

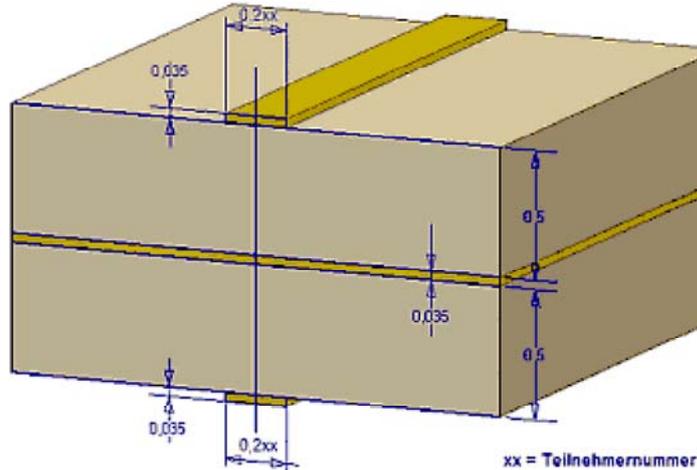
Software: FEM - Tutorial - Elektrostatik

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

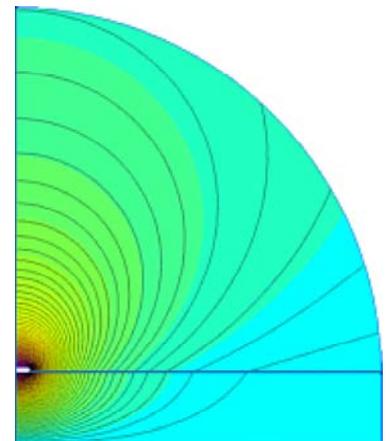
- Erste Schritte im Programm FEMM
- Problemdefinition
- Geometrie-Modellierung
- Material und Properties
- Loads und Constraints
- Vernetzung, Berechnung und Auswertung
- Open Boundary Problems

4. FEM-Scripting und Parametrisierung

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

5. Elektrostatisches Feld mit Z88Aurora

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



6. Zusammenfassung

- Potentialfeld-Analogie mittels Thermo-Modul
- Strukturierte Vernetzung
- Ergebnis-Aufbereitung

Einzusendende Ergebnisse:

- Teilnehmer der Lehrveranstaltung **Praktische Einführung in die FEM** schicken ihre Ergebnisse per Mail an **a.kamusella@tu-dresden.de**
- Als Anhang dieser Mail mit (xx=Teilnehmer-Nummer 01...99) ist ein Archiv-File **FEM3_xx** (z.B. als .zip / .7z / .rar) mit allen Projekt-Ordnern (inklusive Inhalt!) zu senden.
- In einer vergleichenden Auswertung aller FE-Simulationen ist der "tatsächliche" Wert der Leiterzug-Kapazität zu ermitteln.
- Einsendeschluss ist die Nacht vor dem nächsten Übungskomplex. Die Nacht endet um 10:00 Uhr.

← →

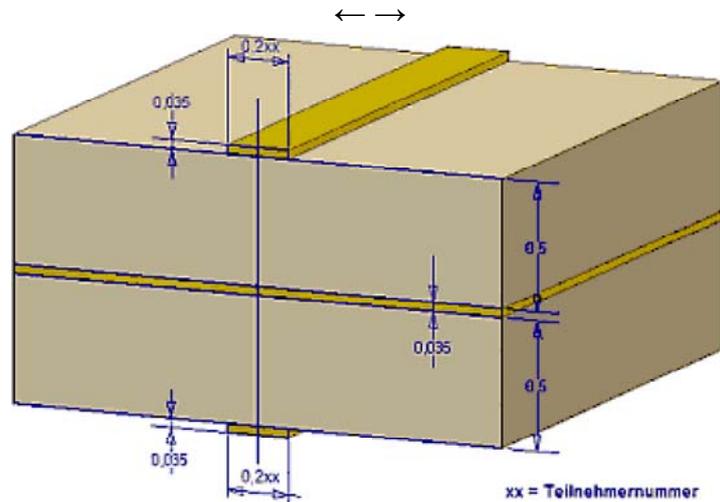
Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrostatik&oldid=20361“

▪

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 $\epsilon_0 = 8,86\text{E-}12$ (A·s)/(V·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 1E-12 liegen, genügen Werte von z.B. 1E-6 als Ersatz für Unendlich!



← →

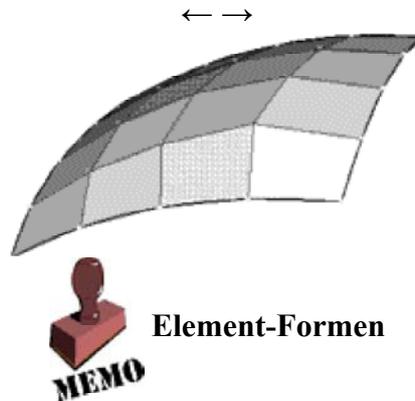
Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrostatik_-_Z88_-_Kapazitaet&oldid=20016)

title=Software: _FEM_ _Tutorial_ _Elektrostatik_ _Z88_ _Kapazitaet&oldid=20016“

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 verflossenen 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.

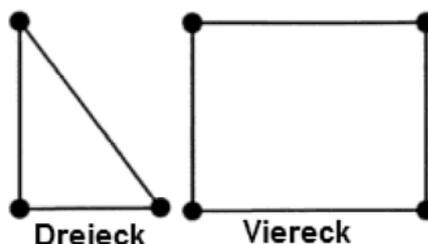
Die *Methode der Finiten Elemente (FEM)* ist ein Weg zur Diskretisierung:

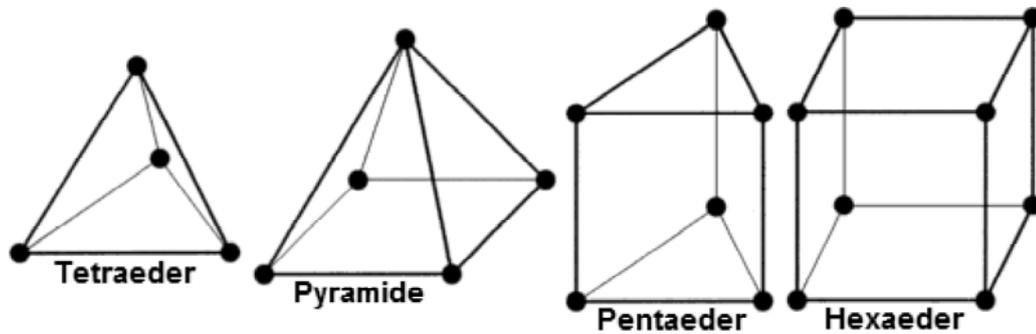
- Reduktion auf geometrisch einfache Formen, die über wenige Eckpunkte definiert sind:

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 Ansatzfunktion 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

← →

Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Diskretisierung_-_Z88_-_Elementformen&oldid=20127“

▪

Software: FEM - Tutorial - Diskretisierung - Z88 - Ansatzfunktionen

Aus OptiYummy

↑



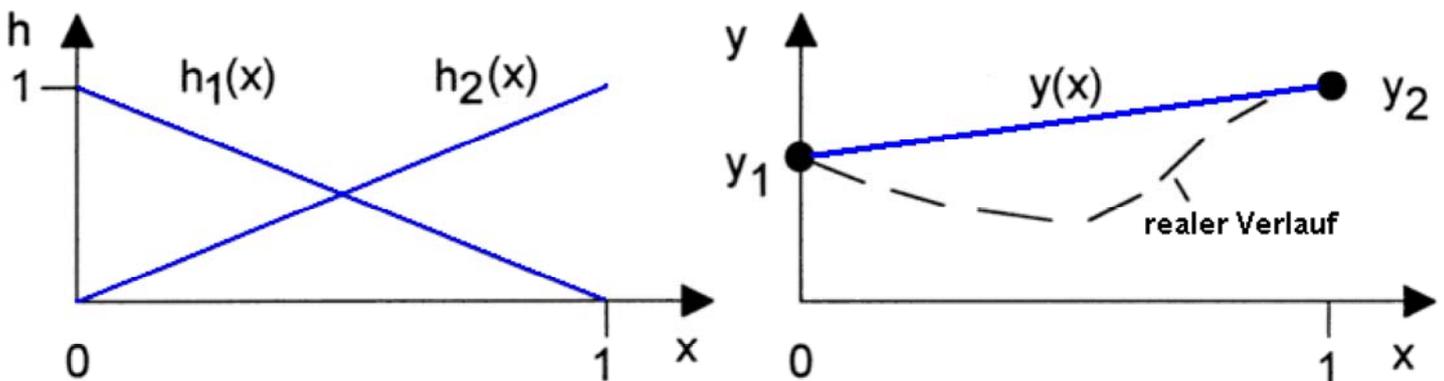
← →

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 lineare Ansatzfunktionen verdeutlicht werden:



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

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

$$h_2(x) = x$$

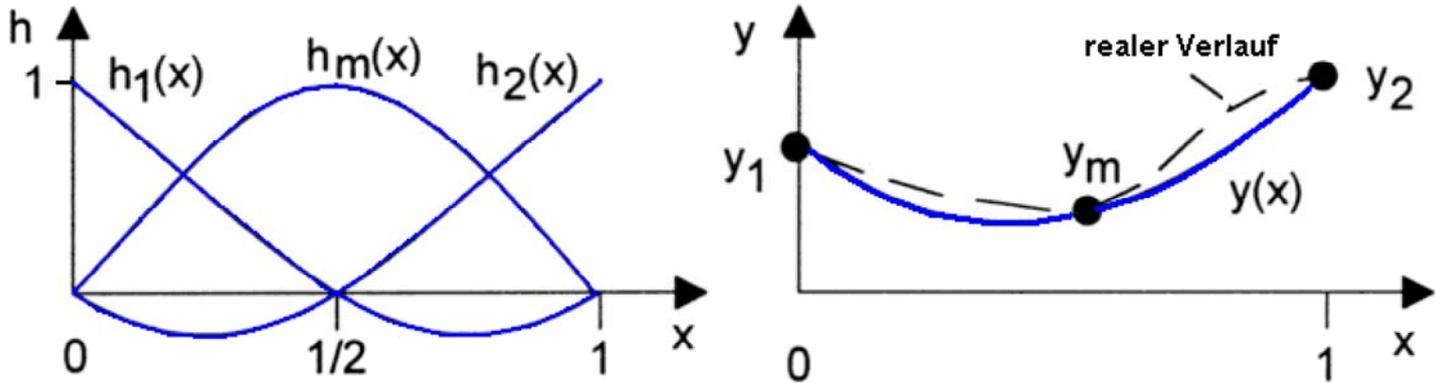
- Gewichtet mit den Knotenwerten y_1 und y_2 lautet die Elementfunktion

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

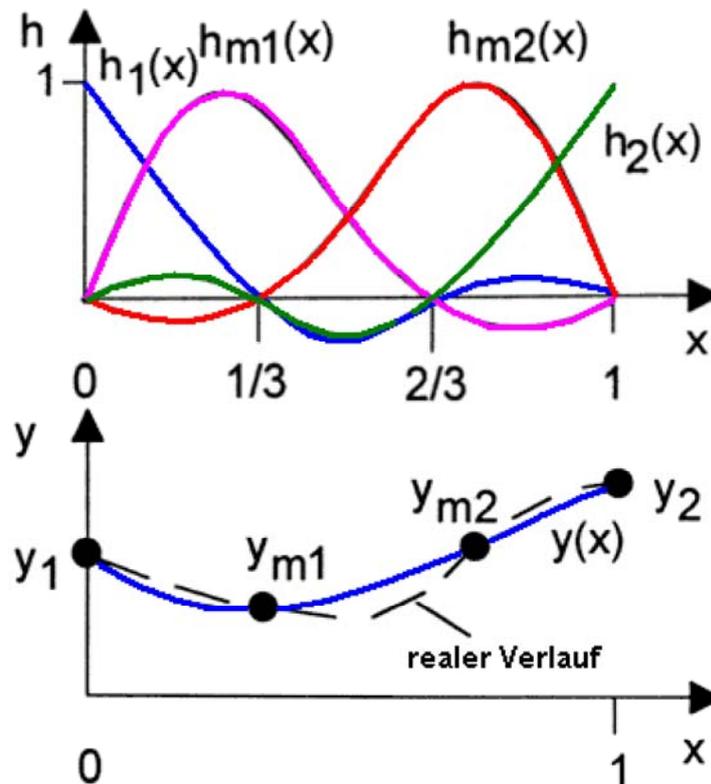
$$y(x) = y_1 \cdot (1-x) + y_2 \cdot x$$

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.

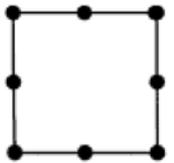
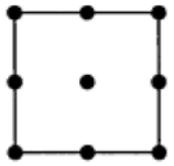
In der Praxis beschränkt man sich auf lineare und insbesondere quadratische Ansatzfunktionen. Zur Erreichung einer höheren Genauigkeit wählt man statt einer höheren Ansatzfunktion eine engere Vernetzung!

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 größeren 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.

← →

Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Diskretisierung_-_Z88_-_Ansatzfunktionen&oldid=20128“

▪

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	Elektrostatisches 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]	dielektr. 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* nicht implementiert.
- Auf Grundlage des thermischen Solvers kann man jedoch mittels der Analogiebeziehungen trotzdem in *Z88Aurora* elektrostatische Probleme berechnen.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Diskretisierung_-_Z88_-_Potentialfeld-Analogien&oldid=20129)

[title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Diskretisierung_-_Z88_-_Potentialfeld-Analogien&oldid=20129](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Diskretisierung_-_Z88_-_Potentialfeld-Analogien&oldid=20129)“

▪

Software: FEMM - Elektrostatik - Einstieg

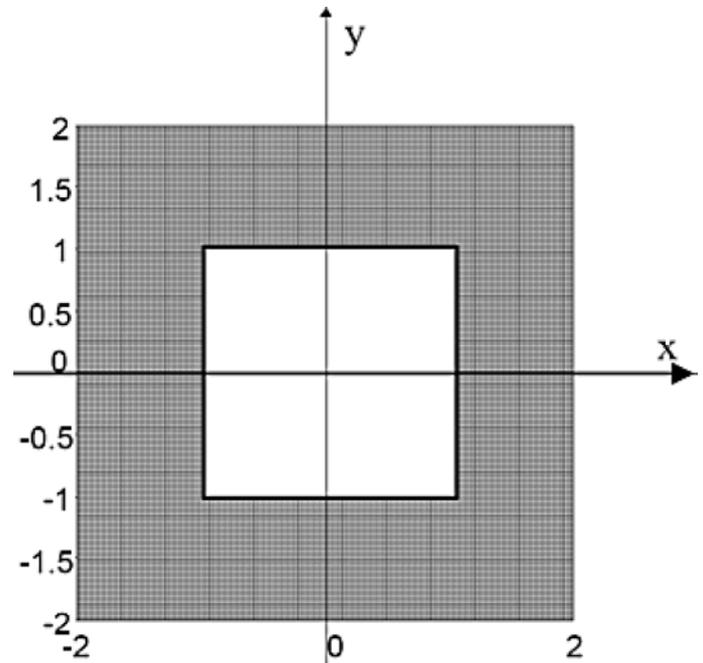
Aus OptiYummy



Erste Schritte im Programm FEMM

In Hinblick auf die Einarbeitung in die FEMM-Bedienung sollte man unbedingt zuerst das Beispiel "Capacitor with a Square Cross-Section" bearbeiten. Dieses wird Schritt für Schritt in der Datei **tutorial-electrostatic.pdf** erläutert, welche sich zusätzlich zum **manual.pdf** im FEMM-Programmordner befindet (Siehe: FEMM-Programmgruppe im Windows-Menü).

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 Koordinateneingabe, 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 elektrostatistische 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).

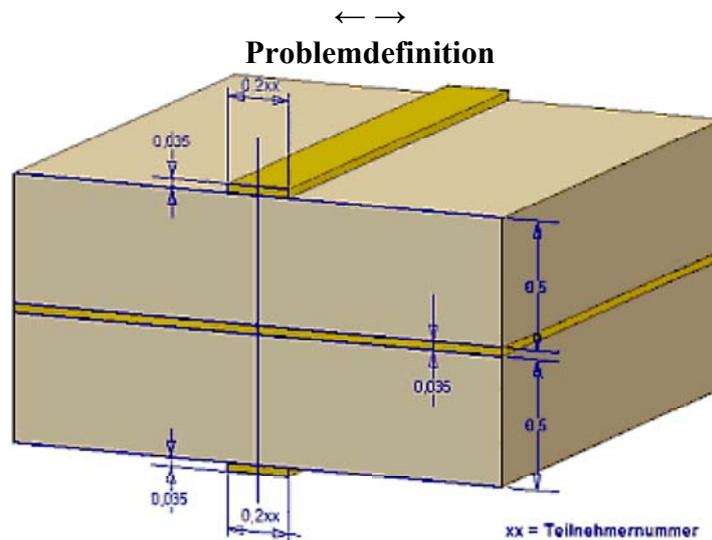


Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Einstieg&oldid=20135“

▪

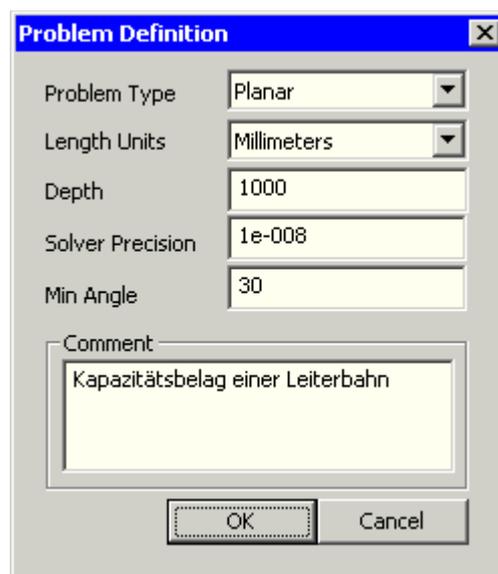
Software: FEMM - Elektrostatik - Problemdefinition

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 Objektabmessungen (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.

