

Tests zur Abhängigkeit des Sicherheitsfaktors von der Elementgröße.

Als Werksstudent an einem Lehrstuhl an der TU München, entwickle ich mithilfe von SolidWorks Druckeinkapselungen für Photomultiplier. Diese sollten nach Möglichkeit 12 Bar aushalten und die angedachten Designs derselben bestehen derzeit meist aus 3 Teilen. Zum Beispiel aus einem kleinen Zylinder, einem Kegelförmigen Aufsatz darauf, beides aus Edelstahl und aus einer Acrylglas-Hemisphäre, die die Einkapselung abschließt.

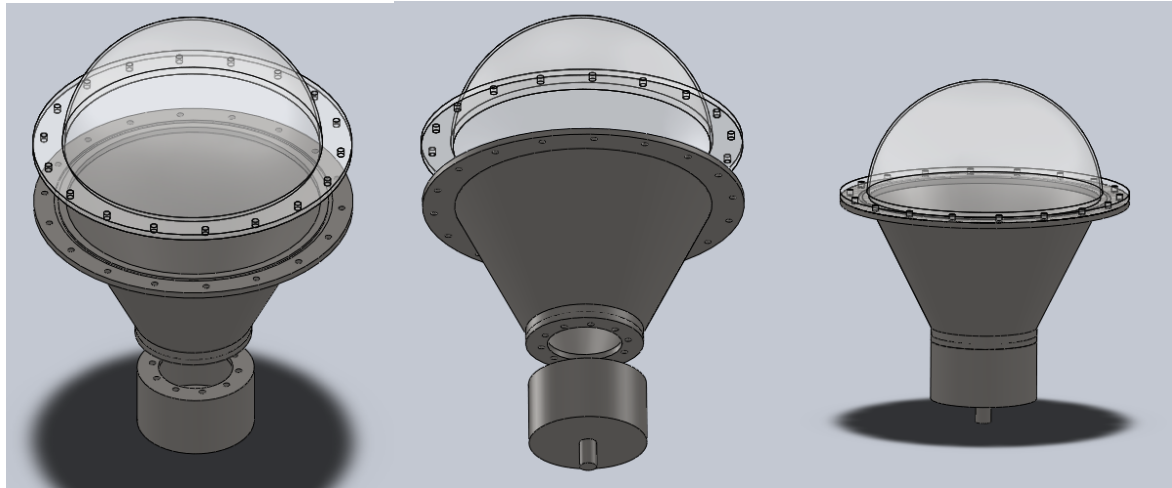


Abbildung 1: Die untersuchte Baugruppe. Als erstes wurde die dünnste aber noch stabile Dicke des mittleren, konischen Metallteils und der Acrylglas-Hemisphäre gesucht. Diese Dicken wurden verringert bis man für jedes der Teile einen FOS von gerade noch über 1 hat. Der untere Zylinder hat eine feste Dicke (5mm) und wurde somit zwar mitsimuliert aber der FOS für dieses Teil alleine nicht betrachtet.

Ich habe mich in SolidWorks eingearbeitet und einige verschiedene Einkapselungen erstellt, sowie bereits Simulationen dazu durchgeführt. Allerdings habe ich nie einen SolidWorks-Kurs besucht, sondern nur etliche Tutorial durchgearbeitet.

Meine Vorgehensweise zum Erstellen der Elemente, waren Skizzen, die dann mit Aufsätzen, Rotationen und Schnitten versehen wurden. Bohrlöcher in den Flanschen wurden dabei auch nur als Linear ausgetragene Schnitte angedeutet.

Unter Material bearbeiten wurde Edelstahl 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) beziehungsweise Acryl (halb-bis hochschlagszäh) ausgewählt. Die Auswahl der Elemente geschah in Absprache mit dem Werkstattleiter des Lehrstuhls.

Beim Erstellen einer Baugruppe wurden dann einfach Kanten von je zwei „Bohrlöchern“ (runde lineare Schnitte) eines Teiles deckungsgleich mit zwei „Bohrlöchern“ des anderen Parts verknüpft. Somit waren die Teile dann fixiert.

