Ein Ansatz für die Überlagerung von kurz- und mittelfristig einwirkenden Lasten mit dauerhaften Einwirkungen unter Berücksichtigung eines Schubverbundes

Dr. Dirk Bohmann, Mepla Glas Software, Würselen, 2016

Einleitung

Der Ansatz einer Verbundwirkung für dauerhafte Einwirkungen wie Eigengewicht ist für Verbundglasscheiben i.d.R. nach DIN 18008-1 nicht zulässig. Für kurzzeitige und mittelfristige Einwirkungen wie Wind und Schnee weisen jedoch einige Verbundfolien eine erhöhte Steifigkeit auf, die durch allg. bauaufsichtliche Zulassungen auch bestätigt werden.

Die Verwendung dieser Steifigkeitswerte wirft nun die Frage auf, wie der Zustand für dauerhafte Einwirkung „ohne Verbund" mit den zulässigen Teilverbundwerten bei kurz- und mittelfristigen Lasten überlagert werden kann.

Der oft gehörte Ansatz einer Superposition des Lastfalles Eigengewicht mit den Berechnungsergebnissen aus Wind oder Schnee mit höherem Schubverbund ist dazu denkbar ungeeignet. Er erzeugt zum einen

- einen hohen Rechenaufwand, da zwei vollständige Berechnungsergebnisse je Gaußpunkt in ihren Spannungskomponenten zu überlagern sind, um daraus die neuen Hauptzugspannungen sowie deren Lage ermitteln zu können,
- was nur auf Basis linear geometrische Berechnungsansätze möglich ist.

Zum Zweiten ist diese Vorgehensweise mechanisch unverträglich

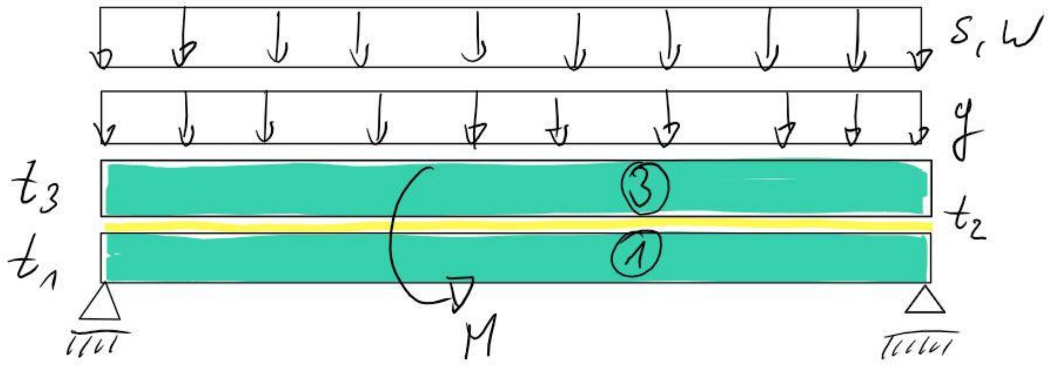
- mit nicht-linearen Berechnungen (großen Verformungen). Der Membranspannungszustand hängt von der Gesamtlast ab und kann daher nicht vorab in Einzelteile aufgespaltet werden.
- Eine (lineare) Überlagerung nicht-linearer Berechnungsergebnisse verbietet sich sowieso grundsätzlich.

Eine nachträgliche Überlagerung zweier Lastfälle mit unterschiedlichen Verbundsteifigkeiten scheidet damit im Allgemeinen aus.

Daher soll hier ein alternativer immer gültiger und immer auf der sicheren Seite liegender, alternativer Ansatz vorgestellt werden.

Lösungsansatz

Es soll ein Faktor für die dauerhafte Lasteinwirkung ermittelt werden, der die Spannungen in einer Verbundscheibe unter Ansatz eines Teil- oder Vollverbundes immer auf der sicheren Seite liegend genau so hoch ermittelt, dass dies spannungsmäßig mindestens dem Zustand ohne Verbundansatz entspricht.
Auf diese Weise könnten höhere Verbundwerte in den Lastfallüberlagerungen für die kurz- und mittelfristigen Lasten (z.B. Wind oder Schnee) angesetzt werden, da der dauerhafte Spannungszustand immer auf der sicheren Seite berücksichtigt würde.



