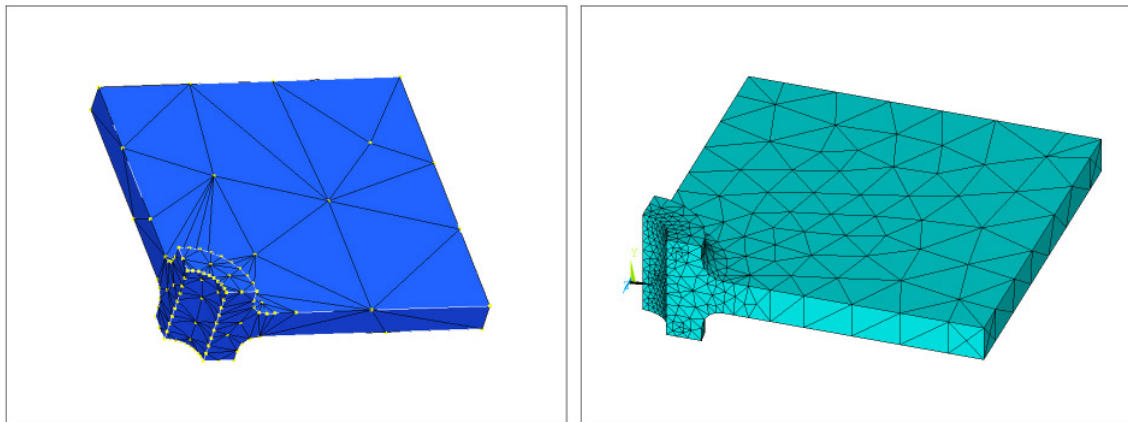




# Vergleich von Simulationen mittels Pro/MECHANICA und ANSYS



Sven D. Simeitis

04/2011



# Gliederung

## **Einleitung**

- Art und Umfang der Berechnungen
- MECHANICA (p-Methode)
- ANSYS (h-Methode)

## **Berechnungsbeispiele**

- Rundstab mit U-förmiger Kerbe
- Balken mit konstanter Flächenlast
- Platte mit Bohrung

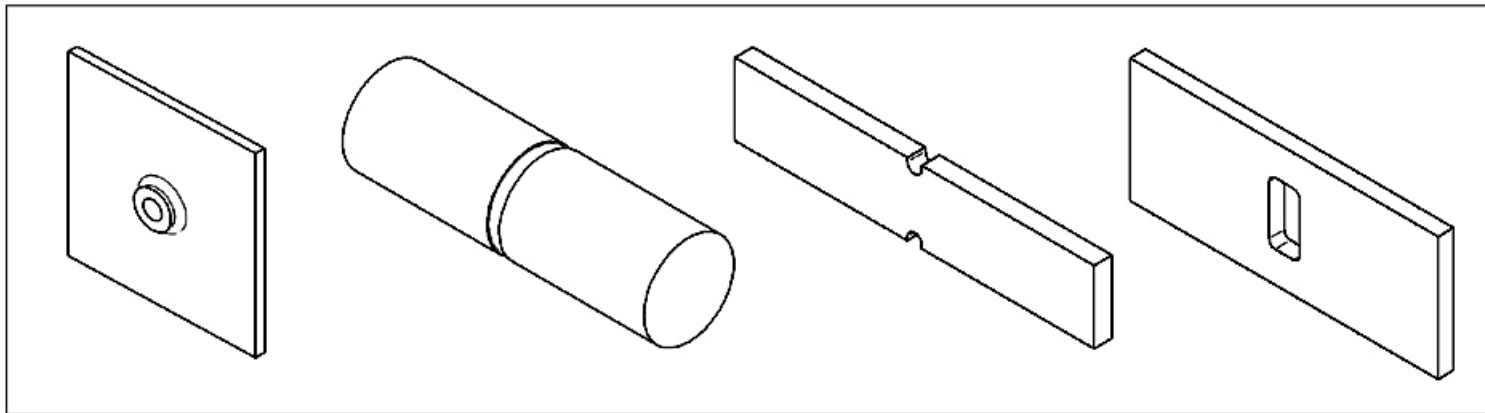
## **Zusammenfassung der Ergebnisse**

## **Fragen / Diskussion**



# Art und Umfang der Berechnungen

- Berechnet wurden 10 Beispiele aus dem Bereich der Strukturmechanik
- Bauteile wurden so gewählt, dass eine analytische Betrachtung möglich ist



Auszug aus den verwendeten Bauteilgeometrien

- Analysen im linear-elastischen Bereich
- Berechnungen jeweils mit AEK und AMK (MECHANICA)
- Modelle jeweils mit einfachen und höherwertigen Elementen (ANSYS)
- Berechnungen wurden ggf. mit Volumen- und Scheiben- bzw. Schalenelementen durchgeführt
- Gegenüberstellung der numerischen Ergebnisse



# MECHANICA University Edition WF5.0

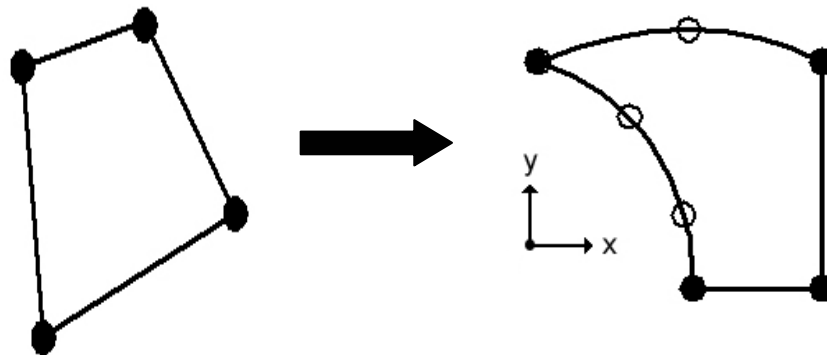
In Pro/ENGINEER integriertes FE-Programm

- Grafische Bedienoberfläche / Iconbasiert
- Übernahme der Geometrie- und Materialdaten direkt aus dem CAD-Programm Pro/ENGINEER
- Analysen nach der „p-Methode“

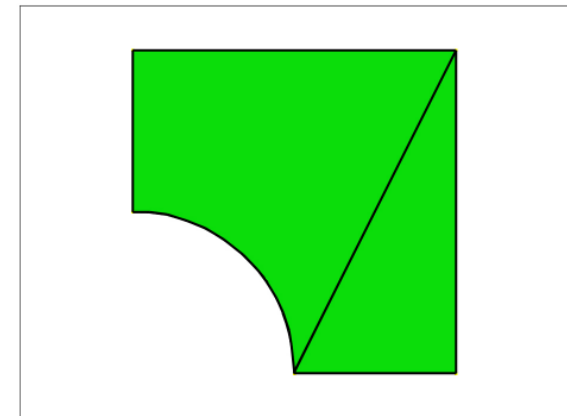
## Prinzip der „p-Methode“

Steigerung der Genauigkeit durch Erhöhen der Polynomordnung der Formfunktionen

- Wird von MECHANICA adaptiv gesteuert



p-Element (Viereckselement)



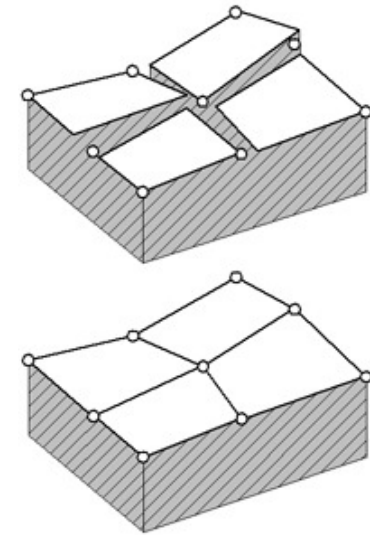
Diskretisierung der Bohrung durch ein  
einziges p-Element möglich



# MECHANICA University Edition WF5.0

## **Adaptive Einschnitt-Konvergenz (AEK):**

- Abschätzen des Fehlers anhand der ungeglätteten Elementspannungen nach dem ersten Rechendurchlauf (Polynomgrad 3)
- Anpassen der Polynomordnung an den jeweiligen Elementkanten
- Ausgabe des Ergebnisses nach dem zweiten Rechendurchlauf



Elementspannungen,  
oben ungeglättet

## **Adaptive Mehrfach-Konvergenz (AMK):**

- Vergleichen der Ergebnisse von zwei aufeinander folgenden Rechendurchläufen mit den Benutzervorgaben
- Anpassen der Polynomordnung an den jeweiligen Elementkanten vor dem nächsten Rechendurchlauf
- Dieser Vorgang wird wiederholt, bis die vom Benutzer festgelegten Konvergenzkriterien erfüllt sind



