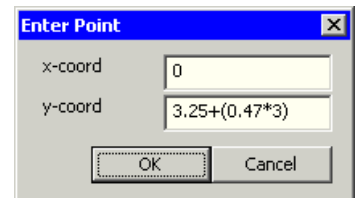
Bisher haben wir unsere FEM-Modelle mit Hilfe der vom FEM-System bereitgestellten grafischen Oberfläche entwickelt, simuliert und die Simulationsergebnisse ausgewertet. Solche grafischen Oberflächen (**GUI = Graphical User Interface**) ermöglichen dem Anfänger einen relativ schnellen Einstieg in die Nutzung der Finite-Element-Methode.

Alle modernen FEM-Systeme besitzen auch eine **Scriptsprache**, welche man in Ergänzung oder auch als vollständigen Ersatz für die grafische Oberfläche verwenden kann. Über die Scriptsprache wird normaler Weise für jede Funktion der grafischen Oberfläche ein Script-Befehl zur Verfügung gestellt, z.B. im Programm FEMM:

- `open("filename")` = Öffnen einer Datei
- `ei_addnode(x,y)` = Neuer Knoten auf x,y
- `ei_selectnode(x,y)` = Selektiert den Knoten, der x,y am nächsten liegt
- `ei_deleteselectednodes` = Löscht alle selektierten Knoten
- ...

Das Programm FEMM nutzt als Grundlage die **LUA-Scriptsprache** in der **Version 4.0**. Der LUA-Interpreter ist in das Programm FEMM integriert und wirkt auf folgende Inhalte:

- **Eingabefelder:**
 - Beim Schließen des zugehörigen Dialogfensters werden die Ausdrücke als LUA-Script interpretiert.
 - Das Ergebnis des Ausdrucks ist der Zahlenwert der Eingabe.
- **LUA-Konsole:**



- Diese Konsole kann man über **View > LUA-Console** im FEMM öffnen.
- Im unteren Input-Feld kann man Script-Ausdrücke eingeben.
- Diese werden nach Betätigen von Evaluate ausgeführt.

- Die Wirkung der Befehle kann man am Modell sofort sehen.
 - Bei Bedarf erscheint eine Fehlermeldung.
 - Bereits ausgeführte Ausdrücke erscheinen im oberen Output-Feld.
 - Damit kann man Schritt für Schritt ein Script entwickeln, welches man in einer LUA-Textdatei speichert (Kopieren über Zwischenablage).
- **LUA-Textdatei:**
- Eine Textdatei, welche ein LUA-Script enthält, kann man über **File > Open Lua Script** aktivieren:

```

showconsole()
clearconsole()
print("position in inches | force in lbf")
open("Roters-Ch9Fig6.fem")
mi_saveas("temp.fem")
for n=0,20,1 do
  mi_analyze()
  mi_loadsolution()
  mo_groupselectblock(1)
  f=mo_blockintegral(19)/4.4482
  print(0.1*n,f)
  mo_close()
  mi_seteditnode("group")
  mi_selectgroup(1)
  mi_movetranslate(0,-0.1)
end

```

- **Hinweis:** Wer keine Schreibrechte im FEMM-Programm-Ordner besitzt, muss die beiden Dateien "Roters-Ch9Fig6.fem" und "Force-vs-Position.lua" vor dem Öffnen dieses Script-Beispiels in einen anderen Ordner kopieren!
- Die Anweisungen dieses Scripts werden nach dem Öffnen der Datei ausgeführt.
- Wie von Geisterhand gesteuert laufen Modellbildung, Simulation und Ergebnisdarstellung im Programm-Fenster ab.
- Im Output-Feld der LUA-Konsole werden im Beispiel die Werte der Magnetkraft als Funktion der Rotorposition aufgelistet.

Ist in einem FEM-System der gesamte Umfang der verwendeten Scriptsprache (z.B. von LUA) verfügbar, so eröffnen sich vielfältige Möglichkeiten:



- Die konstruktiven Parameter (Geometrie und Stoff) können damit direkt als Parameter des Finite Element Modells definiert werden.
- Durch mathematische Verknüpfung können aus den konstruktiven Parameter alle erforderlichen Werte für das Finite Element Modell berechnet werden.
- Auf Basis einer Folge von Anweisungen der Scriptsprache unter Einbeziehung bedingter Verzweigungen oder Schleifen kann man den FEM-Prozess freizügig automatisieren.

LUA-Syntax im Programm FEMM

Im Kapitel 3 der FEMM-Hilfe (manual.pdf) sind die speziellen FEMM-Erweiterungen der LUA-Scriptsprache beschrieben.

1. Allgemeine Funktionen

Diese wirken unabhängig von der konkreten physikalischen Domäne des bearbeiteten Problems, z.B.:

- `clearconsole()`
- `newdocument(doctype)`
- `hideconsole()`
- `hidepointprops()`
- `messagebox("message")`
- `open("filename")`
- `pause()`
- `print()`
- `prompt("message")`
- `quit()`

2. Domänenbezogene Funktionen

Sind gekennzeichnet durch 2 Zeichen vor dem Funktionsnamen (**uv**_function) mit:

- **u** = **m**agnetic | **e**lectrostatic | **c**urrent flow | **h**eat flow
- **v** = **i**nput (Preprocessor) | **o**utput (Postprocessor)

Die Funktionen für den Preprocessors wirken auf die Modelldatei der jeweiligen Domäne (fem/fee/fec/feh):

- Definition des Problems
- Hinzufügen/Löschen von Objekten
- Editieren von Objekten
- Bearbeiten von Objekteigenschaften
- Selektieren von Geometrie
- Labeling von Objekten
- Erzeugen/Löschen des Netzes
- Zoom der Ansicht
- Sichtbarkeit Fenster/Raster
- Diverse Hilfsfunktionen

Die Funktionen für den Postprocessor wirken auf die zum Modell gehörenden Ergebnisdateien (ans/res/anc/anh):

- Datenextraktion
- Selektieren von geometrischen Elementen in der Ergebnisdatei
- Zoom der Ansicht
- Konfiguration der Ergebnisdarstellung
- Diverse Hilfsfunktionen

Mit diesen Funktionen kann man sämtliche Möglichkeiten der grafischen Bedienoberfläche in Form von LUA-Funktionsaufrufen nachempfinden:

- Man benötigt zusätzlich noch Ausdrücke der eigentlichen LUA-Sprache, um z.B. Prozesse mit bedingten Verzweigungen oder Schleifen zu beschreiben.
- Um Abhängigkeiten zwischen den Modellparametern zu definieren, benötigt man außerdem mathematische Operatoren und Funktionen der LUA-Sprache.
- In Hinblick auf FEMM muss man hierbei die **Version 4.0** der LUA-Sprache benutzen.

Nicht im Handbuch beschrieben sind die zusätzlich vordefinierten Naturkonstanten und Maßeinheiten. Man findet diese Definitionen für das Programm FEMM in der Datei `..\Programme\femm42\bin\init.lua` :

- **PI** = 3,14159... (Kreiszahl π - auch *Pi* oder *pi*)
- **uo** = $\text{PI} \cdot 4 \cdot 10^{-7}$ = 1.2566E-6 (μ_0 magn. Feldkonstante)
- **eo** = 8.85418781762e-12 (ϵ_0 elektrische Feldkonstante)
- **meter** = 1 (auch *meters* ; *Meter* ; *Meters*)
- **cm** = 0.01 (auch *centimeter* ; *centimeters* ; *Centimeters* ; *Centimeter*)
- **mm** = 0.001 (auch *millimeters* ; *millimeter* ; *Millimeter* ; *Millimeters* ; *milimeter* ; *milimeters*)
- **um** = 0.000001 (auch *micrometer* ; *Micrometer* ; *micrometers* ; *Micrometers* ; *micron* ; *Micron* ; *microns* ; *Microns*)
- **inch** = 0.0254 (Zoll=2.54 cm) (auch *inches* ; *Inch* ; *Inches* ; *in*)
- **mil** = 0.001*inch (auch *mils* ; *Mils* ; *Mil*)
- **Tesla** = 1
- **mTesla** = 0.001
- **Gauss** = 0.0001
- **kGauss** = 0.1
- **AmpMeter** = 1
- **kAmpMeter** = 1000
- **Oersted** = 250/PI
- **kOersted** = 1000*Oersted

← →

Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_LUA-Scripting&oldid=25161“

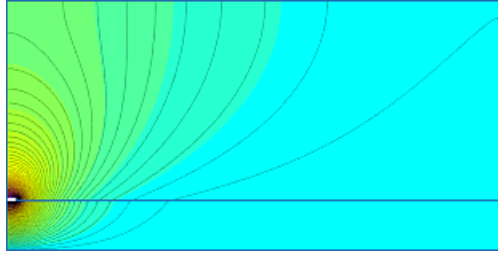
Software: FEMM - Elektrostatik - Modellsript

Aus OptiYummy



Parametrisiertes Modellsript

Leiterkapazität im endlichen Raum

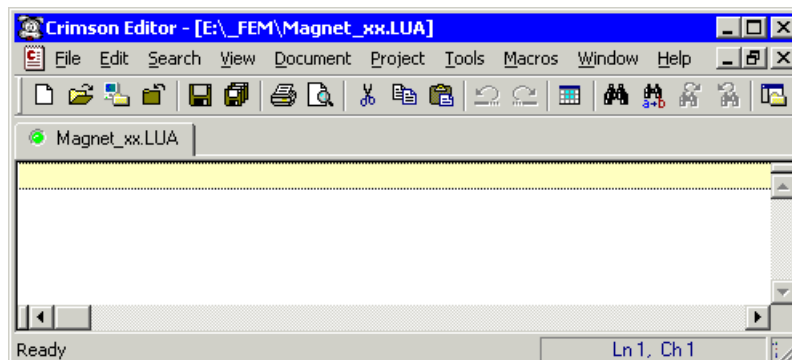


Unser erstes FEMM-Modell werden wir nun schrittweise nicht auf der grafischen Oberfläche, sondern mit einem LUA-Script entwickeln.

Der LUA-"Experte" schreibt seine Scripte sofort in eine Textdatei und hofft, dass es dann funktioniert. Den Frust der anschließenden Fehlersuche wollen wir uns als LUA-"Greenhorn" ersparen und nur zuvor getestete LUA-Anweisungen in die LUA-Textdatei **Leiterplatte1_xx.LUA** aufnehmen. Dazu bedienen wir uns zweier Hilfsmittel:

Script-Editor

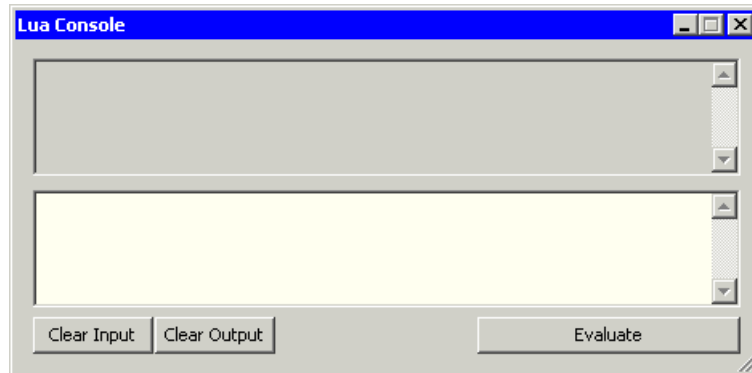
- Das Erstellen der LUA-Datei funktioniert prinzipiell mit jedem ASCII-Editor (z.B. Notepad.EXE).
- Es ist jedoch günstig, einen Editor zu verwenden, welcher die LUA-Schlüsselworte farbig hervorhebt.
- Geeignet dafür ist z.B. der Crimson-Editor, der auch noch sehr viele andere Script- bzw. Programmiersprachen beherrscht.
- Der Crimson Editor kann als Freeware kostenlos aus dem Internet geladen werden (<http://www.crimsoneditor.com>).
- **Hinweis:** Im PC-Pool ist aktuell Notepad++ als Editor installiert. Dieser ist genau so gut geeignet und kann im Folgenden Anstelle des Crimson-Editors genutzt werden.
- Wir starten den Crimson-Editor und speichern das leere Textfile als **Leiterplatte1_xx.LUA** (mit **xx**=Teilnehmer-Nummer):





LUA-Konsole in FEMM

- Mittels *View - Lua Console* öffnen wir im FEMM die Lua-Konsole:



- Im unteren "Input"-Teil kann man LUA-Anweisungen eingeben.
- Nach dem Drücken von "Evaluate" werden diese Anweisungen abgearbeitet.
- Falls darin Fehler existieren, erhält man eine entsprechende Fehlermeldung.
- Wir werden das Script Zeile für Zeile im Crimson-Editor schreiben und dabei die einzelnen Zeilen in der LUA-Konsole austesten bis sie funktionieren (Kopieren über die Zwischenablage).

Hinweis:

Im Rahmen dieser Übung kopieren wir die Zeilen aus der Übungsanleitung Abschnittsweise über die Zwischenablage in den Crimson-Editor. Dabei sollte man trotzdem versuchen, die Bedeutung der einzelnen Anweisungen zu verstehen (**Manual** als PDF-Datei geöffnet halten!).

Script-Entwicklung

1. Parameter:

In einem ersten Abschnitt listet man alle konstruktiven Parameter auf, die man im Sinne des Experimentierzieles bei Bedarf ändern müsste. Hierzu gehört auch die Teilnehmer-Nummer xx, welche Einfluss auf die konkrete Geometrie hat:

```
-- Parameter --
xx=99;           -- Teilnehmer-Nr. 00 bis 99
D=1000;         -- Länge des Leiters = Dicke 2D-Elemente
d_Cu=0.035;     -- Dicke der Cu-Schicht
b_Cu=0.2+xx/1000; -- Breite des Leiterzugs
d_FR4=0.5;     -- Dicke der Laminat-Schicht
b_FR4=10;     -- Breite der modellierten Laminat-Schicht
h_Air=2.5;     -- Höhe des modellierten Luftraums
```

Hinweis:

Kommentare beginnen mit -- und erstrecken sich jeweils bis zum Zeilen-Ende.

