

Statischer Nachweis

# Galeo XT System

Galeo XT Cylindric Wave Unit  
Galeo XT Flug-Cradle

Stand: 08/2008



**Inhalt**

Vorwort.....	3
Komponenten.....	3
Werkstoffe.....	4
Maximallasten.....	11
Galeo XT	
Federbolzen hinten (Bolzen Distanzer).....	5
Federbolzen vorne.....	5
Bolzen vorne.....	6
Flugfitting hinten.....	6
Distanzer hinten.....	7
Flugfitting vorne.....	7
Distanzer vorne.....	8
Galeo XT Flug-Cradle	
Kugelsperbolzen.....	9
Fitting vorne.....	9
Fitting hinten.....	10
Distanzer hinten.....	10
Lastfälle	
ohne Windlasten	
1. Gerader Aufbau ohne Windlasten.....	12
2. Gewinkelter Aufbau ohne Windlasten.....	16
3. Gewinkelter Aufbau mit Zusatzabspannung ohne Windlasten.....	19
mit Windlasten	
4. Gerader Aufbau Windlasten.....	22
5. Gewinkelter Aufbau Windlasten.....	23
6. Gewinkelter Aufbau mit Zusatzabspannung und Windlasten.....	24
7. Standsicherheitsnachweis.....	26
Abschlussklärung.....	27
Quellenangaben.....	28
Anhang	

## Vorwort

Das Galeo XT Line-Array System ist ein Großbeschallungssystem, konstruiert nach dem Stand der Technik. Die einzelnen Elemente sind in den Konfigurationen mit 80° und 120° horizontalem Abstrahlwinkel erhältlich, die sich statisch nicht unterscheiden und gleich behandelt werden. Das Gehäuse ist aus Birkenperrholz gefertigt, alle Flugfittings sind aus Stahl.

Die Berechnung erfolgt auf Basis der DIN 18800 (Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion) mit Verweisen auf die Unfallverhütungsvorschrift BGV-C1 (Veranstaltungs- und Produktionsstätten für szenische Darstellung) in der jeweils gültigen Fassung.

Die Windlastannahme erfolgt nach DIN 4112 (Fliegende Bauten). Daraus ergibt sich ein zwingend notwendiger Abbau ab Windstärke 8 nach Beaufort.

Der dynamische Anteil während des Auf- und Abbauvorgangs wird durch den Faktor 1.2 berücksichtigt. Schneelasten werden nicht berücksichtigt.

Treten andere als die hier behandelten Lastfälle auf, sind gesonderte Nachweise erforderlich.

## Komponenten

Die einzelnen Elemente des Galeo XT werden über Federbolzen verbunden. Die vorderen Distanzer der unteren Box werden bei gezogenen Federbolzen nach oben zwischen die vorderen Fittings der oberen Box geschoben. Beim Loslassen der federbelasteten Bolzen sind die Elemente vorne verbunden. Die Anwinkelung von 0...7° erfolgt über den von der oberen Box nach unten geklappten, hinteren Distanzer mit entsprechendem Federbolzen in gleicher Weise. Die Verbindung mit dem Flug-Cradle kommt vorne über Kugelsperrbolzen zu Stande, hinten über einen kurzen Distanzer, der über den hinteren Federbolzen mit dem ersten Element verbunden wird. Die Distanzer werden zwischen Fittings geführt.

Eigengewicht Galeo XT	69kg → 0,69kN
Eigengewicht Galeo XT Flug-Cradle (incl. Schäkel, Haken etc. 5kg)	23kg → 0,23kN

## Werkstoffe

Das Galeo XT Line-Array System und der Flug-Cradle sind aus folgenden Werkstoffen gefertigt...

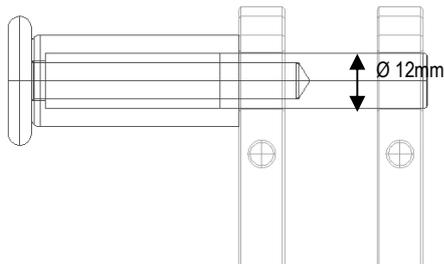
Gehäuse	Birkensperrholz
Fittings vorne, hinten	1.0045 (S355JR)
Bolzen vorne	1.0711 (9S20K)
Distanzer vorne, hinten	1.0045 (S355JR)
Federbolzen vorne, hinten	1.6580 (30CrNiMo8)
Bolzen hinten, Flug-Cradle	1.6580 (30CrNiMo8)
Kugelsperrbolzen 10mm	1.4542 (X5CrNiCuNb16-4) - Belastbarkeit nach Datenblatt des Herstellers -
Flug-Cradle	1.0045 (S355JR)
Distanzer am Flug-Cradle	1.0045 (S355JR)

## Maximallasten

### Federbolzen hinten (Bolzen Distanzer)

Die beiden Bolzen, die den hinteren Distanzer verbinden sind aus gleichem Stahl und in gleichem Durchmesser ausgeführt.

Nachweis auf Abscheren.



$$f_{y,k} = 1050 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad f_{u,k} = 1250 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\gamma_M = 1,1 \quad [1]$$

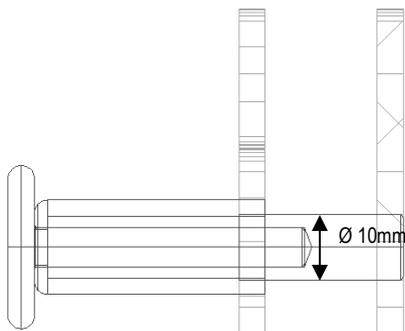
$$r = 6\text{mm}$$

$$V_{r,d} = \frac{\pi \cdot (6\text{mm})^2 \cdot 0,6 \cdot 1250 \frac{N}{\text{mm}^2}}{1,1} = 77,1\text{ kN}$$

### Federbolzen vorne

Die beiden Bolzen verbinden den vorderen Distanzer der unteren Box mit der oberen Box.

Nachweis auf Abscheren.



$$f_{y,k} = 1050 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad f_{u,k} = 1250 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

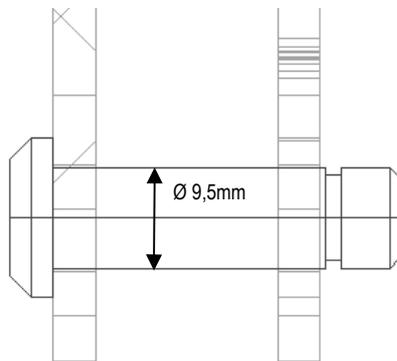
$$r = 5\text{mm}$$

$$V_{r,d} = \frac{\pi \cdot (5\text{mm})^2 \cdot 0,6 \cdot 1250 \frac{N}{\text{mm}^2}}{1,1} = 53,5\text{ kN}$$

### Bolzen vorne

Die vier Bolzen verbinden die vorderen Distanzer mit den vorderen Fittings.

Nachweis auf Scherung.



$$f_{u,k} = 520 \frac{N}{mm^2}$$

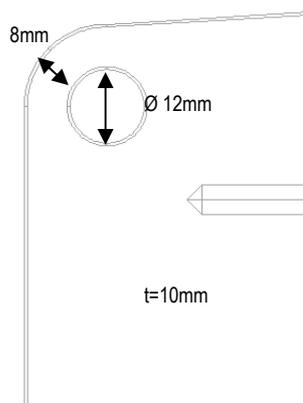
$$r = 4,75mm$$

$$V_{r,d} = \frac{\pi \cdot (4,75 mm)^2 \cdot 0,6 \cdot 520 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 20,1 kN$$

### Flugfitting hinten

Die beiden hinteren Fittings halten über den hinteren Federbolzen den hinteren Distanzer.

Nachweis auf Lochleibung.



$$f_{y,k} = 360 \frac{N}{mm^2} \quad f_{u,k} = 510 \frac{N}{mm^2}$$

$$t = 10mm$$

$$d_l = 12mm$$

$$e = \frac{12mm}{2} + 8mm = 14mm$$

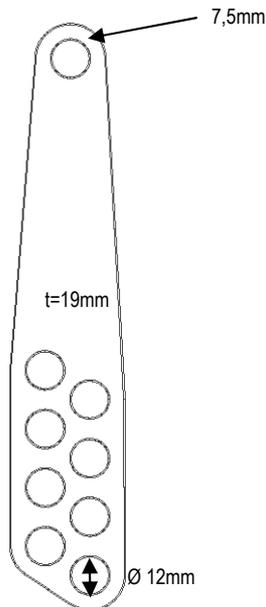
$$\alpha = 1,1 \frac{14mm}{12mm} - 0,3 = 0,98$$

$$V_{r,d} = \frac{10mm \cdot 12mm \cdot 0,98 \cdot 360 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 38,5kN$$

### Distanzer hinten

Der hintere Distanzer verbindet über den hinteren Bolzen der oberen Box und den Federbolzen der unteren Box die Flugfittings der oberen Box mit dem Flugfittings der unteren Box.

Nachweis auf Lochleibung.



$$f_{y,k} = 360 \frac{N}{mm^2} \quad f_{u,k} = 510 \frac{N}{mm^2}$$

$$t = 4mm$$

$$d_l = 19,5mm$$

$$e = \frac{12,5mm}{2} + 7,5mm = 13,75mm$$

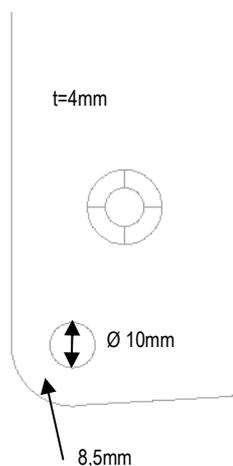
$$\alpha = 1,1 \frac{13,75mm}{12,5mm} - 0,3 = 0,91$$

$$V_{r,d} = \frac{19,5mm \cdot 12mm \cdot 0,91 \cdot 360 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 70kN$$

### Flugfitting vorne

Die vier vorderen Fittings der oberen Box halten über die vorderen Federbolzen die Distanzer der unteren Box.

