

# **Untersuchung der Festigkeit ausgewählter Bauformen von Widerstandsläufern im Leerlauf**

Autor: Andreas Georgi

Friedrichshafen, 11.03. 2014

## **Inhaltsverzeichnis:**

1	Einleitung .....	3
2	Untersuchte Bauformen.....	4
2.1	Savonius – letztes Patent.....	4
2.2	Durchströmrotor .....	8
2.3	C-Rotor .....	12
2.3.1	50-Jahres Wind.....	12
2.3.2	50-Jahres Bö.....	14
3	Fazit .....	16
4	Alternativen .....	16

## **Verzeichnis der Abbildungen:**

Abbildung 1	Savonius, letztes Patent.....	4
Abbildung 3	.....	5
Abbildung 4	Gesamtverformung bei 12 m/s mit 6,5-facher Überzeichnung .....	5
Abbildung 5	Spannungszustand bei 12 m/s .....	6
Abbildung 6	Spannungszustand, vergrößert .....	6
Abbildung 7	.....	7
Abbildung 8	.....	7
Abbildung 9	Konstruktion und Randbedingungen 1,5mm Al-Blech.....	8
Abbildung 10	Spannung bei Nennbedingungen 14 m/s, logarithm. Anzeige.....	9
Abbildung 11	Zugehörige Verformung im Maßstab 1:1 .....	10
Abbildung 12	mechan. Spannungen für 50JBö TSR 0,85; 620 u/min: Nur Fliehkräfte! ....	11
Abbildung 13	Konstruktion mit Randbedingungen, Leerlauf-TSR 1,5 (keine Luftkräfte)...	12
Abbildung 14	Gesamtverformung, nur durch Fliehkräfte und Gewicht .....	12
Abbildung 15	Dazu gehörige mechan. Spannungen .....	13
Abbildung 16	Spannungen in Vergrößerung .....	13
Abbildung 17	Randbedingungen .....	14
Abbildung 18	Stelle und Größe der max. mechan. Spannungen .....	15
Abbildung 19	Normalwindrad Ø 1,5 m TSR 4.....	17
Abbildung 20	Zuschnitt.....	17

# 1 Einleitung

Was macht man zur Sturmsicherung bei Widerstandsläufern?

Normalwindräder haben zahlreiche Möglichkeiten, Darrieus-Läufer wenigstens noch 2, als da wären Generator-Kurzschluss und automatische mechan. Bremse. Beides dient dem Strömungsabriss.

Letzteres ist bei Wid.-Läufern aber nicht möglich. Selbst wenn, das Startmoment bleibt mehr oder weniger erheblich.

Verbleibt neben aufwändigen Fliehkraft-Mechanismus-Systemen mit fragwürdiger Festigkeit nur noch die mechanische Bremse.

Ein automatisches Auslösen ist aber technisch höchst anspruchsvoll, insbes. wenn die Bremse nach dem Sturm wieder automatisch gelöst werden soll.

**Eine einfache Möglichkeit würde sich eröffnen, wenn ab einer zu definierenden Betriebssituation einfach sämtliche Last zum Schutz der Elektrik „abgeworfen“ wird, und man den Wid.-Läufer im Leerlauf weiter drehen lässt.**

**Zu erkunden, ob das möglich ist, ist Sinn dieser Arbeit.**

Dazu wurden speziell für die Aufgabe „WKA für die hohle Gasse“<sup>1</sup> mit 1m Breite und 2 m Höhe verschiedene Systeme konstruiert, Lagermöglichkeit jeweils oben und unten. Dsw. wurden Randbedingungen für den 50-Jahres Wind (50JW) bzw. die 50-Jahres Bö (50JBö) errechnet und mit diesen die Festigkeit mittels Finiter-Elemente-Methode (FEM) simuliert. Massen und Fliehkräfte werden dabei berücksichtigt. Die Einzelteile wurden als quasi verschweißt angenommen.

Zur Bestimmung der 50Jahres-Werte hat der Autor auf die DIN 4131 zurück gegriffen und dort die geringste Windzone (I) veranschlagt, gekennzeichnet durch einen Jahresmittelwind von lediglich 4 m/s. Das deshalb, weil die eigentlich für WKAs zuständigen Regelwerke erst bei 6 m/s beginnen<sup>2</sup>.

Konkret wurden für den 50JW 24,3 m/s angesetzt bzw. 87,5 km/h  
und für die 50JBö 35,5 m/s bzw. 127,8 km/h

Als Referenzmaterial wird EN AW AlSi1MgMn in der Qualität T6 verwendet (kalt ausgelagert, höchste Festigkeitsstufe) Das Mat. ist witterungsbeständig und gut schweißbar. Es gilt mit 10% Bruchdehnung zwar schon nicht mehr als duktil, Radien von 250 mm ließen sich bei 2 mm Blech aber problemlos anrollen. Hier wird nur allgemein 1,5 mm Blech verwendet, bis auf den Vorflügel beim C-Rotor, dort genügt 1 mm.

Materialdaten:  $R_m$  min 310 N/mm<sup>2</sup>;  $R_{p0,2}$  min 255 N/mm<sup>2</sup>.

Noch besser geeignet, da noch fester, ist AlCuMg1 F38 oder F40 in der früheren Bezeichnung, aber vermutlich auch teurer.

Alle hochfesten Al-Leg. mit noch mehr Cu und zusätzlich Zn sind zu wenig korrosionsfest, insbes. wenn Seewasser-Partikel in der Luft sein können.

Im Folgenden werden 3 ausgewählte Bauarten vorgestellt, s. dazu auch <sup>3</sup>

<sup>1</sup> <http://www.kleinwindanlagen.de/Forum/cf3/topic.php?p=39786#real39786>.

<sup>2</sup> Sicherheitsrelevante Windgrößen <http://www.angeo-privat.gmxhome.de/Windkraft/Windklassen.pdf>  
..(Schreibfehler! Es muss heißen IEC 61400-2)

<sup>3</sup> Andreas Georgi: Widerstandsläufer - Bauformen und Eigenschaften, 2014  
<http://www.kleinwindanlagen.de/Forum/cf3/topic.php?p=40441#real40441>

## 2 Untersuchte Bauformen

### 2.1 Savonius – letztes Patent

Eine Grundriss-Zeichnung, welche die Ideen vom Reichspatent 495518<sup>4</sup> aufgreift, ist hier zu sehen. Die vagen Maßandeutungen „von-bis“ im Patent wurden etwa mittig realisiert.

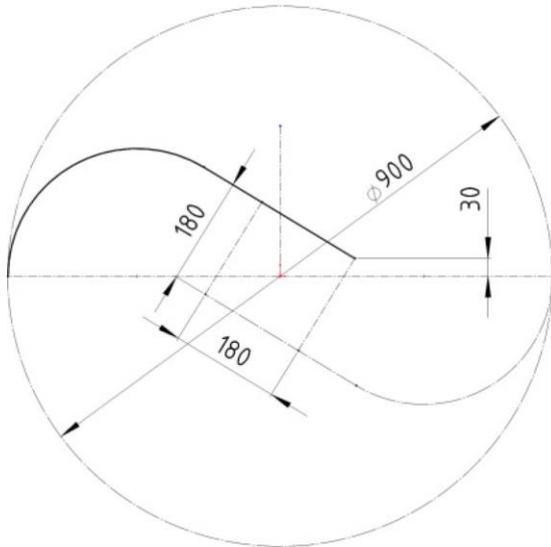


Abbildung 1 Savonius, letztes Patent

Es wurde diese Konstruktion dem klassischen Darrieus vorgezogen, da der Wirkungsgrad wesentlich höher erwartet wird, was beim ähnlich aussehenden *Benesh-Rotor* bestätigt wurde.

Auch erscheint der klassische Darrieus vom Design etwas plump.

