

## **13. Workshop Kolbenverdichter**

**28. / 29. Oktober 2009**

**Vortrag 18**

**Anlagenschwingungen gezielt reduzieren  
- Beispiele mittels FE-Berechnungsmethoden -**

**Dipl.-Ing. Carsten Kleefaß**

**KÖTTER Consulting Engineers KG**

## **Inhalt**

- 1. Einleitung**
- 2. Einsatz bei der Anlagenplanung**
- 3. Einsatz bei Schwingungsproblemen an bestehenden Anlagen**
- 4. Berechnung von Fundamentalschwingungen**
- 5. Thermische Spannungsberechnung**

## 1. Einleitung

Der Grundgedanke der Finite-Elemente-Methode (kurz: FEM) ist die Überführung eines zu berechnenden Bauteils (Kontinuum) in ein Modell, das aus einer Vielzahl von Elementen einfacher Geometrie besteht (Diskretisierung). Das physikalische Verhalten muss dabei nicht mehr für das gesamte Bauteil sondern nur für die einzelnen Elemente formuliert und berechnet werden.

Die Idee hatte schon Archimedes (287 – 212 v. Chr.), der das Verhältnis von Kreisumfang zu seinem Durchmesser (Zahl Pi) durch die Näherung des Kreises mit geraden Linien bestimmte. Der erste technische Einsatz der „modernen“ FEM begann in den 1950er und 1960er Jahren in der Luft- und Raumfahrtindustrie. Bereits in den 1970er Jahren waren dann kommerzielle FEM-Programme für die Berechnungen (ANSYS, NASTRAN, ABAQUS etc.) verfügbar. Doch erst die rasante Entwicklung von Workstations und leistungsfähigen Personalcomputern in den 1980er Jahren ermöglichte Berechnungen direkt am Arbeitsplatz. Heute sind FE-Anwendungen auch in vielen CAD-Systemen integriert (CATIA, Pro/ENGINEER) und stehen so einem immer größer werdenden Anwenderkreis zur Verfügung. Diese große Verfügbarkeit darf jedoch nicht über das nötige Hintergrundwissen und die Erfahrungen der Personen die es benutzen hinwegtäuschen. Zusammen mit der Komplexität von FE-Programmen und die Erfordernisse der ständigen Interpretation und Validierung von Berechnungsergebnissen ist umfangreiches Fachwissen Voraussetzung.

Auch bei der Untersuchung von Schwingungen an Kolbenverdichteranlagen bietet sich ein großes Spektrum an Einsatzmöglichkeiten für FE-Berechnungen. Dazu gehören z. B. Pulsationsstudien nach dem API Standard 618 im Rahmen der Anlagenplanung und die Auslegung von schwingungsmindernden Maßnahmen beim Trouble-Shooting an bestehenden Verdichtern. Darüber hinaus werden thermische Berechnungen sowie Berechnungen im Bereich der Boden-Bauwerk-Interaktion an Verdichterfundamenten durchgeführt. Ziel ist es in allen Fällen, schon vor der ersten Inbetriebnahme das strukturmechanische Verhalten einer Anlage beurteilen zu können. So lassen sich frühzeitig Planungs- bzw. Auslegungsfehler erkennen. Die FEM leistet damit einen wichtigen Beitrag bei der Vermeidung von kostenintensiven Maschinen- und Produktionsausfällen.

## 2. Einsatz bei der Anlagenplanung

Pulsationsstudien ermöglichen es, bereits in der Planungsphase durch theoretische Betrachtungen die zu erwartenden Gaspulsationen und mechanischen Rohrleitungsschwingungen an Kolbenverdichteranlagen aufzuzeigen. Typische Anwendungsbeispiele sind z. B. Prozessgasverdichter in der chemischen und petrochemischen Industrie sowie Erdgasverdichter für Untergrundspeicher.

Bei der schwingungstechnischen Absicherung bzw. Untersuchung von Rohrleitungen stellt die Finite-Elemente-Methode ein wirkungsvolles und vielseitig einsetzbares Werkzeug dar. So werden an einer neu geplanten Verdichteranlage in einem ersten Schritt die Eigenfrequenzen und -formen der Rohrleitungsführung ermittelt. Anschließend wird geprüft, ob die berechneten Eigenfrequenzen mit den dominierenden Anregungsfrequenzen der Gaskräfte, die sich aus dem Verdichterbetrieb ergeben, übereinstimmen. Hierdurch kann es zu überhöhten strukturmechanischen Schwingungen des Rohrleitungssystems kommen (Resonanzfall). Das Schwingungsniveau der relevanten strukturmechanischen Eigenformen, die entscheidend durch die berechneten Gaskräfte angeregt werden können, wird mittels einer Betriebsschwingungsanalyse (Mechanical Response Analysis) im Zeitbereich ermittelt.

Für die strukturmechanischen Berechnungen wird das betrachtete Rohrleitungssystem in einem FE-Modell abgebildet. Dieses beinhaltet auch die detaillierte Modellierung der einzelnen Rohrleitungsstützen (Abbildung 1). Für die Modellierung der Rohrleitungsführung werden spezielle Balken-Elemente genutzt, die auch eine Darstellung und Beurteilung der Spannungsverteilung über den Element- bzw. Rohrumfang ermöglichen.

