

Zertifizierung des FE-Programms

SJ MEPLA

durch Vergleichsberechnungen und
analytische Lösungen

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'G. Sedlacek'.

Prof. Dr.-Ing. G. Sedlacek

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Christian Müller'.

Dipl.-Ing. Christian Müller

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	1
2	Vergleichsberechnungen	1
2.1	Monolithische Platten	1
2.1.1	Lineares Verhalten	1
2.1.1.1	Flächenlast	1
2.1.1.2	Punktlast (Flächenlast auf einer Teilfläche)	2
2.1.2	Geometrisch nicht-lineares Verhalten	2
2.2	Sandwichplatten	3
2.2.1	Lineare Berechnung	3
2.2.2	Nicht-lineare Berechnung	4
2.3	Isolierglas	5
2.4	Punktgehaltene Scheiben	7
2.5	Dynamische Pendelschlagsimulation	10
2.5.1	Vergleichsberechnungen	10
3	Zusammenfassung	11
4	Literatur	12

1 Aufgabenstellung

Der Lehrstuhl für Stahlbau der RWTH Aachen hat von der SJ Software GmbH, Aachen den Auftrag bekommen die Berechnungsansätze in SJ MEPLA /1/ durch Vergleichsberechnungen zu verifizieren. Dies soll durch theoretische sowie Finite Elemente Untersuchungen mit konventionellen Programmen erfolgen. SJ MEPLA ist ein auf den Glasbau spezialisiertes FE-Programm, daß durch die Art der Programmoberfläche und die verwendeten Ansätze die ansonsten komplexen FE-Eingaben automatisiert und so dem Ingenieur die praktische Arbeit erleichtert. Aus der Vielzahl der Möglichkeiten mit SJ MEPLA werden exemplarisch die relevanten Bereiche herausgegriffen und durch Vergleichsberechnungen auf Gültigkeit und Genauigkeit untersucht.

2 Vergleichsberechnungen

SJ MEPLA verwendet für die Platten/Scheiben Elemente (ebene Schalenelemente) 9-Knoten Ansätze, die auf dem Mindlin-Reissner Ansatz für Platten mit Querschubeinfluß beruhen. Die bekannte Effekte des „shear-lockings“, die bei diesen Ansätzen auftreten können, werden durch modifizierte Interpolationsansätze ausgeschlossen, so daß in SJ MEPLA die Elemente voll (mit 3x3 Gaußpunkten) integriert werden können.

2.1 Monolithische Platten

Zunächst werden Standarduntersuchungen an einfachen Platten vorgenommen, um die Genauigkeit der Berechnungsgrundlagen in SJ MEPLA zu verifizieren. Dazu werden theoretische Lösungen herangezogen.

2.1.1 Lineares Verhalten

Die linearen Berechnungsergebnisse werden mit der Reihenlösung für Platten unter Flächen- und Punktlasten verglichen.

Als Format für die Scheibe wird eine rechteckige, allseitig gelenkig gelagerte Scheibe der Größe $x \cdot y = 1000 \times 2500 \text{ mm}$ gewählt. Der E-Modul der Platte beträgt 70000 N/mm^2 mit einer Querkontraktionszahl von 0.23 bei einer Dicke von 6mm.

2.1.1.1 Flächenlast

Die Flächenlast beträgt 1 kN/m^2 .

Spannungen und Verformungen in Plattenmitte:

Programm	w [mm]	σ_{xx} [N/mm ²] (kurze Seite)	σ_{yy} [N/mm ²] (lange Seite)
SJ MEPLA	8.644	18.89	5.91
theoretische Lösung	8.641	18.71	5.88

2.1.1.2 Punktlast (Flächenlast auf einer Teilfläche)

Auf einer Teilfläche von 100x100mm wird eine Last von 1000 N aufgesetzt, was einer Teilflächenlast von 0.1 N/mm² entspricht. Die Teilflächenmitte liegt auf $x_m = 750$ und $y_m = 1700$ mm.

Spannungen und Verformungen in Plattenmitte:

Programm	w [mm]	σ_{xx} [N/mm ²] (kurze Seite)	σ_{yy} [N/mm ²] (lange Seite)
SJ MEPLA	4.88	9.95	0.95
theoretische Lösung	4.88	9.93	0.99

2.1.2 Geometrisch nicht-lineares Verhalten

Zum Nachweis der geometrisch nicht linearen Berechnungsansätze wird die Literaturstelle /3/ herangezogen. Hier wurden theoretische Lösungen mit einem Fehler <2% ermittelt. Zusätzlich werden die Ergebnisse mit dem FE-Programm MARC/ MENTAT /2/ (Elementtyp 22) verglichen.

Von der Platte wird unter Ausnutzung der Symmetrie ein Viertel des Systems abgebildet. Die Ränder sind allseitig eingespannt gelagert. Die Netzdichte für das Viertelsystem beträgt für alle berechneten Systeme 4x4=16 Elemente.

Da auf die Referenzlösung zurückgegriffen wird, werden die dort verwendeten Einheiten beibehalten.

