

MASTERARBEIT

Numerische Analyse der Steifigkeiten & Belastungen von Ladekran Schubarmverbindungen

durchgeführt am
Institut für Mechanik
an der
Technischen Universität Graz

vorgelegt von:
Hannes Rauchenschwandtner

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Maschinenbau



Betreuerin: Univ.-Prof. Dr.-Ing.habil. Katrin Ellermann

Graz, Mai 2017

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Hannes Rauchenschwandtner, 27.09.1991, dass die vorliegende Masterarbeit von mir selbständig verfasst wurde. Zur Erstellung wurden von mir keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet.

Hannes Rauchenschwandtner

Hannes Rauchenschwandtner

1130789

Matrikelnummer

Danksagung

Wer immer tut was er schon kann, bleibt immer das, was er schon ist.

Henry Ford (1863-1947)

Ich bedanke mich recht herzlich bei allen, die mich während meines Studiums und während der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt haben. Da es mir ermöglicht wurde diese Masterarbeit als Kooperationsprojekt durchzuführen, möchte ich mich im Speziellen bei Frau Univ.-Prof.Dr.-Ing.habil. Katrin Ellermann von der Technischen Universität Graz, bei Herrn Ing. Eckhard Wimmer sowie bei Herrn Dipl.Ing. Sandro Holzer von der Palfinger Europe GmbH bedanken. Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Eltern, welche mir das Studium durch finanzielle Unterstützung erleichtert haben, sowie bei meiner Freundin, die mir immer tatkräftig zur Seite gestanden ist, bedanken.

Informationen

Vor- und Zuname:	Hannes Rauchenschwandtner
Institution:	Technische Universität Graz, Mechanik Institut
Studiengang:	Maschinenbau
Kooperationspartner:	Palfinger Europe GmbH
Titel der Masterarbeit:	Numerische Analyse der Steifigkeiten & Belastungen von Ladekran Schubarmverbindungen
Betreuerin der Universität:	Univ.-Prof. Dr.-Ing.habil. Katrin Ellermann
Betreuer der Firma:	Dipl.-Ing. Sandro Holzer

Schlagwörter

1. Schlagwort: Nichtlineare Systeme
2. Schlagwort: Numerische Analyse
3. Schlagwort: Gesamtsteifigkeit
4. Schlagwort: Kontaktspannungen
5. Schlagwort: Methode der Grenzzustände

Abstract

Palfinger is a multinational company, which is worldwide known as a producer of lifting solutions for commercial, maritime and railway vehicles. The core product is a lorry-mounted telescopic crane.

For the dimensioning of such a crane a nonlinear finite elements model is used. The main parts of the crane are simulated as beams, which are coupled in different ways. In this thesis the current used calculation model should be upgraded to a more detailed version. Consequently, the crane could be designed more efficiently.

In general, the bending of a crane consists of two parts. The first part is the mean bending of the telescopic boom and the second part comprises the local effects of the overlap area of the telescopic boom (pipes). The overlap area deformation consists of the deformation of the pipes itself and of the plastic bearing deformation. To generate a crane calculation model, the real crane system has to be simplified. This simplified model includes different beams coupled with springs. The springs simulate the strong nonlinear overlap area. A more exact description of the total deformation is possible by individually determining this spring rates.

The second discussed topic is the strain of the contact zone of the telescopic booms. A determination, investigation and an evaluation of these strains take place.

In conclusion, the goal of this thesis is to improve the durability, the operating range and the load of the cranes.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	ii
Danksagung	iii
Informationen	iv
Schlagwörter	iv
Abstract	iv
Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	xii
Abkürzungsverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	6
2.1 Verwendete Software	6
2.2 Normung	12
3 Durchführung Steifigkeitsuntersuchungen	20
3.1 Analyse der IST-Situation	20
3.1.1 Ermittlung von Einflussfaktoren	21
3.1.2 Kombinationen und Ausprägungen der Rohrpaarungen	23
3.2 Systematischer Modellaufbau	24
3.2.1 Creo	25

3.2.2	Ansys	26
3.3	Steifigkeiten aus den Ansys Daten ableiten	32
3.3.1	Biegelinien aufstellen	32
3.3.2	Steifigkeiten ermitteln	38
3.3.3	Auswerteroutine erstellen/automatisieren	42
3.4	Analyse des gesamten Parameterfeldes	44
3.4.1	Lineare Regression	46
3.4.2	Polynom Regression	48
3.5	Weitere Steifigkeitsuntersuchungen	54
3.5.1	Variation der Eintauchtiefe	55
3.5.2	Variation der Obergurtform	56
3.5.3	Variation der Vorspannungen	58
4	Ergebnisse Steifigkeitsuntersuchung	59
4.1	Gerade Obergurtform	60
4.2	Schräge Obergurtform	62
4.3	JIB Form	63
4.4	Vergleich der Ergebnisse	66
5	Durchführung Spannungsuntersuchungen	71
5.1	Analyse der IST-Situation	72
5.2	Ansys Modellierung	74
5.3	Datenexport und Verarbeitung	76
5.4	Analyse der Spannungen	84
5.4.1	Spannungsverlauf über Belastung	85
5.4.2	Zusammensetzung der Spannung	90
5.5	Analyse des gesamten Parameterfeldes	92
5.5.1	Auswertungsposition - Ebene Fläche	92
5.5.2	Auswertungsposition - Radiusfläche	96
5.5.3	Spannungsschwingbreite	98
6	Ergebnisse Spannungsuntersuchung	102
6.1	Auswertungsposition: Ebene Fläche	102
6.2	Auswertungsposition: Radiusfläche	103

7	Verifikation der Spannungsergebnisse	105
7.1	Kranmodell PK 165.002 TEC7 bewerten	105
7.2	DMS-Messung	106
7.3	Spannungsvergleich mit optischer Messung	110
8	Resümee	113
	Literaturverzeichnis	114
	Anhang	115
A	Numerische Grundlagen	116
A.1	Lineare Regression	116
A.2	Polynom Regression	118
B	Routinen	119
B.1	Excel Auswertung	119
B.1.1	Blatt: Pfade-x	120
B.1.2	Blatt: Eingabe	122
B.1.3	Blatt: 3D kleines Rohr	122
B.1.4	Blatt: Biegelinie	125
B.2	Matlab Auswertung	127
C	Sonstige Daten	129

Abbildungsverzeichnis

1.1	Grundkomponenten (Vgl.[7])	2
1.2	Bestandteile einer Rohrpaarung	3
1.3	Das Balkenmodell	4
1.4	Spannung einer Schubarmverbindung	5
2.1	Rechenprogramm Indus [7]	8
2.2	exemplarische Rohrpaarung	9
2.3	Nodya Balkenmodell	9
2.4	Koppelung von Balkenelementen	10
2.5	Beispielhafter Berechnungspunkt	11
2.6	Unterschiedliche Belastungsszenarien	11
2.7	Berechnungsfaktoren [3]	14
2.8	Lastkombinationen [3]	17
2.9	Methode der zulässigen Spannungen [4]	18
2.10	Methode der Grenzzustände [4]	19
3.1	Variationsfeld	24
3.2	CreoModell	25
3.3	Ansys Designmodeler	26
3.4	Darstellung der Lagersituation / Freiheitsgrade	27
3.5	Darstellung der Lagersituation - Einspannung	28
3.6	Bilineare isotrope Verfestigung	29
3.7	Kontaktdefinitionen (links) und Modellbaum (rechts)	30
3.8	Ansys-Modell	30
3.9	Verformtes Rohrmodell und benötigte Pfade für die Auswertung	33
3.10	Koordinatensystem unverformt und verformt	33

3.11	Rohrquerschnitt mit exportierten Pfaden und Berechnungsdreiecken . . .	35
3.12	Vektoren	36
3.13	Durchbiegung der beiden Rohre in der xy-Ebene und xz-Ebene	38
3.14	Balkenmodell mit Belastungen und resultierende Auflagerkräfte	39
3.15	Berechnungsweg	40
3.16	Mittelung der Steifigkeitswerte	41
3.17	Programmcode	44
3.18	Rohrpaarungskombinationen	45
3.19	Lineare Auswertung Lastfall 100% HL 0% SL	47
3.20	Steifigkeitsfeld	48
3.21	Horizontaler / vertikaler Verlauf	49
3.22	Steifigkeitsverlauf über Rohrgröße	50
3.23	Steifigkeitsverlauf über Wandstaerke	50
3.24	Wandstärkenfeld	52
3.25	Steifikeitsfeld Ansys Werte	52
3.26	Steifigkeitsfeld	54
3.27	Eintauchtiefe	55
3.28	Eintauchtiefe Kräfte	56
3.29	Vergleich Rohrwandstärke und Obergurtform	57
3.30	Rohrvorspannung	58
4.1	Ergebnisse des geraden Obergurtes in Hauptrichtung	60
4.2	Ergebnisse des geraden Obergurtes in Nebenrichtung	61
4.3	Ergebnisse des schrägen Obergurtes in Hauptrichtung	62
4.4	Egebnisse des schrägen Obergurtes in Nebenrichtung	63
4.5	Ergebnisse des geraden Obergurtes HR und Jib Form	64
4.6	Ergebnisse des geraden Obergurtes NR und Jib Form	65
4.7	Traglastdiagramm PK 165.002 TEC 7 G PJ240 E [7]	66
4.8	Prüflaststellung S0	67
4.9	Stellung S1	69
4.10	Stellung S2	70
5.1	Spannung im Kontaktbereich	71

5.2	Hoch belasteter Kontaktbereich	72
5.3	Rissbild	73
5.4	Netzunabhängigkeitsstudie	75
5.5	Netzunabhaengigkeitsstudie	75
5.6	Solid 186 [1]	75
5.7	Koordinatentransformation	78
5.8	Cauchy Tetraeder	79
5.9	Spannungstransformation ebene Fläche	80
5.10	Spannungstransformation Radiusfläche	82
5.11	Spannungen 3D	83
5.12	Spannungen 2D	83
5.13	Untersuchungspunkte Spannung	84
5.14	Spannungsauswertung über großen Lastbereich	85
5.15	Berechnungspunkte	86
5.16	Spannungsauswertung Fläche hinten	87
5.17	Spannungsauswertung Fläche Radius	89
5.18	Flussdiagramm der Analyse	90
5.19	Spannungszusammensetzung	91
5.20	Nennspannung - Ansys Spannung	93
5.21	Delta	94
5.22	Psi	95
5.23	Spannungsschwingbreite	98
5.24	Parabel	99
7.1	Versuchsaufbau	107
7.2	Versuchsaufbau DMS	108
7.3	Messungskurven	108
7.4	Messungskurven	109
7.5	Optische Dehnungsmessung	110
7.6	Vergleich Normalspannung in Querrichtung σ_{zz}	111
7.7	Vergleich erste Hauptnormalspannung σ_1	112
A.1	Lineare Regression	116

A.2	Polynom Regression	118
B.1	Durchbiegung der beiden Rohre in der xy-Ebene	119
B.2	Screenshot des Excel Blattes: Pfade x	120
B.3	Koordinatenursprung	121
B.4	Makro Eingabe	121
B.5	Eingabe Blatt	122
B.6	kleines Rohr Berechnung 1	122
B.7	kleines Rohr Berechnung 2	122
B.8	kleines Rohr Berechnung 3	123
B.9	Vektoren	124
B.10	kleines Rohr Berechnung 4	124
B.11	Biegelinienblatt	125
B.12	Biegelinienblatt dublizieren	126
C.1	gesamter Kran in Transportstellung [7]	129
C.2	Kran aufgebaut auf einem LKW in Transportstellung [7]	130
C.3	Jib und Kran Form	130
C.4	Spannungen 3D	136
C.5	Spannungen 2D	137

Tabellenverzeichnis

3.1	Bewertungsmatrix	23
3.2	Zeitaufstellung	43
3.3	Beispielhafte Lastschritte einer Rohrpaarung	46
4.1	Konstanten für gerade Obergurtform in Hauptrichtung	60
4.2	Konstanten für gerade Obergurtform in Nebenrichtung	61
4.3	Konstanten für schräge Obergurtform in Hauptrichtung	62
4.4	Konstanten für schräge Obergurtform in Nebenrichtung	63
4.5	Verformungen der Prüflaststellung S0	68
4.6	Verformungen der Stellung S1	69
4.7	Verformungen der Stellung S2	70
5.1	Untersuchungsstatus	84
5.2	Lastfälle - erweiterter Lastbereich	86
5.3	Lastfälle - Untersuchungsbereich	87
6.1	Fehlerwerte ebene Fläche	102
6.2	Fehlerwerte Radiusfläche σ_1	103
6.3	Fehlerwerte Radiusfläche σ_{zz}	104
7.1	Vergleich der Spannungsschwingbreiten	106
7.2	Messergebnisse	109
C.1	Rohrpaarungen	130

Abkürzungsverzeichnis

FE Finite Elemente

FEM Finite Elemente Methode

P-Profil Polygonal-Profil

HL Hauptlast

SL Seitenlast

NL Nebenlast

Dof Degree of Freedom

x, r Rohrlängsachse

y, s vertikale Achse

z, t horizontale Achse

DMS Dehnmessstreifen

PK Palfinger Kran

DIS Digital image correlation

RG Rohrgröße [mm]

R Grenzspannungsverhältnis [$\frac{N}{mm^2}$]

adm σ Zulässige Spannung [$\frac{N}{mm^2}$]

A1 bis A4 Lastkombinationen aus regelmäßigen Lasten

B1 bis B5 Lastkombinationen aus regelmäßigen und nicht regelmäßigen Lasten

C1 bis C11 Lastkombinationen aus regelmäßigen, nicht regelmäßigen und außergewöhnlichen Lasten

HC1 bis HC4 Steifigkeitsklassen

HD1 bis HD5 Klassen der Hubwerkstypen und deren Betriebsweise

S Schwerpunkt

V_{i-j} Vektor von Punkt i zu Punkt j
 Δw Wandstärkenabweichung
 $w_{Mittelwert}$ Mittelwert der Wandstärken des großen und kleinen Rohres
 w_{GR} Wandstärke des großen Rohres [mm]
 w_{KR} Wandstärke des kleinen Rohres [mm]
 C Federsteifigkeit [$\frac{N}{mm}$]
 F_h Kontaktkraft hinten oben [N]
 F_v Kontaktkraft vorne unten [N]
 mt Metertonnen
 R_{GR} Radius großes Rohr [mm]
 R_{KR} Radius kleines Rohr [mm]
 $K_1, K_2, K_3, K_4, K, D, m_1, m_2, b$ Konstanten
 f_i Einzellast [N]
 F_h Kontaktkraft hinten oben [N]
 F_v Kontaktkraft vorne unten [N]
 F_s vertikale Kraft [N]
 F_t horizontale Kraft [N]
 F_{hi} Schwenkkraft [N]
 m_i Masse [kg]
 Δm fallengelassener Massenanteil [kg]
 g Erdbeschleunigung [$\frac{m}{s^2}$]
 c_a Aerodynamik Koeffizient
 $q(3)$ Winddruck bei $v(3)$ [$\frac{N}{m^2}$]
 A charakteristische Windangriffsfläche [m^2]
 $v(3)$ Böenwindgeschwindigkeit, gemittelt über eine Zeitspanne von 3 sec [$\frac{m}{s}$]
 S_k Lasteinwirkung im Schnitt k eines Teiles (Methode der Grenzzustände)
 \bar{S}_k Lasteinwirkung im Schnitt k eines Teiles (Methode der zulässigen Spannungen)
 Φ_1 Dynamikbeiwert der Masse

Φ_2 Dynamikbeiwert der Last
 v_h vertikale Hakengeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]
 β_2 Term zur Berechnung von Φ_2
 γ_f globaler Sicherheitsbeiwert
 γ_n Risikobeiwert
 γ_m Widerstandsbeiwert
 γ_p Teilsicherheitsbeiwert
 α Neigungswinkel, Vorspannungswinkel [$^\circ$]
 $\sigma_a, \Delta\sigma$ Spannungsamplitude [$\frac{N}{mm^2}$]
 $\bar{\sigma}_{1l}$ Bemessungsspannung in Element 1 (Methode der zulässigen Spannungen) [$\frac{N}{mm^2}$]
 $\bar{\sigma}_{2l}$ Spannungen in Element 1 als Folge von lokalen Einflüssen (Methode der zulässigen Spannungen) [$\frac{N}{mm^2}$]
 $\bar{\sigma}_1$ Bemessungsspannung in Element 1 (Methode der zulässigen Spannungen) [$\frac{N}{mm^2}$]
 σ_{1l} Spannungen in Element 1 als Folge von S_k (Methode der Grenzzustände) [$\frac{N}{mm^2}$]
 σ_{2l} Spannungen in Element 1 als Folge von lokalen Einflüssen (Methode der Grenzzustände) [$\frac{N}{mm^2}$]
 σ_l Bemessungsspannung in Element 1 (Methode der Grenzzustände) [$\frac{N}{mm^2}$]
 σ_{xx} Normalspannung in x-Richtung (Rohrlängsrichtung) [$\frac{N}{mm^2}$]
 σ_{zz} Normalspannung in z-Richtung (Rohrquerrichtung) [$\frac{N}{mm^2}$]
 σ_1 Erste Hauptnormalspannung [$\frac{N}{mm^2}$]
 $\sigma_{B_{HR}}$ Biegeennspannung in Hauptrichtung [$\frac{N}{mm^2}$]
 $\sigma_{B_{NR}}$ Biegeennspannung in Nebenrichtung [$\frac{N}{mm^2}$]
 e_s Randfaserabstand in s-Richtung [mm]
 e_t Randfaserabstand in t-Richtung [mm]
 Δ_{HR} Spannungsüberhöhung in Hauptrichtung [$\frac{N}{mm^2}$]
 Δ_{NR} Spannungsüberhöhung in Nebenrichtung [$\frac{N}{mm^2}$]
 Ψ Zwischenrechengröße

1

Einleitung

Die multinationale Unternehmensgruppe Palfinger ist weltweit für alle Arten von Hebe-Lösungen im Nutzfahrzeug, Eisenbahn und maritimen Bereich bekannt. Das Stammprodukt ist der Knickarmkran, welcher in unterschiedlichen Branchen eingesetzt wird. Die Anwendungsbereiche reichen von Umschlagen von Gütern, Personentransport bis hin zur Inspektion von Bauwerken. Bei allen Anwendungen sind Reichweite und Hubkraft die entscheidenden Faktoren. Palfinger bietet Krane in der Größe von 1 bis 150 mt Hubmoment und einer Reichweite von 1 bis 49 Meter an.

Ein Kran besteht aus den Grundkomponenten: Grundgestell, Kransäule, Hauptarm, Knickarm und Schubpaket. Diese Komponenten sind in Abbildung 1.1 ersichtlich. Das Grundgestell ist am Lkw montiert und inkludiert Abstützelemente, welche einen sicheren Stand gewährleisten. Durch einen Drehkranz ist die Kransäule mit dem Grundgestell verbunden und kann rotatorisch bewegt werden. Die Kransäule ist mit dem Hauptarm verbunden. Ein Kniehebelsystem ermöglicht die Ausrichtung des Hauptarmes in verschiedene Winkellagen. Der Platz am Lkw ist durch die einzuhaltenen Gesamtabmessungen des Fahrzeuges beschränkt. Aus diesem Grund ist es notwendig, den Kran in Transportstellung auf eine Art zusammenzufalten, dass die Lkw-Breite von 2,55 m nicht überschritten wird. Um dies zu ermöglichen ist der Knickarm relativ zum Hauptarm versetzt. Dieser Versatz wird durch einen Versatzkasten, welcher am Knickarm angebracht ist, ermöglicht. In den Abbildungen C.1 und C.2 im Anhang sind Krane in Transportstellung ersichtlich. Der Knickarm nimmt im zusammengelegten Zustand des Kranes das Schubpaket auf. Am Ende des Schubpaketes

kann ein zweites Knickarmsystem angebracht werden, welches Jib genannt wird. Für die Auslegung eines solchen Kranes wird ein Berechnungsprogramm (Indus) verwendet. In diesem Programm sind alle Hauptkomponenten in einer Bauteildatenbank hinterlegt und können zu verschiedenen Varianten zusammengestellt werden.

Diese Masterarbeit gliedert sich in zwei unterschiedliche Themenbereiche. Der erste Themenbereich handelt von der Ermittlung von Steifigkeitswerten. Im zweiten Teil werden an diversen hoch belasteten Bereichen des Kranes Kontaktspannungen untersucht.



Abbildung 1.1: Grundkomponenten (Vgl.[7])

Ausgangssituation

Ladekrane sind weiche Systeme. Das bedeutet, dass die Steifigkeit einen großen Einfluss auf den Lastangriffspunkt hat. Daher ist ein Kran ein geometrisch stark nichtlineares

System. Ein zentraler Punkt bei der Auslegung ist, die Steifigkeit des gesamten Systems zu kennen. Diese Steifigkeiten bestimmen den Lastangriffspunkt wesentlich. Die Ermittlung von Steifigkeitswerten ist in Überlagerungsbereichen der Rohre eine nicht triviale Angelegenheit.

Das Schubpaket besteht aus bis zu neun teleskopierbaren Stahlrohren, an welche ein Jib mit weiteren sieben teleskopierbaren Stahlrohren angebracht werden kann. Dieses System ermöglicht das Versetzen von Lasten in einem großen Arbeitsbereich.

In Abbildung 1.2 sind exemplarisch zwei dieser teleskopierbaren Stahlrohre - kurz Rohrpaarung - visualisiert. Eine solche Rohrpaarung besteht aus den Grundkomponenten äußeres Rohr, inneres Rohr und mehreren Gleitpaketen. Die Gleitpakete ermöglichen eine translatorische Bewegung der einzelnen Rohre zueinander.

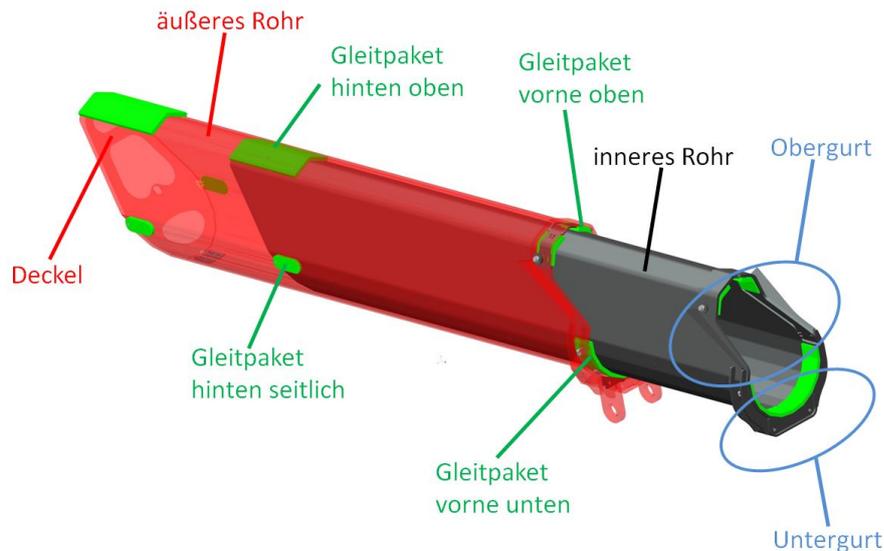


Abbildung 1.2: Bestandteile einer Rohrpaarung

Bei der Auslegung neuer Kranvarianten werden die Grundkomponenten des Schubpaketes vereinfacht als Balkenmodell abstrahiert.

In Abbildung 1.3 ist dieses Balkenmodell ersichtlich. Dabei bildet der linke graue Balken das größere Rohr und der schwarze Balken das kleinere Rohr ab. Die Durchbiegung eines solchen Systems setzt sich zum einen aus der Durchbiegung der Stahlrohre selbst und zum anderen aus den lokalen Verformungen der Überlappungsbereiche der Stahlrohre

zusammen. Diese lokalen Verformungen treten an jenen Kontaktbereichen auf, an denen die Kräfte von einem Rohr zum Nächsten mithilfe der Gleitelemente übertragen werden. Um diese lokalen Verformungs- und Kontakteffekte in einem einfachen Balkenmodell abbilden zu können, wurden die einzelnen Balken mit „Federn“ gekoppelt.

Die Belastung des Balkensystemes setzt sich aus Querkraften sowie Momenten zusammen. Alle diese Belastungen werden durch ein Kräftepaar in das System eingeleitet.

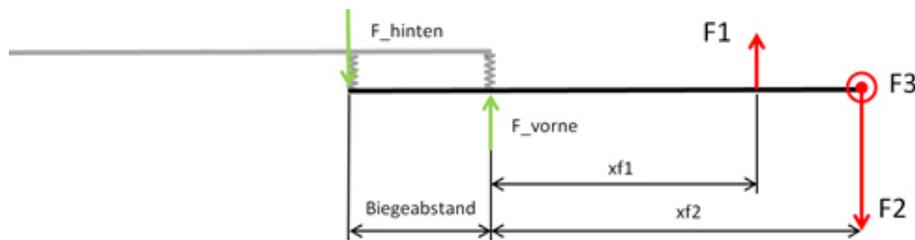


Abbildung 1.3: Das Balkenmodell

Die Federkennwerte simulieren den stark nichtlinearen Bereich der Einspannung samt der lokalen Verformungseffekte. Derzeit werden Federsteifigkeiten verwendet, welche unabhängig von Rohrgröße, Rohrwandstärke, Profilart und weiteren Einflussgrößen ermittelt wurden. Ziel dieser Arbeit ist es, diese Federsteifigkeiten in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen zu ermitteln, um dadurch die Berechnungsqualität anzuheben.

Durch ein Modell, welches die lokalen Effekte genauer beschreibt, kann bei der Auslegung unter Einhaltung der Norm, die Reichweite und / oder die Hublast der Krane erhöht werden.

Im zweiten Teil dieser Masterarbeit werden die hochbelasteten Kontaktbereiche im Hinblick auf Spannungen untersucht.

Die Rohre des Kranausschubpaketes sind mit sogenannten Gleitelementen gekoppelt (siehe Abbildung 1.2). Diese Gleitelemente ermöglichen die translatorische Bewegung der Stahlrohre und übertragen die Kräfte von einem Rohr zum nächsten. In diesen Kontaktbereichen (siehe Abbildung 1.4) treten sehr hohe Spannungen auf, welche die Dauerfestigkeit des Schubpaketes wesentlich mitbestimmen.

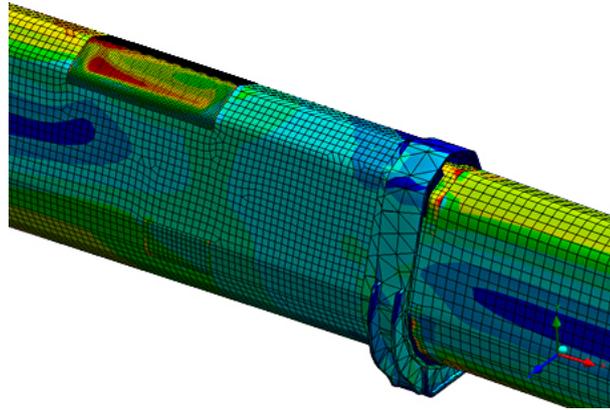


Abbildung 1.4: Spannung einer Schubarmverbindung

Bei der Auslegung der Schubpakete ist es daher sinnvoll, die Spannungsschwingbreite dieser Kontaktspannungen in Abhängigkeit diverser Größen bestimmen zu können ohne ein Finite Elemente Modell aufstellen zu müssen. Mit der Spannungsschwingbreite ist es möglich, diese hochbelastete Bereiche bereits bei der Vorauslegung einer Lebensdauerbewertung zu unterziehen. Aktuell werden diese Spannungen bei der Vorauslegung durch Beschränkung der Abmessung „Biegeabstand“ (siehe Abbildung 1.3) in einem bestimmten Wertebereich gehalten. Diese Beschränkung beruht auf Erfahrungswerten und Dauertestversuchen. Ziel ist es, diese Spannungen spezifischer, bereits bei der Vorauslegung, in Abhängigkeit diverser Einflussgrößen bewerten zu können. So lassen sich die Größen Reichweite, Hublast und Lebensdauer, welche maßgeblich durch den „Biegeabstand“ bestimmt sind, optimieren.

2

Grundlagen

In diesem Kapitel werden Grundlagen wie verwendete Software und Normen, welche für Berechnung notwendig sind, näher erläutert. Das Rechenprogramm Indus wird detailliert beschrieben.

2.1 Verwendete Software

Creo

Mithilfe des parametrischen Zeichenprogrammes Creo werden unterschiedliche Modelle für die Berechnung vorbereitet. Dabei wird auf einen strukturierten Modellaufbau Acht gegeben. Dadurch können alle benötigten Modelle analog aufgebaut werden. Dies erleichtert die anschließende Weiterverarbeitung.

Ansys

Ansys inkludiert eine Vielzahl an Modulen und Optimierungstools. Im Umfang dieser Arbeit werden ausschließlich die zwei Module „Designmodeler“ und „Strukturmodus“ verwendet. Der Designmodeler unterstützt den Benutzer beim Import und bei der Erstellung von Geometrien. Im Programmabschnitt Struktur kann eine statisch-mechanische Analyse der zuvor aufbereiteten Modelle aus dem Designmodeler durchgeführt werden.

Eine solche Analyse gliedert sich in folgende Aufgaben:

1. Zuweisung von Materialeigenschaften
2. Definition von Koordinatensystemen
3. Zuweisung von Kontakten
4. Erzeugung eines Rechenetzes
5. Lagerung des Modells
6. Aufbringen von Belastungen
7. Solver Einstellungen
8. Hinzufügen von Lösungen

Nachdem das Modell vollständig definiert ist und die Rechnung konvergiert, können anschließend im Unterpunkt „Solution“ beliebige Spannungen und Verformungen dargestellt werden. Eine detaillierte Erklärung dieser Schritte an einem für die Arbeit benötigten Modell wird im Abschnitt 3.2 durchgeführt.

Excel – Visual Basic

Für eine Vielzahl von Verifikationen, Auswertungen und grafische Darstellungen wird das Tabellenkalkulationsprogramm Excel verwendet.

Da auswertungsbedingt mit großen Datenmengen hantiert wird, ist es nötig, diverse Rechenschritte mit der Excel inkludierten Entwicklungsumgebung durchzuführen. Diese Entwicklungsumgebung basiert auf der Programmiersprache Visual Basic und ermöglicht sowohl die Programmierung von Shortcuts als auch grafischen Programmoberflächen. Durch die hohe Datenmenge benötigten die erstellten Makros sehr viel Rechenzeit, daher wurden die folgenden Auswertungen mit Matlab durchgeführt.

Matlab

Matlab ist eine Berechnungsumgebung, welches mit Matrizen arbeitet. Bei dieser Arbeit wird es zur Auswertung sowie zur Darstellung von Daten verwendet. Speziell bei den geometrisch ähnlichen Rohrpaarungen konnten für die Auswertung Skripte erstellt werden, welche einen hohen Automatisierungsgrad zuließen.

Indus

Das Programm Indus ist bei Palfinger ein hauseigenes Rechenprogramm. Es besteht aus einer Bauteildatenbank, in welcher alle Hauptkomponenten eines Kranes hinterlegt sind. Diese Datenbank ermöglicht es, Kranvarianten zusammenzustellen und auszulegen. Die Berechnung beruht auf dem FE-Programm Nodya. Nodya ermöglicht lineare sowie geometrische und materielle nichtlineare Berechnungen von unterschiedlichen Tragwerken. Solche Tragwerke können aus linienförmigen Elementen wie Stäben, Balken und Seilen aufgebaut sein. Zudem ermöglicht Indus eine statische und dynamische Berechnungen von Bauteilen nach Norm EN 12999 [3].



Abbildung 2.1: Rechenprogramm Indus [7]

Das Modell des Schubpaketes aus Abbildung 2.2 setzt sich aus den P-Profil Rohren, den zugehörigen Gleitelementen, dem Untergurt samt Lastgehänge, den Obergurt mit den unterschiedlichen Zylinderanlenkungen sowie den Ausschubzylindern zusammen.

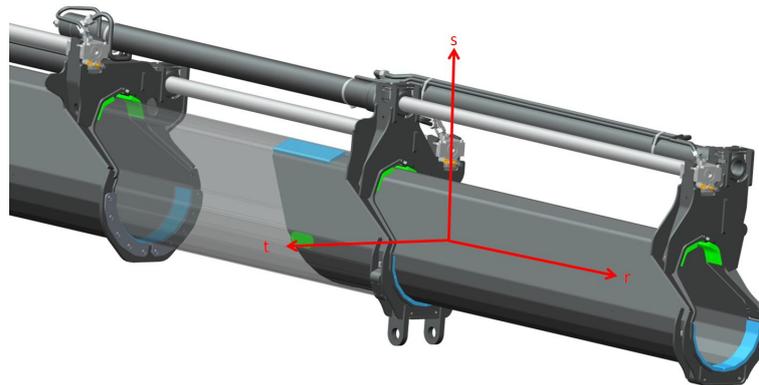


Abbildung 2.2: exemplarische Rohrpaarung

In Darstellung 2.3 ist das detaillierte Modell aus 2.2 als Balkenmodell für die Berechnung abstrahiert.

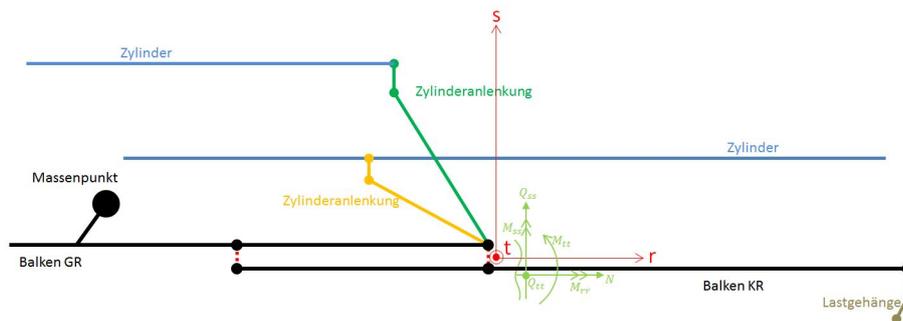


Abbildung 2.3: Nodya Balkenmodell

Die Balken der beiden Rohre sind im wirklichen Rechenmodell an der selben Stelle positioniert. Das bedeutet, dass die in rot punktierten Abstände nicht vorhanden sind. An den lagegleichen Knoten, siehe Abbildung 2.4, können Eigenschaften definiert werden. Als Standardwert werden sechs Freiheitsgrade (6 Dof) übergeben. Dieser Standardwert kann mit einem Endrelease undefiniert werden. Ein solches Endrelease steuert Koppelungsvarianten der Balken. Es ist möglich, Bewegungen in den Koordinaten x , y und z unabhängig voneinander zu definieren. Dabei kann der Knoten in der jeweiligen Koordinatenrichtung freigegeben oder gesperrt werden. Weiters ist eine reibungsbehaftete Koppelung durchführbar. Auch die Koppelung zweier Knoten mittels linearen Federn ist möglich. Unterschiedlichste Rotationen bzw. Momentenkoppelungen sind mit einem Endrelease zu definieren.



Abbildung 2.4: Koppelung von Balkenelementen

Die Federn, welche zur Koppelung der Balken der P-Profil Rohre verwendet werden, sind in diesen Koppelungsbedingungen der jeweiligen Knotenpunkte integriert. An der Lagerstelle „vorne“ der beiden Rohre werden die gesamte Torsion sowie die Querkräfte übertragen. Dabei werden die Belastungen von einem Balken mit den zugehörigen Federsteifigkeit verrechnet, und anschließend auf den nächsten Balken weitergeleitet. Die „hintere“ Lagerstelle ermöglicht ausschließlich die Übertragung der Querkräfte. Eine Normalkraft kann hier nicht übertragen werden, da der Knoten verschiebbar gelagert ist. Die Rohrlängskräfte werden über die Zylinderbalken übertragen. Geometrien, wie die Zylinderanlenkungen und die Zylinder selbst, sind ebenfalls als Balken modelliert. Die gesamten Bauteile besitzen keine Dichte, sondern es werden an beliebigen Punkten Massen positioniert, welche das Eigengewicht der unterschiedlichen Bauteile simulieren. Durch diese Vorgehensweise ist es einfach, Zusatzmassen, welche durch Wunschausrüstungen wie zum Beispiel einer Seilwindenanlage entstehen, in der Berechnung zu berücksichtigen. Zur Auswertung können an den Knoten der jeweiligen Balken, die Schnittkräfte bestimmt werden.

Mithilfe dieser Schnittkräfte werden automatisiert an einer Vielzahl von Rechenpunkten am Querschnitt des jeweiligen Balkens Spannungen ausgewertet.

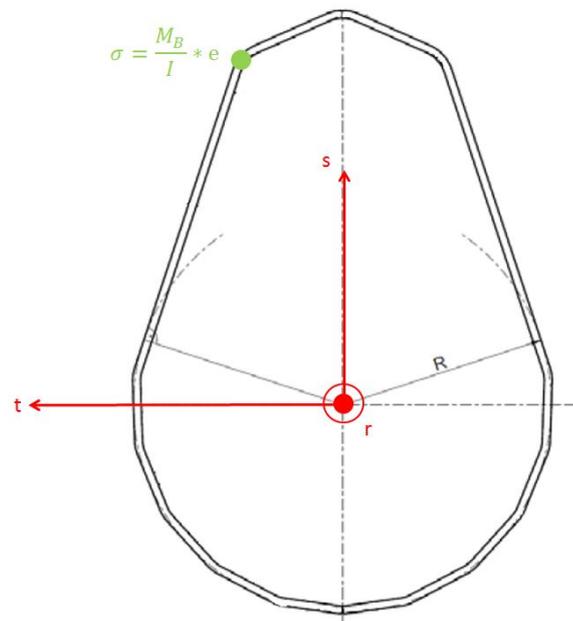


Abbildung 2.5: Beispielhafter Berechnungspunkt

Mit der beschriebenen Vorgehensweise können gesamte Kranvarianten mit verschiedenen Belastungsszenarien (siehe Abbildung 2.6) zusammengestellt und untersucht werden. Anschließend können diverse Belastungsszenarien untersucht werden. Des Weiteren ermöglicht das Rechenprogramm Indus die Durchführung eines Normnachweises nach EN 12999 [3]. Im Abschnitt 2.2 wird die Durchführung eines solchen Normnachweises beschrieben.



Abbildung 2.6: Unterschiedliche Belastungsszenarien

2.2 Normung

In diesem Abschnitt werden Normungssysteme, welche für die Berechnung und Modellierung verwendet werden, beschrieben. Zu Beginn wird auf unterschiedliche Palfinger interne Normungen, welche Geometrievorgaben beinhalten, eingegangen. Anschließend werden internationale Berechnungsnormen beschrieben. Diese internationalen Berechnungsnormen gliedern sich in folgende Berechnungsthemen:

- Statischer Festigkeitsnachweis [2, Abschnitt 5]
- Ermüdungsfestigkeitsnachweise [2, Abschnitt 6]
- Nachweis der elastischen Stabilität [2, Abschnitt 8]

Palfinger Werksnorm

Palfinger verfügt über ein eigenes Normungssystem, welches die Standardisierung über alle Produktions- sowie Entwicklungsstandorte hinweg vorantreibt. Die Palfinger Werksnorm inkludiert verschiedene Konstruktions- sowie Berechnungsrichtlinien. Des Weiteren sind verschiedene Fertigungs- und Montageschritte standardisiert.

Für diese Arbeit ist das Kapitel PNORM 10.33.01 von großer Bedeutung. Dieses Kapitel beinhaltet die Konstruktionsvorgaben für das Polygonal Profil (P-Profil). Das P-Profil wird bei allen neuen Hightech-Kranen von Palfinger als Querschnittprofil für das Schubpaket verwendet. Die Konstruktionsvorgaben reichen von der detaillierten Formgebung bis hin zur möglichen Verwendung von verschiedenen Werkstoffen. (Vgl.[5])

Ein weiteres Kapitel PNORM 10.33.02 beinhaltet Konstruktionsvorgaben für die Knick- und Schubarmrohre, welche als P-Profil ausgeführt sind. In dieser Norm sind mögliche Anbauteile (Deckel, Gleitelemente usw.) sowie Richtlinien für den Zusammenbau geregelt. Im Kapitel 3.1.2 werden die detaillierten geometrischen Ausprägungen dieser Rohre ausgeführt.(Vgl.[6])

EN 12999 [3]

Eine weitere relevante Norm, nach welcher die Krane ausgelegt werden müssen, ist die Norm EN 12999. Diese Norm legt Anforderungen für die Berechnung und Gestaltung von Ladekränen fest. Die für diese Masterarbeit wesentlichen Inhalte, mit speziellem Hinblick auf Bauteilberechnungen, werden nachfolgend beschrieben. Die Bauteilberechnung gliedert sich in folgende Punkte:

- Dynamik-Beiwerte
 - Beschleunigung aus Anheben und Gravitation der Hublast
 - Beschleunigung aus Anheben und Gravitation der Kranmasse
 - Wirkung bei plötzlichem Loslassen eines Teils der Hublast
 - Wirkungen durch Beschleunigung/Abbremsung des Schwenkantriebs
- Lasten und Kräfte
 - Regelmäßige Lasten
 - Eigenlasten
 - Hublasten
 - dynamische Kräfte
 - Fliehkräfte
 - Nicht regelmäßige Lasten
 - Windlasten während des Betriebes
 - andere Umgebungseinwirkungen wie Temperatur, Schnee und Eis
 - Lasten auf Treppen, Plattformen und Handläufen
 - Außergewöhnliche Lasten
 - Prüflasten
 - Kräfte aus Bewegungen, die plötzlich auftreten (Anschlag)
 - plötzliches Loslassen der Last
 - Kräfte auf Grund von gleichzeitig auftretenden dynamischen Höchstwerten
- Lastkombinationen

Dynamik-Beiwerte

Wie aus der Aufzählung entnommen werden kann, gliedert sich dieser Unterpunkt in vier Bereiche. Bei einem Kran können Schwingungen durch unterschiedliche Betriebsfälle entstehen, deren dynamische Wirkung berücksichtigt werden muss.

Beim Anheben und Absenken einer Last ist die Gewichtskraft der Last mit dem Beiwert Φ_2 zu multiplizieren. Dieser Beiwert kann mit (2.1) ermittelt werden, die benötigten Faktoren sind aus Abbildung 2.7 zu entnehmen. Dabei wird der Faktor $\Phi_{2,min}$ und β_2 je nach Hubklasse HC1 oder HC2 gewählt. Die Hubklasse HC1 ist für Krane zu verwenden, welche auf einem Lkw oder ähnlich elastischen Unterlagen montiert sind. Für starr montierte Krane ist HC2 zu verwenden.

