



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorarbeit

Jonas Jenßen

**Finite-Elemente-Analysen zum nichtlinearen Tragverhalten von  
Passfederverbindungen bei statischer Torsionsbelastung unter  
Berücksichtigung von konstruktiven Aspekten**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Jonas Jenßen**

**Finite-Elemente-Analysen zum nichtlinearen  
Tragverhalten von Passfederverbindungen bei  
statischer Torsionsbelastung unter  
Berücksichtigung von konstruktiven Aspekten**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau und Produktion  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Benjamin Kloss-Grote

Zweitprüfer/in: Prof. Dr. Georgi Kolarov

Abgabedatum: 15.11.2024

# Zusammenfassung

Jonas Jenßen

## Thema der Bachelorthesis

Finite-Elemente-Analysen zum nichtlinearen Tragverhalten von Passfederverbindungen bei statischer Torsionsbelastung unter Berücksichtigung von konstruktiven Aspekten

## Stichworte

FEA, FEM, PFV, WNV, DIN 6892, DIN 6885, Abaqus, Flächenpressung, numerische Untersuchung, nichtlinear, Wellen-Naben-Verbindung, Passfederverbindung, Passfeder

## Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst numerische Analysen mit der CAE-Software Abaqus an einer praxisüblichen Passfederverbindung nach DIN 6885. Hierbei wird die fachgemäße Konstruktion einer Passfederverbindung vorgestellt und analytische Untersuchungen der Verbindung mit den Berechnungsmethoden B und C der DIN 6892 durchgeführt. Die Vorgehensweise zur Erstellung eines numerisch funktionsfähigen Finite-Elemente-Modells einer Passfederverbindung wird visualisiert und erläutert. Darauf aufbauend erfolgen diverse numerische Berechnungen mit variierten Einstellungen des Finite-Elemente-Modells. Die erzeugten numerischen Ergebnisse werden analysiert und abschließend in einer Schlussbetrachtung zusammengefasst. Zusätzlich wird die untersuchte Passfederverbindung für die Herstellung von 3D-Druck-Lehrmodellen genutzt. Hierbei werden neben der richtig konstruierten Verbindung auch Passfederverbindungen mit typischen Gestaltungsfehlern hergestellt.

Jonas Jenßen

## Title of the paper

Finite element analyses of the nonlinear load-bearing behavior of parallel key connections under static torsional loading, with constructive considerations

## Keywords

FEA, FEM, PFV, WNV, DIN 6892, DIN 6885, Abaqus, Surface Pressure, numerical analysis, non-linear, Shaft-hub-connection, Feather-key-connection, Feather-key

## Abstract

This report includes numerical analyses with the CAE software Abaqus on a standard feather key connection according to DIN 6885. The professional design of a keyway connection is presented and analytical investigations of the connection are carried out using calculation methods B and C of DIN 6892. The procedure for creating a numerically functional finite element model of a keyway connection is visualized and explained. Based on this, various numerical calculations are carried out with varied settings of the finite element model. The numerical results generated are analyzed and finally summarized in a conclusion. In addition, the investigated feather key connection is used for the production of 3D printed models. In addition to the correctly designed connection, parallel key connections with typical design errors are also produced.

## Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen zu Passfederverbindungen .....	2
1.1	Die Passfederverbindung als Welle-Nabe-Verbindungen.....	2
1.2	Ausführungen von Passfederverbindungen nach DIN 6885 .....	4
1.3	Untersuchungsverfahren der Passfederverbindung nach DIN 6892.....	5
1.3.1	Verfahren nach Methode C .....	7
1.3.2	Verfahren nach Methode B .....	10
1.4	Verfahren nach Methode A .....	14
2	Gestaltung einer Passfederverbindung.....	18
2.1	Analytische Untersuchung der Passfederverbindung .....	21
2.1.1	Untersuchung nach Methode C.....	22
2.1.2	Untersuchung nach Methode B .....	23
3	Erstellung eines FE-Modells der Passfederverbindung .....	25
3.1	Pre-Processing Ausgangsmodell .....	25
3.2	Vorgehensweise bei der FE-Auswertung .....	34
3.3	Agangsmodell [2-AM]-Post-Processing .....	39
4	Optimierung der FE-PFV .....	46
4.1	Entfernung der Fasen aus dem PF-Flankenkontakt und Erhöhung des Reibwertes..	47
4.1.1	[2.1-2.2]-Post-Processing.....	48
4.2	Nutzung einer weicheren Kontakteinstellung.....	57
4.2.1	[2.3-2.5]-Post-Processing.....	58
4.3	Rückführung der Fasen in die PF-Flankenkontaktpaarungen.....	67

4.3.1	[2.6]-Post-Processing .....	67
4.4	Schlussbetrachtung der FE-Ergebnisse .....	74
4.4.1	Bewertung der Modellverformung .....	74
4.4.2	Quantitative Bewertung der Flächenpressung .....	75
4.4.3	Qualitative Bewertung der Flächenpressung .....	76
4.4.4	Konvergenz der Flächenpressung .....	78
5	Herstellung von 3D-Druck-Lerhmodellen .....	79
6	Zusammenfassung und Fazit .....	82
7	Literatur .....	84
8	Anhang .....	86

## Nomenklatur

Zeichen	Einheit	Beschreibung
b	mm	Passfederbreite
d	mm	Kleiner Wellenabsatz/ Fügedurchmesser der Welle
D	mm	Abgesetzter Nabendurchmesser
D <sub>W</sub>	mm	Abgesetzter Wellendurchmesser
E	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul
f <sub>L</sub>	/	Lastspitzenhäufigkeitsfaktor
h	mm	Passfederhöhe
h <sub>tr</sub>	mm	Tragende Nuttiefe
K <sub>A</sub>	/	Anwendungsfaktor
K <sub>R</sub>	/	Reibschlussfaktor
K <sub>λ</sub>	/	Lastverteilungsfaktor
l <sub>PF</sub>	mm	Passfederlänge
l <sub>tr</sub>	mm	Tragende Länge der Passfeder
M <sub>teq</sub>	Nm	Äquivalentes Torsionsmoment
M <sub>tmax</sub>	Nm	Lastspitzen-torsionsmoment
M <sub>tenn</sub>	Nm	Nenn-torsionsmoment
n	/	Passfederanzahl
N <sub>L</sub>	/	Lastspitzenhäufigkeit
p	N/mm <sup>2</sup>	Numerisch bestimmte Flächenpressung
p <sub>m</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Mittlere Flächenpressung
p <sub>max</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Maximale Flächenpressung
p <sub>zul</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Zulässige Flächenpressung
r <sub>1</sub>	mm	Rundung an der Passfeder
R <sub>e</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Streckgrenze
R <sub>emin</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Kleinste Streckgrenze Nabe/Welle
R <sub>m</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit
R <sub>p02</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Dehngrenze
s <sub>1</sub>	mm	45°-Fase an der Wellennutkante
s <sub>2</sub>	mm	45°-Fase an der Nabennutkante
S <sub>F</sub>	/	Sicherheitsfaktor gegen das Überschreiten der Streckgrenze
t <sub>1</sub>	mm	Wellennuttiefe
t <sub>2</sub>	mm	Nabennuttiefe
u <sub>t</sub>	mm	Tangentiale Verschiebung
ν	/	Querkontraktionszahl
ρ	kg/mm <sup>3</sup>	Materialdichte
φ	/	Tragfaktor

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
AM	Ausgangsmodell
FE	Finite-Elemente
KVG	Konvergenz
MB	Methode B (n. DIN 6892)
MC	Methode C (n. DIN 6892)
MF/ OF	Mit bzw. ohne Fasen
PF	Passfeder
PFV	Passfederverbindung
SSF	Stiffness scale factor
WNV	Welle-Nabe-Verbindung

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unterteilung der WNV nach ihren Wirkprinzipien .....	2
Abbildung 2: PFV-Explosionsansicht .....	3
Abbildung 3: Passfederformen [KdesM-23] .....	4
Abbildung 4: Nutformen für Wellen [DIN 6885] .....	4
Abbildung 5: Bezeichnungen an einer Passfederverbindung [FbrgF-06], [DIN 6885].....	6
Abbildung 6: Gleichmäßige Verteilung der Flächenpressung [MilO-75] .....	7
Abbildung 7: Geometrische Größen der Methode C [DIN 6892] .....	8
Abbildung 8: Geometrie der PFV nach Methode B [RM-23].....	10
Abbildung 9: Bestimmung des Lastverteilungsfaktors [RM-23] -TB 12-2 c).....	12
Abbildung 10: Formen der Lastein- bzw. -ableitung [RM-23] .....	12
Abbildung 11: Flächenpressungsverlauf nach Militzer [MilO-75].....	14
Abbildung 12: Belastungsvorrichtung für spannungsoptische Untersuchungen [MilO-75].....	15
Abbildung 13: Belastungsvorrichtung für Umlaufbiegung mit statischer Torsion [FbrgF-06].....	16
Abbildung 14: : Forbrigs FE-Modell mit bezogenen Auswertekoordinaten [FbrgF-06].....	16
Abbildung 15: FE-Ergebnisse von Forbrig bei statischer Torsion [FbrgF-06] .....	17
Abbildung 16: Wellengeometrie (Nicht maßstabsgerecht) .....	18
Abbildung 17: Passfederlängen nach DIN 6885-1 [RM-23] -TB 12-2 a).....	19
Abbildung 18: Nabengeometrie (Nicht maßstabsgerecht).....	19
Abbildung 19: PFV-Übersicht (nicht maßstabsgerecht) .....	20
Abbildung 20: FE-PFV Assembly (Explosionsansicht).....	25
Abbildung 21: FE-Netz der Welle .....	26
Abbildung 22: FE-Netz der Nabe .....	27