Maße: $a \times a = 300 \times 300$ in
 E-Modul: $E = 0.3 \cdot 10^8$ lb/in²
 Querkontraktion: $\nu = 0.318$
 Dicke: $t = 3$ in

Der Vergleich der Ergebnisse erfolgt über die Normierung der Verformungen und Spannungen:

$$w^* = w / t$$

$$\sigma^* = \sigma a^2 / (E \cdot t^2)$$

Spannungen und Verformungen in Plattenmitte:

Flächenlast p	Theorie		SJ MEPLA		MARC	
	w*	σ^*	w*	σ^*	w*	σ^*
5.337	0.237	2.6	0.236	2.63	0.236	2.67
40.47	1.121	13.3	1.106	13.83	1.145	14.34
120.60	1.902	25.1	1.855	24.79	1.883	24.86

2.2 Sandwichplatten

Mit den Ansätzen in SJ MEPLA /1/ können Verbundglasscheiben mit beliebig vielen Schichten berechnet werden. Diese Ansätze basieren auf der Koppellung von Platten, die auch Scheibefreiheitsgrade besitzen. Nur jede zweite Schicht (Glasscheiben) hat eigene Freiheitsgrade der Verschiebung und Verdrehung. Die Verformung der Zwischenschichten (z.B: PVB) werden durch die beiden einschließenden Schichten hergeleitet, die aufgrund der kinematischen Bindungsgleichungen eindeutig zu beschreiben sind. Über die kontinuumsmechanische Betrachtung können die Eigenschaften der Zwischenschichten durch Integration in die Steifigkeitsmatrix so eingebaut werden, so daß sie zum einen das Verhalten der Verbundschichten abbilden und zum anderen die Koppellung der Deckschichten bewirken. Daraus ergibt sich die Vorgabe, daß die Anzahl der Gesamtschichten immer ungerade sein muß.

Die Gültigkeit dieser Berechnungsansätze kann nur mittels Volumenelementen verglichen werden, da in SJ MEPLA eine schubweiche Zwischenschicht berücksichtigt wird und die klassische Laminattheorie damit als Vergleichsmöglichkeit ausscheidet. Auch hier werden Vergleichsrechnungen mit dem FE-Programmsystem MARC / MENTAT /2/ unternommen.

Die Seitenlänge der Sandwichplatte beträgt 1000x1000mm. Als Schichtenaufbau wurde 4/0.76/6 mm gewählt. Die beiden Deckschichten haben einen E-Modul von 70000 N/mm² mit einer Querkontraktionszahl ν von 0.23. Die Verbundschicht hat einen E-Modul von 3 N/mm² mit $\nu = 0.49$. Alle berechneten Systeme wurden unter Ausnutzung der doppelten Symmetrie (nur ein Viertel des Netzes) durchgeführt. Die unten angegebene Elementanzahl gibt die Summe aller Elemente ohne Symmetrieausnutzung an.

2.2.1 Lineare Berechnung

Für die lineare Berechnung beträgt die Flächenlast 1 kN/m².

Spannungen auf der Ober- Unterseite des Sandwichs und Verformung in Plattenmitte:

Elementanzahl	SJ MEPLA		MARC	
	w [mm]	σ [N/mm ²]	w [mm]	σ [N/mm ²]
64 x 3 Schichten	-1.262	-3.79 3.20	-1.275	-3.793 3.213
100 x 3 Schichten	-1.262	-3.78 3.19	-1.275	-3.790 3.206
256 x 3 Schichten	-1.262	-3.78 3.19	-1.275	-3.790 3.206
400 x 3 Schichten	-1.262	-3.78 3.19	-1.275	-3.790 3.206

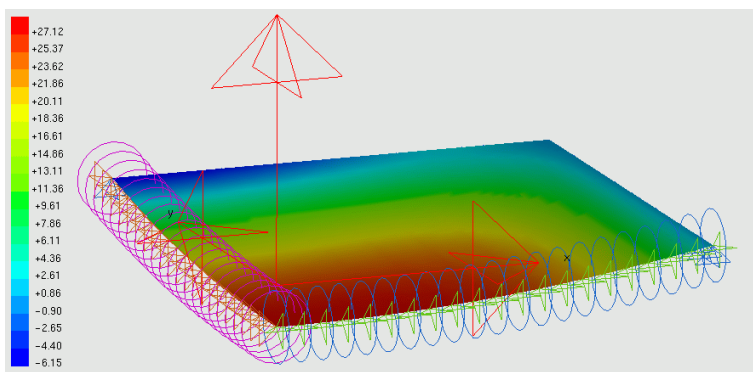
2.2.2 Nicht-lineare Berechnung

Die geometrisch nicht-lineare Berechnung (große Verformungen) wurde bei gleichem System mit einer Flächenlast von 10 kN/m² durchgeführt.

Spannungen auf der Ober- Unterseite des Sandwichs und Verformung in Plattenmitte:

Elementanzahl (Rechendauer)	SJ MEPLA		MARC	
	w [mm]	σ [N/mm ²]	w [mm]	σ [N/mm ²]
64 x 3 Schichten (4 sec) 100 x 3 Schichten	-9.57	-18.70 27.58	-9.72	-19.54 27.38
256 x 3 Schichten (26 sec) 400 x 3 Schichten (81 sec) 400 x 3 Schichten (180 sec)	-9.58 -9.58	-19.41 27.19 -19.49 27.12	-9.74	-19.63 27.27

Bei diesem Vergleich muß berücksichtigt werden, daß die nicht-linearen Berechnungen in SJ MEPLA durch das erste Reihenglied der Cosinus-Entwicklung berechnet werden, während in MARC große Verformungen durch den vollständigen Cosinus-Ansatz berücksichtigt werden.