Die Geschwindigkeit v_h beschreibt die vertikale Hakengeschwindigkeit. Diese ist je nach Hubwerkstyp und Betriebsart aus Abbildung 2.7 zu wählen. Dabei wurden in drei Hubwerkstypen unterschieden. Der Hubwerkstyp HD1 entspricht einem Hubwerk, welches mit konstanter Geschwindigkeit betrieben wird. Beim Typ HD4 beginnt das Heben der Last mit kontinuierlich steigender Geschwindigkeit. Der Typ HD5 besitzt eine Steuerung, welche gewährleistet, dass der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Dynamik vernachlässigt werden kann. (Vgl.[3])

$$\Phi_2 = \Phi_{2,min} + \beta_2 \times v_h \quad (2.1)$$

Tabelle 2a — Werte von β_2 und $\phi_{2,min}$

Hubklasse der Hubeinrichtung	β_2	$\phi_{2,min}$
HC 1	0,17	1,05
HC 2	0,34	1,10

Tabelle 2b — Werte von v_h

Lastkombination	Hubwerkstyp und seine Betriebsart		
	HD1	HD4	HD5
A1, B1	$v_{h,max}$	$0,5 \times v_{h,max}$	$v_h = 0$
C1	$v_{h,max}$	$v_{h,max}$	$0,5 \times v_{h,max}$

Abbildung 2.7: Berechnungsfaktoren [3]

Beim Anheben und Senken von Lasten muss die Gewichtskraft, resultierend aus der Kranmasse, mit dem Beiwert Φ_1 multipliziert werden. Der Beiwert Φ_1 errechnet sich nach (2.2).

$$\Phi_1 = \min(1, 1; \Phi_2) \quad (2.2)$$

Bei plötzlichem Loslassen eines Teiles der Hublast (Greiferbetrieb, Magnetbetrieb) muss ein weiterer Beiwert Φ_3 berücksichtigt werden. Dieser wird mit (2.3) berechnet. Dabei ist m die Masse der Hublast, Δm der fallengelassene Massenanteil der Hublast. Der Faktor β ist bei langsam öffnenden Greifern mit 0,5 zu wählen und bei schnell-freisetzenden Lastreduktionen (Magnete) auf 1 zu setzen ist.[3]

$$\Phi_3 = 1 - \frac{\Delta m \times (1 + \beta)}{m} \quad (2.3)$$

Auch durch Beschleunigung und Abbremsung des Schwenkantriebes können Schwingungen entstehen. Diese Schwingungen werden mit dem Dynamik Beiwert Φ_{5h} berücksichtigt. Der Beiwert Φ_{5h} ist 1,05 bei Hakenbetriebe und 1,3 bei Greifer- und Schaufelbetriebe.[3]

Lasten und Kräfte

Die Lasten und Kräfte gliedern sich, wie in der Aufzählung am Beginn dieses Kapitels zu sehen ist, in 3 Kategorien.

Die Regelmäßigen Lasten setzen sich aus Eigenlast, Hublast, Kräfte aufgrund der Beschleunigung/Abbremsung des Schwenkantriebes und aus Fliehkräften zusammen. Die Kräfte aufgrund der Beschleunigungs/Abbremsens des Schwenkantriebes lassen sich nach (2.4) berechnen und müssen horizontal angesetzt werden. Dabei ist m_i die Nutzlast oder ein Massenpunkt des Auslegers, g entspricht der Erdbeschleunigung. Der Schrägungswinkel α soll $\geq 3^\circ$ sein. Je nach dem vom Hersteller erlaubten Schrägstellungsbetriebes ist dieser Wert zu erhöhen.

$$F_{hi} = m_i \times g \times \tan(\alpha) \quad (2.4)$$

Die Fliehkräfte werden aus den Eigenlasten der Auslegerbauteile und der Hublast berechnet. Dabei werden die einzelnen Lasten ohne Berücksichtigung der Dynamikbeiwerte verwendet.

Die Nicht regelmäßigen Lasten setzen sich aus Windlasten, Lasten aufgrund Umgebungseinwirkungen und Lasten auf Treppen oder Plattformen zusammen. Die Windlasten lassen sich nach (2.5) berechnen. Dabei stellt $q(3)$ einen gemittelten Winddruck über 3 Sekunden Einwirkdauer dar. Der Koeffizient c_a ist einen Aerodynamik Koeffizient des jeweiligen Bauteiles und A ist die charakteristische Windangriffsfläche des Bauteiles.

$$F = q(3) \times c_a \times A \quad (2.5)$$

Die letzte Gruppe sind die außergewöhnlichen Lasten. Solche Lasten können zum Beispiel beim Prüfen der Krane auftreten.

Lastkombinationen

Nach Aufstellen aller Lasten am Kran, müssen diese Lasten zu Lastkombinationen vereint werden. In Abbildung 2.8 sind diese Kombinationen ersichtlich.

Tabelle 3 — Zu berücksichtigende Lastkombinationen

Art der Last	Lasten		Lastkombination A			Lastkombination B			Lastkombination C			Reihe
			γ_p	A1	A2	γ_p	B1	B2	γ_p	C1	C3	
regelmäßig	Schwerkraft, Beschleunigung von Hubantrieben	Bewegte Massen des Krans	1,22	ϕ_1	ϕ_1	1,16	ϕ_1	ϕ_1	1,1	ϕ_1	1	1
		Masse der Hublast	1,34	ϕ_2	ϕ_3	1,22	ϕ_2	ϕ_3	1,1	–	–	2
	Beschleunigung aus Schwenk-antrieb	Bewegte Massen des Krans	1,22	ϕ_{5h}	ϕ_{5h}	1,16	ϕ_{5h}	ϕ_{5h}	–	–	–	3
		Masse der Hublast	1,34	ϕ_{5h}	ϕ_{5h}	1,22	ϕ_{5h}	ϕ_{5h}	–	–	–	4
	Fliehkräfte ^a	Massen des Krans	1,22	1	1	1,16	1	1	–	–	–	5
		Masse der Hublast	1,34	1	1	1,22	1	1	–	–	–	6
nicht regelmäßig	wetterbedingte Einwirkungen	Windlasten während des Betriebes ^b	–	–	–	1,22	1	1	–	–	–	7
außergewöhnlich	Kräfte aufgrund eines außergewöhnlichen Ereignis		–	–	–	–	–	1,1	ϕ_2	1	8	

^a Es müssen nur Fliehkräfte berücksichtigt werden, die die Lasteinwirkungen erhöhen.

^b Kräfte, die gleichzeitig mit den Windlasten wirken, dürfen nur in solchem Maße aufgebracht werden, dass die Antriebskräfte in Reihe 3 und Reihe 4 nicht überschritten werden.

Abbildung 2.8: Lastkombinationen [3]

Die Lastkombinationen A1 und B1 entsprechen einer Lastkombination mit maximaler vertikaler Hakengeschwindigkeit von einem einzelnen Hydraulikantrieb. Die Lastkombination C1 ist bei gleichzeitigem Einsatz aller möglichen Hydraulikantriebe am Kran zu verwenden. Dabei stellen Lastkombinationen des Types A regelmäßige Lasten dar. Die Lastkombinationen des Types B setzen sich aus regelmäßige Lasten kombiniert mit Windlasten zusammen. Der Typ C deckt Lastkombinationen aus regelmäßigen Lasten kombiniert mit nicht regelmäßigen und außergewöhnlichen Lasten ab. (Vgl.[3])

Nach dem Kombinieren der Einzellasten zu Lastkombinationen kann die Spannungsermittlung durchgeführt werden.

Spannungsermittlung

In der Norm EN 12999 wird die Spannungsermittlung an Bauteilen nicht näher erläutert, sondern es wird auf eine weitere Norm EN 13001-3-1 verwiesen. Diese wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

EN 13001-1 [4]

Es gibt zwei unterschiedliche Herangehensweisen wie ein Festigkeitsnachweis laut dieser Norm durchgeführt werden kann. Die erste Herangehensweise ist die „Methode der zulässigen Spannungen“. Diese Methode ist laut Norm für Krane zulässig, bei denen ein linearer Zusammenhang zwischen Lasten und Lasteinwirkungen vorhanden ist. Bei Kranen, welche große Verformungen aufweisen, so dass dieser Zusammenhang nicht gegeben ist, muss die zweite Herangehensweise „Methode der Grenzzustände“ verwendet werden. Diese beiden Varianten werden im folgenden Teil der Arbeit näher erläutert.

Methode der zulässigen Spannungen: Wie in Abbildung 2.9 ersichtlich, werden bei dieser Methode alle Einzellasten f_i einschließlich dynamischer Beiwerte zu einer kombinierten Last bzw. Lastkombination aufsummiert. Anschließend wird daraus eine Lasteinwirkung \bar{S}_k errechnet. In Abbildung 2.9 ist ersichtlich, dass der Zusammenhang zwischen dieser Lastkombination \bar{F}_j und der Lasteinwirkung \bar{S}_k ein linearer Zusammenhang ist. Aus der Lasteinwirkung wird anschließend eine resultierende Spannung errechnet. Zu dieser Spannung wird an der Summierstelle eine Spannung als Folge lokaler Einflüsse addiert. Diese Gesamtspannung wird anschließend mit der zulässigen Spannung verglichen. Die zulässige Spannung errechnet sich aus der Streckgrenze des Werkstoffes. Dabei wird die Streckgrenze mit einem globalen Sicherheitsbeiwert γ_f und mit einem Risikobeiwert γ_n reduziert. Bei dieser Methode ist ersichtlich, dass nahezu der gesamte „Unsicherheitsfaktor“ dem Werkstoff zugewiesen wird - auch solche Unsicherheiten, welche aufgrund der Belastungssituation entstehen. Üblich sind werkstoffseitige Sicherheitsfaktoren von $\gamma_f * \gamma_n = 1.5$.

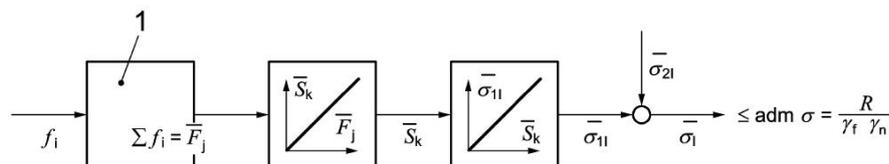


Abbildung 2.9: Methode der zulässigen Spannungen [4]

Der zentrale Bereich in dieser Arbeit handelt von Untersuchungen von Kran Schubpaketen. Diese weisen eine starke Nichtlinearität zwischen Last und Lasteinwirkung auf, weshalb die Methode der Grenzzustände verwendet wird.

Methode der Grenzzustände: Die Methode der Grenzzustände unterscheidet die Herkunft der einzelnen Unsicherheiten im Detail. Beim Überschreiten eines Grenzzustandes tritt nach dieser Norm Versagen der Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit auf. Die Vorgehensweise der Methode ist im Flussdiagramm in Abbildung 2.10 visualisiert.

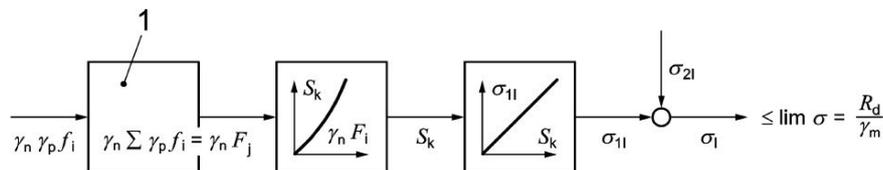


Abbildung 2.10: Methode der Grenzzustände [4]

Bei dieser Methode wird belastungsseitig wieder mit den Einzellasten inklusive deren Dynamikbeiwerten gearbeitet. Zusätzlich dazu wird die Unsicherheit der Einzellast mittels des Teilsicherheitsbeiwertes γ_p und des Risikobeiwertes γ_n berücksichtigt. Der „Lastunsicherheitsfaktor“ beträgt $\gamma_p = 1,34$. Anschließend werden diese Größen zu einer „Gesamteinwirkung“ aufgrund unterschiedlicher Lasten und Lastkombinationen aufsummiert. Diese „Einwirkungsgröße“ $\gamma_n * F_j$ wird mit einem Zusammenhang auf die Lasteinwirkung S_k umgerechnet. Dieser Zusammenhang kann je nach Eigenschaft des Systemes linear oder nichtlinear gewählt werden. Die Lasteinwirkung wirkt wie eine innere Belastungsgröße, wie zum Beispiel ein Moment oder eine Kraft. Daraus entsteht eine Spannung σ_{1l} , welche um eine weitere Spannung, die lokale Einflüsse beschreibt, erhöht wird. Daraus resultiert eine Gesamtspannung σ_l , welche mit dem Werkstoff verglichen wird. Der Werkstoff (Streckgrenze) wird ausschließlich mit dem Widerstandsbeiwert γ_m reduziert.

Die Methode der Grenzzustände ist ein Vergleich zwischen Einwirkung und Widerstand. Dabei werden die Sicherheitsfaktoren an Positionen verrechnet, an welchen diese Unsicherheiten entstehen. (Vgl.[4])

3

Durchführung

Steifigkeitsuntersuchungen

In diesem Abschnitt werden ausgehend von der Analyse der Ist-Situation die geforderten Steifigkeitswerte der Einspannbereiche mit einer systematischen Vorgehensweise erarbeitet.

3.1 Analyse der IST-Situation

Zu Beginn werden alle möglichen Einflussgrößen auf das Verformungsverhalten des Ausschubpaketes bestimmt. Eine Balkenverformung ist durch die Geometrie der Balken und die auftretenden Belastungen bestimmt. Des Weiteren können geometrische als auch materielle Nichtlinearitäten die Verformung von Systemen erheblich mitbestimmen.

Die Geometrie des Kranausschubpaketes, ist wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, durch die Palfinger Werksnorm definiert und somit nur in gewissen Variationsbereichen veränderlich. Diese Variationsbereiche wurden ermittelt und charakteristische Klassifizierungsmerkmale definiert.

Zusätzlich zu geometrischen Gestaltungsmerkmalen der P-Rohre gibt es auch verschiedene Montagemöglichkeiten, welche in Abhängigkeit der Belastung die inneren Kräfte der Systeme bestimmen. Durch Verändern bestimmter Montagemöglichkeiten,

wie zum Beispiel den Biegeabstand (siehe Abbildung 1.3), steigen die inneren Kräfte und die damit verbundenen lokalen Verformungen überproportional.

3.1.1 Ermittlung von Einflussfaktoren

Nach Ermittlung aller Einflussgrößen auf die Gesamtdurchbiegung, sind diese mithilfe einer Bewertungsmatrix nach Priorität des Einflusses gereiht worden.

In folgender Aufzählung sind die Variationsbereiche, welche laut Norm möglich sind, aufgelistet. Ein Teil dieser Begrifflichkeiten wurde bereits in Abschnitt 1 in Abbildung 1.2 visualisiert.

- Rohrgröße (Querschnittgröße)
- Rohrwandstärken 3 bis 8 mm
- Eintauchtiefe der Rohre $4,75 * R_{GR}$ bis $5,5 * R_{GR}$
- Vorspannung der Rohre 0 bis $0,5^\circ$
- Gleitpaketstärken → gekoppelt mit Vorspannung
- Rohrdeckelblechstärke → gekoppelt an Rohrwandstärke
- Schweißnahtstärke des Deckels → laut Norm festgelegt
- Verhältnis Hauptlast zu Seitenlast
- Werkstoff S890 / S1100 → auf maximale Auslastung des S1100 gerechnet
- Geometrie des Rohres am Ende (Krangeometrie / Jibgeometrie)
- Reibung im Kontakt
- Untergurt mit/ohne Lastgehänge
- Obergurtform (gerader Obergurt, schräger Obergurt)

Im Folgendem werden die einzelnen Einflussfaktoren beschrieben.

Die Rohrgröße ist ein Maß für die Querschnittgröße der Schubarmrohre. In Abbildung 2.5 ist diese Größe mit R (Radius) eingezeichnet. An jeder Rohrgröße sind im Schnitt drei unterschiedliche Rohrwandstärken möglich.

Die Eintauchtiefe gibt jene Längen an, welche den Überlappungsbereich zweier Rohre bestimmt. Diese Größe wird bei Palfinger auch als Biegeabstand (siehe Abbildung 1.3)

bezeichnet. Bei Verringerung dieser Abmessung steigen die inneren Kräfte im System stark an.

Die einzelnen Rohre werden bei der Montage vorgespannt. Dies ermöglicht ein nahezu durchbiegungsfreies Ausfahren des Schubpaketes im traglastlosen Zustand. Diese Vorspannung wird in Abhängigkeit der Fertigungstoleranzen durch die Wahl der Gleitpaketstärken eingestellt.

Zu jeder Rohrwandstärke gibt es in selber Blechstärke einen Deckel, mit welchem die Schubarmrohre im hinteren Bereich verschlossen werden. Je nachdem ob ein Schubarmrohr am Kran selbst oder am Jib verbaut wird, variiert die Rohrendform konstruktionsbedingt. Im Anhang in Abbildung C.3 sind diese unterschiedlichen Formen visualisiert.

Des Weiteren ist aus Versuchen bekannt, dass das Verhältnis zwischen Haupt- und Seitenlast einen Einfluss auf die Verformung hat.

In Abbildung 1.2 sind die unterschiedlichen Untergurtformen mit und ohne Lastgehänge dargestellt. Das große Rohr besitzt in dieser Abbildung einen Untergurt mit Lastgehänge und das kleine einen Untergurt ohne Lastgehänge. Auch der Obergurt ist in dieser Abbildung ersichtlich. Es gibt zwei unterschiedliche Typen: einen Obergurt mit gerader Rohrendform und einen Obergurt mit schräger Rohrendform. In Abbildung 1.4 ist die gerade Obergurtform ersichtlich und in Abbildung 2.2 sind Rohre mit schrägem Obergurt dargestellt.

Mithilfe einer Bewertungsmatrix (siehe Tabelle 3.1) wurden die einzelnen Einflussgrößen einer Bewertung unterzogen. Dabei wird durch Abschätzung der einzelnen Einflussfaktoren ein geringer Wert bei wenig Einfluss auf die Durchbiegung zugewiesen und ein hoher Wert bei großem Einfluss. Diese Bewertung ist subjektiv, daher wurde diese von mehreren Personen unabhängig voneinander durchgeführt. Die Werte in der Tabelle entsprechen dem gerundeten arithmetischen Mittelwert der Einzelbewertungen.

Einflussfaktoren	Einflussbewertung	Berechenbarkeit	Umsetzbarkeit	Produkt der Faktoren = Priorität
Eintauchtiefe	9	10	10	900
Rohrwandstärke	9	8	10	720
Rohrgröße	10	8	8	640
Vorspannung	8	7	7	392
Verhältnis HL zu SL	9	6	4	216
Gleitpaketstärke	4	7	7	196
Untergurtform	2	10	9	180
Obergurtform	6	3	6	108
Reibung im Kontakt	6	10	1	60
Obergurt mit Zylinderanlenkung	1	10	1	10

Tabelle 3.1: Bewertungsmatrix

In der zweiten Spalte der Tabelle 3.1 ist den einzelnen Einflussfaktoren eine subjektive Bewertung des Einflusses auf die Gesamtdurchbiegung zugewiesen. In der dritten Spalte ist ein Wert ersichtlich, welcher die gegenseitige Beeinflussung bzw. die explizite Berechenbarkeit darstellt. Der Wert in der Spalte Umsetzbarkeit stellt die Realisierbarkeit bzw. mögliche Veränderbarkeit am realen Kran dar. Anhand dieser Reihung nach Priorität ist die Untersuchungsreihenfolge der einzelnen Größen entschieden worden.

3.1.2 Kombinationen und Ausprägungen der Rohrpaarungen

Aus den Einflussgrößen ergibt sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Kombinationen. In Abbildung 3.1 sind alle Einflussgrößen dargestellt. Diese bilden ein Variationsfeld in 8 Koordinatenrichtungen.

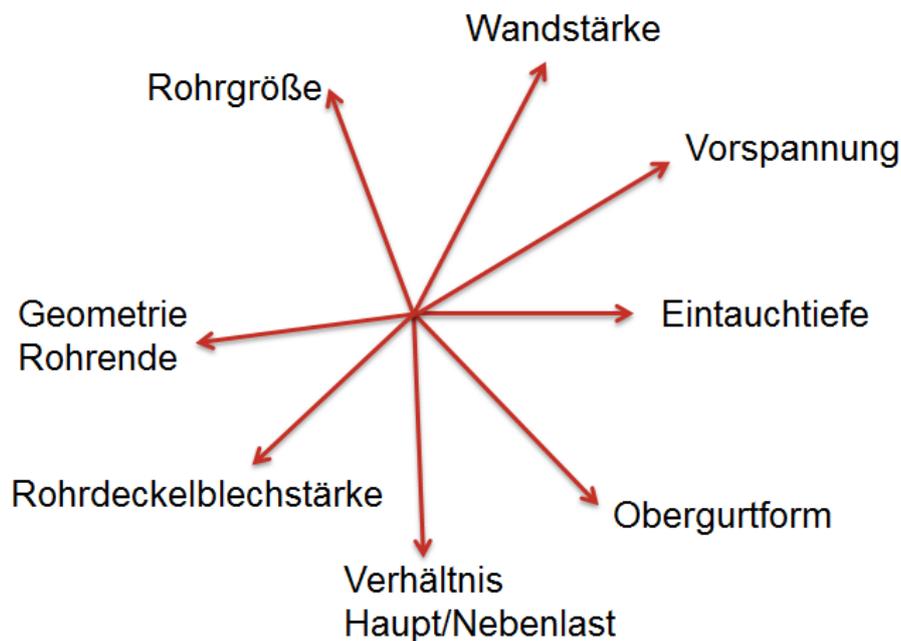


Abbildung 3.1: Variationsfeld

Zu Beginn wurden einzelne Parameter variiert und dadurch deren Einfluss auf die Durchbiegung ermittelt. In Folge wurden Kombinationen der Einzeleinflüsse ausgewertet. Um eine genaue Übersicht aller Parameter und deren Ausprägung zu bekommen, ist eine Excel Datei mit allen Größen erstellt worden. Alleine durch Variation aller Rohrgrößen und Wandstärken ergeben sich 119 unterschiedliche Kombinationen. Diese 119 unterschiedlichen Paarungen sind in Tabelle C.1 im Anhang ersichtlich. Da Kombinationen mit einem Außenrohr in der dicksten Wandstärke und Innenrohr mit der dünnsten Wandstärke in der Praxis nicht zur Anwendung kommen resultieren daraus 66 häufig zur Anwendung kommende Paarungen.

3.2 Systematischer Modellaufbau

Da für die Auswertung von Steifigkeiten mehrere Rechenmodelle notwendig sind, ist es sinnvoll, alle Modellierungsschritte systematisch aufzubauen. Dadurch vereinfachen sich die Schnittstellen der verwendeten Softwarepakete und es kann Zeit beim Einlesen und dem anschließenden Aufbereiten der Modelle gespart werden. Im folgenden

Abschnitt wird der Aufbau der Modelle beschrieben.

3.2.1 Creo

Bei der Modellierung wurde darauf geachtet, dass die Vielzahl geometrischer Parameter variiert werden können. Zu Beginn wurde eine Kombination mittlerer Rohrgrößenpaarung P136 in P146 aufgebaut. Da der Detaillierungsgrad der Fertigungsmodelle sehr hoch ist, mussten für die Berechnung vereinfachte Modelle erstellt werden. Aus den bereits vorhandenen Fertigungsmodellen (Volumenmodelle) wurde ein vereinfachtes FEM-Modell für die Rechnung abgeleitet, siehe Abbildung 3.2. Die jeweiligen Bauteilquerschnitte wurden dabei mittels Publiziergeometrien vom bestehenden Modell abgenommen. Aus diesen Informationen wurde ein Hybridmodell aufgebaut. In diesem Hybridmodell sind die Kontaktzonen aus Volumenmodellen ausgeführt. Geometrien, welche lediglich zur Abbildung der Rohrsteifigkeiten verwendet werden, sind als Flächenmodelle ausgeführt.

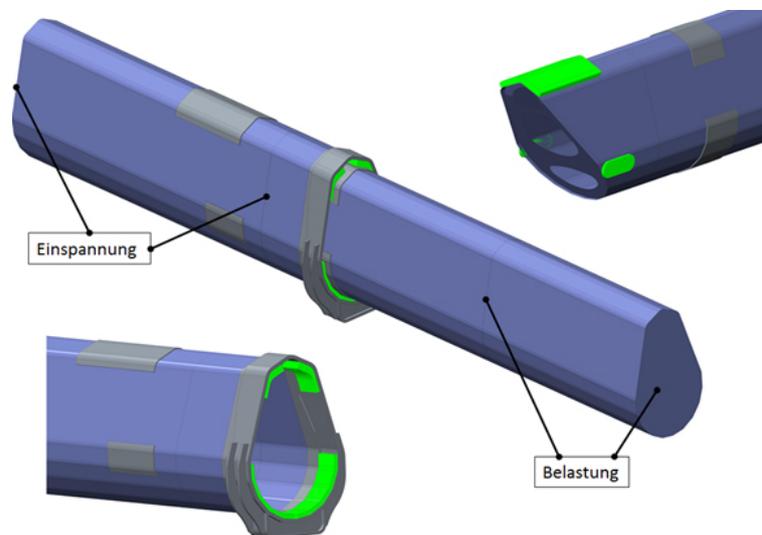


Abbildung 3.2: CreoModell

Die Flächenbereiche bieten für die spätere FEM Berechnung den Vorteil, dass die Elementanzahl gering gehalten werden kann. Nur jene Bereiche, welche an der Kraftübertragung beteiligt sind, wurden als Volumenmodelle realisiert. Zudem können die Kontaktbereiche durch diese Trennung von den restlichen Bauteilen unterschiedlich

vernetzt werden. Eine feinere Vernetzung ist in den Kontaktbereichen für die reibungsbehafteten Verbindungen sowie zur späteren Spannungsauswertung notwendig. An jenen Stellen, an welchen Randbedingungen und Belastungen aufgebracht werden, sind die Flächenmodelle getrennt worden. Diese Trennung erzeugt Linienzüge in den Flächenmodellen, welche im Ansysmodell benötigt werden.

3.2.2 Ansys

Es wurde ein nichtlineares Kontaktmodell in Ansys erstellt. Dieses Modell wird im Folgenden beschrieben. Mithilfe des Designmodeler wurde das FEM Modell in das Programm Ansys importiert. Jenen Flächen, welche für die Berechnung wesentlich sind, können positionsbezogene Benennungen (named selection) zugewiesen werden.

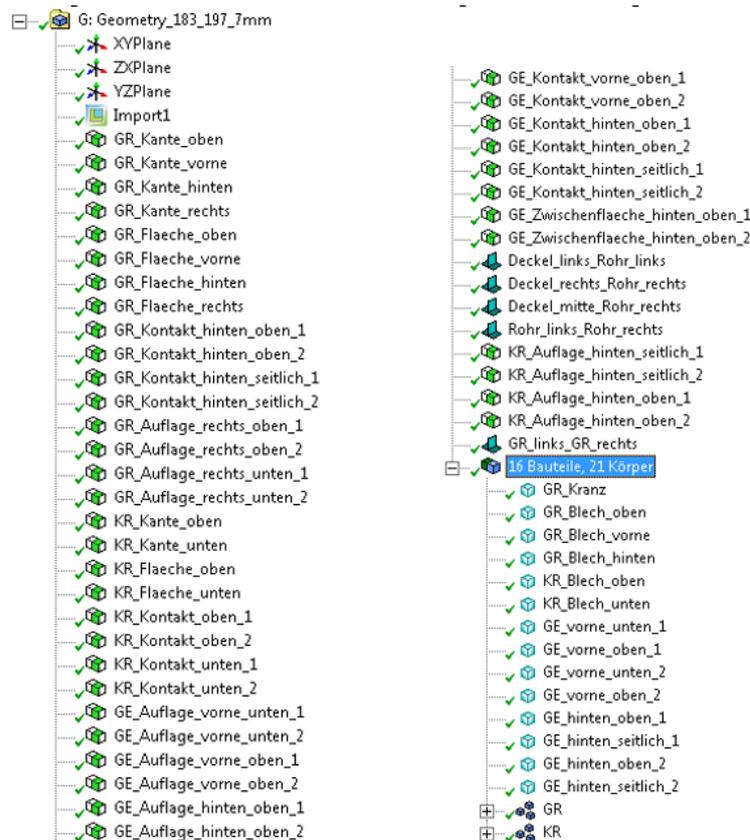


Abbildung 3.3: Ansys Designmodeler

Diese Benennung vereinfacht später die Vervielfältigung der Berechnungen mit neuen Geometrievarianten. Die Einstellungen der Berechnungen sind auf diese Flächennamen

bezogen. Durch konsequenten systematischen Aufbau der unterschiedlichen Modelle bleiben die KE-Nummern gleich, wodurch zugewiesene Benennungen automatisch nach dem Import an den richtigen Flächen liegen. Durch diese Vorgehensweise konnte die Schnittstelle bzw. der Geometrieimport wesentlich zeitoptimierter gestaltet werden.

Im Designmodeler wurden zudem die getrennten Flächenkörper vereint und zusammengehörende Körper verschmolzen. Aus der Verschmelzung entstehen Kettenzüge, welche für die Erzeugung von Remote Points verwendet werden. Ein Remote Point ist ein Punkt, welcher aus einem Kettenzug gebildet werden kann. An diesen Remote Points können Kräfte sowie Lagerbedingungen aufgebracht werden.

Im Folgenden wird die Lagersituation näher erläutert. In Abbildung 3.4 ist das Modell samt dem Koordinatensystem und den Freiheitsgraden ersichtlich.

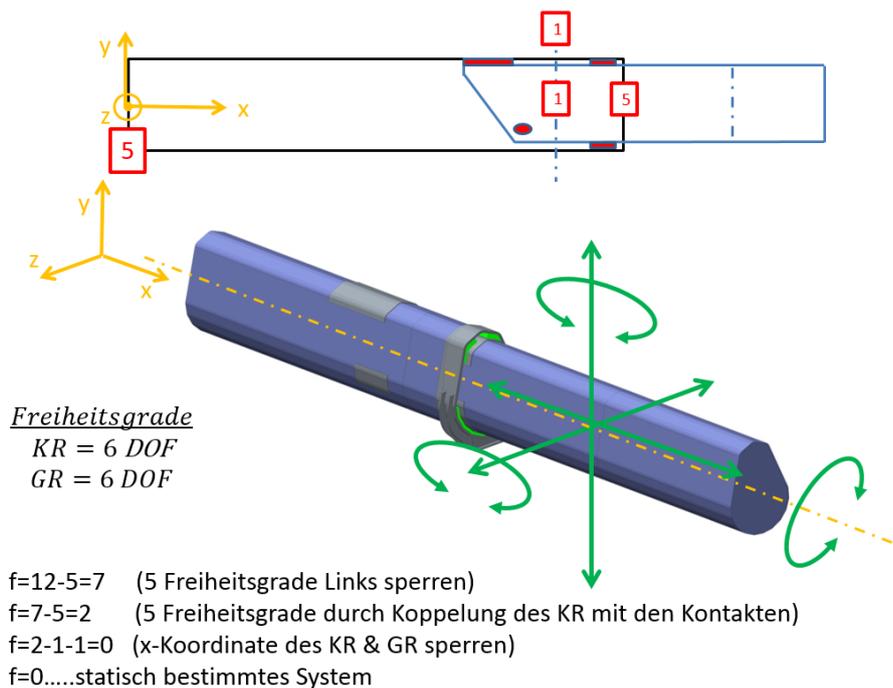


Abbildung 3.4: Darstellung der Lagersituation / Freiheitsgrade

Da die Gleitelemente, wie in Abbildung 3.2 in grün dargestellt, am kleinen bzw. am großen Rohr fixiert sind, besteht die Gesamtbaugruppe aus zwei unabhängigen Körpern: dem großen und dem kleinen Rohr. Jeder dieser Körper hat 6 Freiheitsgrade. Das große Rohr ist am linken Ende gegen Verschiebung in y sowie z Richtung gesichert (-2 DOF). Auch alle Momente können am linken Ende des großen Rohres

durch die Lagerstelle aufgenommen werden (-3 Dof). Durch Koppelung des kleinen Rohres mit dem großen Rohr sind alle Verdrehungen sowie Verschiebungen in y und z Richtung des kleinen Rohres unterbunden (-5 Dof). Letztlich bleiben noch 2 Freiheitsgrade übrig. Diese werden durch eine Lagerung aufgenommen, welche das jeweilige Rohr in x -Richtung fixiert (-2 Dof). Diese Lagerung kann an jeder Position am Rohr sein. Jedoch ist es sinnvoll die Lagerstelle an derselben x -Position der Rohre zwischen den Kraftübertragungspunkten des großen zum kleinen Rohres anzubringen. Dadurch resultiert die relative Verschiebung in den Kontaktbereichen nur durch Biegung der Rohre und ist somit relativ gering. Diese Modellierung hat sich für die Konvergenz des Modells als vorteilhaft herausgestellt. In Abbildung 3.5 ist dieses Modell vereinfacht dargestellt.

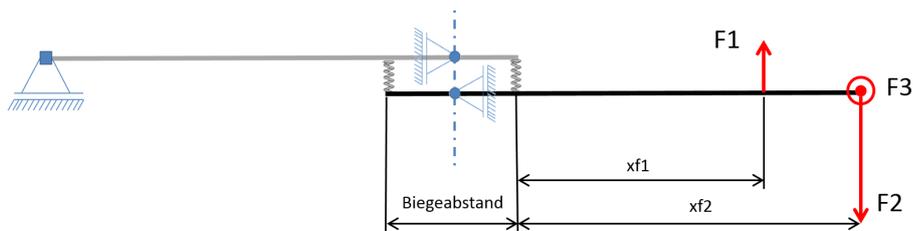


Abbildung 3.5: Darstellung der Lagersituation - Einspannung

Nachdem eine vollständig definierte Lagersituation erarbeitet ist, kann das Modell aufgebaut werden.

Im Programmteil Mechanical werden im ersten Schritt zuvor definierte Materialien den Geometrien zugeordnet. Den Rohren wird das Material Stahl zugewiesen, den Gleitelementen ein Material mit bilinearer isotropen Verfestigung, siehe Abbildung 3.6.

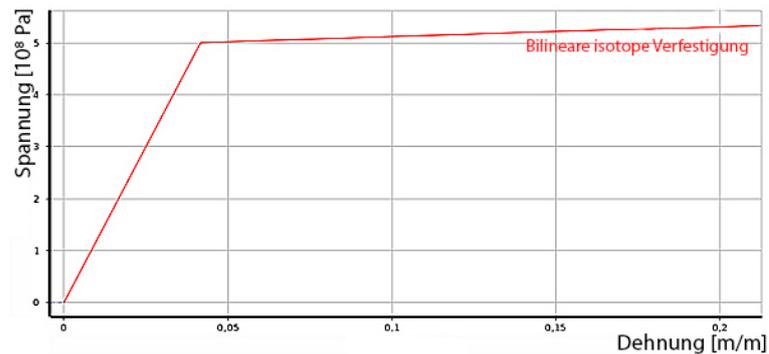


Abbildung 3.6: Bilineare isotrope Verfestigung

Dieses bilineare Material ermöglicht es eine nichtlineare Abhängigkeit zwischen Spannung und Dehnung darzustellen. Es beschreibt die Materialnichtlinearitäten. Ein solches Material erlaubt das Ausbilden von Fließbereichen. Bei einem linearen Material steigt die Spannung unrealistisch linear über die Streckgrenze weiter, dadurch sind extrem hohe Spannungswerte möglich. Bei dem verwendeten nichtlinearen Material können sich in Bereichen hoher Spannungen Fließbereiche bilden. Dadurch verändert sich die Geometrie, und Spannungswerte bleiben realistisch. Bei der Rechnung mit einem nichtlinearem Material ist eine höhere Anzahl an Iterationen notwendig, wodurch die Rechenzeit steigt.

Ein Rechenmodell kann aus verschiedenen Gründen nichtlinear sein. Die aufgebauten Rechenmodelle sind mehrfach nichtlinear. Dies resultiert aus einem nichtlinearem Material, den großen Verformungen und den nichtlinearen Kontaktformulierungen. Bei einem vollständig linearen Modell (Material linear, Geometrie linear, Kontakt linear) gibt es immer eine Lösung, jedoch muss diese auf Plausibilität geprüft werden.

Als nächsten Schritt können Pfade entlang bestimmter Geometrien angelegt werden, sowie Koordinatensysteme und externe Punkte definiert werden. Anschließend werden Connections zwischen den einzelnen Bauteilen definiert. Der Connection Typ „Bonded“ verbindet die zusammengehörenden Teile eines Rohres. Mit dem Typ „Frictional“ wurden die Gleitelemente mit den Rohren verbunden. Alle Einstellungen (Externe Punkte, Connections, Mesh, Randbedingungen, Belastungen) sind auf die im Programmabschnitt Designmodeller vergebenen Benennungen bezogen.

Der mit den beschriebenen Schritten erstellte Modellbaum ist in Abbildung 3.7 ersichtlich.

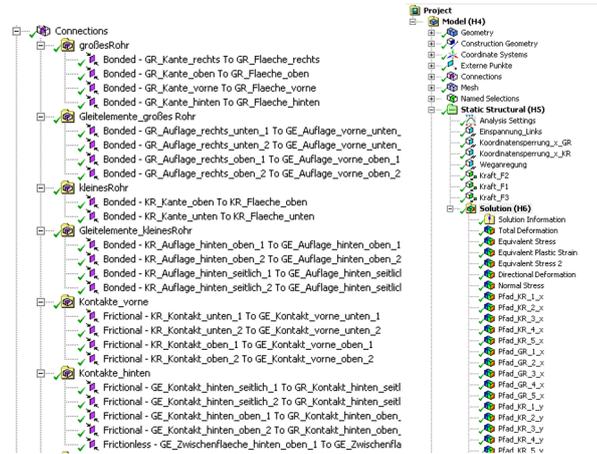


Abbildung 3.7: Kontaktdefinitionen (links) und Modellbaum (rechts)

Fortan wurde den einzelnen Bauteilen Vernetzungseigenschaften zugewiesen. Dabei wurde speziell an den Volumenelementen der Kontaktbereiche das Augenmerk auf ein regelmäßiges, feines Netz gelegt. Die Netze der Flächenmodelle der übrigen Rohre wurden groß gewählt, um die Elementanzahl gering zu halten. Das erstellte Modell ist in Abbildung 3.8 zu erkennen.

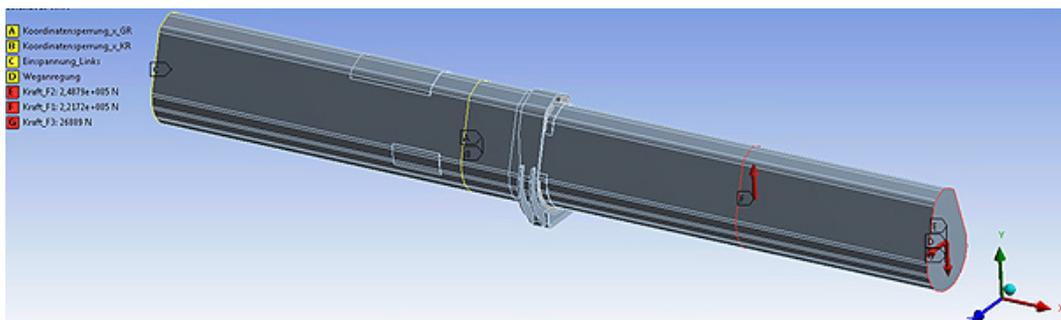


Abbildung 3.8: Ansys-Modell

Nachdem die Lagerung sowie die Kräfte definiert wurden, konnte der erste Rechenlauf gestartet werden. Um die Stabilität der Rechnung zu verbessern, wurde das Modell zuerst mit einer Weganregung belastet. Dadurch konnten sich die Kontaktbereiche langsam anlegen, wodurch sich das Modell stabilisiert. Anschließend wurde das

Modell in mehreren Lastschritten stufenweise bis zur geforderten Höchstlast gesteigert. Eine solche Rohrpaarung wird prinzipiell durch eine Querkraft und auch durch ein hohes Moment belastet. Die Belastung mittels Momenten wirkte sich schlecht auf die Konvergenz aus. Daher wurden die Momente wie in Abbildung 3.5 ersichtlich in eine Belastung mittels eines Kräftepaares umgerechnet.

Durch Aufbau der Modelle mittels „named selections“ konnte der Berechnungsbereich zwischen verschiedenen Varianten übernommen werden. Bei einer neuen Geometrievariante war lediglich diese neu einzulesen, die Benennung zu kontrollieren und anschließend die neue Belastung der Variante einzustellen.

3.3 Steifigkeiten aus den Ansys Daten ableiten

In diesem Abschnitt wird die Ermittlung der benötigten Federsteifigkeiten erläutert. Diese Federsteifigkeiten sollen die lokalen Verformungen der Kontaktbereiche in einem einfachen Balkenmodell simulieren. Zur Ermittlung der Steifigkeit wird aus dem Ansys Modell eine dreidimensionale Biegelinie abgeleitet. Dazu ist es notwendig, die verformten Geometrien, wie in folgender Beschreibung erklärt wird, zu exportieren. Diese Auswertung ist in einem ersten Schritt in Excel umgesetzt.

3.3.1 Biegelinien aufstellen

Die Gesamtdurchbiegung der Ansysmodelle resultiert zum einen aus der Verformung der Stahlrohre selbst und zum anderen aus der relativen Schrägstellung der Rohre zueinander. Diese relative Schrägstellung setzt sich aus den Verformungen der Gleitelemente und der lokalen Verformungen der Kontaktbereiche der Stahlrohre zusammen.

Die Durchbiegung des Stahlrohres kann durch eine Biegelinie abgebildet werden. Die Einspannung ist jedoch von vielen Faktoren abhängig und soll im Folgenden durch eine „Feder“ modelliert werden. Es soll ein Wert gefunden werden, welcher sämtliche Einflüsse (Rohrgröße, Wandstärke, Einspannung, Elastizität der Gleitelemente) zu einem Parameter zusammenfasst. Mit dieser Federsteifigkeit kann anschließend die zusätzliche Durchbiegung aufgrund lokaler Verformungseffekte einer Rohrpaarung ermittelt werden. Durch Zusammensetzen der Rohrbiegung und der Durchbiegung aufgrund der Federn, kann die Gesamtverformung ohne einem aufwendigen Kontaktmodell beschrieben werden.

In Abbildung 3.9 ist ein verformtes Ansysmodell ersichtlich.

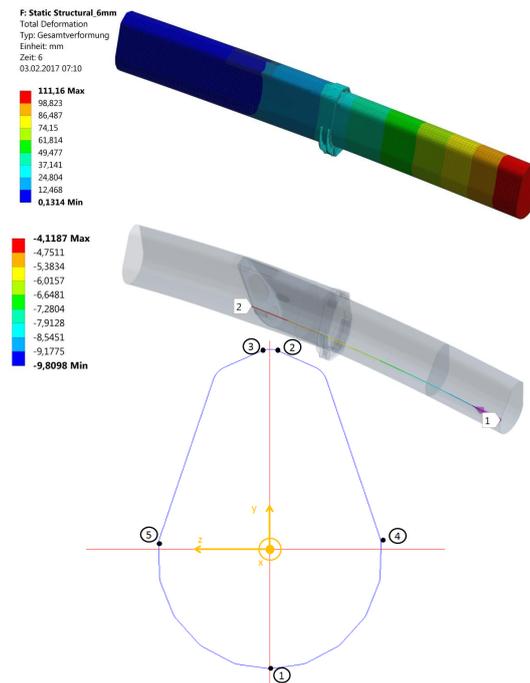


Abbildung 3.9: Verformtes Rohrmodell und benötigte Pfade für die Auswertung

Aus diesem Ansys Modell wurden entlang einiger Pfade (1 bis 5) die Verschiebungen in den drei Koordinatenrichtungen x,y und z exportiert. Die damit erhaltenen Dateien (für jede Koordinatenrichtung eine Datei) könnten automatisiert in Excel eingelesen werden. Aus diesen Pfaden soll nun eine Biegelinie des Gesamtsystems erstellt werden.

