



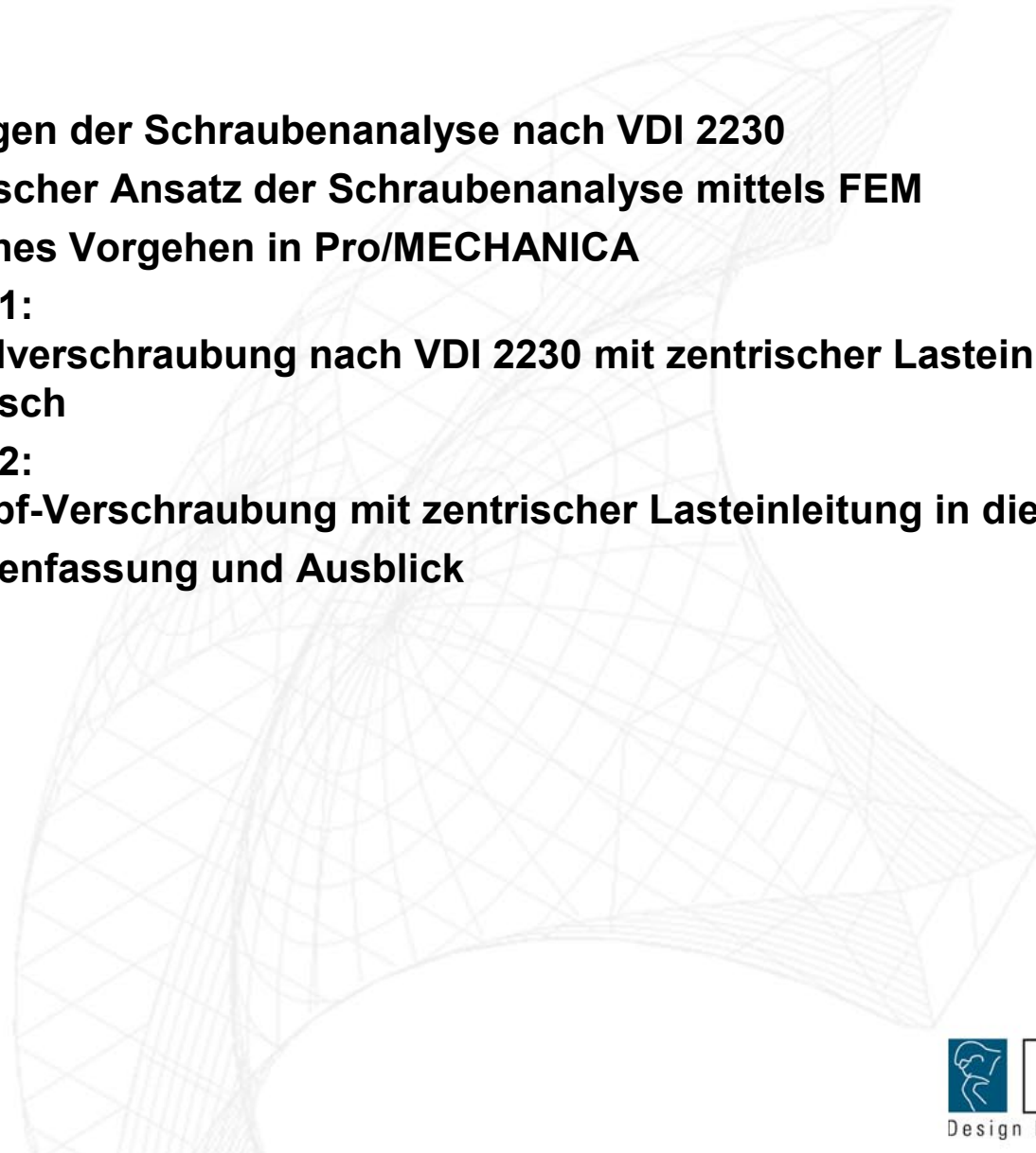
Kontaktanalyse vorgespannter Schraubverbindungen

Dr. Roland Jakel
DENC AG Langenfeld



Inhalt

- **Grundlagen der Schraubenanalyse nach VDI 2230**
- **Theoretischer Ansatz der Schraubenanalyse mittels FEM**
- **Praktisches Vorgehen in Pro/MECHANICA**
- **Beispiel 1:**
Standardverschraubung nach VDI 2230 mit zentrischer Lasteinleitung in den Flansch
- **Beispiel 2:**
Gabelkopf-Verschraubung mit zentrischer Lasteinleitung in die Schraube
- **Zusammenfassung und Ausblick**





Grundlagen der VDI 2230

Standard – Rechenschritte nach VDI 2230:

„Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen“

- **R1: Vordimensionierung**
- **R2: Wahl des Anzugsverfahrens**
- **R3: Bestimmung der erforderlichen Mindestklemmkraft**
- **R4: Ermittlung des Kraftverhältnisses ϕ_n**
- **R5: Bestimmung des Vorspannkraftverlustes durch Setzen**
- **R6: Bestimmung der erforderlichen Schraubengröße/
Festigkeitsklasse (Hauptdimensionierungsformel)**
- **R7: Bei notwendiger Iteration: Wiederholung von R4 bis R6**
- **R8: Prüfung auf Einhaltung der max. zulässigen Schraubenkraft**
- **R9: Ermittlung der Dauerschwingbeanspruchung**
- **R10: Berechnung der Flächenpressung unter Kopf/Mutter**



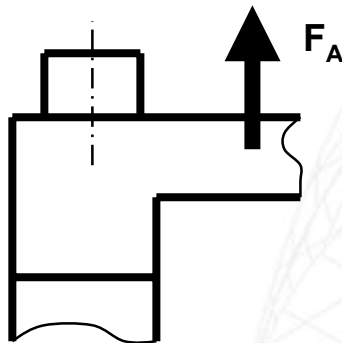
Grundlagen der VDI 2230

- **Hauptdimensionierungsformel nach VDI 2230:**

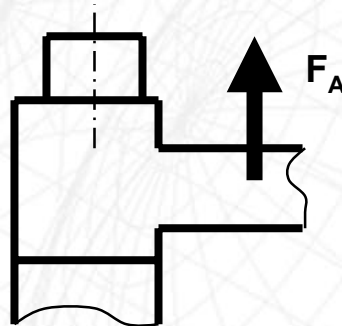
$$F_{Mmax} = \alpha_A \cdot F_{Mmin} = \alpha_A \cdot [F_{Kerf} + (1 - \phi_n) F_A + F_Z]$$

mit Kraftverhältnis $\phi_n = n \cdot \phi_k = n \cdot \delta_p / (\delta_s + \delta_p)$

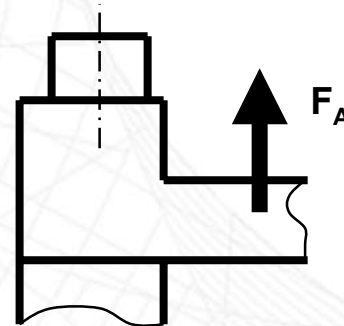
- **Richtwerte zur Bestimmung von n:**



n=0,7



n=0,5



n=0,3



Theoretischer Ansatz der Schraubenanalyse mittels FEM

■ Hauptprobleme in der Auslegung sind:

- Unbekannte Reibzahlen → hier hilft FEM nicht!
- Unbekanntes Kraftverhältnis ϕ_n → hier hilft FEM!