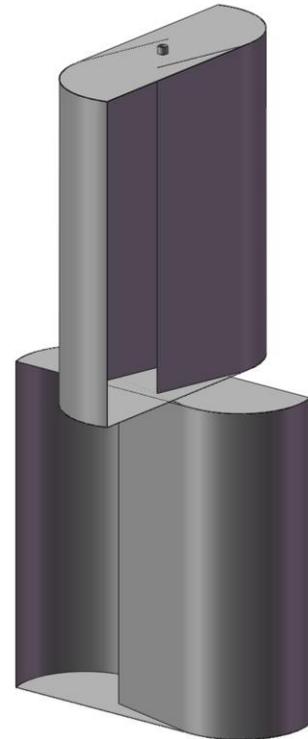


Abbildung 2

Da das Höhen-Ø Verhältnis erheblich ist und weil damit zu rechnen ist, dass das Drehmoment über 360° deutlich pulsiert, wurde eine 2-stufige winkelversetzte Anordnung gewählt. Dazu die Konstruktion nach Abb. 2, welche auch für die FEM-Simulation Verwendung fand. Material allgemein 1,5 mm Al-Legierung.

Ein Mittelrohr Ø 30x2 aus NIRO wurde vorsorglich vorgesehen, da trotz Lagerunterstützung oben und unten nicht genug Eigenstabilität erwartet wurde.

Als Lasten wurden angenommen für 14m/s und TSR 1:

Drehzahl	255 u/min
Wid.-Kräfte in Richtung -z von je	80N aus einem Gesamt-Cw von 1 <sup>5</sup>

Lagerung jeweils am Rohr oben und unten.

<sup>4</sup> Ebenda, Kap. 3.1.2

<sup>5</sup> Sigurd Savonius: The wing-rotor in theory and practice, Helsingfors, 1926 Fig. 18  
[http://www.prh.fi/stc/attachme...\\_kirja.pdf](http://www.prh.fi/stc/attachme..._kirja.pdf)

Eine Darstellung der Randbedingungen in folgendem Bild.

