

PROJEKT ZUR  
FINITEN ELEMENTMETHODE

ABAQUS-Tutorial

prepared by:  
Frédéric Sontag  
Nils Wiegmann  
Jasmina Kessel  
Konrad Arndt  
Martin Lück  
Jörg Wessel

21. Juli 2006

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Die ABAQUS-Eingabemaske</b>	<b>5</b>
2.1	Allgemeine Beschreibung . . . . .	5
2.2	Die Programm-Oberfläche . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Preprocessing</b>	<b>7</b>
3.1	Sketch . . . . .	8
3.2	Part . . . . .	10
3.3	Assembly . . . . .	13
3.4	Property . . . . .	15
3.5	Step . . . . .	20
3.6	Interaction . . . . .	23
3.7	Load . . . . .	25
3.8	Mesh . . . . .	29
3.9	Job . . . . .	32
<b>4</b>	<b>FE-Run</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>Postprocessing</b>	<b>40</b>
5.1	Visualization . . . . .	41
5.2	Der XY Data Manager . . . . .	45
5.3	Lebensdaueranalyse . . . . .	47

## 1 Einleitung

Im andauernden Zeitalter der Miniaturisierung unter der Anforderung der Höchstbelastbarkeit an Mikrobauteile, z.B. im Bereich der Elektrotechnik (Computer, Handys usw.), gewinnen numerische Berechnungen der Bauteilhaltbarkeit auf Grund der hohen Dauerbeanspruchung an Bedeutung. Hierzu wurden Programme entwickelt, die auf problemspezifischen mathematischen Methoden basieren, mit denen Lebensdaueranalysen von entsprechenden Bauteilen, oder Elementen daraus, gemacht werden können.

Im Folgenden soll das Programm ABAQUS vorgestellt werden, welches zur Berechnung die mathematische Methode der finiten Elemente benutzt. Hierbei werden die Geometrie des zu untersuchenden Bauteils, dessen Materialien mit ihren Eigenschaften sowie definierte Belastungen in das Programm eingegeben. Mit Hilfe der Unterteilung in finite Elemente werden an beliebigen Stellen innerhalb des Bauteils die auftretenden Spannungen und Verformungen berechnet. ABAQUS löst dafür in jedem Schritt die NAVIER-LAMÉschen Differentialgleichungen mit den entsprechenden Rand- und Übergangsbedingungen. Da beliebig gestellte Probleme in 3-D beliebig kompliziert werden können, somit hohe Rechenzeiten benötigen und eine hohe Fehleranfälligkeit besitzen, wird im Allgemeinen von dem vereinfachten 2-D Fall ausgegangen. Hierbei wird zusätzlich eine der beiden folgenden Annahmen getroffen:

**Ebener Verzerrungszustand:** Alle Verzerrungen in die dritte Raumrichtung werden zu Null angenommen. (gute Näherung für Bauteile mit großer Länge – z.B. Pipeline)

**Ebener Spannungszustand:** Alle Spannungen in die dritte Raumrichtung werden zu Null angenommen. (gute Näherung für Bauteile, die sehr dünn sind – z.B. Festplatten)

Obwohl für viele Bauteile beides nur ungenügend zutrifft, wird in den meisten Fällen dennoch eine der beiden Annahmen genutzt, um die Probleme überhaupt innerhalb wirtschaftlicher Zeiträume lösbar zu machen. In der nachfolgend beschriebenen Problemstellung wird die erste Annahme als Vereinfachung angewendet.

**Problemstellung:** Als Beispiel für diese Schritt-für-Schritt-Anleitung wird ein Ball-Grid-Array<sup>1</sup> unter Temperaturbelastung betrachtet, das auf eine Pla-

---

<sup>1</sup>Ein Mikrochip-Paket, bei dem die Lotbälle in einem gitterförmigen Raster an der Unterseite des Chips angeordnet sind.

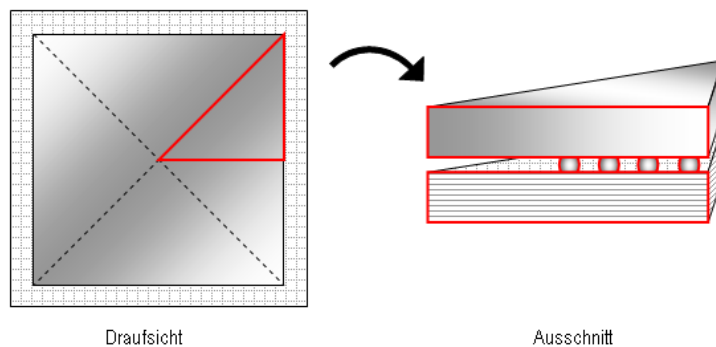


Abbildung 1: Vereinfachung des Problems durch Ausnutzung von Symmetrien

tine mittels SMT<sup>2</sup> gelötet ist.

Um den Rechenaufwand zu minimieren werden zur Vereinfachung des Problems bestimmte Symmetrien in der Geometrie ausgenutzt (Abb. 1). Um das Problem ausschließlich 2-dimensional zu betrachten wird nun der ebene Verzerrungszustand angenommen, wodurch sich das Problem auf folgenden Fall beschränkt:

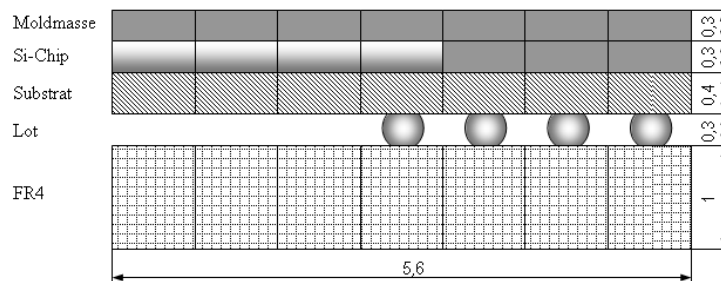


Abbildung 2: Problemstellung, 2-dimensionaler Ausschnitt

**Hinweis:** Das folgende Skript beinhaltet lediglich eine Schritt-für-Schritt-Anleitung für die Eingabe und Berechnung des vorgegebenen Problems in ABAQUS. Es beinhaltet keine vollständige Beschreibung von ABAQUS! Es wird an dieser Stelle auf die ABAQUS-Hilfe und eine Dokumentation im Internet unter <http://lcadm.rzrn.uni-hannover.de:2080/v6.5/> verwiesen.

<sup>2</sup>Surface Mount Technology: Oberflächenbestückung von elektronischen Bauteilen auf eine Leiterplatte.

## 2 Die ABAQUS-Eingabemaske

### 2.1 Allgemeine Beschreibung

Mit der grafischen, interaktiven Umgebung des Programms ABAQUS/CAE (Complete ABAQUS Environment) können Modelle für die Finite Elemente Methode auf komfortable Art und Weise erstellt werden. Ist das Modell fertig, kann ebenfalls mit ABAQUS/CAE der zu untersuchende Prozess definiert, kontrolliert und gesteuert werden. All diese Daten können nach der eigentlichen Berechnung auch mit ABAQUS/CAE ausgewertet werden. Dieses Tutorial und die Kontrolldateien sind mit der ABAQUS/CAE Version 6.5-1 unter der cae\_teaching Lizenz<sup>3</sup> erstellt.

### 2.2 Die Programm-Oberfläche

Die Oberfläche des ABAQUS/CAE-Programms ist aus folgenden Bereichen zusammengesetzt:

**Titelleiste (Title bar)** Auf der Titelleiste steht die Versionsnummer von ABAQUS/CAE und der Verzeichnispfad zu der momentan geöffneten Datei.

**Menüleiste (Menu bar)** Hier lassen sich die meisten Einstellungen und Anpassungen vornehmen sowie Befehle aufrufen.

**Symbolleiste (Tool bar)** In der Symbolleiste sind die wichtigsten Funktionen mit einem Button repräsentiert, damit ein schneller Zugriff möglich ist.

**Kontextzeile (Context bar)** an dieser Stelle kann zwischen den wichtigsten Arbeitsbereichen eines Projektes wie Modul, Model und Part gewechselt werden.

**Baumstruktur des Modells (Model Tree)** In dieser Übersicht über alle Teile des Projekts kann man schnell von einem Bereich zum anderen wechseln und mit Doppel- und Rechtsklick die wichtigsten Einstellungen aufrufen. In dem Menüpunkt **View** lässt sich die Baumstruktur des Modells (Model Tree) aus- und wieder einblenden. Dadurch kann das Arbeitsfenster vergrößert werden.

---

<sup>3</sup>Es kann zu Kompatibilitätsproblemen zwischen den verschiedenen Arten von Lizenzen kommen.

## 2 DIE ABAQUS-EINGABEMASKE

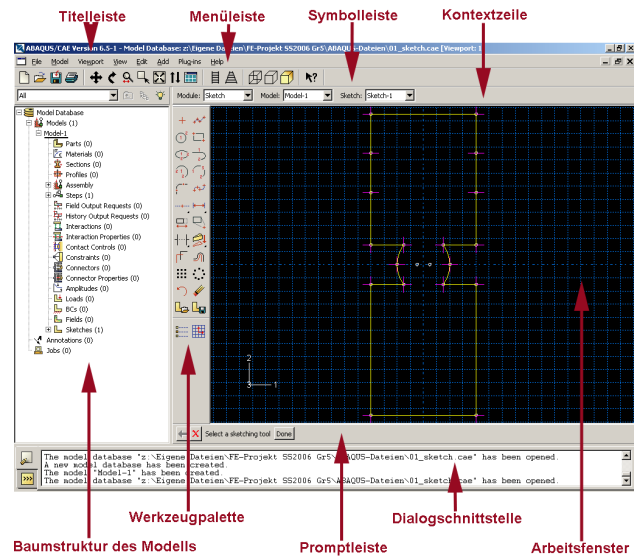

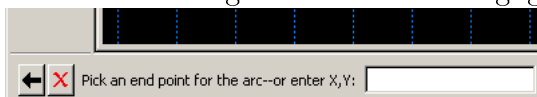


Abbildung 3: Die beschriftete ABAQUS-Eingabemaske

**Werkzeugpalette (Toolbox area)** Wenn die Maustaste auf einem Button gedrückt gehalten wird, in dessen rechter, unterer Ecke ein schwarzes Dreieck ist, dann öffnet sich eine Auswahl an Variationen dieses Werkzeugs .


**Arbeitsfenster (Viewport, Canvas and drawing area)** Hier kann das Modell grafisch bearbeitet werden.

**Promptleiste (Prompt area)** In dieser Leiste kann man dem Programm z. B. Daten eingeben und Arbeitsschritte bestätigen oder abbrechen. Dazu muss lediglich der Anweisung gefolgt werden, wie z. B. hier:




**Dialogschnittstelle (Message Area, Command line interface)** In diesem Fenster werden Statusinformationen und Warnungen ausgegeben. Diese werden alle protokolliert, so dass ältere Informationen durch Hochscrollen wieder gefunden werden können. In diesem Fenster lassen sich im Command-line-interface-Modus Befehle eintippen, dies ist aber nur für fortgeschrittene Programmbenutzer eine empfehlenswerte Option.

## 3 Preprocessing

1. Starten Sie ABAQUS/CAE .
2. Drücken Sie auf den Button **Create Model Database**, um ein neues Projekt zu starten.
3. Nun finden Sie die ABAQUS-Eingabemaske vor. Das vorangegangene 2. Kapitel erklärt die einzelnen Bereiche der Programm-Oberfläche.
4. Fahren Sie fort mit dem nächsten Abschnitt über das Modul Sketch.