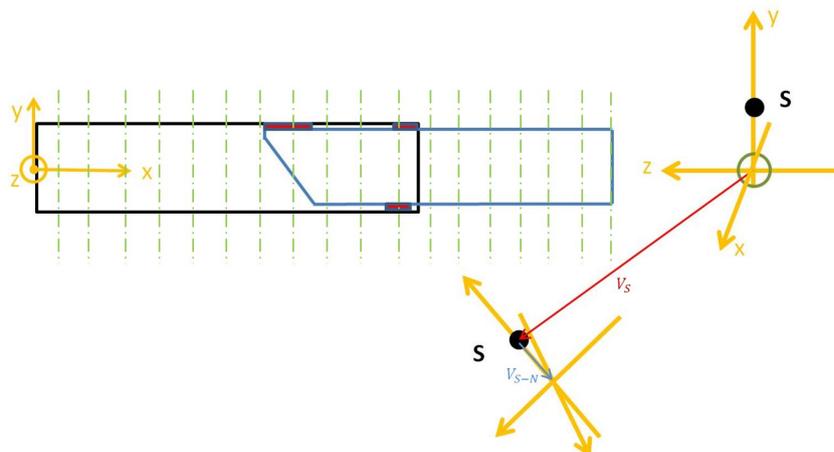


Abbildung 3.10: Koordinatensystem unverformt und verformt

Voraussetzung um die im folgenden beschriebene Auswertemethode verwenden zu

können ist, dass die nach Bernoulli aufgestellten Annahmen zur Balkentheorie gültig sind. Speziell die Annahme, dass der Querschnitt auch nach der Deformation in sich eben bleibt, muss erfüllt sein.

In Abbildung 3.10 ist das unverformte System im linken Bereich des Bildes ersichtlich. Die exportierten Werte der Pfade spannen in regelmäßigen Abständen entlang der Rohrlängsachse (grüne Strichpunktlinien) die im Raum verformten Querschnitte auf. An jedem dieser verformten Querschnitte wird ein lokales, im Raum gedrehtes Koordinatensystem aufgestellt. Dieses gedrehte Koordinatensystem und auch das unverformte Koordinatensystem sind in Abbildung 3.10 ersichtlich. Das in orange dargestellt unverformte Koordinatensystem stellt jenes Koordinatensystem dar, in welchem die Biegelinien der beiden Rohre beschrieben werden.

In Abbildung 3.11 ist exemplarisch ein Rohrquerschnitt dargestellt.

Entlang der Rohrlängsachse x sind am verformten Modell die Lagewerte an den Pfaden bekannt. Mithilfe dieser Lagewerte können die in grün dargestellten Dreiecke im verformten Modell aufgestellt werden. Anschließend wurde vereinfacht der Gesamtschwerpunkt der beiden grünen Dreiecke (siehe Abbildung 3.11) ermittelt und als Referenzpunkt verwendet.

Da der Schwerpunkt bei jeder verformten Querschnittsfläche entlang der Rohrlängsachse ermittelt werden kann und dieser immer nahezu denselben Abstand zum Nullpunkt N (verformtes Koordinatensystem) hat, konnte mithilfe der Schwerpunkte auf die Biegelinie rückgerechnet werden.

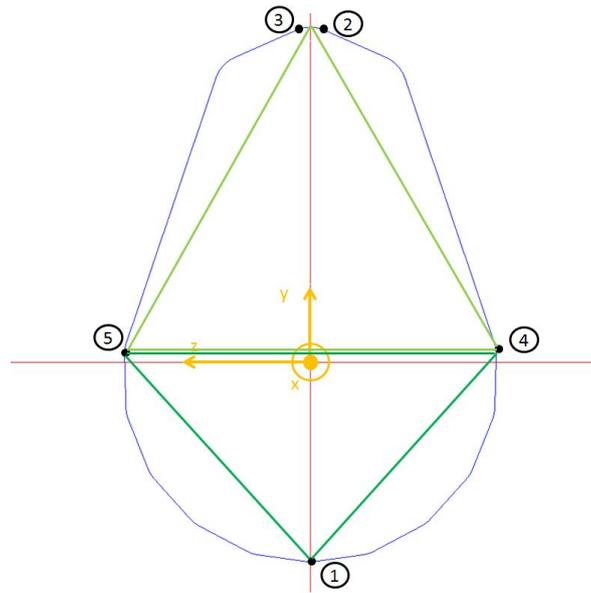


Abbildung 3.11: Rohrquerschnitt mit exportierten Pfaden und Berechnungsdreiecken

Ein Problem ergab sich dabei durch die Drehung der Querschnittsflächen im Raum.

Im rechten Bildbereich der Abbildung 3.10 ist das globale Koordinatensystem dargestellt und ein weiteres lokales Koordinatensystem, welches sich gedanklich auf der verdrehten verformten Querschnittsfläche befindet. In dem verdrehten Koordinatensystem ist der in blau dargestellte Abstandsvektor V_{S-N} vom Schwerpunkt zum Nullpunkt ersichtlich. Dieser Abstandsvektor V_{S-N} wurde vereinfacht (trotz Verformung) als Längenkonstant angenommen, wodurch bei großen Verformungen im Querschnitt ein Fehler entstehen kann. Es soll ein Vektor zwischen den beiden Koordinatensystemen bzw. deren Ursprüngen aufzustellen werden. Dazu wird der rote Vektor V_S und der blaue Vektor V_{S-N} addiert. Bevor diese Addition durchführbar ist, müssen beide Vektoren im unverformten Koordinatensystem vorhanden sein. Dazu wird der Vektor V_{S-N} mithilfe einer Drehmatrize in das unverformte Koordinatensystem umgerechnet.

Die Drehmatrize wird mithilfe der oberen grünen Dreiecksfläche ermittelt.

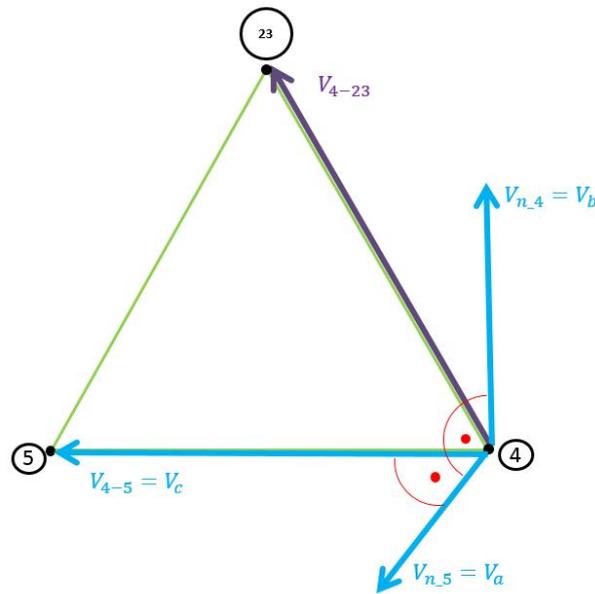


Abbildung 3.12: Vektoren

In Abbildung 3.12 sind die benötigten Vektoren zur Ermittlung der Drehmatrix ersichtlich. Diese Vektoren werden am verformten Querschnitt aufgestellt.

Die Punkte 2 und 3 werden zu einem Punkt P_{23} zusammengefasst und mit den Punkten P_{23} , P_4 , P_5 wird gedanklich ein Dreieck gebildet. Ebenso wird ein Dreieck mit den Punkten P_4 , P_5 , P_1 gebildet. An diesen Dreiecken werden die räumlichen Schwerpunkte ermittelt und anschließend über die Flächeninhalte dieser Dreiecke eine Mittelung zu einem Gesamtschwerpunkt mit (3.1) durchgeführt.

$$S = \frac{S_{oben} \cdot A_{oben} + S_{unten} \cdot A_{unten}}{A_{ges}} \quad (3.1)$$

Die Winkel, welche für die Aufstellung der Drehmatrix benötigt werden, werden vereinfacht nur mit der oberen Dreiecksfläche berechnet, da der Winkelunterschied der beiden Dreiecksflächen sehr gering ist. Dieser geringe Winkelunterschied der oberen und unteren Dreiecksfläche impliziert, dass der Querschnitt in sich nahezu eben bleibt. Dies ist notwendig, um die Annahmen nach Bernoulli zu erfüllen und somit diese Auswertemethode anwenden zu können.

Mit den erwähnten Rechenpunkten können die Vektoren $V_{4-5} = V_c$ und V_{4-23}

aufgestellt werden. Diese beiden Vektoren liegen in der Dreiecksebene. Durch Bildung des Kreuzproduktes erhält man einen Vektor, welcher normal auf die Ebene steht Vektor ($V_{n5} = V_a$). Durch Bildung eines weiteren Kreuzproduktes aus $V_{n5} = V_a$ und $V_{4-5} = V_c$ erhält man den Vektor $V_{n4} = V_b$. Die Vektoren V_a , V_b , V_c bilden ein rechtwinkeliges Dreiein. Durch Normierung dieser drei Vektoren erhält man ein gedrehtes Koordinatensystem, welches oben bereits als gedrehtes/lokales Koordinatensystem bezeichnet wird. Aus den beiden Koordinatensystemen lokal/global können die Verdrehwinkel berechnet werden, wobei der Vektor V_a in die x-Koordinate, der Vektor V_b in die y-Koordinate und der Vektor V_c in die z-Koordinate überzuführen ist.

Nach Ermittlung der Drehmatrix kann der Vektor V_{S-N} in das globale Koordinatensystem umgerechnet werden. Anschließend wird die besprochene Addition durchgeführt. Das Resultat dieser Berechnung sind die Biegelinien der beiden Rohre, welche in Abbildung 3.13 dargestellt sind.

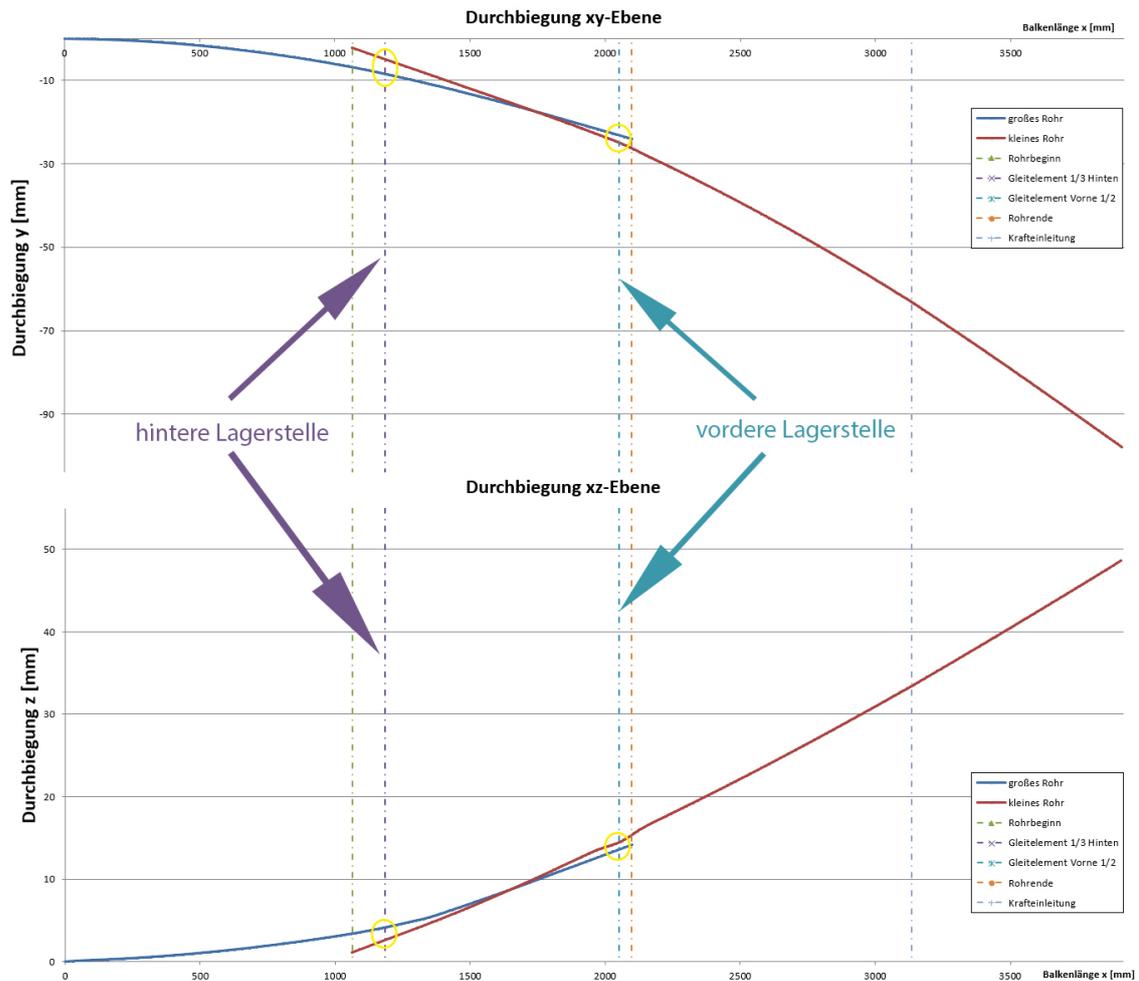


Abbildung 3.13: Durchbiegung der beiden Rohre in der xy-Ebene und xz-Ebene

3.3.2 Steifigkeiten ermitteln

Um die Balkenmodelle zu koppeln, werden lineare Federn verwendet. Bei linearen Federn ist der mathematische Zusammenhang aus dem Hookeschen Gesetz abgeleitet. Die Kraft stellt sich dabei als Gleichgewicht zwischen Federkonstante (Steifigkeit) multipliziert mit der Längenänderung ein, siehe (3.2).

$$F = C \cdot \Delta l \quad (3.2)$$

Aus dieser Formel ist ersichtlich, dass bei bekannter Längenänderung und

Kraft die Federsteifigkeit auswertbar ist. In Abbildung 3.13 sind die Biegelinien einer Rohrpaarung ersichtlich. Des Weiteren sind in dieser Abbildung die Kraftübertragungspunkte der hinteren und vorderen Lagerstelle ersichtlich. An diesen Lagerstellen können die Wegunterschiede der Biegelinien sowohl in Hauptrichtung (xy-Ebene) als auch in Nebenrichtung (xz-Ebene) ermittelt werden.

In Abbildung 3.14 ist das Balkenmodell dieser Rohrpaarung ersichtlich. Die in rot eingezeichneten Belastungen erzeugen in den Lagerstellen Kontaktkräfte.

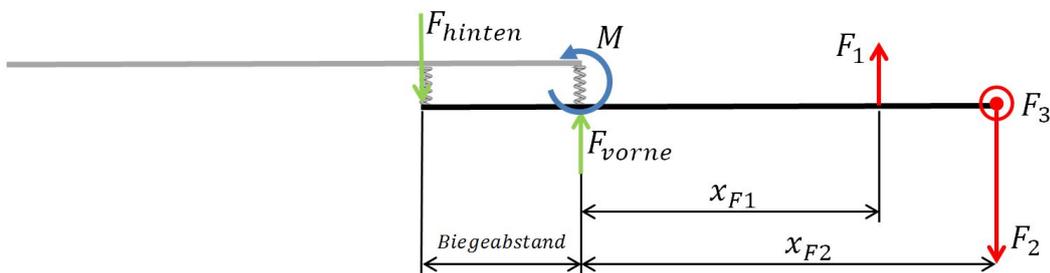


Abbildung 3.14: Balkenmodell mit Belastungen und resultierende Auflagerkräfte

Diese Kontaktkräfte können analytisch berechnet werden, wie in folgender Herleitung ersichtlich ist. In einem ersten Schritt wird das Moment M in der vorderen Lagerstelle ermittelt.

$$M = F_1 \cdot x_{F1} - F_2 \cdot x_{F2} \quad (3.3)$$

Aus diesem Moment kann auf die Kraft in der hinteren Lagerstelle F_{hinten} geschlossen werden.

$$F_{hinten} = \frac{M}{\text{Biegeabstand}} \quad (3.4)$$

Aus der Summe aller Kräfte am Balken des kleinen Rohres kann schlussendlich die Kontaktkraft der vorderen Lagerstelle F_{vorne} errechnet werden.

$$\sum F = 0 \Rightarrow F_{vorne} \quad (3.5)$$

Diese Vorgehensweise wird in analoger Art und Weise in der zweiten Ebene xz durchgeführt.

Somit werden wie in Abbildung 3.15 visualisiert die Federsteifigkeiten ermittelt.

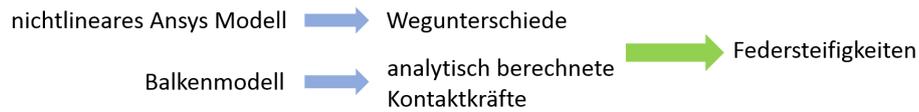


Abbildung 3.15: Berechnungsweg

Aus diesem Verfahren werden pro Rohrpaarung insgesamt vier unterschiedliche Werte für die Steifigkeiten ermittelt. Ziel soll jedoch sein, dass pro Rohrpaarung lediglich ein Federsteifigkeitswert pro Koordinatenrichtung hinterlegt wird. Daher musste eine Methode gefunden werden, welche die Mittelung zwischen den beiden Federsteifigkeiten (der vorderen und hinteren) Lagerstelle ermöglicht. Diese Methode ist in Abbildung 3.16 visualisiert. Die Verdrehung der einzelnen Biegelinien, sollen zueinander exakt nachgebildet werden.

Für die Lage des Lastangriffspunktes eines Kranes bzw. für die Gesamtverformung sind die Einzelverdrehungen der Rohre wesentlich. Bei der Mittelung der Steifigkeiten tritt bei konstant halten der Verdrehung der Biegelinien zueinander eine kleine Abweichung am Endpunkt der Biegelinien auf. Diese Abweichung ist jedoch sehr gering und hat auf die Lage des Lastangriffspunktes eines Kranes einen untergeordneten Einfluss. Die Tabelle in Abbildung 3.16 beinhaltet die Abweichung am Endpunkt der Biegelinie einer Rohrpaarung.

In Abbildung 3.16, sind die Soll-Lagerstellen gekennzeichnet. Als Soll-Lagerstellen werden jene Lagerstellen bezeichnet, welche aus den Ansys-Modellen ermittelt wurden. Die blaue Biegelinie stellt den exakten Verlauf des Ansys-Modells dar. Der Einspannbereich ist im unteren Bildbereich nochmals vergrößert dargestellt. Es soll ein Wegunterschied an der vorderen und hinteren Lagerstelle ermittelt werden, welcher bei unterschiedlichen Kräften gleich groß ist. Dadurch ist der Winkel φ , welcher den Winkelversatz darstellt, ident zu jenem aus dem Ansys-Modell. Um diese Steifigkeiten, Wegunterschiede und auch den Winkel φ zu finden wird ein Gleichungssystem aufgestellt.

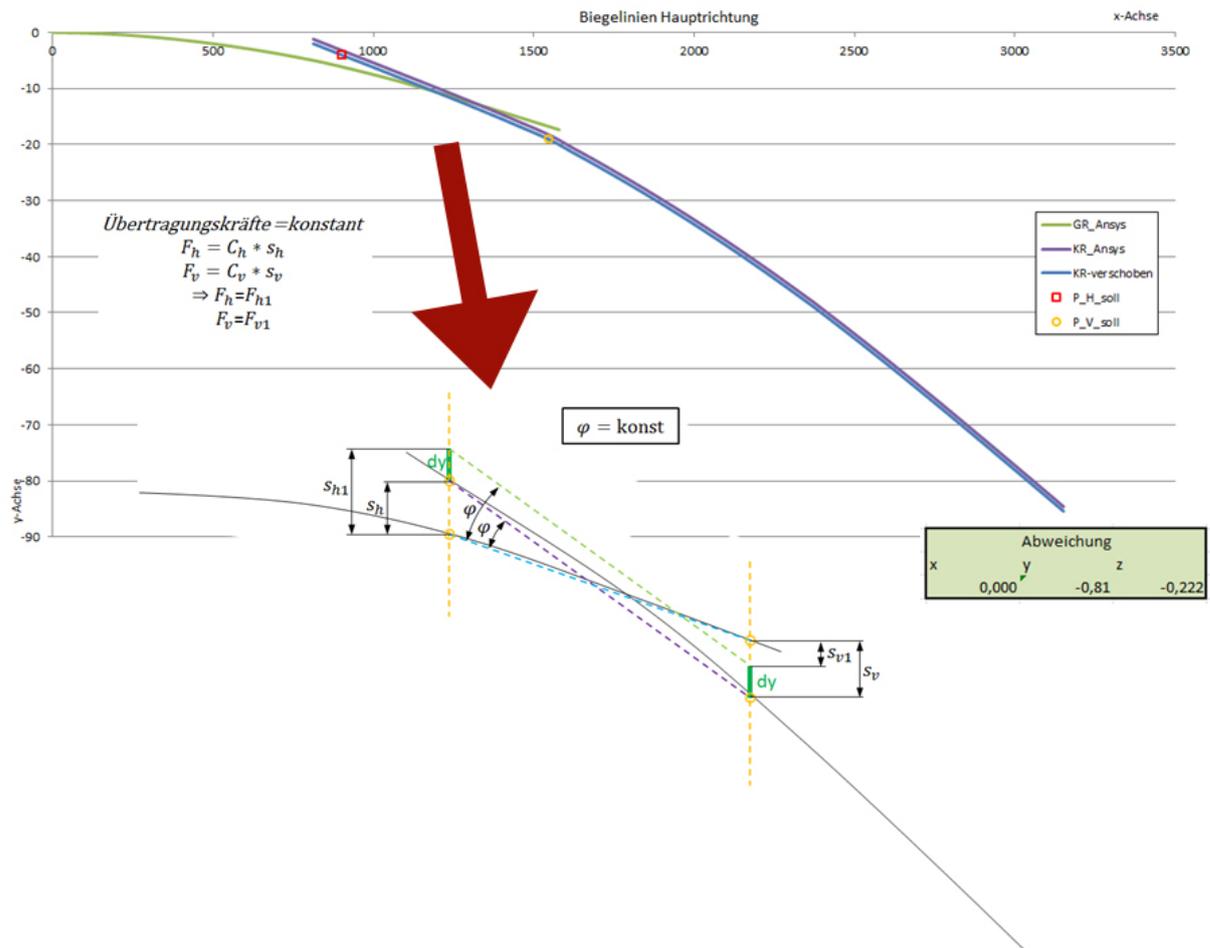


Abbildung 3.16: Mittelung der Steifigkeitswerte

Die Gleichung (3.6) beschreibt die hintere Kontaktkraft in Abhängigkeit des hinteren Wegunterschiedes und der gesuchten Federsteifigkeit, analog dazu die Gleichung (3.7) für die vordere Lagerstelle. Die dritte Gleichung (3.8) setzt die Bedingung, dass der Winkel konstant gehalten wird indem die Wegunterschiede der hinteren und vorderen Lagerstelle den selben Betrag haben müssen. Diese Wegunterschiede bilden sich aus den Wegen $s_{h1} - s_h$ bzw. $s_v - s_{v1}$. Dabei sind die Wege mit Indizes 1 für jene vom Ansysmodell und jene ohne Zahl im Index für die gesuchten Wege versehen.

$$I : F_h = C \cdot s_{h1} \quad (3.6)$$

$$II : F_v = C \cdot s_{v1} \quad (3.7)$$

$$III : s_{h1} - s_h = dy = s_v - s_{v1} (\varphi = konst) \quad (3.8)$$

Dieses Gleichungssystem besteht aus drei Unbekannten C, s_h, s_v und drei Gleichungen, wodurch es lösbar ist. Der Wert C stellt die Federsteifigkeit dar, welche an der hinteren und vorderen Lagerstelle eingesetzt werden kann.

Die resultierende Mittelungsformel ist in (3.9) ersichtlich und ermöglicht die Mittelung der vorderen und hintern Steifigkeit wobei der Winkel φ konstant bleibt.

$$C = \frac{F_h + F_v}{s_h + s_v} \quad (3.9)$$

3.3.3 Auswerteroutine erstellen/automatisieren

Die auf den vorhergehenden Seiten beschriebenen Rechenwege werden auf das gesamte Rechenfeld angewendet. Für die Anwendung dieser Rechenschritte auf das gesamte Rechenfeld war eine Automatisierung notwendig.

Die Ermittlung der Steifigkeitswerte, welche auf den vorhergehenden Seiten beschrieben ist, wird nun auf das gesamte Rechenfeld angewendet. Um dies zu ermöglichen wurde die Berechnung in Excel verwirklicht. Dazu wurden verschiedene Einlesevorgänge programmiert, welche mehrere Makros beinhalten. Die detaillierte Durchführung einer Auswertung in Excel ist im Kapitel B.1 ersichtlich. Die Auswertung in Excel ist sehr Zeit aufwendig. Daher wurde zur Abschätzung der gesamten Auswertedauer eine Zeitaufstellung erstellt.

Zeitaufstellung

In Tabelle 3.2 ist die zeitliche Aufstellung der einzelnen Arbeitsschritte einer exemplarischen Auswertung für eine Rohrpaarung chronologisch aufgelistet.

Wie man in Tabelle 3.2 erkennt, sind die Arbeitsschritte Modellumbau und Auswertung im Excel die zeitintensivsten Tätigkeiten. Die Arbeitsschritte Import in Ansys und aufbereiten der Modelle in Ansys Struktur, konnten wie bereits beschriebenen durch

Arbeitsschritte	benötigte Zeit
Creo Modell Umbau auf neue Version	120 min
Import in Ansys Designmodeler	20 min
Ansys Structur - Aufbereiten des Modells	15 min
Rechenzeit	60 min
Export der Ergebnisse	8 min
Auswertung mit Excel	12 min pro Lastschritt → 84 min

Tabelle 3.2: Zeitaufstellung

den systematischen Modellaufbau zeitlich optimiert werden. Bei dem Arbeitsschritt Modellaufbau besteht wenig Potential die benötigte Zeit zu reduzieren. Bei der Excel Auswertung könnten viele Schritte automatisiert werden. Auch zu erwähnen ist, dass durch eine Vielzahl manueller Schritte bei der Excel Auswertung die Fehleranfälligkeit hoch ist. Die programmierten Makros sind sehr langsam und verzögern den gesamten Auswertevorgang. Aus diesen Gründen wurde beschlossen, die gesamte Auswertung vollständig in einem Matlab Skript zu automatisieren.

Matlab Routine

Die erstellten Matlab Skripte importieren die Ausgabedateien der Ansys Rechnung und ermittelt anschließend alle Kontaktkräfte sowie Steifigkeitswerte, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben. Die errechneten Daten werden in einer Datei ausgegeben. Dieses Skript ist auf eine Art und Weise programmiert, dass je nach vorhandenen exportierten Ansys Dateien und je nach Anzahl der Lastschritte, all diese ausgewertet werden. Durch diese Skripte konnte die Auswertezeit pro Rohrpaarung gegenüber der Excel Auswertung reduziert werden. An einer üblichen Rohrpaarung wurden ca. 7 unterschiedliche Lastfälle gerechnet, welche in Summe eine Excel-Auswertedauer von 84 Minuten in Anspruch nahmen. Diese Zeit konnte auf ca. 10 Sekunden reduziert werden. Dadurch war es erst möglich, mehrere Rohrpaarungen mit unterschiedlichen Geometrievarianten und diversen Lastfällen auszuwerten. Die detaillierten Schritte, welche diese Skripte ausführen, sind im Anhang B.2 beschrieben.

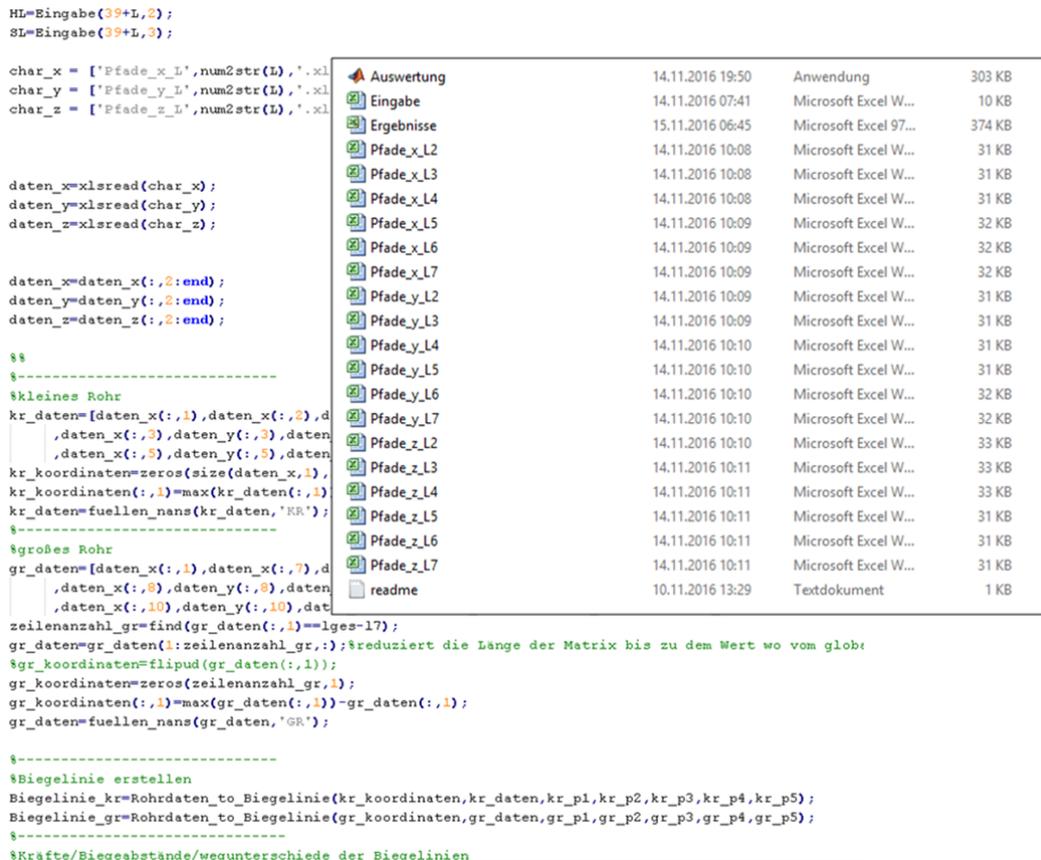


Abbildung 3.17: Programmcode

Nachdem die Auswertung wesentlich vereinfacht wurde, wurde begonnen, weitere Punkte des Parameterfeldes abzuarbeiten.

3.4 Analyse des gesamten Parameterfeldes

In diesem Kapitel wird, ausgehend von 16 Rechenpunkten, beschrieben wie die Steifigkeiten aller 119 möglichen Rohrpaarungskombinationen und die jeweils unterschiedlichen Geometrievarianten ermittelt werden.

Um einen Überblick zu bekommen, wurde die Grafik 3.18 erstellt. Auf der Ordinate ist der Mittelwert der Wandstärken der jeweiligen Rohrpaarung aufgetragen. Die Abszisse stellt die Rohrgröße dar. In Grafik 3.18 sind mit blauen Punkten alle nach der Palfinger Werknorm möglichen Rohrpaarungskombinationen dargestellt. Die Größe der orangen Kreise stellt die prognostizierten Stückzahlen in den nächsten

Jahren der jeweiligen Paarungen dar. Die grün ausgefüllten Kreise kennzeichnen alle Modelle, an welchen ein nichtlineares Ansys Kontaktmodell aufgebaut und mit der bereits beschriebenen Auswerterroutine Steifigkeiten ermittelt wurden. Bei jedem dieser Rechenpunkte wurden mindestens sieben unterschiedliche Lastfälle untersucht. Beispielhafte Lastfälle sind in Tabelle 3.3 ersichtlich. Bei den grün ausgefüllten Kreisen handelt es sich um Paarungen mit gerader Obergurttform und der Standard-Kranrohrendgeometrie. Jene Rohrpaarungen, an welchen auch die zurück geschnittene Obergurttform untersucht wurde, sind mit grünen Kreisen belegt. An den blauen Kreisen wurden Rohrpaarungen mit Jib Form untersucht.

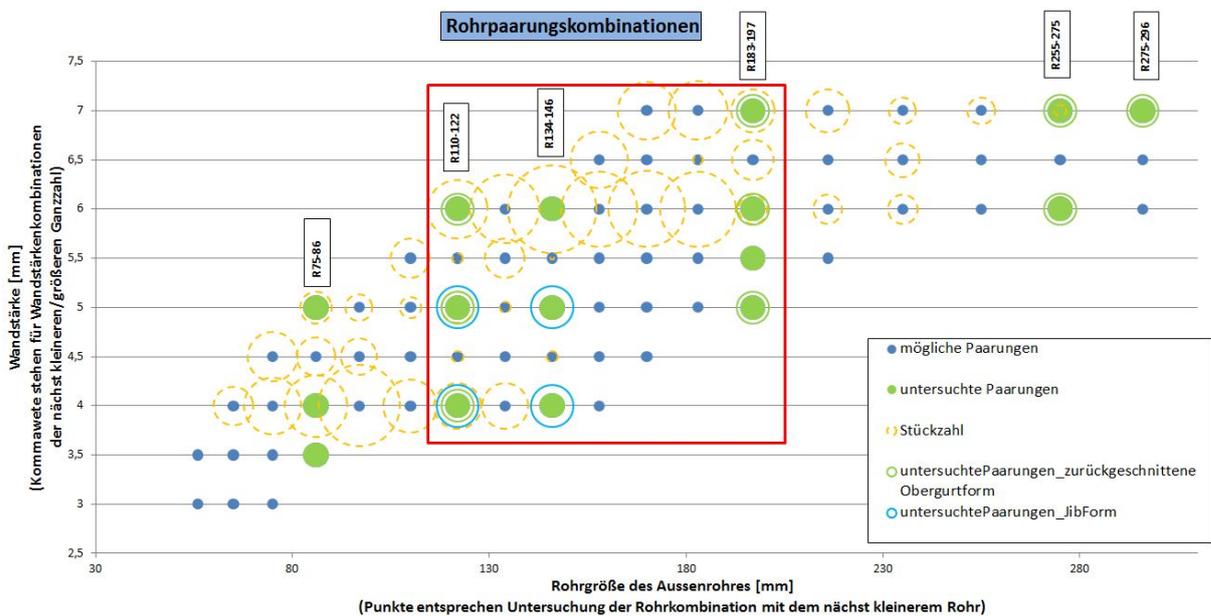


Abbildung 3.18: Rohrpaarungskombinationen

Wie man aus Abbildung 3.18 entnehmen kann, wurden 29 unterschiedliche nichtlineare Ansys Kontaktmodelle aufgebaut. Durch die im Abschnitt 3.3.3 beschriebene Automatisierung sowie den systematischen Modellaufbau war die Durchführung des Aufbaues der Modelle, der Ansys Berechnung und der anschließenden Auswertung an einer derartig großen Anzahl an Rechenpunkten mit jeweils mindestens sieben Lastfällen überhaupt möglich! In Tabelle 3.3 sind die einzelnen Lastschritte einer Rohrgrößen-, Wandstärkenkombination eingetragen.

Die ersten Auswertungen wurden in Rohrgrößenbereichen durchgeführt, welche in

Step	1	2	3	4	5	6	7
Hauptlastfaktor [%]		50	75	100	100	100	125
Seitenlastfaktor [%]		0	0	0	50	100	125
F_1 in [N] bei 100% Auslastung	Wegabweichung	110860	166290	221720	221720	221720	277150
$-F_2$ in [N] bei 100% Auslastung		124393	186590	248787	248787	248787	310983
F_3 in [N] bei 100% Auslastung		0	0	0	13444	26889	33611

Tabelle 3.3: Beispielhafte Lastschritte einer Rohrpaarung

Abbildung 3.18 durch ein rotes Rechteck gekennzeichnet sind. Dieser Bereich bildet einen hohen Anteil der insgesamt prognostizierten Stückzahlen ab.

In diesem Bereich ist eine lineare Methode gefunden worden, welche die Steifigkeiten wie im Folgenden (Kap.3.4.1) beschrieben, mit einem geringen Fehler abbilden lässt.

Die gesamte Verformung eines Kranes setzt sich aus den Verformungen der einzelnen Ausschubrohre zusammen. Die größten Rohre befinden sich am Beginn des Ausschubpaketes und daher ist es wichtig, diese rechnerisch genau abbilden zu können. Da bei diesen Rohren bereits ein kleiner rechnerischer Winkelfehler großen Einfluss auf den Lastangriffspunkt, welcher sich bei Großkrane bis zu 50m vom LKW entfernt befindet, hat.

Deshalb wurden anschließend trotz kleiner Stückzahlen auch die großen Rohre detailliert untersucht. Es stellte sich heraus, dass die lineare Methode mit Einbeziehung der Steifigkeitsergebnisse der großen Rohrpaarungen kein ausreichend genaues Ergebnis liefert. In Abschnitt 3.4.2 wird eine Auswertemethode höherer Ordnung entwickelt.

3.4.1 Lineare Regression

Im Anhang A.1 sind die notwendigen mathematischen Grundlagen der linearen Regression erläutert. In Abbildung 3.19 stellen die blauen Punkte alle errechneten Steifigkeitswerte des mittleren Rohrgrößenbereichs dar. Dabei wurden die Rohrpaarungen mit einem für die jeweilige Rohrgröße spezifischen Lastfall NR. 4 (100% HL, 0% SL) belastet. Aus dieser Punktwolke wurde mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ein linearer Zusammenhang ermittelt.

Aktuell wird in dem in der Einleitung beschriebenen Balkenmodell (Abbildung 1.3) ein Federkennwert verwendet, welcher von der Geometrie unabhängig ist. Die angegebenen Steifigkeitswerte stellen normierte Größen dar, welche auf einen Referenzwert bezogen sind und mit (3.10) ermittelt werden.

$$C_{normiert} = \frac{C_{ermittelt}}{C_{referenz}} \quad (3.10)$$

Auf der Ordinate sind die errechneten normierten Steifigkeitswerte aufgetragen. Die Abszisse wird durch eine Mittelungsgröße skaliert. Diese Mittelungsgröße wird mit (3.11) errechnet. Es wurde eine Vielzahl an Variationen durchgeführt um eine geeignete Mittelungsgröße zu finden. Die geeignetste Größe ergibt sich aus der Summe aus Rohrgröße des großen Rohres und einem Faktor F multipliziert mit dem Mittelwert der beiden Rohrwandstärken. Dieser Faktor gibt das Verhältnis des Rohrwandstärken-, Rohrgrößeneinflusses an und wird mittels eines Solvers auf eine Art gelöst, dass die Korrelation zwischen errechneten Steifigkeitswerten aus dem linearen Zusammenhang und den Steifigkeitswerten aus den Ansys Modellen ein Extremum aufweist.

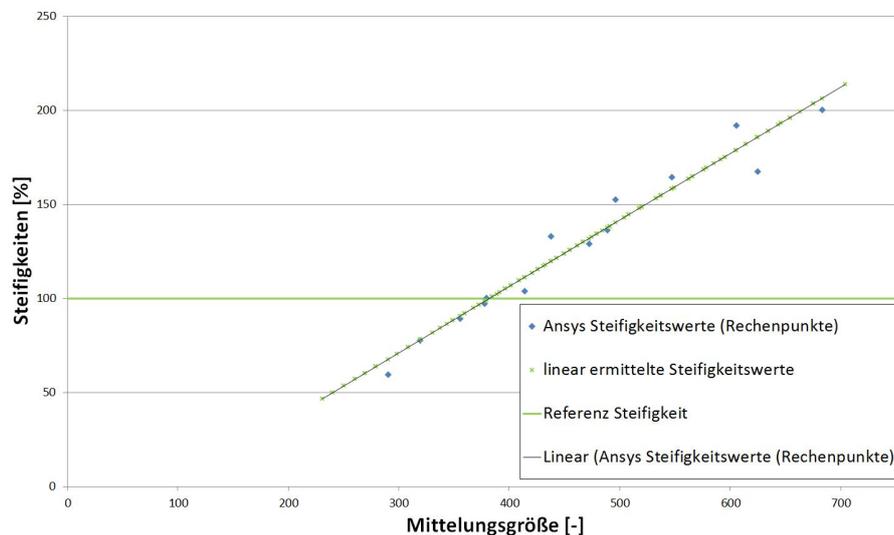


Abbildung 3.19: Lineare Auswertung Lastfall 100% HL 0% SL

$$\text{Mittelungsgröße} = RG + F \cdot \text{Mittelwert}(W_{GR}, W_{KR}) \quad (3.11)$$

Wie in der Grafik ersichtlich ist, kann mittels des linearen Zusammenhanges (3.11) auf die gesamten Steifigkeiten aller Rohrpaarungen in diesem eingeschränkten Rohrgrößenbereich geschlossen werden.

In Abbildung 3.20 sind die errechneten Steifigkeiten des gesamten Parameterfeldes als grüne Punkte über die Rohrgröße des großen Rohres dargestellt. Diese grünen Punkte wurden mit dem angeführten linearen Rechenweg ermittelt. Die blauen Punkte kennzeichnen die Steifigkeitswerte der Untersuchungspunkte, an welchen ein Ansys Modell aufgebaut wurde. Diese lineare Methode kreiert Bänder der Wandstärkenabstufung.

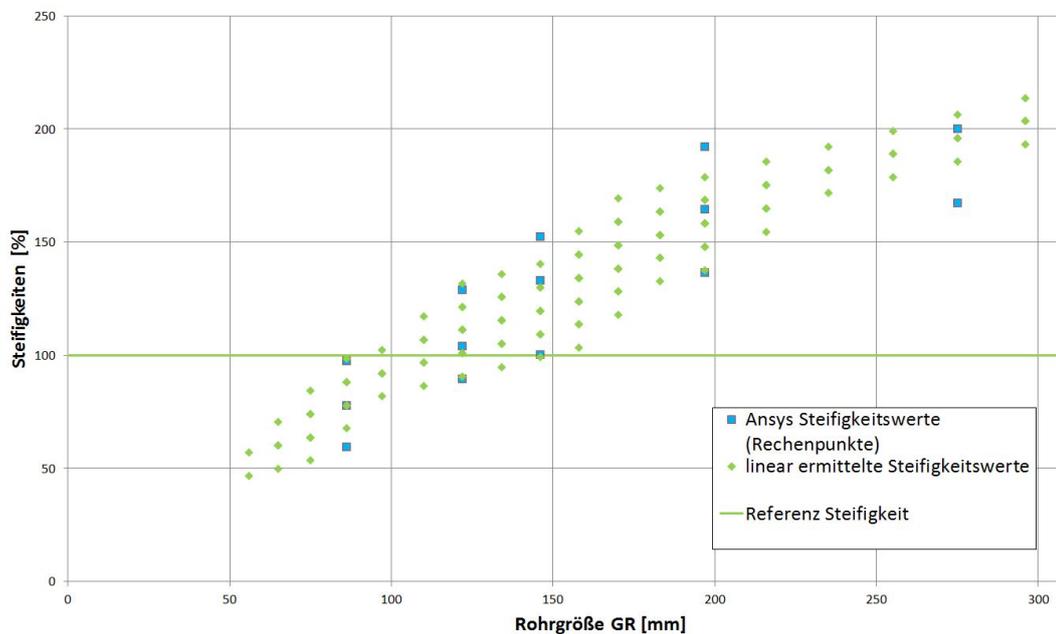


Abbildung 3.20: Steifigkeitsfeld

In diesem Rohrgrößenbereich ist eine lineare Näherung der Steifigkeiten möglich. Für das gesamte Feld muss ein anderer funktioneller Zusammenhang gefunden werden (siehe Kapitel 3.4.2).