2. Definition des Problem-Typs:

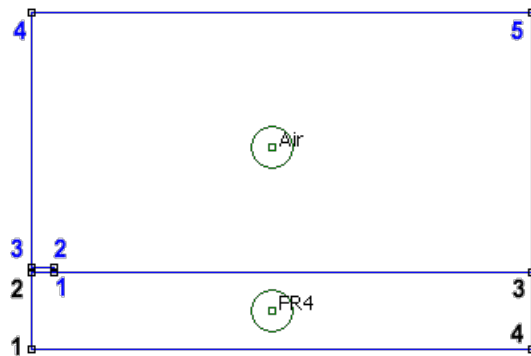
```

-- Definition des Problem-Typs
=====
showconsole();    -- LUA-Console, falls Script als Datei
ausgefuehrt
create(1);        -- 1=electrostatic  0=magnetic
ei_probdef ("millimeters", "planar", 1e-8, D, 30);
                -- 1e-8=Max. Fehler für Solver
                -- 30° =Min. Winkel für Netz

```

3. Geometrie:

Wie auf der grafischen Oberfläche definiert man die Geometrie über die Eck-Knoten und die dazwischen liegende Linien-Segmente:



Dabei muss man jedoch im Sinne der Modell-Parametrisierung Folgendes beachten:

- Alle x- und y-Koordinaten werden auf die zuvor definierten Parameter bezogen.
- Die Koordinaten der End- oder Mittelpunkte der Geometrie-Bereiche werden mehrmals benötigt. Deshalb sollte man für jeden Punkt separate x- und y-Koordinate als Variable definieren:

```

-- Geometrie
=====
    ei_seteditmode ("nodes") -- FR4-Laminat
    *****
        x1_FR4= 0;          y1_FR4= 0;          ei_addnode (x1_FR4,
y1_FR4);
        x2_FR4= 0;          y2_FR4= d_FR4;      ei_addnode (x2_FR4,
y2_FR4);
        x3_FR4= 0.5*b_FR4;  y3_FR4= d_FR4;      ei_addnode (x3_FR4,
y3_FR4);
        x4_FR4= 0.5*b_FR4;  y4_FR4= 0;          ei_addnode (x4_FR4,
y4_FR4);
    ei_seteditmode ("segments")
    ei_addsegment ( x1_FR4,y1_FR4 , x2_FR4,y2_FR4 );
    ei_addsegment ( x2_FR4,y2_FR4 , x3_FR4,y3_FR4 );
    ei_addsegment ( x3_FR4,y3_FR4 , x4_FR4,y4_FR4 );
    ei_addsegment ( x4_FR4,y4_FR4 , x1_FR4,y1_FR4 );
    ei_seteditmode ("nodes") -- Luft
    *****
        x1_Air= 0.5*b_Cu;   y1_Air= d_FR4;      ei_addnode
(x1_Air,y1_Air);
        x2_Air= 0.5*b_Cu;   y2_Air= d_FR4+d_Cu; ei_addnode
(x2_Air,y2_Air);
        x3_Air= 0;          y3_Air= d_FR4+d_Cu; ei_addnode
(x3_Air,y3_Air);
        x4_Air= 0;          y4_Air= d_FR4+h_Air; ei_addnode
(x4_Air,y4_Air);
        x5_Air= 0.5*b_FR4;  y5_Air= d_FR4+h_Air; ei_addnode
(x5_Air,y5_Air);
    ei_seteditmode ("segments")
    ei_addsegment ( x1_Air,y1_Air , x2_Air,y2_Air );
    ei_addsegment ( x2_Air,y2_Air , x3_Air,y3_Air );
    ei_addsegment ( x3_Air,y3_Air , x4_Air,y4_Air );
    ei_addsegment ( x4_Air,y4_Air , x5_Air,y5_Air );
    ei_addsegment ( x5_Air,y5_Air , x3_FR4,y3_FR4 );
    ei_zoomnatural(); ei_zoomout(); -- Komplette Ansicht im
Fenster

```

4. Material für Modell-Bereiche:

Es gibt zwar eine Materialbibliothek mit den entsprechenden Material-Kennwerten. Scheinbar existiert jedoch keine Möglichkeit auf diese Werte zuzugreifen. Das ist aber aus zwei Gründen in einem Modell-Script auch nicht sinnvoll:

- Da eine Materialbibliothek vom Nutzer verändert werden kann, wäre die Portabilität des Modell-Scripts nicht gewährleistet.
- Material-Parameter innerhalb des Scripts ermöglichen Experimente zur Untersuchung des Material-Einflusses auf das Modellverhalten.

```

-- Material fuer Modell-Bereiche (Mesh Size=0.25 mm)
=====
ei_addmaterial ("Air", 1.0, 1.0, 0); -- Luft
ei_addmaterial ("FR4", 4.7, 4.7, 0); -- Laminat
ei_seteditmode ("blocks") -- Label immer in Mitte der
Bereiche!
x0_FR4= 0.25*b_FR4; y0_FR4= 0.5*d_FR4; -- FR4-Laminat
*****
ei_addblocklabel(x0_FR4, y0_FR4); ei_selectlabel
(x0_FR4,y0_FR4);
ei_setblockprop ("FR4",0,0.25,0); ei_clearselected();
x0_Air= 0.25*b_FR4; y0_Air= d_FR4+0.5*h_Air; -- Luft
*****
ei_addblocklabel(x0_Air, y0_Air); ei_selectlabel
(x0_Air,y0_Air);
ei_setblockprop ("Air",0,0.25,0); ei_clearselected();

```

5. Leiter-Potentiale als Constraints:

Die Leiterpotentiale muss man den Linien-Segmenten ihrer Grenzflächen zuweisen. Leider kann man Segmente nur über eine Koordinate x,y selektieren. Es wird das Segment gewählt, welches dem Punkt x,y am nächsten liegt. Damit dies unabhängig von den Werten der Modell-Parameter funktioniert, sollte man immer den Mittelpunkt des zu selektierenden Liniensegments berechnen:


```

-- Leiter-Potentiale
=====
-- ei_addconductorprop ("name" , Vc, qc, type: 1=Vc/0=qc)
  ei_addconductorprop ("1 V" , 1 , 0 , 1 );
  ei_addconductorprop ("Null" , 0 , 0 , 1 );
  ei_seteditmode ("segments") -- Cu-Leiter mit 1 V
*****
-- ei_selectsegment(x,y) -> Mitte xs,ys des Segments P1,P2
nutzen:
--
--          xs=x1+(x2-x1)/2; ys=y1+(y2-y1)/2;
-- SegA= 2_FR4...1_Air:
  xs_A=x2_FR4+(x1_Air-x2_FR4)/2; ys_A=y2_FR4+(y1_Air-y2_FR4)/2;
  ei_selectsegment(xs_A,ys_A);
-- SegB= 1_Air...2_Air:
  xs_B=x1_Air+(x2_Air-x1_Air)/2; ys_B=y1_Air+(y2_Air-y1_Air)/2;
  ei_selectsegment(xs_B,ys_B);
-- SegC= 2_Air...3_Air:
  xs_C=x2_Air+(x3_Air-x2_Air)/2; ys_C=y2_Air+(y3_Air-y2_Air)/2;
  ei_selectsegment(xs_C,ys_C);
--
ei_setsegmentprop("bound.",elem.size,automes,hide,group,"cond.")
  ei_setsegmentprop("<None>",0.01 , 0 , 0 , 0 , "1
V");
  ei_clearselected();
-- SegM= 1_FR4...4_FR4:      -- Masse-Ebene mit Nullpotential
*****
  xs_M=x1_FR4+(x4_FR4-x1_FR4)/2; ys_M=y1_FR4+(y4_FR4-y1_FR4)/2;
  ei_selectsegment(xs_M,ys_M);
  ei_setsegmentprop("<None>",0 , 1 , 0 , 0 ,
"Null");
  ei_clearselected();

```

6. Vernetzung und Berechnung:

Die Vernetzungsparameter wurden in den Blockproperties der Modellbereiche spezifiziert. Die Vernetzung ist jedoch erst möglich, wenn das Modell zuvor gespeichert wurde:

```

-- Vernetzung und Berechnung
=====
  ei_saveas("leiter.fee"); -- Speichern in Ordner der LUA-Datei
  ei_createmesh(); --> nur gespeichertes Modell wird vernetzt!
  ei_analyze(1); -- Solver in einem Fenster 0=minimiert /
1=sichtbar
  ei_loadsolution(); -- öffnet Ergebnisfenster für Postprozess

```

7. Ergebnisse (Postprocessing):

Die Kommandos für den Postprozessor beginnen für die elektrostatische Domäne mit "eo_":

```

-- Felddarstellung und Kapazitätsberechnung
=====
    eo_showmesh(); -- Anzeige der Vernetzung
    eo_zoomnatural(); eo_zoomout(); -- Komplette Ansicht im
Fenster
    U,Q = eo_getconductorproperties("1 V");
    C = 2*Q/U; -- Gesamtkapazität/m von Leiter gegen Masse
-- ACHTUNG: Grenzwerte "upper" und "lower" in Manual vertauscht!
-- eo_showdensityplot(legend,gscale,lower_D,upper_D,type);
--          0|1 ,0=color, min , max , 0=V|1=D|2=E
    eo_showdensityplot( 1 , 0 , 0 , U , 0 );
    eo_showcontourplot(20,0,U); -- blendet 20 Aequipotentiallinien
ein
-- Darstellung normiert auf aktuellen Maximalwert durch max=U
    print ("C=", C*1e12, "[pF/m]") -- in Outputfeld der LUA-
Konsole
    print (" mit U=", U, "[V]");
    print (" und Q=", Q, "[As]");

```

 Mit **File - Open Lua Script** können wir die Script-Datei **Leiterplatte1_xx.LUA** nun komplett abarbeiten. Dazu sollten wir zuvor das bisherige Modell schließen.

← →

Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Modellscript&oldid=25707“

Software: FEMM - Elektrostatik - OBC-Script

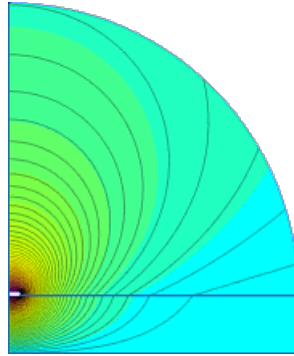
Aus OptiYummy

↑



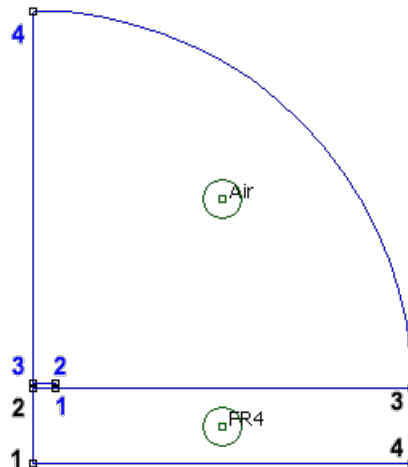
LUA-Script für Open Boundary Problem

Leiterkapazität im unendlichen Raum



Die Berechnung der Leiter-Kapazität als Open-Boundary-Condition Problem (**OPC**-Problem) soll nun ebenfalls als LUA-Script **Leiterplatte2_xx.LUA** beschrieben werden. Hierfür können wir die existierende Datei **Leiterplatte1_xx.LUA** modifizieren:

- Wir erzeugen eine Kopie der vorhandenen Datei unter dem neuen Namen.
- Der Radius der Luft-Sphäre soll nur 2,5 mm betragen:



- $h_{Air}=2.5$ kann nun als Radius dieser Luft-Sphäre interpretiert werden.
- b_{FR4} muss nun abhängig von h_{Air} berechnet werden (Formel). Das setzt voraus, dass beide Parameter sequentiell in der richtigen Reihenfolge mit Werten belegt werden!
- Die Geometrie-Anweisungen für die nicht mehr benötigten Linien-Segmente und Eck-Knoten des bisherigen Luftraums können im Script gelöscht werden.
- `ei_seteditmode ("arcsegments")` aktiviert den Bogen-Modus.

Hinweis: Die Aktivierung der einzelnen Bearbeitungsmodi ist für die Funktion eines Scripts nicht erforderlich. Man sollte dies aber trotzdem konsequent anwenden, weil man sich damit im Fehlerfall sofort im richtigen Bearbeitungsmodus befindet! Außerdem dient `seteditmode` gleichzeitig der Strukturierung des Scripts.

- **ei_addarc(x1,y1, x2,y2, deg, segm_deg)** zeichnet entgegen dem Uhrzeigersinn einen Kreisbogen von **Knoten1** nach **Knoten2** mit dem angegebenen Winkel [deg]. Gewählt werden die Knoten, welche den Koordinaten (x1,y1) und (x2,y2) am nächsten liegen. Wir nutzen die berechneten, exakten Koordinaten.

Der Bogen wird aus kleinen Linien-Segmenten zusammengesetzt, welche einen maximalen Winkel aufweisen [segm_deg]. Dafür sollte man z.B. 5° wählen.

- Zusätzlich zu den Potentials der Conductor-Segmente müssen wir noch die "Open Boundary Property" für den Kreisbogen definieren und dem Bogen zuweisen:
 - **ei_addboundprop("boundpropname", Vs, qs, c0, c1, BC-Type)** erzeugt eine Randbedingung.
 - Über den BC-Type kann man wählen zwischen:
 - **0="Konstantspannung"** (alles Null, außer Vs),
 - **1="Mixed"** (Rest Null, außer c0 und c1),
 - **2="Ladungsdichte"** (Rest Null, außer qs)
 - In unserem Beispiel sind:
 - **c0=eo/(h_Air*mm);**
 - **c1=0;**
 - In der Formel für c0 ist der Radius h_Air in Meter gefordert. Da unser Wert in Millimetern gemessen ist, muss man ihn mit der vordefinierten Konstante **mm=0.001** multiplizieren!
 - **ei_addboundprop("asyp.BC" , 0 , 0 , c0, c1, 1);** lautet also die konkrete Anweisung, nachdem man zuvor c0 und c1 berechnet hat.

Achtung: Damit die Boundary Property "asyp.BC" dem Kreisbogen auch zugewiesen wird, muss man in Analogie zur Behandlung von Linien-Segmenten das Bogensegment selektieren und ihm danach die Property zuweisen. Die speziellen LUA-Befehle sind dem FEMM-Manual zu entnehmen! Ob die Open Boundary Condition richtig definiert wurde, erkennt man nach der Simulation anhand der Feldlinien (Siehe obiges Bild).

Frage für Teilnehmer der Lehrveranstaltung:

Senden Sie die mit Ihrer Teilnehmer-Nummer xx konfigurierten Script-Dateien **Leiterplatte1_xx.LUA** und **Leiterplatte2_xx.LUA** als Teil der Lösung.

← →

Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_OBC-Script&oldid=21665“

Software: FEM - Tutorial - Elektrostatik - Fusion - CAD-Modell

Aus OptiYummy

↑



Parametrisiertes CAD-Modell

Bei Bedarf → Autodesk Fusion 360 (Schnellstart)


Inhaltsverzeichnis

- 1 Projekt
- 2 Konstruktion
- 3 Top-down-Entwurf der Modell-Geometrie
 - 3.1 Modellraum definieren und skizzieren
 - 3.2 Material-Bereiche in den Modellraum einbinden
 - 3.2.1 Elektrostatische Materialien definieren
 - 3.2.2 Laminat-Bereich
 - 3.2.3 Leiterzug-Bereich
 - 3.2.4 Luft-Bereich

Projekt

- Mit unseren Erfahrungen aus den vorherigen Übungen erstellen ein neues Projekt und nennen es "**FEM3_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 "**Y nach oben**" gesetzt werden, um eine Übereinstimmung zwischen dieser Anleitung und der Ausrichtung im Fusion herzustellen. Danach muss die "unbenannte" Konstruktion geschlossen werden, weil diese Voreinstellungen erst für neue Konstruktionen wirken!

Konstruktion

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

Top-down-Entwurf der Modell-Geometrie

Modellraum definieren und skizzieren

Der als Finite Elemente Modell vernetzte Raum unterscheidet sich von der realen Geometrie der zu untersuchenden Konstruktion (Bauteil bzw. Baugruppe). Die Unterschiede werden durch folgende Aspekte bestimmt:

1. Besonderheiten des benutzten FEM-Programms

- Basis für die Ermittlung der elektrischen Kapazität C eines Leiters zur Nullpotentialfläche ist der Zusammenhang zwischen der Spannung U und der Ladungsmenge Q auf dem Leiter ("**Definitionsgleichung**"):

$$C=Q/U$$

- Nutzt man die Analogiebeziehungen zwischen Wärme und elektrostatischem Feld, so benötigt man als Ergebnis der thermischen Simulation die Temperaturdifferenz T [Kelvin] zwischen Leiter und Bezugspotential (Null), sowie den Wert des Wärmestroms Φ [Watt] im Leiter:
- Welche dieser thermischen Größen man als Randbedingung vorgibt und welche Größen innerhalb der Simulation berechnet werden können, wird durch die Eigenschaften des verwendeten Thermo-Solvers bestimmt.
- Da *Fusion 360* nicht direkt den integralen Wärmestrom durch eine Hülle berechnen kann, muss man die Temperatur des Bezugspotentials und den Wärmestrom in der Leitergeometrie vorgeben. Berechnet wird dann daraus die Temperatur des Leiters.
- Die Solver von *Fusion 360* unterstützen nur 3D-Volumen-Elemente in Form von Tetraedern mit unterschiedlichen Ansatzfunktionen. Der thermische Solver ist dabei auf Tetraeder mit linearer Ansatzfunktion beschränkt.

2. Vereinfachungen der realen Geometrie (z.B. Details weglassen, Reduktion 3D \rightarrow 2D, Ausnutzung von Symmetrie-Eigenschaften):

- Die Masse-Ebene aus Kupfer kann entfallen, weil das Null-Potential direkt als Randbedingung auf der Unterseite des Laminats definierbar ist.
- Der Kupfer-Leiterzug wird als Materialbereich für die Einspeisung und Verteilung des Wärmestroms benötigt, welcher die Ladungsmenge auf dem Leiter repräsentiert.
- Ungünstig ist für unser Beispiel, dass wir auf Grund der Fusion-Solver ein 3D-Modell entwickeln müssen, obwohl prinzipiell ein 2D-Modell völlig ausreichend wäre!
- Anstatt eines Meters bilden wir im 3D-Modell nur eine Tiefe von **0.1 mm** ab! Damit ist noch eine anschauliche Umrechnung auf 1 m möglich und eine harmonische Vernetzung der kleinen Strukturen realisierbar.
- Wir nutzen wie im FEMM-Modell die Symmetrie-Eigenschaften.