### 3.1 Sketch

Das Modul Sketch dient zur Erstellung von Zeichnungen (engl.: sketches). Mit Punkten und Linien wird hier die Geometrie, d.h. die Form und die Abmessungen des späteren Bauteils (engl.: part) festgelegt.

1. Wählen Sie **Module** → **Sketch**.
2. Klicken Sie auf **Sketch Manager** .
3. Klicken Sie auf **Create**.
4. Geben Sie einen beliebigen Namen ein und wählen Sie die ungefähre Größe der Zeichnung. Vorschlag: **Approximate Size** = 3. So entsteht ein Gitter von 3x3 Größeneinheiten<sup>4</sup>, in das die Zeichnung aus Abbildung 4 hineinpasst.

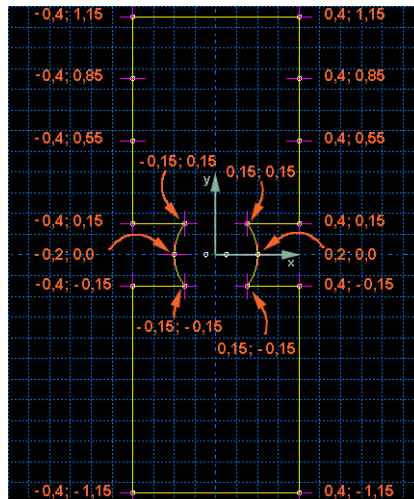




Abbildung 4: Sketch mit Koordinaten  $(x, y)$ , Ursprung in der Mitte

5. Klicken Sie auf **Continue...**, um Ihre Angaben zu bestätigen.
6. Klicken Sie auf **Dismiss**, um den Sketch Manager zu schließen.
7. Vergrößern Sie den Bildausschnitt, indem Sie mit dem Scrollrad der Maus herauszoomen, bis Sie das gesamte blaue Gitter sehen.

---

<sup>4</sup>ABAQUS kümmert sich nicht um Einheiten. Der Benutzer muss sich zuvor auf alle Einheiten festlegen. Als Längeneinheit wird mm gewählt.



8. Geben Sie alle Koordinaten aus Abb. 4 ein. Klicken Sie dazu auf **Create Isolated Point** . Anschließend geben Sie die Koordinaten nacheinander in der Eingabezeile unten ein - z.B. 0.4,1.15 und dann auf ENTER. Alternativ können Sie die Punkte direkt mit der Maus im Gitter anklicken.
9. Nun zeichnen Sie den linken und rechten Rand des Lotballs mit einem Kreisbogen wie in Abb. 5. Klicken Sie dazu auf **Create Arc: Thru 3 Points** . Klicken Sie erst auf den Startpunkt links oben, dann auf den Endpunkt links unten und zum Schluss auf den Punkt links mittig, der den Kreisbogen eindeutig bestimmt. Zeichnen Sie analog den rechten Kreisbogen.

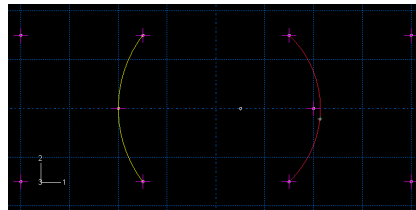









Abbildung 5: Zeichnen der Außenkontur des Lotballs (kurz vor dem letzten Klick auf die rechte mittlere Koordinate)

10. Klicken Sie auf **Create Lines: Connected** . Verbinden Sie nacheinander die übrigen Punkte mit Linien so, dass wie in Abb. 4 nur die Außenkontur zu sehen ist. Es muss sich um eine geschlossene Linie ohne Verzweigungen handeln. Das Ende einer Linie legen Sie fest, indem Sie mit der rechten Maustaste in das Arbeitsfenster klicken und **Cancel Procedure** wählen.
11. Klicken Sie auf **Save Sketch As** , geben Sie unten einen beliebigen Namen ein und betätigen Sie die ENTER-Taste. Der abgespeicherte Entwurf ist nun oben in der **Sketch**-Auswahlbox, links in der Baumstruktur des Modells sowie im **Sketch Manager** zu finden. Um zum **Sketch Manager** zu gelangen, müssen Sie den aktuellen Sketch verlassen. Klicken Sie dazu links unten auf **Cancel Procedure** .

Sie können Ihre Ergebnisse mit der Datei `01_sketch.cae` vergleichen.

## 3.2 Part

Das Modul Part dient der Erstellung von Bauteilen aus zuvor angefertigten Sketches. Zwei ähnliche Parts sollen hier generiert werden.

1. Wählen Sie **Module** → **Part**.
2. Klicken Sie auf **Part Manager** .
3. Klicken Sie auf **Create**.
4. Geben Sie einen beliebigen Namen ein. Setzen Sie **Modeling Space** auf **2D Planar** und wählen Sie für **Approximate Size** wieder die ungefähre Sketch-Größe (hier 3). Belassen Sie alle weiteren Einstellungen.
5. Klicken Sie auf **Continue...**, um Ihre Angaben zu bestätigen.
6. Klicken Sie auf **Dismiss**, um den Part Manager zu schließen.
7. Nun fügen Sie den zuvor gespeicherten Sketch in Ihre Partumgebung ein. Klicken Sie dazu auf **Add Sketch** . Wählen Sie Ihren Sketch und klicken Sie auf **OK**. Antworten Sie auf die Frage in der Promtleiste mit **Done**, um die Position des Sketches beizubehalten.
8. Klicken Sie nochmals auf **Done**. Nun haben Sie das Part mit der Form des Sketches erstellt. Es ist weiß auf schwarzem Hintergrund und erscheint jetzt in der **Part**-Auswahlbox oben, im Part Manager sowie in der Baumstruktur des Modells links.
9. Nun sollen die Materialgrenzen im Part festgelegt werden. Dazu wird das Part in Partitionen eingeteilt. Halten Sie die linke Maustaste ca. 2 Sekunden gedrückt auf dem Button **Partition Face: Sketch**  und wählen Sie den Unterpunkt **Partition Face: Use Shortest Path Between 2 Points** .
10. Auf den Rändern des Parts erscheinen alle im Sketch eingezeichneten Punkte einschließlich der Linienmittelpunkte dazwischen. Klicken Sie erst auf den Startpunkt und dann den Endpunkt, zwischen denen die Materialgrenze verlaufen soll. Wählen Sie dafür aus Abb. 6 die Punkte der obersten Grenze. Klicken Sie unten auf **Create Partition**, um die große Partition zu teilen.
11. Nun muss die untere Partition weiter untergliedert werden. Klicken Sie in in den unteren Bereich des Parts (weiße Fläche), um die zu teilende Partition auszuwählen, und dann auf **Done**. Es erscheinen wieder die

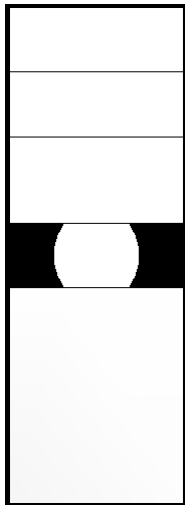





Abbildung 6: Das Part in Partitionen eingeteilt

Rändern mit ihren Punkten. Klicken Sie erst auf den Startpunkt und dann den Endpunkt, zwischen denen die Materialgrenze verlaufen soll. Wählen Sie dafür aus Abb. 6 die Punkte der zweiten Grenze von oben. Klicken Sie unten auf **Create Partition**, um die untere Partition zu teilen.




12. Wiederholen Sie den letzten Vorgang für alle weiteren Grenzen aus Abb. 6. Dazu muss zunächst die jeweils zu teilende Partition gewählt, mit **Done** bestätigt, die beiden Punkte ausgewählt und mit **Create Partition** partitioniert werden.
13. Nun ist Ihr erstes Part für das spätere Zusammenfügen in Modul **Assembly** fertig. Es sollte aussehen wie in Abb. 6. Vor dem Aneinanderreihen der Parts im Modul **Assembly** ist noch ein zweites Part zu erstellen, das dem ersten Part sehr ähnlich ist: Es fehlt lediglich der Lotball. Deshalb wird das erste Part einfach kopiert und der Lotball gelöscht. Öffnen Sie dazu den **Part Manager** .
14. Klicken Sie auf **Copy**, geben Sie einen neuen Namen ein und bestätigen Sie mit **OK**. Verlassen Sie den Part Manager über **Dismiss**. Nun verfügen Sie über zwei identische Parts.
15. Halten Sie die linke Maustaste ca. 2 Sekunden gedrückt auf dem Button **Repair Small Faces**  und wählen Sie den Unterpunkt **Remove Faces** .

16. Klicken Sie im Arbeitsfenster auf die weiße Fläche des Lotballs und bestätigen Sie das Löschen dieser Fläche mit **Done**. Klicken Sie nochmals auf **Done** um den Befehl zu beenden. Nun ist auch ihr zweites Part fertig. Beide Parts können jetzt im Modul **Assembly** aneinander gereiht werden

Sie können Ihre Ergebnisse mit der Datei `02_part.cae` vergleichen.

### 3.3 Assembly

Assembly bedeutet Montage oder Zusammenbau. In Assembly werden die Einzelteile (Parts) zu einem Gesamtbauteil zusammengefügt. In Vorbereitung auf die spätere Materialzuweisung wird das Bauteil anschließend in Sets eingeteilt.

1. Wählen Sie **Module** → **Assembly**.
2. Klicken Sie auf **Instance Part** .
3. Markieren Sie Ihr zweites Part (ohne Lotball) und aktivieren Sie den Punkt **Auto-offset from other instances**<sup>5</sup>.
4. Bestätigen Sie mit **OK**. Nun haben Sie eine Instanz Ihres zweiten Parts eingefügt.
5. Fügen Sie zwei weitere Instanzen Ihres zweiten Parts und vier Instanzen Ihres ersten Parts (mit Lotball) ein, indem Sie die Schritte 2. bis 4. wiederholen.
6. Nun werden die einzelnen Instanzen zusammengeschoben. Klicken Sie dazu auf **Translate Instance** .
7. Klicken Sie im Arbeitsfenster auf die zweite Instanz von links und bestätigen Sie unten mit **Done**.
8. Jetzt sind viele gelbe Punkte sichtbar, die Sie als Start- und Endpunkt der Verschiebung benutzen können. Wählen Sie zuerst den Punkt links oben in der zweiten Instanz und anschließend den Punkt rechts oben in der ersten Instanz. So rücken die beiden Instanzen zusammen. Bestätigen Sie unten mit **OK**.
9. Reihen Sie auch die anderen Instanzen aneinander, indem Sie die Schritte 6 bis 8 geeignet wiederholen.
10. Die Instanzen sind jetzt räumlich aneinander gereiht – jedoch noch unverbunden. Um Sie zu einer Instanz zu verbinden, klicken Sie auf **Merge/Cut Instances** .
11. Geben Sie einen beliebigen Namen für Ihr neues Part ein. Ändern Sie lediglich die Option **Intersecting Boundaries** zu **Retain**, um die Grenzen für die spätere Materialzuweisung beizubehalten.

---

<sup>5</sup>So werden die sieben einzufügenden Instanzen nicht übereinander sondern nebeneinander eingefügt.

12. Klicken Sie auf **Continue...**
13. Markieren Sie alle sieben Instanzen, indem Sie mit der Maus einen Rahmen um sie ziehen.
14. Klicken Sie unten auf **Done**, um den Merge-Vorgang abzuschließen.