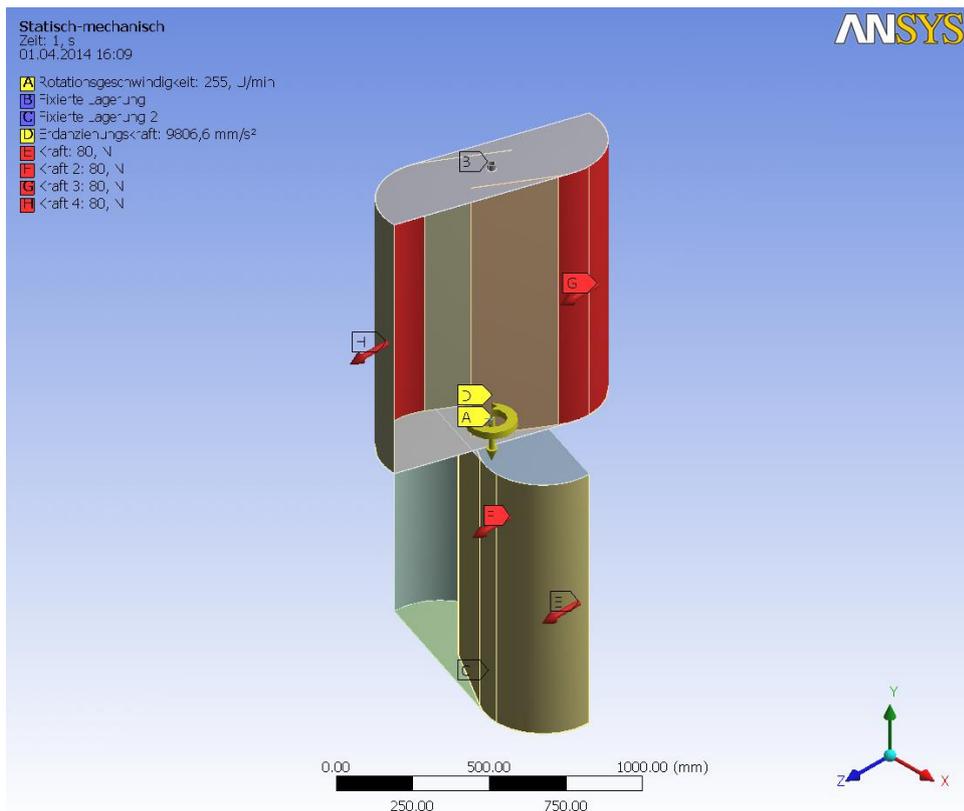


Abbildung 3

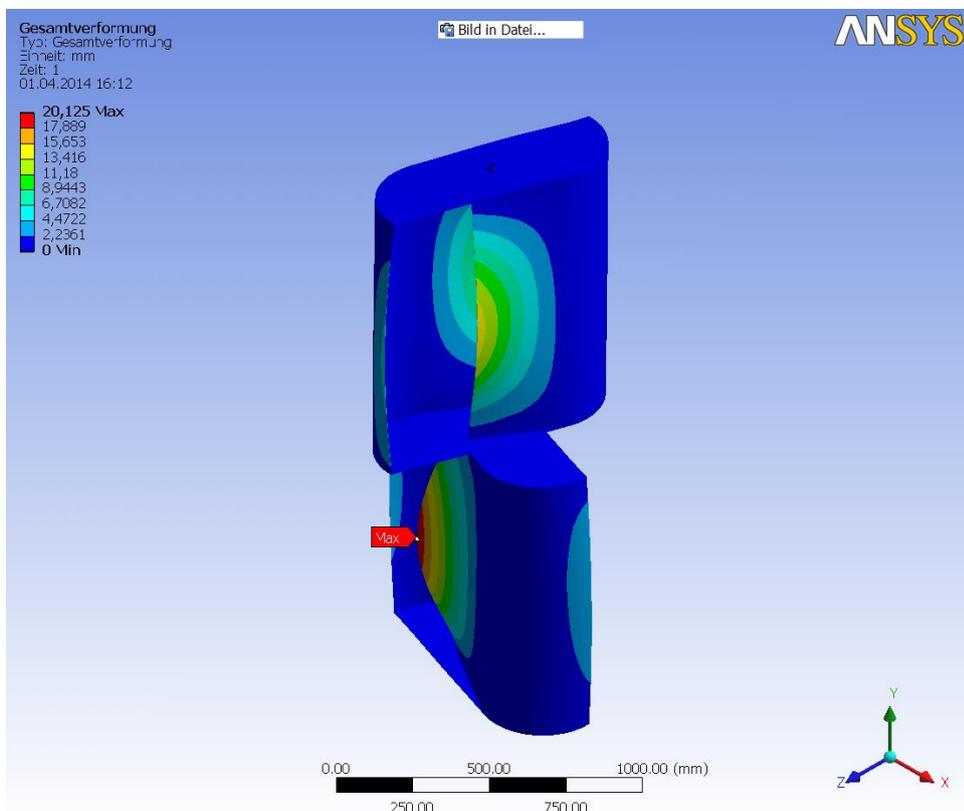


Abbildung 4 Gesamtverformung bei 12 m/s mit 6,5-facher Überzeichnung

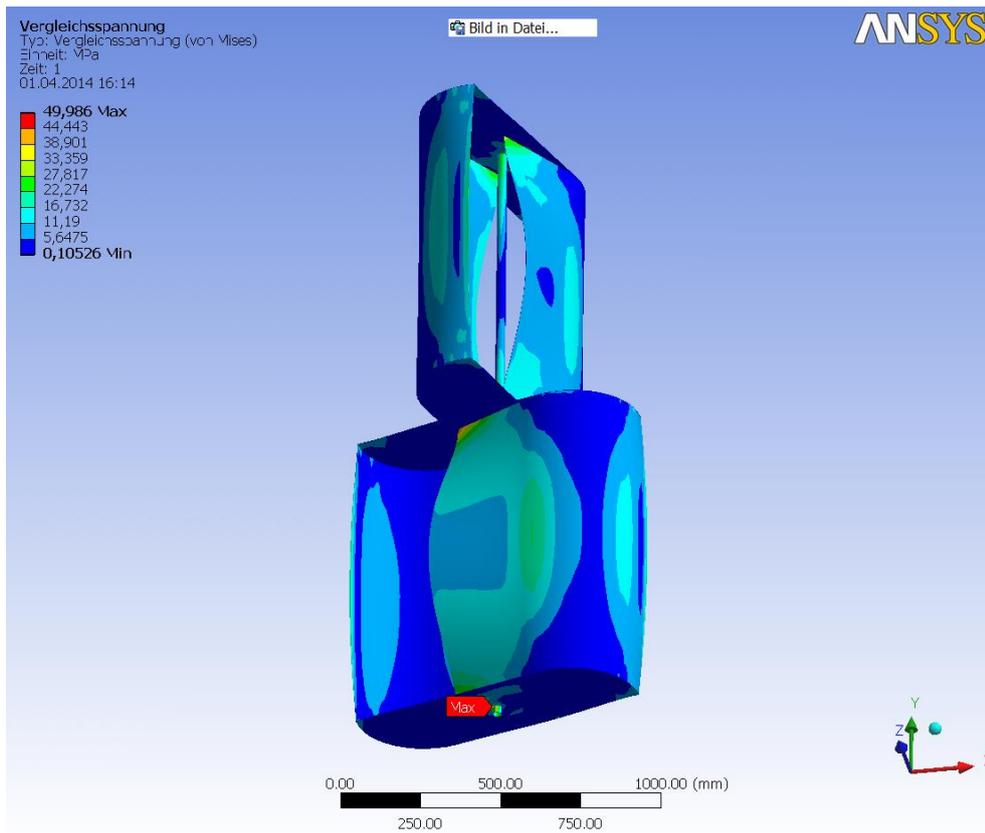


Abbildung 5 Spannungszustand bei 12 m/s

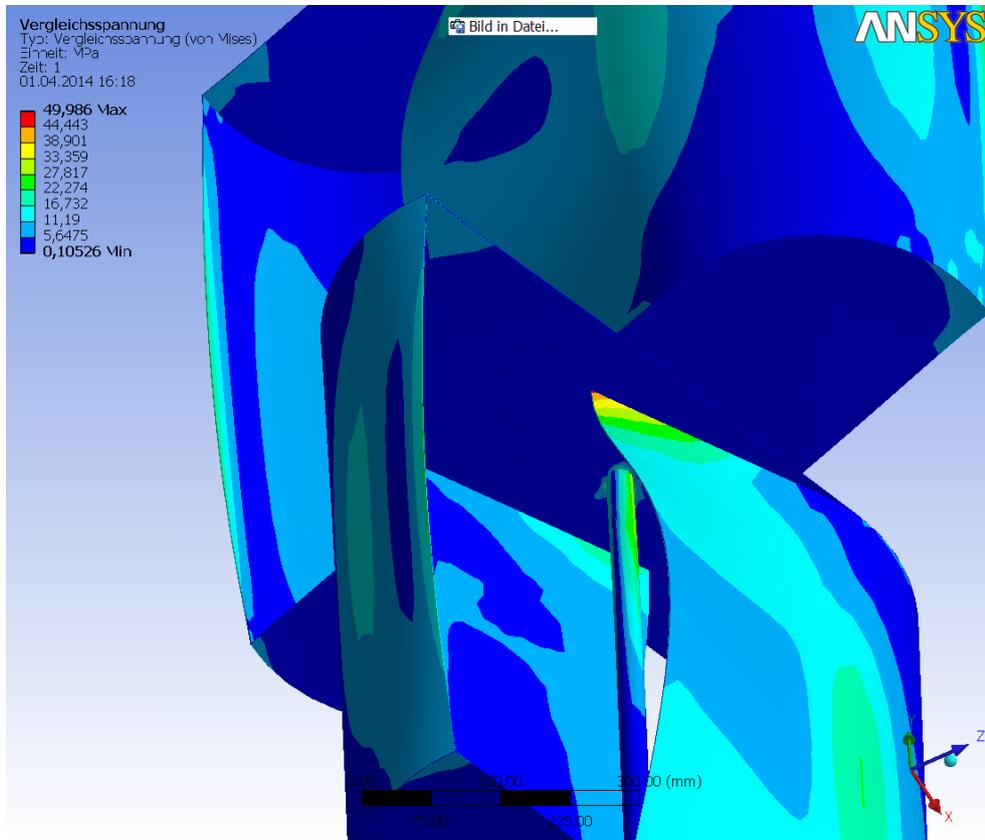


Abbildung 6 Spannungszustand, vergrößert

## Auswertung

Mit max. Spannung von ca. 50 N/mm<sup>2</sup> ergibt sich bei der Zugfestigkeit vom Material von 310 N/mm<sup>2</sup> ein Si-Faktor von 6,2. Das ist bezüglich der mind. 3-fachen Sicherheit nach EN 61400-2 ausreichend, vermutlich auch noch bei 14 m/s.

Um über 14 m/s die Last abwerfen zu können, müssten allerdings weitere Verstrebungen die Durchbiegungen der ungewölbten Flächen abfangen, die vornehmlich durch die Fliehkraft entsteht.

Wegen erheblicher optischer Unruhe und verbleibender aerodyn. Unwuchten, die sich wie dynamische Unwuchten äußern, wurden keine weiteren Simulationen gemacht. Allerdings hat der Rotortyp bezüglich Cp einiges Potential<sup>6</sup>.

Deswegen wurde noch eine 3-Stufen Variante zumindest konstruiert, mit Versatz um jeweils 120°.