Die Simulationen wurden wie folgt durchgeführt:

- Abstandsprüfung und Interferenzprüfung durchgeführt
- Neue Studie gestartet, statisch ausgewählt
- Rechtsklick auf Einspannungen und fixierte Geometrie ausgewählt. Dazu wurde die Mantelfläche des kleinen, am Boden der Einkapselung aufgesetzten Zylinders markiert. Dort wird unter anderem später wirklich die Halterung greifen.
- Rechtsklick auf Externe Lasten und Auswahl von Druck. Hier wurden 1.2 N/mm^2 ausgewählt was 12 Bar entspricht und alle Oberflächen markiert. Die Flächen der

Bohrlöcher im Flansch vom kegelförmigen Metallteil und dem Plexiglas wurden nicht markiert.

- Bei der Netzerstellung wurde anfangs nur das Standardnetz genutzt, allerdings wurde dabei die globale Größe der Elemente auf 3mm eingestellt. Die Toleranz ändert sich dabei automatisch auf 0.15mm.
- Nach der Netzerstellung wurde schließlich nur noch auf Ausführen geklickt.
- Danach wurde der für uns wichtige FOS bestimmt. Rechtsklick auf Ergebnisse – Darstellung des Sicherheitsfaktors definieren.
- Dann wurde der Sicherheitsfaktor einmal für die gesamte Baugruppe und nochmals jeweils für den Kegelförmigen Teil sowie für das Acrylglas bestimmt. Für den dritten Teil, den metallischen Zylinder wurde er nicht nochmals einzeln bestimmt, da dieser eine festgesetzte Dicke hat, die vorerst nicht variiert wird. Das Kriterium des Sicherheitsfaktors wurde generell auf Automatisch belassen, da, wenn ich es richtig verstanden habe, SolidWorks je nach Material das richtige Kriterium auswählt.

Ziel der Simulationen war es die minimal notwendigen Dicken des kegelförmigen metallischen Teils und des Acrylglases der Einkapselung zu finden, die die 12 Bar Druck aushalten (also einen FOS über 1 haben)

War also der FOS unter oder über 1 wurde die Dicke der Einkapselung um einen halben Millimeter verstärkt oder reduziert. Somit näherte man sich einem Sicherheitsfaktor von knapp über 1 an, eben mit der Dicke die gerade noch hält.

Bei einem Standardnetz und einer globalen Größe von 3 Millimeter habe ich diese Ergebnisse erhalten:

Dicke Metall	Min FOS Metall	Dicke Plexiglas	Min FOS Plexiglas
1mm	2,64	2,40mm	0,94
0,9mm	2,25	2,40mm	0,94
0,5mm	1,13	2,50mm	1,03
0,3mm	0,72	2,50mm	1,07
0,4mm	0,89	2,45mm	1,04
0,45mm	1,01	2,43mm	1,01
0,44mm	0,99	2,42mm	1,01
0,45mm	1,01	2,41mm	1,01
0,45mm	1,01	2,40mm	1

Tabelle 1: Minimale Werte des Sicherheitsfaktors für die verschiedene Dicken der Einkapselungsbauteile. Die Tabelle ist zeilenweise zu lesen. Bsp. Zeile 1: Hier hatte der konische Metallpart der Einkapselung eine Dicke von 1mm und die Plexiglashemisphäre eine Dicke von 2,40mm. Um den minimalen Sicherheitsfaktor der einzelnen Teile der Baugruppe zu ermitteln wurde einfach bei der Darstellung des SF nur diese Teile ausgewählt.