■ Bestimmung des Kraftverhältnisses ϕ_n mittels FEM:

- Eine Kontaktanalyse ohne Betriebskraft zur „Justierung“ der Montagevorspannkraft (iterativ; globale Sensitivität)
- Eine Kontaktanalyse mit zusätzlicher Betriebskraft zur Bestimmung der gesamten Schraubenkraft
- Damit wird das Kraftverhältnis ϕ_n :

$$\frac{\text{Gesamte Schraubenkraft} - \text{Montagevorspannkraft}}{\text{Betriebskraft}}$$



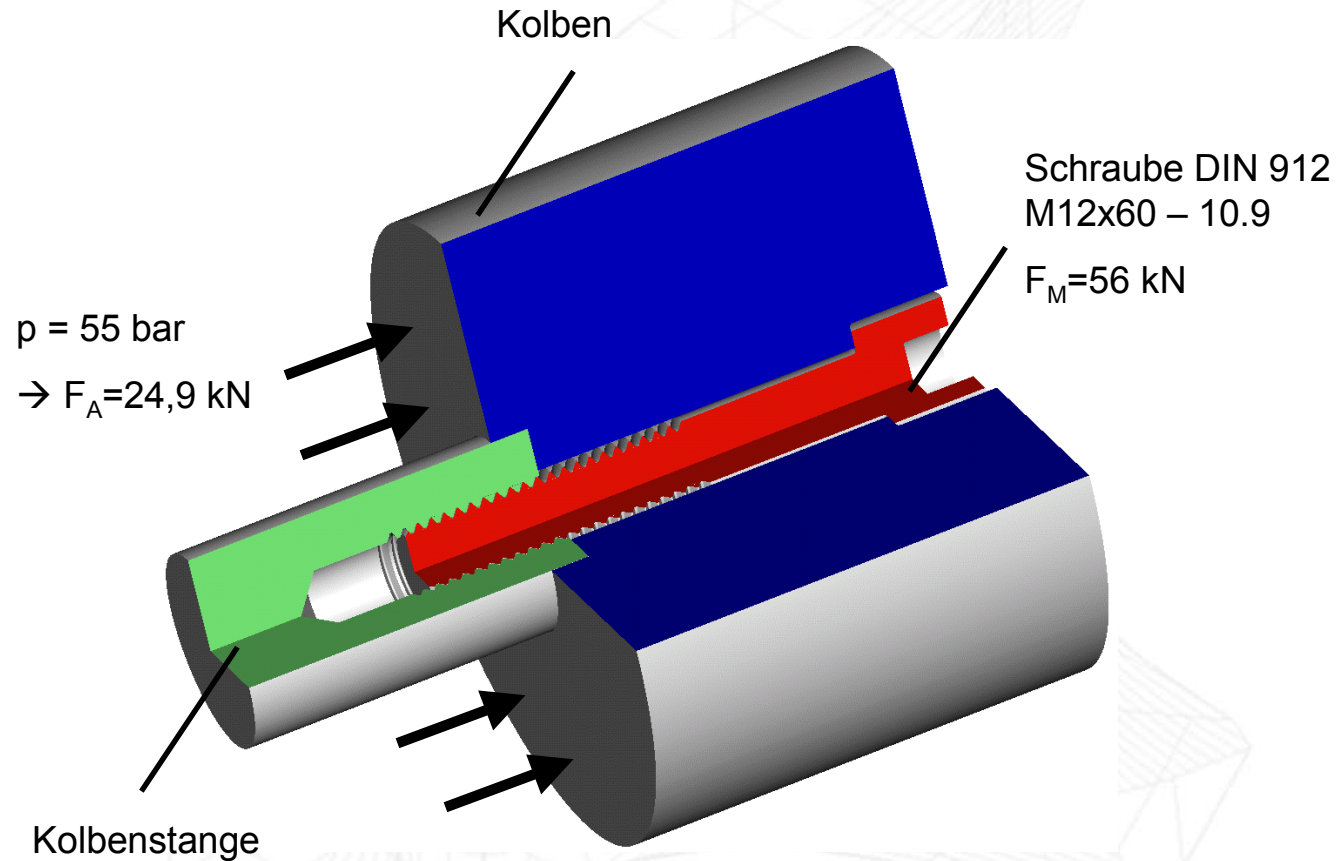
Praktisches Vorgehen in Pro/MECHANICA

- **Modellierung der Verschraubungsgeometrie in Pro/E mit Spalten; dabei Ausnutzung von Axialsymmetrien, falls möglich**
- **Definition der Materialien, Randbedingen, Kontaktstellen**
- **Definition von Messinstrumenten für mittlere Flächenpressung und Kontaktfläche unter dem Schraubenkopf zur Bestimmung der Schraubenlast**
- **Übergabe nach Pro/MECHANICA Standalone und Vernetzung**
- **Definition einer Designvariable zur „Vor-Durchdringung“ (z.B. Verschiebung Schraubenkopffläche) → Vorspannung!**
- **Globale Sensitivitätsstudie zur Vorspannungseinstellung ohne Betriebslast**
- **Standard-Kontaktanalyse mit Betriebslast**
- **Konvergenzprüfung**



