

Strukturmechanische Berechnungen des Windrades Binopterus



Projektdaten:

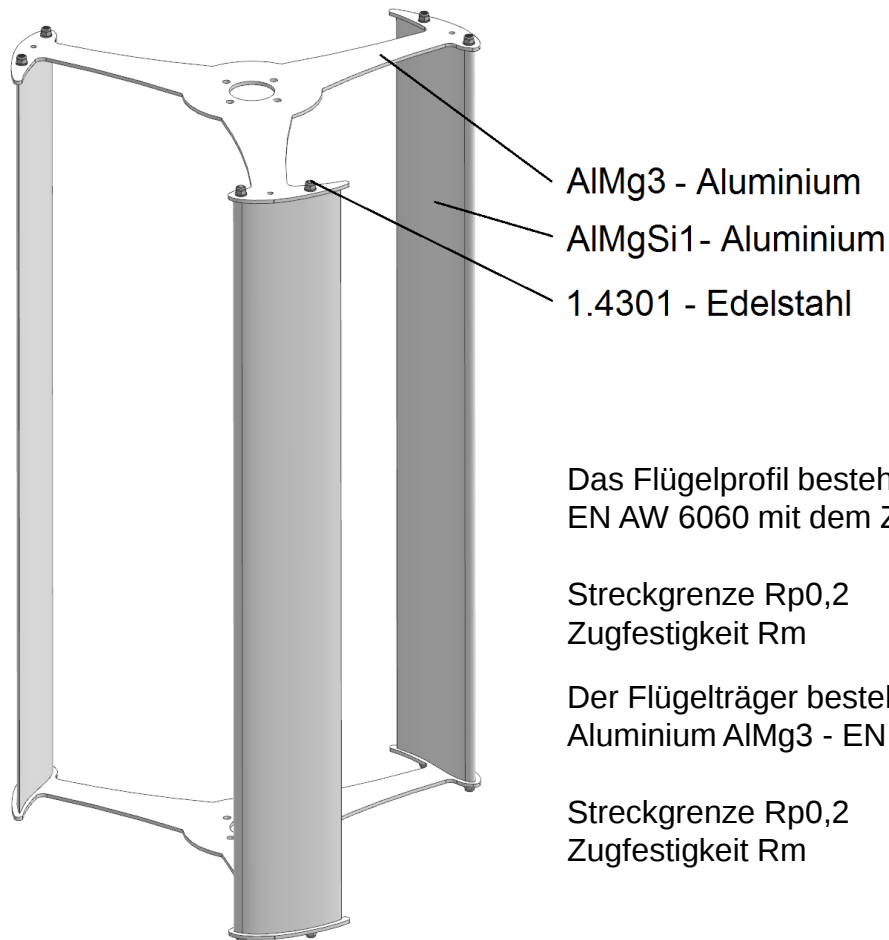
Projekt: Fa. MGM (MG 601)
Betreff: Windrad Binopterus
Datum: 31.05.2016

Aufgabenstellung:

Strukturmechanische Untersuchungen des Windrades Binopterus.
Festigkeitsberechnungen des Widerstandsläufers (Savonius) und des
Auftriebsläufers (Darrieus) bei unterschiedlichen Drehzahlen bis 830U/min.
Dimensionierung der Bauteile.

Randbedingungen:

Materialzuweisung Auftriebsläufer (Darrieus):



Das Flügelprofil besteht aus dem Werkstoff Aluminium EN AW 6060 mit dem Zustand T6

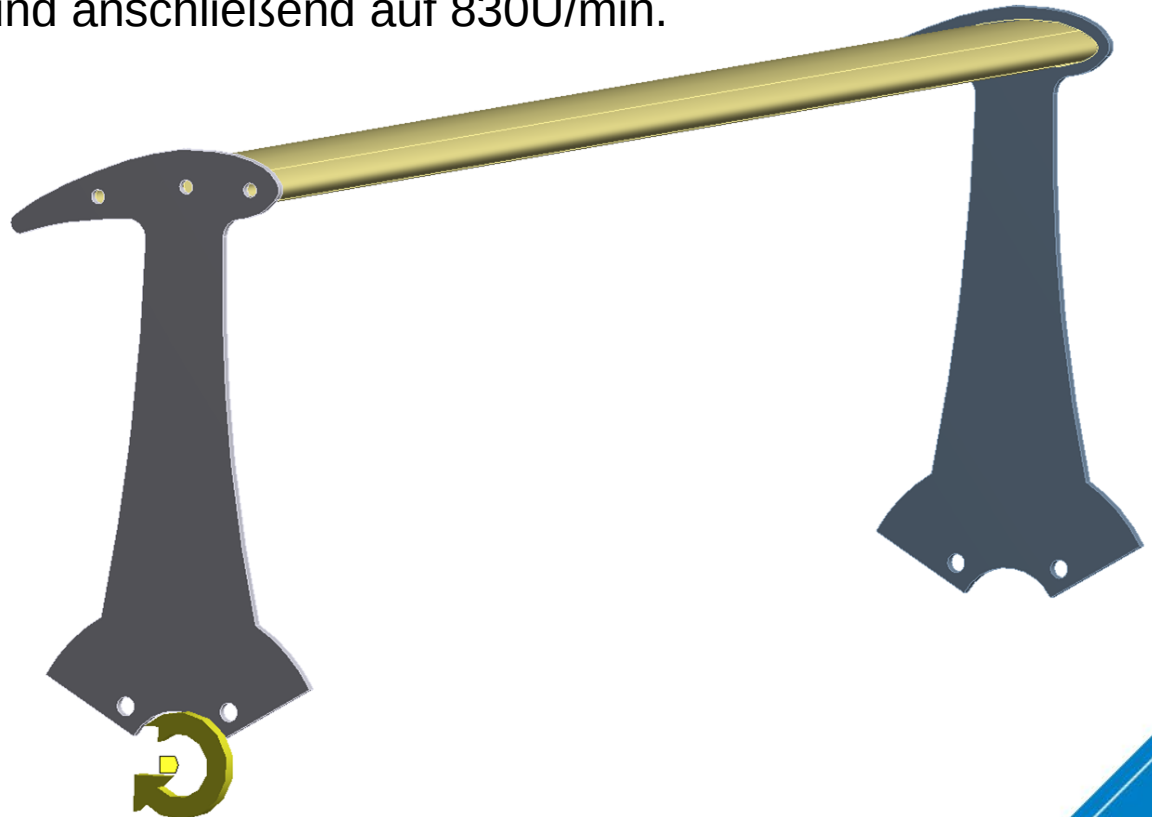
Streckgrenze $R_{p0,2}$	= 160N/mm ²
Zugfestigkeit R_m	= 215N/mm ²

Der Flügelträger bestehen aus dem Werkstoff Aluminium AlMg3 - EN AW 5754 mit dem Zustand H22

Streckgrenze $R_{p0,2}$	= 130N/mm ²
Zugfestigkeit R_m	= 220N/mm ²

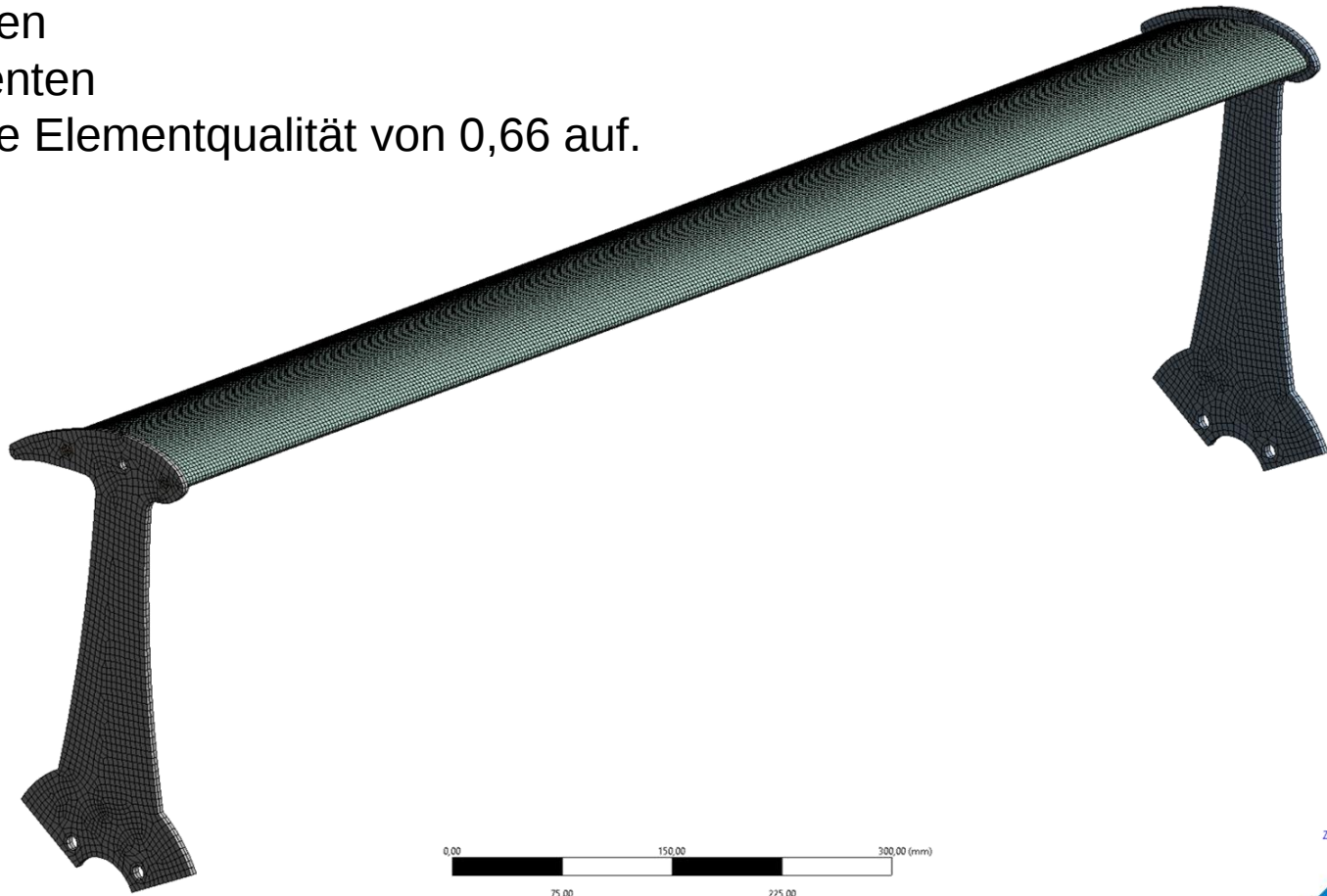
Randbedingungen:

Da der Rotor drehsymmetrisch ist, wird nur ein drittel des Rotors betrachtet. In erster Linie wird eine Rotatorische Last aufgeprägt. Diese Rotatorische Last steigt mit 200U/min Schritte auf eine Drehzahl von 800U/min und anschließend auf 830U/min.

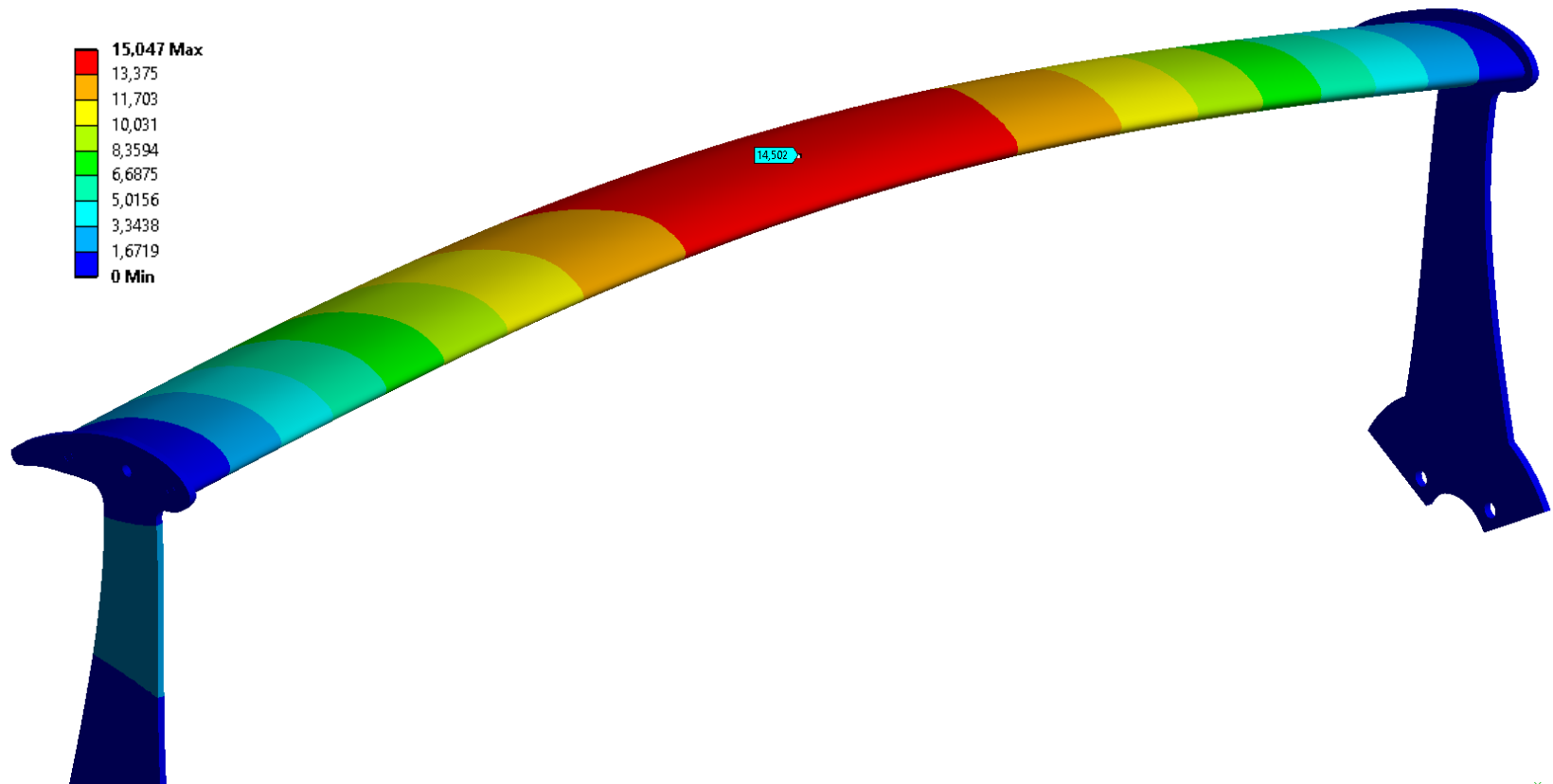


Netz - Auftriebsläufer

Das Netz des Auftriebsläufers besteht aus:
495.335 Knoten
86.982 Elementen
und weist eine Elementqualität von 0,66 auf.