Nun ging es darum zu prüfen, welchen Einfluss die globale Größe der Elemente auf die Ergebnisse der Simulationen haben beziehungsweise ob man mit anderen Vernetzungsmethoden genauere oder andere Ergebnisse erhält. Ich habe also alle weiteren Simulationen mit der oben ermittelten Dicke von 0,45mm des Metalls und mit einer Dicke von 2,40mm des Acrylglases durchgeführt. Als erstes habe ich überprüft wie sich der FOS der einzelnen Teile ändert, wenn ich nur die globale Größe verändere, das Standardnetz belasse und weiterhin keine Adaption verwende:

Ich habe folgende Ergebnisse bekommen:

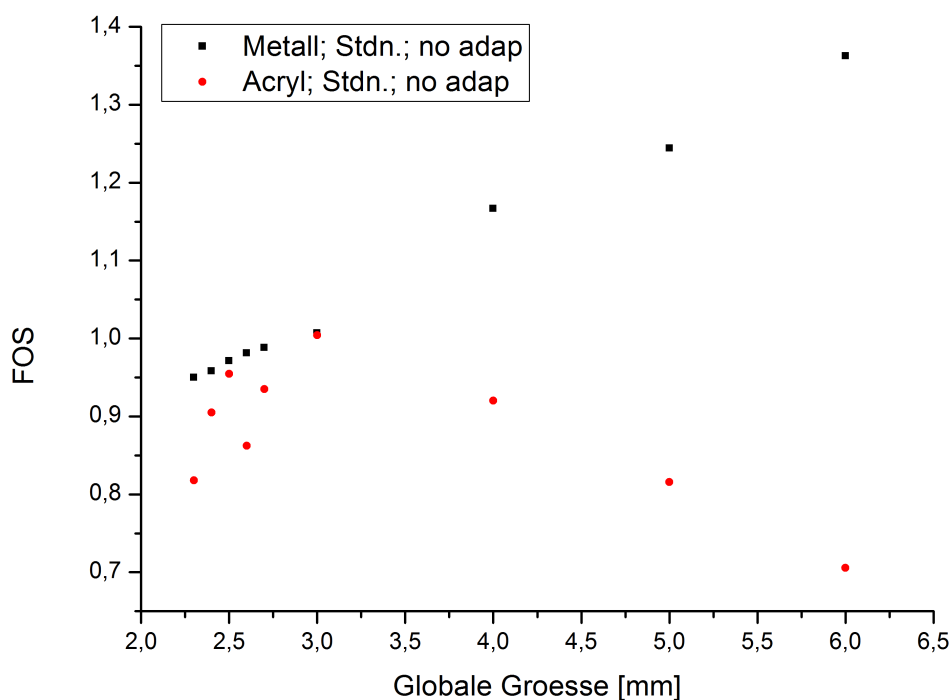


Abbildung2: Auswirkung der veränderten Globalen Größe auf den Sicherheitsfaktor. Am Modell und der Simulation wurde außer der Globalen Größe sonst nichts mehr variiert. Zuvor vorangegangene Simulationen bei einer festen Globalen Größe von 3mm dienten dazu die Dicken des Modells bei denen ein FOS von 1 erreicht wurde, zu ermitteln. Mit diesen Dicken wurden dann eben obige Simulationen durchgeführt. Die Wertetabellen finden Sie im Anhang.

Eigentlich hatte ich erwartet, dass der Sicherheitsfaktor mit zunehmend kleiner werdender Elementgröße gegen einen bestimmten Wert konvergiert. Dies scheint leider nicht der Fall zu sein. Das Verhalten des Sicherheitsfaktors des Acrylglases bei Simulationen mit Elementgrößen über 3mm wäre ja eventuell noch dadurch zu erklären, dass wenn das Metall stabiler ermittelt wird, mehr Spannung auf das Acrylglas übertragen wird und somit dieses instabiler wird. Ist dies richtig? Was passiert dann aber bei einem FOS unter 3mm beim Acrylglas? Ist das fluktuierende Verhalten dadurch zu erklären, dass die ganze Baugruppe instabil ist?