3.4.2 Polynom Regression

Da es essentiell ist, auch die Randbereiche des Parameterfeldes gut abbilden zu können, wurden weitere Berechnungspunkte außerhalb des roten Rechtecks untersucht, siehe Abbildung 3.18. Nach Auswertung der großen Rohrpaarungen (R255-275, R275-296)

wurde eine quadratische Veränderung der Steifigkeitswerte über das gesamte Parameterfeld ersichtlich. Im Folgenden wird daher die Ermittlung der Steifigkeiten des gesamten Feldes mit einem anderen Verfahren als bisher beschrieben.

Von Interesse sind die im folgendem Diagramm skizzierten Kurvenverläufe der Steifigkeiten in horizontaler (orange) und vertikaler (rot) Richtung. Diese skizzierten Kurven sind nur zur Kennzeichnung der zu erstellenden Verläufe eingezeichnet und der Verlauf ist frei gewählt. In den Abbildungen 3.22 und 3.23 sind die tatsächlichen Verläufe dieser Kurven ersichtlich. Um die Ordnung der Zusammenhänge abschätzen zu können, wurden zu Beginn dieser Untersuchung einzelne variable Größen wie Wandstärke und Rohrgröße separat in Diagrammen dargestellt.

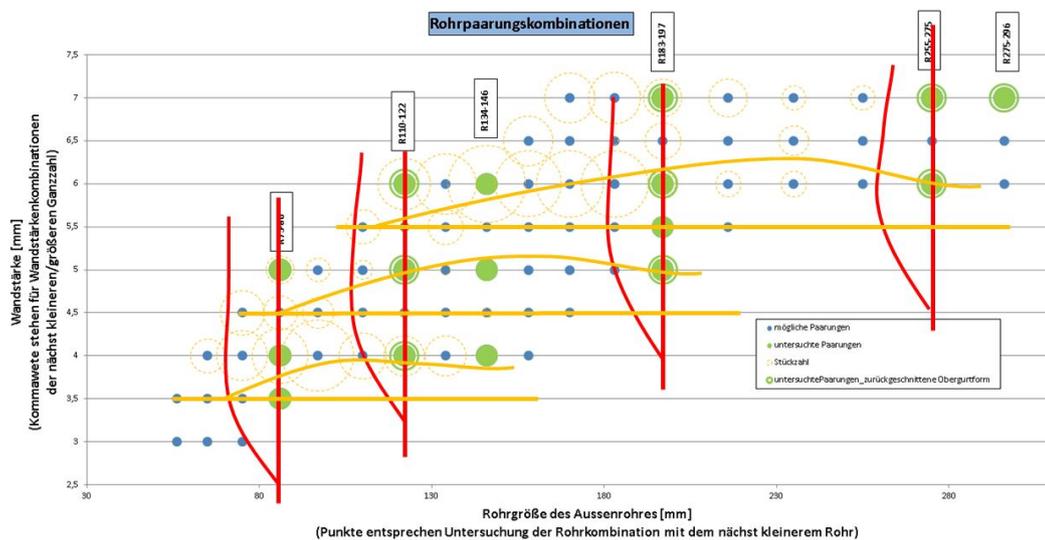


Abbildung 3.21: Horizontaler / vertikaler Verlauf

Die Idee ist, aus diesen einzelnen Verläufen einen formalen Zusammenhang abzuleiten.

In Abbildung 3.22 stellen die blauen Punkte die Steifigkeitswerte der Rohre mit geradem Obergurt dar. Die roten Punkte jene Werte mit schrägem Obergurt. Es ist ersichtlich, dass sich die Steifigkeitswerte bei konstanter Wandstärke (rote/blau Linien) über die Rohrgröße gut mit einer quadratischen Funktion abbilden lassen. In Abbildung 3.23 wurden Linien der Steifigkeiten einer Rohrgröße über die Wandstärkenveränderung aufgetragen. Mit Geraden könnte der Einfluss der Rohrgröße gut angenähert werden.

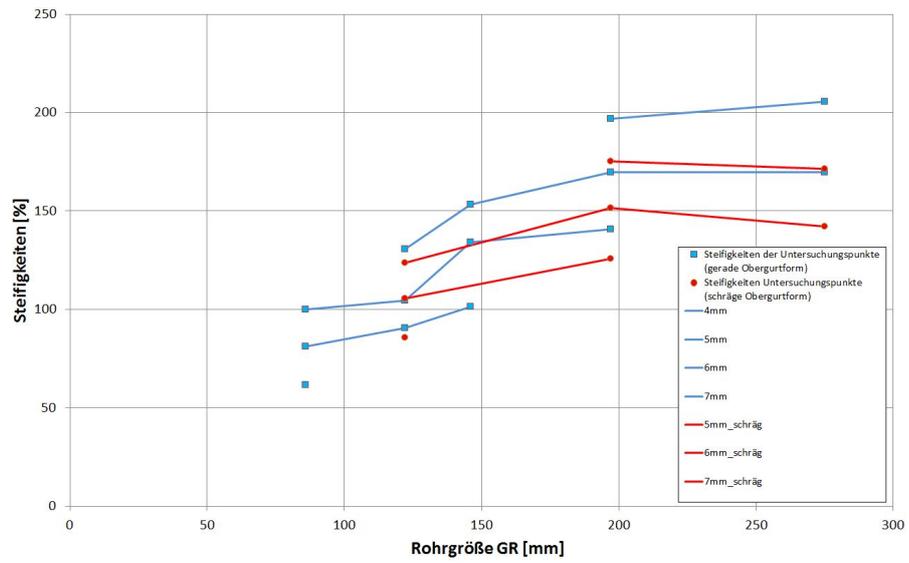


Abbildung 3.22: Steifigkeitsverlauf über Rohrgröße

→ **Quadratisch**

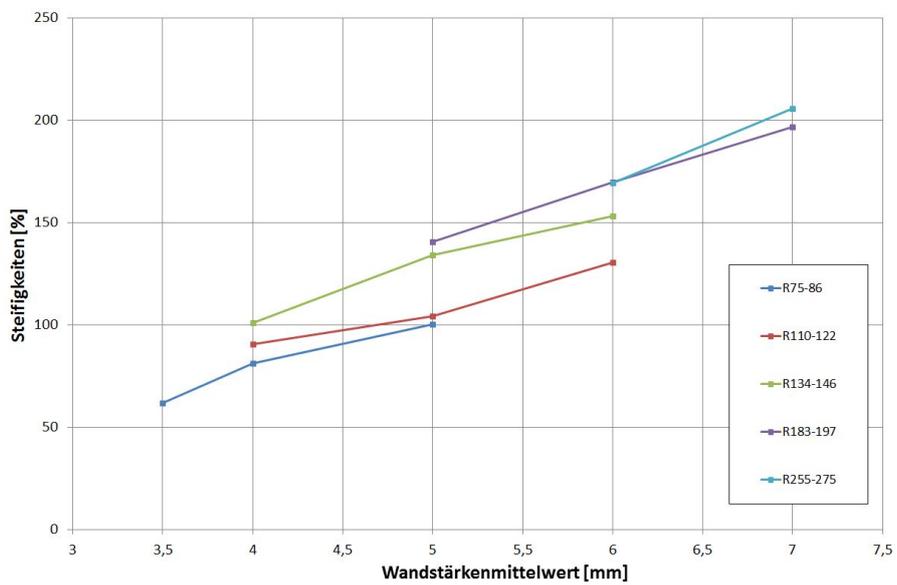


Abbildung 3.23: Steifigkeitsverlauf über Wandstaeerke

→ **Linear**

Die Formel (3.12) stellt den formalen Funktionsverlauf einer vollständigen quadratischen Näherung dar. Dabei sind K_1 bis K_4 Konstanten, RG entspricht der

Rohrgröße des großen Rohres, D stellt eine weitere Konstante dar, und W entspricht dem Mittelwert der Wandstärken der Paarung.

$$C = K_1 \cdot RG^2 + K_2 \cdot RG + K_3 \cdot W^2 + K_4 \cdot W + D \quad (3.12)$$

Aus den beschriebenen Diagrammen ist ersichtlich, dass der Term $K_3 \cdot W^2$ in (3.12) nicht benötigt wird, um die Steifigkeiten mit guter Näherung abbilden zu können. Daher folgt aus dieser Überlegung der allgemeine Ansatz für die Steifigkeiten, siehe (3.13).

$$C = K_1 \cdot RG^2 + K_2 \cdot RG + K_4 \cdot W + D \quad (3.13)$$

Im folgendem Abschnitt wird versucht einen solchen quadratischen Zusammenhang wie in (3.13) ersichtlich herzuleiten bzw. einen Weg zu finden, wie die einzelnen Konstanten ermittelt werden können. In Abbildung 3.14 sind alle möglichen Wandstärken-Rohrgrößenkombinationen mit blauen Punkten dargestellt. Dabei entspricht die Ordinate jeweils dem Mittelwert der Wandstärkenkombination der Rohrpaarung. Aus dieser Punktwolke wurde eine polynomische Regressionskurve erstellt.

$$w_{Mittelwert} = K_1 \cdot RG^2 + K_2 \cdot RG + D \quad (3.14)$$

Diese stellt den Standardwert der Wandstärke für eine bestimmte Rohrgröße dar. Da bei jeder Rohrgröße mehrere Wandstärken möglich sind, entsteht ein Feld an diskreten Punkten der Wandstärken. Diese diskreten Punkte können verwendet werden, um die Steifigkeitswerte wie im Folgenden beschrieben zu skalieren.

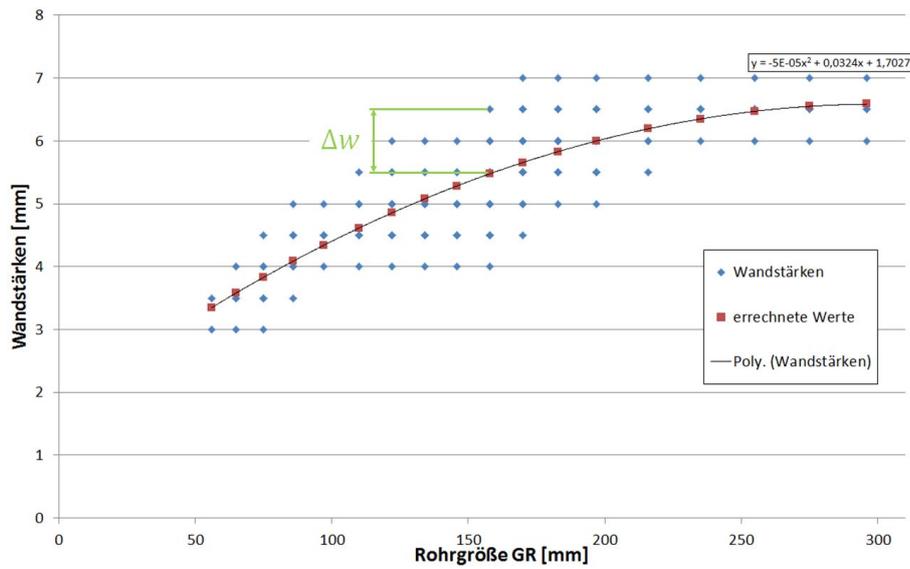


Abbildung 3.24: Wandstärkenfeld

Es wurden die Abweichungen Δw der einzelnen Punkte zu der polynomischen Regressionskurve (Wandstärkenstandardwert) ermittelt.

$$\Delta w = K_1 \cdot RG^2 + K_2 \cdot RG + D - w_{\text{Mittelwert}} \quad (3.15)$$

Die Wandstärkenabweichung, welche mit (3.15) ermittelt wird, wird verwendet um die Einzelwerte der Steifigkeiten zu skalieren.

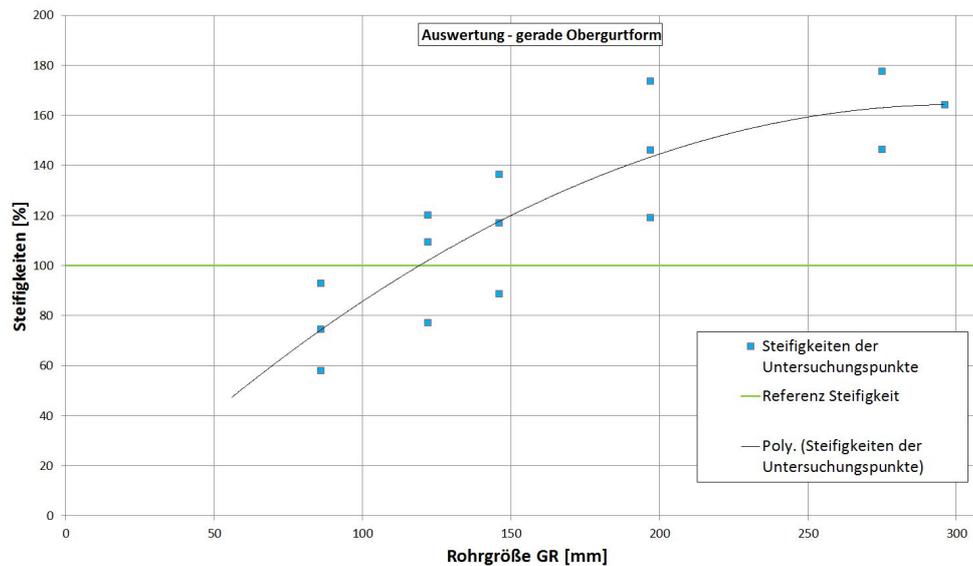


Abbildung 3.25: Steifigkeitsfeld Ansys Werte

Aus den errechneten Ansys-Werten (blaue Punkte in Abbildung 3.25) wurde ebenfalls eine quadratische Regressionskurve erstellt. Diese Kurve stellt den Steifigkeitsverlauf über die Rohrgröße dar und wird mit (3.16) beschrieben.

$$C = m_2 \cdot RG^2 + m_1 \cdot RG + b \quad (3.16)$$

Um aus diesem Verlauf der Steifigkeit diskrete Werte für die jeweilige Wandstärke zu bekommen, ist dieser Steifigkeitsverlauf mit einem weiteren Term ergänzt worden. Dieser zusätzliche Term besteht aus der zuvor bestimmten Wandstärkenabweichung (3.15) multipliziert mit einer Konstanten K . Diese Konstante beschreibt das Verhältnis zwischen Wandstärken- und Rohrgrößeneinfluss. Das Resultat ist in (3.17) ersichtlich.

$$C = m_2 \cdot RG^2 + m_1 \cdot RG + b + \Delta w \cdot K \quad (3.17)$$

Diese Konstante K wurde mithilfe des Solvers so gewählt, dass die Korrelation zwischen den Steifigkeitspunkten des Ansys-Modells und den Punkten, welche mit der Formel errechnet werden in Richtung Maximum strebt. Nach Einsetzen des Wertes Δw in diese Formeln und zusammenfassen der einzelnen Konstanten ergibt sich folgender Zusammenhang (3.18) für das Parameterfeld.

$$C = K_1 \cdot RG^2 + K_2 \cdot RG + K_3 + K \cdot w_{\text{Mittelwert}} \quad (3.18)$$

Die Konstanten K_1 bis K_3 werden durch quadratische Regression der einzelnen Kurven ermittelt. Dabei wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet, welche im Anhang A.2 für ein Polynom beschrieben ist.

Es ist ersichtlich, dass (3.18) dieselbe Form hat wie der Zusammenhang aus (3.13), welcher aus Überlegungen hervorgegangen ist.

Mit (3.18) wurden die Steifigkeiten des gesamten Feldes ermittelt, diese sind in Abbildung 3.26 ersichtlich.

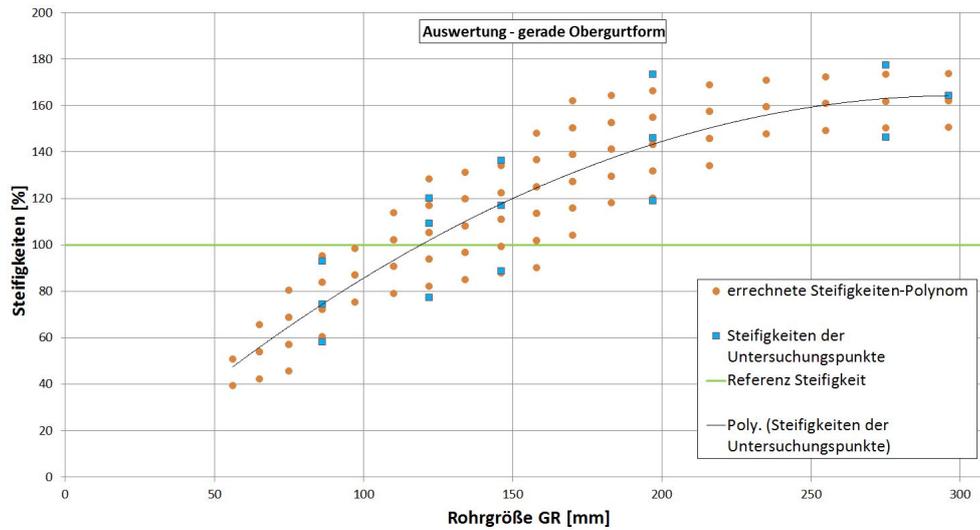


Abbildung 3.26: Steifigkeitsfeld

Durch die in diesem Abschnitt erstellte Funktionsentwicklung ist es möglich die Steifigkeiten über den gesamten Rohrgrößenbereich zu ermitteln. Es werden Effekte, welche die Steifigkeit bei den größten Rohren reduzieren, in der Berechnung abgebildet. Dieser Effekte wurden bei der linearen Methode nicht abgebildet, sondern so optimiert, dass der Fehler bei allen Werten größer wurde, um damit den Fehler der großen Rohre gering zu halten.

Im Kapitel 4 ist die Variante der Polynom Regression (3.18) auf alle untersuchten Geometrieausprägungen in Hauptlast- sowie Seitenlasttrichtung angewendet worden. Zusätzlich dazu wurden diverse Fehlerabschätzungen durchgeführt.

3.5 Weitere Steifigkeitsuntersuchungen

Es wurden eine Vielzahl an Einzeleffekten und Einflussgrößen detailliert untersucht. Die wichtigsten Untersuchungen werden in diesem Abschnitt beschrieben.

- Variation der Eintauchtiefe
- Unterschiedliche Obergurtformen
- Unterschiedliche Vorspannungen

3.5.1 Variation der Eintauchtiefe

Ein weiterer untersuchter Einflussfaktor ist neben Rohrgröße, Wandstärke, Auslastung und Obergurtform die Eintauchtiefe. Durch Variation der Eintauchtiefe der Rohre konnten die Auswirkungen dieser Einflussgröße abgeschätzt werden. Es wurden die Steifigkeiten an drei verschiedenen Eintauchtiefen ermittelt $4,75 \cdot R$, $5 \cdot R$ sowie $5,25 \cdot R$. Durch Verkürzen der Eintauchtiefen steigen die Übertragungskräfte in den Kontaktbereichen. In Abbildung 3.27([1,1],[1,2]) ist ersichtlich, dass der Einfluss auf die Steifigkeit in Haupttrichtung relativ gering ist.

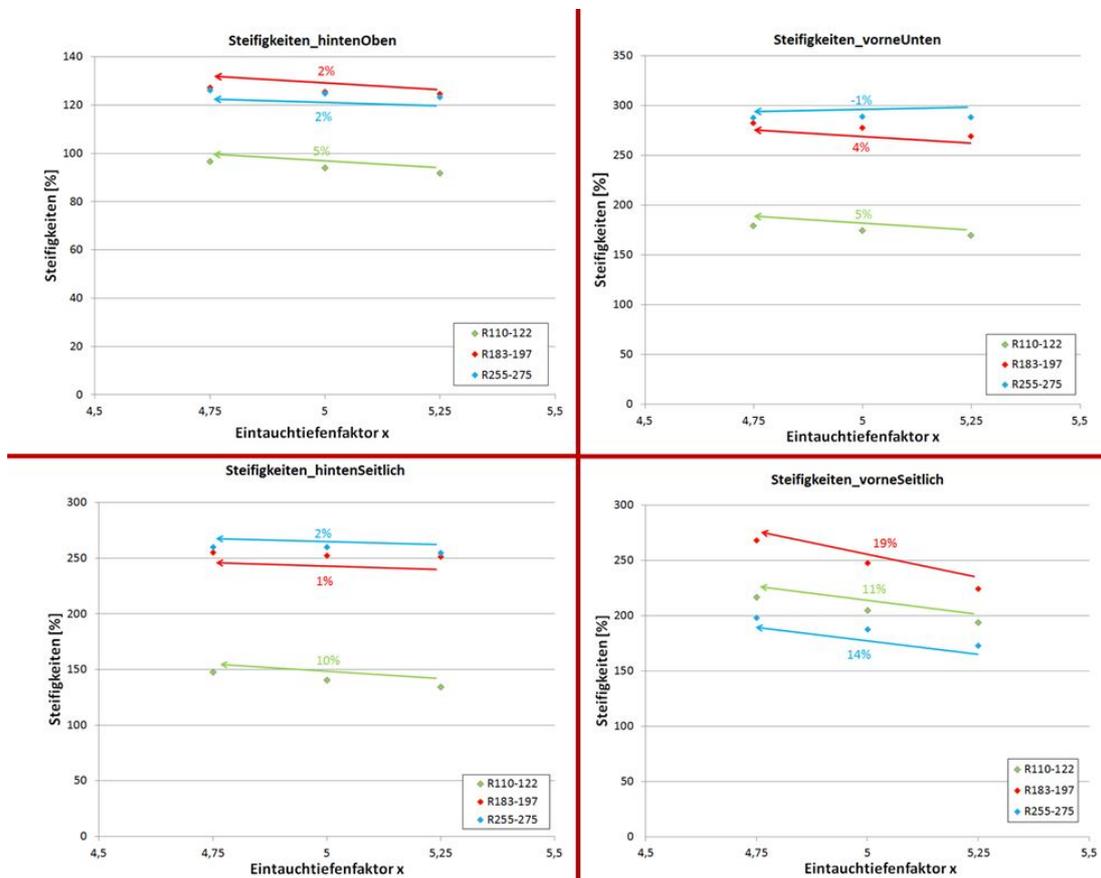


Abbildung 3.27: Eintauchtiefe

In Nebenrichtung sind die Auswirkungen höher. Dieser Einfluss kann vernachlässigt werden, da die Steifigkeitsänderung auf die Kräfteveränderung rückführbar ist. In Abbildung 3.28 sind die Steifigkeitswerte bei Erhöhen der Auslastung dargestellt. Dies entspricht gleich der Erhöhung der Kontaktkraft hinten oben.

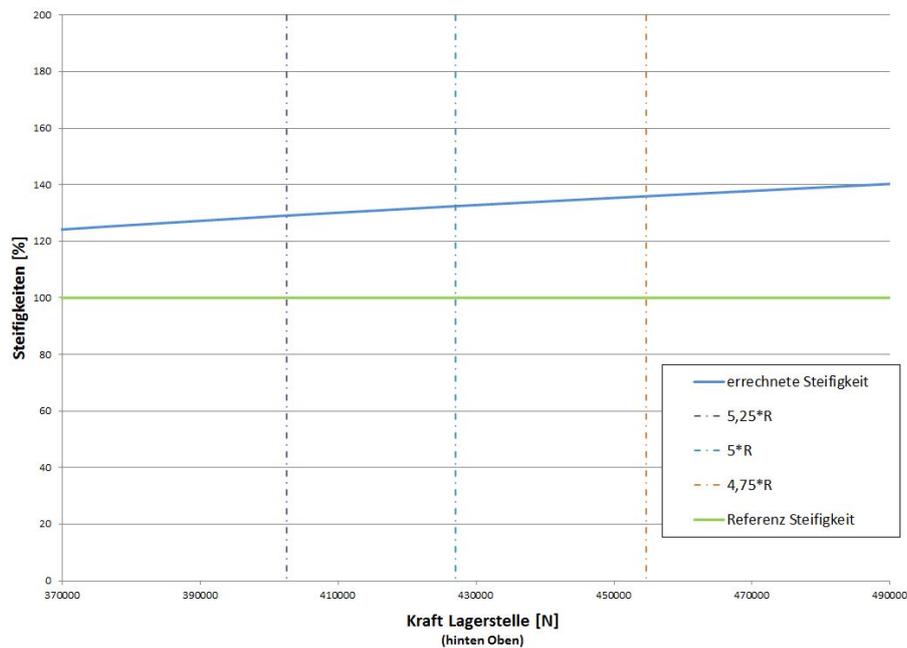


Abbildung 3.28: Eintauchtiefe Kräfte

Die vertikalen Linien kennzeichnen die übertragenen Kräfte der jeweiligen Einspannvariante. Durch Verkürzen der Einspannlänge steigt die Kraft und somit erhöht sich die Steifigkeit. Jedoch sind die Steifigkeitswerte speziell bei Auswertpunkten um eine Auslastung von 100% für den Normnachweis von Interesse. Da die Steifigkeitswerte im Berechnungsprogramm Indus speziell für die Erstellung von Normfestigkeitsnachweise von Interesse sind, werden die Steifigkeiten bei Kontaktkräften, welche einer Querschnittauslastung von 100% entsprechen, berechnet.

3.5.2 Variation der Obergurtform

An einer Rohrpaarung (R183-197) wurden an einem 5-mm-Rohr und an einem 7-mm-Rohr die Steifigkeitswerte der geraden und schrägen Obergurtform ermittelt und gegenübergestellt.

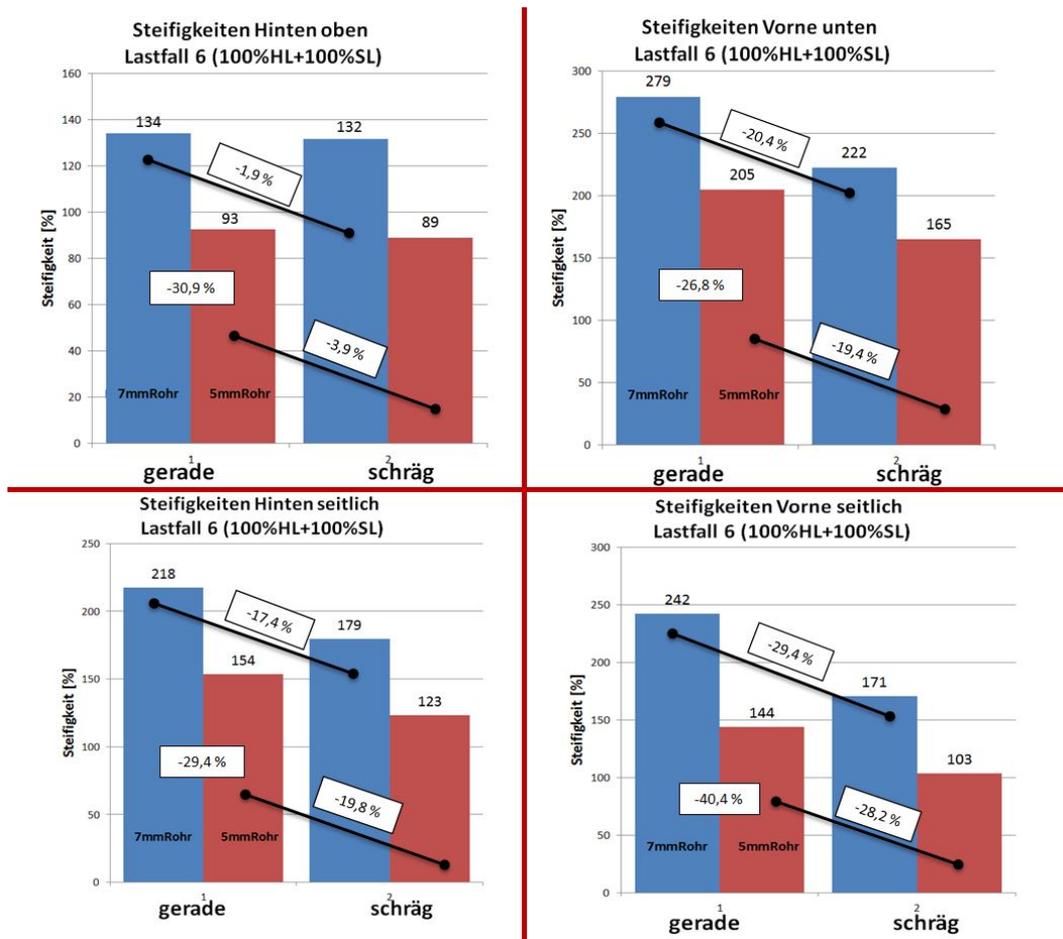


Abbildung 3.29: Vergleich Rohrwandstärke und Obergurttform

In Abbildung 3.29 sind alle Steifigkeiten der einzelnen Lagerstellen in Haupttrichtung und in seitlicher Richtung, jeweils als gerades und schräges Rohr mit 7mm und 5mm, dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Rohrform bei der hinteren oberen Lagerstelle kaum einen Einfluss auf die Steifigkeit hat. Die Steifigkeitswerte der vorderen Lagerstelle werden deutlich durch die Rohrform beeinflusst. Dieser Einfluss wurde detailliert untersucht. Es stellte sich heraus, dass der Einfluss von der Aufweitung des Untergurtes resultiert. In seitlicher Richtung haben sowohl Wandstärke als auch Obergurttform an beiden Lagerstellen eine Auswirkung auf die Steifigkeit.

Aus dieser Untersuchung geht hervor, dass sowohl der Wandstärkeneinfluss als auch der Einfluss der Obergurttform detailliert untersucht werden muss.

3.5.3 Variation der Vorspannungen

Die Ausschubrohre werden je nach Fertigungstoleranz mit unterschiedlichen Gleitelementstärken vorgespannt. Dadurch verringert sich die Gesamtdurchbiegung. Die Vorspannung sorgt dafür, dass die Rohre lastlos mit kaum einer Durchbiegung ausfahren. Da es sehr aufwändig wäre, die Rohre in den Modellen schräg einzubauen, wurde versucht dieses Verhalten mit der Veränderung der hinteren oberen Gleitelementgeometrie zu simulieren. Dabei wurden die Gleitelemente mit dem Vorspannungswinkel auf der oberen Fläche abgeschrägt. Der Vorspannungswinkel variiert je nach Fertigungstoleranz der Stahlrohre und den laut Norm möglichen Gleitelementstärken. Es ist daher nicht möglich, den Winkel im Rechenmodell exakt an den realen Kran anzupassen. Um den Einfluss der Vorspannung zu ermitteln, wurde an einer Rohrpaarung mit den Winkeln der Toleranzgrenzen eine Untersuchung durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass die Vorspannung einen Einfluss auf die Steifigkeit hat.

Für die Untersuchung des gesamten Rohrpaarungsfeldes wurde der Schrägungswinkel $0,2^\circ$ gewählt. Dieser Winkel stellte den Mittelwert der erlaubten Vorspannungen dar. Die gewählte Modellierung sorgt nach dem Aufbringen der Last und dem Anlegen der Kontakte für eine Vorspannung. An einer Rohrpaarung ist das Verhalten unterschiedlicher Vorspannungen analysiert worden. Sobald die Belastung gesteigert wird legt sich das Gleitelement in das Rohr hinein wodurch eine Kraftübertragungsfläche entsteht.

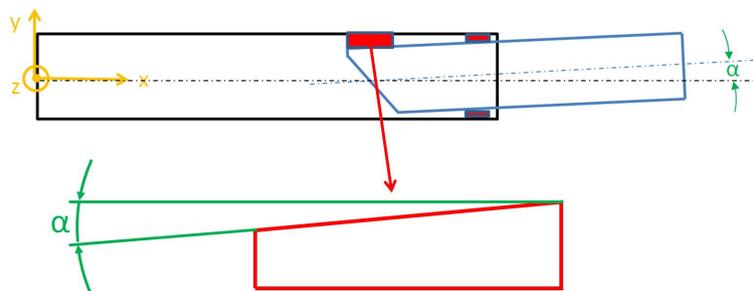


Abbildung 3.30: Rohrvorspannung

4

Ergebnisse Steifigkeitsuntersuchung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen dargestellt und interpretiert. Die Ermittlung der Steifigkeiten wurde bereits in den Abschnitten 3.3 und 3.4 erläutert.

Die Steifigkeitsergebnisse wurden bei dem Lastfall Nr. 6 in Tabelle 3.3 ausgewertet. Dieser Lastfall entspricht jener Belastung in Hauptrichtung und seitlicher Richtung, welche Rohrquerschnitte nach Norm gerechnet zu 100% belastet.

Die Ergebnisse gliedern sich in mehrere Geometrievarianten:

- gerade Obergurtform
- schräge Obergurtform
- JIB Form

Jede dieser Geometrievarianten ist sowohl in Hauptbelastungsrichtung als auch in seitlicher Belastungsrichtung untersucht worden.

Anschließend an die Untersuchung und Ermittlung der Steifigkeiten ist ein Vergleich der Balkenmodelle mit unterschiedlichen Federkennwerten durchgeführt worden.

4.1 Gerade Obergurttform

Hauptbelastungsrichtung; In Abbildung 4.1 sind die errechneten Steifigkeitswerte des geraden Obergurtes als orange Punkte dargestellt. Es ist ein deutlicher quadratischer Verlauf ersichtlich. Die Genauigkeit der Rechenmethode ist mit Fehlerwerten kleiner 6% ausreichend, wenn man berücksichtigt, dass die ursprünglich verwendeten Federsteifigkeiten von der Geometrie unabhängig sind. Die blauen Werte stellen die Fehlerwerte dar. Diese sind auf die exakten Steifigkeiten der Ansys Rechenpunkte bezogen. Diese Ansys Rechenpunkte sind mit blauen Quadraten gekennzeichnet. Die Rechenkonstanten sind normiert in Tabelle 4.1 ersichtlich. Mit diesen Konstanten und (3.18) können die Steifigkeiten in Abhängigkeit der Rohrgröße und Wandstärke (orange Punkte in Abbildung 4.1) ermittelt werden.

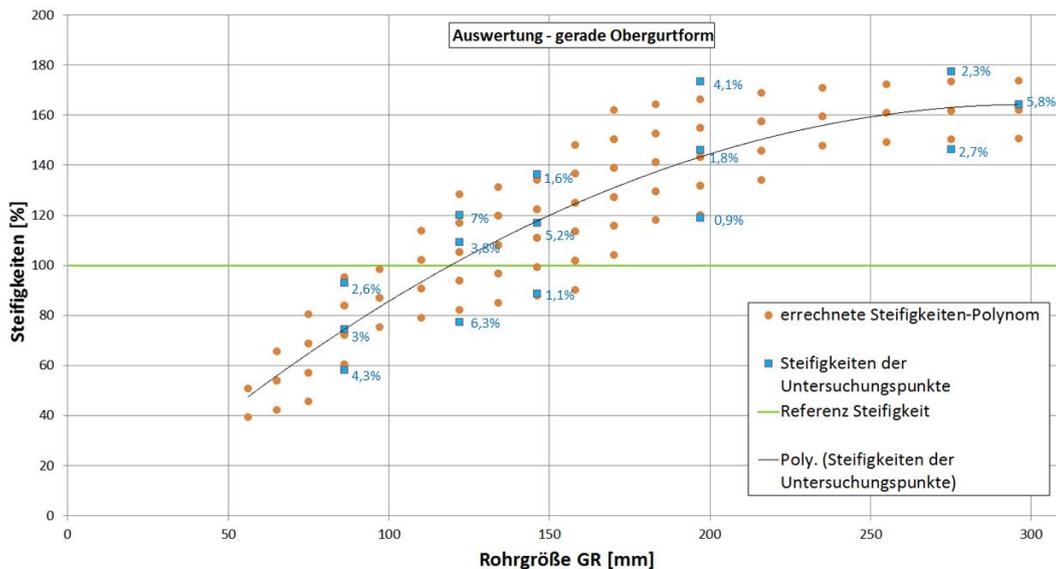


Abbildung 4.1: Ergebnisse des geraden Obergurtes in Haupttrichtung

Konstanten			
K_1	K_2	K_3	K
-0,0007144	0,4259	-51,73	-23,15

Tabelle 4.1: Konstanten für gerade Obergurttform in Haupttrichtung

Seitliche Belastungsrichtung: In Abbildung 4.2 sind analog zu der beschriebenen Hauptbelastungsrichtung die Ergebnisse der Rohrpaarung mit geradem Obergurt in seitlicher

Belastungsrichtung dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich die seitliche Richtung stärker gekrümmt verhält, also die Steifigkeit bei den großen Rohrpaarungen deutlich abnimmt. Auch ist zu erkennen, dass die Steifigkeiten der kleinsten Rohrpaarungen, welche mit der beschriebenen Methode ermittelt wurden, keine verwendbaren Ergebnisse liefern. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die unterste Randzone des Parameterfeldes nicht gerechnet wurde. Daher wäre es sinnvoll, diese kleinste Rohrpaarung ebenfalls einer genauen Untersuchung zu unterziehen. Aus zeitlichen Gründen wurde dies nicht näher ausgeführt, da die kleinsten Rohre auf das gesamte Verhalten des Kranes wenig Einfluss haben. Es wurde in diesem Bereich eine Steifigkeitsuntergrenze definiert, welche nicht unterschritten werden darf. Dadurch konnte der Fehler in Grenzen gehalten werden.

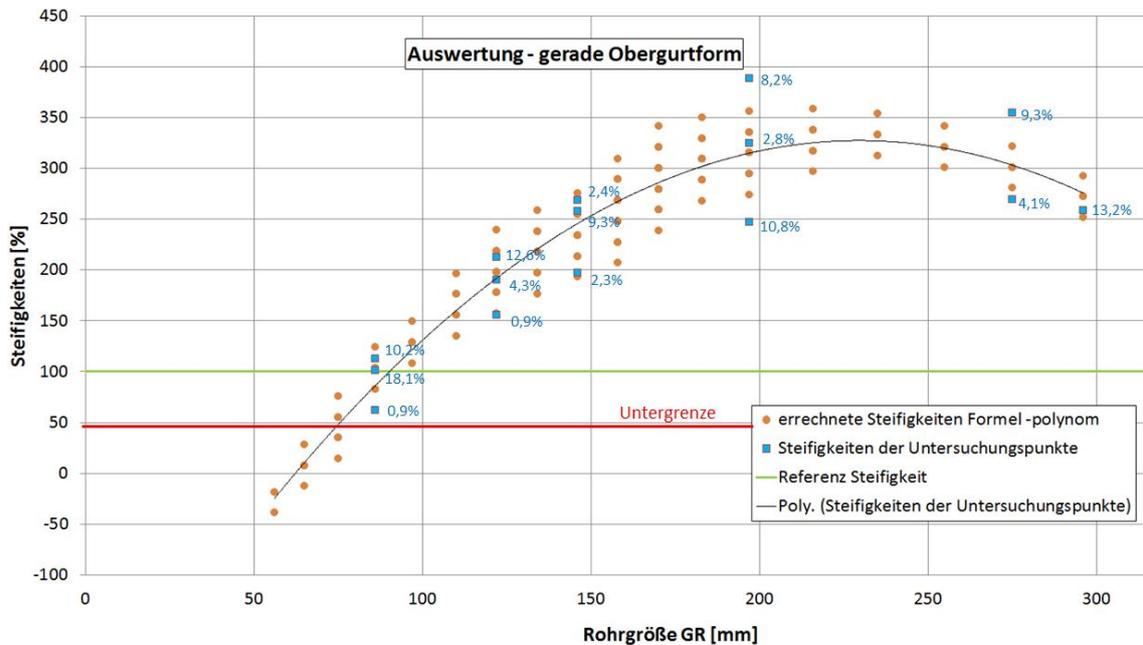


Abbildung 4.2: Ergebnisse des geraden Obergurtes in Nebenrichtung

In Tabelle 4.2 sind die normierten Konstanten für diese Werte ersichtlich.

Konstanten			
K_1	K_2	K_3	K
-0,009485	4,0356	-358,32	-41,067

Tabelle 4.2: Konstanten für gerade Obergurtform in Nebenrichtung

4.2 Schräge Obergurtform

Hauptbelastungsrichtung: Abbildung 4.3 zeigt die Steifigkeiten der Rohrpaarungen mit der Geometrieausprägung des schrägen Obergurtes.

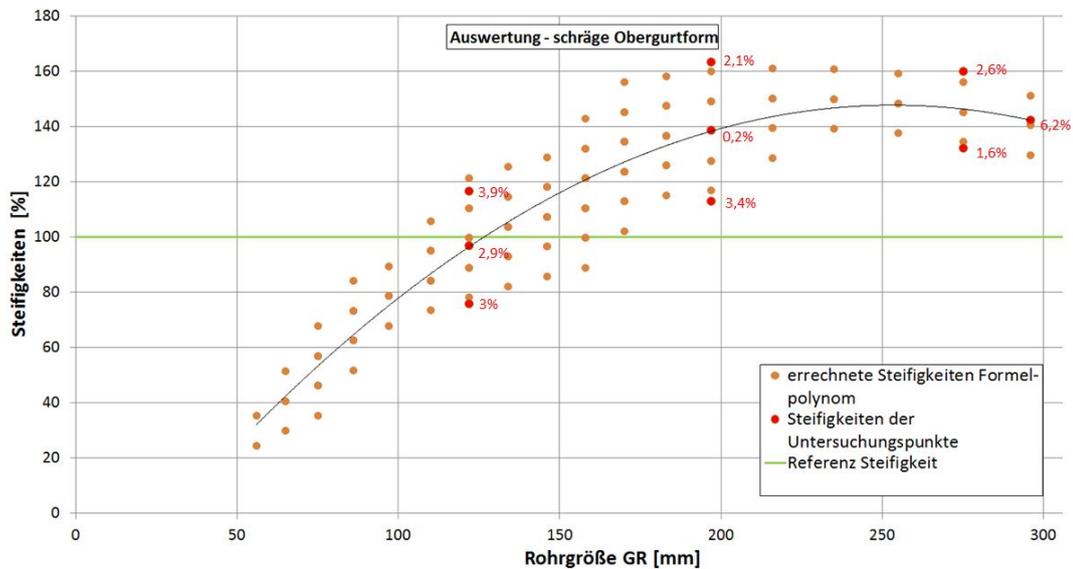


Abbildung 4.3: Ergebnisse des schrägen Obergurtes in Haupttrichtung

In Tabelle 4.3 sind die normierten Konstanten ersichtlich.

Konstanten			
K_1	K_2	K_3	K
-0,001817	0,8077	-79,64	-21,56

Tabelle 4.3: Konstanten für schräge Obergurtform in Haupttrichtung

Seitliche Belastungsrichtung: Auch bei der schrägen Obergurtform ist es notwendig analog zur geraden Obergurtform in seitlicher Richtung eine Untergrenze einzuführen.

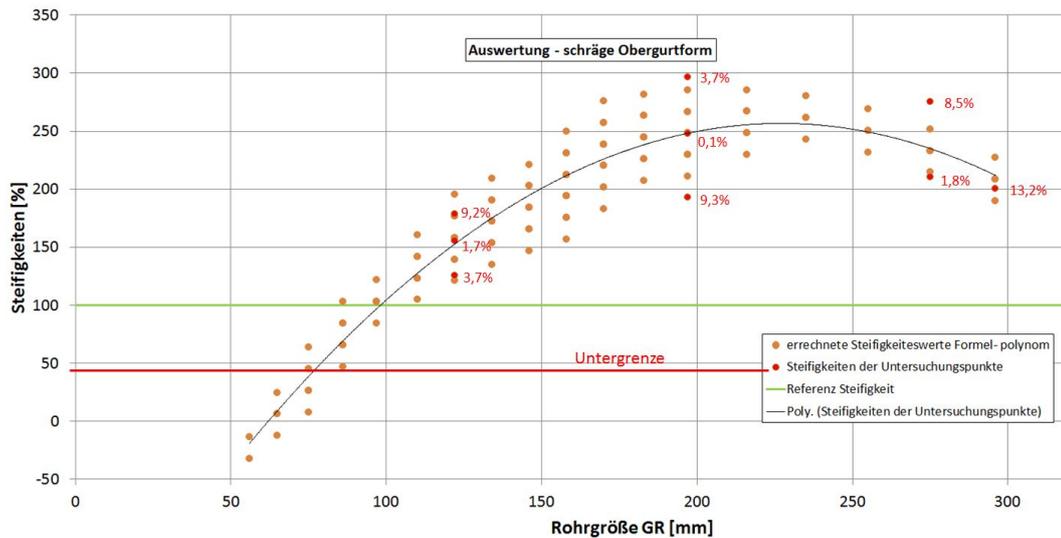


Abbildung 4.4: Ergebnisse des schrägen Obergurtes in Nebenrichtung

In Tabelle 4.4 sind die normierten Konstanten ersichtlich für die schräge Obergurtform in seitlicher Richtung.