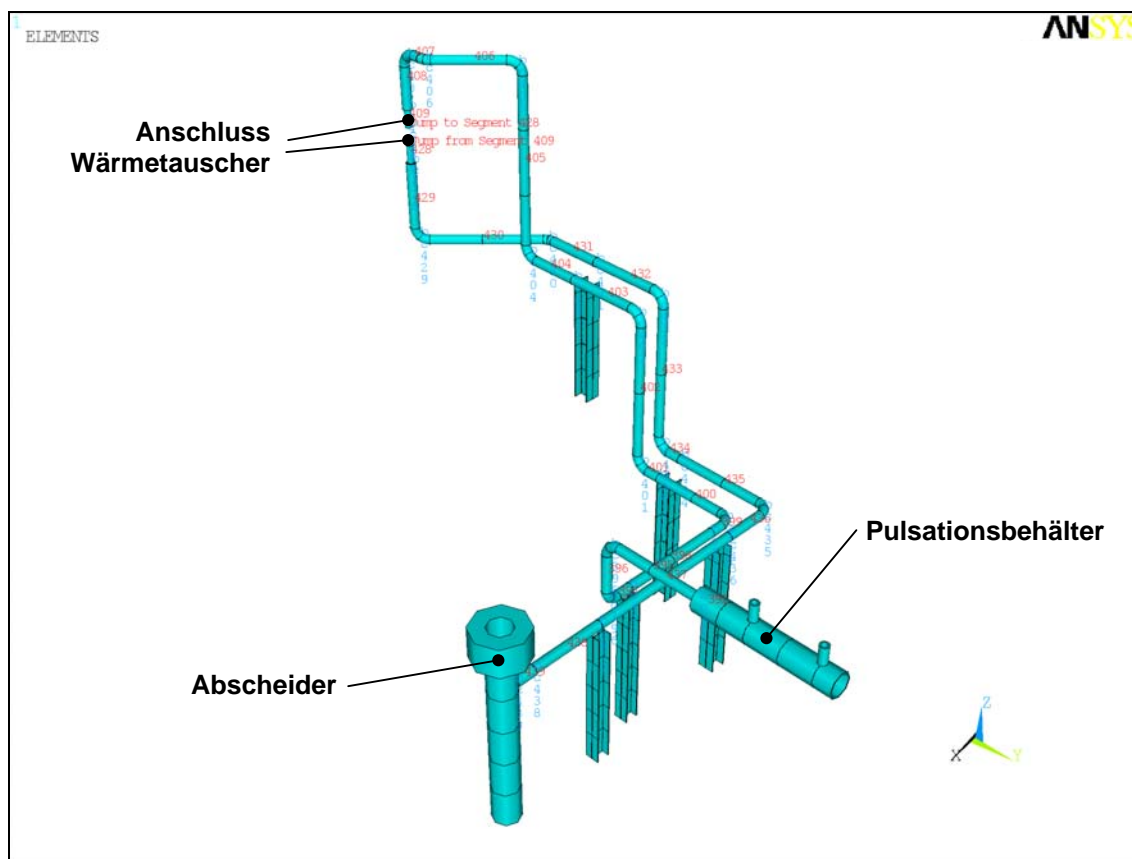
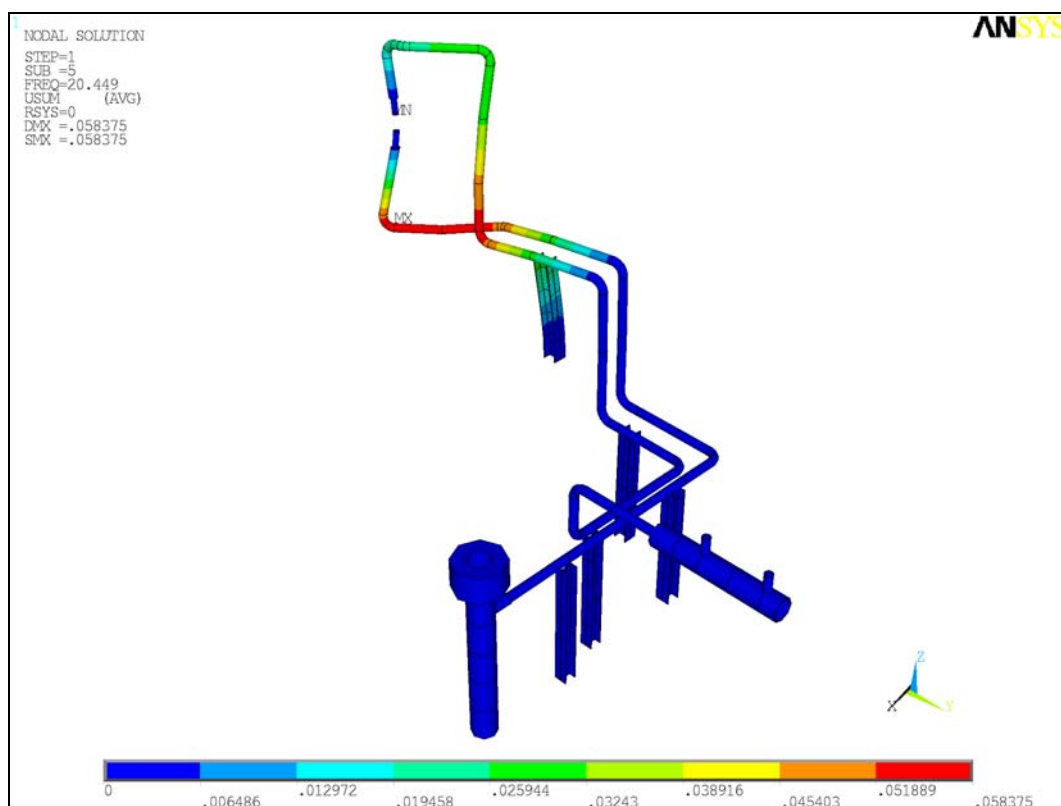
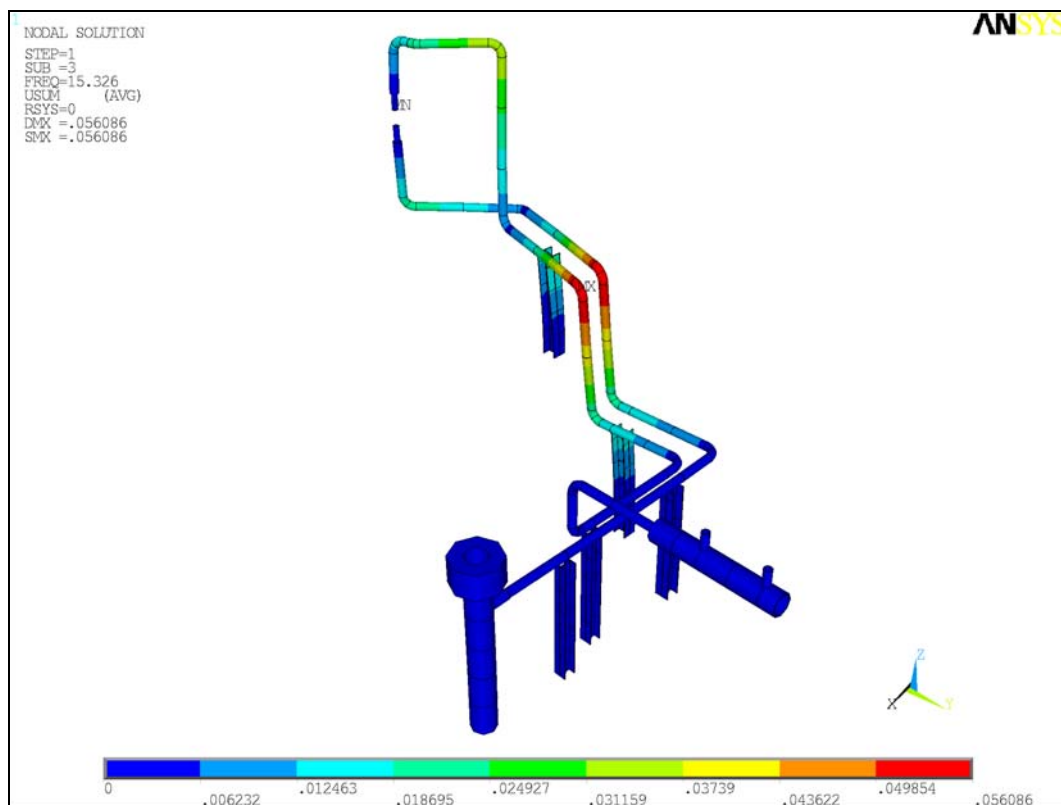


Abbildung 1: Beispiel eines FE-Modells für eine verdichternahe Rohrleitungsstruktur (Druckseite).

Die durchgeführte Eigenfrequenzanalyse zeigt im Beispiel zahlreiche lokale Eigenformen und -frequenzen, die sich im Frequenzbereich der Gaskraftanregung befinden. Abbildung 2 stellt exemplarisch zwei berechnete Eigenformen auf der Druckseite des betrachteten Rohrleitungssystems dar.

Um die Eigenformen bzw. -frequenzen zu ermitteln, die tatsächlich durch Gaskräfte zu kritisch hohen Schwingungen angeregt werden, wird eine Betriebschwingungsanalyse, die sogenannte „Mechanical Response Analysis“, durchgeführt. Dafür werden die in der akustischen Studie ermittelten Gasschwingungen als anregende Kräfte auf die jeweiligen Kraftangriffspunkte (Rohrkrümmer, T-Stücke, Blenden etc.) des strukturmechanischen FE-Modells aufgebracht (Abbildung 3). So lassen sich die Eigenfrequenzen, bei denen überhöhte Schwingungen zu erwarten sind, gezielt identifizieren.



