Einfluss unterschiedlicher Rechenmodelle bei der Simulation von Impact-Versuchen von einem fehlerbehafteten Rohrleitungsabschnitt

Can Kosar

27. September 2012

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
m	$Tonne$	Masse
x	mm	Weg
d		Dämpfungskonstante
k		Federkonstante
δ		Diracsche (Delta-) Distribution
t	s	Zeit
ω	rad/s	Kreisfrequenz
I	$N \cdot s$	Impuls
E	$N \cdot mm$	Energie
$\mathbf{M}$		Massenmatrix
$\mathbf{D}$		Dämpfungsmatrix
$\mathbf{K}$		Steifigkeitsmatrix
$\mathbf{F}$		Vektor der äußeren Kräfte
$\mathbf{U}$		Vektor der Knotenverschiebungen
$\mathbf{I}$		Vektor der inneren Kräfte
p		Ordnungsindex
α		Rayleigh-Koeffizient der Massenmatrix
β		Rayleigh-Koeffizient der Steifigkeitsmatrix
ξ		Dämpfungsfaktor

Die für die Dokumentierung des PipeGen's verwendeten Symbole werden im 3. Kapitel ausführlicher beschrieben und sind von denen in anderen Kapiteln zu trennen

1. Einleitung

Für die Beförderung der Fluide werden in unterschiedlichen Bereichen Maschinen- und Anlagenbaus Rohrleitungssysteme eingesetzt. Bei den Anlagen wie Kernkraftwerken, in denen Fluide mit hohem Druck, hoher Temperatur oder gefährliche Stoffe transportiert werden, werden die Anforderungen an Sicherheit besonders hochgestellt. Das Versagen der Rohrleitungssysteme in solchen Anlagen können gravierende gesundheitliche und wirtschaftliche Folgen haben.

Zu den möglichen Gefahrinduktoren gehören Verschleiß der Rohre und Schwingungen. Bei der Berechnung der Dauerfestigkeit der Rohrleitungssysteme müssen u.a. die Betriebs- und Ausnahmeschwingungen (z.B. Erdbeben) und strukturelle und materielle Veränderungen durch Verschleiß berücksichtigt werden.

Der Verschleiß der Rohre kann durch verschiedene Mechanismen verursacht werden. Diese Mechanismen können sowohl zu Strukturfehlern als auch zur Änderung der materiellen Eigenschaften führen. Daher stellt die Untersuchung der fehlerbehafteten Rohrleitungen ein wichtiges Forschungsgebiet dar.

Eine Folge des Verschleißes an Rohrleitungssystemen ist die Wanddickenreduzierung. Da sie die Struktur des Systems verändert, beeinflusst sie das Schwingungs- und Festigkeitsverhalten des Systems. Die Wanddickenreduzierung in Rohrleitungssystemen werden in internationalen Projekten wie ASME-Codecase-N-597-2 geforscht, siehe [Sca].

Bei der Dynamikuntersuchung der fehlerbehafteten Rohrleitungen werden experimentelle sowie numerische Methoden verwendet. Die experimentellen Methoden können sehr zuverlässig aber auch sehr kostenintensiv und schwer reproduzierbar sein. Hingegen zeichnen sich numerische Rechnungsmethoden u.a. mit ihren Kostenvorteilen und ihrer Reproduzierbarkeit aus. Diese Eigenschaften der numerischen Untersuchungsmethoden ermöglichen effiziente Auswertung der Belastungs- und Schädigungsszenarien an Rohrleitungen und damit eine frühzeitige Gefahrerkennung. Zudem können die Kenntnisse über die möglichen Suboptimalitäten im Betrieb wichtige Hilfsmittel für den Entwicklungsprozess sein.

An der MPA werden schwingungstechnische sowie materielle Eigenschaften der Rohrleitungssysteme untersucht, die fehlerbehaftete Rohrleitungsabschnitte beinhalten. Es liegt ein Rohrleitungssystem aus dem Forschungsprojekt „Reaktorsicherheitsforschung-Vorhaben Nr. 150 1062“ als Versuchsaufbau zur Verfügung. Für Schwingungsanalyse der Rohrsysteme werden experimentelle Methoden wie Snapback-, Shaker- und Impactversuche verwendet. Für die effiziente Durchführung von Variantenstudien und die Systemidentifikation werden Rechenmodelle für die Versuche entwickelt.

In Varianten- und Parameterstudien der Rohrleitungssysteme werden Modelle für Rohrleitungsabschnitte mit Wanddickenreduzierung erstellt. Je nach erforderlicher Anzahl an zu erstellenden Modellen kann der Modellaufbau sehr zeitintensiv werden.

Im Rahmen dieser Studienarbeit wird ein Rohrmodellgenerator programmiert, mit dem 3D-CAD-Rohrmodelle mit Wanddickenreduzierung automatisch erstellt werden können. Der Rohrmodellgenerator wurde „PipeGen“ benannt. Durch Benutzereingabe in Form eines Matlab-Structs erstellt der Rohrmodellgenerator „PipeGen“ zuerst ein AutoLISP-Skript in Matlab , führt es in AutoCAD-CLI aus und exportiert ein Rohrmodell in ein CAD-Format. Anschließend baut er das erstellte Modell in eine Testsimulation in ABAQUS ein und überprüft das Modell nach Vernetzbarkeit, Netzqualität und Konvergenz. Der Rohrmodellgenerator ermöglicht rekursives Erstellen der Modelle und bildet damit eine Softwarebasis für Variantenstudien und Optimierungsschleifen.

Anschließend wird ein Rechenmodell für den Impact-Versuch am Prüfstand „Mock-Up“ gebaut. Am Rechenmodell werden verschiedene Modellierungsvarianten untersucht und Anforderungen an die Systemidentifikation durch Stoßsimulation ermittelt.

1.1. Vorgehensweise

Im folgender Abbildung 1.1 werden die Bestandteile der Arbeit und die Zeiteinteilung visualisiert.

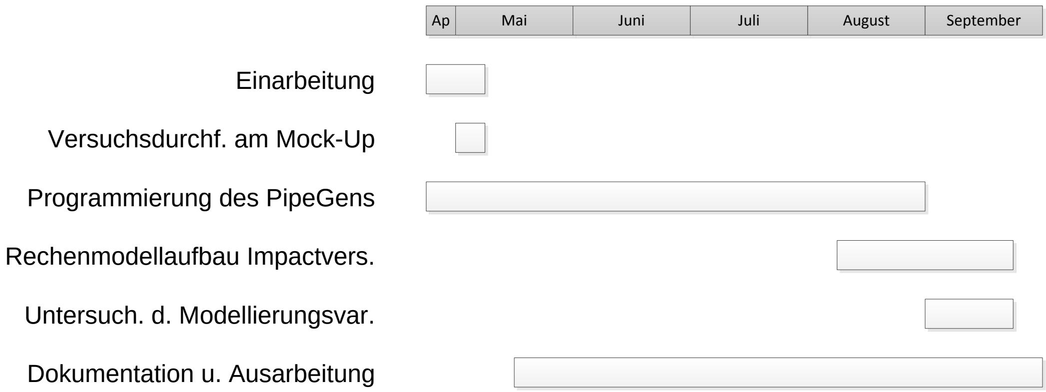


Abbildung 1.1.: Vorgehensweise bei der Studienarbeit

Zu Beginn der Arbeit wurde der Rohrmodellgenerator PipeGen konzipiert. Als Hauptplattform für die Programmierung wurde aufgrund ihren reichen Toolboxen und praktischen Schnittstellen zu Systemresourcen die Software „Matlab“ ausgewählt. Für die Erstellung der Rohrmodelle wird aufgrund ihrem Command-Line-Interface (CLI) und erweiterte 3D-Modellierungsfunktionen die CAD-Software „AutoCAD“ vorgezogen. Parallel zu Programmierung von PipeGen wurde eine Reihe von Versuchen am Mock-Up durchgeführt, die Impact-Versuche durch Hammerschlag, Snapback-Versuche und Shakerversuche umfassen.

Der Umfang des Rohrmodellgenerators PipeGen wurde um eine automatisierte Testsimulation in ABAQUS erweitert, um die erstellten Modelle auf automatische Vernetzbarkeit und Netzqualität zu überprüfen. Damit wurde eine Softwarekette für die automatisierte Parameterstudien an Rohrleitungen mit Wanddickenreduzierung erstellt.

Anschließend wurde ein Rechenmodell für den Impact-Versuch mit Impulshammer aufgebaut. In der ersten Variante wird der Hammerschlag durch Kollision von Hammerkopf auf die Rohrleitung modelliert. In der zweiten Variante wird der Stoßeffekt durch Vorgabe des gemessenen Hammerkraftverlaufs realisiert. Die Mess- und Simulationsergebnisse aus beiden Varianten werden gegenübergestellt und die Anforderungen an die Modellierung eines Impact-Versuchs untersucht.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die Grundlagen und Methoden eingegangen, auf die in dieser Studienarbeit zurückgegriffen wird.
Es wird zuerst ein einfaches Stoßproblem analytisch beschrieben, um das Verständnis zum Hintergrund eines Hammerschlag zu schaffen. Anschließend werden die gängigen Integrations- und deren Schrittweitensteuerungsmethoden in der FEM erläutert. Diese sind u.a. die . Die Grundlagen der Modalanalyse und der FEM werden im weiteren nicht erläutert und aus der Literatur [Bat02] und [Nat88] zu entnehmen.

2.1. Erzwungene Schwingungen

Unter „erzwungener Schwingung“ wird eine Schwingung verstanden, die durch von außen wirkende Kräfte erzwungen wird. Die Erregung kann hierbei durch eingeprägte Kräfte, äußere Störfaktoren (Wind, Erdbeben), Aktorik, materielle Interaktionen sowie Stöße erfolgen. Der folgende Abschnitt wird auf die Erregungen durch Stöße beschränkt.

2.1.1. Analytische Formulierung eines Stoßproblems in der Strukturdynamik

Ein Körper, dargestellt in Abbildung 2.1, sei im Folgenden ein einfacher gedämpfter Einmassenschwinger mit einem Freiheitsgrad. Der Körper mit einer Masse von m sei in der vorliegenden Konfiguration mit einer Feder und einem Dämpfer am Boden befestigt und es wirke eine zeitabhängige Kraft- bzw. Erregerfunktion $f(t)$.

Nach dem Prinzip der virtuellen Arbeit ergibt sich die Bewegungsgleichung

$$m{\cdot}\ddot{x}(t) + d{\cdot}\dot{x}(t) + k{\cdot}x(t) = f(t) \tag{2.1}$$

mit der verallgemeinerten Koordinate x, der Dämpfungskonstante d und der Federkonstante k, für die Herleitung siehe [WS12].

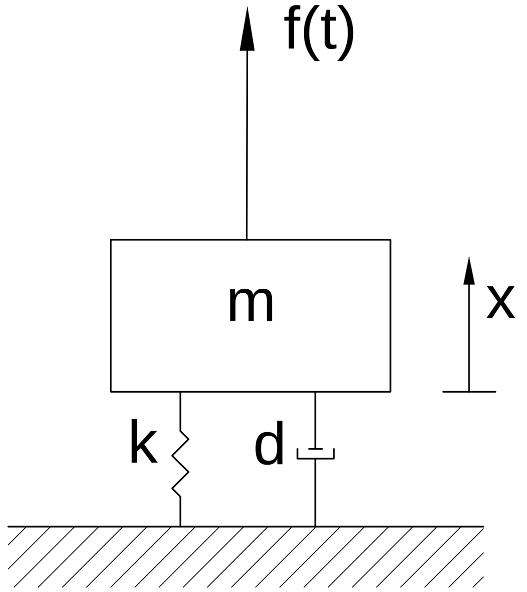


Abbildung 2.1.: Gedämpfter Einmassenschwinger

Hierbei ist $f(t)$ eine beliebige Funktion. Um eine kurzzeitig wirkende Stoßerregung zu definieren wird die diracsche δ-Distribution eingeführt, siehe [Luz92]. Die diracsche δ-Distribution eines beliebigen Arguments ψ ist als

$$\begin{aligned} \delta(\psi) &= 0 \text{ für } \psi \neq 0 \\ \delta(\psi) &\to \infty \text{ für } \psi = 0 \end{aligned} \tag{2.2}$$

definiert, siehe Bild 2.2(a).

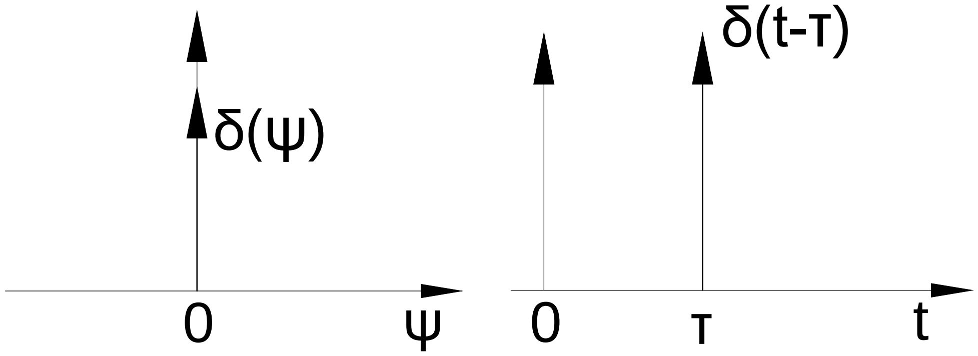
Wird als Argument die Zeit t verwendet, so wird für den Zeitpunkt des Stoßes τ die δ-Funktion

$$\begin{aligned} \delta(t-\tau) &= 0 \text{ für } t = \tau \\ \delta(t-\tau) &\to \infty \text{ für } t \neq \tau \end{aligned} \tag{2.3}$$

erhalten, siehe Abbildung 2.2(b).

Die δ-Distribution beschreibt einen unendlich hohen Peak im infinitesimalen Zeitintervall $t \to 0$. Sie kann als Grenzwert einer Reihe dargestellt werden, siehe Abbildung 2.3. Eine Approximation der Dirac-Distribution ist

$$\int\limits_{\tau-\varepsilon}^{\tau+\varepsilon} \delta(t-\tau)dt \stackrel{!}{=} 1, \tag{2.4}$$



(a) Delta-Distribution eines beliebigen Arguments

(b) Delta-Distribution einer Zeitfunktion

Abbildung 2.2.: Definition der Krafterregung mit Hilfe von δ-Distribution

physikalisch gesehen mit einer Stoßdauer von 2ε. Da die Fläche unter der Kurve 1 beträgt, wird es als Einheitsstoß bezeichnet.

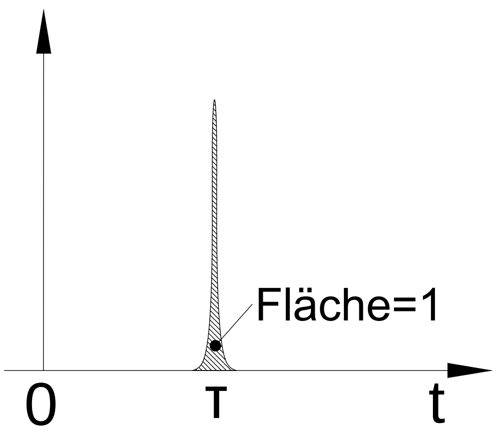


Abbildung 2.3.: Aproximation der Delta-Distribution mit Reihen

Kombiniert mit der Translations- und Skalierungseigenschaft der Deltadistribution

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot \delta(t-\tau) dt = g(\tau), \tag{2.5}$$

siehe [Ade], folgt

$$\int_{\tau-\varepsilon}^{\tau+\varepsilon} g(t)\cdot\delta(t-\tau)dt = g(\tau) \tag{2.6}$$

bzw.

$$g(\tau)\int_{\tau-\varepsilon}^{\tau+\varepsilon} \delta(t-\tau)dt = g(\tau), \tag{2.7}$$

wobei $g(t)$ eine beliebige Skalierfunktion ist. Somit ist die Fläche unter der Kurve mit der Funktion g skaliert. Ohne auf die Eigenschaften der δ-Funktion ausführlicher einzugehen, wird im Folgenden mit einer Funktion $g(t) = a = konst.$ und $\varepsilon \to 0^+$ die Antwort des Körpers durch den Dirac-Impuls erläutert. Die Erregerfunktion $f(t)$ ergibt sich als

$$f(t) = a\cdot\delta(t-\tau). \tag{2.8}$$

Die Einheit der Erregerfunktion $f(t)$ ist eine Krafteinheit. Der Skalar a ist die Magnitude des Stoßes und muss eine Impulseinheit besitzen. Aus den Gleichungen 2.1 und 2.8 folgt

$$m\cdot\ddot{x}(t) + d\cdot\dot{x}(t) + k\cdot x(t) = a\cdot\delta(t-\tau). \tag{2.9}$$

bzw. mit der Einführung eines Dämpfungsfaktors $d^* = \frac{d}{2m}$ und der Kreisfrequenz $\omega = \frac{\sqrt{k}}{m}$

$$\ddot{x}(t) + 2d^*\cdot\dot{x}(t) + \omega^2\cdot x(t) = \frac{a}{m}\cdot\delta(t-\tau). \tag{2.10}$$

Mit der Annahme, dass das System vor dem Stoß in Ruhe ist, kann der Impuls vor dem Stoß als

$$I_v = \int_{\tau-\varepsilon}^{\tau+\varepsilon} f(t)dt = \int_{\tau-\varepsilon}^{\tau+\varepsilon} a\cdot\delta(t-\tau)dt = a \tag{2.11}$$

und der Impuls nach dem Stoß als

$$I_n = m \cdot \dot{x}(\tau) \tag{2.12}$$

formuliert werden. Aus der Newtonschen Stoßhypothese und unter der Annahme, dass beim Stoß keine mechanische Energie verloren geht, folgt

$$I_v = I_n, \tag{2.13}$$

und damit

$$\dot{x} = \frac{a}{m}. \tag{2.14}$$

Die homogene Lösung der Gleichung 2.10 ergibt sich als

$$x(t) = e^{-d^* t}\ (A \sin(\omega_d t) + B \sin(\omega_d t)), \tag{2.15}$$

siehe [Luz92] und [WS12] für die Herleitung. Die Unbekannten A und B ergeben sich aus den Anfangsbedingungen $x(\tau) = 0$ und $\dot{x} = \frac{a}{m}$ und daraus berechnet sich die Impulsantwort eines gedämpften Schwingers mit einem Freiheitsgrad als

$$x(t) = \frac{a}{m\omega_D} e^{-d^* t}\ \sin(\omega_d t) \tag{2.16}$$

für die Zeitpunkte nach dem Stoß, also $t \geq \tau + \epsilon$, siehe [Luz92].

Anstatt vom Impulserhaltungsgesetz kann auch das Energieerhaltungsgesetz verwendet werden. Für das oben genannte Beispiel kann die Stoßgleichung zwar stützend auf das Verhältnis $E = \frac{p^2}{2\ m}$ in eine Energiegleichung umwandeln aber sobald die Parameter bzw. Konstanten u.a.

- miteinander gekoppelt,
- zeitabhängig,
- über nichtlineare Verhältnisse definiert

sind, werden die Bewegungsgleichungen sehr schwer bis nicht mehr analytisch lösbar. Die numerischen Verfahren wie Finite-Elemente-Methode bieten Ansätze für die größeren und komplizierteren Strukturen mit u.a. nichtlinearen Materialeigenschaften. Im Folgenden werden Grundkenntnisse in der Finite-Elemente-Methode vorausgesetzt und für diese Studienarbeit wichtige Methoden erläutert, ohne auf die Grundlagen einzugehen.

2.2. Inkrementelle Berechnung mit der Finite-Elemente-Methode

Das dynamische Verhalten von angeregten Systemen kann mit Hilfe der Differentialgleichungen berechnet werden. Vor Beginn eine FEM-Berechnung müssen für die vorliegende Analyse geeignete Methoden ausgewählt werden. Zu denen gehören u.a.

- die geeignete Integrationsmethode und
- die geeignete Zeitdiskretisierung.

In dieser Studienarbeit wird ein Stoßproblem diskutiert, das ein großes Modell, sowie Hyperelastizitäten sowie pfadabhängige Nichtlinearitäten besitzt. Um ein Grundverständnis über die in der FEM verwendeten Integrationsmethoden zu vermitteln, werden im Folgenden zuerst die numerischen Integrationsmethoden erläutert.

2.2.1. Numerische Integrationsverfahren

Für die numerische Berechnung von Differentialgleichungen stehen mehrere Verfahren zur Verfügung, die grundsätzlich als

- explizite und
- implizite

Integrationsverfahren in zwei Kategorien unterteilt werden. Diese Unterscheidung spielt u.a. beim Lösen nichtlinearer Probleme mit Finite-Elemente-Methode eine wichtige Rolle. Der Hauptunterschied beider Verfahren liegt darin, dass

- die expliziten Verfahren mit einer Ansatzfunktion vom aktuellen Zustand das nächste Inkrement berechnen und

- die impliziten Verfahren mit einer Ansatzfunktion vom aktuellen und dem nächsten Zustand das nächste Inkrement berechnen.

$\mathbf{Y}(t)$ sei der aktuelle Zustand und $\mathbf{Y}(t+\Delta t)$ der nächste Zustand des Systems. Δt ist infinitesimales Zeitintervall. Somit berechnet ein explizites Verfahren den nächsten Zustand $\mathbf{Y}(t+\Delta t)$ mit

$$\mathbf{Y}(t+\Delta t) = F_{explizit}(\mathbf{Y}(t)) \tag{2.17}$$

mit einer Ansatzfunktion $F_{explizit}$. Stattdessen löst ein implizites Verfahren die Gleichung

$$G_{implizit}(\mathbf{Y}(t), \mathbf{Y}(t+\Delta t)) = 0 \tag{2.18}$$

um den nächsten Zustand $\mathbf{Y}(t+\Delta t)$ zu berechnen. Um diesen Unterschied zu veranschaulichen, kann das explizite und implizite Euler-Verfahren in Betracht gezogen werden.

Sei $\dot{y}(t) = \frac{dy}{dt} = 2y^2$ mit der Anfangsbedingung $y(0) = 0$. Das explizite Vorwärts-Eulerverfahren berechnet den nächsten Schritt mit dem Ansatz

$$\dot{y}_k(t) = \frac{y_{k+1} - y_k}{\Delta t} = 2y_k^2 \tag{2.19}$$

als

$$y_{k+1} = 2y^2\Delta t + y_k \tag{2.20}$$

wobei y_k dem $y(t_k)$ und y_{k+1} dem $y(t_{k+1})$ entspricht, in dem k das jeweilige Inkrement und t_k und t_{k+1} die aufeinander folgenden diskreten Zeitpunkte sind. Hingegen löst das implizite Euler-Rückwärtsverfahren die Gleichung

$$\dot{y}_k(t) = \frac{y_{k+1} - y_k}{\Delta t} = 2y_{k+1}^2 \tag{2.21}$$

für den nächsten Schritt und die Lösung ergibt sich aus Nullstellenberechnung als

$$y_{k+1} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 8\Delta t y_k}}{4\Delta t} \tag{2.22}$$

Im Folgenden wird dieser Zusammenhang an einer Finite-Elemente Struktur erläutert. Die Bewegungsgleichungen einer dynamisch belasteten Struktur lauten

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{D} \cdot \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}, \tag{2.23}$$

in dem $\mathbf{M}$ die Massenmatrix, $\mathbf{D}$ die Dämpfungsmatrix, $\mathbf{K}$ die Steifigkeitsmatrix, $\mathbf{F}$ der Vektor der äußeren Kräfte und $\mathbf{U}$, $\dot{\mathbf{U}}$, $\ddot{\mathbf{U}}$ jeweils die Knotenverschiebung, -geschwindigkeit und -beschleunigung ist. Sei das System nicht gedämpft und $\mathbf{I}^t = \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}^t$ der Vektor der auf die Knoten wirkenden inneren Kräfte, so kann die Gleichung 2.23 als

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}^t = \mathbf{F}^t - \mathbf{I}^t \tag{2.24}$$

geschrieben werden.

