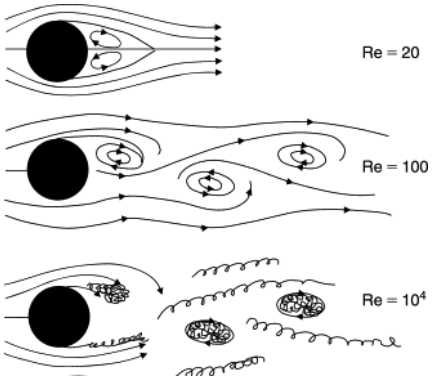
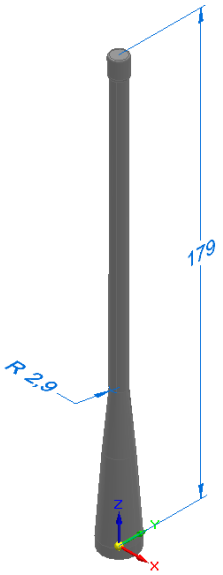
Kármánsche Wirbelablösungen mit Simcenter FLOEFD und Simcenter Femap – Leitfaden für kooperative Simulationen mit Strömung und struktureller Dynamik

In der Strömungsmechanik ist bekannt, dass an umströmten Körpern bei Reynoldszahlen im Bereich von ~100 bis ~10^4 periodische und wechselseitige Wirbelablösungen auftreten können, die sog. Wirbelstraßen im Strömungsnachlauf bilden. Dieser Effekt wurde von Kármán erstmals 1911 nachgewiesen. Die Reynoldszahl ist ein Gradmesser für den Übergang von laminaren zu turbulenten Strömungen und ergibt sich aus der Strömungsgeschwindigkeit, der charakteristischen Länge des umströmten Körpers sowie der kinematischen Viskosität des Fluids.



Quelle:
https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/karman-vortex-street

Anhand einer Fahrzeugantenne aus Aluminium und mit Simulationssoftware aus dem **Siemens Simcenter** Portfolio soll hier demonstriert werden, wie dieser Strömungseffekt erfasst und visualisiert werden kann und diese Ergebnisse Eingang in eine strukturell-dynamische Analyse finden. Dabei kommen **Simcenter FLOEFD** sowie **Simcenter Femap mit Nastran** zum Einsatz.



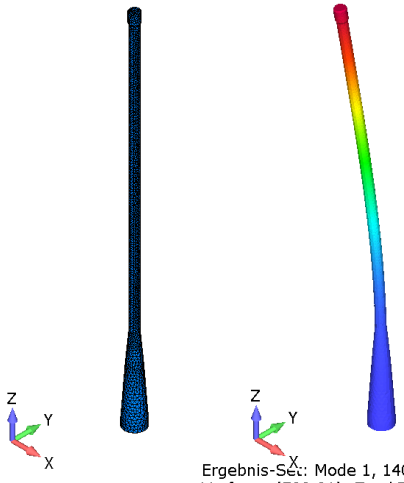
Nachfolgend werden die einzelnen Schritte dieser kooperativen Simulation erläutert:

- Ermittlung der relevanten Biege-Eigenfrequenz mit **Simcenter Femap**
- Abschätzung der Strömungsgeschwindigkeit mittels Strouhal-Zahl
- Abschätzung der Reynoldszahl
- Strömungsanalyse mit **Simcenter FLOEFD**
- Visualisierung des erwarteten Strömungseffekts und Überprüfung der Ablösefrequenz
- Übergabe der max. Relativdruck-Amplitude an **Simcenter Femap**
- Harmonische Frequenzganganalyse mit **Simcenter Femap**
- Auswertung der strukturellen Simulationsergebnisse

Ermittlung der relevanten Biege-Eigenfrequenz mit Simcenter Femap

Grundlage aller strukturell-dynamischer Untersuchungen ist die Kenntnis über die Eigenfrequenzen und -formen des Simulationsmodells. Die Ermittlung dieser Daten im Rahmen von Modalanalysen gehört zu den Basisfunktionen von **Simcenter Femap mit Nastran**. Hierfür wurde der Antennenkörper mit Tetraederelementen quadratischer Ansatzfunktion vernetzt und mit den Materialeigenschaften von Aluminium verknüpft. Aus der modalen Analyse ergibt sich eine Biegeform bei **~141 Hz**.

Hieraus folgt, dass die Struktur bei einer korrespondierenden Anregung in Resonanzschwingungen geraten würde.



Ergebnis-Set: Mode 1, 140.6907 Hz
Verformt (789,01): Total Translation
Knotenkontur: Total Translation

Abschätzung der Strömungsgeschwindigkeit mittels Strouhal-Zahl

Die Strouhal-Zahl wird als Kenngröße für periodisch auftretende Ablösungen von Strömungswirbeln verwendet. Sie berechnet sich aus der Ablösefrequenz, der charakteristischen Länge des umströmten Körpers (hier Durchmesser) und der Strömungsgeschwindigkeit:

$$S = \frac{f \cdot l}{v}$$

Aus Versuchsreihen hat sich ergeben, dass die dimensionslose Strouhal-Zahl in einem weiten Bereich von Reynoldszahlen bei ~0,2 liegt. Damit ist es nun durch Umstellung möglich, die erforderliche Strömungsgeschwindigkeit zu berechnen, die eine Ablösefrequenz im Resonanzbereich des Antennenstabs erzeugen könnte:

$$v = \frac{f \cdot l}{S} \approx \mathbf{4,1\ m/s} \approx 15\ km/h$$

Abschätzung der Reynoldszahl

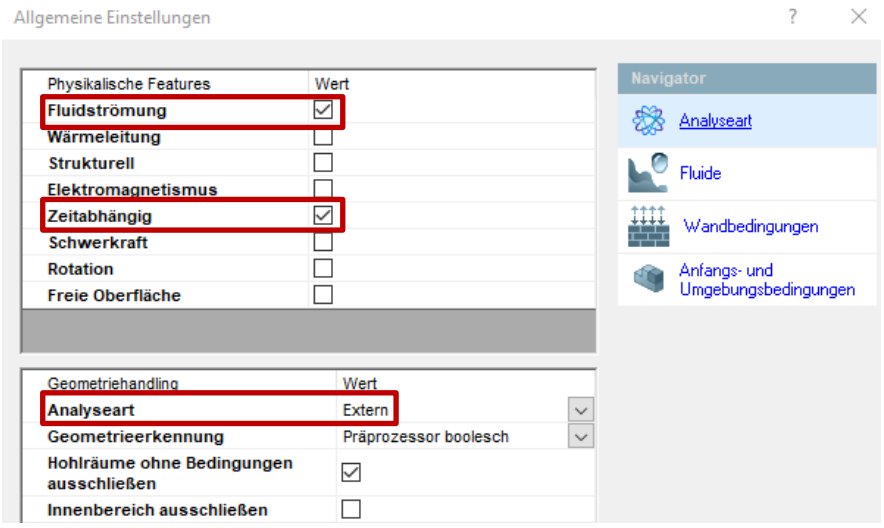
Mit der Reynoldszahl wird der Zusammenhang von Strömungsgeschwindigkeit, charakteristischer Länge des umströmten Körpers sowie kinematischer Viskosität des Fluids beschrieben. Für Luft mit einer kinematischen Viskosität von $\vartheta = 1{,}5111E-5\ m^2/s$ ergibt sich somit:

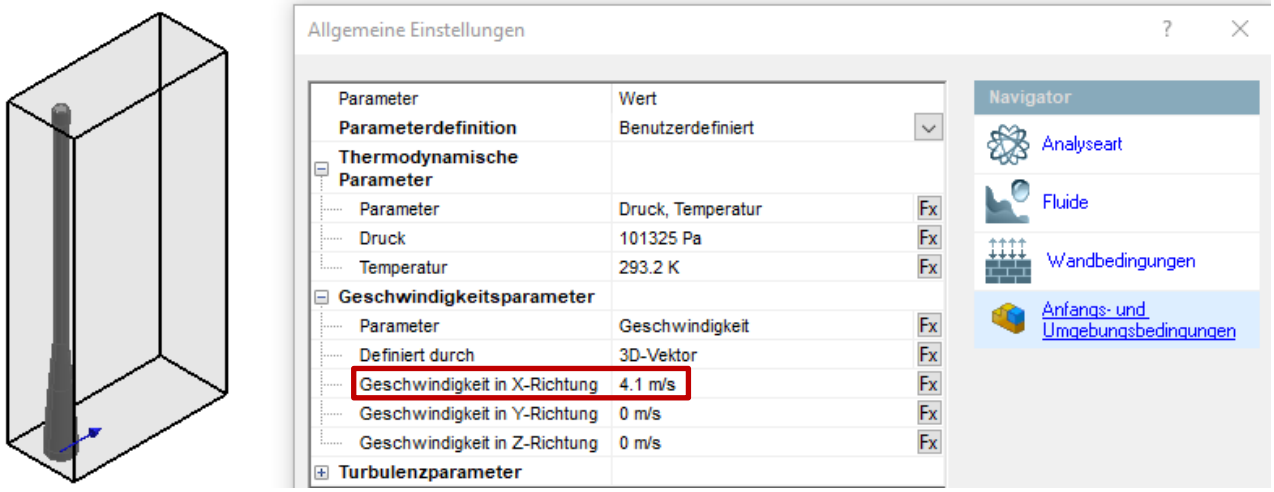
$$Re = \frac{v \cdot l}{\vartheta} \approx \mathbf{1600}$$

Damit liegt Re in einem Bereich, in dem das Auftreten des erwarteten Strömungseffekts wahrscheinlich ist.