# ANSYS CLASSIC ED 11.0

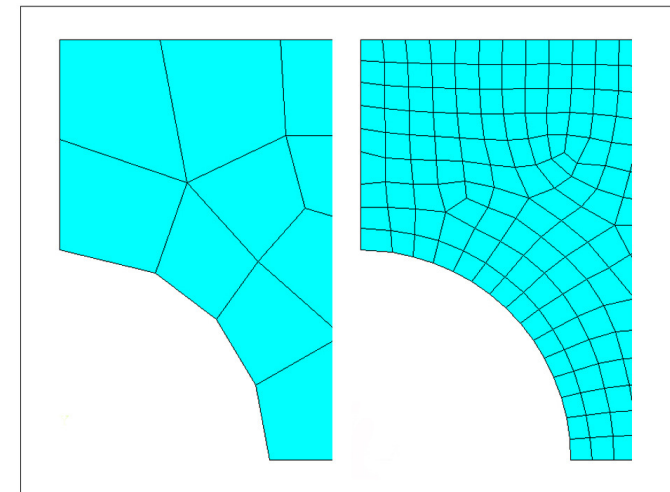
Eigenständiges General-Purpose FE-Programm

- Grafische Bedienoberfläche / Kommandozeilenbasiert
- Import von Geometriedaten aus separaten CAD-Programmen möglich (z.B. IGES Format)
- Analysen nach der „h-Methode“ und der „p-Methode“

## Prinzip der „h-Methode“

Steigerung der Genauigkeit durch das Erhöhen der Elementanzahl

- Kann von ANSYS adaptiv gesteuert werden
- Manuelle Steuerung über das „Meshtool“ möglich

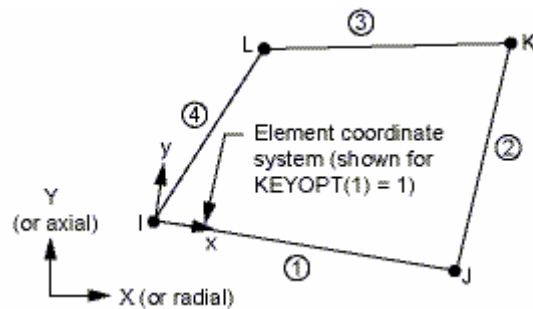


Diskretisierung der Bohrung mit vier Elementen, mit 15 Elementen (rechts)

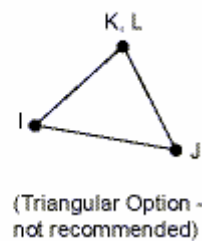


# ANSYS CLASSIC ED 11.0

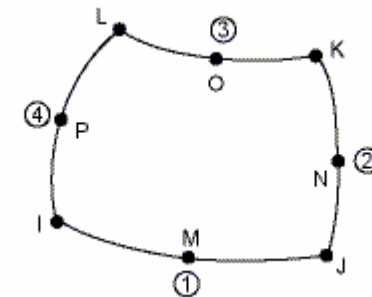
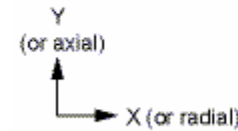
## Scheibenelemente



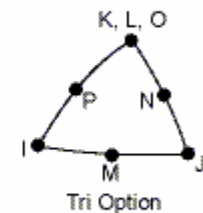
PLANE42



(nach ANSYS Element Reference)



PLANE82



## Steigerung der Genauigkeit durch höherwertige Elemente:

- PLANE42 Element (lineare Formfunktionen)
- PLANE82 Element (quadratische Formfunktionen) → Bessere Diskretisierung irregulärer Bauteilgeometrien

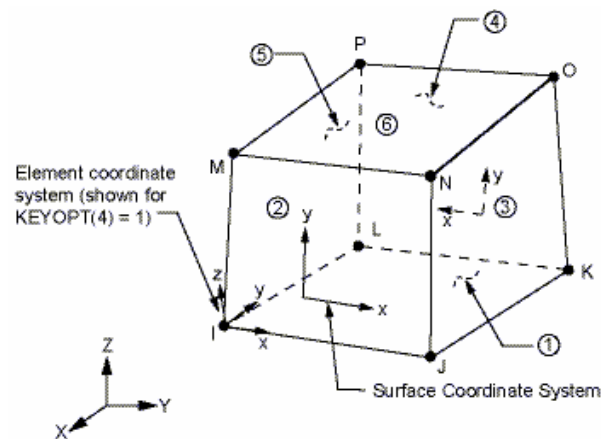
Bauteildicke kann bei diesen Elementen im Elementansatz berücksichtigt werden



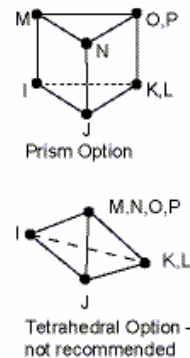


# ANSYS CLASSIC ED 11.0

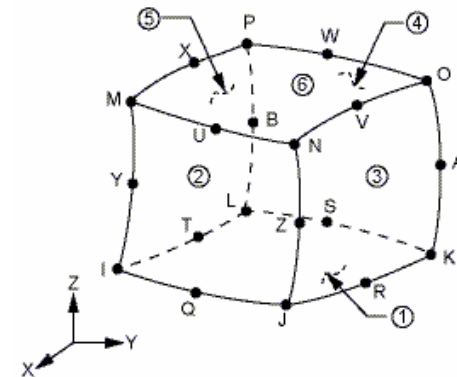
## Volumenelemente



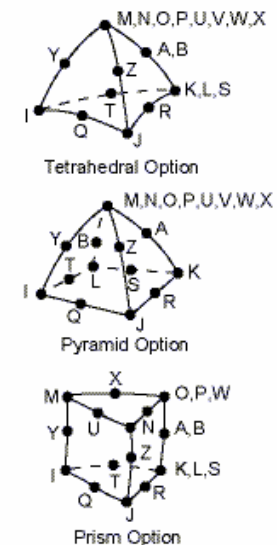
SOLID45



(nach ANSYS Element Reference)



SOLID95



### Steigerung der Genauigkeit durch höherwertige Elemente:

- SOLID45 Element (lineare Formfunktionen) → 8 Knoten, 3 Freiheitsgrade pro Knoten
- SOLID95 Element (quadratische Formfunktionen) → 20 Knoten, 3 Freiheitsgrade pro Knoten

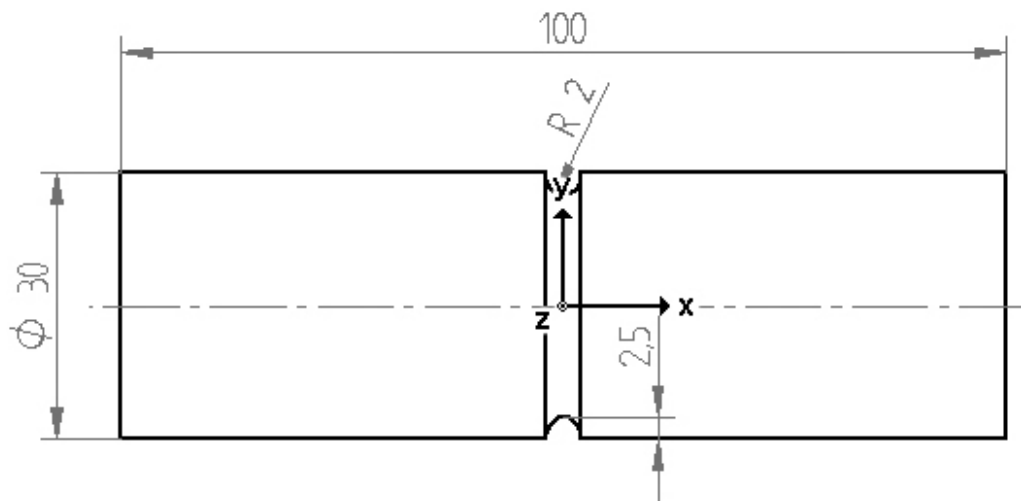
Höherer Berechnungsaufwand bei Verwendung von Elementen mit quadratischen Formfunktionen