Spannungen auf der Unterseite der 4 mm Schicht (SJ MEPLA)

Aufgrund der optimierten Vorgehensweise in SJ MEPLA (Streichung überflüssiger Freiheitsgrade durch auf die Platte/Scheibe reduzierte Ansätze) werden die obigen Systeme schneller gelöst (81 Sekunden auf 500 MHz PC zu 180 Sekunden auf SUN Ultra Sparc Workstation für die größten obigen Netze).

2.3 Isolierglas

Die Isolierglasansätze werden unter Ansatz linearen Verhaltens für die Scheiben und allseitig gelenkiger Randlagerung durch Aufstellen und Lösen einer nicht-linearen Gleichung verglichen. In SJ MEPLA können beliebige Lasten, Randlagerungen, Verbundglasscheiben wie auch geometrisch nicht-lineares Verhalten berücksichtigt werden.

Für die Nachrechnung wird hier ein analytisch nachrechenbares System verwendet:

Scheibenmaße: 1000x1500mm

Lagerung: allseitig gelenkig gelagerte Ränder des Isolierglases mit festem 12 mm Abstand

Scheibenaufbau: 8/12mm SZR/12mm (Glas: $E = 70000 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.23$)

SZR: gefüllt mit Luft ($\gamma_L = 0.003674$, Volumenausdehnungskoeffizient)

Lastfall: Außendruck: $p_a = 0.997 \text{ N/mm}^2$

Innendruck: $p_o = 0.101 \text{ N/mm}^2$ (bei Herstellung des Isolierglases)

Temperatur: $+25^\circ \text{ C}$ Temperaturdifferenz im SZR (Scheibenzwischenraum)

Analytische Berechnung der Spannungen und Verformungen:

Auf eine Scheibe 1000x1500mm mit 10 mm Dicke wird eine Flächenlast von $p = 1 \text{ kN/m}^2 = 0.001 \text{ N/mm}^2$ angesetzt.

Daraus ergibt sich die Verformung in Plattenmitte: $w = 1.2567 \text{ mm}$

Die Spannungen in Scheibemitte beträgt: $\sigma = 4.78 \text{ N/mm}^2$ (über die kurze Seite)

$\sigma = 2.69 \text{ N/mm}^2$ (über die lange Seite)

Aus der Integration der Verformungen über die Scheibenfläche

ermittelt man ein aufgespanntes Volumen infolge von p zu: $\Delta V = 798776.02 \text{ mm}^3$

Die Volumennachgiebigkeit für dieses System läßt sich aus $C_v = \Delta V/p = 798776018.88 \text{ mm}^5/\text{N}$ ermitteln.

Die Umrechnung der Volumennachgiebigkeiten auf die tatsächlichen Plattendicken erfolgt über das Verhältnis der Plattendicken

$$n_1 = t^3 / t_1^3 = 10^3 / 8^3 = 1.953125$$

$$n_2 = t^3 / t_2^3 = 10^3 / 12^3 = 0.578704$$

und ergibt

$$C_{v1} = n_1 C_v = 1560109411.87 \text{ mm}^5/\text{N}$$

$$C_{v2} = n_2 C_v = 462254640.55 \text{ mm}^5/\text{N}$$

Das Ausgangsvolumen im SZR ist $V_o = 12 \cdot 1000 \cdot 1500 = 1.8 \cdot 10^7 \text{ mm}^3$

Die Gasdruckkonstante unter Einfluß der Erwärmung lautet:

$$K = p_o \cdot V_o \cdot (1 + \gamma_L \cdot \Delta T) = 0.101 \cdot 1.8 \cdot 10^7 \cdot (1 + 0.003674 \cdot 25) = 1984983.3 \text{ Nmm}$$

Damit läßt sich die nicht-lineare Gleichung für den Innendruck p_i aufbauen:

$$K = p_i \cdot [V_o + \Delta V] = p_i \cdot [V_o + (C_{v1} + C_{v2}) \cdot \Delta p] = p_i \cdot [V_o + (C_{v1} + C_{v2}) \cdot (p_i - p_a)]$$

wobei Δp der auf die beiden Scheiben wirkende tatsächliche Druck ist, der aus der Differenz von Innendruck - Außendruck gebildet wird. Diese Gleichung kann mit Hilfe der Newton-Nullstellensuche gelöst werden.