**Abbildung 2:** Ausgewählte strukturmechanische Eigenformen der druckseitigen Rohrleitungsstruktur, oben: Eigenform bei 15,3 Hz, unten: Eigenform bei 20,5 Hz.

Ein Eliminieren aller berechneten strukturmechanischen Eigenfrequenzen im Bereich der akustischen Anregung ist nicht erforderlich, da Resonanzen – also die Übereinstimmung von Struktureigenfrequenz und Anregung – nicht in jedem Fall eine Gefahr darstellen. Diese entsteht erst, wenn in der Resonanz tatsächlich überhöhte Schwingungen auftreten.

Im Beispiel zeigen die durch die Gaskräfte erzwungenen Rohrleitungsschwingungen bei der Anregung von lokalen strukturmechanischen Eigenfrequenzen ein stark überhöhtes Schwingungsniveau im verdichternahen Rohrleitungsbereich der Saugseite. Exemplarisch ist in Abbildung 4 die berechnete Schwinggeschwindigkeit in y-Richtung an Position Seg. 195 (siehe Abbildung 3) dargestellt. Für den Hochlauf der drehzahlvariablen Maschine ist deutlich bei ca.  $T = 40$  s die Resonanzüberhöhung bei einer Frequenz von ca. 32 Hz zu erkennen. Ursächlich ist dabei die Anregung durch Gaspulsationen in der zweiten Ordnung der Verdichterdrehzahl. Man erkennt deutlich, wie die zweite Ordnung bei ansteigender Drehzahl in die Resonanz hineinfährt (Abbildung 4 unten).

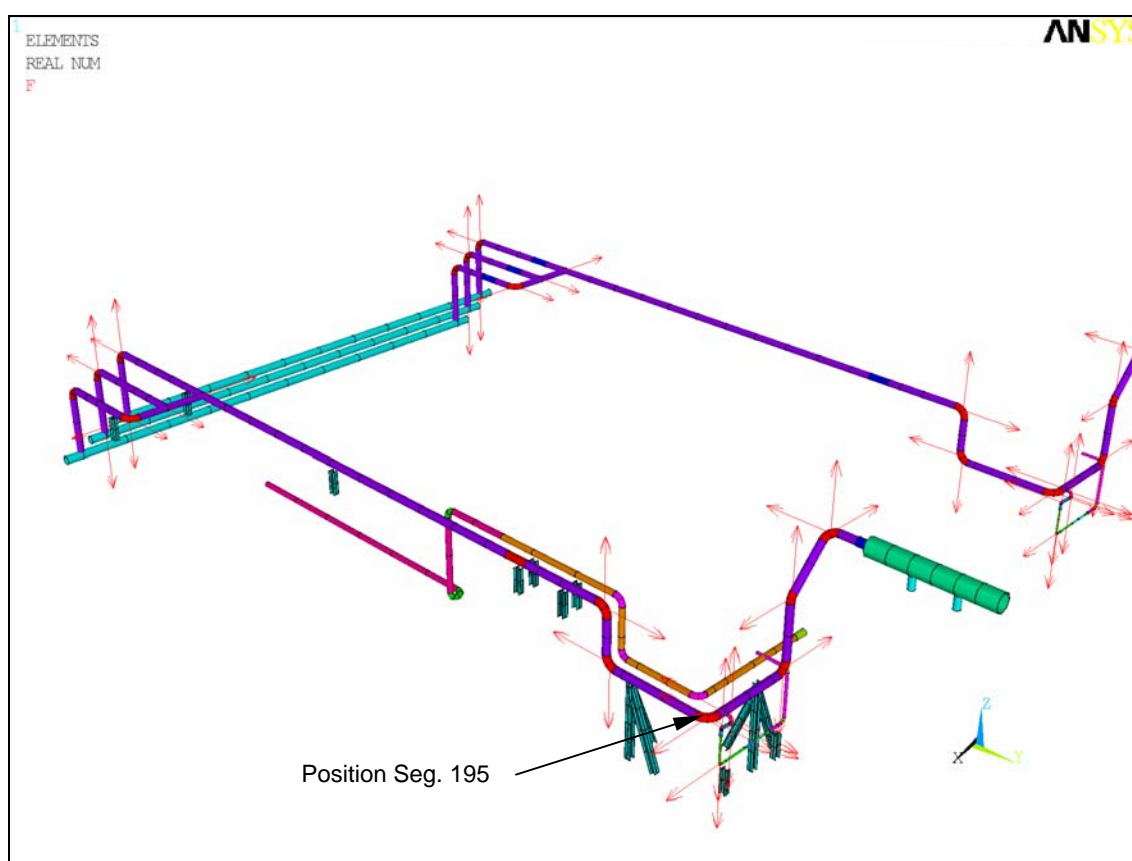
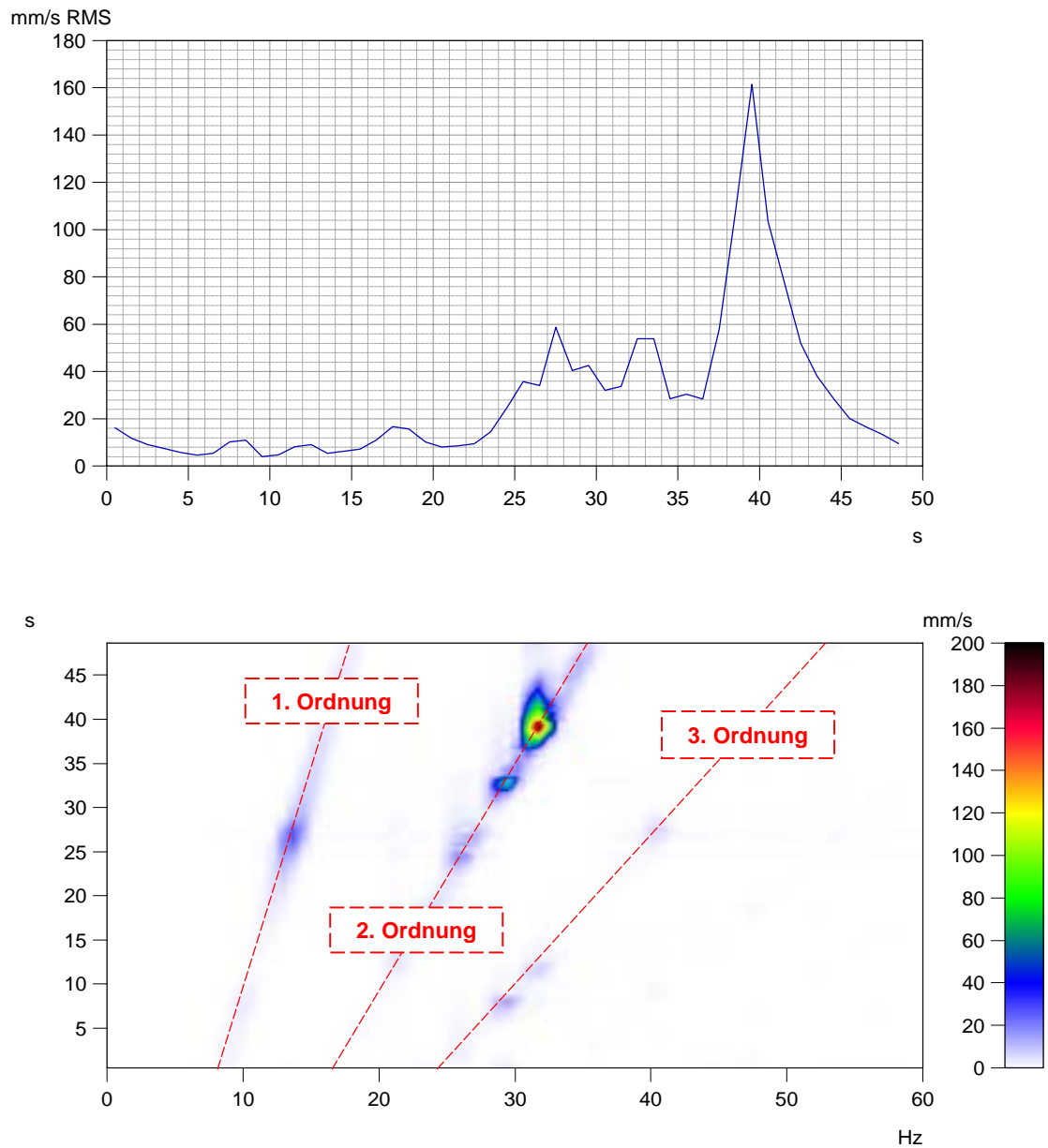
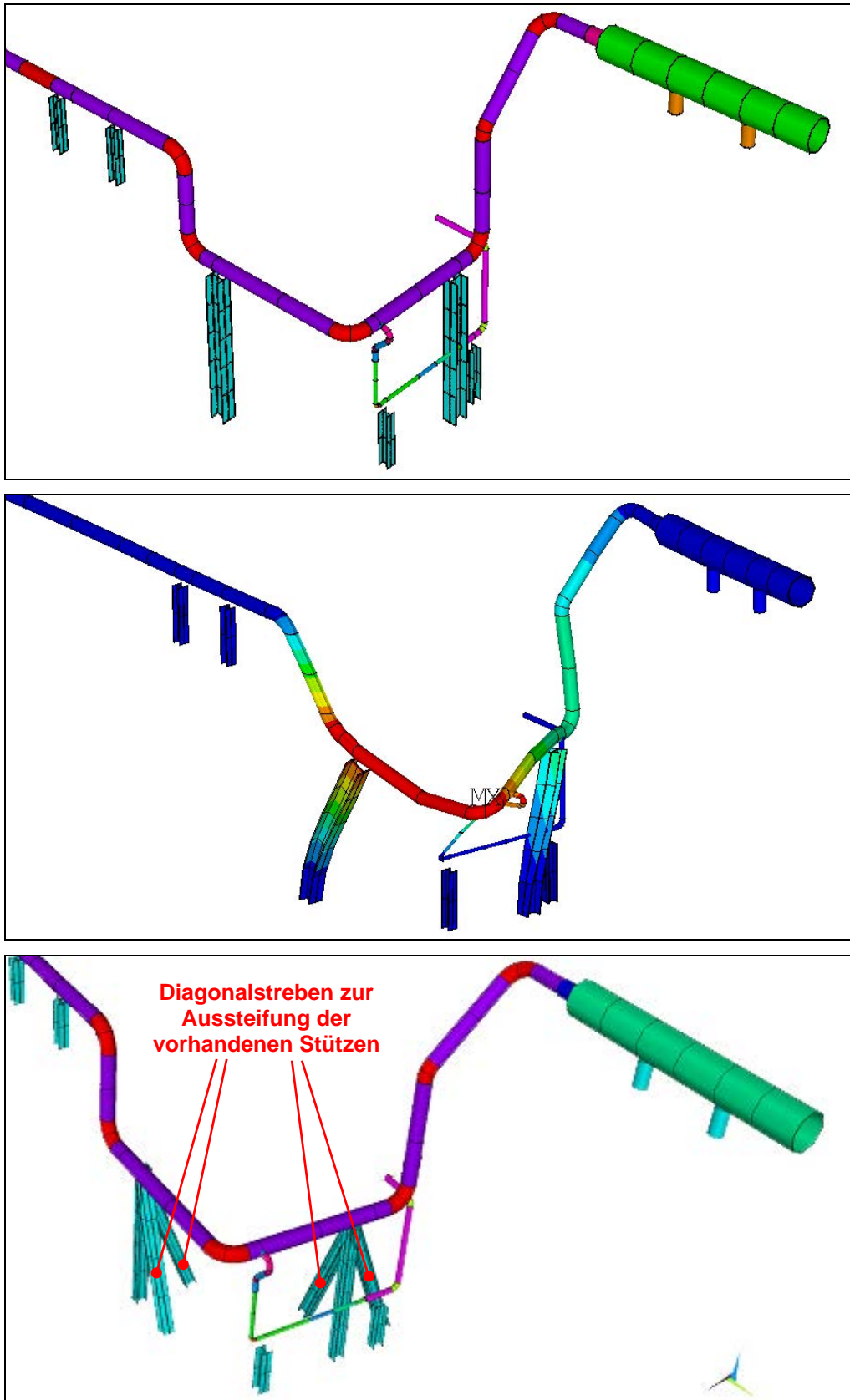