Da das Acrylglas ja eine Hemisphäre ist, habe ich die Simulationen der Baugruppe aus obigem Graph nochmals mit einem kurvengestützten Netz durchgeführt:

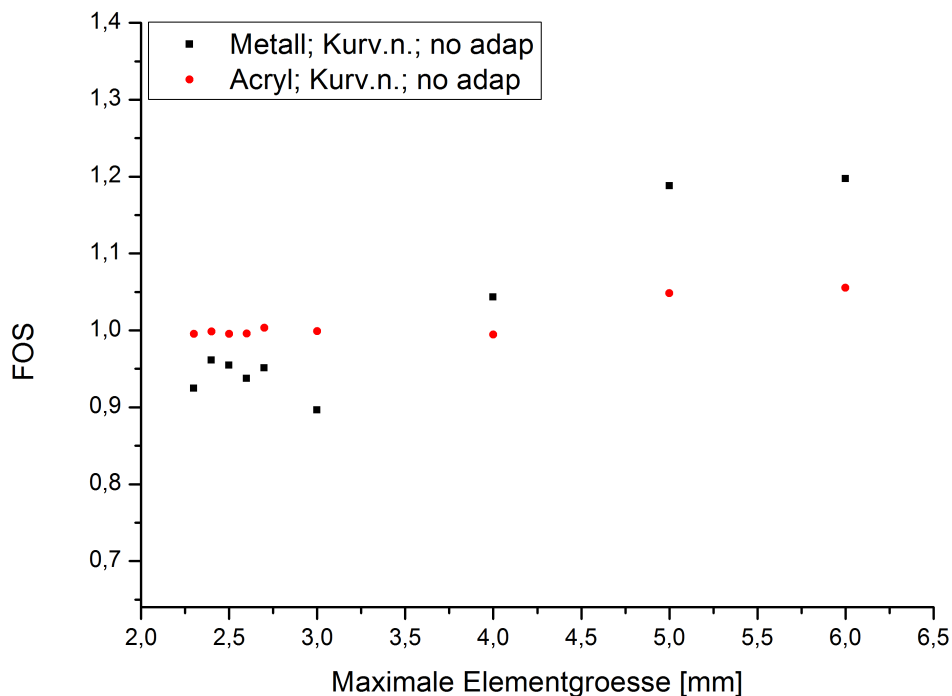


Abbildung 3: Der Sicherheitsfaktor für den kegelförmigen Teil aus Metall und die Acrylglas-Hemisphäre der Einkapselung aufgetragen für verschiedene Globale Größen. Diesmal mit einem kurvengestützten Netz. Die Maximale Elementgröße wurde hier in den Schritten verändert, wie vorher die Globale Größe; die minimale Elementgröße wird dann vom Programm automatisch gesetzt. Die Mindestanzahl der Elemente in einem Kreis wurde bei 8 beibehalten, ebenso das Elementgrößen-Wachstum wurde bei der Standardeinstellung von 1.6 belassen.

Hier sieht man nun, dass sich der FOS für die Acrylglas-Hemisphäre etwa bei 1 hält. Allerdings konvergiert er auch hier für die durchgeführten Simulationen nicht. Ist die Annahme einer strengen Konvergenz falsch? Der FOS des Metalls sieht nun aber sehr willkürlich aus, was kann ich dann daraus schließen?

Um genauere Ergebnisse zu erhalten wurden dann die Simulationen noch mit aktivierter H-Adaption durchgeführt.

Bei der Vernetzung wurden einmal das Standardnetz und das einmal kurvengestützte Netz angewendet. Wie oben auch wurden alle Standardwerte wieder belassen und nur die globale Größe und die sich dadurch automatisch anpassende Abweichung der Elementgröße bzw. die maximale Elementgröße und die sich damit automatisch anpassende minimale Elementgröße geändert. Die Netzvergrößerung wurde aktiviert. Die Zielgenauigkeit wurde auf 99% und die Genauigkeitsabweichung auf Global (langsamer) eingestellt.

