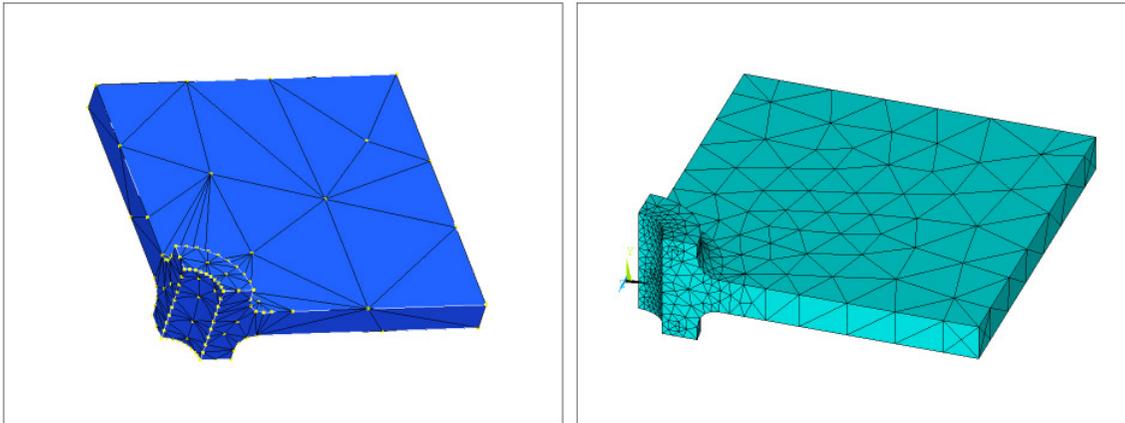




Vergleich von Simulationen mittels Pro/MECHANICA und ANSYS



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

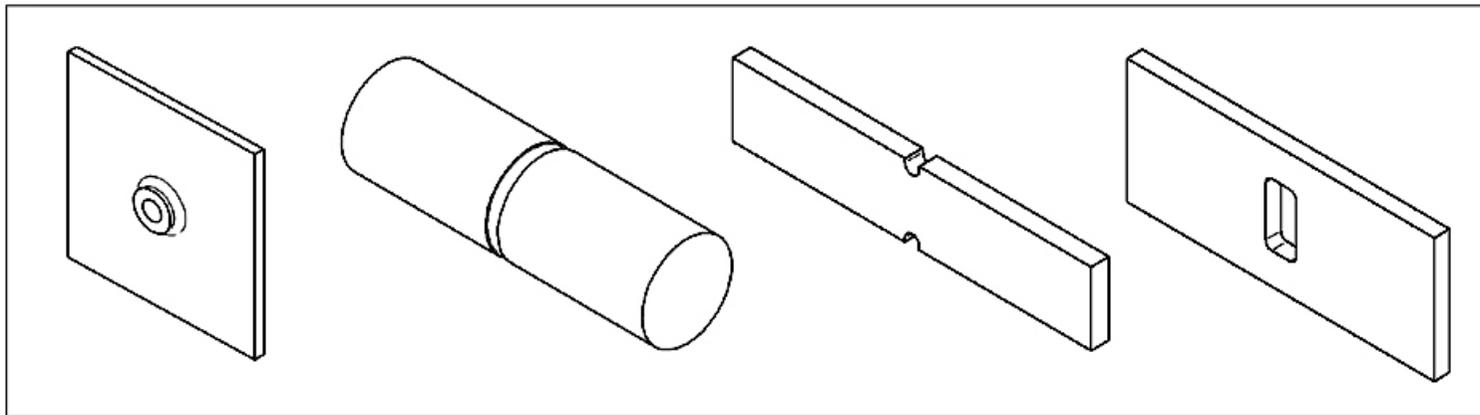
Zusammenfassung der Ergebnisse

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

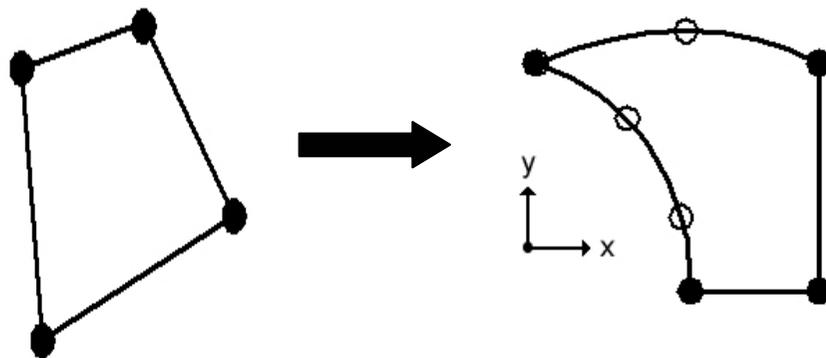
In Pro/ENGINEER integriertes FE-Programm

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

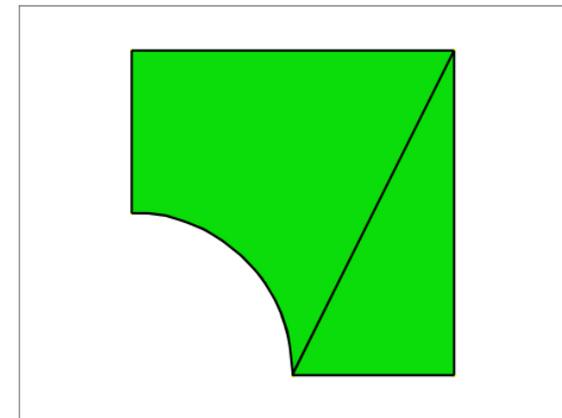
Prinzip der „p-Methode“

Steigerung der Genauigkeit durch Erhöhen der Polynomordnung der Formfunktionen

- Wird von MECHANICA adaptiv gesteuert



p-Element (Viereckselement)



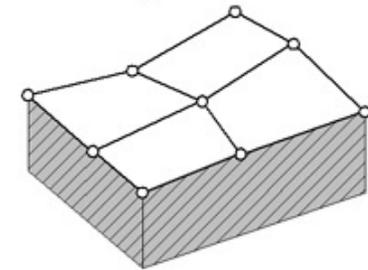
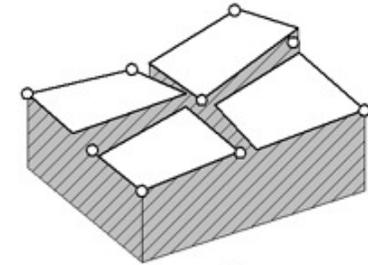
Diskretisierung der Bohrung durch ein
einziges p-Element möglich



MECHANICA University Edition WF5.0

Adaptive Einschritt-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

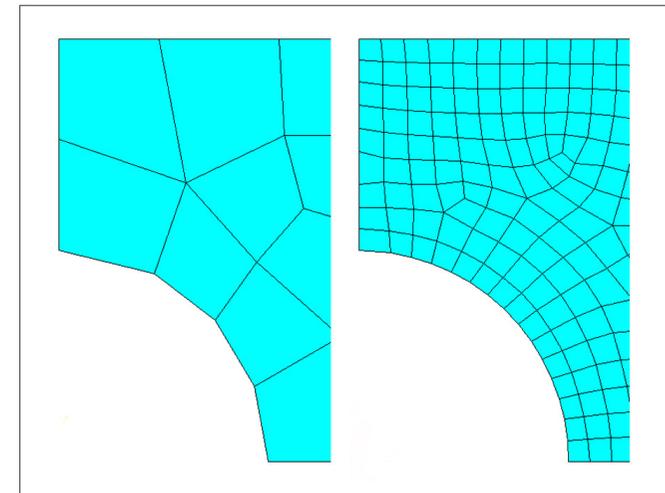
Eigenständiges General-Purpose FE-Programm