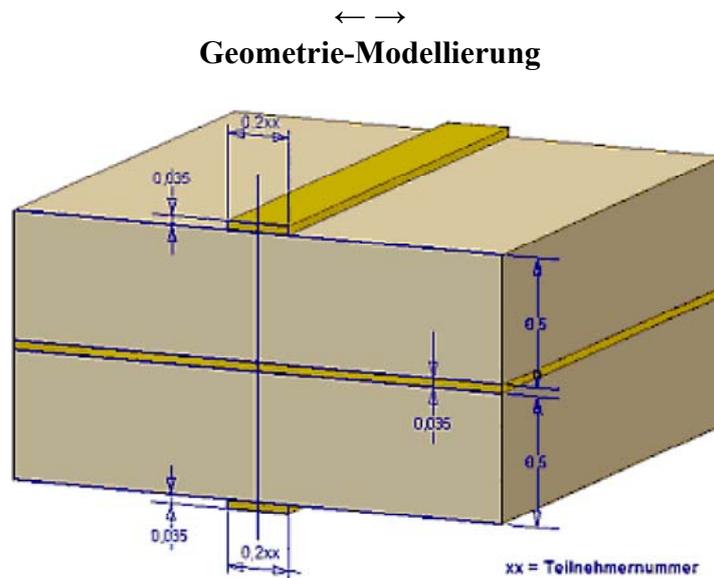


Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Problemdefinition&oldid=20358“

▪

Software: FEMM - Elektrostatik - Geometrie

Aus OptiYummy



Noch einmal zur Erinnerung der abstrahierte Aufbau des Verdrahtungsträgers:

- 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 0,2xx mm (xx= 01 bis 99).
- FR4-Laminat: $\epsilon_r = 4,7$

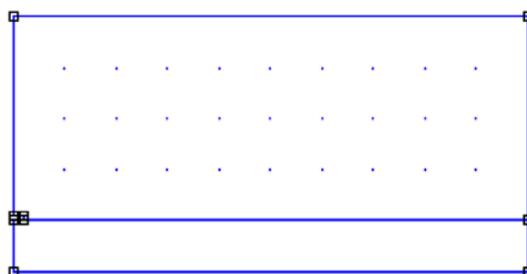
Alle FEMM-Modelle sind in einem Ordner "**FEM3_FEMM_xx**" zu speichern. In einem ersten FEMM-Modell "**Leiterplatte1_xx.FEE**" werden wir einen hinreichend großen Luftraum berücksichtigen, um damit das unendliche Feld zu erfassen:

- 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:

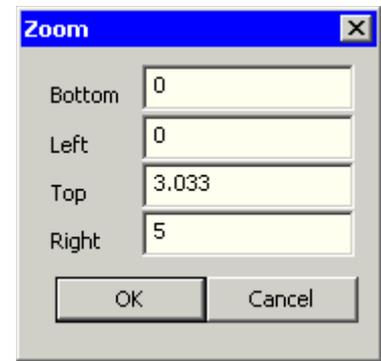
- In FEMM (Elektrostatik) wird nur das elektrische Feld in den Isolatoren berechnet. Leiter werden als feldfrei angenommen (als ideal leitend).
- Mittels geometrischer Objekte beschreibt man nur den betrachteten Raum für die Isolatoren (Luft/Laminat).
- Grenzen zwischen Isolator und Leiter werden im 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.

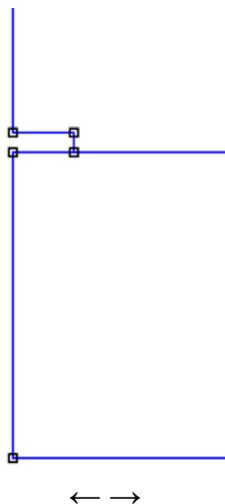
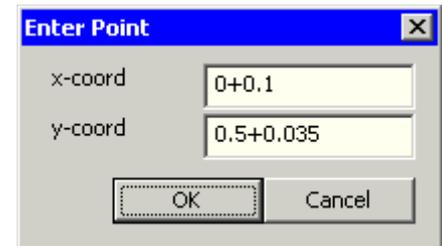


2. Laminat-Geometrie (Rechteck)

- 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:



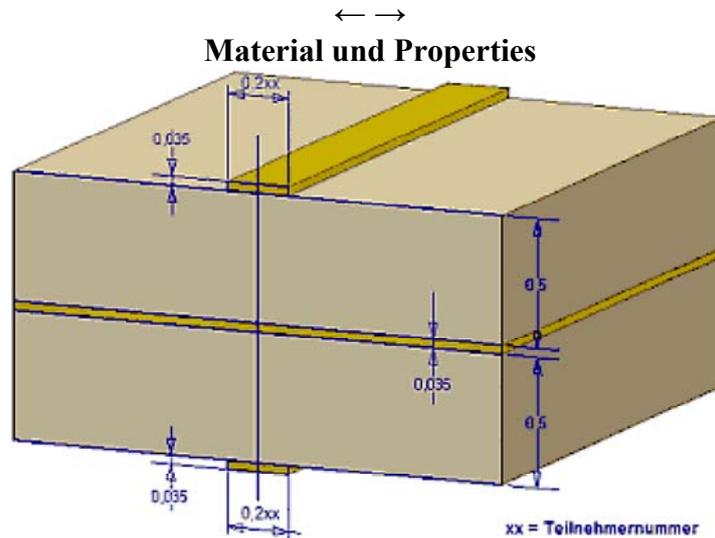
Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Geometrie&oldid=20149“

▪

Software: FEMM - Elektrostatik - Material und Properties

Aus OptiYummy

↑

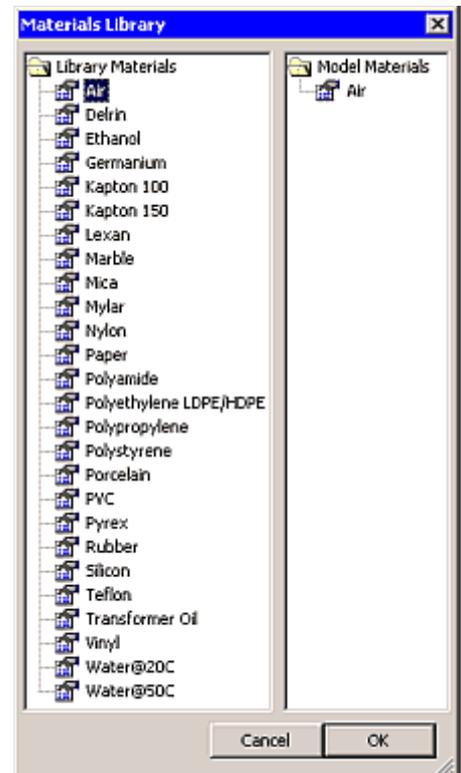


Hinweise:

- In den unterschiedlichen FEM-Systemen wird man mit unterschiedlichen Begriffshierarchien konfrontiert.
- In Programmen wie ANSYS oder FEMAP 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:

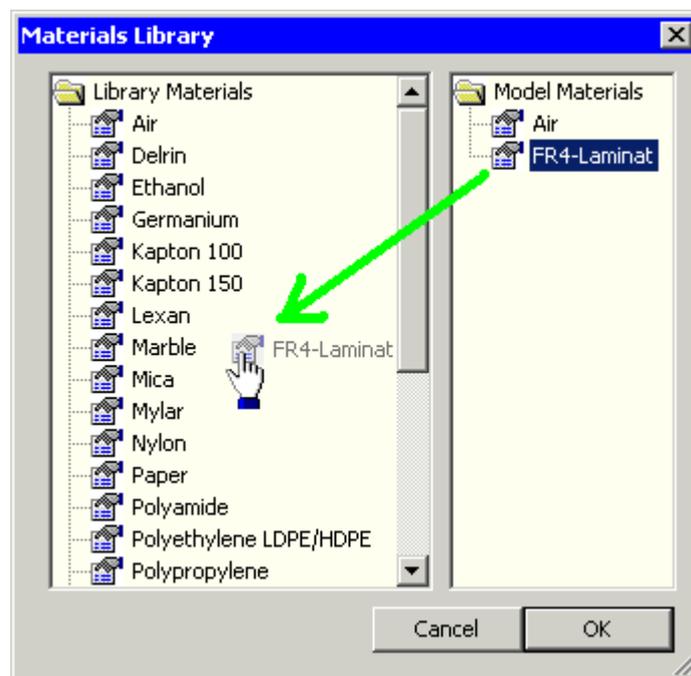
- In elektrostatischen FEMM-Modellen definiert man nur die Materialien der Nichtleiter.
- Die benötigten Materialien müssen innerhalb des Modells als "Model Materials" definiert werden.
- Soweit wie möglich, sollte man diese Materialien der Materialbibliothek entnehmen (**Properties > Materials Library**).
- 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.

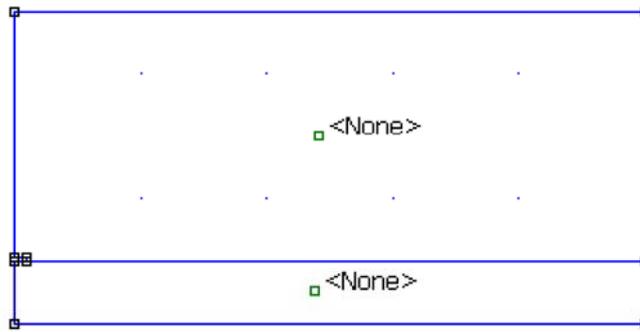


▪ **Achtung:**

- 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!

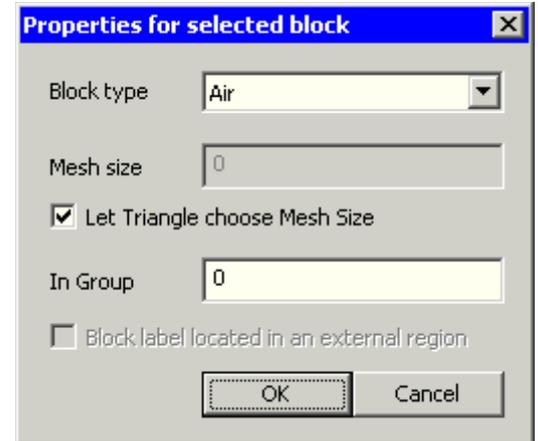
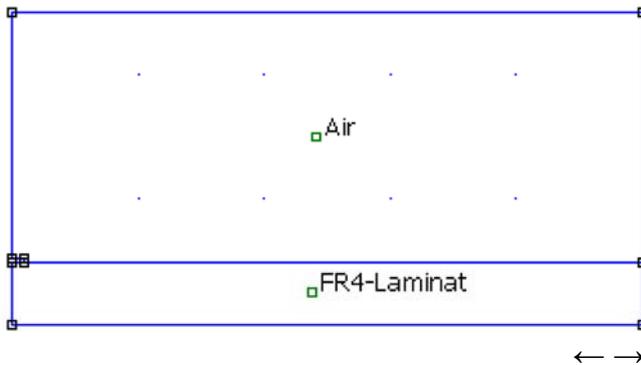
3. Block Labels platzieren:

- 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.



Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Material_und_Properties&oldid=20146)

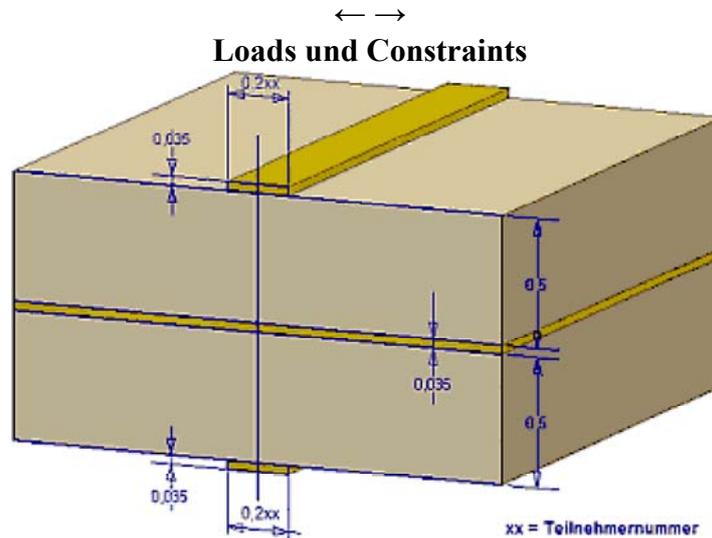
[title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Material_und_Properties&oldid=20146](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Material_und_Properties&oldid=20146)“

▪

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:

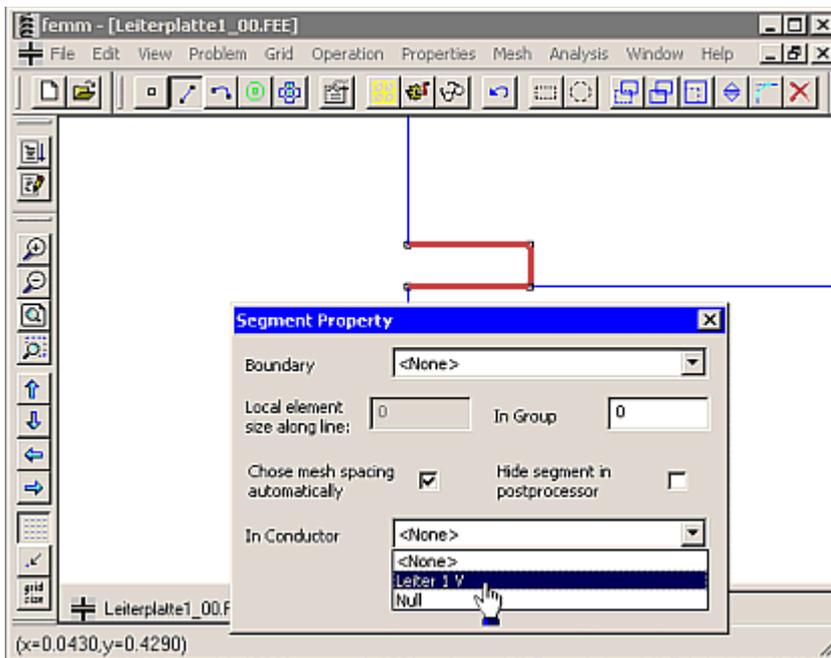
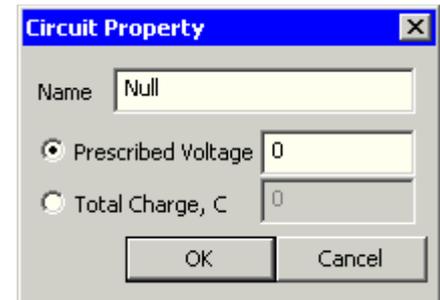
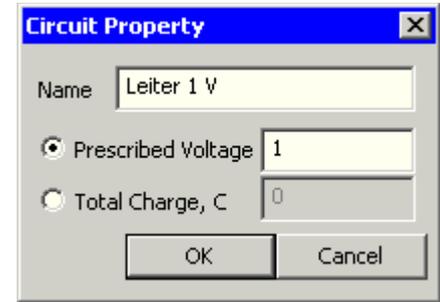
- Die Potentialvorgabe ist jeweils nur alternativ zur Ladungsdefinition möglich, um damit eine Überbestimmung des Gleichungssystems zu vermeiden.
- Die Potentialverteilung an den Rändern zum "unendlichen" Raum definiert man über so genannte *Boundary Conditions*. Das sind Gleichungen, welche den Verlauf 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 Leitererbahn 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.

← →

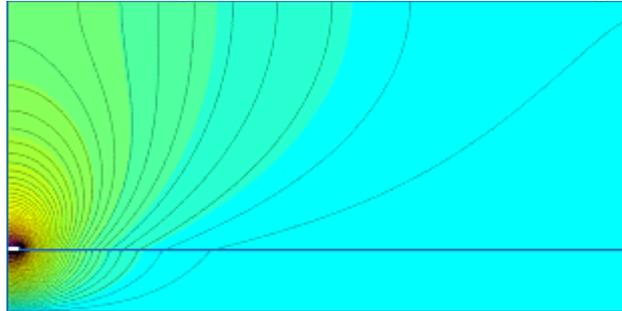
Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Loads_und_Constraints&oldid=20137“

Software: FEMM - Elektrostatik - Netz und Berechnung

Aus OptiYummy



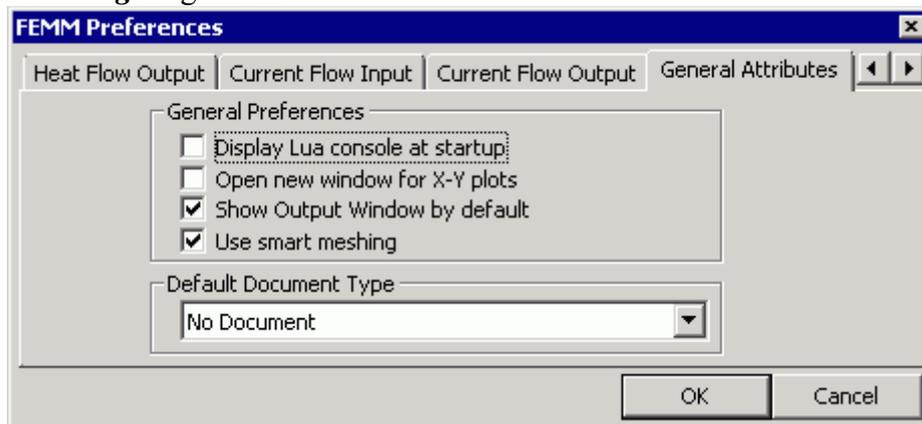
Vernetzung, Berechnung und Auswertung



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:

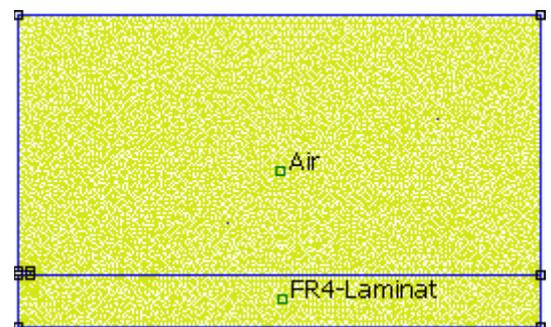


- Standardmäßig ist *Smart Meshing* aktiv und führt nach Aufruf des Netzgenerators  zu nebenstehendem Netz mit ca. 3800 Knoten.

Problem unter Windows:

Das Ein-/Ausschalten des *Smart Meshing* funktioniert nur, wenn man das Programm als Administrator gestartet hat (**Kontextmenü FEMM-Startsymbol > Als Administrator ausführen**).