Bei 2 Schleifen ergeben sich folgende Messergebnisse:

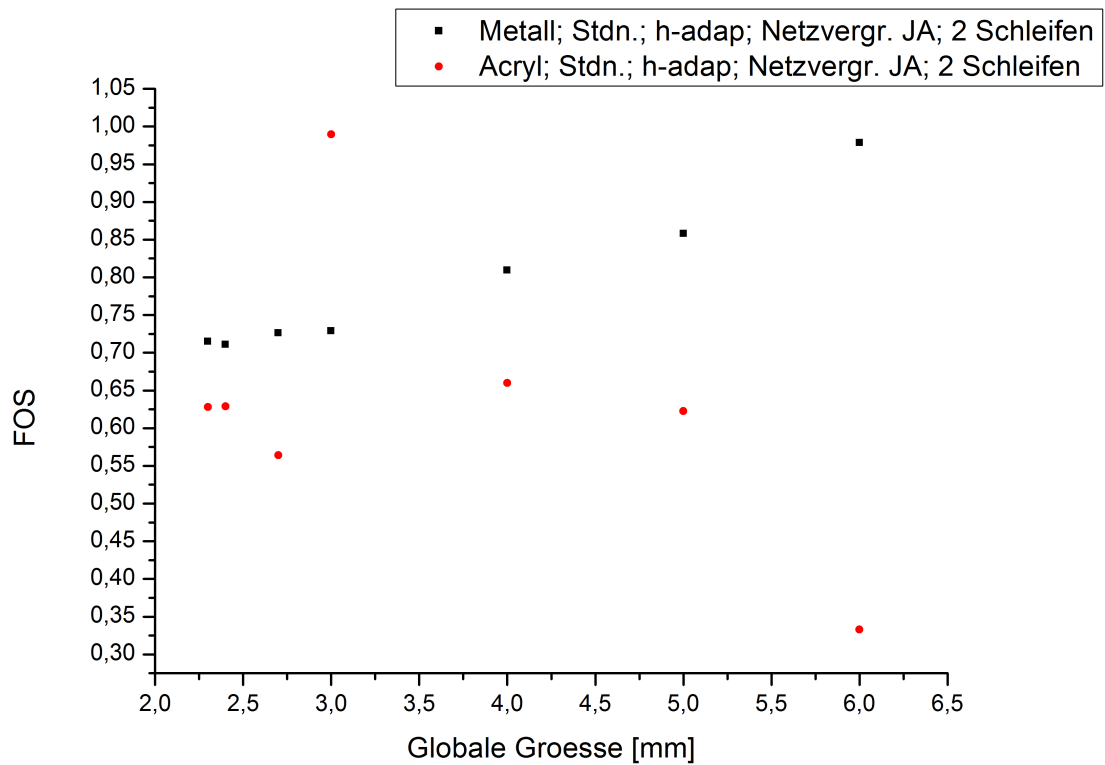


Abbildung 4: Der Sicherheitsfaktor für den kegelförmigen Teil aus Metall und die Acrylglas-Hemisphäre der Einkapselung, aufgetragen für verschiedene Globalen Größen. Hier wurde das Standardnetz und die H-Adaption mit 2 Schleifen verwendet.