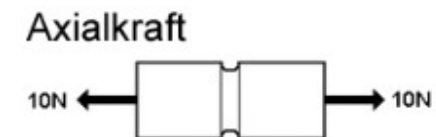


# Berechnungsbeispiel (1)

## Rundstab mit U-förmiger Kerbe (Axialkraft)



Bauteilgeometrie und Lastfall



### Analytische Berechnung nach Roark's Formulas for Stress and Strain:

- Formeln sind nicht exakt, der Fehler ist mit  $<5\%$  angegeben



# Berechnungsbeispiel (1)

## Erstellen des FE-Modells (MECHANICA)

### **Einstellungen AutoGEM Steuerung:**

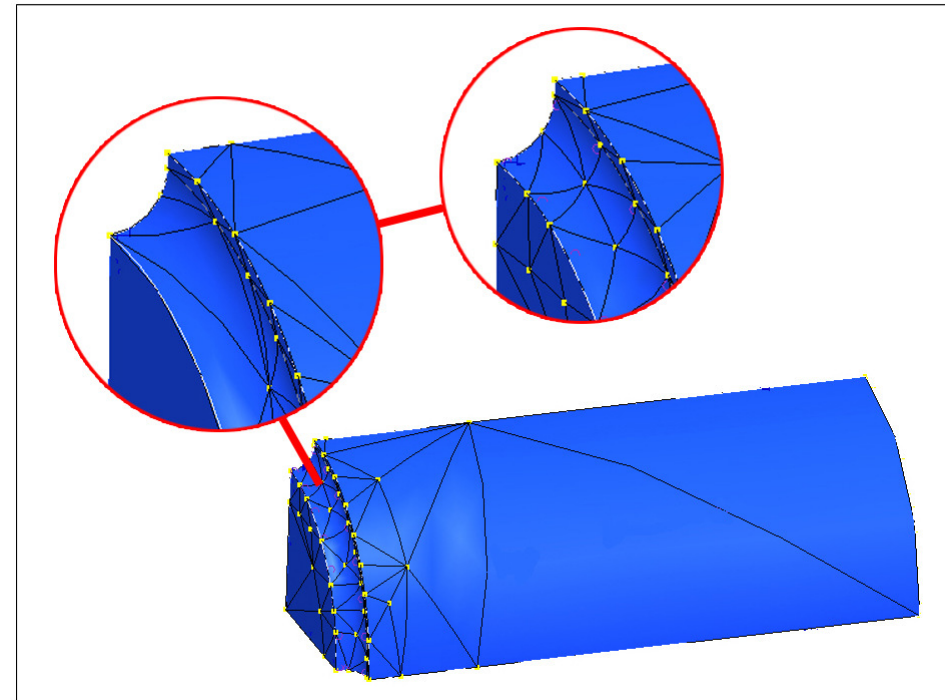
- Max. Elementgröße 40mm (Komponenten)
- Max. Elementgröße 4mm (Fläche)
- Vernetzen mit Tetraederelementen

### **Einstellungen statische Analyse (AEK):**

- Max. Spannungsfehler 8%, lokaler Spannungsfehler 10%, Plotraster 4 (Werkseinstellung)

### **Einstellungen statische Analyse (AMK):**

- Polynomgrad 1-9, Grenzwert 2% Konvergenz, Plotraster 4
- Konvergieren auf lokale Verschiebung, lokale Dehnungsenergie, RMS-Spannung



MECHANICA FE-Netz (links, ohne AutoGEM Vorgaben)



# Berechnungsbeispiel (1)

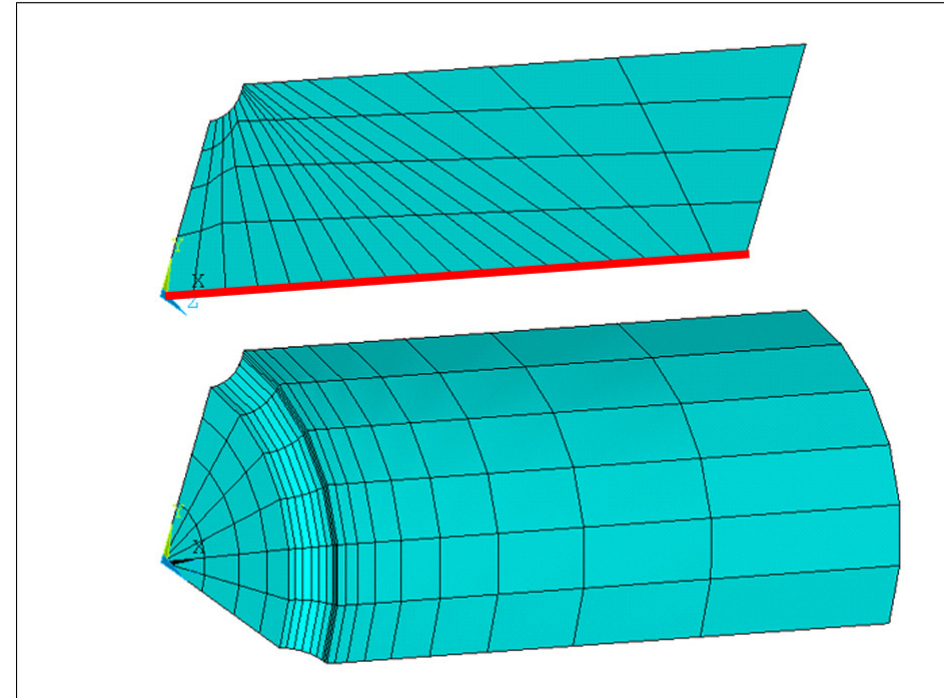
## Erstellen des FE-Modells (ANSYS)

### **Vernetzen der Querschnittsfläche:**

- Vernetzen mit PLANE82 Elementen
- Unterteilung 18 Elemente (Länge)
- Unterteilung 4 Elemente (Radius)

### **Erzeugen des Volumenmodells:**

- Rotation der Querschnittsfläche
- Unterteilung 6 Elemente pro 90°
- Volumenelemente (SOLID95) werden hierbei automatisch mit generiert



ANSYS FE-Netz (SOLID95 Modell)

Anmerkung: Die Abbildung zeigt das Modell des ersten Rechendurchlaufs → Netzverfeinerung notwendig



# Berechnungsbeispiel (1)

## Numerische Ergebnisse

	MECHANICA		ANSYS	
Elemente	Tetraeder (AEK)	Tetraeder (AMK)	SOLID45	SOLID95
Anzahl	141	141	1056	984
CPU-Zeit [s]	1,33	3,56	2,78	4,78
Max. Verschiebung [mm]	3,50E-6	3,50E-6	3,49E-6	3,49E-6
Max. Spannung [MPa]	5,26E-2	5,22E-2	5,22E-2	5,13E-2

Maximale Spannung analytisch → 5,06E-2 MPa

**Relative Abweichung der numerischen und analytischen Ergebnisse für die max. Spannung:**

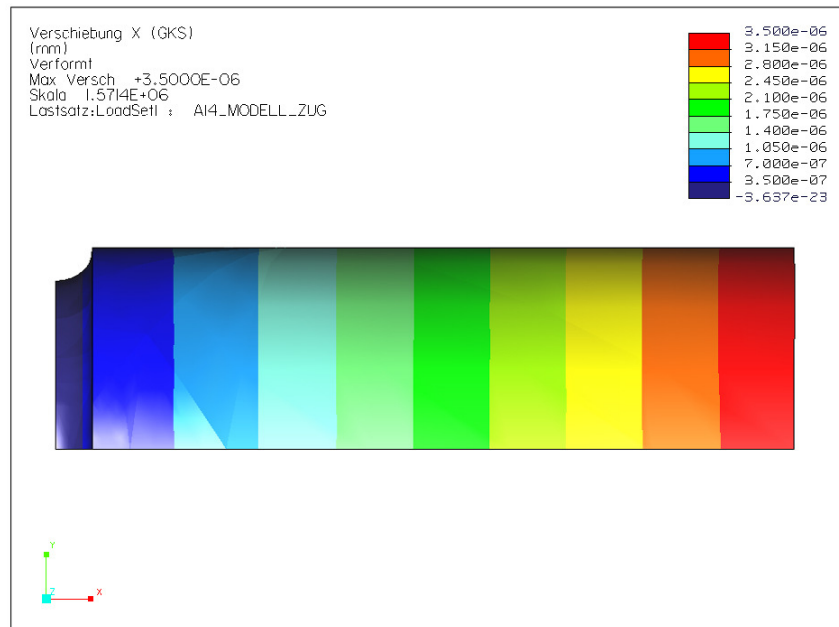
Rel. Abweichung [%]	4,03	3,16	3,16	1,38
---------------------	------	------	------	------

- Geringe Abweichungen der numerischen Lösungen (Verschiebung, Spannung)