#### Sets definieren


1. Nun fassen wir Teile des neuen Parts in Sets zusammen. Sets sind generierbar im Modul Part und im Modul Assembly. Da Part-Sets in Assembly zugänglich sind, Assembly-Sets jedoch nicht in Part, wechseln Sie zurück nach **Module** → **Part**.
2. Wählen Sie oben in der **Part**-Auswahlbox Ihr zuletzt in Assembly generiertes Part, sodass die siebenteilige Geometrie weiß auf schwarzem Hintergrund sichtbar wird.
3. Wählen Sie in der Menüleiste **Tools** → **Set** → **Create...**
4. Geben Sie als Namen "Bereich Mold" ein und klicken Sie auf **Continue**.
5. Klicken Sie im Arbeitsfenster unter Gedrückthalten der SHIFT-Taste alle sieben Rechtecke in der obersten Reihe sowie die drei Rechtecke rechts in der zweiten Zeile von oben an.
6. Klicken Sie unten auf **Done**, um die Zusammenfassung zu bestätigen.
7. Wählen Sie in der Menüleiste **Tools** → **Set** → **Manager...** und sehen Sie Ihr neu definiertes Set.
8. Klicken Sie im Set Manager auf **Create...**, um das nächste Set zu definieren. Wiederholen Sie die Schritte 4 bis 6, bis alle Bereiche gleichen Materials (siehe Abb. 2) ins Sets zusammengefasst sind und der Set Manager folgende Sets aufweist:
  - Bereich FR4
  - Bereich Lotbaelle
  - Bereich Mold
  - Bereich Si-Chip
  - Bereich Substrat

Die so definierten Sets haben den Vorteil, dass sich die spätere Materialzuweisung zu den einzelnen Bereichen vereinfacht.

Sie können Ihre Ergebnisse mit der Datei `03_assembly.cae` vergleichen.



### 3.4 Property

Im Modul **Property** werden sämtliche Materialien spezifiziert und geometrischen Bereichen zugewiesen.


1. Wählen Sie **Module** → **Property**.
2. Klicken Sie auf **Material Manager** .
3. Klicken Sie auf **Create**.
4. Geben Sie den Materialnamen ein, z. B. „Material Mold“.
5. Klicken Sie auf **Mechanical**, und wählen Sie **Elasticity** → **Elastic**.
6. Wählen Sie dann **Type** → **Isotropic**, da das Mold isotrop ist. Für andere Materialien ist der entsprechende Type auszuwählen; im folgenden wird aber das Material Mold als Beispiel durchexerziert. Geben Sie in der Datentabelle den E-Modul (**Young's Modulus**), hier 2.1E04, und die Poissonzahl  $\nu$  (**Poisson's Ratio**), hier 0.24, ein. Die Eingabe erfolgt dimensionslos. Es ist also darauf zu achten, dass die Einheiten konsistent mit den zuvor verwendeten Einheiten sind. Entspricht die für den Sketch verwendete Einheit in der Realität z.B. „mm“, so ist der E-Modul in „N/mm<sup>2</sup>“ anzugeben, so wie in diesem Beispiel geschehen.
7. Klicken Sie wiederum auf **Mechanical**, und wählen Sie diesmal **Expansion**.
8. Wählen Sie wiederum den entsprechenden Type aus, hier also **Type** → **Isotropic**. Geben Sie in der Datentabelle den thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  (**Expansion Coeff Alpha**) ein, hier 3.43E-06.
9. Klicken Sie auf **OK**.
10. Die Schritte 3 bis 9 sind für jedes Material entsprechend durchzuführen. Achtung: Bei den orthotropen Materialien sollte im Schritt 6 **Type** → **Engineering Constants** statt **Type** → **Orthotropic** gewählt werden. Die neun unabhängigen Einträge der Elastizitätsmatrix werden dann über die neun unabhängigen Ingenieurskonstanten angegeben. Dies sind die drei E-Module, die drei Poissonzahlen und die drei Schubmodule. Die einzugebenden Materialdaten finden Sie in den Tabellen 1 und 2.

11. In unserem Beispiel ist ausschließlich für das Lot ferner noch der Kriechvorgang zu berücksichtigen. Es müssen dafür noch die im hyperbolischen Arrhenius-Ansatz benötigten Materialkonstanten eingegeben werden. Klicken Sie dafür wiederum auf **Material Manager**, falls er nicht noch geöffnet ist. Wählen Sie in der Liste das bereits erstellte Material Lot aus und klicken Sie auf **Edit...**
12. Klicken Sie auf **Mechanical**, und wählen Sie **Plasticity** → **Creep**.
13. Wählen Sie **Law** → **Hyperbolic-Sine** und geben Sie in der Datentabelle die in Tabelle 3 aufgeführten Konstanten ein.
14. Zur Spezifikation des Plastifizierens klicken Sie wiederum auf **Mechanical**, und wählen Sie diesmal **Plasticity** → **Plastic**.
15. Wählen Sie **Hardening** → **Isotropic** und geben Sie in der Datentabelle die in Tabelle 3 aufgeführten Konstanten ein.
16. Klicken Sie auf **OK**.
17. Im Fenster „Material Manager“ klicken Sie auf **Dismiss**.


**Definition von Sections** Als nächstes müssen Bereiche („Sections“) erstellt werden, denen die oben definierten Materialien sowie eine Dicke zugewiesen werden können.

1. Klicken Sie auf **Create Section** .
2. Geben Sie einen Namen ein, für dieses Beispiel z. B. „Section Mold“.
3. Wählen Sie **Category** → **Solid** und **Type** → **Homogenous**.
4. Klicken Sie auf **Continue...**, um Ihre Angaben zu bestätigen.
5. Im erscheinenden Fenster „Edit Section“ wählen Sie das entsprechende Material aus, hier **Material** → **Mold**. Geben Sie für **Plane stress/strain thickness** die Dicke 1 ein.
6. Klicken Sie auf **OK**.
7. Die Schritte 1 bis 6 sind für alle nötigen Bereiche durchzuführen.
8. Als nächstes müssen die oben definierten Sections geometrischen Bereichen zugewiesen werden. Klicken Sie dazu auf **Assign Section** .



9. Klicken Sie in der Promptarea auf **sets** und wählen sie einen set aus. Alternativ können Sie den geometrischen Bereich auch mit der Maus im Arbeitsfenster markieren.
10. Klicken Sie auf **Continue...**
11. Wählen Sie die dem geometrischen Bereich zuzuweisende entsprechende Section aus.
12. Klicken Sie auf **OK**. Der bearbeitete Bereich erscheint im Arbeitsbereich nun blau markiert.
13. Die Schritte 8 bis 12 sind für alle nötigen Bereiche durchzuführen. Es ist möglich, die Eingaben im **Section Assignment Manager**  zu kontrollieren.

**Definition von lokalen Koordinatensystemen** Da die orthotropen Materialien richtungsabhängige Materialparameter besitzen, ist für jedes orthotrope Material ein lokales Koordinatensystem festzulegen.

1. Klicken Sie dafür auf **Create Datum CSYS: 3 Points** .
2. Geben Sie einen beliebigen Namen ein, z.B. „Datum csys-1“, wählen Sie **Coordinate System Type** → **Rectangular** und klicken Sie auf **Continue...**
3. Geben Sie in der Promptleiste einen beliebigen Koordinatenpunkt ein - z.B. 0.0,0.0,0.0 - und klicken Sie auf **Create Datum**. Es erscheint ein zusätzliches gelbes Koordinatenkreuz.
4. Klicken Sie nun auf in der Menüleiste auf **Assign** → **Material Orientation**.
5. Wählen Sie den Materialbereich aus, indem Sie in der Promptleiste auf **sets** klicken und einen set auswählen, z.B. FR4 (nur für orthotrope Materialien nötig, hier also FR4 und Substrat). Bestätigen Sie mit **Continue...**
6. Klicken Sie in der Promptleiste auf **Datum CSYS List...**, wählen Sie in dem erscheinenden Fenster das gerade erstellte Koordinatensystem „Datum csys-1“ aus und bestätigen mit **OK**. Es erscheinen am gesamten Rand des ausgewählten Bereichs rote Koordinatensysteme.

7. Für die Festlegung der (eventuellen) Drehung des lokalen Koordinatensystems bzgl. des globalen klicken Sie in der Promptleiste auf die Achse, um die gedreht werden soll, z.B. **Axis-3**. Da in diesem Fall aber sämtliche orthotrope Materialdaten bzgl. des globalen Systems angegeben wurden, das lokale also dem globalen System entspricht, ist keine Drehung nötig. Geben deswegen „0.0“ (Winkelangaben) in der Promptleiste ein und bestätigen Sie mit „Enter“.
8. Bestätigen Sie Ihre Angaben nochmal mit „Enter“.
9. Wiederholen Sie die Schritte 4 bis 8 für die anderen orthotropen Materialien, hier also nur noch für das Material Substrat.

Tabelle 1: Orthotrope Materialien

	<b>FR4</b>	<b>Substrat</b>
$\mathbf{E}_1$ in N/mm <sup>2</sup>	19300	26400
$\mathbf{E}_2$ in N/mm <sup>2</sup>	8300	11000
$\mathbf{E}_3$ in N/mm <sup>2</sup>	19300	26400
$\nu_{12}$	0.40	0.39
$\nu_{13}$	0.15	0.11
$\nu_{23}$	0.40	0.39
$\mathbf{G}_{12}$ in N/mm <sup>2</sup>	8400	11890
$\mathbf{G}_{13}$ in N/mm <sup>2</sup>	8400	11890
$\mathbf{G}_{23}$ in N/mm <sup>2</sup>	8400	11890
$\alpha_{11}$ in 1/K	1.60E-05	1.50E-05
$\alpha_{22}$ in 1/K	8.40E-05	5.20E-05
$\alpha_{33}$ in 1/K	1.60E-05	1.50E-05

Tabelle 2: Isotrope Materialien

	<b>Silizium</b>	<b>Moldmasse</b>	<b>Lot</b>
$\mathbf{E}$ in N/mm <sup>2</sup>	162000	21000	50000
$\nu$ in N/mm <sup>2</sup>	0.23	0.24	0.36
$\alpha$ in 1/K	2.70E-06	3.43E-06	2.45E-05

Tabelle 3: Konstanten zur Spezifizierung des Kriech- bzw. plastischen Verhaltens des Lots

<b>Power Law Multiplier</b> in 1/s	96200
<b>Hyperb Law Multiplier</b> in 1/MPa	0.087022
<b>Eq Stress Order</b>	3.3
<b>Activation Energy</b> in J/mol	8110
<b>Universal Gas Constant</b> in J/(K mol)	1
<b>Yield Stress</b> in N/mm <sup>2</sup>	52.1
<b>Plastic Strain</b> in mm	0

Sie können Ihre Ergebnisse mit der Datei `04_property.cae` vergleichen.

### 3.5 Step

Im Modul **Step** werden die einzelnen Temperaturbelastungsintervalle festgelegt. Hierbei ist es notwendig, die Dauer der Belastungsintervalle sowie den Temperaturverlauf dazwischen (z.B. linear) zu kennen. Wichtig ist, die Belastungssteps in der richtigen Reihenfolge zu kreieren und nur so viele, bis die erste Wiederholung aufgetreten ist (weitere Belastungsperioden werden später im Inputfile hinzugefügt).