- Solange man FEMM nur für einzelne, manuell gestartete Simulationen benutzt, ist trotz der feinen Vernetzung des *Smart Meshin* 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 Umrandungslinien von Bereichen).
- Man gelangt damit automatisch zu einem Netz mit optimaler Genauigkeit für die Simulationsergebnisse.



Wir werden im Folgenden das *Smart Meshing* abschalten:

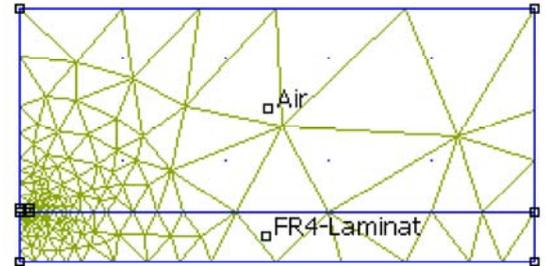
1. Nur durch manuelle Steuerung der Vernetzung kann man ein Gefühl für die Auswirkungen der Vernetzungsdichte entwickeln.
2. Bei Einbindung des FEMM-Programms in eine Analyse-/Optimierungsumgebung, ergeben sich sehr viele Modellberechnungen. Dazu ist im Sinne der Berechnungszeit ein Kompromiss zwischen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

Hinweis:

Nach dem Abschalten des *Smart Meshing* muss das FEMM-Programm nicht mehr im Administrator-Modus laufen!

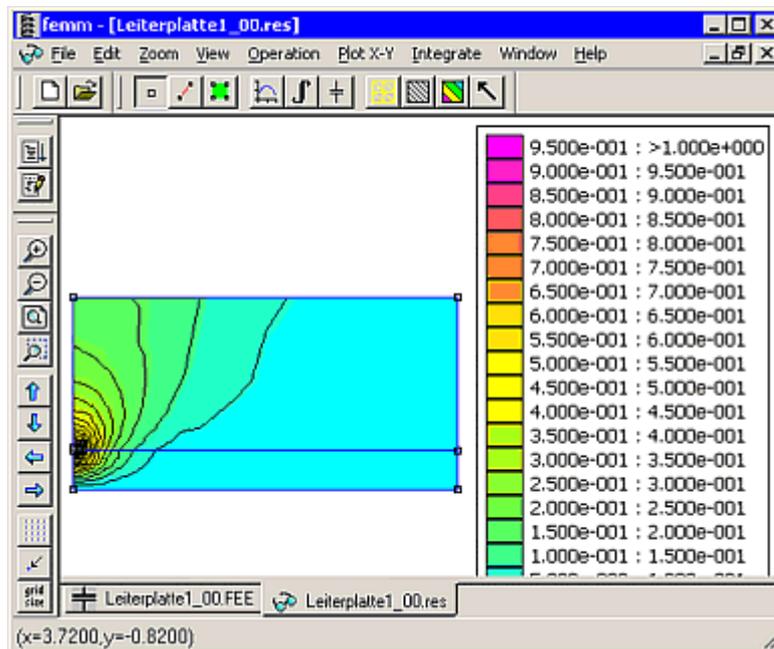
Mit inaktivem *Smart Meshing* führt der Aufruf des Netzgenerators  zu einem Netz mit ca. 200 Knoten:

- Die Teilung entlang der Umriss-Linien beträgt jetzt 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:

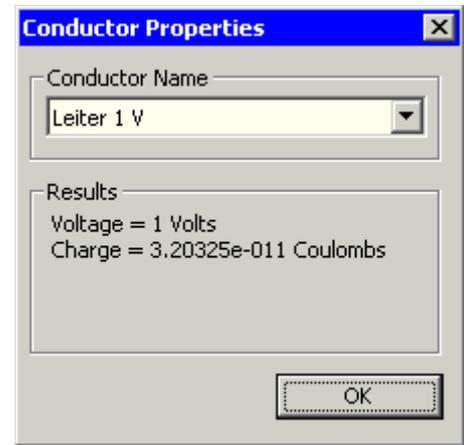


- Standardmäßig wird das Potentialfeld als Contour-Darstellung ausgegeben:
 - Die Legende zeigt im Beispiel die Farbskala von 0 bis 1 V.
 - Mittels  kann man die Darstellung der Ergebnisse umfassend konfigurieren.
 - Ein Einblenden der Equipotential-Linien zeigt, dass die grobe Vernetzung doch zu gewissen Ungenauigkeiten im Feldverlauf führt.

3. Auswertung:

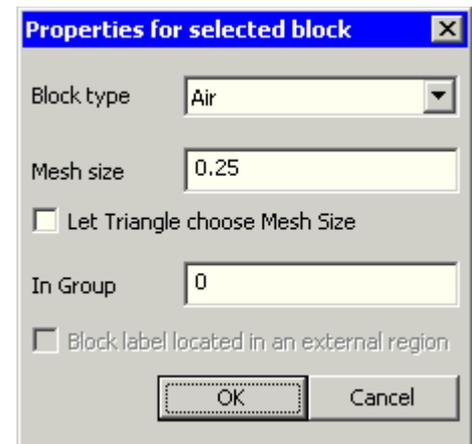
- Als Ergebnis der FEM-Berechnung interessiert uns der Kapazitätsbelag der Leiterbahn zur Masse-Ebene.

- 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.

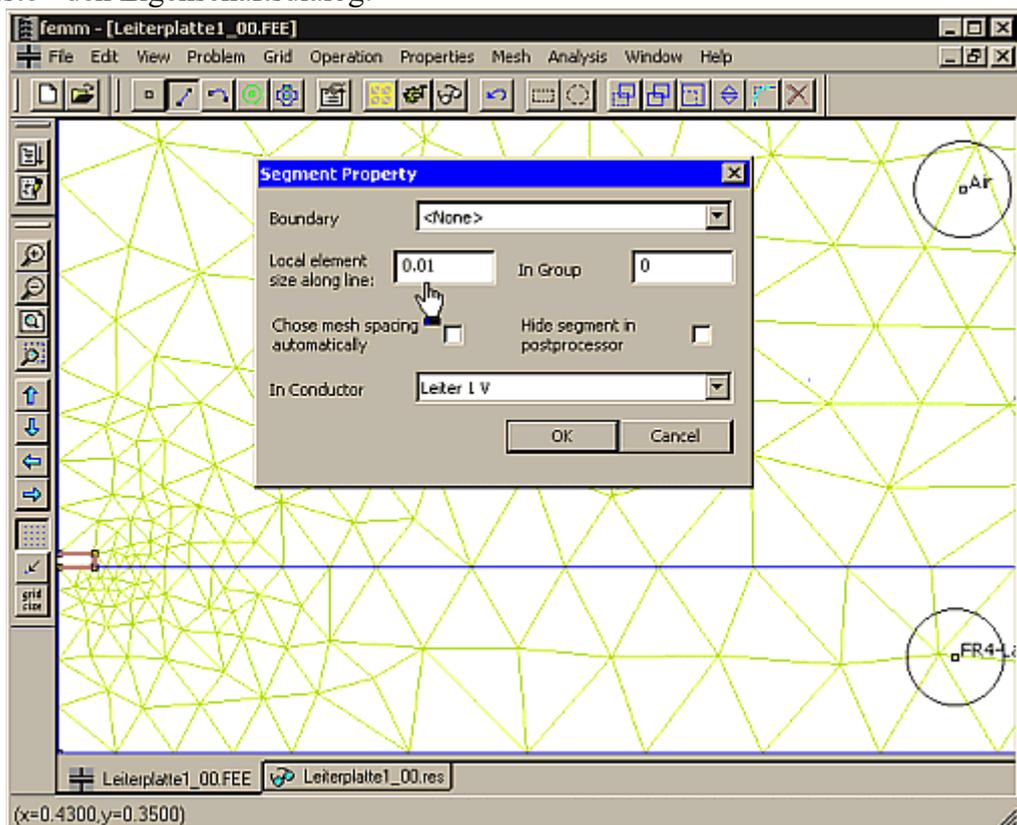


4. Vernetzungssteuerung:

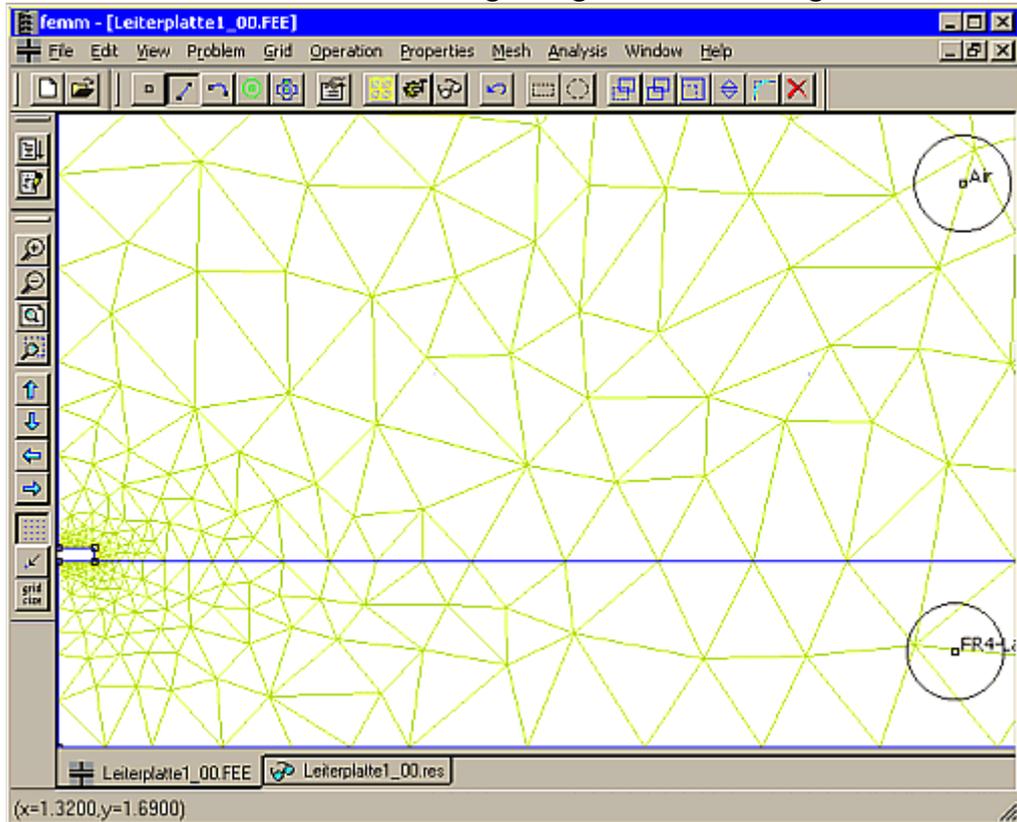
- Die Umschaltung zwischen Ergebnis- und Modelldatei kann über die unteren Register des Grafikfensters vorgenommen werden.
- Innerhalb der Modelldatei steuert man den Vernetzungsgenerator über die Eigenschaften der Block-Label  :
 - Mit rechter Maustaste Block-Label markieren und mit <Leertaste> Eigenschaftsdialog 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 Block die Maschengröße steuern. Damit wird aber nicht automatisch an den kritischen Stellen genauer vernetzt.
-  Es ist deshalb wichtig, an der Grenze zur Leiterbahn den Vernetzungsautomatismus für die entsprechenden Segmente abzuschalten. Dazu markiert man mit der rechten Maustaste Segmente und aktiviert mit der <Leertaste> den Eigenschaftsdialog:



- Nach erneuter Vernetzung erzielt man mit obiger Elementgröße von 0.01 mm entlang der Leiterbegrenzungslinien eine bedeutend feinere Vernetzung. Die globale Vernetzung wird dadurch nicht verändert:



- Wenn man 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 muss man die Maschengrößen für die Blöcke und Leitersegmente wählen, damit sich das Ergebnis der Kapazitätsberechnung praktisch nicht mehr ändert? Die getroffene Wahl ist anhand einer Versuchsreihe zu dokumentieren (Tabellen oder Grafiken), welche den Zusammenhang zwischen Maschengrößen und berechnetem Kapazitätswert widerspiegelt.
- 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!

← →

Von „<http://www.optiyummy.de/index.php?>

title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Netz_und_Berechnung&oldid=20147“

▪

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:

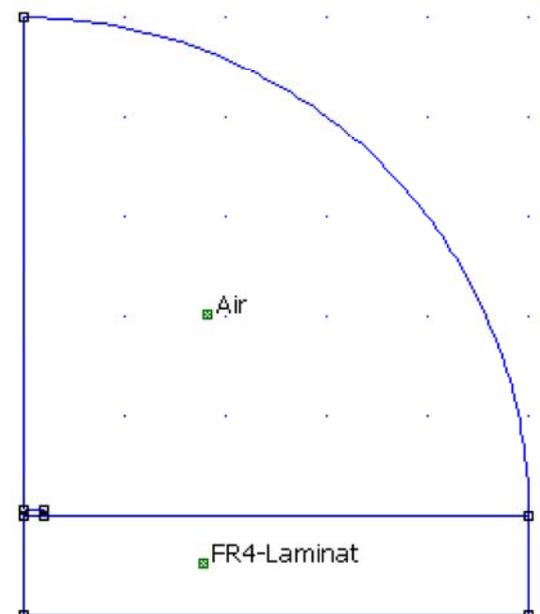
- Das Streufeld einer Magnetspule bestimmt wesentlich die Induktivität.
- Der elektrische Widerstand oder die elektrische Kapazität zwischen weit voneinander entfernten Elektroden wird wesentlich durch die Ausbreitung des elektrischen Feldes bestimmt.

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:

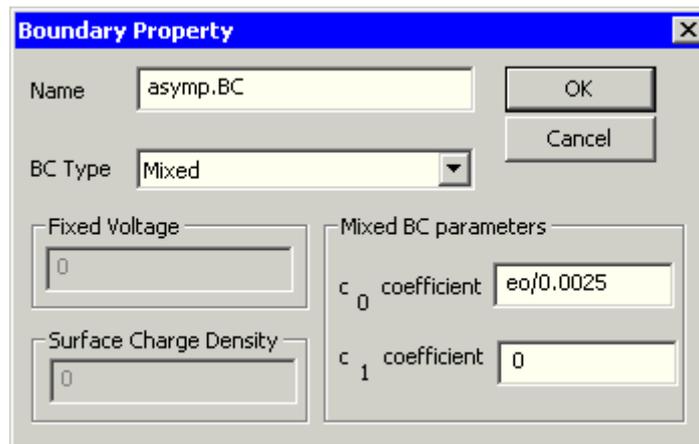
- Über Randbedingungen kann man definieren, welche Wirkung der Raum außerhalb der Grenzen auf das Feld innerhalb der Grenzen ausüben soll.
- Im Beispiel wollen wir den "unendlichen" Luftraum nachbilden, in den sich das Streufeld der Leiterbahn erstreckt.
- Die richtigen Randbedingungen sind entscheidend 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:

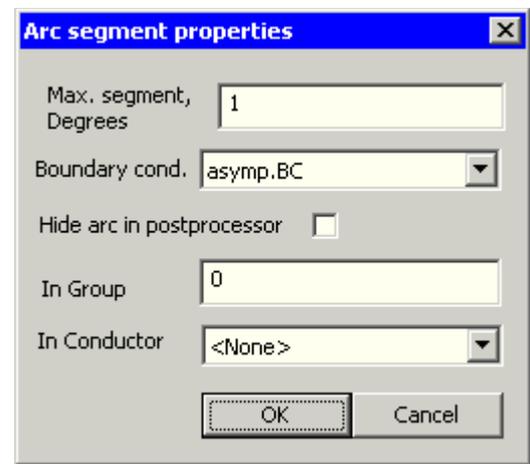
$$c_0 = \frac{\epsilon_0 n}{r_0}$$

- **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:

$$eo/0.0025$$

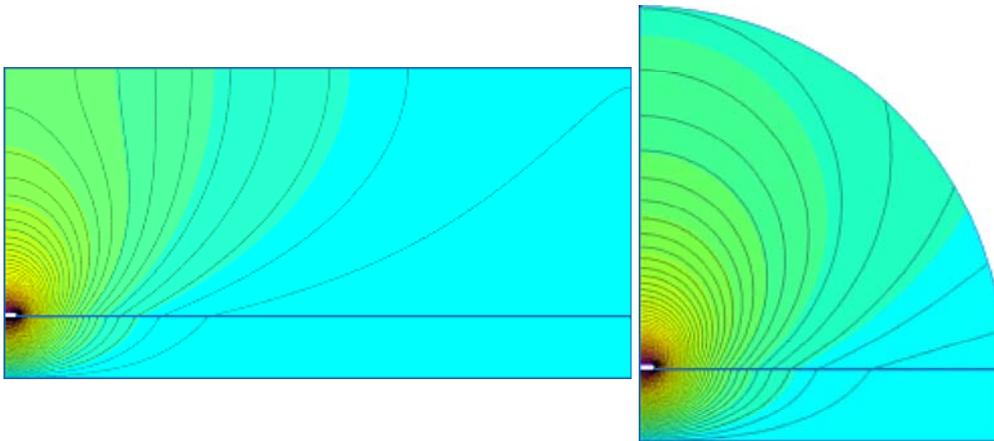
- eo steht für den Wert der Permittivität ϵ_0 .
- Nach dem Schließen des Dialogfensters werden die Ausdrücke in den Wert-Eingabefeldern berechnet und durch den resultierenden Zahlenwert ersetzt. D.h., beim nächsten Aufruf dieses Property-Dialogs (z.B. zum *Modifizieren*), wird der ursprüngliche Ausdruck 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!