Gesamtverformung bei 600U/min



Das Flügelprofil weist eine maximale Verformung von 15mm bei einer Drehzahl von 600U/min auf.

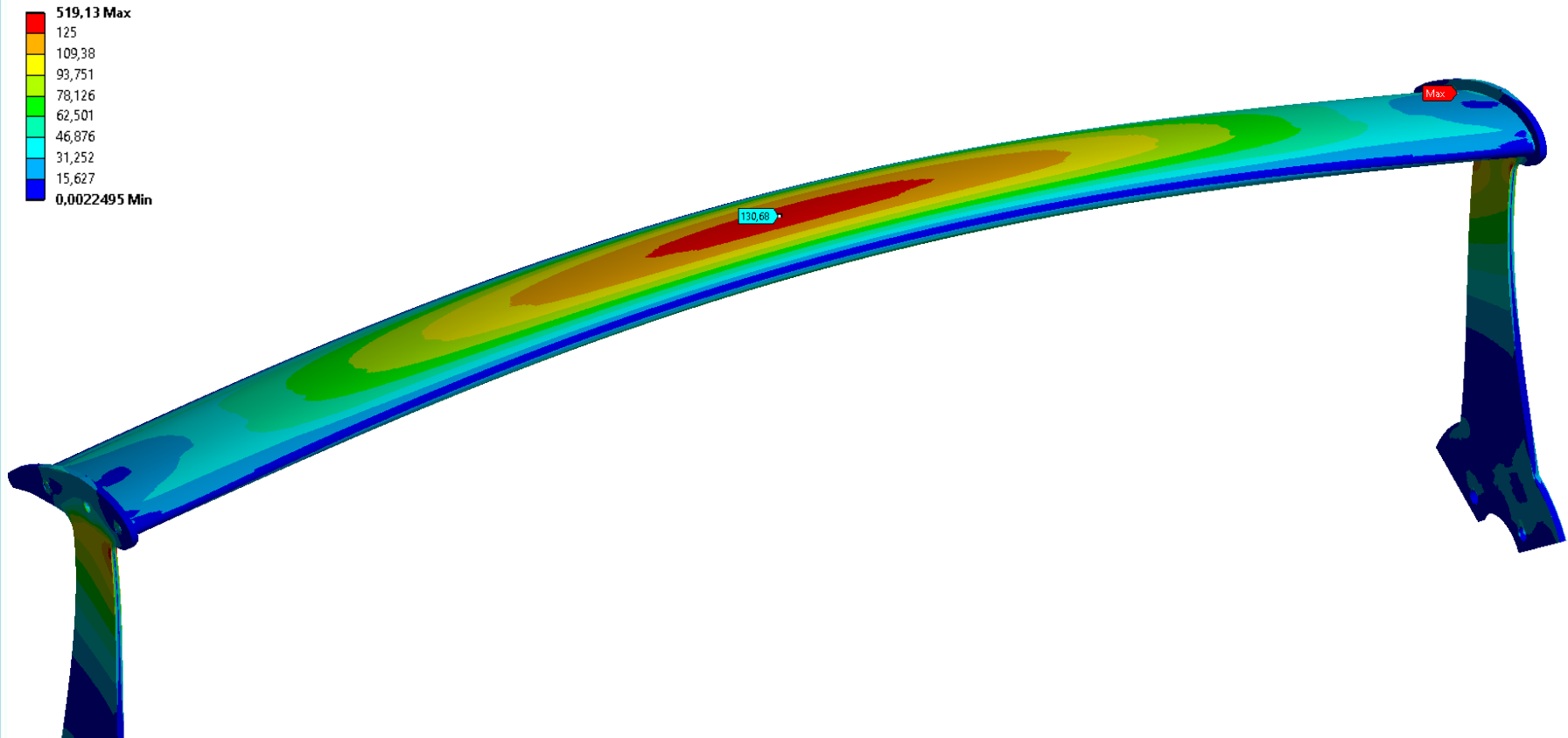
Gesamtverformung bei 600U/min

Ansicht von der Seite



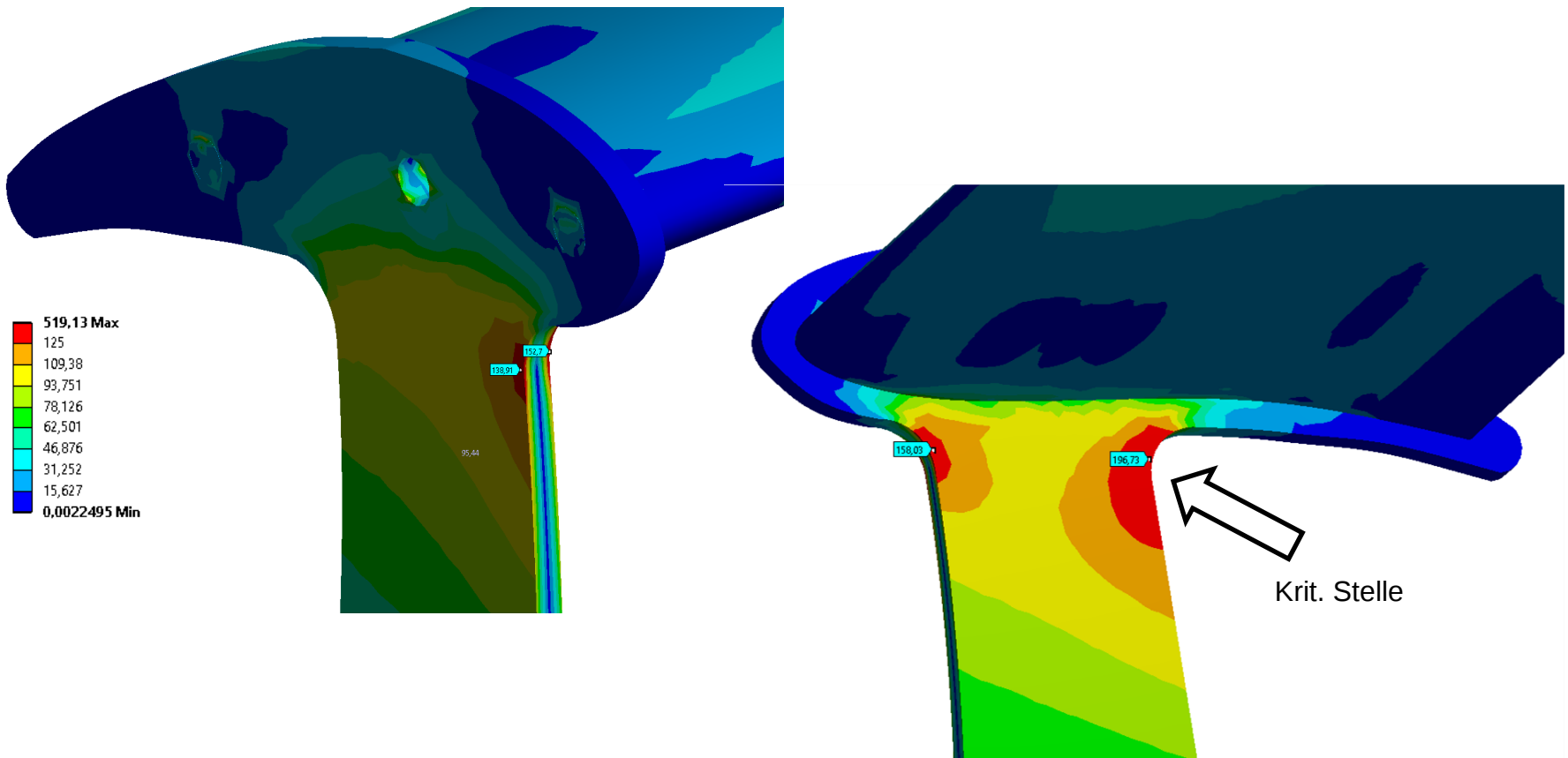
Das Flügelprofil weist eine maximale Verformung von 15mm bei einer Drehzahl von 600U/min auf.

Vergleichsspannung bei 600U/min



Das Flügelprofil weist eine maximale Spannung von 131 N/mm² bei einer Drehzahl von 600U/min auf.

Vergleichsspannung bei 600U/min



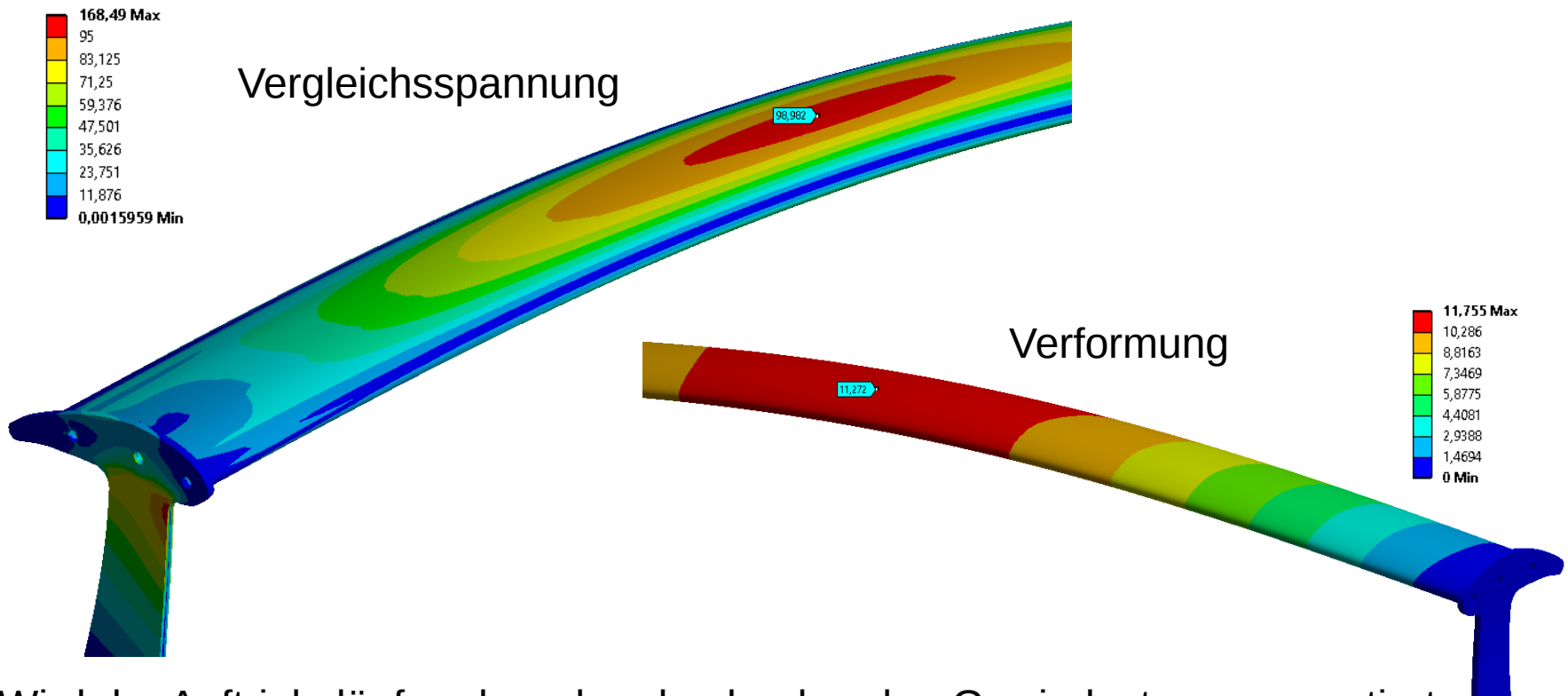
Der Flügelträger weist eine maximale Spannung von 197 N/mm^2 bei einer Drehzahl von 600U/min auf.

Auswertung bei unterschiedlichen Drehzahlen

U/min	max. Verformung [mm]	max. Spannung Flügelprofil [N/mm ²]	max. Spannung Flügelträger [N/mm ²]
200	1,8	14,4	32
400	6,7	58,2	96,3
600	15	130,7	196,7
800	26,8	232,6	304
830	28,8	250	313

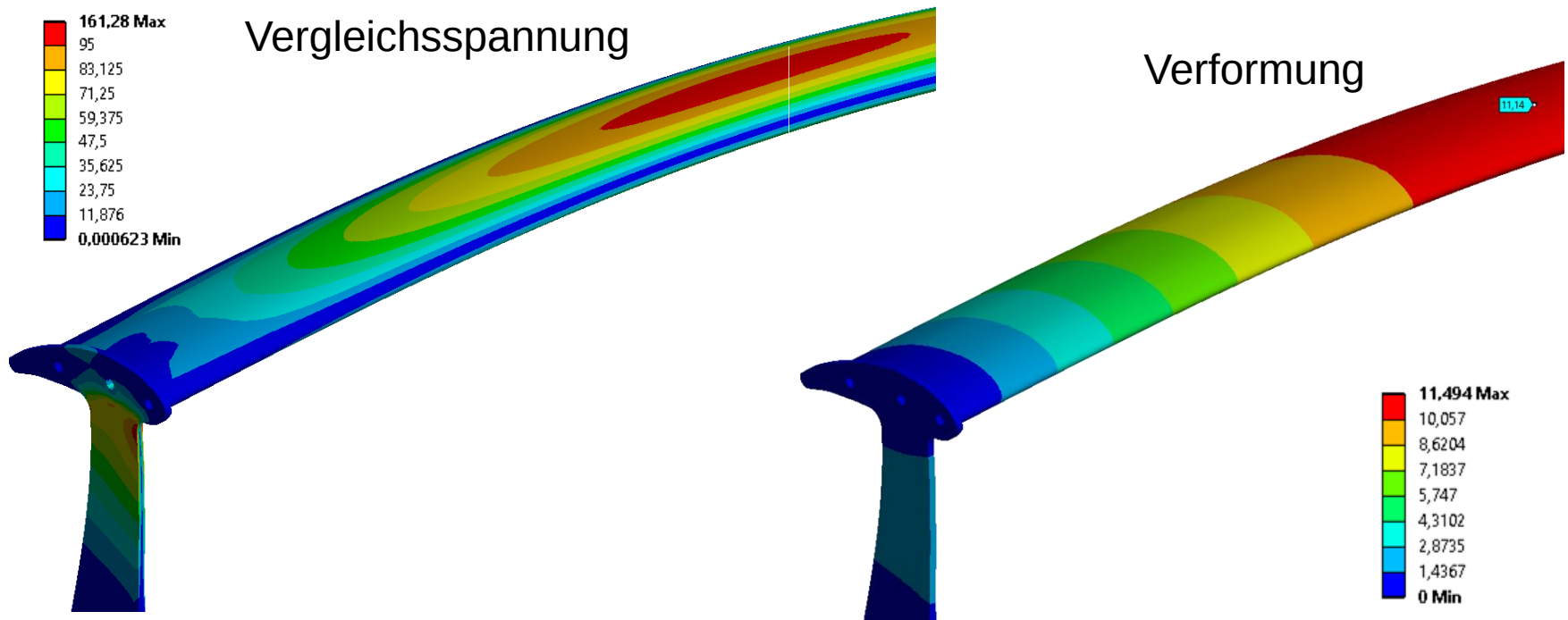
Bei einer Drehzahl von 600U/min sind die vorhandenen Spannungen im Flügelträger kritisch anzusehen. Mit dem zurzeit verwendeten Material wird es dort Probleme geben. Ab einer Drehzahl von 600U/min werden auch die max. vorherrschenden Spannungen im Flügelprofil größer als die zulässigen Werte.