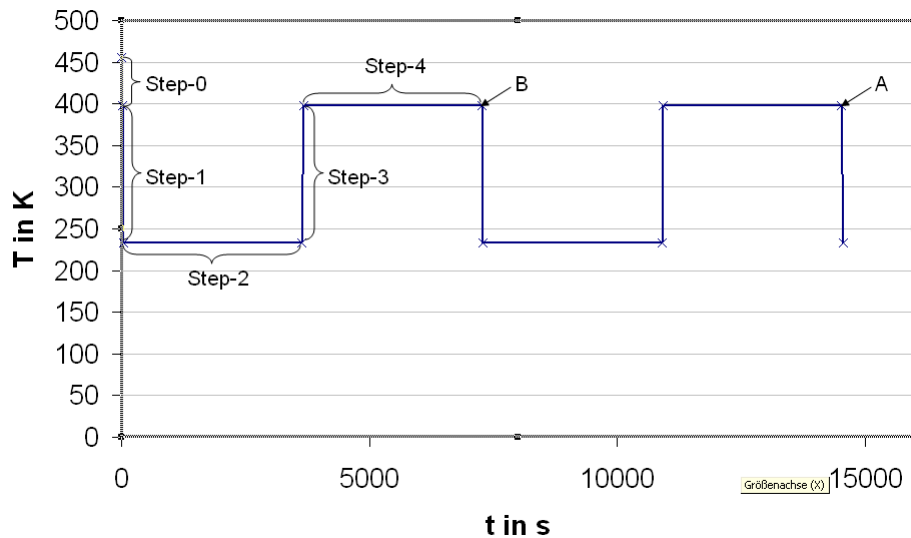


Abbildung 7: Vorgegebener Belastungstemperaturverlauf über der Zeit

Tabelle 4: Wertzuordnung für die einzelnen Schritte des Zyklus

Schritt	Temperatur zu Beginn [K]	Temperatur am Ende [K]	Dauer des Schrittes [s]
<b>Step-0</b>	456	398	10,5
<b>Step-1</b>	398	233	30
<b>Step-2</b>	233	233	3600
<b>Step-3</b>	233	398	30
<b>Step-4</b>	398	398	3600

Die Schritte Step-1, Step-3, usw. dauern 30 s und verlaufen nicht instantan, wie es in Abb. 7 zu sein scheint. Diesen Temperaturverlauf nennt man Schockbelastung.

1. Wählen Sie **Module** → **Step**.
2. Klicken Sie auf **Step Manager**
3. Klicken Sie auf **Create**.
4. Geben Sie einen beliebigen Namen ein (z.B. Step-0). In der Zeile **Procedure type**: ist die Option **General** eingestellt. Wählen Sie aus der Liste darunter durch Anklicken die Option **Visko** aus und klicken Sie auf **Continue**.
5. Stellen Sie nun im Bereich **Basic** für das entsprechende Temperaturintervall bei **time period**: 10.5 ein (Zeitintervall der Abkühlung von der Fertigungstemperatur).
6. Stellen Sie im Bereich **Incrementation** für **Maximum number of increments** → 10000 ein. Desweiteren sollen für **Increment size** → **Initial** → 0.01 , **Minimum** → 1E-5 und **Maximum** → 10.5 und für **creep/swelling/viskoelastic strain error tolerance** → 1E-7 eingegeben werden. Für **creep/swelling/viskoelastic integration** klicken Sie die Option **Explicit** (Rechenverfahren) an.
7. Klicken Sie nun im Bereich **Other** die Option **Ramp linearly over step** (Art der Approximation zwischen den gesetzten Temperaturpunkten).
8. Sind die Eingaben abgeschlossen, dann drücken Sie auf **OK**. Der von Ihnen eingebene Step erscheint nun im Step Manager.
9. Wiederholen Sie nun die Schritte 3 bis 8 mit folgenden Abänderungen für die entsprechenden Temperaturbelastungsintervalle:
10. In Schritt 5 muss nun im Bereich **Basic** für das entsprechende Temperaturintervall bei **time period**: in der ersten Wiederholung 30 (Intervalldauer des weiteren Abkühlungsprozesses) und in der zweiten Wiederholung 3600 (Intervalldauer der Ruhephase bei -40°C) eingegeben werden. In der dritten Wiederholung muss wieder 30 angegeben werden (Intervalldauer der linearen Erwärmungsphase auf 125°C) und in der vierten Wiederholung wieder 3600 (Intervalldauer der Belastungsphase bei hoher Temperatur) siehe 7.
11. In Schritt 6 muss nur für **Increment size** → **Maximum** → die jeweilige maximale Zeitdauer, also in der ersten Wiederholung 30, in der zweiten Wiederholung 3600 usw., abgeändert werden. Alle anderen Eintragungen sind entsprechend dem ersten Durchlauf zu tätigen.

12. Alle Steps in der richtigen Reihenfolge und mit den dazugehörigen Intervalldauern sind nun im **Step Manager** aufgeführt.
13. Verlassen Sie den **Step Manager** durch Klicken auf **Dismiss**  
ABAQUS muss auch wissen, welche der Größen, die berechnet werden können, ausgegeben werden sollen. Dafür existiert der **Field Output Manager**.
14. Öffnen Sie den **Field Output Manager** durch Klicken auf das entsprechende Symbol in der Werkzeugpalette. Es erscheinen alle von Ihnen eingegebenen Steps in einer Tabelle.
15. Wählen Sie unter dem ersten Step das Fenster aus, wo **Created** zu lesen ist, und klicken Sie auf **Edit**. Es erscheint ein Fenster, in dem alle Werte, die ausgegeben werden können, aufgelistet sind.
16. Um die Anzahl der ausgegebenen Variablen nicht zu groß werden zu lassen, wählen Sie oberhalb der Liste **Output Variables** die Option **Save output at The last increment** und nicht **Every increment**. Dies verhindert ein unnötig großes Outputfile mit den Daten jedes Increments, die für die Berechnung nicht notwendig sind.
17. Klicken Sie in der Liste **Output Variables** den kleinen, schwarzen Pfeil vor der Größe **Energy** an und wählen Sie danach in dem entstandenen Auswahlbereich die Größe **ENER**, so dass durch Anklicken ein Häkchen erscheint. Bestätigen Sie die Eingabe mit **OK**.  
Diese Eingabe wird nun auch für alle Steps übernommen, was im **Field Output Manager** durch die bestehende Einstellung **Propagated** unter den anderen Steps bestimmt ist. Es werden nun die gewünschte Energiedichte (CENER) und einige andere Energiegrößen ausgegeben.

Sie können Ihre Ergebnisse mit der Datei `05_step.cae` vergleichen.

### 3.6 Interaction

Das Modul Interaction dient der Festlegung von Zwangsbedingungen. Z.B. kann man ein anliegendes Bauteil mit einer sehr hohen Steifigkeit berücksichtigen, indem man die Randverschiebung in eine Koordinatenrichtung verbietet.

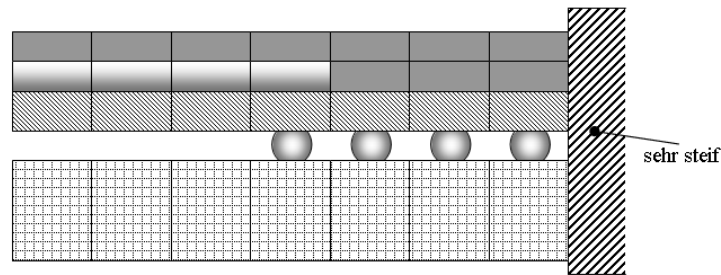



Abbildung 8: Beispiel für zusätzliche Zwänge durch anliegende, sehr steife Bauteile

1. Wählen Sie **Module** → **Interaction**.
2. Klicken Sie auf **Constraint Manager** .
3. Klicken Sie auf **Create**.
4. Geben Sie den Namen der Zwangsbedingung ein, z.B. „rechter Rand“.
5. Wählen Sie unter **Type** → **Coupling** und bestätigen Sie mit **continue...**
6. Klicken Sie auf den Eckpunkt rechts oben im Modell, um ihn als Bezugspunkt zu wählen.
7. Der Punkt leuchtet nun rot.
8. Klicken Sie in der Promptleiste auf **Surface**.
9. Markieren Sie mit Shift+Linksklick stückweise den rechten Rand des Modell, sodass dieser farbig markiert ist.
10. Bestätigen Sie durch klicken von **done** in der Promptleiste.
11. Es öffnet sich das Fenster **Edit Constraint**.
12. Stellen Sie folgende Einstellungen sicher: **Coupling Type** → **Kinematic** sowie **Influence Radius** → **To outermost point on the region**.

13. Wählen Sie bei **Constrained degrees of freedom** → **U1** und wählen Sie **U2** und **UR3** ab.
14. Bestätigen Sie mit **OK**.
15. Verlassen Sie den **Constraint Manager** durch klicken auf **Dismiss**.

Sie können Ihre Ergebnisse mit der Datei `06_interaction.cae` vergleichen.


**Hinweis:** In Abb. 1 ist zu erkennen, dass eigentlich nur die Lotplatine (FR4) unter dem Zwang des benachbarten Bauteils steht. Dabei handelt es sich um den Rest der Platine, der eigentlich nicht viel steifer ist als unser Bauteil. Die hier definierte Interaction ist also lediglich ein imaginäres Anwendungsbeispiel für dieses Preprocessing-Modul (und führt dazu, dass am Ende der linke und nicht der rechte äußere Lotball am stärksten belastet wird).



### 3.7 Load

Im Modul Load werden sowohl kinematische als auch dynamische Randbedingungen formuliert. In diesem Beispiel werden geometrische Lagerbedingungen am linken Rand sowie Temperaturlastschritte definiert.

#### Kinematische Randbedingungen definieren

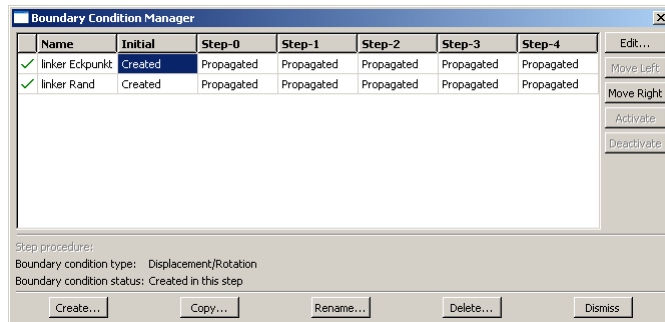
1. Wählen Sie **Module** → **Load**.
2. Klicken Sie auf **Boundary Condition Manager** .
3. Klicken Sie auf **Create**.
4. Es öffnet sich das Fenster **Create Boundary Condition**.
5. Geben Sie den Namen der Lagerbedingung ein, z.B. „linker Rand“.
6. Wählen Sie die folgenden Einstellungen: **Step** → **Initial**, **Category** → **Mechanical** und **Types for selected Step** → **Displacement/Rotation**.<sup>6</sup>
7. Bestätigen Sie mit Linksklick auf **continue...**
8. Markieren Sie mit Shift+Linksklick stückweise den linken Rand des Modells, sodass dieser farbig markiert ist.
9. Bestätigen Sie durch klicken von **done** in der Promtleiste.
10. Es öffnet sich das Fenster **Edit Boundary Condition**.
11. Setzen Sie bei **U1** und bei **UR3** einen Haken durch Linksklicken.<sup>7</sup>
12. Klicken Sie auf **OK**.
13. Wiederholen Sie die Schritte 3. bis 12. mit den folgenden Änderungen, um eine weitere Lagerbedingung einzugeben.
14. Geben Sie als Namen der Bedingung z.B. „linker Eckpunkt“ ein.
15. Wählen Sie bei Schritt 8 den Eckpunkt links unten im Modell durch einen Linksklick aus.

---

<sup>6</sup>So wird eine mechanische Lagerbedingung bezüglich Verschiebung und Rotation eingegeben.