Das Gesamtmoment im Verbundglas ohne Verbundansatz (E_{Folie} = *0.0 N/mm²*) ergibt sich aus der Summe beider Einzelmomente:

$$M = M_1 + M_3$$

Die Aufteilung des Gesamtmomentes auf die Einzelsteifigkeiten erfolgt dabei aus dem Steifigkeitsverhältnis der Einzelscheiben 1 und 3

$$M_1 = M \frac{t_1^3}{t_1^3 + t_2^3}$$

und

$$M_3 = M \frac{t_3^3}{t_1^3 + t_3^3}$$

Die Spannung in der dickeren Einzelscheibe t_{max} als Maximum aus *1* oder *3* ermittelt sich damit im Verbundglas ohne Verbundansatz aus

$$\sigma_{\max}^{ohne\,Verbund} = \frac{M_{\max}}{w_{\max}} = M \frac{6 \cdot t_{\max}}{t_1^3 + t_3^3} \quad mit\ t_{\max} = \{\max aus\, t_1, t_3, ...$$

mit dem Widerstandsmoment w_{max} der dickeren Scheibe t_{max}

$$w_{\max} = \frac{t_{\max}^2}{6}$$

Vergleicht man die Spannungen auf der sicheren Seite liegend mit einer monolithischen Scheibe (auch einem Teilverbund wird dabei „voller Verbund" unterstellt) aus der Summe aller Einzelscheiben inklusive der Verbundfolienstärke $t_1 + t_{Folie} + t_3$

$$\sigma_{\max}^{monolithisch} = \frac{6 \cdot M}{\left(\sum t_i\right)^2}$$

so ergibt sich der Faktor f_{eg} *aus*

$$\sigma_{\max}^{monolithisch} \cdot f_{eg} = \sigma_{\max}^{ohne\,Verbund}$$

zu

$$f_{eg} = t_{\max} \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} t_i\right)^2}{\sum_{1,3,5,\ldots,n} t_i^3}$$ mit den Glasschichten *1,3,5,…,n.*

Für eine Verbundglasscheibe aus 2 Gläsern ergibt sich damit

$$f_{eg} = t_{\max} \frac{(t_1 + t_{Folie} + t_3)^2}{t_1^3 + t_3^3}$$

Dieser Faktor f_{eg} erhöht nun die dauerhafte Belastung einer Verbundglasscheibe aus Eigengewicht mit teilweisem bis hin zu vollem Verbund derart, dass dabei auf der sicheren Seite liegend immer mindestens die Spannungen aus einem Ansatz ohne Verbund ermittelt werden.

Die Dicke der Verbundfolie muss dabei in der Gesamthöhe berücksichtigt werden, da ansonsten das Widerstandsmoment des Scheibenaufbaus zu gering angesetzt würde.

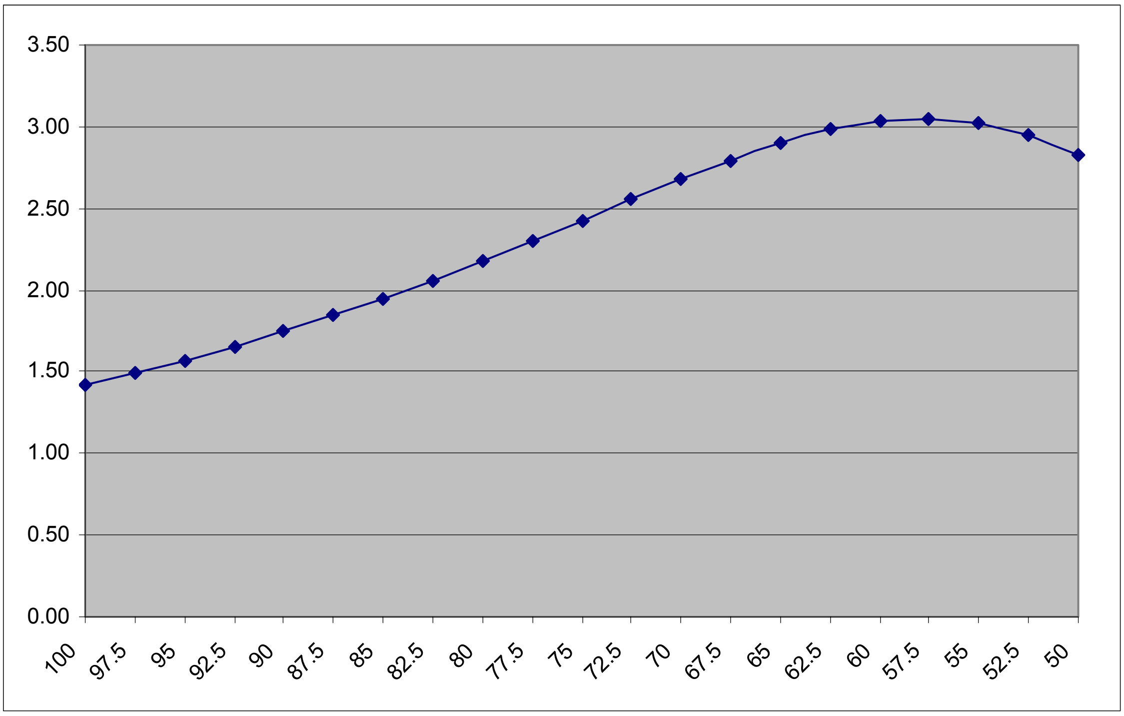
Faktoren am Beispiel einer Verbundglasscheibe 4/4 (Folienstärke 1.52mm):