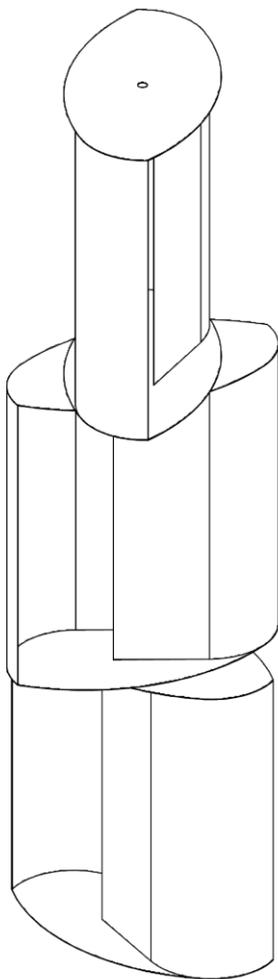


Abbildung 8

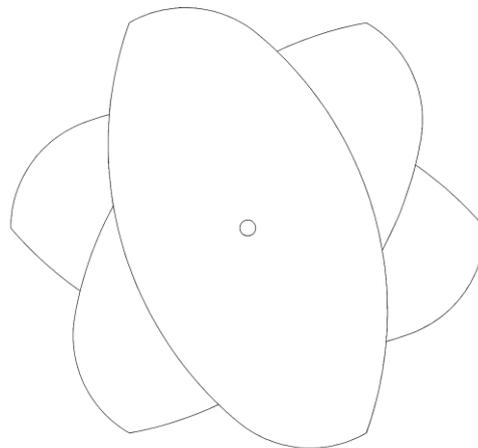


Abbildung 7

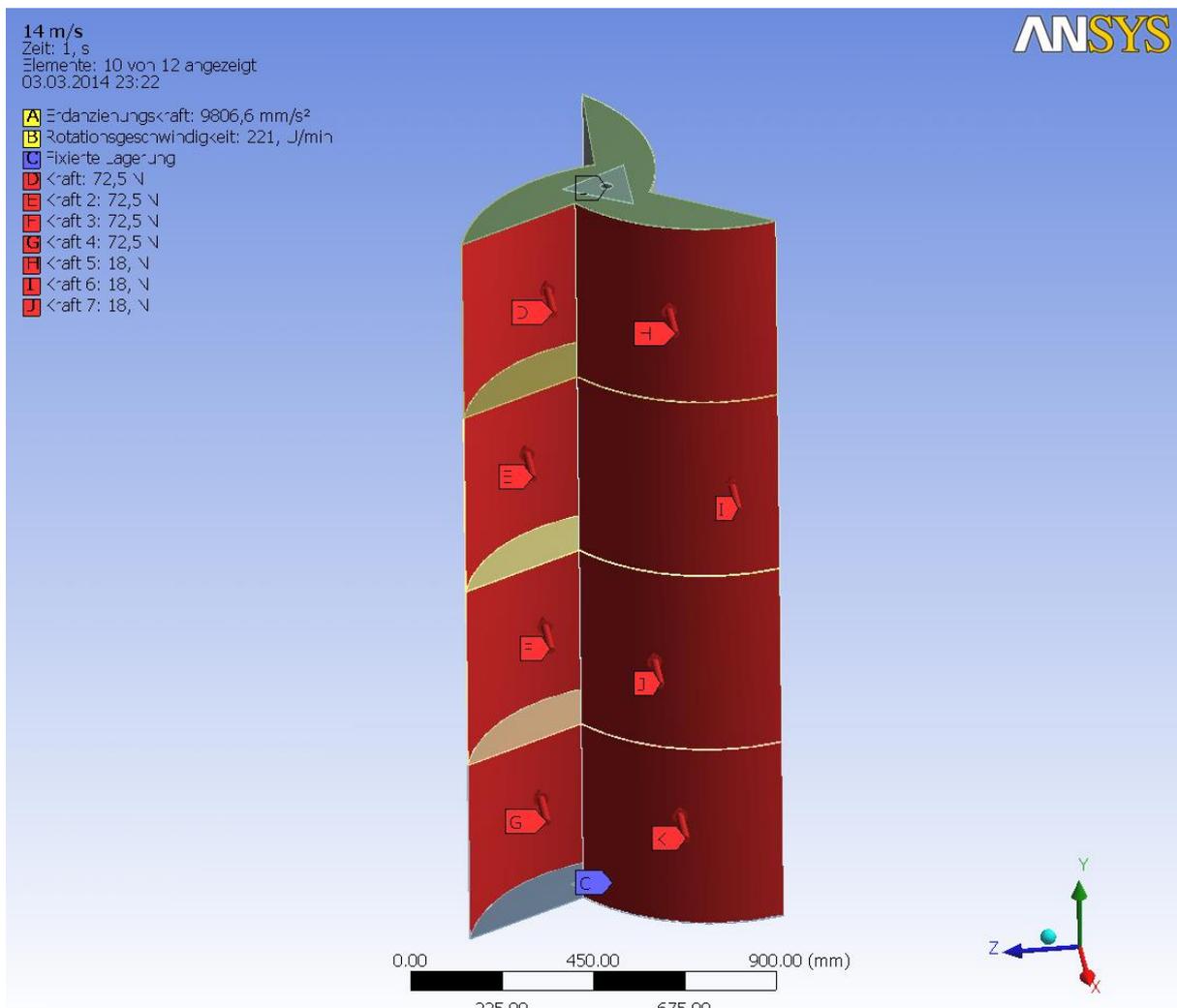
<sup>6</sup> Andreas Georgi: Widerstandsläufer - Bauformen und Eigenschaften, 2014  
<http://www.kleinwindanlagen.de/Forum/cf3/topic.php?p=40441#real40441>

## 2.2 Durchströmrotor

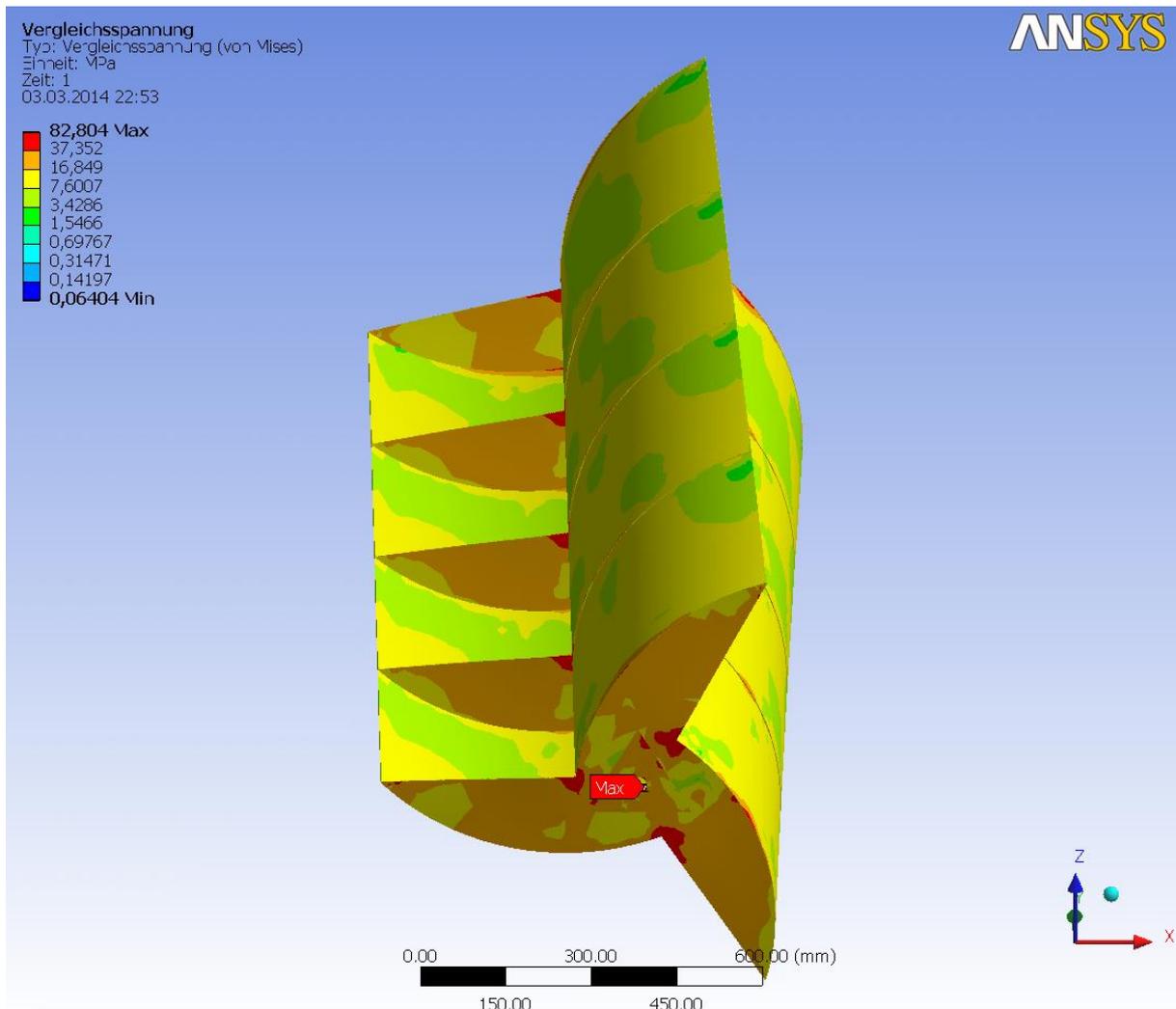
Obwohl vom Cp nicht überragend, hat er eine gewisse Eigenstabilität, welche die Prüfung auf Verwendung ohne Mittelrohr sinnvoll erscheinen lässt. Auch ist die optische Unruhe vergleichsweise gering, dsw. die Pulsation des Drehmomentes über 360°.

Simulationen mit nur 1 Mittelstütz-Ebene haben die Sinnlosigkeit erkennen lassen, das Selbe bei Außenhaut 1mm Blech, selbst bei insgesamt 5 Stützebenen. Einigermaßen hoffnungsvoll, aber weder für den 50JW geschweige denn für die 50JBö ausreichend, schon gar nicht im Leerlauf, war folgende Konstruktion mit durchgängig 1,5 mm Al-Blech.