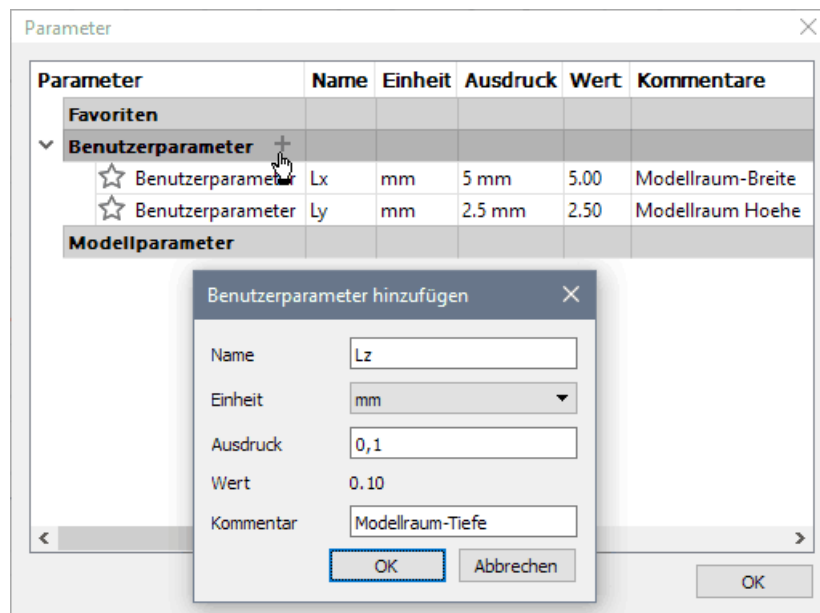
3. Einfluss der Umgebung (Koppelstellen und "unendlicher Raum"):

- Die elektrische Kapazität zwischen Leiterzug und Massefläche wird durch das gesamte elektrostatische Feld bestimmt, welches sich um den Leiterzug im Laminat und im Luftraum bildet. In *Fusion 360* ist es nicht möglich, diesen "unendlichen" Raum durch entsprechende Randbedingungen an einem Kreisbogen zu beschreiben.
- Infolge der erforderlichen 3D-Vernetzung sollte das zu vernetzende Volumen möglichst klein gehalten werden.
- Wir verwenden die gleichen Abmessungen wie bei dem FEMM-Modell, um die Ergebnisse direkt vergleichen zu können.

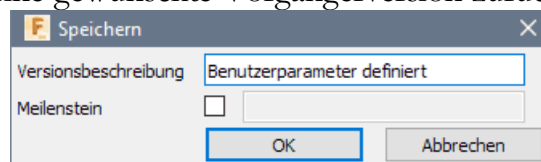
Damit umschließt der Modellraum einen gedachten **Quader (L_X, L_Y, L_Z)** von **5 x 2,5 x 0,1 mm³**, den wir aus einer Rechteck-Skizze in der **XY**-Ebene konstruieren:

1. Parameter definieren (**Werkzeug > Ändern > Parameter ändern**):

- Im Prinzip würde es ausreichen, wenn man die Werte der Modellbemaßung direkt in den Skizzen oder Extrusionen eingibt.
- Im Sinne einer übersichtlichen, zentralen Änderungsmöglichkeit ist es günstig, dafür Benutzerparameter zu definieren:

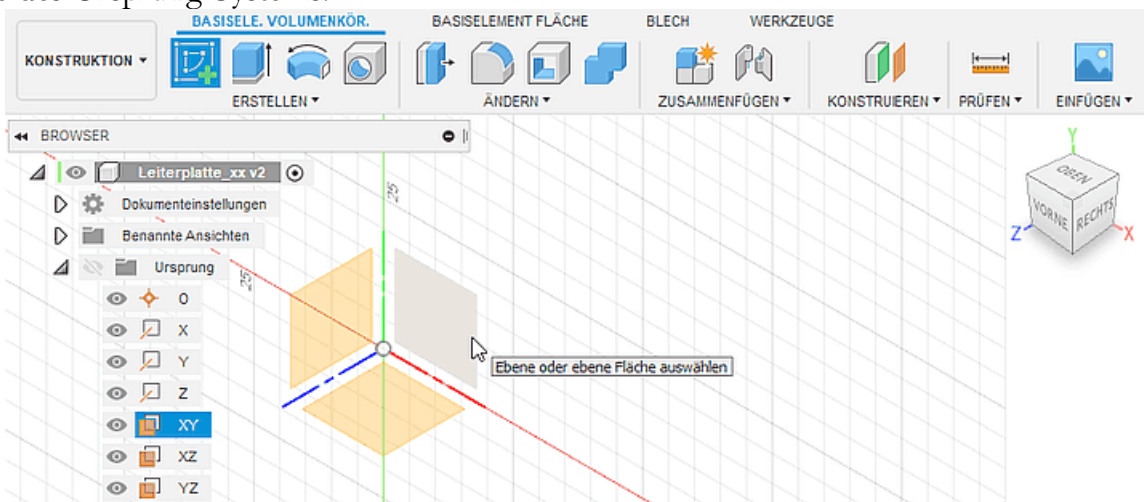


- **Speichern** des aktuellen Bearbeitungszustandes der Konstruktion erzeugt immer eine neue Version (hier v2). Diese sollte man mit einer sinnvollen Versionsbeschreibung versehen, damit man später bei Bedarf auf eine gewünschte Vorgängerversion zurückgreifen kann:

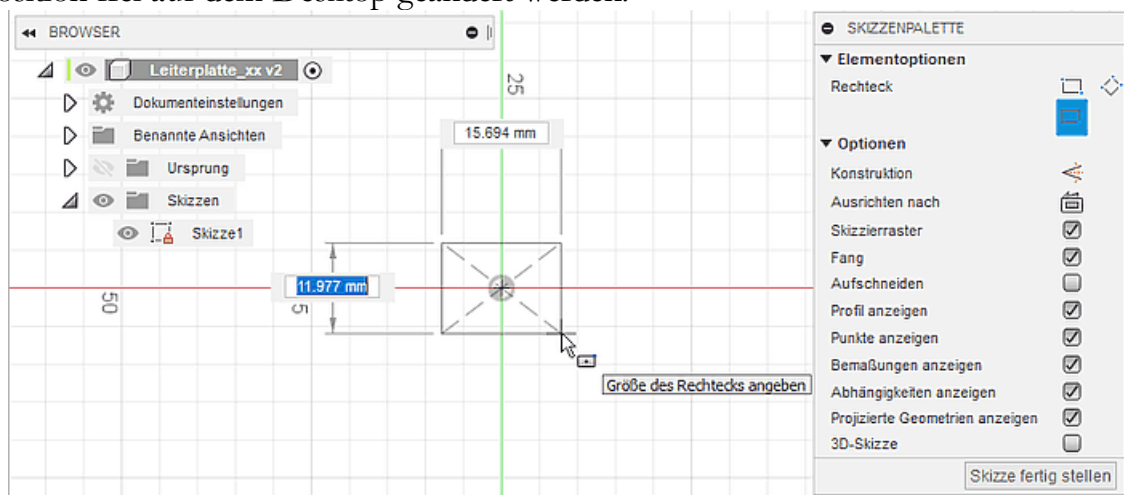


2. Basis-Skizze erstellen:

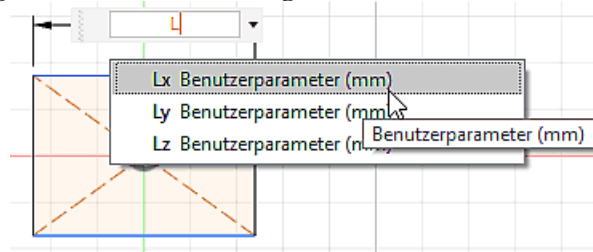
- Wir erstellen die für die Skizzierung des Modellraums erforderliche Basis-Skizze in der XY-Ebene des Ursprung-Systems:



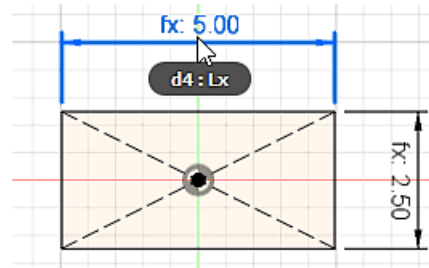
- Danach befindet man sich im Skizzen-Modus. Die zugehörige Skizzen-Palette kann in Größe und Position frei auf dem Desktop geändert werden:



- Am Mittelpunkt des Ursprung-Koordinatensystems platzieren wir den Mittelpunkt eines Rechtecks. Der Eckpunkt des Rechtecks bestimmt nur die Größe des gezeichneten Rechtecks, ohne diese Größe durch eine Skizzen-Bemaßung festzulegen.
- Beim Ergänzen der Skizzen-Bemaßung wird zuerst die aktuelle Abmessung als Wert angezeigt. Diesen Wert muss man mit dem Namen des zugehörigen Benutzer-Parameters überschreiben.
- Leider wird dazu nicht die komplette Parameter-Liste eingeblendet, sondern man muss zumindest den ersten Buchstaben des Parameters eingeben (Schreibweise egal) und kann dann eine Auswahl aus der eingeblendeten Liste tätigen:



- Die parametrischen Bemaßungswerte sind durch ein vorangestelltes Funktionssymbol **fx**: gekennzeichnet. Bewegt man den Cursor über die Maßzahl, wird die zugehörige Gleichung eingeblendet (z.B. "d4=Lx"):

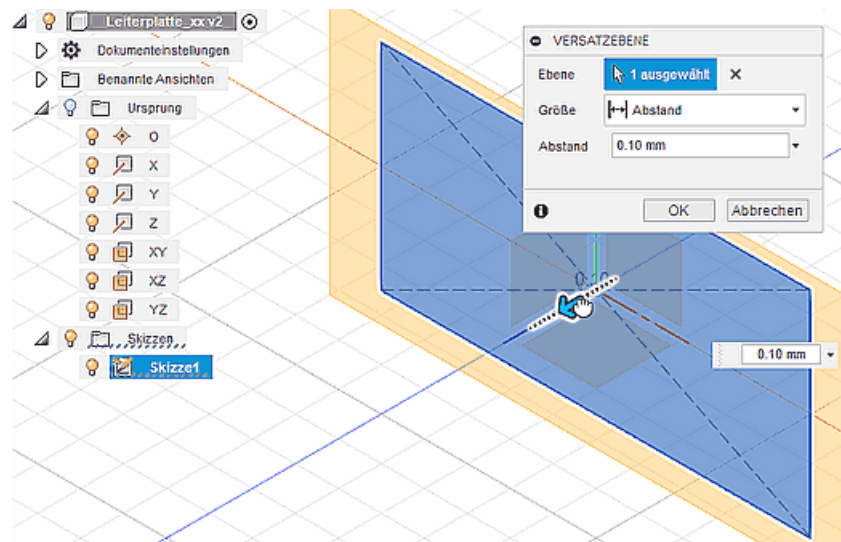


- In der Parameter-Liste wurden zugehörig zur Skizze1 im Beispiel die Modell-Parameter **d4** und **d5** ergänzt:

Parameter	Name	Einheit	Ausdruck	Wert	Kommentare
Favoriten					
▼ Benutzerparameter					
☆ Benutzerparameter	Lx	mm	5 mm	5.00	Modellraum-Breite
☆ Benutzerparameter	Ly	mm	2.5 mm	2.50	Modellraum Hoehe
☆ Benutzerparameter	Lz	mm	0.1 mm	0.10	Modellraum-Tiefe
Modellparameter					
▼ Leiterplatte_xx v2					
▼ Skizze1					
☆ Linear Dimension-2	d4	mm	Lx	5.00	
☆ Linear Dimension-3	d5	mm	Ly	2.50	

3. Tiefe des Modellraums durch Versatz-Ebene definieren:

- Der 3D-Modellraum soll nur in Form von Skizzen und sogenannter Konstruktionsgeometrie aufgespannt werden, ohne selbst als Volumenkörper in Erscheinung zu treten. In diese "skizzierte" Umrahmung des Modellraums passen sich dann die einzelnen Materialbereiche des Leiterplatten-Modells mit ihren unterschiedlichen Materialien ein.
- In den nutzerspezifischen Voreinstellungen könnte man das Skizzieren von Linien und Splines in 3D aktivieren, was wir hier aber vermeiden!
- Im Beispiel genügt eine um die Tiefe des Modellraums zur Basis-Skizze versetzte Konstruktionsebene für die Vorgabe der Extrusionshöhen der einzelnen Modell-Bereiche (**Werkzeug > Konstruieren > Versatzebene**):



- **Wichtig:**
Als Wert für den Versatz=0,1 ist der benutzerdefinierte Parameter **Lz** für die Modell-Tiefe zuzuweisen!
- **Hinweis:**
Die in der Werkzeug-Gruppe "Konstruieren" erstellbare 3D-"Konstruktionsgeometrie" (Ebenen, Achsen, Punkte) entspricht den "Arbeitselementen" z.B. im *Autodesk Inventor*. Diese 3D-Elemente dienen als Hilfskonstruktionen für die Orientierung und Platzierung der eigentlichen Modell-Geometrie.

Material-Bereiche in den Modellraum einbinden

Es bestehen im *Fusion 360* zwei grundsätzliche Möglichkeiten, unterschiedliche Material-Bereiche innerhalb einer Konstruktion zu definieren:

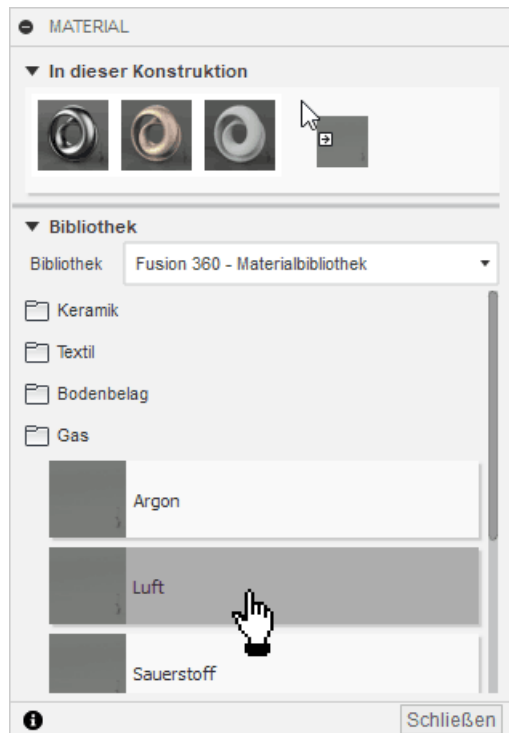
1. Als separate Körper innerhalb einer (Bauteil-)Komponente, wobei jeder Körper eigene Materialeigenschaften besitzen kann.
2. Als (Bauteil-)Komponenten einer (Baugruppen-)Komponente, wobei jedes Bauteil jeweils nur aus dem Körper des entsprechenden Material-Bereichs besteht.

Wir benutzen die erste Möglichkeit und modellieren die Leiterplatte damit als ein Verbund-Bauteil, welches aus unterschiedlichen Material-Bereichen besteht.