Nachweis auf Lochleibung.



$$f_{y,k} = 360 \frac{N}{mm^2} \quad f_{u,k} = 510 \frac{N}{mm^2}$$

$$t = 4mm$$

$$d_l = 10mm$$

$$e = \frac{10mm}{2} + 8,5mm = 13,5mm$$

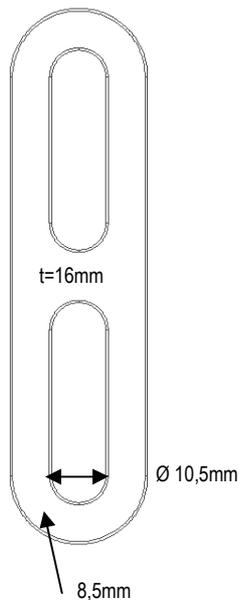
$$\alpha = 1,1 \frac{13,5mm}{10mm} - 0,3 = 1,185$$

$$V_{r,d} = \frac{4mm \cdot 10mm \cdot 1,185 \cdot 360 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 15,5kN$$

### Distanzer vorne

Die vordere Distanzer verbinden über die vorderen Bolzen der unteren Box und die Federbolzen der oberen Box die Flugfittings der unteren Box mit den Flugfittings der oberen Box.

Nachweis auf Lochleibung.



$$f_{y,k} = 360 \frac{N}{mm^2} \quad f_{u,k} = 510 \frac{N}{mm^2}$$

$$t = 16mm$$

$$d_l = 10,5mm$$

$$e = \frac{10,5mm}{2} + 8,5mm = 13,75mm$$

$$\alpha = 1,1 \frac{13,75mm}{10,5mm} - 0,3 = 1,14$$

$$V_{r,d} = \frac{16mm \cdot 10mm \cdot 1,14 \cdot 360 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 59,7kN$$

### Kugelsperrbolzen (Flug-Cradle)

Die beiden vorderen Kugelsperrbolzen verbinden die vorderen Fittings des Flug-Cradles über die vorderen Distanzer mit den vorderen Fittings der obersten Box.

Kein gesonderter Nachweis auf Abscheren erforderlich. Maximale Abscherkraft aus Datenblatt im Anhang:



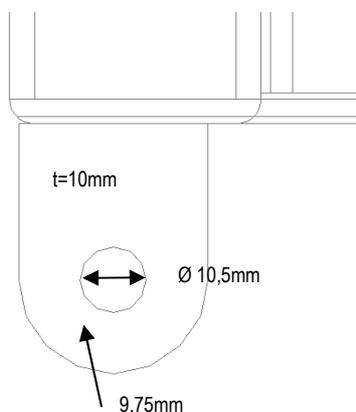
Quelle: Halder Normteile

$$V_{r,d} = \frac{38kN}{1,1} = 34,5kN$$

### Fittings vorne (Flug-Cradle)

Die vier vorderen Fittings des Flug-Cradles halten über die Kugelsperrbolzen die Distanzer der unteren Box.

Nachweis auf Lochleibung. (Schweißnaht gesondert)



$$f_{y,k} = 360 \frac{N}{mm^2} \quad f_{u,k} = 510 \frac{N}{mm^2}$$

$$t = 10mm$$

$$d_l = 10,5mm$$

$$e = \frac{10,5mm}{2} + 9,75mm = 15mm$$

$$\alpha = 1,1 \frac{15mm}{10,5mm} - 0,3 = 1,27$$

$$V_{r,d} = \frac{10mm \cdot 10mm \cdot 1,27 \cdot 360 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 41,5kN$$

Fittings hinten (Flug-Cradle)

Die beiden hinteren Fittings halten über den hinteren Bolzen den Distanzer.

Nachweis auf Lochleibung. (Schweißnaht gesondert)

$$f_{y,k} = 360 \frac{N}{mm^2} \quad f_{u,k} = 510 \frac{N}{mm^2}$$

$$t = 10mm$$

$$d_l = 12,5mm$$

$$e = \frac{12,5mm}{2} + 8,75mm = 15mm$$

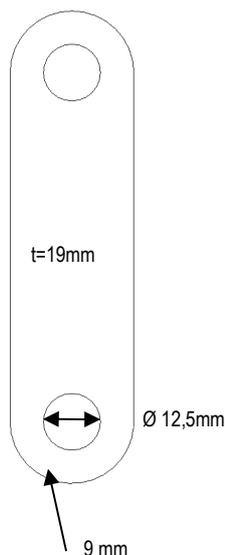
$$\alpha = 1,1 \frac{15mm}{12,5mm} - 0,3 = 1,02$$

$$V_{r,d} = \frac{10mm \cdot 12mm \cdot 1,02 \cdot 360 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 40kN$$

Distanzer (Flug-Cradle)

Der Distanzer verbindet über den hinteren Bolzen des Flug-Cradles und dem Federbolzen der obersten Box die hinteren Fittings des Flug-Cradles mit den hinteren Flugfittings der obersten Box.

Nachweis auf Lochleibung.



$$f_{y,k} = 360 \frac{N}{mm^2} \quad f_{u,k} = 510 \frac{N}{mm^2}$$

$$t = 19mm$$

$$d_l = 12,5mm$$

$$e = \frac{12,5mm}{2} + 9mm = 15,25mm$$

$$\alpha = 1,1 \frac{15,25mm}{12,5mm} - 0,3 = 1,04$$

$$V_{r,d} = \frac{19mm \cdot 12mm \cdot 1,04 \cdot 360 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 74,6kN$$

Summe der ertragbaren Lasten

Federbolzen / Bolzen hinten 1x	77kN
Federbolzen vorne 2x	107kN
Bolzen vorne 4x	80kN
Flugfitting hinten 2x	77kN
Distanzer hinten 1x	70kN
Flugfitting vorne 4x	62kN
Distanzer vorne 2x	119kN
Kugelsperrbolzen (Flug-Cradle) 2x	182kN
Fittings vorne (Flug-Cradle) 4x	166kN
Fittings hinten (Flug-Cradle) 2x	80kN
Distanzer (Flug-Cradle) 1x	75kN

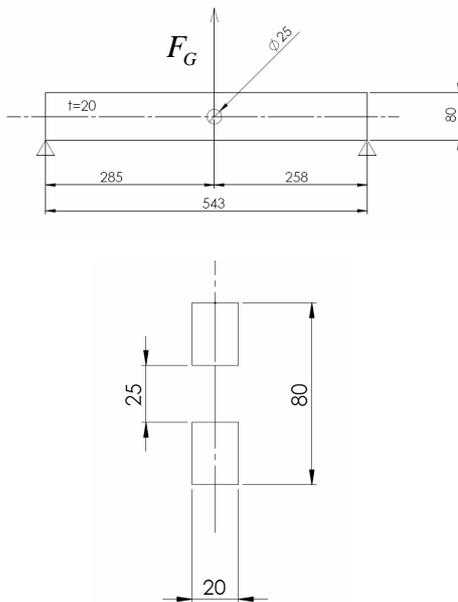
*Die maximale Kraft darf in der Flugmechanik vorne 62kN und hinten 70kN nicht überschreiten.*

## Lastfälle

### Lastfall 1: 12 x Galeo XT (doppeltes Gewicht) am Pinpoint 1 (12 x Galeo XT nach BGV-C1) ohne Wind

#### Nachweis des Mittelholmes

Annahme: Der mittlere Holm ist beidseitig gelenkig gelagert.



$$f_{y,k} = 360 \frac{N}{mm^2} \quad f_{u,k} = 510 \frac{N}{mm^2}$$

$$F_G = 1,2 \cdot 10 \frac{kg}{s^2} (12 \cdot 2 \cdot 69kg + 23kg) = 20,1kN \quad [2]$$

$$l_1 = 285mm$$

$$l_2 = 258mm$$

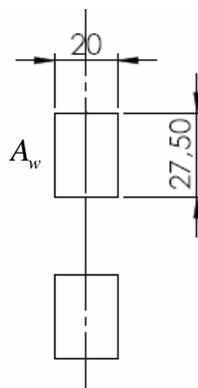
$$l_0 = 543mm$$

$$M_{b,max} = \frac{20,1kN \cdot 285mm \cdot 258mm}{543mm} = 2,72 \cdot 10^6 Nmm$$

$$W_b = \frac{20((80mm)^3 - (25mm)^3)}{6 \cdot 80mm} = 2,07 \cdot 10^4 mm^3$$

$$\sigma_b = \frac{2,72 \cdot 10^6 Nmm}{2,07 \cdot 10^4 mm^3} = 131 \frac{N}{mm^2}$$

Annahme: Nur der Teil oberhalb der Bohrung trägt gegen die Querkraft.



$$A_w = 27mm \cdot 20mm = 540mm^2$$

$$F_G = 20,1kN$$

$$\tau_s = \frac{20,1kN}{540mm^2} = 37 \frac{N}{mm^2}$$

$$\gamma_F = 1,5 \quad [3]$$

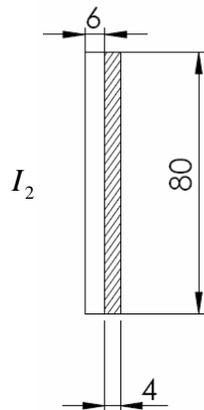
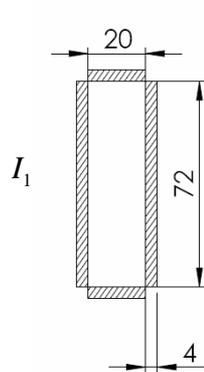
$$\sigma_{S,d} = 1,5 \sqrt{(131 N / mm^2)^2 + 3(37 N / mm^2)^2} = 219 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = \frac{360 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 327 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_{S,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{219 \frac{N}{mm^2}}{327 \frac{N}{mm^2}} = 0,67 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt.}$$