$$t_{gesamt} = \left(t_1 + t_{Folie} + t_3\right) = 9.52mm$$

$$Anteil\,\% = \frac{t_{\max}}{t_{gesamt}}$$

t3	t1	Anteil %	Faktor
8	0	100	1.42
7.8	0.2	97.5	1.49
7.6	0.4	95	1.57
7.4	0.6	92.5	1.65
7.2	0.8	90	1.75
7	1	87.5	1.84
6.8	1.2	85	1.95
6.6	1.4	82.5	2.06
6.4	1.6	80	2.18
6.2	1.8	77.5	2.30
6	2	75	2.43
5.8	2.2	72.5	2.55
5.6	2.4	70	2.68
5.4	2.6	67.5	2.80
5.2	2.8	65	2.90
5	3	62.5	2.98
4.8	3.2	60	3.03
4.6	3.4	57.5	3.05
4.4	3.6	55	3.02
4.2	3.8	52.5	2.95
4	4	50	2.83

Bereich des 1.5-fachen Dickenverhältnisses der Scheiben t_3 zu t_1



Für zwei gleich dicke 4mm Scheiben (50/50 %) ermittelt sich der Faktor zu 2.83.

Für nicht gleich dicke Scheiben wie z.B. 12/8 mm (60/40 %) können sich auch größere Faktoren als für den 50/50% Fall ergeben, um die sichere Seite anzubilden. Dies ergibt sich direkt aus der Anwendung der einfachen Formel.

Beispielberechnung

Eine Beispielberechnung soll den Effekt verdeutlichen:

- horizontale Verbundglasscheibe
- 1000x1000mm, TVG, 4/1.52/4
- allseitig gelenkig gelagert
- linear geometrischer Ansatz
- Lasten:
  - Eigengewicht *g = 2 * 0.1 = 0.2 kN/m²*
  - Winddruck *w = 1.0 kN/m²*
  - Schnee *s = 1.5 kN/m²*

Bisheriger Bemessungsansatz:

- alle Lasten ohne Verbundansatz
- mit Verbundglaserhöhungsfaktor +10% in R_d

Lastfallkombination:

$1.35 \cdot g + 0.9 \cdot w + 1.5 \cdot s$ mit $E_{PVB} = 0.0$

Layer		Ed	< Rd	OK/NOK
3	Area	22.55	51.33	✓
	Area	29.07	51.33	✓
1	Area	22.55	51.33	✓
	Area	29.08	51.33	✓

(E_d maximale Hauptzugspannungen auf der Ober- bzw. Unterseite einer jeden Glasschicht)

Neuer Bemessungsansatz:

- mit Teilverbund und erhöhtem Eigengewichtsfaktor f_{eg} = *2.83*
- hier z.B. TROSIFOL ES für Wind, Schnee und Holmlast mit *G = 7 N/mm², E = 21 N/mm²*
- ohne Verbundglaserhöhungsfaktor von 10% in R_d

Lastfallkombination:

$2.83 * g + 0.9 * w + 1.5 * s$ *mit* $E_{PVB} = 21.0$

Layer		Ed	< Rd	OK/NOK
3	Area	7.36	46.67	✓
	Area	7.57	46.67	✓
1	Area	6.76	46.67	✓
	Area	14.39	46.67	✓

Dadurch, dass nun für die maßgebenden Lasten wie Wind oder Schnee eine höhere Verbundwirkung angesetzt werden kann, kann reduziert sich das Spannungsniveau von *29.08* auf *14.39* N/mm² und somit auf unter 50%. Die Spannungen alleine aus Eigengewicht betragen dabei 1.0-fach nur 0.83 N/mm² und werden nun durch den Faktor *2.83* lediglich auf *2.34* N/mm² erhöht – was gegenüber dem Lastniveau aus Wind und Schnee jedoch kaum ins Gewicht fällt.

Selbst mit einem recht geringen Schubmodul von G = 0.4 N/mm² reduzieren sich für diese Beispiel die Spannungen der 4/1.52/4 Scheibe noch auf *24.51* anstatt der *29.08* N/mm² aus dem Ansatz ganz ohne Verbundwirkung:

Layer		Ed	< Rd	OK/NOK
3	Area	17.73	51.33	✓
	Area	18.56	51.33	✓
1	Area	17.70	51.33	✓
	Area	24.51	51.33	✓

Alternativ könnte mit diesem Ansatz die Glasdicke auch auf 2x3mm reduziert werden, wobei die Spannungen dabei immer noch kleiner (*22.0 N/mm²*) wären als mit dem Ansatz gänzlich ohne Verbundwirkung. Dabei wurde der zugehörige Faktor nach obiger Formel für einen Glasaufbau von 3/1.52/3 zu *3.14* ermittelt.