Abbildung 23: FE-Netz der Passfeder .....	27
Abbildung 24: Mechanisches Modell V1 der PFV .....	28
Abbildung 25: Zwangsbedingung zwischen der Wellenschnittfläche und Referenzpunkt.....	29
Abbildung 26: Flächenpaarungen 'Stahlkontakt' .....	30
Abbildung 27: Verhalten der Flächenpressung bei einem 'Hard Contact' auf Standardeinstellungen [MIT-117].....	31
Abbildung 28: Flächenpaarungen 'Passfederflankenkontakt' .....	32
Abbildung 29: FE-Ergebnisse von Forbrig bei statischer Torsion [FbrgF-06] .....	34
Abbildung 30: Bezogene Auswertekoordinaten von Forbrigs FE-Ergebnissen [FbrgF-06] .....	35
Abbildung 31: Vereinfachte Verteilung der Flächenpressung.....	35
Abbildung 32: Pfade in FEM an der Welle .....	36
Abbildung 33: Pfade in FEM an der Nabe .....	36
Abbildung 34: Grundlegende Diagrammstruktur .....	37
Abbildung 35: [2-AM]-PF-Verformungsfigur .....	39
Abbildung 36: [2-AM]-Verformung der belasteten Nutflanken .....	39
Abbildung 37: [2-AM]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke.....	41
Abbildung 38: [2-AM]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke .....	43
Abbildung 39: Mechanisches Modell V2 der PFV .....	47
Abbildung 40: [2.1-2.2]-PF-Verformungsfigur .....	48
Abbildung 41: [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Verformung der belasteten Nutflanken .....	48
Abbildung 42: [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke .....	50
Abbildung 43: [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke .....	51

Abbildung 44: [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke .....	53
Abbildung 45: [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke .....	54
Abbildung 46: Verhalten der Flächenpressung bei einem linearem „softened contact“ [MIT-217] .....	57
Abbildung 47: [2.3-2.5]-PF-Verformungsfigur .....	58
Abbildung 48: [2.3] u. [2.5]-Verformung der belasteten Nutflanken .....	59
Abbildung 49: [2.3-2.5]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke .....	61
Abbildung 50: [2.3-2.5]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke .....	63
Abbildung 51: [2.5-2.6]-PF-Verformungsfigur .....	67
Abbildung 52: [2.6]-Verformung der belasteten Nutflanken.....	68
Abbildung 53: [2.5-2.6]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke .....	69
Abbildung 54: [2.5-2.6]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke .....	71
Abbildung 55: Vergleich der PF-Kippfiguren [FrbgF-06].....	74
Abbildung 56: Grundsätzlicher Aufbau der 3D-Druck-Lehrmodelle .....	79
Abbildung 57: Gestaltungsfehler 1 'Wellennut in Nabe' .....	80
Abbildung 58: Gestaltungsfehler 2 'Einseitige Nabennut zum Wellenabsatz' .....	80
Abbildung 59: Gestaltungsfehler 3 'Einseitige Nabennut zum Wellenende'.....	81
Abbildung 60: Gestaltungsfehler 4 'Nabe ohne Montagefase' .....	81

## Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: [2-AM]-Tangentiale Verschiebung der belasteten Nutkanten.....	40
Diagramm 2: [2-AM]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennuthöhe .....	42
Diagramm 3: [2-AM]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennutlänge .....	42
Diagramm 4: [2-AM]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennuthöhe .....	44
Diagramm 5: [2-AM]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennutlänge .....	44
Diagramm 6: [2-AM]-Konvergenzprüfung der Flächenpressung .....	45
Diagramm 7: [2.1-2.2]-Tangentiale Verschiebung der belasteten Nutkanten .....	49
Diagramm 8: [2.1-2.2]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennuthöhe ....	52
Diagramm 9: [2.1-2.2]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennutlänge ...	52
Diagramm 10: [2.1-2.2]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennuthöhe...	54
Diagramm 11: [2.1-2.2]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennutlänge ..	55
Diagramm 12: [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Konvergenzprüfung der Flächenpressung.....	56
Diagramm 13: [2.3-2.5]-Tangentiale Verschiebung der belasteten Wellennutkante .....	60
Diagramm 14: [2.3-2.5]-Tangentiale Verschiebung der belasteten Nabennutkante .....	60
Diagramm 15: [2.3-2.5]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennuthöhe ..	62
Diagramm 16: [2.3-2.5]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennutlänge..	62
Diagramm 17: [2.3-2.5]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennuthöhe...	64
Diagramm 18: [2.3-2.5]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennutlänge..	64
Diagramm 19: [2.3-2.5]-Konvergenzprüfung der Flächenpressung.....	65
Diagramm 20: [2.5-2.6]-Tangentiale Verschiebung der belasteten Nutkanten .....	68
Diagramm 21: [2.5-2.6]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennuthöhe ..	70
Diagramm 22: [2.5-2.6]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennutlänge..	70

Diagramm 23: [2.5-2.6]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennuthöhe...	72
Diagramm 24: [2.5-2.6]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennutlänge..	72
Diagramm 25: [2.5-2.6]-Konvergenzprüfung der Flächenpressung.....	73
Diagramm 26: Betragsänderung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke .....	75
Diagramm 27: Betragsänderung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke .....	76
Diagramm 28: Verlauf der Flächenpressung an den höchstbelasteten Pfaden entlang $l_{tr}$ in der Welle .....	77
Diagramm 29: Verlauf der Flächenpressung an den höchstbelasteten Pfaden entlang $l_{tr}$ in der Nabe .....	77

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sicherheitsfaktoren für die zulässige Flächenpressung [RM-23]-TB 12-1 b) .....	9
Tabelle 2: Eingangsgrößen für eine analytische Untersuchung n. DIN 6892 .....	21
Tabelle 3: Analytische bestimmte Flächenpressungen nach DIN 6892.....	24
Tabelle 4: Reibungszahlen [RM-23] -TB 4-1 a).....	30
Tabelle 5: FE-Berechnungsschritte.....	33
Tabelle 6: FE-Berechnungsstruktur .....	46
Tabelle 7: Konvergenzeinschätzung der Flächenpressung in den tragenden Nutflanken .....	78

## Einleitung

Die Passfederverbindung (kurz PFV) wird im Bereich der Antriebstechnik zur Drehmomentübertragung als Welle-Nabe-Verbindung (kurz WNV) eingesetzt. In der Lehrveranstaltung Konstruktion A wird die überschlägige Dimensionierung von Passfedern nach Methode C der DIN 6892 gelehrt, welche von einer konstanten Beanspruchung in Form einer nominellen, mittleren Flächenpressung innerhalb der Verbindung ausgeht. Jedoch konnte in diversen Arbeiten nachgewiesen werden, dass eine gleichmäßig verteilte Flächenpressung nicht den realen Bedingungen entspricht. Die Verteilung der Flächenpressung innerhalb der PFV bildet den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. Hierfür wird ein Finite-Elemente-Modell (kurz FE) einer PFV unter statischer Torsionsbelastung mit der CAE-Software Abaqus entwickelt. Ziel der Arbeit ist die Erzeugung eines funktionierenden Simulationsmodells, welches sowohl qualitativ als auch quantitativ akkurate Ergebnisse liefert. Hierfür erfolgt im ersten Abschnitt eine generelle Einführung der Passfederverbindung in Form einer Einordnung in die WNV sowie dessen Ausführung nach DIN 6885. Daran anknüpfend werden die Untersuchungsmethoden für PFV nach DIN 6892 vorgestellt. Mit diesen Kenntnissen erfolgt die Gestaltung einer PFV. Hierbei fließen zum einen die bis dahin vermittelten Kenntnisse dieser Arbeit sowie Gestaltungshinweise zu Wellen und Achsen sowie Passfederverbindungen der Lehrveranstaltung Konstruktion A ein. Daran anknüpfend erfolgt eine Untersuchung der PFV nach den Berechnungsmethoden B und C der DIN 6892. Mit der Gestaltung und Untersuchung des gewählten Anwendungsbeispiels soll dem Leser die Entwicklung einer PFV nähergebracht werden. Damit kann im darauffolgenden Abschnitt der grundsätzliche Aufbau eines numerisch funktionierenden FE-Modells einer PFV schrittweise erläutert werden. Hierfür wird die Geometrie des Anwendungsbeispiels genutzt. Das FE-Modell muss auf die gewünschten Ergebnisse abgestimmt werden. Hierfür erfolgt im nachfolgenden Abschnitt eine iterative Optimierung des FE-Modells mit diversen Berechnungen. Für die Bewertung der FE-Ergebnisse werden zum einen die Ergebnisse der analytischen Berechnungsmethoden nach DIN 6892 und zum anderen die numerischen Ergebnisse von Forbrig [FrbrgF-06] herangezogen. Der Entwicklungsverlauf des FE-Modells wird in Form einer Power-Point-Präsentation dokumentiert und dieser Arbeit angehängt. Ein weiteres Produkt dieser Arbeit bildet die Herstellung von 3D-Druck-Lehrmodellen von richtig und falsch konstruierten Passfederverbindungen. Die Herstellung der 3D-Druckmodelle erfolgt in Zusammenarbeit mit dem 3D-Space der HAW-Hamburg.

Die Arbeit umfasst ausschließlich statische Analysen an einer Passfederverbindung. Entsprechend erfolgen keine Untersuchungen hinsichtlich der Gestaltfestigkeit.

# 1 Grundlagen zu Passfederverbindungen

## 1.1 Die Passfederverbindung als Welle-Nabe-Verbindungen

Zusammen mit Wellen und Rädern, gehören WNV zu den historisch ältesten Maschinenelementen. Diese haben seit jeher eine Hauptfunktion: Das Übertragen von Drehmomenten von der Welle auf die Nabe oder umgekehrt. Dabei können die etablierten WNV gemäß Abbildung 1 nach ihrem Wirkprinzip der Kraftübertragung gegliedert werden.