← →

Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Open_Boundary_Problems&oldid=20139“

▪

Software: FEMM - Elektrostatik - LUA-Scripting

Aus OptiYummy



Scriptsprachen für FEM (LUA in FEMM)

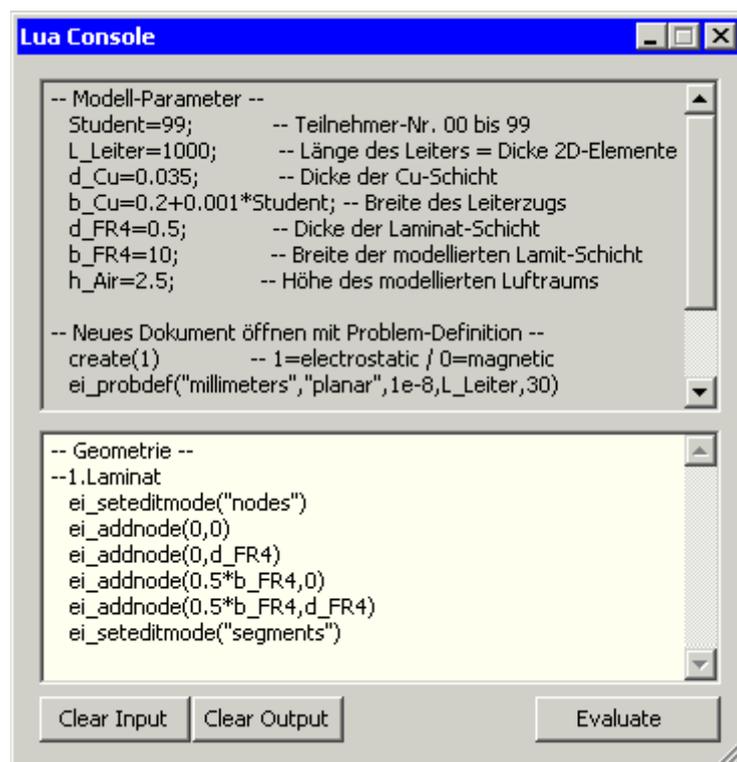
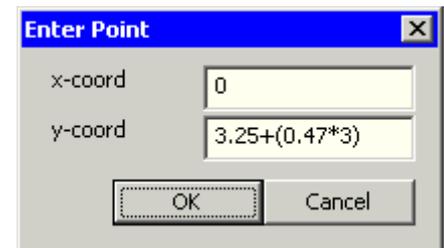
Bisher haben wir unsere FEM-Modelle mit Hilfe der vom FEM-System bereitgestellten grafischen Oberfläche entwickelt, simuliert und die Simulationsergebnisse ausgewertet. Solche grafischen Oberflächen (**GUI = Graphical User Interface**) ermöglichen dem Anfänger einen relativ schnellen Einstieg in die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

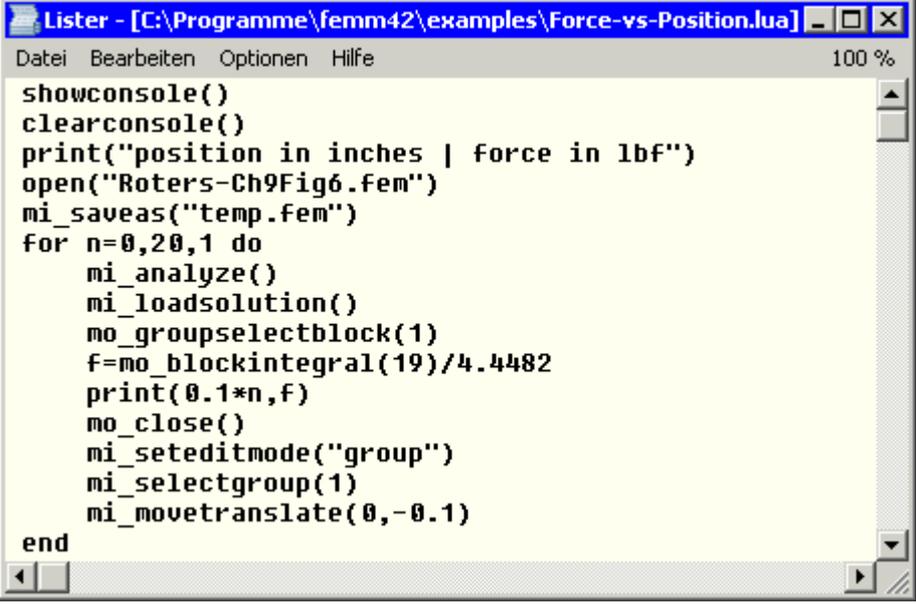
Das Programm FEMM nutzt als Grundlage die **LUA-Scriptsprache** in der **Version 4.0**. Der LUA-Interpreter ist in das Programm FEMM integriert und wirkt auf folgende Inhalte:

- **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_seteditmode("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.

In einem FEM-System ist der gesamte Umfang der verwendeten Scriptsprache (z.B. von LUA) verfügbar:

- 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

← →

Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_LUA-Scripting&oldid=20140“

▪

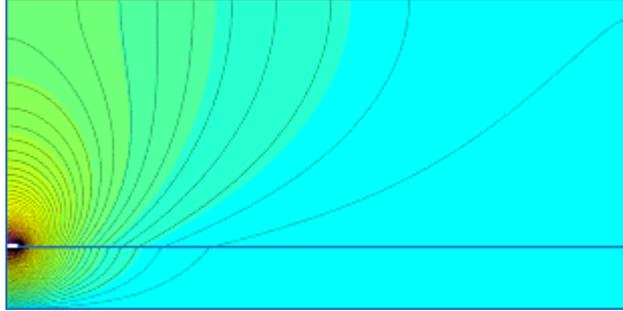
Software: FEMM - Elektrostatik - Modellsript

Aus OptiYummy



Parametrisiertes Modellsript

Leiterkapazität im endlichen Raum



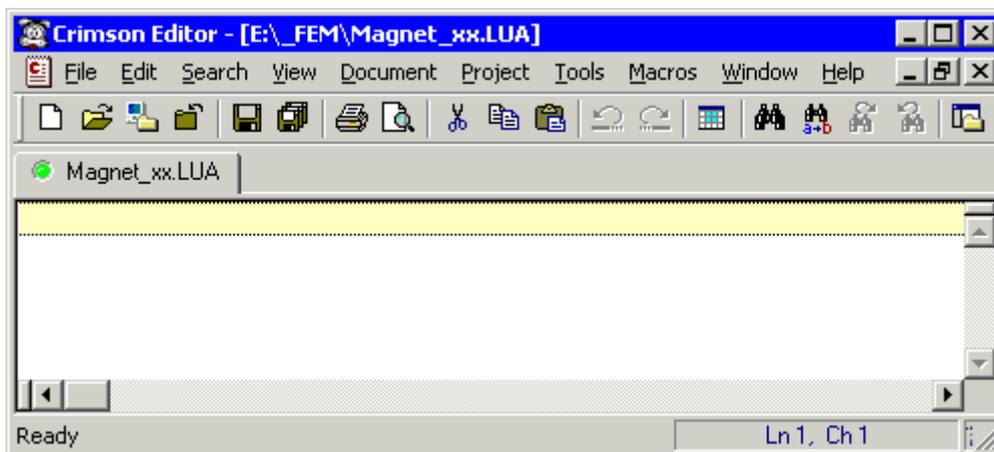
Unser erstes FEMM-Modell werden wir nun schrittweise nicht auf der grafischen Oberfläche, sondern mit einem LUA-Script entwickeln.

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:



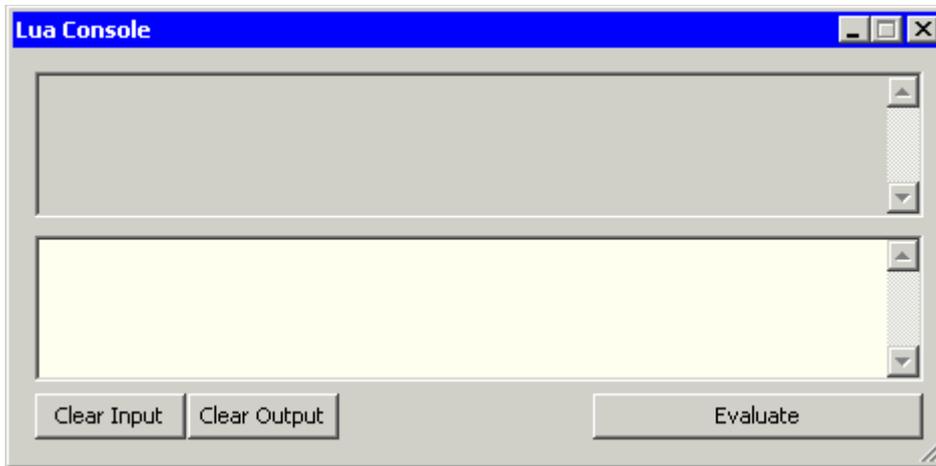
Script-Editor

- 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>).
- 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:

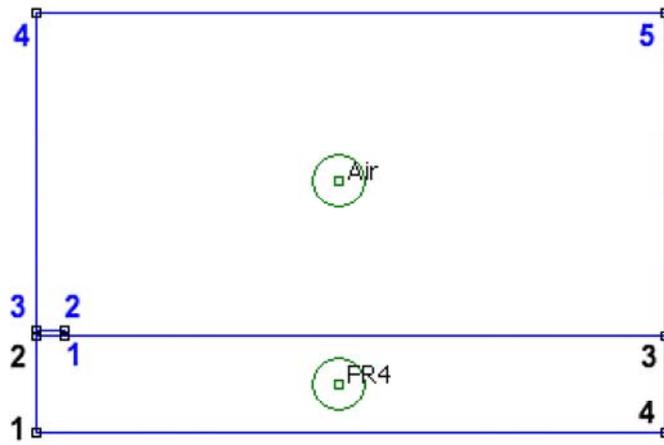
Kommentare beginnen mit -- und erstrecken sich jeweils bis zum Zeilen-Ende.

2. Definition des Problem-Typs:

```
-- Definition des Problem-Typs =====
showconsole();  -- LUA-Console, falls Script als Datei ausgeführt
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,automesh,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.

← →

Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_Modellscript&oldid=20141“

Software: FEMM - Elektrostatik - OBC-Script

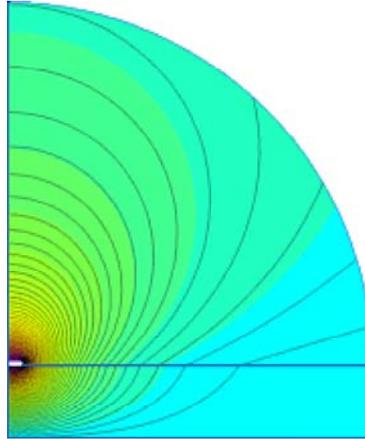
Aus OptiYummy

↑

← →

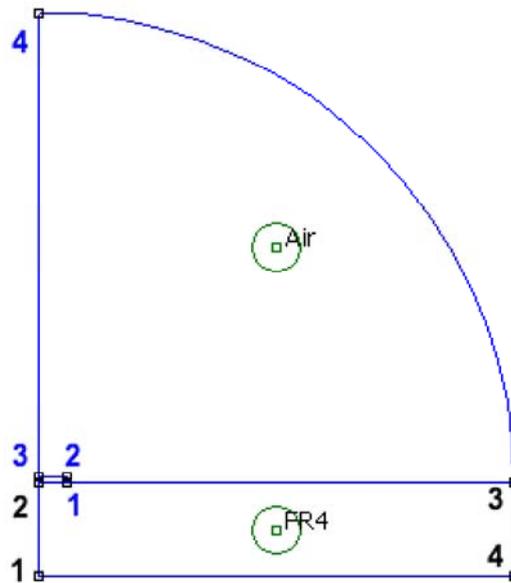
LUA-Script für Open Boundary Problem

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 Potentialen 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.

← →

Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEMM_-_Elektrostatik_-_OBC-Script&oldid=20142“

▪

Software: FEM - Tutorial - Elektrostatik - Z88 - Modellbildung

Aus OptiYummy



Modellbildung und -validierung mit Z88Aurora-Thermomodul

Vorbemerkungen

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-Moduls bestimmt.
- Da *Z88Aurora* nicht direkt den 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.

Erschwert wird die Nutzung der thermo-elektrischen Analogien durch einige Probleme mit dem *Z88Aurora*-Thermomodul, welche erst mit der nächsten Programm-Release beseitigt werden:

- Der Schwerpunkt der *Z88Aurora*-Nutzung liegt bei den Mechanik-Modulen, welche sehr stabil arbeiten.
- Die Einbindung der Z88-Thermomodule in die grafische Oberfläche des *Z88Aurora*-Thermomoduls weist noch einige Schwachstellen auf, welche anscheinend durch die fehlende Nutzung noch nicht aufgefallen waren!
 1. **Keine unterschiedlichen Materialbereiche:**
 - Erforderlich wäre für den Leiter ein sehr gut wärme-leitendes Material, um eine einheitliche Temperatur (=elektrische Spannung) im Leiter zu erzwingen. Da die Maße des Leiters sehr klein sind, kann man darauf hoffen, dass darin nur geringe Temperaturunterschiede entstehen.
 - Es fehlt vor allem die Luft als zweites Material zusätzlich zum Laminat.
 2. **Wärmeleitfähigkeit muss Wert $\geq 1e-5$ besitzen:**
 - Die kleinste Dielektrizitätskonstante $\epsilon_{Luft} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 = 1 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ (A}\cdot\text{s)/(V}\cdot\text{m)}$ entspricht laut Analogie dem Wert der Wärmeleitfähigkeit in **W/(K·m)**
 - Benötigt wird die Wärmeleitfähigkeit in **W/(K·mm)** $\rightarrow \epsilon_{Luft} = 8,86 \cdot 10^{-15}$
 - Deshalb sollte eine einheitliche Skalierung aller Dielektrizitätskonstanten mit dem **Faktor 10^{10}** erfolgen, welcher dann auch für die berechnete Spannungswerte (=Temperaturwerte) anzuwenden ist!
 3. **Nur Hexaeder Nr. 10 als Superelement verwendbar:**
 - Da die Leiterplattengeometrie keine Krümmungen aufweist, wäre für eine 3D-Superstruktur die Verwendung von Hexaeder Nr. 1 völlig ausreichend.
 - Leider gelang es im Rahmen der Vorbereitung dieser Übung nicht, mittels Hexaeder Nr. 1 ein lauffähiges Finite Elemente Modell zu entwickeln!
 - Deshalb muss die Superstruktur mit den viel aufwändigeren Hexaeder-Elementen Nr. 10 aufgebaut werden.

Wir entwickeln unabhängig von den aktuellen "Schwächen" des Thermo-Moduls unter dem Aspekt der Modellvalidierung das Z88-Modell in drei Schritten:

1. Validierung der thermo-elektrostatischen Analogie (Modellansatz und Material):

- Die "Dimensionierungsgleichung" für einen **Plattenkondensator** bei homogenen Feld ermöglicht für diesen Spezialfall die analytische Berechnung des Kapazitätswertes:

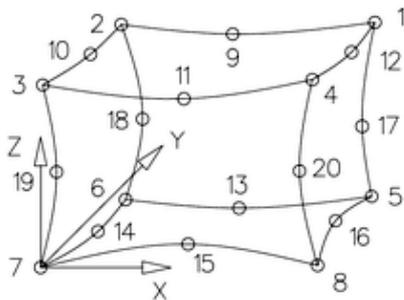
$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A/d$$

- Exakt diesen Spezialfall bildet man im ersten Schritt mit einem Finite Element Modell nach, um die simulierten Ergebnisse mit dem analytisch berechneten Wert vergleichen zu können.
2. **Laminat-Geometrie (ohne Luft-Raum!):**
- mit Fläche für Bezugspotential Null und
 - mit Fläche des Leiterzugs zum Einspeisen eines Wärmestroms
 - Vergleich der Simulationsergebnisse mit Ergebnissen der FEMM-Simulation unter gleichen Bedingungen.
3. **Ergänzen der Leiterzug-Höhe und des Luftraums (mit Workaround für fehlende Materialien):**
- Verwendung von Laminat für diese Bereiche und
 - überschlägige Berechnung der realen Kapazität durch lineare Interpolation

Hinweise:

- Ungünstig ist für unser Beispiel, dass wir auf Grund des Z88-Thermomoduls ein 3D-Modell entwickeln müssen, obwohl prinzipiell ein 2D-Modell völlig ausreichend wäre!
- Erforderlich ist eine strukturierte Hexaeder-Vernetzung → gerade Grenzen zwischen Material-Bereichen!
- 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.
- Die AutoCAD-DXF-Dateien speichern wir in einem Ordner "**FEM3_CAD_xx**" (xx=Teilnehmer-Nr. 01..99).

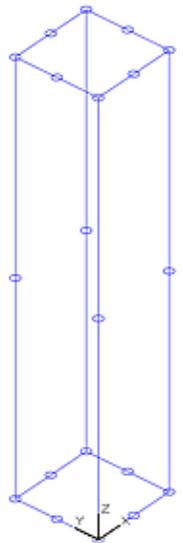
Validierung der thermo-elektrostatischen Analogie



Abgebildet wird im Modell nur der Laminat-"Quader" direkt unter dem Leiterzug mit einem Superelement vom Typ Hexaeder Nr. 10:

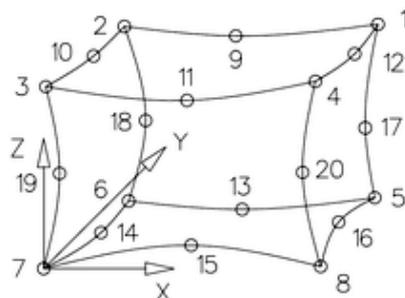
Um Fehler bei der Definition der Superstruktur zu vermeiden, sollte man das XYZ-Koordinatensystem der 3D-Zeichnung als Element-Koordinatensystem entsprechend der Element-Skizze aus dem Theoriehandbuch verwenden.

Die Knotenpunkte sollte man ebenfalls exakt laut dieser Element-Skizze beschriften.



Wir folgen dem bekannten Schema der Definition einer Superstruktur mittels einer AutoCAD-DXF-Datei → Name="**FEM3_Laminat1_xx**":

- **Planungsgeometrie** auf Standard-Layer 0 (gelb):
 - in XY-Ebene (Ansicht von OBEN) → X=Breite (0.2xx)/2 mm / Y=Tiefe 0.1 mm;
 - Kopie in Z-Richtung um Höhe=0.5 mm und Linien zwischen den Eck-Punkten;
 - Punkte an alle Knoten-Positionen von Hexaeder Nr. 10.
- **Knoten-Definition** auf Layer Z88KNR (weiß)
 - Beschriftung der 20 Knotenpunkte des Superelements
 - die Punkte mit der gleichen Nummerierung, wie die Knoten des Elements laut Definition



- **Element-Defintion** auf Layer Z88EIO (grün) - Planung der Vernetzungsfeinheit
 - Die Feinheit der Vernetzung wird wesentlich durch die Maße des Leiterzugs bestimmt. An der Leiterzugkante sollte die Vernetzung am

feinsten sein, da dort nach Ergänzung des restlichen Laminats die größten Potentialgradienten auftreten.

- Den Wärmestrom an der Kontaktfläche zum Laminat kann man im *Z88Aurora* als Gesamtstrom für eine Knoten-"Fläche" angeben. Dabei erfolgt eine automatische Verteilung auf die Einzelknoten der "Fläche".
- Für eine hinreichend feine Vernetzung insbesondere an der Leiterzug-Kante wird ein Raster von **10x10 Knoten** generiert.
- An dieser Teilung der Leiterbreite in 9 Elemente muss sich die gesamte Vernetzung des Laminat-Querschnitts in der XY-Ebene orientieren!

1. **Y-Richtung** (0.1 mm) → **9 E**
2. **Z-Richtung** (0.5 mm) → **15 L** (zur Leiterzug-Seite feiner)
3. **X-Richtung** (0.2xx/2 mm) → **9 E**

- Da für das restliche Laminat und den Luftraum noch viele Finite Elemente benötigt werden, soll die Vernetzung mit Hexaeder-Elementen Nr. 1 (mit linearer Ansatzfunktion) erfolgen um die Größe des Gleichungssystems klein zu halten.
- Damit ergibt sich folgende Superelement-Definition:

SE 1 10 1 9 E 9 E 15 L

- Der einzeilige Text kann z.B. auf einem Mittelpunkt einer Superelement-Kante platziert werden.

- **Element-Knoten-Koinzidenz** auf Layer Z88NET (cyan):

Damit *Z88Aurora* die Koinzidenz-Matrix für die Superelement-Struktur generieren kann, müssen für jedes Hexaeder-Superelement alle Element-Knoten nach einem vorgegebenen Schema mittels Linienzügen verbunden werden (Theoriehandbuch S.83):

1. obere Fläche entgegen Uhrzeigersinn ab Knoten 1:
1 - 9 - 2 - 10 - 3 - 11 - 4 - 12 - 1, Linie beenden
2. untere Fläche exakt wie obere Fläche:
5 - 13 - 6 - 14 - 7 - 15 - 8 - 16 - 5, Linie beenden
3. senkrechte Kanten entgegen Uhrzeigersinn beginnend ab Knoten 1 von oben nach unten
 - **1 - 17 - 5**, Linie beenden
 - **2 - 18 - 6**, Linie beenden
 - **3 - 19 - 7**, Linie beenden
 - **4 - 20 - 8**, Linie beenden

- **Generelle Strukturinformation** auf Layer Z88GEN (rot):

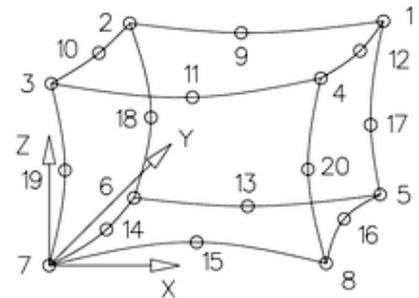
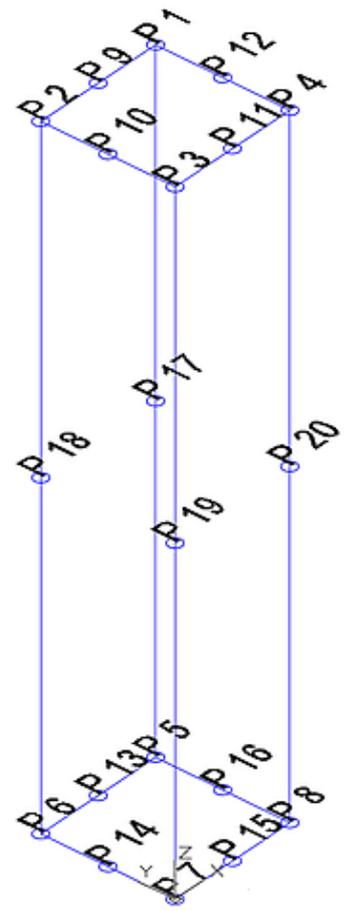
Knoten thermischer Netze besitzen zwar nur 1 Freiheitsgrad (Potentialgröße "Temperatur"), aber die strukturierte Vernetzung erfolgt immer mit Angabe der mechanischen Freiheitsgrade des Element-Typs:

```
Z88NI.TXT ..... : 1. Eingabegruppe für Netzgenerator-Eingabefile Z88NNI.TXT
Dimension der Struktur ..... : 2 oder 3 (eben bzw. räumlich)
Anzahl Knoten ..... : im Beispiel 20
Anzahl Super-Elemente ..... : im Beispiel 1
Anzahl mech. Freiheitsgrade .... : Knoten x Dimension (im Beispiel 60)
Koordinatenflag Superelemente .. : 0 oder 1 (kartesische bzw. Polar-Koord.)
Fangradius-Steuerflag ..... : 0 (ergibt Epsilon=0.01) / 1 (nur bei Bedarf!)
Koordinatenflag finite Elemente : 0 (Standard=kart. Koord.) / 1 (Polar-Koord. als Spezialfall!)
```

Daraus resultiert die folgende Struktur-Information, welche als einzeiliger Text irgendwo zu platzieren ist:

Z88NI.TXT 3 20 1 60 0 0 0

Im *Z88Aurora* erfolgt dann die Erzeugung des Z88-Modells anhand der gespeicherten DXF-Datei und dessen Validierung auf Basis der Dimensionierungsgleichung:



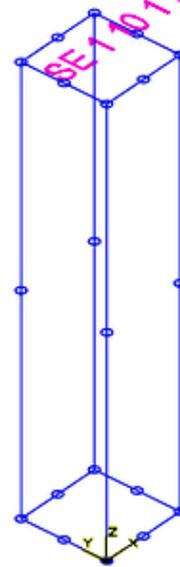
▪ **Import der Superstruktur** und strukturierte Vernetzung:

1. Neues Projekt anlegen "FEM3_Z88_Laminat1_xx" nach Start von Z88Aurora
2. Import der AutoCAD DXF-Datei ergibt das abgebildete Netz
3. Laminat FR4 als neues Material definieren und allen Elementen zuweisen:

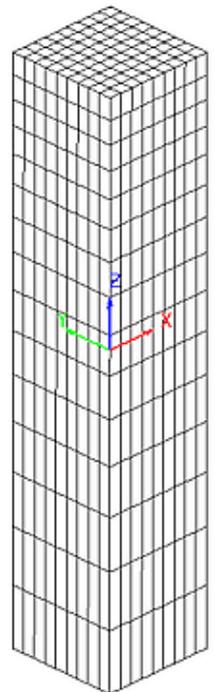
Beachte: Z88Aurora überprüft bei jedem Start, ob alle Materialdaten "plausibel" sind. Um Fehlermeldungen zu vermeiden, muss man Werte größer als Null für E-Modul und Querkontraktion eintragen, auch wenn man diese Werte in einem statischen thermischen Modell nicht benötigt! Falls vorhanden, sollte man reale Werte verwenden:

Allgemein	
Name	Laminat
Bezeichnung	FR4
Nummer	--
Kommentar	N/mm/t/V/As Elektrostatic 1E10
Materialeigenschaften	
<input checked="" type="radio"/> Linear <input type="radio"/> Nichtlinear <input type="radio"/> Thermisch	
E-Modul	25000.00
Dichte	2.000000E-009
Querkontraktion	0.30

Materialeigenschaften	
<input type="radio"/> Linear <input type="radio"/> Nichtlinear <input checked="" type="radio"/> Thermisch	
Waermeleitfaehigkeit	4.164200E-004
Waermeausdehnung	2.000000E-005



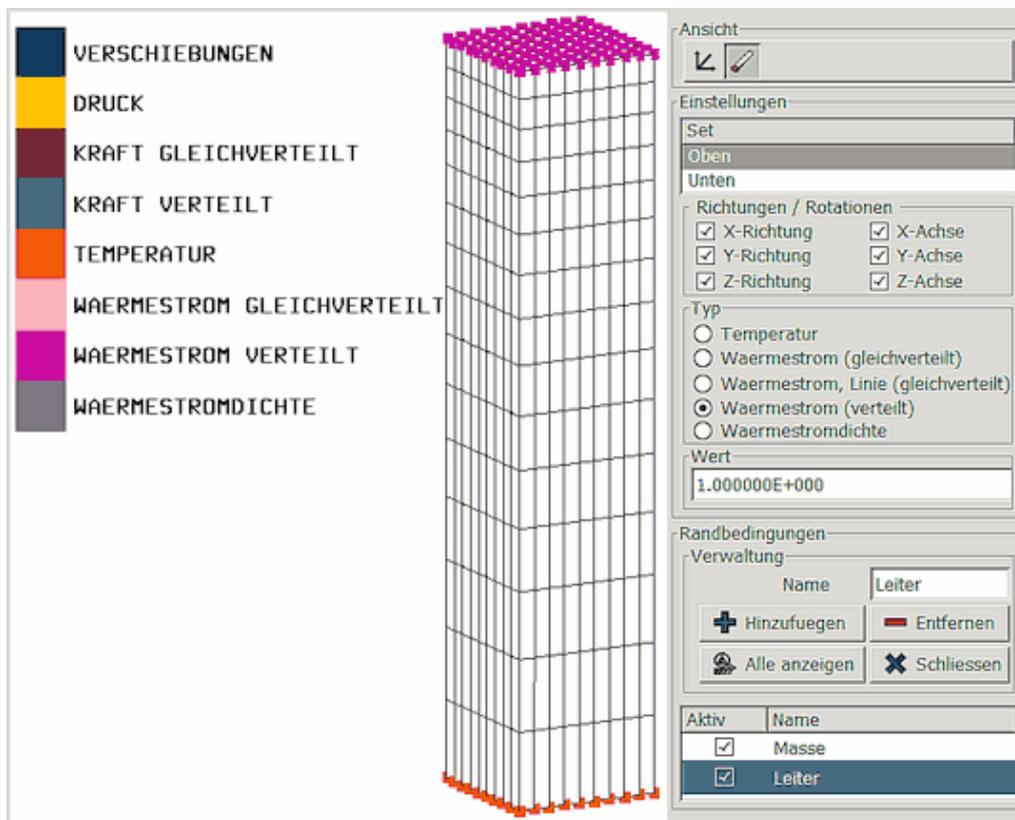
Z88NI.TXT 320160000



- Die Dielektrizitätskonstante $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 = 4,7 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ (A} \cdot \text{s)/(V} \cdot \text{m)}$ entspricht dem Wert der Wärmeleitfähigkeit in **W/(K·m)**
- Benötigt wird die Wärmeleitfähigkeit in **W/(K·mm)** $\rightarrow 4,7 \cdot 8,86 \cdot 10^{-15} = 41,642 \cdot 10^{-15}$.
- Dieser Wert muss mittels des Korrekturfaktors **1E10** auf ein verarbeitbares Niveau erhöht werden.
- Für die nicht benötigte Wärmeausdehnung des in der Realität anisotropen Materials wird zur Vermeidung von Fehlermeldungen ein technisch sinnvoller Wert eingetragen.

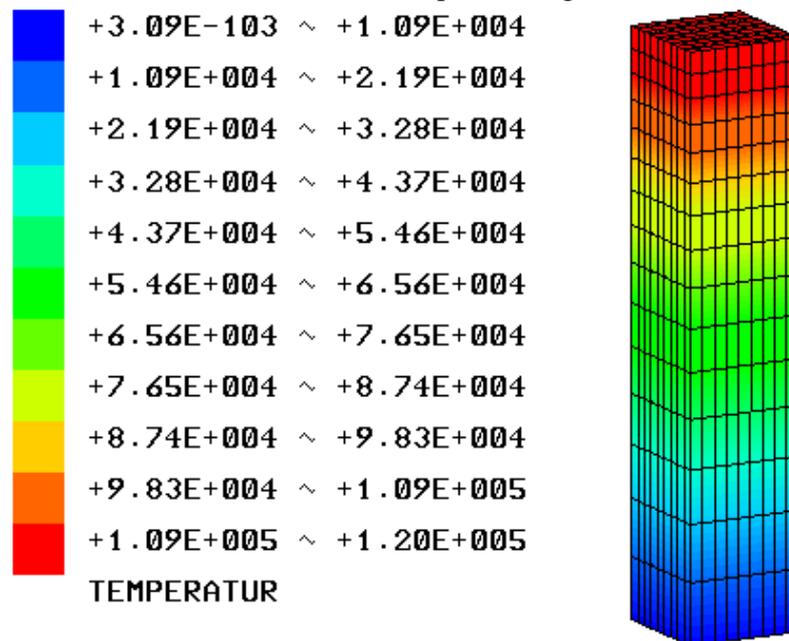
▪ **Randbedingungen** definieren:

1. Mittels Picking die Knoten-Sets der beiden Kontaktflächen "**Oben**" für den Leiter und "**Unten**" für die Massefläche definieren.
2. Vor dem Zuweisen der thermischen Randbedingungen muss eine Umschaltung auf "**Stationaer thermisch**" zur Aktivierung des Z88-Thermo-Moduls erfolgen.
3. Die "**Masseflaeche**" erhält die Temperatur-Vorgabe 0 Kelvin (= **0 Volt**).
4. Der "**Leiter**" soll eine Ladung von **1 Coulomb** erhalten, damit der inverse Wert der sich einstellenden Spannung der Kapazität der Anordnung entspricht ($C=Q/U$):
 - Es stehen zwei Möglichkeiten bereit, den Wärmestrom für die Leiter-Kontaktfläche vorzugeben (gleichverteilt bzw. verteilt).
 - "Gleichverteilt" bedeutet hier, dass jedem Knoten der gleiche angegebene Wert zugewiesen wird, wohin gegen "verteilt" die Aufteilung nach den Finite-Elemente-Regeln realisiert.
 - Wir nutzen deshalb den Modus "Waermestrom (verteilt)" mit dem Gesamtwert 1:

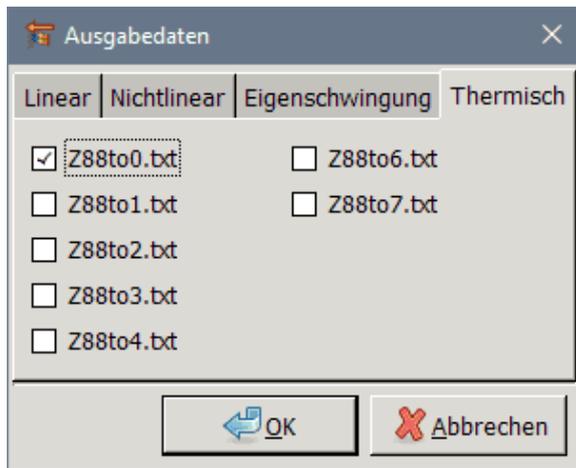


Simulation und Analyse:

1. Die Berechnung mit dem PARDISO-Gleichungslöser aktiviert nur den thermischen Z88-Solver, da keine mechanischen Randbedingungen definiert wurden.
2. Im Postprozessor kann man die berechneten Knoten-Temperaturen grafisch als Farbverlauf darstellen:



3. Uns interessiert für die Modellvalidierung vor allem die Temperatur der Leiterfläche:
 - Diese wird als Maximalwert der Farblegende angezeigt (im Beispiel: 1.20E5).
 - Anscheinend besitzen alle Knoten der Leiterfläche die gleiche Temperatur. Die exakten Werte findet man unter *Postprozessor > Ausgabedaten > Thermisch (Z88to0.txt)*.
 - Die maximale Knotentemperatur (im Beispiel: 1.2019E5) wiederholt sich entsprechend der Netzstruktur aller 16 Knoten. Alle Knoten der Leiterfläche besitzen also exakt die gleiche Temperatur:



Ausgabedatei Z88T00.TXT: Temperatur, erzeugt mit Z88thermo

Knoten	T(1)
1	+1.2019231E+05
2	+1.1562572E+05
3	+1.1071202E+05
4	+1.0542476E+05
5	+9.9736057E+04
6	+9.3614903E+04
7	+8.7028605E+04
8	+7.9941826E+04
9	+7.2316345E+04
10	+6.4111538E+04
11	+5.5283413E+04
12	+4.5784375E+04
13	+3.5563461E+04
14	+2.4565865E+04
15	+1.2732524E+04
16	+3.0864136E-103
17	+1.2019231E+05
18	+1.1562572E+05

Fragen zur Modell-Validierung → Antworten mit nachvollziehbarem Rechenweg:

1. Welche elektrische Kapazität besitzt die modellierte Geometrie laut Dimensionierungsgleichung?
2. Welcher Kapazitätswert ergibt sich anhand der Simulationsergebnisse aus der Definitionsgleichung?

Hinweis:

Bei merklichen Abweichungen zwischen beiden Ergebnissen liegt ein Fehler vor und dieser muss behoben werden!

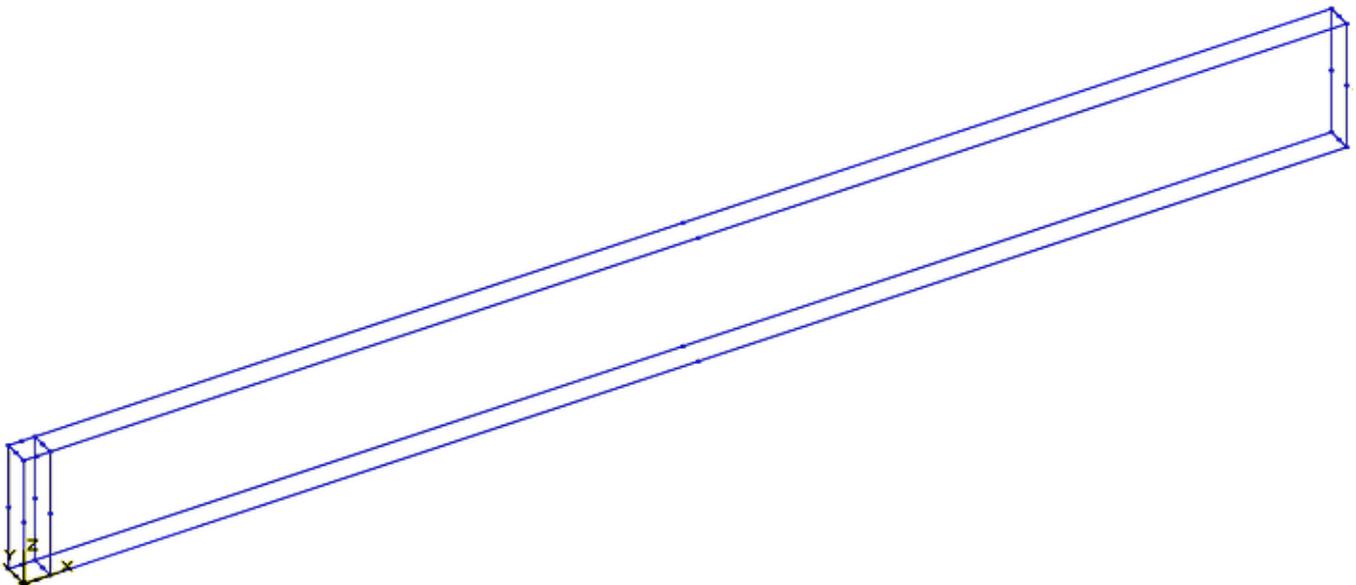
Laminat-Modell mit Kontaktflächen und ohne Luftraum

Nachdem unser Modellansatz validiert ist, ergänzen wir im nächsten Schritt das restliche Laminat im Modell:

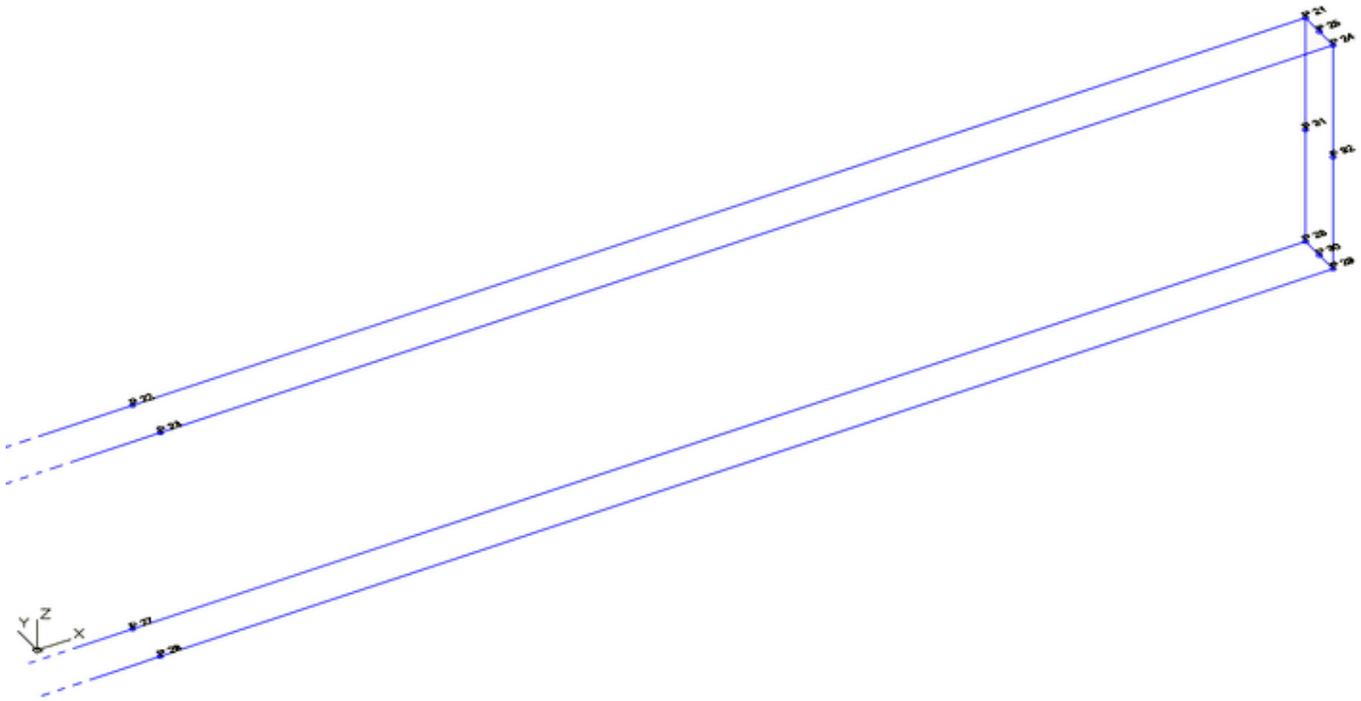
- Wir erzeugen eine Kopie von der AutoCAD-Datei **FEM3_Laminat1_xx.dwg** → **FEM3_Laminat2_xx.dwg** und arbeiten mit dieser Kopie weiter.
- Um die Ergebnisse der Z88-Simulation direkt mit den FEMM-Ergebnissen vergleichen zu können, ist für die Laminat-Symmetriehälfte exakt die gleiche Breite von **5 mm** vorzusehen.

Die Ergänzungen sind auf dem jeweiligen Layer vorzunehmen. Dabei folgen wir wieder dem bekannten Schema:

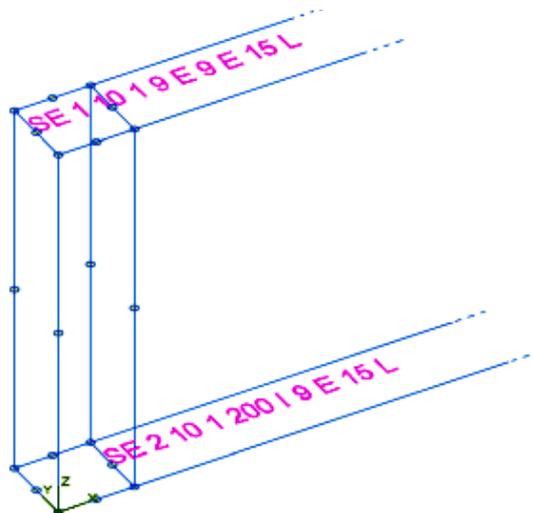
- **Planungsgeometrie** auf Standard-Layer 0 (gelb):
Volumen mit 2. Superelement → X=Gesamtbreite 5 mm / Y=Tiefe 0.1 mm:



- **Knoten-Definition** auf Layer Z88KNR (weiß):
Beschriftung der zusätzlichen 12 Knotenpunkte des 2. Superelements (Reihenfolge egal):



- **Element-Defintion** auf Layer Z88EIO (grün) - Planung der Vernetzungsfeinheit des 2. Superelements
 - Die Vernetzung des 2. Superelements muss an der Kontaktfläche zum 1. Superelement identisch sein.
 - Die Vernetzung sollte in der Nähe des Leiters am feinsten sein.
 - 1. **Y-Richtung** (0.1 mm) → **9 E** (für alle Superelemente SE)
 - 2. **Z-Richtung** (0.5 mm) → **15 L** (zur Leiterzug-Seite feiner für alle SE)
 - 3. **X-Richtung** ((5-0.2xx/2) mm) → **200 I** (größer werdend im Rest des Laminats)