<sup>7</sup>Das bedeutet der linke Rand kann weder entlang der 1-Achse verschoben, noch um die 3-Achse rotiert werden. (Gleitlager)

16. Setzen Sie bei Schritt 11 nur bei **U2** einen Haken. <sup>8</sup>
17. Nachdem Sie mit Schritt 12 die zweite Bedingung eingegeben haben, sollte der **Boundary Condition Manager** wie folgt aussehen:




18. Schließen Sie den **Boundary Condition Manager** mit **Dismiss**.

**Globale Konstanten eingeben** Damit in diesem Modell die Eingabe von Temperaturen in der Einheit Kelvin erfolgen kann, muss die absolute Nulltemperatur eingegeben werden. Gehen Sie dazu wie folgt vor:

1. Wählen Sie in der Menüleiste **Model** → **Edit Attributes** → **Model-1**.
2. Es öffnet sich das Fenster **Edit Model Attributes**.
3. Geben Sie in dem Feld **Physical Constants** → **Absolute zero temperature:** den Wert „0“ ein. <sup>9</sup>
4. Bestätigen Sie mit Linksklick auf **OK**.

**Temperaturlastschritte eingeben** Im folgenden werden die Temperatursprünge eines kompletten Lastzyklus eingegeben.

1. Klicken Sie auf **Field Manager** .
2. Klicken Sie auf **Create**.
3. Es öffnet sich das Fenster **Create Field**.

<sup>8</sup>Der Eckpunkt ist damit unverschiebbar entlang der 2-Achse und durch die erste Bedingung („linker Rand“) auch unbeweglich entlang der 1-Achse sowie rotationslos.

<sup>9</sup>Bei Eingabe von 273.15 würden alle Temperatureingaben in diesem Modell in der Einheit °C erfolgen müssen.

4. Geben Sie als Namen für den ersten Schritt „Anfangstemp“ ein.
5. Wählen Sie folgende Einstellungen: **Step** → **Initial** und **Category** → **Other** → **Temperature**.
6. Bestätigen Sie die mit Linksklick auf **Continue...**
7. Markieren Sie das gesamte Modell indem sie mit gedrückter linker Maustaste einen Rahmen ziehen.<sup>10</sup>
8. Klicken Sie auf **Done** in der Promtleiste.
9. Es öffnet sich das Fenster **Edit Field**.
10. Wählen Sie: **Distribution** → **Direct specification** und geben Sie bei **Magnitude** den Wert „456“ ein.<sup>11</sup>
11. Bestätigen Sie die Eingaben durch Linksklick auf **OK**.
12. Wiederholen Sie die Punkte 2. bis 11. fünfmal mit folgenden Änderungen:
13. Geben Sie als Namen der Schritte Field-0, Field-1... bis Field-4 ein.
14. Wählen Sie beim 5.Punkt **Step** → **Step-0**, bei der nächsten Wiederholung **Step** → **Step-1** usw., bis **Step** → **Step-4**.<sup>12</sup>
15. Geben Sie beim 10.Punkt bei **Magnitude** für die Schritte mit den Werten Step-0, Step-3 und Step-4 „398“ und für die Schritte mit den Werten Step-1 und Step-2 „233“ ein.
16. Doppelklicken Sie nun im **Field Manager** in der Zeile mit dem Namen „Anfangstemp“ auf das Kästchen in der Spalte **Step-0**.
17. Wählen Sie in dem nun geöffneten Fenster **Edit Field** die Einstellung **Status** → **Reset to initial** und bestätigen sie mit **OK**.
18. Wiederholen Sie diesen Vorgang mit den Zeilen „Field-0“ bis „Field-3“ indem Sie jeweils auf das Kästchen rechts von dem Eintrag „Created“ klicken.

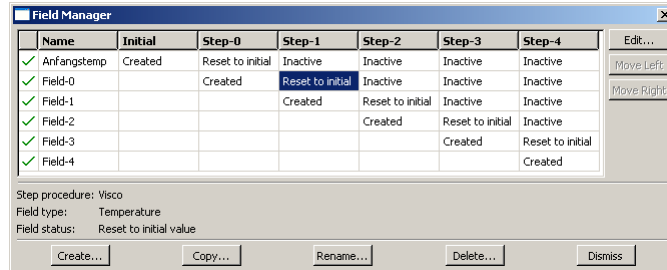
---

<sup>10</sup>Klicken Sie beispielsweise auf einen Punkt links oberhalb des Modells und bewegen Sie die Maus bei gedrückter Maustaste nach rechts unten. Beim Loslassen der Maustaste sollte das gesamte Modell rot umrandet sein.

<sup>11</sup>Dies setzt die Temperatur des ersten Schrittes auf 456K bzw. 183°C fest.

<sup>12</sup>Also immer passend zu den vorgeschlagenen Namen.

19. Der **Field Manager** sollte nun folgendermaßen aussehen:



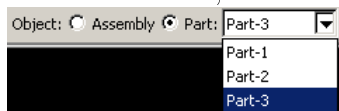
20. Verlassen Sie den Field Manager durch klicken auf **Dismiss**. Die Schritte Step-0 bis Step-4 beschreiben den Lastzyklus: Kühlen - Temperatur halten - Erwärmen - Temperatur halten. Um einen oder mehrere Lastzyklen hinzuzufügen, müssen diese Schritte nur kopiert werden.





Sie können Ihre Ergebnisse mit der Datei 07\_load.cae vergleichen.

### 3.8 Mesh




Im Modul **Mesh** wird das erzeugte Modell in ein Netz aus Elementen zerlegt. Für eine hohe Genauigkeit sollte darauf geachtet werden, dass alle Elemente des Netzes eine möglichst quadratische Form aufweisen. Außerdem gilt: je feiner das Netz, umso höher ist zwar die Genauigkeit, aber die Rechenzeit erhöht sich ebenfalls. Im Folgenden wird zunächst nur beschrieben, wie ein Modell in ein gleichmäßiges, strukturiertes Netz zerlegt wird:

1. Wählen Sie aus der Kontextzeile **Module** → **Mesh**.
2. Wählen Sie in der Kontextzeile rechts **Part** und aus dem drop-down-Menü das Part, welches das Gesamtmodell darstellt, also hier **Part-3**.



3. Das Netz wird durch verschiedene, auswählbare Verfahren automatisch erstellt. Dazu müssen aber Orientierungspunkte (Seeds) gesetzt werden. Um das gesamte Modell gleichmäßig zu vernetzen, wählen Sie in der Werkzeugpalette **Seed Part** . Es öffnet sich das Fenster **Global Seeds**. Geben Sie unter **Approximate global size** die ungefähre Größe eines Elementes an, z.B. 0.1 und belassen Sie die restlichen Einstellungen. Damit wird das Modell später in ein Netz aus Elementen der ungefähren Größe von 0,1x0,1 Größeneinheiten zerlegt. Bestätigen Sie mit **OK**.
4. Die Lotbälle sind besonders interessant und sollen deswegen etwas feiner vernetzt werden. Wählen Sie dazu den Button **Seed Part**  und halten Sie die linke Maustaste zwei Sekunden lang gedrückt. Wählen Sie aus dem ausklappenden Menü **Seed Edge: By Size** . Markieren Sie alle Lotbälle z.B. einzeln mit SHIFT+Linksklick und bestätigen Sie in der Promptleiste mit **Done**. Geben Sie in das Eingabefeld in der Promptleiste wieder die ungefähre Größe eines Elementes an, z.B. 0.05 und beenden die Eingabe mit ENTER.
5. Das Modell soll quadratisch strukturiert vernetzt werden. Um dieses Vernetzungsverfahren zuzuweisen wählen Sie aus der Werkzeugpalette **Assign Mesh Controls** . Wählen Sie das gesamte Modell aus, indem Sie z.B. mit gedrückter linker Maustase einen Rahmen darum ziehen und bestätigen Sie die Auswahl mit **Done** in der Promptleiste. Es öffnet sich das Fenster **Mesh Controls**. Wählen Sie unter **Element Shape** den Punkt **Quad** und unter **Technique** den Punkt **Structured** und schließen

das Fenster mit **OK**. Die zugewiesenen Bereiche erscheinen nun in der Farbe der gewählten Methode, das Modell ist grün eingefärbt.



- Den einzelnen Elementen muss noch ein Elementtyp zugewiesen werden. Wählen Sie dazu in der Werkzeugpalette **Assign Element Type** . Markieren Sie wieder das gesamte Modell, indem Sie z.B. mit gedrückter linker Maustaste einen Rahmen darum ziehen und bestätigen Sie die Auswahl mit **Done** in der Promptleiste. Es öffnet sich das Fenster **Element Type**. Für das Modell soll der ebene Verzerrungszustand angenommen werden. Wählen Sie also unter **Family** den Punkt **Plane Strain**, belassen Sie die restlichen Einstellungen und bestätigen Sie mit **OK**.
- Erzeugen Sie nun automatisch das Netz, indem Sie aus der Werkzeugleiste **Mesh Part**  auswählen. Bestätigen Sie in der Promptleiste mit **OK**. Die Vernetzung des Modells ist nun abgeschlossen und wird dargestellt. Um die Vernetzung wieder zu löschen wählen Sie den Button **Mesh Part**  und halten Sie die linke Maustaste zwei Sekunden lang gedrückt. Wählen Sie aus dem ausklappenden Menü **Delte Part Mesh** und bestätigen Sie in der Promptleiste mit **Yes**.

Sie können Ihre Ergebnisse mit der Datei `08_mesh.cae` vergleichen.

**Bemerkung:** Es gibt noch viele andere Möglichkeiten ein Modell zu vernetzen. Wie „gut“ letztendlich eine Vernetzung ist, kann man meist schwer vorhersagen. Hier ist ein wenig Ausprobieren und Erfahrung gefragt.

**Hinweise:** Um Rechenzeit einzusparen empfiehlt es sich, die weniger interessierenden Bereiche des Modells eher grob zu vernetzen und die interessanten Bereiche sehr fein. Weisen zwei angrenzende Bereiche eine sehr unterschiedliche Anzahl an Seed-Points auf, werden an den Übergangstellen beim Vernetzen sehr ungünstige, langgezogene Elementformen erzeugt. Im folgenden werden einige Möglichkeiten vorgeschlagen, dies etwas einzuschränken:

- Eine einfache Möglichkeit besteht darin, den Übergangsbereichen eine gemittelte Anzahl an Seed-Points zuzuweisen. Das Netz sollte nicht abrupt feiner werden, sondern eher gestaffelt. Alternativ zu **Seed Edge: By Size** kann man mit **Seed Edge: By Number** die Anzahl der Seed-Points angeben, die gesetzt werden sollen. Der jeweilige Abstand zwischen den Seed-Points wird dann automatisch berechnet.
- Mit der Funktion **Seed Edge: Biased** können Seed-Points entlang einer Kante so gesetzt werden, dass die Abstände der Punkte gleichmäßig

kleiner werden von einem Punkt zum nächsten. Wählen Sie dazu den Button **Seed Part**  und halten Sie die linke Maustaste zwei Sekunden lang gedrückt. Wählen Sie aus dem ausklappenden Menü **Seed Edge: Biased** . Wählen Sie nun die Kanten aus, die feiner werdend vernetzt werden sollen. Achten Sie dabei darauf, dass Sie beim Auswählen der Kante näher auf den Bereich klicken, der feiner vernetzt werden soll. Beispiel: Eine Kante verläuft horizontal, das Netz soll von links nach rechts feiner werden, also klicken Sie beim Auswählen der Kante weiter rechts. In der Promptleiste wird auch ein entsprechender Hinweis gegeben. Bestätigen Sie Ihre Auswahl mit **Done** in der Promptleiste. Geben Sie nun in der Promptleiste das Verhältnis vom feinsten zum größten Element an und bestätigen Sie mit ENTER. Beispiel: Bei einem Wert von 5.0 ist das größte Element am einen Rand der Kante fünf mal so groß wie das feinste Element am anderen Rand. Geben Sie nun die Anzahl der Seed-Points an, die auf der Kante platziert werden sollen und bestätigen Sie wieder mit ENTER.

- Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Übergangsbereiche mit einem anderen Verfahren vernetzen zu lassen. Probieren Sie z.B. unter **Assign Mesh Controls** im Fenster **Mesh Controls** unter **Element Shape** die Option **Quad-dominated** aus. Mit diesem Vernetzungsverfahren können Übergänge von einem feinen zu einem grob vernetzten Bereich meist besser gestaltet werden.

### 3.9 Job

Das Modul Job startet nun die tatsächliche Berechnung des Bauteils. Hierbei wird aus den vorangegangenen Eingaben in die ABAQUS-Eingabemaske ein Inputfile erstellt, welches die Berechnung ermöglicht. In diesem Inputfile werden auch die Anzahl der Belastungszyklen durch Copy&Paste vervielfacht.

1. Wählen die das Modul **Job** aus.
2. Klicken Sie auf **Create Job** und geben Sie einen beliebigen Namen ein (z.B. meinjob). Bestätigen Sie die Eingabe mit **Continue**.
3. Belassen Sie in der nachfolgenden Eingabemaske alle Einstellungen und klicken Sie auf **OK**.
4. In der Dialogschnittstelle erscheint die Nachricht: 'The job „meinjob“ has been created.'

Hinweis: Der folgende Schritt ist optional. Er hat den Nachteil, dass auf dem Netzwerk-Laufwerk Z: der FE-Run langsamer läuft als auf dem lokalen Rechner. Zudem besteht dort eine Speicherplatzbegrenzung von 100 MB, die mit manchen odb-Ausgabedateien schnell überschritten werden kann.

5. Bevor Sie das Inputfile erstellen, ändern Sie Ihr aktuelles Arbeitsverzeichnis, damit das Inputfile im eigenen Verzeichnis anstatt im temporären Verzeichnis abgespeichert wird. Geben Sie dazu in der **Command Line** der Dialogschnittstelle den Befehl `os.chdir('dasjeweiligeVerzeichnis')` ein. Wichtig ist, dass alle Backslashes gedoppelt werden, z.B. 'Z:\\Eigene Dateien\\FE-Projekt SS2006 Gr5\\ABAQUS-Dateien\\Jobs'. Zur Überprüfung des Vorgangs können Sie sich das aktuelle Arbeitsverzeichnis<sup>13</sup> mit dem Befehl `os.getcwd()` anzeigen lassen.
6. Klicken Sie auf den **Job Manager** und anschließend auf **Write Input**. In der Dialogschnittstelle erscheint die Nachricht: 'The job input file has been written to „meinjob.inp“.'

---

<sup>13</sup>engl.: current work directory



**Inputfile editieren** Bevor der Job mit **Submit** gestartet wird, müssen noch einige Änderungen am Inputfile vorgenommen werden.

1. Öffnen Sie Ihr Inputfile außerhalb von ABAQUS in einem Editor. Jedes ABAQUS-Inputfile beginnt zunächst mit einem „Heading“. Dort wird der Name des Jobs sowie das gewählte Model aufgeführt. Beachte: Alle Befehle beginnen mit \*. Alle Kommentare, die ABAQUS beim Durchlaufen des Inputfiles ignoriert, beginnen mit \*\*. Im folgenden sind die einzelnen Segmente (in Großbuchstaben geschrieben) aufgeführt:

- PARTS

- „node“

In dem Abschnitt „node“ sind sämtliche im betrachteten Part enthaltenen Knotenpunkte in Form ihrer Koordinaten angegeben. Jeder Knoten erhält außerdem eine von 1 bis zur Gesamtanzahl der Knoten laufende Nummer (linke Spalte).

```
** PARTS
**
*Part, name=Part-3
*Node
  1,    4.6500001, -0.150000006
  2,    4.94999981, -0.150000006
  3,    4.94999981,  0.150000006
  4,    4.6500001,  0.150000006
  5,    5.19999981,  0.150000006
  6,    5.19999981,  0.550000012
  7,    4.4000001,  0.550000012
  8,    4.4000001,  0.150000006
  9,    5.19999981,  0.850000024
 10,    4.4000001,  0.850000024
```

- „element“

In dem Abschnitt „element“ sind sämtliche Elemente aufgeführt. Dies geschieht über die Aufzählung der jeweils enthaltenen Knoten mittels ihrer laufenden Nummer. Auch die Elemente werden mit einem laufenden Index versehen (linke Spalte). Ferner wird die Elementart angegeben, z.B. „type=CPE4R“. Dabei steht C für Kontinuum und PE für den ebenen Verzerrungszustand (plain strain). 4 ist die Anzahl der Knoten pro Element. R steht für reduzierte Integration.

```
*Element, type=CPE4R
  1,  1,  77, 673, 112
  2,  77,  78, 674, 673
  3,  78,  79, 675, 674
  4,  79,  80, 676, 675
  5,  80,  81, 677, 676
```

– „set“

In dem Abschnitt „set“ werden die sets definiert. Dazu werden zunächst die im jeweiligen set enthaltenen Knoten mittels ihrer laufenden Nummer aufgelistet, eingeleitet durch den Befehl nset=„jeweiliger Bereichsname“. Dann werden auch noch die im jeweiligen set enthaltenen Elemente aufgelistet, eingeleitet durch den Befehl elset=„jeweiliger Bereichsname“.

- ASSEMBLY

Im Abschnitt Assembly werden Instanzen aus Parts erzeugt. Die anschließenden Knoten- und Elementsets werden ähnlich wie bei PART erstellt und den jeweiligen Instanzen zugeordnet.

```
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=Part-3-1, part=Part-3
*End Instance
**
*Nset, nset=_PickedSet21, internal, instance=Part-3-1
  11,
*Nset, nset=_PickedSet24, internal, instance=Part-3-1
  55, 56, 71, 74, 75, 76, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449,
  540, 541, 554, 555, 563, 564
*Elset, elset=_PickedSet24, internal, instance=Part-3-1
  1101, 1102, 1103, 1104, 1105, 1106, 1107, 1108, 1109, 1110, 1379,
  1399, 1407, 1415, 1423
*Nset, nset=_PickedSet25, internal, instance=Part-3-1
  56,
*Nset, nset=_PickedSet26, internal, instance=Part-3-1, generate
  1, 1583, 1
*Elset, elset=_PickedSet26, internal, instance=Part-3-1, generate
  1, 1423, 1
```

- MATERIALS

Hier werden sämtliche Materialparameter aufgelistet. Dazu gehören u.a. die Steifigkeitskoeffizienten, die sowohl im isotropen als auch im orthotropen Fall auch durch die Ingenieurskonstanten angegeben werden können, sowie die thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Im unten aufgeführten Beispiel ist u.a. das Material Lot aufgeführt, dafür müssen auch die Konstanten des hyperbolischen

Kriechgesetzes und für das plastische Verhalten die Fließspannung festgelegt werden.

```
** MATERIALS
**
*Material, name="Material FR4"
*Elastic, type=ENGINEERING CONSTANTS
19300., 8300.,19300., 0.4, 0.15, 0.4, 8400., 8400.
8400.,
*Expansion, type=ORTHO
1.6e-05, 8.4e-05, 1.6e-05
*Material, name="Material Lot"
*Creep, law=HYPERB
96200., 0.087022, 3.3, 8110., 1.
*Elastic
50000., 0.36
*Expansion
2.45e-05,
*Plastic
52.1,0.
*Material, name="Material Mold"
*elastic
```

- PHYSICAL CONSTANTS  
Hier werden physikalische Konstanten festgelegt, so z.B. der absolute Nullpunkt der Temperatur.
- BOUNDARY CONDITIONS  
In diesem Abschnitt werden die Randbedingungen definiert. Es wird zunächst die Art der Beschränkung festgelegt, in diesem Beispiel soll Verschiebung und Rotation beschränkt werden. Wenn der Punkt oder Rand, auf die die Randbedingung angewandt werden soll, im Arbeitsfenster ausgewählt wurden, erhält dieser Bereich die Bezeichnung „\_ PickedSet“ mit intern gewählter Nummer (siehe untenstehendes Beispiel, dort die 24 bzw. 25). Die Zahl dahinter gibt die Richtung an, in der die Einschränkung wirkt; dabei stehen die Ziffern eins bis drei für den Verschiebungszwang in  $x$ -,  $y$ -, und  $z$ -Richtung, die Ziffern vier bis sechs für den Rotationszwang um die  $x$ -,  $y$ -, und  $z$ -Achse.

```
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: linker Eckpunkt Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet25, 2, 2
** Name: linker Rand Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet24, 1, 1
_PickedSet24, 6, 6
```

- FIELDS und STEPS

Hier werden die einzelnen Belastungsintervalle festgelegt. Zunächst werden unter FIELDS die Anfangsbedingungen (Initial Conditions) festgelegt, in diesem Beispiel eine Temperatur von 456 K. Als nächstes werden die einzelnen STEPS definiert. In diesem Beispiel heißt der erste Step „Step-0“. Dabei wird die Maximalanzahl der Inkremente ( $inc=10000$ ), die Anfangsgröße der Inkremente (0.1), die Dauer (10.5) sowie die Minimalgröße ( $1e-05$ ) und die Maximalgröße (10.5) festgelegt. „amplitude=RAMP“ bedeutet, dass die Temperatur linear zwischen Anfangs- und Endtemperatur verläuft. Die Anfangstemperatur wurde bereits unter Initial Conditions definiert, die Endtemperatur wird unter dem neuen Abschnitt FIELDS definiert. Im Gegensatz zu den Initial Conditions wird für dieses neue Feld ein Name erzeugt (Name: Field-0). Die neue Temperatur wird mit dem Befehl  $op=NEW$  erzeugt (hier 398 K). Unter OUTPUT REQUESTS werden die Variablen festgelegt, die ausgegeben werden sollen.

### 3 PREPROCESSING

---


```
** FIELDS
**
** Name: Anfangstemp   Type: Temperature
*Initial Conditions, type=TEMPERATURE
_PickedSet26, 456.
** -----
**
** STEP: Step-0
**
** Step, name=step-0, amplitude=RAMP, inc=10000
**Visco, cetol=1e-07, creep=explicit
0.1, 10.5, 1e-05, 10.5
**
** FIELDS
**
** Name: Anfangstemp   Type: Temperature
*Temperature, op=NEW
** Name: Field-0      Type: Temperature
*Temperature, op=NEW
_PickedSet27, 398.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
** Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-output-1
**
** Output, field, variable=PRESELECT, frequency=99999
**
** HISTORY OUTPUT: H-output-1
**
** Output, history, variable=PRESELECT, frequency=99999
** End Step
** -----
```

2. Kopieren Sie die Schritte Step-1 bis Step-4 und fügen Sie sie am Ende des Inputfiles vier weitere Male ein, sodass Sie insgesamt fünf Zyklen definiert haben. Ändern Sie die Namen der Schritte, sodass die Zahlen den Schritt eindeutig kennzeichnen und der letzte Schritt **name=Step-20** heißt.

Sie können Ihr Inputfile mit der Datei `meinjob.inp` vergleichen.