Konstanten			
K_1	K_2	K_3	K
-0,007436	3,078	-292,59	-37,16

Tabelle 4.4: Konstanten für schräge Obergurtform in Nebenrichtung

4.3 JIB Form

Die Jib Form ist, wie aus Grafik 3.18 zu entnehmen ist, nur an vier Rechenpunkten (blaue Kreise) durchgeführt worden. In Abbildung 4.5 sind die Ergebnisse der Jib Form in Hauptrichtung als grüne Dreiecke dargestellt und mit der geraden Obergurtform verglichen. Es ist zu erkennen, dass ein Unterschied in Hauptrichtung an den vier Rechenpunkten vorhanden ist. Als erste Näherung könnten die Funktionen der geraden Obergurtform als Berechnung verwendet werden. Eine spezifische Bestimmung der zur Berechnung benötigten Konstanten ist mit nur vier Rechenpunkten nicht möglich, wodurch bei der Jib Form Potential für eine weitere Verfeinerung der Berechnung besteht.

Speziell bei der seitlichen Belastungsrichtung wäre eine detaillierte Untersuchung notwendig, da sich die Steifigkeitswerte wesentlich erhöhen, siehe Abbildung 4.6. Des Weiteren müsste hier die Modellbildung und Auswertung spezifischer auf die Geometrie der Jib Form adaptiert werden. In Abbildung 4.6 ist das zur Auswertung notwendige Balkenmodell ersichtlich. Durch die Geometrieveränderung auf die Jib Form verändert sich auch der seitliche Kraftübertragungspunkt. Folglich steigen die Steifigkeitswerte überproportional an. Die seitlichen Jib Steifigkeiten erhöhen sich im Vergleich zur normalen Rohrform um einen Faktor von 2,2.

Hauptbelastungsrichtung

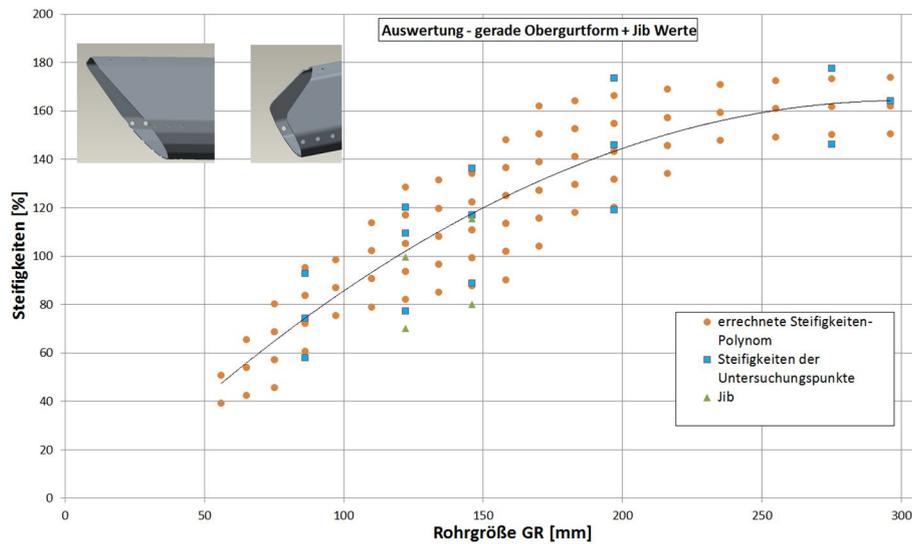


Abbildung 4.5: Ergebnisse des geraden Obergurtes HR und Jib Form

Seitliche Belastungsrichtung

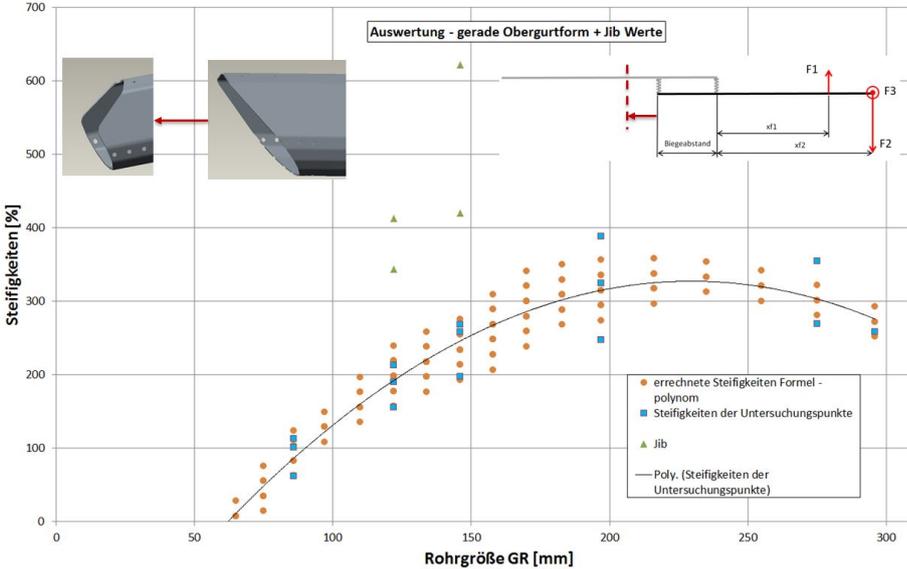


Abbildung 4.6: Ergebnisse des geraden Obergurtes NR und Jib Form

4.4 Vergleich der Ergebnisse

Um die Auswirkung der Steifigkeitsergebnisse auf einen gesamten Kran zu prüfen, wurden in diesem Abschnitt unterschiedliche Vergleiche durchgeführt. Diese Vergleiche wurden an dem neuen Kranmodell PK 165.002 TEC 7 G PJ240 E durchgeführt. Das zugehörige Traglastdiagramm ist in Abbildung 4.7 ersichtlich.

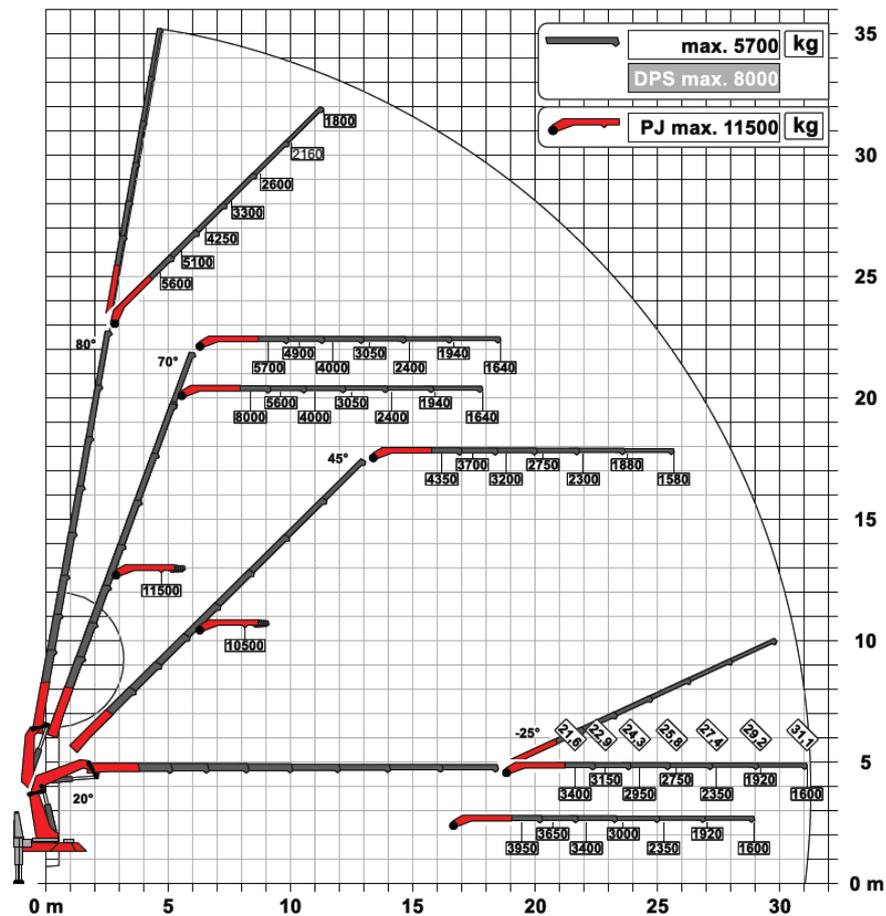


Abbildung 4.7: Traglastdiagramm PK 165.002 TEC 7 G PJ240 E [7]

Anhand folgender drei Kranstellungen wurden die Vergleiche durchgeführt.

- Stellung S0 (Prüflaststellung)
- Stellung S1
- Stellung S2 (Steilstellung)

Die Stellung S0 ist eine Stellung mit maximaler Reichweite. Die Stellung S1 ist eine

im mittleren Bereich des Traglastdiagrammes und die Stellung S0 erreicht nahezu die maximale Hubhöhe.

Prüfstellung S0

Begonnen wurde mit der Prüflaststellung, welche einem Hauptarmwinkel von 20° , einem Knickarmwinkel von 20° und einem Jibwinkel von 0° entspricht. Wie aus dem Traglastdiagramm 4.7 entnommen werden kann, ist der Kran in dieser Position mit eine Last von 1600 kg belastbar. Die seitliche Belastung des Systems wurde laut Norm EN12999 [3] durchgeführt. In Abbildung 4.8 sind mehrere Kranbalkenmodelle in dieser Stellung überlagert dargestellt. Das graue Balkenmodell stellt das unverformte System dar. Ein weiteres System, welches die geringste Durchbiegung aufweist, ist eine Variante mit deaktivierten Kopplungsfedern (Variante starr). Jenes System, welches die größte Verformung aufweist, hat die ursprünglich verwendeten Federkennwerte hinterlegt. Diese ursprünglich verwendeten Federkennwerte sind unabhängig von der Geometrie ermittelt worden. Zusätzlich wurde eine Variante in dieser Stellung mit den in dieser Arbeit spezifisch ermittelten Federkennwerte durchgeführt. Diese Variante ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingezeichnet.

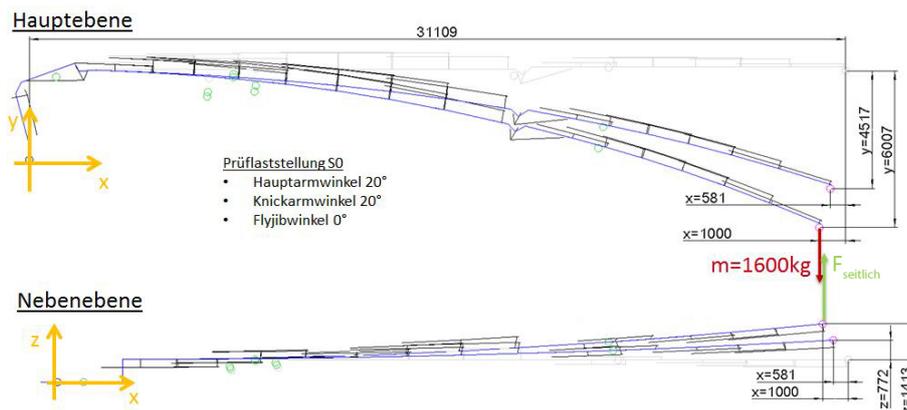


Abbildung 4.8: Prüflaststellung S0

In Tabelle 4.5 sind diese drei Varianten (starr, ursprünglich, spezifisch) verglichen. Es wurde eine Belastungssituation ohne Schwenkbelastung und eine mit Schwenkbelastung errechnet. Die hinterlegten Werte stellen die Verformungen des Lastangriffspunktes

relativ zum unverformten System dar. Im rechten Bereich der Tabelle sind die prozentualen Abweichungen zwischen der Variante mit den spezifischen Federkennwerten und der ursprünglichen Variante ersichtlich. Aus den Ergebnissen des vorgehenden Abschnittes ist bekannt, dass sich speziell die großen Rohrpaarungen wesentlich steifer verhalten. Dies wirkt sich auf die gesamte Durchbiegung des Kranes sehr positiv aus. Der Lastangriffspunkt verformt sich deutlich weniger. Speziell bei einer Belastungssituation mit Schwenkbelastung kann in Nebenrichtung, also in z-Achse, die Verformung um bis zu 25 % reduziert werden.

Stellung	Variante									Abweichung		
	starr [mm]			ursprünglich [mm]			spezifisch [mm]			[%]		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
S0 ohneSchwenken	568	4527	-	961	6031	-	872	5677	-	-9	-6	-
S0 mitSchwenken	581	4517	772	1000	6007	1413	894	5659	1059	-11	-6	-25

Tabelle 4.5: Verformungen der Prüflaststellung S0

Stellung S1

Die Stellung S1 besitzt einen Hauptarmwinkel von 70° , einen Knickarmwinkel von 0° und einen Jibwinkel von 70° . Aus dem Traglastdiagramm 4.7 kann für diese Stellung eine Last von 1640 kg entnommen werden. Es wurde ausschließlich eine Stellung ohne Schwenken untersucht. Dabei wurden wieder die drei bereits beschriebenen Varianten verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleiches sind in Tabelle 4.6 ersichtlich.

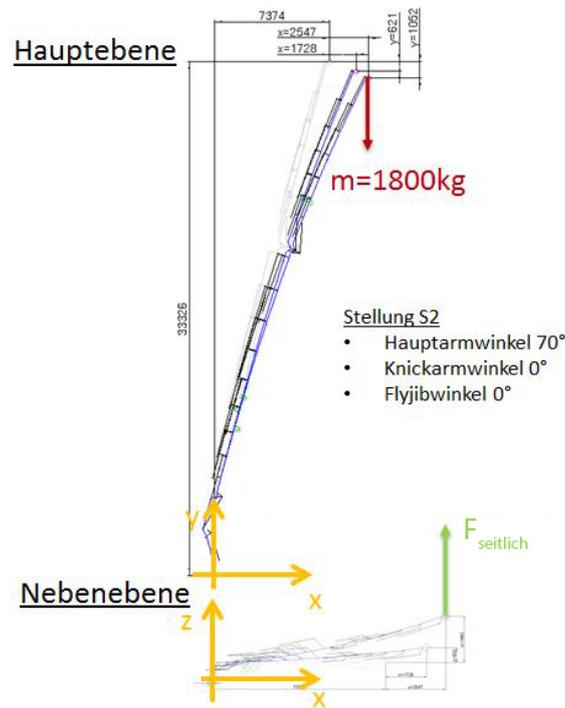


Abbildung 4.10: Stellung S2

Stellung	Variante											
	starr [mm]			ursprünglich [mm]			spezifisch [mm]			Abweichung [%]		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
S1 ohneSchwenken	1722	607	-	2578	966	-	2377	883	-	-8	-9	-
S1 mitSchwenken	1728	621	632	2547	1052	1962	2375	917	1097	-7	-13	-44

Tabelle 4.7: Verformungen der Stellung S2

Wie in den Ergebnistabellen erkennbar ist, ergeben die spezifisch ermittelten Federkennwerte, welche deutlich steifer sind, eine wesentliche Reduktion der Verformungen. Dieses Verhalten deckt sich auch mit diversen Verformungsversuchen. Jedoch ist zu erwähnen, dass die gesamte Verformung eines Kranes aufgrund von Fertigung und Montage sehr breit streut. Rein rechnerisch bringen diese Ergebnisse einen deutlichen Vorteil. Da wie bereits erläutert die Krane nach EN-12999 [3] auszulegen sind. Bei dieser Auslegung ist die Methode der Grenzzustände anzuwenden. Daher ist es ein großer Vorteil die Last und deren Einwirkungspunkt genauer beschreiben zu können.

5

Durchführung

Spannungsuntersuchungen

Der zweite Themenbereich dieser Masterarbeit handelt von der Untersuchung unterschiedlicher Kontaktspannungen der Schubarmrohre. Im Folgenden wird ausgehend von den bereits beschriebenen Ansys-Modellen ein Weg beschrieben, bei dem diese Spannungen mit einem Formelwerk ausgewertet werden.

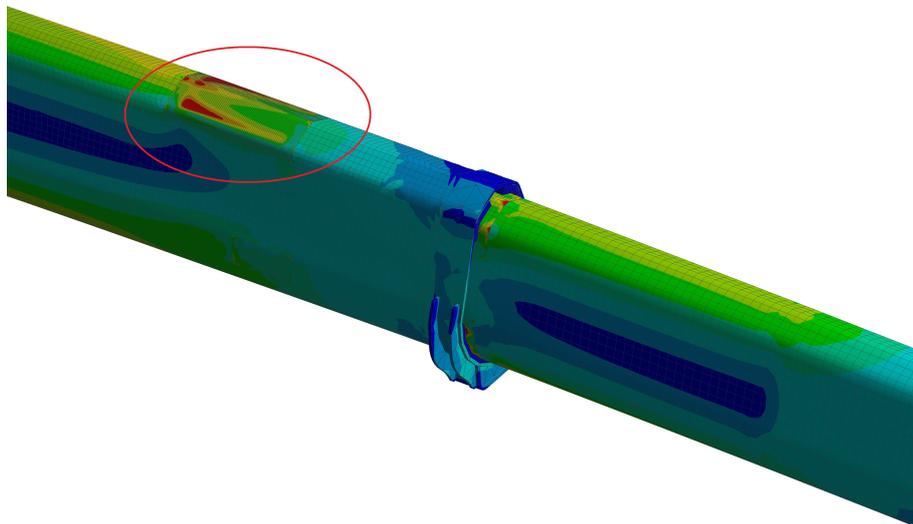


Abbildung 5.1: Spannung im Kontaktbereich

5.1 Analyse der IST-Situation

Ein relevanter Bereich für die Lebensdauer der Schubarmverbindung ist jener Bereich, der in Abbildung 5.1 durch die rote Ellipse hervorgehoben ist. In dieser Position treten lokal sehr hohe Spannungen auf. Diese entstehen durch den Kontaktdruck, resultierend aus der Kraftübertragung von dem kleinen Rohr über die Gleitelemente auf das große Rohr.

Aus mehreren Dauertestversuchen sind Rissbilder dieser Bereiche vorhanden. Es ist bekannt, dass die Risse entweder von der vorderen/hinteren ebenen Rohraußenfläche oder vom inneren Radius ausgehend entstehen. Daher werden genau diese Bereiche detailliert untersucht.

In Abbildung 5.2 sind diese drei Positionen am Außenrohr gekennzeichnet.

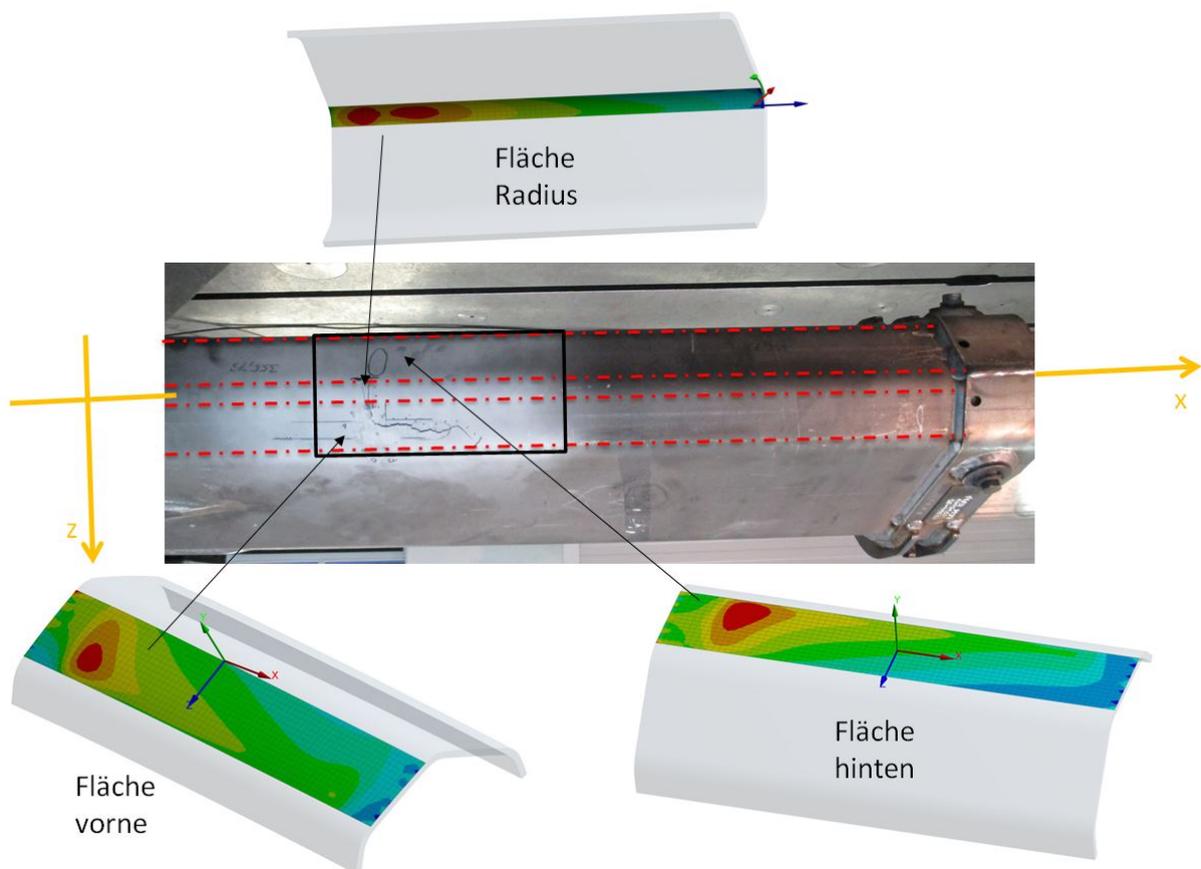


Abbildung 5.2: Hoch belasteter Kontaktbereich

Das gekennzeichnete Rechteck mit den drei hoch belasteten Flächen ist in Abbildung

5.3 vergrößert dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich an der vorderen und der hinteren Fläche Risse bilden. Auch in dem Radiusbereich ist bereits ein langer Riss erkennbar, welcher sich ausgehend von der Rohrrinnenfläche ausbreitet. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass sich die Positionen der Spannungsmaxima der Ansys-Modelle mit den Rissbildungspositionen des Dauertestes decken.

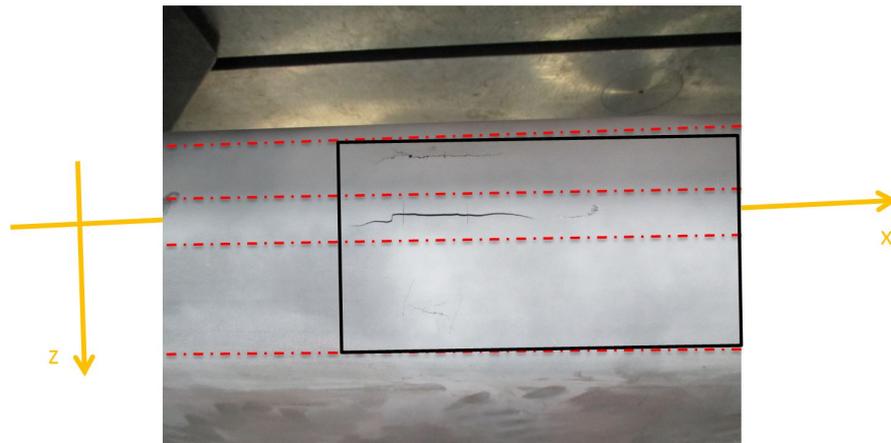


Abbildung 5.3: Rissbild

Ziel ist es, die Kontaktspannungen an den drei Positionen in Abhängigkeit der Einflussgrößen bestimmen zu können.

Ermittlung von Einflussfaktoren

Analog zum ersten Themengebiet wurden auch hier mögliche Einflussgrößen definiert.

- Hintere Auflagekraft = $f_{kt}(\text{Eintauchtiefe, Belastung})$
- Rohrgröße
- Rohrwandstärke
- Vorspannung der Rohre 0 bis $0,5^\circ$
- Gleitpaketstärke \rightarrow gekoppelt mit Vorspannung
- Verhältnis Hauptlast zu Seitenlast
- Spannungen bei unterschiedlicher Auslastung
- Spannungsaufteilung aufgrund von Biegung & lokalen Flächenpressungseffekten

Die Auswirkung dieser Einflussgrößen auf den Spannungszustand wurde mit unterschiedlichen Berechnungen geprüft. Im Abschnitt 5.4 werden diese Analysen detailliert beschrieben.

5.2 Ansys Modellierung

Für die Spannungsauswertung an den Kontaktstellen ist es notwendig, die Modellbildung genau zu prüfen. Dabei wurde spezielles Augenmerk auf die Vernetzung des Kontaktbereiches gelegt und eine Netzunabhaengigkeitsstudie erstellt. Bei dieser Netzunabhaengigkeitsstudie wurde der Kontaktbereich einer exemplarischen Rohrpaarung im mittleren Größenbereich unterschiedlich vernetzt. Die Vernetzung wurde in zwei Koordinatenrichtungen variiert, in Rohrlängsrichtung und über die Blechdicke.

In Abbildung 5.4 ist ein Diagramm ersichtlich, in welchem der maximale Spannungswert der Dachfläche bei unterschiedlicher Vernetzung dargestellt ist.

Die einzelnen Kurven stellen die Elementanzahl von einem bis drei Elementen über die Blechdicke dar. Auch die Elementgröße über die Längsachse des Kontaktbereiches wurde variiert. Dabei wurde das Netz von einer Elementgröße von 50 mm bis zu 3 mm verfeinert. Es ist erkennbar, dass sich durch Verfeinerung der Netzgröße in Rohrlängsrichtung (Abszisse im Diagramm 5.4) eine Veränderung der Spannung ergibt.

Ab einer Netzgröße von ca. 6mm in Längsrichtung ändert sich der maximale Spannungswert bei weiterer Verfeinerung nicht mehr wesentlich, jedoch erhöht sich die Rechenzeit erheblich. Die Elementanzahl über der Blechdicke hat wenig Einfluss auf die Spannungswerte. Dies resultiert aus dem verwendeten Vernetzungselement. Es wurde das Element Solid186 (Abbildung 5.6) verwendet. Dieses Element besitzt bereits eine quadratische Ansatzfunktion. Diese quadratische Ansatzfunktion beschreibt den Spannungsverlauf über die Blechdicke genau genug.

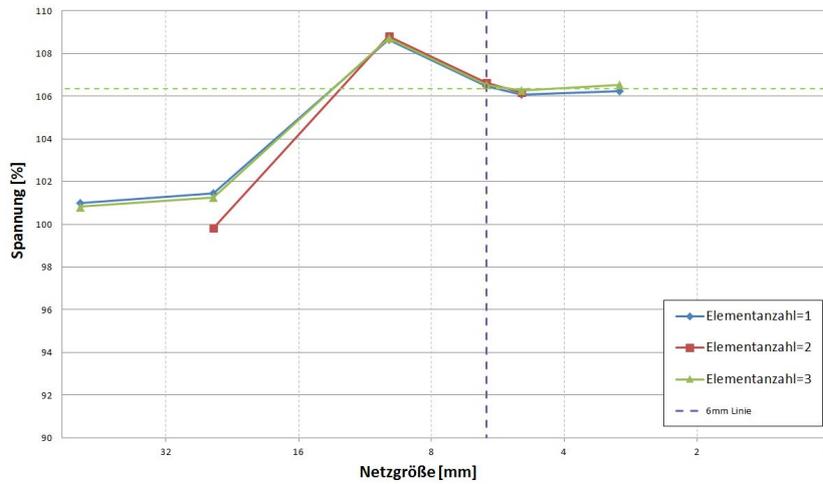


Abbildung 5.4: Netzunabhängigkeitsstudie

In Abbildung 5.5 sind die unterschiedlichen Vernetzungsvarianten dargestellt. Damit die Rechnungen konvergieren, mussten die Elementgrößen des Gleitelementes und des Daches in ähnlicher Größenordnung gehalten werden.

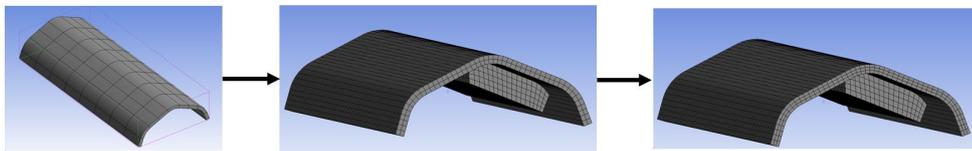


Abbildung 5.5: Netzunabhängigkeitsstudie

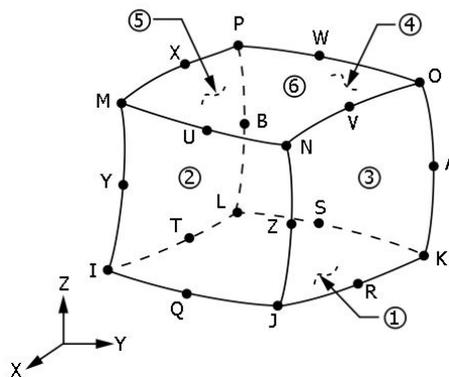


Abbildung 5.6: Solid 186 [1]

5.3 Datenexport und Verarbeitung

Die Spannungsauswertung ist mit der Verarbeitung von großen Datenmengen verbunden. Daher wurde im ersten Schritt eine geeignete Datenverarbeitung entwickelt.

Ein Spannungszustand lässt sich allgemein in unterschiedlichen Formen beschreiben. Es gibt die Möglichkeit der Spannungstensoren, welche alle Spannungsarten eines Punktes in einem Koordinatensystem beschreiben (5.1). Ein solcher Tensor inkludiert in der Hauptdiagonalen alle Normalspannungen. Die Nebendiagonalen sind mit den Schubspannungen belegt. Jeder dieser Einträge hat zwei Indizes. Dabei entspricht der erste Index der Normalenrichtung (Flächennormale der Angriffsfläche) und der zweite Index der Wirkrichtung der Spannung.

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Eine weitere Möglichkeit ist die Beschreibung eines Spannungszustandes mit den drei Hauptspannungsvektoren. Der Spannungstensor in (5.2) beinhaltet in der Hauptdiagonale die drei Hauptspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 . Die Nebendiagonalen sind mit Nullen besetzt. Das bedeutet, dass dieser Vektor im Hauptachsensystem beschrieben ist. Die Hauptnormalspannungsflächen sind schubspannungsfrei (Nullen in den Nebendiagonalen).

Die Lage dieses Hauptachsensystemes (Hauptnormalspannungsflächen) kann durch die Eulerwinkel beschrieben werden.

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Alle beschriebenen Spannungsarten können mit Ansys ausgewertet werden. Dazu muss lediglich auf die auszuwertende Fläche ein lokales Koordinatensystem platziert werden.

Für die durchgeführte Bewertung war es notwendig den gesamten Spannungstensor zur

Verfügung zu haben. Daher mussten alle sechs unterschiedlichen Spannungen, welche den Spannungstensor zusammensetzen, ausgewertet und exportiert werden. Dies ist bei einer Vielzahl an Rohrpaarungen, Geometrievarianten, Lastfällen und jeweils deren drei auszuwertenden Flächen zeitlich nicht möglich. Daher wurden eine geeignete Export- und Auswerte-Möglichkeit gesucht, welche automatisierbar ist. Dieser automatisierte Weg wird im Folgenden beschrieben.

Für die Auswertungen ist es notwendig auf den beschriebenen drei Flächen (Abbildung 5.2) an jedem Knotenpunkt die Spannungswerte zu exportieren. Dazu konnte pro Fläche eine Datei exportiert werden, welche folgende Informationen jedes Knotenpunktes beinhaltet:

- Knotenlage
- Hauptspannungsvektoren
- Eulerwinkel

Die Knotenlage beschreibt die Positionierung jedes Knotens in einem globalen Koordinatensystem. Die Hauptspannungsvektoren beschreiben den Spannungszustand im Hauptachsensystem. Die Lage des Hauptachsensystemes variiert in jedem Knotenpunkt je nach Spannungszustand und kann durch die drei Eulerwinkel relativ zum globalen Koordinatensystem beschrieben werden.

Die beschriebene Vorgehensweise ermöglicht alle Informationen jedes Knotenpunktes einer Fläche gesammelt in einer Datei zu exportieren. Dadurch werden pro Rohrpaarungsvariante drei Dateien exportiert (ebene Fläche vorne, ebene Fläche hinten, Radius Fläche).

Für die folgenden Analysen war es notwendig, die Informationen in einem lokalen Koordinatensystem zur Verfügung zu stellen. Demzufolge muss sowohl die Lage der Knoten als auch der Spannungszustand in ein lokales Koordinatensystem umgerechnet werden.

Transformation der Knotenlage

In Abbildung 5.7 ist die Transformation der Koordinaten visualisiert. Zu Beginn wurden aus den globalen Ansys Koordinaten automatisiert die Punkte P_1 und P_2 aufgestellt. Diese Punkte ermöglichten die Bildung des Vektors V_{12} .

Anschließend wurde mit dem Vektor V_{12} und der Gleichung aus 5.3 der Neigungswinkel φ der auszuwertenden Fläche bestimmt.

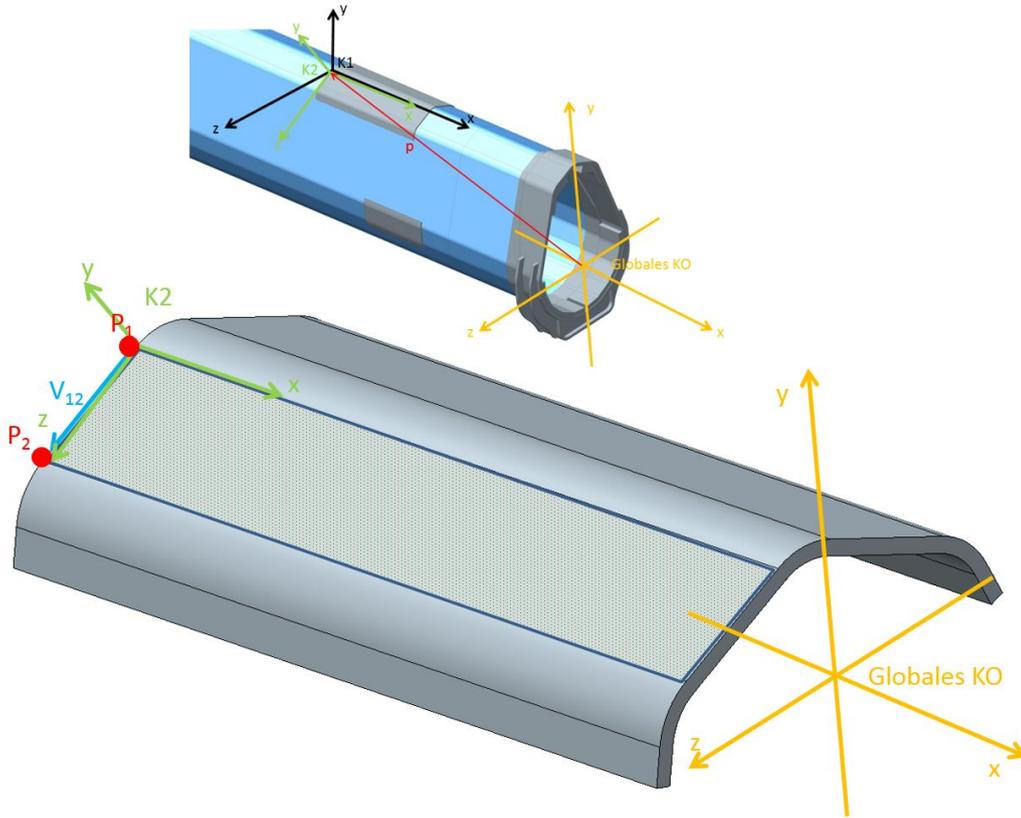


Abbildung 5.7: Koordinatentransformation

$$\varphi = \text{atan}\left(\frac{v_{12y}}{v_{12z}}\right) \quad (5.3)$$

Mit dem Winkel φ kann die Drehmatrix zwischen dem Koordinatensystem K1 und dem Koordinatensystem K2 gebildet werden (5.4).

$${}^{21}\underline{\underline{A}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Da es sich bei der abgebildeten Fläche um eine planare Fläche handelt, ist der Winkel für alle Knotenpunkte auf dieser Fläche gleich. Die globalen Koordinaten wurden zuerst in ein lokales Koordinatensystem K1 mit dem roten Vektor P verschoben

und anschließend mit der Drehmatrix die Drehung in das Koordinatensystem K2 durchgeführt.

Transformation der Spannungsmatrix

In Abbildung 5.9 ist ein Cauchy Tetraeder dargestellt. Die Ebenen dieses Koordinatensystemes stellen die Hauptnormalspannungsflächen mit den zugehörigen Hauptspannungen dar. Ziel ist diese Hauptspannungen auf eine beliebig gedrehte Ebene umzurechnen. Diese Umrechnung kann mithilfe der Spannungstransformationsformel (5.5) durchgeführt werden. Dabei ist $\underline{\underline{A}}$ die Drehmatrize, welche die Orientierung der gedrehten Ebene relativ zum nichtgedrehten Koordinatensystem beschreibt. Der Tensor $\underline{\underline{S}}$ beschreibt den Spannungszustand im Hauptachsensystem und der Tensor $\underline{\underline{S'}}$ den Spannungszustand im verdrehten Koordinatensystem.

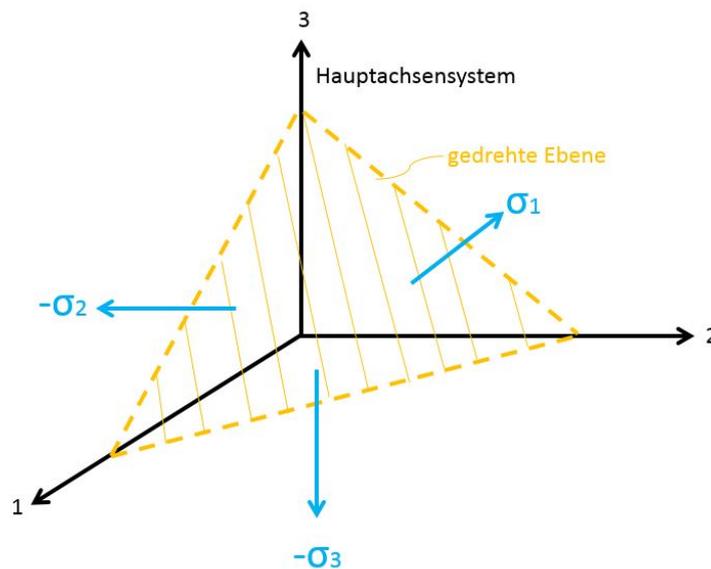


Abbildung 5.8: Cauchy Tetraeder

$$\underline{\underline{S'}} = \underline{\underline{A}} \cdot \underline{\underline{S}} \cdot \underline{\underline{A}}^T \quad (5.5)$$

In Abbildung 5.9 ist der Dachbereich mit der auszuwertenden ebenen vorderen Fläche und den unterschiedlichen Koordinatensystemen ersichtlich. Auf dieser Fläche sind von jedem Knotenpunkt die Hauptspannungsvektoren vorhanden. Ebenso wurden von jedem Knotenpunkt die Euler-Winkel aus Ansys exportiert. Diese Euler Winkel

beschreiben die Lage des Hauptachsensystems (1, 2, 3) relativ zum globalem Koordinatensystem.

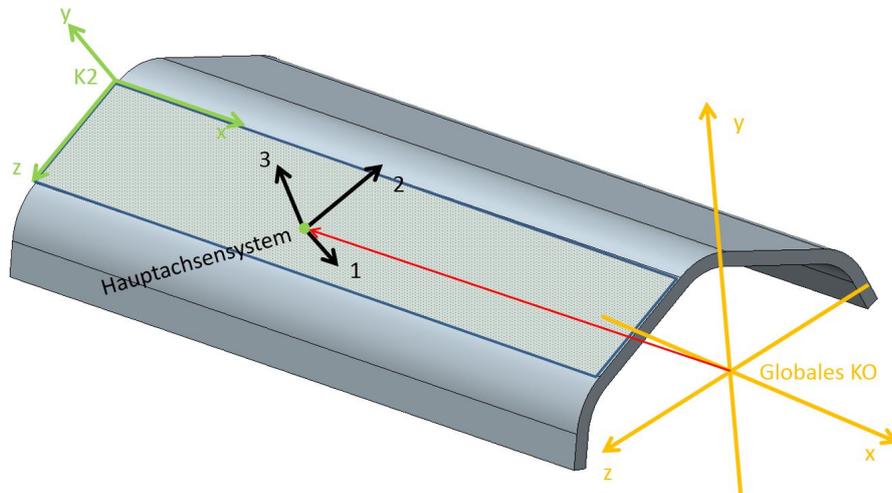


Abbildung 5.9: Spannungstransformation ebene Fläche

Mithilfe dieser Winkel kann die Drehmatrix A errechnet werden, welche die Gesamtdrehung zwischen dem globalen und dem lokalen Koordinatensystem beschreibt. In Ansys handelt es sich dabei um eine Drehung um die z -Achse (Matrix $\underline{\underline{A_1}}$). Anschließend erfolgt eine Drehung um die neue x' -Achse (Matrix $\underline{\underline{A_2}}$) und zum Schluss um eine Rotation um die neue y'' -Achse (Matrix $\underline{\underline{A_3}}$). Diese Einzeldrehungen ergeben die Gesamtdrehung vom Hauptachsensystem zum globalen Koordinatensystem (5.9).

$$\underline{\underline{A_1}} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$\underline{\underline{A_2}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ 0 & \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$\underline{\underline{A_3}} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & 0 & \sin(\gamma) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\gamma) & 0 & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$\underline{\underline{A}} = \underline{\underline{A}}_1 \cdot \underline{\underline{A}}_2 \cdot \underline{\underline{A}}_3 \quad (5.9)$$

Mit Anwendung der Spannungstransformationsformel (5.5) und der Drehmatrix (5.9) kann der Spannungstensor vom Hauptachsensystem in das globale Koordinatensystem transformiert werden. In analoger Art wird anschließend der erhaltene Spannungstensor durch nochmaliges Anwenden der Spannungstransformationsformel und der Drehmatrix ${}^{21}\underline{\underline{A}}$ in das lokale Koordinatensystem K2 transformiert.

Dadurch erhält man einen Spannungstensor im lokalen Koordinatensystem K2, welcher dem Typ von (5.1) entspricht. Dieser beinhaltet alle Spannungsarten des jeweiligen Knotenpunktes.

In analoger Art und Weise wird das vorgestellte Verfahren auf die hintere ebene Fläche angewendet. Dabei werden lediglich die Punkte P_1 und P_2 auf der hintere Fläche definiert (siehe Abbildung 5.7).

Um dieses Verfahren auch für die Radiusfläche anwenden zu können, waren einige Adaptionen notwendig. In Abbildung 5.10 ist der Kreisbogen der Radiusfläche dargestellt.