- 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

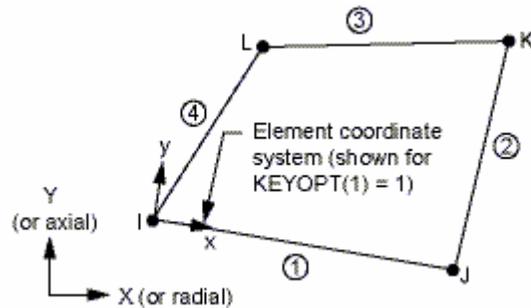


Diskretisierung der Bohrung mit vier Elementen, mit 15 Elementen (rechts)

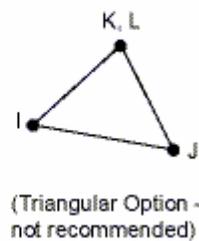


ANSYS CLASSIC ED 11.0

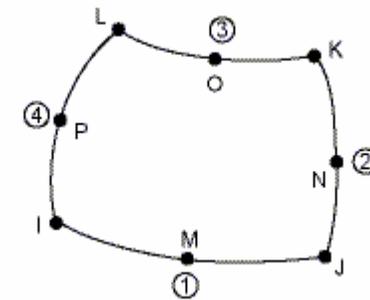
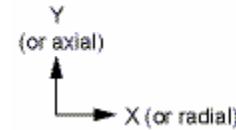
Scheibenelemente



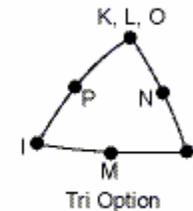
PLANE42



(nach ANSYS Element Reference)



PLANE82



Steigerung der Genauigkeit durch höherwertige Elemente:

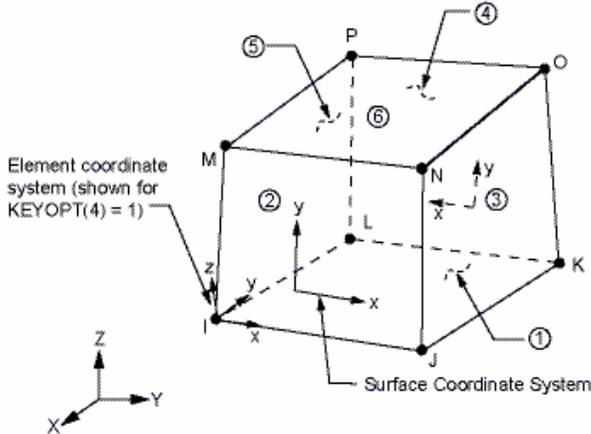
- PLANE42 Element (lineare Formfunktionen)
- PLANE82 Element (quadratische Formfunktionen) → Bessere Diskretisierung irregulärer Bauteilgeometrien

Bauteildicke kann bei diesen Elementen im Elementansatz berücksichtigt werden

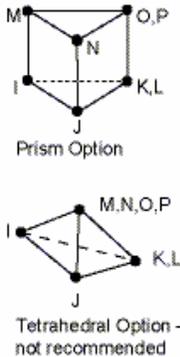


ANSYS CLASSIC ED 11.0

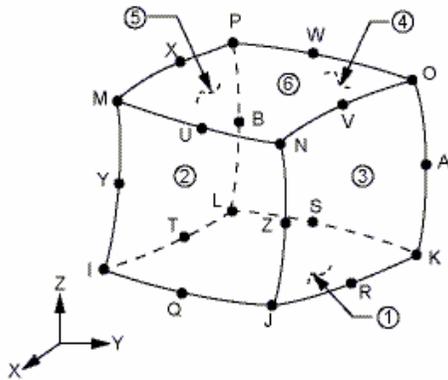
Volumenelemente



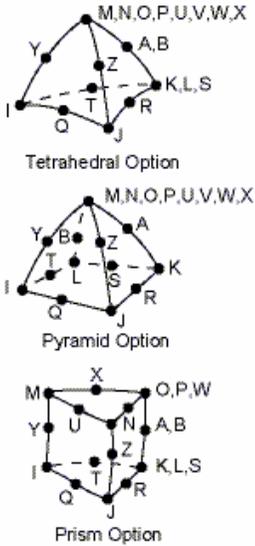
SOLID45



(nach ANSYS Element Reference)



SOLID95



Steigerung der Genauigkeit durch höherwertige Elemente:

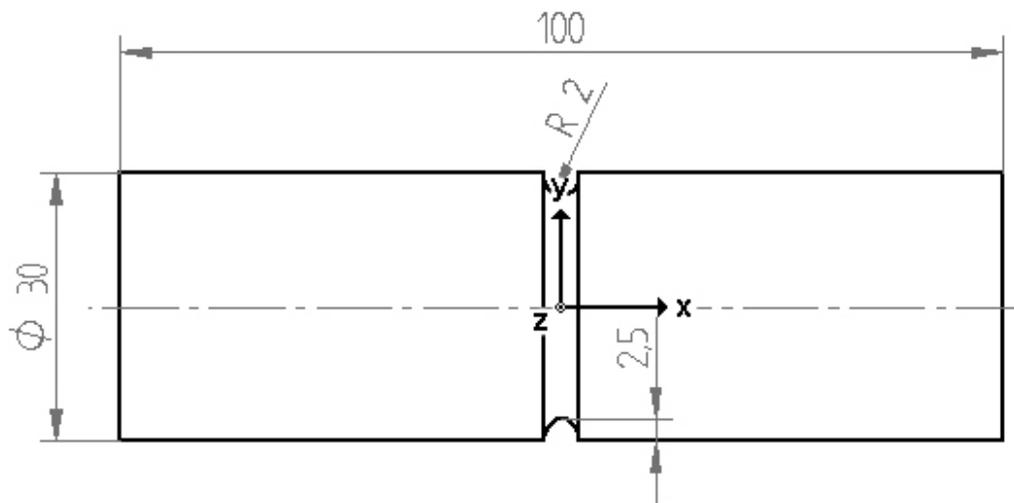
- SOLID45 Element (lineare Formfunktionen) → 8 Knoten, 3 Freiheitsgrade pro Knoten
- SOLID95 Element (quadratische Formfunktionen) → 20 Knoten, 3 Freiheitsgrade pro Knoten

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:

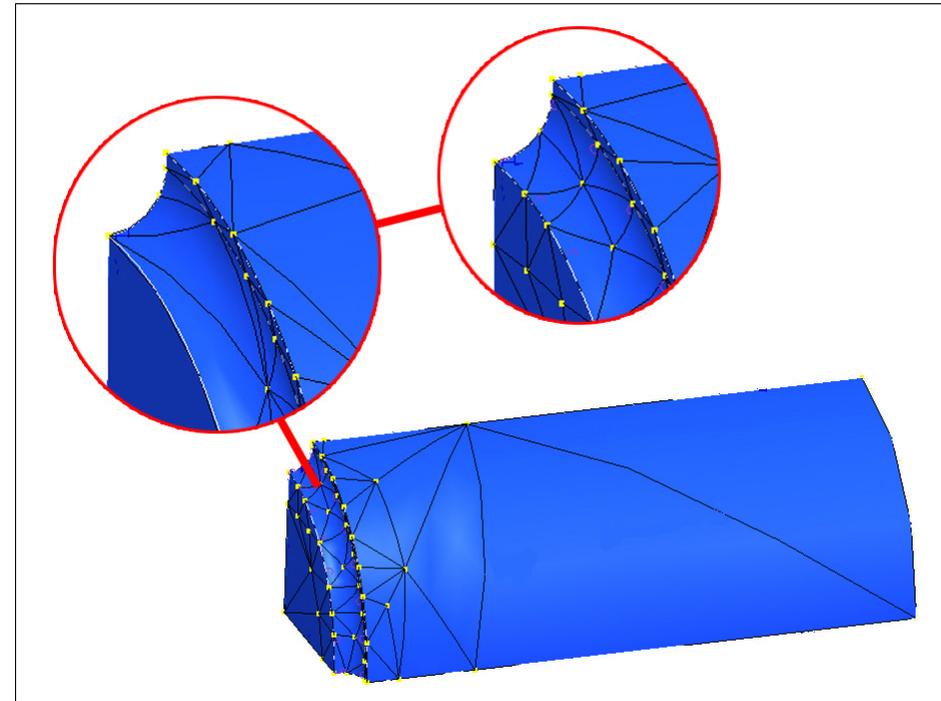
- Max. Elementgröße 40mm (Komponenten)
- Max. Elementgröße 4mm (Fläche)
- Vernetzen mit Tetraederelementen

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)

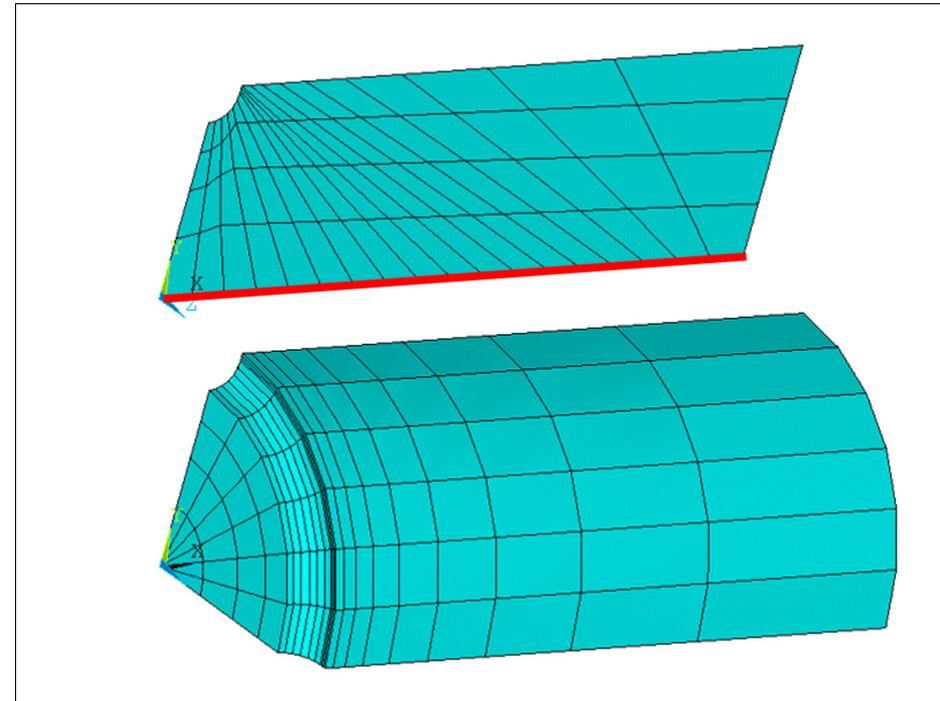
Erstellen des FE-Modells (ANSYS)

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

Elemente	MECHANICA		ANSYS	
	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:

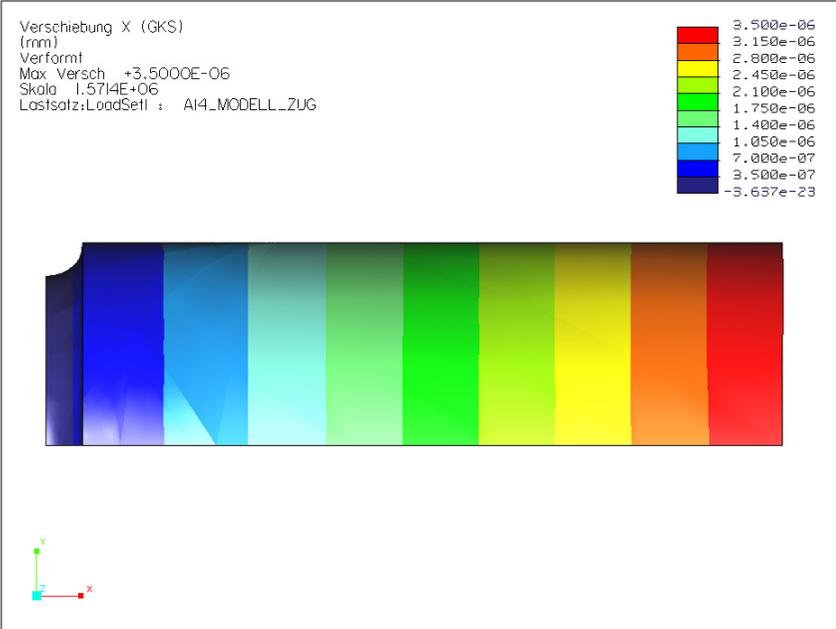
Rel. Abweichung [%]	4,03	3,16	3,16	1,38
---------------------	------	------	------	------

- Geringe Abweichungen der numerischen Lösungen (Verschiebung, Spannung)

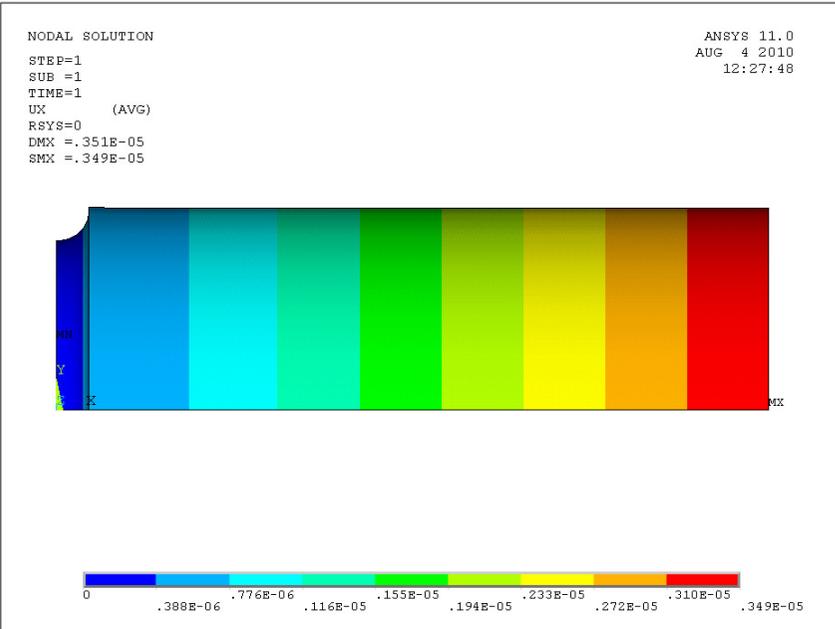


Berechnungsbeispiel (1)