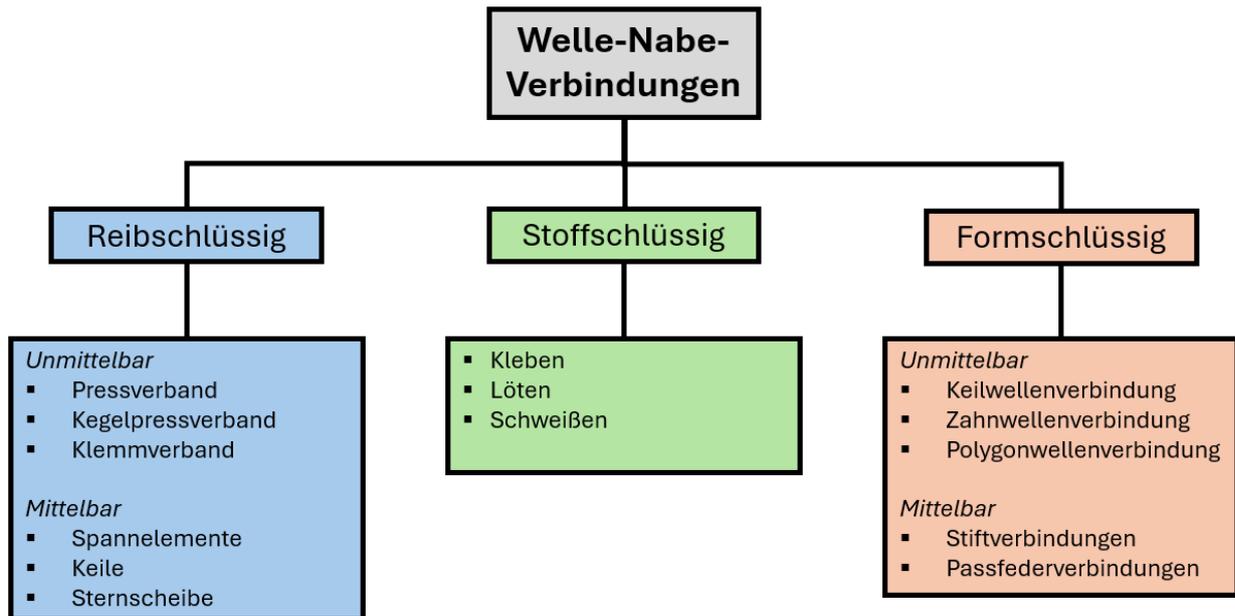
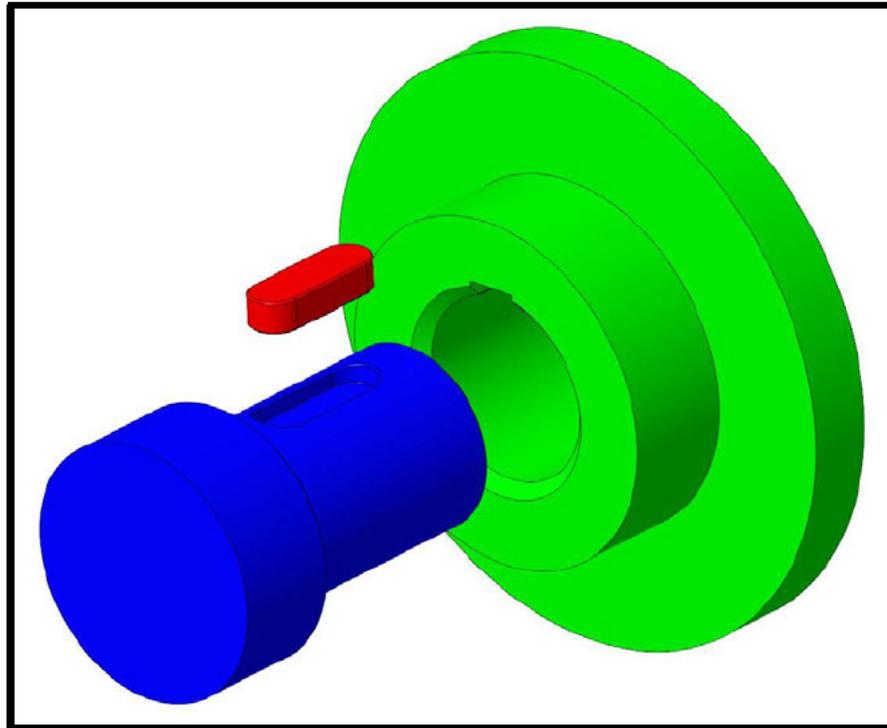


Abbildung 1: Unterteilung der WNV nach ihren Wirkprinzipien

Des Weiteren kann eine Unterscheidung hinsichtlich der Drehmomentübertragung mit und ohne Zwischenglied (mittelbar bzw. unmittelbar) erfolgen. Bei kraftschlüssigen WNV erfolgt die Drehmomentübertragung durch Reibungskräfte. Gemäß dem Coulombschen Reibungsgesetz, wirken die Kräfte tangential zu den konischen und zylindrischen Wirkflächenpaaren der WNV. Dies wird durch das Aufpressen oder Verkleben der Nabe auf die Welle realisiert. Mit stoffschlüssigen WNV wird eine materielle Verbindung zwischen Welle und Nabe mittels Kleben, Löten oder Schweißen erzeugt. Diese Verbindungen können in der Regel nicht zerstörungsfrei gelöst werden. Die Drehmomentübertragung bei formschlüssigen WNV erfolgt mittels Normalkräften zwischen Wirkflächenpaaren, die durch ihre Formgebung realisiert werden. Formschlüssige WNV werden mit Spiel- oder Übergangspassungen gefügt, wodurch ihre Montage und Demontage erleichtert werden und sich gleichzeitig eine nahezu spannungsfreie Verbindung im montierten Zustand ergibt. Gleichzeitig hat dies die Folge, dass mit ihnen ohne zusätzliche axiale Sicherungsmittel lediglich Umfangskräfte übertragen werden können.

Den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit bildet die Passfederverbindung. Die PFV ist eine mittelbare formschlüssige Verbindung, die sich aus den drei Komponenten Welle, Nabe und der Passfeder (kurz PF) zusammensetzt (s. Abbildung 2):



*Abbildung 2: PFV-Explosionsansicht*

Die Verbindung ist mittelbar, da die Passfeder das Drehmoment als Zusatzelement von der Welle in die Nabe (oder umgekehrt) leitet. Hierbei kommen in der Regel nur eine, in Sonderfällen auch mehrere Passfedern zum Einsatz. Was die Passfederverbindung wirtschaftlich attraktiv macht, ist die einfache Mon- und Demontage der Verbindung. Bei einem Austausch der Passfeder muss die Nabe von der Welle demontiert und die alte Passfeder aus der Wellennut entfernt werden. Anschließend kann eine neue Passfeder, als kostengünstiges Zukaufteil, in die Wellennut eingesetzt werden. Da diese Verbindungen mit Spiel- oder Übergangspassungen toleriert werden, ist hierbei ggf. kein großer Aufwand nötig. Passfederverbindungen, die mit einer Presspassung gefügt werden, gelten als hybride Verbindungen, da hier das Drehmoment sowohl reibschlüssig als auch formschlüssig übertragen wird. Als Passfederwerkstoff wird der Baustahl E295 GC+C für normale Ansprüche eingesetzt. Passfederverbindungen eignen sich vor allem für einseitig wirkende Drehmomente, wie es z.B. bei Riemenscheiben, Zahnrädern oder Kupplungen der Fall ist [KdesM-23] [Masch1-15].

## 1.2 Ausführungen von Passfederverbindungen nach DIN 6885

In der DIN 6885 sind die Maße und Toleranzen verschiedener PFV-Ausführungen genormt. In der folgenden Abbildung 3 werden die verschiedenen Passfederformen dargestellt.

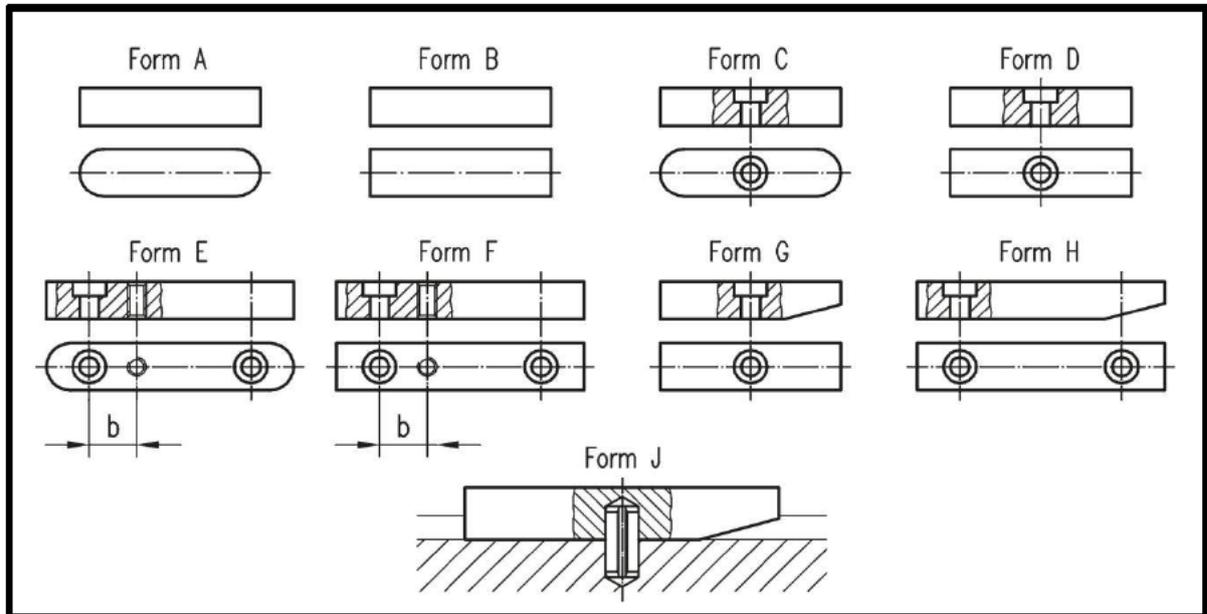


Abbildung 3: Passfederformen [KdesM-23]

Rundstirnige Passfedern der Form A kommen in der Praxis am häufigsten zum Einsatz. Die Formen C-J werden mit Schrauben in der Passfedernut gesichert. Hierzu muss die Welle mit einer Querbohrung versehen werden. Zusätzlich sind die Formen G-J mit Aushebeschrägen als Demontagehilfe ausgestattet. Darüber hinaus existieren kombinierte Passfederformen, wie die Form AB, die jeweils ein geradstirniges und ein rundstirniges Ende besitzen. Die DIN 6885 unterscheidet außerdem zwischen den in der Abbildung 4 gezeigten Formen für die Passfedernut [Masch1-15].