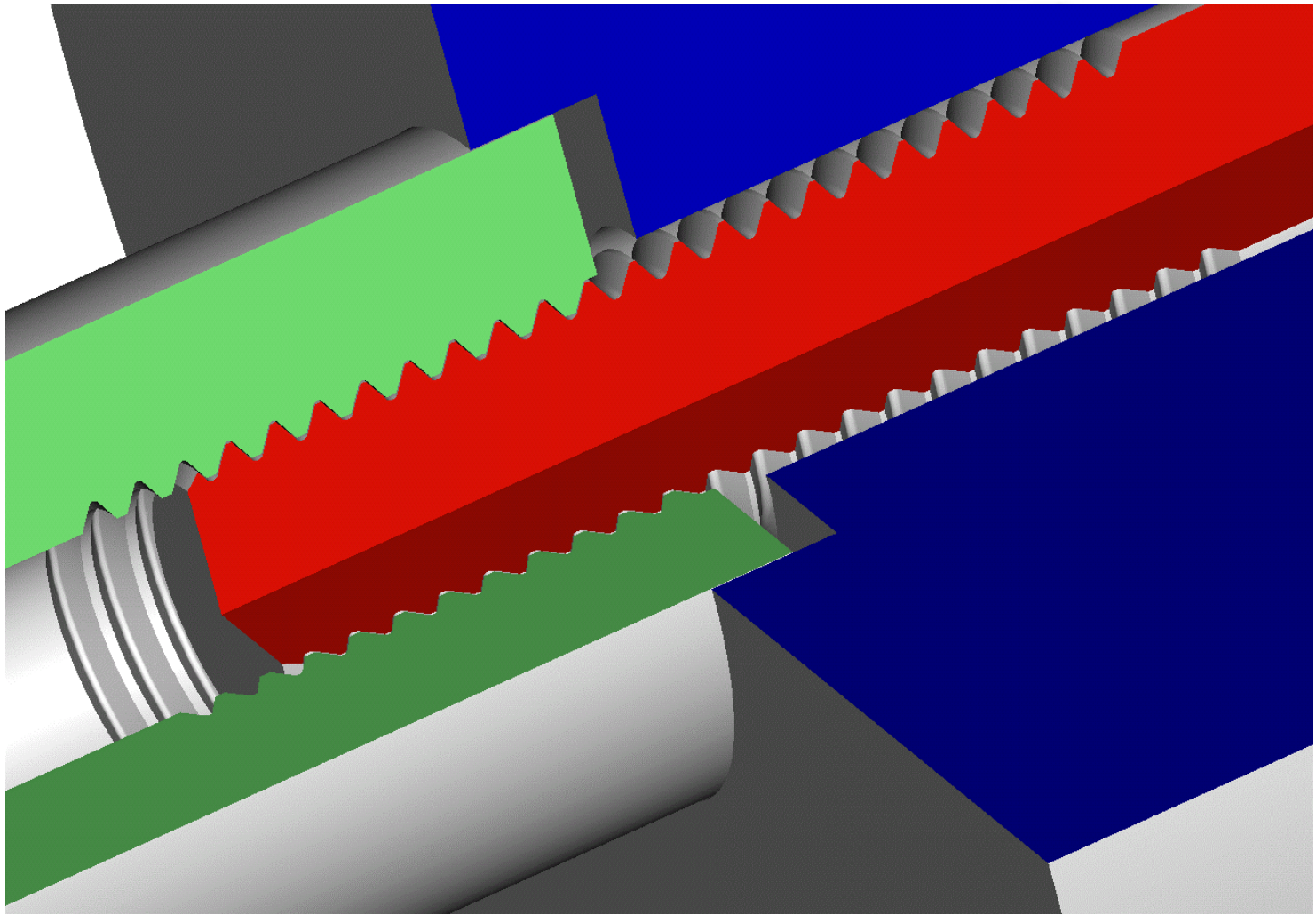
Beispiel 1 – Pro/ENGINEER Modell

- Standardverschraubung mit zentrischer Lasteinleitung in den Flansch (VDI 2230, Beispiel 6.1)