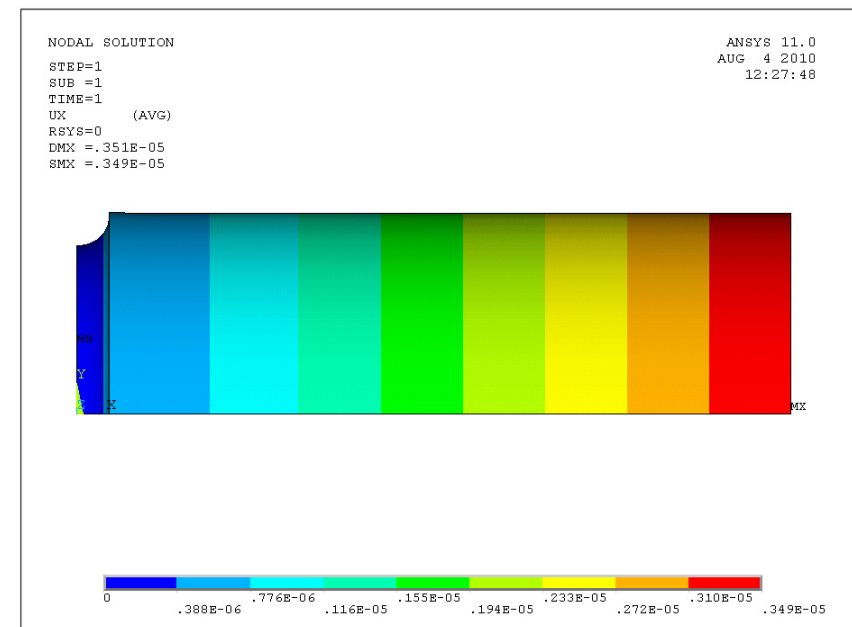


# Berechnungsbeispiel (1)

## Farbplot der Verschiebung



MECHANICA (AMK)



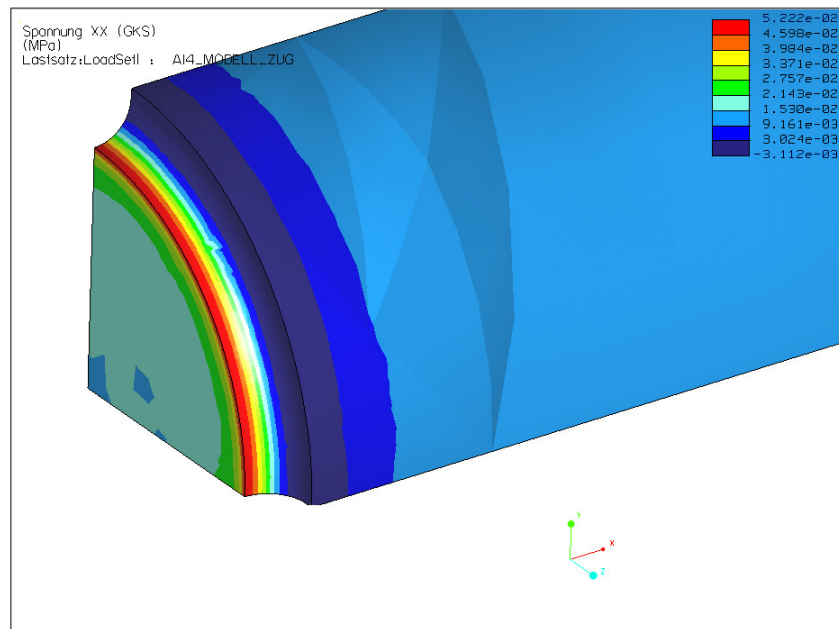
ANSYS (SOLID95)

- Der Verschiebungsverlauf wird von beiden Programmen gleichermaßen dargestellt

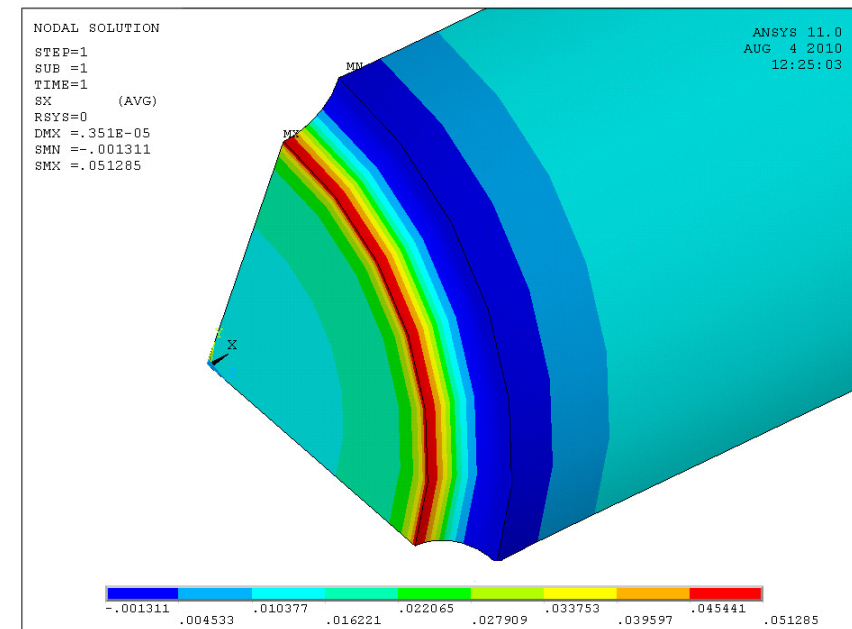


# Berechnungsbeispiel (1)

## Farbplot der Normalspannung



MECHANICA (AMK)



ANSYS (SOLID95)

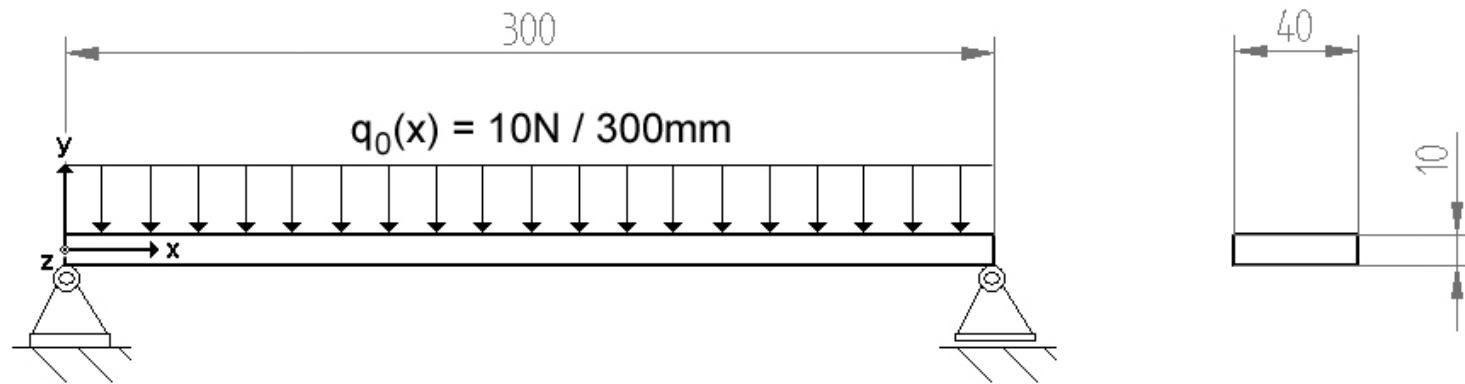
- Gute Übereinstimmung in der Darstellung des Spannungsverlaufs





## Berechnungsbeispiel (2)

### Balken mit konstanter Flächenlast



Bauteilgeometrie und Lastfall

### Analytische Berechnung über die DGL der Biegelinie:

Annahme: Die Schubspannungen sind wesentlich kleiner als die Biegespannungen und können daher vernachlässigt werden (max. Schubspng. / max. Biegespng. < 5%)