## Nachweis der Schweißnaht zwischen Mittelholm und Querbalken

Annahme: Die Schweißnaht wirkt als Einspannung und nimmt die Querkraft und das Moment aus Querkraft und Hebelarm anteilig auf.



$$F_{\text{vorne}} = \frac{20,1 \text{ kN} \cdot 258 \text{ mm}}{543 \text{ mm}} = 9,55 \text{ kN}$$

$$M_b = 9,55 \text{ kN} \cdot 285 \text{ mm} = 2,7 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$I_1 = 2 \left( \frac{20 \text{ mm} \cdot (4 \text{ mm})^3}{12} + 20 \cdot 4 \left( \frac{72 \text{ mm} + 4 \text{ mm}}{2} \right)^2 \right) + \frac{4 \text{ mm} \cdot (72 \text{ mm})^3}{12}$$

$$= 4,7 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = \frac{4 \text{ mm} \cdot (80 \text{ mm})^3}{12} = 1,7 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{ges}} = 4,7 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 + 2 \cdot 1,7 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 = 8,1 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$W_b = \frac{8,1 \cdot 10^5 \text{ mm}^4}{40 \text{ mm}} = 2,03 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_b = \frac{2,7 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{2,03 \cdot 10^4 \text{ mm}^3} = 133 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$A_{w,1} = 2 \cdot 4 \text{ mm} (72 \text{ mm} + 20 \text{ mm}) = 736 \text{ mm}^2$$

$$A_{w,2} = 80 \text{ mm} \cdot 4 \text{ mm} = 320 \text{ mm}^2$$

$$A_{w,\text{ges}} = 736 \text{ mm}^2 + 2 \cdot 320 \text{ mm}^2 = 1376 \text{ mm}^2$$

$$\tau_s = \frac{9,55 \text{ kN}}{1376 \text{ mm}^2} = 7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{S,d} = \sqrt{(133 \text{ N/mm}^2)^2 + (7 \text{ N/mm}^2)^2} = 133 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

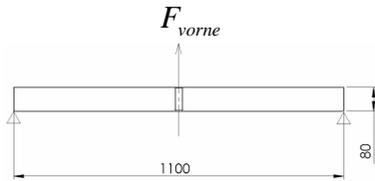
$$\sigma_{\text{zul},S355} = 190 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [4]$$

$$\sigma_{R,d} = \frac{190 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,1} = 173 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\sigma_{S,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{133 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{173 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,77 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt.}$$

## Nachweis des Querbalkens

Annahme: Der Querbalken nimmt die Querkraft als Biegemoment auf. Die Rippen werden nicht berücksichtigt.



$$f_{y,k} = 360 \frac{N}{mm^2} \quad f_{u,k} = 510 \frac{N}{mm^2}$$

$$W_b = \frac{40mm \cdot (80mm)^3 - (72mm)^3 \cdot 32mm}{6 \cdot 80mm} = 1,78 \cdot 10^4 mm^3$$

$$M_b = \frac{9,55kN \cdot 1100mm}{4} = 2,6 \cdot 10^6 Nmm$$

$$\sigma_b = \frac{2,6 \cdot 10^6 Nmm}{1,78 \cdot 10^4 mm^3} = 148 \frac{N}{mm^2}$$

$$A_w = 80mm \cdot 40mm - 72mm \cdot 32mm = 896mm^2$$

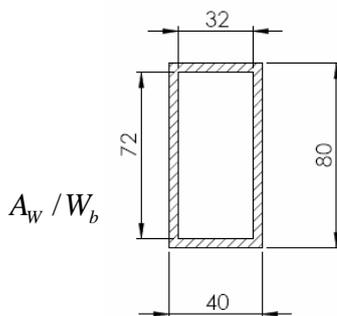
$$F_{vorne} = 9,55kN$$

$$\tau_s = \frac{9,55kN}{896mm^2} = 10,6 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{S,d} = 1,5 \sqrt{(148 N/mm^2)^2 + 3(10,6 N/mm^2)^2} = 224 \frac{N}{mm^2}$$

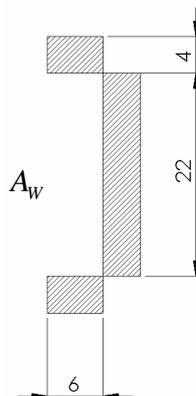
$$\sigma_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = \frac{360 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 327 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_{S,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{224 \frac{N}{mm^2}}{327 \frac{N}{mm^2}} = 0,69 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt.}$$



## Nachweis der Schweißnaht an den vorderen Fittings

Annahme: Die Last verteilt sich gleich auf alle 4 Fittings.



$$F_{fv} = \frac{9,55kN}{4} = 2,4kN$$

$$A_w = 2 \cdot 4 \cdot 6mm^2 + 22 \cdot 4 = 136mm^2$$

$$\sigma_{S,d} = \frac{2,4kN}{136mm^2} = 17,6 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{zul,S355} = 190 \frac{N}{mm^2}$$

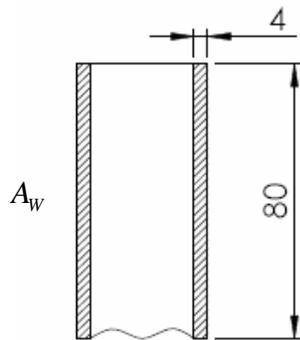
$$\sigma_{R,d} = \frac{190 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 173 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_{S,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{17,6 \frac{N}{mm^2}}{173 \frac{N}{mm^2}} = 0,1 \leq 1$$

Nachweis erfüllt.

## Nachweis der Schweißnaht an den hinteren Fittings

Annahme: Die Last verteilt sich gleich auf beide Fittings.



$$F_{fjh} = \frac{10,5kN}{2} = 5,25kN$$

$$A_w = 2 \cdot (80mm \cdot 4mm) = 640mm^2$$

$$\tau_{S,d} = \frac{5,25kN}{640mm^2} = 8,2 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{zul,S355} = 190 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{R,d} = \frac{190 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 173 \frac{N}{mm^2}$$

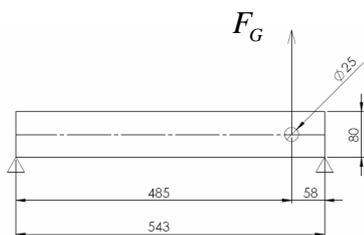
$$\frac{\tau_{S,d}}{\tau_{R,d}} = \frac{8,2 \frac{N}{mm^2}}{173 \frac{N}{mm^2}} = 0,05 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt.}$$

Durch ein stärkeres Curving wandert der Schwerpunkt nach hinten. Die Last im Flugrahmen – als kritischste Stelle – ändert sich jedoch nicht.

Lastfall 2: 24 x Galeo XT (doppeltes Gewicht) am Pinpoint 5  
(24 x Galeo XT nach BGV-C1) ohne Wind.

Nachweis des Mittelholmes

Annahme: Der mittlere Holm ist beidseitig gelenkig gelagert..



$$f_{y,k} = 360 \frac{N}{mm^2} \quad f_{u,k} = 510 \frac{N}{mm^2}$$

$$F_G = 1,2 \cdot 10 \frac{kg}{s^2} (24 \cdot 2 \cdot 69kg + 23kg) = 40kN$$

$$l_1 = 485mm$$

$$l_2 = 58mm$$

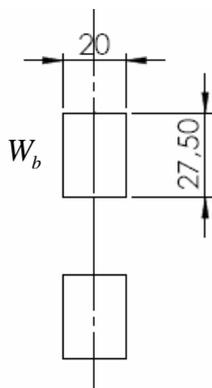
$$l_0 = 543mm$$

$$M_{b,max} = \frac{40kN \cdot 485mm \cdot 58mm}{543mm} = 2,07 \cdot 10^6 Nmm$$

$$W_b = \frac{20((80mm)^3 - (25mm)^3)}{6 \cdot 80mm} = 2,07 \cdot 10^4 mm^3$$

$$\sigma_b = \frac{2,07 \cdot 10^6 Nmm}{2,07 \cdot 10^4 mm^3} = 100 \frac{N}{mm^2}$$

Annahme: Nur der Teil oberhalb der Bohrung trägt gegen die Querkraft.



$$A_w = 27mm \cdot 20mm = 540mm^2$$

$$F_G = 40kN$$

$$\tau_s = \frac{40kN}{540mm^2} = 74,1 \frac{N}{mm^2}$$

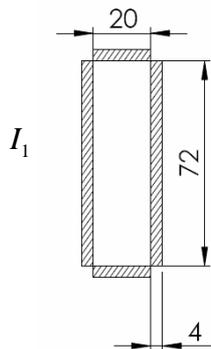
$$\sigma_{S,d} = 1,5 \sqrt{(100 N / mm^2)^2 + 3(74,1 N / mm^2)^2} = 244 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{R,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = \frac{360 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 327 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\sigma_{S,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{244 \frac{N}{mm^2}}{327 \frac{N}{mm^2}} = 0,7 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt.}$$

## Nachweis der Schweißnaht zwischen Mittelholm und Querbalken

Annahme: Die Schweißnaht wirkt als Einspannung und nimmt die Querkraft und das Moment aus Querkraft und Hebelarm anteilig auf.