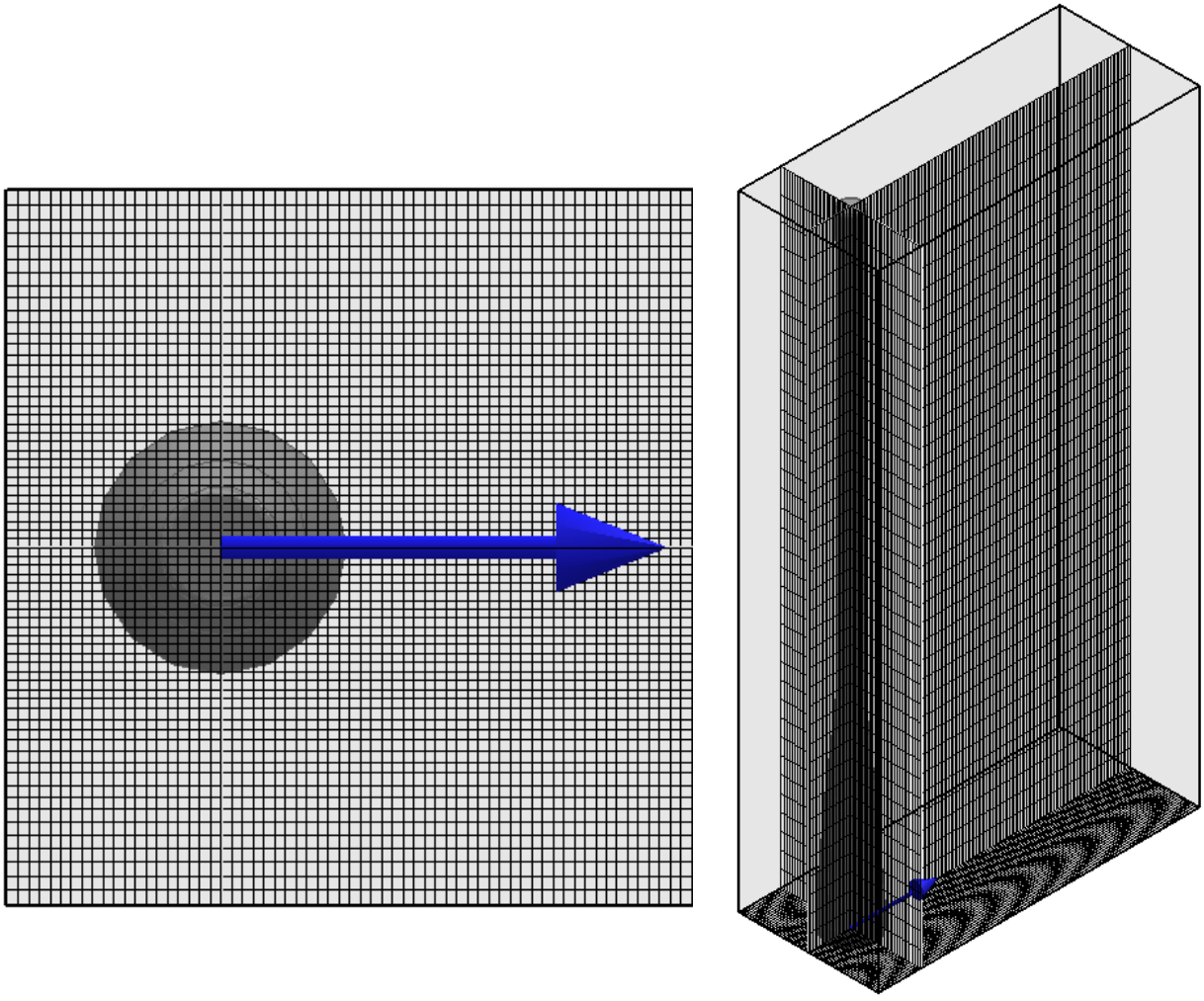
Strömungsanalyse mit Simcenter FLOEFD

Da sich eine Fahrzeugantenne nicht in einem geschlossenen Strömungsraum befindet, muss die Simulation als *Extern* angelegt werden. Darüber hinaus sind periodische Wirbelablösungen nicht durch stationäre Berechnungen erfassbar, so dass die Analyse *Zeitabhängig* durchgeführt werden muss. Beide Optionen sind Basisfunktionen in **Simcenter FLOEFD**. Die Integration der Anwendung in die CAD-Umgebung ermöglicht die Arbeit direkt auf dem 3D-Geometriemodell des Antennenstabs. Durch den kartesischen Netzansatz sind keine Körper-genauen Vernetzungen von Strömungsräumen oder Festkörpern erforderlich. Stattdessen legt sich ein Quader-förmiges Netz in einem ausreichend dimensionierten Berechnungsraum über die Struktur und die Zellen erkennen selbständig, wo sich das strömende Fluid befindet. Um Störeinflüsse auf den gewünschten Effekt zu vermeiden, bietet sich eine Begrenzung des Berechnungsraums am jeweils oberen und unteren Ende des Antennenstabs an.

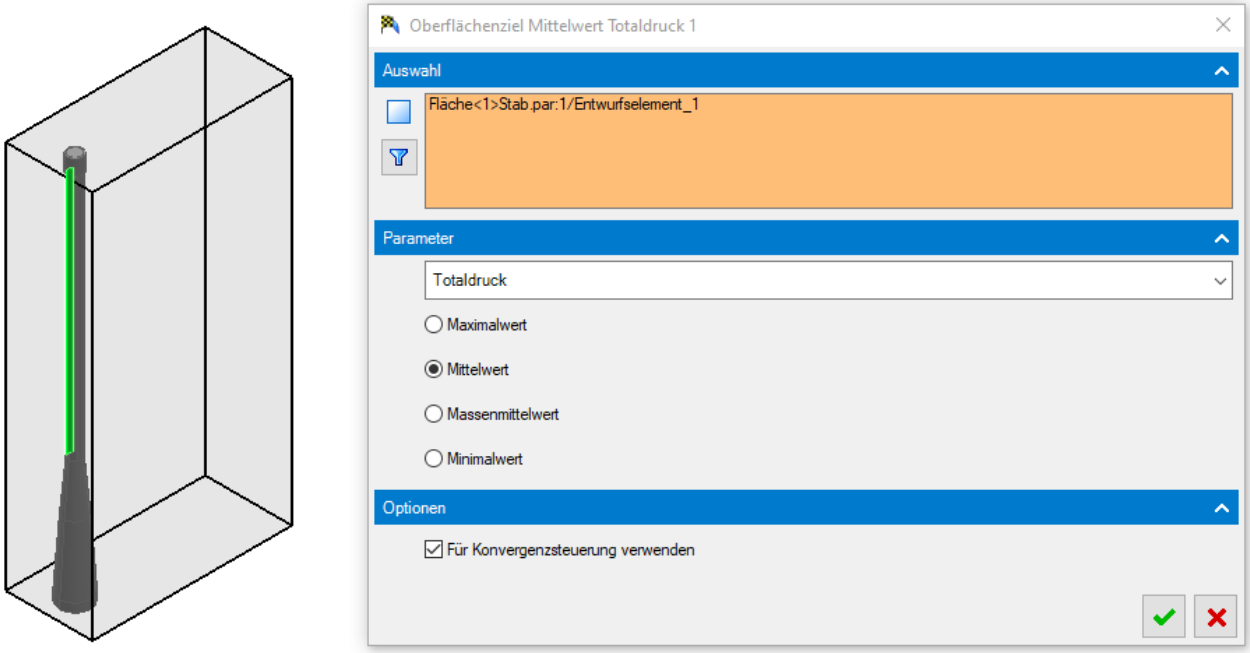


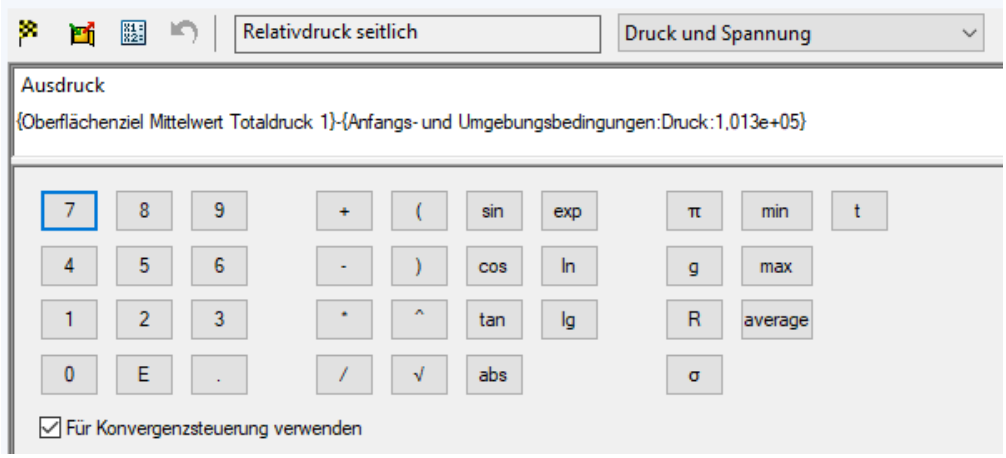


Da **Simcenter FLOEFD** insbesondere im Grenzbereich von Fluid und Festkörper numerische und analytische Ansätze kombiniert, ist eine aufwändige manuelle Auflösung der Grenzschicht meist nicht erforderlich. Gemeinhin ist eine höhere Zellendichte in Bereichen von engen Kanälen oder hochgradigen Strömungsänderungen zu empfehlen, jedoch lässt sich der Effekt der Kármánschen Wirbelstraße hier am besten mit einem feinen, aber uniformen Netz erfassen. Dabei ist die Auflösung in Strömungsrichtung von Interesse, während die Zellenzahl über die Stabhöhe erheblich reduziert werden kann. Dies kommt der Rechenzeit zugute.