2.2.1.1. Explizite Integration

Nach Finite-Differenzen-Verfahren lauten die Knotenpunktbeschleunigungen zum Zeitpunkt t ausgedrückt mit Knotenverschiebungen

$$\ddot{\mathbf{U}}^t = \frac{\mathbf{U}^{t-\Delta t} - 2\mathbf{U}^t + \mathbf{U}^{t+\Delta t}}{(\Delta t)^2} = \frac{\mathbf{F}^t - \mathbf{I}^t}{\mathbf{M}} \tag{2.25}$$

und ausgedrückt mit Knotengeschwindigkeiten

$$\ddot{\mathbf{U}}^t = \frac{\dot{\mathbf{U}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \dot{\mathbf{U}}^{t-\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{F}^t - \mathbf{I}^t}{\mathbf{M}}. \tag{2.26}$$

Wird die Gleichung 2.26 nach $\dot{\mathbf{U}}$ aufgelöst, so erhält man

$$\dot{\mathbf{U}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} = \dot{\mathbf{U}}^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \frac{\mathbf{F}^t - \mathbf{I}^t}{\mathbf{M}}\Delta t = \frac{\mathbf{U}^t - \mathbf{U}^{t-\Delta t}}{\Delta t} + \frac{\mathbf{F}^t - \mathbf{I}^t}{\mathbf{M}}\Delta t \tag{2.27}$$

Auf der anderen Seite kann $\dot{U}$ als

$$\dot{\mathbf{U}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} = \frac{\mathbf{U}^{t+\Delta t} - \mathbf{U}^t}{\Delta t} \tag{2.28}$$

formuliert werden. Aufgelöst nach $\mathbf{U}^{t+\Delta t}$ ergibt sich

$$\mathbf{U}^{t+\Delta t} = \mathbf{U}^t + \dot{\mathbf{U}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} \Delta t \tag{2.29}$$

und somit können die Knotenverschiebungen im nächsten Zeitpunkt $\mathbf{U}^{t+\Delta t}$ als

$$\mathbf{U}^{t+\Delta t} = \mathbf{U}^t + (\frac{\mathbf{U}^t - \mathbf{U}^{t-\Delta t}}{\Delta t} + \frac{\mathbf{F}^t - \mathbf{I}^t}{\mathbf{M}} \Delta t) \Delta t \tag{2.30}$$

berechnet werden, da die Knotenverschiebungen in dem aktuellen $\mathbf{U}^t$ sowie dem früheren Zeitpunkt $\mathbf{U}^{t-\Delta t}$ bekannt sind.

2.2.1.2. Implizite Integration

Bei der impliziten Integration wird das Gleichgewicht im nächsten Zeitpunkt betrachtet. Durch einen Iterationsansatz wird der Fehler, der durch den Integrationsansatz entsteht, so lange verkleinert, bis er im gewünschten Intervall liegt und der berechnete Schritt wird als nächster Zeitpunkt genommen.

Um dieses Verfahren zu veranschaulichen, wird das System zunächst als dämpfungs- und trägheitsfrei betrachtet. Somit lautet die Bewegungsgleichung 2.23 zum Zeitpunkt $t + \Delta t$

$$\mathbf{F}^{t+\Delta t} - \mathbf{I}^{t+\Delta t} = 0 \tag{2.31}$$

Die Differenzenformulierung der inneren Knotenkräfte und der Knotenverschiebungen sei

$$\mathbf{I}^{t+\Delta t} = \mathbf{I}^t + d\mathbf{I} \tag{2.32}$$

bzw.

$$\mathbf{U}^{t+\Delta t} = \mathbf{U}^t + d\mathbf{U} \tag{2.33}$$

Damit kann eine Approximation für die Knotenverschiebungen im nächsten Zeitpunkt berechnet werden. Man möchte hierbei die Knotenverschiebungsdifferenz

$d\mathbf{U}$ solange iterieren, bis ein ausgewähltes Kriterium erfüllt ist. Dieses Kriterium ist typischerweise, dass der Vektor der inneren Kräfte $\mathbf{I}^t$ mit äußeren Kräften verträglich ist bzw. die Bewegungsgleichung in dem Zeitpunkt den kleinsten Fehler aufweist. Deswegen wird davon gesprochen, dass die inneren Kräfte mit äußeren Kräften verglichen werden, siehe [Zim].

Diese Prozedur kann mit den Gleichungen

$$\mathbf{K}^t \Delta\mathbf{U}_{(i)} = \mathbf{F}^{t+\Delta t} - \mathbf{I}^{t+\Delta t}_{(i-1)} \tag{2.34}$$

und

$$\mathbf{U}^{t+\Delta t}_{(i)} = \mathbf{U}^{t+\Delta t}_{(i-1)} + \Delta\mathbf{U}_{(i)} \tag{2.35}$$

formuliert werden, wobei i der Iterationsindex mit $i \in \mathbb{N}$ und K^t die Tangentensteifigkeitsmatrix mit $d\mathbf{I} = \mathbf{K}^t d\mathbf{U}$ ist.

Unter Berücksichtigung der Massen- und Dämpfungsmatrix wird die Gleichung 2.34 auf

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t}_{(i)} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{U}}^{t+\Delta t}_{(i)} + \overset{t}{\mathbf{K}} \Delta\mathbf{U}_{(i)} = \mathbf{F}^{t+\Delta t} - \mathbf{I}^{t+\Delta t}_{(i-1)} \tag{2.36}$$

erweitert. Die Näherungen der Knotenverschiebungen dienen dazu, die inneren Kräfte zu berechnen. Die rechte Seite wird somit in jedem Iterationsschrit mit der Einführung der inneren Kräfte aus dem vorherigen Schritt verbessert, z.B. mit Hilfe der Nullstellenberechnung durch die Newton-Iteration, siehe [Saa].

2.2.1.3. Gegenüberstellung der beiden Verfahren

Die expliziten Verfahren berechnen die Knotenverschiebungen für den nächsten Schritt mit einem Integrationsansatz und validieren dabei die Knotenkräfte nicht. Hingegen müssen die impliziten Verfahren für jeden einzelnen Zeitschritt eine Iteration durchführen. Deswegen dauert die Berechnung eines einzelnen Zeitschrittes bei einem impliziten Verfahren prinzipiell länger als bei einem expliziten Verfahren. Dafür muss bei einem expliziten Verfahren die Schrittweite sehr klein gewählt werden, um die Integrationsfehler in gewünschten Maßen zu halten. Bei den impliziten Verfahren kann die Schrittweite beliebig hoch gesetzt werden, solange sie mit pfad- bzw. materialabhängigen Nichtlinearitäten verträglich ist. Ansonsten kann es vorkommen, dass der implizite Solver trotz hoher Anzahl an Iterationsschritten die kinetischen Gleichungen nicht erfüllen kann. Daher wird typischerweise eine maximale Anzahl an erlaubten Iterationsschritten eingeführt, um solche Inkremente abzufangen und die Berechnung abzubrechen.

2.2.2. Auswahl der geeigneten Schrittweite

Wie im Abschnitt 2.2.1 beschrieben, wird die Zeit bei einer numerischen Integration in kleinere Zeitschritte geteilt. Je nach Problemstellung und Verfahren muss dem Solver eine Schrittweite vorgegeben werden. Hierbei stehen meist zwei Optionen zur Verfügung:

- Konstante Schrittweite und
- Variable Schrittweite.

2.2.2.1. Konstante Schrittweite

Bei der Wahl einer geeigneten Schrittweite sind generell zwei Gesichtspunkte maßgebend. Der erste Punkt ist, dass kleinere Schrittweiten meist zu einer stabileren und zuverlässigeren Lösung führen und der Zweite ist, dass sich die Rechenzeit bei der Wahl kleinerer Schrittweiten dementsprechend erhöht. Streng genommen, kann die erste Tatsache nicht allgemein behauptet werden, da eine größere Schrittweite ggf. die Dynamik besser abtasten kann. Trotzdem erfolgt die Wahl einer geeigneten Schrittweite generell unter Berücksichtigung dieser beiden Kriterien. Der Integrator führt die Rechnung mit konstanter Schrittweite

$$\Delta t = konst. \text{ mit } t_{i+1} = t_i + \Delta t,\ i = 0 \ldots n \text{ und } t_0 = t_{anfang},\ t_n = t_{ende} \quad (2.37)$$

durch.

2.2.2.2. Variable Schrittweite

Bei dynamischen Untersuchungen ist es häufig der Fall die Zeitgebiete unterschiedliche große Schrittweiten erfordern. Bei pfadabhängigen Nichtlinearitäten und Kontaktproblemen wird die Differenz der benötigten Schrittweiten in unterschiedlichen Zeitbereichen besonders groß. Bei einer Berechnung mit konstanter Schrittweite führt diese Tatsache zu kleinen Schrittweiten und demzufolge zu höheren Rechenzeiten. Das Stoßproblem in dieser Studienarbeit ist ein Beispiel für solche Modelle. Während dem Stoß sind die Knotenverschiebungsdifferenzen zu den vorherigen Schritten so groß, dass dieser Bereich höher aufgelöst werden muss. Dafür kann aber die erregte Schwingung nach dem Stoß mit deutlich größerer Schrittweite abgetastet werden.

Bei dieser Problematik kann während der Berechnung eines Inkrements die erforderliche Schrittweite für das nächste Inkrement berechnet werden. Dafür stehen unterschiedliche Ansätze bzw. Schrittweitensteuerungsalgorithmen zur Verfügung. Kommerzielle Solver haben je nach Integrator meist eine automatisierte Schrittweitensteuerung, siehe [DS]. Im Folgenden werden die Funktionsweisen zweier wichtiger adaptiven Algorithmen erläutert, ohne auf ihre mathematischen Hintergründe einzugehen. Die ausführlicheren mathematischen Kenntnisse für die Implementierung dieser Agorithmen können u.a. durch [Mel] erworben werden.

Adaptive Algorithmen

Bei den adaptiven Algorithmen wird der Konsistenzfehler in jedem Schritt bestimmt und eine Vorhersage für die nächste erforderliche Schrittweite getroffen. Solange der Fehler, der durch die neue Schrittweite entstehen würde, der angegebenen Toleranz entspricht, wird diese Schrittweite genommen, siehe [Mel].

Diese Prozedur wird im Algorithmus 1 veranschaulicht.

Die Fehler, die in jedem Schritt entstehen, addieren sich. Daher muss darauf geachtet werden, ob die eingegebene Toleranz für einen einzelnen Schritt gewährleistet werden soll oder für die ganze Integration. Wenn sie für die ganze Integration gelten muss, muss der erlaubte Fehler dementsprechend skaliert werden.

Algorithmus 1: Adaptive Schrittweitensteuerung

Eingabe der gewünschten Fehlertoleranz;
Eingabe der initiierenden Schrittweite;
while $t < t_{ende}$ **do**
  Berechne eine Schrittweite Δt, mit der der Fehler des nächsten Schrittes der eingegebenen Fehlertoleranz entspricht;
  $t := t + \Delta t$;
end

Um die in dem Algorithmus genannte Schrittweite Δt zu berechnen, stehen u.a. folgende Methoden zur Verfügung

Schrittweitensteuerung durch Extrapolation

Bei einer Schrittweitensteuerung durch Extrapolation wird ein Schritt mit der aktuellen Schrittweite und zwei Schritte mit der Hälfte dieser Schrittweite gemacht und basierend auf dem Verhältnis von beiden Ergebnissen entschieden, ob für den Schritt eine kleinere Schrittweite erforderlich ist. Diese Prozedur wird im folgenden

Algorithmus 2 veanschaulicht, vgl. [Jus].

Algorithmus 2: Schrittweitensteuerung durch Extrapolation

Eingabe der gewünschten Fehlertoleranz ϵ_{tol} ;
Eingabe der initiierenden Schrittweite;
while $t < t_{ende}$ **do**
  Berechne den Wert $x_{i,1}$ mit zwei Schritten;
  Berechne den Wert $x_{i,2}$ mit einem Schritt Δt ;
  Berechne die Schrittweite t^* ausgehend von t_0 ;

$$t^{*} = \frac{\sqrt[p]{(1-2^{-p})^{*} tol}}{(x_{i,1} - x_{i,2})}$$

  if $t^{*} \leq \frac{t}{4}$ **then**

$$\Delta t := 2t^{*}$$

  else

$$t_i := t_i + \Delta t$$

  end
end

Eingebettete Runge-Kutte Methode

In der Variante mit Schrittweitensteuerung durch Extrapolation wird in jedem Iterationsschritt eine zusätzliche Funktion ausgewertet. Die Runge-Kutte Methode vergleicht hingegen in jedem Inkrement die Lösung der höchsten Ordnung mit der Lösung der eins-niedrigeren Ordnung. Somit wird keine zusätzliche Funktion ausgewertet. Diese Prozedur wird im folgenden Algorithmus 3 dargestellt, siehe [Mel].

Algorithmus 3: Eingebettete Schrittweitensteuerung vom Runge-Kutte Verfahren

```
Eingabe der gewünschten Fehlertoleranz ϵ_tol;
Eingabe der initiierenden Schrittweite;
t := t_0;
while t < t_ende do
    Berechne den Wert x_{i,1} aus der p-ten Ordnung;
    Berechne den Wert x_{i,2} aus der p + 1-ten Ordnung;
    Schätze den Fehler ϵ_i der schlechteren Ordnung if ϵ_i ≈ ϵ_tol then
        Akzeptiere die bessere Aproximation;
        Berechne die neue Schrittweite;
    else
        Δt := Δt/2 ;
    end
end
```

3. Der Rohrmodellgenerator „PipeGen“

Im Rahmen dieser Studienarbeit wird das Matlab-Tool „PipeGen“ programmiert, mit dem durch Benutzereingabe automatisch Rohrmodelle mit mehreren Wanddickenreduzierungen für Parameterstudien erstellt werden können. In diesem Kapitel wird das Funktionsprinzip und die Anwendung dokumentiert. Die im Quellcode verwendeten Algorithmen sind zusätzlich für die Weiterentwicklung im Quellcode dokumentiert, siehe angehängte CD. Die aktuelle Version des PipeGens generiert zwei grundlegende Rohrelemente

- Rohrbogen und
- Lineares Rohr.

Der MPA-Prüfstand „Mock-Up“ besteht aus diesen Grundelementen. Das Tool erfordert folgende Software

- Matlab R2012a,
- AutoCAD 2013 (Command line interface) und
- ABAQUS 6.11 (Command line interface).

3.1. Nomenklatur

In diesem Abschnitt wird auf die Begriffe hingewiesen, die in diesem Kapitel verwendet werden. Mit „radial“ sind die Ebenen gemeint, die die Mittellinie des Rohres senkrecht schneiden. Hingegen folgen die „axialen“ Ebenen parallel zur Mittellinie, siehe Abbildung 3.1

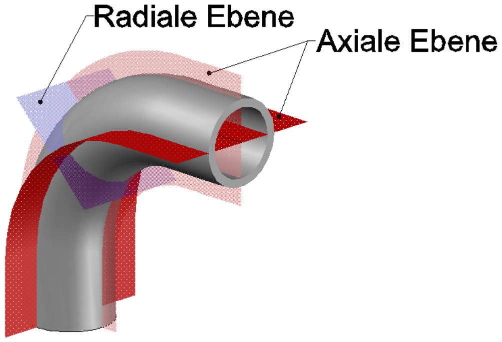


Abbildung 3.1.: Nomenklatur im PipeGen

Die Parameter

- i wird für die axialen Indizes der Gitterpunkte,
- j wird für die radialen Indizes der Gitterpunkte,
- k wird für den Index der Wanddickenreduzierungen,
- $\alpha_{\{...\}}$ wird für die Winkel auf axialen Ebenen und
- $\beta_{\{...\}}$ wird für die Winkel auf radialen Ebenen

verwendet. Mit „Rohrbogen“ (pl. Rohrbogen) wird ein gebogenes Rohr und mit „linearem“ Rohr wird ein gerades Rohr bezeichnet. Die „Wanddickenreduzierung“ ist die Aushöhlung bzw. Volumenabtragung in einem Rohr. Die maximale „Tiefe“ einer Wanddickenreduzierung ist die größte exzentrische Entfernung eines Gitterpunkts von seiner Sollstelle. Ein „Struct“ ist der Mischvariablentyp des Programms Matlab.

3.2. Anwendung von Pipegen

In diesem Abschnitt wird die Anwendung des Rohrmodellgenerators dokumentiert.

3.2.1. Voreinstellung des Matlab-Tools

Vor der ersten Anwendung muss das Skript dem System angepasst werden. Dafür wird das Hauptskript „index.m“ konfiguriert. Dabei werden die folgenden Schritte durchgegangen.

Falls vorhanden, wird der Eingangsstruct „input“ geladen. Im vorliegenden Beispiel ist er als „name.inp“ gespeichert worden.

```
%Inputdatei
load('name.inp');
```

Falls der Eingangsstruct „input“ noch nicht vorhanden ist, wird es im Workspace erstellt. Die Erstellung der Eingangsstructs wird im Abschnitt 3.2.2 und 3.2.3 erläutert.

Es wird eingegeben, ob die Testsimulation zur Validierung des Modells in ABAQUS durchgeführt werden soll. Falls sie durchgeführt werden soll, wird 1 eingegeben, anderenfalls 0.

```
%Abaqus ausfuehren
exec_abaqus=0;
```

Es wird eingegeben, ob der Prozess archiviert werden soll. Falls sie archiviert wird, wird 1 eingegeben, anderenfalls 0.

```
%Prozess archivieren
archive=1;
```

Es wird ein Unterordner für die Archivierung definiert.

```
%Archiveordner
archive_folder='export';
```

Es wird eingegeben, ob das Modell für erweiterte Kompatibilität in eine STEP-Datei konvertiert werden soll.

```
%Sat-Datei in Step-Datei konvertieren
convert_to_step=0;
```

Der Pfad von AutoCAD-CLI wird eingegeben.

```
%Der Pfad zum AutoCAD-CLI
autocad_dir='C:\...\AutoCAD 2013';
```

Der Pfad von Exchanger-CLI wird eingegeben.

```
%Der Pfad zum Cad Exchanger-CLI
```

```
exchanger_dir='C:\...\cad_exchanger\bin\';
```

Nachdem die Voreinstellungen übernommen werden, wird das Hauptskript „index.m“ durchgeführt. Nachdem der Prozess durchgelaufen ist, erscheint die Dauer des Prozesses und die erzeugten Dateien befinden sich in dem voreingestellten Archivordner. Nach der erfolgreichen Durchführung eines Prozesses enthält der Archivordner einen nach Mikrozeit des Prozesses genannten Unterordner (z.B. 09_08_2012_11_03_22_430) mit folgenden Dateien:

- Der Eingang von AutoCAD-CLI, AutoLISP-Skript „import.scr“,
- Die AutoCAD-Datei des Modells „cad_model.dwg“,
- Das Rohrmodell in ACIS-Format „import.sat“,
- Die Informationsdatei für den Prozess „step_info.txt“,
- Eine Kopie des Eingangstructs „input“,
- Eine Kopie des durch Präprozessor bearbeiteten Eingangsstructs „input_processed“,
- Der Python-Eingangsskript der Testsimulation „input.py“,
- Die ABAQUS-Modelldatei der Testsimulation „model.cae“,
- Die Ausgangsdatei der ABAQUS-Testsimulation „result.odb“ und
- falls erfordert, das Rohrmodell in STEP-Format „model.stp“.

Es können mehrere Modelle in einer Schleife mittels Skripts „index_recursive.m“ erstellt werden. Dieses Skript kann für die effiziente Durchführung der Parameterstudien sowie Optimierungsschleifen verwendet werden. Dabei wird ein Eingabestruct nach der oben beschriebenen Prozedur geladen und die zu variierenden Parameter werden innerhalb von der Schleife dynamisch modifiziert. Es wird hierzu zusätzlich die Anzahl der Rekursionsdurchläufe

```
%Die Anzahl an Rekursionsdurchlaeufe
num_of_cycles=3;
```

und die Variationsstatemens

```
%Beispielstatement : Erhoehe die Tiefe der ersten Wanddickenreduzierung
%in jedem Schritt um 0.1
input.thinning.t1.erosion_level=input.thinning.t1.erosion_level+0.1;
```

eingegeben.

3.2.2. Erstellung des Eingabestructs bei den Rohrbogen

Ein Rohrbogen ist als ein gebogenes Rohr modelliert, dessen Mittellinie ein Kreisbogenstück ist. Er wird ggf. mit Verlängerungen an beiden Enden erweitert, durch die die Verbindung zu den Anschlußrohren erfolgt.

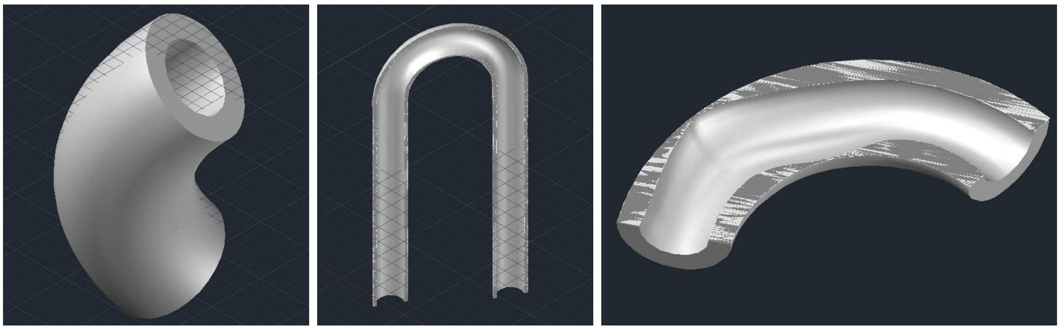


Abbildung 3.2.: Mit PipeGen erstellte Rohrbogen-Modelle

3.2.2.1. Struktur des Eingangs

Vor dem Ausführen des Programms muss ein Struct im Matlab-Workspace erstellt und „input“ benannt werden. Falls vorhanden, kann er auch aus einer Datei geladen werden. Er besitzt die folgende Struktur und Variablentypen für einen Rohrbogen, siehe Abbildung 3.3. Ein Beispiel-Struct ist in der Abbildung A.1 dargestellt. Die Eingangsparameter der allgemeinen Geometrie, des Wanddickenverlaufs und der Wanddickenreduzierung werden im Folgenden ausführlicher erläutert.