$$F_{\text{vorne}} = \frac{40 \text{ kN} \cdot 58 \text{ mm}}{543 \text{ mm}} = 4,27 \text{ kN}$$

$$M_b = 4,27 \text{ kN} \cdot 485 \text{ mm} = 2,1 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$I_1 = 2 \left( \frac{20 \text{ mm} \cdot (4 \text{ mm})^3}{12} + 20 \cdot 4 \left( \frac{72 \text{ mm} + 4 \text{ mm}}{2} \right)^2 + \frac{4 \text{ mm} \cdot (72 \text{ mm})^3}{12} \right)$$

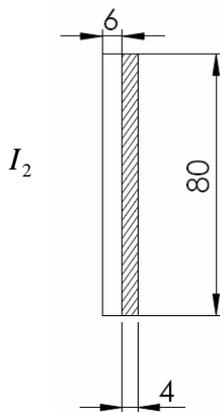
$$= 4,7 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = \frac{4 \text{ mm} \cdot (80 \text{ mm})^3}{12} = 1,7 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{ges}} = 4,7 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 + 2 \cdot 1,7 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 = 8,1 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$W_b = \frac{8,1 \cdot 10^5 \text{ mm}^4}{40 \text{ mm}} = 2,03 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_b = \frac{2,1 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{2,03 \cdot 10^4 \text{ mm}^3} = 103 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$



$$A_{w,1} = 2 \cdot 4 \text{ mm} (72 \text{ mm} + 20 \text{ mm}) = 736 \text{ mm}^2$$

$$A_{w,2} = 80 \text{ mm} \cdot 4 \text{ mm} = 320 \text{ mm}^2$$

$$A_{w,\text{ges}} = 736 \text{ mm}^2 + 2 \cdot 320 \text{ mm}^2 = 1376 \text{ mm}^2$$

$$\tau_s = \frac{4,27 \text{ kN}}{1376 \text{ mm}^2} = 3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{nicht relevant.}$$

$$\sigma_{\text{zul}, S355} = 190 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{R,d} = \frac{190 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,1} = 173 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\sigma_{S,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{103 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{173 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,6 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt.}$$

## Nachweis des Querbalkens

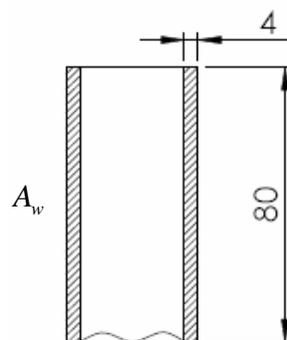
Die Kraft an der Schweißnaht und folglich auch im vorderen Balken ist geringer als im Lastfall 1. Auf einen gesonderten Nachweis wird verzichtet.

## Nachweis der Schweißnaht an den vorderen Fittings

Die Kraft im vorderen Balken und folglich auch in den vorderen Fittings ist geringer als im Lastfall 1. Auf einen gesonderten Nachweis wird verzichtet.

## Nachweis der Schweißnaht an den hinteren Fittings

Annahme: Die Last verteilt sich gleich auf beide Fittings.



$$F_{ffh} = \frac{35,7kN}{2} = 17,9kN$$

$$A_w = 2 \cdot (80mm \cdot 4mm) = 640mm^2$$

$$\tau_{S,d} = \frac{17,9kN}{640mm^2} = 30 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{zul,S355} = 190 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{R,d} = \frac{190 \frac{N}{mm^2}}{1,1} = 173 \frac{N}{mm^2}$$

$$\frac{\tau_{S,d}}{\tau_{R,d}} = \frac{30 \frac{N}{mm^2}}{173 \frac{N}{mm^2}} = 0,17 \leq 1$$

Nachweis erfüllt.

Lastfall 3a: 24 x Galeo XT (doppeltes Gewicht) am Pinpoint 5  
(24 x Galeo XT nach BGV-C1) mit zusätzlicher VERTIKALER Abspannung  
hinten. Curving pro Einheit 1°, -22,5°, ohne Wind.

Annahme: Der Schwerpunkt der Box liegt in der Mitte. Der Schwerpunkt des Flugrahmens liegt in der Mitte. Die Gesamte Gewichtskraft wird zur Punktlast zusammengefasst (konservative Annahme!)

$$F_{G,d} = 1,2 \cdot 10 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} (24 \cdot 69\text{kg} \cdot 2 + 23\text{kg}) \cdot 1,5 = 60\text{kN}$$

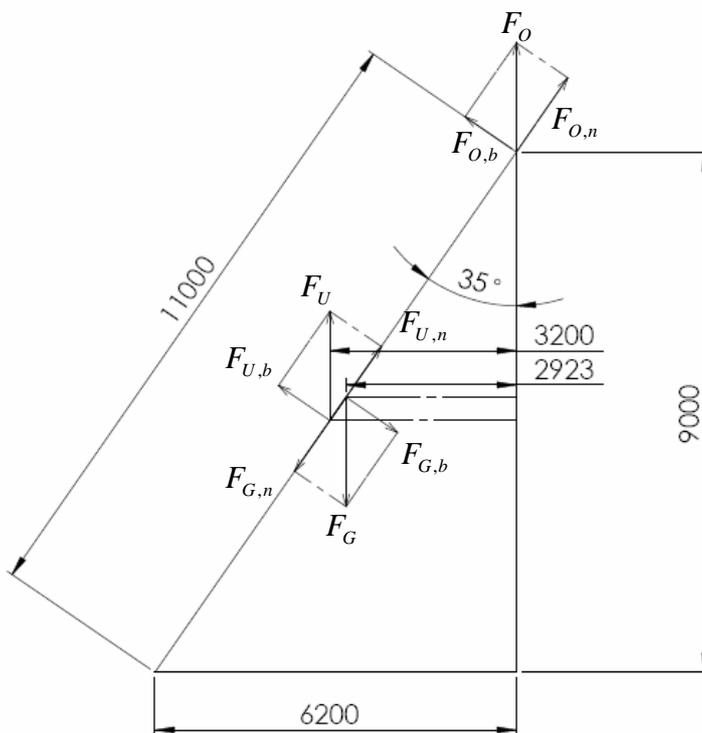
$$x_s = \frac{\sum_{i=1..24} x_{si} \cdot F_{F,i}}{\sum F_{F,i}}$$

$$x_s = 2923\text{mm}$$

Die tatsächliche Anordnung wird im Weiteren als rechtwinkliges Dreieck betrachtet. Der Winkel alpha beträgt 35°, die Hypotenuse 11m, die Kantenlängen 9m und 6,2m.

Der Schwerpunkt der Anordnung fällt sehr gut mit dem Schwerpunkt der 13. Box zusammen (6mm Abweichung).

Am Distanzer der **14. Box** wird mit Hilfe eines Schäkels bzw. einer Bandschlinge (incl. Sicherung) und einem Stahlseil (o.ä.) zusätzlich SENKRECHT hochgezogen.



$$F_{G,n} = F_{O,n} + F_{U,n}$$

$$F_{G,b} = F_G \cdot \sin \alpha = 34\text{kN}$$

$$F_{G,n} = F_G \cdot \cos \alpha = 49\text{kN}$$

$$F_{U,b} = \frac{F_{G,b} \cdot 5,15\text{m}}{5,6\text{m}} = 31,2\text{kN}$$

$$F_{O,b} = \frac{F_{G,b} \cdot 0,5\text{m}}{5,6\text{m}} = 3\text{kN}$$

$$F_O = \frac{F_{O,b}}{\sin \alpha} = \frac{3\text{kN}}{\sin \alpha} = 5,2\text{kN}$$

$$F_U = \frac{F_{U,b}}{\sin \alpha} = \frac{31,2\text{kN}}{\sin \alpha} = 54\text{kN}$$

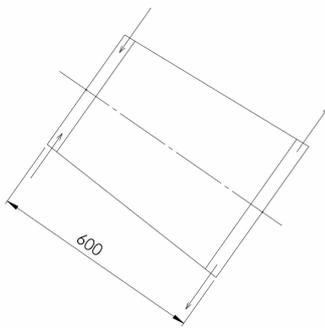
Die Biegekomponente der Gewichtskraft erzeugt ein Moment, das durch die Flugfittings vorne und hinten als Zug- bzw. Druckkraft aufgenommen wird. Die Kraft im oberen Fitting ist erheblich geringer als im Lastfall 2 und wird nicht gesondert nachgewiesen.

$$M_{b,\max} = \frac{F_{G,b} \cdot 5,15m \cdot 0,5m}{5,6m} = 15,6kNm$$

$$F_{ffv,ffh,13} = \frac{15,6kNm}{0,3m \cdot 2} = 26kN$$

Diese Kraft wirkt im hinteren Flugfitting als Druckkraft und somit entlastend und wird nicht gesondert nachgewiesen. In den vorderen Fittings als zusätzliche Zugkraft. An der Box 13 wirkt jedoch nur die Gewichtskraft der darunter hängenden Boxen.