Es ergibt sich ein Innendruck im SZR von: $p_i = 0.09810353 \text{ N/mm}^2$

Der tatsächliche Druck auf die Scheiben ist dann

$$p_1 = p_2 = p_i - p_a = 0.09810353 - 0.097 = 0.00110353 \text{ N/mm}^2$$

Über die Umrechnung der Normlast $p = 0.001$ und Verwendung der Steifigkeitsbeiwerte n_1 und n_2 ergeben sich die Verformungen der beiden Scheiben zu:

$$w_1 = w / p \cdot p_1 \cdot n_1 = 1.2567 / 0.001 \cdot 0.00110353 \cdot 1.953125 = 2.7086 \text{ mm}$$

$$w_2 = w / p \cdot p_2 \cdot n_2 = 1.2567 / 0.001 \cdot 0.00110353 \cdot 0.578704 = 0.80255 \text{ mm}$$

Die Spannungen in jeder Scheibe werden aus dem Verhältnis s der Widerstände berechnet,

$$s_1 = t^2 / t_1^2 = 10^2 / 8^2 = 1.5625$$

$$s_2 = t^2 / t_2^2 = 10^2 / 12^2 = 0.6944$$

so daß sich für die Spannungen

$$\sigma_{1xx} = \sigma_{xx} / p \cdot p_1 \cdot s_1 = 4.78 / 0.001 \cdot 0.00110353 \cdot 1.5625 = 8.2419 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{2xx} = \sigma_{xx} / p \cdot p_2 \cdot s_2 = 4.78 / 0.001 \cdot 0.00110353 \cdot 0.6944 = 3.6629 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{1yy} = \sigma_{yy} / p \cdot p_1 \cdot s_1 = 2.69 / 0.001 \cdot 0.00110353 \cdot 1.5625 = 4.6383 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{2yy} = \sigma_{yy} / p \cdot p_2 \cdot s_2 = 2.69 / 0.001 \cdot 0.00110353 \cdot 0.6944 = 2.0613 \text{ N/mm}^2$$

ergibt.

Das Lösungsverfahren in SJ MEPLA beruht auf einem anderen Ansatz. Damit beliebig viele Lastkombinationen (auch unter Ansatz von geometrisch nicht-linearem Verhalten) auf einmal gelöst werden können, wird das Gasgesetz in den Scheibenzwischenräumen durch die Bildung einer tangentialen Steifigkeitsmatrix und Iterationen mittels des *Newton-Raphson*-Verfahrens gelöst. Die Umlagerungen des Gases in den Zwischenräumen wird dabei berücksichtigt. Mit diesem Ansatz sind auch komplexe Systeme mit mehrfachem Isolierglas (3 x SZR), Verwendung von Verbundglasscheiben, (punktgehaltenes Isolierglas und Abstandhalter im Isolierglas, nach Auskunft der SJ GmbH im nächsten Update) zu berechnen.

Die Berechnung des obigen Systems mit SJ MEPLA ergab die folgenden Verformungen und Spannungen in Plattenmitte:

$$w_1 = 2.707 \text{ mm (Verformung der unteren Scheibe)}$$

$$w_2 = 0.803 \text{ mm (Verformung der oberen Scheibe)}$$

$$\sigma_{1xx} = 8.17 \text{ N/mm}^2 \text{ (Spannung Schicht 1, über die kurze Seite)}$$

$$\sigma_{2xx} = 3.64 \text{ N/mm}^2 \text{ (Spannung Schicht 2, über die kurze Seite)}$$

$$\sigma_{1yy} = 4.62 \text{ N/mm}^2 \text{ (Spannung Schicht 1, über die lange Seite)}$$

$$\sigma_{2yy} = 2.06 \text{ N/mm}^2 \text{ (Spannung Schicht 2, über die lange Seite)}$$

Der Innendruck wurde hier zu $p_i = 0.0981052 \text{ N/mm}^2$ berechnet.

2.4 Punktgehaltene Scheiben

Der Vergleich an punktgehaltenen Glasscheiben wird wieder durch eine Nachrechnung mit MARC / MENTAT /2/ durchgeführt. Für eine realistisch Abbildung der Punkthalter müssen diese hier durch Volumenelemente abgebildet werden. Damit die Lochleitungskräfte im Bohrungsbereich richtig erfaßt werden, wird die Glasscheibe ebenfalls aus 20 Knoten Volumenelementen mit 2 Elementen über die Scheibendicke diskretisiert.

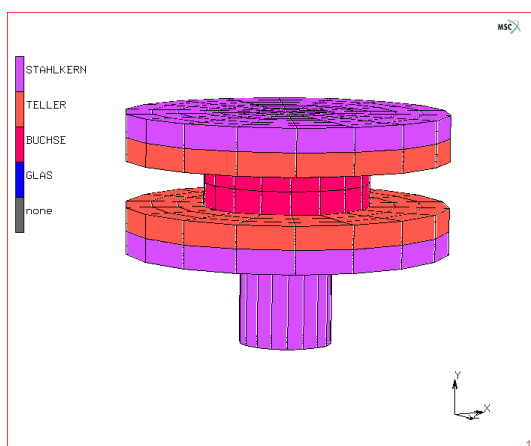
Scheibenmaße:	1500 x 1000 mm
	$t = 10\text{mm}$, $E = 70000 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.23$
Flächenlast:	$2 \text{ kN/m}^2 = 0.002 \text{ N/mm}^2$
Punkthalterort:	150 mm von den Ecken
Punkthalterdefinition:	$r_i = 18 \text{ mm}$ (Bohrungsradius)
	$r_a = 35 \text{ mm}$ (Außenradius der Tellerschicht)
	$t_s = 5 \text{ mm}$, $E_s = 50 \text{ N/mm}^2$ (EPDM-Profil)
	$t_h = 3.0 \text{ mm}$, $E_h = 3000 \text{ N/mm}^2$ (POM)
	$Z_h = -30 \text{ mm}$ (Exzentrizität: Abstand Gelenk am Bolzenende-Glasunterseite)