Abbildung 3.3.: Input Struktur für einen Rohrbogen

3.2.2.2. Allgemeine Geometrie

Die Eingangsparameter für die allgemeinen Geometrieangaben vom zu erstellenden Rohrbogen sind in der Tabelle 3.1 aufgeführt und in der Abbildung 3.4 visualisiert.

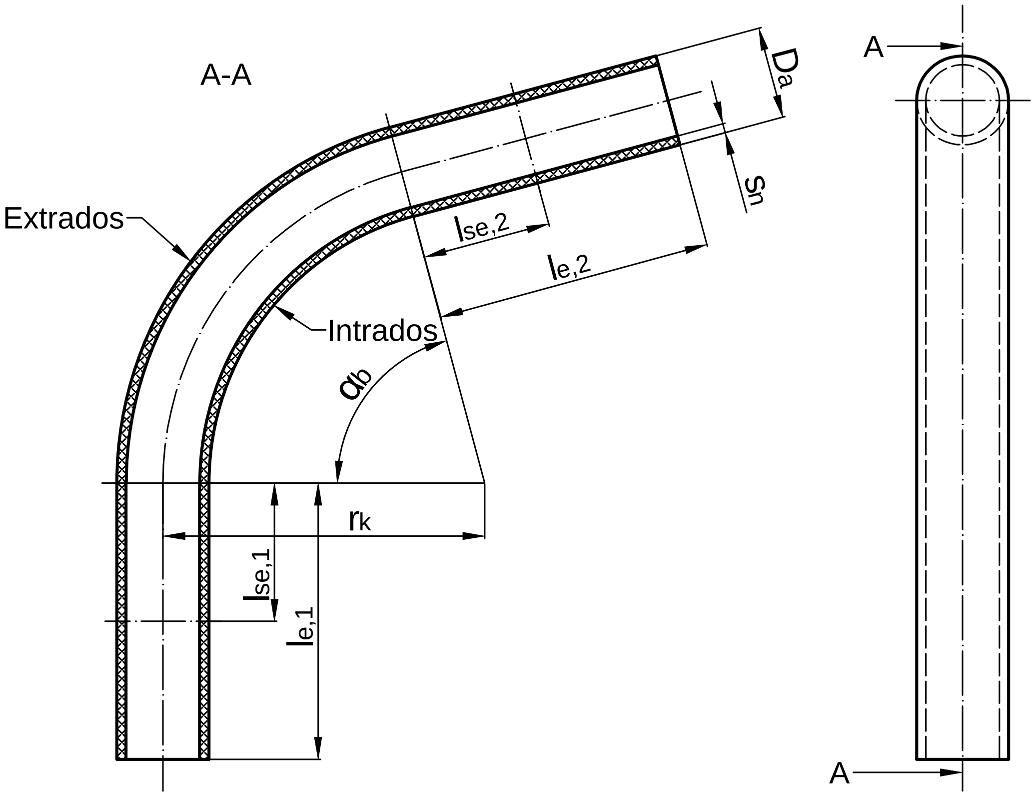


Abbildung 3.4.: Allgemeine Maße der Rohrbogen

Parametername	Bezeichnung	Inputparameter
D_a	Nennaußendurchmesser	D_a
s_n	Nennwanddicke	s_n
α_b	Krümmungswinkel	elbow_angle
r_k	Krümmungsradius	r_k
$L_{e,1}, L_{e,2}$	Länge der Verlängerungen	l_an_1, l_an_2
$L_{se,1}, L_{se,2}$	Standardisierungsoffset der Verlängerungen	l_fade_1, l_fade_2

Tabelle 3.1.: Parameterbezeichnung allgemeiner Geometrie des Rohrbogens

Nennaußendurchmesser (D_a)

Der Nennaußendurchmesser D_a ist der konstante Außendurchmesser des Rohres ohne Wanddickenreduzierung. Der mögliche Wertebereich ist unbegrenzt, solange er mit der gesamten Geometrie kompatibel ist ($D_a \in \mathbb{R}^+$).

Nennwanddicke (s_n)
Die Nennwanddicke s_n ist die Wanddicke, auf die die Anschlüsse normalisiert werden. Sie ist keine Angabe des Wanddickenverlaufs (s. Profilangabe), sondern nur ein Richtwert für die ggf. erforderte Anschlussanpassung. Sie kann einen beliebigen Float-Wert besitzen, solange er geometrisch sinnvoll gesetzt ist ($s_n \in \mathbb{R}^+, 0 < s_n < \frac{D_a}{2}$).

Krümmungswinkel (α_b)
Der Krümmungswinkel α_b ist die radiale Breite des Bogens. Die radiale Breite kann einen beliebigen Float-Wert zwischen $0°$ und $360°$ besitzen, solange in der Geometrie keine Kollision vorliegt ($\alpha_b \in \mathbb{R}^+, 0 < \alpha_b < 360$).

Krümmungsradius (r_k)
Der Krümmungsradius r_k ist der Radius der Mittellinie des Bogens. Er kann einen beliebigen positiven Float-Wert besitzen ($r_k \in \mathbb{R}^+$).

Länge der Verlängerungen ($l_{e,1}, L_{e,2}$)
Die Parameter $l_{e,1}$ und $l_{e,2}$ sind die Längen der Anschlussverlängerungen. Sie können einen beliebigen positiven Float-Wert besitzen, solange in der Geometrie keine Kollision vorliegt ($l_{e,x} \in \mathbb{R}^+$).

Standardisierungsoffset der Verlängerungen ($l_{se,1}, L_{se,2}$)
Die Parameter $l_{se,1}$ und $l_{se,2}$ geben jeweils den Abstand des Normquerschnitts an, ab dem die eingegebene Nennwanddicke in den Verlängerungen gewährleistet ist. Der Variablentyp ist Float und muss einen Wert zwischen 0 und der jeweiligen Verlängerungslänge besitzen ($l_{e,x} \in \mathbb{R}^{+,} 0 < l_{se,x} < l_{e,x}$).

3.2.2.3. Profilangabe

Die Eingangsparameter für die Profilangaben vom zu erstellenden Rohrbogen sind in der Tabelle 3.2 aufgeführt und in der Abbildung 3.5 visualisiert.

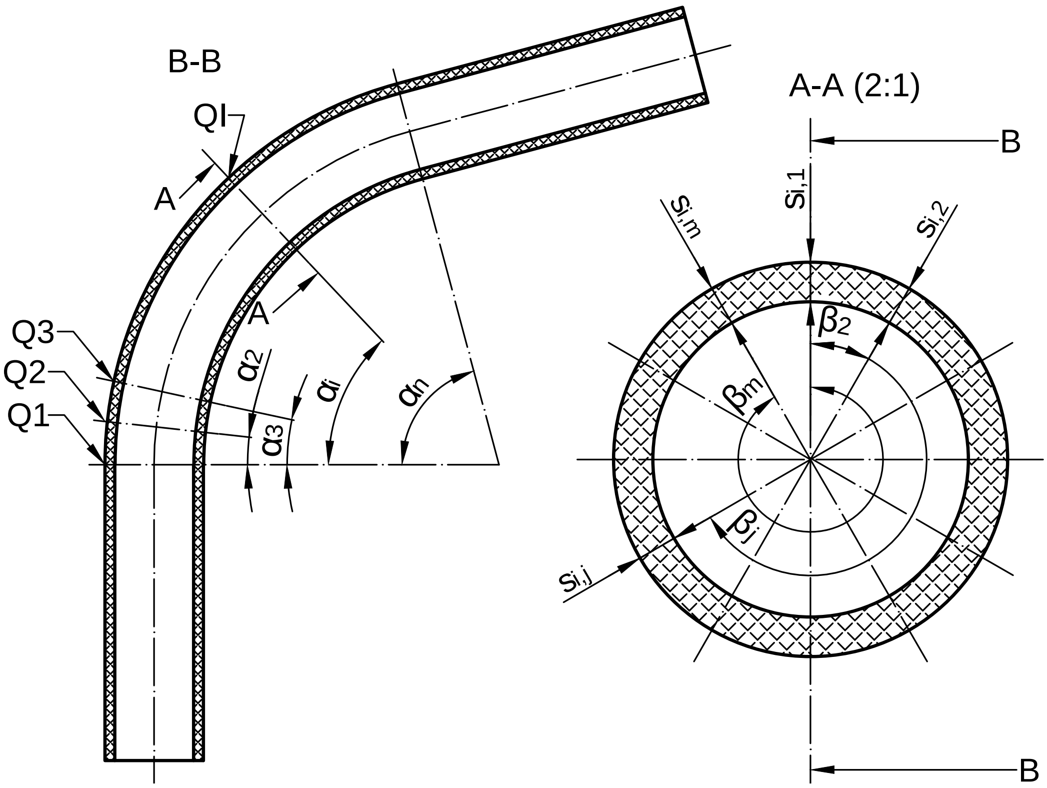


Abbildung 3.5.: Profilangaben der Rohrbogen

Parametername	Bezeichnung	Inputparameter
α_i	Radiale Position des i-ten Querschnitts	profile_positions
β_j	Radiale Position der j-ten Wanddicke	thickness_radial_positions
$s_{i,j}$	j-te Wanddicke im Querschnitt i	thickness

Tabelle 3.2.: Parameterbezeichnung bei Profilangabe des Rohrbogens

Gebogene Zylinderkoordinaten der Wand ($s_{i,j}$)

Ein Querschnitt wird durch einen Spline approximiert, der über radial verteilte Punkte aufgespannt ist. Der Abstand zwischen der Mittellinie und einem Gitterpunkt entspricht dabei dem im jeweiligen Querschnitt und radialen Winkel gemessenen bzw. erwünschten inneren Radius. Diese Radien s_{ij} werden durch die Wanddicken in der Matrix „thickness" konstruiert. ($s_{i,j} \in \mathbb{R}^{+,}0 < s_{i,j} < \frac{D_a}{2}$).

Radiale Offsets der Querschnitte (α_i)
Die radialen Offsets α_i sind die Positionen der Querschnitte, durch die die Rohrwand approximiert wird. Falls sie explizit eingegeben sind, werden die Querschnitte nach der Eingabe gesetzt. Falls sie nicht eingegeben sind, werden sie auf den gesamten Bogen gleichmäßig verteilt. Somit ist der Vektor „profile_positions“ eine optionale Eingabe. Im Falle einer vorgegebener Querschnittstreuung muss darauf geachtet werden, dass der erste Querschnitt auf 0° liegt, der letzte auf dem Bogenendquerschnitt α_b liegt, alle Einträge inkrementell sortiert sind und die Dimension des Vektors der vertikalen Dimension der Matrix „thickness“ übereinstimmt ($\alpha_i \in \mathbb{R}^{+,}0 \leq \alpha_i \leq \alpha_b$).

Radiale Streuung der Wanddicken (β_j)
Die radialen Positionen der Gitterpunkte in den Querschnitten können in einem Vektor „thickness_radial_positions“ vorgegeben werden. Wenn dieser Vektor nicht eingegeben ist, werden die Punkte gleichmäßig auf den Umfang verteilt. Dabei werden so viele Punkte wie die horizontale Dimension der Matrix „thickness“ aber mindestens 12 Punkte genommen, um eine Rundform zu gewährleisten. Bei der Eingabe des Vektors muss darauf geachtet werden, dass die radialen Positionen in Grad mit 0 anfangend, inkrementell angegeben sind und der letzte Eintrag (somit alle Einträge) kleiner als 360 ist ($\beta_j \in \mathbb{R}_0$, $0 \leq \beta_j < 360$).

In der folgenden Tabelle 3.3 werden die Varianten der Profilangabe und deren Interpretation durch Beispiele erläutert. Hierbei steht die linke Spalte für die Positionen der axialen Ebenen α_i ($\equiv$ „profile_positions“), die oberste Zeile für die Positionen der radialen Ebenen β_j ($\equiv$ „thickness_radial_positions“). Die rechts untere Matrix, die von Doppellinien begrenzt wird, ist die Matrix „thickness“.

Eingegeben

α_i \ β_j	0	20	24	98	119	160	194	230	240	275	310	346
0	9	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11
15	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11	9
40	9	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11
51	10	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11	8
67	12	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11
79	11	11	8	7	9	11	10	8	7	9	11	10
90	9	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11	9

Interpretiert $\Downarrow$

α_i \ β_j	0	20	24	98	119	160	194	230	240	275	310	346
0	9	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11
15	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11	9
40	9	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11
51	10	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11	8
67	12	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11
79	11	11	8	7	9	11	10	8	7	9	11	10
90	9	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11	9

Eingegeben

α_i \ β_j	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	9	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11
-	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11	9
-	9	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11
-	10	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11	8
-	12	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11
-	11	11	8	7	9	11	10	8	7	9	11	10
-	9	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11	9

Interpretiert $\Downarrow$

α_i \ β_j	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
0	9	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11
15	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11	9
30	9	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11
45	10	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11	8
60	12	11	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11
75	11	11	8	7	9	11	10	8	7	9	11	10
90	9	10	8	7	9	11	10	8	7	9	11	9

Eingegeben

α_i \ β_j	-
-	10

Interpretiert $\Downarrow$

α_i \ β_j	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
90	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Eingegeben

α_i \ β_j	-	-	-
-	10	16	11
-	10	4	9

Interpretiert ⇓

α_i \ β_j	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
0	10	11	12	13	14	15	16	15	14	13	12	11
90	10	9	8	7	6	5	4	5	6	7	8	9

Tabelle 3.3.: Eingabemöglichkeiten für die Matrix $s_{i,j}$ ($\equiv$ „thickness“)

3.2.2.4. Angabe der lokalen Wanddickenreduzierungen

Es können beliebig viele lokale Wanddickenreduzierungen in einem Rohr konstruiert werden. Dafür müssen die einzelnen Wanddickenreduzierungen im Struct „thinning“ als untere Structs, mit „t1“ anfangend und inkrementell eingegeben werden (t1, t2, t3, ...). Die Eingabeparameter für eine einzelne Wanddickenreduzierung bei einem Rohrbogen sind in der Tabelle 3.4 aufgeführt und in der Abbildung 3.6 visualisiert.

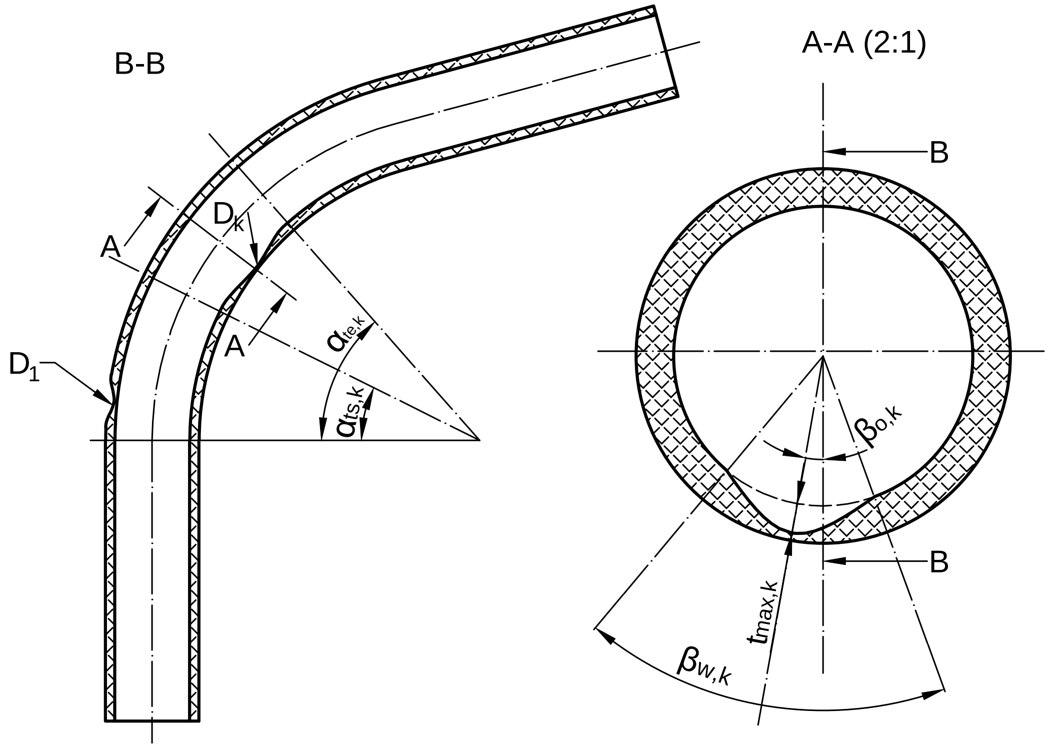


Abbildung 3.6.: Angabe der Wanddickenreduzierung bei den Rohrbogen

Parametername	Bezeichnung	Inputparameter
D_k	k-te lokale Wanddickenreduzierung	-
$\alpha_{ts,k}$	Anfangswinkel der k-ten WD-Reduzierung auf der radialen Ebene	erosion_start_position
$\alpha_{te,k}$	Endwinkel der k-ten WD-Reduzierung auf der radialen Ebene	erosion_end_position
$\beta_{o,k}$	Radiale Verschiebung der k-ten WD-Reduzierung	erosion_radial_position
$\beta_{w,k}$	Radiale Breite der k-ten WD-Reduzierung	erosion_radial_width
$t_{max,k}$	Maximale Tiefe der k-ten WD-Reduzierung	erosion_level
	Bezugswand	erosion_wall

Tabelle 3.4.: Parameterbezeichnung bei der Wanddickenreduzierungsangabe am Rohrbogen

Anfangswinkel der Wanddickenreduzierung auf der axialen Ebene ($\alpha_{ts,k}$)
Der Anfangswinkel der k-ten Wanddickenreduzierung auf der axialen Ebene $\alpha_{ts,k}$ darf nur einen positiven Float-Wert besitzen, der kleiner als der Endwinkel $\alpha_{te,k}$ ist ($\alpha_{ts,k} \in \mathbb{R}_0, 0 \leq \alpha_{ts,k} < \alpha_{te,k}$).

Endwinkel der Wanddickenreduzierung auf der axialen Ebene ($\alpha_{te,k}$)
Der Endwinkel der k-ten Wanddickenreduzierung auf der axialen Ebene $\alpha_{te,k}$ darf nur einen positiven Float-Wert besitzen, der kleiner oder gleich Krümmungswinkel α_b ist ($\alpha_{te,k} \in \mathbb{R}_0, \alpha_{ts,k} < \alpha_{te,k} \leq \alpha_b$).

Radiale Verschiebung der Wanddickenreduzierung ($\beta_{o,k}$)
Die radiale Positionierung der Wanddickenreduzierung erfolgt über den Winkel $\beta_{o,k}$, der zwischen der $0°$-Position und dem Punkt maximaler Wanddickenreduzierung, aufgespannt ist. Durch diese Größe wird bestimmt, ob sich die Wanddickenreduzierung im Intrados oder Extrados befindet ($\beta_{o,k} \in \mathbb{R}_0, 0 \leq \beta_{o,k} < 360$).

Radiale Breite der Wanddickenreduzierung ($\beta_{w,k}$)
Die radiale Breite $\beta_{w,k}$ ist die radiale Spannweite der Wanddickenreduzierung. Sie

ist mittig um $\beta_{o,k}$ verschoben und hat im Mittelpunkt des Intervalls sein Maximum ($\beta_{w,k} \in \mathbb{R}_0, 0 \leq \beta_{w,k} < 360$).

Maximale Tiefe der Wanddickenreduzierung($t_{max,k}$)
Die maximale Tiefe $t_{max,k}$ gibt die Tiefe an, die an der tiefsten Stelle der Wanddickenreduzierung gewährleistet werden soll. Überschreitet die Tiefe die Wanddicke $s^k_{i,j}$ an der Stelle, so entsteht ein Loch. ($t_{max,k} \in \mathbb{R}_0, 0 \leq t_{max,k} < s^k_{i,j}$).

Bezugswand der Wanddickenreduzierung
Die Eingabe, ob die Wanddickenreduzierung an der Innen- oder Außenseite des Rohres konstruiert wird, erfolgt mit dem Parameter „erosion_wall“. Für eine Wanddickenreduzierung an der Innenseite des Rohres hat dieser den String-Wert „inner“ und für die Aussenseite „outer“.

3.2.3. Erstellung des Eingabestructs bei den linearen Rohren

Ein lineares Rohr ist ein gerades Rohrstück, dessen Mittellinie einer Gerade entspricht.

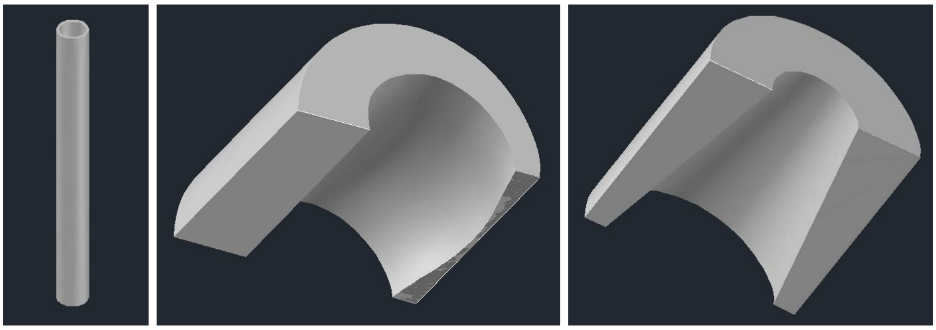


Abbildung 3.7.: Mit PipeGen erstellte lineare Rohrmodelle

3.2.3.1. Struktur des Eingangs

Der Eingang der Softwarekette „PipeGen“ ist ein Matlab-Struct, der „input“ heißt. Er besitzt die folgende Struktur und Variablentypen für einen Rohrbogen, siehe Abbildung 3.8. Zuerst wird der Struct nach diesem Schema erstellt und in den Workspace geladen, bevor das Hauptskript „index.m“ ausgeführt wird. Ein Beispiel-Struct ist in der Abbildung A.2 dargestellt. Die Eingangsparameter der allgemeinen Geometrie, des Profils und der Wanddickenreduzierung werden im Folgenden ausführlicher erläutert.