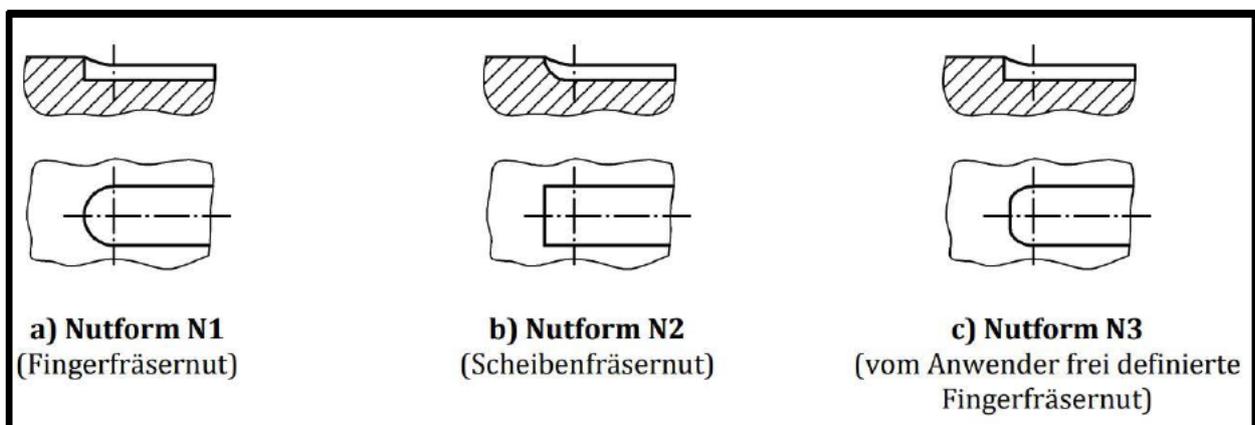


Abbildung 4: Nutformen für Wellen [DIN 6885]

Bei den klassischen Ausführungen der Passfedernut N1 und N2 erfolgt die Unterteilung hinsichtlich des eingesetzten Fräsverfahrens bzw. des eingesetzten Fräswerkzeugs. Die Variante N3 beschreibt eine Fingerfräsernut dessen Form der Nutzer selbst definiert. Darüber hinaus gibt die DIN 6885 Hinweise zur Ausführung von Bohrungen sowie Rundungen und Kantenbrechungen. Die Abmessungen der Passfeder sowie der Passfedernut sind dabei vom Wellenfügedurchmesser abhängig [DIN 6885].

### 1.3 Untersuchungsverfahren der Passfederverbindung nach DIN 6892

Die Berechnungen von Passfederverbindungen erfolgen nach der DIN-Norm 6892. Je nach gewünschter Genauigkeit sieht die Norm für den Festigkeitsnachweis die Untersuchungsverfahren nach den Methoden A, B und C vor.

- Die Methode A bildet das aufwendigste und genaueste Verfahren. Hierbei wird ein experimenteller Festigkeitsnachweis unter Betriebsbedingungen durchgeführt, um Ermüdungserscheinungen wie Schwingungsverschleiß in der PFV zu erfassen. Alternativ kann auch die komplette PFV rechnerisch auf ihre Beanspruchungen untersucht werden. Für die Methode A existiert bisher noch keine allgemeingültige Vorgehensweise.
- Die Methode B (kurz MB) ist ein hinreichend genaues Verfahren zur rechnerischen Erfassung der wirkenden Flächenpressung in der PFV. Dieses Berechnungsverfahren berücksichtigt mit Faktoren die inhomogene Lasterverteilung in der PFV. Außerdem sieht diese Methode einen Tragfähigkeitsnachweis der Welle nach DIN 743 vor.
- Methode C (kurz MC) sieht einen überschlägigen Nachweis vor die von einer konstanten Flächenpressung innerhalb der PFV ausgeht. Dieses vergleichsweise schnelle Verfahren eignet sich vor allem für Entwurfsberechnungen.

Während die Methode A experimentelle und numerische Analysen vorsieht, bilden die Methoden B und C einen analytischen Berechnungsstandard. Das Beurteilungskriterium der Nachweise nach Methode B und C bildet die wirkende Flächenpressung in der Passfedernut der Welle bzw. der Nabe. Hierzu werden in Abbildung 5 die verwendeten Bezeichnungen an einer PFV dargestellt:

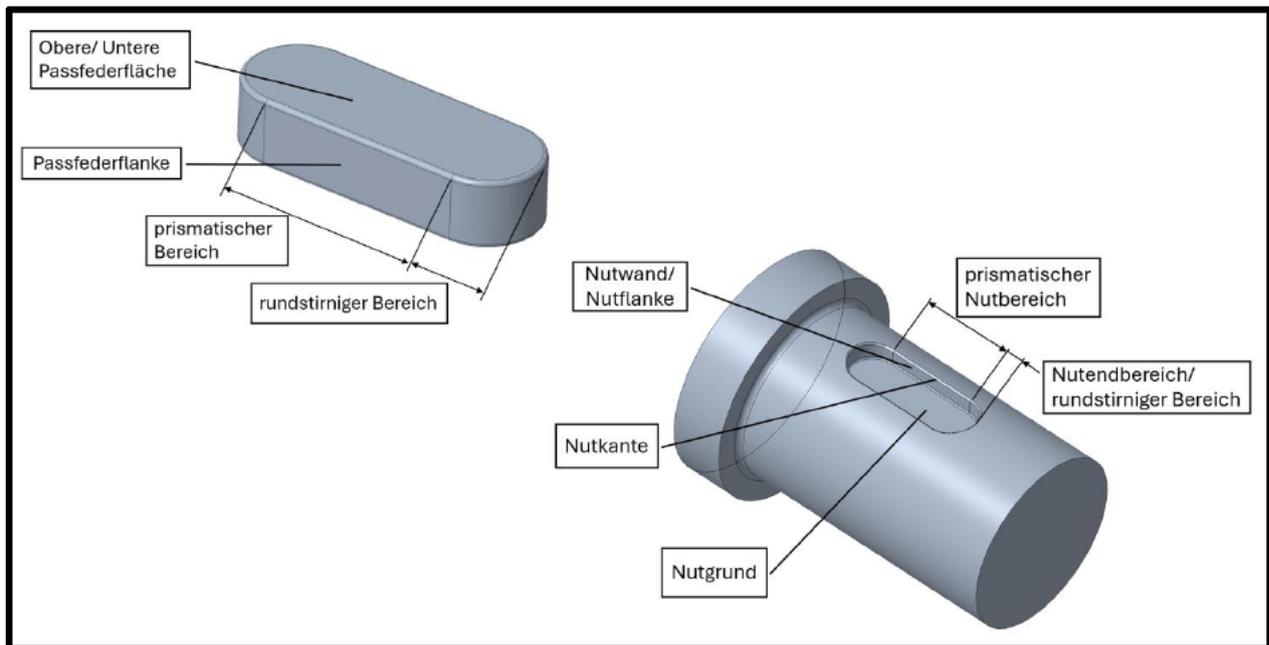


Abbildung 5: Bezeichnungen an einer Passfederverbindung [FbrgF-06], [DIN 6885]

Hierbei werden die Bezeichnungen aus der Arbeit von Forbrig und der DIN 6885 herangezogen. Der Untersuchungsbereich bildet dabei die tragende Nutflanke im prismatischen Nutbereich der jeweiligen Komponente. Bis auf den rundstirnigen Nutendbereich, können die Bezeichnungen an der Wellennut analog auf die Nut der Passfedernabe übertragen werden. Die Scherbeanspruchung der Passfeder ist bei Normabmessungen unkritisch und wird in der DIN 6892 nicht berücksichtigt.

Der Festigkeitsnachweis einer PFV erfordert Kenntnisse über das zu übertragende Drehmoment  $M_t$ . Zusammen mit dem Anwendungsfaktor  $K_A$  bildet sich das äquivalente Torsionsmoment  $M_{teq}$ , welches zur Ermittlung der Flächenpressung genutzt wird:

$$M_{teq} = K_A \cdot M_t \quad (1.1)$$

Die Werte für den Anwendungsfaktor  $K_A$  berücksichtigen das Verhalten des Torsionsmomentes, in Abhängigkeit der Betriebsverhältnisse und können aus der DIN 6892 entnommen werden. Bei Sonderereignissen, die zu Lastspitzen im Betrieb führen, kann in der Gleichung (1.7) das äquivalente Torsionsmoment  $M_{teq}$  durch das Spitzentorsionsmoment  $M_{tmax}$  ersetzt werden. Diese Lastspitzen übersteigen das äquivalente Torsionsmoment und können durch Anfahrstöße und Notbremsungen verursacht werden. Die Berechnungen nach den Methoden B und C sind für eine Passfederanzahl  $n \leq 2$  gültig [KdesM-23] [Masch1-15] [DIN 6892].