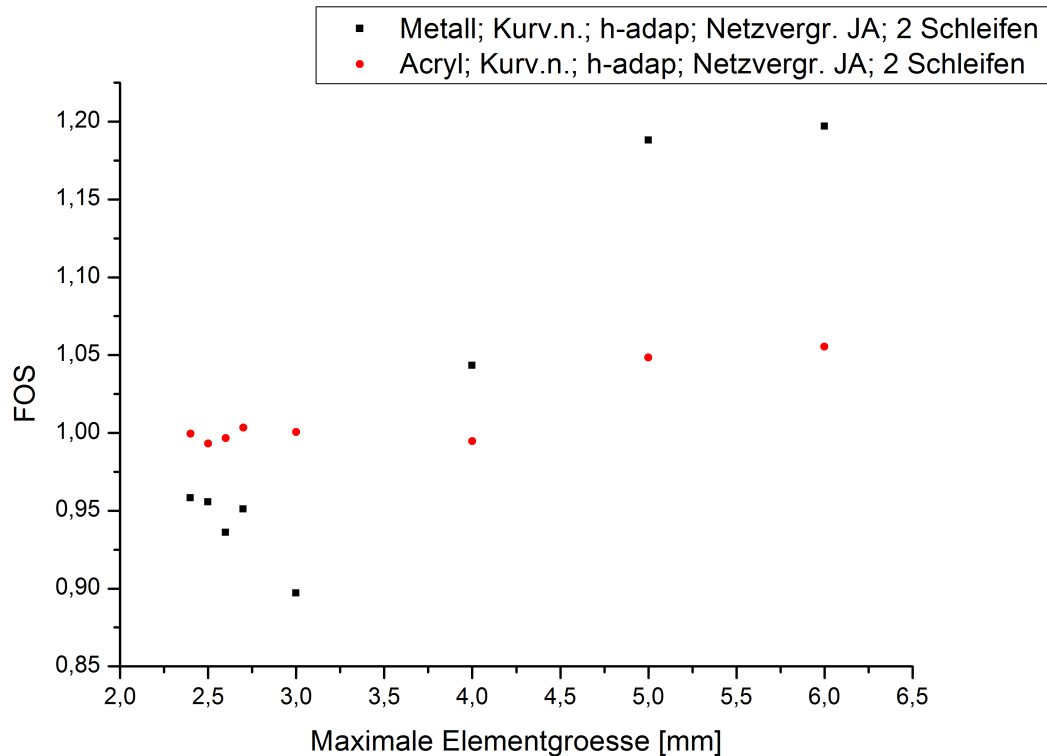


Abbildung 5: Der Sicherheitsfaktor für den kegelförmigen Teil aus Metall und die Acrylglas-Hemisphäre der Einkapselung, aufgetragen für verschiedene maximale Elementgrößen. Hier wurde das kurvengestützte Netz und die H-Adaption mit 2 Schleifen verwendet.

Vergleicht man die Ergebnisse mit denen ohne Adaption, so ergeben sich für das Standardnetz keine Übereinstimmungen, jedoch das kurvengestützte Netz liefert bei H-Adaption fast dieselben Werte wie bei Simulationen ohne Adaption. Leider kann ich nicht beurteilen, ob das ein gutes Ergebnis ist. Eventuell ist die H-Adaption bei einem kurvengestützten Netz keine Verbesserung und somit die Übereinstimmung nicht aussagekräftig. Wie oben auch erwähnt kann ich ja aus den Werten wenige Schlüsse ziehen, da sich zwar der Sicherheitsfaktor des Acrylglases in etwa bei 1 befindet, allerdings für den Metallkegel große Fluktuationen aufweist.