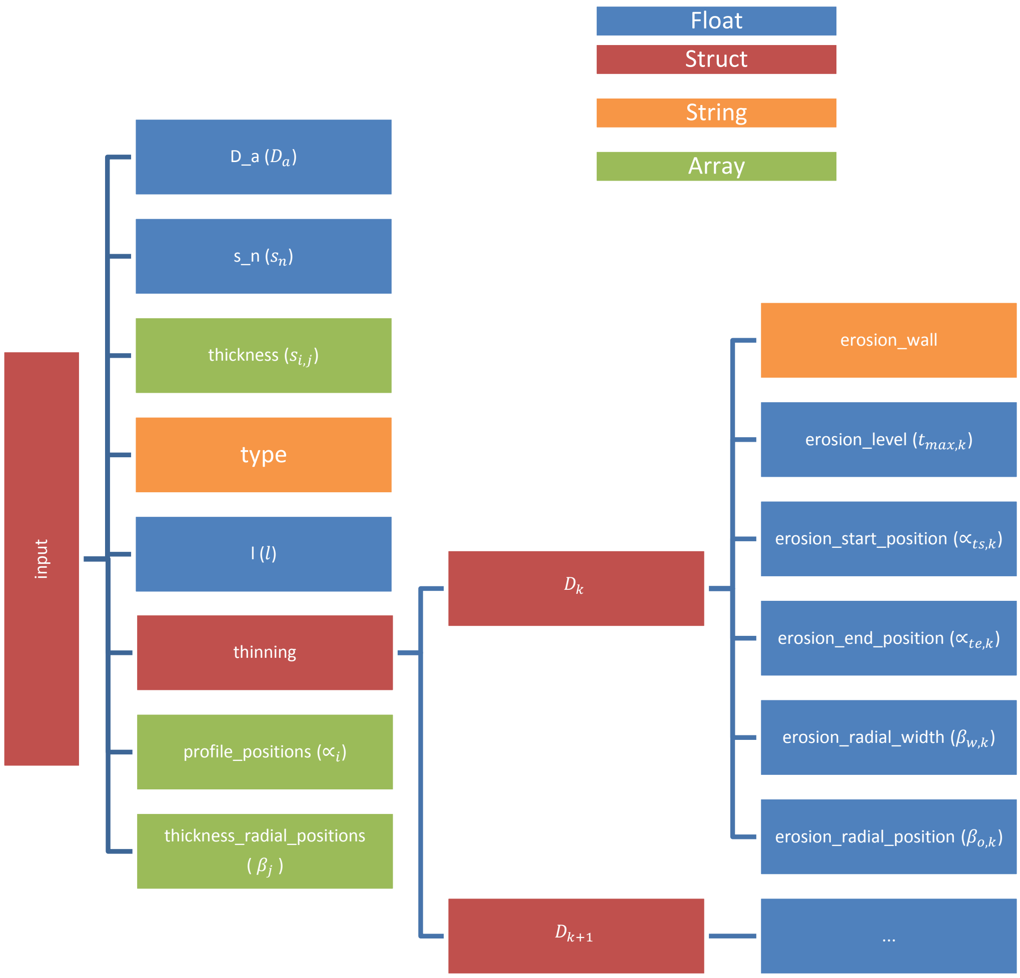


Abbildung 3.8.: Input-Struct für einen Rohrbogen

3.2.3.2. Allgemeine Geometrie

Die Eingangsparameter für die allgemeine Geometrieangaben vom zu erstellenden geraden Rohr sind in der Tabelle 3.5 aufgeführt und in der Abbildung 3.9 visualisiert.

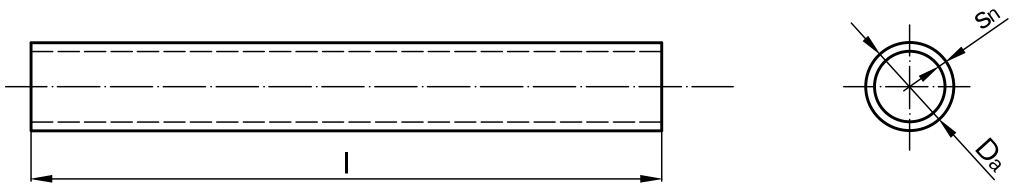


Abbildung 3.9.: Allgemeine Maße der linearen Rohre

Parametername	Bezeichnung	Inputparameter
l	Axiale Länge	l
D_a	Nennaussendurchmesser	D_a

Tabelle 3.5.: Parameterbezeichnung allgemeiner Geometrie des geraden Rohres

Axiale Länge(l)
Die axiale Länge des linearen Rohres gibt die gesamte Länge an. Im Gegensatz zu dem Rohrbogen besitzt das lineare Rohr keine Anschlussstandardisierung, da diese über die Querschnitte erzeugt werden kann ($l \in \mathbb{R}^+$).

Nennaußendurchmesser (D_a)
Der Nennaußendurchmesser D_a ist der konstante Außendurchmesser des Rohres ohne Wanddickenreduzierung. Alle positiven Float-Werte sind zulässig ($D_a \in \mathbb{R}^+$).

3.2.3.3. Profilangabe

Die Eingangsparameter für die Profilangaben vom zu erstellenden linearen Rohr sind in der Tabelle 3.6 aufgeführt und in der Abbildung 3.10 visualisiert.

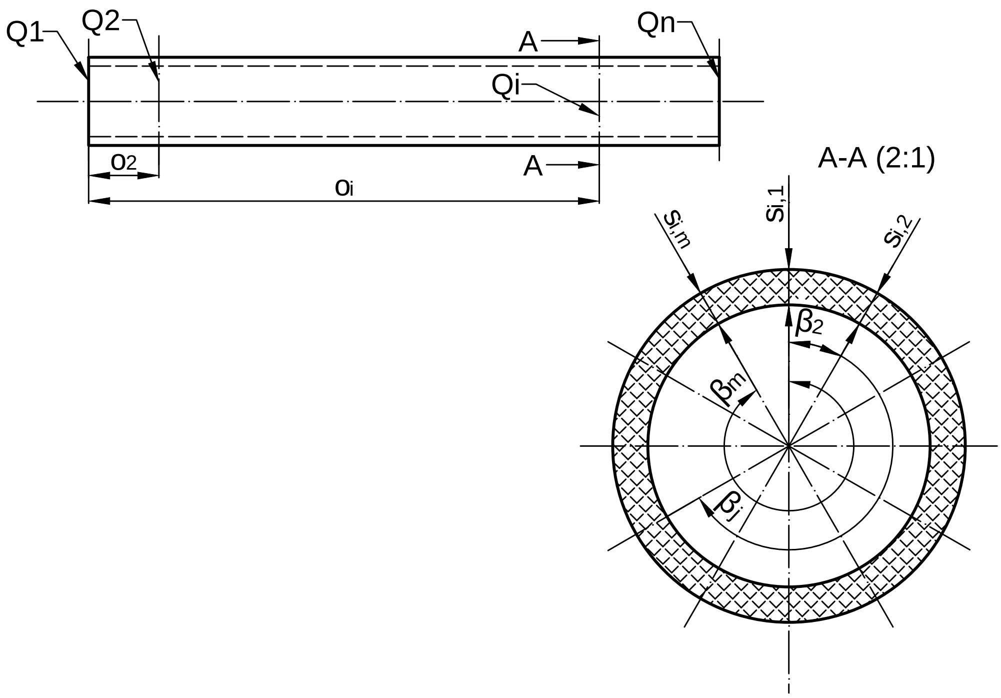


Abbildung 3.10.: Profilmaße der linearen Rohre

Parametername	Bezeichnung	Inputparameter
o_i	Axiale Position des i-ten Querschnitts	profile_positions
β_j	Radiale Position der j-ten Wanddicke	thickness_radial_positions
$s_{i,j}$	j-te Wanddicke im Querschnitt i	thickness

Tabelle 3.6.: Parameterbezeichnung bei der Profilangabe am geraden Rohr

Wanddickenverlauf ($s_{i,j}$)
Der Wanddickenverlauf wird durch Zylinderkoordinaten angegeben. Hierbei werden die Querschnitte auf der gesamten Achse gesetzt, die zu einem geraden Rohr approximiert werden. Der Abstand zwischen der Mittellinie und einem inneren Gitterpunkt gibt dabei den in dem jeweiligen Querschnitt und radialen Winkel gemessenen bzw. erwünschten inneren Radius an. Diese Radien $s_{i,j}$ werden durch die eingegebenen Wanddicken nach innen gerichtet konstruiert, siehe Tabelle 3.3 ($s_{i,j} \in \mathbb{R}^{+,}0 < s_{i,j} < \frac{D_a}{2}$).

Axiale Offsets der Querschnitte (o_i)
Die Querschnitte werden axial auf die gesamte Rohrachse verteilt. Das erfolgt entweder individuell per Eingabe eines Offsetvektors o_i oder gleichmäßig ohne Eingabe. Im Falle einer vorgegebener Querschnittstreuung muss darauf geachtet werden, dass der erste Querschnitt auf 0 liegt, der letzte auf dem Ende des Rohres l liegt, alle Einträge inkrementell sortiert sind und die Dimension des Vektors der vertikalen Dimension der Matrix „thickness“ übereinstimmt ($o_i \in \mathbb{R}^{+,} 0 \leq o_i \leq l$).

Radiale Streuung der Wanddicken (β_j)
siehe Abschnitt 3.2.2.3.

3.2.3.4. Angabe der lokalen Wanddickenreduzierungen

Es können beliebig viele lokale Wanddickenreduzierungen in einem Rohr konstruiert werden. Dafür müssen die einzelnen Wanddickenreduzierungen im Struct „thinning“ als untere Structs, mit „t1“ anfangend und inkrementell eingegeben werden (t1, t2, t3, ...). Die Eingangsparameter für eine einzelne Wanddickenreduzierung am geraden Rohr sind in der Tabelle 3.7 aufgeführt und in der Abbildung 3.11 visualisiert.

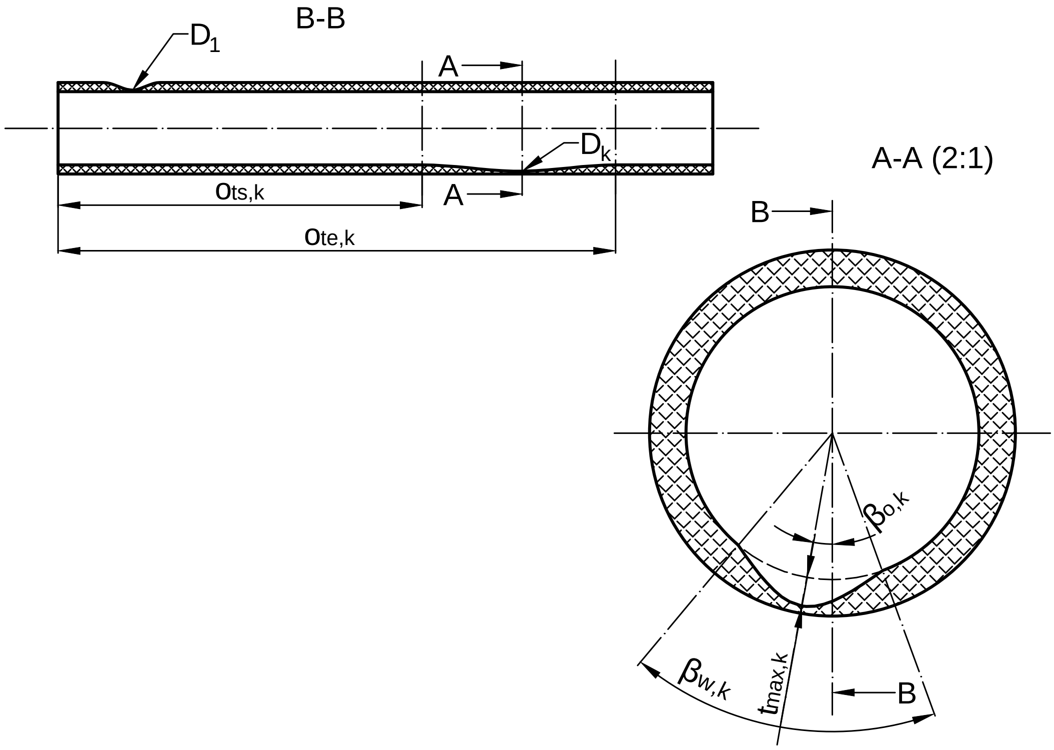


Abbildung 3.11.: Allgemeine Maße der linearen Rohre

Parametername	Bezeichnung	Inputparameter
D_k	k-te lokale Wanddickenreduzierung	-
$o_{ts,k}$	Axiale Anfangsposition der k-ten WD-Reduzierung	erosion_start_position
$o_{te,k}$	Axiale Endposition der k-ten WD-Reduzierung	erosion_end_position
$\beta_{o,k}$	Radiale Verschiebung der k-ten WD-Reduzierung	erosion_radial_position
$\beta_{w,k}$	Radiale Breite der k-ten WD-Reduzierung	erosion_radial_width
$t_{max,k}$	Maximale Tiefe der k-ten WD-Reduzierung	erosion_level
-	Bezugswand	erosion_wall

Tabelle 3.7.: Parameterbezeichnung der Wanddickenreduzierungsangabe am geraden Rohr

Anfangsposition der Wanddickenreduzierung auf der axialen Ebene ($o_{ts,k}$)
Der Anfangswinkel der k-ten Wanddickenreduzierung auf der radialen Ebene $o_{ts,k}$ darf nur einen positiven Float-Wert besitzen, der kleiner als Endposition $o_{te,k}$ ist ($o_{ts,k} \in R_0, 0 \leq o_{ts,k} < l$).

Endwinkel der Wanddickenreduzierung auf der radialen Ebene ($o_{te,k}$)
Der Endwinkel der k-ten Wanddickenreduzierung auf der radialen Ebene $\alpha_{te,k}$ i darf nur einen positiven Float-Wert besitzen, der kleiner gleich die Rohrlänge l ist. ($o_{te,k} \in \mathbb{R}_0, 0 < o_{te,k} \leq l$).

Radiale Verschiebung der Wanddickenreduzierung ($\beta_{o,k}$)
siehe Abschnitt 3.2.2.4.

Radiale Breite der Wanddickenreduzierung ($\beta_{w,k}$)
siehe Abschnitt 3.2.2.4.

Maximale Tiefe der Wanddickenreduzierung($t_{max,k}$)
siehe Abschnitt 3.2.2.4.

Bezugswand der Wanddickenreduzierung
siehe Abschnitt 3.2.2.4.

3.3. Funktionsweise von PipeGen

In diesem Abschnitt wird die Funktionsweise des Programmcodes erklärt.

3.3.1. Struktur des Programmcodes

Der Programmablauf und Eingang-Ausgangsverhalten des Pipegens ist in der Abbildung 3.12 visualisiert.

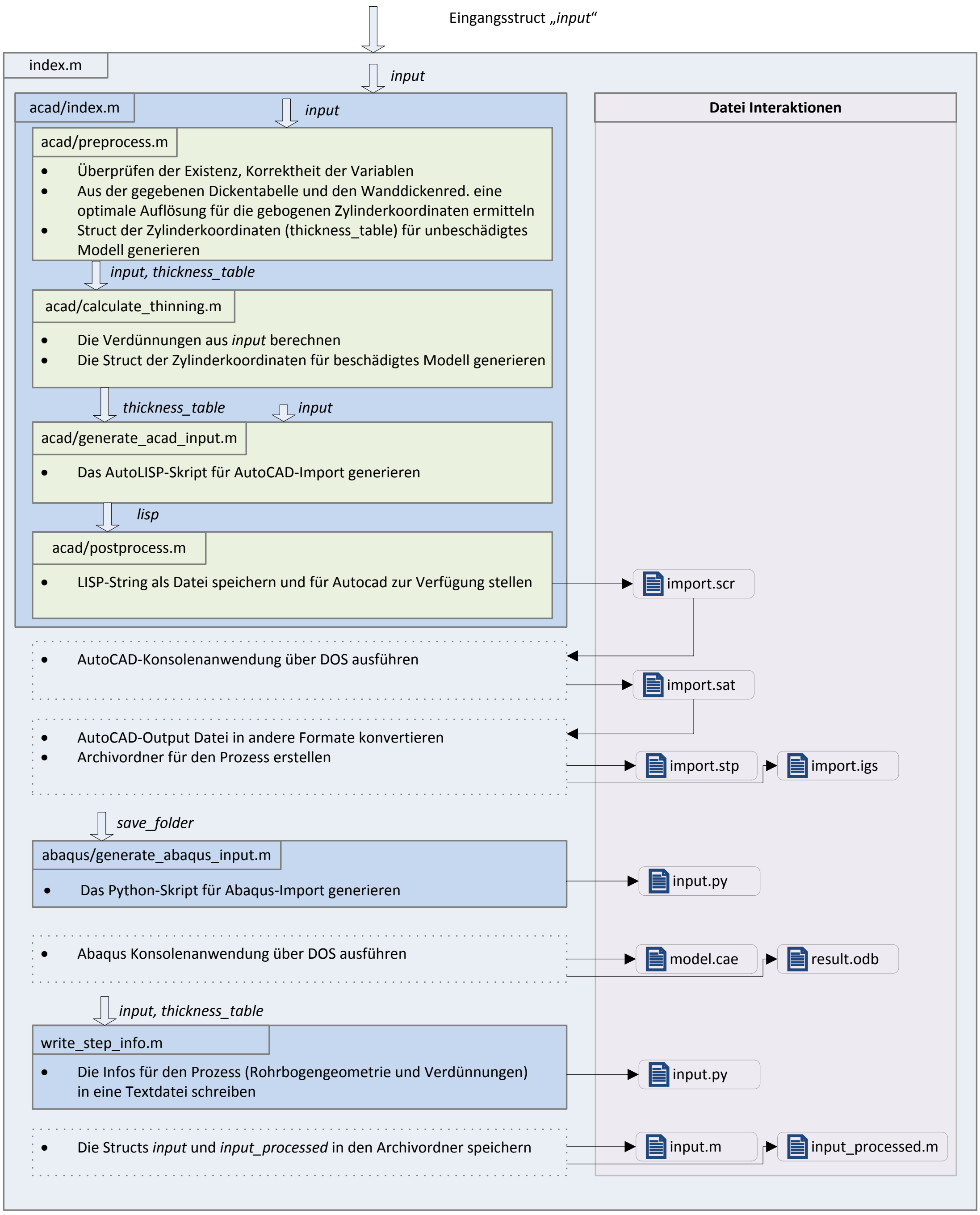


Abbildung 3.12.: Struktur des Codes

3.3.1.1. Subfunktionenstruktur

Die Subfunktionenzugehörigkeit des PipeGens ist im Bild 3.13 dargestellt.

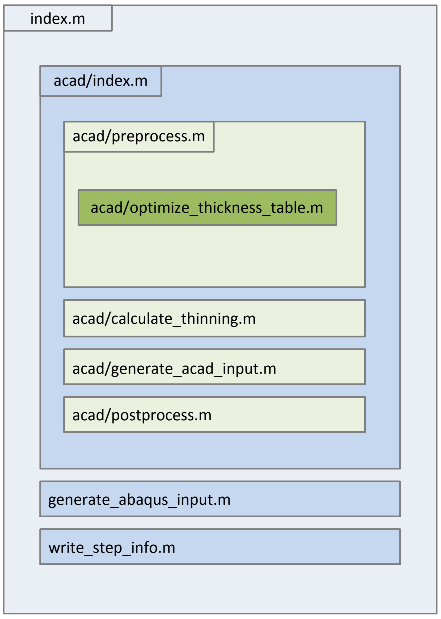


Abbildung 3.13.: Subroutinenstruktur des Codes

3.3.2. Präprozessor und Fehlerabfang

Der Eingabestruct wird zuerst im Präprozessor auf Fehler und Inkonsistenzen überprüft. Weisen die Parameter Inkonsistenzen auf, so werden die dementsprechenden Fehlermeldungen ausgegeben und der Prozess wird abgebrochen. Die Eingabekriterien werden in den folgenden Abschnitten 3.2.2 und 3.2.3 detalliert beschrieben.

Sind alle Parameter konsistent und miteinander kompatibel, dann wird im Präprozessor als nächstes die Wanddickenverlaufsmatrix „thickness“ interpretiert und ggf. modifiziert. Die Struktur dieser Matrix wird im Abschnitt 3.2.2.3 erläutert.

Das Programm generiert einen Volumenkörper, in dem er aus gegebenen Inputdaten zuerst ein Feld mit Gitterpunkten erstellt, durch die der Volumenkörper aufgespannt wird. Die Generierung dieser Gitterpunkte wird im folgenden Abschnitt erläutert.

3.3.3. Erstellung der Gitterpunkte des Modells

Die Eingabe der Wanddickenreduzierungen kann in zwei Arten erfolgen:

- Detallierte Eingabe der Koordinaten (Messdaten)
- Definition durch Geometriedaten der Wanddickenreduzierungen

Das PipeGen erstellt 3D-Modelle nach folgendem Ablauf:

- Entscheidung für ein Koordinatensystem
- Definition der für die Konstruktion erforderlichen radialen und axialen Ebenen
- Ermittlung der radialen Gitterebenen
- Ermittlung der axialen Gitterebenen
- Modifikation der Gitterpunkte nach Wanddickenreduzierungseingaben
- Aufspannung der Querschnitte über den Gitterpunkten auf radialen Ebenen
- Generierung des Volumenkörpers durch die Querschnitte

3.3.3.1. Entscheidung für ein Koordinatensystem

Die eindeutige Beschreibung der Gitterpunkte, über denen der Volumenkörper aufgespannt wird, erfolgt

- bei den linearen Rohren über die Zylinderkoordinaten und
- bei den Rohrbogen über die gebogenen Zylinderkoordinaten.

3.3.3.2. Berechnung der Auflösung der Gitterpunkte

Der Wanddickenverlauf des Rohres ist durch die Matrix „thickness" im Eingangsstruct angegeben. Die Matrix kann eine beliebige Breite und Höhe besitzen. Sie kann auch ein Skalar oder ein Vektor sein, siehe [TM]. Durch den Benutzer wird hierbei der gewünschte Dickenverlauf des Rohres angegeben. Möchte der Benutzer einen konstanten Wanddickenverlauf haben, so wird er einen Skalarwert in der Matrix „thickness" angeben $thickness \in \mathbb{R}^{1x1}$. Im Falle der variablen Dicke nur in der axialen oder nur in der radialen Ebene, kann es der Dickenverlauf als ein vertikaler oder horizontaler Vektor eingegeben sein. Unter Berücksichtigung aller Eingaben werden die erforderlichen Ebenen und die Gitterpunkte berechnet. Es wird hierbei gewährleistet, dass

- sich auf den radialen Ebenen mindestens 12 homogen verteilte Gitterpunkte befinden (für einen präzisen kreisähnlichen Querschnitt mit quadratischen Splines),

- der Anfangs- und Endquerschnitte auf den radialen Ebenen definiert sind und
- die durch Wanddickenreduzierungsangaben erforderliche Konstruktionsebenen auf axialen und radialen Ebenen definiert sind.

Wenn eine Wanddickenreduzierung vorgegeben ist, die auf der radialen Ebene um $60°$ verschoben, $30°$ breit ist und auf der axialen Ebene zwischen $42°$ und $76°$ aufspannt, so werden die radialen Gitterebenen bei $45°$, $60°$, $75°$ und die axialen Gitterebenen bei $42°$, $59°$, $76°$ gewährleistet. Es werden hierbei mittlere Ebenen hinzugefügt, um die tiefste angegebene Stelle des Sattels aufzulösen.

3.3.3.3. Berechnung der Positionen der Gitterpunkte des Rohres ohne Wanddickenreduzierung

Nachdem die Auflösung des Koordinatensystems, also die Positionen der erforderlichen Ebenen ermittelt werden, werden die Positionen der Gitterpunkte für das (noch) nicht wanddickenreduzierte Rohr berechnet.

Es wird hierbei angenommen, dass der äußere Durchmesser des Rohres konstant bleibt und die Wanddicken nach innen abgebildet werden. In diesem Schritt entsteht eine Matrix, die die Koordinaten des äußeren sowie inneren Zylinders beinhaltet.

3.3.3.4. Einbau der Wanddickenreduzierungen

In diesem Schritt stehen die Koordinaten für das intakte Rohr ohne Wanddickenreduzierung aus dem vorherigen Schritt zur Verfügung und die Koordinaten werden unter Angaben für die Wanddickenreduzierung modifiziert.