Zu Beginn wurden die Positionen der einzelnen Knotenpunkte auf dieser Radiusfläche in einem Zylinderkoordinatensystem beschrieben. Dieses Zylinderkoordinatensystem liegt im Zentrum des dargestellten Kreisbogens. Die Lage des Zentrum konnte mit den Punkten P_1 , P_2 und P_3 automatisiert errechnet werden. Es soll in jedem dieser Knotenpunkte ein neues lokales Koordiantensystem aufgestellt werden, welches die Zylinderoberfläche mit der z-Achse tangiert (dunkelgrüne Koordinatensystem K3). Dieses lokale Koordinatensystem konnte mit dem Winkel φ bestimmt werden.

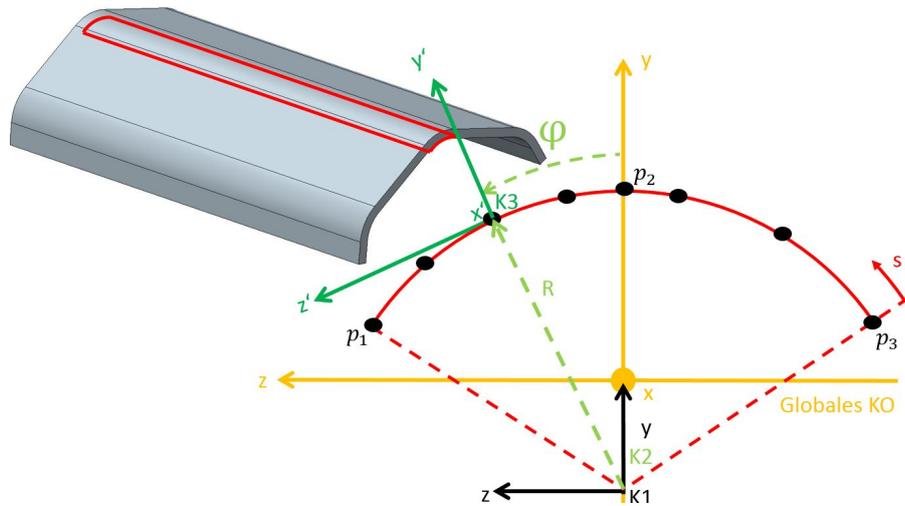


Abbildung 5.10: Spannungstransformation Radiusfläche

Nach dem Umrechnen der Knotenpunktpositionen in das lokale Koordinatensystem, konnte auch der Spannungstensor umgerechnet werden. Dazu wurde der Spannungstensor jedes Knotens im ersten Schritt, in analoger Art und Weise wie bei der ebenen Fläche, vom Hauptachsensystem in das globale Koordinatensystem transformiert. Im zweiten Schritt wurde der so erhaltene Tensor mit dem Winkel φ in das tangierende Koordinatensystem K3 des jeweiligen Knotenpunktes umgerechnet.

Die beschriebene Vorgehensweise wurde anschließend in Matlab implementiert. Es wurde eine Ausgabe implementiert, welche pro Rechenvariante eine Datei erstellt. Diese Datei inkludiert die Spannungsergebnisse aller Knotenpunkte der drei Flächen in dem jeweiligen lokalen Koordinatensystem. An den Flächenbereichen wurden aus den errechneten Spannungsarten jeweils die Maxima bestimmt. Weiters wurde das erstellte Programm mit einer grafischen Ausgabe ausgestattet, welche den gesamten Spannungszustand der drei Kontaktflächen darstellt, siehe Abbildung 5.11.

Diese ersten neun Felder entsprechen den Werten des Spannungstensors. Das Feld links unten entspricht der ersten Hauptnormalspannung. Das Feld in der mittleren Spalte der letzten Zeile entspricht der Vergleichsspannung nach Mises.

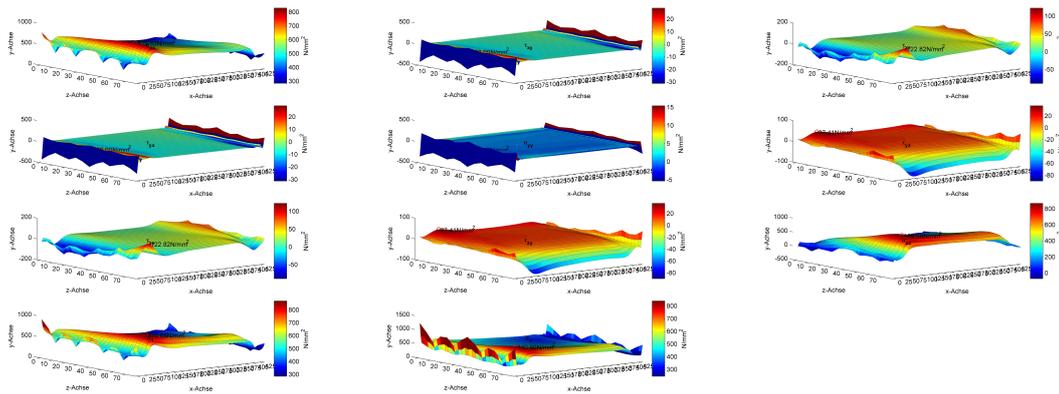


Abbildung 5.11: Spannungen 3D

Wie in der Darstellung 5.11 erkennbar ist, gibt es am Randbereich der jeweiligen Flächen numerische Probleme. Diese Abbildung ist im Anhang unter C.4 vergrößert dargestellt. Diese Probleme sind auf den Übergang von Volumenmodellen auf die Flächenmodelle zurück zu führen. Die Spannungsmaxima wurden deshalb lediglich in einem eingeschränkten Bereich ermittelt. Bei diesem eingeschränkten Bereich wurden die Randzonen, welche numerische Probleme bereiten, von der Auswertung ausgenommen. Auch die Skalierung der Farbflächen wurde ohne die Spannungswerte der Problemzonen durchgeführt. Die Abbildung 5.12 ist im Anhang C.5 vergrößert dargestellt.

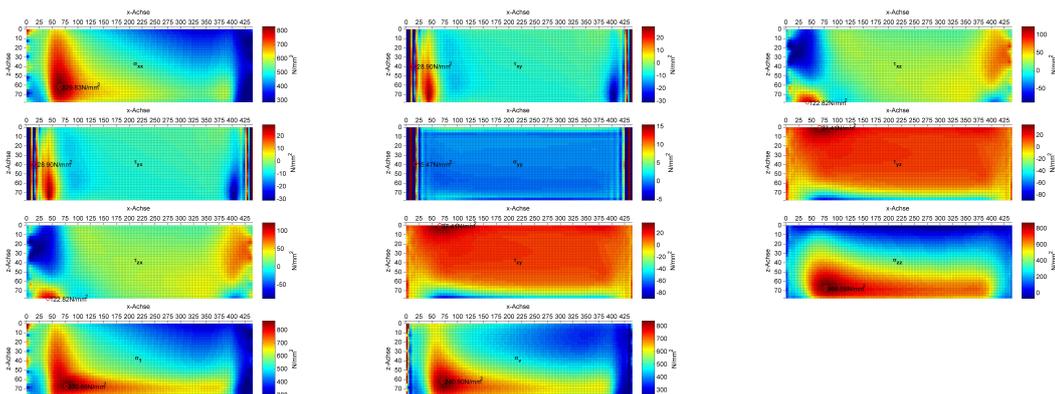


Abbildung 5.12: Spannungen 2D

Die Auswerterroutine wurde auf das gesamte Rohrpaarungsfeld angewendet. Für jede auszuwertende Fläche wurde das Ergebnis als Farbfeld visualisiert und anschließend als Bilddatei exportiert. So konnten die Spannungen schnell und einfach bewertet und die Lage der Spannungsmaxima auf Plausibilität geprüft werden.

5.4 Analyse der Spannungen

In Abbildung 5.13 sind alle untersuchten Rohrpaarungen mit grünen Punkten gekennzeichnet.

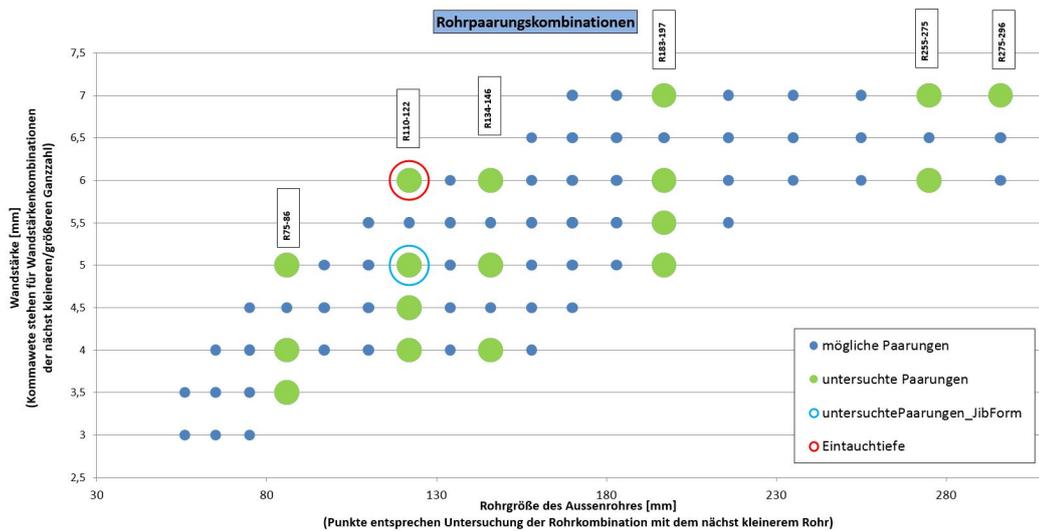


Abbildung 5.13: Untersuchungspunkte Spannung

An jedem dieser grünen Punkte sind sieben unterschiedliche Lastfälle berechnet und mit der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Methode ausgewertet worden. An der Rohrpaarung R110-122 wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Obergurtformen und unterschiedlicher Rohrendformen (Kran, Jib) untersucht. In Tabelle 5.1 sind die Auswirkungen der unterschiedlichen Einflussgrößen aufgelistet.

Einflussgrößen	Einfluss	Status
Obergurtform	kaum vorhanden	nicht untersucht
Rohrendform (Kran, Jib)	vorhanden	nicht untersucht
Eintauchtiefe	kaum vorhanden	nicht untersucht
Rohrwandstärke	vorhanden	untersucht
Rohrgröße	vorhanden	untersucht
Spannungsaufteilung	vorhanden	untersucht
Verhältnis HL zu SL	vorhanden	untersucht

Tabelle 5.1: Untersuchungsstatus

Die Größe Obergurt und auch die Eintauchtiefe haben keinen direkten Einfluss auf die Spannungen und sind daher nicht weiter untersucht worden. Die Rohrendform hat

deutlichen Einfluss auf die Spannungen. Aus zeitlichen Gründen wurde beschlossen, lediglich die Kranform detailliert zu untersuchen. Alle weiteren untersuchten Größen werden im Folgenden detailliert beschrieben.

5.4.1 Spannungsverlauf über Belastung

Die Spannungswerte an den drei Positionen (Abb. 5.2) resultieren zum einen aus der Hauptbiegung der Rohre selbst und zum anderen aus den lokalen Spannungen, welche aufgrund der Kontaktbereiche auftreten. Die erste Auswertung wurde bei einer Rohrpaarung an der ebenen vorderen Fläche durchgeführt. In Abbildung 5.14 sind die unterschiedlichen Spannungsarten dieser Fläche über die Kontaktkraft dargestellt. Bei dieser Auswertung wurde das System ausschließlich in Hauptlastrichtung belastet. Die Last wurde schrittweise von 10% bis 250% Belastung des kleinen Rohres gesteigert. In Tabelle 5.2 sind die einzelnen Lastschritte zu entnehmen.

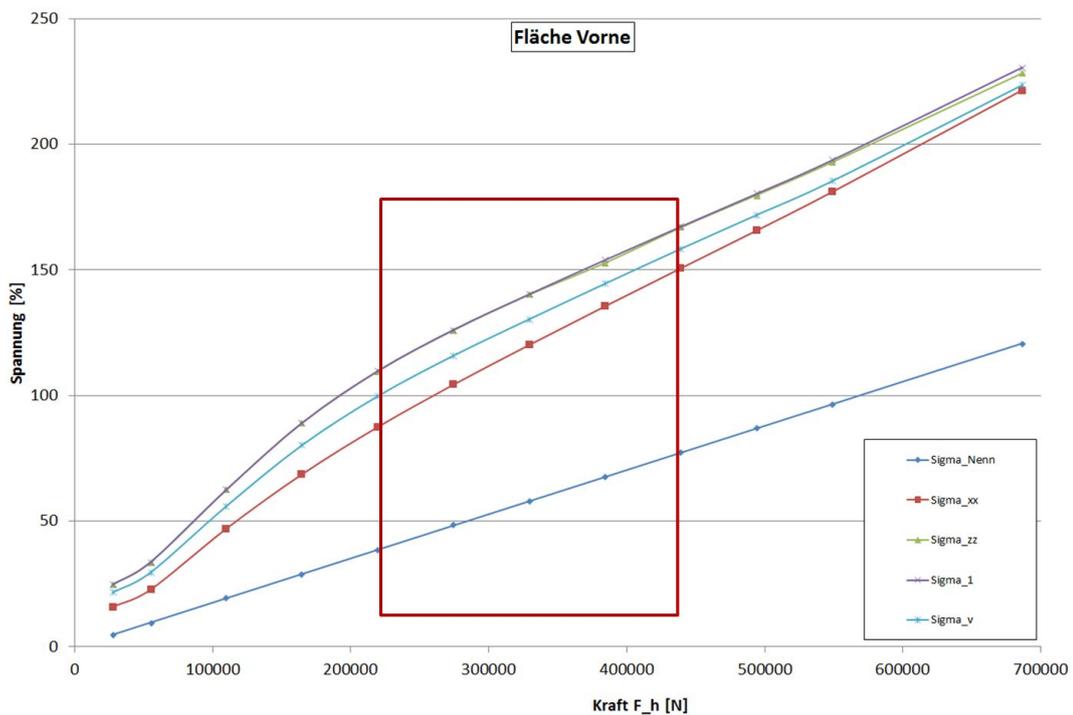


Abbildung 5.14: Spannungsauswertung über großen Lastbereich

Lastfall	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
HL[%]	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	250
SL[%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 5.2: Lastfälle - erweiterter Lastbereich

In Abbildung 5.14 kann man einen nichtlinearen Verlauf der aus dem Ansys-Modell ermittelten Spannungen über die Belastung erkennen. Diese Kurven stellen die maximalen Spannungswerte auf der Kontaktfläche dar. Die rote Kurve kennzeichnet die Normalspannung in x-Richtung σ_{xx} . Diese Normalspannung wird bei Palfinger als Längsspannung bezeichnet. Die türkise Kurve entspricht der Vergleichsspannung von Mises. Die höchste Spannung ist die erste Hauptnormalspannung σ_1 . Die Normalspannung in z-Richtung σ_{zz} ist nahezu ident zur ersten Hauptnormalspannung. Da die z-Richtung quer zur Rohrlängsachse liegt, wird diese Normalspannung σ_{zz} bei Palfinger als Querspannung bezeichnet.

Es wurde eine weitere Spannung aus einem einfachem Balkenmodell ermittelt, welche ausschließlich die Hauptbiegung beschreibt. Diese Nennspannung (Hauptbiegespannung) wurde auf der vorderen Fläche im Berechnungspunkt B (siehe Abbildung 5.15) ermittelt und ist in Abbildung 5.14 als blaue Gerade dargestellt.

Mit einem rotem Rechteck sind jene Lastbereiche gekennzeichnet, welche für die folgenden Untersuchungen von Interesse sind. Es ist zu erkennen, dass sich dieser Bereich nahezu linear verhält.

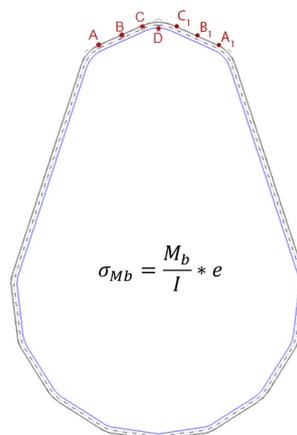


Abbildung 5.15: Berechnungspunkte

In Abbildung 5.15 ist der Querschnitt eines Rohres mit mehreren gekennzeichneten Rechenpunkten zu sehen. Die Ansys Spannungen wurden mit analytisch gerechneten Nennspannungen an diesen Rechenpunkten verglichen.

An einer weiteren Rohrpaarung wurden Lastfälle mit seitlicher Belastung untersucht. Die aufgebrauchte Belastung des jeweiligen Lastschrittes ist in Tabelle 5.3 dargestellt.

Lastfall	2	3	4	5	6	7
HL [%]	50	75	100	100	100	125
SL [%]	0	0	0	50	100	125

Tabelle 5.3: Lastfälle - Untersuchungsbereich

Die Abbildung 5.16 stellt die Ergebnisse der hinteren Dachfläche dar. Die Lastfälle zwei bis vier sind ohne seitlicher Belastung. Ab dem Lastfall fünf wird eine seitliche Last aufgebracht. In Abbildung 5.16 ist ersichtlich, dass dadurch ein Spannungssprung entsteht.

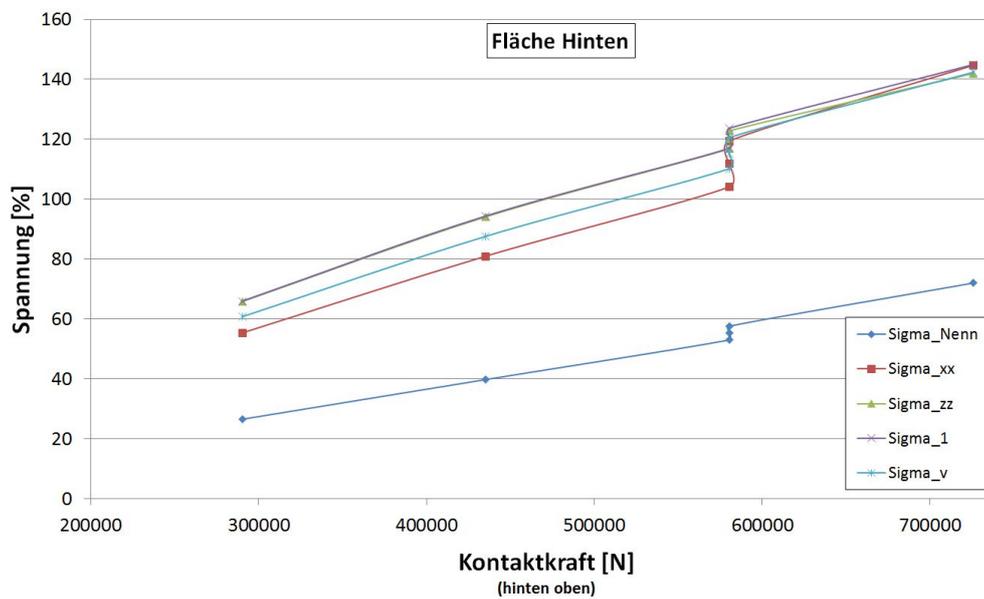


Abbildung 5.16: Spannungsauswertung Fläche hinten

Für den Spannungszustand der ebenen Fläche ist die Normalspannung σ_{zz} bei dünnen Wandstärken die bestimmende Spannung (höchste Spannung), siehe Abbildung 5.16. Die ebenen Flächen des Daches sind durch Fertigung nicht vorbelastet, was bedeutet, dass das Material in alle Richtung gleich belastbar ist. Deshalb wird vermutet, dass

der höchste Spannungswert jener ist, welcher die Rissbildung verursacht. Die Normalspannung σ_{zz} ist auf den ebenen Flächen nahezu ident mit der ersten Hauptnormalspannung σ_1 .

Bei einer Rohrpaarung mit großer Wandstärke (5-6mm) ist die Spannung σ_{xx} die höchste auf der ebenen Fläche. In diesem Fall ist die Spannung σ_{xx} nahezu ident zur ersten Hauptnormalspannung σ_1 .

In den folgenden Untersuchungen soll daher ein Zusammenhang zwischen der ersten Hauptnormalspannung und den Einflussgrößen über das gesamte Parameterfeld gefunden werden.

In Abbildung 5.17 sind die ausgewerteten Spannungsarten der Radiusfläche dargestellt. Diese Daten wurden mit der bereits beschriebenen Umrechnung (siehe Abschnitt 5.3) aus den Hauptspannungsvektoren, welche aus Ansys exportiert wurden, ermittelt. In Abbildung 5.17 ist ersichtlich, dass in diesem Bereich der Spannungszustand durch die Normalspannung in x-Richtung σ_{xx} bestimmt wird. Diese Normalspannung wird bei Palfinger als Längsspannung bezeichnet. Durch die Umformung der Bleche bei der Fertigung, wird das Material in bestimmten Koordinatenrichtungen vorgeschädigt. Dadurch kann der Fall eintreten, dass eine niedrige Spannungsschwingbreite eines Spannungstyps, welche in bereits vorgeschädigte Richtungen wirkt, den Anriss verursacht. Die orange Gerade stellt analog zur ebenen Fläche die Nennspannungen im Berechnungspunkt D dar.

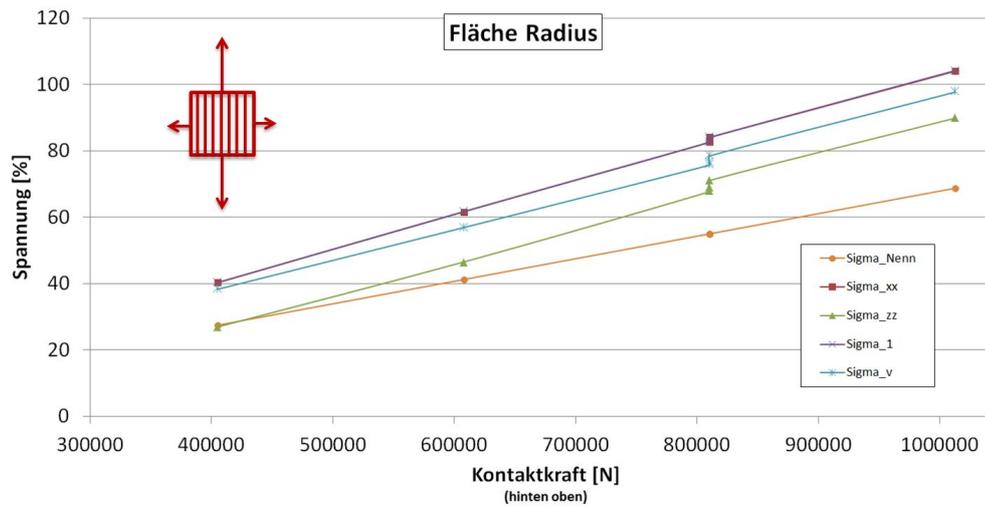


Abbildung 5.17: Spannungsauswertung Fläche Radius

Aus Dauertestversuchen ist bekannt, dass die Risse der Radiusfläche häufig längs der Rohrachse entstehen, siehe Abbildung 5.3. Diese Rissbildung, ist auf die Normalspannungen in z-Richtung σ_{zz} zurückzuführen. Da die z-Richtung quer zur Rohrlängsachse liegt, wird diese Normalspannung bei Palfinger als Querspannung bezeichnet.

Aus dem beschriebenen Spannungszustand und der Rissbildung geht hervor, dass für die Radiusfläche keine eindeutig rissbildende Spannungsart definiert werden kann. Deshalb ist es notwendig, sowohl die Spannung $\sigma_1 \cong \sigma_{xx}$ als auch σ_{zz} über des gesamte Parameterfeld auszuwerten.

Parallel zu dieser Masterarbeit werden unterschiedliche Materialtests durchgeführt. Diese sollen Aufschluss über die von unterschiedlichen Spannungen verursachten Schädigung geben. Durch die Fertigung der Rohre wird der Werkstoff bereits sehr hohen Umformkräften ausgesetzt und ist somit in bestimmte Richtungen vorgeschädigt. Auch aufgrund der spezifischen Geometrie ist nicht bekannt welche Belastungsrichtung – Spannungsrichtung das Versagen der Bauteile bestimmt.

In Zukunft soll durch diese Auswertungen eine Aussage über Lebensdauer möglich sein. In Abbildung 5.18 ist ein Flussdiagramm der Analyse dargestellt. Aus den Materialtests werden geometriespezifische und werkstoffspezifische Wöhlerkurven ermittelt.

Aus den durchzuführenden Spannungsauswertungen wird ein funktioneller Zusammenhang abgeleitet, welcher die Bestimmung der Spannungen in Abhängigkeit der Einflussgrößen erlaubt. Dieser Zusammenhang ist für unterschiedliche Lastfälle anwendbar. Somit kann eine Spannungsschwingbreite des Kontaktbereichs ermittelt werden. Mit den generierten Wöhlerkurven und der Spannungsschwingbreite ist in einem weiteren Schritt eine Aussage über die ertragbaren Lastwechsel und damit der Lebensdauer möglich.

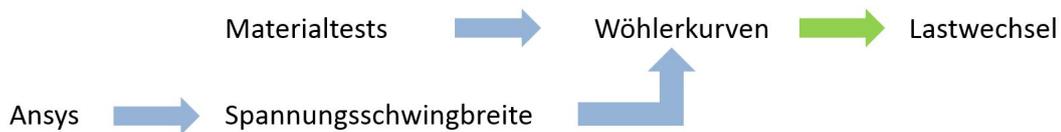


Abbildung 5.18: Flussdiagramm der Analyse

5.4.2 Zusammensetzung der Spannung

Wie man in der Abbildung 5.14 erkennt, sind die Spannungen der Ansysrechnung deutlich höher als die analytisch berechnete Nennspannung. Dies liegt daran, dass in der berechneten Nennspannung keine Einflüsse des Kontaktes berücksichtigt sind. In diesem Abschnitt soll ein Weg gefunden werden den Unterschied zwischen den Nennspannungen und den Ansys Gesamtspannungen zu beschreiben.

Wie in Kapitel 2 ausgeführt ist, ist dem Rechenprogramm Indus ein Balkenmodell des Kranes hinterlegt. Dieses Balkenmodell ist exemplarisch nochmals in Abbildung 5.19 ersichtlich. Aus dem Balkenmodell können Schnittkräfte F_s , F_t und Schnittmomente M_{ss} , M_{tt} an den jeweiligen Knotenpunkten ausgewertet werden.

Im unteren Bereich der Abbildung 5.19 ist eine mögliche Vorgehensweise dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass sich die Spannung $\sigma_{gesAnsys}$ aus zwei Komponenten zusammensetzt.

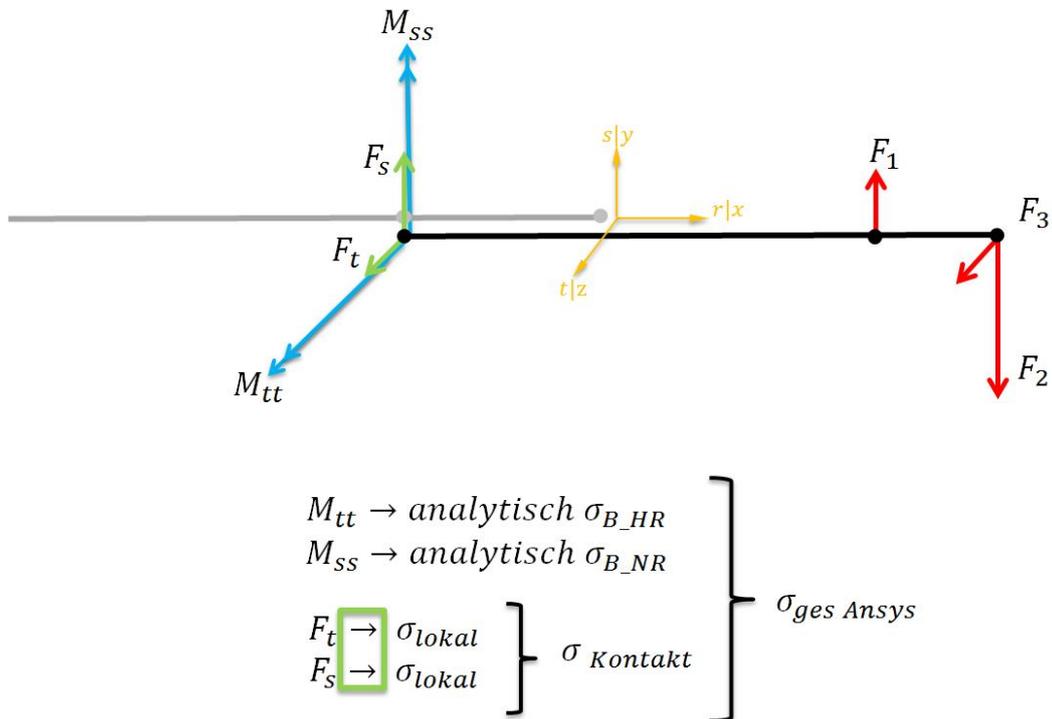


Abbildung 5.19: Spannungszusammensetzung

Die erste Komponente ist die Hauptbiegespannung (Nennspannungen) σ_B . Diese Nennspannungen lassen sich sowohl in Hauptbelastungsrichtung (5.10) als auch in seitlicher Belastungsrichtung (5.11) berechnen. Die für die Berechnung benötigten Schnittmomente können aus dem im Berechnungsprogramm Indus hinterlegten Balkenmodell entnommen werden.

$$\sigma_{B_{HR}} = \frac{M_{tt}}{I_{tt}} \cdot e_s \quad (5.10)$$

$$\sigma_{B_{NR}} = \frac{M_{ss}}{I_{ss}} \cdot e_t \quad (5.11)$$

Die zweite Komponente ist eine Spannung, welche aufgrund des lokalen Kontaktes auftritt. Der Betrag dieser lokalen Spannungsüberhöhung $\sigma_{Kontakt}$ kann aus der Differenz der Gesamtspannung $\sigma_{ges\ Ansys}$ und der Nennspannung $\sigma_{B_{ges}}$ gebildet werden. Mit der beschriebenen Vorgehensweise kann die Höhe der lokalen Spannungsüberhöhung ausgewertet werden.

Ziel ist es einen funktionellen Zusammenhang zwischen den Schnittkräften F_s/F_t und der Spannung σ_{lokal} (σ_{Kontakt}) aufzustellen. Dieser Zusammenhang soll eine Möglichkeit bieten die Spannungsüberhöhung in Abhängigkeit aller Einflussgrößen über das gesamte Rohrgrößenfeld zu ermitteln.

Durch diese Methode soll die Ermittlung und Bewertung der Gesamtspannung der Kontaktzone bereits in frühen Auslegungsphasen mit wenig Aufwand möglich sein.

5.5 Analyse des gesamten Parameterfeldes

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Überlegungen werden nun auf alle Rohrgrößen und Rohrwandstärkenkombinationen angewendet. Exemplarisch wird nachstehend die Auswertung an einer Rohrgröße erläutert. Dabei wird sowohl auf die ebene hintere Fläche als auch auf die Radiusfläche detailliert eingegangen.

5.5.1 Auswertungsposition - Ebene Fläche

In der ebenen Fläche setzt sich die Spannung σ_1 aus den in (5.12) beschriebenen Termen zusammen. Die Terme $\sigma_{B_{HR}}$ und $\sigma_{B_{NR}}$ entsprechen den Nennspannungen in Haupt- und Nebenrichtung. Diese Nennspannungen können mit den Zusammenhängen (5.10) und (5.11) für jedes Rohr mit deren spezifischer Belastung und Geometrie bestimmt werden. Auf die Spannungsüberhöhungen in Hauptrichtung Δ_{HR} und Nebenrichtung Δ_{NR} wird im Folgenden genau eingegangen.

$$\sigma_1 = \sigma_{B_{HR}} + \Delta_{HR} + \sigma_{B_{NR}} + \Delta_{NR} \quad (5.12)$$

Spannungsüberhöhung Hauptrichtung Δ_{HR}

In Abbildung 5.20 sind die Spannungskurven für eine Rohrpaarung mehrerer Wandstärken über die Kontaktkraft aufgetragen. Die strichpunktierten Linien stellen die Werte σ_1 aus den Ansys Modellen dar. Die durchgezogenen Linien sind die analytisch berechneten Nennspannungen. Wenn man die Ansys Spannungswerte

vergleicht, kann man eine deutliche Spannungsreduktion bei Erhöhen der Wandstärke von 5 mm auf 7 mm feststellen (blaue Kurve \rightarrow rote Kurve \rightarrow grüne Kurve). Die mögliche Belastung steigt mit der Wandstärke an, folglich erhöht sich die Kontaktkraft. Die gelbe und die lila Kurve sind Kurven von Rohrpaarungen mit einem Wandstärkenunterschied. Das innere Rohr hat einen untergeordneten Einfluss auf die Spannung. Die mögliche Belastung (Kontaktkraft) wird von der Auslastbarkeit des inneren Rohres bestimmt. Die Unterschiede der strich-punktierten Kurven und der durchgezogenen Kurven stellt die Spannungsüberhöhungen Δ_{HR} dar. In Abbildung 5.21 ist diese Differenz Δ_{HR} über die Kontaktkraft dargestellt.

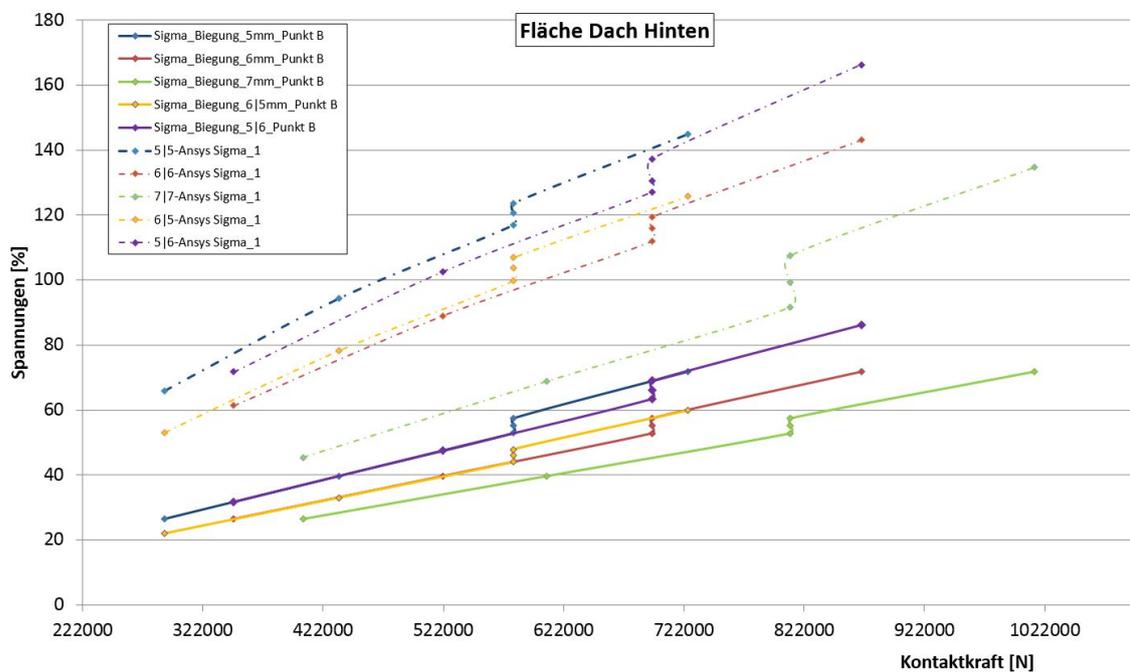


Abbildung 5.20: Nennspannung - Ansys Spannung

Diese Delta-Werte werden nun mit einem formellen Zusammenhang beschrieben. Dazu wurde eine Umrechnung auf eine Zwischengröße ψ angewendet. Infolgedessen konnten die Delta Kurven auf eine Art und Weise skaliert werden, dass sich die Kurven nahezu überlagern.

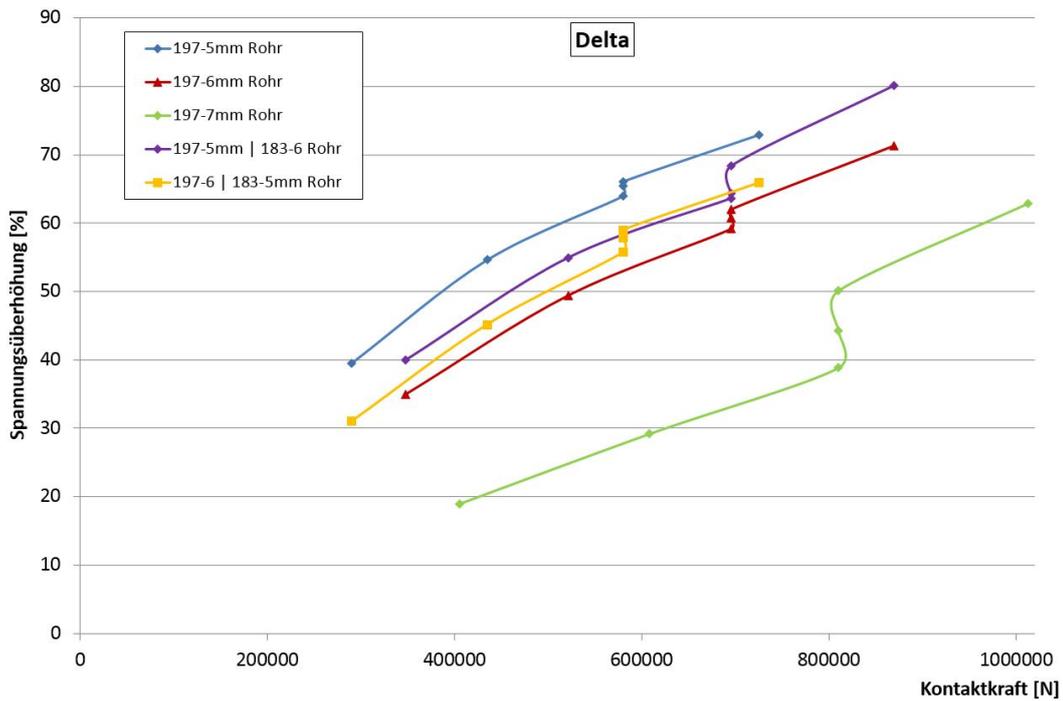


Abbildung 5.21: Delta

Mit (5.13) wurde diese Skalierung durchgeführt. Dabei ist die Spannungsüberhöhungen jeder Rohrwandstärke mit zwei Termen skaliert worden. Der erste Term bildet sich aus einer Konstante k_1 und der Wandstärke des großen Rohres w_{GR} . Der zweite Term lässt sich mit einer Konstante k_2 und der Wandstärke des kleinen Rohres bilden. Die Konstanten wurden mittels eines Solvers iteriert, sodass der Unterschied der Werte gering ist. Das bedeutet, dass die Kurven eine bestmögliche gemeinsame Regressionskurve aufweisen. Wie man in Abbildung 5.22 erkennen kann, ermöglicht diese Umrechnung eine wandstärkenunabhängige Darstellung der Spannungsüberhöhung.

$$\psi = \Delta_{HR} + k_1 \cdot w_{GR} + k_2 \cdot w_{KR} \quad (5.13)$$

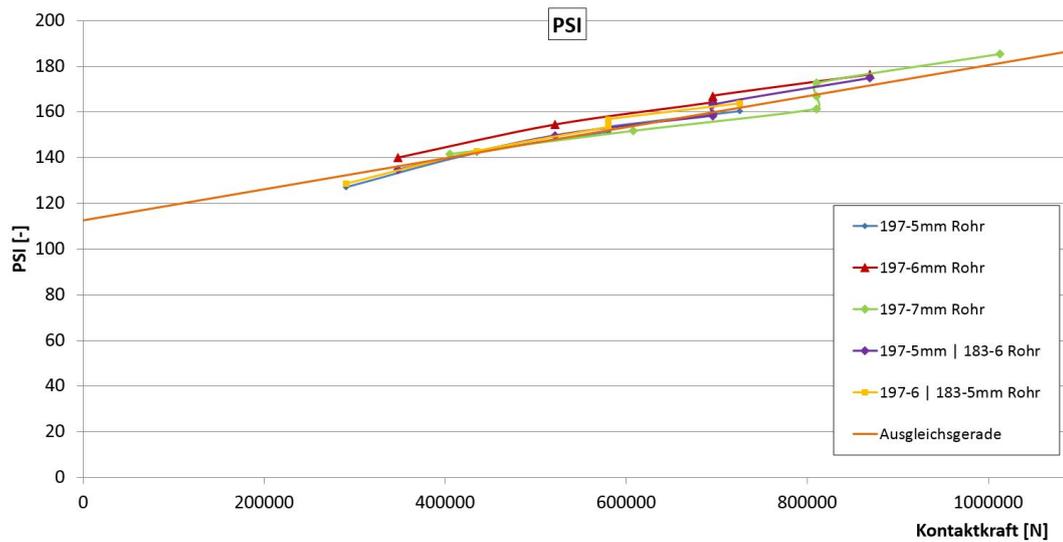


Abbildung 5.22: Psi

Dadurch konnte diese Kurvenschar mit einer Geraden genähert werden, siehe (5.14). Diese Gerade ist mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gebildet, siehe A.1.

$$\psi = k \cdot F_s + D \quad (5.14)$$

Aus den Gleichungen 5.13 und 5.14 konnte die gesuchte Größe Δ_{HR} explizit dargestellt und ermittelt werden, siehe (5.15).

$$\Delta_{HR} = \psi - k_1 \cdot w_{GR} - k_2 \cdot w_{KR} \quad (5.15)$$

Diese Berechnung wurde bei jeder Rohrgröße durchgeführt.

Daraus resultieren an jedem dieser Rechenpunkte, Werte der Konstanten k_1 , k_2 , k und D . Diese Konstanten variieren über die Rohrgröße in unterschiedlicher Form. In einem weiteren Schritt wurden die Verläufe der Konstanten über die Rohrgröße aufgestellt.

$$k_1, k_2, k, D \text{ sind Funktionen der Rohrgröße } \rightarrow f(RG)$$

Spannungsüberhöhung Nebenrichtung Δ_{NR}

Die Spannungsüberhöhung in Nebenrichtung wurde nicht so spezifisch ermittelt. Diese Spannungserhöhung ist gegenüber der Hauptrichtung relativ gering. Daher wirkt sich ein Fehler im Wert Δ_{NR} nur gering auf das Gesamtergebnis aus.

$$\Delta_{NR} = k_{NR} \cdot F_t \quad (5.16)$$

Mit (5.16) wurde die Spannungsüberhöhung in Nebenrichtung abgeschätzt. Die Konstante k_{NR} stellt einen genäherten Wert über das gesamte Rohrpaarungsfeld dar. Diese Konstante k_{NR} wird mit der jeweiligen seitlichen Kontaktkraft F_t multipliziert. Dadurch ist die Spannungsüberhöhung in Nebenrichtung bestimmbar.

5.5.2 Auswertungsposition - Radiusfläche

Wie in Abschnitt 5.4.1 erläutert ist, wird in diesem Bereich sowohl die Spannung σ_1 also auch die Spannung σ_{zz} ausgewertet. Diese Spannungen sollen im Berechnungspunkt D (siehe Abbildung 5.15) ermittelt werden. Vorab kann erwähnt werden, dass sich die Auswertungen der Radiusfläche linearer als die im Abschnitt 5.5.1 beschriebene ebene Fläche verhält, wodurch die Methode der ebenen Fläche sehr gut für die Radiusfläche funktioniert.