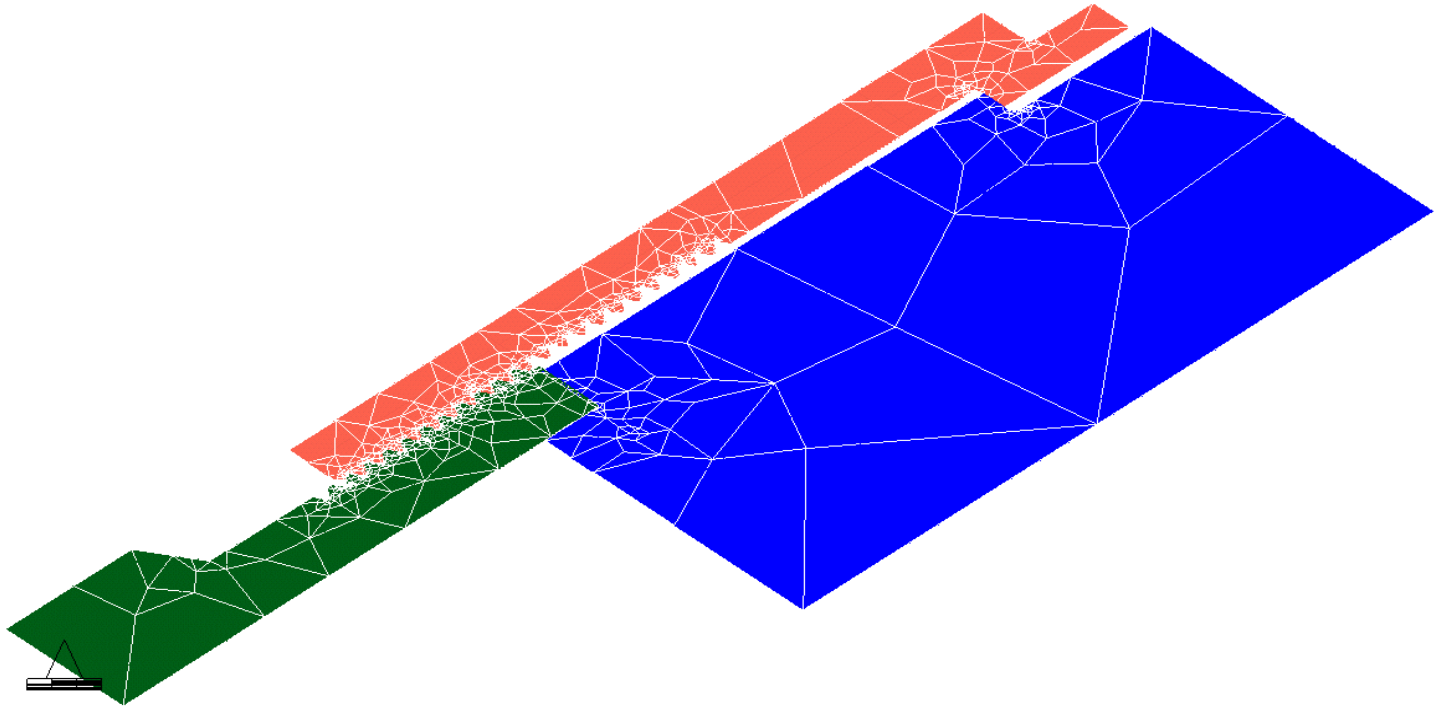


Beispiel 1 - Modellspalte



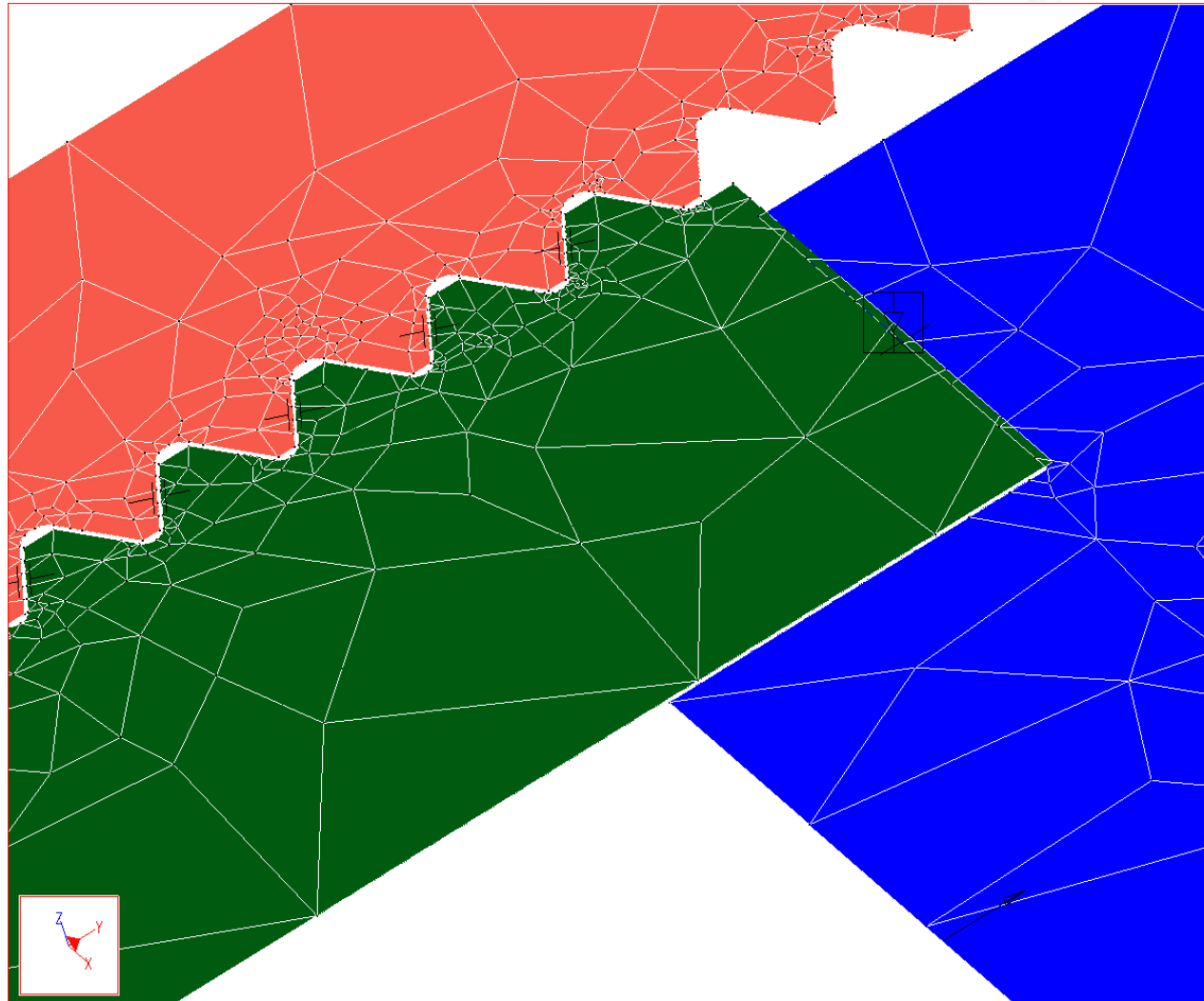


Beispiel 1 – Pro/MECHANICA Modell





Beispiel 1 – Kontaktbereiche/Designvariablen





Beispiel 1 - Vorspannungsjustierung

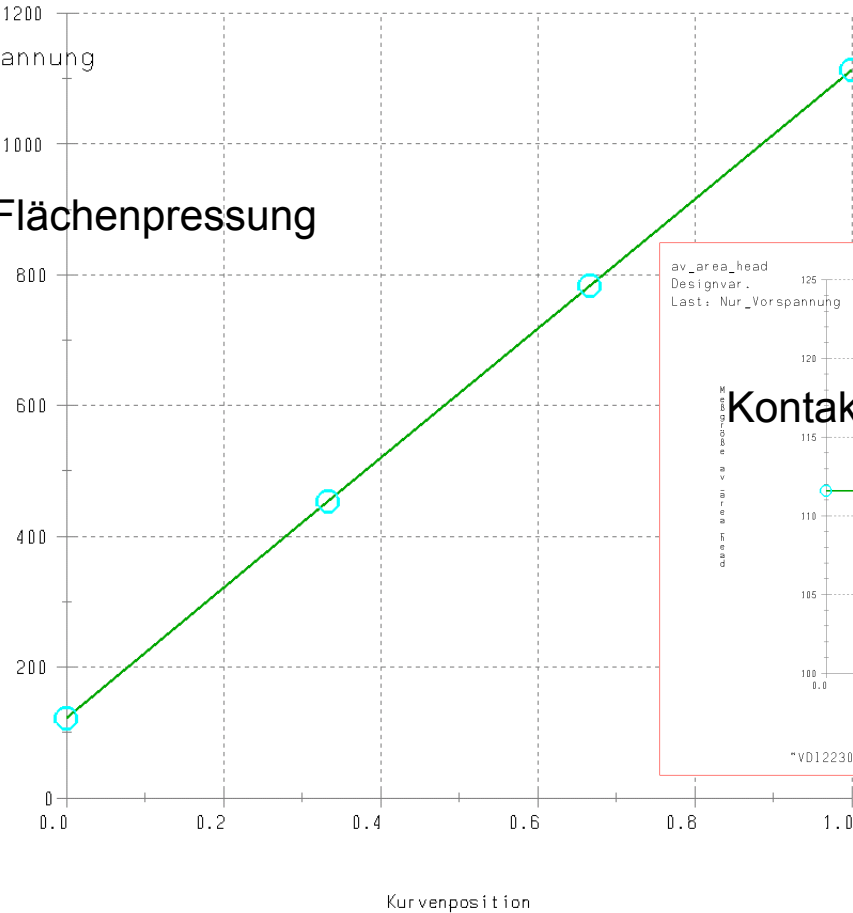
av_press_head

Designvar.

Last: Nur_Vorspannung

av_press_head

Flächenpressung



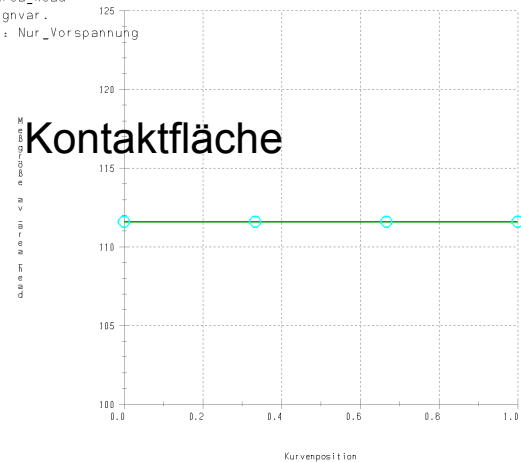
"VD12230_C" - Vorspannung_Def - Vorspannung_Ist

av_area_head

Designvar.