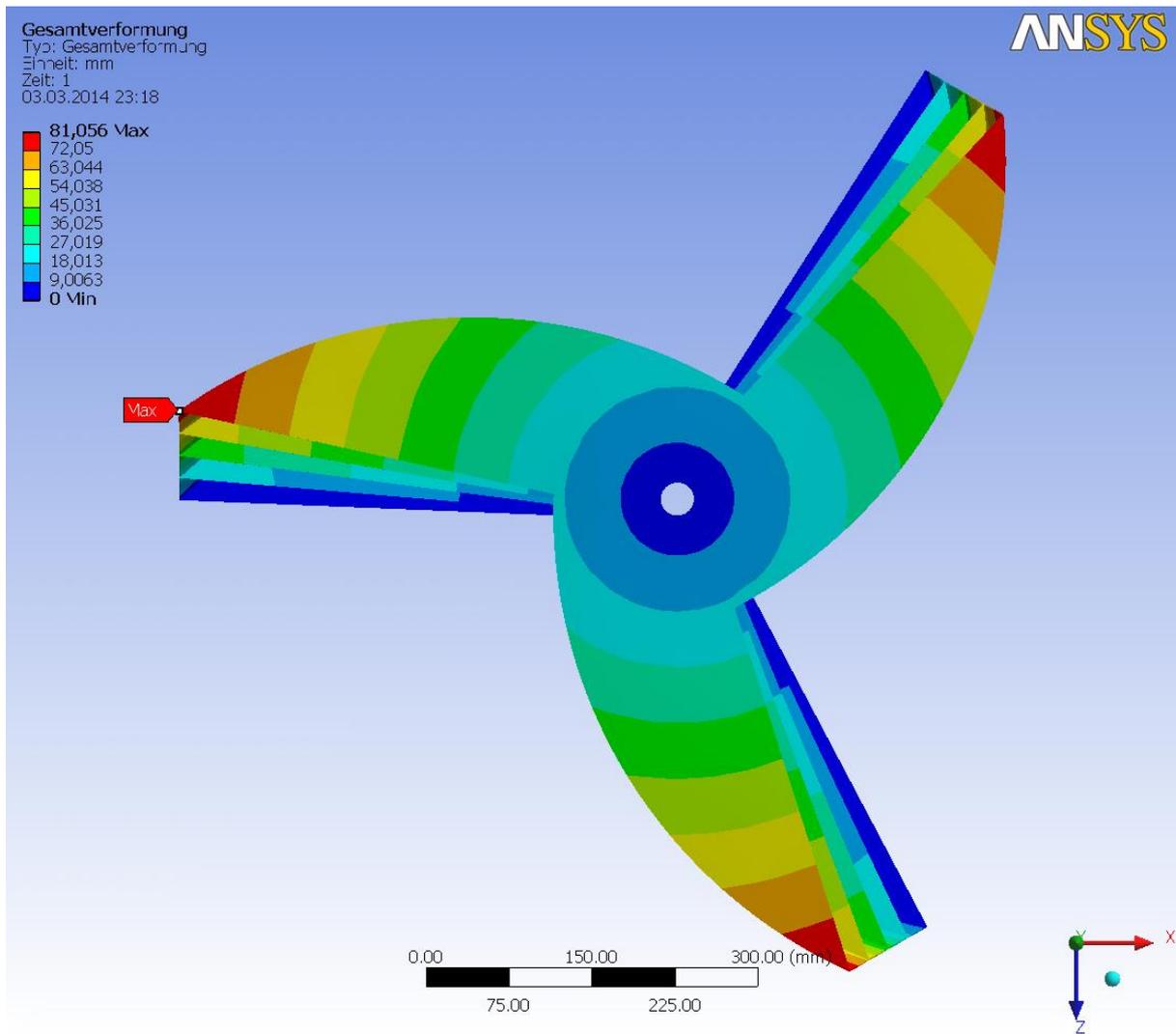
Darstellung bereits mit Randbedingungen. Oben u. unten je 1 verstärkendes Blechdreieck.



**Abbildung 9** Konstruktion und Randbedingungen 1,5mm Al-Blech  
Marke oben (ohne Farbe) „zylindrische Lagerung“, TSR 0,75



**Abbildung 10** Spannung bei Nennbedingungen 14 m/s, logarithm. Anzeige

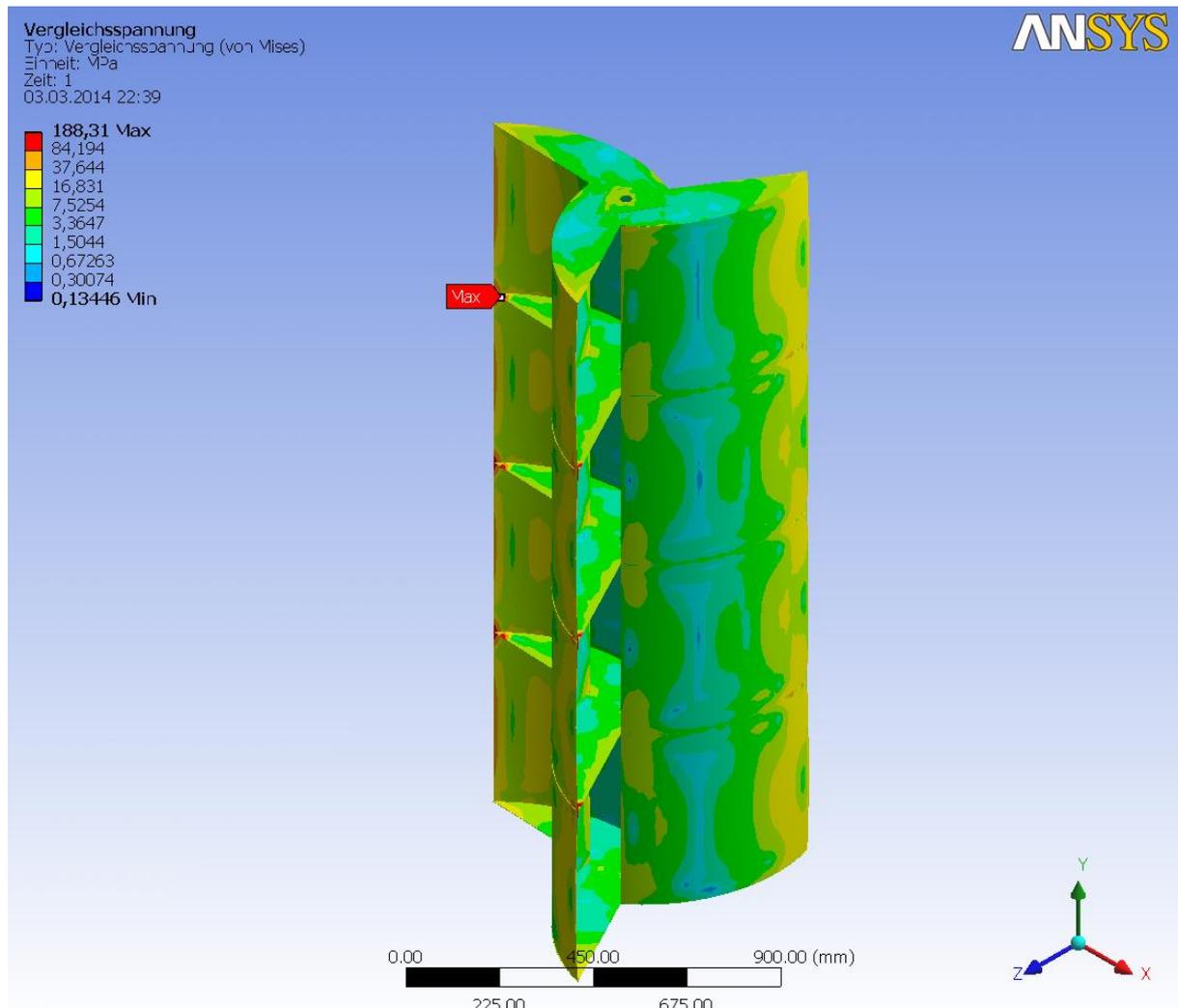


**Abbildung 11** Zugehörige Verformung im Maßstab 1:1

### Zwischenauswertung

Mit max. Spannung von ca. 83 N/mm<sup>2</sup> ergibt sich bei der Zugfestigkeit vom Material von 310 N/mm<sup>2</sup> ein Si-Faktor von 3,7. Das ist bezüglich der mind. 3-fachen Sicherheit nach EN 41400-2 ausreichend.

Die Verwindung durch das Drehmoment ist erheblich, aber nicht Sicherheits-bedenklich. Ein Mittelrohr bedeutet Abmilderung aber auch erhebliche Störung der Durchströmung, falls letztere tatsächlich wesentlich ist.



**Abbildung 12** mechan. Spannungen für 50JBö TSR 0,85; 620 u/min: Nur Fliehkräfte!

### Endauswertung

Es scheint sogar noch ein Si-Beiwert von 1,36 vorhanden zu sein gegen die Dehngrenze 255 N/mm<sup>2</sup>.

Allerdings wurden noch keine Windkräfte berücksichtigt. Außerdem liegt die Leerlauf-TSR bei ca. 1,5 und damit die zu erwartende Drehzahl wesentlich höher!