Spannung σ_1

Die Spannungsart σ_1 konnte mit nahezu analoger Berechnungsweise wie die Berechnung der ebenen Fläche durchgeführt werden.

Die Spannung σ_1 setzt sich aus drei Termen zusammen:

$$\sigma_1 = \sigma_{B_{HR}} + \Delta_{HR} + \Delta_{NR} \quad (5.17)$$

Der Term $\sigma_{B_{HR}}$ stellt die analytisch berechnete Nennspannung aufgrund der Biegung dar und wird mit (5.10) ermittelt. Diese Biegespannung kann ausschließlich in Hauptbelastungsrichtung ermittelt werden, da der Berechnungspunkt D keinen Randfaserabstand in Nebenrichtung aufweist. Die Spannungsüberhöhung Δ_{HR} ist in analoger

Art berechnet wie im Abschnitt 5.5.1 für die ebene Fläche bereits beschrieben wurde. Die Spannungsüberhöhung Δ_{NR} wurde mit folgender Formel ermittelt.

$$\Delta_{NR} = F_t \cdot k(RG) \quad (5.18)$$

Dabei ist F_t die seitliche Kontaktkraft und k eine Funktion, die über die Rohrgröße einen quadratischen Verlauf aufweist.

Spannung σ_{zz}

In seitlicher Belastungsrichtung kann mit der aktuellen Modellbildung keine analytisch gerechnete Nennspannung ermittelt werden. Um dies zu ermöglichen, müsste ein neues Modell erstellt werden. Es wurde daher versucht, diese Spannung mit unterschiedlichen funktionellen Zusammenhängen abzubilden. Die am besten funktionierende Methode wird im Folgenden beschrieben.

Dabei wird die Normalspannung σ_{zz} ausschließlich aus den Spannungsüberhöhungen Δ_{HR} , Δ_{NR} der Hauptnormalspannung σ_1 ermittelt. Die Terme Δ_{HR} , Δ_{NR} beschreiben jene Spannungsüberhöhungen, welche lokal aufgrund der Kontaktkräfte F_t und F_s , auftreten. Die Kontaktkräfte F_t und F_s verursachen in diesem Kontaktbereich (Radiusflaeche, Abb 5.2) in Querrichtung im Blech eine Zugspannung. Diese Zugspannung entspricht der Normalspannung in Querrichtung σ_{zz} . Daher wurde ein Verhältnis zwischen der Summe der Spannungsüberhöhungen und der Normalspannung in Querrichtung σ_{zz} aufgestellt.

$$\frac{\sigma_{zz}}{\Delta_{HR} + \Delta_{NR}} = Z \quad (5.19)$$

Der Faktor Z stellt den Mittelwert aller vorhandenen Rechenpunkte (Rohrgröße, Rohrwandstärke) dar. Aus diesem Verhältnis wurde die Normalspannung in Querrichtung σ_{zz} ermittelt.

5.5.3 Spannungsschwingbreite

Wie man aus dem letzten Abschnitt entnehmen kann, ist es möglich die Spannungen mit dem generierten Formelwerk in Abhängigkeit der Einflussgrößen zu berechnen. Dieses Formelwerk darf jedoch nur in einem eingeschränkten Bereich (siehe Abbildung 5.14) angewendet werden, da außerhalb dieses Bereiches eine starke Nichtlinearität zwischen Spannung und Belastung auftritt. Für die beschriebenen Lebensdauer-Untersuchungen ist es notwendig, wie in Abbildung 5.23 gezeigt, eine Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ aufzustellen. Eine mögliche Spannungsschwingbreite bildet sich aus der Spannung der maximalen Traglast des Kranes und aus dem Lastfall an welchem der Kran ausschließlich mit dem Eigengewicht belastet ist (Null Traglast). Der Lastfall mit der maximalen Traglast befindet sich in dem linearem Bereich (rotes Rechteck in Abbildung 5.14) und ist daher mit dem beschriebenen Formelwerk auswertbar. Für den Lastfall mit null Traglast muss die erstellte Auswertemethode erweitert werden, um eine konservative Lebensdauerabschätzung (hohe Spannungsschwingbreite) zu gewährleisten.



Abbildung 5.23: Spannungsschwingbreite

Diese Erweiterung wird anhand der Auswertung an der ebenen Fläche beschrieben.

Betrachtet man die Formel der Gesamtspannung σ_1 genauer, erschließt sich, dass diese Formel aus vier Termen besteht. Die Terme σ_{HR} und σ_{HR} werden in Abhängigkeit von den Schnittmomenten bestimmt und sind somit lastabhängig. Dadurch können diese beiden Terme auch für den nichtlinearen Bereich verwendet werden. Der Term der seitlichen Spannungsüberhöhung Δ_{NR} ist direkt von der seitlichen Kontaktkraft abhängig, siehe (5.16) und geht ohne seitliche Kraft auch auf null Spannungsüberhöhung zurück. Dadurch kann auch dieser Term außerhalb des linearen Bereiches verwendet werden. Zu erweitern ist der Term Δ_{HR} . In Abbildung 5.24 ist dieser Sachverhalt visualisiert.

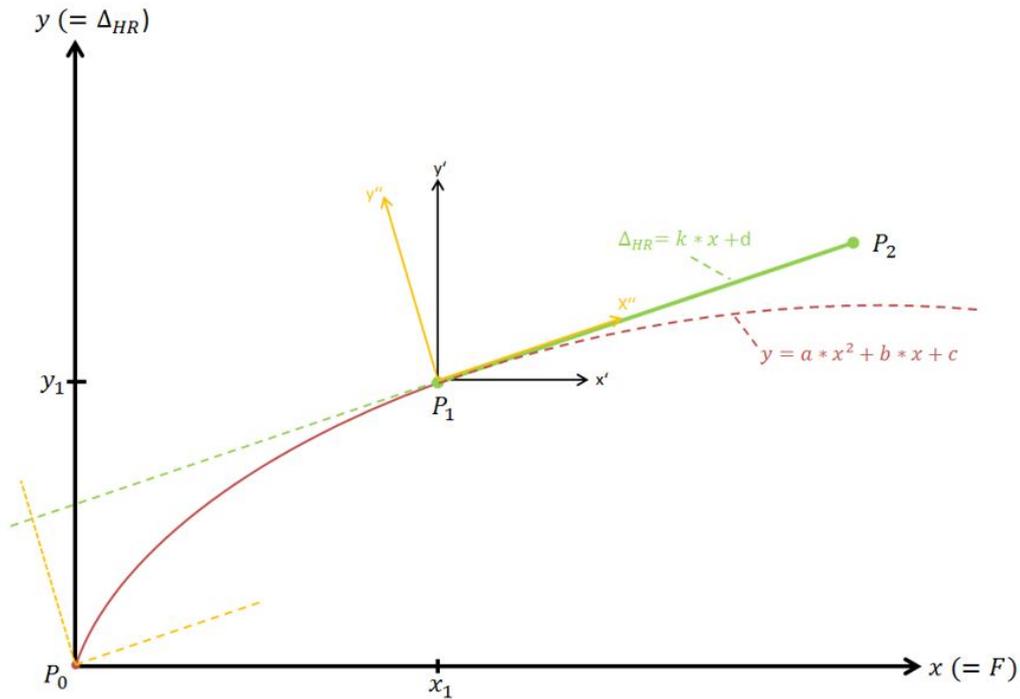


Abbildung 5.24: Parabel

Die grüne Kurve in Abbildung 5.24 welche zwischen den Punkten P_1 und P_2 verläuft, stellt den linearen Bereich der Abbildung 5.14 dar. Deshalb ist in diesem Bereich das generierte Formelwerk anwendbar.

Es ist ersichtlich, dass die Kurve ΔHR linear weiterläuft und die y-Achse je nach Steigung im positiven oder negativen Bereich schneidet, wenn man in niedrigen Lastbereichen unterhalb des Punktes P_1 diese Verfahren anwendet. Für die Spannungsschwingbreite ist wichtig, dass die Größe ΔHR außerhalb des linearen Bereiches so schnell als möglich Null wird, um nicht fälschlicher Weise bei kleiner Kontaktkraft einen hohen Überhöhungsanteil der Spannung einzurechnen.

Die rote Kurve stellt den gewünschten Verlauf der Größe ΔHR unterhalb des Punktes P_1 dar. Dieser Verlauf tangiert im Punkt P_1 die lineare Kurve. Zudem ändert dieser Verlauf, je nach Steigung der grünen Kurve die Krümmung, um die Funktion möglichst schnell auf null zu zwingen. Der rote Verlauf konnte mit einer Parabel verwirklicht werden. Diese Parabel lässt sich einfach in dem lokalen Koordinatensystem (x'', y'') aufstellen und kann anschließend auf das globale schwarze Koordinatensystem umgerechnet werden. Der Ursprung des lokalen Koordinatensystems liegt im Punkt P_1

und die Achse x'' ist deckungsgleich mit der linearen Funktion Δ_{HR} .

Die Gleichung (5.20) stellt die rote Parabelfunktion im lokalem orangen Koordinatensystem dar. Diese Parabel liegt in dem lokalem Koordinatensystem in zweiter Hauptlage. Das bedeutet, dass die Konstanten c und b den Wert Null annehmen.

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (5.20)$$

Dadurch vereinfacht sich die Funktion zu folgender Formel:

$$y = a \cdot x^2 \quad (5.21)$$

Diese Parabel soll im globalem Koordinatensystem beschrieben werden. Dazu wurde zwischen dem globalem Koordinatensystem und dem lokalem orangen Koordinatensystem die Drehmatrize gebildet. Anschließend wurden die Punkte der Parabel in das globale Koordinatensystem durch Drehung und Verschiebung transformiert. Die Formel (5.22) stellt das Ergebnis dieser Umrechnung dar. Dabei sind für x_{Par} die Koordinatenwerte des globalen Koordinatensystems einzusetzen.

$$y_{Par} = y_1 + \left(1 + \frac{1}{(\tan(\alpha))^2}\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot a} \cdot (\cos(\alpha) - \sqrt{w}) + \frac{1}{\tan(\alpha)} \cdot (x_1 - x_{Par}) \quad (5.22)$$

$$\sqrt{w} = \sqrt{(\cos(\alpha))^2 + 4 \cdot a \cdot \sin(\alpha) \cdot (x_1 - x_{Par})} \quad (5.23)$$

$$a = \frac{x_1 \cdot \sin(\alpha) - y_1 \cdot \cos(\alpha)}{(-x_1 \cdot \cos(\alpha) - y_1 \cdot \sin(\alpha))^2} \quad (5.24)$$

Die in Gleichung (5.22) dargestellte Funktion ermöglicht es, die Funktion Δ_{HR} außerhalb des linearen Bereiches abzubilden.

Es wird noch definiert, ab welchem Punkt zwischen der linearen und der Parabelfunktion gewechselt wird. Dazu muss der Punkt P_1 beschrieben werden. Dies

lässt sich mit der Umschaltkraft F (=x-Koordinate des Punktes P_1) mit (5.25) ermitteln. Diese Umschaltkraft stellt die Kraft des 50 prozentigen Auslastungspunktes über nahezu alle Rohrgrößen hinweg dar.

$$F = K \cdot (GR \cdot \text{Mittelwert}(w_{GR}, w_{KR})) + D \quad (5.25)$$

6

Ergebnisse Spannungsuntersuchung

In diesem Abschnitt wird die Spannungsermittlung mit dem erstellten Formelwerk einer Fehleranalyse unterzogen.

6.1 Auswertungsposition: Ebene Fläche

Der Tabelle 6.1 sind die Fehlerwerte der jeweiligen Rohrpaarung zu entnehmen.

GR	w_{GR}	KR	w_{KR}	Fehler [%]				
				L2	L3	L4	L5	L6
86	4	75	3	4,5	-5,7	-8,9	-10,4	-18,0
86	4	75	4	1,4	-4,9	-4,9	-2,8	-8,1
86	5	75	5	-4,8	-2,3	1,7	-1,4	-8,7
122	4	110	4	4,9	0,0	2,1	5,6	3,2
122	5	110	4	8,0	1,4	2,7	6,1	2,6
122	4	110	5	4,1	2,7	6,9	9,2	6,9
122	5	110	5	7,5	4,7	8,0	10,4	7,2
122	6	110	6	-9,3	-2,1	6,2	8,0	4,2
146	4	134	4	11,2	2,6	2,8	6,2	4,8
146	5	134	5	10,3	4,8	6,4	9,6	7,5
146	6	134	6	-0,5	1,3	6,5	8,6	5,8
197	5	183	5	-1,5	-10,8	-11,0	-7,7	-8,8
197	6	183	5	-3,7	-13,0	-14,4	-10,9	-12,8
197	5	183	6	-6,5	-12,0	-9,7	-6,6	-9,0
197	6	183	6	-16,4	-19,8	-16,7	-13,5	-13,5
197	7	183	7	-12,5	-8,5	-6,1	-7,7	-10,2
275	6	255	6	-2,2	-4,9	-3,6	-5,0	-6,2
275	7	255	7	4,1	5,3	6,6	4,6	6,7
296	7	275	7	26,4	24,1	24,5	22,3	23,2

Tabelle 6.1: Fehlerwerte ebene Fläche

Diese Fehlerwerte spiegeln die Unterschiede der Spannungen σ_1 aus den Ansys-Modellen und dem Formelwerk wider. Im mittleren Rohrgrößenbereich funktioniert die Methode sehr gut. Bei der größten Rohrpaarung treten Probleme in der Auswertung auf. Dies resultiert aus lediglich einem Wandstärkenrechenpunkt bei dieser Rohrgröße. Um das Verhalten genauer abbilden zu können, wären mehrere Wandstärken Kombinationen notwendig. Dies ist aber aus zeitlichen Gründen nicht möglich gewesen.

6.2 Auswertungsposition: Radiusfläche

Das Gesamtverhalten des Radius ist merklich linearer als auf der ebenen Fläche. Aus diesem Grund ergab die Ermittlung der Spannungen deutlich genauere Ergebnisse siehe Tab 6.2.

Spannung σ_1

GR	w_{GR}	KR	w_{KR}	Fehler [%]					
				L2	L3	L4	L5	L6	L7
86	4	75	3	1,09	1,11	1,11	1,13	1,15	1,12
86	4	75	4	1,06	1,08	1,08	1,09	1,09	1,07
86	5	75	5	1,16	1,06	1,02	1,03	1,04	1,00
122	4	110	4	0,95	1,00	1,02	1,02	1,03	1,02
122	5	110	4	1,02	1,03	1,02	1,03	1,04	1,01
122	4	110	5	0,94	0,99	1,01	1,01	1,01	1,01
122	5	110	5	1,00	1,00	0,99	1,00	1,01	0,99
122	6	110	6	1,14	1,05	1,00	1,00	1,01	0,97
146	4	134	4	0,93	1,00	1,04	1,05	1,05	1,05
146	5	134	5	0,96	1,00	1,01	1,01	1,01	1,00
146	6	134	6	1,03	1,00	0,98	0,98	0,98	0,96
197	5	183	5	0,99	1,03	1,05	1,05	1,05	1,05
197	6	183	5	1,01	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02
197	5	183	6	0,98	1,02	1,04	1,04	1,04	1,03
197	6	183	6	1,01	1,02	1,02	1,02	1,01	1,00
197	7	183	7	1,01	0,98	0,96	0,96	0,95	0,93
275	6	255	6	1,08	1,07	1,07	1,05	1,04	1,05
275	7	255	7	0,97	0,97	0,96	0,94	0,93	0,92
296	7	275	7	0,99	0,97	0,96	0,93	0,92	0,93

Tabelle 6.2: Fehlerwerte Radiusfläche σ_1

Spannung σ_{zz}

Die Normalspannung in Querrichtung σ_{zz} konnte mit der beschriebenen Berechnung sehr genau bestimmt werden.

GR	w_{GR}	KR	w_{KR}	Fehler [%]					
				L2	L3	L4	L5	L6	L7
86	4	75	3	0,62	0,88	1,03	1,06	1,12	1,15
86	4	75	4	0,66	0,89	1,02	1,03	1,06	1,09
86	5	75	5	0,63	0,66	0,70	0,73	0,78	0,77
122	4	110	4	0,60	0,82	0,96	0,98	1,00	1,05
122	5	110	4	0,70	0,89	0,98	1,00	1,04	1,04
122	4	110	5	0,61	0,84	0,97	0,99	1,02	1,05
122	5	110	5	0,75	0,85	0,94	0,96	0,99	0,99
122	6	110	6	1,18	1,02	0,98	0,98	1,01	0,95
146	4	134	4	0,54	0,73	0,89	0,91	0,97	1,04
146	5	134	5	0,64	0,83	0,93	0,95	0,98	1,00
146	6	134	6	0,85	0,93	0,96	0,97	0,99	0,97
197	5	183	5	0,65	0,86	0,99	1,01	1,06	1,10
197	6	183	5	0,71	0,87	0,96	0,98	1,02	1,03
197	5	183	6	0,74	0,87	0,99	1,00	1,04	1,07
197	6	183	6	0,73	0,89	0,97	0,98	1,01	1,01
197	7	183	7	0,88	0,89	0,91	0,90	0,89	0,87
275	6	255	6	1,25	1,10	1,17	1,14	1,16	1,17
275	7	255	7	0,97	0,86	0,91	0,89	0,90	0,90
296	7	275	7	0,90	0,85	0,90	0,87	0,88	0,89

Tabelle 6.3: Fehlerwerte Radiusfläche σ_{zz}

Verifikation der Spannungsergebnisse

7.1 Kranmodell PK 165.002 TEC7 bewerten

An der Kranversion PK 165.002 TEC 7 wurden die beschriebenen Rechenverfahren der ebenen Fläche an zwei unterschiedlichen Varianten angewendet. Bei der Grundausslegung dieses Kranes wurden die Rohrwandstärken über das gesamte Schubrohrpaket mit 6mm gewählt. Während des Entwicklungsprozesses einer neuen Kran Variante wird ein Dauertestversuch durchgeführt. Bei der zweiten Variante (6mm Wandstärken) versagten die Rohre der Nummer 1, 4, 5 (siehe Tabelle 7.1) frühzeitig. Daher wurde diese Kranvariante verstärkt und zum Teil mit Schubarmrohren von 7mm Wandstärke ausgeführt (Variante 1). Das Rohr Nummer sechs sollte auch verstärkt werden, dies war jedoch aus konstruktiven Gründen nicht mehr möglich.

In Tabelle 7.1 sind die errechneten Spannungsschwingbreiten der jeweiligen Variante und Rohrgröße eingetragen. Es ist ersichtlich, dass durch das Erhöhen der Wandstärke die Spannungsschwingbreite deutlich reduziert wird. Man kann erkennen, dass mit dem entwickelten Rechenverfahren die Rohre 4, 5, 6 der Variante 2 eine kritische Spannungsschwingbreite aufweisen. Dies deckt sich auch mit dem Dauertestversuch. Lediglich das frühzeitige Versagen des Rohres Nummer 1 hätte man mit dem entwickelten Verfahren nicht vorhersagen können. Um die Gründe des frühzeitigen Versagens des ersten Rohres zu ermitteln, müsste eine genauere Analyse durchgeführt werden.

Nr.	Rohrgröße [-] [mm]	Variante 1		Variante 2	
		w_{GR} [mm]	Schwingbreite [%]	w_{GR} [mm]	Schwingbreite [%]
1	255	7	70	6	82
2	235	7	73	6	86
3	216	7	83	6	98
4	197	7	88	6	106
5	183	7	90	6	109
6	170	6	107	6	107
7	158	6	92	6	92
8	146	6	82	6	82

Tabelle 7.1: Vergleich der Spannungsschwingbreiten

Mit dem entwickelten Verfahren zur Spannungsbewertung wäre eine Ermittlung der kritischen Rohre vor dem Dauertest möglich gewesen. Dadurch wäre bereits vor dem Dauertest eine Verstärkung auf 7 mm möglich gewesen, wodurch der Dauertest beim ersten mal die geforderten Lastwechsel bestanden hätte.

Zukünftig kann mit der entwickelte Berechnungsmethode Gesamtentwicklungszeit eingespart werden, da bei der Grundausslegung die Hauptabmessungen spezifischer bestimmt werden können. Somit kann die benötigte Zeit für das Ändern von Geometrien der Kranmodelle nach dem Dauertest reduziert werden.

7.2 DMS-Messung

In Abbildung 7.1 ist der Versuchsaufbau visualisiert. Die vorderste Rohrpaarung ist die Rohrpaarung R48 in R56, die kleinste verfügbare Rohrpaarung. Die Rohrpaarung ist im gedrehtem Zustand aufgebaut. Diese Aufbaumethode hat sich als ideal herausgestellt, da durch den Zylinder 2 das Eigengewicht der Baugruppe und das Eigengewicht des Zylinders 4 aufgenommen werden kann. Der Zylinder 4 bringt die Hauptlast auf, der Zylinder 2 die seitliche Belastung.

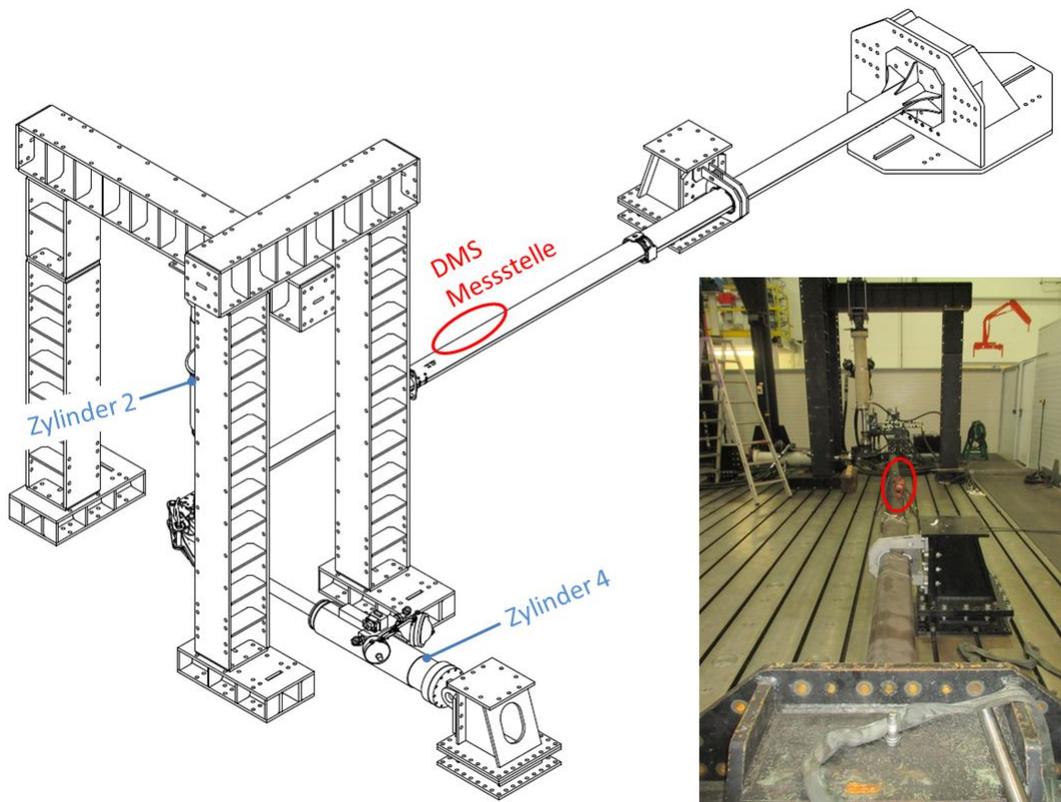


Abbildung 7.1: Versuchsaufbau

Die gekennzeichnete DMS Messstelle ist in Abbildung 7.2 vergrößert dargestellt. Die Position dieser Messstelle wurde so gewählt, dass die Stelle lagegleich mit dem Spannungsmaximum im Ansys Modell ist. Exakt diese Rohrgröße wurde aber nicht aufgebaut, daher wurde die Lage der Messstelle von einem größeren Ansys Modell auf das untersuchte Modell skaliert. Die seitliche Belastung der untersuchten Zeitschnitte wird durch Einfahren des Zylinders 2 aufgebracht. Dadurch ist in diesen Zeitschritten die untere DMS Messstelle jene, welche höher belastet wird.

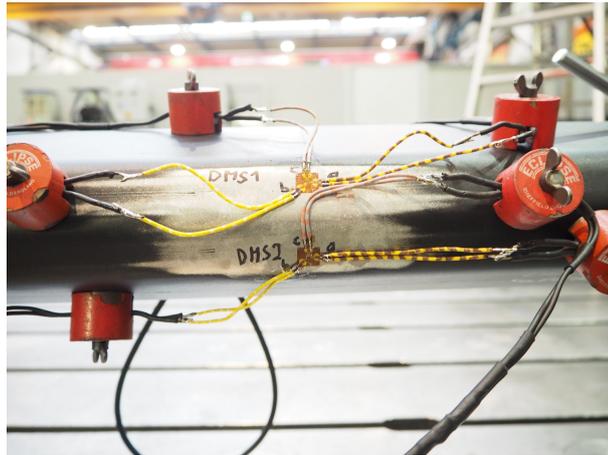


Abbildung 7.2: Versuchsaufbau DMS

Das Diagramm 7.3 stellt alle aufgezeichneten Kräfte der Zylinder sowie die Spannungen der DMS-Messstelle (DMS 2) dar.

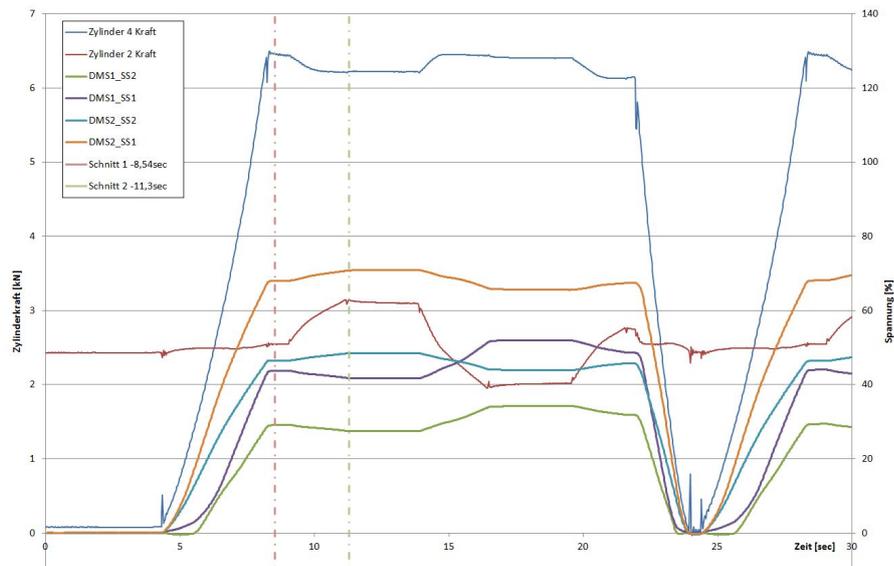


Abbildung 7.3: Messungskurven

Es wurden zwei zeitliche Schnitte für den Vergleich ausgewählt. Der erste Schnitt ist bei 8,5 sec. Dies kommt einem Lastfall mit maximaler Hauptlast und keiner Seitenlast gleich. Der zweite Vergleichszeitpunkt (11,3 sec) entspricht einem Lastfall mit maximaler Hauptlast und Seitenlast.

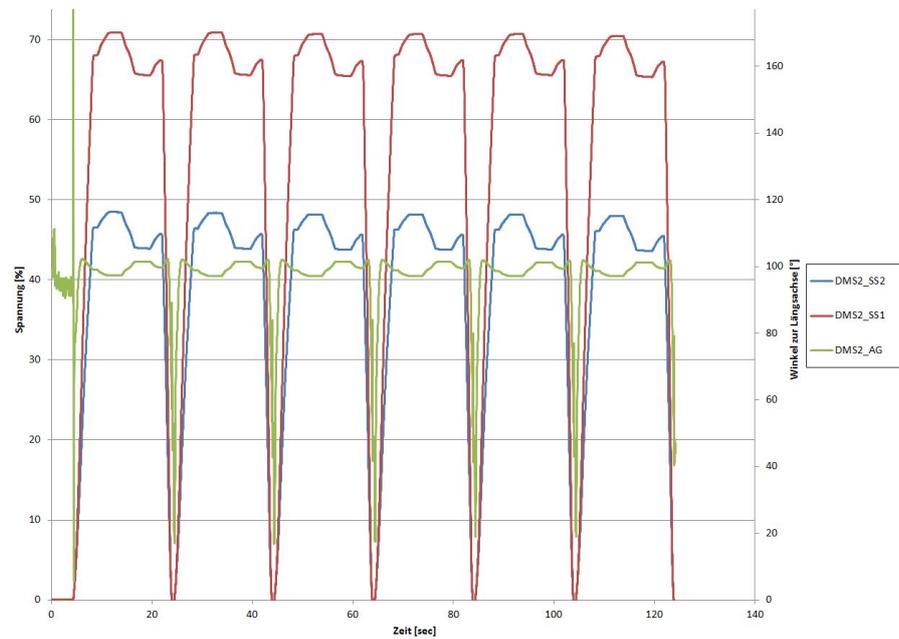


Abbildung 7.4: Messungskurven

Aus Abbildung 7.4 wurden die Spannungswerte, welche in Tabelle 7.2 dargestellt sind, entnommen.

Zeit	Spannung DMS σ_1	Spannung Formelwerk σ_1
[sec]	[%]	[%]
8,5	68	56,7
11,3	70,8	57,8

Tabelle 7.2: Messergebnisse

Es ist ein deutlicher Unterschied in den Ergebnissen erkennbar. Dies hat mehrere Gründe. Zum ersten wird durch die Krafteinleitungssituation des Zylinders 2 eine zusätzliche Torsion aufgebracht, welche die Spannungen an der Messstelle erhöhen. Zudem bewegt sich der Lastangriffspunkt bei konstant halten der Zylinderlänge 2 auf einer Kreisbahn. Dies erzeugt eine künstliche seitliche Belastung, wenn der Zylinder 4 die Hauptlast aufbringt.

Auch die Auswertung der Spannungen mit dem erstellten Formelwerk ist bei Rohren unterhalb der Rohrgröße R75 nur bedingt anwendbar. Dies resultiert aus den errechneten Konstanten k_1 , k_2 , k , D . Wie bereits erläutert sind diese Variablen,

Funktionen der Rohrgröße. Im untersuchten Rohrgrößenfeld P75 bis P296 lassen sich diese Werte gut abbilden. Die untersuchte Rohrpaarung am Prüfstand ist jedoch in diesem Bereich nicht mehr inkludiert, weshalb die Funktionen der Größe k_2 und D teilweise starke Änderungen (außerhalb des Untersuchungsbereiches) aufweisen.

7.3 Spannungsvergleich mit optischer Messung

In Abbildung 7.5 ist der Versuchsaufbau einer optischen Dehnungsmessung dargestellt. Dieser Versuch wurde an der Rohrpaarung R110-122, in 4mm Wandstärke durchgeführt. Ziel ist es die hoch belasteten Kontaktbereiche einer Dehnungs- und Spannungsuntersuchung zu unterziehen.

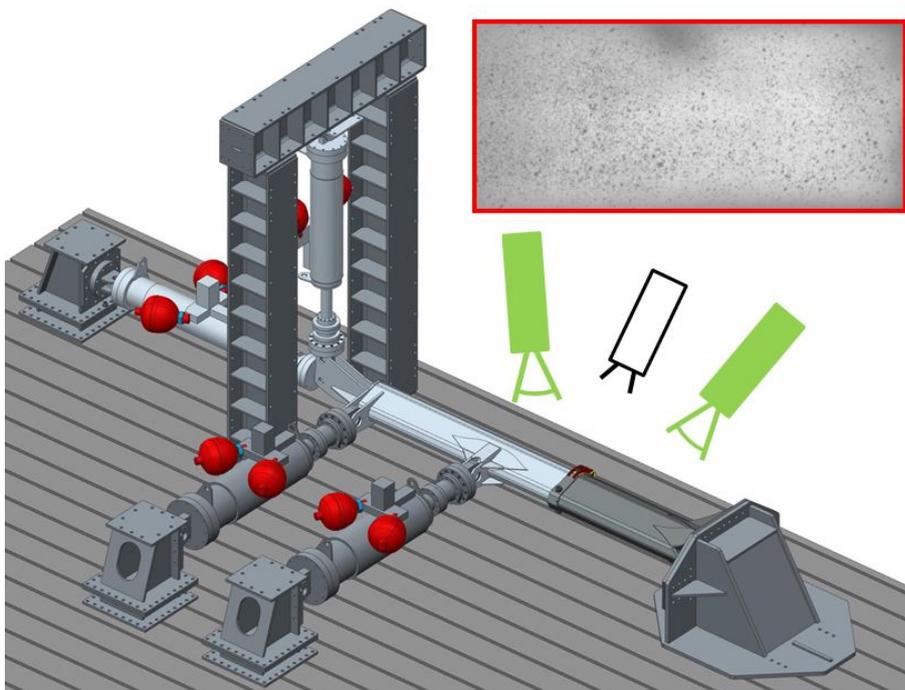


Abbildung 7.5: Optische Dehnungsmessung

Für diese Untersuchung wurde ein Messaufbau der Firma GOM GmbH, namens Aramis verwendet. Das Messprinzip beruht auf einer berührungslosen Dehnungsmessung. Dabei wird im ersten Schritt auf die zu untersuchenden Bereiche ein chaotisches Sprenkelmuster aufgebracht. Diese Bereiche werden mit einer Lichtquelle beleuchtet

um eine gleichbleibende Belichtungsstärke zu erreichen. Zwei Kamerasysteme zeichnen die Veränderungen des chaotischen Musters auf, anschließend werden die Bilddaten mit einer digitalen Bildkorrelation (Dis) verarbeitet.

Die Messergebnisse sind in Abbildung 7.6 und 7.7 mit den aus den Ansys ermittelten Spannungswerten verglichen. Die dargestellten Flächen entsprechen den abgewickelten Rohraußenflächen des Dachbereiches aus Abbildung 5.1. Der Flächenbereich inkludiert die vordere und hintere ebene Fläche sowie auch die Fläche des Radius auf der Rohraußenfläche. Das obere Farbfeld stellt die Messergebnisse dar, die untere Farbfläche entspricht den mit Ansys ermittelten Werten. Dieser Vergleich wurde bei dem Lastfall sechs aus Tabelle 3.3 durchgeführt.

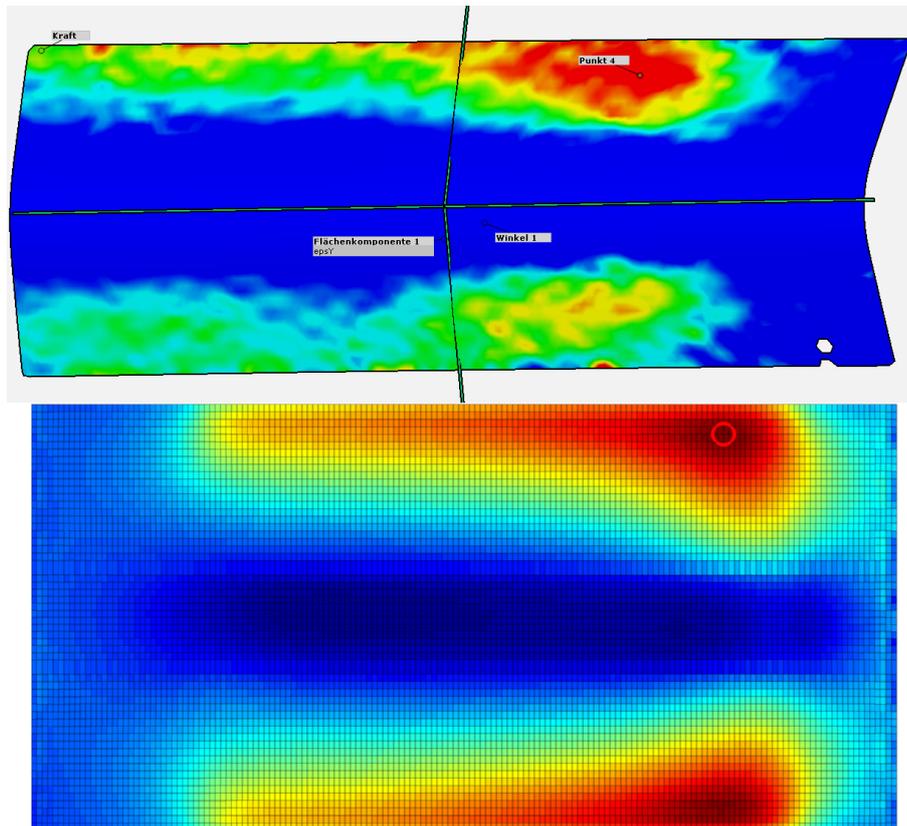


Abbildung 7.6: Vergleich Normalspannung in Querrichtung σ_{zz}

Man kann erkennen, dass die Messung gegenüber der Spannungsergebnisse aus den Ansys-Modellen eine leichte Asymmetrie des Spannungszustandes aufweist. Das Gesamtverhalten des Versuches ist vom Tragbild her nahezu ident zum Ansys-Modell. In Abbildung 7.6 ist erkenntlich, dass sich beide Normalspannungsergebnisse σ_{zz} nahezu

ident Verhalten. Im mittleren Bereich ist bei beiden Flächen ein niedrig belasteter Bereich. An den Randzonen bilden sich die hochbelastete Bereiche aus.

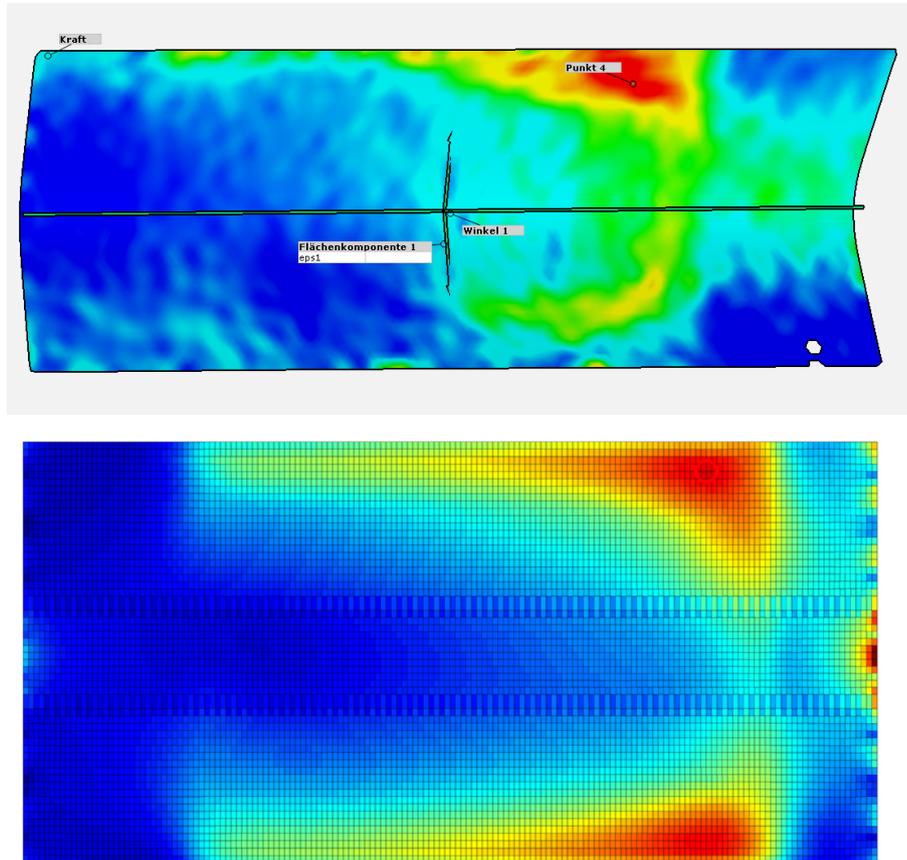


Abbildung 7.7: Vergleich erste Hauptnormalspannung σ_1

In Abbildung 7.7 sind die Vergleichsspannungen σ_1 dargestellt. Auch hier ist das Verhalten ähnlich. Im Bereich der beiden Hauptdruckpunkte ist der Spannungsverlauf in z-Richtung mit einer erhöhten Spannungszone verbunden. Diese Verhalten bildet sich bei der Messung stärker aus. Auch eine stärkere Asymmetrie ist bei den Messwerten zu erkennen.

Die Unterschiede resultieren zum einen aus dem Messaufbau und zum anderen aus Vereinfachungsgründen bei der Modellbildung.

Resümee

In Zuge dieser Arbeit wurde eine Vielzahl an unterschiedlicher Rohrpaarungskombinationen detailliert untersucht. Mithilfe nichtlinearer Kontaktmodelle wurden zum einen Steifigkeitswerte und zum anderen Spannungswerte ermittelt. Aus den 19 Ansys Rechenmodellen und deren unterschiedlichen Ausprägungen wurde eine Reihe verschiedener Zusammenhänge ermittelt. Ein wesentlicher Zusammenhang des ersten Themengebietes ermöglicht die Ermittlung von Steifigkeitswerten je nach Rohrgeometrieausprägung. Durch diese spezifische Bestimmung der Rechengrößen konnten die Balken-Feder-Modelle, welche zur Auslegung eines Kranes verwendet werden, deutlich verbessert werden. Dies ermöglicht zum einen eine genauere Kalkulation der Verformung des Kranes (Lastangriffspunktes) und zum anderen sind die ermittelten Steifigkeitswerte gegenüber den Referenzwerten deutlich erhöht. Dadurch kann rechnerisch die Verformung am Kran in bestimmten Stellungen deutlich reduziert werden, woraus eine Erhöhung der Hublast oder der Reichweite resultiert.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Bewertung der Kontaktspannungen bereits in frühen Auslegungsphasen erlaubt. Dieses Verfahren kann in dem untersuchten Rohrgrößenbereich angewendet werden. Sinnvoll wäre für die Spannungsuntersuchung zwei weitere Rechenpunkte zu untersuchen, um das Verfahren zur Spannungsuntersuchung auf das gesamte Feld anwenden zu können. Des Weiteren wäre empfehlenswert die Geometrievarianten Jib im Hinblick auf die Spannungen zu untersuchen, um die entwickelten Verfahren auf alle Geometrievarianten anwenden zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Ansys Inc, Canonsburg, Pennsylvania, Vereinigte Staaten: Ansys Hilfe, März 2016. Ansys Hilfe.
- [2] Austrian Standards Institute, Heinestraße 38, 1020 Wien: Krane — Konstruktion allgemein Teil 3-1: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken, Dezember 2013. ÖNORM EN 13001-3-1, ICS 5302020.
- [3] Austrian Standards Institute, Heinestraße 38, 1020 Wien: Krane-Ladekrane, März 2013. ÖNORM EN 12999, ICS 5302020.
- [4] Austrian Standards Institute, Heinestraße 38, 1020 Wien: Krane — Konstruktion allgemein Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen, Mai 2015. ÖNORM EN 13001-1, ICS 5302020.
- [5] Palfinger Europe GmbH, Moosmühlstraße 1, 5203 Köstendorf bei Salzburg: P-Profil: Konstruktionsvorgabe Rohr, März 2015. Palfinger Werknorm 103301 Teil 0.
- [6] Palfinger Europe GmbH, Moosmühlstraße 1, 5203 Köstendorf bei Salzburg: Konstruktionsvorgabe für Knick- und Schubarmrohre aus P-Profil, Januar 2016. Palfinger Werknorm 103302 Teil 0.
- [7] Palfinger Europe GmbH, Moosmühlstraße 1, 5203 Köstendorf bei Salzburg: allgemeine Unterlagen, März 2017.
- [8] Papula, Lothar: Mathematische Formelsammlung. Viewegs Fachbücher der Technik, 2003.