### Nachweis der Flugfittings vorne



$$F_{G,13...24,d} = 1,2 \cdot 10 \frac{kg}{s^2} (12 \cdot 69kg \cdot 2) \cdot 1,5 = 29,8kN$$

$$F_{G,13...24,n,d} = F_{G,13...24,d} \cdot \cos \alpha = 24,4kN$$

$$F_{G,13...24,b,d} = F_{G,13...24,d} \cdot \sin \alpha = 17,1kN$$

Die Normalkraft teilt sich auf in die Fittings vorne und hinten.

$$F_{ffv,13,G,n} = \frac{F_{G,13...24,n,d}}{2} = 12,2kN$$

$$F_{ffv,13,\Sigma n} = 24,7kN + 12,2kN = 36,9kN$$

$$V_{S,d} = \sqrt{(36,9kN)^2 + 3 \cdot (15,9kN)^2} = 46kN$$

$$\frac{V_{S,d}}{V_{R,d}} = \frac{46kN}{62kN} = 0,74 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt, mit Vorbehalt.}$$

### Nachweis des Distanzers hinten

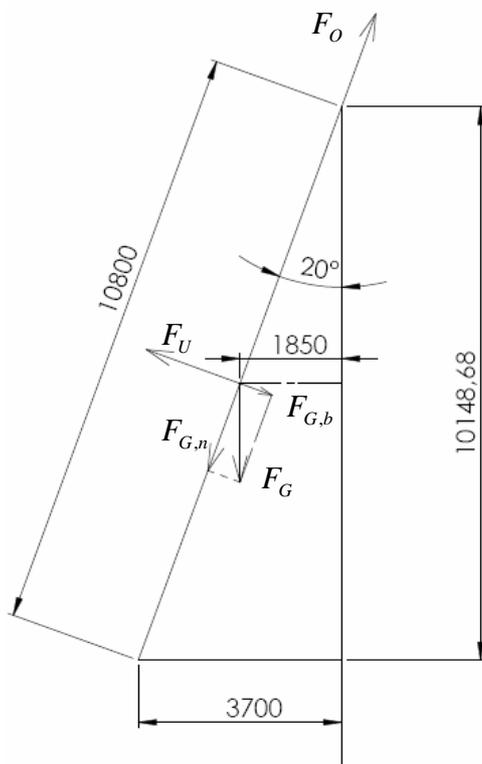
$$F_U = V_{S,d} = \frac{F_{U,b}}{\sin \alpha} = \frac{31,2kN}{\sin \alpha} = 54kN$$

$$\frac{V_{S,d}}{V_{R,d}} = \frac{54kN}{70kN} = 0,77 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt, mit Vorbehalt.}$$

Alle Nachweise des Lastfalls 3 sind erfüllt. Die Stahlverbindung erfüllt alle Anforderungen, die Kraft im Distanzer hinten ist mit 51kN jedoch sehr groß. Die Fittings vorne und die Fittings hinten verfügen über keine metallische Verbindung zueinander. Das Anschlussfeld wird durch 18 M5 10.9 Schrauben (Zug) mit dem Gehäuse verbunden. Die Flugfittings hinten sind mit 10 Schrauben M5 10.9 (Zug) durch das Anschlussfeld mit dem Montagewinkel verschraubt. Dieser ist zusätzlich mit Boden und Deckel des Gehäuses mit einer M10 10.9 Schraube (Scherung) verbunden. Das Gehäuse aus 15mm Sperrholz kann jedoch nicht nachgewiesen werden. **Lastfall 3a bzw. 6a sind daher nicht zugelassen.**

Der Lastfall 3 (senkrechte, zusätzliche Aufhängung) ist die ungünstigste Möglichkeit, eine Anwinkelung des gesamten Arrays zu erreichen. Erheblich günstiger ist die Abspannung unter Neigungswinkel+90°, also lotrecht zur Box im Schwerpunkt.

**Lastfall 3b: 24 x Galeo XT (doppeltes Gewicht) am Pinpoint 5**  
**(24 x Galeo XT nach BGV-C1) mit zusätzlicher Abspannung**  
**IM NEIGUNGSWINKEL hinten. Curving pro Einheit 0°, - 20°, ohne Wind.**



$$F_{G,d} = 1,2 \cdot 10 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} (24 \cdot 69\text{kg} \cdot 2 + 23\text{kg}) \cdot 1,5 = 60\text{kN}$$

$$F_{G,b} = F_U = F_G \cdot \sin \alpha = 20,5\text{kN}$$

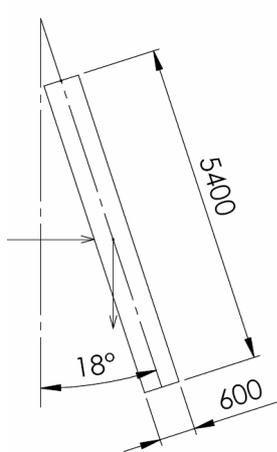
$$F_{G,n} = F_O = F_G \cdot \cos \alpha = 56,4\text{kN}$$

Die Kraft im hinteren Teil der Lautsprecherbox beträgt nun nur noch 20,4kN und ist ohne gesonderten, rechnerischen Nachweis zu ertragen.

## Lastfall 4: 12 x Galeo XT am Pinpoint 1 (12 x Galeo XT nach BGV-C1) mit Wind.

Durch die Windlast, kommt es zu einer Auslenkung um den Riggingpunkt. Das Moment der Gewichtskraft des Line-Arrays hält dem Moment der Windkraft das Gleichgewicht.

### Wind von vorne/hinten



$$A = 12 \cdot 0,45\text{m} \cdot 1,1\text{m} = 6\text{m}^2$$

$$c_f = 1,3 \quad [5]$$

$$q_{>5\text{m}} = 0,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad [6]$$

$$F_{W,d} = 1,5 \cdot 0,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,3 \cdot 6\text{m}^2 = 2,9\text{kN}$$

$$F_G = 10 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} (12 \cdot 69\text{kg} + 23\text{kg}) = 8,51\text{kN}$$

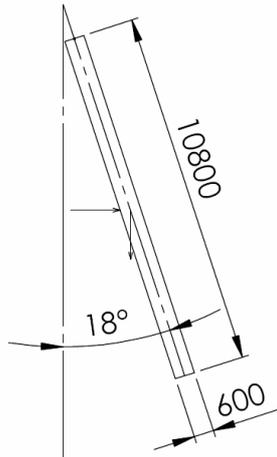
$$\tan \psi = \frac{F_{W,d}}{F_G} = \frac{2,9\text{kN}}{8,51\text{kN}} \rightarrow \psi = 18,8^\circ$$

Durch die Auslenkung um  $18,8^\circ$  wirkt die Gewichtskraft nicht mehr senkrecht nach unten. Sowohl die resultierende Windkraft, als auch die Gewichtskraft greifen auf halber Höhe ( $12 \cdot 0,45\text{m}/2$ ) an. Somit kommt es nicht (wie im Lastfall 3) zu einem zusätzlichen Biegemoment.

Die Windkraft wirkt als zusätzliche Querkraft, ist jedoch mit  $2,9\text{kN}$  gegenüber den Lasten durch das Eigengewicht vernachlässigbar gering. Ein gesonderter Nachweis ist nicht erforderlich.

Lastfall 5: 24 x Galeo XT (doppeltes Gewicht) am Pinpoint 5  
(24 x Galeo XT nach BGV-C1) mit Wind.

Durch die Windlast, kommt es zu einer Auslenkung um den Riggingpunkt. Das Moment der Gewichtskraft des Line-Arrays hält dem Moment der Windkraft das Gleichgewicht.



$$A = 24 \cdot 0,45m \cdot 1,1m = 12m^2$$

$$c_f = 1,3$$

$$q_{>5m} = 0,25 \frac{kN}{m^2}$$

$$F_{W,d} = 1,5 \cdot 0,25 \frac{kN}{m^2} \cdot 1,3 \cdot 12m^2 = 5,9kN$$

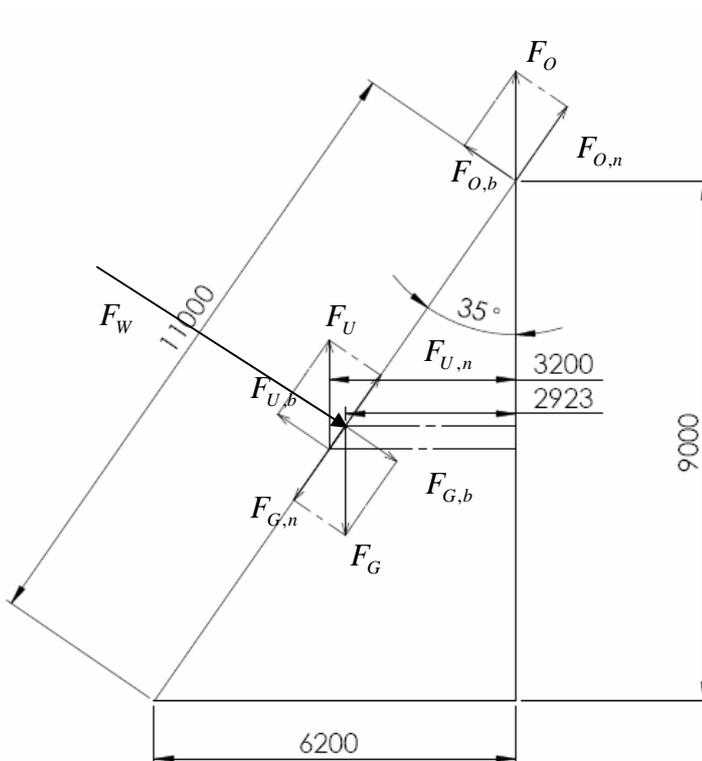
$$F_G = 10 \frac{kg}{s^2} (24 \cdot 69kg + 23kg) = 16,8kN$$

$$\tan \psi = \frac{F_{W,d}}{F_G} = \frac{5,9kN}{16,8kN} \rightarrow \psi = 19,4^\circ$$

Sowohl die Windlast, als auch die Gewichtskraft steigen im Vergleich zum Lastfall 4 linear an. Der Auslenkungswinkel bleibt praktisch unverändert. Die Zusätzliche Querkraft von 5,9kN kann an der kritischen Stelle (Flug-Cradle zu oberstem Element) von den Bolzen leicht aufgenommen werden. Ein gesonderter Nachweis ist nicht erforderlich.

Lastfall 6a: 24 x Galeo XT (doppeltes Gewicht) am Pinpoint 5  
(24 x Galeo XT nach BGV-C1) mit zusätzlicher VERTIKALER Abspannung  
hinten. Curving pro Einheit 1°, -22,5°, mit Wind.