Das Auftreten des erwarteten Strömungseffekts kann leicht durch Visualisierung überprüft werden. Zusätzlich sollen aber auch die periodische Ablösefrequenz sichtbar gemacht und die auf den Stab wirkenden Druckschwankungen quantitativ erfasst werden. Hierfür ist es sinnvoll, den relativen Druck auf einer Zylinderseite senkrecht zur Strömungsrichtung als *Ziel* der Berechnung festzulegen. Damit kann die Druckschwankung bereits während der zeitabhängigen Simulation auf Plausibilität überprüft werden. Da Druckkennwerte in **Simcenter FLOEFD** immer absolut zu verstehen sind, wird die Druckschwankung zunächst als Oberflächenziel absolut erfasst und mittels eines Gleichungsziels um den Betrag des Umgebungsdrucks auf die relative Größe reduziert.

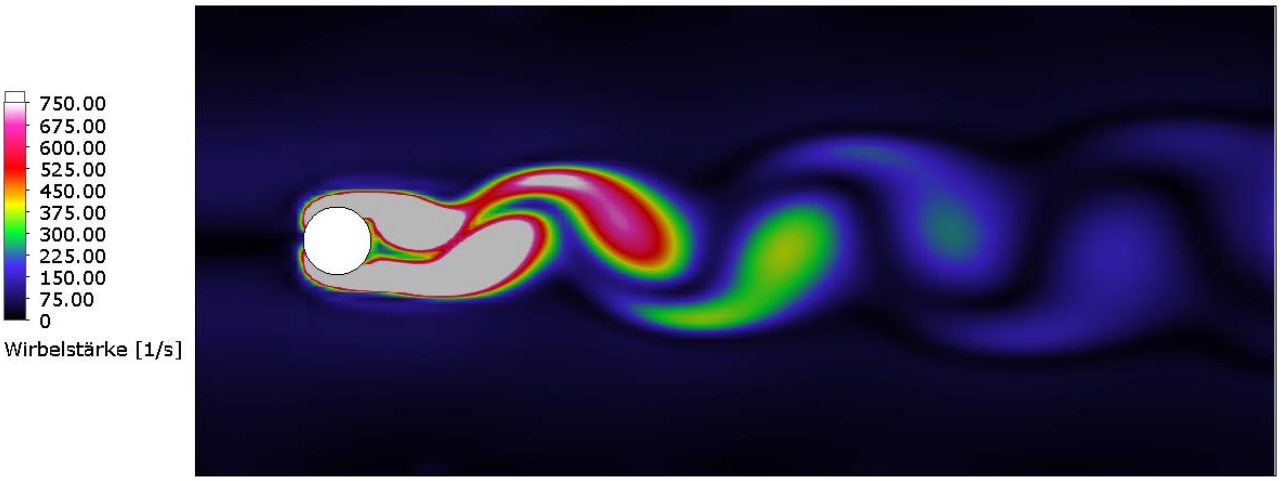


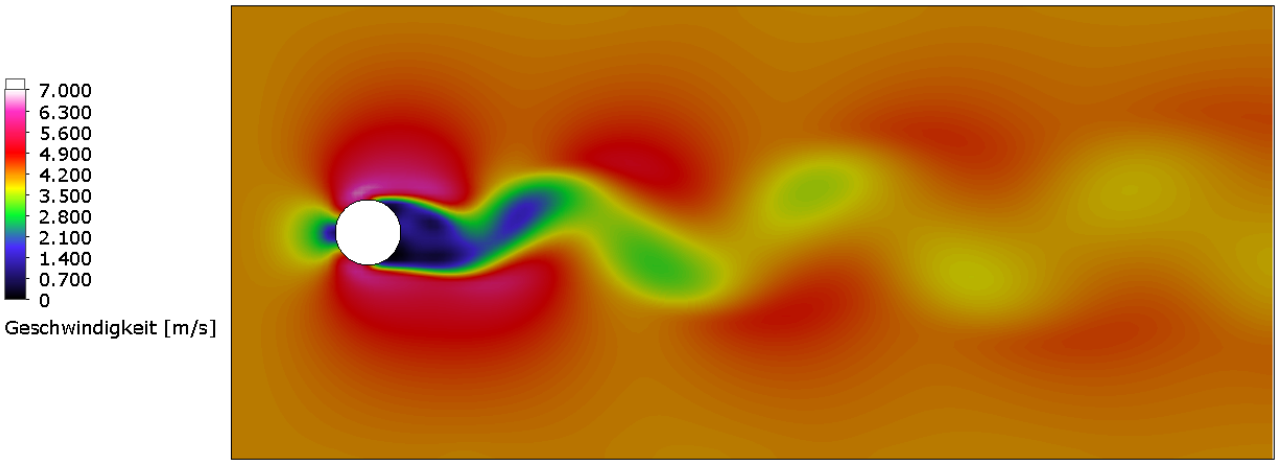


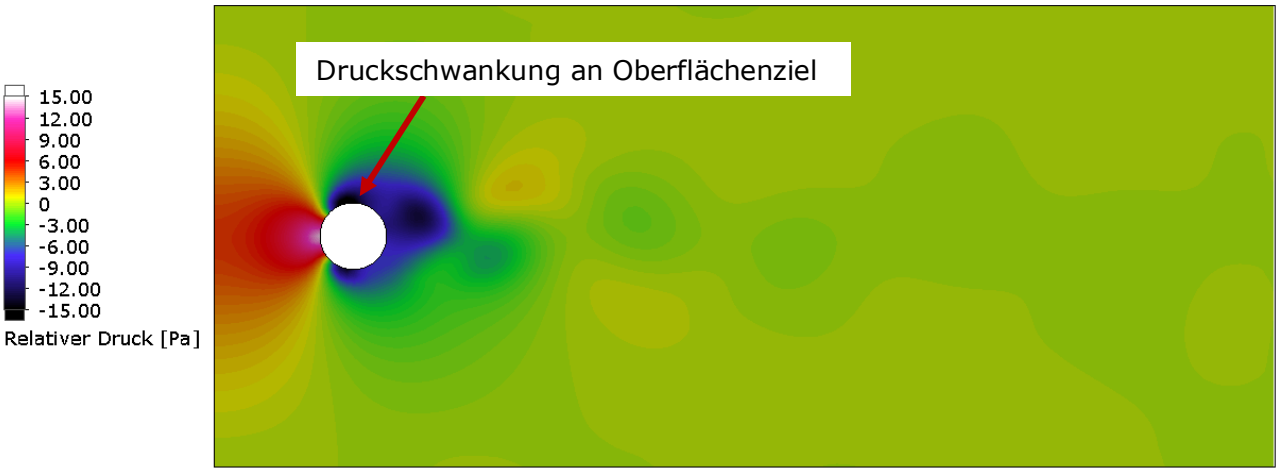