Auswertung Auftriebsläufer bei 600U/min ohne den Gewindestangen



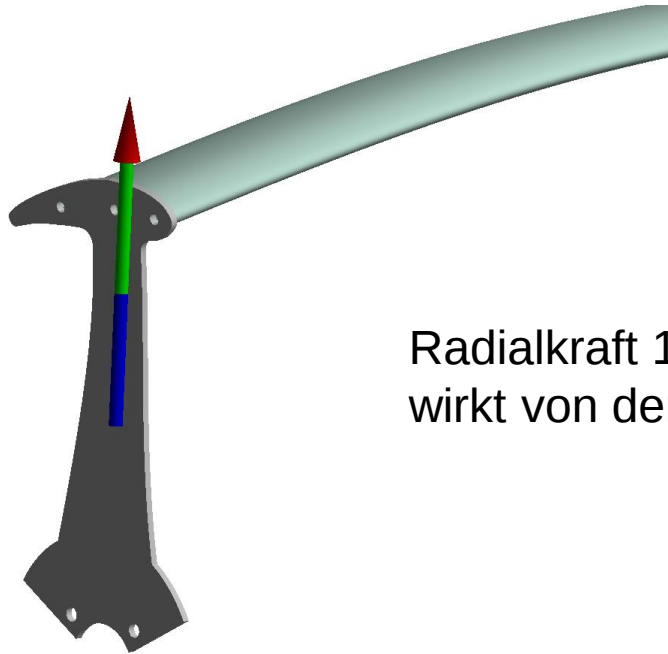
Wird der Auftriebsläufer ohne den durchgehenden Gewindestangen montiert verringert sich die Vergleichsspannung beim Flügelprofil von $130,6 \text{ N/mm}^2$ auf $99,0 \text{ N/mm}^2$. Weiters verringert sich die Verformung von $14,5 \text{ mm}$ auf $11,3 \text{ mm}$.

Auswertung Auftriebsläufer bei 600U/min ohne den Gewindestangen und opt. Profil



Die maximale berechnete Spannung und Verformung sind etwas kleiner als diese bei den Standard-Flügelprofil.

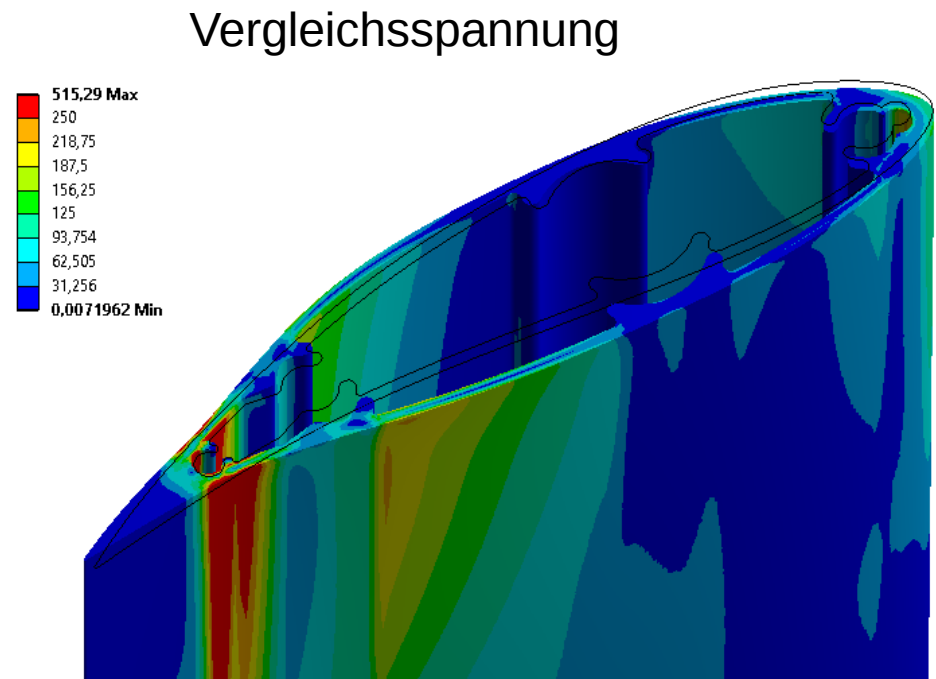
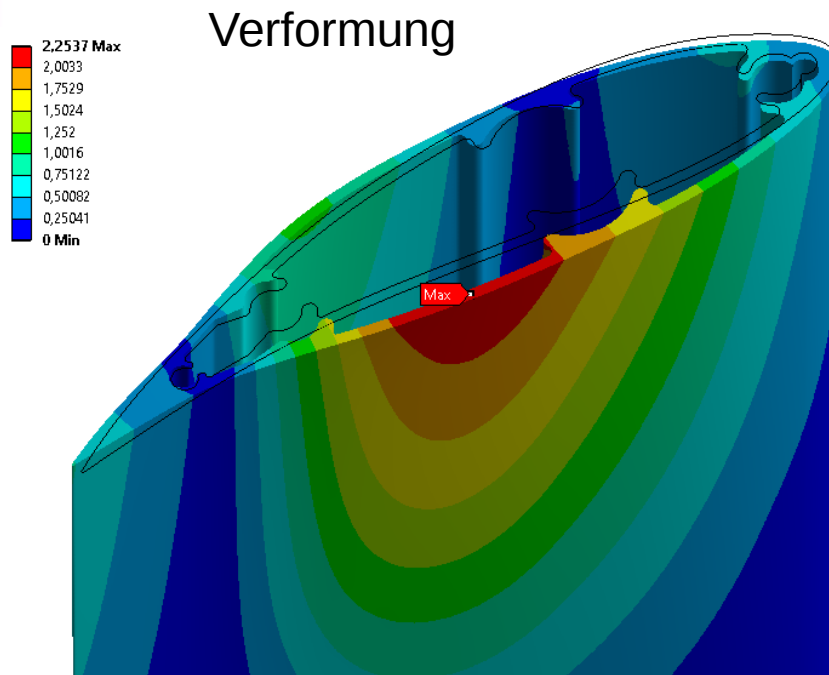
Auswertung Auftriebsläufer bei 600U/min ohne den Gewindestangen



Radialkraft 1.550N
wirkt von dem Flügelprofil auf den Halter

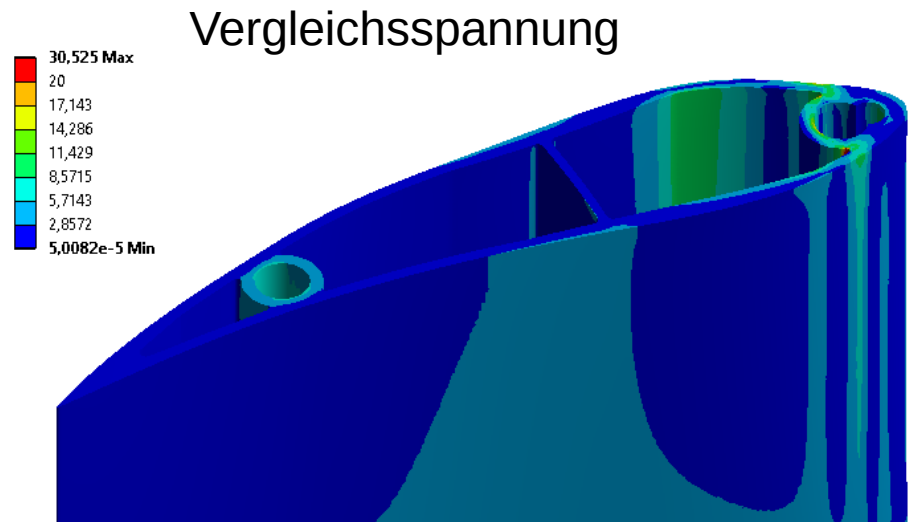
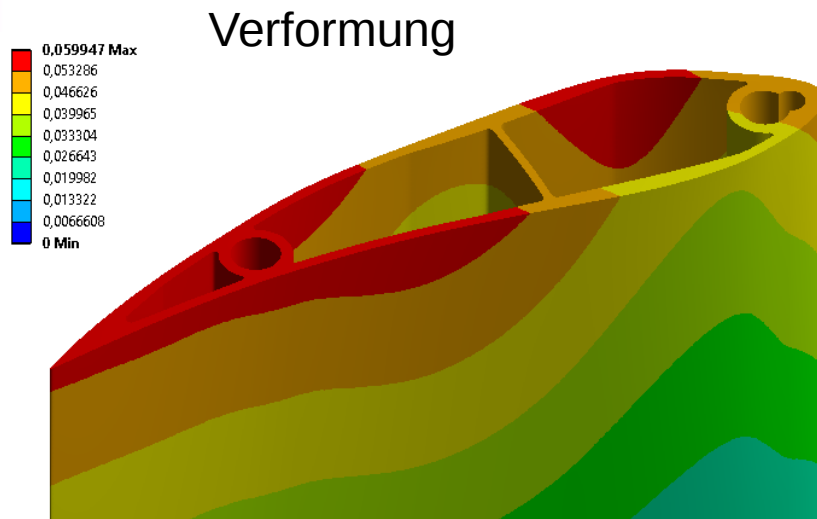
Um eine Radialkraft von 1.550N über Reibschluss bewerkstelligen zu können benötigt man eine min. Schraubenvorspannung von 15.500N. Wird diese auf zwei Schrauben aufgeteilt benötigt man pro Schraube 7.750N Vorspannungskraft.

Spreizkraft zufolge Schraubenvorspannung bei Flügelprofil



Bei einer Schraubenvorspannungskraft von 7.750N ergibt sich eine Spreizkraft von 4.330N (Einschraublänge 80mm). Wird diese nun auf das Standard-Flügelprofil aufgebracht, ergeben sich folgende Schaubilder. Diese Spannungen und Verformungen führen zum Bauteilversagen.

Spreizkraft zufolge Schraubenvorspannung bei optimiertem Flügelprofil



Einleitung der Spreizkraft zufolge Schraubenvorspannung auf das optimierte Flügelprofil (Einschraublänge 80mm). Da die Bohrungen für die Gewinde nun geschlossen sind erträgt dieses Flügelprofil die Spreizkraft der Schrauben zufolge Schraubenvorspannung.

Modalanalyse - Darrieus

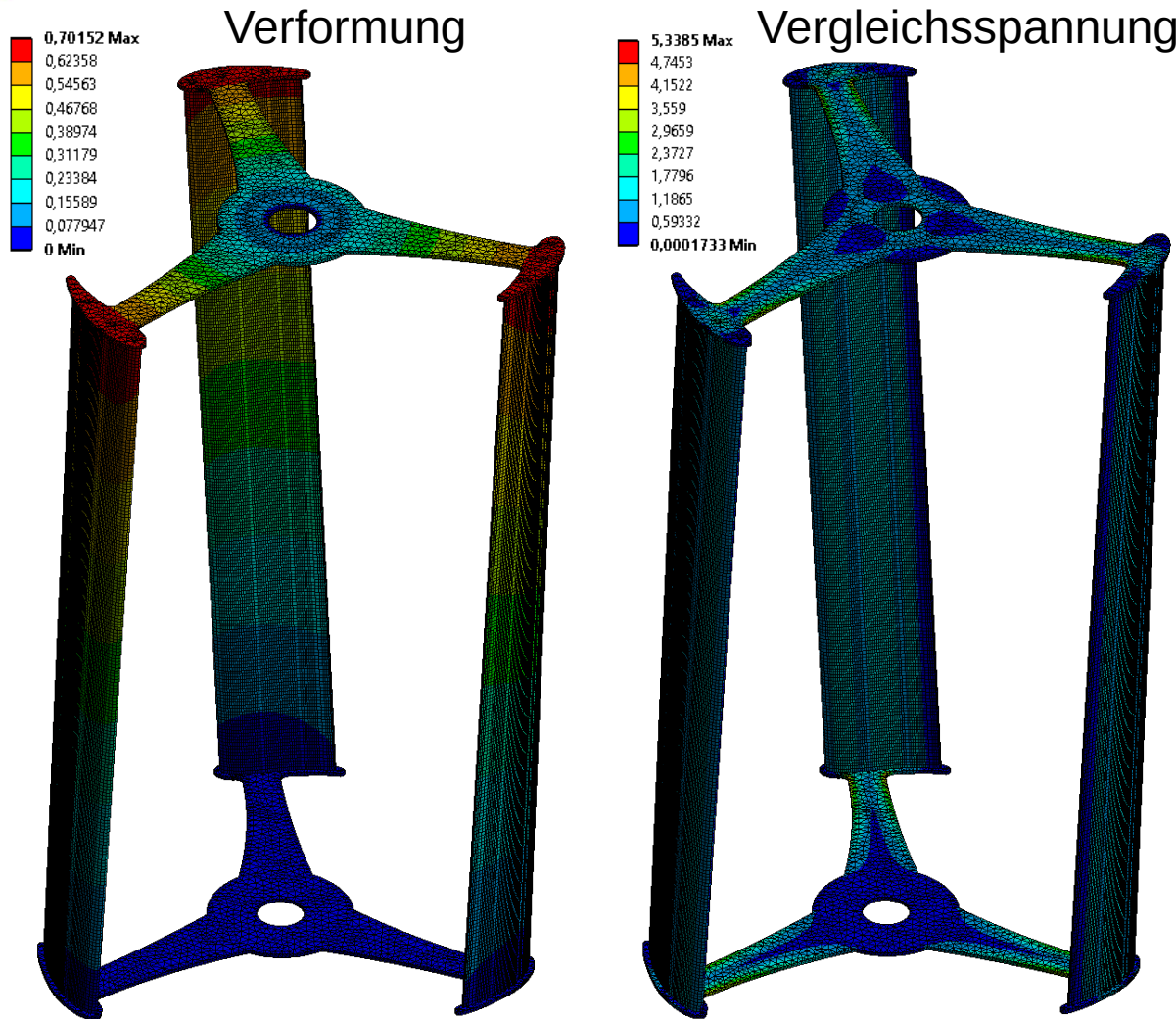
Bei der durchgeführten Modalanalyse ergeben sich folgende Eigenmoden bei folgenden Frequenzen:

- 17,3Hz – 1. Mode
- 23,2Hz – 2. Mode
- 23,3Hz – 3. Mode
- 28,4Hz – 4. Mode
- 57,6Hz – 5. Mode

Die max. Betriebsdrehzahl des Auftriebsläufers beträgt 600U/min. Diese Drehzahl entspricht einer Frequenz von 10Hz. Da die erste Eigenfrequenz des Rotors bei 17,3Hz liegt, welche viel höher ist als die Betriebsdrehzahl, besteht keine Gefahr einer Resonanzfrequenz.