# Berechnungsbeispiel (2)

## Erstellen des FE-Modells (MECHANICA)

### **AutoGEM Einstellungen:**

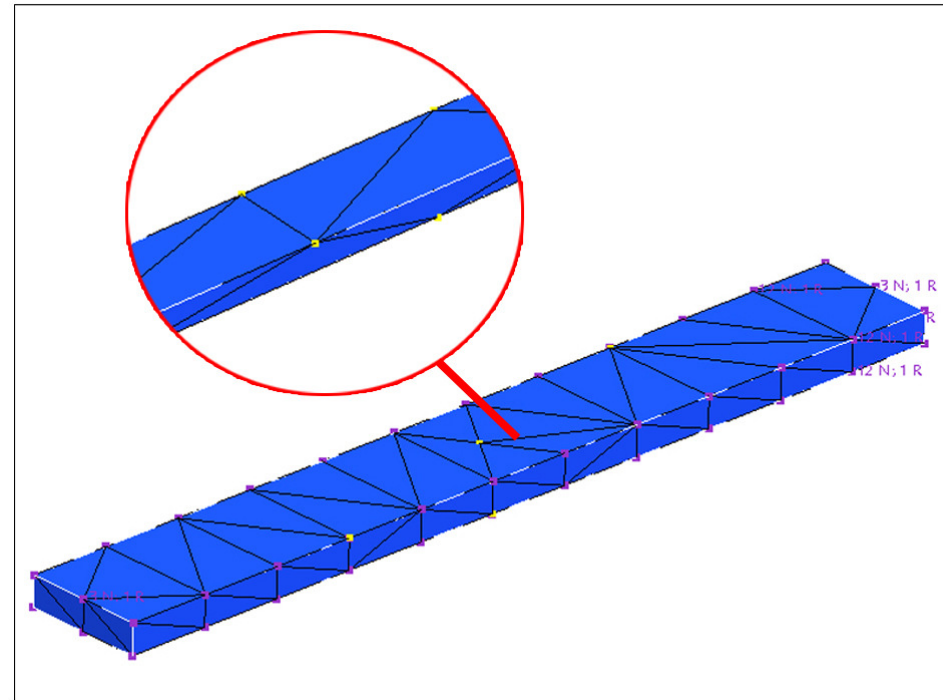
- Kantenverteilung 12 Knoten / Intervall 1,0 (Länge)
- Kantenverteilung 3 Knoten / Intervall 1,0 (Breite)
- Vernetzen mit Tetraederelementen

### **Einstellungen statische Analyse (AEK):**

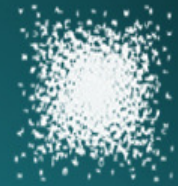
- Max. Spannungsfehler 8%, lokaler Spannungsfehler 10%, Plotraster 4 (Werkseinstellung)

### **Einstellungen statische Analyse (AMK):**

- Polynomgrad 1-9, Grenzwert 2% Konvergenz, Plotraster 4
- Konvergieren auf lokale Verschiebung, lokale Dehnungsenergie, RMS-Spannung

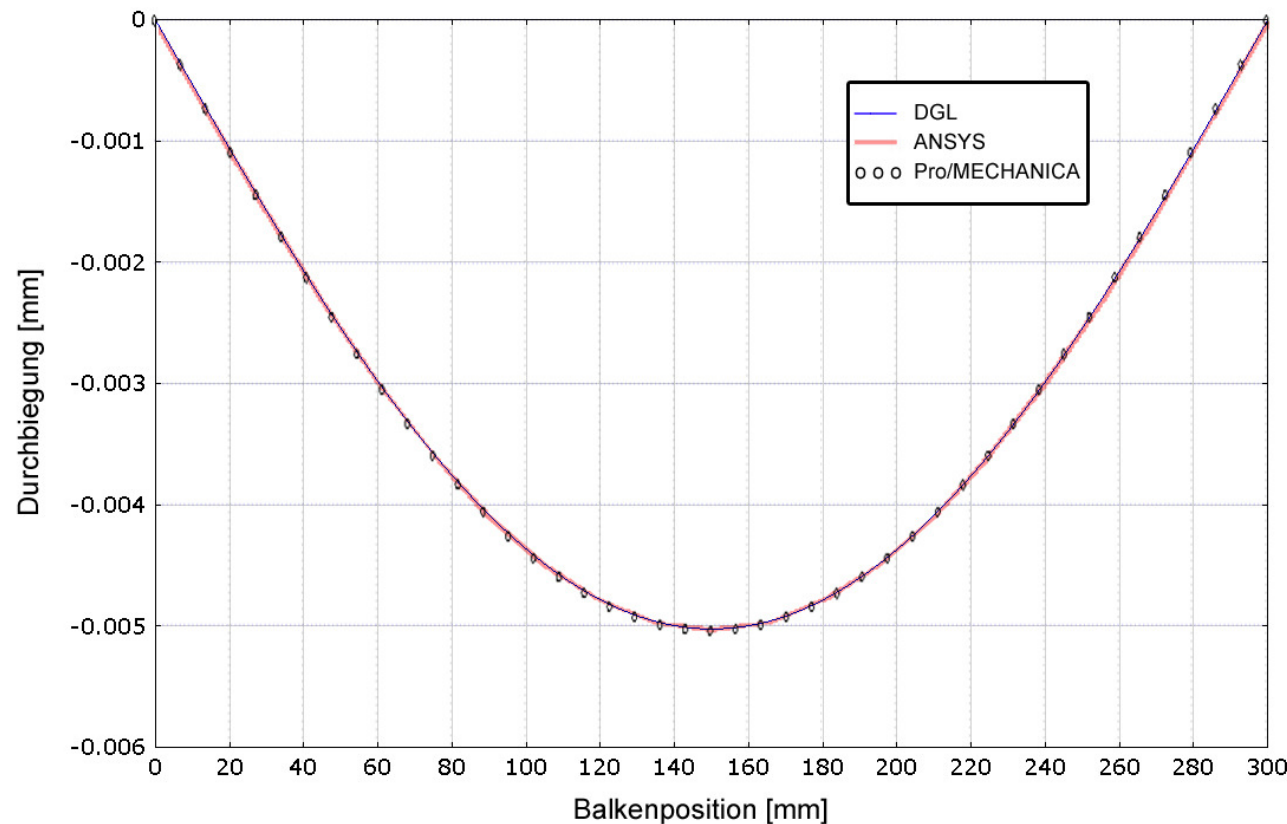


MECHANICA FE-Netz (oben, ohne AutoGEM Vorgaben)



## Berechnungsbeispiel (2)

### Numerische Ergebnisse (Verschiebung)



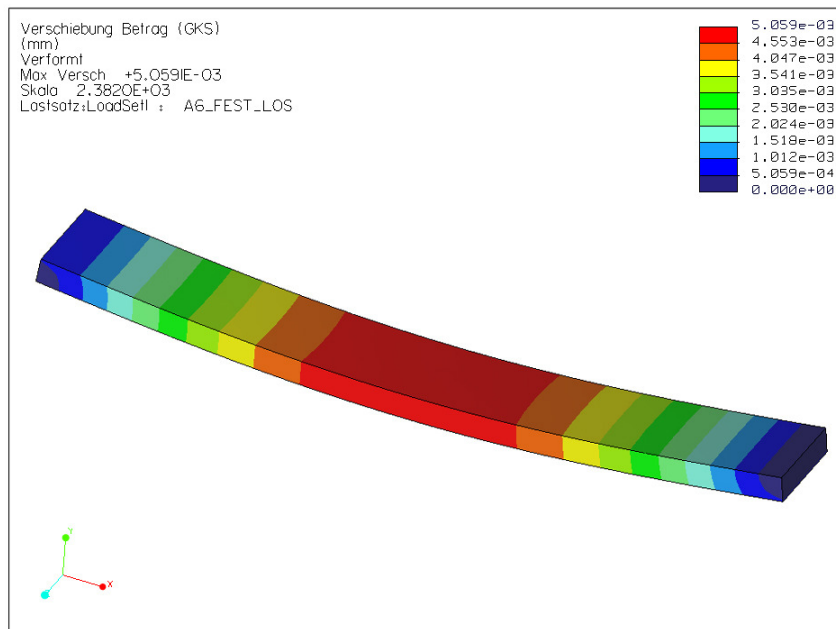
- Rel. Abweichung der numerischen von der analytischen Lösung in der Balkenmitte < 0,6%

Durchbiegung als Funktion der Balkenposition  
MECHANICA (Tetraeder, AMK), ANSYS (SOLID95)