Die hintere Abspannung verhindert bei Wind von hinten ein Auslenken. Durch die Windkraft wird das Biegemoment der Gewichtskraft zusätzlich verstärkt. Bei ungünstigstem Fall durch Wind von schräg oben, wirkt die Windkraft linienflüchtig mit  $F_{G,b}$ .



$$A = 11m \cdot 1,1m = 12,1m^2$$

$$c_f = 1,3$$

$$q_{>5m} = 0,25 \frac{kN}{m^2}$$

$$F_{W,d} = 1,5 \cdot 0,25 \frac{kN}{m^2} \cdot 1,3 \cdot 12,1m^2 = 5,9kN$$

$$M_{b,max} = \frac{(F_{G,b} + F_W) \cdot 5,15m \cdot 0,5m}{5,6m} = 18,4kN$$

$$F_{ffv,ffh,13} = \frac{18,4kN}{0,3m \cdot 2} = 30,7kN$$

$$F_{ffv,13,G,n} = \frac{F_{G,13...24,d,n}}{2} = 12,2kN$$

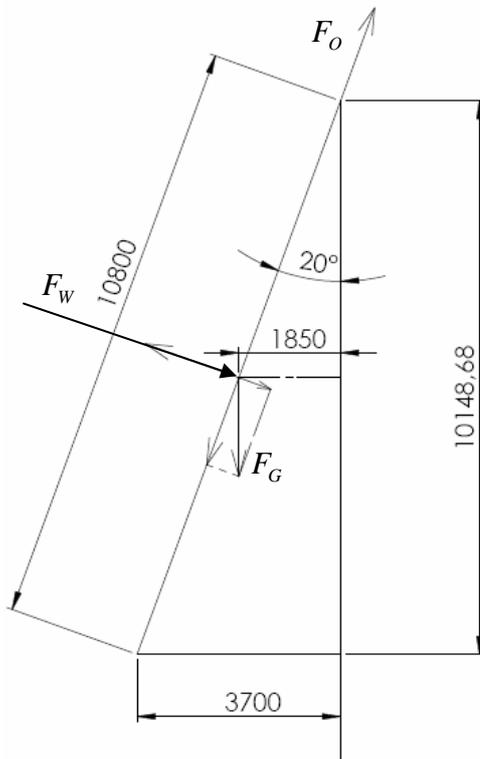
$$F_{ffv,13,\sum n} = 28,7kN + 12,2kN = 42,9kN$$

$$V_{S,d} = \sqrt{(42,9kN)^2 + 3 \cdot (15,9kN)^2} = 51kN$$

$$\frac{V_{S,d}}{V_{R,d}} = \frac{51kN}{62kN} = 0,82 \leq 1$$

Die Zunahme der Kraft in den Fittings durch die Windlast ist gering. Auf weitere Nachweise wird verzichtet.

Lastfall 6b: 24 x Galeo XT (doppeltes Gewicht) am Pinpoint 5  
(24 x Galeo XT nach BGV-C1) mit zusätzlicher Abspannung  
IM NEIGUNGSWINKEL hinten. Curving pro Einheit 0°, - 20°, mit Wind.



$$F_{G,d} = 1,2 \cdot 10 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} (24 \cdot 69\text{kg} \cdot 2 + 23\text{kg}) \cdot 1,5 = 60\text{kN}$$

$$A = 10\text{m} \cdot 1,1\text{m} = 11\text{m}^2$$

$$c_f = 1,3$$

$$q_{>5\text{m}} = 0,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$F_{W,d} = 1,5 \cdot 0,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,3 \cdot 11\text{m}^2 = 5,4\text{kN}$$

$$F_{G,b,d} = F_U = F_{G,d} \cdot \sin \alpha + F_W = 26\text{kN}$$

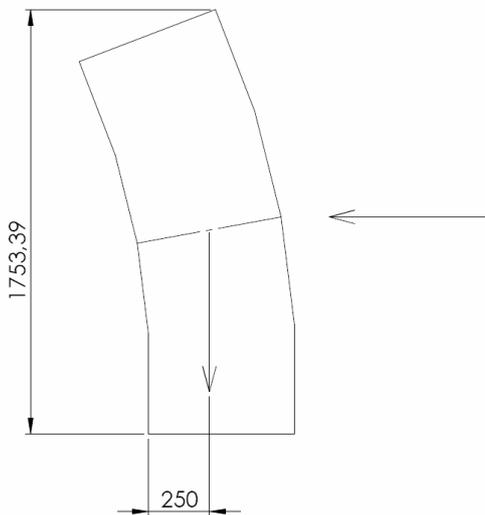
$$F_{G,n,d} = F_O = F_{G,d} \cdot \cos \alpha = 56\text{kN}$$

Die zusätzliche Windkraft von 5,4kN kann von der metallischen Konstruktion ertragen werden.

## Lastfall 7: Standsicherheitsnachweis für 4 Galeo XT auf Flug-Cradle (Groundstack) mit Wind.

Annahme: Der Bühnenboden ist aus Holz, trocken, ausreichend tragfähig und verformt sich nicht. Die Elemente werden „kopfüber“ auf dem Flug-Cradle aufgestellt, das Curving beträgt je 7°. Ein direktes Aufliegen der Poly ureafläche auf dem Holzboden ist unkritischer und wird nicht nachgewiesen ( $\mu > 0,6$ ). Der Wind kommt senkrecht von vorne. Die Oberkante der gesamten Anordnung liegt nicht höher als 5m über Bodenniveau. Bei Windstärke  $> 8$  ist der Betrieb einzustellen und die Boxen sind abzustacken.

### Nachweis gegen Kippen.



$$c_f = 1,3$$

$$q = 0,15 \frac{kN}{m^2} \quad [7]$$

$$A = 1,1m \cdot 1,8m = 2m^2$$

$$F_{W,d} = 1,3 \cdot 0,15 \frac{kN}{m^2} \cdot 2m^2 \cdot 1,5 = 0,59kN$$

$$M_{w,d} = 0,59kN \cdot \frac{1,8m}{2} = 0,53kNm$$

$$F_{G,d} = \frac{(4 \cdot 69kg + 18kg) \cdot 10 \frac{N}{s^2}}{1,1} = 2,64kN$$

$$M_{G,d} = 2,64kN \cdot 0,25m = 0,66kNm$$

$$\frac{M_{w,d}}{M_{G,d}} = \frac{0,53kNm}{0,66kNm} = 0,8 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt.}$$

### Nachweis gegen Verschieben.

$$\mu_0 = 0,6 \quad [8]$$

$$F_{R,max,d} = 0,6 \cdot 2,64kN = 1,6kN$$

$$\frac{F_{W,d}}{F_{R,max,d}} = \frac{0,59kN}{1,6kN} = 0,37 \leq 1 \quad \text{Nachweis erfüllt.}$$

## Abschlussklärung

Die hier nachgewiesenen Lastfälle stehen beispielhaft für alle anderen Lastfälle mit geringeren Belastungen in der Flugmechanik. Es ergibt sich:

**Bis zu 12 Elemente Galeo XT nach BGV-C1 an Pinpoint 1...4 mit beliebigem Curving und Wind.**

**Bis zu 24 Elemente Galeo XT nach BGV-C1 am Pinpoint 5 mit beliebigem Curving und Wind.**

**Bis zu 24 Elemente Galeo XT nach BGV-C1 am Pinpoint 5 mit bis zu 20° Gesamt-Curving, hinterer, lotrechter Abspannung im Schwerpunkt und Wind.**

**Bis zu 4 Elemente Galeo XT als Groundstack bis 5m Höhe Oberkante über Bodenniveau.**

Alle Aufbauarten, Lastfälle oder zusätzliche Abspannungen, wie etwa ein Aufbau mit mehr als 4 Einheiten im Groundstack, bedürfen gesonderter Nachweise.

Alle Trag- und Anschlagmittel, die zusätzlich zu der hier nachgewiesenen Flugmechanik benutzt werden, dürfen nur mit der Hälfte des vom Hersteller angegebenen WLL (Working Load Limit) belastet werden, dies gilt insbesondere für die Anschlagshaken direkt am Line-Array bzw. dem Flug-Cradle.

*Dieser Nachweis ist nach bestem Wissen und Gewissen durch die Fa. SEEBURG acoustic line – Entwicklungsabteilung – erstellt worden und gilt für die mit diesem Nachweis ausgelieferten Galeo XT bzw. Flug-Cradle.*