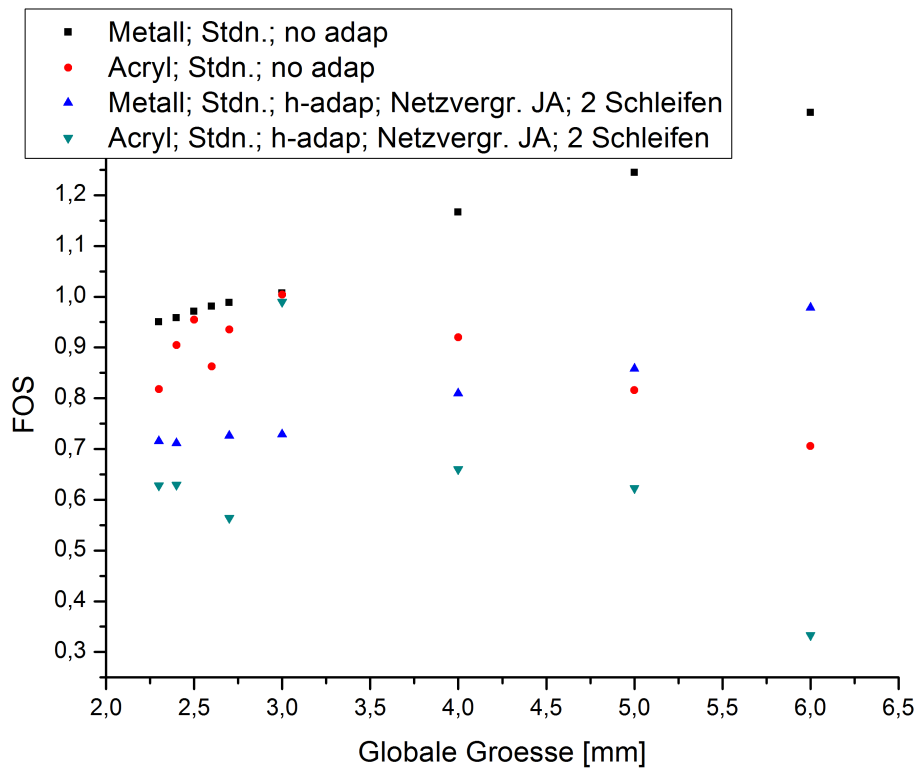


Abbildung 6: Vergleich von Simulationen mit keiner und mit H-Adaption. Es wurde hier das Standardnetz verwendet.

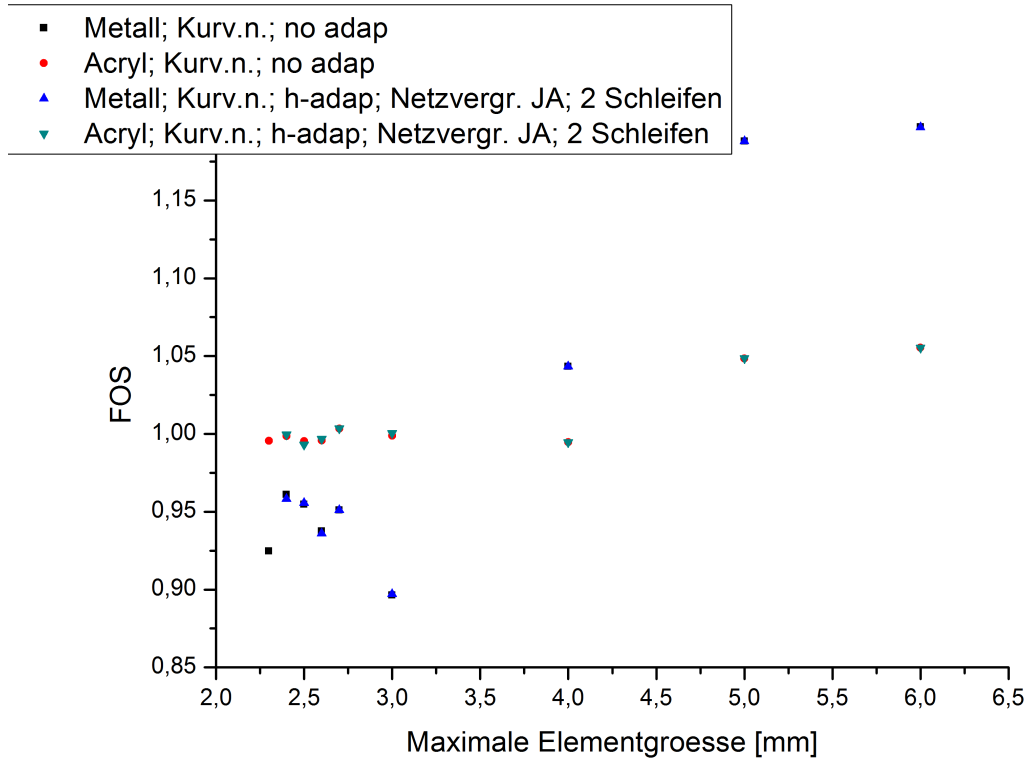


Abbildung 7: Vergleich von Simulationen mit keiner und mit H-Adaption. Es wurde hier das kurvengestützte Netz verwendet. Fast immer stimmen die Werte nahezu exakt überein, konvergieren aber nicht oder häufen sich nicht bei einem Wert.