In den kommenden Abschnitten werden die Methoden B und C, wie sie im Roloff/Matek [RM-23] behandelt werden, näher vorgestellt. Aus didaktischen Gründen wird zuerst die vereinfachte MC und darauf aufbauend die MB behandelt. Die im Folgenden vorgestellten Berechnungsvorschriften gehen von einer PFV, bestehend aus einer rundstirnigen Passfeder (Form A, C, E) sowie von einer Spiel- bzw. Übergangspassung zwischen Welle und Nabe bei einer rein statischen Torsionsbelastung aus.

### 1.3.1 Verfahren nach Methode C

Die vereinfachte Methode C kann zur überschlägigen Dimensionierung von Passfederverbindungen genutzt werden. Bei diesem Verfahren wird das Bauteil mit der niedrigeren Festigkeit untersucht, welches in der Regel die Nabe ist. Hierbei wird von einer gleichmäßig verteilten bzw. mittleren Flächenpressung in der belasteten Nutflanke der Welle bzw. der Nabe ausgegangen (s. Abbildung 6):

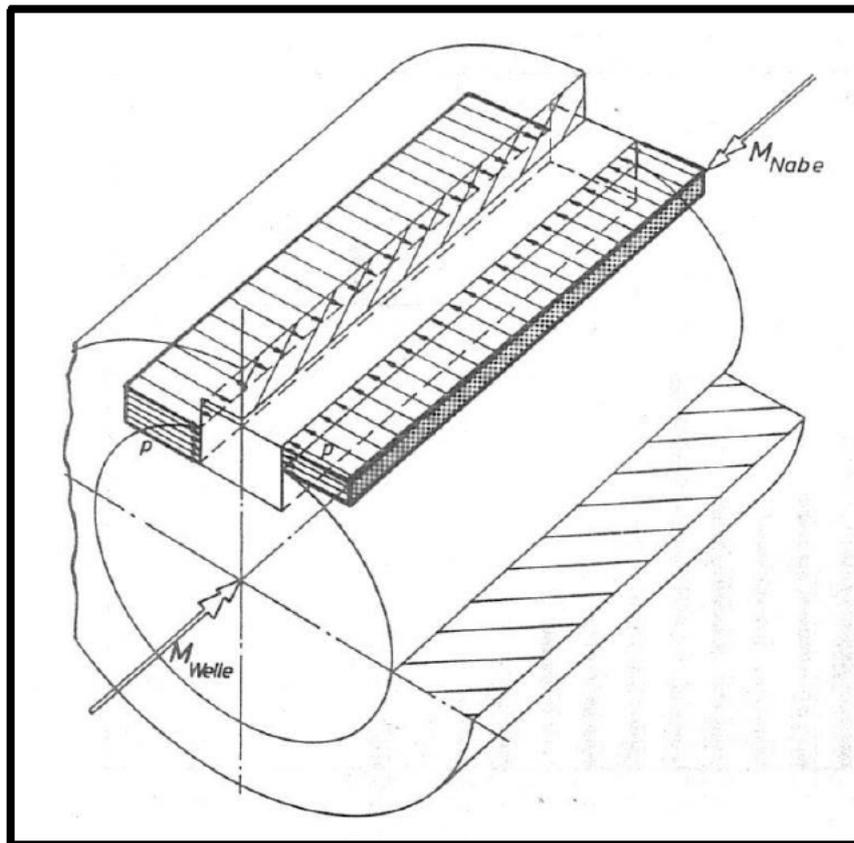


Abbildung 6: Gleichmäßige Verteilung der Flächenpressung [MILÖ-75]

Weiterhin werden die in der folgenden Abbildung 7 gezeigten geometrischen Größen der PFV für die Berechnung nach MC genutzt:

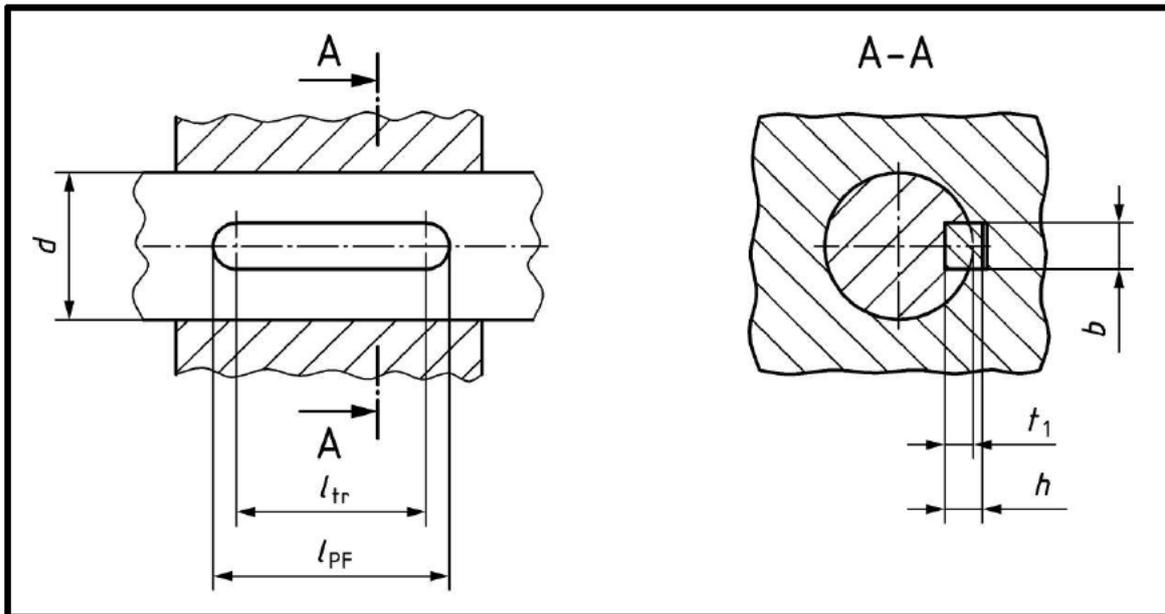


Abbildung 7: Geometrische Größen der Methode C [DIN 6892]

Für die tragende Höhe  $h_{tr}$  gelten je nach betreffendem Bauteil folgende Zusammenhänge:

- Für die Welle wird direkt die Wellennuttiefe  $t_1$  aus der DIN 6885 eingesetzt:

$$h_{tr1} = t_1 \quad (1.2)$$

- Bei der Nabe wird die Wellennuttiefe  $t_1$  von der Passfederhöhe  $h$  abgezogen:

$$h_{tr2} = h - t_1 \quad (1.3)$$

Für die tragende Höhe der Nabe kann nicht die Nabennuttiefe  $t_2$  verwendet werden, da diese ein Rückenspiel zwischen Passfeder und Nabennutgrund berücksichtigt, welches nicht an der Kraftübertragung beteiligt ist.

Der Tragfaktor  $\varphi$  berücksichtigt das Tragverhalten in Abhängigkeit der Passfederanzahl  $n$ :

- Bei einer Passfeder ( $n = 1$ ):  $\varphi = 1$  (1.4)

- Bei zwei Passfedern ( $n = 2$ ):  $\varphi = 0,75$  (1.5)

Die tragende Länge  $l_{tr}$  für rundstirnige Passfedern (A, C, E), ergibt aus der Passfederlänge  $l_{PF}$  abzüglich einer Passfederbreite  $b$ :

$$l_{tr} = l_{PF} - b \quad (1.6)$$

Damit lässt sich die mittlere Flächenpressung in der Nabe gemäß der folgenden Gleichung bestimmen:

$$p_m = \frac{2 \cdot M_{teq}}{d \cdot h_{tr} \cdot l_{tr} \cdot n \cdot \varphi} \quad (1.7)$$

Für den Festigkeitsnachweis muss außerdem eine zulässige Flächenpressung ermittelt werden. Hierbei gilt für duktile Werkstoffe:

$$p_{zul} = \frac{R_{emin}}{S_F} \quad (1.8)$$

Dabei wird in der Gleichung (1.8) die Werkstoffgrenze des schwächeren Bauteils eingesetzt werden. Der technologische Größeneinflussfaktor wird hierbei nicht berücksichtigt.  $S_F$  bildet den Sicherheitsfaktor gegen das Überschreiten der Werkstoffgrenze des jeweiligen Bauteils. Sicherheitsfaktoren für die zulässige Flächenpressung  $p_{zul}$  sind zum Beispiel im Roloff Matek zu finden (s. Tabelle 1):

Verbindungsart		Nabenwerkstoff	
		Stahl, GS $p_{F\ zul} = R_e/S_F$	GJL $p_{F\ zul} = R_m/S_B$
Passfeder <sup>1)</sup>		$S_F \approx 1,1 \dots 1,5$	$S_B \approx 1,5 \dots 2,0$
Gleitfeder <sup>2)</sup> und Keile		3,0...4,0	3,0...4,0
Polygonverbindung		1,1	1,5
Profilwelle <sup>2)</sup>	einseitig, stoßfrei	1,3...1,5	1,7...1,8
	wechselnd, stoßhaft	2,7...3,6	3,4...4,0
Pressverband <sup>3)</sup>		(1,0) 1,1...1,3	2,0...3,0
Kegelpressverband <sup>3)</sup>		(1,0) 1,1...1,3	2,0...3,0
Spannverbindung, Keilverbindung		1,5...3,0	2,0...3,0

<sup>1)</sup> Bei Methode C ist  $S_F = S_B = 1,1$  zu verwenden. Bei Methode B wird in DIN 6892  $S_F = S_B = 1,0$  in den Berechnungsbeispielen angesetzt. Bei unsicheren Annahmen sollten höhere Sicherheiten verwendet werden.  $p_{F\ zul}$  siehe Lehrbuch.