5. Mode – Schwingungsform bei 57,6Hz

Drehmomentübertragung - Auftriebsläufer



Belastung des
Auftriebsläufers mit
einem Drehmoment von
20Nm.

Grundlage:
Generatorleistung 218W
bei 600U/min.

$M = P / 2 \cdot \pi \cdot n \rightarrow$
 $M = 3,5 \text{ Nm} + \text{Sicherheit}$

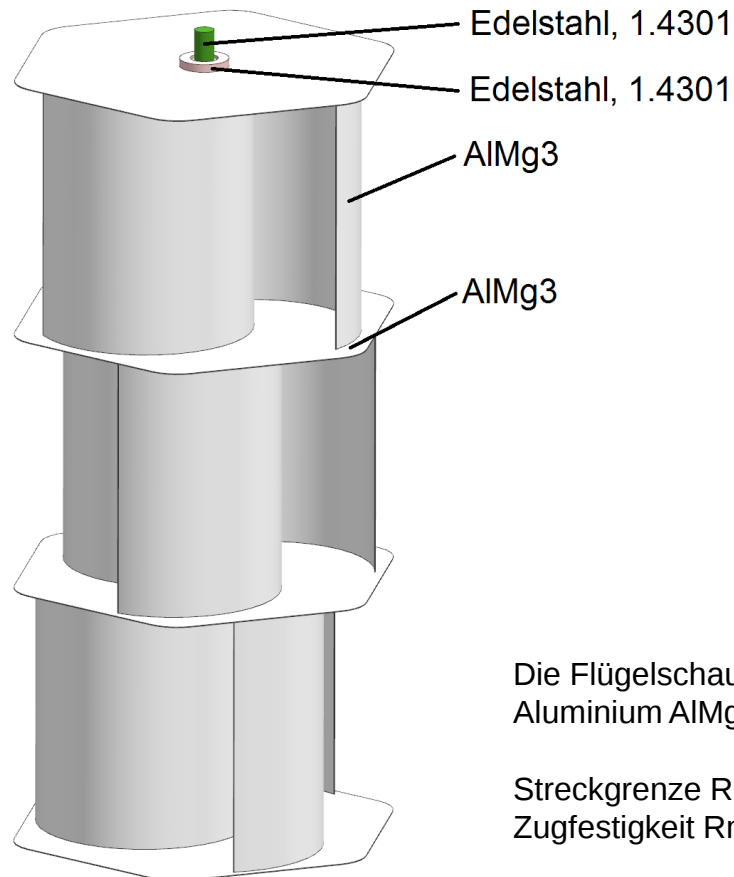
Fazit zur Berechnung des Auftriebsläufers

Bei der max. Betriebsdrehzahl von 600U/min beträgt die Spannung im Flügelträger 197N/mm^2 . Bei dieser Spannung beginnt der Werkstoff zu fließen (AlMg3-H22, Streckgrenze 130N/mm^2 , Zugfestigkeit 220N/mm^2). Um diese Spannung ertragen zu können wäre ein höherfester Aluminium Werkstoff zwingend notwendig z.B.: EN AW 6082 – T5 oder T6.

Bei der Vergleichsrechnung des Auftriebsläufers ohne den Gewindestangen verringert sich die max. Spannung im Flügelprofil um ca. 25% und die max. Verformung um 22%.

Randbedingungen:

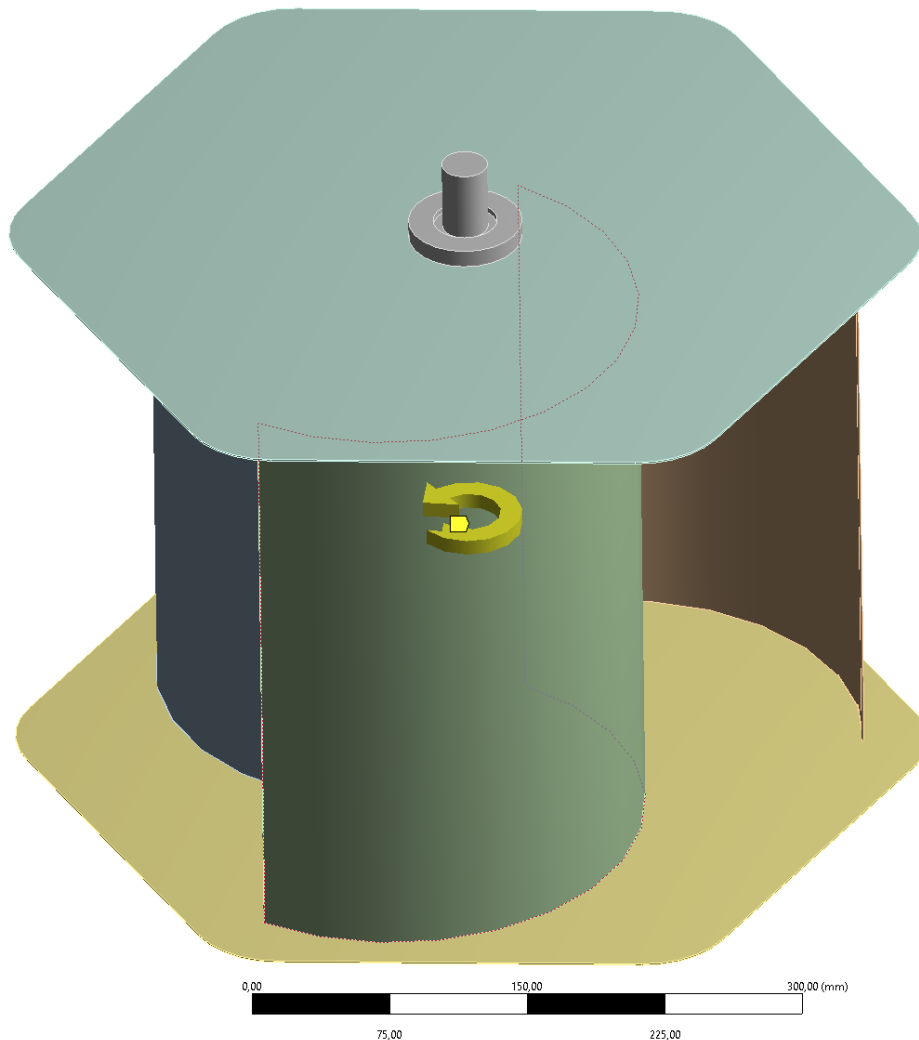
Materialzuweisung Widerstandsläufer (Savonius):



Die Flügelschaufel und die Platten bestehen aus den Werkstoff Aluminium AlMg3 - EN AW 5754 mit dem Zustand H22

Streckgrenze $R_{p0,2}$	= 130N/mm ²
Zugfestigkeit R_m	= 220N/mm ²

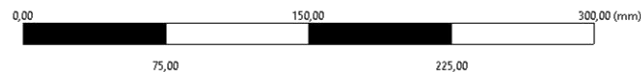
Randbedingungen:



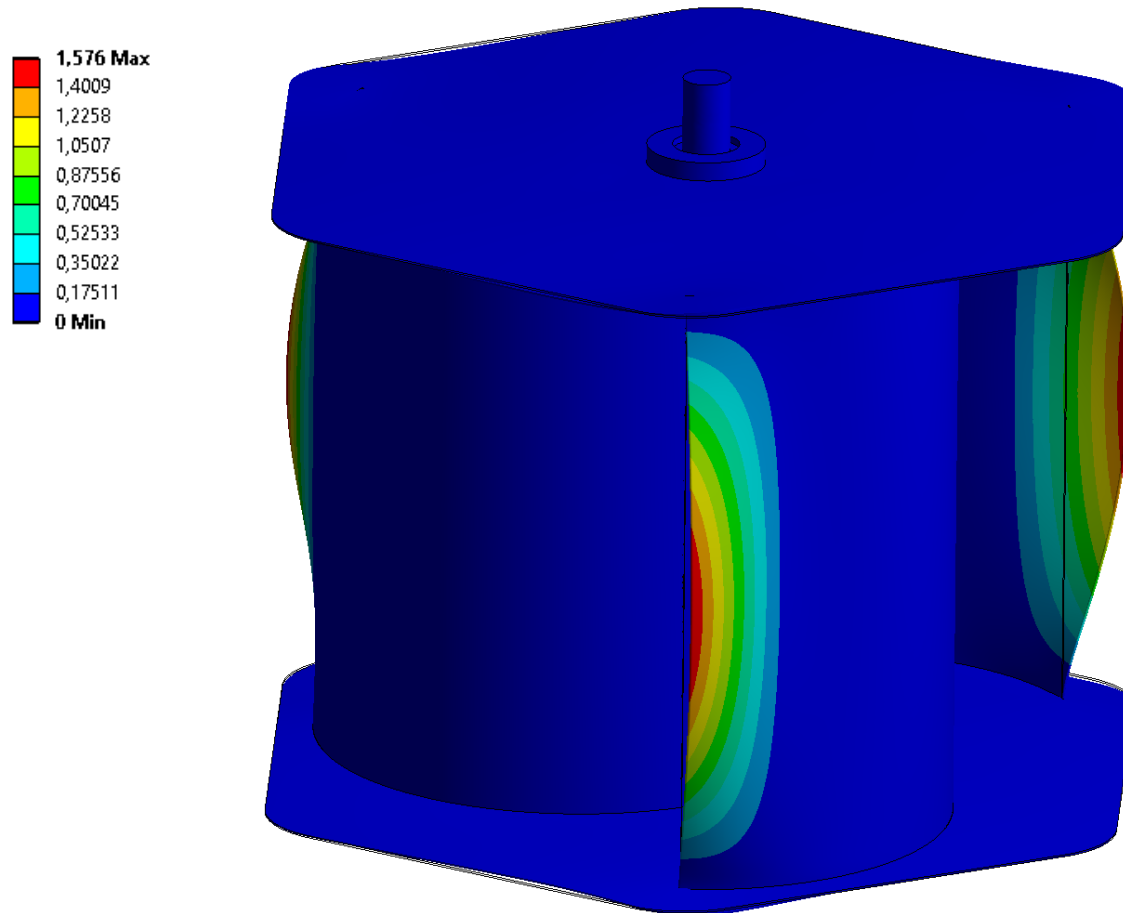
Der Widerstandsläufer wird ebenfalls gedrittelt, jedoch in der Höhe. Die Rotatorische Berechnung erfolgt gleich wie bei dem Auftriebsläufer. Es werden die Zustände für eine Drehzahl von 200U/min, 400U/min, 600U/min, 800U/min und 830U/min berechnet und ausgewertet.

Netz - Savonius Rotor:

Das Netz des Widerstands-
läufers besteht aus:
1.421.449 Knoten
614.405 Elementen

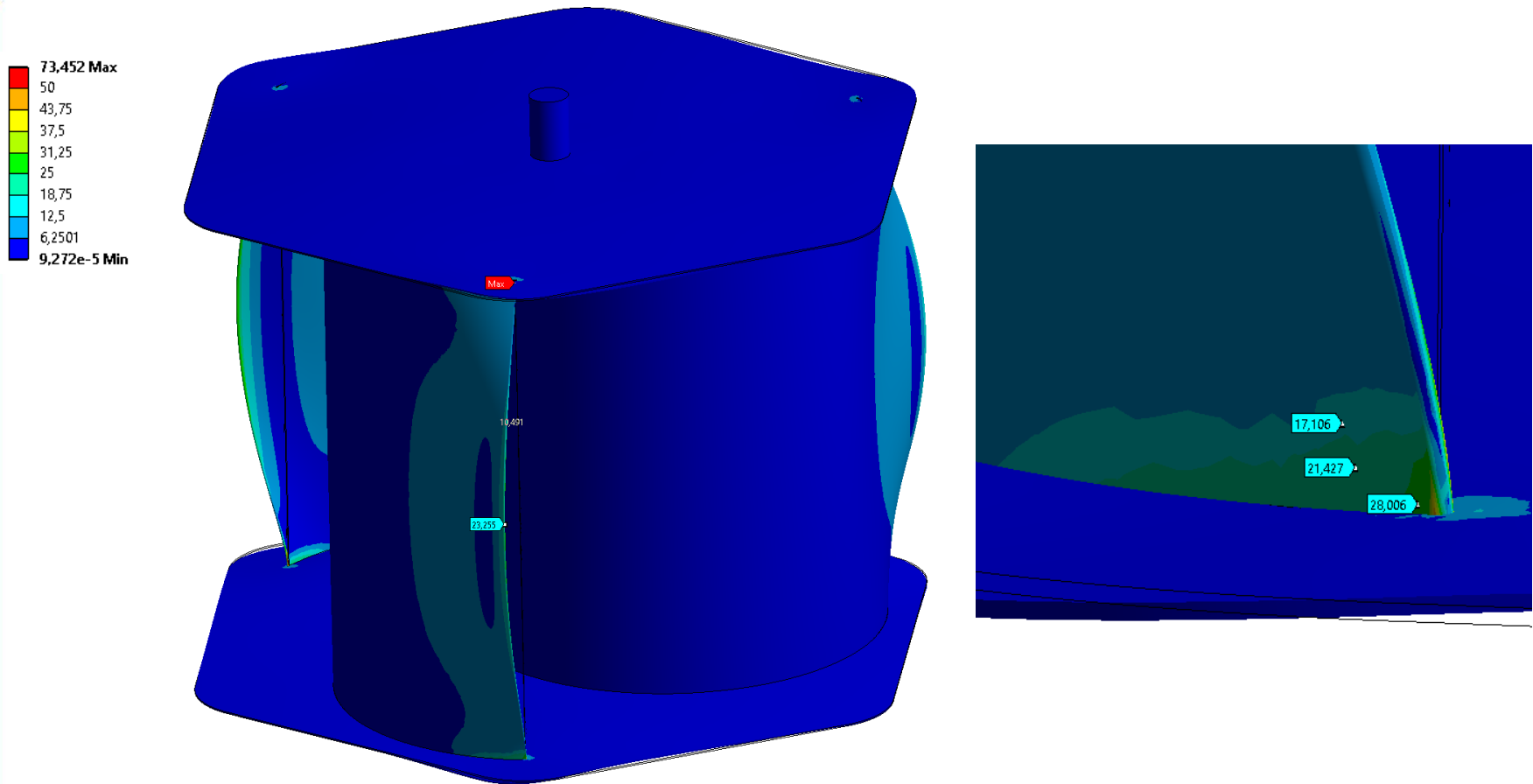


Gesamtverformung Savonius Rotor 600U/min:



Der Savonius Rotor verformt sich bei einer Drehzahl von 600U/min um 1,6mm.