Abbildung 3: Gaskräfte der Betriebsschwingungsanalyse auf der Saugseite der Anlage.



**Abbildung 4:** Berechnete Schwinggeschwindigkeit in y-Richtung an Position Seg. 195 auf der Saugseite im Planungszustand der Anlage (Simulationszeit von 50 s für einen simulierten Drehzahlhochlauf), oben: Verlauf des RMS-Wertes, unten: Zeit-Frequenz-Spektrum mit Hervorhebung der Drehzahlordnungen.





**Abbildung 5:** Strukturaussteifung am Beispiel des verdichternahen Rohrleitungsbereichs der Saugseite, oben: Planungszustand, Mitte: berechnete Eigenform bei ca. 32 Hz, unten: Aussteifung der Rohrleitungshalterung.

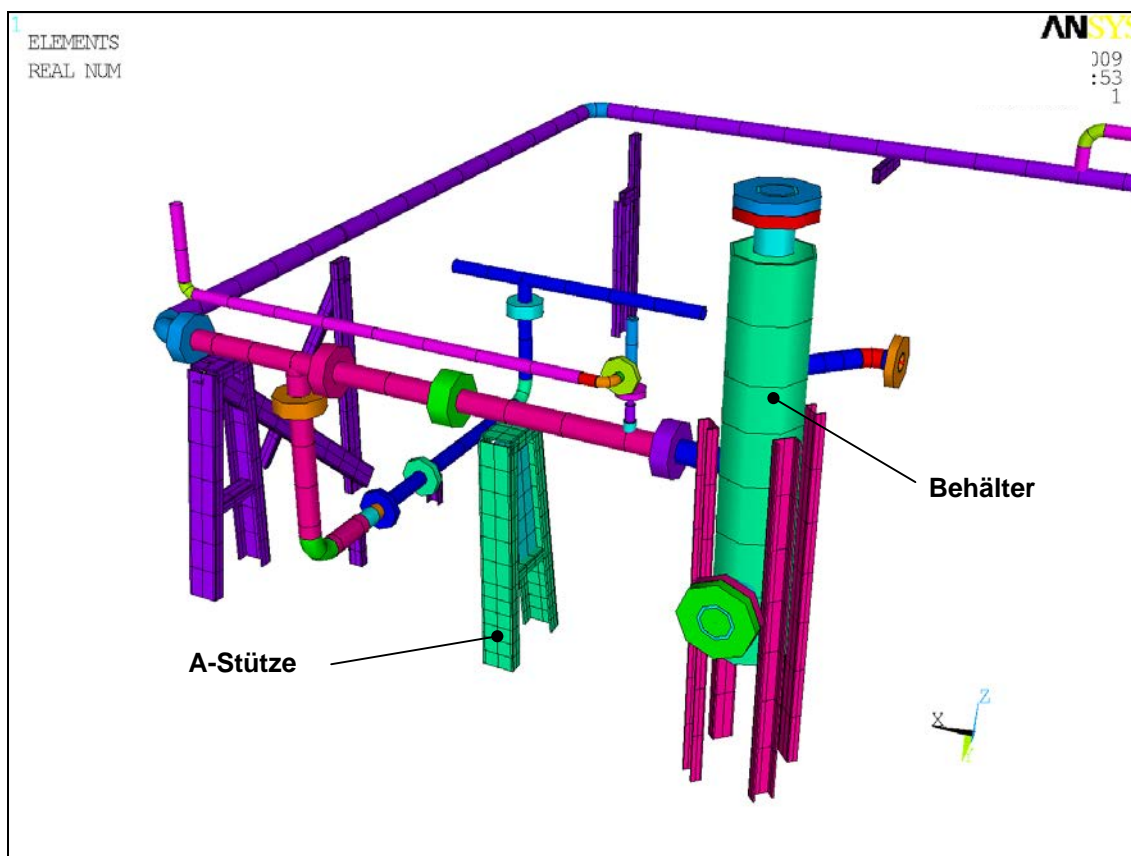
Um die zu erwartenden stark überhöhten strukturmechanischen Resonanzschwingungen der saugseitigen Rohrleitung im verdichternahen Bereich so zu reduzieren, dass die geforderten Richtwerte eingehalten werden, erfolgt eine Aussteifung der Stützenkonstruktion. Dadurch wird eine Verschiebung der lokalen Eigenfrequenz nach oben aus dem Anregungsbereich der Gaskräfte erreicht. In Abbildung 5 ist beispielhaft die horizontale Aussteifung der hoch verlegten Rohrleitungen auf der Saugseite dargestellt. Diese erfolgt durch das Einsetzen von zusätzlichen Diagonalstreben. Die zu erwartende Wirkung der Maßnahme wird durch eine erneute Berechnung der modifizierten Rohrleitungsstruktur überprüft.

### **3. Einsatz bei Schwingungsproblemen an bestehenden Anlagen**

FE-Berechnungen werden, insbesondere in Kombination mit einer messtechnischen Untersuchung, auch bei der Auslegung von schwingungsmindernden Maßnahmen an bestehenden Verdichteranlagen eingesetzt. Die ausgelegten Maßnahmen können anhand dieser theoretischen Berechnungen schon vor der Umsetzung hinsichtlich ihrer Wirksamkeit beurteilt werden. Grundlage hierfür ist ein Modell, das die dynamischen Eigenschaften der zu untersuchenden Verdichteranlage ausreichend genau abbildet. So kann sichergestellt werden, dass geplante Minderungsmaßnahmen den gewünschten Erfolg erzielen.

Beispielsweise wurden im Rahmen einer messtechnischen Kontrolle an einem Kolbenverdichter erhöhte Rohrleitungsschwingungen im verdichternahen Bereich festgestellt. Die Schwingungen traten bei einer bestimmten Drehzahl auf und wurden auf die Anregung einer strukturmechanischen Eigenfrequenz zurückgeführt. Mit Hilfe einer Modellrechnung sollten Möglichkeiten zur Verbesserung der Schwingungssituation aufgezeigt werden.

Für die strukturdynamische Berechnung wurde in einem ersten Schritt ein vereinfachtes FE-Modell des betrachteten Bereichs aufgestellt (Abbildung 6). Bei der Modellierung werden die Fundamentbefestigungen der Rohrleitungs- und Behälterstützen zunächst als ideal fest eingespannte Randbedingungen abgebildet.



**Abbildung 6:** Vereinfachtes FE-Modell des verdichternahen Rohrleitungsbereichs.

Um das Berechnungsmodell zu validieren, wurden die Ergebnisse der Messung herangezogen. Für das Berechnungsmodell mit ideal fest eingespannten Randbedingungen im Bereich der Fundamentbefestigungen der Rohrleitungsstützen zeichnete sich bei der Eigenfrequenzanalyse eine Bewegungsform ab, die in erster Näherung der gemessenen Bewegungsform entsprach. Im Vergleich zur Messung lag die Eigenfrequenz der berechneten Bewegungsform jedoch deutlich zu hoch. Dies führte zu dem Schluss, dass die Steifigkeiten im Bereich der Fundamentanbindung zu hoch waren. Eine genauere Berücksichtigung der Randbedingung war daher erforderlich.

Aus den nachträglich erhaltenen Konstruktionsunterlagen des Verdichter-Skids ging hervor, dass die A-Stütze auf einem Grundrahmen montiert ist. Dieser besteht aus einem Stahlrahmen mit einem darüber liegenden Bodenblech. Die A-Stütze ist durch eine Schraubverbindung mit dem Blech verbunden, das seinerseits mit dem Stahlrahmen verschweißt ist. Die Schweißnaht ist nicht durchgehend ausgeführt, so dass das Blech nicht vollständig mit dem darunter liegenden Rahmen verbunden ist.

Diese „weiche“ Aufstellung wird in einem entsprechend erweiterten und angepassten Berechnungsmodell berücksichtigt, wodurch sich die Eigenfrequenz deutlich nach unten verschob. Die sich neu einstellende Eigenform und insbesondere auch die Eigenfrequenz stimmte nun zufriedenstellend (Abweichung ca. 5 %) mit der Messung überein (Abbildung 7).

Nachdem eine ausreichende Modellgenauigkeit gegeben war, wurden verschiedene Möglichkeiten zur Aussteifung der A-Stütze und des Behälterfußes untersucht. Die Wirksamkeit der Maßnahmen wurde durch die zu erwartende Frequenzverschiebung bewertet.