Farbplot der Verschiebung



MECHANICA (AMK)



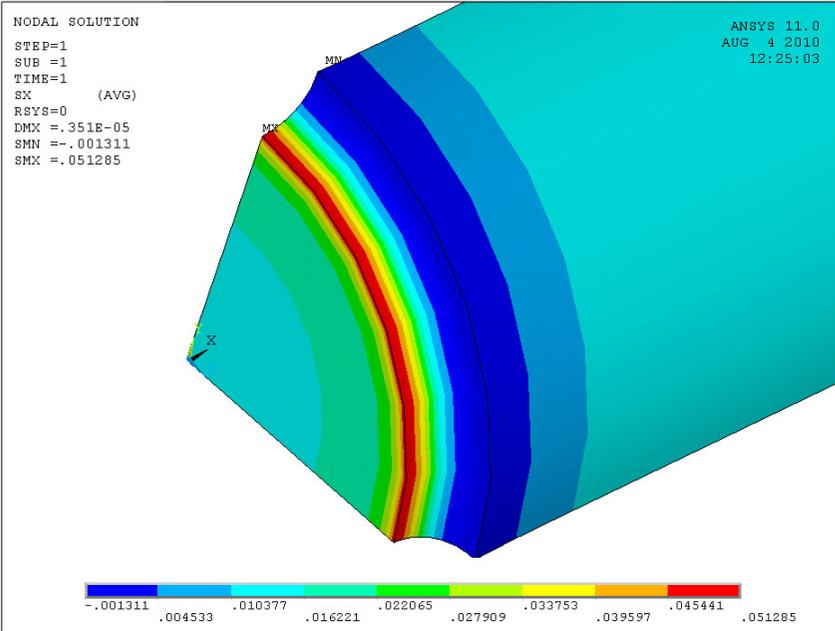
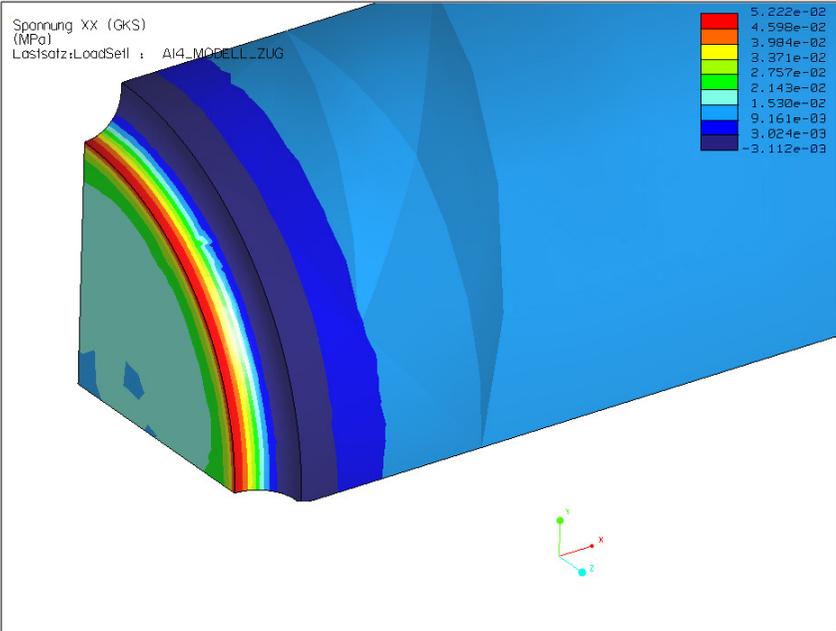
ANSYS (SOLID95)

- Der Verschiebungsverlauf wird von beiden Programmen gleichermaßen dargestellt



Berechnungsbeispiel (1)

Farbplot der Normalspannung

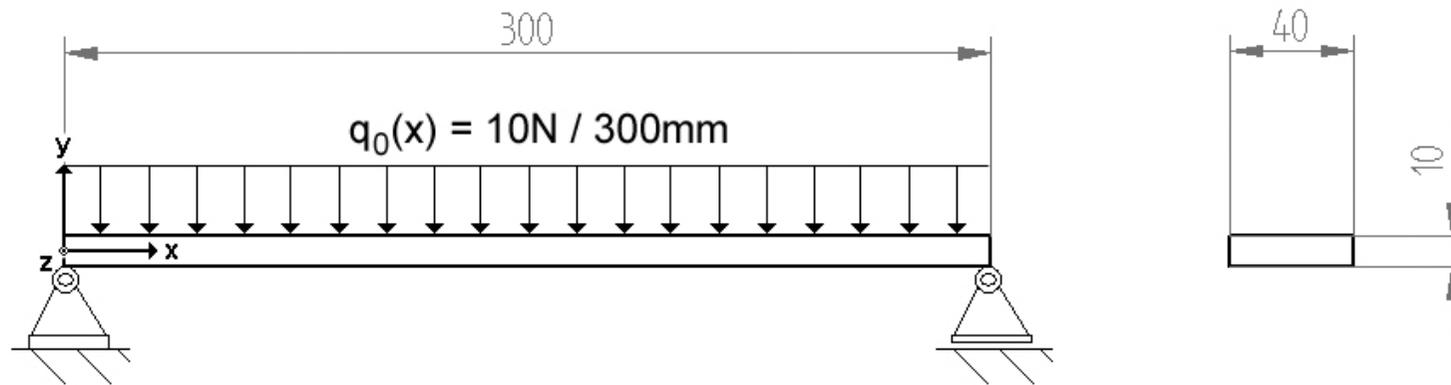


- Gute Übereinstimmung in der Darstellung des Spannungsverlaufs



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:

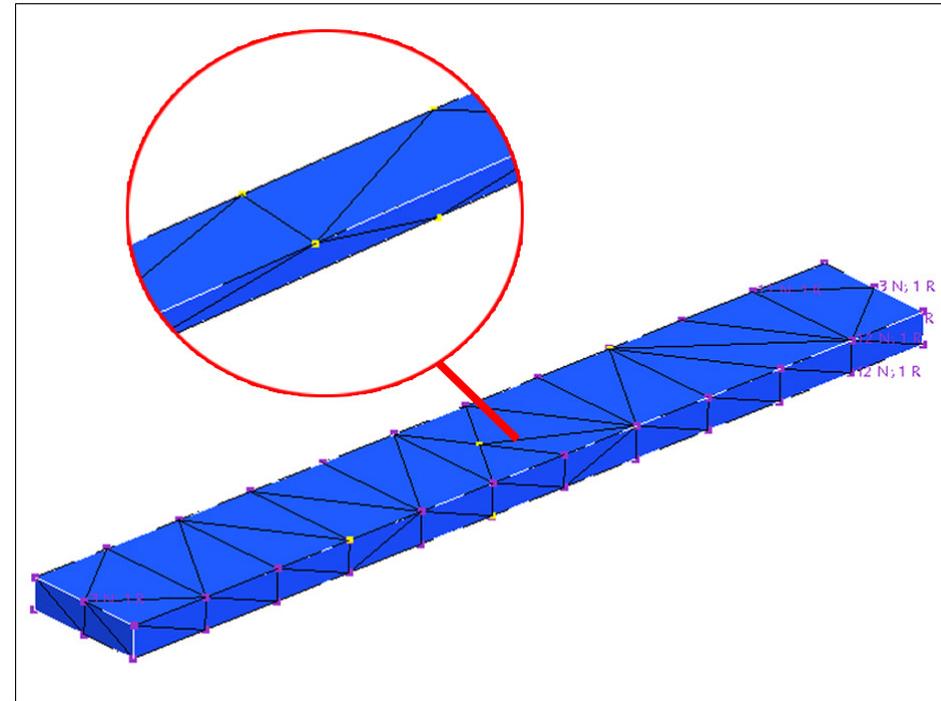
- Kantenverteilung 12 Knoten / Intervall 1,0 (Länge)
- Kantenverteilung 3 Knoten / Intervall 1,0 (Breite)
- Vernetzen mit Tetraederelementen

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

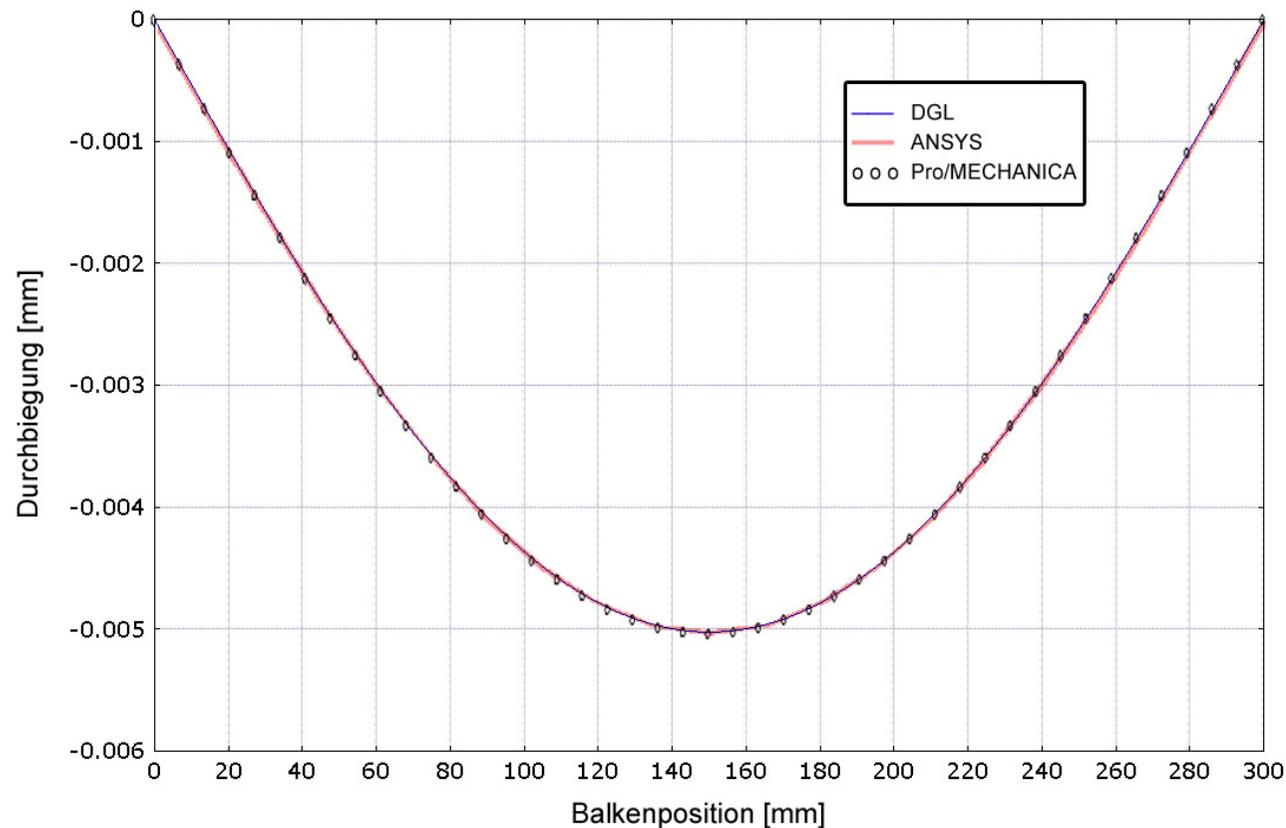


MECHANICA FE-Netz (oben, ohne AutoGEM Vorgaben)



Berechnungsbeispiel (2)

Numerische Ergebnisse (Verschiebung)



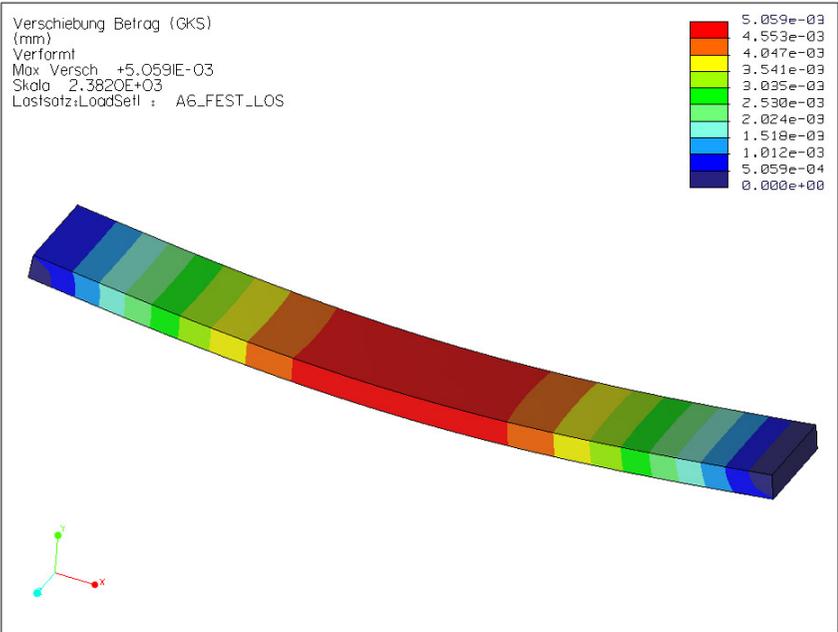
- Rel. Abweichung der numerischen von der analytischen Lösung in der Balkenmitte < 0,6%