 - Damit ergeben sich folgende Superelement-Definitionen:
 1. **SE 1 10 1 9 E 9 E 15 L** (bereits definiert)
 2. **SE 2 10 1 200 I 9 E 15 L**

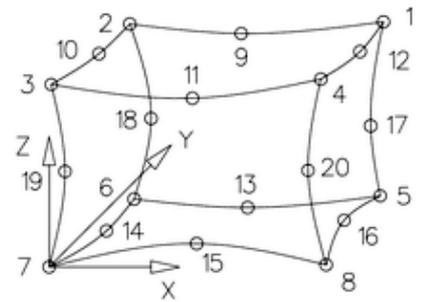


- **Element-Knoten-Koinzidenz** auf Layer Z88NET (cyan):
Damit Z88Aurora die Koinzidenz-Matrix für die Superelement-Struktur generieren kann, müssen auch für das 2. Hexaeder-Superelement alle Element-Knoten nach dem vorgegebenen Schema mittels Linienzügen verbunden werden (Theoriehandbuch S.83):

Wichtig: Es ist anscheinend nicht möglich, die vorhandenen Linien durch die Linien eines neuen Elements zu ergänzen, wenn zwischendurch auf anderen Layern gearbeitet wurde. Dies führt beim DXF-Import in Z88Aurora immer zum Abruch mit der Meldung "identische Knoten in Element x ..Stop". Deshalb muss man auf dem Layer Z88NET alle Linien

löschen und systematisch wieder mit dem ersten Superelement zu beginnen!

1. obere Fläche entgegen Uhrzeigersinn ab Knoten 1:
1 - 9 - 2 - 10 - 3 - 11 - 4 - 12 - 1, Linie beenden
2. untere Fläche exakt wie obere Fläche:
5 - 13 - 6 - 14 - 7 - 15 - 8 - 16 - 5, Linie beenden
3. senkrechte Kanten entgegen Uhrzeigersinn beginnend ab Knoten 1 von oben nach unten
 - 1 - 17 - 5, Linie beenden
 - 2 - 18 - 6, Linie beenden
 - 3 - 19 - 7, Linie beenden
 - 4 - 20 - 8, Linie beenden



Warnung: Hier ist auf Grund der sehr langgestreckten Form des 2. Superelements beim Fangen der Punkte extrem sorgfältiges Arbeiten erforderlich! Es sollte hierfür nur der Fang von Punkten aktiv sein. Bei jedem Punkt ist zu warten, bis die Fang-Information erscheint, bevor man den Maus-Click ausführt.

- **Generelle Strukturinformationen** auf Layer Z88GEN (rot):

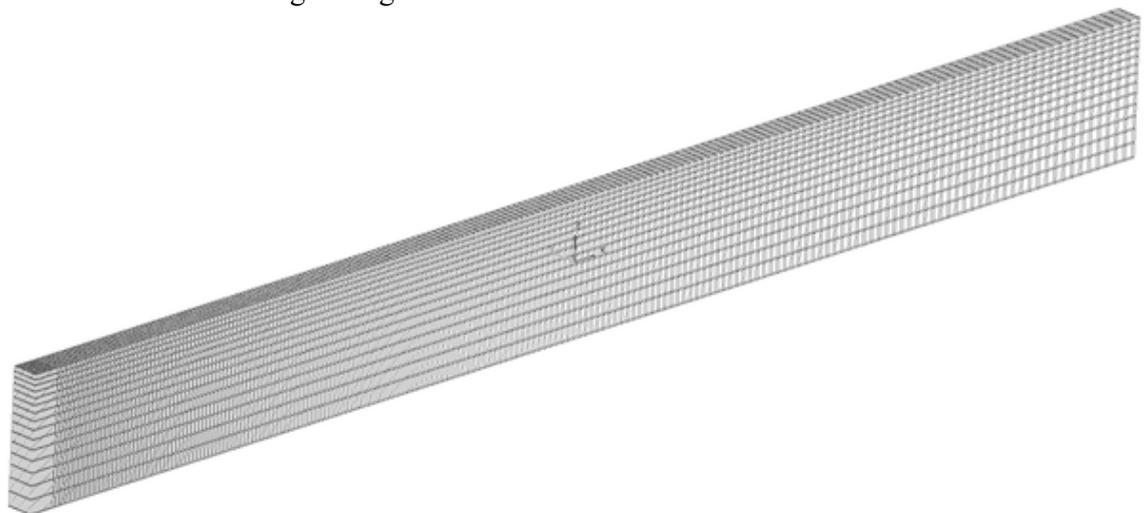
```
Z88NI.TXT ..... : 1. Eingabegruppe für Netzgenerator-Eingabefile Z88NNI.TXT
Dimension der Struktur ..... : 2 oder 3 (eben bzw. räumlich)
Anzahl Knoten ..... : im Beispiel 32
Anzahl Super-Elemente ..... : im Beispiel 2
Anzahl mech. Freiheitsgrade .... : Knoten x Dimension (im Beispiel 96)
Koordinatenflag Superelemente .. : 0 oder 1 (kartesische bzw. Polar-Koord.)
Fangradius-Steuerflag ..... : 0 (ergibt Epsilon=0.01) / 1 (nur bei Bedarf!)
Koordinatenflag finite Elemente : 0 (Standard=kart. Koord.) / 1 (Polar-Koord. als Spezialfall!)
```

Daraus resultieren die folgende Struktur-Informationen:

Z88NI.TXT 3 32 2 96 0 0 0

Im *Z88Aurora* erfolgt dann die Erzeugung des Z88-Modells anhand der gespeicherten DXF-Datei und dessen Validierung auf Basis der FEMM-Ergebnisse:

- **Import der Superstruktur** und strukturierte Vernetzung:
 1. Neues Projekt anlegen "**FEM3_Z88_Laminat2_xx**" nach Start von *Z88Aurora*
 2. Thermo-Modul → "**Stationaer thermisch**" wählen
 3. Import AutoCAD DXF-Datei ergibt folgendes Netz:

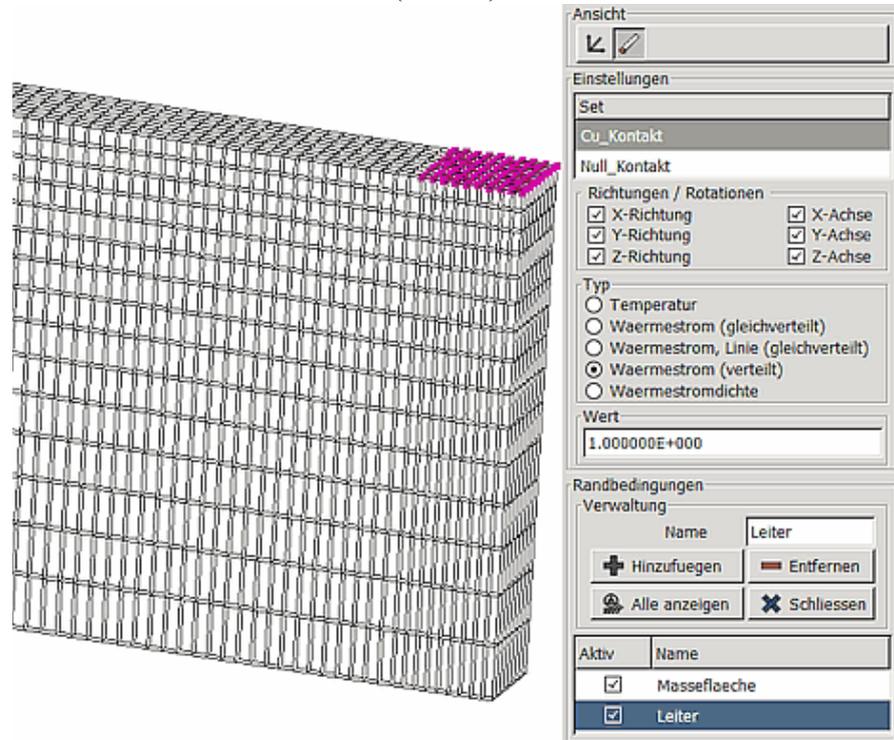


Hinweis: Falls beim Import Fehlermeldungen zum 2. Superelement erscheinen (z.B. Knoten mehrfach vorhanden, fehlerhafte Linien), sollte man im AutoCAD-Layer Z88NET alle Linien löschen und die komplette Struktur neu zeichnen!

- **Material-Zuweisung:**
das bereits definierte Laminat FR4 allen Elementen des Modells zuweisen

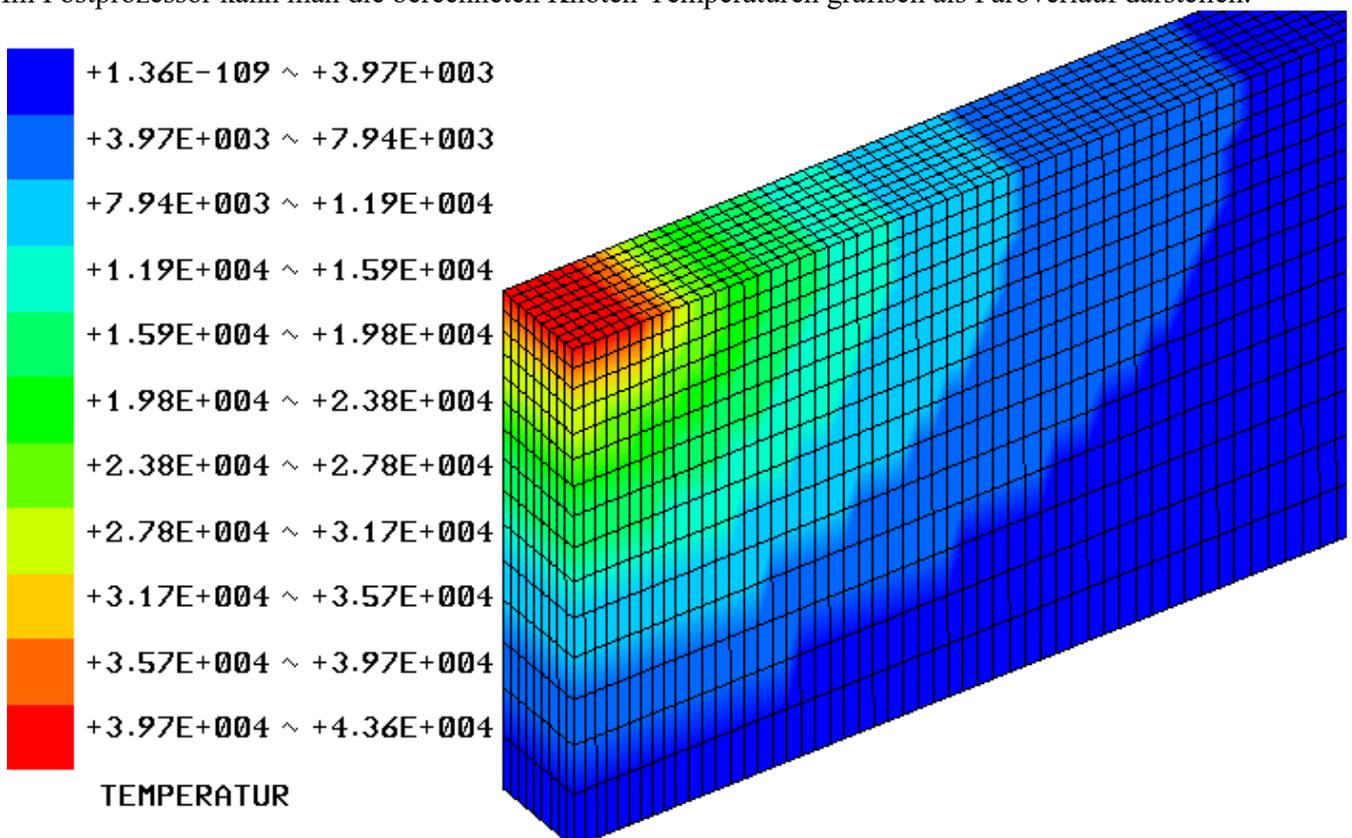
▪ Randbedingungen:

1. Knoten-Sets für die beiden Kontaktflächen "**Cu_Kontakt**" und "**Null_Kontakt**" definieren
 - zuerst für Cu_Kontakt alle Knoten der Leiterseite auswählen (gesamte obere Fläche des Laminats).
 - danach mittels Rechteck-Abwahl (mit gedrückter Hoch-Taste) alle Laminat-Punkte aus Markierung entfernen → wegen der großen Längsausdehnung zuerst einige Spalten direkt am Cu_Kontakt abwählen, dann erst den Rest der Knoten
2. Null_Kontakt erhält als "**Masseflaeche**" die Vorgabe-Temperatur 0 Kelvin (= 0 Volt)
3. Cu_Kontakt sollte als "**Leiter**" eine Ladung von 1 Coulomb erhalten, damit der inverse Wert der sich einstellenden Spannung der Kapazität der Anordnung entspricht ($C=Q/U$):
 - Wir nutzen wieder den Modus "Waermestrom (verteilt)" mit dem Gesamtwert 1:



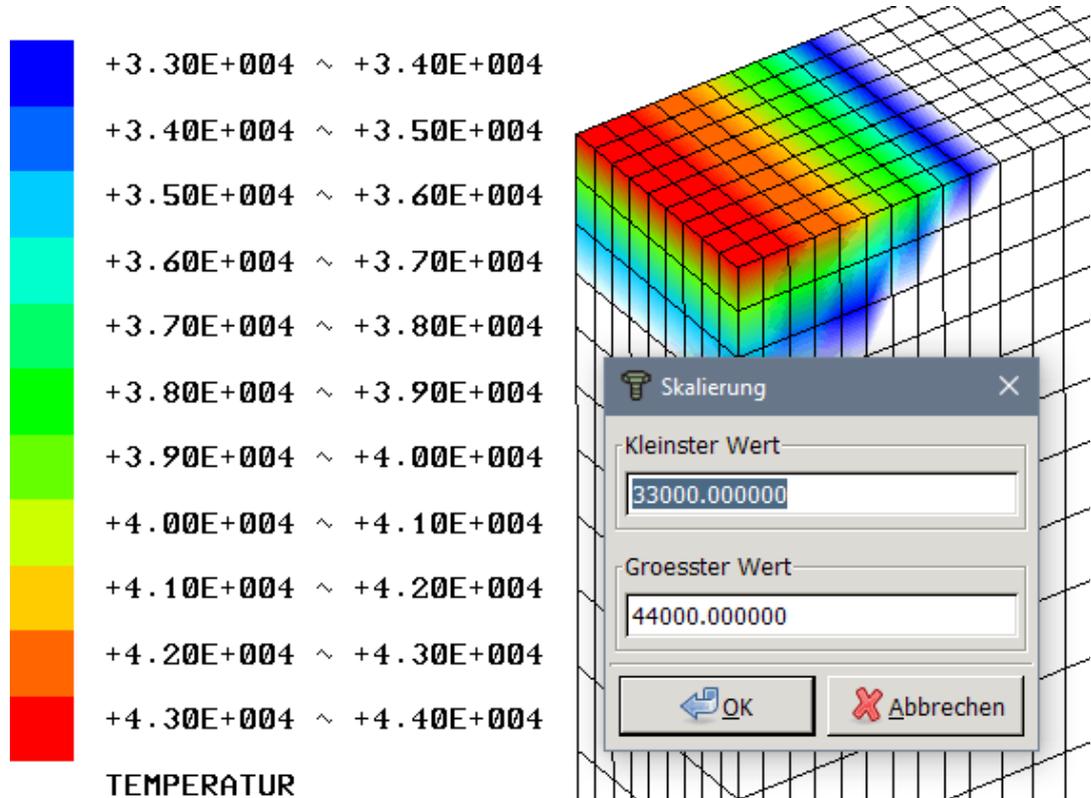
▪ Simulation und Analyse:

1. Die Berechnung mit dem PARDISO-Gleichungslöser aktiviert wieder nur den thermischen Z88-Solver, da keine mechanischen Randbedingungen definiert wurden.
2. Im Postprozessor kann man die berechneten Knoten-Temperaturen grafisch als Farbverlauf darstellen:



3. Uns interessiert für die Modellvalidierung vor allem die Temperatur der Leiterfläche:

- Leider besitzen die Knoten der Leiterfläche nun nicht mehr die gleiche Temperatur. Hier fehlt das Cu-Material mit "idealer" Leitfähigkeit für den Potentialausgleich!
- Der Maximalwert wird an der Farblegende angezeigt (im Beispiel: 4.36E4). In den Randelementen des Leiterkontaktes sinken die berechneten Temperaturen auf ca. 3.5E4.
- Die exakten Werte findet man zwar mit einigem Aufwand unter **Postprozessor** > **Ausgabedaten** > **Thermisch (Z88to0.txt)**, aber das nützt für die Kapazitätsberechnung mittels der Definitionsgleichung wenig.
- Günstiger ist die Anwendung eines Filter-Bereiches, damit sich die gesamte Farbskala auf die Cu-Kontaktfläche konzentriert:



- **Hypothese:** Wir benutzen den "**Mittelwert**" (im Beispiel: ca. $(4.4E4+3.3E4)/2$) in der Annahme, dass sich auf Kupfer als Leitermaterial dieser Wert einstellen würde.

Fragen zur Modell-Genauigkeit → Antworten mit nachvollziehbarem Rechenweg:

1. Welcher Kapazitätswert C in pF/m ergibt sich für den realen, kompletten Leiterzug anhand der Simulationsergebnisse bei Anwendung obiger Hypothese mittels der Definitionsgleichung " $C=Q/U$ " ?
2. Im Vergleich dazu ist mittels des FEM-Modells der Kapazitätswert C in pF/m bei fehlender Luft zu ermitteln. Dazu kann im LUA-Script "**Leiterplatte1_xx.LUA**" temporär die Dielektrizitätskonstante von Luft auf einen vernachlässigbar kleinen Betrag gesetzt werden.

Hinweis:

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

← →

Von „<http://www.optiyummy.de/index.php?>

title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrostatik_-_Z88_-_Modellbildung&oldid=20368“

▪

Software: FEM - Tutorial - Elektrostatik - Z88 - Analyse-Modell

Aus OptiYummy

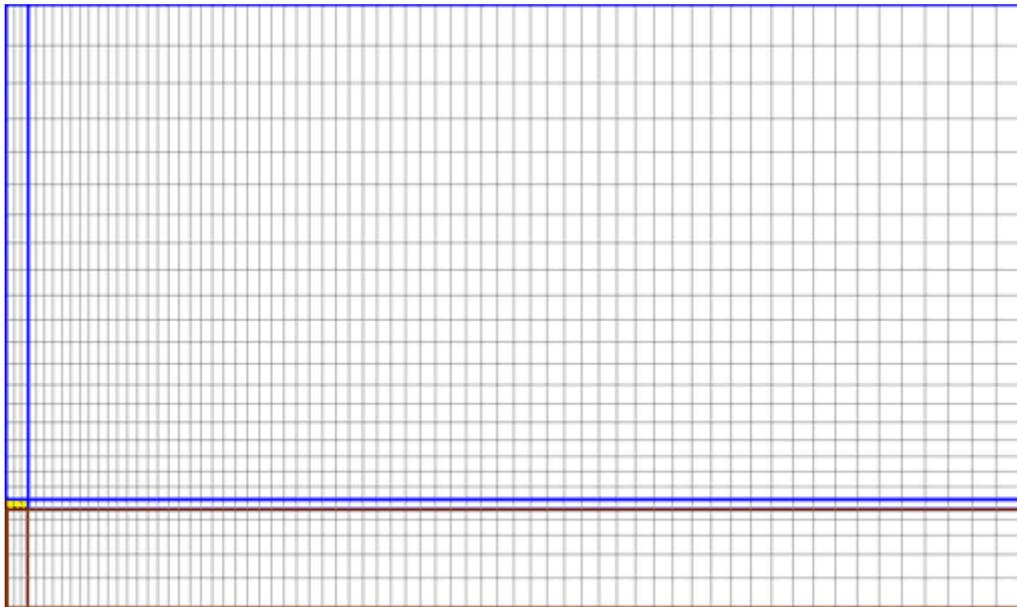
↑

← →

Komplettes Analyse-Modell

Nach der erfolgreichen Validierung des Z88Aurora-Modells für die Leiterzug-Kapazität anhand der Dimensionierungsgleichung und anhand des FEMM-Modells (ohne Luftraum), können wir den Aufwand für die Erstellung des kompletten Analyse-Modells betreiben:

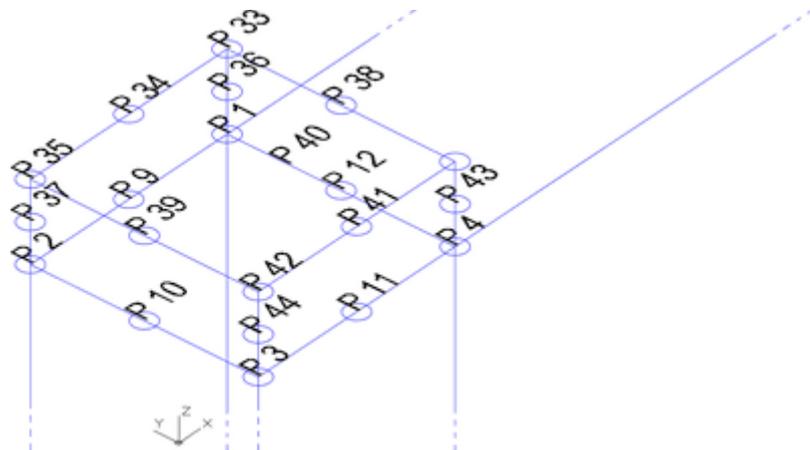
- Um den bisherigen Bearbeitungszustand nicht zu zerstören, arbeiten wir mit einer Kopie der letzten AutoCAD-Datei unter dem Namen **FEM3_Leiter_mit_Luft_xx**.
- Im AutoCAD-Modell müssen noch vier Superelemente ergänzt werden, um Leiterzug und Luftraum in gleicher Größe nachzubilden, wie dies im FEMM-Modell der Fall ist.