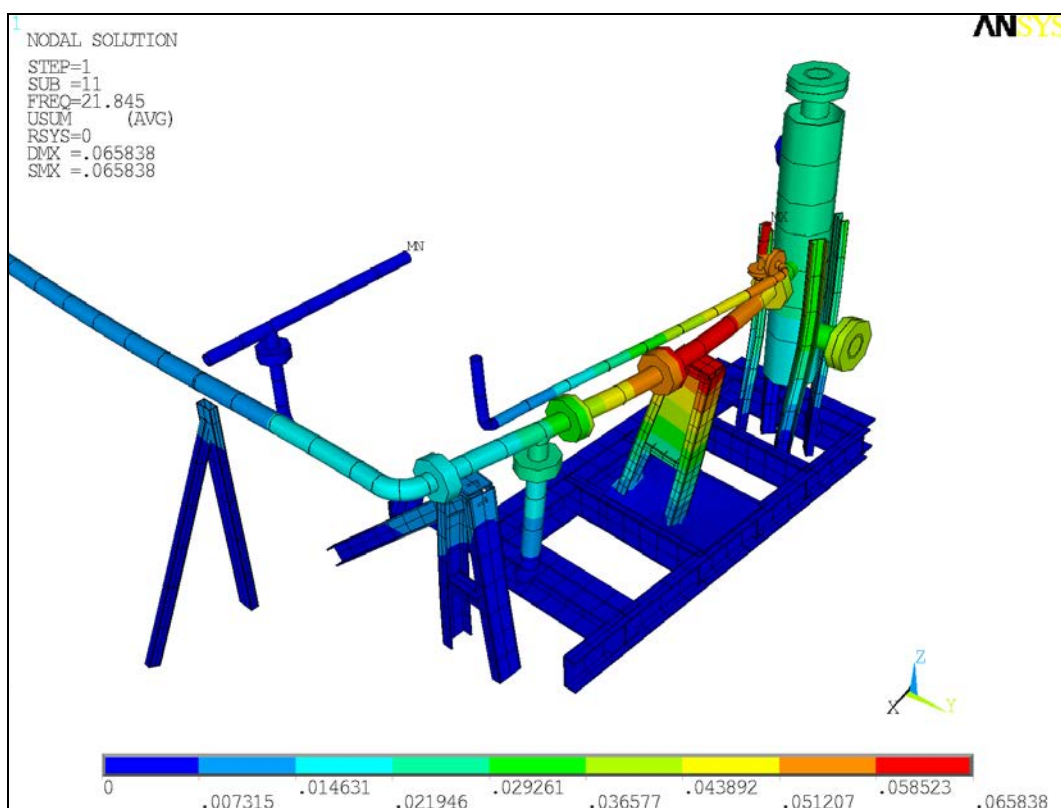


Abbildung 7: Eigenform bei 21,8 Hz, überarbeitetes Modell mit Grundrahmen (Berücksichtigung der Nachgiebigkeit im Bereich der A-Stütze).

Das Beispiel zeigt, dass in vielen Fällen ein zu einfaches Berechnungsmodell für die Auslegung von strukturmechanischen Minderungsmaßnahmen nicht ausreichend ist. Insbesondere den Lagerungs- bzw. Randbedingungen muss eine erhöhte Beachtung zuteil werden, da diese einen großen Einfluss auf das Modell und dessen Aussagekraft haben.

Das Beispiel verdeutlicht aber auch, dass bei einem mit Messungen abgestimmten Modell und einer detaillierten Modellierung der Lager- und Randbedingungen eine hohe Modellgenauigkeit erreicht wird. Eine begleitende Schwingungsmessung kann dabei wichtige Informationen liefern, die zu einer deutlichen Erhöhung der Modellaussagekraft beitragen.

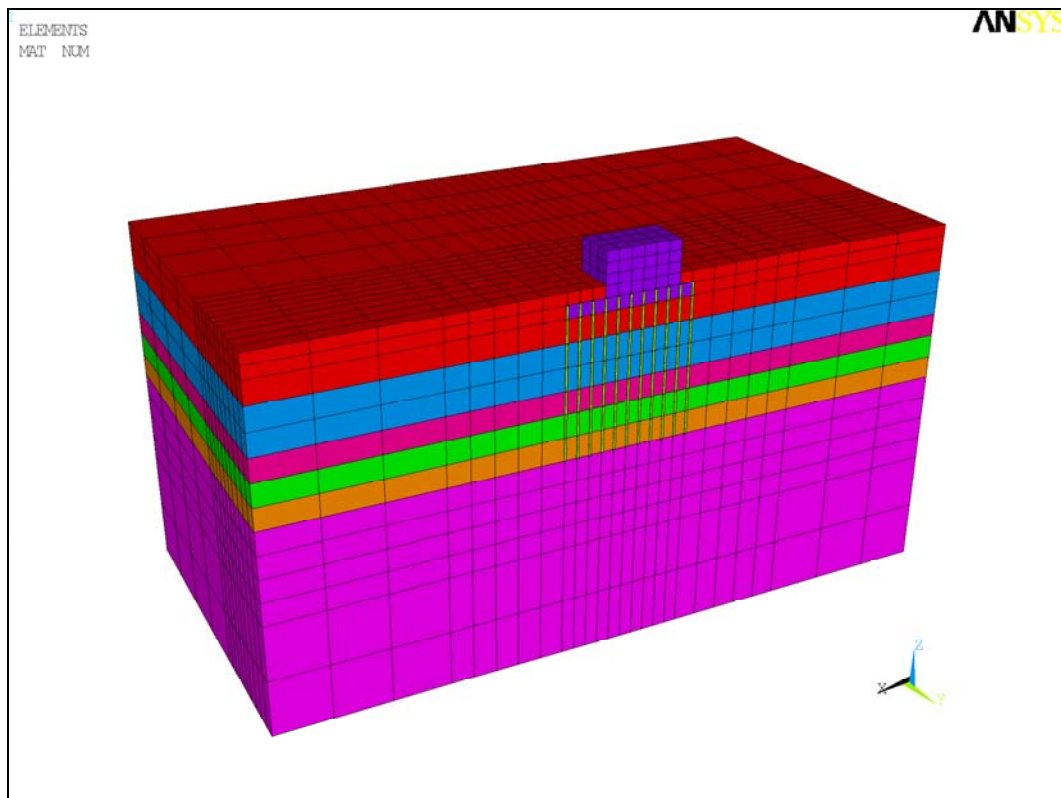
## 4. Berechnung von Fundamentalschwingungen

Im Rahmen der Planung und des Umbaus von Kolbenverdichteranlagen werden durch KCE auch immer wieder spezielle Aufgabenstellungen bearbeitet, wie zum Beispiel die Untersuchung der dynamischen Boden-Bauwerk-Interaktion an Kompressorfundamenten.

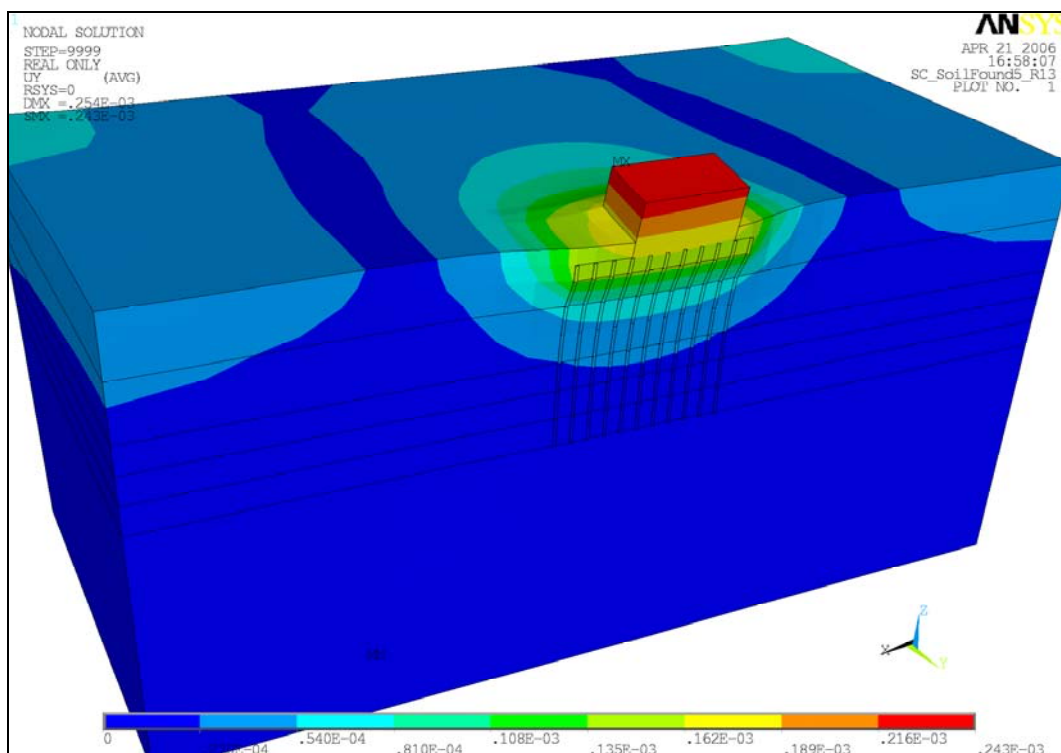
FE-Berechnungen werden hier eingesetzt, um beispielsweise ein neues oder zu sanierendes Fundament auf seine dynamischen - das heißt schwingungstechnischen - Eigenschaften hin zu dimensionieren bzw. zu prüfen.