Die Wanddickenreduzierungen beruhen auf dem Sattelmodell. Hierbei schneiden sich zwei Kurven senkrecht in dem Punkt maximaler Wanddickenreduzierung. Zwei Kurven jeweils auf der axialen und radialen Ebene, die durch den Punkt maximaler Wanddickkenreduzierung verlaufen können berechnet werden. Dennoch sind die die Grenzen der Wanddickenreduzierung bekannt. Der Sattel wird abgebildet, in dem die Gitterpunkte, die sich innerhalb der Grenzen der Wanddickenreduzierung befinden, exzentrisch verschoben werden. Die Verschiebung wird realisiert, in dem die Gitterpunkte zwischen dem Punkt maximaler Wanddickenreduzierung und den Wanddickenreduzierungsgrenzen interpoliert werden.

3.3.3.5. Erstellung der Querschnitte in der radialen Ebene

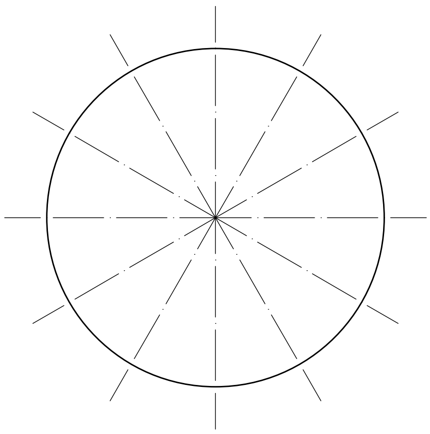
Der innere und äußere Grenze eines Querschnitts auf der radialen Ebene definiert sich als zwei geschlossene Splines. Die Splines sind über den zugehörigen Gitterpunkten aufgespannte Kurven der zweiten Ordnung. Um die optimale Rundform der Querschnitte zu erreichen, werden die Tangenten an Gitterpunkten zusätzlich definiert. Die Tangenten an Gitterpunkten sind senkrecht zur Linie zwischen dem Mittelpunkt (durch den die Mittellinie des Rohres verläuft) und dem jeweiligen Gitterpunkt definiert.

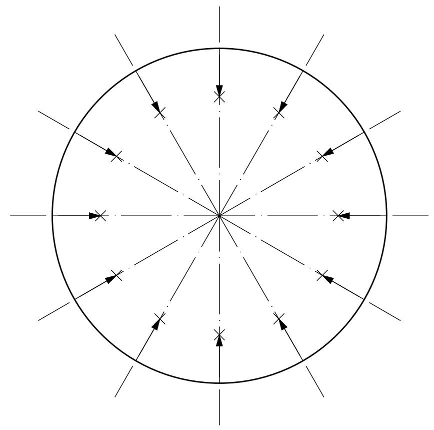
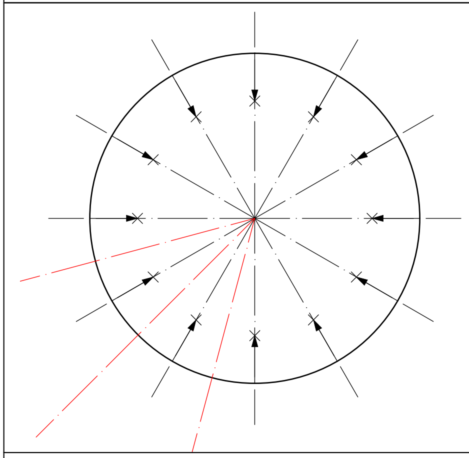
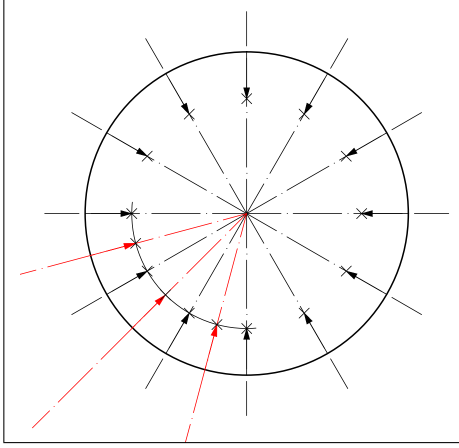
3.3.3.6. Erstellung der Verlängerungen beim Rohrbogen

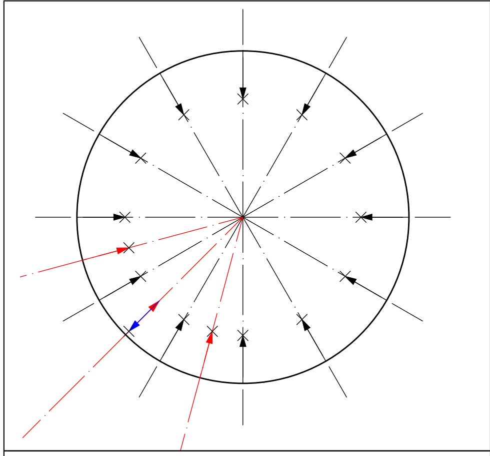
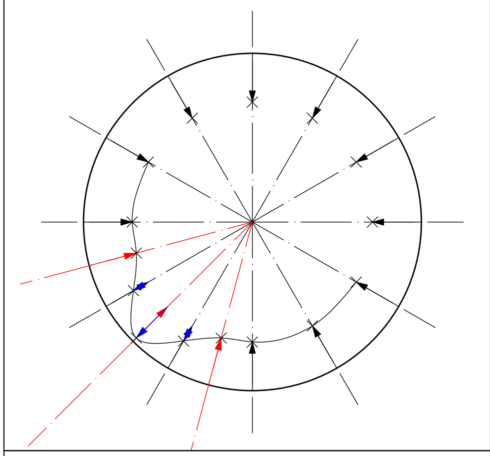
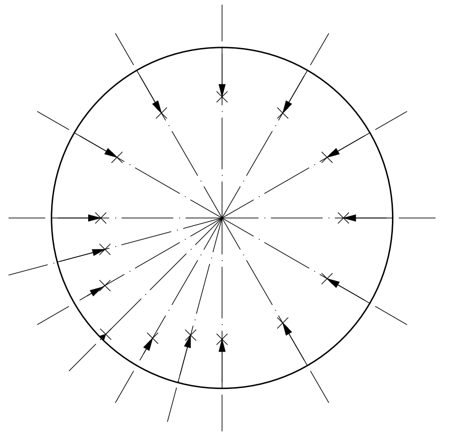
Die Verlängerungen sind gerade Rohrstücke, durch die der Anschluss des Rohrbogens zu den anderen Rohren erfolgt. In den Anschlüssen werden die unregelmäßigen Wanddicken des Rohrbogens normalisiert, d.h. zu exakten Kreisen überführt. Somit kann eine exakte Übereinstimmung der Rohranschlüsse erreicht werden.

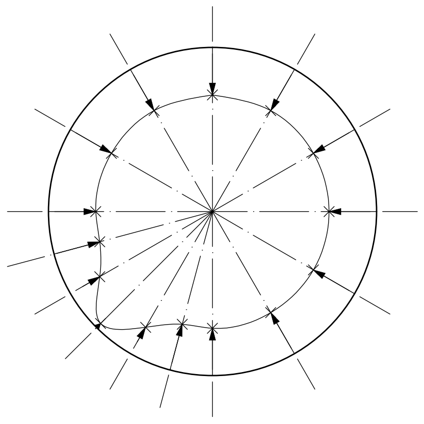
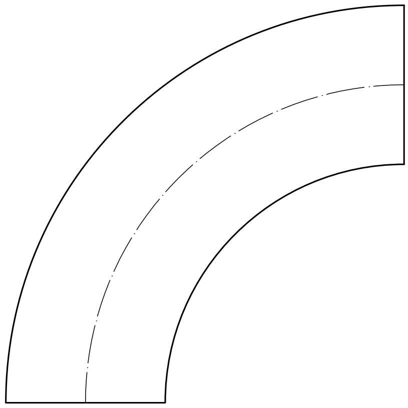
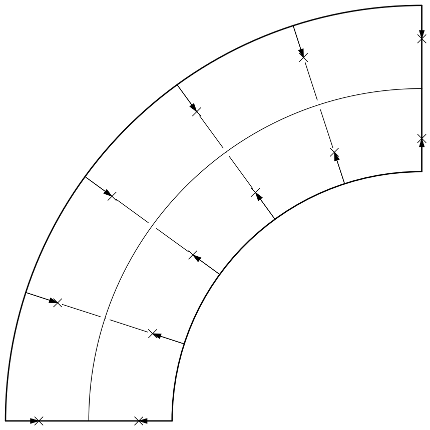
3.3.3.7. Ablauf eines Modellierungsprozesses

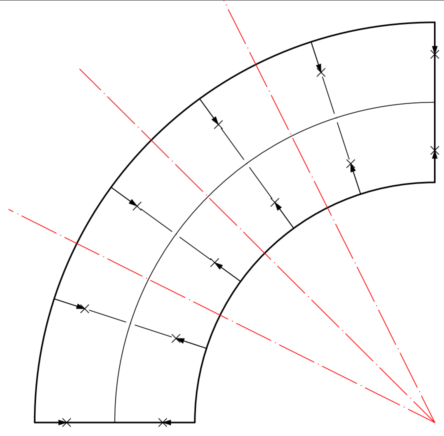
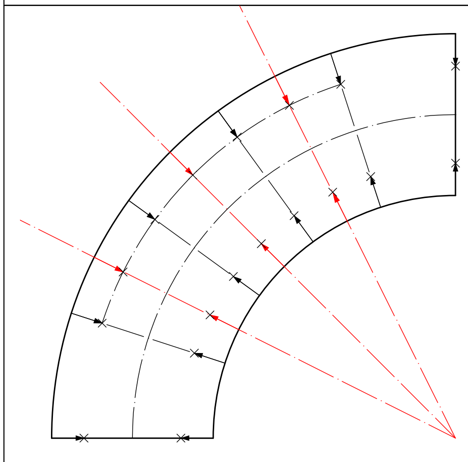
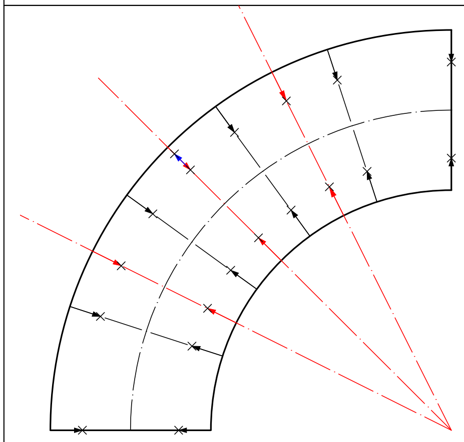
In diesem Schritt stehen die Koordinaten der Gitterpunkte des Rohres und somit innere und äußere Querschnitte zur Verfügung. Durch die äußeren Querschnitten wird der äußere Volumenkörper und durch die inneren Querschnitten wird der innere Volumenkörper erzeugt. Anschließend wird der innere Volumenkörper aus dem Äußeren subtrahiert.

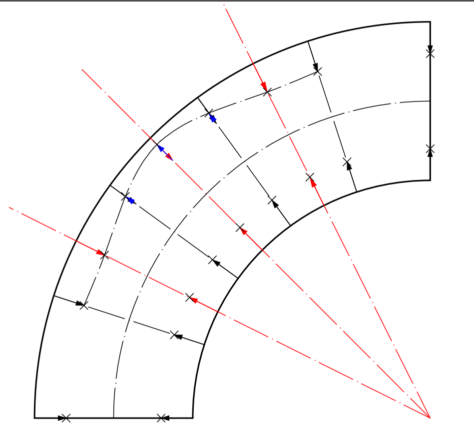
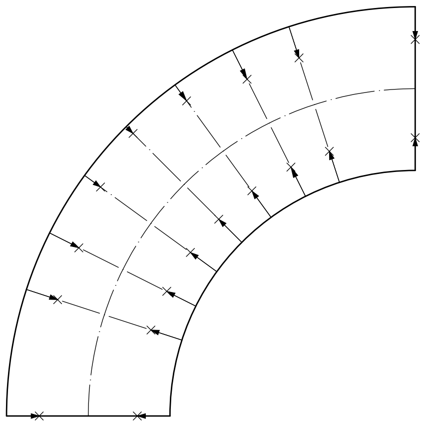
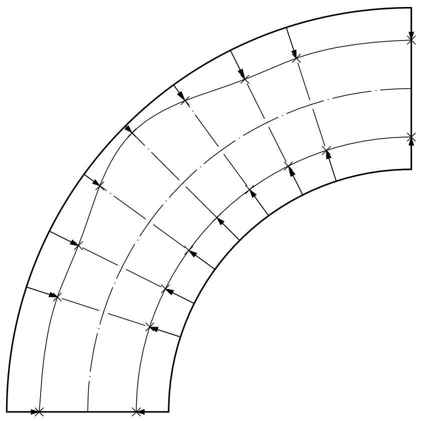
Darstellung	**Beschreibung**
	Die äußere Form des Querschnitts in einer radialen Ebene ist ein Kreis und basiert auf dem Nennaußendurchmesser. Als Erstes wird die Eingabe der Wanddicken überprüft und eine Referenzauflösung für die radiale Ebene berechnet. Werden weniger als 12 Punkte für die radialen Ebenen in der Wanddickentabelle „thickness“ angegeben, so werden diese auf 12 Punkte bzw. Strahlen erweitert. Werden mehr als 12 Punkte angegeben, so wird die Auflösung übernommen.

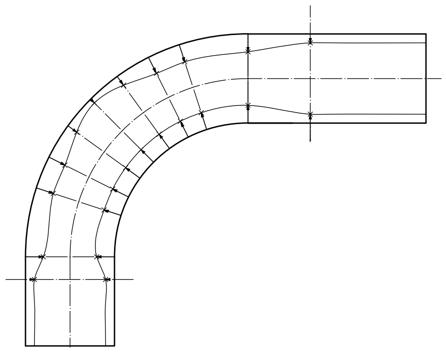
	Zunächst werden aus den Eingaben in der Dickentabelle die inneren Profile gestaltet. Die Abstände der Gitterpunkte vom Außendurchmesser sind prinzipiell nicht gleich sondern aus der Wanddickentabelle entnommen, bzw. wenn die Anzahl der Gitterpunkte weniger als 12 sind, werden die Zwischenpunkte interpoliert.
	Als nächstes werden die eingegebenen Wanddickenreduzierungen untersucht. Hier werden für jede Wanddickenreduzierung erforderliche Gitterebenen, d.h. die Anfangs-, Endwinkel und der mittlere Gitterebenen zu den radialen Ebenen hinzugefügt. Die Eingabe der radialen Positionierung einer Wanddickenreduzierung erfolgt über die Position des Tiefpunkts und die Breite.
	Die noch fehlenden Einträge der neu hinzugefügten Strahlen werden aus den Nachbargitterpunkten interpoliert.

	Die Eingabe der Wanddickenreduzierungstiefe erfolgt über die maximale Tiefe, die gewährleistet werden muss.
	Die Gitterpunkte, die sich innerhalb der radialen Grenzen dieser Wanddickenreduzierung befinden, werden nach der maximalen Tiefe neu berechnet. Die blauen Pfeile zeigen die zurückgeschobenen Gitterpunkte.
	Somit sind die Gitterpunkte des inneren Profils berechnet.

	Durch die Gitterpunkte wird ein Spline der zweiten Ordnung aufgespannt und somit kann ein Innenprofil auf der radialen Ebene konstruiert werden.
	Der Ablauf der Berechnung der Gitterpunkte auf axialen Ebenen ist ähnlich wie auf den radialen Ebenen. Es werden hier nach eingegebenen Krümmungsradius, -bogenbreite die axialen Gitterpunkte der äußeren Profile in den (gebogenen) Zylinderkoordinaten berechnet.
	Die axialen Profile des noch nicht wanddickenreduzierten Rohres werden aus dem eingegebenen Wanddickenverlauf entnommen.

	Die Eingabe der axialen Positionierung einer Wanddickenreduzierung erfolgt über den Anfangs- und Endwinkel. Es werden die für die Auflösung der Wanddickenreduzierungen erforderliche Ebenen definiert.
	Die inneren Profile auf radialen Ebenen werden durch die benachbarten Ebenen interpoliert.
	Das innere Profil auf der radialen Ebene, die durch die maximale Tiefe geht, ist nun aus der vorherigen Berechnung bekannt. Ein Gitterpunkt an diesem Profil sei auf der axialen Ebene mit dem blauen Pfeil bezeichnet.

	Die Profile zwischen dem in radialer Ebene berechneten Profil maximaler Wanddickenreduzierung (mittlere rote Linie) und den Grenzprofilen der Wanddickenreduzierung (untere und obere rote Linien) werden interpoliert.
	Somit sind alle Gitterpunkte des Rohres mit Wanddickenreduzierung berechnet.
	Anschließend kann der äußere und innere Volumenkörper durch die berechneten Gitterpunkte in AutoCAD erzeugt werden. Der innere Volumenkörper wird aus dem äußeren Volumenkörper subtrahiert und ein Rohrbogen erstellt.



Die Anfangs- und Endquerschnitte der Rohrbogen sind nach der Wanddickentabelle konstruiert und ggf. nicht ideal rund. Um Anschlüsse für die Verbindung anderer Rohre anzupassen, können die Rohrbogenenden um gerade Verlängerungsstücke erweitert werden. Bei den Verlängerungsstücken wird das innere Profil für den Anschluss zu den anderen Rohren auf ein Referenzprofil normalisiert. Das bedeutet, die unregelmäßigen Profile an beiden Enden des Rohrbogens werden über diese Verlängerungen zu einem exakten Kreis überführt. Der Durchmesser dieses Kreises wird ab der eingegebenen Position bzw. dem Profil gewährleistet.

3.3.4. Durchführung von AutoCAD-CLI

Nachdem alle (gebogenen) Zylinderkoordinaten in Matlab berechnet wird, werden diese für das AutoLISP-Skript in kartesische Koordinaten umgerechnet. Die Koordinaten werden mit einer Double-Präzision von 10^{16} in das AutoLISP-Skript geschrieben, damit die AutoCAD-Programmgenauigkeit erreicht wird und angrenzende Linien, sowie geschlossene Splines erkannt werden. Ein Auszug aus dem AutoLISP-Skript für die Annäherung des im 4. Kapitel eingeführten Rohrabzweig, siehe Abschnitt 4.1, ist im Code A.1 gezeigt.

3.3.5. Überprüfung des Modells durch eine Testsimulation

Nach dem Exportieren der CAD-Datei wird das Modell mittels einer Testsimulation in ABAQUS nach Vernetzbarkeit, Netzqualität und Konvergenz überprüft. Dazu wird in der vorliegenden Konfiguration eine statische Rechnung durchgeführt. Am Modell werden alle Freiheitsgrade vom ersten Anschluss des Rohres beschränkt und auf den anderen Anschluss eine Knotenkraft in horizontaler Richtung eingebracht. Das Modell wird automatisch mit Hexaeder-Elementen vernetzt. Anschließend wird die Ruhelage des Systems unter Schwerkraft statisch berechnet. Die Netzqualität kann nach erfolgreicher Durchführung der Rechnung in der Ergebnisdatei (job_scripted.odb) gelesen werden.

Die Simulation wird mittels eines automatisch erstellten Python-Skripts über ABAQUS-

CLI durchgeführt. Die Parameter der Testsimulation wie der Elementtyp, der Knotenabstand oder der Lastfall können im Skript modifiziert werden. Das Skript der in der Entwicklung benutzten Konfiguration ist im Code A.2 im Anhang dokumentiert.

4. Anforderungen an Simulationsverfahren von Hammerschlagversuchen

Im Rahmen des Forschungsprojekts-Nr.150 1062 an der MPA wird das Schwingungsverhalten eines Rohrleitungssystems untersucht, das einen Rohrabschnitt (im Folgenden Abzweig genannt) mit lokaler Wanddickenreduzierung besitzt. Für die Untersuchung des Schwingungsverhaltens vom System werden Shaker-, Snapback-, und Hammerschlagversuche durchgeführt.

Bei einem Hammerschlagversuch wird der Prüfaufbau mit einem Impulshammer an unterschiedlichen Stellen angeregt, um die Eigenfrequenzen des Systems und deren Amplituden zu ermitteln. Anhand dieses Versuchs können unterschiedliche Eigenfrequenzen mit unterschiedlicher Amplitude erregt werden. Zur Erklärung der Idee des Hammerschlagversuchs können die Saitenschwingungs- und Balkentheorien in Betracht gezogen werden.

Die Eigenfrequenzen sind Systemeigenschaften und von der Anregung unabhängig. Daher besitzt z.B. eine Gitarrensaite, unabhängig von der Zupfstelle, dieselben Eigenfrequenzen. Der Ton wird aus allen Eigenschwingungen zusammengesetzt. Allerdings je nach Zupfstelle wird zwar dieselbe Note aber verschiedene Klangfarben gehört. Die Begründung dafür ist, dass die Amplitudenverteilung von einzelnen Eigenschwingungen von der Zupfstelle abhängt. Beim Zupfen einer Saite werden alle Eigenschwingungen angeregt, die an der Zupfstelle keinen Bewegungsknoten haben, siehe [Tre39]. Dieses Verhalten ist in der Abbildung 4.1 visualisiert.

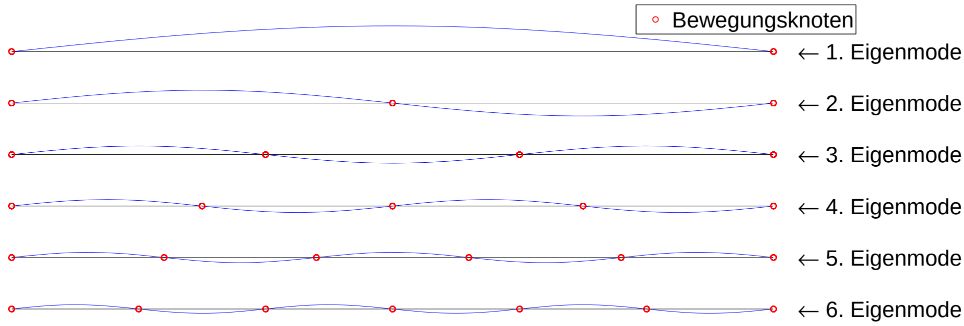


Abbildung 4.1.: Saitenschwingungen

Dennoch werden die Eigenschwingungen in dem Bereich, wo sie keine Bewegungsknoten besitzen, in unterschiedlichen Verhältnissen angeregt. Wird die Saite z.B. unmittelbar neben einem Bewegungsknoten einer einzelnen Eigenschwingung gezupft, so wird diese Eigenschwingung zwar angeregt, wird allerdings eine kleinere Amplitude haben.

Analog zu der Saitentheorie können die Amplituden der Eigenschwingungen, in einer komplizierteren Geometrie wie in einem Rohrsystem, durch Erregung an unterschiedlichen Stellen variiert werden. Somit kann die Intensivität der Eigenfrequenzen bzw. zu vermeidende Betriebsfrequenzen ausgelegt werden. Die Tatsache, dass die Hammerschläge an unterschiedliche Stellen des Rohres unterschiedliche Klangfarben verursachen, zeigt, wie sich die Amplituden der Hochfrequenzen variieren.