**Selbst wenn die Stabilität nach geringfügigen plastischen Verformungen zunimmt (nichtlineare Simulation), ist das Überleben einer 50-Jahres-Bö für Standorte selbst mit Jahresmittelwind von lediglich 4 m/s fraglich.**

## 2.3 C-Rotor

Allgemeine Blechstärke 1,5 mm bis auf die Vorflügel mit 1 mm

### 2.3.1 50-Jahres Wind

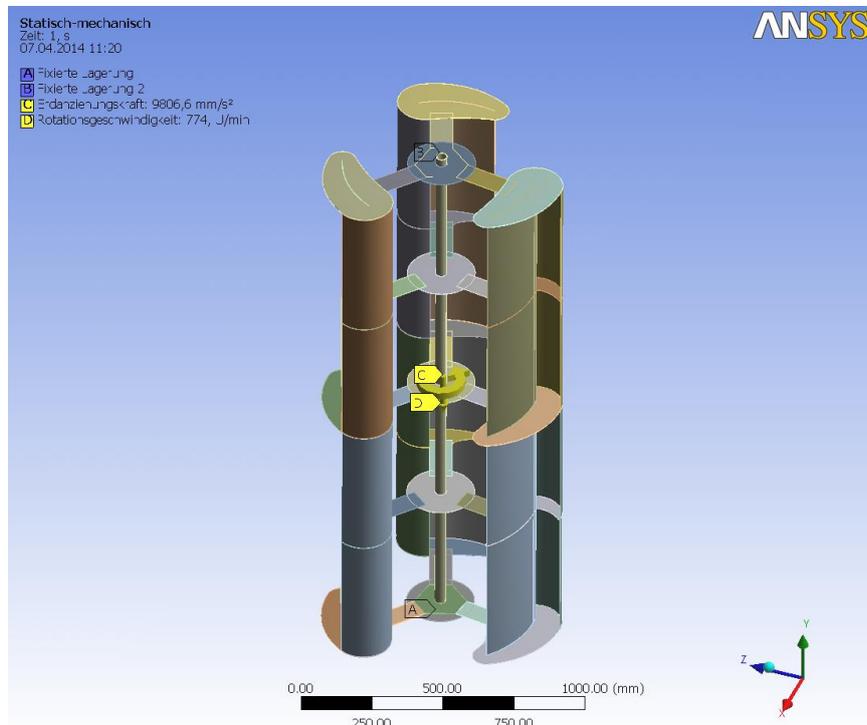


Abbildung 13 Konstruktion mit Randbedingungen, Leerlauf-TSR 1,5 (keine Luftkräfte)