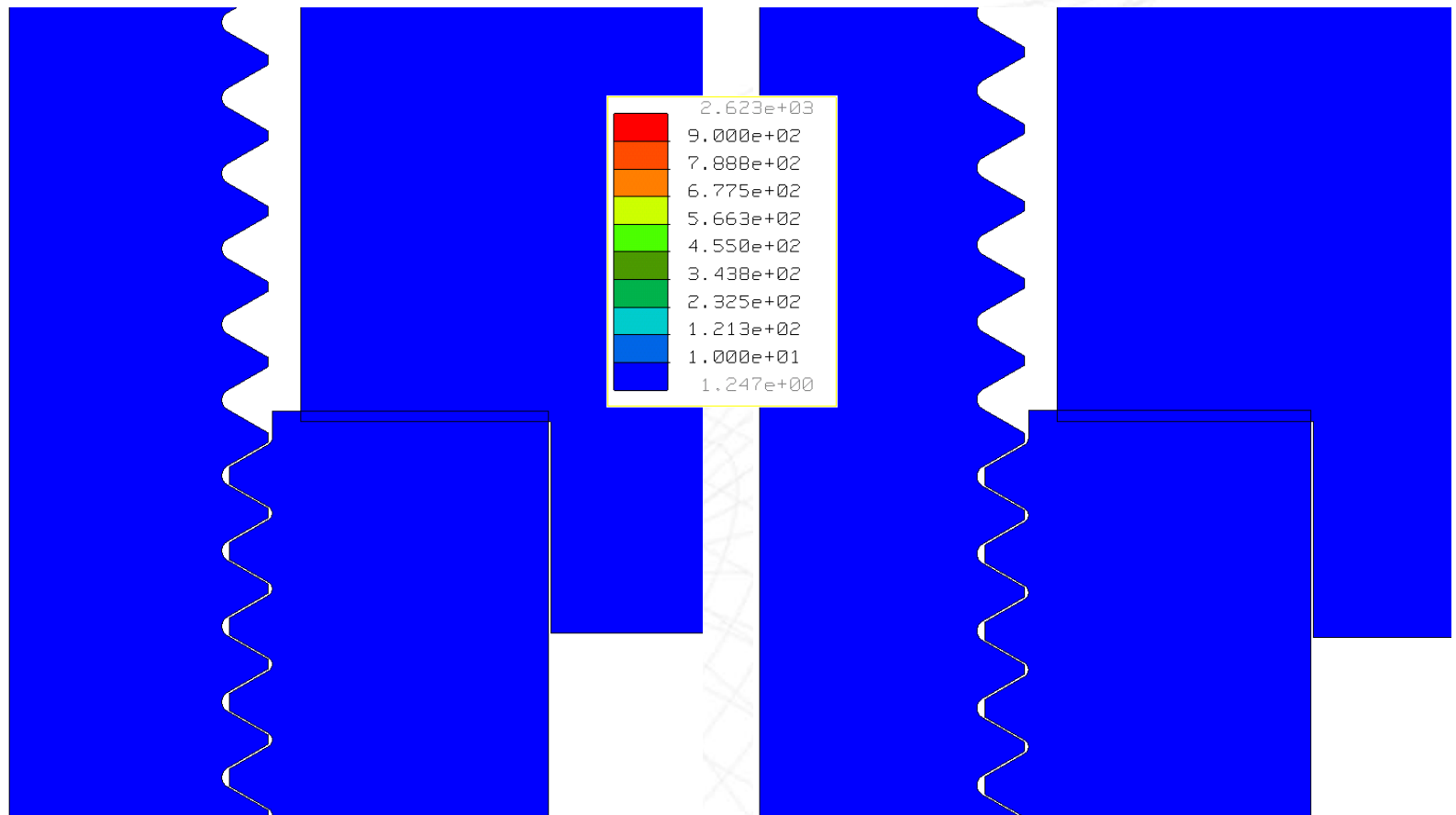
Last: Nur_Vorspannung

Kontaktfläche



"VD12230_D" - Vorspannung_Def - Vorspannung_Ist

Beispiel 1 – Spannungen nach von Mises



nur vorgespannt

mit Betriebslast



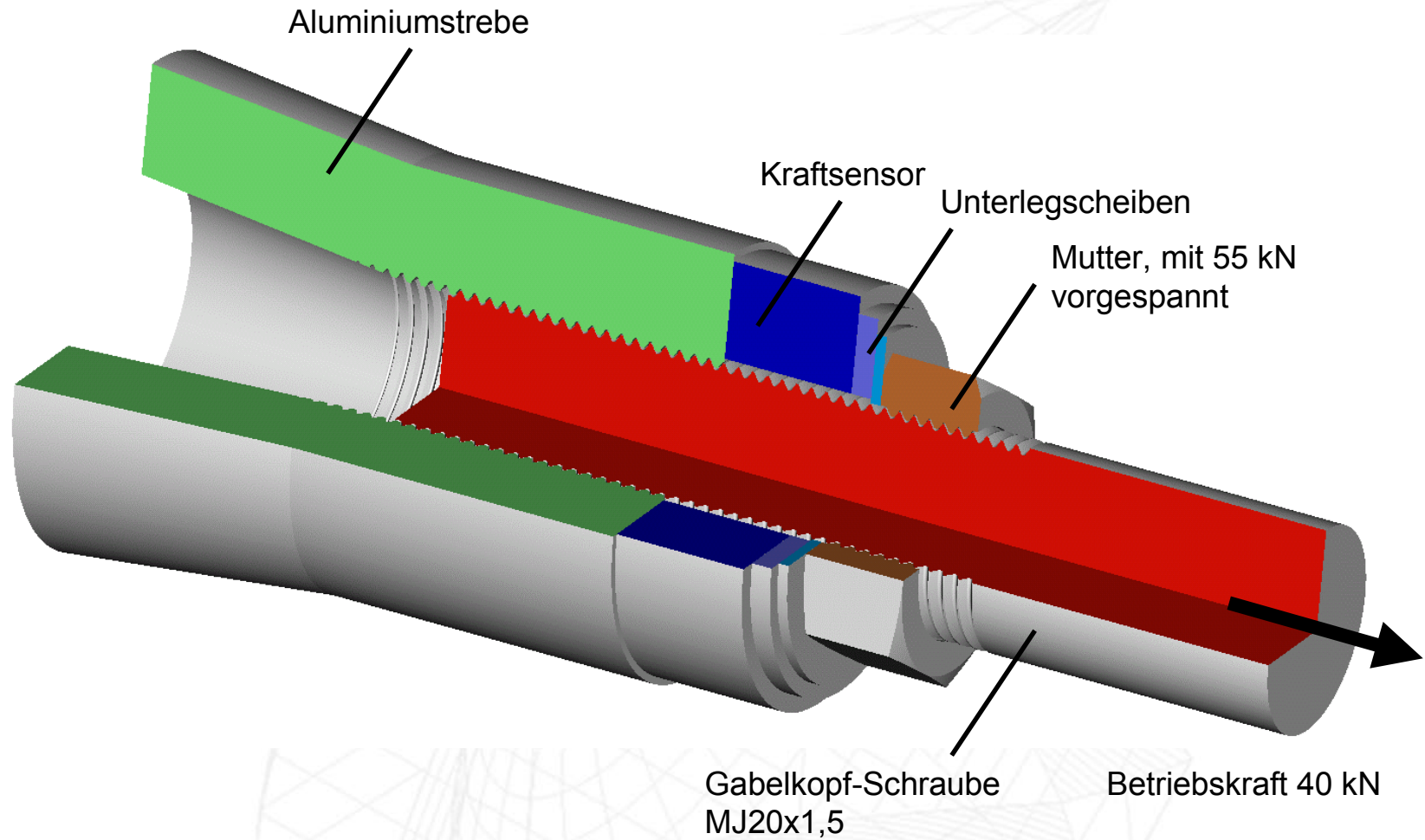
Beispiel 1 – Vergleich Analyse / FEM

■ Vergleich VDI-Analyse und Pro/MECHANICA:

	VDI 2230	FEM
Gewählte Vorspannkraft	56 kN	55,9 kN
Betriebskraft	24,9 kN	24,9 kN
Kraftverhältnis ϕ_k	0,115	-
n-Wert (geschätzt!)	0,3	-
Reales Kraftverhältnis ϕ_n	0,035	0,086
Zusatzkraft auf Schraube	0,87 kN	2,1 kN
Gesamte Schraubenlast	56,9 kN	58,0 kN