Elektrostatische Materialien definieren

Bevor wir die Material-Bereich als Körper modellieren, konfigurieren wir mittels **Werkzeug > Ändern > Material** innerhalb der Konstruktion die erforderlichen elektrostatischen Materialien:

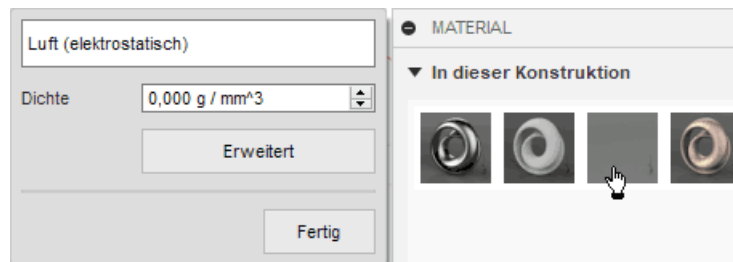
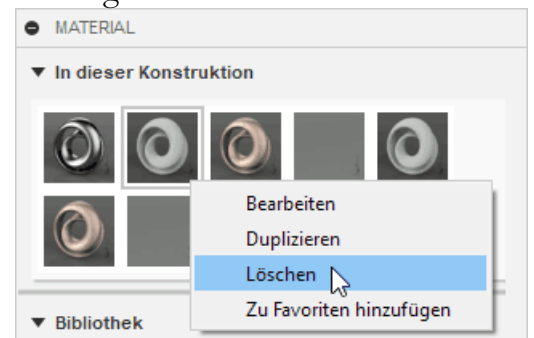
- Die benötigten Materialien (oder möglichst ähnliche) ziehen wir per **Drag & Drop** aus der Material-Bibliothek in die "Konstruktion".
- Standardmäßig befindet sich bereits "Stahl" als Material in der Konstruktion und kann dort nicht gelöscht werden. Wir ergänzen z.B.:
 - **Metall > Kupfer, geschmiedet**
 - **Kunststoff > Laminat, Weiß, matt**
 - **Gas > Luft**



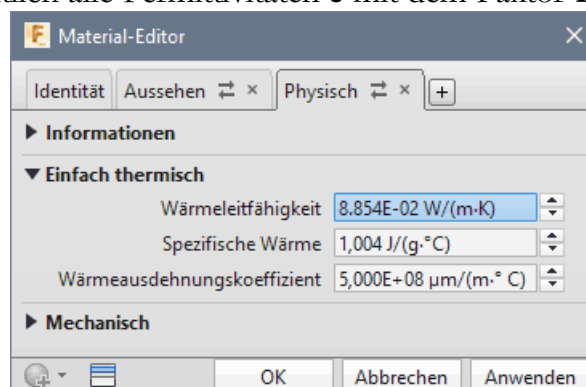
- Innerhalb einer thermischen Studie wird nur der Material-Wert der Wärmeleitfähigkeit benutzt, den wir in der Elektrostatik als Permittivität ϵ verwenden. Die anderen physikalischen Parameter der Materialien werden für statische thermische Simulationen nicht benötigt.

Die Eigenschaften der Original-Materialien kann man nicht direkt bearbeiten, sondern nur in Kopien dieser Materialien:

- Wir erzeugen von den drei hinzugefügten Materialien Kopien (**Kontextmenü > Duplizieren**). Die Kopien erhalten standardmäßig die Namensergänzung (1).
- Die drei Original-Materialien entfernen wir dann wieder aus der Konstruktion (**Kontextmenü > Löschen**).
- Beim Bearbeiten der einzelnen Materialien modifizieren wir zuerst den Bezeichner:



- Für "**Luft (elektrostatisch)**" müssen wir unter **Erweitert > Physisch > Einfach Thermisch** den Wert der Wärmeleitfähigkeit auf $\epsilon_0 = 8,854E-12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ändern, was jedoch unmöglich ist, weil dieser Wert $1E-2$ nicht unterschreiten darf.
- Deshalb skalieren wir einheitlich alle Permittivitäten ϵ mit dem Faktor 10^{10} .



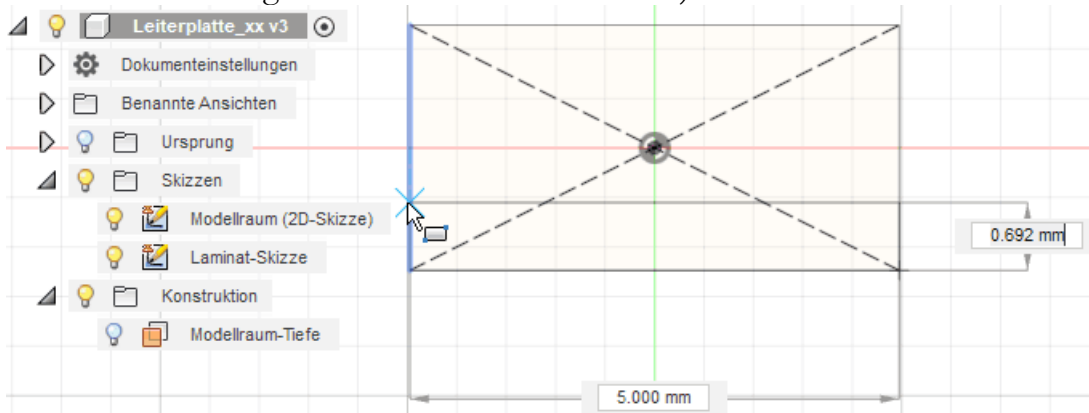
- Für "**Laminat (elektrostatisch)**" muss die relative Permittivität $\epsilon_r=4,7$ berücksichtigt werden.
- Für "**Kupfer (elektrostatisch)**" ist die Permittivität $\epsilon=\infty$. "Unendlich" sollte durch den maximal möglichen Wert von **5E+03** berücksichtigt werden.
- **Wichtig:** Die simulierten elektrischen Kapazitäten sind dann laut Dimensionierungsgleichung $C \sim \epsilon$ um diesen Skalierungsfaktor **10¹⁰** zu groß, was bei der Berechnung der Kapazitätswerte mittels der Definitionsgleichung $C=Q/U$ zu berücksichtigen ist!

Die "elektrostatischen" Materialien weisen wir später den einzelnen Körpern zu, welche wir im Folgenden in den Modell-Raum einbetten.

Laminat-Bereich

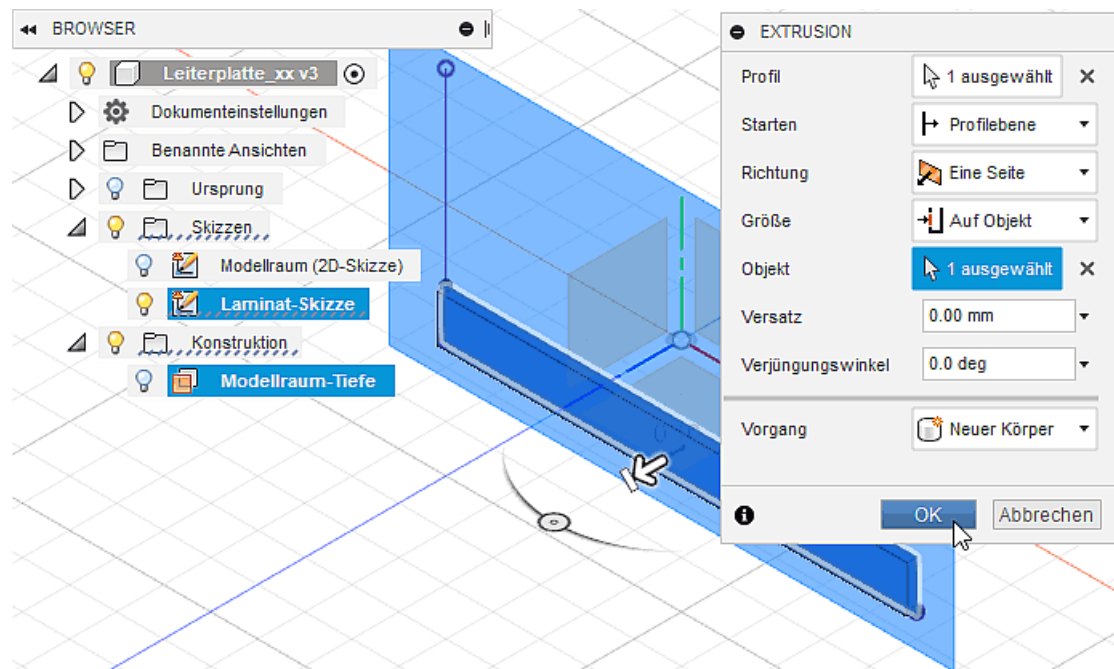
Für jeden Körper-Bereich definieren wir eine separate Skizze auf der zuvor definierten Geometrie. Die Laminat-Skizze platzieren wir auf der Basis-Skizze des Modell-Raums:

- Es ist günstig zuvor die Sichtbarkeit der Versatz-Ebene auszuschalten!
- **Wichtig:** Damit das Fangen der zu skizzierenden Profile an vorhandener Geometrie funktioniert, muss folgendes konfiguriert sein:
 1. **Nutzer > Voreinstellungen > allgemein > Konstruktion > Kanten automatisch auf Referenz projizieren = aktiv**
 2. **SKIZZENPALETTE > Optionen > Fang = inaktiv** (bezieht sich auf Skizzierraster!)
- Die einzelnen Skizzen sollten nach ihrer Erzeugung sinnvolle Bezeichner erhalten.
- Das 2D-Profil des Bereiches wird als "Rechteck mit 2 Punkten" skizziert. Die Rechteck-Punkte können dabei automatisch an vorhandener Geometrie gefangen werden (z.B. zuerst rechte untere Ecke und dann obere Ecke irgendwo auf Modellraum-Rand):

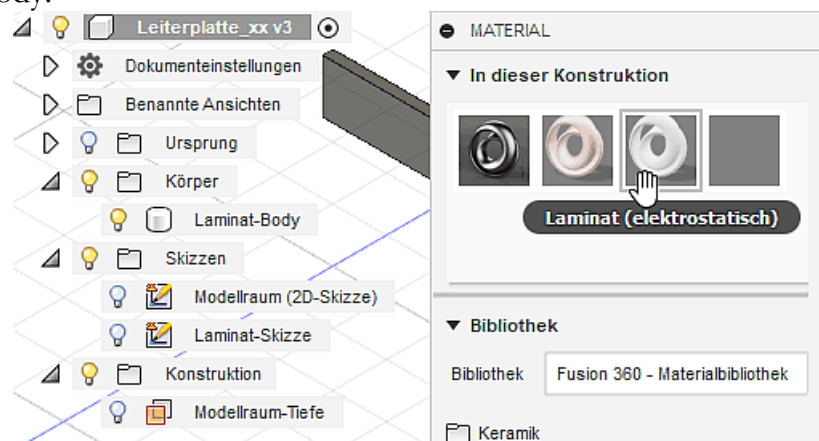


- Die Breite des Laminat-Bereiches ergibt sich somit automatisch aus der Breite des Modellraums.
- Für die Höhe des Laminat-Bereiches definieren wir einen Benutzer-Parameter **h_FR4 = 0,5 mm** und bemaßen damit die Höhe des Rechtecks.

Vor dem Erstellen eines Bereich-Körpers mittels Extrusion sollte man die Sichtbarkeit aller nicht benötigten Skizzen ausschalten und die isometrische Ausgangsansicht wählen:



- Mittels **Werkzeug > Erstellen > Extrusion** erzeugen wir aus dem Rechteck-Profil und der Versatz-Ebene den Körper für den Laminat-Bereich.
- Die Zuweisung des Materials erfolgt über **Werkzeug > Ändern > Material** durch **Drag & Drop** auf den Laminat-Body:

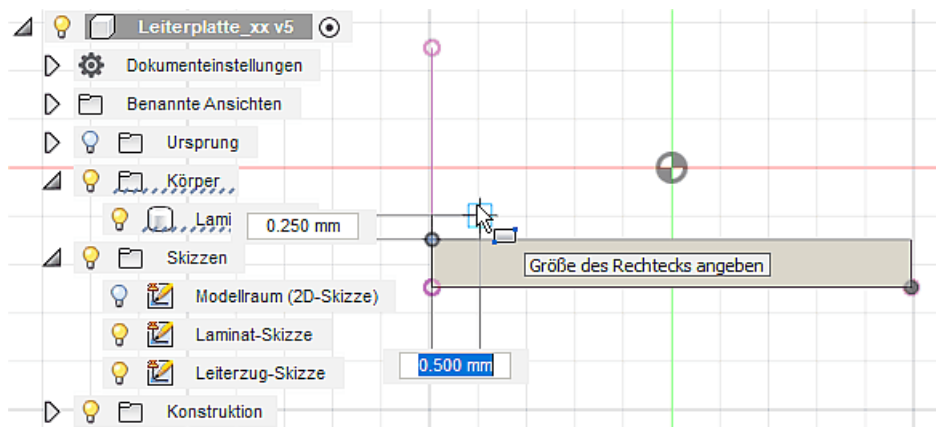


- Ob die Zuweisung wirklich erfolgt ist, kann man im Browser mittels **Laminat-Body > Kontextmenü > Eigenschaften** überprüfen.

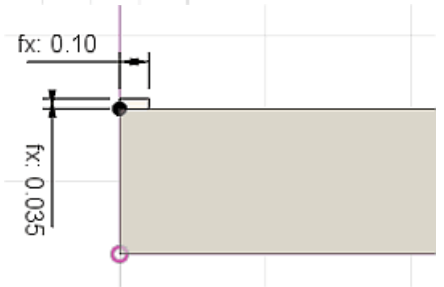
Leiterzug-Bereich

Der Bereich des Leiterzugs wird direkt über dem Laminat-Bereich an der Symmetrie-Linie der Leiterplatte platziert (linker Rand des Modell-Raums):

- **Wichtig:**
 - Die neue Skizze für den Leiterzug ist auf der vorhandenen Laminat-Skizze zu platzieren.
 - Das Fangen vorhandener Skizzen-Geometrie funktioniert nicht immer stabil. Hier hilft es die Sichtbarkeit der zugehörigen Skizze zu aktivieren bzw. zu deaktivieren (im Beispiel betrifft dies die Laminat-Skizze).
- Das Leiterzug-Profil ist als "Rechteck mit zwei Punkten" beginnend mit dem Fangen der linken unteren Ecke zu skizzieren:

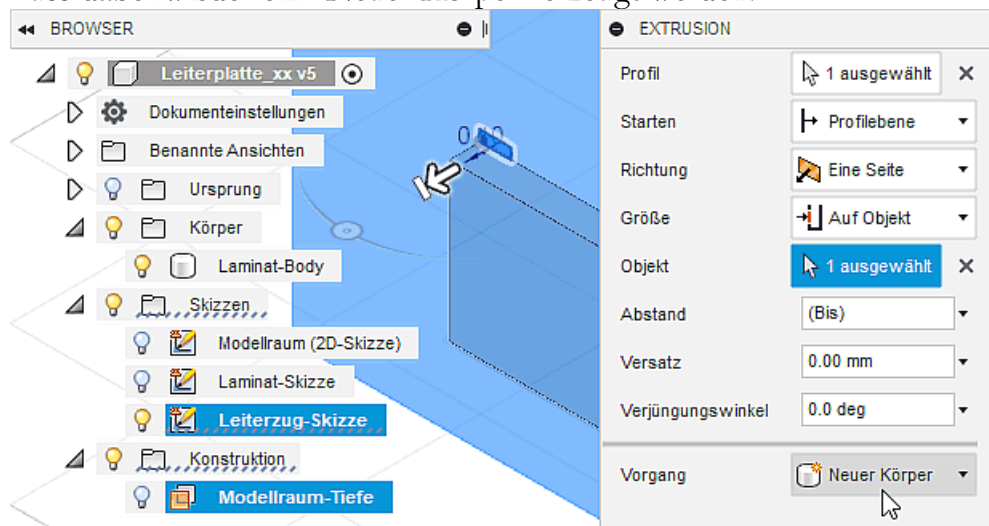


- Für die Bemaßung des Leiterzug-Bereichs definieren wir zwei neue Benutzerparameter:
 - $h_{Cu} = 0,035$ mm (Leiterzug-Höhe)
 - $b_{Cu} = 0,2xx$ mm (Leiterzug-Breite) - mit $xx=00\dots99$ laut Teilnehmer-Nummer
- **Achtung:** infolge der Nutzung der Symmetrie-Beziehungen beträgt die Bereichsbreite im Modell nur $b_{Cu}/2!$



Das Erstellen des Leiterzug-Bereichs mittels Extrusion funktioniert wie beim Laminat-Bereich:

- **Wichtig:** Es muss dabei wieder ein "Neuer Körper" erzeugt werden!



- Der erzeugte Körper ist entsprechend als "**Leiterzug-Body**" zu benennen und die Zuweisung des Materials "Kupfer (elektrostatisch)" vorzunehmen.