Vor dem Start der zeitabhängigen Analyse sind noch einige *Berechnungsoptionen* festzulegen. Dazu zählen die Dauer und die Zeitschrittgröße sowie Art und Umfang der Ergebnisse, die periodisch erzeugt werden sollen. Mit einer physikalischen Zeit von 1 s können die Ablösefrequenz gut erfasst und etwaige nachfolgende Effekte gut ausgeschlossen werden. Dazu ermöglicht eine automatische Zeitschrittgröße einen guten Kompromiss aus Effizienz und stabiler numerischer Berechnung. Als periodische Ergebnisse im *Transient Explorer* sind Druck, Relativer Druck, Geschwindigkeit und Wirbelstärke sinnvoll.

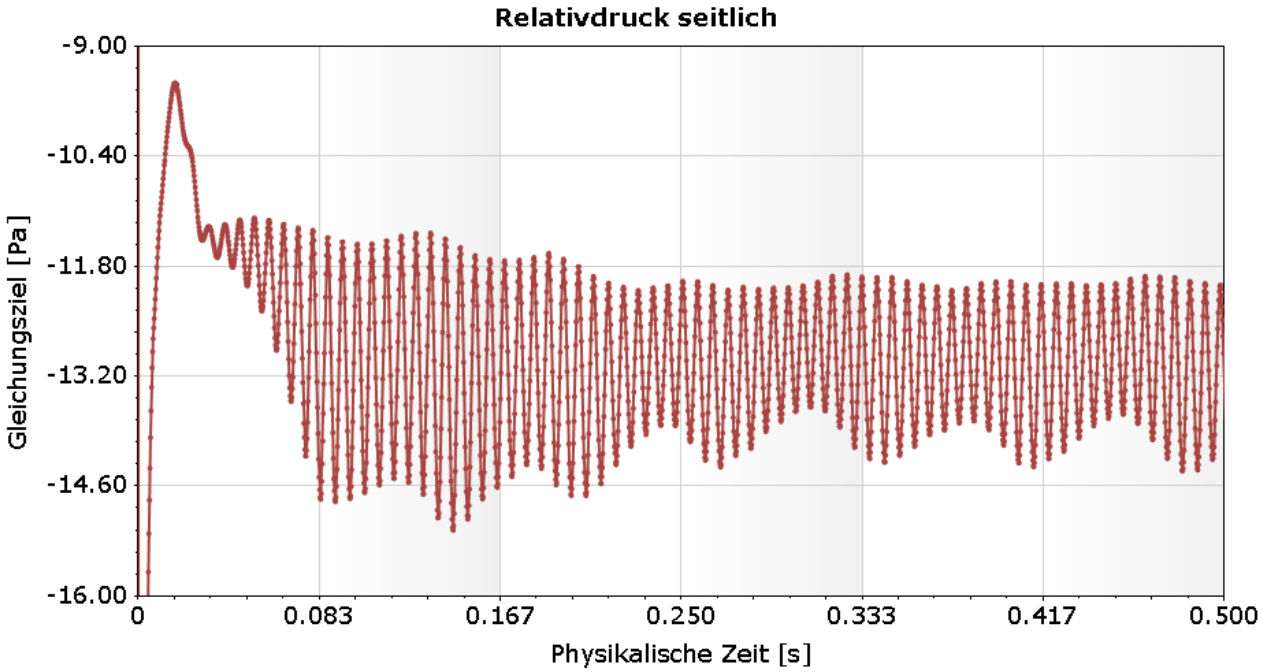
Visualisierung des erwarteten Strömungseffekts und Überprüfung der Ablösefrequenz

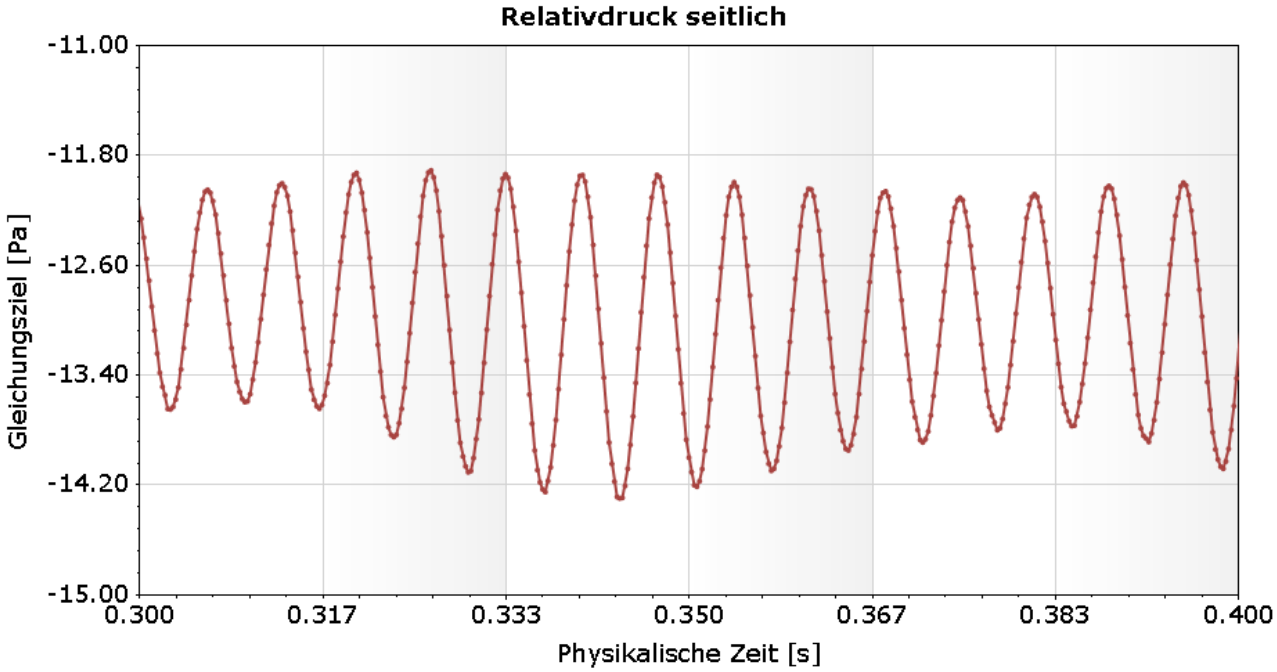
Mit Hilfe von Schnittansichten des Strömungsraums auf mittlerer Höhe des Antennenstabs lässt sich das Strömungsverhalten gut visualisieren. Nach einigen Zeitschritten bildet sich dabei ein wiederkehrendes Strömungsbild aus, welches über die Parameter *Wirbelstärke, Geschwindigkeit* und *Relativer Druck* beschrieben werden kann (Beispiel Zeitschritt 0,571 s):