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

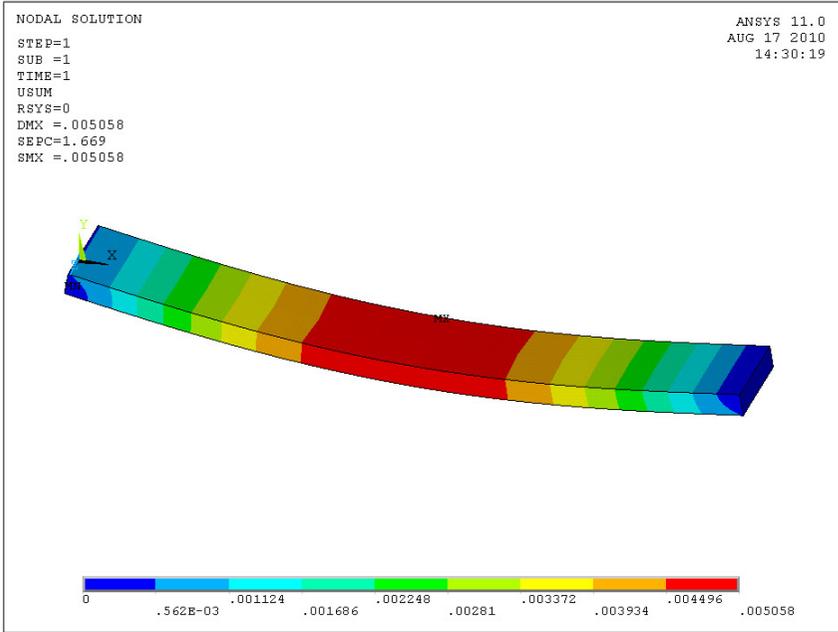


Berechnungsbeispiel (2)

Farbplot der Verschiebung



MECHANICA (AMK)



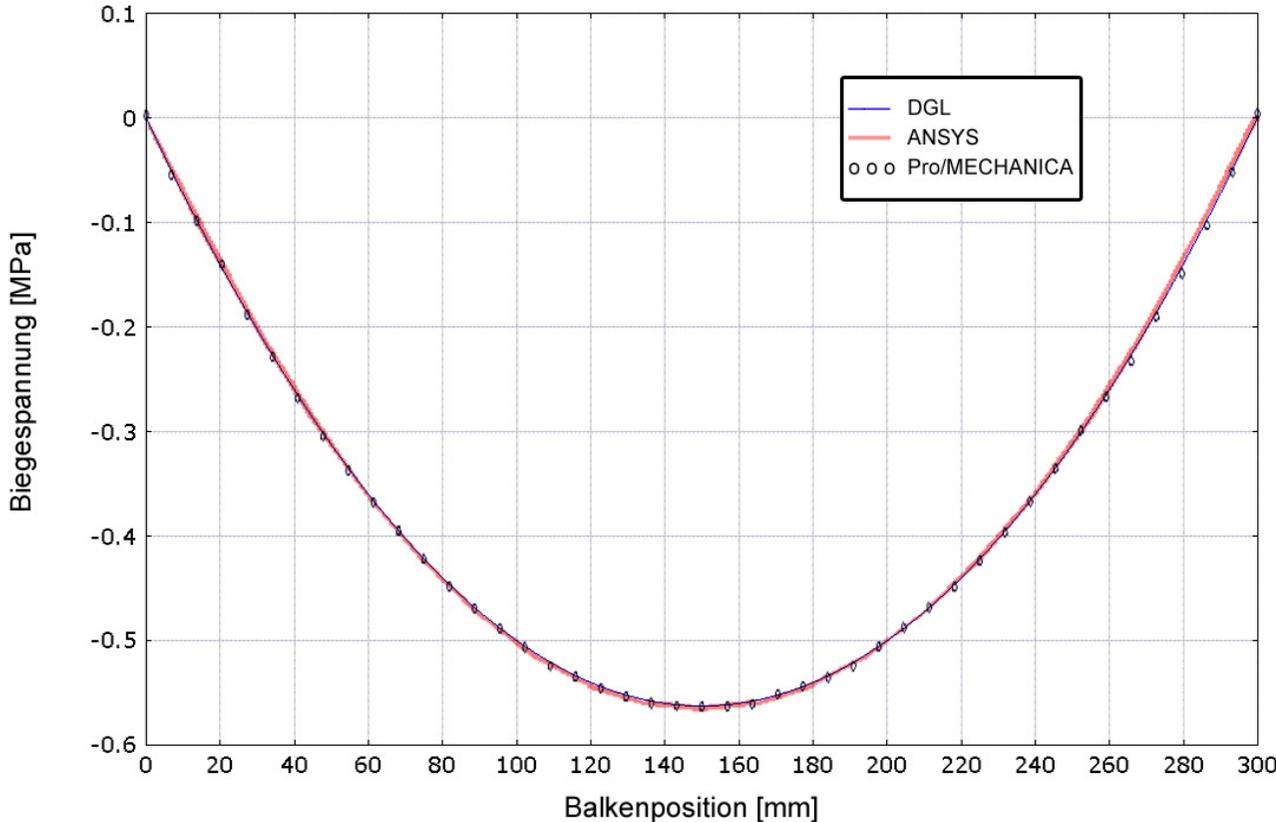
ANSYS (SOLID95)

- Gute Übereinstimmung beider Programme bei der Darstellung des Verschiebungsverlaufs



Berechnungsbeispiel (2)

Numerische Ergebnisse (Biegespannung)



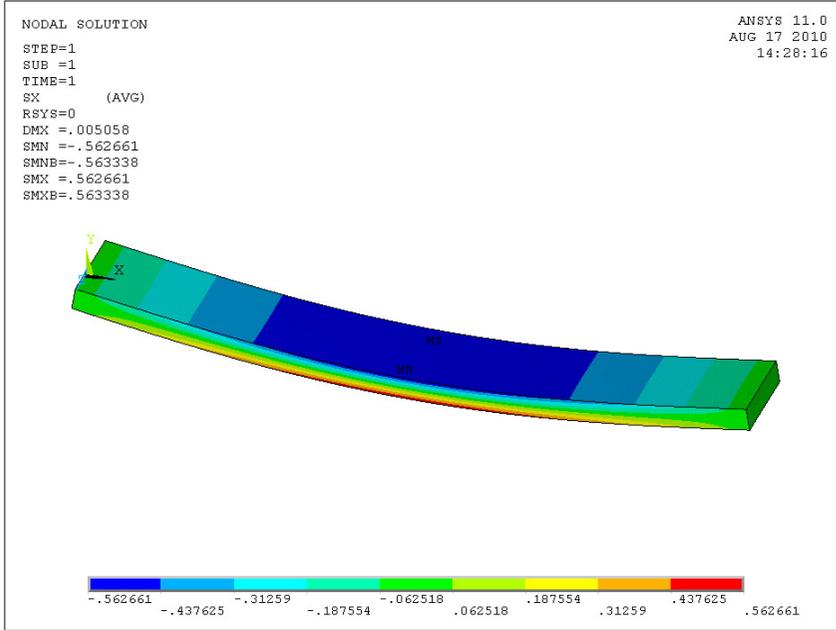
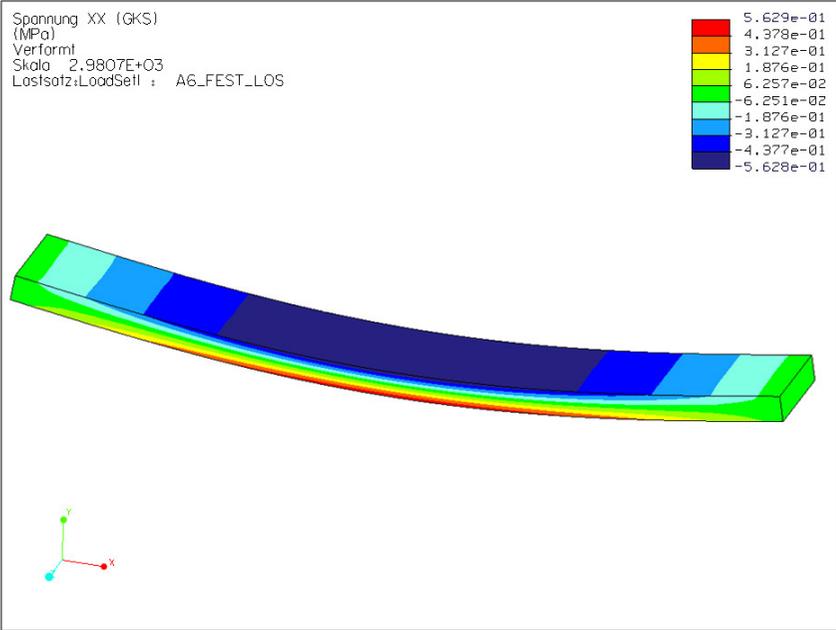
- Numerische und analytische Lösung stimmen in der Balkenmitte exakt überein