Luft-Bereich

Der noch freie Bereich innerhalb des Modell-Raums ist mit Luft zu füllen:

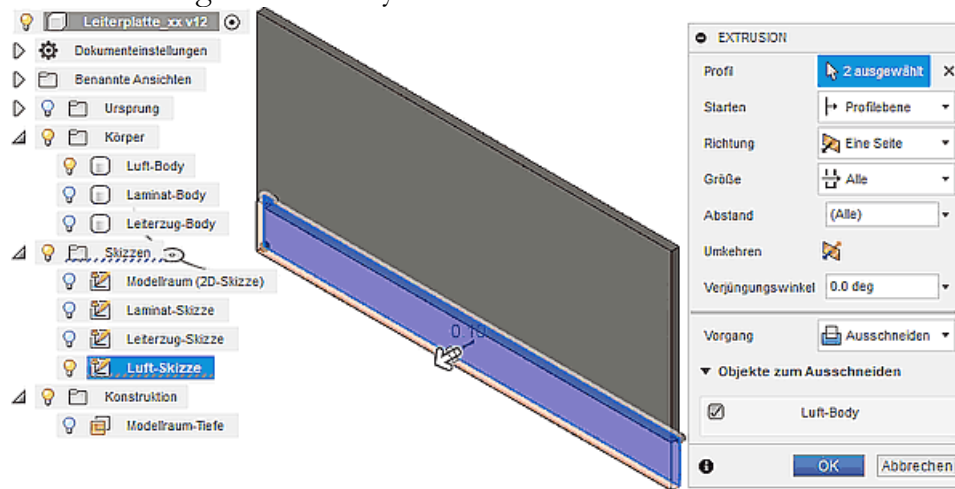
- Damit man später die Breite des Modellraums bis an die Kante des Leiterzuges reduzieren kann, sollte man folgende Vorgehensweise wählen:
 - Zuerst den ganzen Modellraum mit einem Luft-Body füllen.
 - Danach den Laminat- und den Leiterzug-Bereich ausschneiden, sodass nur der tatsächliche Luftraum als Luft-Body übrig bleibt.
- Durch Extrusion des Rechteck-Profiles der Modellraum-Skizze mit der Modellraumtiefe **Lz** bzw. mit der Arbeitsebene als Zielobjekt erzeugen wir den Luft-Body.

Hinweis: Ab hier kann auch ein alternatives Vorgehen genutzt werden (siehe unten)

- Wir definieren eine Luft-Skizze, welche wir auf der Leiterzug-Skizze zu platzieren, um Leiterzug- und Laminat-Bereich aus dem Luft-Body herauszuschneiden:

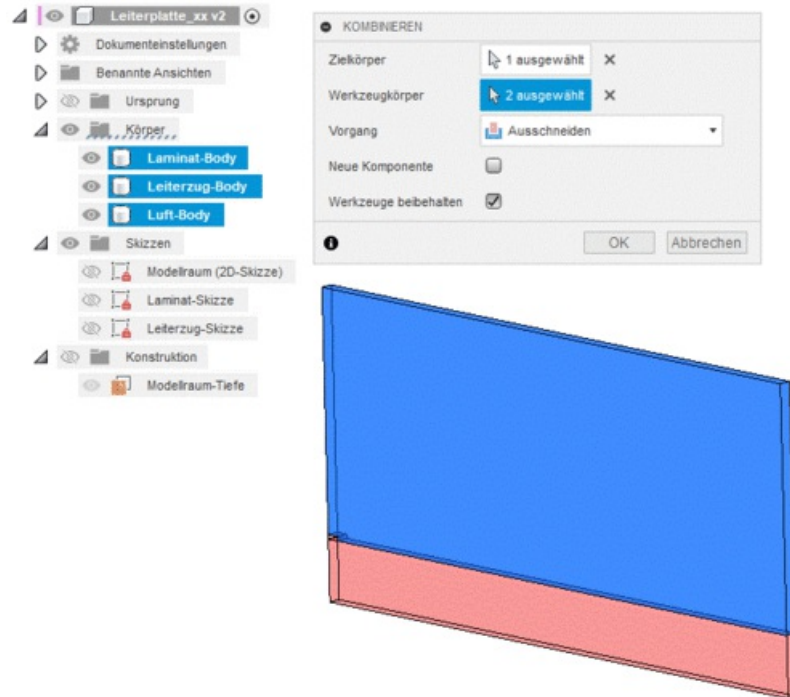


- Zum Ausschneiden eines Profils aus einem vorhanden Körper mittels Extrusion sind folgende Schritte auszuführen:
 - Erstellen > Extrusion** öffnet den Extrusionsdialog.
 - Profil-Auswahl:** die Teilflächen des Profils sind nacheinander mit gedrückter <STRG>-Taste zu markieren.
 - Größe = Alle** (entspricht durchgängiger Extrusion)
 - Vorgang = Ausschneiden** wählen und nur Luft-Body als Objekt zum Ausschneiden als "Sichtbar" markieren.
 - Quittieren mit OK** bewirkt das Herausschneiden der Bereiche des Leiterzuges und des Laminats aus dem vorläufigen Luft-Body:

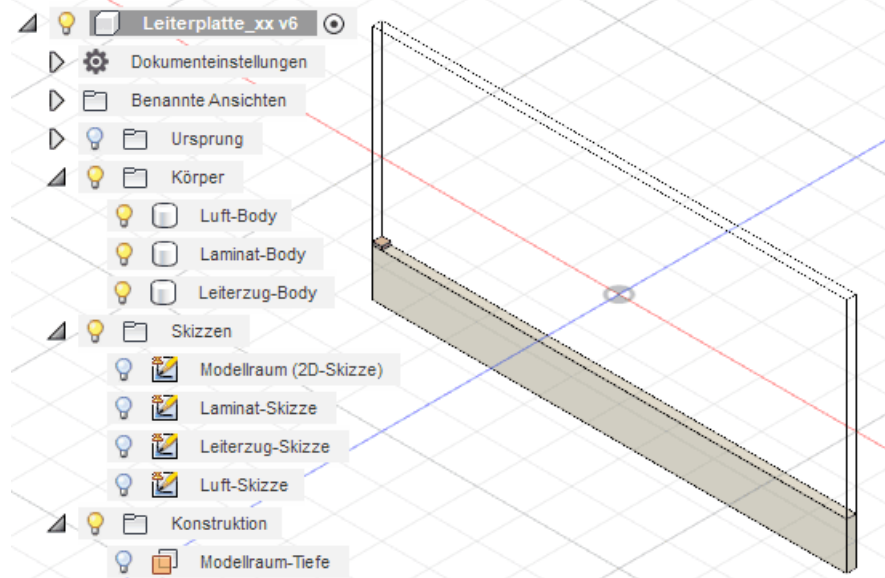


Alternativer Weg zum Verkleinern des Luftkörpers:

- Prinzipiell reicht es aus, vom über den Modellraum definierten Luft-Body, die beiden anderen Körper "abzuziehen".
- Solche booleschen Operationen mit Körpern werden in den meisten CAD-Systemen unterstützt.
 - Ändern > Kombinieren**
 - Zielkörper** ist der Luft-Body
 - die **Werkzeugkörper** Laminat und Leiterzug werden mit diesem "verrechnet"
 - der Vorgang ist dabei **Ausschneiden** (Subtraktion bzw. boolesches XOR)
 - es ist keine **neue Komponente** nötig
 - die **Werkzeugkörper** müssen aber dringend **beibehalten** werden
 - Quittieren mit OK** bewirkt das Herausschneiden der Bereiche des Leiterzuges und des Laminats aus dem vorläufigen Luft-Body:



- Der Luft-Body wird nach Zuweisung des elektrostatischen Luft-Materials durchsichtig dargestellt:



Nach der Definition des Luft-Bereiches verfügen wir über ein parametrisiertes CAD-Modell. Dieses ermöglicht sowohl eine einfache Änderung der betrachteten Leiterplatten-Geometrie als auch der Größe des zu vernetzenden Finite-Elemente-Modellraum. Damit können wir uns im nächsten Schritt der Simulation des elektrostatischen Feldes in diesem Modellraum widmen.



Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrostatik_-_Fusion_-_CAD-Modell&oldid=25709“

Software: FEM - Tutorial - Elektrostatik - Fusion - elektrostatische Simulation

Aus OptiYummy

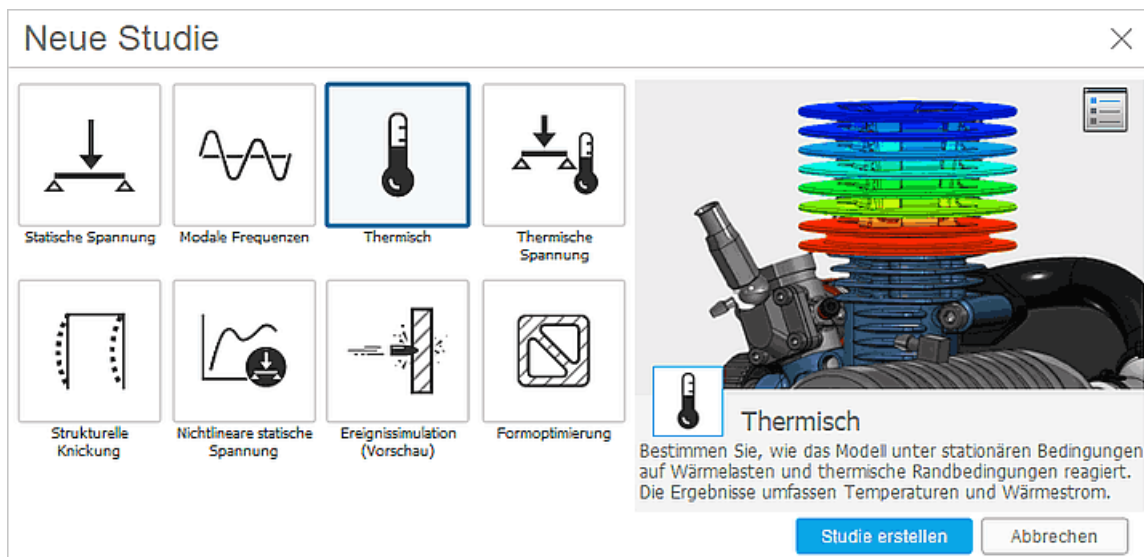
↑



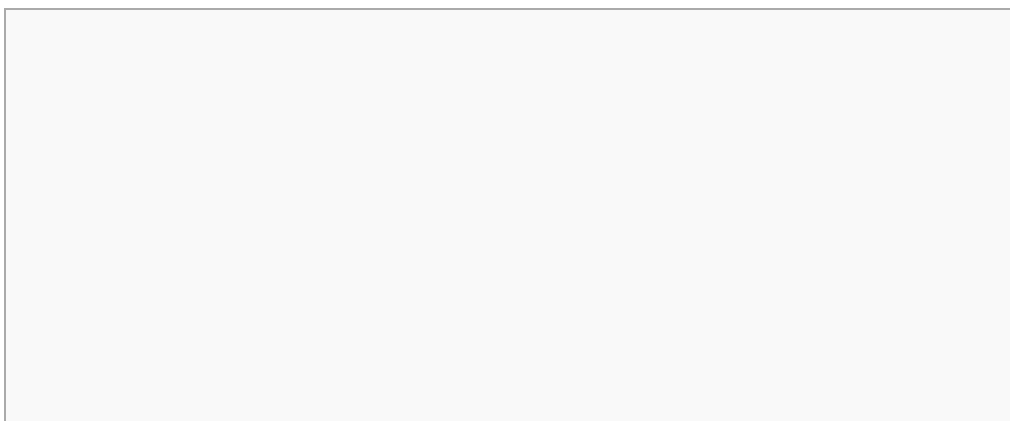
Elektrostatische Simulation mittels thermischer Studie

Wir wechseln nun vom Arbeitsbereich "Konstruktion" in den Arbeitsbereich "Simulation":

- Innerhalb dieses Arbeitsbereiches können auf Grundlage des CAD-Modells Finite-Elemente-Simulationen für unterschiedliche physikalische Domänen durchgeführt werden (zur Zeit nur für Strukturmechanik und Wärme).
- Je nach gewünschten Analyse- bzw. Optimierungsanforderungen muss man sich in Abhängigkeit von der betrachteten physikalischen Domäne für einen Studientyp entscheiden, welcher dann die erforderliche Funktionalität bereitstellt:



- Elektrische Felder werden als physikalische Domäne vom *Fusion 360* nicht unterstützt. Wir können jedoch problemlos die Potentialfeld-Analogie zwischen Temperaturfeld und elektrostatischem Feld nutzen.
- Wir wählen den Studientyp "Thermisch", der sich auf reine Wärmesimulationen beschränkt (der Studientyp "Thermische Spannung" behandelt zusätzlich innerhalb der Konstruktion die Wechselwirkung zwischen der Wärmeverteilung und der mechanischen Verformung und der daraus resultierenden mechanischen Spannung).

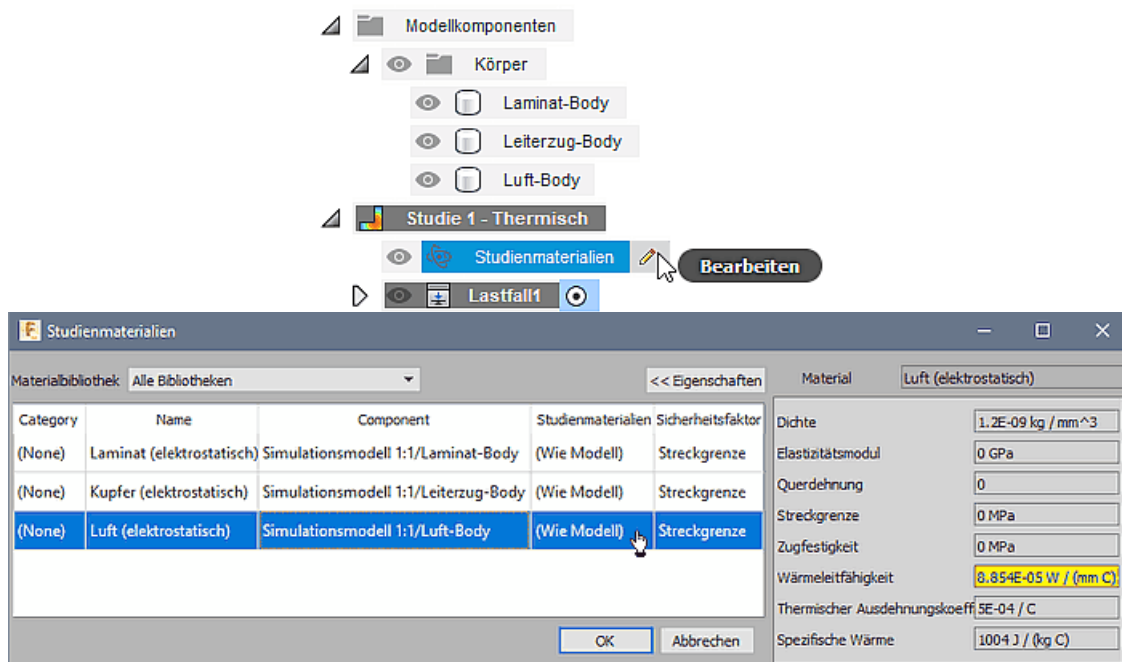


Inhaltsverzeichnis

- 1 Studien-Materialien und -Einheiten
- 2 Kontakt-Generierung und Vernetzung
- 3 Null-Potential und Leiterzug-Ladung
- 4 Simulation des elektrischen Potentialfeldes
 - 4.1 Modell-Berechnung
 - 4.2 Darstellung der Simulationsergebnisse
 - 4.3 Modell-Validierung anhand der Dimensionierungsgleichung
 - 4.4 Ermittlung der Leiterzug-Kapazität

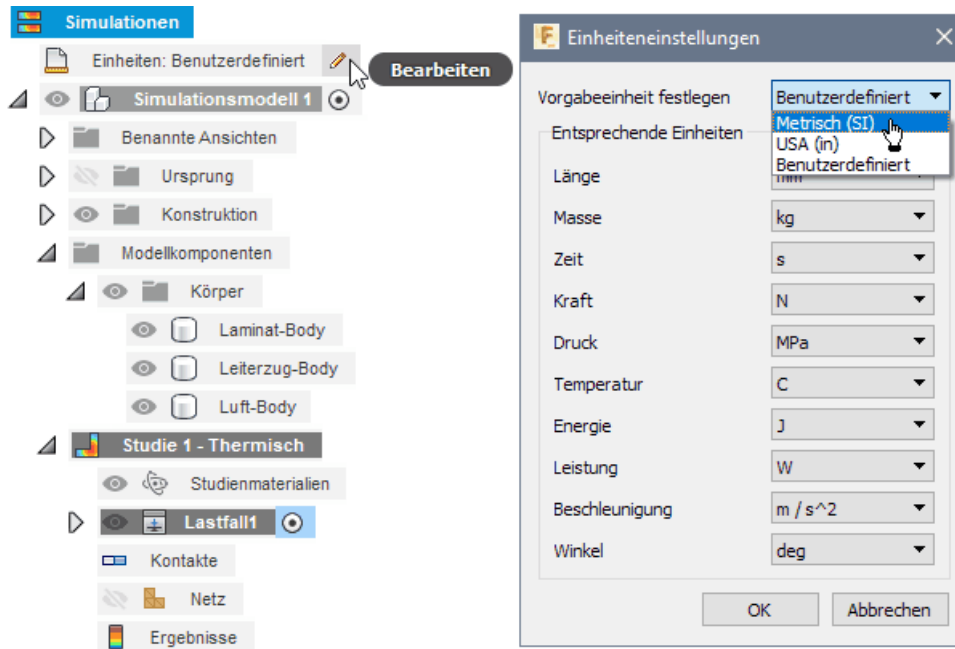
Studien-Materialien und -Einheiten

Zuerst sollte man überprüfen, ob alle Körper des Modells auch wirklich mit den richtigen Material-Parametern für die "thermische Leitfähigkeit" entsprechend ihrer Permittivität ϵ versehen sind (bei leeren Datenfeldern zuerst in Feld "(Wie Modell)" klicken, dann auf Material-Namensfeld):



- **Hinweis:** Bei einer ungünstigen Kombination aus Schriftsatz und Monitorauflösung kann es vorkommen, dass die Anzeigefelder für die Materialparameter zu schmal sind und deshalb die vorderen Ziffernstellen abgeschnitten werden. Dies ist anscheinend vorwiegend ein Problem chinesischer Windowsversionen. In diesem Fall kann man über das Kontextmenü der rechten Maustaste auf das Material im Browser die Materialeigenschaften wertmäßig komplett darstellen.
- Man wird bemerken, dass die Werkstoffparameter z.B. die Einheiten **mm** und **C** anstatt der SI-Einheiten **m** und **K** verwenden, was die Überprüfung der zuvor in SI-Einheit eingegebenen Wärmeleitfähigkeiten erschwert.