4.1. Versuchsaufbau und Messungsdurchführung

Das Rohrsystem, das für den Versuchsaufbau dieser Studienarbeit zugrunde liegt, ist der sogenannte „Mock-up“ an der MPA, siehe Abbildung 4.2.

Abbildung 4.2.: Versuchsaufbau „Mock-up“

Der Grundkörper des Mock-ups, dargestellt in 4.3, ist ein dreifach gekrümmter Rohrstrang bestehend aus:

- einem geraden Rohr mit Verjüngung (RS1),
- einem geraden Rohr (RS2),
- einem 90° Rohrbogen (RS3),
- einem geraden Rohr (RS4),
- einem 90° Rohrbogen (RS5),
- einem geraden Rohr (RS6),
- einem 90° Rohrbogen (RS7),
- und einem geraden Rohr (RS8).

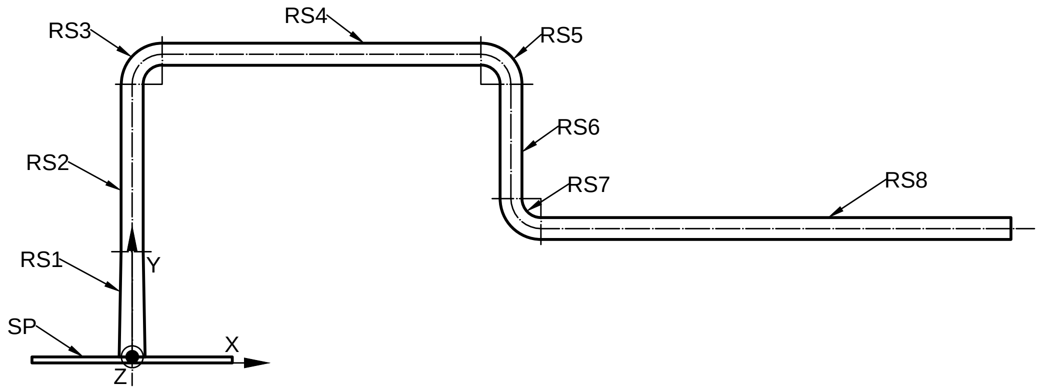


Abbildung 4.3.: Bestandteile des Mock-ups

Der Rohrstrang ist durch eine Schweißverbindung zwischen dem kegeligen Rohr (RS1) und einer 60mm dicke Stahlplatte (SP) auf dem Grund befestigt. Der Mock-up ist zudem durch den Abzweig, dargestellt in Abbildung 4.4, zu dem mittleren Grundkörper (MGK) gebunden. Der Abzweig besteht aus:

- einem geraden Rohr (RS9),
- einem $90°$ Rohrbogen (RS10),
- und einem geraden Rohr (RS11).

Abbildung 4.4.: Der Abzweig

Der Abzweig ist ein fehlerbehafteter Rohrabschnitt. Das Exemplar im vorliegenden Versuch hat eine lokale Wanddickenreduzierung von $7mm$ mittig im Extrados der inneren Wand. Sie ist radial $180°$ und axial $54°$ breit. Verbunden wird der Abzweig zu dem MGK über ein Kreuzgelenk (KG) und dem Mock-up über eine Schweißverbindung, die mit zwei Plattenstücken (VS) verstärkt ist.

4.1.1. Messhardware

Für die Messung der Schwingungen werden monoaxiale, piezoelektrische Beschleunigungsmesser der Firma Endevco Model 7754-1000 verwendet. Sie verfügen über integrierte Elektronik und eignen sich besonders für die ultra-low-level Messung der niederfrequenten Schwingungen, siehe [COR]. Das Modell 7754-1000 kann bis zu 5g in positiver und negativer Richtung messen.

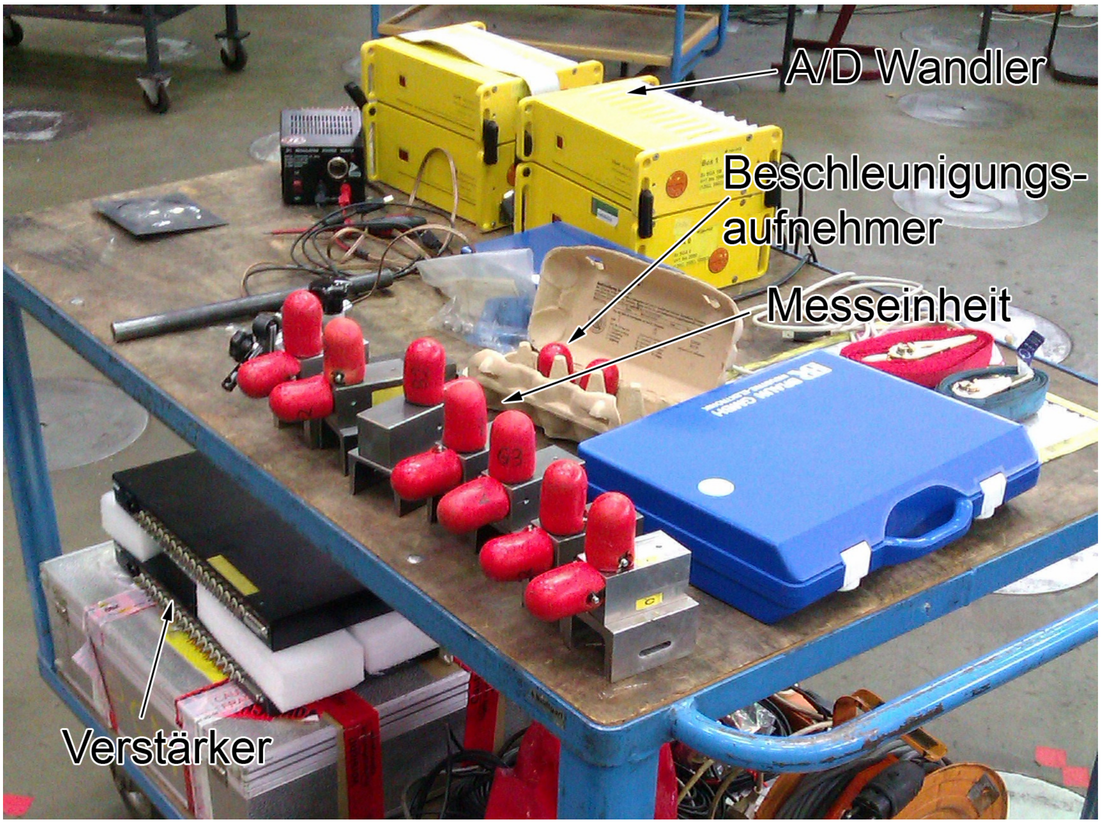


Abbildung 4.5.: Die Messinstrumente

Eine Messeinheit, dargestellt in Abbildung 4.5, besteht aus einer Halterungsvorrichtung aus Stahl und darauf in drei Raumrichtungen gerichtete Beschleunigungsmessern. Somit misst eine Messeinheit die Beschleunigungen an einem Punkt in drei Raumrichtungen. Die Halterungsvorrichtungen werden mittels Spanngürtel auf das Rohrsystem fest gespannt.

Die Konfiguration der Messeinheiten ist in dem Bild 4.6 dargestellt. Es werden für den Hammerschlagversuch fünf Messeinheiten verwendet und damit Beschleunigungen an fünf Messstellen in jeweils drei Raumrichtungen gemessen. Für die Messungen liegt die Vereinfachung zugrunde, dass die Masse der Messeinheiten gegenüber der Masse vom Rohrleitungssystem vernachlässigt werden können und die Befestigung steif ist. Die Entfernung der Messsensoren vom Rohrwand durch Halterungsvorrichtung ist ebenso vernachlässigbar.

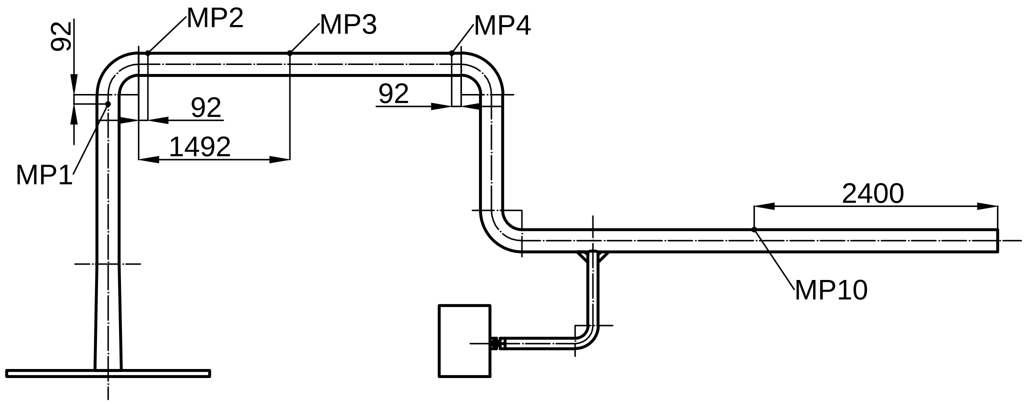


Abbildung 4.6.: Konfiguration der Messpunkte

4.1.2. Impulshammer

Der Impulshammer, dargestellt in Abbildung 4.7, ist ein Hammer mit eingebautem Kraftmesssensor und Elektronik der Firma PCB Piezotronics Modell 086D50. Er kann eine Kraft von bis zu $\pm 22440\ N$ messen, wiegt 5kg und eignet sich für Impulsantwortmessungen bei den Rohrsystemen. Die Maße des Hammers sind in Abbildung 4.15 dargestellt. Der Hammer verfügt über 4 verschiedene Köpfe, mit denen die Amplitude des erzeugten Kraftverlaufs variiert werden kann.

Abbildung 4.7.: Impulshammer (Quelle: PCB Piezotronics)

4.2. Versuchsdurchführung

Der Versuch für die Modalanalyse des Mock-ups mit Impulshammer läuft nach dem folgenden Schema:

- Die Messinstrumente einstellen,

- Die Schwingungen abklingen lassen, falls noch welche vom vorherigen Versuch vorhanden,
- Die Messung starten,
- Mit dem Hammer gegen den Schlagpunkt schlagen, siehe Abbildung 4.8,
- Die Messung beenden, wenn die Schwingungen abgeklungen sind.

Der Schlagpunkt befindet sich in der vorliegenden Konfiguration auf dem geraden Rohr RS8 und $1160mm$ entfernt von seinem offenen Ende. Der Impuls wird in horizontaler (Z-) Richtung eingebracht.

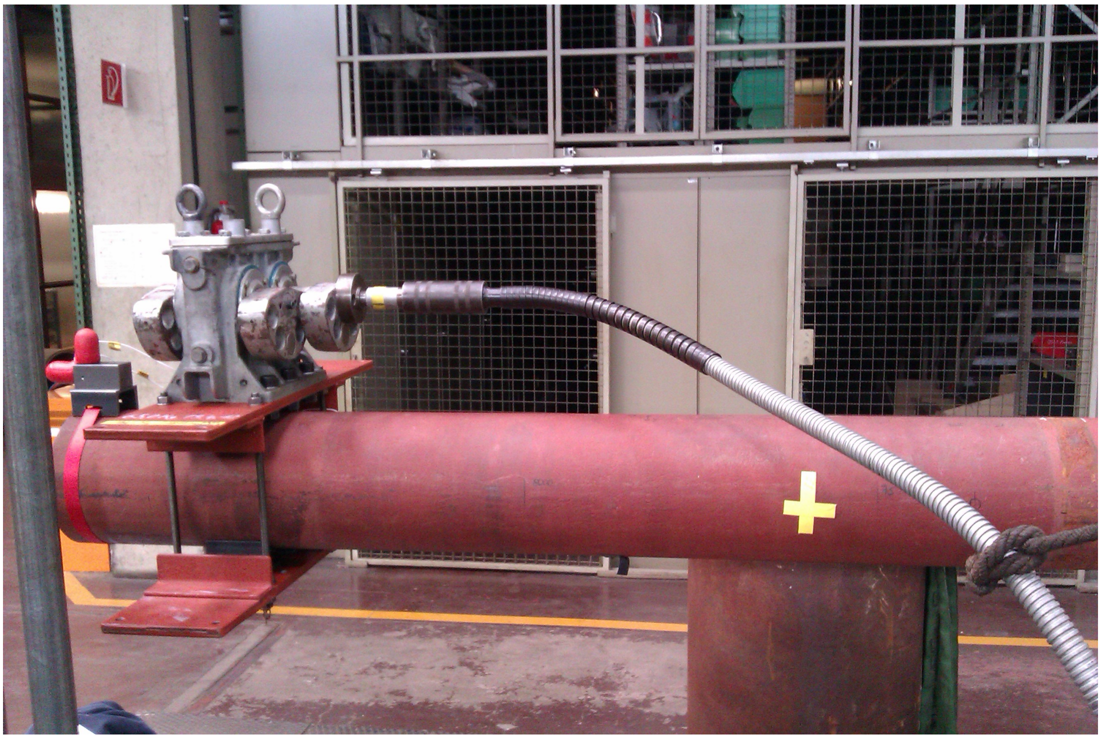


Abbildung 4.8.: Der Schlagpunkt

4.3. Rechenmodell des Experiments und Model-Updating

Der Versuch wird anschließend mit der FEM simuliert. Die verwendete FEM-Software dafür ist ABAQUS 6.11.

Bei der Rechenmodellerstellung eines Versuchsaufbaus treten typischerweise u.a. folgende Lücken auf:

- Nicht vollständig bekannte Materialeigenschaften,
- Nicht vollständig bekannte Geometrien,
- Nicht vollständig bekannte physikalische Eigenschaften,
- Störgrößen.

Um diese unbekannten Größen zu optimieren, wird ein Model-Updating durchgeführt. Das Model-Updating erfolgt hierbei nach dem Schema, das in der Abbildung 4.9 dargestellt wird.

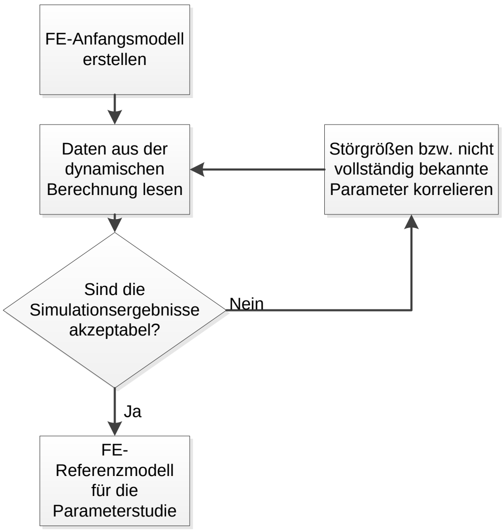


Abbildung 4.9.: Ablauf vom Model-updating

Das Model-Updating hat eine Mehrzahl von Entscheidungs- und Korrelierungsmethoden, die bei unterschiedlichen strukturdynamischen Problemen einsetzbar sind. In dem vorliegenden Fall sind die kritischsten Modellkomponenten u.a.:

- die Materialeigenschaften des Hammeransatzes,
- die Vereinfachungen am Stoß,
- sonstige physikalische Gegebenheiten am Hammerschlag, die durch menschliche Imperfektion verursacht worden sind (Weiterschieben nach dem Stoß, Abweichen von dem gewünschten Punkt usw.).

4.3.1. Modellierung des Mock-ups und Abzweigs

Die Maße des Abzweigs und des Mock-ups sind in den Abbildungen 4.10 und 4.11 visualisiert.

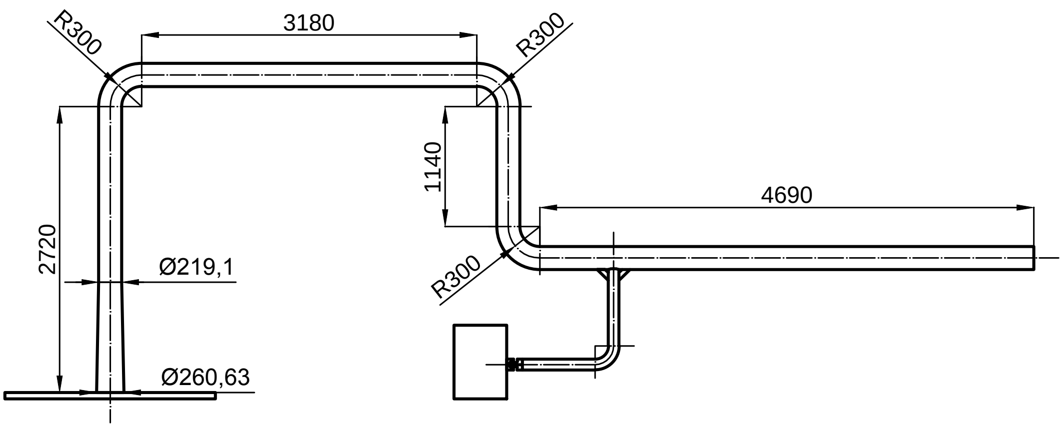


Abbildung 4.10.: Maße des gesamten Versuchaufbaus

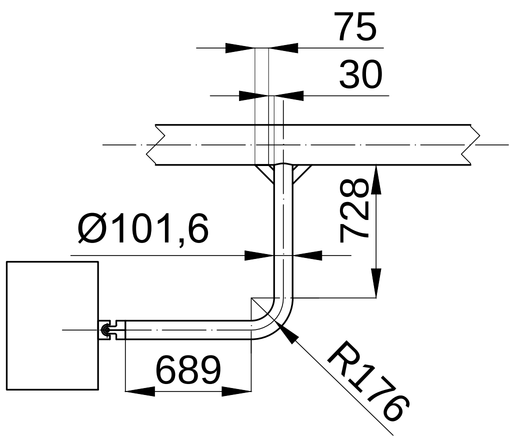


Abbildung 4.11.: Maße des Abzweigs

Die Abmessungen und die Materialen der Rohrstücke sind in der Tabelle 4.1 gelistet.

-	Außendurchmesser [mm]	Wanddicke [mm]	Material
RS1	260-219,1	37,95-17,5	15Mo3
RS2	219,1	17,5	15Mo3
RS3	219,1	16	15Mo3
RS4	219,1	17,5	15Mo3
RS5	219,1	16	15Mo3
RS6	219,1	17,5	15Mo3
RS7	219,1	16	15Mo3
RS8	219,1	17,5	15Mo3
RS9	101,6	10	S235
RS10	101,6	10	S235
RS11	101,6	10	S235

Tabelle 4.1.: Geometrie und Material der Rohrstücke

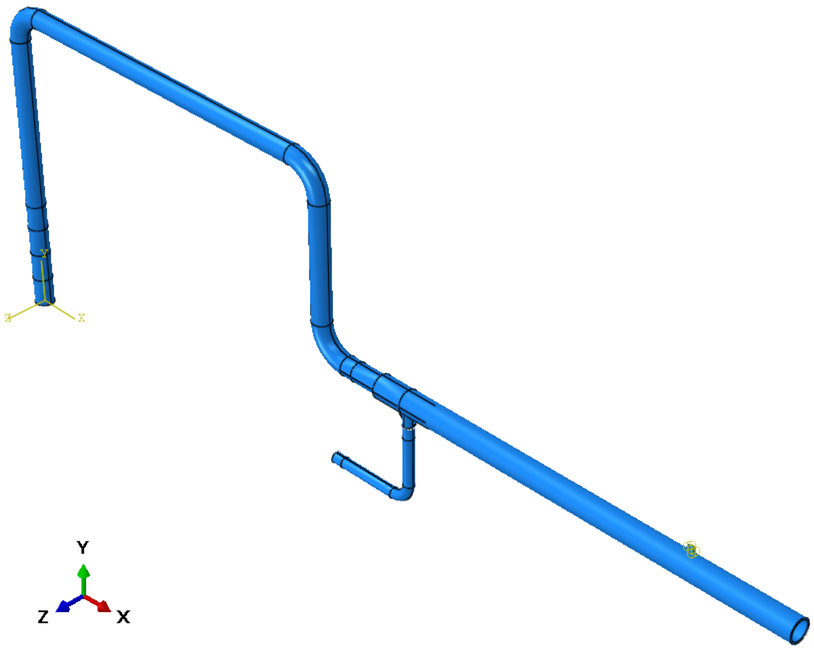


Abbildung 4.12.: Das FEM-Modell

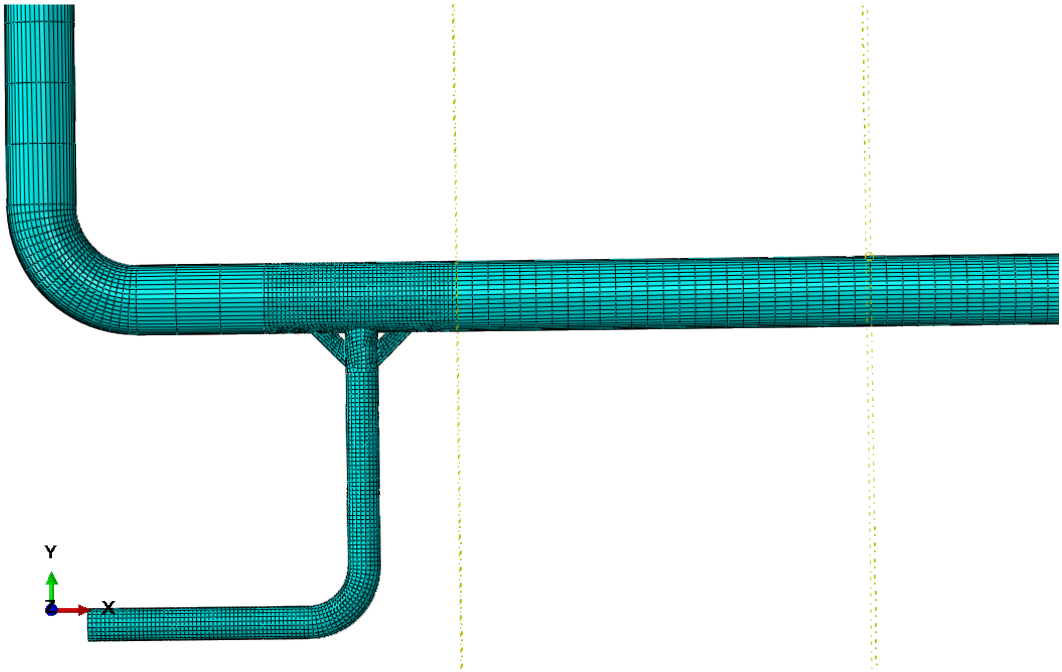


Abbildung 4.13.: Die Vernetzung des FEM-Modells

Die Materialdaten der Stähle sind in der Tabelle 4.2 zusammengefasst.

	Streckgrenze ($R_e, R_{p,0.2}$) [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Dichte [kg/dm^3]
St35	235	360	$7,8$
15Mo3	295	440	$7,85$

Tabelle 4.2.: Materialeigenschaften der verwendeten Stahltypen

Das Modell des Mock-ups wird aus 2D-Schalen- (ABAQUS: Shell) und 3D-Vollkörpergeometrien (ABAQUS: Solid) zusammengesetzt. Die Vereinfachung, ein Rohr durch Schalenelemente mit Dicke zu modellieren, kann bei der Annahme der konstanten Wanddicken realisiert werden. Die Bereiche, die an dem Stoß beteiligt sind, werden typischerweise als 3D-Körper modelliert. Die Geometrie wird hauptsächlich mit 2 Elementtypen diskretisiert, siehe Tabelle 4.3.