Mit ausschlaggebend für Untersuchungen der dynamischen Boden-Bauwerk-Interaktion sind immer auch die Bodenverhältnisse am Aufstellungsort. Insbesondere bei schwierigen Bodenverhältnissen ist es erforderlich, die Gründung ebenso wie die Bodenbeschaffenheit im Modell sehr detailliert abzubilden, um entsprechend belastbare Ergebnisse zu erhalten (Abbildung 8). Um mögliche Lösungsansätze hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zu bewerten, wird rechnerisch überprüft, ob das Fundament z. B. die dynamischen Lastreaktionen des Verdichters aufnehmen kann. Dazu wird am Fundament die Anregung durch die Verdichterkräfte simuliert (Abbildung 9).

Bei Umbau- oder Sanierungsmaßnahmen an bereits bestehenden Kompressorfundamenten können Schwingungsmessungen wesentliche Zusatzinformationen liefern. So kann durch die Messergebnisse auch eine Abstimmung der FE-Modelle erfolgen. Durch Finite-Elemente-Berechnungen zur Dynamik der Fundamente von Kolbenverdichtern lässt sich so eine hohe Planungssicherheit erreichen.



**Abbildung 8:** Beispiel für das FE-Modell eines Verdichterfundamentes zur detaillierten Betrachtung der dynamischen Boden-Bauwerk-Interaktion (Schnitt durch die x-z-Ebene).



**Abbildung 9:** Dynamische Auslenkung eines Fundamentes in y-Richtung bei Anregung durch Verdichterkräfte (Schnitt durch die x-z-Ebene).

## 5. Thermische Spannungsberechnung

Neben theoretischen Berechnungen und Untersuchungen, bei denen dynamische Vorgänge im Vordergrund stehen, werden durch KCE auch Aufgaben in Bezug auf statische Problemstellungen bearbeitet. So werden z. B. im Rahmen von Pulsationsstudien nach dem API Standard 618 neben Gaspulsationen und mechanischen Rohrleitungsschwingungen auch die zu erwartenden Materialspannungen in Folge thermischer Dehnung untersucht.

Hierbei erfolgt auf Kundenwunsch die Prüfung des Rohrleitungshalterungskonzeptes unter Berücksichtigung der berechneten thermischen Spannungen. Dies betrifft insbesondere die unter thermischen Gesichtspunkten als kritischer einzustufenden druckseitigen Rohrleitungsbereiche zwischen Verdichter und Gaskühler.

Thermische Berechnungen können im Rahmen von Pulsationsstudien mit vergleichsweise geringem Modellierungsaufwand realisiert werden, da in der Regel hierfür die bereits existierenden FE-Berechnungsmodelle für die strukturdynamische Untersuchung der Rohrleitungen genutzt werden. Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit, Rohrleitungshalterungen und -stützen in FE-Programmen detailliert nachbilden zu können. Neben einfachen Los- und Festlagern sind hier Feder- und Dämpferelemente modellierbar. Sofern es die Aufgabenstellung erfordert, können auch die Unterstruktur der Lager sowie komplette Rohrbrücken im Modell berücksichtigt werden.

Beispielsweise wurden im Rahmen einer Studie zur schwingungstechnischen Absicherung der Erweiterung eines Erdgasspeichers die zu erwartenden Werkstoffspannungen aufgrund der thermischen Ausdehnung an den Rohrleitungen und an den Rohrleitungshalterungen geprüft.

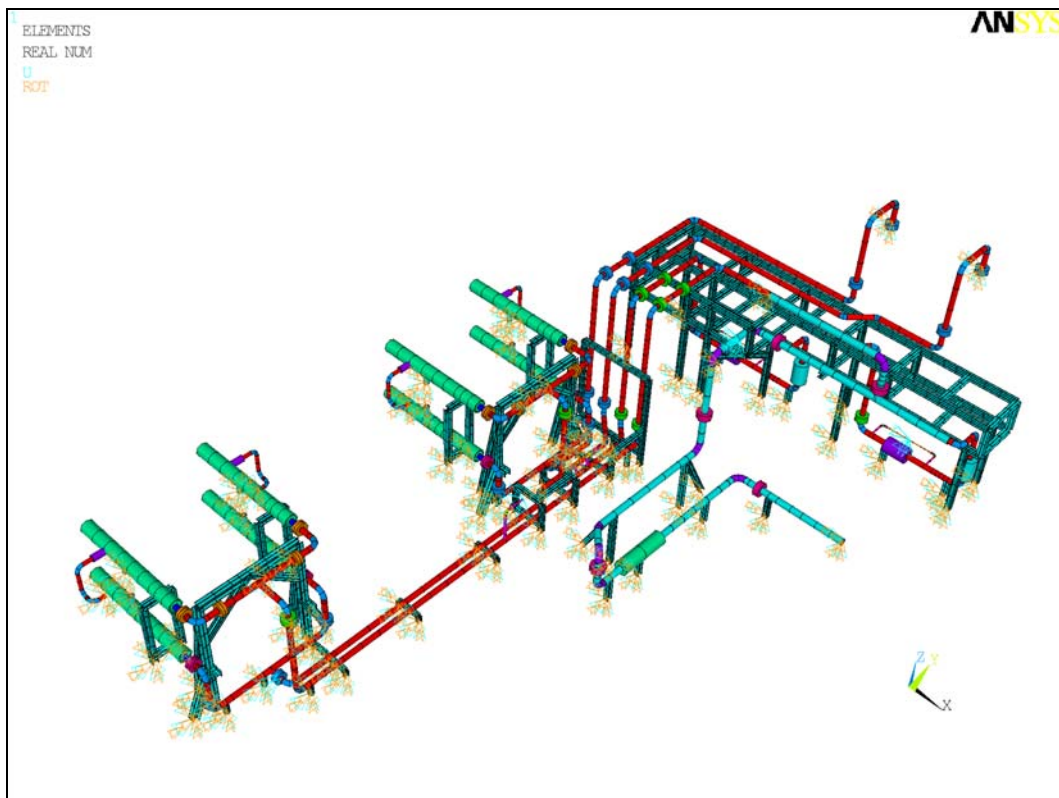


Abbildung 10: FE-Modell zur Kontrolle der auftretenden thermischen Spannungen.