Tabelle 1: Sicherheitsfaktoren für die zulässige Flächenpressung [RM-23]-TB 12-1 b)

Für einen erfolgreichen Nachweis darf die vorhandene Flächenpressung  $p_m$  nicht die zulässige Flächenpressung  $p_{zul}$  überschreiten:

$$p_m \leq f_L \cdot p_{zul} \quad (1.9)$$

Der Lastspitzenhäufigkeitsfaktor  $f_L$  erfasst betriebliche Sonderereignisse, die Kenntnisse über die Betriebsbedingungen der PFV erfordern.

Für weitere Hinweise zur Bestimmung des Lastspitzenhäufigkeitsfaktors wird auf die DIN 6892-1 verwiesen. Weiterhin sind bei der Anwendung der Methode C folgende Hinweise zu beachten:

- Dieses Berechnungsverfahren ist für einseitig wirkende Drehmomente gültig. Bei wechselnden Drehmomenten muss auf die Methode B zurückgegriffen werden.
- Dieses Berechnungsverfahren berücksichtigt keinerlei Radien, Fasen sowie Aushebeschrägen in der Verbindung.

### 1.3.2 Verfahren nach Methode B

Die Berechnungsmethode B sieht eine umfassende Untersuchung der Nabe und der Welle vor und geht dabei tiefer auf die konstruktiven und geometrischen Eigenschaften sowie deren Einflüsse auf das Tragverhalten der PFV ein. Hierzu wird eine vergrößerte Schnittansicht einer PFV betrachtet (s. Abbildung 8):

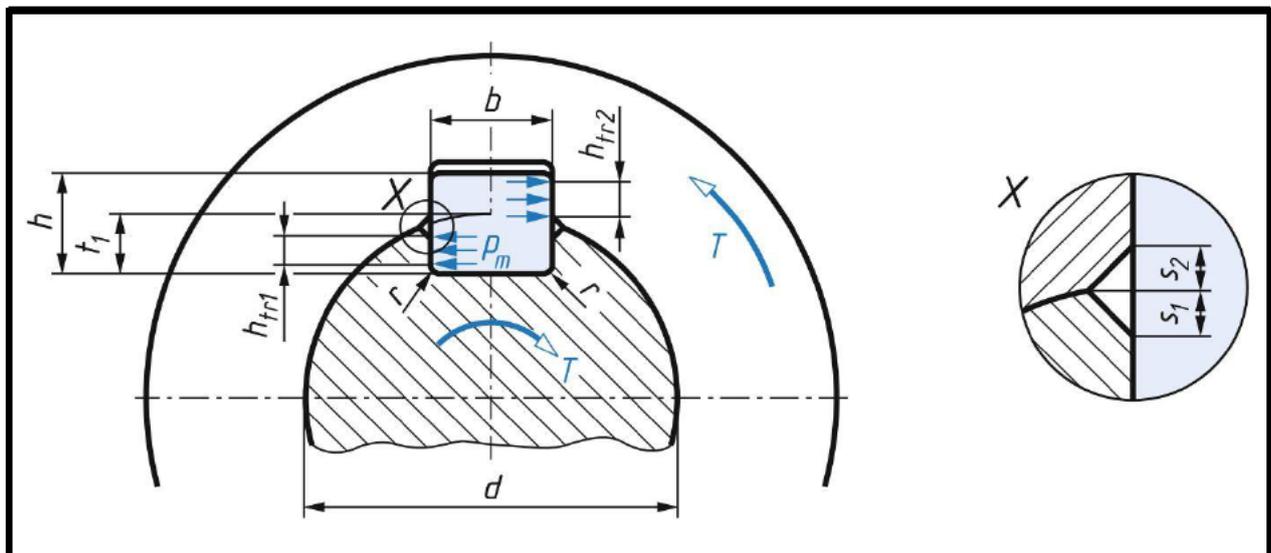


Abbildung 8: Geometrie der PFV nach Methode B [RM-23]

Wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt wurde, werden die Komponenten der Verbindungen mit Rundungen und Kantenbrechungen bzw. Fasen versehen. Das Anfasen der Bauteile erleichtert dessen Zusammenbau, verkleinert aber gleichzeitig die tragenden Wirkflächen der Wellen- und Nabennutflanken.

Da die Fasen oberhalb der Nutkanten (s. Abbildung 5) und Rundungen nicht an der Kraftübertragung beteiligt sind, müssen diese von den tragenden Nuttiefen abgezogen werden:

- Wellennutwand:

$$h_{tr1} = t_1 - (r + s_1) - \frac{(d - \sqrt{d^2 - (b + 2 \cdot s_1)^2})}{2} \quad (1.10)$$

- Nabennutwand:

$$h_{tr2} = h - t_1 - (r + s_2) + \frac{(d - \sqrt{d^2 - (b + 2 \cdot s_2)^2})}{2} \quad (1.11)$$

Bei der tragenden Länge  $l_{tr}$  gelten dieselben Beziehungen wie in MC gemäß Gleichung (1.6).

Für den Nachweis der Flächenpressung sieht die Methode B einen statischen und dynamischen Nachweis vor. Hierbei gilt für die statische Flächenpressung:

$$p_{max} = \frac{2 \cdot K_\lambda \cdot K_R \cdot M_{tmax}}{d \cdot h_{tr} \cdot l_{tr} \cdot n \cdot \varphi} \quad (1.12)$$

Der Nachweis mit der zulässigen Flächenpressung  $p_{zul}$  erfolgt dabei analog zu MC. Dabei ändert sich bei einem Einsatz von zwei Passfedern die Beziehung des Tragfaktors  $\varphi$  für den statischen Nachweis:

- Bei einer Passfeder ( $n = 1$ ):  $\varphi = 1$  (1.13)

- Bei zwei Passfedern ( $n = 2$ ):  $\varphi = 0,9$  (1.14)

Hinweise zum dynamischen Nachweis sind in der DIN 6892 zu finden und werden hier nicht weiter vorgestellt. Weiterhin sei erwähnt, dass die Gleichungen für Passfederformen ohne Aushebeschrägen gültig sind (s. DIN 6892).

Der Ausdruck für die wirkende Flächenpressung erweitert sich jeweils um den Lastverteilungsfaktor  $K_\lambda$  und den Reibschlussfaktor  $K_R$ . Der Reibschlussfaktor  $K_R$  berücksichtigt, dass bei einer Übermaßpassung ein Teil des Drehmomentes reibschlussig übertragen wird (s. Abschnitt 1.1). In dieser Arbeit wird stets von einer Spiel- bzw. Übergangspassung ausgegangen, wodurch der Reibschlussfaktor auf  $K_R = 1$  gesetzt wird. Weitere Hinweise zur Bestimmung des Reibschlussfaktors können in der DIN 6892 nachgeschlagen werden. Mit dem Lastverteilungsfaktor  $K_\lambda$  werden die inhomogene Lastverteilung entlang des prismatischen Nutbereiches sowie die Lastein- bzw. Lastableitungsverhältnisse berücksichtigt. Nach dem Roloff Matek erfolgt die Bestimmung des Lastverteilungsfaktors mit dem folgenden Diagramm in Abbildung 9:

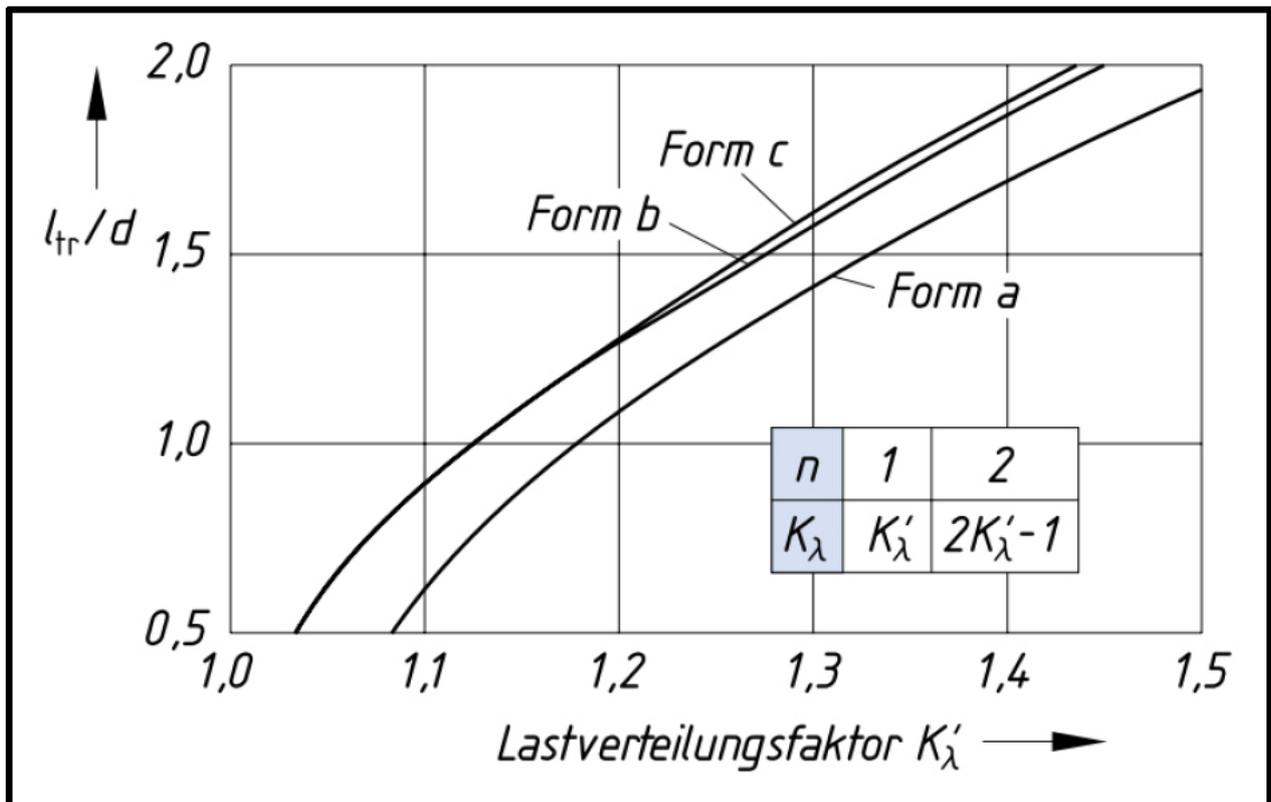


Abbildung 9: Bestimmung des Lastverteilungsfaktors [RM-23]-TB 12-2 c)

In dem Diagramm sind 3 Graphen für die Formen a bis c zu sehen. Diese Formen beschreiben, wie groß der Anteil der tragenden Passfederlänge ist, welcher zur Drehmomentübertragung genutzt wird (s. Abbildung 10).