Layer		Ed	< Rd	OK/NOK
3	Area	10.60	46.67	✓
	Area	10.89	46.67	✓
1	Area	9.36	46.67	✓
	Area	22.00	46.67	✓

Naturgemäß erzeugt dieser Ansatz für Verbundfolien bei denen für keine Belastungs- und Einsatzsituation eine Schubsteifigkeit ansetzt werden darf einen Nachteil, da nun die Spannungen (vollständig ohne Verbundansatz) für die dauerhaft einwirkenden Lasten zu hoch ermittelt werden. Für diesen Fall einer Berechnung komplett ohne Schubverbund ist die Formel natürlich auch nicht gemacht.
Des Weiteren tritt ein positiver Effekt umso stärker hervor, je größer die Belastungen aus Wind und Schnee im Vergleich zu den ständigen Lasten sind.
Wirkt nur Eigengewicht, so macht die Verwendung des hier beschriebenen Ansatzes ebenso keinen Sinn. Werden also Spannungsnachweise nach DIN 18008 alleinig für ständige Belastungen (z.B. mit kleinem $k_{mod} = 0.25$) geführt, so sollte für diese Lastfälle weiter der Teilsicherheitsbeiwert von *1.35* verwendet werden.

Dieser hier beschriebene Ansatz gilt auch bei Verwendung des nicht-linear geometrischen Verhaltens, da ein doppelt so hoch angesetztes Eigengewicht in jedem Fall auch höhere Spannungen ergeben wird. Befindet man sich weit im nicht-linearen Bereich (also bei großen Durchbiegungen mit hohen Membraneffekten) werden die Einspareffekte jedoch kleiner, da die nicht-linearen Effekte gerade bei dünnen Scheiben einen besonders hohen Einfluss haben, so dass der Ansatz ohne Verbund (also die alleinige Betrachtung der dünneren Einzelscheiben) hier bereits eine hohe Spannungsreduktionen bewirkt. Eine quasi monolithische Platte gleicher Dicke hingegen, gerät weniger schnell in den nicht-linearen Bereich, selbst bei doppelt so hohem Eigengewicht, so dass diese Spannungen immer über den Spannungen aus einer Einzelscheibenbetrachtung liegen.

Für obiges Beispiel ergeben sich nicht-linear geometrisch aus dem Lastfall

$$1.35(\text{bzw. } 2.83) * g + 0.9 * w + 1.5 * s$$

ohne Verbund -> *17.93 N/mm²*

Layer		Ed	< Rd	OK/NOK
3	Area	16.94	51.33	✓
	Area	17.93	51.33	✓
1	Area	16.94	51.33	✓
	Area	17.93	51.33	✓

mit Verbund *E = 21* und Faktor *2.83* -> *14.54 N/mm²*

Layer		Ed	< Rd	OK/NOK
3	Area	7.20	46.67	✓
	Area	7.48	46.67	✓
1	Area	6.67	46.67	✓
	Area	14.54	46.67	✓

ebenso eine Ansenkung des Ausnutzungsniveaus. Die Spannungsreduktion beträgt hier noch 19%.

Offene Fragen

Offen bleibt noch die Frage, ob aus sicherheitstechnischen Erwägungen eine Erhöhung nach Formel auf *2.83* (für 4/1.52/4) bereits ausreichen wird, um den bisherigen Sicherheitsfaktor für ständige Belastungen aus Eigengewicht von *1.35* zu ersetzen oder ob etwa auch hier noch eine weitere Erhöhung auf *2.83 + 0.35* (oder gar *2.83 * 1.35*) angesetzt werden sollte? Da die Handformel aber immer auf der sicheren Seite liegenden Spannungen für den Grenzzustand voller Verbund ermittelt, dieser Zustand mit einer berücksichtigten Foliensteifigkeit von z.B. *G = 7.0 bzw. G = 0.4 N/mm²* aber nicht gänzlich erreicht wird, entsteht bereits durch diese Überschätzung der Spannungen ein weiterer Zuschlag auf die Spannungen, so dass die Verwendung des Sicherheitsfaktors von z.B. *2.83* für die in der Praxis vorkommenden Teilverbundzustände ausreichend sein müsste.

Zusammenfassung

Die hier erstellte, einfache Formel erlaubt eine erhebliche Reduktion der Spannungen. Eine zulässige Verbundwirkung für kurz- und mittelfristige Lasten kann nun gemeinsam mit langfristig wirkenden Beanspruchungen kombiniert werden.

Da dies eine rein mechanisch- mathematische Herleitung ist, gibt es keinen Grund diese Formel nicht anwenden zu dürfen. Schließlich ist man damit immer auf der sicheren Seite.