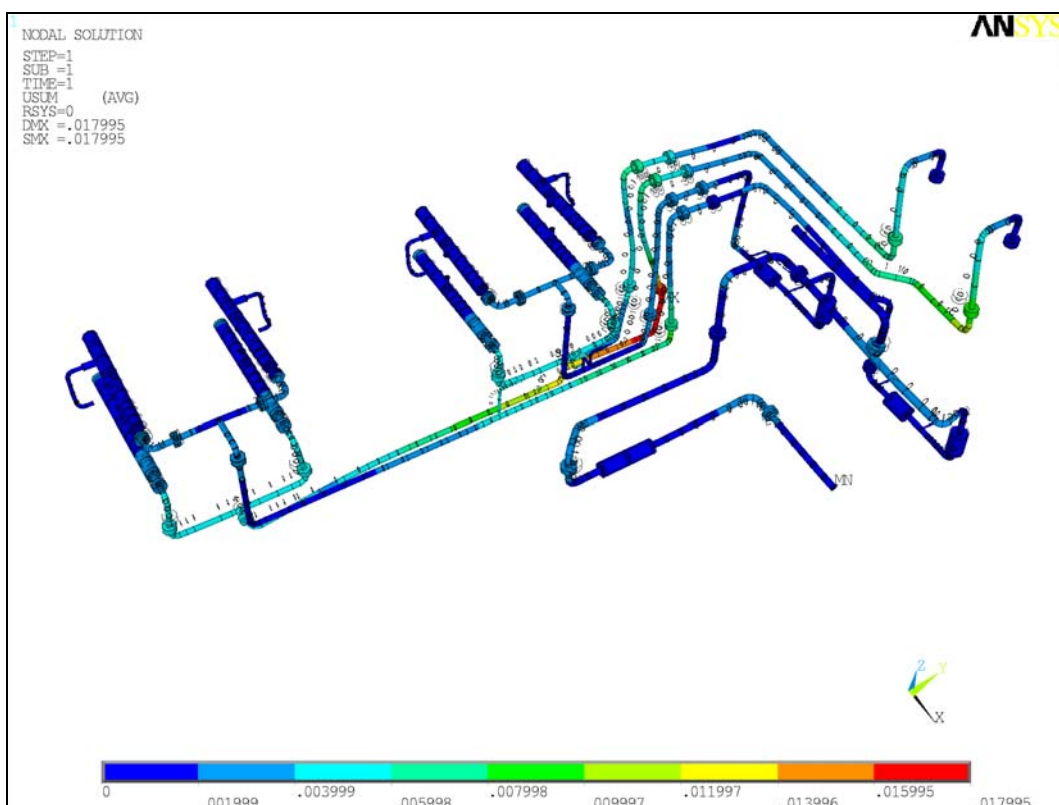


Abbildung 11: Rohrleitungsverformung infolge thermischer Dehnung (ohne Darstellung der Rohrleitungsstützen und der Rohrbrücke).



Für die Berechnung der thermischen Spannungen wurden die Pulsationsbehälter sowie alle relevanten Rohrleitungsstützen und auch die Rohrbrücke im Modell detailliert abgebildet (Abbildung 10). Anschließend wurde das Modell mit einer vorgegebenen Temperaturdifferenz auf der Saugseite bzw. auf der Druckseite beaufschlagt. Als Ergebnis der Berechnung ergaben sich die Verformung der Rohrleitung in Folge der Temperaturdehnung (Abbildung 11) und die zu erwartenden Materialspannungen in der Rohrleitungswand (Abbildung 12).

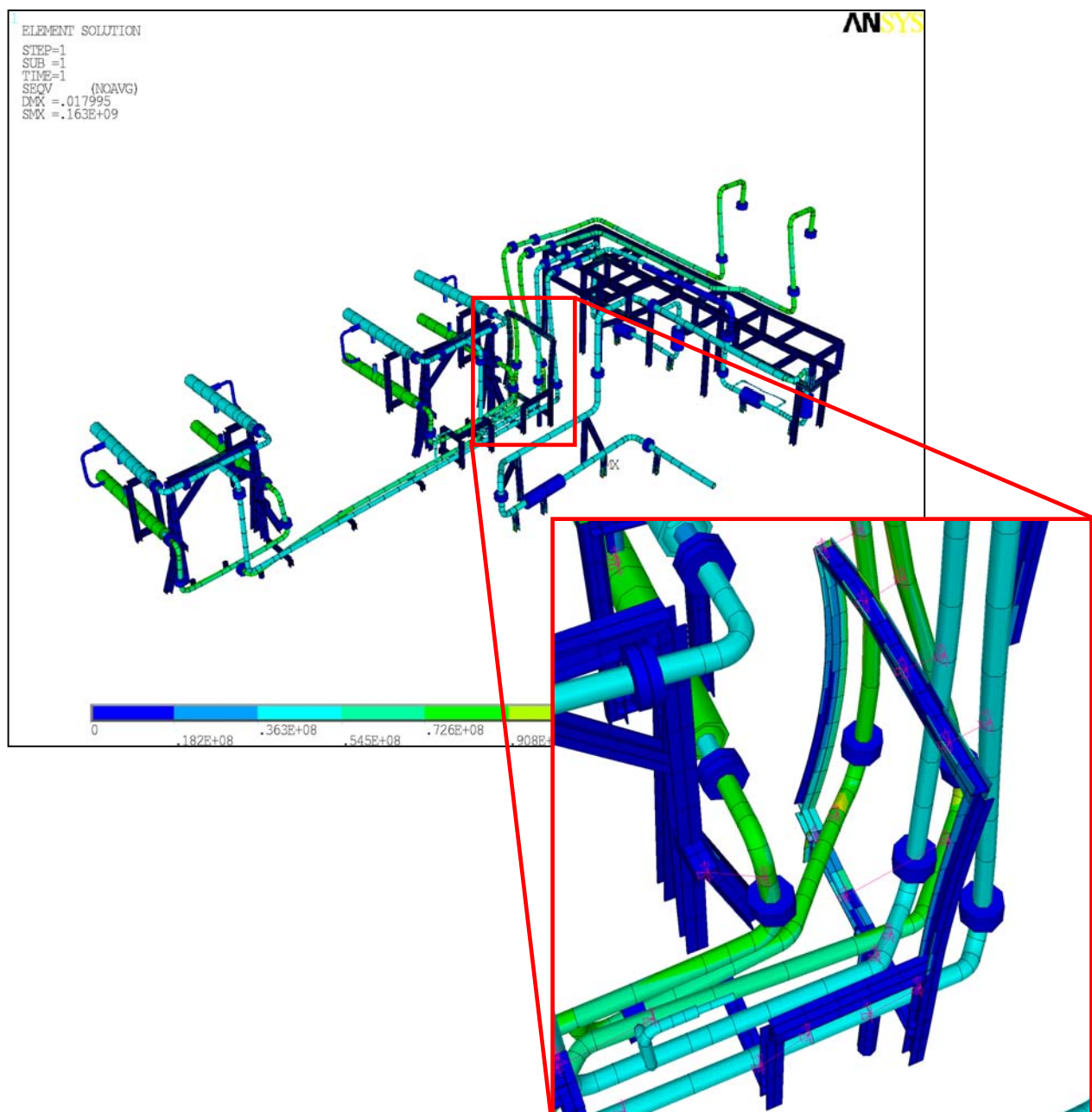


Abbildung 12: Spannungsverteilung (Vergleichsspannung) infolge thermischer Dehnung.

Die Ergebnisse für den Planungszustand zeigten in einigen Bereichen lokale thermische Spannungen, die die zulässigen Werte überschritten. Zur Begrenzung der Spannungen in der Rohrleitung wurde daraufhin das Konzept der Rohrleitungshalterung modifiziert. Es wurden z. B. bestimmte Lagerpunkte hinsichtlich ihrer Freiheitsgrade so verändert, dass die Spannungen auf ein zulässiges Maß abgeschwächt wurden. Nach der Überarbeitung des Halterungskonzeptes wurden abschließend die dynamischen Lastreaktionen an den Lagern, Stützenfüßen der Rohrbrücke etc. überprüft.