Der Punkthalter besteht aus einem Stahlkern (violett): $E_{\text{Stahl}} = 210000 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.3$

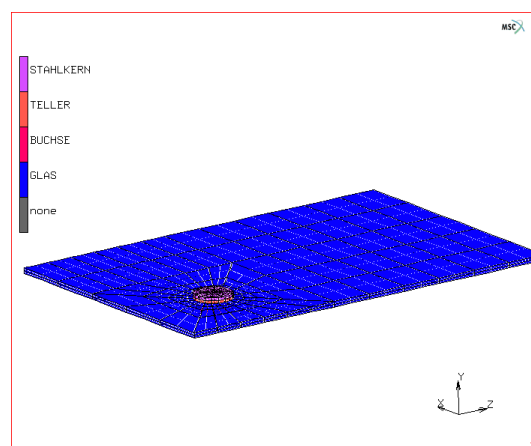
Die Tellerschicht wurde mit einem E-Modul von 50 N/mm^2 mit $\nu = 0.49$ abgebildet.

Die Hülsenschicht besteht aus POM mit einem E-Modul von 3000 N/mm^2 mit $\nu = 0.45$.

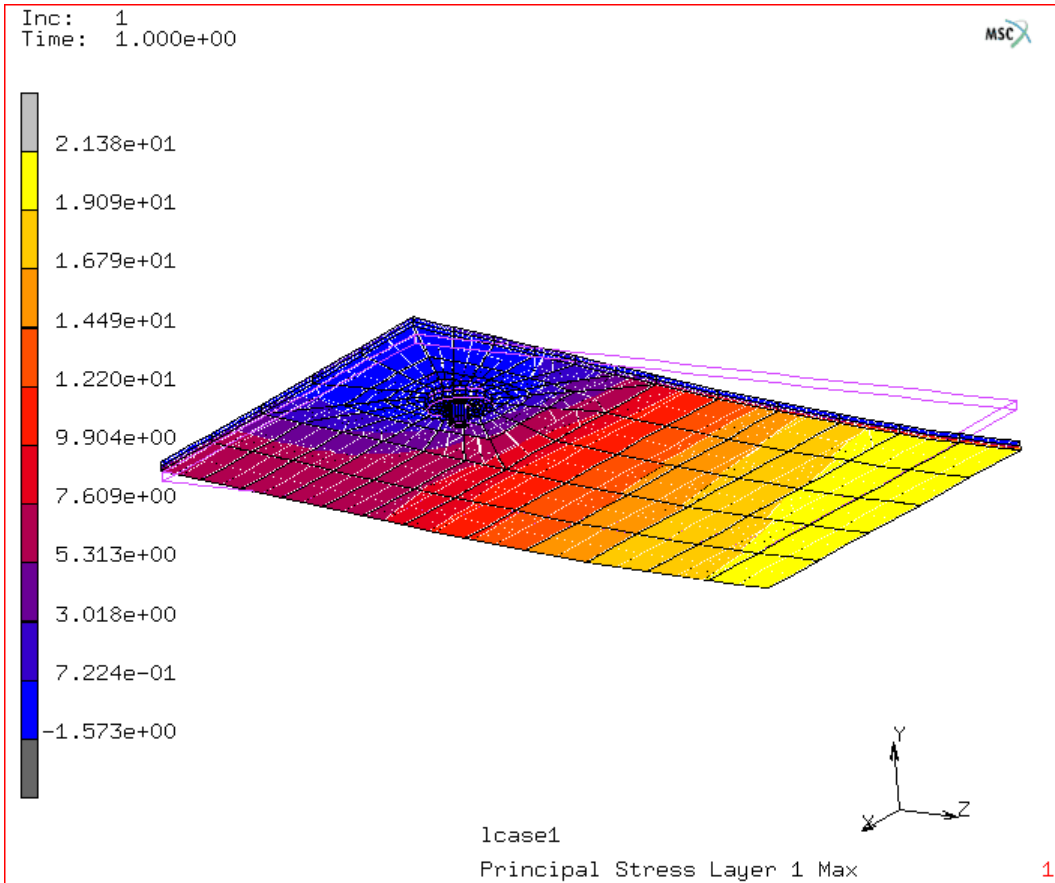
Abgebildet wurde aufgrund der Symmetrie nur ein Viertel des System: Die Lagerung erfolgt über die Punkthalter, die statisch bestimmt am Bolzenende drehweich (Gelenk) gelagert wurden. Die Exzentrizität von 30 mm wurde bei der Generierung des Bolzens berücksichtigt.