- Wir brechen deshalb vorläufig die Material-Überprüfung ab und öffnen die Einstellungen für die Einheiten:

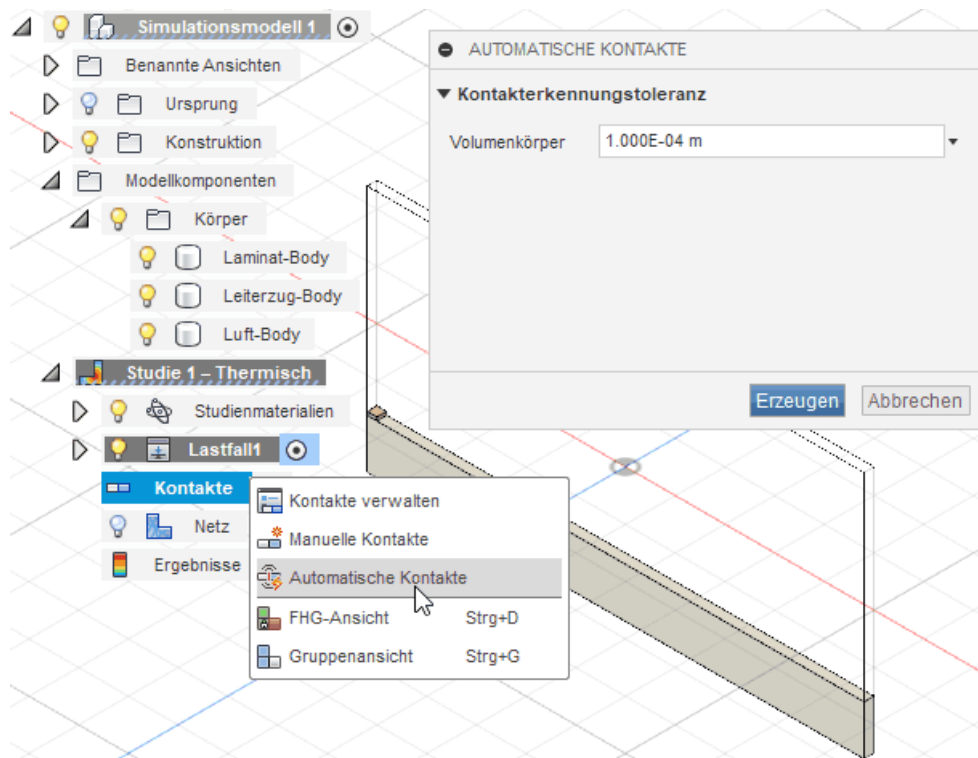


- Ein Umschalten der Vorgabeeinheit auf "**Metrisch (SI)**" würde nur die Temperatur-Einheit von **Celsius** auf **Kelvin** ändern. Die Länge behält eigenartiger Weise trotzdem die Einheit **Millimeter** und könnte danach nicht manuell auf **Meter** geändert werden!
- Wir belassen es deshalb bei der Vorgabeeinheit "**Benutzerdefiniert**" und wählen manuell **Kelvin** und **Meter**.
- Danach sollten die thermischen Leitfähigkeiten der Studienmaterialien die Einheit **W/(m·K)** besitzen und damit wertmäßig leicht überprüfbar sein.

Kontakt-Generierung und Vernetzung

In der 2. FEM-Übung haben wir uns am Beispiel der Strukturmechanik intensiv mit der Wirkungsweise und Definition von **Kontakten** zwischen Bauteilen innerhalb einer Baugruppe beschäftigt:

- Um den Wärmefluss zwischen den einzelnen Körper einer Konstruktion im FEM-Modell zu ermöglichen, müssen thermische Kontakte definiert werden. Dies betrifft im Normalfall alle Berührungsflächen zwischen den Körpern.
- Für die Erzeugung der erforderlichen Kontakte stehen in kommerziellen FEM-Programmen meist Automatismen zur Verfügung. Diese können aber durchaus zu physikalisch unsinnigen Kontakten führen!
- Beim Aufruf der Funktion zur automatischen Generierung von Kontakten erfolgt die wichtige Abfrage zur Kontakterkennungstoleranz. Der Vorgabewert von z.B. **100 µm** ist größer als die Leiterzugdicke von **35 µm** und würde einen Kontakt zwischen Laminat und Luft über der Leiterzug hinweg erzeugen! Wir müssen diesen Wert also z.B. auf **10 µm** verringern:



- Nach dem Klick auf Erzeugen wird das Modell ausgewertet und Kontaktsätze werden hinzugefügt, wenn die Flächen oder Kanten die folgenden beiden Kriterien erfüllen:
 1. Der Abstand zwischen den Objekten darf nicht größer als die Kontakterkennungstoleranz sein.
 2. Die Objekte müssen parallel sein und innerhalb eines Toleranzbereichs von 15 Grad liegen.
- Jeder automatisch erzeugte Kontaktsatz wird wie folgt definiert (**Siehe** → **Fusion-Onlinehilfe**):
 - **Kontakttyp** = Verklebt (kein Temperatur-Unterschied zwischen den beiden Kontaktseiten)
 - **Durchdringungstyp** = Symmetrisch (Master- und Slave-Körper werden gleich behandelt)

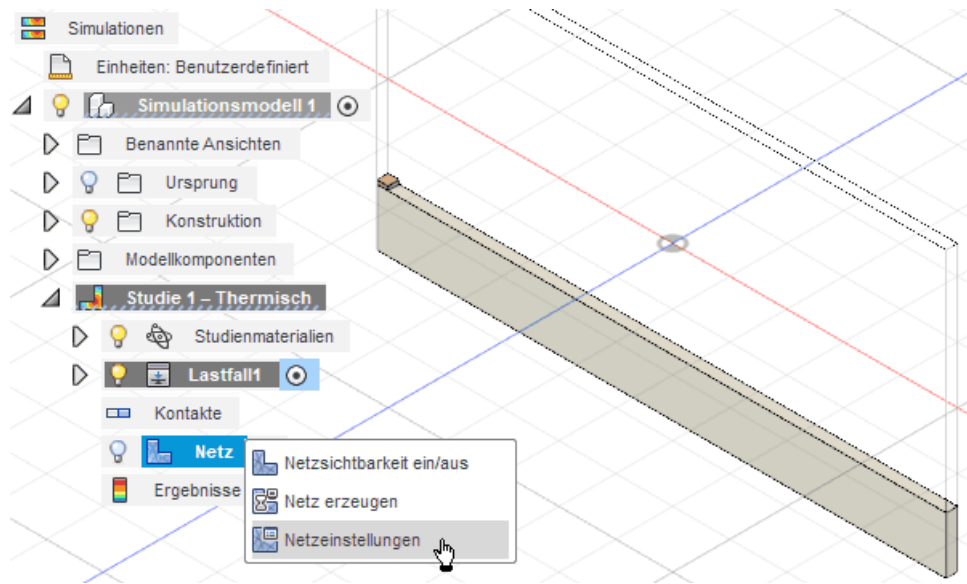
Kontakte-Kontextmenü > **Kontakte verwalten** öffnet den Kontaktmanager:

KONTAKTMANAGER				
		<input type="radio"/> Nach Körpern auflisten <input checked="" type="radio"/> Nach Kontaktsatz auflisten		<input type="button" value="Kontaktsatz erstellen"/>
Kontaktsatz	Kontakttyp	Durchdringungstyp	Körper	Objekte
Verklebt1	Verklebt	Symmetrisch	/Leiterzug-Body	Fläche 86
			/Luft-Body	Fläche 102
Verklebt2	Verklebt	Symmetrisch	/Leiterzug-Body	Fläche 85
			/Luft-Body	Fläche 103
Verklebt3	Verklebt	Symmetrisch	/Laminat-Body	Fläche 65
			/Luft-Body	Fläche 101
Verklebt4	Verklebt	Symmetrisch	/Laminat-Body	Fläche 65
			/Leiterzug-Body	Fläche 83

- Zugehörig zum jeweils in der Tabelle ausgewählten Kontaktsatz oder Flächen-Objekt werden die zugehörigen Flächen in der 3D-Darstellung des Modells farblich hervorgehoben.
- Man sollte durch Anwahl der einzelnen Kontaktsätze bzw. Flächen in der Tabelle überprüfen, ob wirklich alle Berührungsflächen zwischen den Materialbereichen durch jeweils einen Kontaktsatz korrekt verbunden wurden!

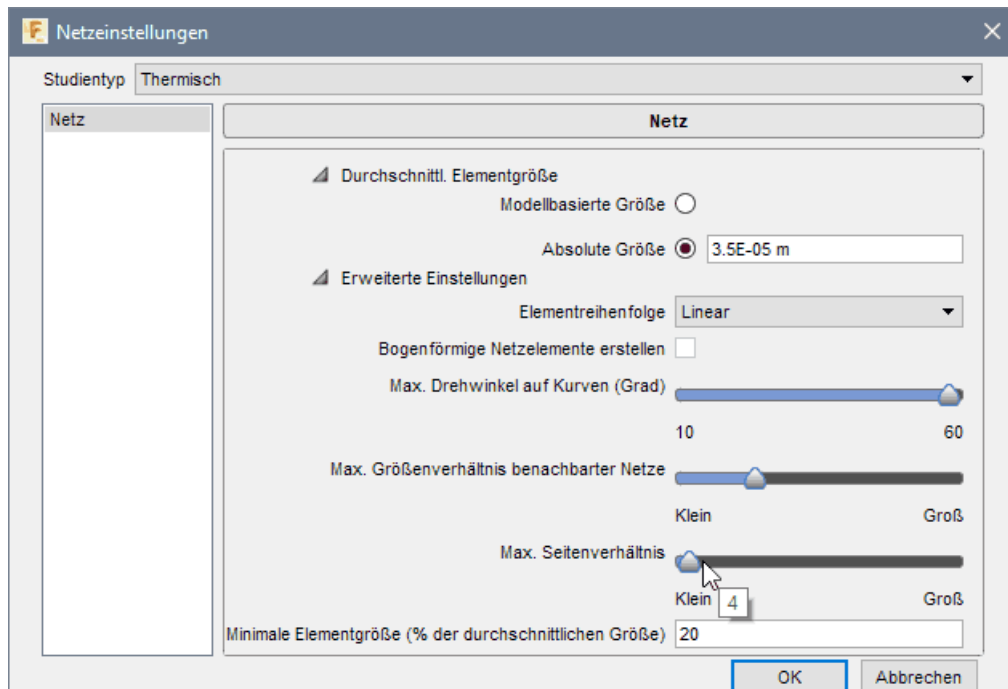
Die Vernetzung muss insbesondere im Bereich der Leiterzug-Kanten hinreichend fein sein, weil dort die größten Potential-Änderungen auftreten. Global würde eine Vernetzung mit einer Elementschicht genügen. Allerdings sollten die Tetraeder-Elemente nicht zu spitz werden (Max. Seitenverhältnis

möglichst klein \rightarrow 4:1). Zu den globalen Netzeinstellungen gelangt man im Browser über das Netz-Kontextmenü:

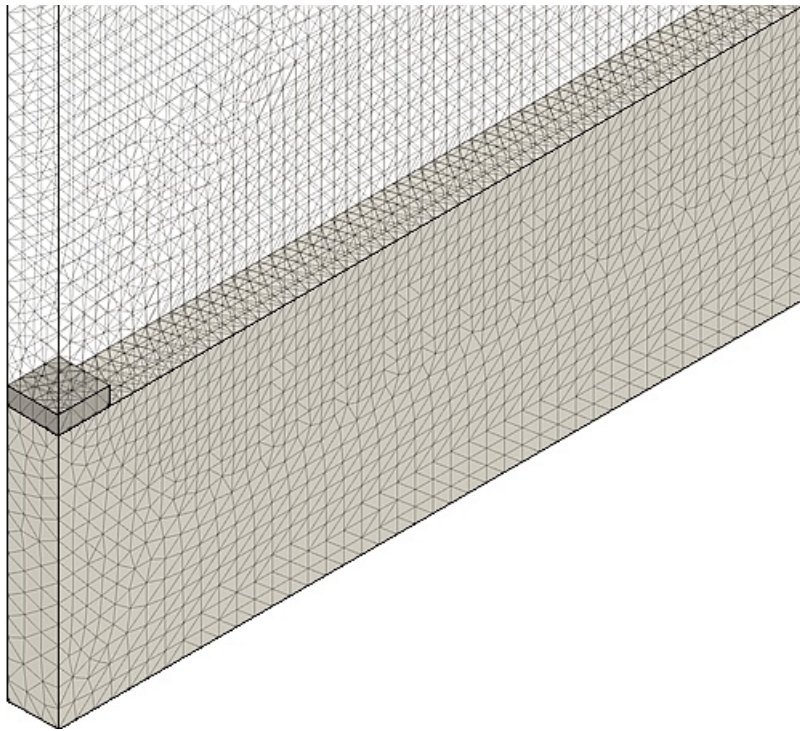


Zur Konfiguration eines thermischen Netzes ist es erforderlich, die erweiterten Einstellungen zu öffnen:

- Wir betrachten nachher noch im Detail, weshalb eine lokale feinere Vernetzung des Laminats unterhalb der Leiterzug-Kante nur mit erheblichem Aufwand möglich ist.
- Im Beispiel beschränken wir uns wegen dieses Aufwandes auf eine globale Vernetzung, welche jedoch im Bereich des Leiterzuges hinreichend fein ist.
- Wir orientieren uns mit der durchschnittlichen absoluten Elementgröße an der Leiterzugdicke von 35 μm . Dies ergibt innerhalb der Leiterzugdicke eine Elementschicht und eine Teilung in Tiefe und Breite in mindestens drei Elementschichten:

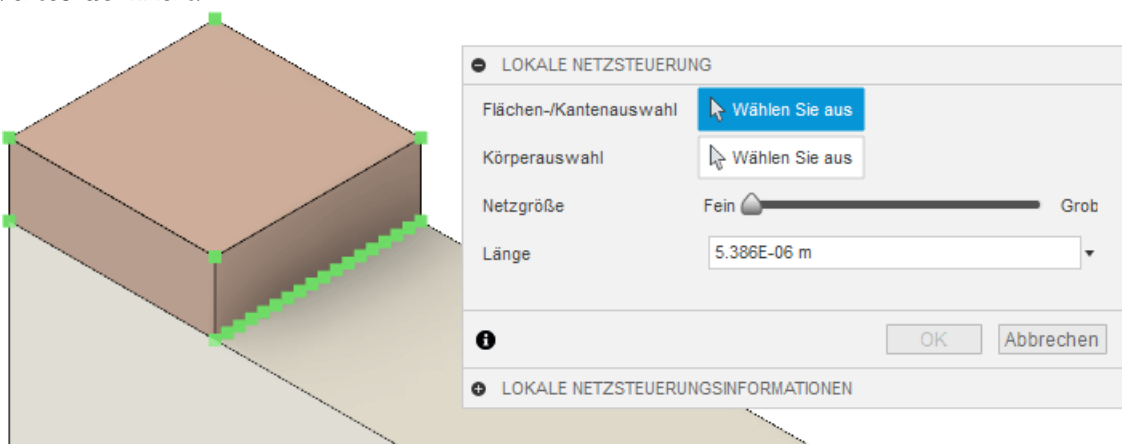


- Der thermische Solver von Fusion 360 unterstützt lineare und parabolische Tetraeder-Elemente (im Dialog ungünstig als "Elementreihenfolge" übersetzt) - im Beispiel genügt die lineare Ansatzfunktion.
- Ungünstig spitze Elemente werden durch ein max. Seitenverhältnis von 4 vermieden.
- Die restlichen Einstellungen können ihre Vorgabewerte behalten.
- Nach dem "Netz erzeugen" ergibt sich die folgende Vernetzungsstruktur, welche in den Leiterzug-fernen Bereichen natürlich viel zu fein ist:



Hinweise zur lokalen Netzsteuerung (nur zur Information!):

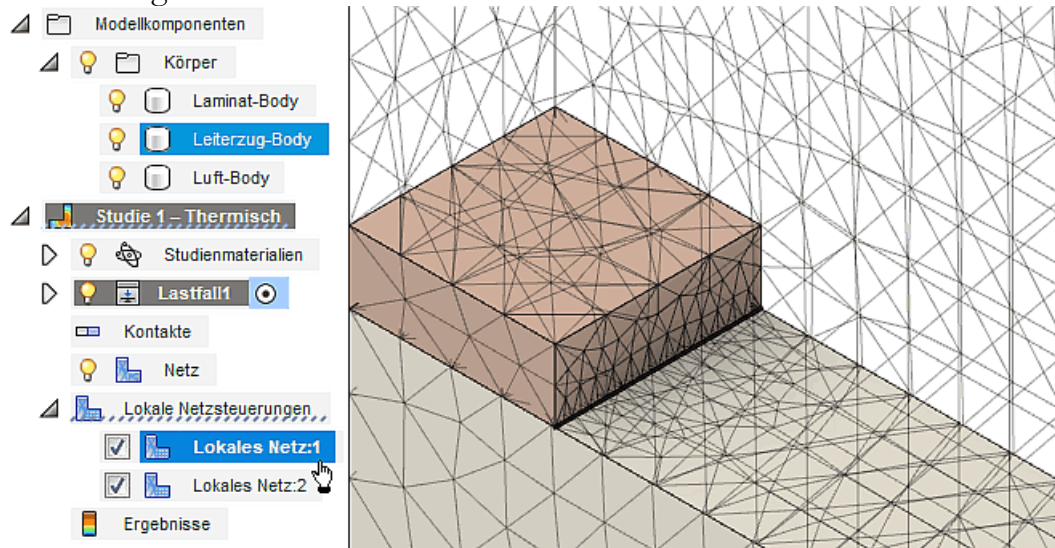
- Die einzelnen Körper innerhalb des Modells werden im *Fusion 360* immer unabhängig von den anderen Modell-Körpern vernetzt:
 - Die erweiterten Einstellungen der Netzsteuerung gelten einheitlich für alle Körper.
 - Im Normalfall gilt eine einheitliche durchschnittliche Elementgröße für alle Modell-Körper (Absolutwert oder Relativwert zum virtuellen Rahmen des Gesamtmodells).
 - Aktiviert man die Option "Netzgröße pro Bauteil skalieren", so ist die Elementgröße in jedem Körper relativ zum virtuellen Rahmen dieses Körpers. Der Relativwert ist jedoch für alle Körper gleich.
- Die Wechselwirkung zwischen den Körpern wird unabhängig von ihrer individuellen Vernetzungsdichte über die Kontaktsätze vermittelt. Dabei ist es jedoch numerisch günstig, wenn kontaktierte Flächen eine ähnliche Vernetzungsdichte besitzen.
- Mit dieser globalen Vernetzungssteuerung kann die gewünschte feinere Vernetzung um die Leiterzugkante nicht realisiert werden!
- **Werkzeug > Verwalten > Lokale Netzsteuerung** eröffnet die Möglichkeit, z.B. Kanten auszuwählen, welche feiner vernetzt werden sollen. Die Elementgröße wird durch eines Absolutwertes definiert:



- Die ausgewählte Kante bzw. Fläche bezieht sich immer nur auf die lokale Vernetzung des zugehörigen Bauteils. Die Auswahl der "richtigen" Kante kann man z.B. durch Ausblenden der umliegenden Körper gewährleisten.
- Grenzen wie in unserem Beispiel an der kritischen Leiterzugkante drei Körper, so muss man diese

Kante für jeden Körper einzeln auswählen und dafür möglichst die gleiche Elementgröße definieren.

- Leider existiert in unserem Modell am Laminat-Körper keine Kante an dieser Stelle, so dass im Laminat hier keine lokale Netzverfeinerung möglich ist! Damit fehlt die Netzverfeinerung gerade dort, wo sie am wichtigsten wäre:

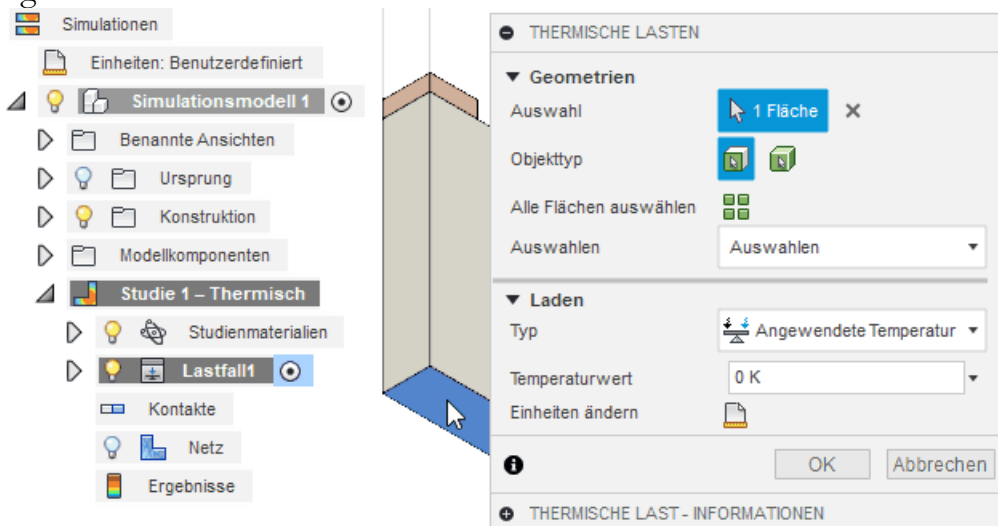


- Mit einigen Tricks gelingt es bestimmt, im CAD-Modell eine "Pseudo-Kante" im Laminat an dieser Stelle zu erzeugen. Wir verzichten innerhalb dieser Übung auf den erforderlichen Aufwand und nutzen stattdessen die etwas feinere globale Vernetzung.

Null-Potential und Leiterzug-Ladung

Es ist günstig, die Netzdarstellung vor der Definition der thermischen Randbedingungen auszuschalten, um die Auswahl der Flächen bzw. Körper übersichtlicher zu gestalten:

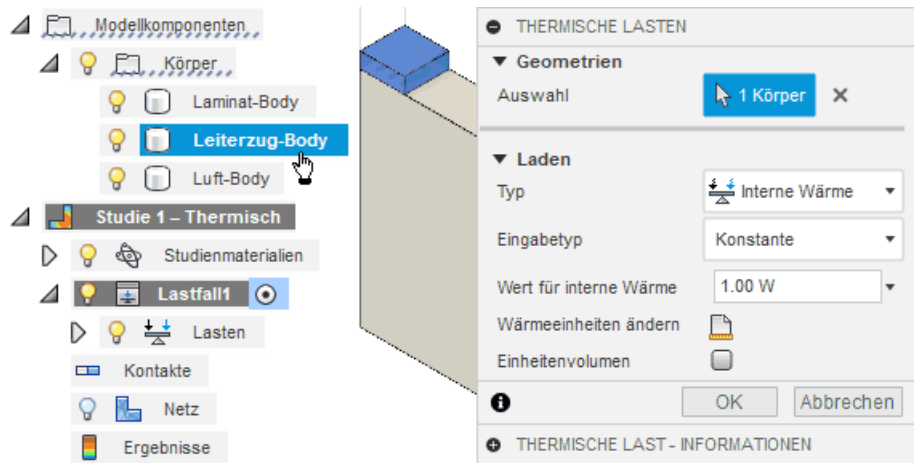
- Werkzeug > Lasten > Thermische Lasten** öffnet den Dialog für die thermischen Randbedingungen:



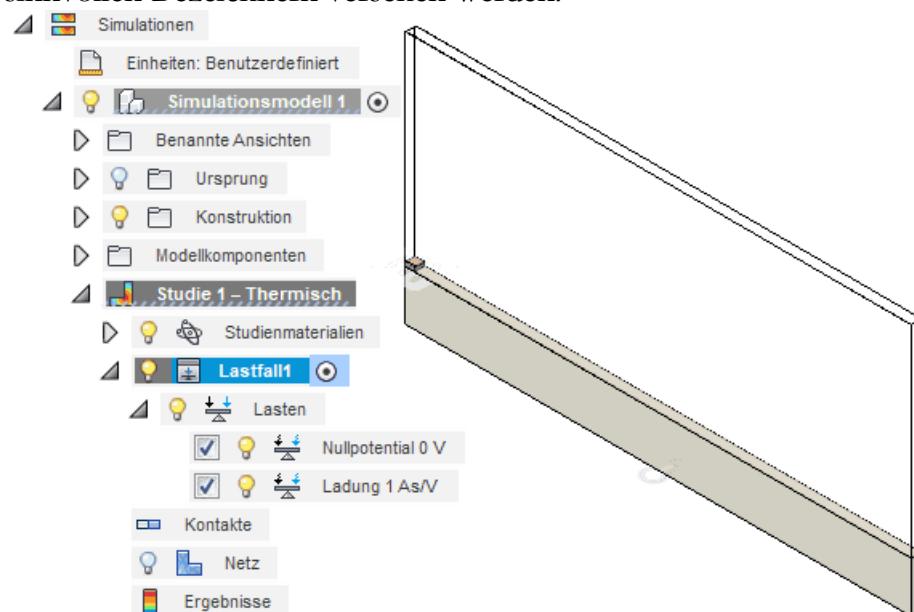
1. Null-Potential [V] (Analogie = "Angewendete Temperatur [K]"):

- Als Objekttyp ist die Fläche unterhalb des Laminat-Bereiches auszuwählen.
- Es ist dort der Temperaturwert **0 K** vorzugeben.
- Hinweis:** Infolge eines Grafikfehlers werden u.U. die erforderlichen Dialogfelder unter "Laden" nicht angezeigt. Dann muss man den "Laden"-Eintrag per Mausklick schließen und wieder öffnen!

2. Ladung im Leiterzug [As/V] (Analogie = "Wärmeleistung [W]"):



- Es existieren zwei Möglichkeiten für das Einspeisen einer Wärmeleistung in den Leiterzug-Körper:
 - **"Interne Wärme"** kann direkt auf den gesamten Leiterzug-Körper angewendet werden, was der Realität am nächsten kommt.
 - **"Wärmequelle"** kann nur auf Flächen des Leiterzug-Körpers angewendet werden und die gleichmäßige Verteilung wird dann erst bei der Simulation durch die sehr hohe Leitfähigkeit des Cu-Materials gewährleistet.
- Wir benutzen als Analogie die "Interne Wärme" bezogen auf den gesamten Leiterzug-Körper (nicht pro "Volumeneinheit").
- **Hinweis:** Die Auswahl des Körpers ist am Einfachsten durch Wahl des Leiterzug-Body in der Browser-Darstellung.
- Die als thermische Lasten definierten elektrostatischen Randbedingungen sollten in der Browser-Darstellung mit sinnvollen Bezeichnern versehen werden:

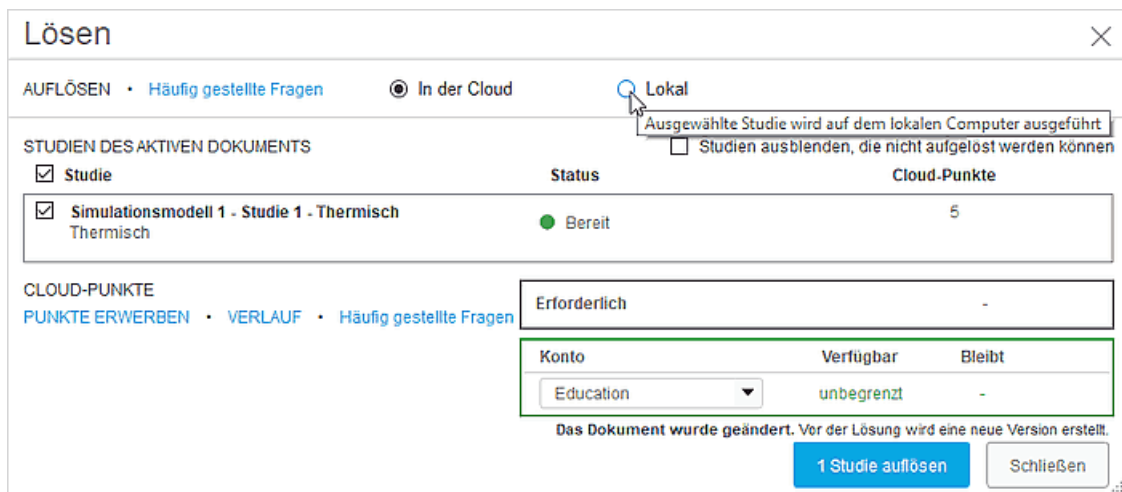


Simulation des elektrischen Potentialfeldes

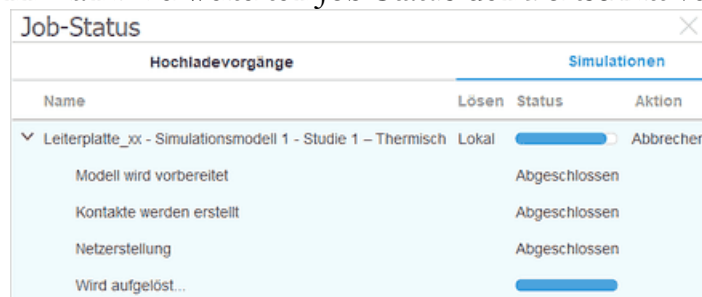
Modell-Berechnung

Autodesk Fusion 360 enthält einen thermischen Solver, welcher ein "Lösen" der partiellen Differentialgleichung des thermischen Modells durchführt:

- Vor dem eigentlichen Berechnen kann man eine **Werkzeug > Lösen > Vorüberprüfung** veranlassen, welche erfolgreich verlaufen sollte.
- Bevor man die Berechnung startet, muss man entscheiden, wo sie ausgeführt werden soll:



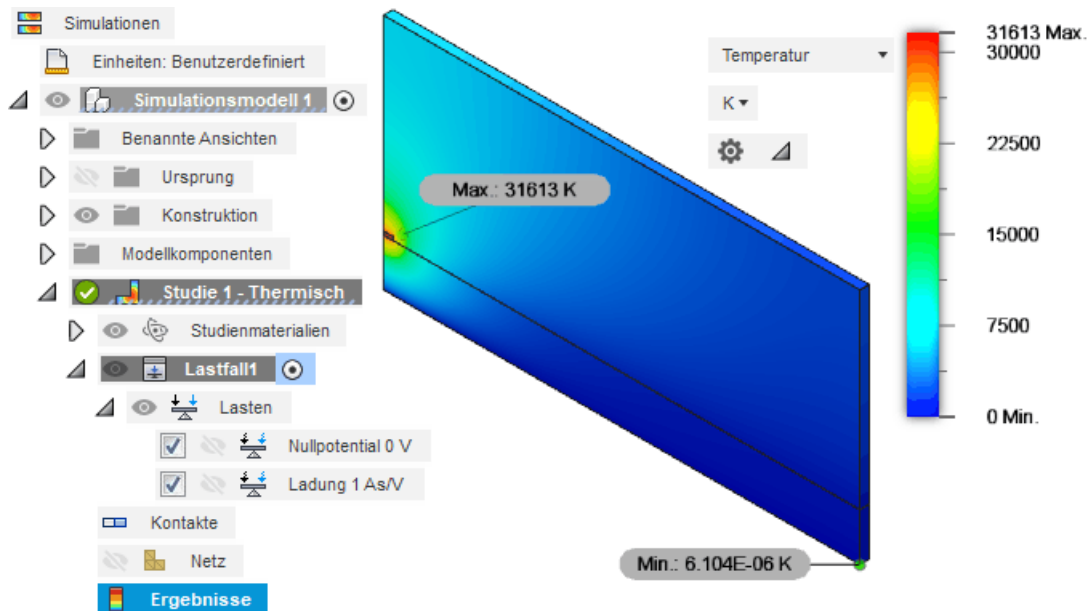
- Standardmäßig werden Berechnungen in der Cloud durchgeführt. Die Kosten der konkreten Berechnung für den kommerziellen Anwender in Form von Cloud-Punkten werden angezeigt (1 Punkt entspricht ca. 1 Euro).
- Die Ultimate-Lizenz für Bildungseinrichtungen besitzt dafür unbegrenzt viele Cloud-Punkte (kostenlos!). Allerdings werden die Berechnungen in der Priorität hinter den gleichzeitig laufenden kommerziellen Berechnungen eingeordnet. D.h., Simulationen von Studenten werden in einer speziellen Warteschlange verwaltet, die in Zeiten mit starker Auslastung, z.B. am Semesterende, recht voll werden kann. Dies kann zu einer beträchtlichen Verzögerung bei der Berechnung der Simulationsergebnisse führen!
- Thermische Simulationen besitzen nur einen **Freiheitsgrad** (Temperatur), so dass ihre Berechnung wesentlich weniger Ressourcen (CPU und RAM) erfordert, als mit einem identischen FEM-Netz der Strukturmechanik mit bis zu 6 Freiheitsgraden (ux,uy,uz,rotx,roty,rotz). Die Berechnung unseres Netzes mit linearen Tetraeder-Elementen kann somit problemlos auf dem lokalen PC ausgeführt werden. Die Berechnung in der Cloud dauert wegen des erforderlichen zusätzlichen Verwaltungsaufwandes sogar im besten Fall etwas länger!
- Während des LöSENS kann man im erweiterten Job-Status den Fortschritt verfolgen:



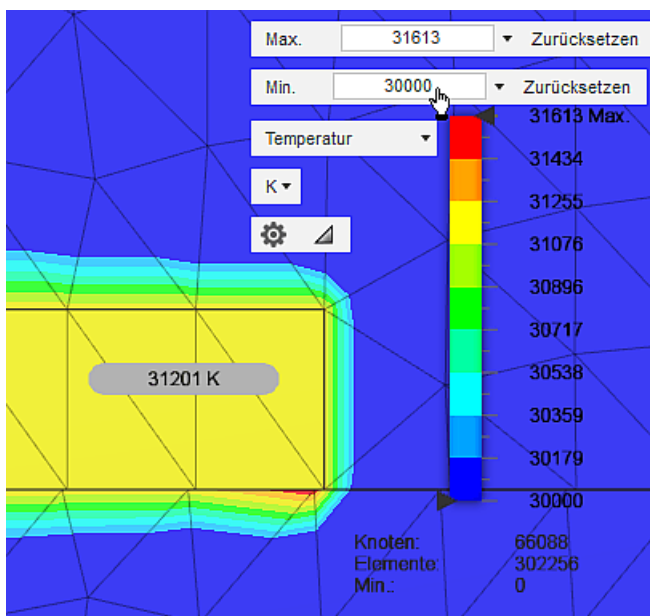
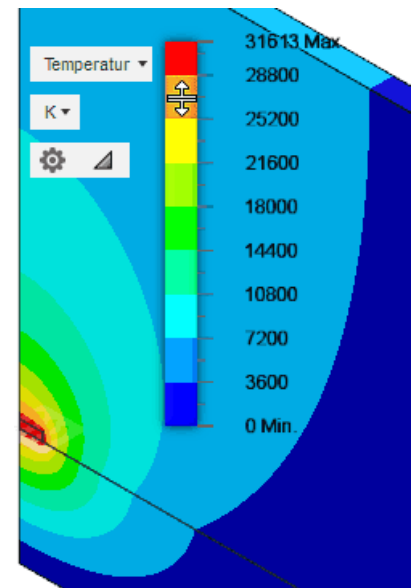
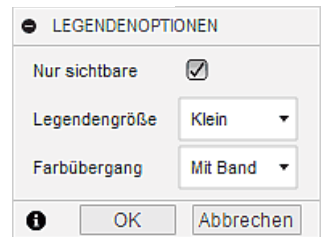
- **Hinweis:** Unabhängig vom Ort der Berechnung, erfolgt anschließend eine Übertragung der Ergebnis-Daten in den Cloud-Bereich des Projektes. Dabei wird jedes Mal eine neue Version der Konstruktionsdatei erzeugt!

Darstellung der Simulationsergebnisse

- Nach erfolgreichem Abschluss der Berechnung erfolgt automatisch die Anzeige der Ergebnisse in Form einer glattschattierten Kontur-Darstellung des Temperaturfeldes im simulierten Finite-Elemente-Netz:



- Die zusätzlich eingeblendeten Min./Max.-Werte stören meist und werden standardmäßig bereits als Grenzen der Legende angezeigt (**Werkzeug > Prüfen > Min./Max. ausblenden**)
- Die glatt-schattierte Darstellung retuschiert wichtige Details (z.B. Unstetigkeitsstellen). Deshalb ist eine gestufte Darstellung ("mit Band") mit einer nicht zu geringen Anzahl von Farbstufen meist günstiger (**ERGEBNISWERKZEUGE > Legendenoptionen**).
- Standardmäßig ist die Legende in 5 Stufen geteilt. Die Teilung der Legende zwischen 2 und 9 kann durch senkrechtes Ziehen des Cursors mit gedrückter linker Maustaste auf dem Farbbalken geändert werden. Bei gewählter Band-Darstellung entspricht die Teilung der Anzahl der Farbstufen.
- Auch bei feinsten Farbstufung könnte man vermuten, dass im Leiterzug infolge der hohen Leitfähigkeit homogen die Maximaltemperatur auftritt. Durch Anpassung des Legendenbereiches kann man die Farbkontur auf einen gewünschten Ergebniswert fokussieren (**ERGEBNISWERKZEUGE > Legende Min./Max**). Der Fokus auf den Leiterzug zeigt ein Auftreten des angezeigten Maximalwertes nur an der unteren Kante des Leiterzuges, was auch physikalisch begründeten Erwartungen entspricht:



- Im Beispiel kann man durch eine weitere Wert-Erhöhung für das Legenden-Minimum zeigen, dass für den Leiterzug tatsächlich eine weitestgehend einheitliche Temperatur von z.B. ca. **31200 K** berechnet wird. Dieser Wert liegt ca. **1,3 %** unterhalb des berechneten Maximalwertes von **31613 K**. Für die Berechnung der Leiterzug-Kapazität wird das hinreichend genaue Leiterzug-Potential benötigt. Berechnete lokale Maximalwerte können aus numerischen Effekten einer ungünstigen Vernetzung resultieren!
- Mittels **Werkzeug > Prüfen > Oberflächen-Antasten** kann man mittels Cursor innerhalb des Leiterzug-Bereiches die berechneten Potentialwerte noch exakter ablesen (im Beispiel **31201 K ± 1 K**).
- "**Punkt-Antasten**" als ähnliche Funktion liefert zusätzlich noch die räumlichen Koordinaten-Werte, welche wir jedoch nicht benötigen.

Mit dem als Spannungswert **U** interpretierten Temperatur-Potential des Leiterzuges und der als Ladung **Q** interpretierten Wärmeleistung könnte man nun die elektrische Kapazität **C** der simulierten Modell-Geometrie berechnen mit $C=Q/U$. Leider gibt es in unserem Beispiel einige möglichen Fehlerquellen bei der Ermittlung der geforderten Leiterzugkapazität pro Meter:

1. Das Modell nutzt die Symmetrie zur Modell-Reduktion auf den halben Querschnitt und berechnet die Kapazität nur für eine Leiterzug-Länge von 0,1 mm.
2. Wir mussten alle Permittivitäten ϵ mit dem Faktor **10¹⁰** skalieren, um in den zulässigen Wertebereich für die thermischen Leitfähigkeiten zu gelangen. Die simulierten elektrischen Kapazitäten sind deshalb um diesen Skalierungsfaktor zu groß!

Modell-Validierung anhand der Dimensionierungsgleichung

Modell-Validierung ist ein Teil-Prozess, welcher die Glaubwürdigkeit der simulierten Modell-Ergebnisse sicherstellen soll. Dabei werden meist in der aufgelisteten Reihenfolge folgende Kriterien berücksichtigt:

1. **Qualitative Übereinstimmung mit unserem Wissen** (Feldverläufe, Zusammenhänge zwischen Modellgrößen (z.B. Proportionalitäten), Plausibilität von Größenordnungen (z.B. kleine oder große Werte)).
2. **Quantitative Übereinstimmung mit anderen validierten Modellen** (welche z.B. nur für bestimmte Spezialfälle gültig sind):
 - Z.B. ermöglicht die "Dimensionierungsgleichung" für einen **Plattenkondensator** bei homogenen Feld für diesen Spezialfall die analytische Berechnung des Kapazitätswertes:
$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A / d$$
 - Exakt diesen Spezialfall muss man mit dem Finite Elemente Modell nachbilden, um die simulierten Ergebnisse mit dem analytisch berechneten Wert vergleichen zu können.
3. **Hinreichende quantitative Übereinstimmung mit der Realität** (Messungen am modellierten Objekt) als letzte und teuerste Stufe der Modell-Validierung, welche man nach Möglichkeit einspart!

Die Parametrisierung des CAD-Modell ermöglicht uns mit geringem Aufwand, den Modellraum auf die Leiterzug-Breite zu begrenzen und die Dimensionierungsgleichung in die Parameterliste zu implementieren:

- **Werkzeug > Arbeitsbereich wechseln** (von "Simulation" in "Konstruktion"), um Änderungen am CAD-Modell vornehmen zu können.
- **Werkzeug > Ändern > Parameter ändern** öffnet die Parameterliste, in der wir die Modellraum-Breite von 5 mm auf die halbe Leiterzugbreite setzen: $L_x = b_{Cu} / 2$
- **Wichtig:** in *Fusion 360* erfolgt die Berechnung des "Ausdruck" zur Ermittlung des aktuellen Parameterwertes unter strenger Berücksichtigung der physikalischen Einheiten. Passt die

resultierende Einheit des Ausdrucks nicht zur Einheit des Parameters, so erfolgt eine Fehlermeldung! Insbesondere für Materialparameter (z.B. Permittivität) existieren keine vordefinierten Einheiten.

1. **Definition erforderlicher Benutzerparameter ohne Einheit** (zugeordnete SI-Einheit als Kommentar):

Parameter	Name	Einheit	Ausdruck	Wert	Kommentare
Favoriten					
▼ Benutzerparameter +					
☆ Benutzerparameter	Lx	mm	b_Cu / 2	0.10	Modellraum-Breite
☆ Benutzerparameter	Ly	mm	2.5 mm	2.50	Modellraum Hoehe
☆ Benutzerparameter	Lz	mm	0.1 mm	0.10	Modellraum-Tiefe
☆ Benutzerparameter	h_FR4	mm	0.5 mm	0.50	Laminat-Hoehe
☆ Benutzerparameter	h_Cu	mm	0.035 mm	0.035	Leiterzug-Hoehe
☆ Benutzerparameter	b_Cu	mm	0.2 mm	0.20	Leiterzug-Breite
☆ Benutzerparameter	eps		4.7 * 8.854E-02	0.416138	Modell-Permittivität Laminat [F/m]
☆ Benutzerparameter	k_eps		1E-10	1e-10	Korrekturfaktor für eps
☆ Benutzerparameter	A_Cu		1 * b_Cu / m	0.0002	Cu-Fläche bei Lz=1m [m²]
☆ Benutzerparameter	d_Cu		h_FR4 / m	0.0005	Plattenabstand [m]

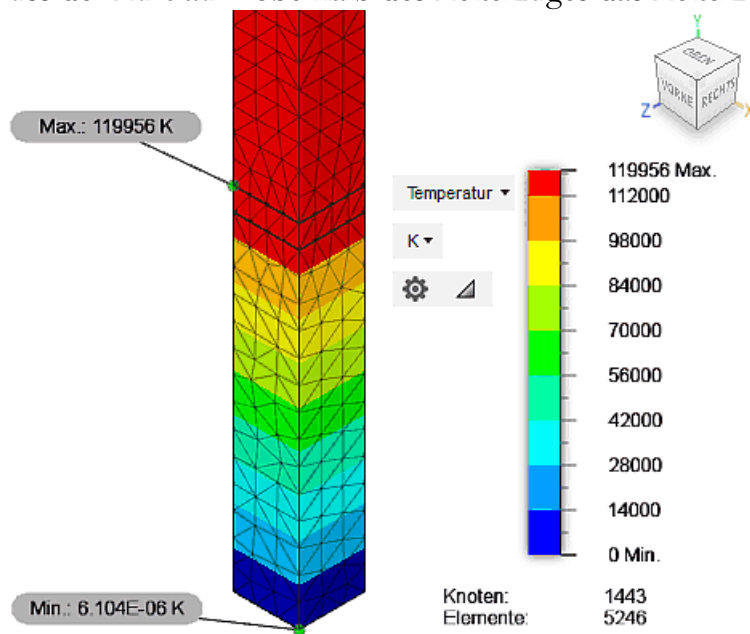
Von Vorteil ist die Kontroll-Möglichkeit für die richtige Berücksichtigung der Maßeinheiten bei den Komponenten der Dimensionierungsgleichung! In welcher Einheit ein Parameterwert verwendet wird, bestimmt man durch den dahinterstehenden Teiler (z.B. "/m").

2. **Berechnung der kompletten Leiterzug-Kapazität** (mit korrigierter Dimensionierungsgleichung):

$$C_{Cu} = k_eps * eps * A_{Cu} / d_{Cu} \quad | \quad \text{Kapazitätsbelag [F/m]}$$

3. **Simulation des "Plattenkondensators"**

- Das Netz mit seinen Kontakten muss neu erzeugt werden. Dazu ist für vor dem Erzeugen der "Automatischen Kontakte" die Kontakterkennungstoleranz erneut anzupassen!
- Nach der Lösung muss der Luftraum oberhalb des Leiterzuges das Leiterzug-Potential besitzen:



Frage:

Um wie viele Prozent unterscheidet sich der auf der Grundlage dieser Finite-Elemente-Simulation berechnete Kapazitätsbelag pro Meter von dem Ergebnis der Dimensionierungsgleichung? Der Berechnungsweg für den kompletten Leiterzug einschließlich der erforderlichen Korrekturfaktoren ist nachvollziehbar zu dokumentieren!

Ermittlung der Leiterzug-Kapazität

Nach der erfolgreichen Validierung des FEM-Modells anhand der Dimensionierungsgleichung konfigurieren wir das Modell wieder mit seiner ursprünglichen Modellraum-Breite:

- Die erneute Simulation des regenerierten FEM-Modells sollte wieder zu den ursprünglichen Ergebnissen führen.
- Auf Grundlage des für den Leiterzug-Bereich plausiblen Potential-Wertes kann man mittels der Definitionsgleichung $C=Q/U$ und den erforderlichen Korrekturfaktoren den Kapazitätsbelag für einen **1 m** langen Leiterzuges berechnen.

Fragen zur Leiterzug-Kapazität → Antworten mit nachvollziehbarem Rechenweg:

1. Welcher Kapazitätswert **C** in pF/m ergibt sich für den realen, kompletten Leiterzug anhand der Simulationsergebnisse aus der Thermo-Simulation mit *Autodesk Fusion 360*?
2. Wie groß ist die prozentuale Abweichung zum Ergebnis des geometrisch gleichen FEMM-Modells.

Hinweis:

Bei starken Abweichungen zwischen den Ergebnissen beider FEM-Modelle liegt ein Fehler vor und dieser muss behoben werden!

← →

Abgerufen von „http://index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrostatik_-_Fusion_-_elektrostatische_Simulation&oldid=25165“