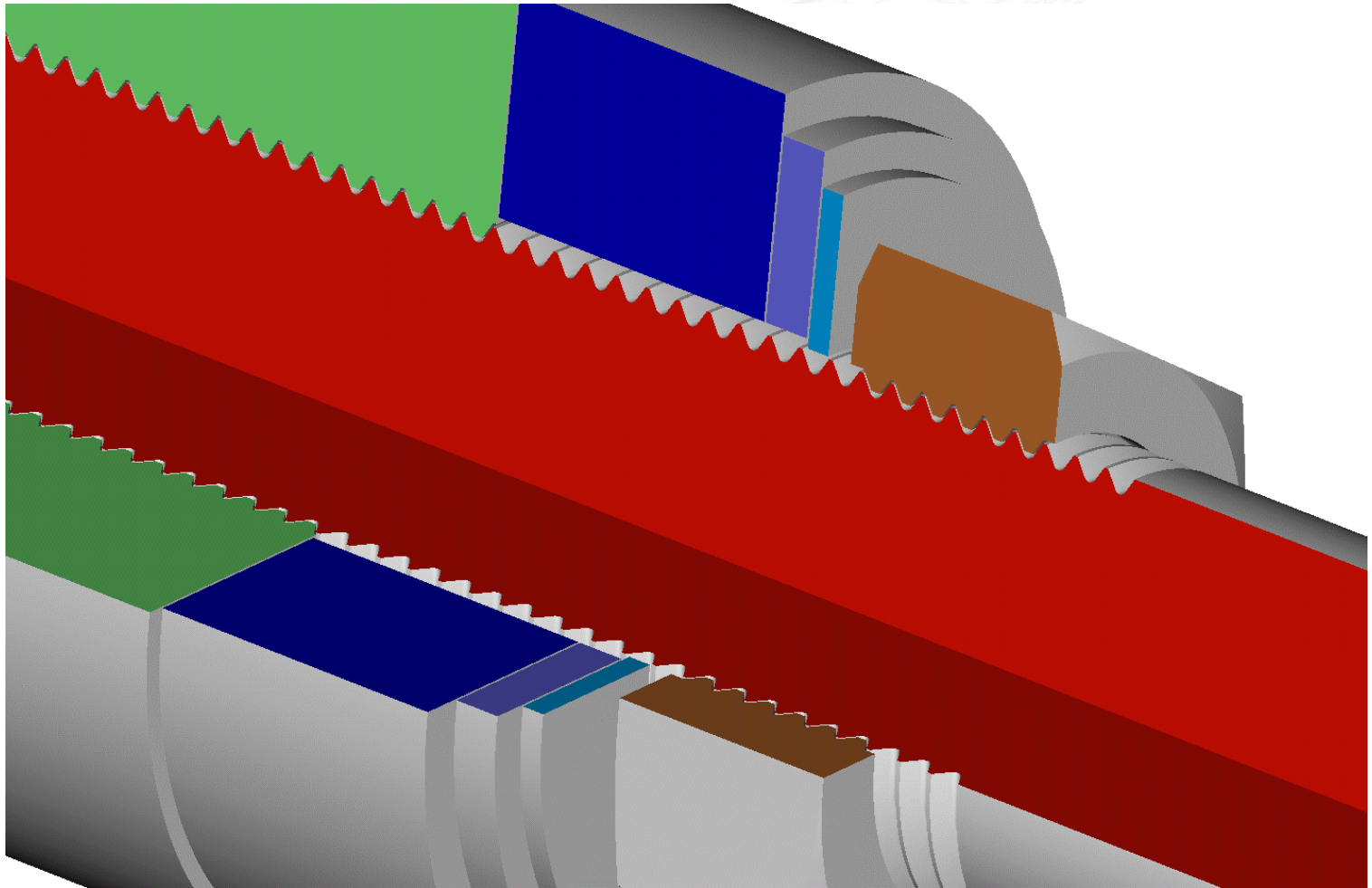


Beispiel 2 – Pro/ENGINEER Modell

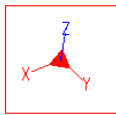
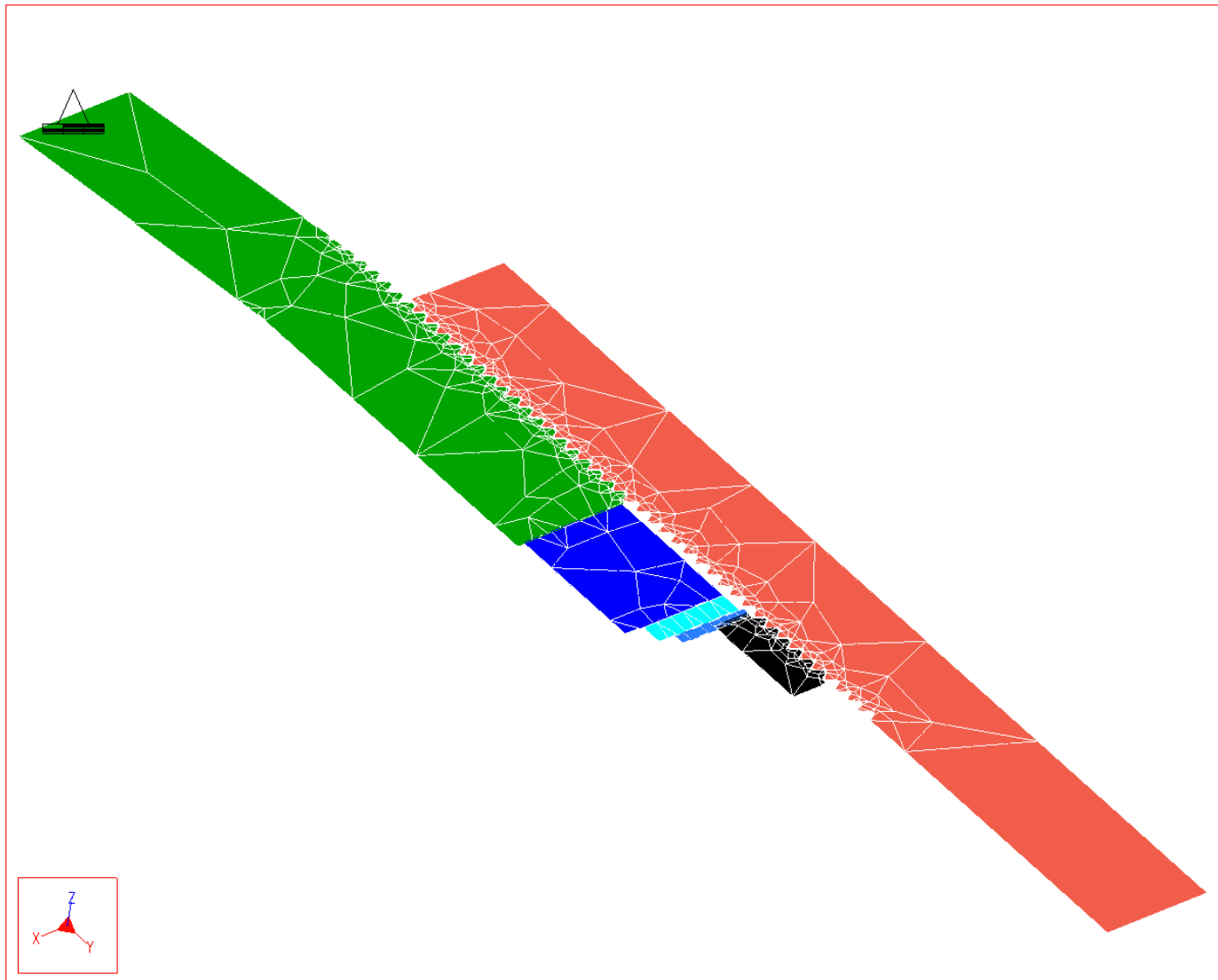