## 4 FE-Run

Nun soll die Berechnung des Jobs gestartet werden. Gehen sie dazu wie folgt vor:

1. Wählen Sie **Module** → **Job** und öffnen Sie den **Job Manager** .<sup>14</sup>
2. Wählen Sie den Job den Sie ausführen möchten, mit Linksklick auf den Namen, aus der Liste aus. Ist nur ein Job im **Job Manager** vorhanden, so ist dieser automatisch markiert.
3. Starten Sie den Job durch Klicken auf **Submit**.
4. Die Anzeige in der Spalte **Status** zeigt nun für einige Sekunden „Submitted“.<sup>15</sup>
5. In der Dialogschnittstelle erscheint nun die Nachricht: 'The job input file "jobname.inp" has been submitted for analysis.'<sup>16</sup>
6. Die Anzeige in der Spalte **Status** zeigt jetzt „Running“. Die Berechnung des Jobs wurde gestartet.
7. Öffnen Sie mit Linksklick auf **Monitor...** den **Job Monitor**. In diesem Fenster kann der Fortschritt der Berechnung des Jobs beobachtet werden.
8. In der oberen Hälfte des Fensters ist in tabellarischer Form der bisherige Fortschritt der Berechnung aufgelistet. Es werden u.a. die berechneten Schritte mit den jeweiligen Inkrementen und ihrer Berechnungszeit angezeigt.
9. In der unteren Hälfte des Fensters sind die Anzeige-Optionen **Log**, **Errors**, **Warnings** und **Output** auswählbar.
10. In der Anzeige für **Log** ist das Protokoll für den jeweiligen Job zu sehen. Hier wird z.B. der Start-Zeitpunkt des Jobs sowie der bisherige Verlauf des Jobs ausgegeben.
11. Unter der Option **Output** wird der Pfadname des Output-Files<sup>17</sup> und die Anzahl der bereits geschriebenen Frames angezeigt.

---

<sup>14</sup>Dieser Punkt kann selbstverständlich übersprungen werden, wenn der Job Manager bereits geöffnet ist.

<sup>15</sup>In dieser Zeit werden die Daten aus dem Input-File übertragen.

<sup>16</sup>Jobname steht hier für den vorher festgelegten Namen des Jobs.

<sup>17</sup>jobname.odt

12. Die Anzeigeeoption **Warnings** listet die Ungenauigkeiten der vorherigen Eingabe des Modells auf, welche aber nicht zwangsweise falsche Ergebnisse bei der Berechnung des Modells bewirken müssen. So kann zum Beispiel eine Überbestimmung bei den Randbedingungen aufgetreten sein. Das Programm löst die meisten kleineren Probleme durch leichte Änderungen der Eingaben. Es sollte aber immer geprüft werden ob diese Änderungen mit den eigenen Anforderungen an das Modell übereinstimmen. Sollte dies nicht der Fall sein, so kann die Berechnung durch Klicken auf **Kill** abgebrochen werden.
13. Wird in der Anzeige **Error** ein Fehler angezeigt, so führt dies zum Abbruch der Berechnung. Der Eingabefehler ist in diesem Fall so gravierend, dass eine Änderung der betreffenden Angabe erforderlich ist um das Modell berechnen zu können.
14. Ist ein Error aufgetreten oder haben Sie die Berechnung aufgrund einer Warnung abgebrochen, so verlassen Sie den **Job Manager** mit **Dismiss**<sup>18</sup> und ändern Sie die betreffenden Eingaben. Nach Änderung der Eingaben muss ein neuer Job erstellt und ausgeführt werden.
15. Die Berechnung des Modells ist abgeschlossen, wenn im **Job Manager** bzw. im **Job Monitor** unter **Status** die Anzeige **Completed** erscheint.
16. **Job Monitor** sowie **Job Manager** können nun mit **Dismiss** geschlossen und die Ergebnisse unter **Module** → **Visualization** betrachtet werden.

---

<sup>18</sup>Das Verlassen des Job Monitors ist auch während der Berechnung möglich.

## 5 Postprocessing

In diesem Kapitel werden die Daten aus dem FE-Lauf ausgewertet. Im ersten Abschnitt geht es um die grafische Visualisierung von Spannungen und Dehnungen. Im zweiten Abschnitt wird erklärt, wie man aus der ABAQUS-Eingabemaske Daten für die Lebensdaueranalyse auslesen kann. Der dritte und letzte Abschnitt befasst sich mit der Lebensdaueranalyse selbst.



## 5.1 Visualization

Das Modul **Visualization** dient der grafischen Darstellung des Modells und dessen Berechnungsergebnissen.

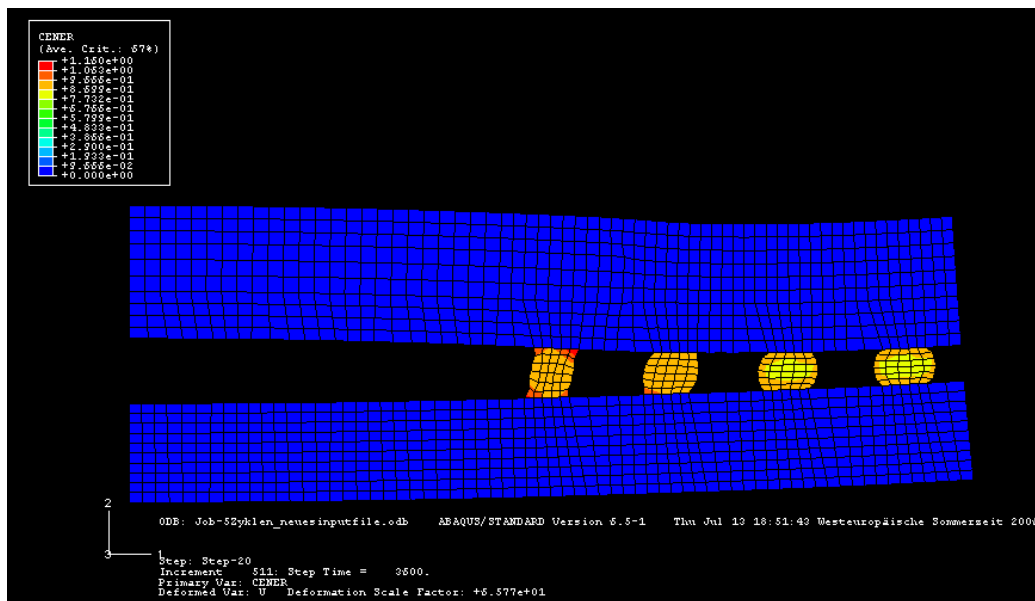





Abbildung 9: Das Modell nach dem Durchlauf der Zyklen

1. Wenn **Job** erfolgreich abgeschlossen wurde kann die „output database“ Datei geöffnet werden, falls sie nicht schon bereits nach dem **FE-Run** offen ist. Diese Datei hat die Endung **.odb** und in ihr sind die Ergebnisse der Berechnung gespeichert. Beim öffnen der Datei muss beachtet werden, dass der File Filter auf **\*.odb\*** eingestellt oder in der Checkbox der Haken bei **Read Only** entfernt ist, damit die Dateien im **Open Database** Fenster sichtbar werden . Öffnen Sie jetzt ggf. die Datei „meinjob.odb“.
2. Wechseln Sie in der Kontextzeile auf das Modul **Visualization**.
3. Die optisch interessanten Darstellungsformen können mit den Button **Plot Deformed Shape**  und **Plot Contours**  aus der Werkzeugpalette aufgerufen werden. **Plot Deformed Shape** zeigt das l als Netz an, wie es im Modul **Mesh** erstellt wurde, bzw. wie sich dieses Netz verformt. Mit **Plot Contours** wird der Betrag einer physikalischen Größe farbig dargestellt, wie Sie z. B. für **CENER**, die Kriechenergiedichte, in der obigen Abbildung 9 sehen können.

4. Die Darstellungsform **Plot Contours** kann verschiedene physikalische Größen anzeigen, im der Überschrift der Skala, links oben im Arbeitsfenster, steht die aktuell angezeigte Größe. Um diese zu ändern wählen Sie in der Menüleiste **Result** → **Field Output...**
5. Lassen Sie sich z. B. die äquivalente plastische Dehnung anzeigen, indem Sie **PEEQ** auswählen und auf den **OK** Button klicken.
6. Mit den Pfeilbuttons können Sie in der Promptleiste einen Steps vor- oder zurückgehen.
7. Unten im Arbeitsfenster wird angegeben, welcher Step, mit welchem Inkrement, und zu welcher Zeit, dem momentane angezeigtem Zustand entspricht.

**Gesondertes Anzeigen einzelner Bereiche** In dem zugehörigen Beispiel stellen die Lotbälle einen besonders interessanten Bereich dar. Wenn dieser Ausschnitt gesondert angezeigt wird, dann passt ABAQUS/CAE automatisch die Skala an, so dass die Unterunterschiede zwischen den einzelnen Lotbällen deutlicher werden.

1. Dazu wählen Sie in der Menüleiste **Tools** den Punkt **Display Group** → **Manager**
2. Klicken Sie im Manager-Fenster auf den Button **Create...**
3. Doppelklicken Sie hier z. B. **PART-3-1.BEREICHLOTBAELLE**.
4. Dann klicken Sie im **Save Selection As** Fenster den Button **OK** und schließen Sie anschließend das **Create Display Group** Fenster.
5. Wählen Sie im **ODB Display Group Manager** die neu angelegte **DisplayGroup-2** aus und klicken Sie auf den Button **Plot**. Nun werden nur noch die vier Lotbälle angezeigt. Die Skala ist jetzt feiner unterteilt und man erkennt besser, wie die Lotbälle beansprucht werden (Abb. 10).

### Angezeigte Grafik abspeichern

1. Um diese den aktuellen Ausschnitt des Arbeitsfensters als reine Grafik-Datei abzuspeichern, öffnen Sie in der Menüleiste **File** den Unterpunkt **Print...** Wählt man im Bereich **Selection** bei **Print:** die Option **Current viewport**, dann wird nur der momentanen Ausschnitt des Arbeitsfensters ausgegeben.

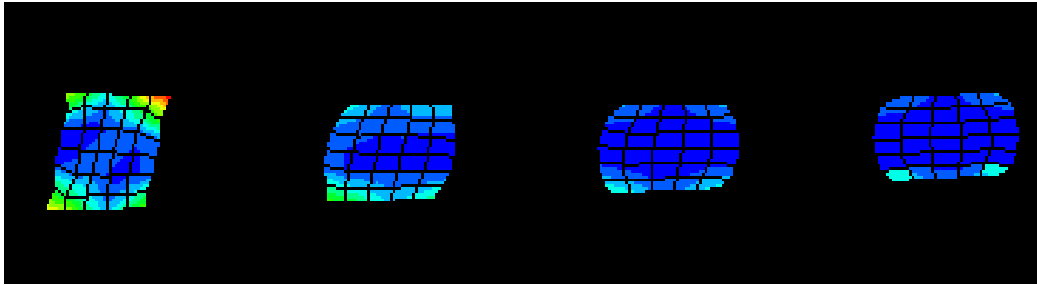



Abbildung 10: Darstellung der Kriechenergie in den Lotbällen

2. Wenn Sie die Grafik nicht direkt ausdrucken möchten, dann wählen im Bereich Settings als Destination **File**.
3. Jetzt müssen Sie die Datei noch benennen und sich für ein Dateiformat z. B. PNG entscheiden.
4. Jetzt müssen Sie nur noch den Button **OK** drücken und dann kann die Bilddatei mit anderen Programmen weiter bearbeitet werden.

**Animation** Anstatt immer wieder auf die Pfeil-Buttons zu klicken, um sich Step für Step die Veränderungen anzusehen, kann man auch eine Animation starten.