Punkthalter aus Volumenelementen (MARC)



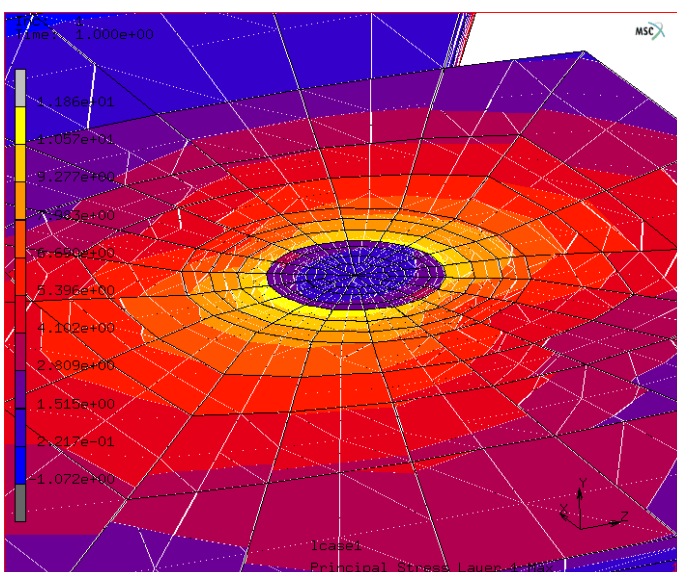
Viertelplatte aus Volumenelementen (MARC)



Verformtes System mit Darstellung der maximalen Hauptzugspannungen (MARC)

Die maximale Hauptzugspannung am Scheibenrand in Feldmitte beträgt: 21.38 N/mm²
Die maximale Verformung am Plattenrand in Feldmitte: $w = -8.68$ mm

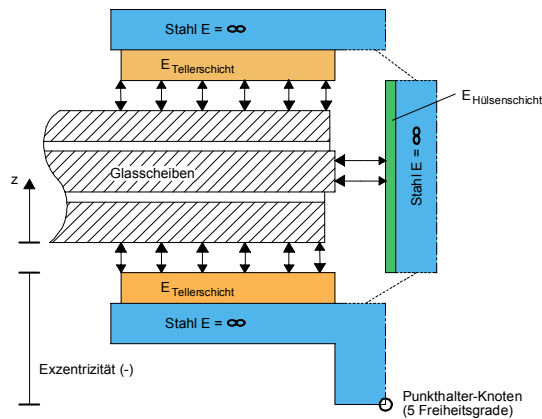
An der Bohrung entsteht eine kleinere maximale Hauptzugspannung von 11.86 N/mm²



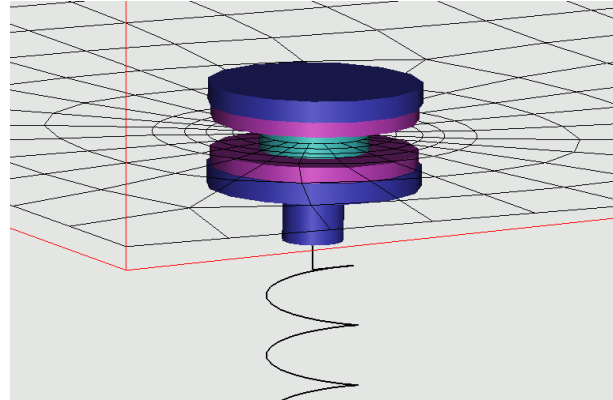
Ausschnitt: Hauptzugspannungen am Bohrlochrand (MARC)

Insgesamt wurden für das Viertel-Netz 957 Volumenelemente verwendet. Die Berechnungsdauer betrug 18.3 min.

Die Berechnung mit SJ MEPLA verfolgt einen anderen Lösungsweg. Hier wird ein eigenes Element angeboten, das die Halter abbildet. Alle notwendigen Eigenschaften (die Tellerschicht, die Buchsen-schicht und die Exzentrizität) werden dabei berücksichtigt /1/.