Vergleichsspannung Savonius Rotor 600U/min



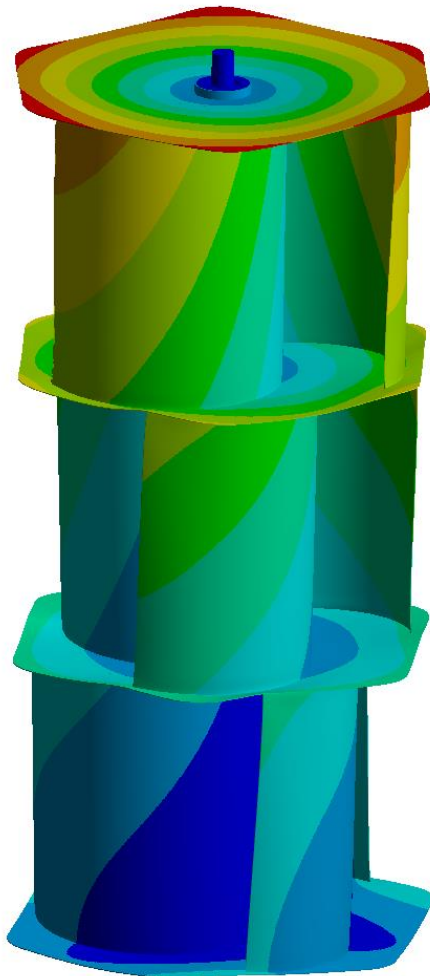
Die max. Spannung bei dem Widerstandsläufer beträgt $73,5 \text{ N/mm}^2$. Diese tritt bei dem Übergang zwischen Flügelschaufel und Patte auf und ist lokal sehr begrenzt. An der Stelle der max. Verformung herrscht eine Spannung von $23,3 \text{ N/mm}^2$.

Auswertung bei unterschiedlichen Drehzahlen

U/min	max. Verformung [mm]	max. Spannung [N/mm ²]
200	0,2	8,1
400	0,7	32,7
600	1,6	73,5
800	2,8	130,8
830	3,0	140,6

Alle auftretenden Spannungen bis zu einer Drehzahl von 830U/min sind im Zulässigen Bereich. Die laut Berechnung auftretenden max. Spannungen sind lokal sehr begrenzt und nicht Praxisrelevant (scharfe Kanten usw.).

Modalanalyse - Savonius



1. Mode – Schwingungsform bei 31,4Hz

Bei der durchgeführten Modalanalyse ergeben sich Eigenmoden bei folgenden Frequenzen:

- 31,4Hz – 1. Mode
- 69,8Hz – 2. Mode
- 69,8Hz – 3. Mode
- 75,8Hz – 4. Mode
- 86,2Hz – 5. Mode

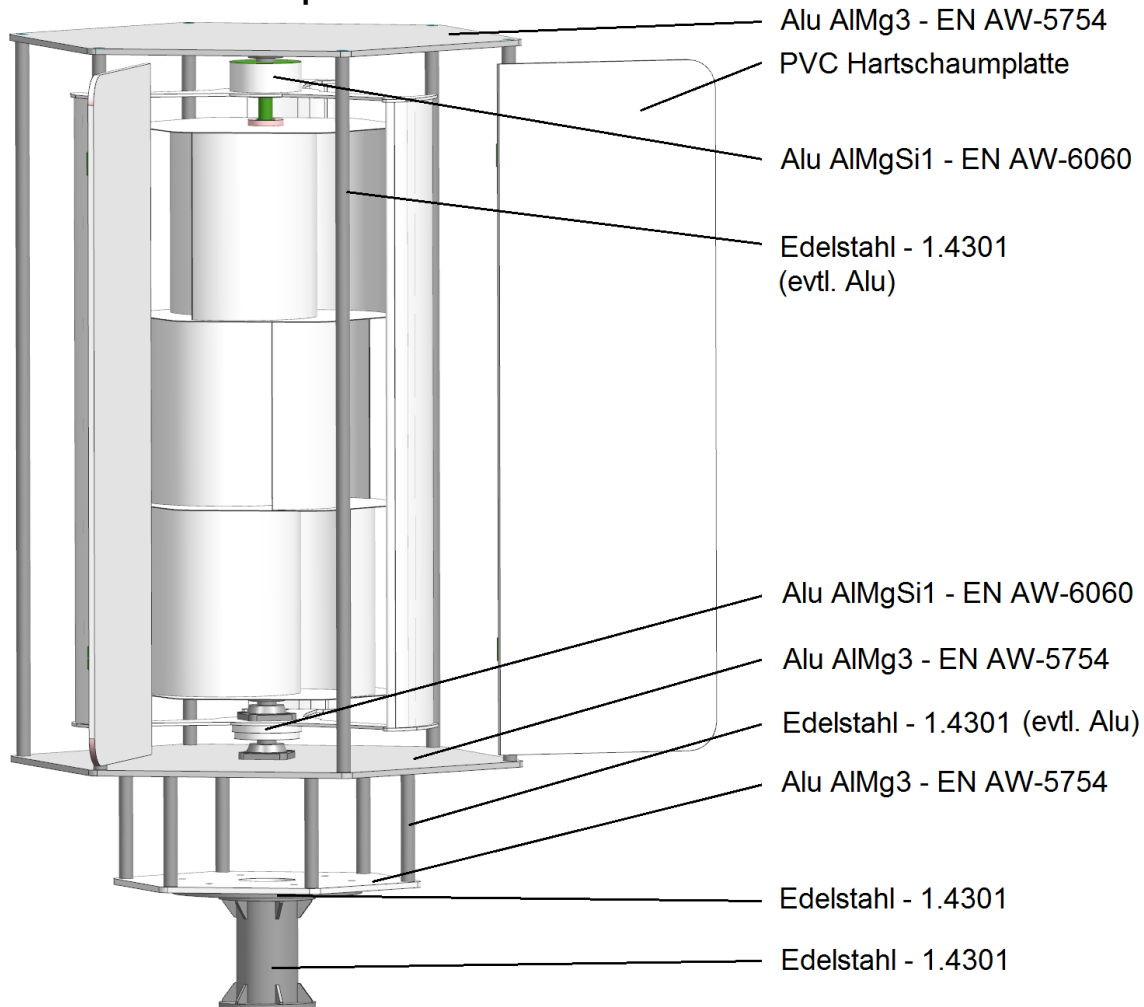
Da die max. Betriebsdrehzahl des Widerstandsläufers beträgt 600U/min. Diese Drehzahl entspricht einer Frequenz von 10Hz. Da die erste Eigenfrequenz des Rotors bei 31,4Hz liegt, welche viel höher als die Betriebsdrehzahl ist, besteht keine Gefahr einer Resonanzfrequenz.

Fazit zur Berechnung des Widerstandsläufers

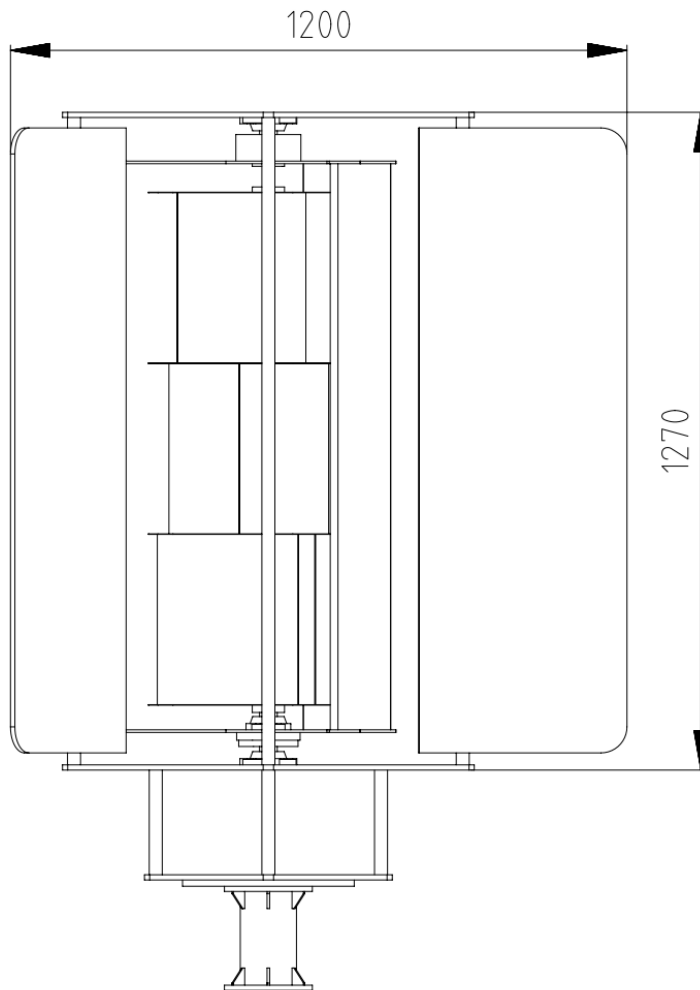
Alle Berechnungen des Widerstandsläufer können als positiv angesehen werden. Hinsichtlich Spannungen und Verformungen bewegt sich der Rotor im zulässigen Bereich. Die max. auftretenden Spannungen sind lokal sehr begrenzt.

Randbedingungen Windrad komplett:

Materialzuweisung Windrad komplett:



Randbedingungen:



Bei dieser Berechnung wird die gesamte Struktur in den Wind gestellt und berechnet.

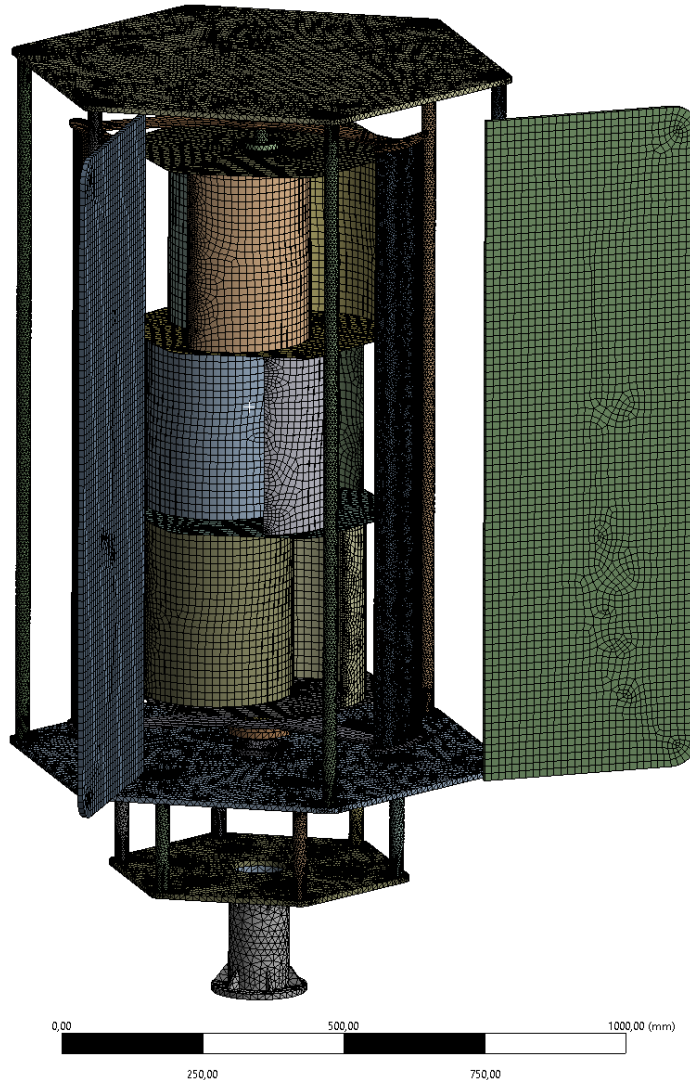
Max. Windgeschwindigkeit = 135km/h
entspricht $0,8\text{kN/m}^2$

Das gesamte Windrad hat eine
Angriffsfläche von $1,2 \times 1,27 = 1,524\text{m}^2$