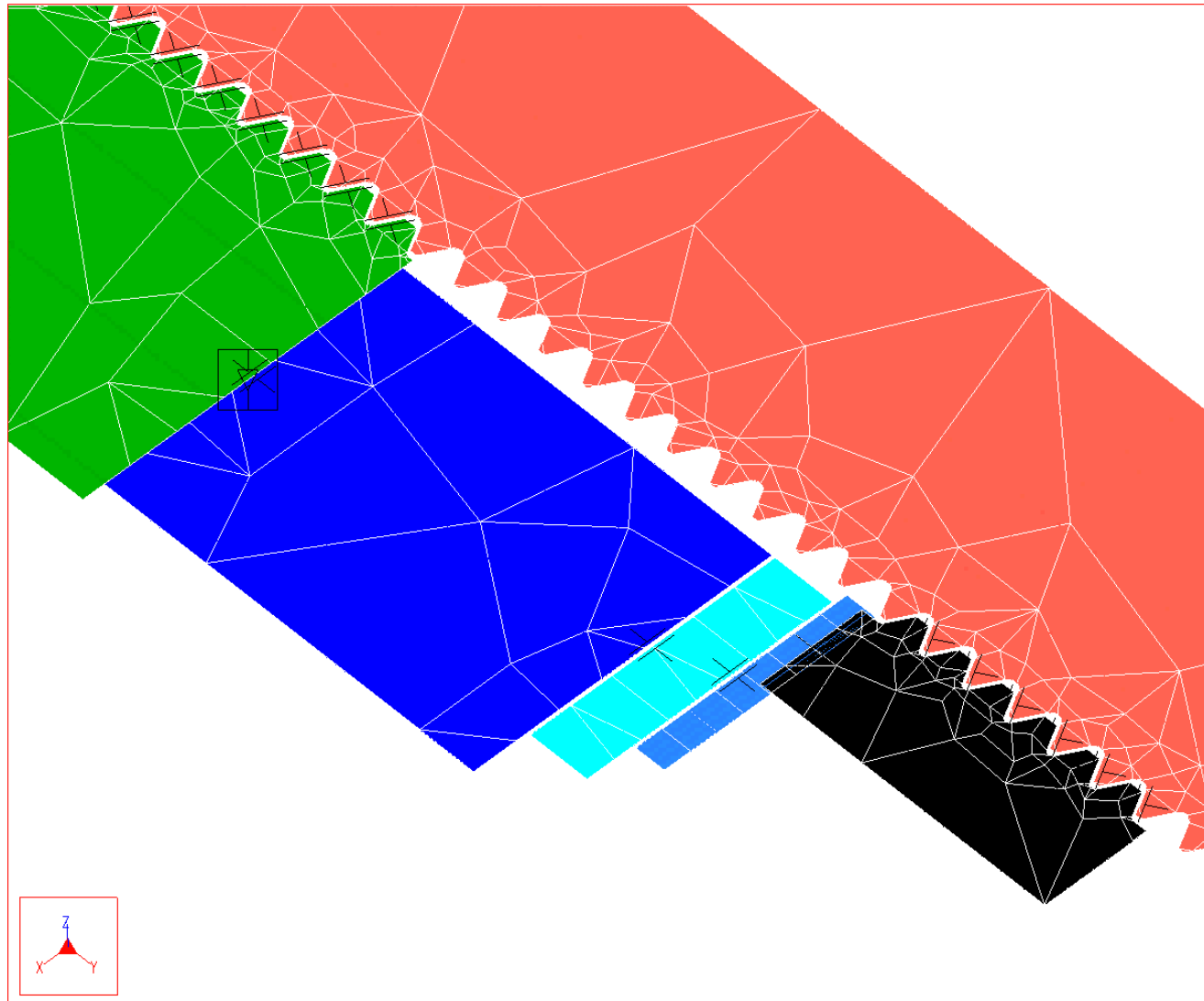
Beispiel 2 - Modellspalte



Beispiel 2 – Pro/MECHANICA Modell



Beispiel 2 – Kontaktbereiche/Designvariablen





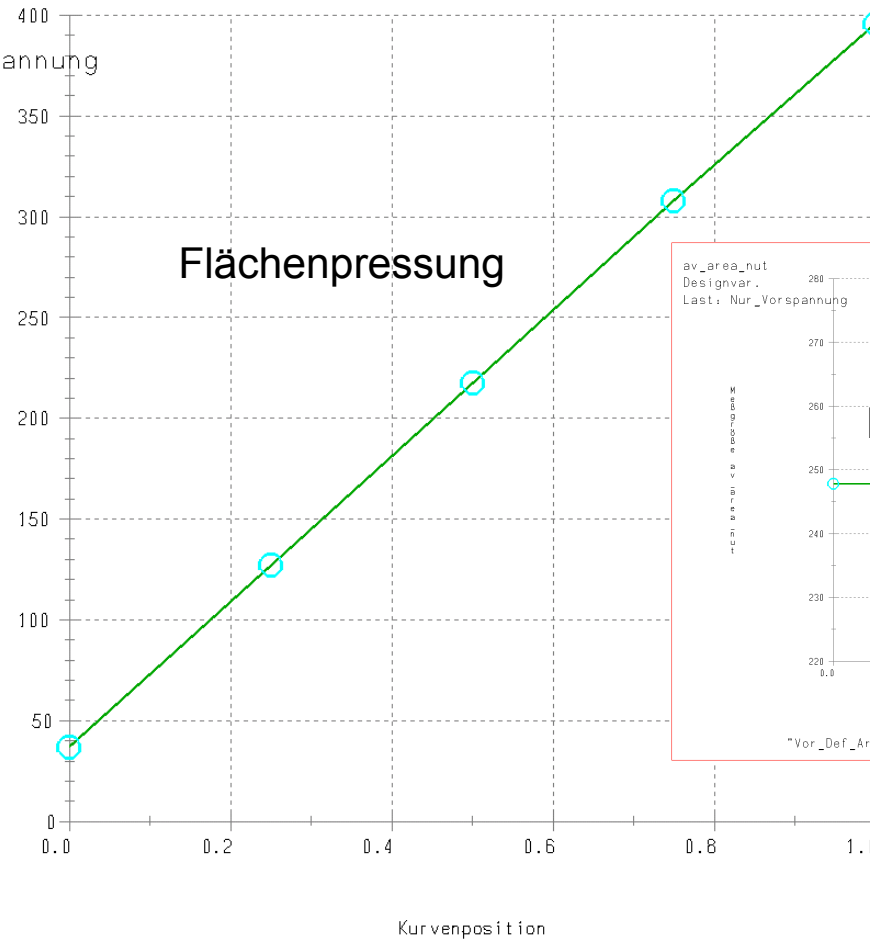
Beispiel 2 - Vorspannungsjustierung

av_press_nut

Designvar.