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



Berechnungsbeispiel (2)

Farbplot der Biegespannung

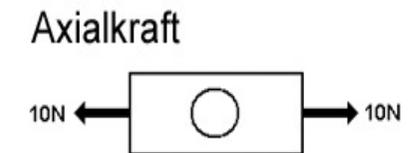
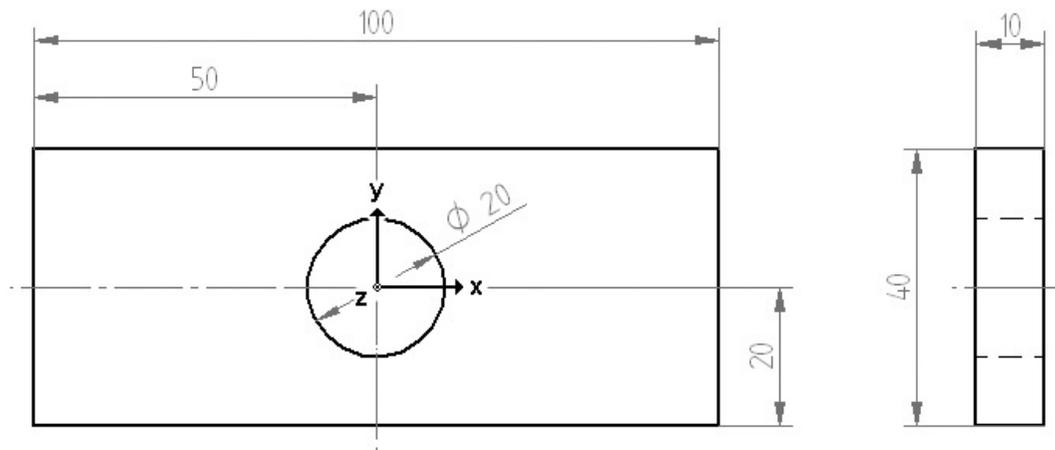


- Gleichwertige Darstellung des Spannungsverlaufs



Berechnungsbeispiel (3)

Platte mit Bohrung



Bauteilgeometrie und Lastfall

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:

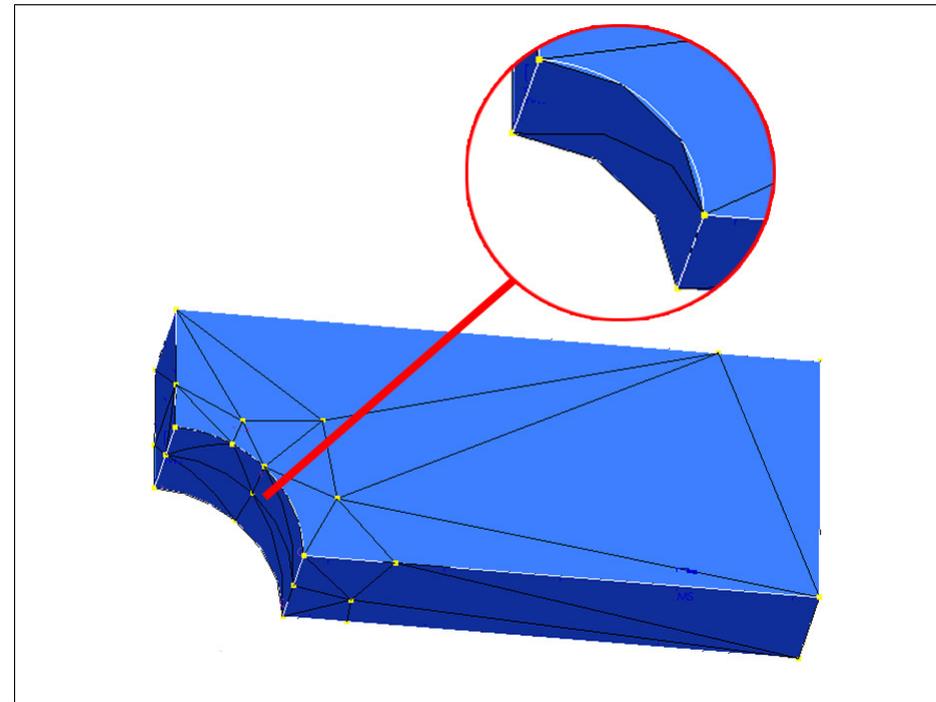
- Max. Elementgröße 8mm (Fläche)
- Vernetzen mit Tetraederelementen

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)