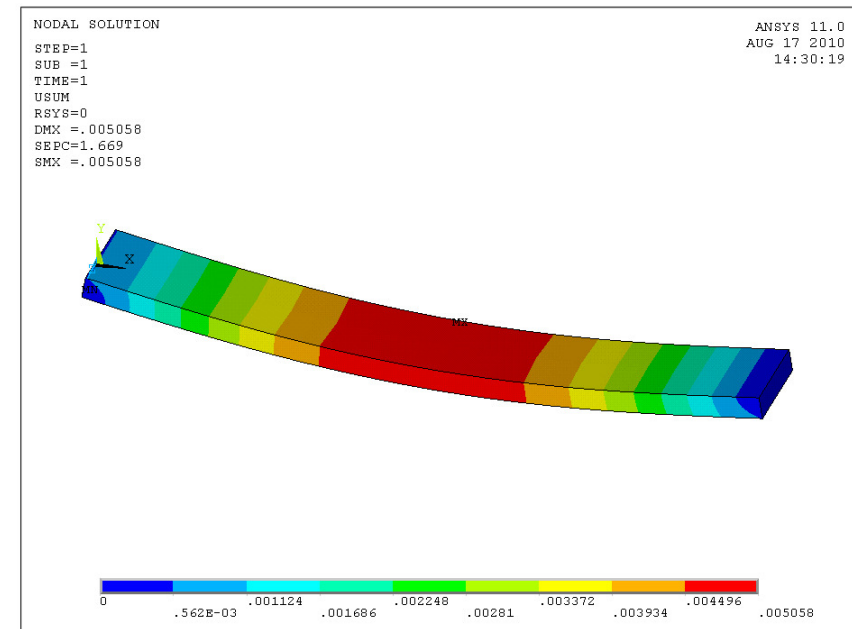


## Berechnungsbeispiel (2)

### Farbplot der Verschiebung



MECHANICA (AMK)



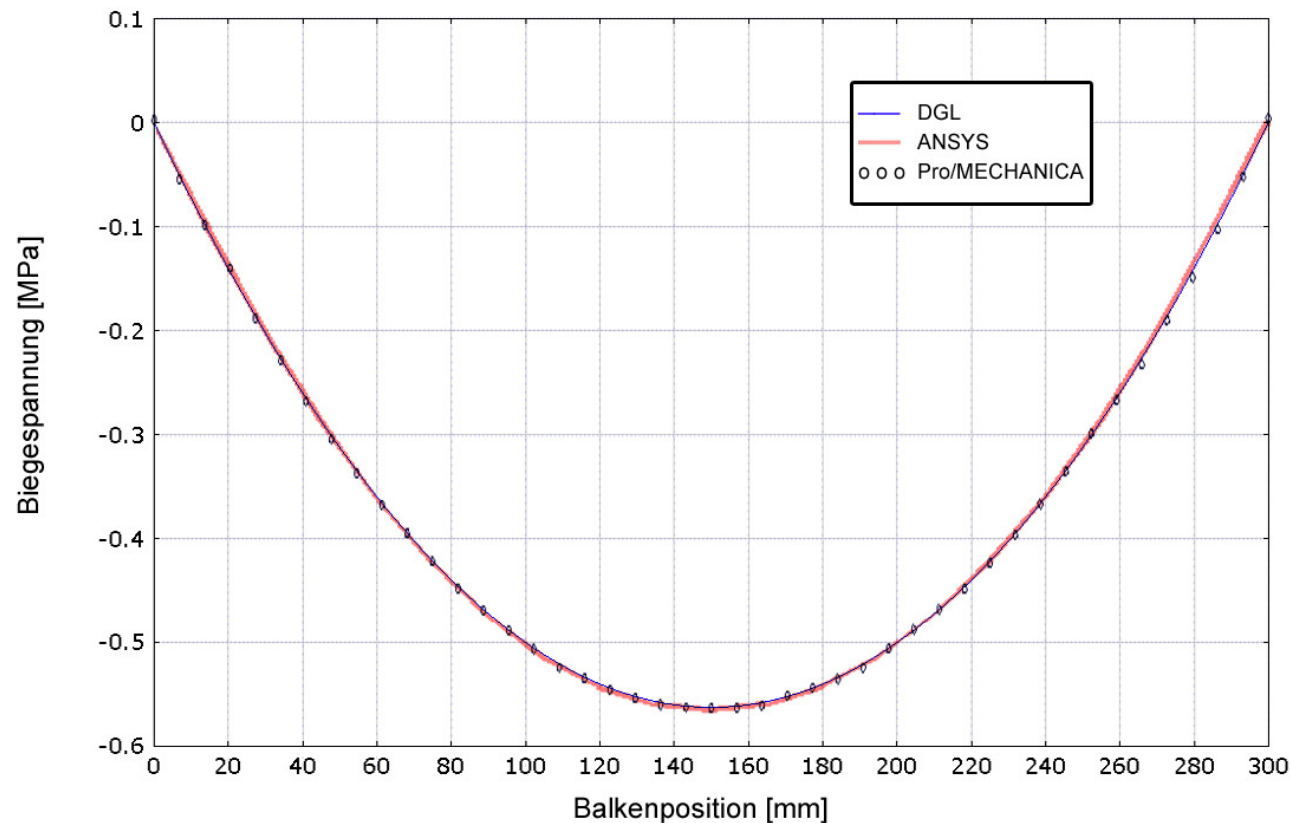
ANSYS (SOLID95)

- Gute Übereinstimmung beider Programme bei der Darstellung des Verschiebungsverlaufs



## Berechnungsbeispiel (2)

### Numerische Ergebnisse (Biegespannung)



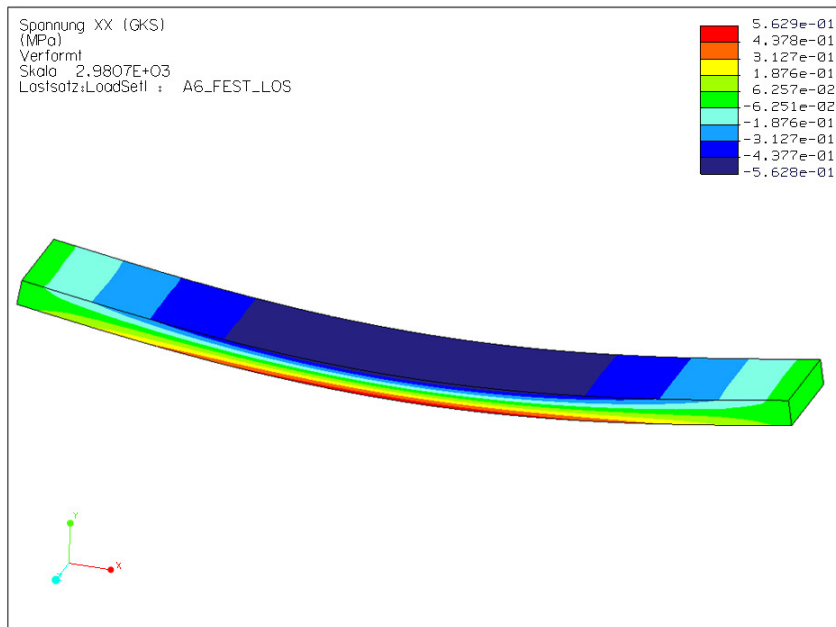
- Numerische und analytische Lösung stimmen in der Balkenmitte exakt überein

Biegespannung als Funktion der Balkenposition  
MECHANICA (Tetraeder, AMK), ANSYS (SOLID95)

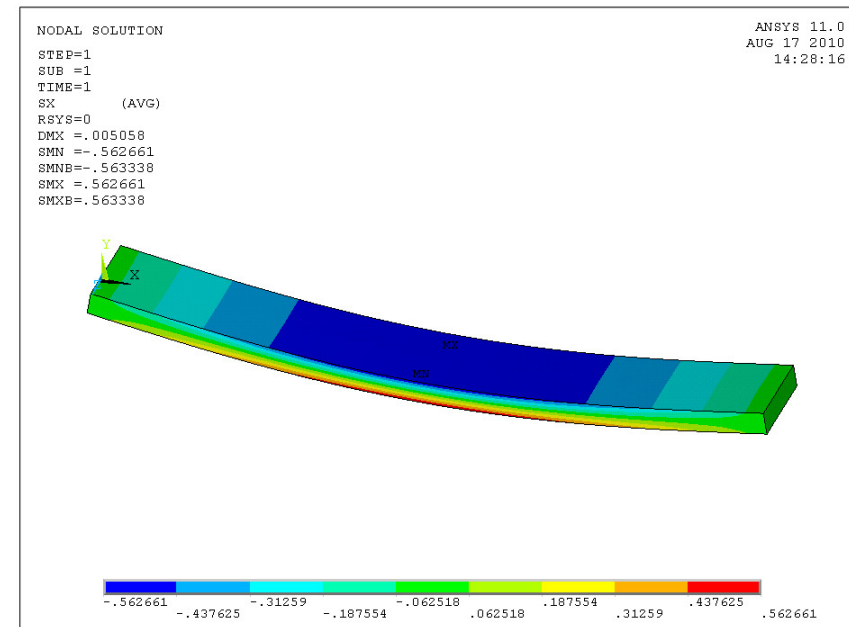


# Berechnungsbeispiel (2)

## Farbplot der Biegespannung



MECHANICA (AMK)