Bezeichnung	Typ	Knotenanzahl	Geom. Ordnung
C3D8R	Volumenelement	8	linear
S4R	Flächenelement	4	linear

Tabelle 4.3.: Verwendete FEM-Elementtypen

Der Abzweig hat variable Wanddicke und somit wird es mit Volumenelementen diskretisiert. Beim Vernetzen ist zu beachten, dass die Konvergenzkriterien erfüllt werden. Dennoch muss die Anzahl bzw. Größe der Elemente unter Berücksichtigung der Rechenzeit und der Präzision der Ergebnisse optimiert werden. Eine hohe Anzahl der Elemente führt zu vertrauenswürdigeren Ergebnissen aber auch zu hohen Rechenzeiten. Da es hierbei um eine dynamische implizite Berechnung geht, sind die Rechenzeiten besonders kritisch.

4.3.2. Modellierung der Dämpfung

Die Dämpfung des Rohrsystems wird mit Rayleigh-Dämpfung beschrieben.

Die Dämpfung eines reellen Systems wird prinzipiell experimentell bestimmt. Bei der Wahl der Dämpfungskoeffizienten wurde von den Werten ausgegangen, die in [Gü08] für das Mock-up ermittelt wurden. Diese betragen für den Mock-up ohne den Abzweig $\alpha = 0,2$ und $\beta = 0,0001$ und sind aus den Snap-Back- und Shakerversuchen ermittelt worden. Diese ursprünglichen Koeffizienten müssen dem veränderten Versuchsaufbau mit Abzweig angepasst werden, der durch den Abzweig ein verändertes Dämpfungsverhalten aufweist.

Die Rayleigh-Koeffizienten hängen mit prozentualer und frequenzabhängiger Dämpfung ξ_i nach

$$\alpha + \beta\omega_i^2 = 2\omega_i\xi_i \tag{4.1}$$

zusammen, wobei ω die Kreisfrequenz ist. Mit den modifizierten Koeffizienten $\alpha = 0,0001$ und $\beta = 0,00001$ wird der Zusammenhang der Dämpfungsintensität ξ und der Frequenz in Abbildung 4.14 für die ursprüngliche und modifizierte Variante dargestellt.

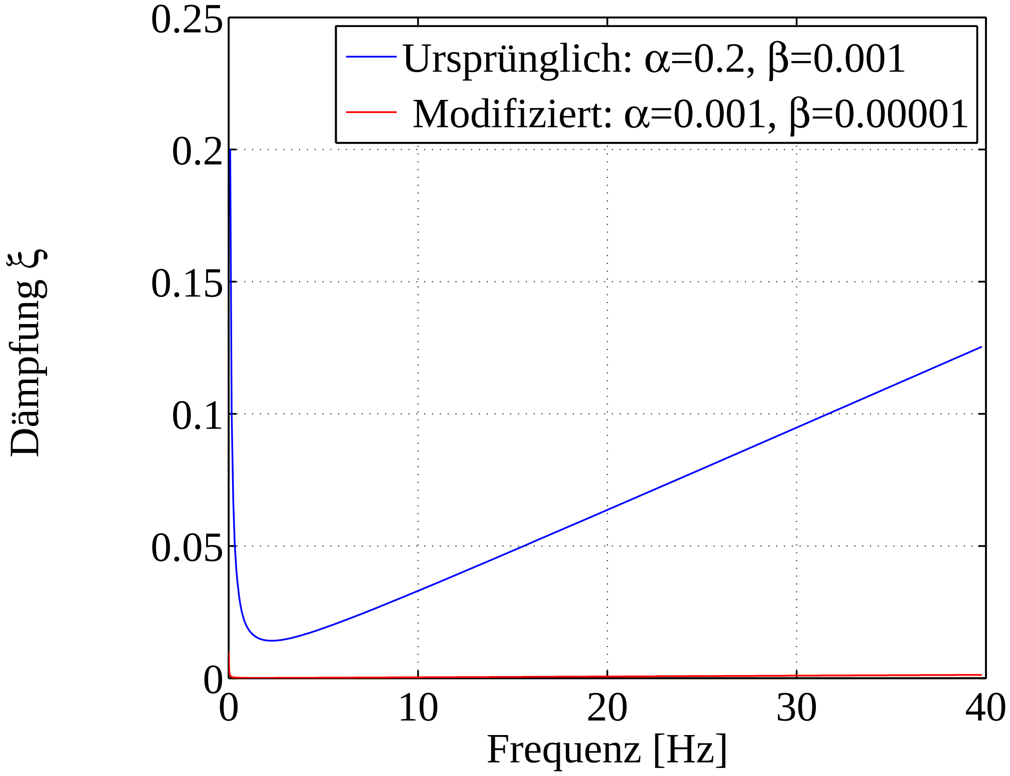


Abbildung 4.14.: Vergleich von Dämpfungskoeffizienten aus [Gü08] mit den Modifizierten

Aus dem Diagramm 4.14 kann entnommen werden, dass besonders die höheren Frequenzen mit den neuen Koeffizienten viel schwächer gedämpft werden. Hierbei liegt die Tatsache zugrunde, dass in dem veränderten Modell mit Abzweig die höheren Frequenzen sehr schnell abklingen. Um diese Frequenzen realistisch abzubilden, werden die Rayleigh-Koeffizienten niedriger gewählt.

4.3.3. Modellierung des Hammers

Der Impulshammer mit den Maßen in Abbildung 4.15 ist als Hammerkopf modelliert, der zum Vollzylinder vereinfacht wurde, siehe Abbildung 4.19. Der nicht modellierte Teil des Hammers (Hammerstiel, obere Masse) wurde als Volumenmasse von $5kg$ im Vollzylinder integriert.

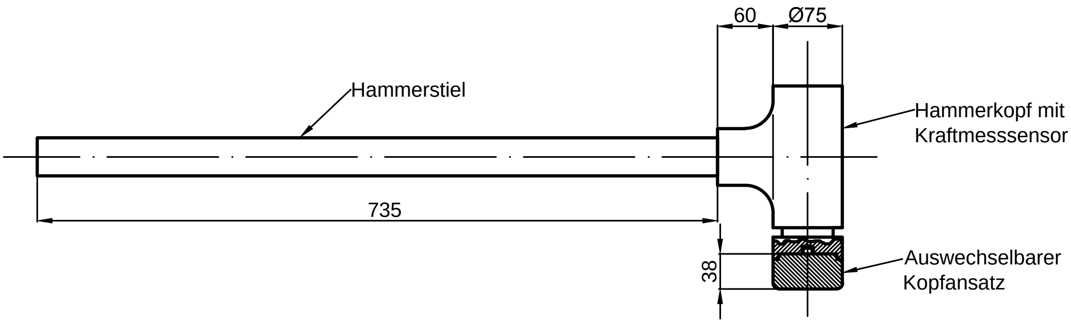


Abbildung 4.15.: CAD-Modell des Hammers

4.3.3.1. Stoßproblem

Der Hammerschlag wird im Rechenmodell in zwei Arten realisiert. Bei der ersten Variante kollidiert das Hammermodell mit dem Rohrsystem. Bei der zweiten Variante wird der im Versuch ermittelte Hammerkraftverlauf an die Schlagfläche eingebracht. Bei der ersten Variante mit Kollision läuft der Hammer mit einer Anfangsgeschwindigkeit von $1m/s$ auf eine virtuelle Schiene, so dass er während dem Stoß und nach dem Zurückspringen nur eine translatorische Bewegung in horizontaler Richtung hat.

Bei der zweiten Variante mit Kraftvorgabe ohne Kollision wird das Modell mit dem Hammerkraftverlauf erregt, der im Versuch gemessen wurde. Die beiden Varianten werden im nächsten Abschnitt gegenübergestellt.

4.4. Interpretation und Vergleich der Simulations- und Messergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse aus dem Versuch und dem Rechenmodell interpretiert und verglichen, um die unbekannten Systemparameter zu korrelieren. Das Schwingungsverhalten des Systems wird experimentell aus den Beschleunigungsmessungen gewonnen. Daher werden zuerst die Beschleunigungen aus Messungen und Rechnungen im Zeit- und Frequenzbereich gegenübergestellt.

Bei der Modellierung des Versuchsaufbaus sind u.a. folgende Größen nicht oder unvollständig bekannt :

- Dämpfungsverhalten des Mock-ups und Abzweigs,

- Die Daten des Impulshammers (Materialdaten des Hammerkopfs, Position des Sensors, das Verhältnis zwischen der Kraft an Kontaktstelle und am Sensor),
- Einfluß der Schweißstellen auf die Dämpfung und Steifigkeit,
- Krafteinleitung durch Impulshammer, exakte Position und Richtung des Stoßes (verursacht durch menschliche Imperfektion),
- Gewicht und Trägheit der Messinstrumente,
- Sonstige Störfaktoren während der Messung.

4.4.1. Beschleunigungsverläufe im Zeitbereich

Die Systemidentifikation im Zeitbereich hängt u.a. stark von den Erregungsamplituden und dem Dämpfungsverhalten ab. Im Folgenden werden diese Unbekannten in z-Richtung (Schlagrichtung) angenährt. Die Gegenüberstellung der Beschleunigungsverläufe von Mess- und Rechnungsdaten in vertikaler und Querrichtung weisen große Unterschiede auf. Das ist ein Ergebnis davon, dass beim Versuch von der beabsichtigten horizontalen Richtung leicht abgewichen wurde und somit wurden auch die Moden in vertikaler und Querrichtung angeregt. Allerdings sind sie im Vergleich mit horizontalen Schwingungen sehr schwach. Daher werden im weiteren ausschließlich die Moden in horizontaler also Richtung betrachtet.

Zuerst werden die beiden Varianten der Krafterregung in folgender Abbildung 4.16 dargestellt.

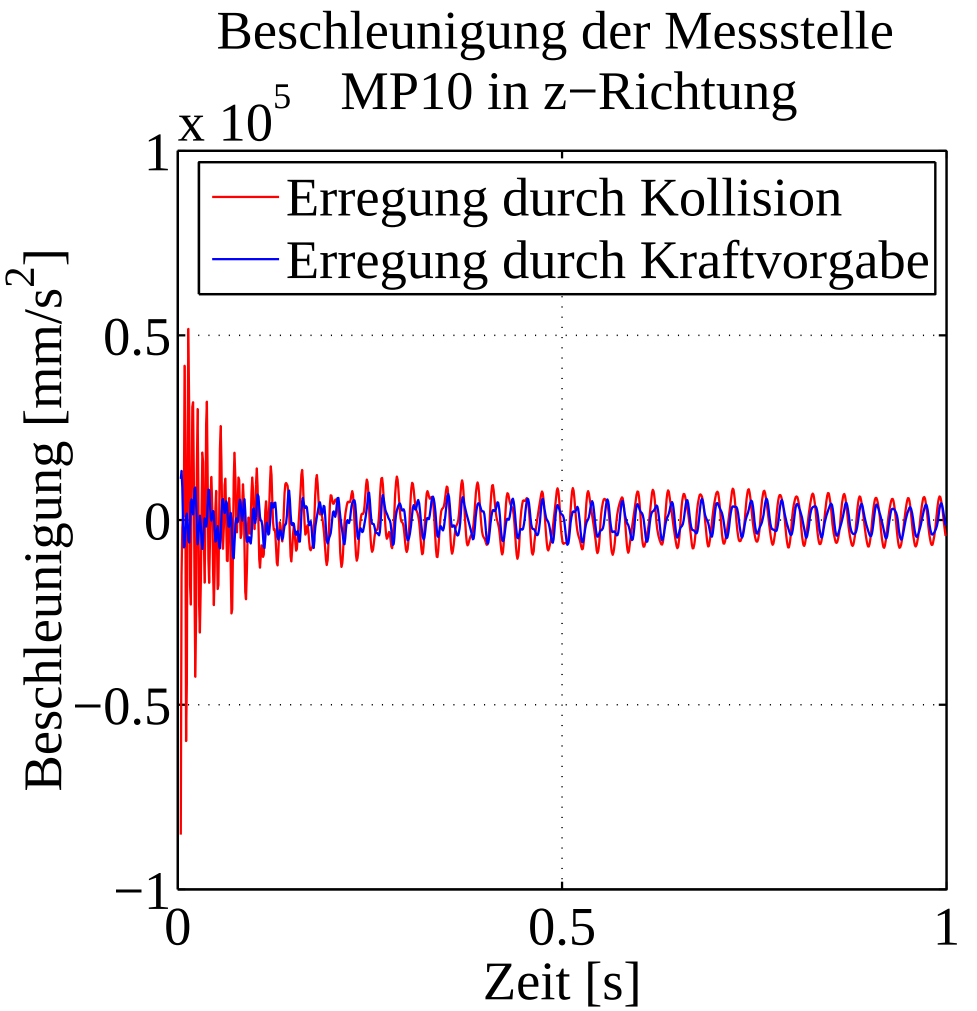


Abbildung 4.16.: Der Beschleunigungsverlauf der Messstelle MP10 in Z-Richtung

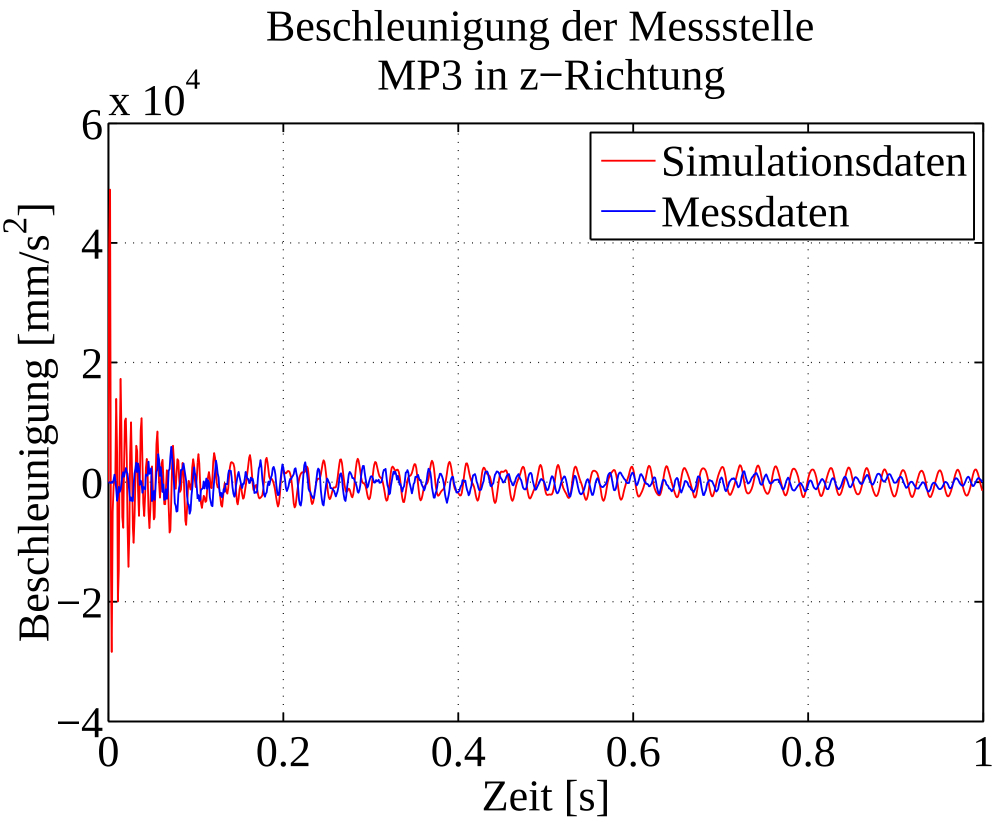


Abbildung 4.17.: Der Beschleunigungsverlauf der Messstelle MP10 in Z-Richtung

4.4.2. Hammerkraft

Die Hammerkraft wird durch einen Sensor in dem Hammer gemessen. Theoretisch gesehen ist die gemessene Kraft die Summe der Reaktionskräfte zwischen dem Sensor und angrenzende Struktur des Hammers. In der Abbildung 4.18 ist die gemessene Schlagkraft aus dem Versuch dargestellt.

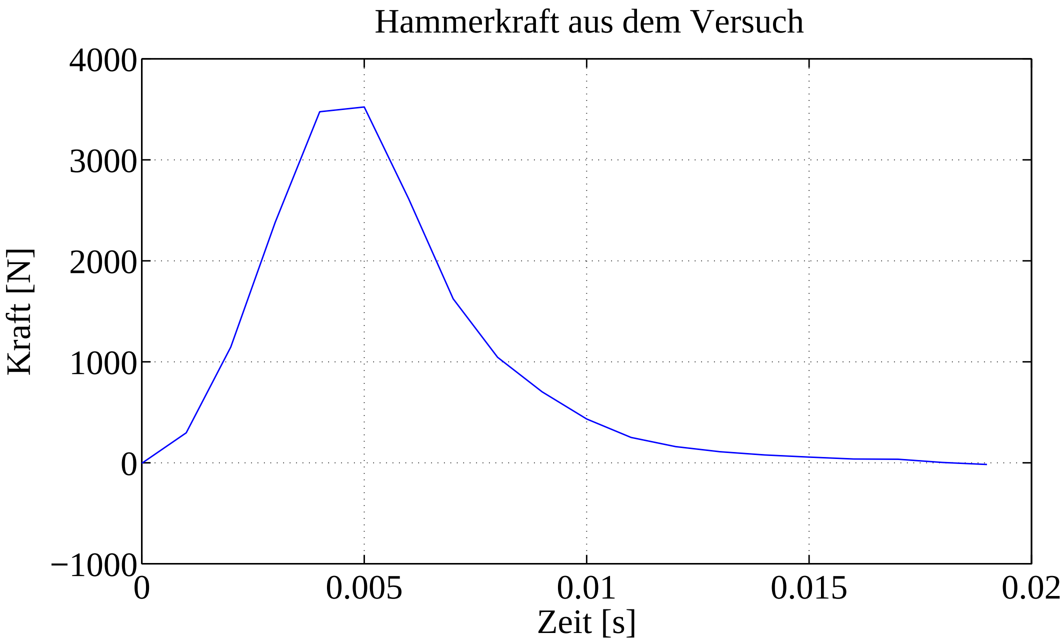


Abbildung 4.18.: Die gemessene Hammerkraft

Das Plateau an der Spitze der Kurve weist auf einen möglichen Informationsausfall hin. Weil die Auflösung der Messung nur $1000Hz$ beträgt, wird dieses Plateau nicht präzise aufgelöst. Es ist hierbei aufgrund der steilen Tangenten an den zwei Stützpunkten des Plateaus möglich, dass auf dessen eine größere Spitze aufgelöst werden könnte, wenn der Hammerkraftverlauf mit einer höheren Frequenz abgetastet wäre. Die in der Simulation entstandenen Kraftverläufe sind in derselben Konfiguration bis zu 3 mal höher.

In den folgenden Untersuchungen liegt die erste Variante mit kollidierendem Hammer zugrunde.

4.4.3. Spannungen in der Struktur

Die Spannungsverläufe an der Struktur tragen dazu bei, das Schwingungsverhalten bzw. das Abklingeverhalten zu identifizieren. Große Spannungen an der Kontaktstelle führen zu plastischen Verformungen und ändern damit die Geometrie bzw. die Systemeigenschaften. Es ist also zu gewährleisten, dass im Rechenmodell keine plastischen Deformationen auftreten, wie im reellen Fall. Die größte Spannung in der Struktur während dem ganzen Verlauf entsteht während dem Kontakt und beträgt $34,97N/mm^2$. Der Verlauf der Vergleichsspannung nach Mises während dem Stoß ist in der Abbildung 4.19 auf dem Modell veranschaulicht.

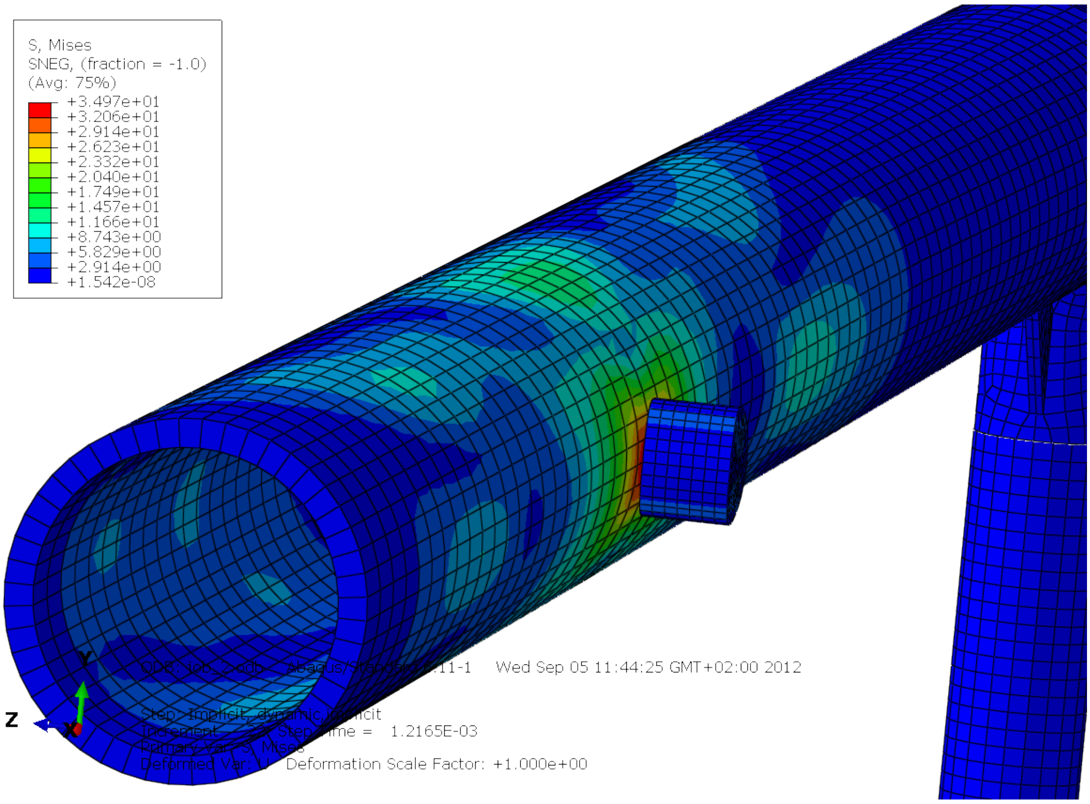
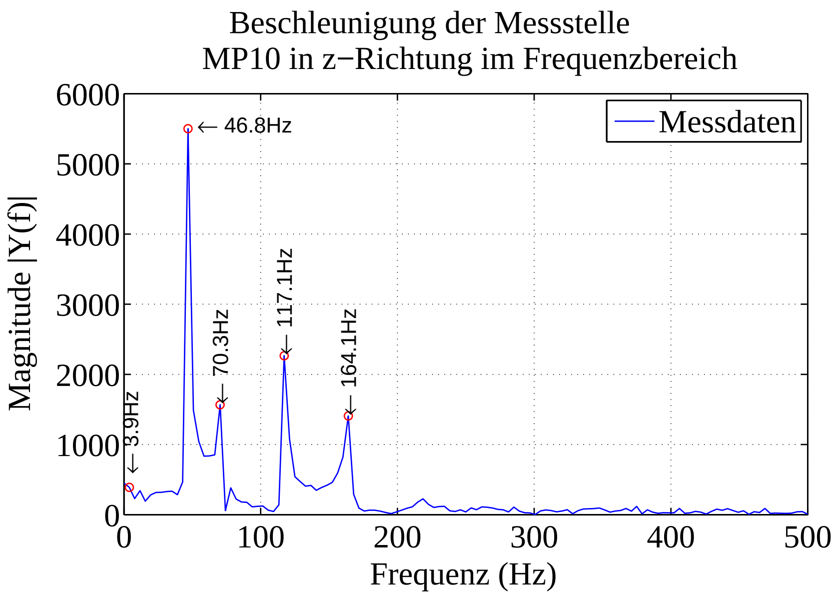


Abbildung 4.19.: Spannungsverteilung auf dem Rohr während dem Stoß

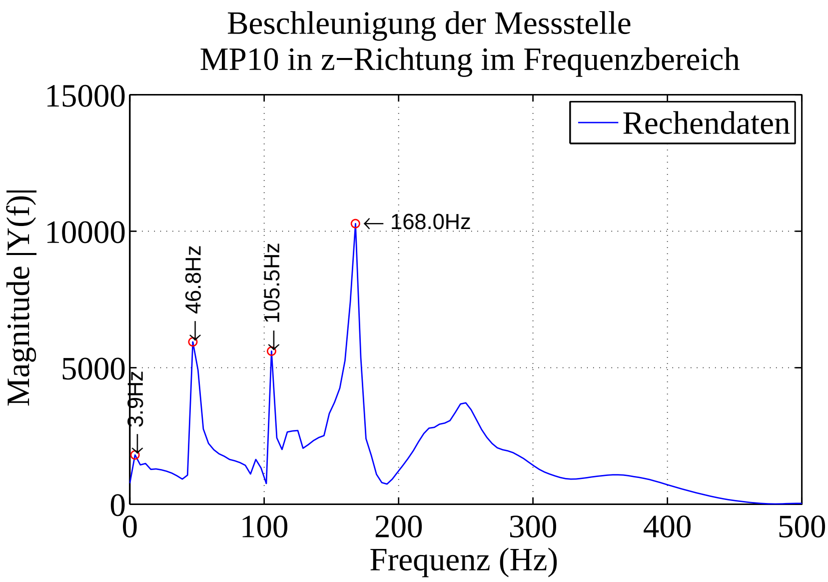
4.4.4. Untersuchung im Frequenzbereich

Im Folgenden werden die Beschleunigung-Zeit Kurven mit Hilfe der Fourier Analyse im Frequenzbereich betrachtet. Die in den Zeitbereichuntersuchungen schlecht sichtbaren Zusammensetzungen der Schwingungen werden dabei erkannt. Die Gegenüberstellung der dominanten Eigenfrequenzen aus Mess- und Rechnungsdaten sind in der Abbildung 4.20 dargestellt.