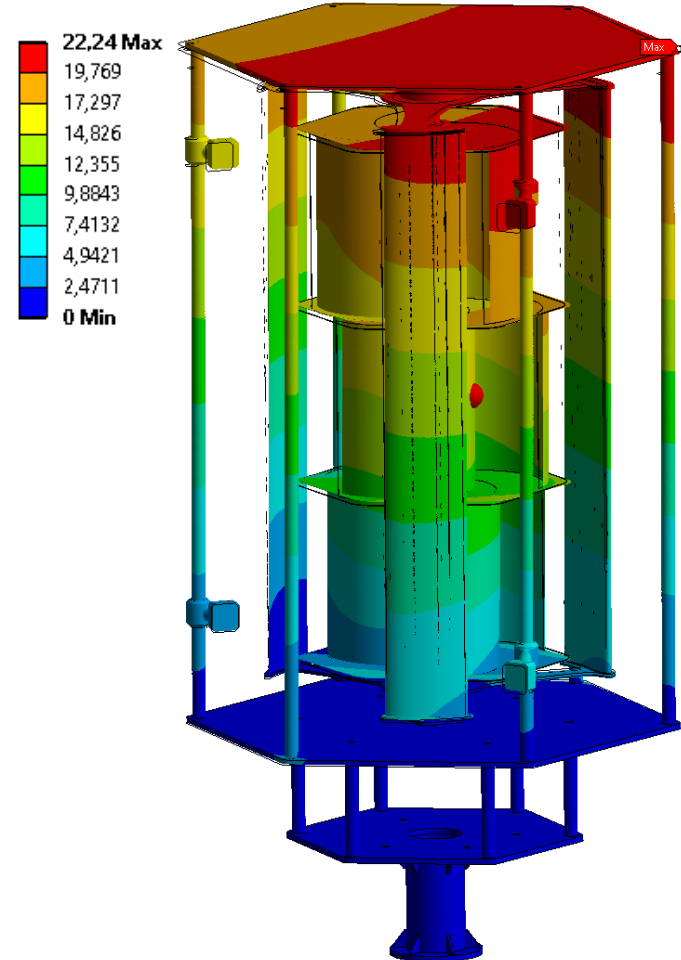
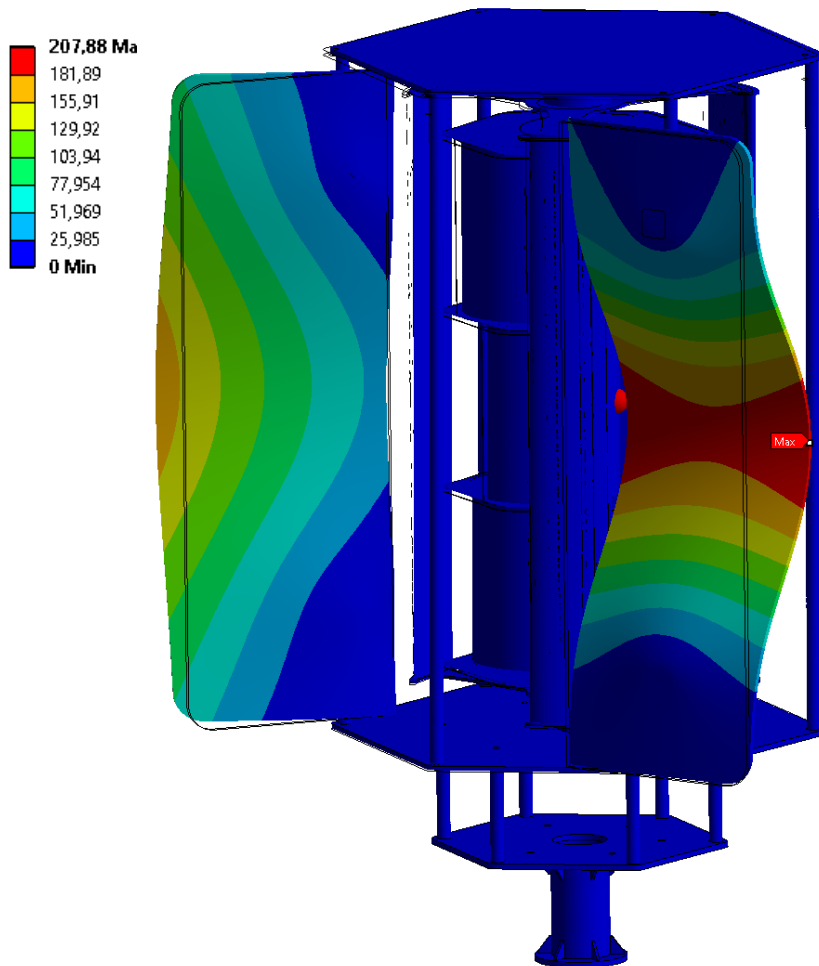
Dies entspricht einer ges. Windlast von
 $1.219\text{N} = 121,9\text{kg}$.

Netz – Windrad komplett:

Das Netz des kompletten
Windrades besteht aus:
2.105.041 Knoten
878.339 Elementen



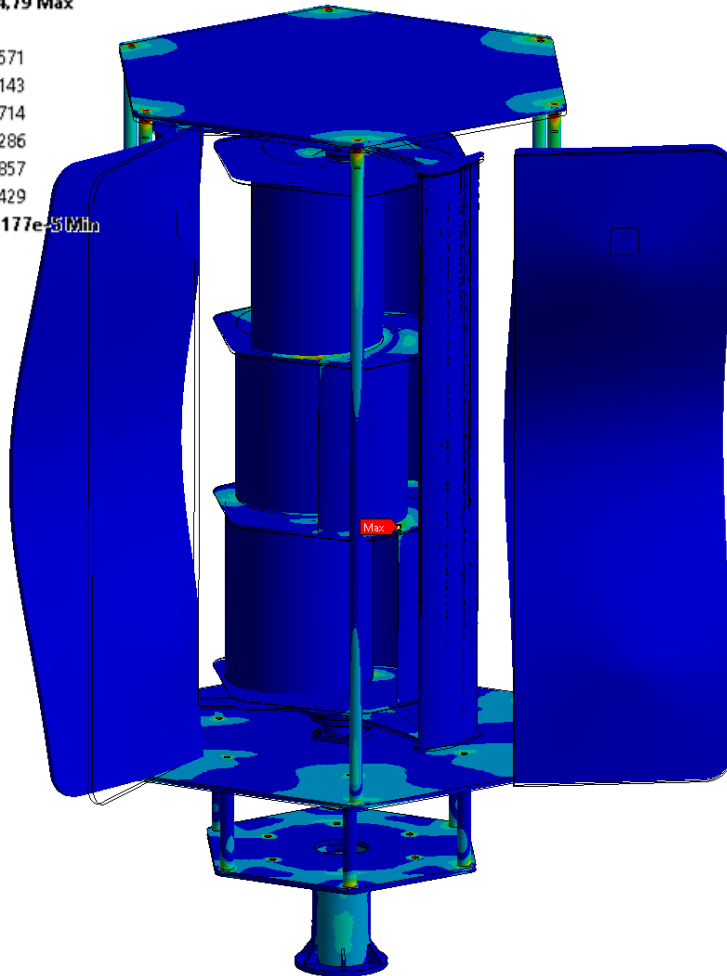
Gesamtverformung bei 135km/h Windgeschw.



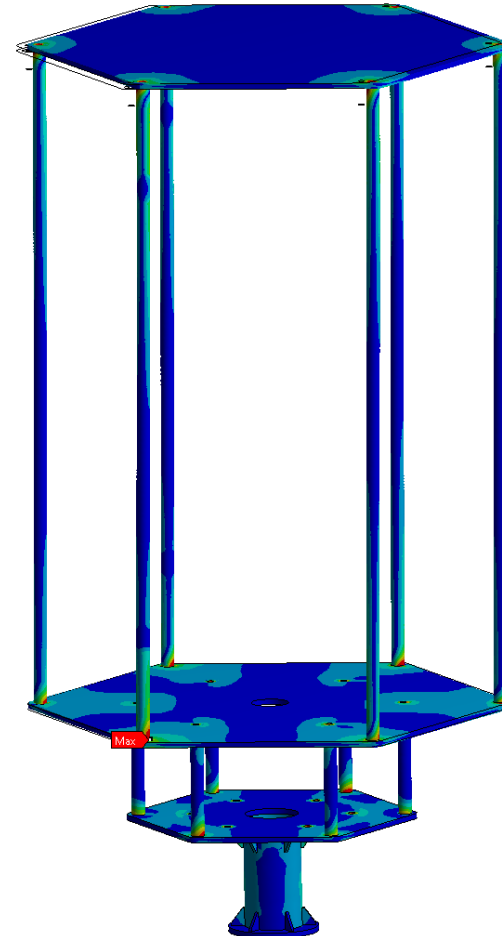
Die tragende Struktur des Windrades verformt sich bei 135km/h Windgeschw. um 22,2mm. Die Windkollektoren halten dieser max. Windgeschw. nicht stand.

Vergleichsspannung bei 135km/h Windgeschw.

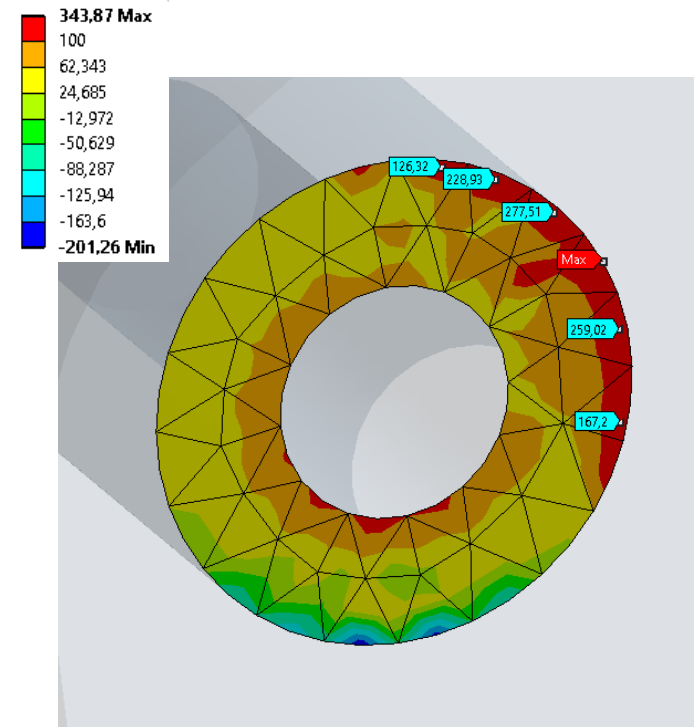
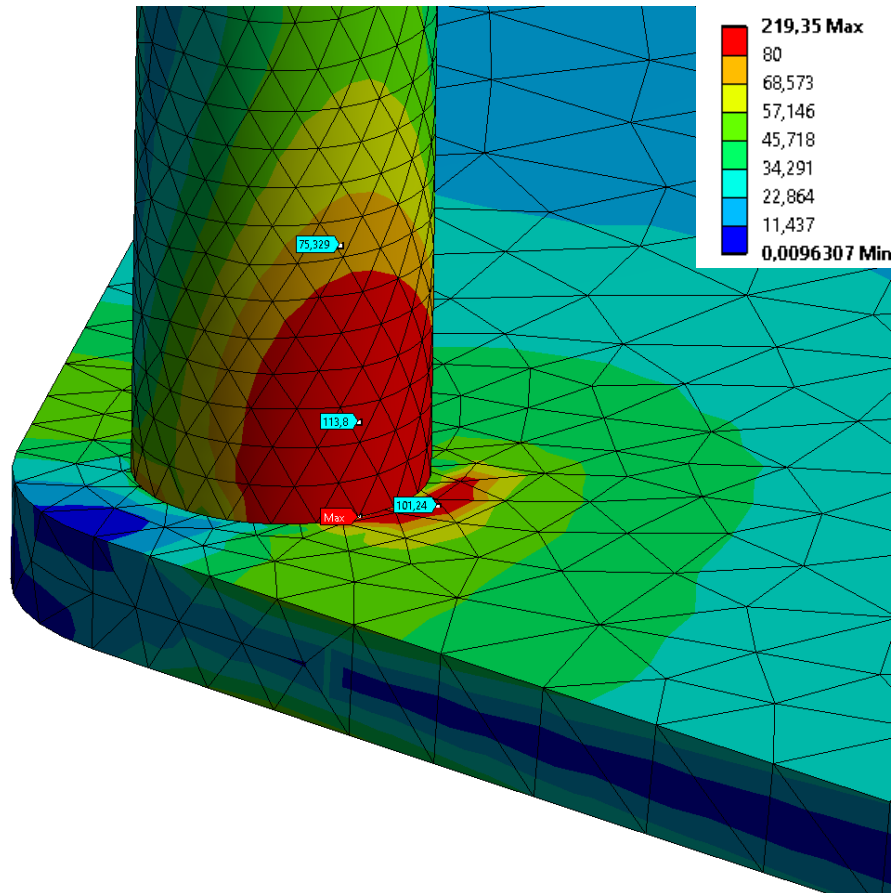
564,79 Max
80
68,571
57,143
45,714
34,286
22,857
11,429
9,6177e-5 Min