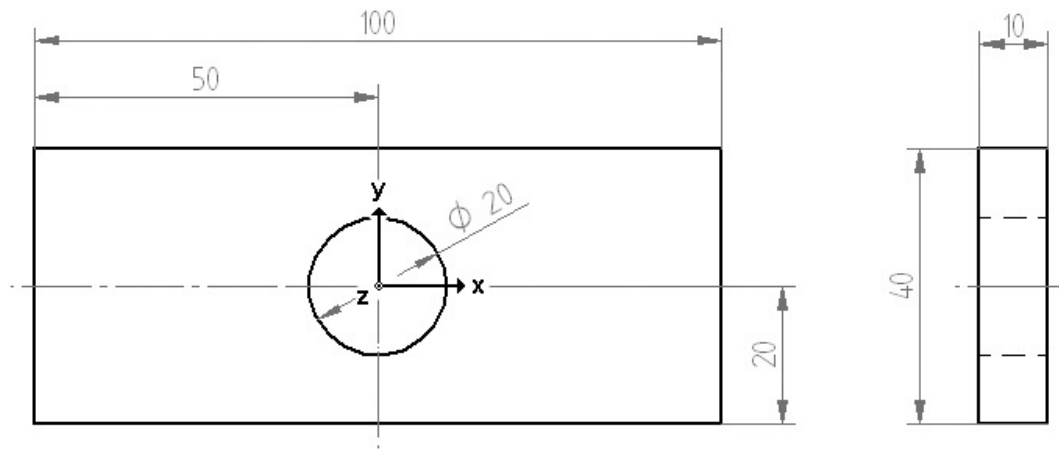
ANSYS (SOLID95)

- Gleichwertige Darstellung des Spannungsverlaufs



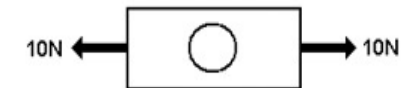
## Berechnungsbeispiel (3)

### Platte mit Bohrung



Bauteilgeometrie und Lastfall

Axialkraft



### Analytische Berechnung nach Roark's Formulas for Stress and Strain:

- Formeln sind nicht exakt, der Fehler ist mit  $<5\%$  angegeben





# Berechnungsbeispiel (3)

## Erstellen des FE-Modells (MECHANICA)

### **AutoGEM Einstellungen:**

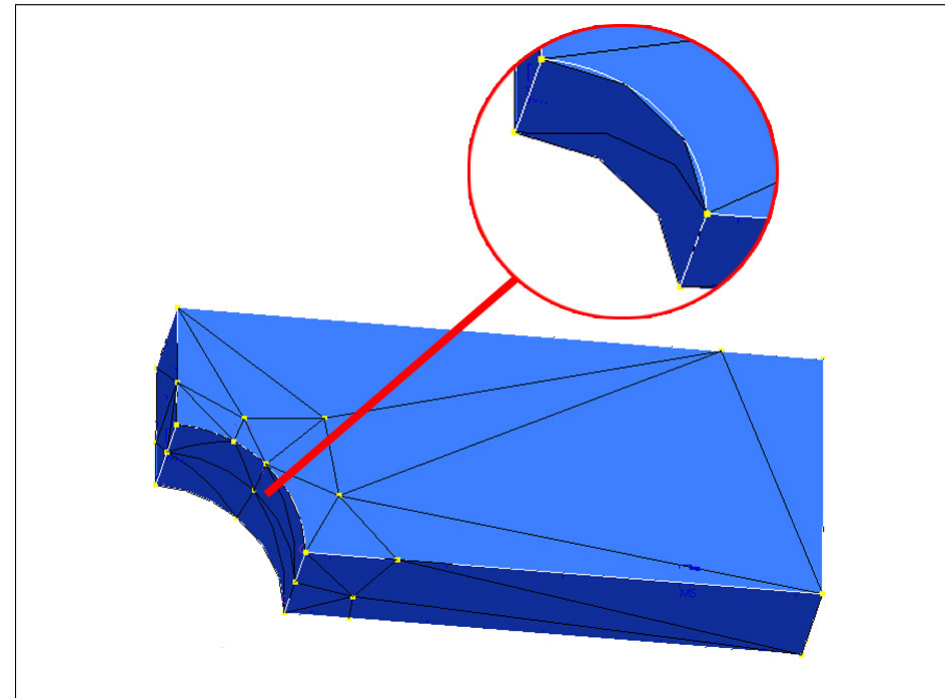
- Max. Elementgröße 8mm (Fläche)
- Vernetzen mit Tetraederelementen

### **Einstellungen statische Analyse (AEK):**

- Max. Spannungsfehler 8%, lokaler Spannungsfehler 10%, Plotraster 4 (Werkseinstellung)

### **Einstellungen statische Analyse (AMK):**

- Polynomgrad 1-9, Grenzwert 5% Konvergenz, Plotraster 4
- Konvergieren auf lokale Verschiebung, lokale Dehnungsenergie, RMS-Spannung



MECHANICA FE-Netz (oben, ohne AutoGEM Vorgaben)





## Berechnungsbeispiel (3)

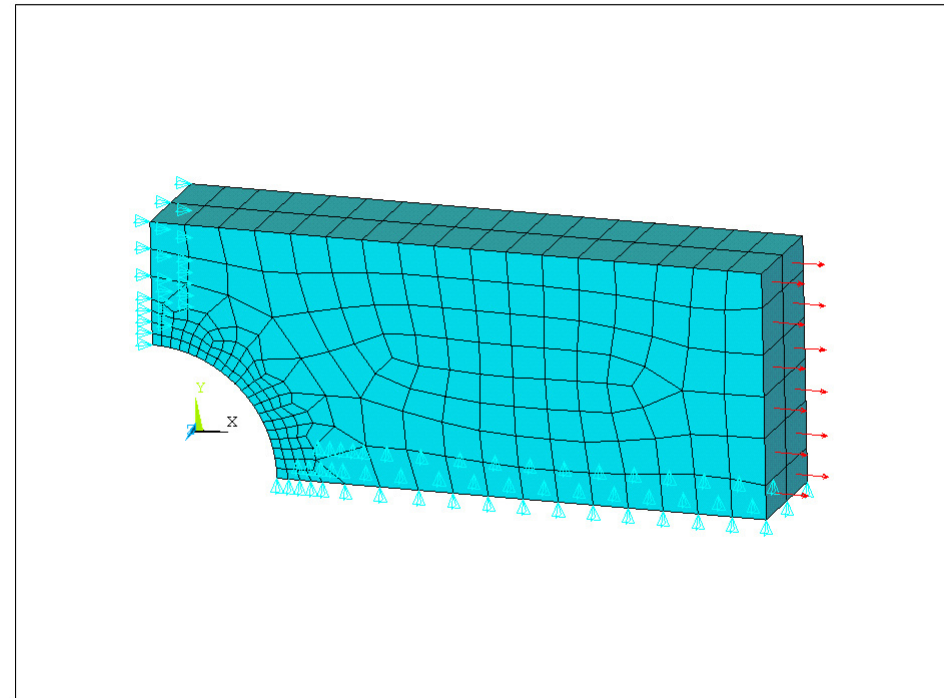
### Erstellen des FE-Modells (ANSYS)

#### **Vernetzen der Querschnittsfläche:**

- Vernetzen mit PLANE42 Elementen
- Erhöhen der Elementdichte im Bereich der Bohrung

#### **Erzeugen des Volumenmodells:**

- Extrudieren der Querschnittsfläche
- Unterteilung 2 Elemente (Breite)
- Volumenelemente (SOLID45) werden hierbei automatisch mit generiert



ANSYS FE-Netz (SOLID45)



## Berechnungsbeispiel (3)

### Numerische Ergebnisse

	MECHANICA		ANSYS	
Elemente	Tetraeder (AEK)	Tetraeder (AMK)	SOLID45	SOLID95
Anzahl	64	64	398	294
CPU-Zeit [s]	1,03	2,09	2,29	3,16
Max. Verschiebung [mm]	7,87E-6	7,91E-6	7,89E-6	7,91E-6
Max. Spannung [MPa]	0,111	0,112	0,112	0,113