Leider kann ich aus meinen erhaltenen Ergebnissen keine Schlüsse ziehen. Ich hoffe aber, dass jemand mit mehr SolidWorks-Erfahrung mir bei diesem Problem helfen kann und weiß, ob ich die Simulationen falsch mache, bzw. mir sagen kann, wie die Ergebnisse zu interpretieren sind. Eventuell ist auch die Vorgehensweise falsch, das Ergebnis sollte jedenfalls aussagen, ob die Einkapselung die 12 Bar übersteht oder nicht. (Bzw. mit welcher Dicke hält sie 12 Bar aus)

Vielen Dank an jeden, der sich mit dem Thema befasst.

Viele Grüße

German

Daten des simulierenden PCs:

Prozessor: Intel(R) Core(TM) i7-2600 CPU @ 3.40 Ghz (8CPUs)

Speicher: 8192 MB RAM

Verwendet wurde SolidWorks 2010 mit SP 4.

Keine Adaption				
Standardnetz				
Dicke	Minimaler	Dicke	Minimaler	
Metall [mm]	FOS	Plexiglas[mm]	FOS	Globale Größe
				[mm]
0,45	0,9502	2,4	0,8181	2,3
0,45	0,9585	2,4	0,9049	2,4
0,45	0,9712	2,4	0,9546	2,5
0,45	0,9813	2,4	0,8623	2,6
0,45	0,9884	2,4	0,9352	2,7
0,45	1,0071	2,4	1,0043	3
0,45	1,1668	2,4	0,9201	4
0,45	1,2444	2,4	0,8156	5
0,45	1,3625	2,4	0,7054	6

Keine Adaption				
Kurvengestütztes Netz				
Dicke	Minimaler	Dicke	Minimaler	
Metall [mm]	FOS	Plexiglas[mm]	FOS	Max. Elementgr
				[mm]
0,45	0,9246	2,4	0,9955	2,3
0,45	0,9611	2,4	0,9986	2,4
0,45	0,9547	2,4	0,9953	2,5
0,45	0,9375	2,4	0,9957	2,6
0,45	0,9511	2,4	1,0034	2,7
0,45	0,8964	2,4	0,9989	3
0,45	1,0434	2,4	0,9946	4
0,45	1,1881	2,4	1,0485	5
0,45	1,1971	2,4	1,0553	6

n-adaptiv	Zielgenauigkeit 99%; Genauigkeitsabweichung Global			
Maximale Anzahl schleifen 2; Netzvergrößerung JA				
Standardnetz				
Dicke	Minimaler	Dicke	Minimaler	
Metall [mm]	FOS	Plexiglas[mm]	FOS	Globale Größe
				[mm]
0,45	0,7151	2,4	0,6278	2,3
0,45	0,7111	2,4	0,6291	2,4
0,45	Fehler (*)	2,4	Fehler (*)	2,5
0,45	Fehler (*)	2,4	Fehler (*)	2,6
0,45	0,7262	2,4	0,5639	2,7
0,45	0,7290	2,4	0,9898	3
0,45	0,8093	2,4	0,6598	4
0,45	0,8580	2,4	0,6226	5
0,45	0,9768	2,4	0,3328	6

Fehler (*) Vernetzungsanpassung fehlgeschlagen

n-adaptiv	Zielgenauigkeit 99%; Genauigkeitsabweichung Global			
Maximale Anzahl schleifen 2; Netzvergrößerung JA				
Kurvengestütztes Netz				
Dicke	Minimaler	Dicke	Minimaler	
Metall [mm]	FOS	Plexiglas[mm]	FOS	Max. Elementgr.
				[mm]
0,45	Fehler (**)	2,4	Fehler (**)	2,3
0,45	0,9582	2,4	0,9995	2,4
0,45	0,9556	2,4	0,9931	2,5
0,45	0,9361	2,4	0,9967	2,6
0,45	0,9511	2,4	1,0034	2,7
0,45	0,8970	2,4	1,0005	3
0,45	1,0434	2,4	0,9946	4
0,45	1,1881	2,4	1,0485	5
0,45	1,1970	2,4	1,0553	6

Fehler (**) STAR funktioniert nicht mehr → keine Datei verfügbar