219,35 Max
80
68,573
57,146
45,718
34,291
22,864
11,437
0,0096307 Min

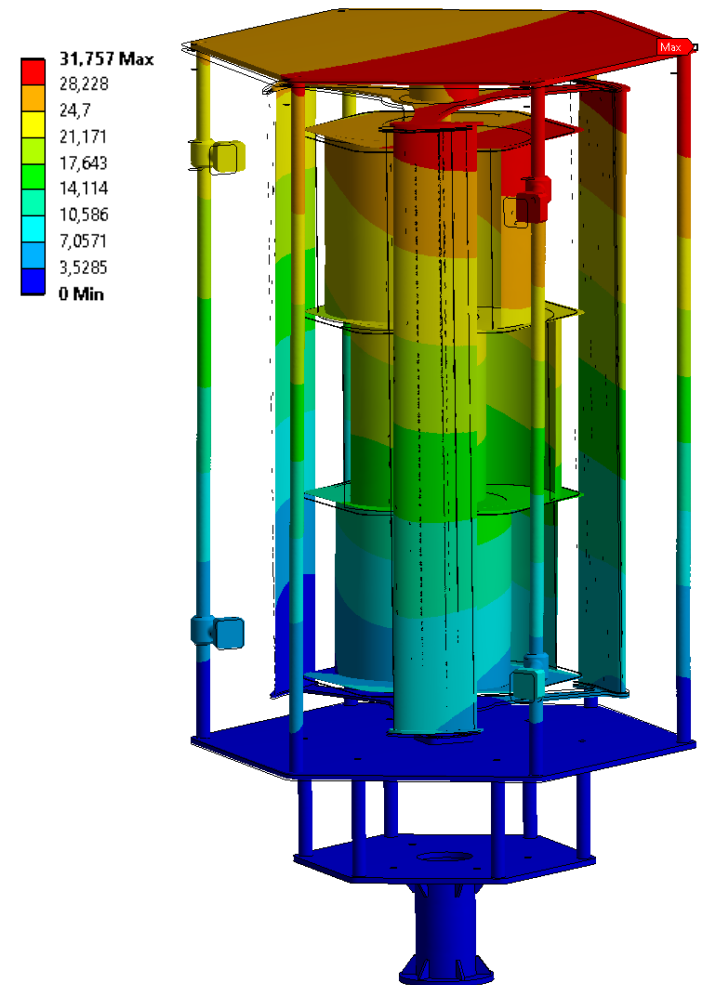
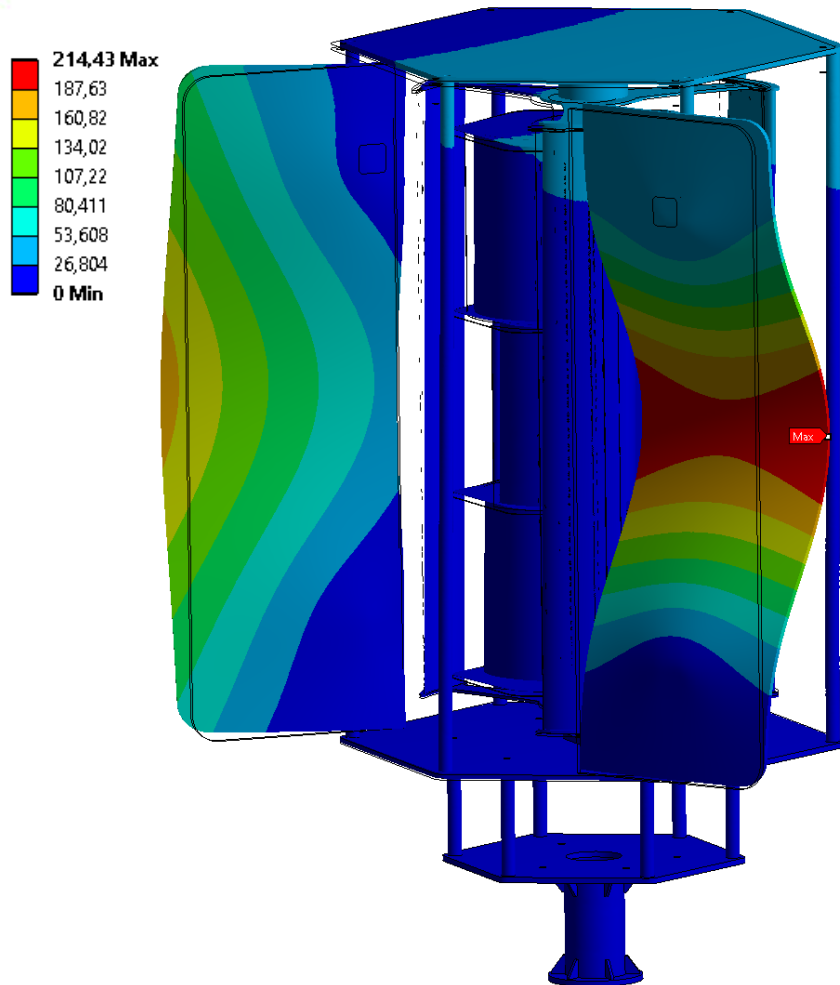


Vergleichsspannung bei 135km/h Windgeschw.



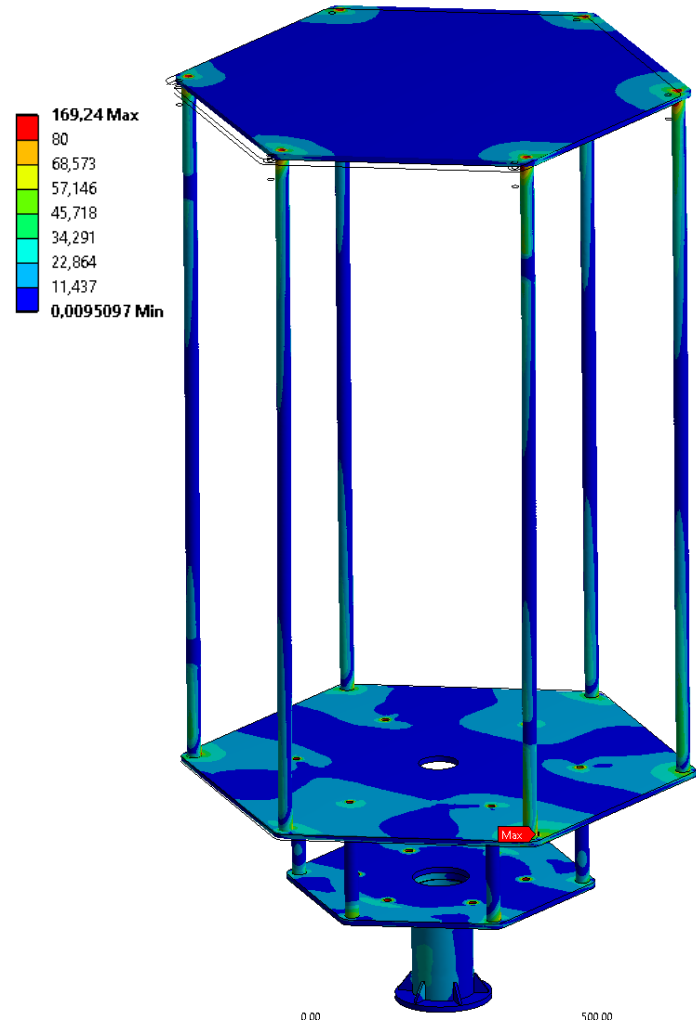
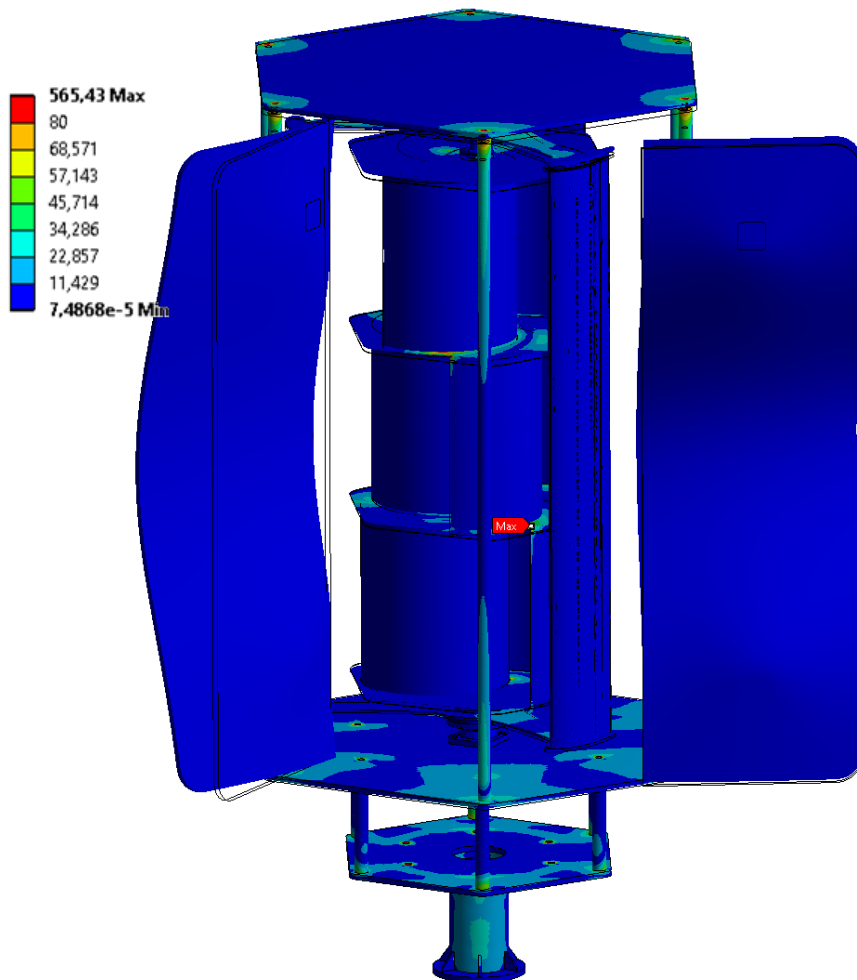
Detailansicht der am meisten belasteten Säule

Gesamtverformung bei 135km/h Windgeschw. und Alu-Säulen

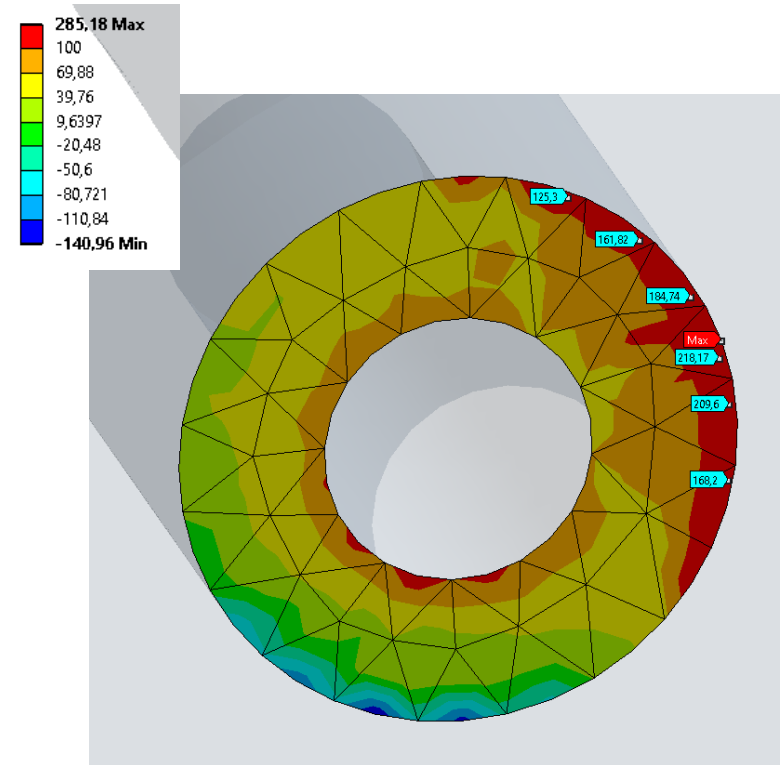
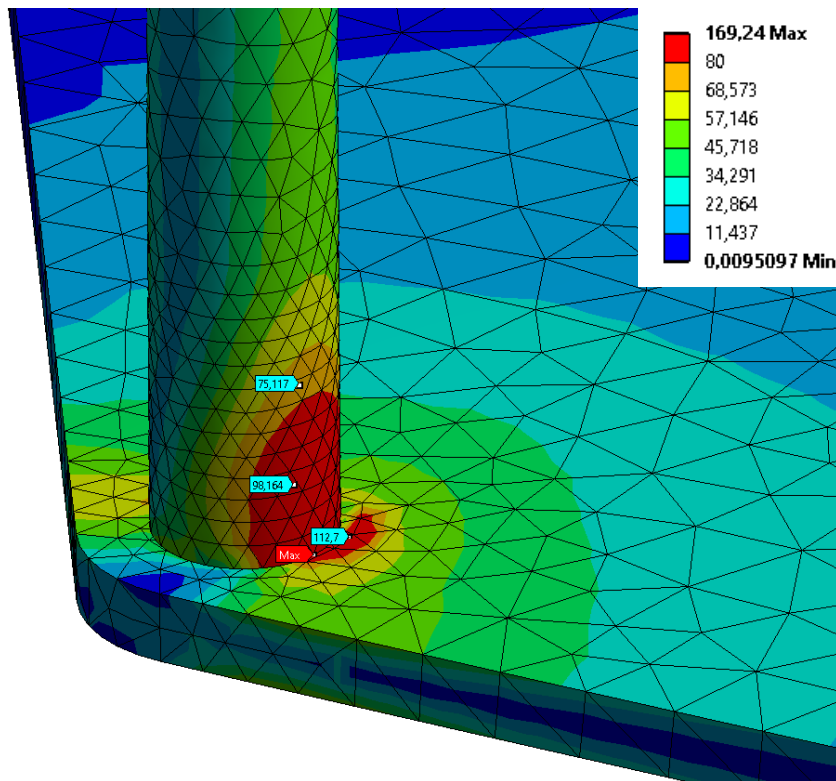


Die tragende Struktur des Windrades verformt sich bei 135km/h Windgeschw. um 31,8mm. Die Windkollektoren halten diese max. Windlast nicht stand.

Vergleichsspannung bei 135km/h Windgeschw. und Alu-Säulen



Vergleichsspannung bei 135km/h Windgeschw. und Alu Säulen



Detailansicht der am meisten belasteten Säule

Fazit

Wirkt eine Windlast von 135km/h auf die gesamte Struktur des Windrades verformt sich die Struktur selbst um 22,2mm. Der Windkollektor hält diese Windgeschwindigkeiten nicht stand. Die max. Vergleichsspannung an den Säulen beträgt 219N/mm². Diese tritt jedoch nur in sehr kleinen Bereichen auf und kann damit vernachlässigt werden. Die Säulen aus Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4301 ertragen diese max. Windlast.