- Die Leiterbahn wird nur mit drei Schichten finiter Elemente vernetzt. Für die Luft ist neben dem Leiterzug deshalb auch ein Superelement mit drei Schichten finiter Elemente vorzusehen. Aufgrund der geringen Dicke von 0,035 mm ist dies eine sehr kritische Stelle für die Vernetzung.
- Darüber ist der Luftraum bis zu einer Gesamthöhe des Modells von 2,5 mm mit zwei weiteren Superelementen zu füllen.
- Die folgende Skizze zeigt die gesamte Superstruktur mit ihren sechs Superelementen und einer wegen der Erkennbarkeit auf 1/3 reduzierten Netzdichte im Innern:



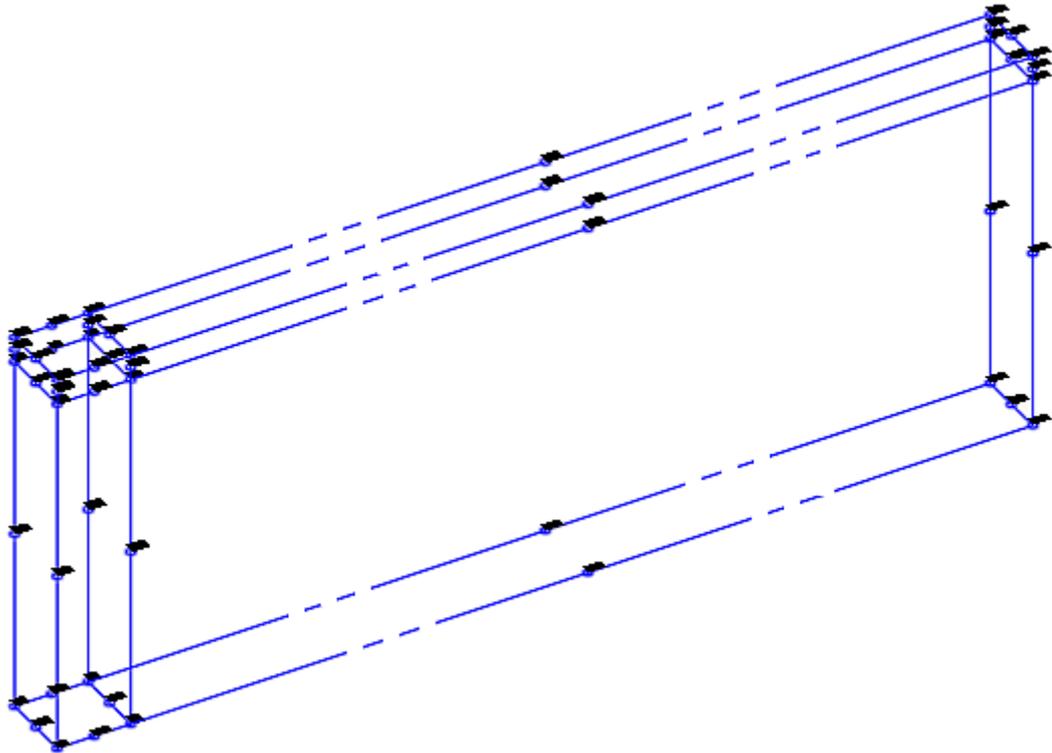
- Leider ist eine schrittweise "Inbetriebnahme" der einzelnen Superelemente wegen der erforderlichen durchgängigen Bearbeitung aller Element-Umrandungen im Layer Z88NET nicht praktikabel!
- Die Einschränkung der durchgängigen Bearbeitung trifft für die anderen Layer nicht zu. Deshalb sollte man zumindest bei komplexeren Strukturen ein Superelement nach dem anderen jeweils vollständig definieren (mit Ausnahme der Linien auf Layer **Z88NET**):

1. Superelement für den Leiterzug (SE 3 10 1 9 E 9 E 3 E) → max. Knoten-Nr.=P 44:

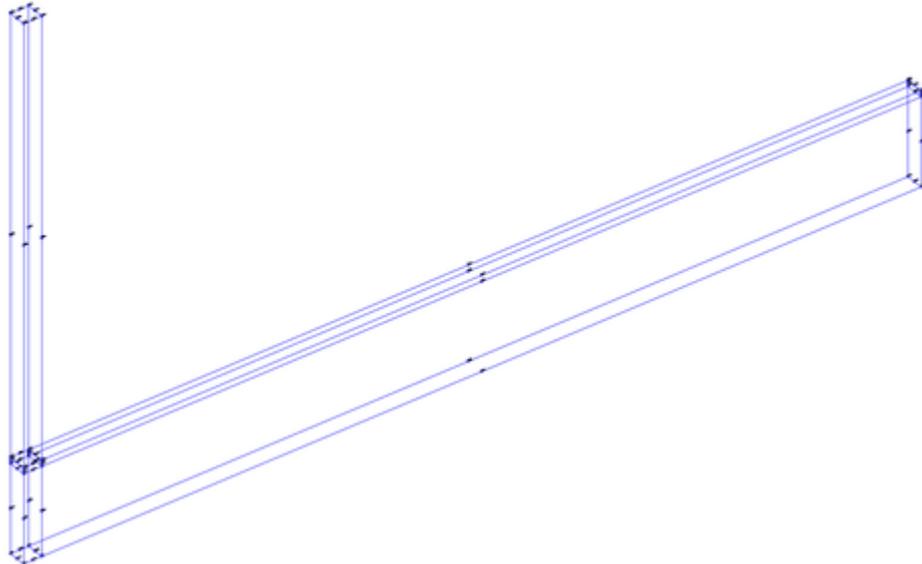
- Das Zeichnen der erforderlichen Linien und Knoten-Punkte auf Layer 0 ist problemlos möglich.
- Die Beschriftung der zusätzlichen Knoten-Nummern auf dem Layer **Z88KNR** wird unübersichtlich.
- Die Schriftgröße der Texte auf diesem Layer kann nach Rechteckwahl aller Texte (andere Layer ausblenden!) über die Eigenschaften (Kontext-Menü rechte Maustaste) z.B. auf 0.01 verkleinert werden.
- Mit dieser kleineren Schriftgröße werden dann auch die neuen Knoten beschriftet:



2. **Superelement der Luftschicht neben dem Leiter** (SE 4 10 1 200 19 E 3 E) → max. Knoten-Nummer=**P 51**:



3. **Superelement für Luft über Leiter** (SE 5 10 1 9 E 9 E 60 l) → max. Knoten-Nr.=**P 63**:



4. **Superelement für restlichen Luftraum** (SE 6 10 1 200 19 E 60 l) → max. Knoten-Nummer=**P 70**

5. **Generelle Strukturinformation** auf Layer **Z88GEN** → Z88NI.TXT 3 70 6 210 0 0 0

Nach dem DXF-Import ergibt sich das komplette Finite Elemente Modell (wenn alles korrekt definiert wurde):

- Die Vernetzung sollte dem Bild am Anfang dieses Abschnittes entsprechen, ist jedoch um den Faktor 3 feiner.
- Folgende Schritte sind vor dem Berechnung des Feldverlaufs noch erforderlich:

1. fehlende Materialien definieren
2. Element-Sets für alle Materialbereiche des Netzes definieren und die Materialwerte den zugehörigen Element-Sets zuweisen
3. Knoten-Sets für die Randbedingungen definieren und Randbedingungen (Ladungsmenge und Nullpotential) zuweisen

1. Materialien definieren:

- Zu beachten ist der erforderliche Korrekturfaktor von 1E10 für die Dielektrizitätskonste (Wärmeleitfähigkeit).
- Außerdem müssen "plausible" Werte für vom thermostatischen Solver nicht benötigte Parameter angegeben werden. Dies ist insbesondere ein Problem bei Gasen (Luft).

1. Elektrode aus elektrisch sehr gut leitendem Material für den Leiterzug:

- Für die Elektrode kann ein idealer Wert $\epsilon_{\text{Elektrode}} = \infty \text{ (A}\cdot\text{s)/(V}\cdot\text{m)}$ angenommen werden (d.h. auch bei unendlich großen Ladungsdifferenzen baut sich kein Potentialunterschied innerhalb der Elektrode auf).
- 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 möglichst großen Zahl als Ersatz für den Wert "Unendlich". Man sollte jedoch einen Wert wählen, welcher in Bezug auf die "normalen" Werte hinreichend groß ist.
- Als Ersatz für "Unendlich" genügt hier ein Faktor von ca. 1 Million im Vergleich z.B. zur Dielektrizitätskonstante von Luft:

Allgemein	
Name	Elektrode
Bezeichnung	Leiter
Nummer	--
Kommentar	N/mm/t/V/As Elektrostatic 1E10

Materialeigenschaften		
Linear	Nichtlinear	Thermisch
E-Modul	120000	
Dichte	9E-9	
Querkontraktion	0.3	

Materialeigenschaften		
Linear	Nichtlinear	Thermisch
Waermeleitfaehigkeit	1.000000E+002	
Waermeausdehnung	1.600000E-005	

1. Luft mit der Dielektrizitätskonstante von Vakuum:

- Die mechanischen Kennwerte hierbei dienen nur zur Überlistung der Plausibilitätskontrolle von Z88Aurora:

Allgemein	
Name	Luft
Bezeichnung	Vakuum
Nummer	--
Kommentar	N/mm/t/V/As Elektrostatic 1E10

Materialeigenschaften		
Linear	Nichtlinear	Thermisch
E-Modul	1.00	
Dichte	1.000000E-009	
Querkontraktion	0.30	

Materialeigenschaften		
Linear	Nichtlinear	Thermisch
Waermeleitfaehigkeit	8.860000E-005	
Waermeausdehnung	1.000000E-005	

2. Materialbereiche als Element-Sets definieren und Material zuweisen:

Die Auswahl der Bereiche kann als Rechteckwahl mittels gedrückter ALT-Taste erfolgen.

1. Laminat

- Kritisch ist die enge vertikale Vernetzung direkt über dem Laminat. Hier sollte bei ausreichendem Heranzoomen eine stückweise Rechteckwahl erfolgen. Die Markierungen bereits gewählter Elemente bleiben erhalten, wenn man die Ansicht im Grafikfenster verschiebt, um dann den nächsten Bereich auszuwählen.

2. Luft

- Die Auswahl des Luftraums erfolgt analog, jedoch werden mittels gedrückter HOCH-Taste die Leiter-Elemente als Rechteck wieder abgewählt.

3. Leiter

- Die Rechteckwahl ist bei starkem Heranzoomen kein Problem.

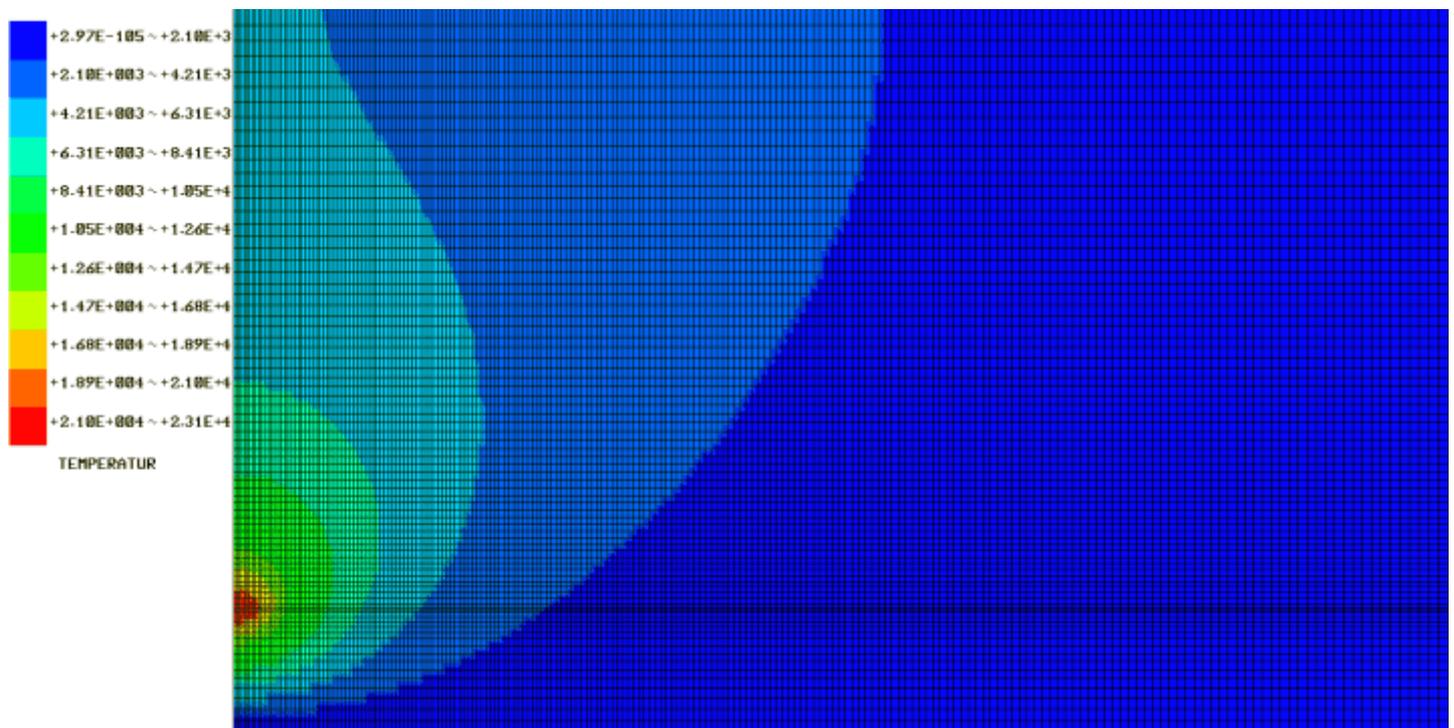
- **Wichtig:**

- Da infolge des vorhandenen Bugs zur Zeit nur ein Material durch den Thermosolver verwendet werden kann, verzichten wir auf die Zuweisung der einzelnen Materialien.
- Alle Elemente erhalten als Workaround nur die Material-Parameter des Laminats!

3. Knoten-Sets für die Randbedingungen definieren und zuweisen:

- Die Definition der Knoten-Sets und deren Belegung mit den Randbedingungen verläuft analog zur vorherigen Modell-Validierung.
- Der Unterschied besteht nur darin, dass für die Elektrode jetzt alle Knoten des Leiter-Bereiches (einschließlich der Randknoten) gewählt werden müssen.

Die Berechnung ergibt dann den folgenden Verlauf für das elektrostatische Feld:

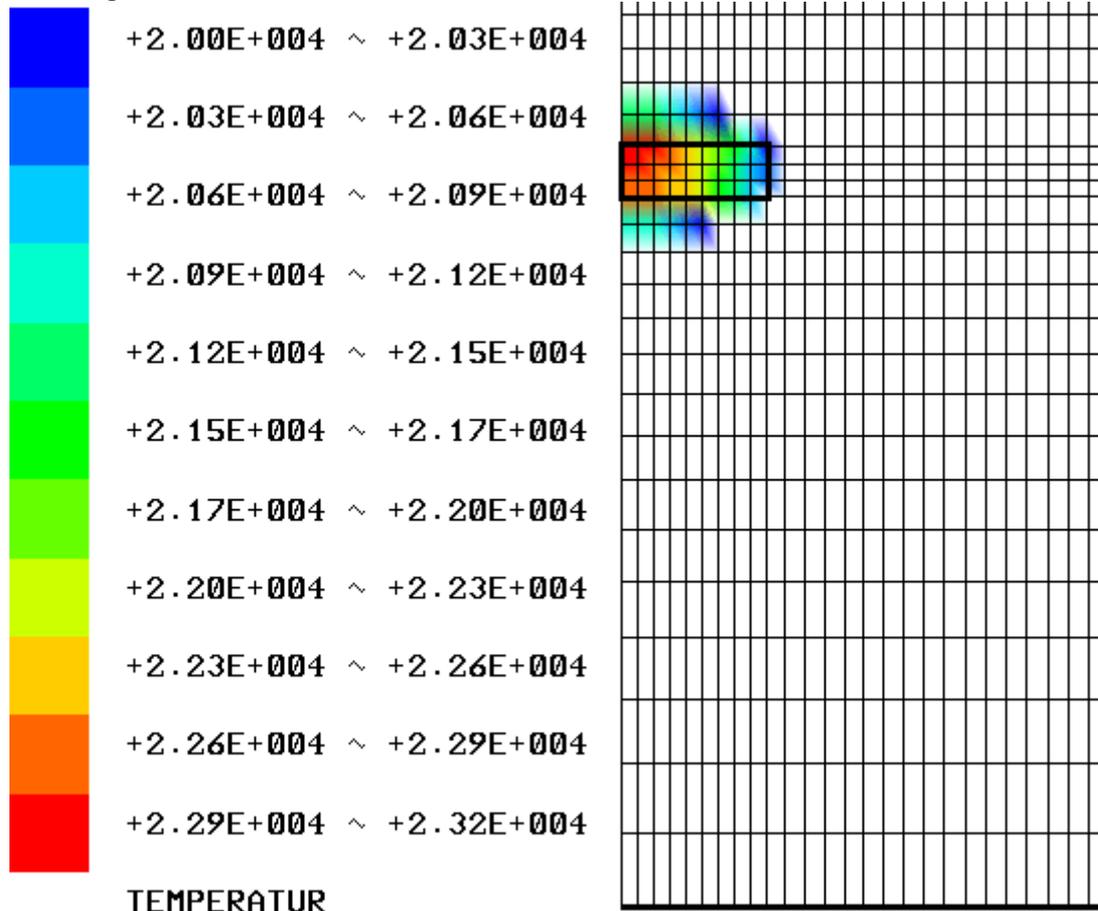


Aus der behelfsweisen Verwendung der Laminat-Dielektrizitätskonstante für das gesamte Modell resultieren zwei das Ergebnis verfälschende Effekte:

1. Die berechnete Kapazität ist größer als die reale, weil der Luftraum im Modell zuviel Feldenergie speichert.
2. Es erfolgt kein Potentialausgleich innerhalb des Leiter-Bereichs, wie wir dies bereits aus der Modellvalidierung kennen.

In gewissen Maße kann durch einfache Annahmen eine Annäherung an das "richtige" Ergebnis für die Leiterzug-Kapazität erfolgen:

1. **Hypothese eines gemittelten Spannungspotentials** im Leiter unter Nutzung der Filter-Funktion für die grafische Darstellung:



- Im Beispiel ergibt sich also ein "berechneter" Potentialwert von ca. $0.5 \cdot (2.32 + 2.00)E4$, aus dem man unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors auf Grundlage der Definitionsgleichung die Leiterzug-Kapazität ermitteln kann.