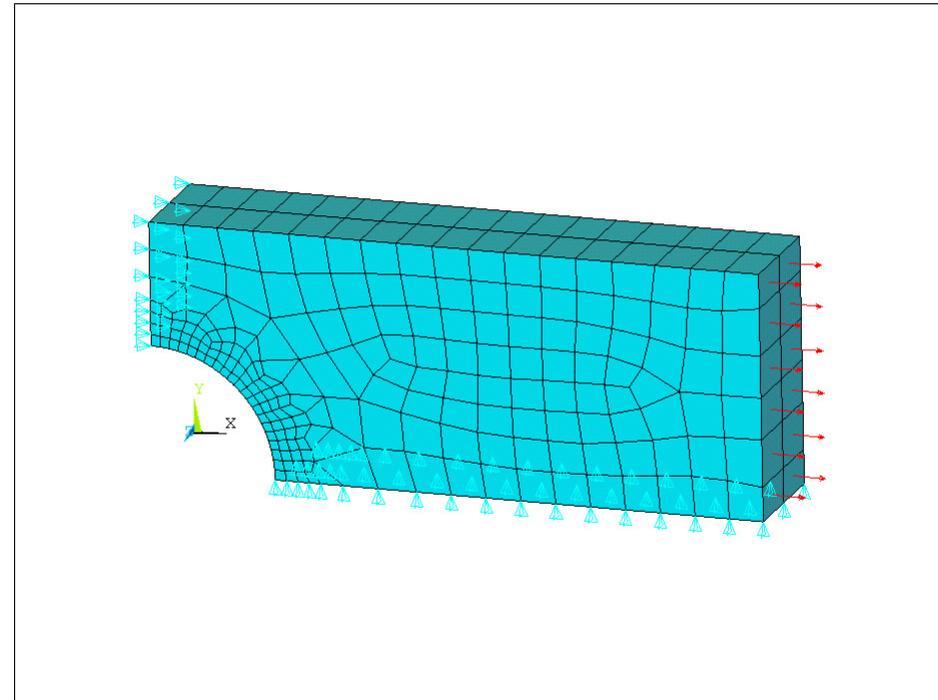
Erstellen des FE-Modells (ANSYS)

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

Elemente	MECHANICA		ANSYS	
	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 → 0,108 MPa

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

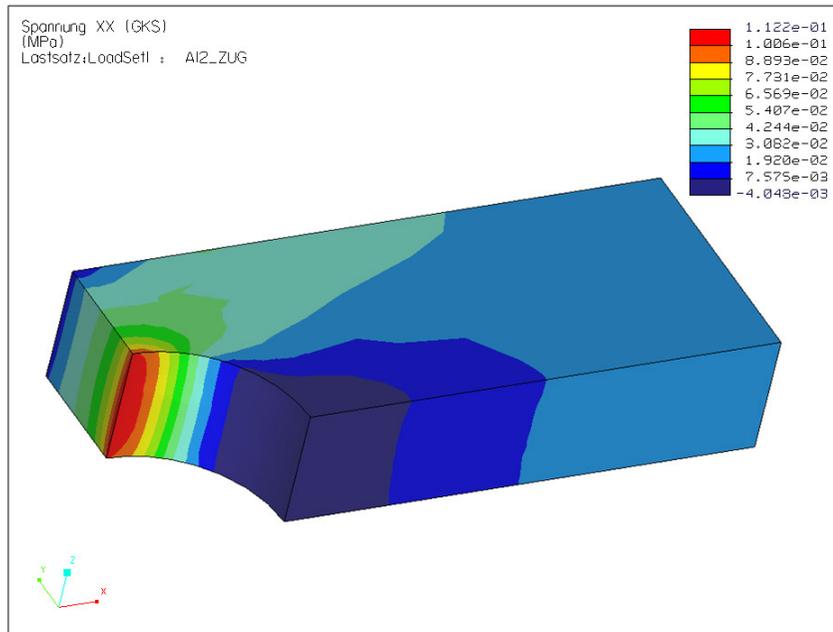
Rel. Abweichung [%]	2,78	3,70	3,70	4,63
---------------------	------	------	------	------

- Geringe Abweichungen der numerischen Lösungen (Verschiebung, Spannung)

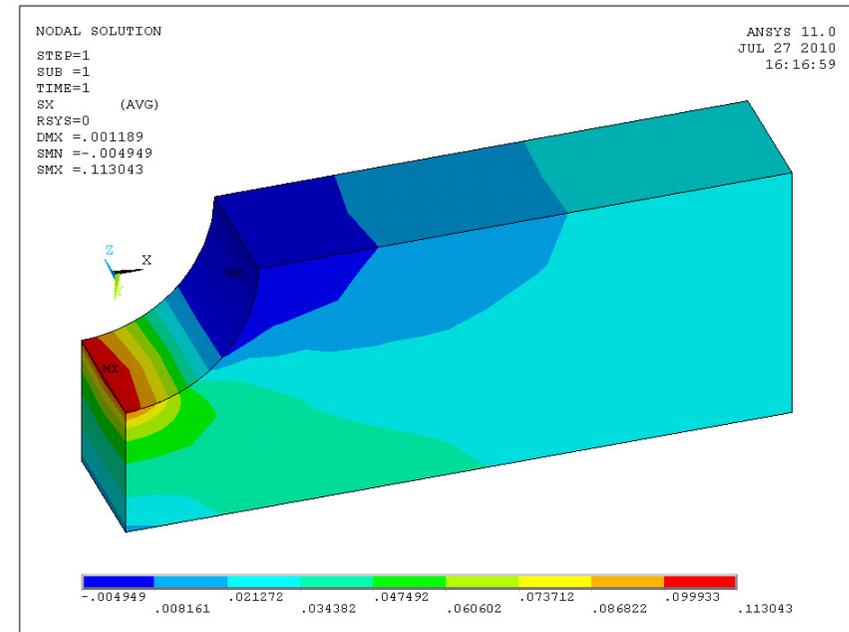


Berechnungsbeispiel (3)

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	2,54	3,36	2,46

7 Analysen	MECHANICA		ANSYS	
Elemente	Schalen (AEK)	Schalen (AMK)	PLANE42	PLANE82
Ø Abweichung [%]	1,16	1,14	1,14	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	67,8	58,6	146,1

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

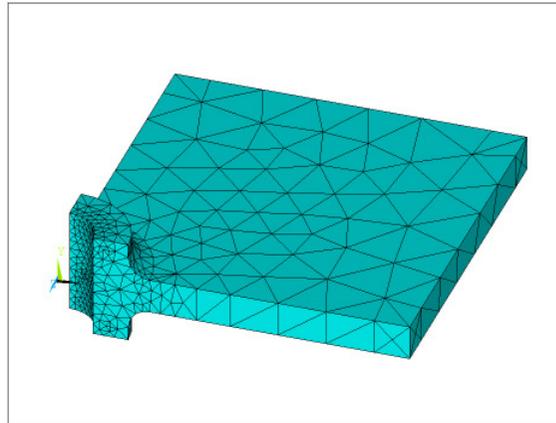
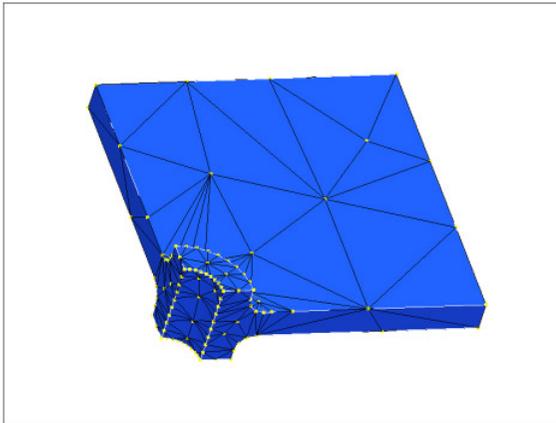
- Kurze Einarbeitungsdauer (Übersichtliche Bedienoberfläche, Icon Basiert)
- Zügiges Arbeiten möglich (Preprocessing → Integration in CAD Programm)
- Unkomplizierte Bedienung z.B. beim Aufbringen von Momenten (Gesamtlast auf Punkt)

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. Bundaynas;
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