STAND 07.07.08

---

Fabian Vuine (B.Eng. VA-Technik)  
Entwicklung, Berechnung

---

Winfried Seeburg  
Geschäftsführung

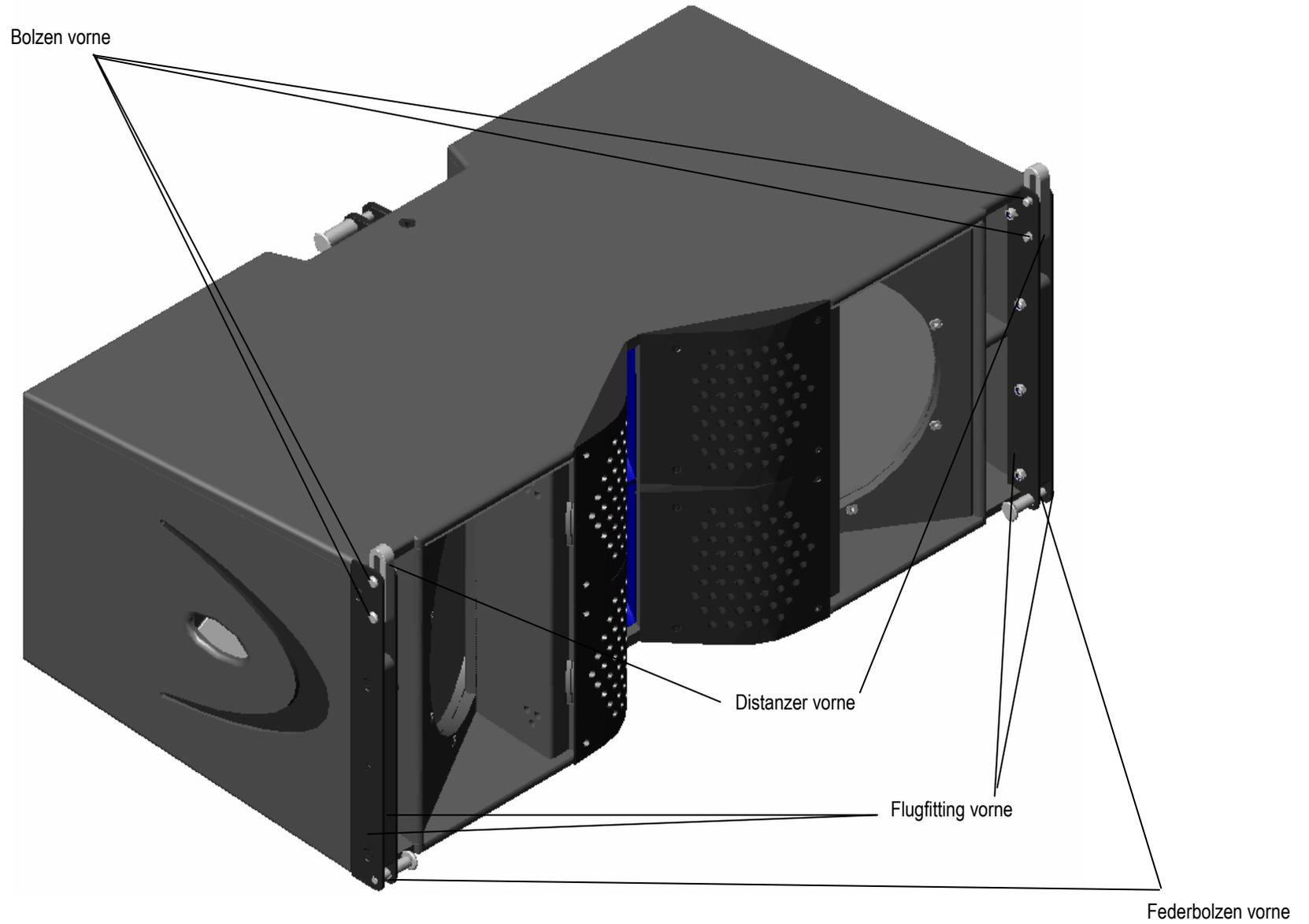
## Quellenangaben

- [1]  $\gamma_M = 1,1$  Gefahr für Leib und Leben  
Schneider, Bautabellen für Ingenieure, 17. Auflage, Werner Verlag, Kapitel 8, Tafel 8.5a
- [2]  $2 = \frac{1}{0,5}$  §9 Durchführungsanweisung, „(...) Anschlagmittel dürfen maximal mit dem 0,5fachen Wert der vom Hersteller angegebenen Tragfähigkeit belastet werden.“  
Unfallverhütungsvorschrift BGV C1 Veranstaltungs- und Produktionsstätten für szenische Darstellung vom 1. April 1998
- [3]  $\gamma_F = 1,5$  Ungünstig wirkende, veränderliche Einwirkungen  
Schneider, Bautabellen für Ingenieure, 17. Auflage, Werner Verlag, Kapitel 8, Tafel 8.5a
- [4]  $\sigma_{zul} = \tau_{zul} = 190 \frac{N}{mm^2}$   
Zulässige Spannung S355J2G3 für Haupt- und Zusatzlasten, alle Nähte, alle Nahtgüten  
Haberbauer, Bodenstein, Maschinenelemente – Gestaltung, Berechnung, Anwendung, Springer Verlag, 12. Auflage, 2003
- [5]  $c_f = 1,3$  Aerodynamischer Formfaktor  
DIN 1055-5 Einwirkungen auf Tragwerke, Tabelle 2
- [6]  $q = 0,25 \frac{N}{m^2}$  Staudruck für Höhen größer 5m.  
DIN 4112 Fliegende Bauten (1983)
- [7]  $q = 0,15 \frac{N}{m^2}$  Staudruck für Höhen kleiner 5m.  
DIN 4112 Fliegende Bauten (1983)
- [8]  $\mu_0 = 0,6$  Grenzwerte für Gleitsicherheitsnachweis bei Traggerüsten  
Holz/Stahl = 0,5...1,2, Ergebnisse eines Forschungsauftrages  
1977 Uni Karlsruhe, Schneider, Bautabellen für Ingenieure, 17. Auflage, Werner Verlag