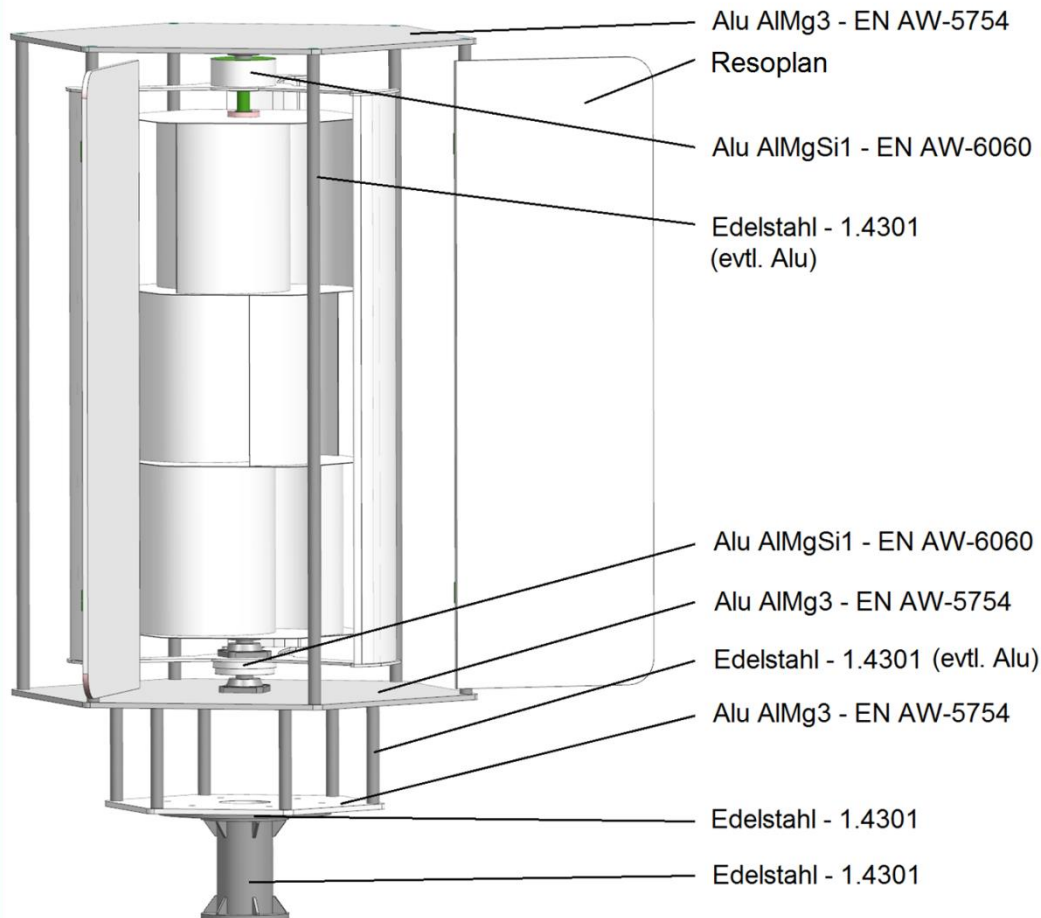
Werden die Edelstahlsäulen mit Säulen aus Aluminium getauscht und dieser Lastfall erneut berechnet, verformt sich die gesamte Struktur bei max. Windlast um 31,8mm. Die beiden Windkollektoren halten dieser Last nicht stand. Die max. auftretende Spannung an den Säulen beträgt 169N/mm². Diese max. Spannung ist auch wie bei der vorherigen Berechnung sehr lokal begrenzt. Wählt man einen Aluminiumwerkstoff mit einer Streckgrenze von über 160N/mm² (z.B.: EN AW 6060 – T66) hält auch dieser diese Windlasten stand.

Ansprechpersonen:

Lukas Soukup - 0662/457940-23 – soukup@obkicher-engineering.at

Peter Wimmer - 0662/457940-22 – wimmer@obkicher-engineering.at

Zusatz: Berechnung der Kollektorplatten mit dem Werkstoff Resoplan



Die Windkollektoren aus den PVC Hartschaumplatten halten die geforderten Windlasten nicht stand. Nun wurde Resoplan als Werkstoff für die Windkollektoren verwendet. Welcher bei der folgenden Berechnung eingesetzt wird.

Werkstoff-Daten von Resoplan:

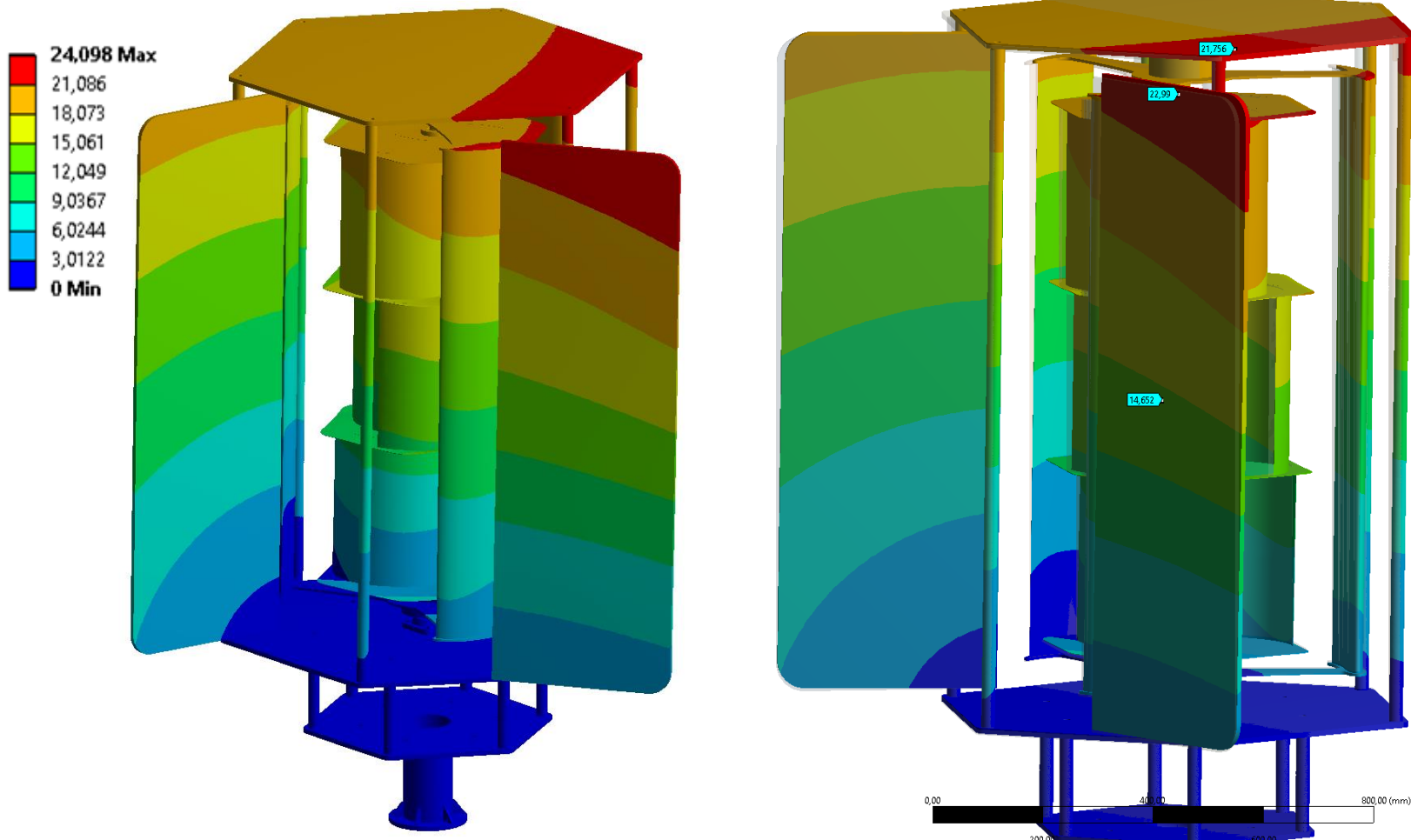
E-Modul quer: 10.000MPa

Dichte: 1,4g/cm³

Zugfestigkeit quer: 70MPa

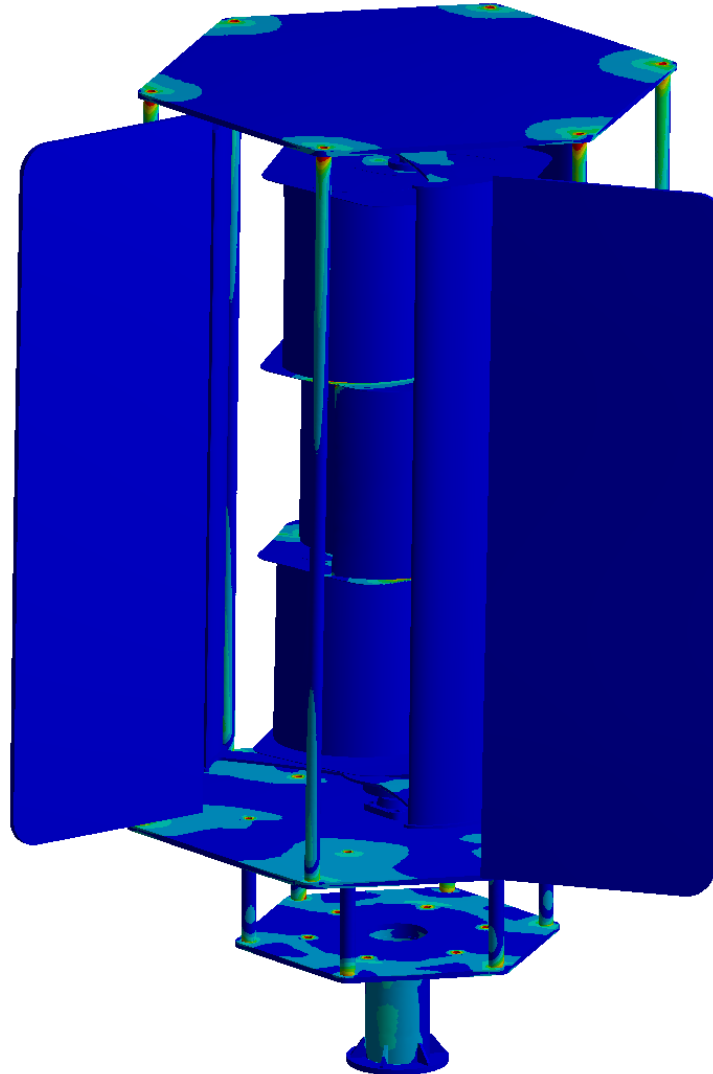
Biegefestigkeit quer: 100MPa

Gesamtverformung bei 135km/h Windgeschw.

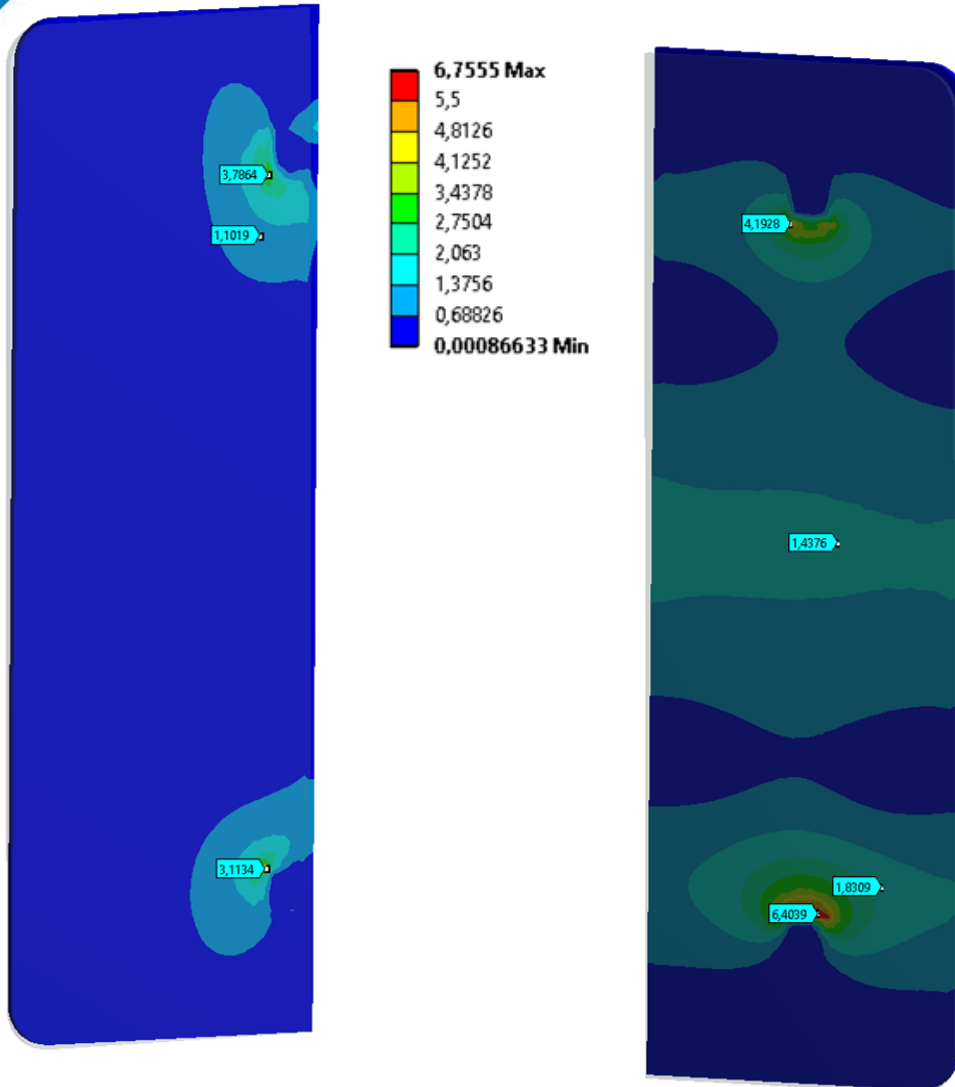


Die gesamte Struktur des Windrades verformt sich bei 135km/h Windgeschw. um 24,1mm. Die Windkollektoren halten diese max. Windlast stand.

Vergleichsspannung bei 135km/h Windgeschw.



Vergleichsspannung bei 135km/h Windgeschw.



Die maximal vorherrschende Spannung an den Windkollektoren beträgt 6,8MPa. Diese Spannung liegt im weit unteren Bereich der zulässigen Spannungen für eine Resoplan Platte.

Fazit zur Berechnung der Windkollektoren aus dem Werkstoff Resoplan

Wirkt eine Windlast von 135km/h auf die gesamte Struktur des Windrades (inklusive Windkollektoren aus Resoplan – Dicke 10mm – wie im CAD-Modell vorhanden) verformt sich die gesamte Struktur um 24,1mm. Der Windkollektor aus dem neuen Werkstoff Resoplan hält diese Windgeschwindigkeiten jetzt stand. Die beiden Windkollektoren verformen sich im Vergleich zur restlichen Struktur nur sehr gering. Die Differenz der Verformung zwischen der Struktur und den Windkollektoren beträgt max. ca. 0,5mm. Die maximal vorherrschende Spannung an den Windkollektoren beträgt 6,8MPa. Diese Spannung liegt im zulässigen Bereich für eine Resoplan Platte (max. zulässige Spannung = 70MPa).

Ansprechpersonen:

Lukas Soukup - 0662/457940-23 – soukup@obkicher-engineering.at
Peter Wimmer - 0662/457940-22 – wimmer@obkicher-engineering.at