2. **Hypothese eines linearen Einflusses von ϵ_r** des "Luftraums" auf die Leiterzug-Kapazität:
- Aus den mittels Z88Aurora berechneten Kapazitätswerten für $\epsilon_r=0$ und $\epsilon_r=4.7$ können wir den näherungsweise Kapazitätswert für Luft mit $\epsilon_r=1$ interpolieren.

Fragen zur Leiterzug-Kapazität → Antworten mit nachvollziehbarem Rechenweg:

- Welcher Kapazitätswert C in pF/m ergibt sich für den realen, kompletten Leiterzug anhand der Simulationsergebnisse bei Anwendung beider Hypothese aus der Simulation mit Z88Aurora?
- Wie groß ist die prozentuale Abweichung zum Ergebnis auf Grundlage des geometrisch gleichen FEMM-Modells.

Hinweis:

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

← →

Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrostatik_-_Z88_-_Analyse-Modell&oldid=20370“

■

Software: FEM - Tutorial - Elektrostatik - Z88 - Feldsimulation

Aus OptiYummy

↑

← →

Potentialfeld-Analogie mittels Thermo-Modul

Mit Ausnahme von Multiphysic-Programmen (z.B. *COMSOL Multiphysics*) gilt für klassische FEM-Programme:

- FEM-Programme der Struktur-Mechanik besitzen meist Möglichkeiten zur Berücksichtigung bzw. sogar zur Simulation eines Temperaturfeldes im Festkörper mit 3D-Modellen.
- Sie verfügen jedoch meist nicht über Möglichkeiten zur Berechnung elektrischer Felder.

Frei verfügbare FEM-Programme zur Simulation elektro-magnetischer Felder sind 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.

← →

Von „[http://www.optiyummy.de/index.php?](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrostatik_-_Z88_-_Feldsimulation&oldid=20347)

[title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrostatik_-_Z88_-_Feldsimulation&oldid=20347](http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrostatik_-_Z88_-_Feldsimulation&oldid=20347)“

▪

Software: FEM - Tutorial - Elektrostatik - Z88 - Mapped Mesh

Aus OptiYummy

↑

← →

Strukturierte Vernetzung

Die automatisierte Vernetzung (Freemesh) von Flächen/Körpern funktioniert sehr gut nur mit Dreiecken/Tetraedern. Entsprechende Netzgeneratoren stehen sowohl in kommerzieller als auch in freier Software zur Verfügung.

Häufig benötigt man jedoch die Vorteile einer regelmäßigen Vernetzung mittels Vierecken/Hexaedern:

- geringere Elementanzahl,
- geringerer Rechenaufwand,
- höhere numerische Genauigkeit der Elemente,
- gerade bzw. ebene Bereichsgrenzen zwischen Bereichen unterschiedlicher Eigenschaften im Netz.

Für die regelmäßige Vernetzung mit Vierecken/Hexaedern existieren keine automatisierten Mapped Meshes:

- Vierecke/Hexaedern führen in Free Meshes zu unregelmäßigen Netzen, welche teilweise mit Dreiecken/Tetraedern gefüllt werden.
- Die regelmäßige Vernetzung erfordert eine manuelle direkte Definition der Elemente oder zumindest eine manuelle Steuerung der Vernetzungsstruktur.
- Das im *Z88Aurora* angewandte Superstruktur-Konzept repräsentiert ein Prinzip der manuellen Steuerung.

Z88-Superstruktur-Konzept:

- Mit sehr großer Wahrscheinlichkeit hat jeder Übungsteilnehmer bei der Definition der Z88-Superstrukturen mittels AutoCAD mehrfach geflucht!
- Die Eingabe der erforderlichen Informationen erscheint am Anfang als sehr umständlich und fehleranfällig.
- Nach einigem Üben wird jedoch klar, dass hier wirklich nur das erforderliche Minimum an Informationen auf den Z88-Layern einzugeben ist.
- Da man die komfortablen Fang-Funktionen von AutoCAD für die Verankerung der Superstruktur an der CAD-Geometrie nutzen kann, resultieren Fehler überwiegend aus unkonzentrierter, manueller Tätigkeit.
- Dieses Superstruktur-Konzept besitzt ein großes Potential für die schrittweise Automatisierung der strukturierten Vernetzung, da das "Zeichnen und Beschriften" strengen Regeln folgt.
- **Hinweise:**
 - Falls man die Vorteile einer regelmäßigen Hexaedern-Vernetzung benötigt, stellt das Superstruktur-Konzept ein optimales Verfahren dar.
 - Ein Teil des hohen Definitionsaufwandes während der Übung resultierte daraus, dass Hexaedern mit linearer Ansatzfunktion trotz prinzipieller Eignung nicht nutzbar waren. Hier besteht Hoffnung, dass dieses Problem im nächsten *Z88Aurora*-Release behoben ist.

← →

Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrostatik_-_Z88_-_Mapped_Mesh&oldid=20353“

▪

Software: FEM - Tutorial - Elektrostatik - Z88 - Ergebnisse

Aus OptiYummy

↑

← →

Ergebnis-Aufbereitung

Wir haben nun mit unterschiedlichen Modellen in unterschiedlichen Programmen unterschiedliche Ergebnisse in Hinblick auf die elektrische Leiterzug-Kapazität [pF/m] in Bezug zur Massefläche einer Leiterplatte ermittelt:

- Im Verlaufe der Übung wurden als Bestandteil der einzureichenden Lösung die Antworten zu den einzelnen Kontrollfragen ermittelt und notiert.
 - Hier nun der zusammengefasste Überblick zu den einzusendenden Ergebnissen:
1. **FEMM-Modell mit hinreichend großem Luftraum (manuell erstellt):**
 - Wie klein muss man die Maschengrößen für die Blöcke und Leitersegmente wählen, damit sich das Ergebnis der Kapazitätsberechnung praktisch nicht mehr ändert? Die getroffene Wahl ist anhand einer Versuchsreihe zu dokumentieren (Tabellen oder Grafiken), welche den Zusammenhang zwischen Maschengrößen und berechnetem Kapazitätswert widerspiegelt.
 - 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?
 2. **FEMM-Modell mit Open Boundary Condition (manuell erstellt)**
 - Gegen welchem Betrag konvergiert der Wert für den vollständigen Kapazitätsbelag einer Leiterbahn in Bezug auf die Masse-Ebene im FEMM mit der Open Boundary Condition für den "unendlichen Luftraum"?
 3. **Modellbildung und -validierung mit Z88Aurora-Thermomodul:**
 - Modell des homogenen Feldes zwischen Leiterzug und Masse:
 - Welche elektrische Kapazität besitzt die modellierte Geometrie laut Dimensionierungsgleichung?
 - Welcher Kapazitätswert ergibt sich anhand der Simulationsergebnisse aus der Definitionsgleichung?
 - Modell der Leiterplatte ohne Luftraum:
 - Welcher Kapazitätswert C in pF/m ergibt sich für den realen, kompletten Leiterzug anhand der Simulationsergebnisse ohne Luftraum?
 - Im Vergleich dazu ist mittels des FEMM-Modells der Kapazitätswert C in pF/m bei fehlender Luft zu ermitteln.
 4. **Komplettes Analyse-Modell (mit Workaround für Materialfehler)**
 - Welcher Kapazitätswert C in pF/m ergibt sich für den realen, kompletten Leiterzug anhand der Simulationsergebnisse mit Z88Aurora?
 - Wie groß ist die prozentuale Abweichung zum Ergebnis auf Grundlage des geometrisch gleichen FEMM-Modells.
 5. **Welcher Wert für den Kapazitätsbelag des Leiterzugs stellt das glaubwürdigste Ergebnis dar?**
 - Auf Grundlage obiger Zwischen-Ergebnisse ist der "tatsächliche" Wert der Leiterzug-Kapazität zu ermitteln.
 - Die Entscheidung ist zu begründen.

← →

Von „http://www.optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_Elektrostatik_-_Z88_-_Ergebnisse&oldid=20371“

▪