Last: Nur_Vorspannung

Messgröße
av_press_nut



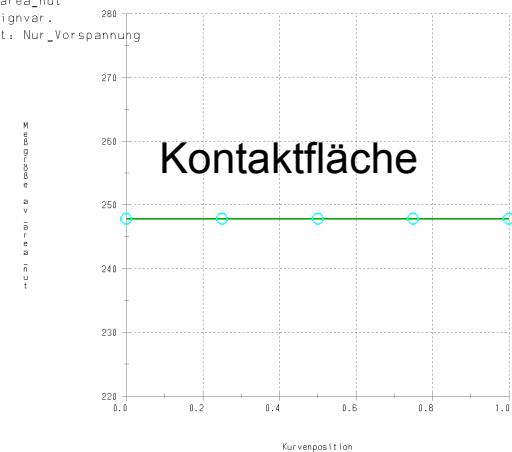
"Vor_Def_Press" - Vorspannung_Def - Vorspannung_Ist

av_area_nut

Designvar.

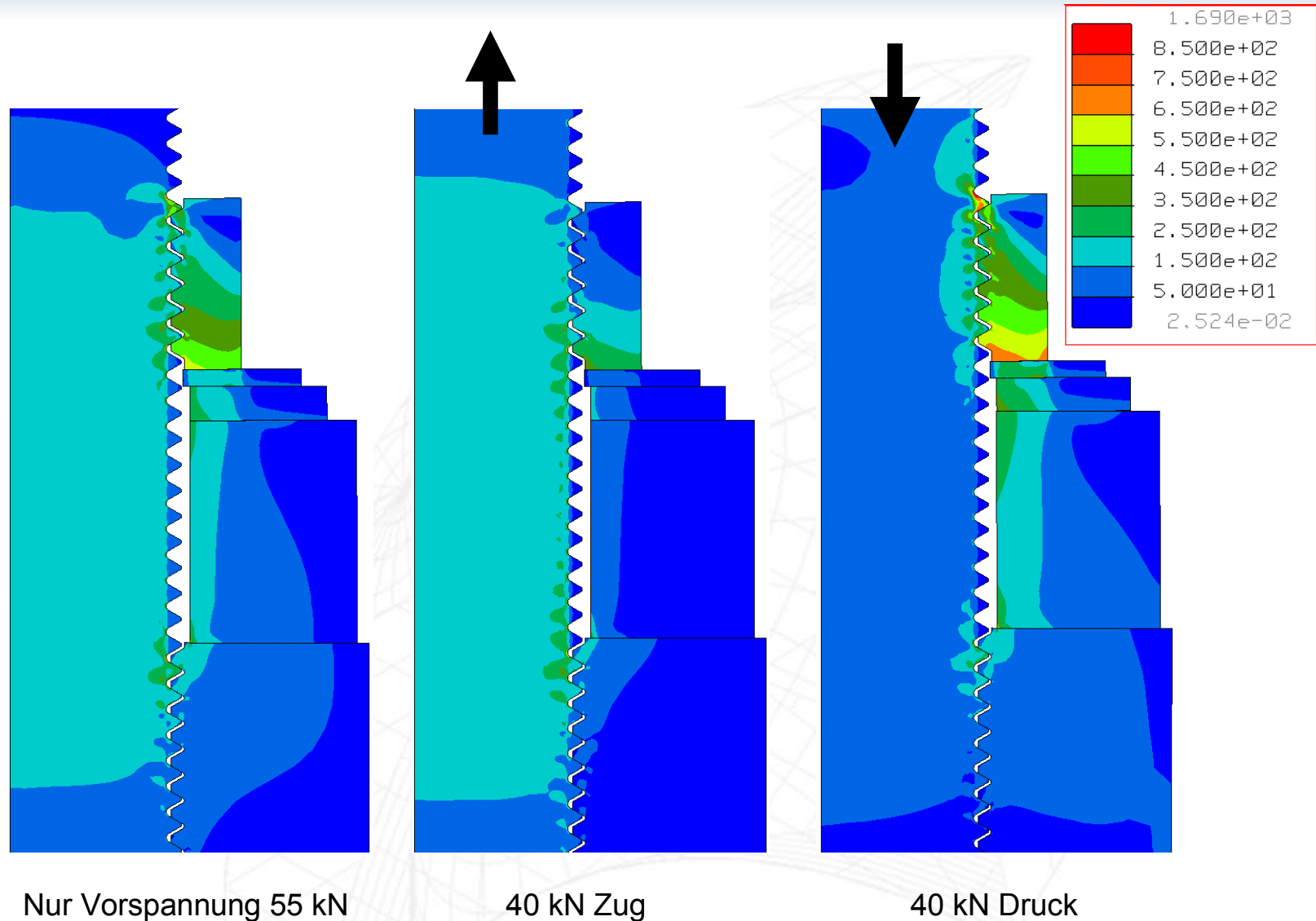
Last: Nur_Vorspannung

Messgröße
av_area_nut



"Vor_Def_Area" - Vorspannung_Def - Vorspannung_Ist

Beispiel 2 – Spannung nach von Mises



Beispiel 2 – Vergleich Analyse/FEM/Messung

■ Vergleich VDI-Analyse, Pro/MECHANICA und Messung *):

	VDI 2230	FEM	Messung
Gewählte Vorspannkraft	55 kN	54,9 kN	55 kN
Betriebskraft	40 kN	40 kN	40 kN
Kraftverhältnis ϕ_k	0,2	-	-
n-Wert	1 (?)	-	-
Reales Kraftverhältnis ϕ_n	0,2	0,48	0,46
Zusatzkraft auf Schraube	8 kN	19,1 kN	18,5 kN
Gesamte Schraubenlast	63 kN	74 kN	73,5 kN

- *) Die Messungen wurden aus dem ESC-A Projekt bereitgestellt durch Astrium GmbH
Freigabe durch CNES, verantwortlich für das ARIANE-5 Projektmanagement.



Zusammenfassung und Ausblick

■ Zusammenfassung:

- FEM Kontaktanalyse mittels Pro/MECHANICA sehr zuverlässig, wenn keine Messungen oder Erfahrungswerte vorliegen
- Konvergenzprüfung hilft bei der Ergebnisbeurteilung
- Sensitivitätsstudie sehr hilfreich bei Zielfindung (Vorspannung)
- Standalone noch notwendig für Modellierung von Presssitzen
- Mit Pro/MECHANICA default-Einstellungen keine befriedigenden Ergebnisse im Kontaktbereich
- VDI 2230 brauchbar für dort abgedeckte Standardfälle ($n \leq 1$), d.h. für den Fall, dass die Betriebslast in den Flansch eingeleitet wird
- Großes Risiko liegt in Schätzung des n-Wertes, besonders bei Lasteinleitung in die Schraube (in den Beispielen war $n = 0,3 \dots 2,3!$)

■ Ausblick:

- Erweiterung des integrierten Modus als Enhancement eingereicht
- Es wäre denkbar, die VDI 2230 für Lasteinleitungen in den Schraubenkopf durch n-Werte größer 1 zu ergänzen!



Zusammenfassung und Ausblick