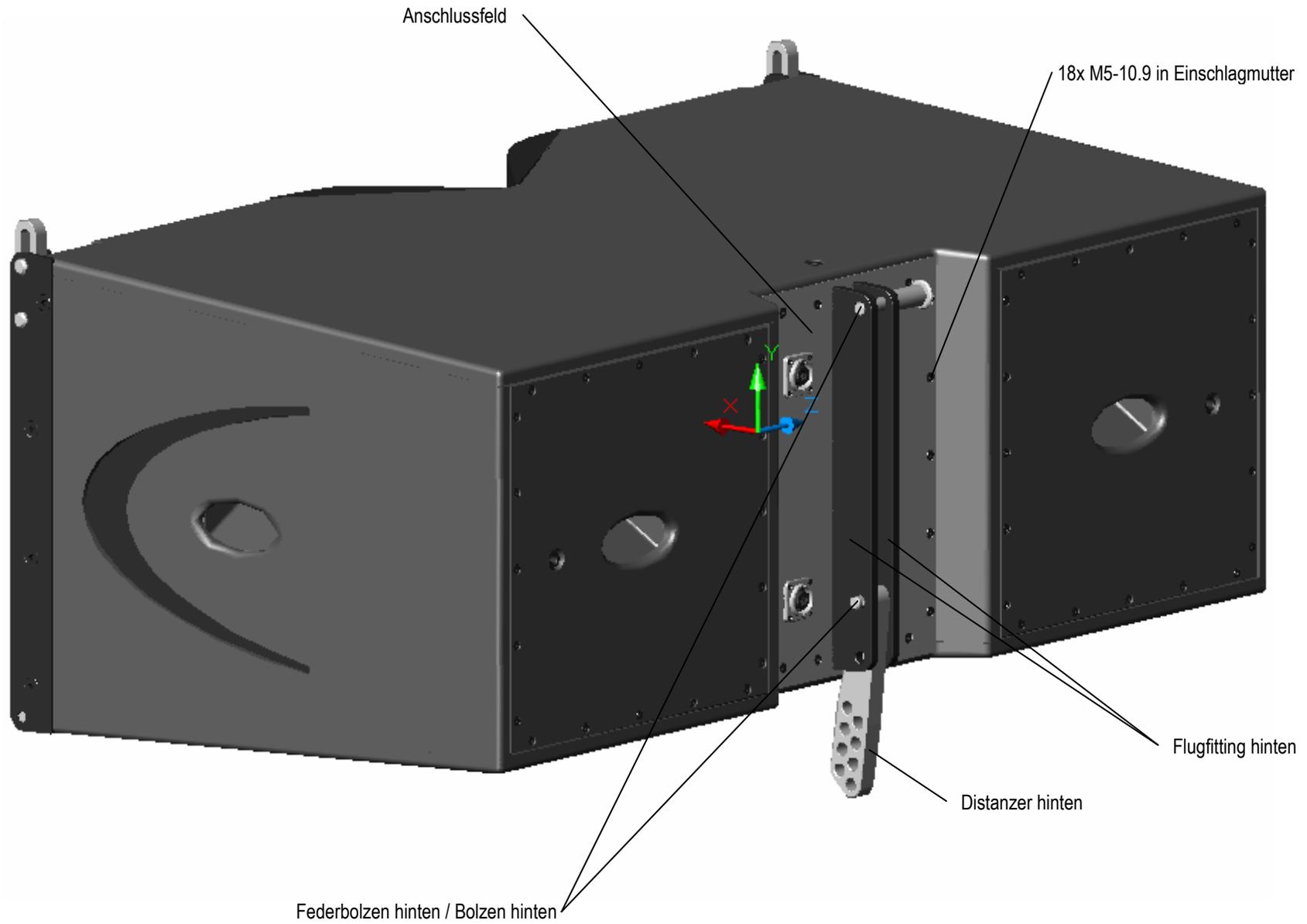


## Anhang

Ansicht Galeo XT Vorderseite

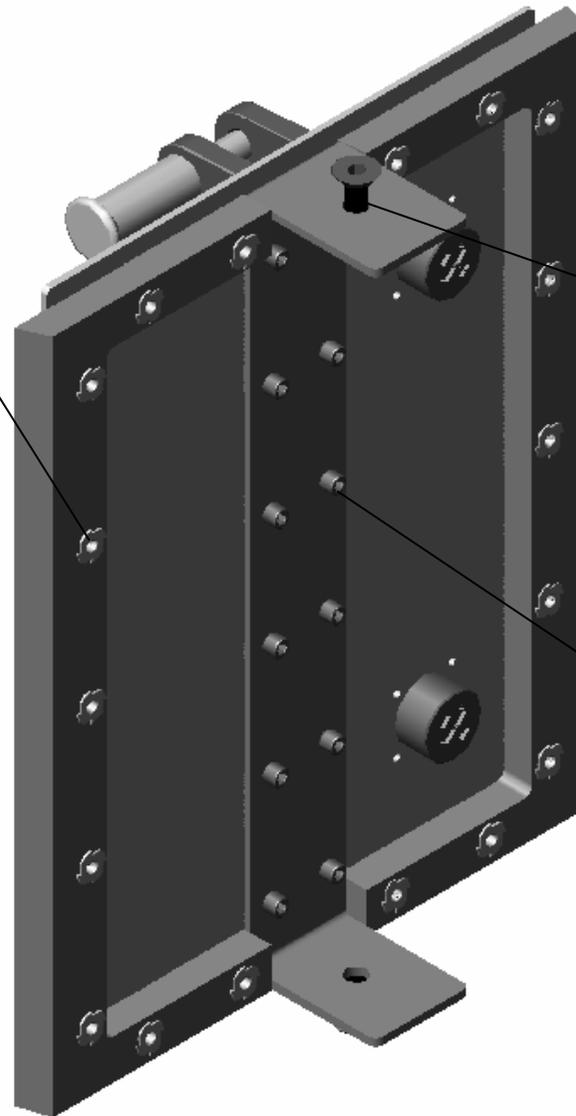


Ansicht Galeo XT Rückseite



## Ansicht Galeo XT Montagewinkel

18x M5-10.9 durchs Anschlussfeld  
in Einschlagmuttern im Gehäuse

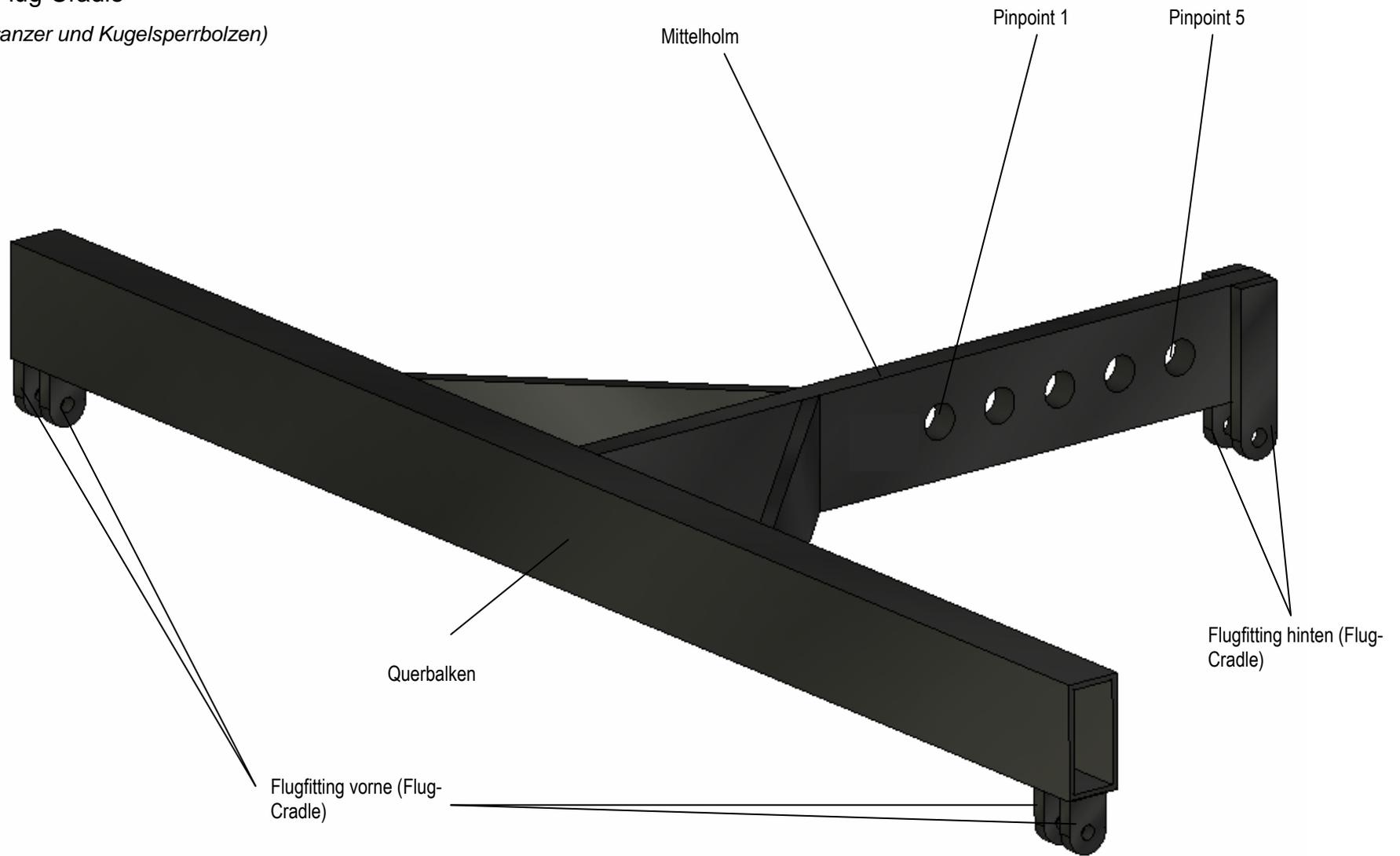


2x M10-10.9 durchs Gehäuse  
in den Montagewinkel, oben und unten  
(aufgeschweißte Mutter)

2x 6x M5-10.9 durch Montagewinkel ins  
Flugfitting hinten

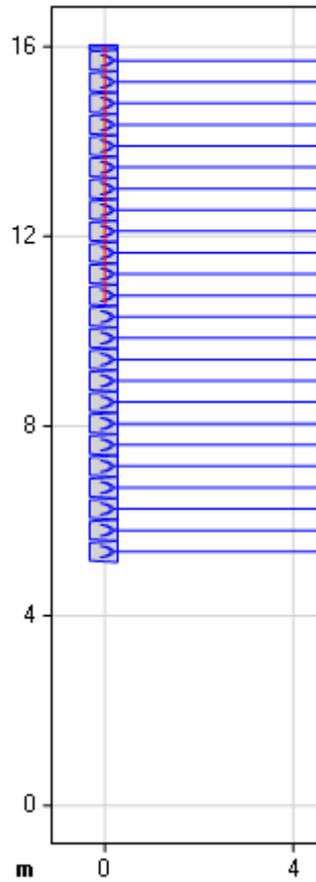
# Ansicht Flug-Cradle

(ohne Distanzer und Kugelsperbolzen)

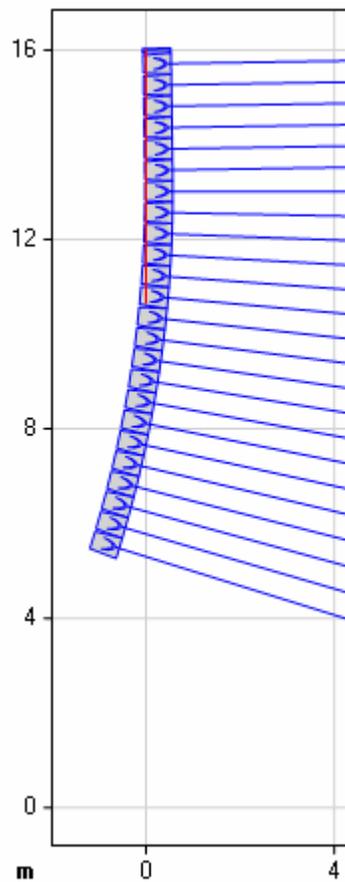


Ansicht der Lastfälle (Beispiele zur Veranschaulichung)

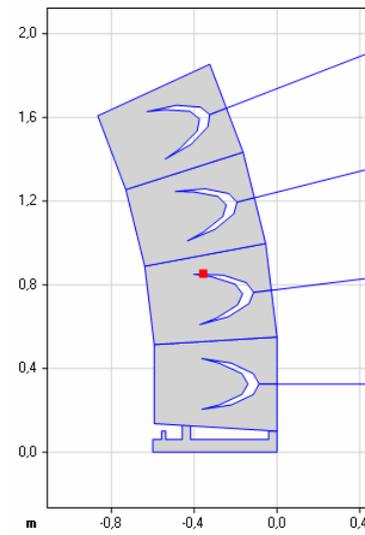
Lastfall 1 (12 Galeo XT mit doppeltem Gewicht entspr. 24 Galeo XT)



Lastfall 3b bzw. 6b (Gesamtcurving 20°)



Lastfall 7





## Maschinen- und Vorrichtungsteile

EH 2235.

Kugelsperbolzen -AUSLAUFMODELL- neue Variante siehe EH 2237. / EH 2238.  
selbstsichernd, ausscheidungsgehärtet



Hinweis:

### Drücken = Entriegeln

Zum raschen Fixieren und Sichern von Teilen und Werkstücken. Schnell und einfach lösbar für häufig wiederholende Verbindungen.

Dieser Kugelsperbolzen zeichnet sich durch die folgenden Eigenschaften aus:

- Korrosionsbeständig
- ergonomischer Griff
- Befestigungsmöglichkeit für Halteseil EH 2234.
- Temperatureinsatzbereich von - 30 °C bis + 80 °C.

Werkstoff:

**Bolzenteil:**

- Nirosa 1.4542, ausscheidungsgehärtet, hartbeschichtet (Markierung)

**Griff:**

- Kunststoff (PA 6)
- Aluminium
- Nirosa 1.4305

**Feder:**

- Nirosa

Best.-Nr.	d <sub>1</sub>	l <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	l <sub>2</sub>	l <sub>3</sub>	l <sub>4</sub>	Aufnahme- bohrung H 11	Scherfestigkeit zweischnitlig KN*	g
2235,455	10	40	12,0	47	23	9,6	35,5	13,5	10	100	62

\* Scherfestigkeit nach DIN 50141