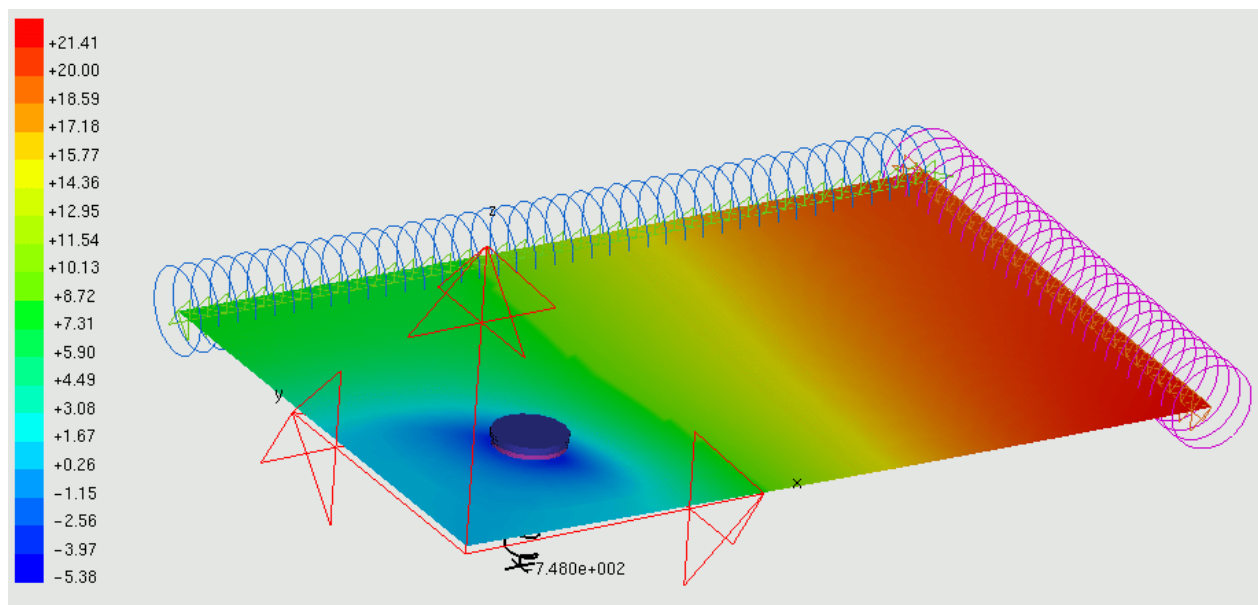
Modell des Punkthalters aus SJ MEPLA



Punkthalterelement mit automatischer Netzbildung

Der Stahlkern des Punkthalters wird in SJ MEPLA als unendlich steif angesetzt, so daß mit den Verschiebungen und Verdrehungen am Bolzenende (Fußpunkt) über einen Verformungsansatz das Zusammenwirken zwischen den Trennschichten und dem Glas beschrieben wird.

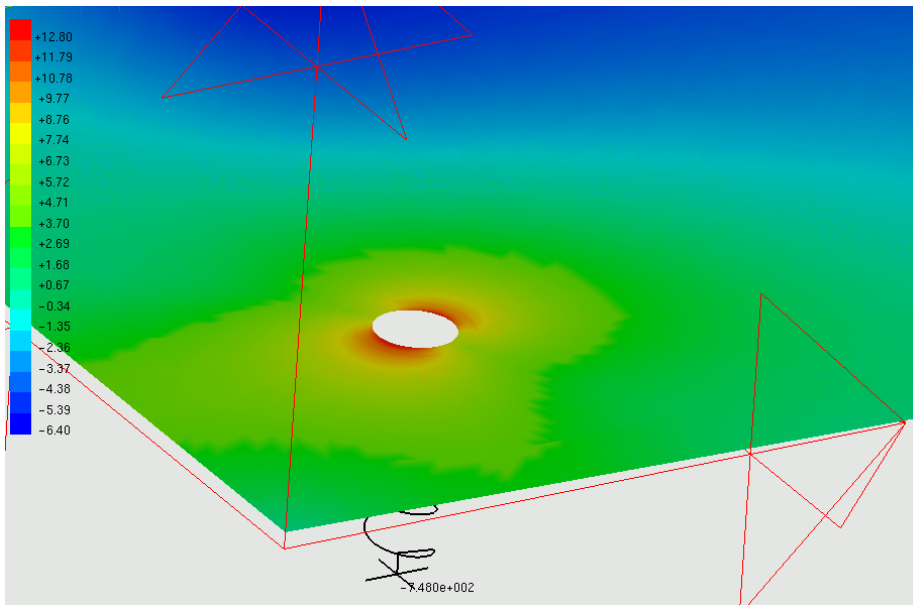
Die Berechnung mit SJ MEPLA ergab eine maximale Hauptzugspannung am Scheibenrand in Feldmitte von 21.41 N/mm² und stimmt mit der obigen Vergleichsrechnung überein.



Verformtes Viertel-System mit Symbolen für die Symmetrielager (SJ MEPLA)

Die maximalen Spannungen am Bohrlochrand ergeben sich auf der Plattenoberseite etwas größer als in MARC zu 12.80 N/mm². Im Gegensatz zur FE-Berechnung mit MARC, bei der alle Glas-Elemente im Punkthalter über die Knoten mit den Teller- und Buchsenelementen verbunden sind, wird in SJ MEPLA immer ein Gleiten der Scheibe über der Tellerschicht und ein Gleiten der Buchsen-schicht am Glasbohrungsrand angesetzt, so daß kein Schub übertragen werden kann. Dies entspricht besser dem realen Punkthalterverhalten. Daher wird hier davon ausgegangen, daß die durch SJ MEPLA ermittelte Spannung von 12.80 N/mm² eher zutrifft als die 11.86 N/mm². Um diesen Effekt in MARC analog zu

SJ MEPLA abzubilden, wären Kontaktansätze zwischen der EPDM-Auflagerschicht, der POM Buchenschicht und der Glasscheibe nötig, auf die hier verzichtet wird.



Hauptzugspannungen am Bohrloch

Die maximale Verformungen von 8.68 mm am Plattenrand in Feldmitte stimmt exakt mit der MARC Berechnung überein.

Für die Berechnung mit SJ MEPLA wurden 440 9-Knoten Elemente und 1 Punkthalter-Element verwendet. Die Berechnungsdauer betrug 0.68 min.

2.5 Dynamische Pendelschlagsimulation

Als Grundlage der Richtlinie „Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen (TRAV), Entwurfsfassung März 2001“ wurden an der Uni Darmstadt, Institut für Statik begleitend zu Versuchen Berechnungen mit dem FE-Programm ANSYS® 5.5 /10/ durchgeführt. Diese Ergebnisse sowie die Versuchsergebnisse gingen in die Tabelle B1 im Anhang B zu dieser Richtlinie ein. Zum Vergleich der dynamischen Berechnungsansätze wird auf diese Referenz zurückgegriffen /6-9/.