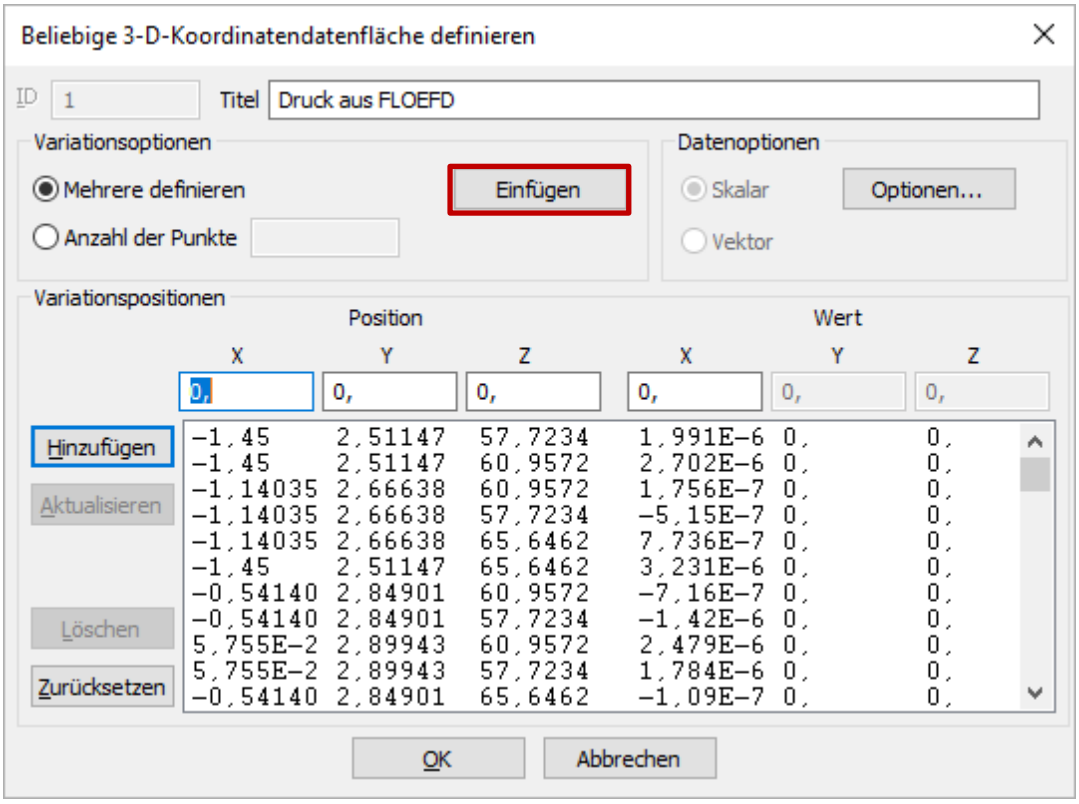
Im Zeitfenster von 0,1 s lassen sich etwas mehr als 14 volle Schwingungsbögen ermitteln, so dass von einer Ablösefrequenz von gut **140 Hz** ausgegangen werden kann. Dies korrespondiert sehr gut mit der zuvor berechneten strukturellen Eigenfrequenz des Antennenstabs bei ~141 Hz.

Übergabe der max. Relativdruck-Amplitude an Simcenter Femap

Harmonische Frequenzganganalysen mit **Simcenter Femap mit Nastran** applizieren die Belastung automatisch als Sinuswelle um den Nullpunkt. Demnach ist es ausreichend, lediglich diejenige Druckverteilung am zuvor definierten Oberflächenziel aus **Simcenter FLOEFD** zu exportieren, bei der die Schwingungsamplitude maximal wird. Ein geeigneter Zeitpunkt hierfür kann über den *Transient Explorer* gefunden werden. Der Export liefert dann eine Textdatei mit den Koordinaten und den relativen Druckwerten in SI-Einheiten [m] und [Pa]. Für die strukturelle Betrachtung in [mm] und [MPa] ist hier also eine Umrechnung erforderlich. Zudem müssen die Druckwerte um den statischen Druckanteil bereinigt werden, um in der harmonischen Analyse ausschließlich die dynamische Anregung zu berücksichtigen:

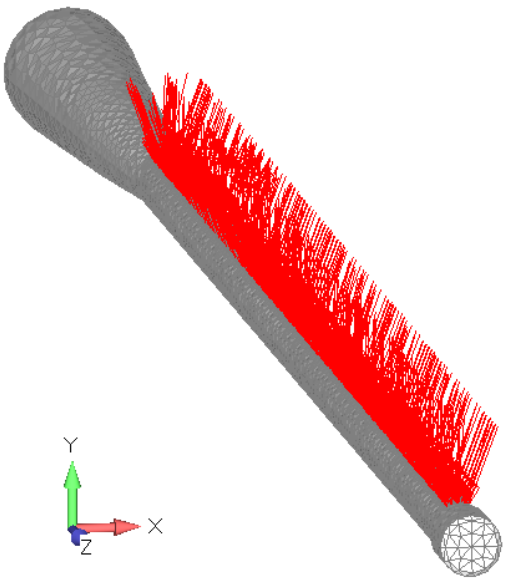
Originaldaten aus FLOEFD				Daten bereinigt (Einheiten und statischer Anteil)				
x	y	z	Relative Pressure	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa] bereinigt	[Mpa]
-0,00145	0,00251147	0,0577234	-11,0094	-1,45	2,51147	57,7234	1,9906E-06	-1,10094E-05
-0,00145	0,00251147	0,0609572	-10,2984	-1,45	2,51147	60,9572	2,7016E-06	-1,02984E-05
-0,00114035	0,00266638	0,0609572	-12,8244	-1,14035	2,66638	60,9572	1,756E-07	-1,28244E-05
-0,00114035	0,00266638	0,0577234	-13,515	-1,14035	2,66638	57,7234	-5,15E-07	-0,000013515
-0,00114035	0,00266638	0,0656462	-12,2264	-1,14035	2,66638	65,6462	7,736E-07	-1,22264E-05
-0,00145	0,00251147	0,0656462	-9,7692	-1,45	2,51147	65,6462	3,2308E-06	-9,7692E-06
-0,0005414	0,00284901	0,0609572	-13,7164	-0,541401	2,84901	60,9572	-7,164E-07	-1,37164E-05
-0,0005414	0,00284901	0,0577234	-14,418	-0,541401	2,84901	57,7234	-0,000001418	-0,000014418
5,75E-05	0,00289943	0,0609572	-10,5206	0,0575482	2,89943	60,9572	2,4794E-06	-1,05206E-05
5,75E-05	0,00289943	0,0577234	-11,2162	0,0575482	2,89943	57,7234	1,7838E-06	-1,12162E-05
-0,0005414	0,00284901	0,0656462	-13,109	-0,541401	2,84901	65,6462	-0,000000109	-0,000013109
5,75E-05	0,00289943	0,0656462	-10,0406	0,0575482	2,89943	65,6462	2,9594E-06	-1,00406E-05
-0,00145	0,00251147	0,0703351	-9,75137	-1,45	2,51147	70,3351	3,24863E-06	-9,75137E-06

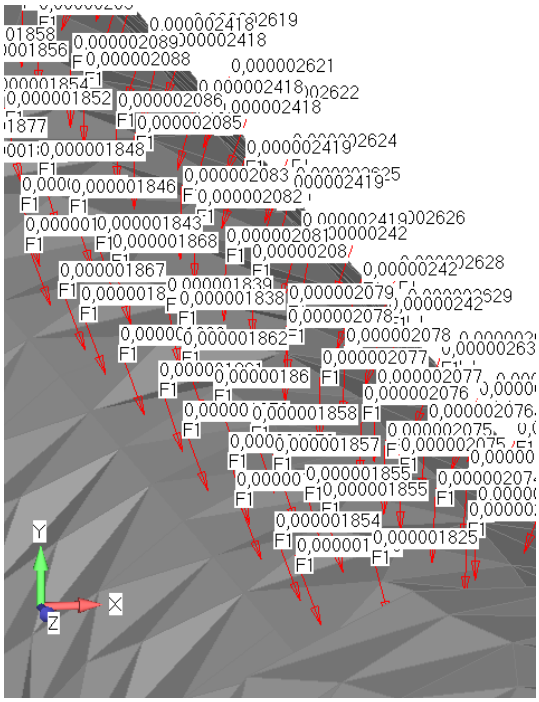
Die bereinigten Daten lassen sich dann einfach in das bereits für die Modalanalyse verwendete Modell in **Simcenter Femap** übertragen, indem die Werte per Copy/Paste in eine 3D-Datenfläche einkopiert werden:



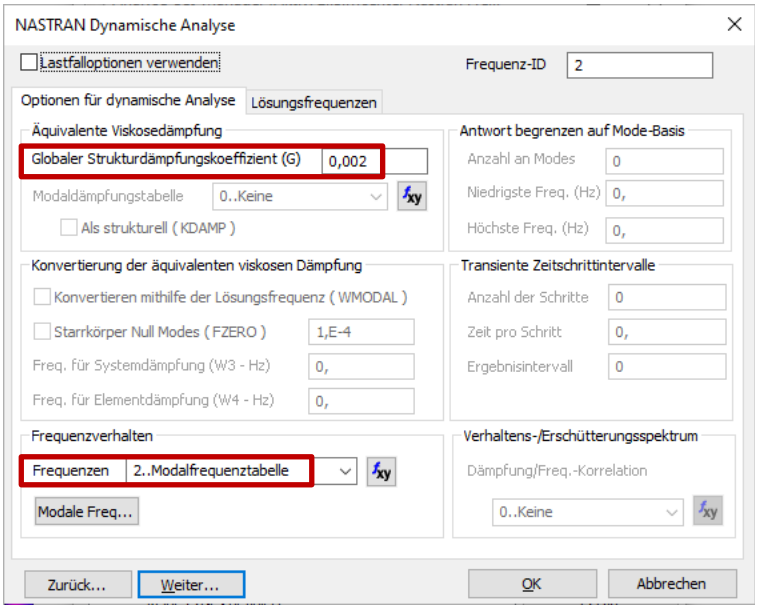
Harmonische Frequenzganganalyse mit Simcenter Femap

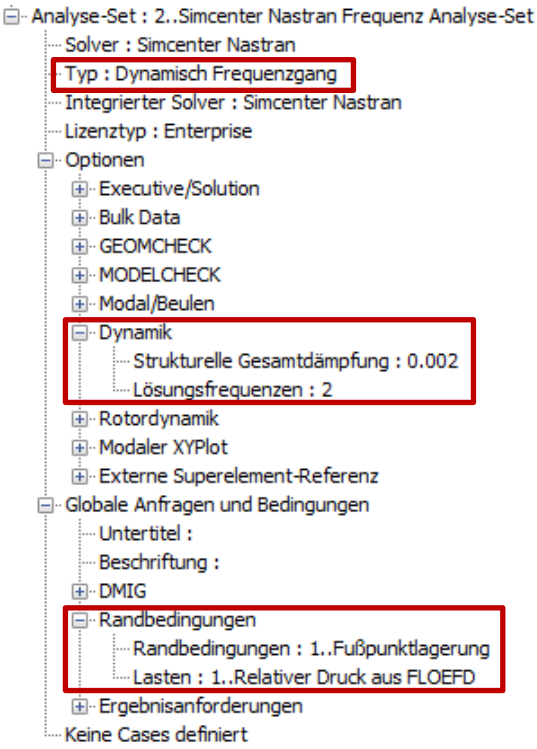
Ziel der harmonischen Analyse ist die Ermittlung von Verschiebungen und Spannungen am Antennenstab, die aus der periodischen Druckschwankung mit annähernd derselben Frequenz erfolgt wie die Resonanzfrequenz der Struktur – quasi eine Worst-Case-Betrachtung. Hierfür muss die aus **Simcenter FLOEFD** übernommene Druckverteilung als Druckbelastung auf den passenden Geometriebereich am Strukturmodell aufgebracht werden. Da dieses Modell eine andere Vernetzung als in der Strömungsanalyse aufweist, werden die Werte bei Erzeugung des Lastfalls auf das bestehende Netz „gemappt", d.h. entsprechend den Koordinatenvorgaben interpoliert:





Die dynamische Untersuchung erfordert einen Analyse-Set vom Typ *Dynamisch Frequenzgang*. Hier werden der Lastfall, die Lagerbedingung, das relevante Frequenzband (hier: Resonanzfrequenz 141 Hz) sowie eine strukturelle Gesamtdämpfung referenziert. Diese ist mit 0,1 % für den Aluminiumwerkstoff konservativ angenommen.

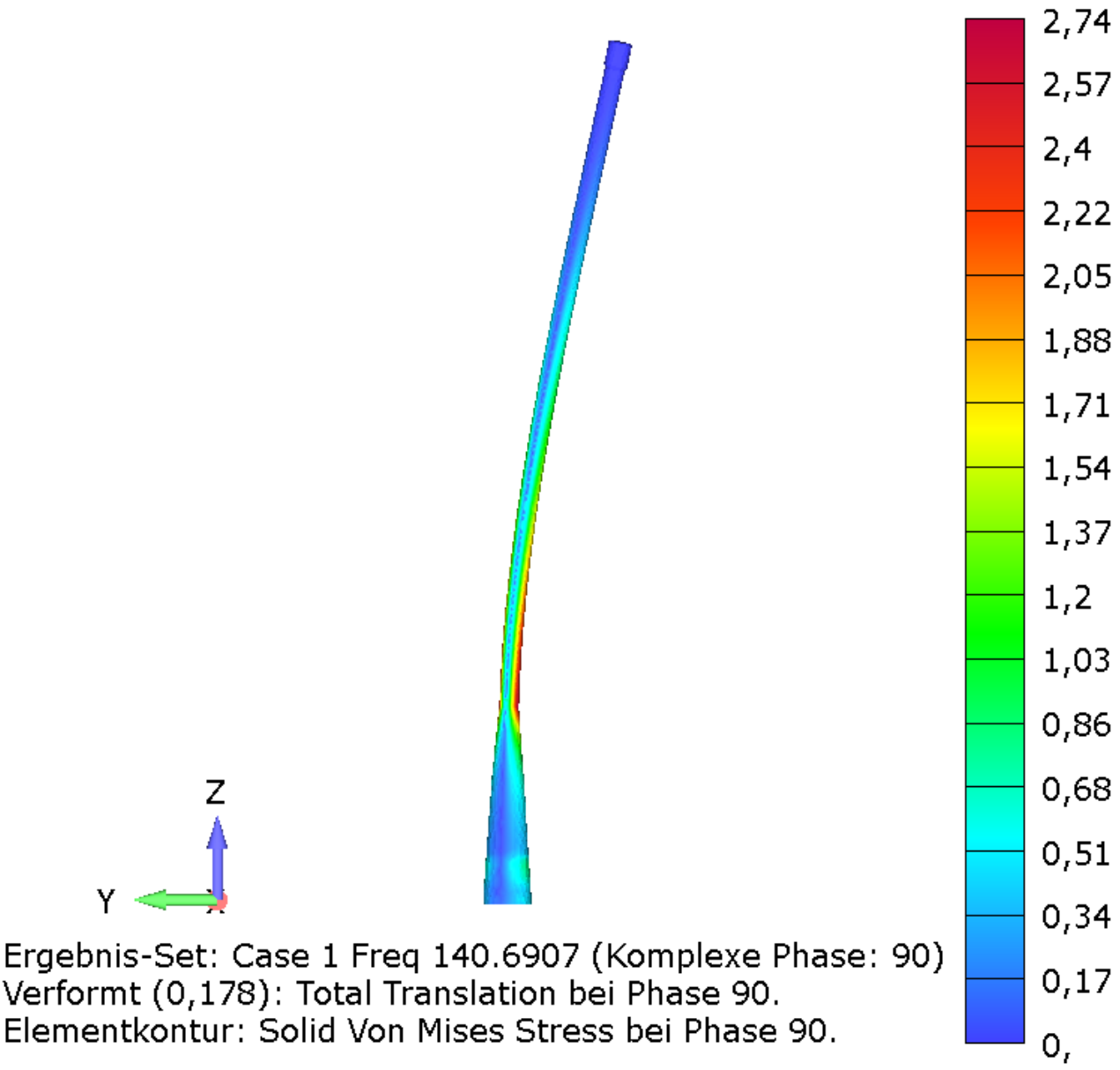




$$G = 2\frac{b}{b_{cr}}$$

Auswertung der strukturellen Simulationsergebnisse

Die Anregung des Antennenstabs mit dem rein dynamischen Anteil des Relativdrucks aus der Strömungsanalyse bei Resonanzfrequenz (= Ablösefrequenz der Wirbel) führt zu strukturellen Schwingungen. Die größten Verschiebungen und Spannungen bezogen auf einen Phasenumlauf sind bei 90° und 270° zu beobachten, hier mit Blick in Fahrtrichtung und deutlich überhöhter Darstellung der Verformung:



Daraus geht hervor, dass der Antennenstab bei konstanter Fahrt mit 15 km/h durch das Phänomen der Kármánschen Wirbelablösung in Resonanzschwingungen mit ~141 Hz versetzt werden und bei Annahme einer geringen Dämpfung eine seitliche Vibration mit maximalen Auslenkungen bis zu ~0,18 mm entwickeln kann. In diesem Frequenzbereich kann die Schwingung unter Umständen auch hörbar sein. Die dabei wirkende maximale Spannung von ~ 3 N/mm² ist vernachlässigbar.