Anhang

A

Numerische Grundlagen

A.1 Lineare Regression

In diesem Kapitel wird der numerische Hintergrund der linearen Regression erläutert. Ziel der linearen Regression ist es, einen linearen Zusammenhang aus einer Punktwolke zu ermitteln. In Abbildung A.1 ist das Verfahren visualisiert.

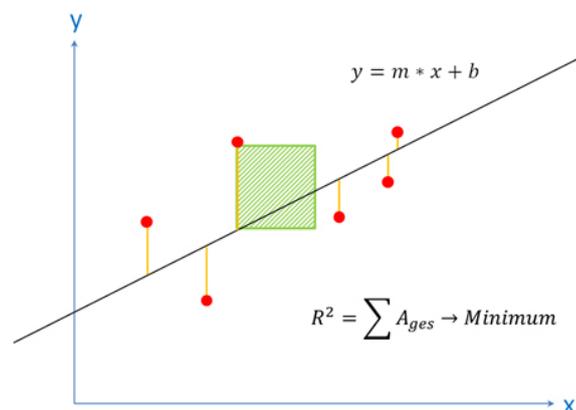


Abbildung A.1: Lineare Regression

Die lineare Regression funktioniert nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Dabei wird mit der Länge der Abweichung (*Residuum*) jedes Rechenpunktes zur Gerade ein Quadrat gebildet. Die dabei erzeugten Quadratflächen (*Residuum*²) werden aufsummiert. Anschließend wird die Steigung und der Achsenabschnitt so lange optimiert bis die Gesamtfläche ein Minimum aufweist. (Vgl. [8])

Im ersten Schritt werden die Mittelwerte gebildet:

$$\mu_x = \bar{x} = 1/n * \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{A.1})$$

$$\mu_y = \bar{y} = 1/n * \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{A.2})$$

Hilfsgrößen

$$Q_x = s_x^2 * (n - 1) = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{A.3})$$

$$Q_{xy} = s_{xy} * (n - 1) = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y}) \quad (\text{A.4})$$

Steigung

$$m = \frac{Q_{xy}}{Q_x} \quad (\text{A.5})$$

Achsenabschnitt

$$b = \bar{y} - m * \bar{x} = \frac{1}{n} * \left(\sum_{i=1}^n y_i - m * \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (\text{A.6})$$

A.2 Polynom Regression

Die Polynomregression arbeitet ebenfalls nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Hierbei lässt sich ein lineares Gleichungssystem aufstellen, welches gelöst werden kann. Dabei sind die Faktoren m_2 , m_1 und b die gesuchten Größen. (Vgl.[8])

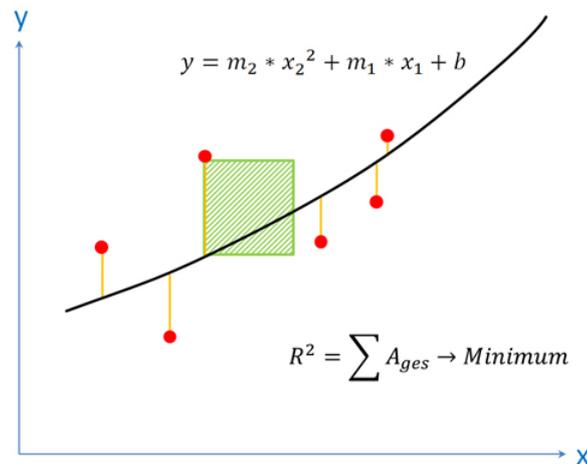


Abbildung A.2: Polynom Regression

Gleichungssystem:

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i^4\right) * m_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right) * m_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) * b = \sum_{i=1}^n x_i^2 * y_i \quad (\text{A.7})$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right) * m_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) * m_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i\right) * b = \sum_{i=1}^n x_i * y_i \quad (\text{A.8})$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) * m_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i\right) * m_1 + n * c = \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{A.9})$$

B

Routinen

Im Folgenden wird die Vorgehensweise der Auswertung der Steifigkeitswerte mit Excel näher beschrieben. Anschließend werden die verwendeten Matlab Skripte zur Steifigkeits- und Spannungsbestimmung beschrieben.

B.1 Excel Auswertung

In folgender Abbildung ist die Biegelinie der beiden Rohre in der xy-Ebene ersichtlich.



Abbildung B.1: Durchbiegung der beiden Rohre in der xy-Ebene

Aus dem Diagramm B.1 können die Wegunterschiede an den Lagerstellen ermittelt werden. Somit kann mit den analytisch bestimmten Kräften und den Wegen eine Federsteifigkeit errechnet werden.

Das Auswertungsfile ist in unterschiedliche Blätter aufgeteilt. Im Folgenden wird eine durchgehende Auswertung im Excel erläutert.

B.1.1 Blatt: Pfade-x

Zu Beginn werden die Ansys-Verschiebungen in der jeweiligen Koordinatenrichtung in das entsprechende Blatt eingelesen. Dieses Blatt dient zur Eingabe der x-Werte aller Pfade.

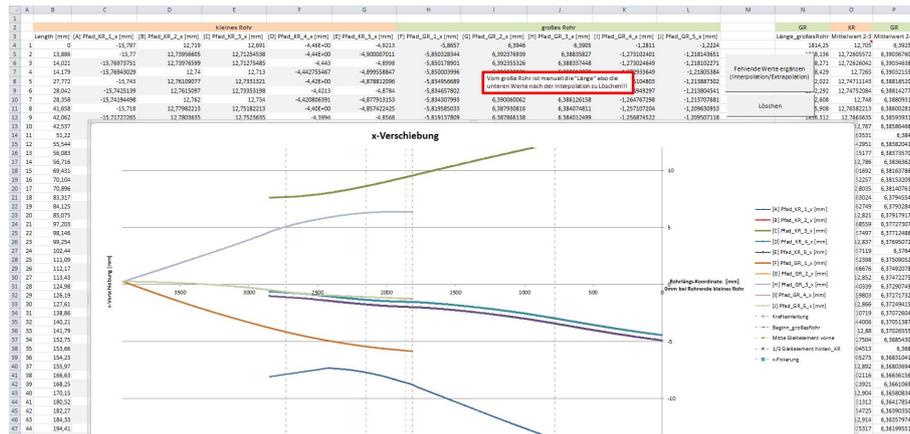


Abbildung B.2: Screenshot des Excel Blattes: Pfade x

Wenn die Zelle A3 markiert ist, kann über die Funktion „Daten/Alle aktualisieren“ das gesamte x-Pfad File, welches aus Ansys exportiert wurde, eingelesen werden. Ebenso können die Werte manuell eingegeben werden. Die weiß hinterlegten Zellen werden durch diesen Import eingelesen. Wie man erkennen kann sind viele graue Felder vorhanden, für welche keine Werte aus Ansys importiert werden konnten. Um auch die Zwischenwerte bei allen Längenkoordinaten automatisiert zu erhalten wurde eine Makro erstellt. Es ist darauf zu achten, dass die Length-Werte aus Ansys von Beginn der Pfade an zu zählen sind. In Abbildung B.3 ist der Pfadbeginn und die Koordinatenrichtung der Length Werte (grüne Pfeile) für das große und das kleine Rohr eingezeichnet. Die Koordinatenrichtung des globalen Koordinatensystemes und die Length-Werte sind gegensinnig und besitzen unterschiedliche Ursprünge. Daher sind diese Werte auf das globale Koordinatensystem umzurechnen.

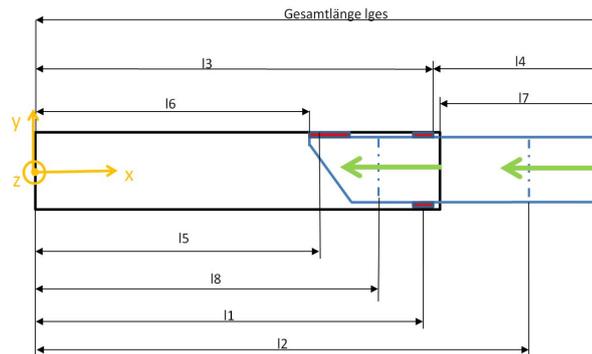


Abbildung B.3: Koordinatenursprung

Durch Betätigen des Buttons „Fehlende Werte ergänzen“ wird das Makro gestartet und folgendes Fenster erscheint.

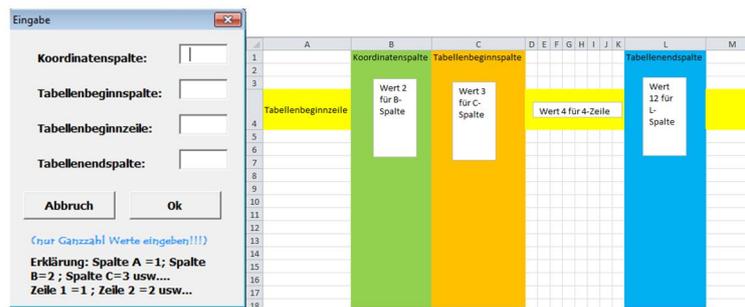


Abbildung B.4: Makro Eingabe

In diesem Fenster sind folgende Wertebereiche anzugeben:

Als Koordinatenspalte muss jene Spalte gewählt werden, welche die Längen beinhaltet. Der Wert „Tabellenbeginnspalte“ und „Tabellenbeginnzeile“ muss ebenfalls angegeben werden. Die Werte stellen den Spaltenbereich und den Zeilenbereich dar, welche zu überprüfen und interpolieren sind. Die leeren Felder werden in dem eingegebenen Bereich automatisiert erkannt und aufgefüllt. Die Durchführung der Interpolation/Extrapolation erfolgt mit den bekannten Werten und den Koordinatenwerten. Alle Felder, welche eine Längskoordinate besitzen, werden gefüllt. Dadurch muss nach Ausführen des Makros der untere Bereich kontrolliert und eventuell wieder Bereiche gelöscht werden, wenn die Rohre eine kürzere Länge aufweisen. Zusätzlich ist in diesem Tabellenblatt noch ein Diagramm ersichtlich, welches die x-Werte darstellt.

Die Blätter Pfade y und Pfade z sind nahezu identisch mit dem Pfade x Blatt und werden daher nicht gesondert erklärt.

B.1.2 Blatt: Eingabe

Bei diesem Blatt sind die unverformten Querschnittswerte für das kleine und das große Rohr einzugeben. Es ist auf die Vorzeichen der Koordinatenwerte zu achten. Des Weiteren müssen diverse Längenmaße eingegeben werden.

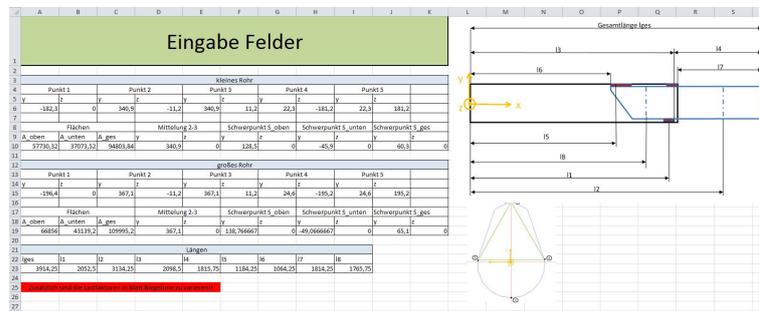


Abbildung B.5: Eingabe Blatt

B.1.3 Blatt: 3D kleines Rohr

Dieses Blatt setzt die Einzelverschiebungen zu einer Biegelinie zusammen.

T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
kleines Rohr Koordinaten absolut														
Punkt 1			Punkt 2			Punkt 3			Punkt 4			Punkt 5		
x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
3898,453	-302,4	2,2663	3926,969	220,08	-8,4532	3926,941	220,07	13,9388	3909,7852	-97,79	-178,7291	3909,3287	-98,09	183,6237
3884,594	-301,58	2,2497	3913,10357	220,8830555	-8,47092598	3913,07655	220,863262	13,9235224	3895,92079	-97,0076064	-178,747719	3895,46399	-97,3175102	183,616074
3884,45926	-301,572028	2,24953861	3912,96877	220,890863	-8,47109831	3912,94175	220,870974	13,9233738	3895,786	-97	-178,7479	3895,3292	-97,31	183,616
3884,30157	-301,562698	2,24934973	3912,811	220,9	-8,4713	3912,784	220,88	13,9232	3895,62824	-96,9910976	-178,748112	3895,17144	-97,3010976	183,615914

Abbildung B.6: kleines Rohr Berechnung 1

AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU
verformt											
Mittelung 23			Schwerpunkt S_oben			Schwerpunkt S_u			Schwerpunkt S		
x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
3926,955	220,075	2,7428	3915,3563	8,065	2,5458	3905,85563	-166,093333	2,38696667	3911,64102	-60,040495	2,48368742
3913,09006	220,873159	2,72629819	3901,49161	8,84934731	2,53155112	3891,99293	-165,301706	2,37268505	3897,7771	-59,2533006	2,46942574

Abbildung B.7: kleines Rohr Berechnung 2

In der Spalte B werden die Pfadkoordinaten aus dem x-Pfade Blatt eingelesen. Diese Werte werden in der Spalte A auf globale Koordinaten umgerechnet. In Spalte D bis R

werden die relativen Verschiebungen der Punkte gesammelt und als Verschiebungsvektor von den unterschiedlichen Eingabeblättern eingelesen. In Spalte T bis AH werden diese Verschiebungsvektoren auf globale/absolute Koordinaten umgerechnet. Das bedeutet, dass in Zeile 4 Spalte T bis V der verschobene Punkt 1 als absoluter Vektor dargestellt ist. Dieser Vektor entspricht dem Punkt 1 am Rohrende des kleinen Rohres.

AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO
nicht verformt				Vektor V_4-5 = V_c				Vektor V_4-23				Normalvektor in Vn_4 = V_a				Normalvektor Vn_4sV_b		
Schwerpunkt				aus Punkt 5 und 4				aus Punkt 23 und 4				aus V_c/V_a				aus V_c/V_a		
x	y	z		x	y	z		x	y	z		x	y	z		x	y	z
3914,25	60,3	0		-0,4505	-0,3	362,2528		17,1698	317,865	181,47017		115293,714	-6304,36703	139,554412		2284363,06	-41795322,9	37448,0275
3900,364	60,3	0		-0,45679711	-0,30990372	362,363793		17,1692656	317,880765	181,474017		115244,719	-6304,41702	139,886196		2284449,11	-41760577,5	38594,6662
3900,229	60,3	0		-0,4568	-0,31	362,3639		17,1692604	317,880918	181,474038		115244,826	-6304,41751	139,885533		2284449,95	-41760628,6	38605,754

Abbildung B.8: kleines Rohr Berechnung 3

Die Punkte 2 und 3 wurden zu einem Punkt 23 zusammengefasst und mit dem Punkt 23, 4 und 5 wurde ein gedankliches Dreieck gebildet (Dreieck oben). Ebenso wurde ein Dreieck mit den Punkten 4, 5 und 1 gebildet (Dreieck unten). An diesen Dreiecken wurden die räumlichen Schwerpunkte ermittelt und anschließend über die Flächen eine Mittelung zu einem Gesamtschwerpunkt durchgeführt. Wie im Abschnitt 3.3.1 beschrieben, muss dieser Schwerpunktsvektor mit dem Abstandsvektor summiert werden, um die Biegelinie im Nullpunkt des globalen Koordinatensystems zu erhalten. Bevor die Summe gebildet werden kann, muss der Abstandsvektor auf das globale Koordinatensystem transformiert werden. Dazu wird entweder die Drehmatrize oder alle Drehwinkel benötigt. Diese Winkel werden vereinfacht nur mit der oberen Dreiecksfläche berechnet, da der Winkelunterschied der beiden Dreiecksflächen sehr gering ist und die Winkel nur zur Umrechnung eines kleinen Abstandsvektors verwendet werden. In Spalte BA bis BC wird der Vektor V_{4-5} aufgestellt, welcher in Abbildung B.9 visualisiert ist.

In Spalte BE bis BG wurde ein weiterer Vektor V_{4-23} aufgestellt. Diese Vektoren V_{4-5} und V_{4-23} liegen in der Dreiecksebene. Durch Bildung des Kreuzproduktes erhält man einen Vektor $V_{n5} = V_a$ welcher normal auf die Ebene steht. Durch Bildung eines weiteren Kreuzproduktes aus $V_{n5} = V_a$ und $V_{4-5} = V_c$ erhält man den Vektor $V_{n4} = V_b$. Die Vektoren V_a , V_b und V_c bilden ein rechtwinkeliges Dreieck.

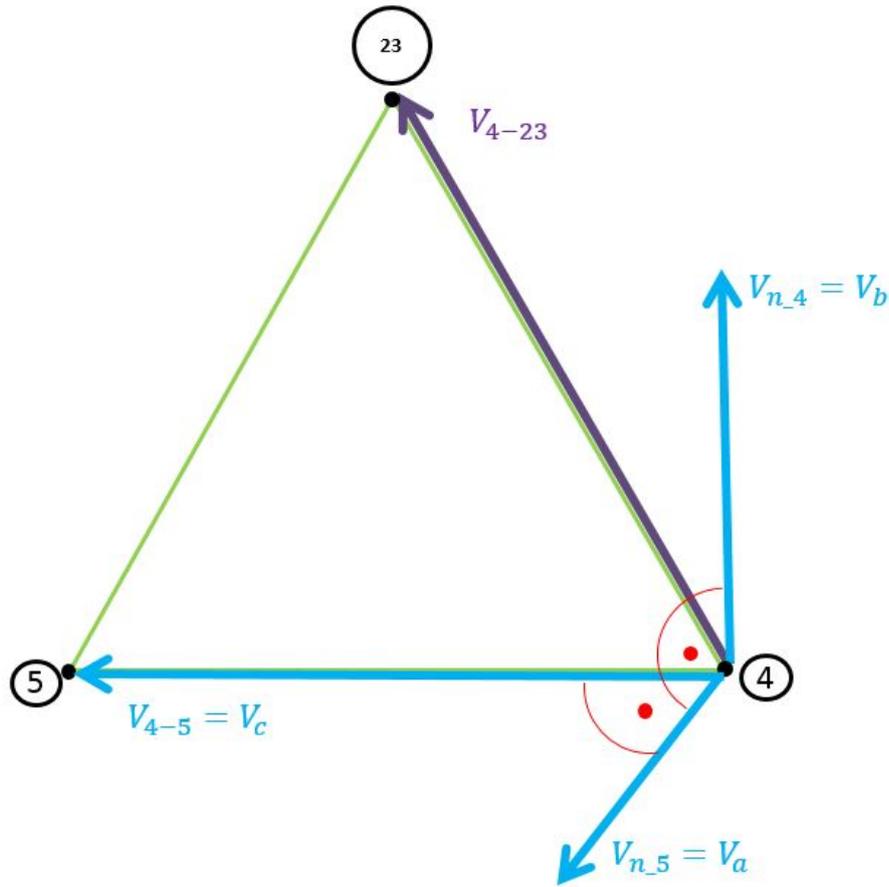


Abbildung B.9: Vektoren

Durch die Normierung (Spalte BQ bis BY) dieser drei Vektoren erhält man ein gedrehtes Koordinatensystem, welches im Abschnitt 3.3.1 bereits als gedrehtes/lokales Koordinatensystem beschrieben wurde. Aus den beiden Koordinatensystemen (lokal und global) können die Verdrehwinkel berechnet werden (Spalte CA bis CI in Abbildung B.10), wobei der Vektor V_a in die x-Koordinate, der Vektor V_b in die y-Koordinate und der Vektor V_c in die z-Koordinate überzuführen ist.

BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA	CB	CC	CD	CE	CF	CG	CH	CI																	
Normierte Vektoren									Drehwinkel																										
V_a			V_b			V_c			alpha 1			beta 1			gamma 1			alpha 2			beta 2			gamma 2			alpha 3			beta 3			gamma 3		
x	y	z	x	y	z	x	y	z	alpha 1	beta 1	gamma 1	alpha 2	beta 2	gamma 2	alpha 3	beta 3	gamma 3																		
0,998506058	-0,05462766	0,001121771	0,0546266	0,99850643	0,00089551	-0,00125982	-0,00082792	0,99999886	3,13226573	95,1314934	89,9505167	86,8685678	3,1318534	89,9486913	90,0721824	90,0474364	0,08637428																		

CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT	CU	
betrachter Punkt (Top Ebene) (im gedrehten KS)				betrachter Punkt (Top) (im normierten KS)				Vektor von Inertialsystem zu verrottem Top-Punkt			
x	y	z	0	x	y	z	0	x	y	z	
0	0	-60,3	0	-1,2938587	-60,209953	-0,05545329	0	396,38703	-135,250484	2,41378945	
				-1,29385845	-60,2099535	-0,05545329		394,48181	-135,463254	2,41378945	
								3894,34883	-135,455601	2,41362579	

Abbildung B.10: kleines Rohr Berechnung 4

In Spalte CK bis CM B.10 ist der vorhandene Abstandsvektor im lokalen Koordinatensystem aufgestellt. Dieser wurde vereinfacht trotz Verformung als konstant angenommen, wodurch bei großen Verformungen im Querschnitt ein Fehler entsteht. In Spalte CO bis CQ (Abb.B.10) ist dieser Vektor umgerechnet auf das globale Koordinatensystem ersichtlich. In Spalte CS bis CU (Abb.B.10) ist nun der gesuchte Vektor (Biegelinie) als globale Koordinate ersichtlich. Diese Biegelinie wurde aus der Summe der beiden Vektoren (verformter Schwerpunktsvektor/betrachteter Punkt (im normalen KO)) errechnet. Das Blatt ‚großes Rohr3D‘ ist nahezu ident mit dem Blatt ‚3D kleines Rohr‘ und wird daher nicht näher erklärt.

B.1.4 Blatt: Biegelinie

Dieses Tabellenblatt dient zum Auswerten der Steifigkeiten sowie zur grafischen Darstellung beider Biegelinien. In den Spalten A bis Q (Abb. B.11) wurden die errechneten Biegelinien / Winkel sowie Koordinatenangaben aus den anderen Blättern übernommen. Die tatsächliche Auswertung geschieht in den Spalten R bis AF (Abb. B.11). In den Zellen AA bis AF wird die wie oben besprochene analytische Kraft berechnet. Dazu müssen je nach Lastfall, die Kräfte eingetragen werden. Mit dem Hauptlastfaktor / Seitenlastfaktor können die Kräfte prozentuell variiert werden.

	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
V e r s c h i e b u n g			Hauptrichtung		Federsteifigkeiten					F1	617627,22 N	x1	1081,75	
			großes Rohr	Beta weg	kleines Rohr					F2	698363,0 N	x2	1861,75	
	Hinten Oben	1187,60097	-10,6160991		1190,11946	-6,77264876				F3	N	Biegeabst	868,25	
		1184,25	-10,5563525	3,94293276	1184,25	-6,61341976		-183995,0239	N/mm	Hauptlastfaktor	1,25	(=I-I)		
		1182,47903	-10,5247768		1175,9263	-6,38761107				Seitenlastfaktor	0			
	Vorne Unten	2055,7282	-28,9892768		2054,2235	-31,254628				M1	-629898016 Nmm	M_Mitte1	-664079933	
		2052,5	-28,9151954	2,28294195	2052,5	-31,1981374		352272,4238	N/mm	F_hinten_oben	-725480,006 N		-2043470,01	
		2047,04969	-28,7901204		2051,02609	-31,1498277				F_vorne_unten	804217,506 N			
										M2	0 Nmm	M_Mitte2	0	
										F_hinten_seitlich	0 N			
										F_vorne_seitlich	0			
	W i n k e l			Hauptrichtung		Federsteifigkeiten								
			großes Rohr	Beta Winkel	kleines Rohr									
Hinten Oben		1187,60097	0,95988662		1187,60097	1,55674911								
		1184,25	0,95717042	0,59712774	1184,25	1,55429816								
		1182,47903	0,955734926		1182,47903	1,55300285								
Vorne Unten		2055,7282	1,272704069		2055,7282	2,02930868								
		2052,5	1,272390133	0,75618918	2052,5	2,02857931								
		2047,04969	1,271866102		2047,04969	2,02734788								
				Mittelwert	0,67665846			-149174,1921	N/mm					
				Nebenrichtung		Federsteifigkeiten								
Hinten seitlich	1187,60097	-0,00418422		1187,60097	0,06281576									
	1184,25	-0,00420322	0,06705681	1184,25	0,06283559									
	1182,47903	-0,00421326		1182,47903	0,06287358									
Vorne seitlich	2055,7282	-0,00704783		2055,7282	0,06911628									
	2052,5	-0,00692551	0,07601164	2052,5	0,06908612									
	2047,04969	-0,00671899		2047,04969	0,06903521									

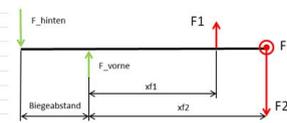


Abbildung B.11: Biegelinienblatt

In Abbildung B.11 ist die Steifigkeitsberechnung ersichtlich. Um eine Steifigkeit ermitteln zu können ist eine Kraft und ein Wegunterschied notwendig. Um den Wegunterschied der beiden Rohre zu ermitteln wurde die Koordinaten aus den Biegelinien an den Lagerstellen entnommen. Da meist kein exakter Wert an der benötigten x-Koordinate vorhanden ist, musste die jeweilige Koordinate interpoliert werden. Anschließend wurde aus den beiden Koordinaten des großen und des kleinen Rohres ein Wegunterschied gebildet (Delta-weg) (Spalte V). Dieser Vorgang wurde an beiden Lagerstellen in Hauptrichtung und Nebenrichtung durchgeführt. In Spalte Y ist die Federsteifigkeit der jeweiligen Lagerstelle in Haupt- und Nebenrichtung ersichtlich.

In den Zellen von AG bis CA sind die Biegelinien in den verschiedenen Ebenen ersichtlich.

Die beschriebene Auswertung kann in analoger Art und Weise auf unterschiedliche Lastfälle angewendet werden.

Um die Ergebnisse der unterschiedlichen Lastfälle in einem Excel zur Verfügung zu haben wurde ein weiteres Makro erstellt.

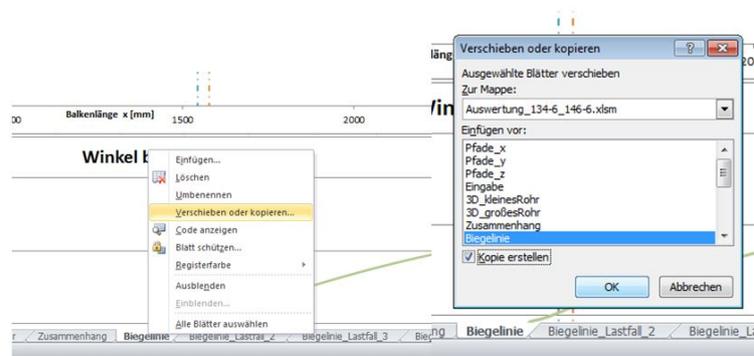


Abbildung B.12: Biegelinienblatt duplizieren

Als ersten Schritt wurde das Blatt Biegelinie dupliziert. Um diese Kopie bei Veränderung der Eingabe Daten zu behalten mussten die Referenzierungen zu den anderen Blättern entfernt werden. Dazu wurde das Makro „Blatt tot schalten“ ausgeführt. Diese Routine entfernt die Referenzen (bis zur Spalte Q) zu den anderen Blättern. Der gesamte Einlesevorgang für die Pfade x, y und z kann erneut durchgeführt werden ohne die ursprünglichen Ergebnisse (Biegelinie/Steifigkeiten) zu verlieren.

B.2 Matlab Auswertung

Der im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Vorgang in Excel wurde auch in Matlab implementiert.

Besonderes Augenmerk wurde darauf gelegt, dass mehrere Lastfälle automatisiert durchgerechnet werden können.

Steifigkeitsauswertung

In folgender Auflistung sind alle benötigten Skripte für die Steifigkeitsbestimmung mit Matlab ersichtlich:

- main.m
- fuellen_nans.m
- interp_eig.m
- Vectornormalisation.m
- Rohrdaten_to_Biegelinie.m

Die exportierten Ergebnisse aus Ansys und eine Eingabedatei wird automatisiert eingelesen, fehlende Koordinatenpunkte interpoliert und anschließend die gemittelte Biegelinien errechnet. Nachdem die Biegelinie des kleinen und des großen Rohres bekannt sind, wird mithilfe der ermittelten Kräfte auf die Steifigkeiten rückgerechnet. Dieser Vorgang wiederholt sich für alle Lastschritte. Anschließend erstellt das Programm eine Ausgabedatei, welche die unterschiedlichen Steifigkeiten sowie Kräfte der Übertragungsstellen und auch die Biegelinien ausgibt. Bei der Programmierung dieser Skripte wurde besonderes darauf geachtet Rechenzeit mittels direkter Indizierung und Vermeidung von Schleifen einzusparen. Die Eingabedateien müssen exakt dieselbe Benennung aufweisen, können jedoch je nach Anzahl der Lastfälle auch unterschiedlich viele an der Zahl sein. Das erstellte Programm reduziert die gesamte Auswertungszeit einer Rohrpaarung von 84 Minuten auf 10 Sekunden.

Spannungsauswertung

Verwendete Skripte:

- main_spannungsauswertung.m

- Berechnung_zylinderFlaeche.m
- Berechnung_ebeneFlaechen.m
- MaxWerte.m
- MinWerte.m
- round2.m
- S_lokal2Farbmatrix.m
- Visualisierung.m
- Ausgabe.m

Das Skript `main_Spannungsauswertung.m` steuert das Einlesen von Daten und startet die einzelnen Berechnungs- und Darstellungsfunktionen. Im Skript `Berechnung_ebene_Flaeche.m` und im Skript `Berechnung_ZylinderFlaeche.m` werden die im Abschnitt 5.3 vorgestellten Umrechnungsschritte durchgeführt. Die Skripte `MaxWerte.m` und `MinWerte.m` suchen auf den auszuwertenden Flächen nach den Spannungsmaxima und Spannungsminima. Die Skripte `Visualisierung.m` und `Slokal2Farbmatrix.m` sind für die Darstellung zuständig. Die Datei `Auswertung.m` erstellt aus den errechneten Werten aller Flächenbereiche eine Excel Datei, welche alle Ergebnisse inkludiert.

C

Sonstige Daten

Die Abbildung C.1 stellt einen Ladekran in zusammengelegter Stellung (Transportstellung) dar.

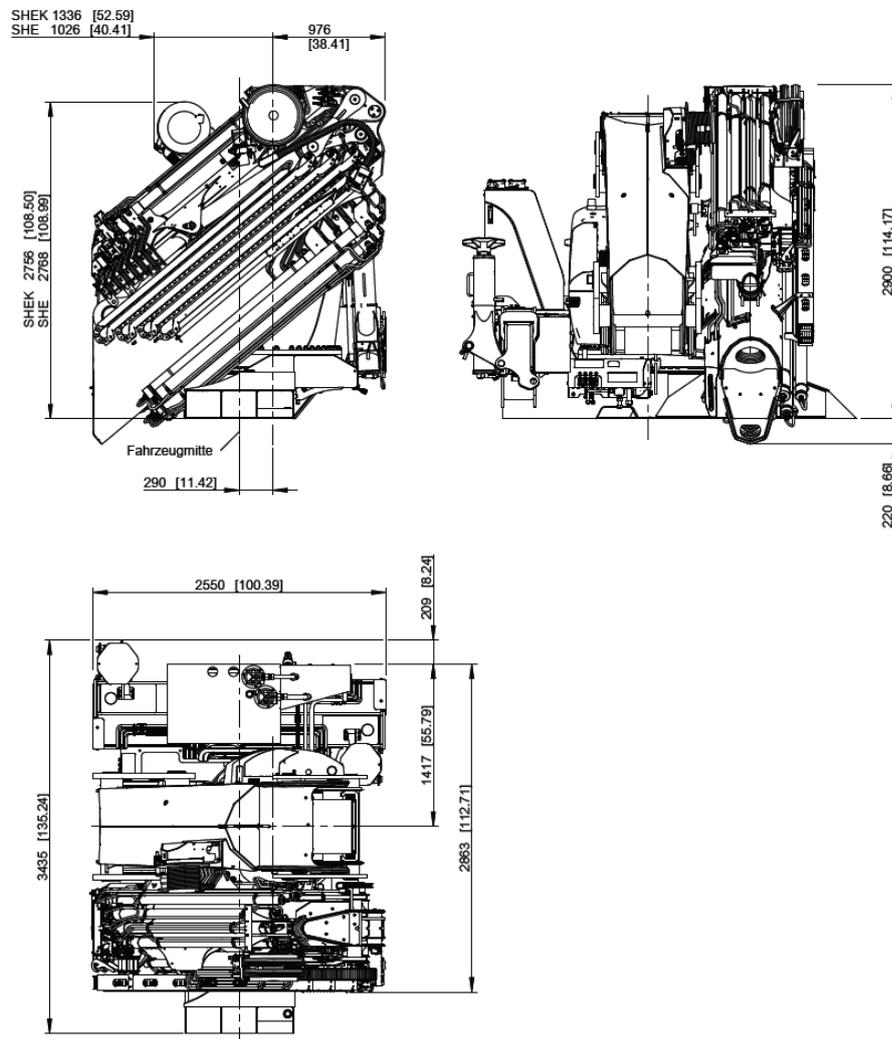


Abbildung C.1: gesamter Kran in Transportstellung [7]

In Abbildung C.2 ist ein Kran in Transportstellung auf einem Lkw ersichtlic.



Abbildung C.2: Kran aufgebaut auf einem LKW in Transportstellung [7]

Es gibt zwei unterschiedliche Endformen von Ausschubrohren, diese sind in Abbildung C.3 dargestellt.

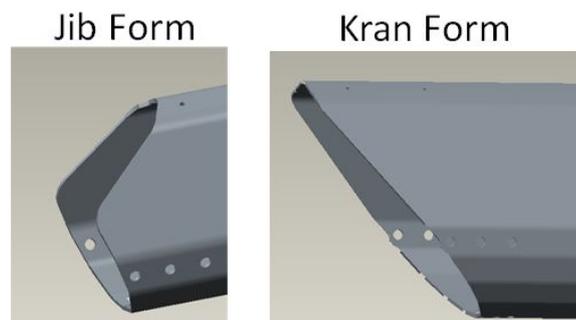


Abbildung C.3: Jib und Kran Form

Alle Rohrpaarungen

In folgender Tabelle sind alle möglichen Rohrpaarungen aufgelistet.

Tabelle C.1: Rohrpaarungen

äusseres Rohr		inneres Rohr	
P-Profil	Wandstärke	P-Profil	Wandstärke
56	3	48	3
56	4	48	3

Fortsetzung auf nächste Seite

äusseres Rohr		inneres Rohr	
P-Profil	Wandstärke	P-Profil	Wandstärke
65	3	56	3
65	4	56	3
65	3	56	4
65	4	56	4
75	3	65	3
75	4	65	3
75	5	65	3
75	3	65	4
75	4	65	4
75	5	65	4
86	4	75	3
86	5	75	3
86	4	75	4
86	5	75	4
86	4	75	5
86	5	75	5
97	4	86	4
97	5	86	4
97	4	86	5
97	5	86	5
110	4	97	4
110	5	97	4
110	6	97	4
110	4	97	5
110	5	97	5
110	6	97	5
122	4	110	4
122	5	110	4

Fortsetzung auf nächste Seite

äusseres Rohr		inneres Rohr	
P-Profil	Wandstärke	P-Profil	Wandstärke
122	6	110	4
122	4	110	5
122	5	110	5
122	6	110	5
122	4	110	6
122	5	110	6
122	6	110	6
134	4	122	4
134	5	122	4
134	6	122	4
134	4	122	5
134	5	122	5
134	6	122	5
134	4	122	6
134	5	122	6
134	6	122	6
146	4	134	4
146	5	134	4
146	6	134	4
146	4	134	5
146	5	134	5
146	6	134	5
146	4	134	6
146	5	134	6
146	6	134	6
158	4	146	4
158	5	146	4
158	6	146	4

Fortsetzung auf nächste Seite

äusseres Rohr		inneres Rohr	
P-Profil	Wandstärke	P-Profil	Wandstärke
158	7	146	4
158	4	146	5
158	5	146	5
158	6	146	5
158	7	146	5
158	4	146	6
158	5	146	6
158	6	146	6
158	7	146	6
170	5	158	4
170	6	158	4
170	7	158	4
170	5	158	5
170	6	158	5
170	7	158	5
170	5	158	6
170	6	158	6
170	7	158	6
170	5	158	7
170	6	158	7
170	7	158	7
183	5	170	5
183	6	170	5
183	7	170	5
183	5	170	6
183	6	170	6
183	7	170	6
183	5	170	7

Fortsetzung auf nächste Seite

äusseres Rohr		inneres Rohr	
P-Profil	Wandstärke	P-Profil	Wandstärke
183	6	170	7
183	7	170	7
197	5	183	5
197	6	183	5
197	7	183	5
197	5	183	6
197	6	183	6
197	7	183	6
197	5	183	7
197	6	183	7
197	7	183	7
216	6	197	5
216	7	197	5
216	6	197	6
216	7	197	6
216	6	197	7
216	7	197	7
235	6	216	6
235	7	216	6
235	6	216	7
235	7	216	7
255	6	235	6
255	7	235	6
255	6	235	7
255	7	235	7
275	6	255	6
275	7	255	6
275	6	255	7

Fortsetzung auf nächste Seite

äusseres Rohr		inneres Rohr	
P-Profil	Wandstärke	P-Profil	Wandstärke
275	7	255	7
296	6	275	6
296	7	275	6
296	6	275	7
296	7	275	7

Tabelle zu Ende

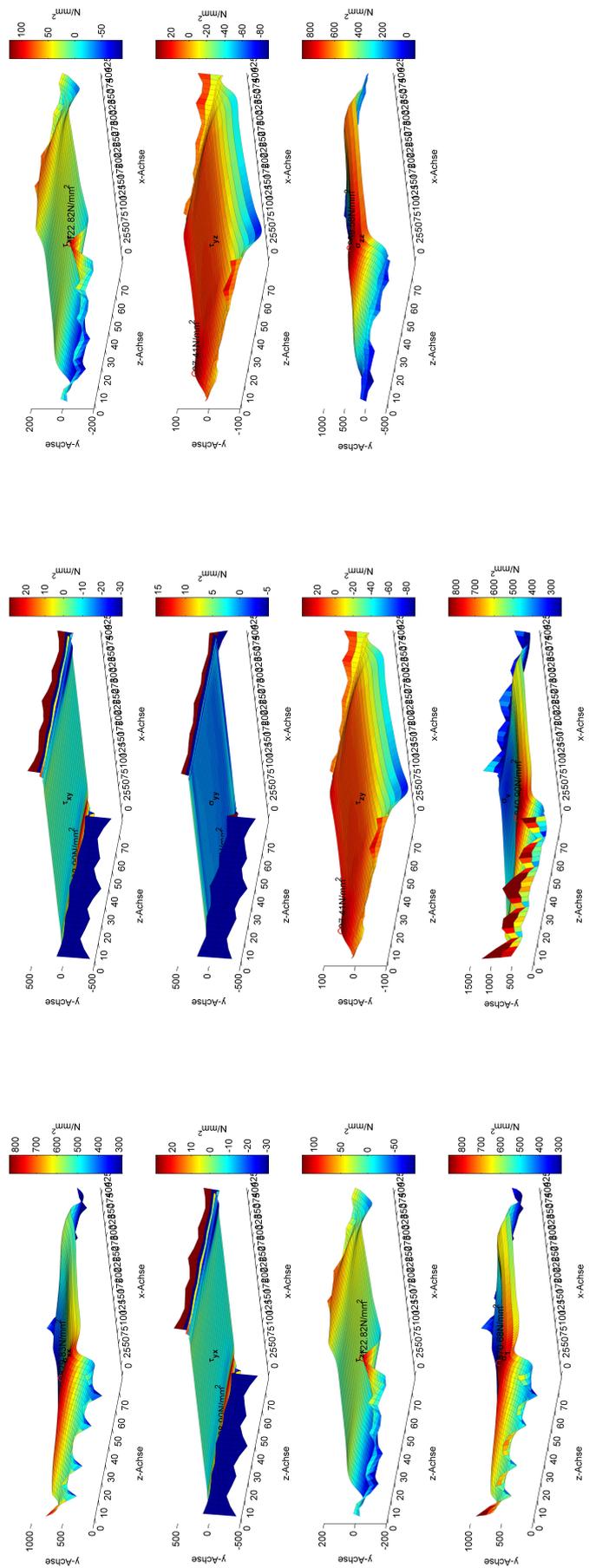


Abbildung C.4: Spannungen 3D

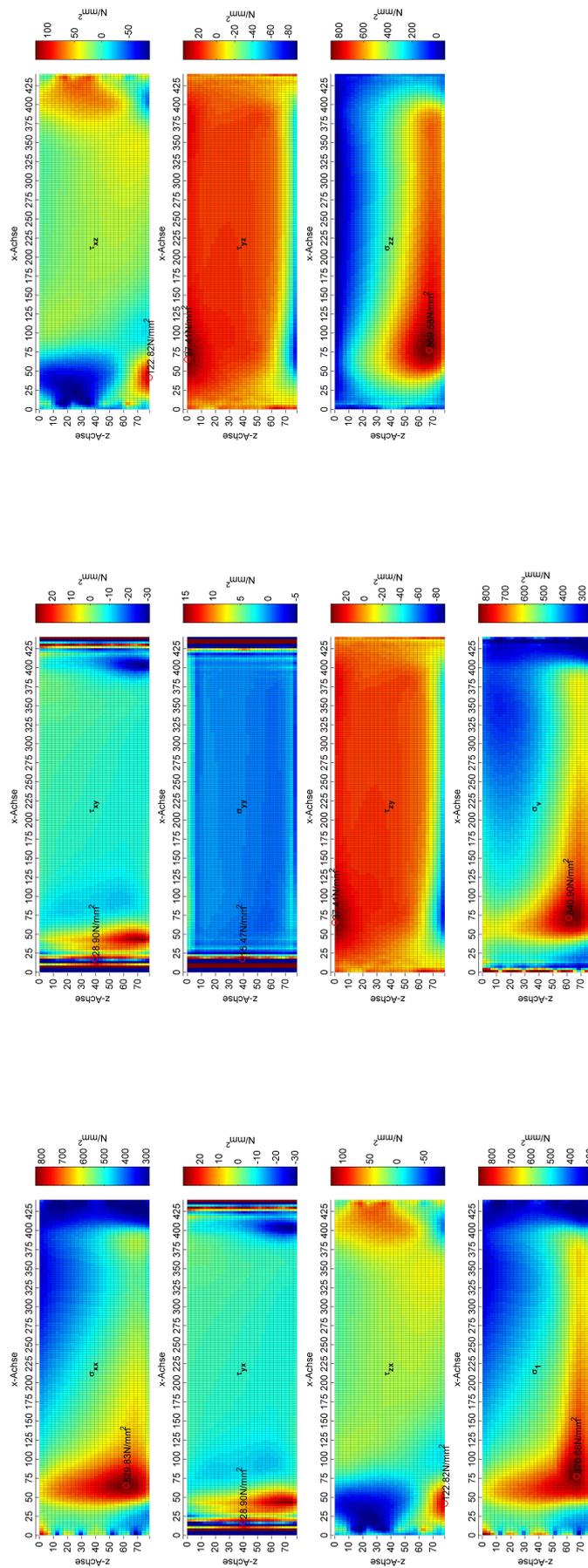


Abbildung C.5: Spannungen 2D