2.5.1 Vergleichsberechnungen

Die der Tabelle B1 zugrundeliegenden ANSYS-Berechnungen werden den Berechnungsergebnissen aus SJ MEPLA gegenübergestellt. Die Tabelle zeigt die ungünstigsten maximalen Spannungen [N/mm²] bei einer Fallhöhe von 450 mm aus den Lastfällen

- Pendelstoß in die Mitte der Scheibe
- Pendelstoß in die Ecke der Scheibe (Abstand je 250 mm)
- Pendelstoß an die Kante der Scheibe (Abstand 250 mm)

für allseitig gelenkig gelagerte Glasscheiben:

Glasdicke L1 [m] mm L2 [m]	1.0	1,0 2,0	1,5 3,0	2,0 3,0	2,0 4,0
8	148 / 154	152 / 159	160 / 158	165 / 152	152 / 151
14	81 / 81	92 / 93	82 / 85	82 / 82	83 / 84
16	65 / 67	73 / 79	76 / 79	66 / 69	67 / 71
20	42 / 37	46 / 45	60 / 52	51 / 46	45 / 47
30	19 / 17	24 / 21	29 / 26	31 / 27	29 / 27

Vergleich der maximal berechneten Spannungen [N/mm²] (SJ MEPLA / ANSYS)

L1, L2: Kantenlängen der Glasscheibe

Die Tabelle zeigt die gute Übereinstimmung zwischen MEPLA und ANSYS. Beide Programme berücksichtigen das geometrisch nicht-lineare Scheibenverhalten unter großen Verformungen bei einem dynamischen Berechnungsansatz nach *Newmark*.

Die Berechnung durch ANSYS erfolgte durch die Abbildung des Pendels mittels Volumenelementen, deren E-Modul den realistischen Eigenschaften des Pendels (50kg, 4.0bar, Zwillingstreifen nach DIN EN 12600) angepaßt wurde. Die Bereiche des Kontaktes zwischen den so abgebildeten Reifen und der Glasscheibe wurden mit Kontaktelementen überzogen, um den Stoßvorgang abbilden zu können.

Die Berechnung durch MEPLA verfolgt einen anderen Weg /1/:

Eine nicht-lineare Feder, deren Steifigkeits-Eigenschaften ebenfalls aus Versuchen hergeleitet wurde, beschreibt die mit 4.0 bar gefüllten Zwillingstreifen. Unter Berücksichtigung des Reifen(Feder-)andrucks auf die Scheibe wird die in der Feder erzeugte Kraft über geometrische Beziehung auf die realistische Andruckfläche der beiden Reifen gleichmäßig aufgeteilt. Die sich beim Stoß verändernde Andruckfläche wird dabei ständig berücksichtigt. Diese für den Spezialfall des Pendels optimierte Vorgehensweise kommt mit einem einzigen Freiheitsgrad aus, womit die Berechnung erheblich beschleunigt werden kann. Die Eingabedaten beschränken sich auf die Angabe des Auftreffpunktes, der Fallhöhe und einer vordefinierten Zeitschrittlänge.

3 Zusammenfassung

Die hier durchgeführten Vergleichsberechnungen zeigen einen repräsentativen Querschnitt der Ansätze und Möglichkeiten mit SJ MEPLA auf. Alle Vergleichsberechnungen bestätigen im Vergleich mit theoretischen wie vergleichenden FE-Ergebnissen die hohe Genauigkeit der SJ MEPLA Berechnungen. Hervorzuheben ist neben der Genauigkeit auch die einfache Eingabe, die Auswertung am PC sowie die hohe Berechnungsgeschwindigkeit, die das SJ System für den praktischen Einsatz prädestiniert.

4 Literatur

- /1/ Schlösser&Jasper Software GmbH, Aachen, SJ MEPLA, Handbücher zum Programm, (2001)
- /2/ MARC / MENTAT; Version 2000, MSC.Software Corporation, Palo Alto, USA (2000)
- /3/ Pica A., Hinton E., Wood R.D.; *Finite Element Analyses of Geometrically Nonlinear Plate Behavior using a Mindlin Formulation*; Computers&Structures, Vol. 11, 203-215 (1980)
- /4/ Bohmann, D.; *Ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Verbundglasscheiben*, Shaker Verlag Aachen, Dissertation, Schriftenreihe - Stahlbau, RWTH Aachen, Heft 43 (1999)
- /5/ Timoshenko S. P.; Woinowsky-Krieger S.; *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill, New York (1959)
- /6/ Wörner J.-D., Schneider J.; *Abschlußbericht zur experimentellen und rechnerischen Bestimmung der dynamischen Belastung von Verglasungen durch weichen Stoß*, Forschungsbericht für das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt), (2000)
- /7/ Schneider J., Wuttke U.; *Experimentelle und rechnerische Bestimmung der dynamischen Belastung von Verglasungen durch weichen Stoß*, VDI-Berichte1527, Bauen mit Glas, S. 637-676, (2000)
- /8/ Schneider J., Wörner J.-D.; *Impact Loading on Glass Panes by Soft Body Impact - Theoretical Analysis and Experimental Verification*, Proceedings of the 7th Glas Processing Days, Tampere, Finland, pp. 689, (2001)
- /9/ Schneider J.; *Festigkeit und Bemessung von Glas: Punktgelagerte Verglasungen, Dynamisch beanspruchte Verglasungen bei weichem Stoß*, Dissertation, Institut für Statik TU Darmstadt, (2001), erscheint in Kürze als Institutsbericht
- /10/ ANSYS Inc., Southpointe, 275 Technology DriveCanonsburg, PA 15317, SAS IP, Inc. (1998)