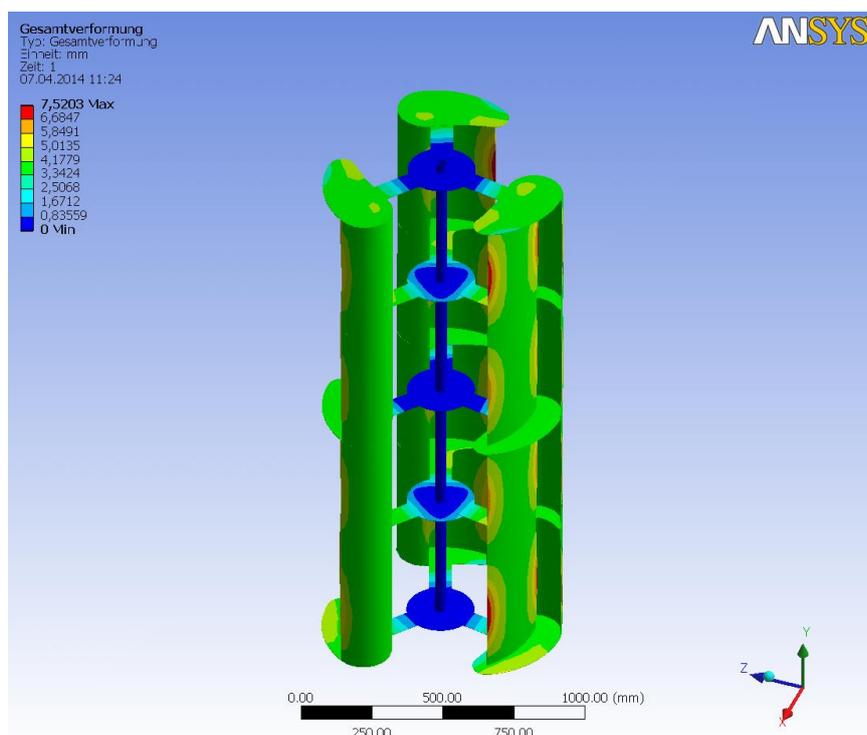


Abbildung 14 Gesamtverformung, nur durch Fliehkräfte und Gewicht

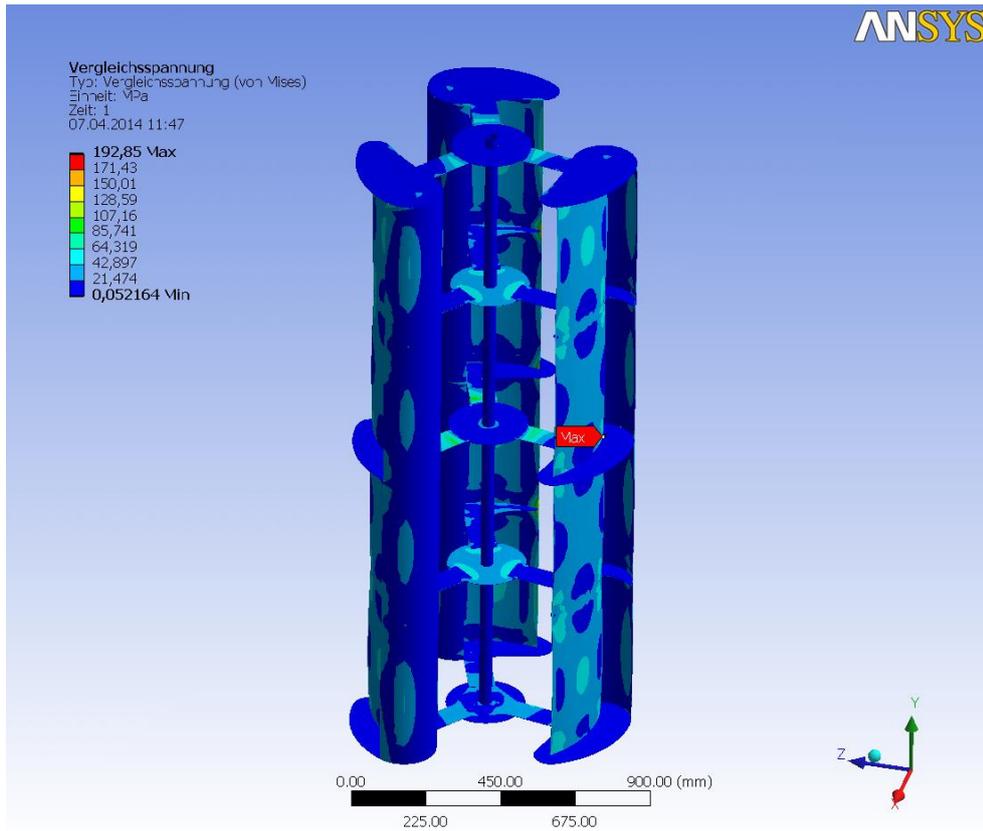


Abbildung 15 Dazu gehörige mechan. Spannungen

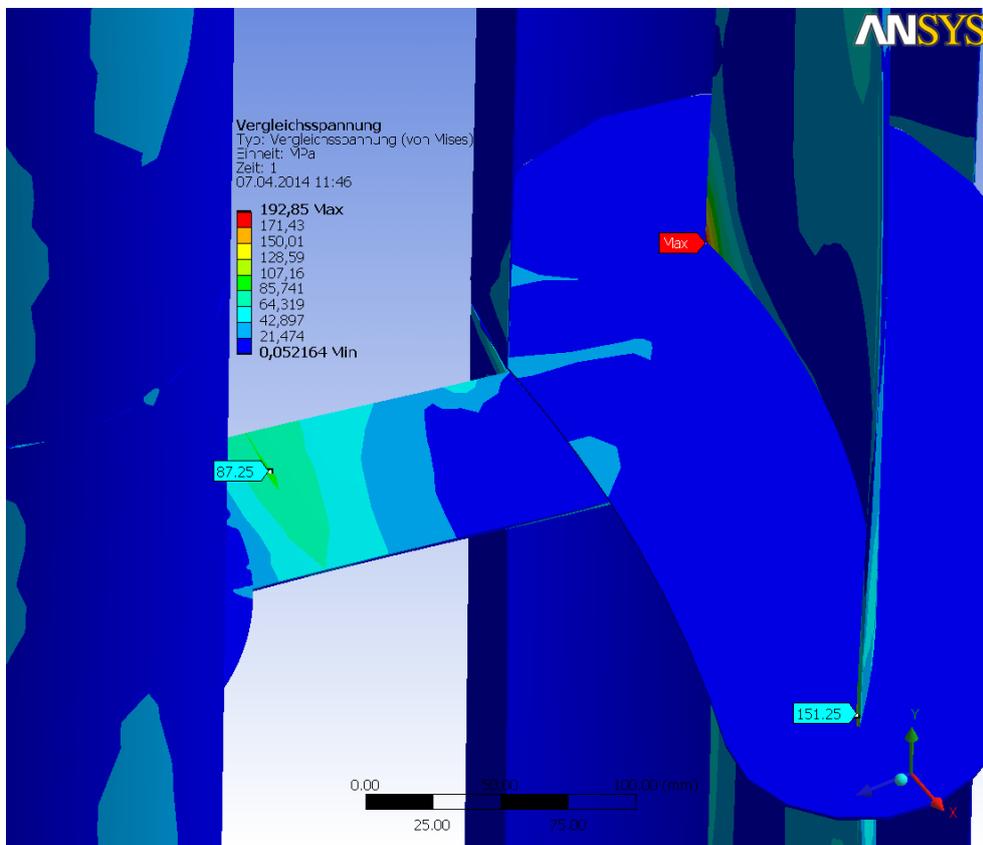


Abbildung 16 Spannungen in Vergrößerung

## Zwischen-Auswertung

Hinzu Fügen von einem Winddruck von 772 Pa ( $\text{N/m}^2$ ), mit EXCEL errechnet für  $C_w$  1 verändert die Belastung nur unwesentlich. Sie steigt von 192  $\text{N/mm}^2$  auf 195  $\text{N/mm}^2$ .

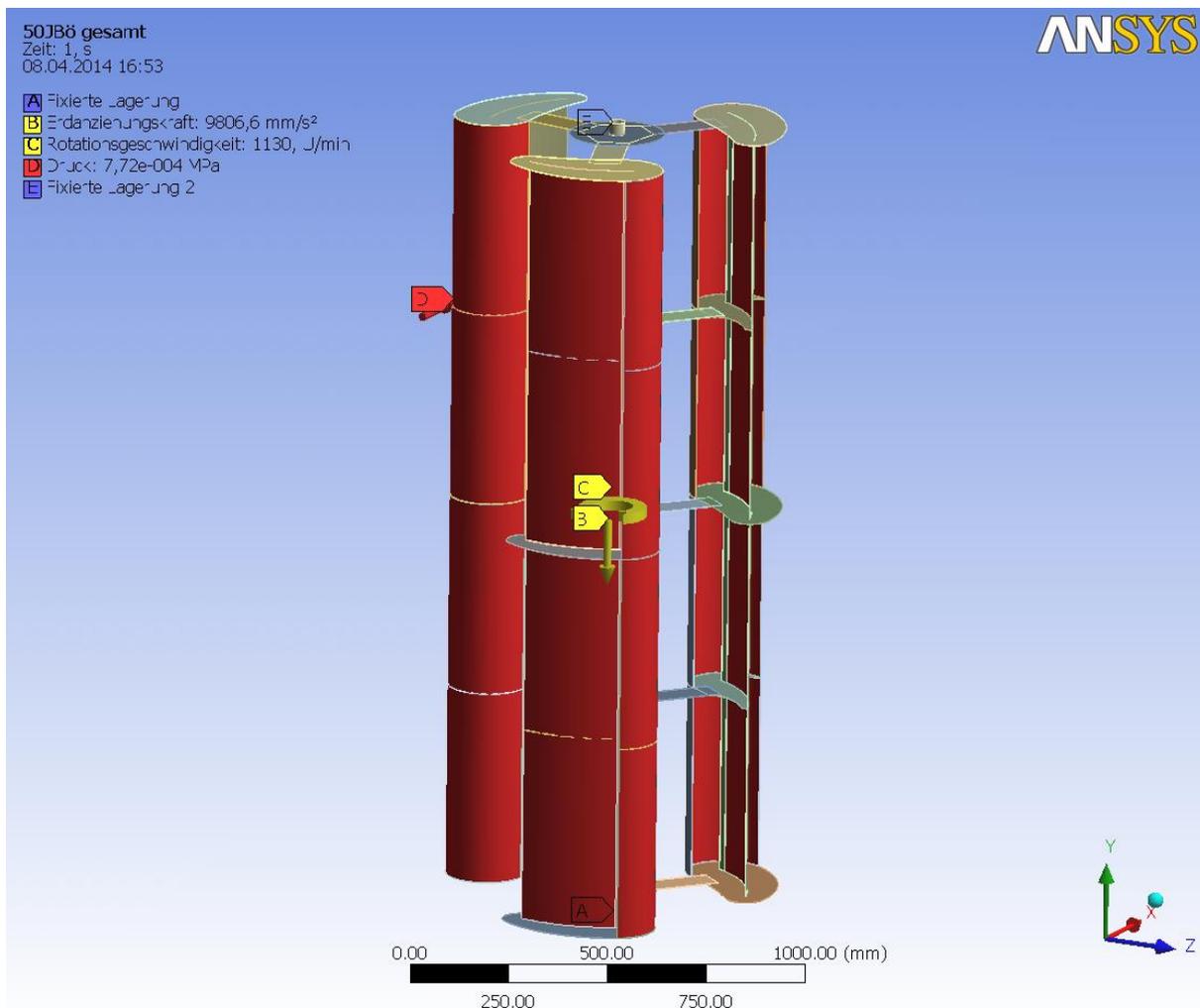
Damit gilt zumindest hier, vermutlich aber für Wid.-Läufer allgemein, dass ähnlich wie beim H-Darrieus die Fliehkräfte den Hauptteil der Belastung ausmachen. Natürlich nur, wenn die Anlage nicht festgebremst ist.

Es würde sich bezüglich Zugfestigkeit ein Si-Beiwert von 1,6 ergeben, bezüglich Dehngrenze 1,3. Das ist wesentlich weniger als die im gültigen Regelwerk geforderten 3 als Minimum. Immerhin werden die Lasten durch Schwingungen erhöht.

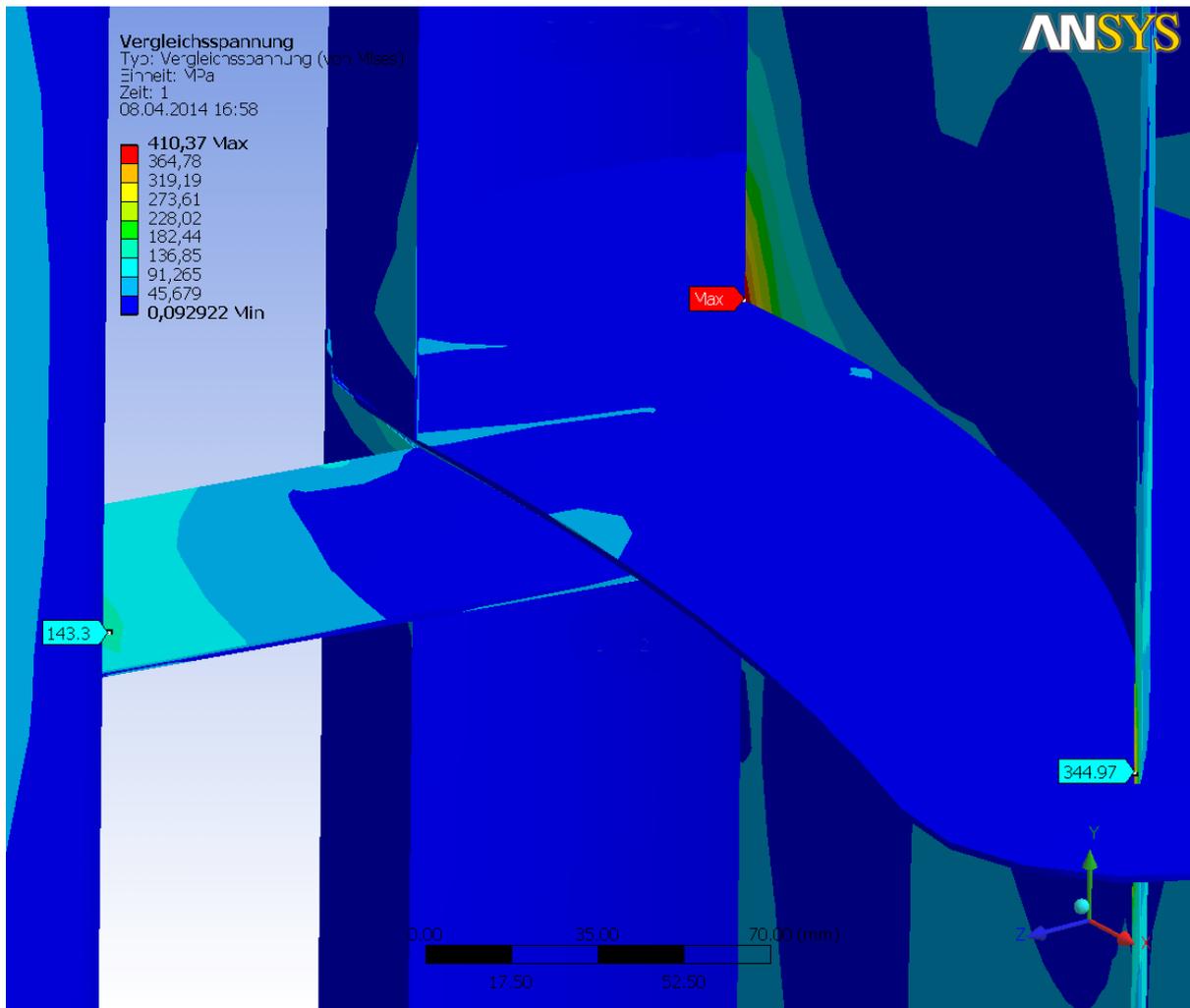
Möglich, dass durch geringfügige plastische Verformungen die Stabilität ansteigt. Auch ist die Wahrscheinlichkeit und Dauer vom 50JW begrenzt.