1. Stellen Sie zuerst die für Sie interessante Darstellungsweise und die entsprechende physikalische Größe ein, so wie es am Anfang dieses Kapitels beschrieben ist.
2. Klicken Sie in der Werkzeugpalette auf den Button **Animate: Time History** . Dies ist die einzig interessante und sinnvolle Art der Animation, die ABAQUS/CAE, für das hier betrachtete Beispiel, zu bieten hat. **Animate: Time History** zeigt die Veränderung im Laufe der Zeit <sup>19</sup>.
3. Rechtsunten in der Promtleiste befindet sich der Button **Animation Options...** Hier kann unter dem Reiter **Player** die Geschwindigkeit (Frame Rate) verändert werden. Unter dem Reiter **Scale Factor/Harmonic** kann

---

<sup>19</sup>Die beiden anderen Animations-Arten ergeben hier keinen Sinn: **Scale Factor** zeigt nur die Verstärkung der betrachteten Größe zu einem konstantem Zeitpunkt. **Harmonic** animiert die Schwingung auf Grund der max. Auslenkung, was z. B. bei der mechanischen Betrachtung eines Balkens sinnvoll ist.

die Anzahl der **Frames** eingestellt werden. Je mehr Frames gewählt werden, desto flüssiger läuft die Animation ab, allerdings muss auch die **Frame Rate** dann angepasst werden, damit sie nicht zu langsam läuft.

**Speichern der Animation als Video-Datei** Sie können eine Animation auch als Video-Datei speichern, wahlweise im Format QuickTime oder AVI. Besonders bei komplexen Modellen lässt sich die Animation ausgehen von einem Video-File besser darstellen.

1. Dazu müssen Sie die Animation nach Ihren Wünschen einstellen und links in der Promtleiste muss als Plot Mode: Contour stehen, bevor Sie mit Punkt 2 weiter machen.
2. Wählen Sie dazu unter **Animate** aus der Menüleiste den Punkt **Save As...**
3. Im Bereich Selection können Sie auswählen ob die Animation das gesamte Modell oder nur der momentan im Arbeitsfenster gewählte Ausschnitt zeigen soll.
4. Im Bereich Settings, unter dem Button **AVI Options...** bzw. **QuickTime Options...** kann die Auflösung und die Kompressionsrate eingestellt werden.
5. Nachdem Sie auf OK geklickt haben, können Sie die Videodatei in einem Movieplayer unabhängig von ABAQUS/CAE abspielen.

## 5.2 Der XY Data Manager

Im Modul **Visualization**:

1. Öffnen Sie den **XY Data Manager** in der Werkzeugpalette.
2. Klicken Sie auf **Create**, wählen Sie den Punkt **ODB field output** und bestätigen Sie mit **Continue...**
3. Es öffnet sich ein Fenster **XY Data from ODB Field Output**. Wählen Sie unter **Variables** die Größen aus, welche ausgewertet werden sollen. Suchen Sie die berechnete Größe eventuell in den anderen Menüpunkten der Checkbox **Position** im oberen Teil des Fensters. Manche Variablen, z.B. das Volumen werden ausschließlich für das gesamte Element berechnet und sind dann unter **Position** → **Whole Element** zu finden. Für dieses Kapitel soll die Größe **CENER**, die dissipierte Kriechenergie-Volumendichte, interessieren.
4. Im Reiter **Elements/Nodes** wählen Sie die Elemente aus, die untersucht werden sollen. Im vorgegebenen Problem sollen der obere und untere Rand des ersten Lotballs untersucht werden, der nach der visuellen Auswertung am stärksten belastet ist<sup>20</sup>. Hier soll exemplarisch die Vorgehensweise nur für den oberen Rand beschrieben werden, beim unteren Rand wird analog verfahren: Wählen Sie unter **Method** → **Pick from viewport** und klicken Sie auf **Edit Selection**. Zoomen Sie mit der mittleren Maustaste im Arbeitsfenster nahe genug an den ersten Lotball heran, so dass sie bequem die Elemente der oberen Grenzschicht z.B. mit SHIFT+Linksklick markieren können. Bestätigen Sie ihre Elementauswahl mit **Done** in der Promptleiste. Im Fenster **XY Data from ODB Field Output** unter **Elements/Nodes** wird nun die Anzahl der gewählten Elemente angezeigt. Speichern Sie die Auswahl mit **Save**, bestätigen Sie die eventuell angezeigte Warnmeldung mit **OK**.
5. Im **XY Data Manager** werden nun die einzelnen ausgewählten Elemente angezeigt. Zur Auswertung soll aber über die gewählten Elemente gemittelt werden. Wählen Sie dazu **Create**, wählen Sie den Punkt **Operate on XY Data** und bestätigen Sie mit **Continue...**
6. Es öffnet sich ein Fenster **Operate on XY Data**. Wählen Sie rechts im Feld **Operators** den Verknüpfungsoperator **avg((A,A,... ))** mit einem Klick. Im oberen Feld erscheint nun **avg()**, ein Cursor sollte in der

---

<sup>20</sup>siehe Hinweis S. 24

Mitte der Klammern blinken. Wählen Sie nun im unteren, linken Feld alle Elemente aus, indem Sie zuerst auf das oberste Element linksklicken und dann das untere Element mit SHIFT+Linksklick auswählen. Klicken Sie auf **Add Expression**, die gewählten Elemente sollten nun innerhalb der Klammern im oberen Feld aufgelistet sein. Speichern sie mit **Save As...**, geben Sie einen Namen ein und bestätigen Sie mit **OK**. Schließen Sie das Fenster mit **Cancel**.

7. Im **XY Data Manager** sollte nun die eben erstellte Verknüpfung der Elemente aufgelistet sein. Mit **Edit** kann man sich die Daten in einer Tabelle anzeigen lassen und editieren. Um die Datenpaare separat zu speichern, z.B. in MS-Excel, markieren Sie die gesamte Tabelle und laden Sie sie mit dem Tastaturkommando STRG+C in den Zwischenspeicher. Fügen sie die Daten im seperaten Programm mit dem Tastaturkommando STRG+V ein. Um sich die Daten plotten zu lassen, wählen sie im **XY Data Manager** den Button **Plot**.

### 5.3 Lebensdaueranalyse

Die von ABAQUS erhaltenen Daten sollen nun für die Berechnung der Lebensdauer genutzt werden. Hierzu wird die Anzahl der Belastungsperioden  $N_{\text{tot}}$  berechnet, bis das Material komplett versagt. Diese setzt sich zusammen aus  $N_{\text{ini}}$  – der Anzahl der Belastungsperioden, bis das erste Element aus dem Gitter einen Riss aufweist – und  $N_f$  – der Anzahl der Belastungsperioden, bis sich dieser infinitesimale Riss auf den ganzen Lotball ausgebreitet hat.

$$N_{\text{tot}} = N_f + N_{\text{ini}} \quad (1)$$

$N_{\text{ini}}$  berechnet sich nach [1]<sup>21</sup> ( $N_0$ ) mit:

$$N_{\text{ini}} = 1,3579 \cdot 10^5 (\Delta W^{\text{Cr}})^{-0,626}. \quad (2)$$

Hierbei ist mit  $\Delta W^{\text{Cr}}$  die Differenz der akkumulierten Kriechenergiedichten (Energie je Volumeneinheit) von einer Belastungsperiode (B steht für den Anfangszustand der Belastungsperiode, A für den Endzustand) beschrieben:

$$\Delta W_{\text{Cr}} = W_{\text{Cr}}^{\text{A}} - W_{\text{Cr}}^{\text{B}} = \frac{\Delta E_{\text{Cr}}}{\Delta V} = \frac{E_{\text{Cr}}^{\text{A}} - E_{\text{Cr}}^{\text{B}}}{V^{\text{top}} + V^{\text{bot}}}. \quad (3)$$

$V^{\text{top}}$  und  $V^{\text{bot}}$  sind die Volumina des oberen und unteren Lotballrandes, wo die Gefährdung für Materialversagen, auf Grund der höchsten Belastung, am größten ist. Ausgeben lassen sich die Volumina über die ABAQUS-Variable EVOL.  $E_{\text{Cr}}$  entspricht der ABAQUS-Größe ELCD.

<sup>21</sup>Die Konstanten der entsprechenden Gleichung beziehen sich auf Lot mit der Zusammensetzung 62Sn36Pb2Ag (Siehe Seite 629 Abschnitt:2.2 Theoretical Background and Material Parameters)

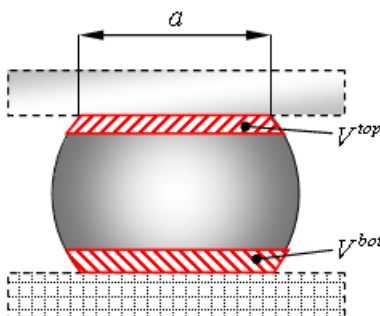


Abbildung 11: Kritische Belastungsbereiche des Lotballs

Man kann sich auch  $W_{Cr} \hat{=} \text{CENER}$  ausgeben lassen und die Differenz extern z.B. in MS-Excel berechnen, denn es gilt:

$$\text{CENER} = \frac{\text{ELCD}}{\text{EVOL}}. \quad (4)$$

Dies ist jedoch nur zulässig, solange die Volumina der Elemente gleich sind. Wenn die Volumina verschieden sind, muss man die absoluten Energien (ELCD) addieren und durch die Summe aller Volumina (EVOL) teilen, damit die korrekte Gewichtung der unterschiedlich großen Elemente gewährleistet ist.

Jeder Zyklus ergibt eine Energiedifferenz  $\Delta W^{Cr}$ , die sich im Laufe der Zyklen immer mehr angleicht. In die Gleichung kann z.B. der Wert des letzten Zyklus eingesetzt werden. Mit den im vorherigen Kapitel aus ABAQUS ausgelesenen Werten ergibt sich für den oberen Lotballrand:

$$N_{ini} = 1,3579 \cdot 10^5 (\Delta W^{Cr})^{-0,626} = 64,07 \text{ Zyklen}. \quad (5)$$

$N_f$  kann aus der Berechnung für die Rissausbreitungsgeschwindigkeit  $v_{riss}$  aus [1] wie folgt ermittelt werden:

$$v_{riss} = \frac{da}{dN_f} = 4,1563 \cdot 10^{-10} (\Delta W^{Cr})^{0,915}. \quad (6)$$

Hierbei beschreibt  $a$  die Länge der Grenzlinie zwischen Lotball und Substrat bzw. Platine. Wichtig ist, dass  $a$  in cm und  $v_{riss}$  in cm/Step angegeben werden. Unter der Voraussetzung einer konstanten Rissgeschwindigkeit (ohne Beschleunigung) kann die Ableitung  $\frac{da}{dN_f}$  durch  $\frac{a}{N_f}$  ersetzt werden, was zur Berechnungsvorschrift für  $N_f$  führt:

$$N_f = \frac{a}{v_{riss}} = \frac{a}{4,1563 \cdot 10^{-10} (\Delta W^{Cr})^{0,915}} = 992,14 \text{ Zyklen mit } a=0,03 \text{ cm} \quad (7)$$

Dabei beträgt die Rissgeschwindigkeit  $v_{riss} = 3,02 \cdot 10^{-5} \text{ cm/Step}$ . Nun kann nach Gleichung (1) die Gesamtanzahl der Belastungsperioden berechnet werden mit:

$$N_{tot} = N_f + N_{ini} = 1056,21 \text{ Zyklen}. \quad (8)$$

Eine analoge Berechnung für den unteren Lotballrand ergibt eine Lebenserwartung von 1090 Zyklen. D.h. der erste Lotball reißt zuerst am oberen Rand.

In dem Paper [1] liegen die numerischen und experimentellen Daten weit auseinander. Das Ergebnis von 1056 Zyklen bis zum Abriss liegt wahrscheinlich auch unter der „wahren“ Lebensdauer dieses Beispielmotors. Der Grund dafür ist die Annahme des ebenen Verzerrungszustands. Im Gegensatz dazu würde der ebene Spannungszustand kaum zum Kriechen und damit zu viel zu hohen Lebenserwartungen führen.



## Literatur

- [1] J. Jendrny, W.H. Müller, H.-J. Albrecht: *Strength and Lifetime Analysis of SMT Solder Joints: An Exemplary Study of the MiniMELF Component*, SMI, San Jose, 1997