Vergleich der durch MP10 aufgenommenen dominanten Eigenfrequenzen					
Messdaten [Hz]	3,9	46,8	70,3	117,1	164,1
Rechenmodell [Hz]	3,9	46,8	-	105,5	168
Abweichung [%]	0	0	-	10,25	2,38



(a) Der Beschleunigungsverlauf der Messstelle MP10 in Z-Richtung im Frequenzbereich aus den Messwerten



(b) Der Beschleunigungsverlauf der Messstelle MP10 in Z-Richtung im Frequenzbereich aus dem Rechenmodell

Abbildung 4.20.: Der Beschleunigungsverlauf der Messstelle MP10 in Z-Richtung im Frequenzbereich

5. Zusammenfassung

Im ersten Teil dieser Studienarbeit wurde der Rohrmodellgenerator „PipeGen“ programmiert, mit dem automatisch per Eingabe eines Inputfiles 3D-Rohrmodelle mit Wanddickenreduzierungen erstellt werden können. Die automatisierte Erstellung unterschiedlicher 3D-Modelle ermöglicht die effiziente Durchführung von Parameterstudien. Das programmierte Matlab-Tool generiert zuerst ein AutoCAD-Skript, führt das AutoCAD-CLI (Command line interface) aus, liest die von AutoCAD exportierte Modelldatei mittels eines Python-Skripts in Abaqus-CLI ein, vernetzt es, führt eine FEM-Testsimulation durch und verifiziert die Konvergenz an einem statischen, unidirektionalen Lastfall. Das PipeGen exportiert Rohrmodelle mit mehreren Wanddickenreduzierungen durchschnittlich unter $10\ Sekunden$ und die Ergebnisse der Testsimulation unter $60\ Sekunden$ auf einem Office-PC (HP-Compaq-DC7900). Dennoch kann das Tool mehrere Modelle rekursiv erstellen und archivieren. Somit bietet der Rohrmodellgenerator „PipeGen“ deutliche Effizienzvorteile gegenüber zu manueller Erstellung der Testmodelle. Damit wurde eine Softwarebasis für automatisierte Parameterstudien und Optimierungsschleifen geschaffen.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde ein Rechenmodell für den Modalanalyseversuch mit Impulshammer aufgebaut. Es wurden an verschiedenen Modellierungsvarianten die Einflüsse der Mess-, sowie Modellunbekannten untersucht. Hierzu wurde der Hammerschlag am Rechenmodell sowohl als ein Kontaktproblem durch einen Stoß, als auch als virtuelle Kraftvorgabe realisiert. Abschließend wurden die Mess- und Rechnungsergebnisse gegenübergestellt und die abweichungsverursachenden Faktoren sowie Verbesserungsmaßnahmen erforscht. Der Vergleich der Mess- und Simulationsergebnisse zeigt, dass für die Modellierung des Kontaktproblems Materialdaten des Hammers erforderlich sind. Dennoch muss das Messsignal des Impulshammers validiert werden. Das Signal ist mit 1000Hz aufgelöst und bei einer Kontaktdauer von $\sim 0,015$ Sekunden sind wenige Messpunkte über den Peak bekannt. Das flache Plateau am Signal, das nur mit zwei Punkten aufgezeichnet ist, weist auf eine möglicherweise größere Signalspitze hin. Es ist zu verifizieren, ob die gemessene Hammerkraft tatsächlich der Kraft an der Kontaktstelle entspricht. Andererseits zeigen die Vergleiche im Zeitbereich, dass die in vorherigen Arbeiten ermittelten Dämpfungsdaten zu dem veränderten Versuchsaufbau angepasst werden müssen. Somit bildet das Rechenmodell und darauf untersuchte Modellierungskomponenten eine Basis für das Model-Updating.

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

[Ade] Adelung, Rainer: *Delta-Distribution*. http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/fnano/pdf_free/kapitel13.pdf, . – Aufruf am 26.09.2012

[Bat02] Bathe, Klaus-Jürgen: *Finite-Elemente-Methoden*. Heidelberg : Springer, 2002

[COR] CORPORATION, ENDEVCO: *ISOTRON® Accelerometer Model 7754A-1000*. http://icwic.cn/icwic/data/pdf/cd/cd036/Acceleration%20Sensor/a/182229.pdf, . – Aufruf am 26.09.2012

[DS] Dassault Systèmes, 2011: *Abaqus 6.11 Online Documentation*. http://caedoc.hlrs.de/abaqus/Documentation/docs/v6.11/books/popups/info.html, . – Aufruf am 26.09.2012

[Gü08] Güner, Till: *Ermittlung des Einflusses verschiedener Dämpfungsmechanismen auf das Schwingungsverhalten eines Rohrleitungssystems*. 2008

[Jus] Juschkat, Ute: *Schrittweitensteuerung von Einschrittverfahren*. http://www.ruhr-uni-bochum.de/num1/files/theses/ba_juschkat.pdf, . – Aufruf am 26.09.2012

[Luz92] Luz, Eberhard: *Schwingungsprobleme im Bauwesen*. Ehningen : Expert Verlag, 1992

[Mel] Melenk, Jens: *Adaptive Verfahren mit Schrittweitensteuerung*. http://www.math.tuwien.ac.at/~melenk/teach/num_DGL_SS08/ode_teil4.pdf, . – Aufruf am 26.09.2012

[Nat88] Natke, Hans G.: *Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse*. Braunschweig/Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn, 1988

[Saa] Saarland, Mia-Uni: *Newton-Verfahren*. http://www.mia.uni-saarland.de/Teaching/MFI0708/mfi_3_skript.pdf, . – Aufruf am 26.09.2012

[Sca] Scarth, Doug: *Supplementary Technical Basis for ASME Section XI Code Case N-597*. http://dx.doi.org/10.1115/PVP2005-71235, . – Aufruf am 26.09.2012

[TM] The MathWorks, Inc: *Matlab Online Documentation*. http://www.mathworks.de/help/techdoc/, . – Aufruf am 26.09.2012

[Tre39] Trendelenburg, Ferdinand: *Einführung in die Akustik*. Berlin : Springer, 1939

[WS12] Werner Schiehlen, Peter E.: *Technische Dynamik : rechnergestützte Modellierung mechanischer Systeme im Maschinen- und Fahrzeugbau*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2012

[Zim] Zimmermann, Steffen: *Finite Elemente und ihre Anwendung auf physikalisch und geometrisch nichtlineare Probleme*. `http://alexandria.tue.nl/extra2/bcoreports/BCO01-05.pdf`, . – Aufruf am 26.09.2012

A. Anhang

```
input:
                  thickness: [12x8 double]
                        D_a: 101.6000
                        s_n: 10
                        r_k: 175
                   l_fade_1: 80
                     l_an_1: 690
                     l_an_2: 729
                   l_fade_2: 80
                elbow_angle: 80
                   thinning: [1x1 struct]
 thickness_radial_positions: [0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330]
                 extensions: 1
                       type: 'bow'
          profile_positions: [0 15.2200 30.4500 45.6700 60.9000 76.1200 78 80]

input.D_a:
  101.6000

input.s_n:
    10

input.r_k:
   175

input.l_fade_1:
    80

input.l_an_1:
   690

input.l_an_2:
   729

input.l_fade_2:
    80

input.elbow_angle:
    80

input.thinning:
    t1: [1x1 struct]

input.thinning.t1:
               erosion_wall: 'inner'
              erosion_level: 8
     erosion_start_position: 30
       erosion_end_position: 60
       erosion_radial_width: 75
    erosion_radial_position: 0

input.thinning.t1.erosion_wall:
inner
input.thinning.t1.erosion_level:
```

Abbildung A.1.: Matlab-Print eines Beispielstructs für einen Rohrbogen

```
input:
                     thickness: [12x8 double]
                           D_a: 101.6000
                           s_n: 10
                      thinning: [1x1 struct]
    thickness_radial_positions: [0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330]
                          type: 'linear'
                             l: 1000
             profile_positions: [0 100 200 500 700 800 900 1000]

input.D_a:
  101.6000

input.s_n:
    10

input.thinning:
    t1: [1x1 struct]

input.thinning.t1:
               erosion_wall: 'inner'
              erosion_level: 8
     erosion_start_position: 300
       erosion_end_position: 500
       erosion_radial_width: 75
    erosion_radial_position: 0

input.thinning.t1.erosion_wall:
inner
input.thinning.t1.erosion_level:
     8

input.thinning.t1.erosion_start_position:
   300

input.thinning.t1.erosion_end_position:
   500

input.thinning.t1.erosion_radial_width:
    75

input.thinning.t1.erosion_radial_position:
     0

input.thickness_radial_positions:
     0    30    60    90   120   150   180   210   240   270   300   330

input.type:
linear
input.l:
        1000

input.profile_positions:
           0         100         200         500         700         800         900↙
```

Abbildung A.2.: Matlab-Print eines Beispielstructs für ein lineares Rohr

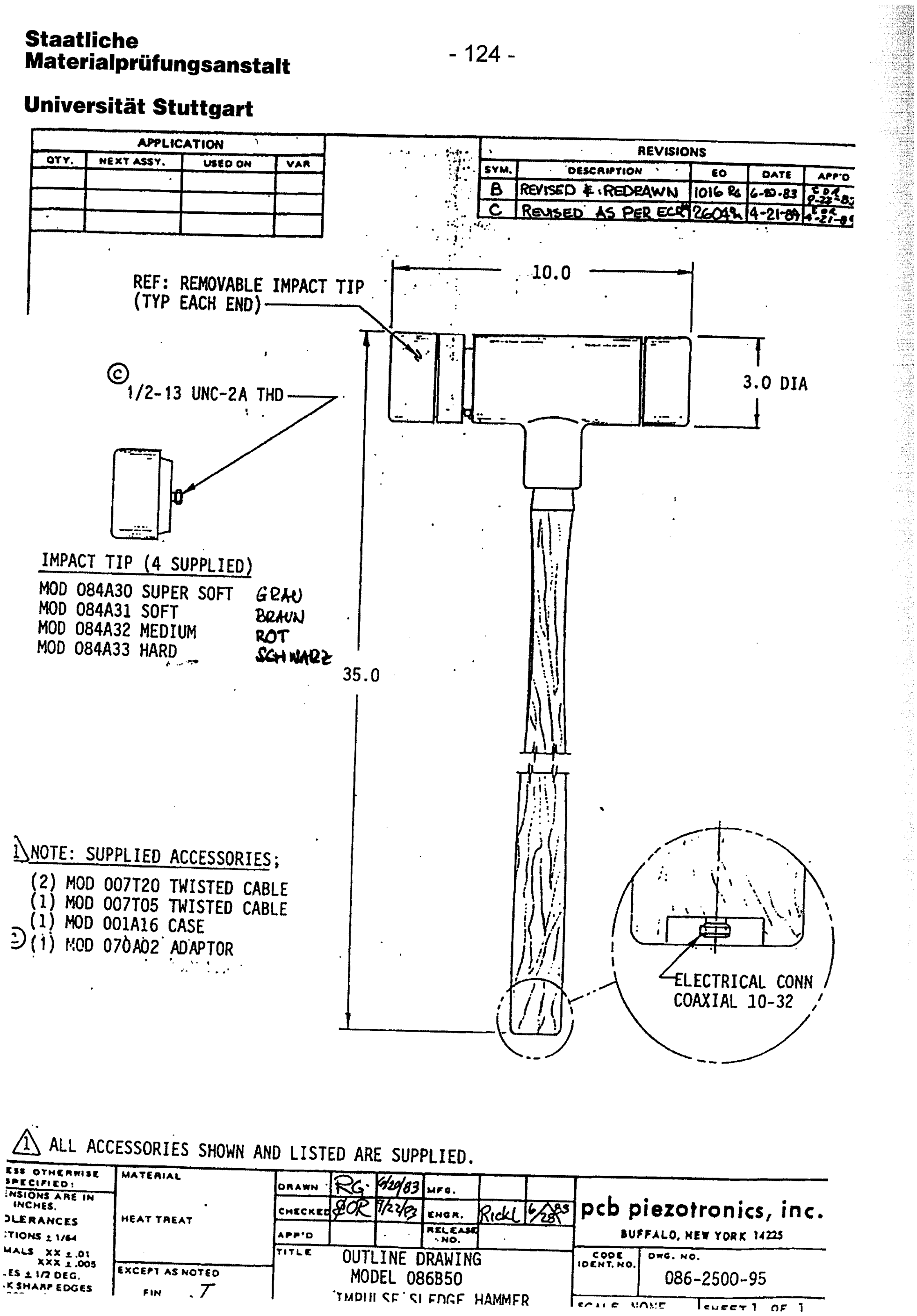


Abbildung A.3.: Betriebsblatt des Impulshammers (Quelle: PCB Piezotronics)

```
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;;Dieses Skript erstellt das solide Modell der erodierten Rohrecke
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;;Das Profil des unteren Anschlusses
(command "_circle" "0,0,0" "D" 101.6)
(setq profil_aussen (EntLast))
(command "_copy" profil_aussen "" "0,0,0" "0,0,0")
(setq profil_end_aussen (EntLast))
(command "_rotate3d" profil_end_aussen "" 2 "175,0,0" "175,1,0" "<80")
(command "_spline" "40.569999999999993,0" ... "_c" "" )
(setq profil_1_1 (EntLast))
(command "_copy" profil_aussen "" "0,0,0" "0,0,-690")
(setq anschluss_1_end_aussen (EntLast))
(command "_circle" "0,0,-80" "D" 81.6)
(setq anschluss_1_mitte_innen (EntLast))
(command "_circle" "0,0,-690" "D" 81.6)
(setq anschluss_1_end_innen (EntLast))
(command "_spline" "39.699999999999996,0" ... "_c" "" )
(setq profil_11_2 (EntLast))
(command "_rotate3d" profil_11_2  "" 2 "175,0,0" "175,1,0" "<90" )
.
.
.
(command "_copy" profil_end_aussen "" "0,0,0" "717.9248519458996,0,126.58952151919222
(setq anschluss_2_end_aussen (EntLast))
(command "_circle"  "0,0,0"  "D" 81.6)
(setq anschluss_2_mitte_innen (EntLast))
(command "_rotate3d" anschluss_2_mitte_innen "" 2 "175,0,0" "175,1,0" "<80")
(command "_move" anschluss_2_mitte_innen "" "0,0,0" "@78.784620240976636,0,13.8918542
(command "_circle" "0,0,0" "D" 81.6)
(setq anschluss_2_end_innen (EntLast))
(command "_rotate3d" anschluss_2_end_innen "" 2 "175,0,0" "175,1,0" "<80")
(command "_move" anschluss_2_end_innen "" "0,0,0" "@717.9248519458996,0,126.589521519
;;Definition der Referenzmittellinie des Rohres
(command "_ucs" "0,0,0" "1,0,0" "1,0,1")
(command "_arc" "_c" "175,0" "0,0" "_a" "-80")
(setq profil_pfad_innen (EntLast))
(command "_line" "0,0,0" "0,-690" "")
(setq anschluss_pfad_1 (EntLast))
(command "_line" "144.61156890828721,172.34135677713641" "@717.9248519458996,126.5895
(setq anschluss_pfad_2 (EntLast))
(command "_save" "")
(command "_pedit" "_m" anschluss_pfad_1 profil_pfad_innen anschluss_pfad_2 "" "" "V"
(command "_copy" pfad_ganz_innen "" "0,0,0" "0,0,0")
(setq pfad_ganz_aussen (EntLast))
(command "_save" "")
;;Erstellen des Koerpers
(command "_loft" anschluss_1_end_innen anschluss_1_mitte_innen profil_1_1 profil_2_1 
anschluss_2_mitte_innen anschluss_2_end_innen "" "_p" pfad_ganz_innen)
(setq rohr_innen (EntLast))
```

```
(command "_loft" anschluss_1_end_aussen profil_1_2 profil_2_2 profil_3_2 profil_4_2
anschluss_2_end_aussen "" "_p" pfad_ganz_aussen)
(setq rohr_aussen (EntLast))
(command "_subtract" rohr_aussen "" rohr_innen "")
(setq rohr_ecke_ganz (EntLast))
(entdel profil_innen)
(entdel profil_aussen)
(command "_save" "")
(command "_export" "...""")
```

Code A.1: Das AutoLISP-Skript einer Annäherung des Abzweigs

```
"""
Abaqus Skript
Rohrbogen
"""

from abaqus import *
from abaqusConstants import *
backwardCompatibility.setValues(includeDeprecated=True, reportDeprecated=False)

# Create a model
komplett = mdb.Model(name='Model-1')

mdb.saveAs(model_file);

#Import part
import part

acis = mdb.openAcis(acisfile,scaleFromFile=OFF)
komplett.PartFromGeometryFile(name='rohrbogen', geometryFile=acis,
    dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
rohrbogen = komplett.parts['rohrbogen']

#Ignore the imported edges
import mesh
rohrbogen.ignoreEntity((rohrbogen.edges[1],rohrbogen.edges[5]))


import part
#Define Datum plane
datum_xz=rohrbogen.DatumPlaneByPrincipalPlane(principalPlane=XZPLANE,offset=0)

#Partition the cell
main_cell=rohrbogen.cells[0]
datum_plane=rohrbogen.datums[3]
rohrbogen.PartitionCellByDatumPlane(main_cell,datum_plane)

# Create the material.
import material

Stahl = komplett.Material(name='Steel')

# Create the elastic properties: youngsModulus is 209.E3
# and poissonsRatio is 0.3

elasticProperties = (210.E3, 0.3)
densityProperties =(7800.E-9, 0)
Stahl.Elastic(table=(elasticProperties, ) )
Stahl.Density(table=(densityProperties, ) )

import section
```

```
# Create a section.

mySection = komplett.HomogeneousSolidSection(name='SteelSection',material='Steel')

# Assign the section to the region. The region refers
# to the single cell in this model.

region = (rohrbogen.cells,)
rohrbogen.SectionAssignment(region=region,sectionName='SteelSection')

#Mesh the part
import mesh

# Assign an element type to the part instance.

region = (rohrbogen.cells,)
elemType = mesh.ElemType(elemCode=C3D8R, elemLibrary=STANDARD)
rohrbogen.setElementType(regions=region, elemTypes=(elemType,))

# Seed the part instance.

rohrbogen.seedPart(size=13)

# Mesh the part instance.

rohrbogen.generateMesh()


# Create assembly
import assembly

myAssembly = komplett.rootAssembly
myInstance = myAssembly.Instance(name='Instance',
    part=rohrbogen,dependent=ON)


#Create a step
import step

#komplett.StaticStep(name='MainStep', previous='Initial',timePeriod=1.0, initialInc
komplett.ImplicitDynamicsStep(name='MainStep',previous='Initial',timePeriod=10.0,ti

##Field output request editieren
komplett.fieldOutputRequests['F-Output-1'].setValues(frequency=1)

#Create loads and BC's
import load

# Create a boundary condition
bc_surface=(myInstance.faces[2],myInstance.faces[9])
komplett.EncastreBC(name='Fixed',createStepName='MainStep',region=bc_surface)
```

```
#Create a amplitude
sinus_amp=komplett.TabularAmplitude('sinus',amp_table)

# Create a surface traction
load_surface=(myInstance.faces[4],myInstance.faces[7])
#komplett.SurfaceTraction(name='SurfaceTrac',createStepName='MainStep',region=load_su
#komplett.Pressure(name='Pressure',createStepName='MainStep',region=load_surface,magn
#komplett.Gravity(name='Gravity', createStepName='MainStep', comp3=9.81);

import interaction
komplett.Coupling(name='Constraint',influenceRadius=WHOLE_SURFACE ,controlPoint=(myIn

import load
komplett.ConcentratedForce(name='Force',createStepName='MainStep',region=(myInstance.

import job

# Create an analysis job for the model and submit it.

jobName = 'Job_scripted'
myJob = mdb.Job(name=jobName, model=komplett,    description='Process the job',numCpu

# Wait for the job to complete.

myJob.submit()
#myJob.waitForCompletion()
mdb.saveAs(model_file);
```

Code A.2: Das Eingabeskript der in der Studienarbeit benutzten Testsimulation