**Einem Regelwerk genügen die Werte aber nicht.**

### 2.3.2 50-Jahres Bö



**Abbildung 17** Randbedingungen



**Abbildung 18** Stelle und Größe der max. mechan. Spannungen

### Zwischen-Auswertung

Es wird nicht nur die Dehngrenze erheblich überschritten (Grenze der elastischen Verformung) sondern auch die Zugfestigkeit. **Von Sicherheitsfaktoren keine Spur.** Selbst wenn durch plastische Verformung ein Stabilitätsgewinn erfolgt, **muss man mit sofortigem Gewaltbruch rechnen.**

### Gesamtauswertung C-Rotor

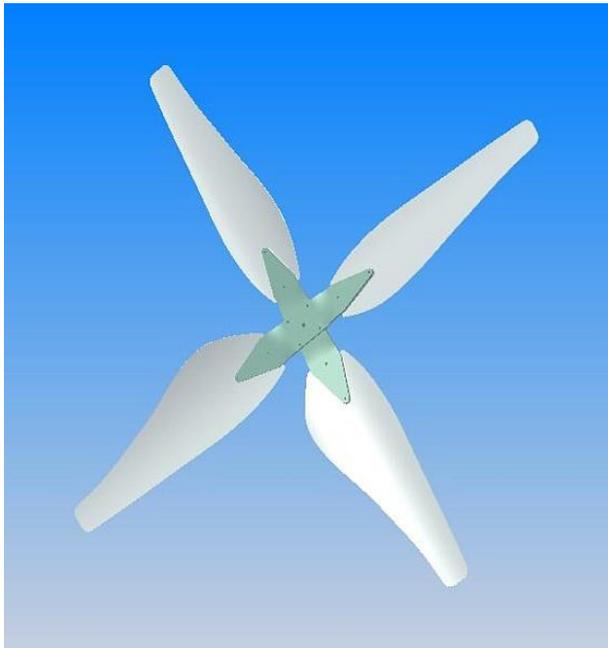
Da es die Leitflügel sind, die besonders belastet werden, ist ein Umlegen des Materials im Sinne von Falzen (Mat.-Dopplung) an Vorder- und Hinterkante zu erwägen. Allerdings ist der minimal zulässige Biegeradius zu ermitteln, da das Material lediglich 10% Bruchdehnung hat.

Das Überstehen einer 50 JBö für Windzone I ( $v_m$  4 m/s) zumindest von dieser Konstruktion erscheint illusorisch.

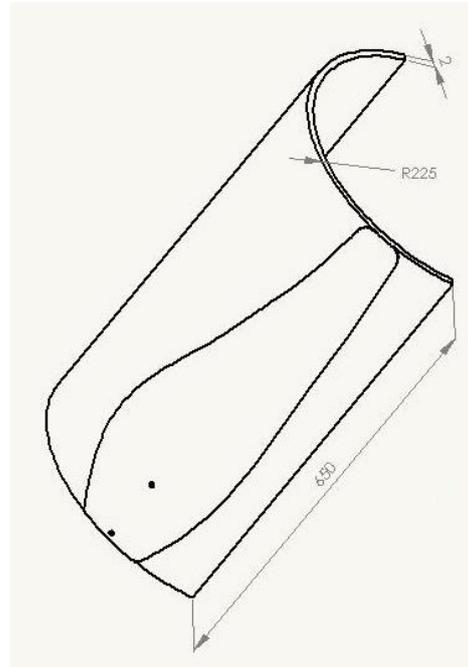
Möglicherweise wird eine Windgeschwindigkeit überstanden, welche als 50 JW dem 50JW entspricht. Letzterer müsste in Folge reduzierend angepasst werden. Als kennzeichnender Jahresmittelwind  $v_m$  ergibt sich dann vermutlich nur ca. 3,5 m/s, was für die Windkraftgewinnung völlig unwirtschaftlich ist.



Für die „hohle Gasse“ nicht geeignet aber grundsätzlich alternativ wäre z.B. dieses Normalwindrad.



**Abbildung 20** Normalwindrad  $\varnothing$  1,5 m TSR 4



**Abbildung 19** Zuschnitt

Vor Jahren selbst konstruiert, wird als Profil die kreisrund gebogene Platte verwendet, wie nebenstehende Abb. zeigt. Es lassen sich alle Zuschnitte auf der Halbschale unterbringen. Als Mat. dient Blech 2 mm aus der eingangs erwähnten relativ festen Al.-Legierung. Bezogen werden kann die z.B. von der Fa. Gemmel-Metalle. Die verschicken das auch. Da das Mat. nicht ganz billig ist - für lediglich 4 relativ kleine Flügel ist es bezahlbar. Die Nabenstreben sind aus Stahl und müssen etwas verwunden werden. Der Rotor besteht aus 2 Halbroten, welche um  $90^\circ$  gedreht angeordnet werden, ergänzt z.B. durch eine kleine zylindrische Nabe. Es ist allerdings ein Generator nötig mit nicht mehr als etwa 0,3 Nm Rastmoment für Selbstanlauf bei 3 m/s. Beim Darrieus muss man sogar einen quasi Rastmoment-freien Generator benutzen.

Dafür ist für Wid.-Läufer dringend eine Aufwärts-Übersetzung geboten, sonst muss der Generator nahezu unbezahlbar groß werden.

Die speziellen Kennlinien von Normalwindrädern und insbes. Darrieus-Läufern machen allerdings eine Anpassung der Anlagen-Kennlinie an die des Verbrauchers sinnvoll bis notwendig, letzteres insbes. für den Darrieus.

Das kann mit Netzeinspeise-Wechselrichtern recht gut gelingen, sollte aber auch bei Lademaschinen statt finden. Der Laderegler hat dann eine Pulsweiten-Modulation (PWM) und eine Speicherdrossel, idealerweise sogar MPPT. Nur so können die konzipierten  $C_p$  realistisch werden. Ohne Dem kann insbes. beim Darrieus das Verhalten des Gesamtsystems sehr unbefriedigend sein.

Die hier vorgestellten Widerstandsläufer eignen sich mit ihrer Kennlinie dagegen eher für einfache Lademaschinen, bei denen der Akku direkt auf den Gleichrichter folgt, von einem Überladungsschutz einmal abgesehen. Der ist zwingend notwendig.

Soweit zu Plus und Minus von Auftriebs- und Widerstandsläufern.