Maximale Spannung analytisch  $\rightarrow$  0,108 MPa

**Relative Abweichung der numerischen und analytischen Ergebnisse für die max. Spannung:**

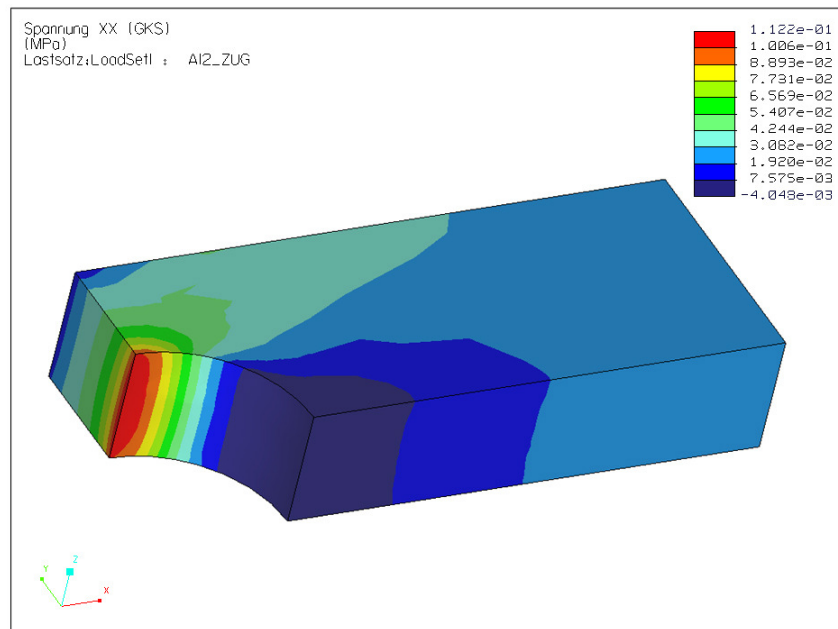
Rel. Abweichung [%]	2,78	3,70	3,70	4,63
---------------------	------	------	------	------

- Geringe Abweichungen der numerischen Lösungen (Verschiebung, Spannung)

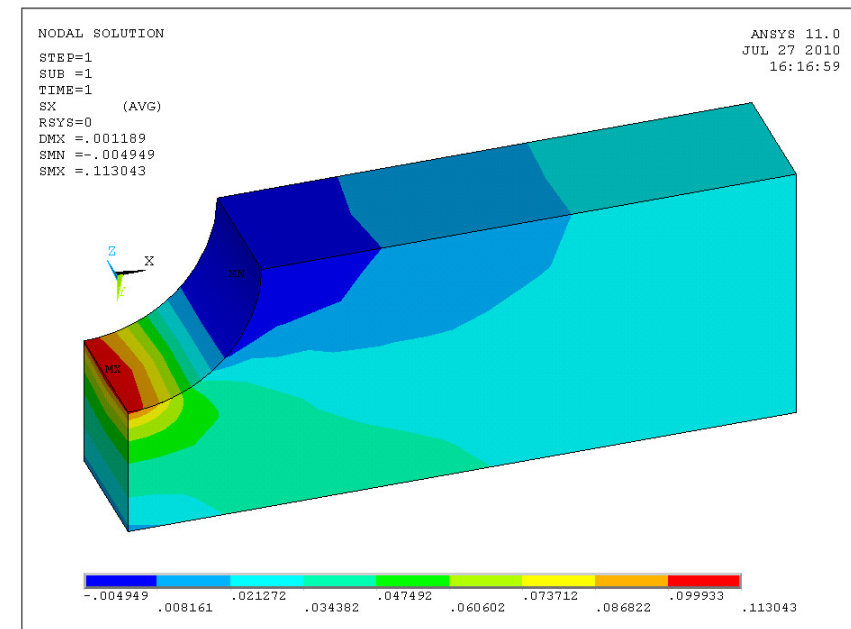


## Berechnungsbeispiel (3)

### Farbplot der Normalspannung



MECHANICA (AMK)



ANSYS (SOLID95)

- Der Spannungsverlauf wird von beiden Programmen gleichermaßen dargestellt



# Zusammenfassung der Ergebnisse

## Mittlere Abweichung zwischen numerischer und analytischer Lösung

Werte bezogen auf die maximale Spannung

14 Analysen	MECHANICA		ANSYS	
Elemente	Tetraeder (AEK)	Tetraeder (AMK)	SOLID45	SOLID95
Ø Abweichung [%]	2,97	<b>2,54</b>	3,36	<b>2,46</b>

7 Analysen	MECHANICA		ANSYS	
Elemente	Schalen (AEK)	Schalen (AMK)	PLANE42	PLANE82
Ø Abweichung [%]	1,16	<b>1,14</b>	<b>1,14</b>	0,92

- Beide Programme erzielen bei den berechneten Modellen vergleichbare Resultate
- Geringer Unterschied zwischen AEK und AMK (max. Spannungen)



# Zusammenfassung der Ergebnisse

## Gesamt Berechnungsdauer

Angegebene Zeit ist die Summe der Berechnungsdauer aller Modelle

14 Analysen	MECHANICA		ANSYS	
Elemente	Tetraeder (AEK)	Tetraeder (AMK)	SOLID45	SOLID95
CPU-Zeit [s]	26,6	<b>67,8</b>	58,6	<b>146,1</b>

7 Analysen	MECHANICA		ANSYS	
Elemente	Schalen (AEK)	Schalen (AMK)	PLANE42	PLANE82
CPU-Zeit [s]	5,2	<b>7,1</b>	<b>15,0</b>	14,7

- MECHANICA benötigte zum Berechnen der Beispiele insgesamt weniger Zeit
- Wesentliche Zeiteinsparung bei Verwendung der AEK, insbesondere bei Volumenelementen

Anmerkung: CPU-Zeit entspricht der gesamt Berechnungsdauer auf allen Prozessorkernen und ist hier nur als Anhaltswert zu verstehen, da diese mit dem jeweiligen Auslastungsgrad des Systems variieren kann



# Zusammenfassung der Ergebnisse

## **MECHANICA aus Sicht des Benutzers**

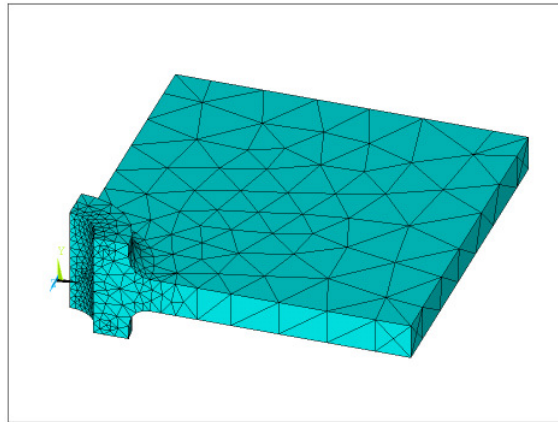
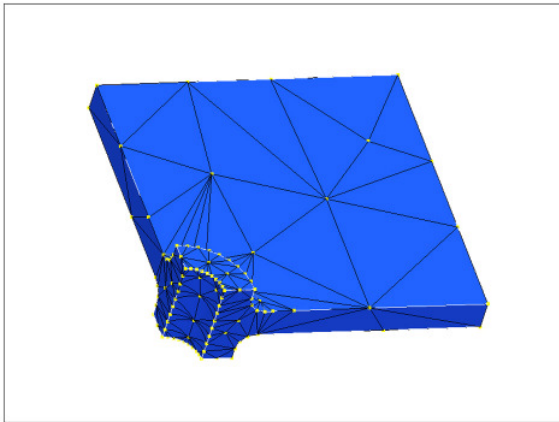
- Kurze Einarbeitungsdauer (Übersichtliche Bedienoberfläche, Icon Basiert)
- Zügiges Arbeiten möglich (Preprocessing → Integration in CAD Programm)
- Unkomplizierte Bedienung z.B. beim Aufbringen von Momenten (Gesamtlast auf Punkt)

### **Vorteile der p-Methode:**

- FE-Modelle enthalten weniger Elemente
- Das FE-Netz bleibt während der Konvergenzanalyse erhalten (kein Re-Meshing erforderlich)
- Vermeidung von Fehlern durch falsche Elementwahl (wenige unterschiedliche Elementtypen notwendig)



Ich bedanke mich für die  
Aufmerksamkeit und freue mich  
auf Ihre Diskussionsbeiträge







# Literatur / Angaben zum System

## **Literatur:**

[1] *Roark's Formulas for Stress and Strain 7th Edition*; Warren C.Young, G. Bundenas;  
McGraw-Hill 2002; ISBN: 0-07-121059-8

[2] *ANSYS Release 9.0 Tutorial*; Kent L. Lawrence;  
SDC Publications 2005; ISBN: 1-58503-254-9

[3] *Pro/MECHANICA Tutorial Structure Release 2001-Integrated Mode*; R. Toogood;  
SDC Publications 2001; ISBN: 1-58503-031-7-2

[4] *ANSYS Release 11.0 Documentation*

[5] *Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 Documentation*

## **System:**

Intel ® Core™ 2CPU, E8400/3.00GHz / 1,98GB RAM / Windows ® XP Professional SP3