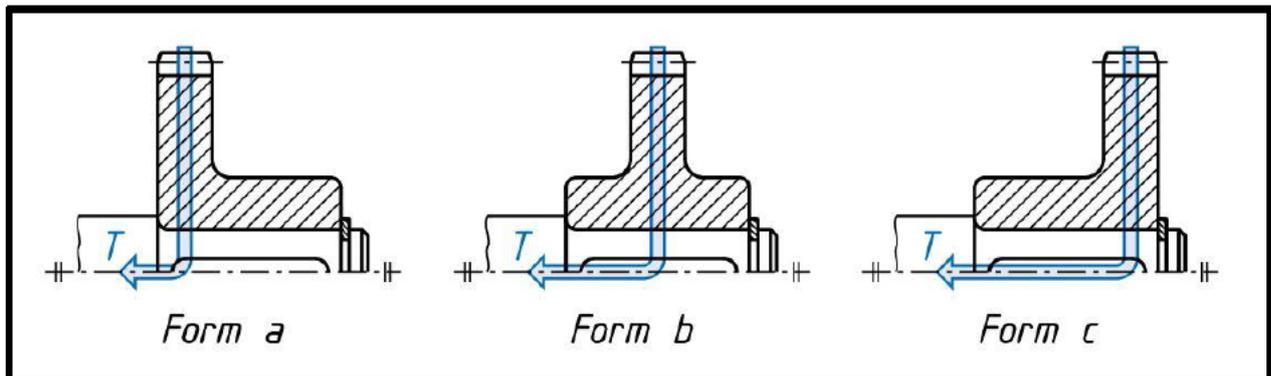


Abbildung 10: Formen der Lastein- bzw. -ableitung [RM-23]

Entsprechend ist die Form c am günstigsten, da hier die komplette Passfederlänge zur Drehmomentübertragung genutzt wird. Für die Nutzung des Diagramms muss außerdem das Verhältnis zwischen der tragenden Länge und des Wellen- bzw. Fügedurchmessers  $\frac{l_{tr}}{d}$  bestimmt werden.

Abschließend entscheidet die Passfederanzahl  $n$  den Wert des Lastverteilungsfaktors.

- Bei einer Passfeder ( $n = 1$ ):

$$K_\lambda = K'_\lambda \quad (1.15)$$

- Bei zwei Passfedern ( $n = 2$ ):

$$K_\lambda = 2 \cdot K'_\lambda - 1 \quad (1.16)$$

Das Diagramm ist für eine maximale Passfederanzahl von  $n = 2$  sowie für ein Verhältnis zwischen dem abgesetzten Nabendurchmesser und Fügedurchmesser von  $1,6 \leq \frac{D}{d} \leq 3,0$  gültig.

Zur Anwendung dieses Berechnungsverfahrens müssen weiterhin folgende Hinweise beachtet werden:

- Dieses Berechnungsverfahren kann unter Einschränkungen auch bei wechselnden Drehmomenten genutzt werden
- Eine Untersuchung nach Methode B sieht stets einen Gestaltfestigkeitsnachweis der Welle nach DIN 743 vor, welcher in dieser Arbeit nicht durchgeführt wird.
- Für spröde Nabenwerkstoffe muss außerdem ein Nachweis der Nabe nach DIN 7190 erfolgen.
- Wenn die Passfeder nicht komplett von der Nabennut umschlossen ist, darf der herausragende Teil der tragenden Länge nicht im Festigkeitsnachweis berücksichtigt werden, wenn dieser die Länge von einer Passfederbreite  $b$  überschreitet.

Die Methode C ist für ein Verhältnis von  $\frac{l_{tr}}{d} \leq 1,3$  gültig. Für die Anwendung der Methode B gilt lediglich die Empfehlung, dass ein Verhältnis von  $\frac{l_{tr}}{d} \leq 1,3$  nicht wesentlich überschritten wird. Bei spröden Nabenwerkstoffen muss die Zugfestigkeit  $R_m$  anstelle von  $R_e$  als Werkstoffgrenze in die Gleichung (1.8) eingesetzt werden. Weiterhin darf beim Einsatz von zwei Passfedern ( $n = 2$ ) die tragende Länge  $l_{tr}$  nur einfach in die Gleichungen (1.7) und (1.12) eingesetzt werden [RM-23] [DIN 6892].

## 1.4 Verfahren nach Methode A

Zusätzlich wird in diesem Abschnitt das Untersuchungsverfahren nach Methode A der DIN 6892 mit Hilfe von ausgewählten Dissertationen vorgestellt, um die Relevanz dieser Methode für die Entwicklung der Passfederverbindung hervorzuheben.

Militzer [MilO-75] hat in seiner Arbeit u. A. die inhomogene Verteilung der Flächenpressung in den tragenden PF- und Nut-Flanken nachgewiesen. Hierbei entwickelte er ein verbessertes Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Flächenpressung, welches u. A. Einflussparameter wie die Passfederlänge, den Nabendurchmesser sowie den Ort der Lasteinleitung und Lastableitung berücksichtigt. Die Ergebnisse seines Rechenmodells vergleicht Militzer mit Ergebnissen seiner experimentellen spannungsoptischen Analyse (s. Abbildung 11):

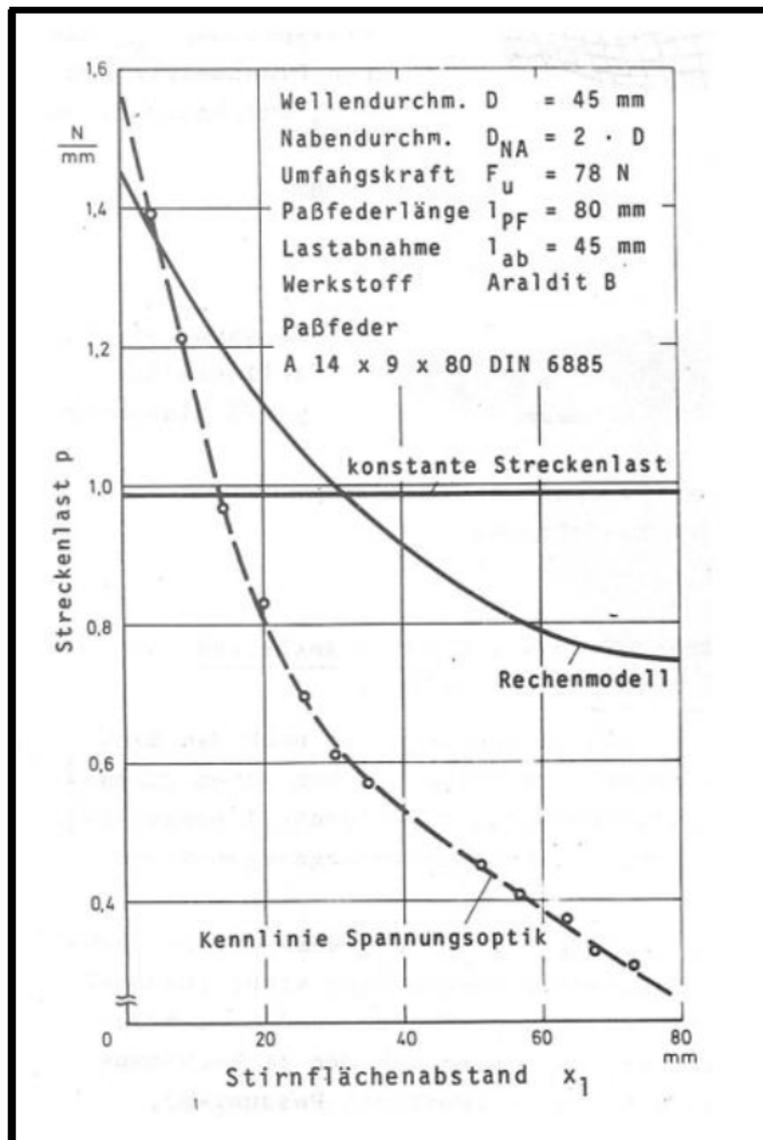


Abbildung 11: Flächenpressungsverlauf nach Militzer [MilO-75]

Hierbei wird die Streckenlast über die tragende Passfederlänge aufgetragen. Die spannungsoptischen Untersuchungen an einer PFV bestehend aus dem Epoxidharz Araldit B wurde mit den in Abbildung 12 gezeigten Versuchsstand durchgeführt:

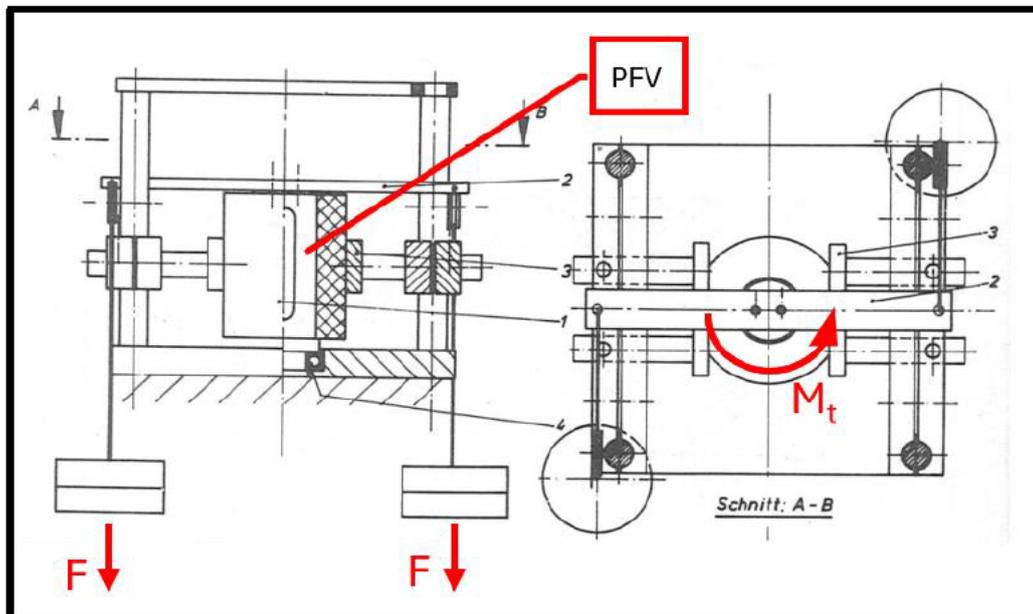


Abbildung 12: Belastungsvorrichtung für spannungsoptische Untersuchungen [MilO-75]

Durch die an Seilen befestigten Gewichte werden mit Umlenkrollen zwei Umfangskräfte erzeugt, wodurch eine reine Torsionsbelastung auf die Welle einwirkt. Bei einer mittig liegenden Nabeneinspannung entsteht die Lastform c entsprechend der Abbildung 10. Militzers Ergebnisse zeigen, dass die größte Flächenpressung gemäß Abbildung 11 auf der Lasteinleitungsseite ( $x_1=0$ ) herrscht. Seine Forschungsergebnisse sind in den Berechnungsstandard der Methode B nach DIN 6892 eingeflossen [FrbrgF-06], [MilO-75].

Forbrig hat umfassende experimentelle Untersuchungen zur Gestaltfestigkeit an PFV durchgeführt. Hierbei hat der u. A. analysiert, wie sich Einflussgrößen wie die Art der Beanspruchung, der Wellenwerkstoff, die Beschichtung der PF und der Welle sowie die konstruktive Gestaltung der Verbindung auf dessen Dauerhaltbarkeit auswirken. Forbrig liefert mit den Ergebnissen seiner Arbeit umfassende Erkenntnisse, die der Konstrukteur neben der DIN 743 und der DIN 6892 zur Dimensionierung beständiger Passfederverbindungen nutzen kann. Für seine experimentellen Untersuchungen nutzte er u. A. die in Abbildung 13 gezeigten Belastungsvorrichtungen:

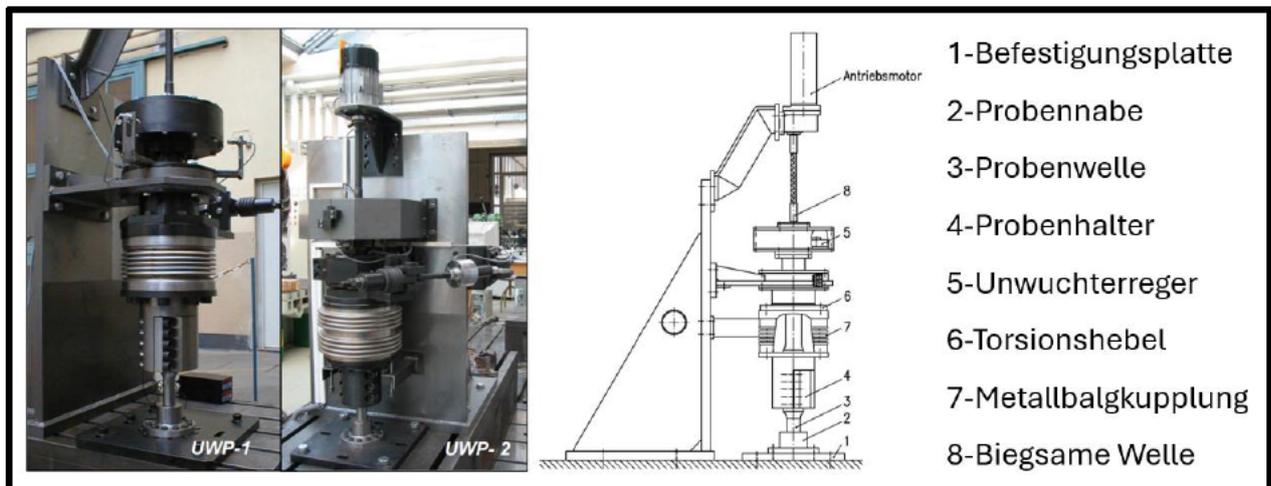


Abbildung 13: Belastungsvorrichtung für Umlaufbiegung mit statischer Torsion [FbrgF-06]

Mit diesen Vorrichtungen kann auf eine Probe-PFV eine Umlaufbiegung mit überlagerter statischer Torsion aufgebracht werden. Parallel dazu hat Forbrig außerdem numerische Untersuchungen an einer PFV mit dem in Abbildung 14 dargestellten Modellaufbau durchgeführt:

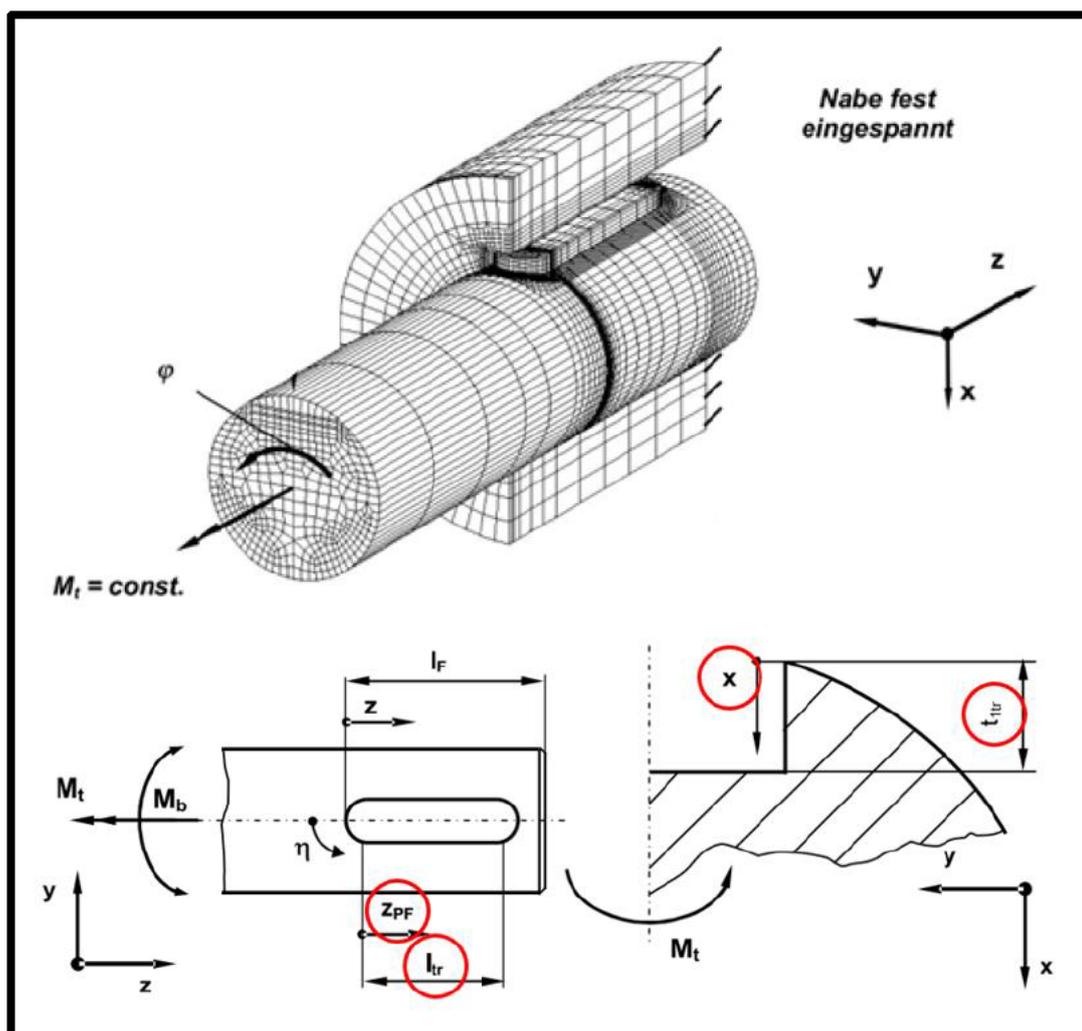


Abbildung 14: Forbrigs FE-Modell mit bezogenen Auswertekoordinaten [FbrgF-06]

Der grundsätzliche Aufbau der FE-PFV setzt sich aus einer absatzlosen Welle, einer Passfeder der Form A sowie einer zylindrischen Nabe zusammen. Das Torsionsmoment wird hierbei am Wellenende eingeleitet und durch eine fest eingespannte Nabe abgeleitet, sodass sich gemäß der Abbildung 10 die Lasteinleitungsform c ergibt. Neben der FE-Analyse mit dynamischen Lasten führt Forbrig eine Simulation mit einer rein statischen Torsionsbelastung durch. Die FE-Ergebnisse werden mit den in Abbildung 14 gezeigten bezogenen Auswertekoordinaten in seiner Arbeit untersucht (s. Abbildung 15):

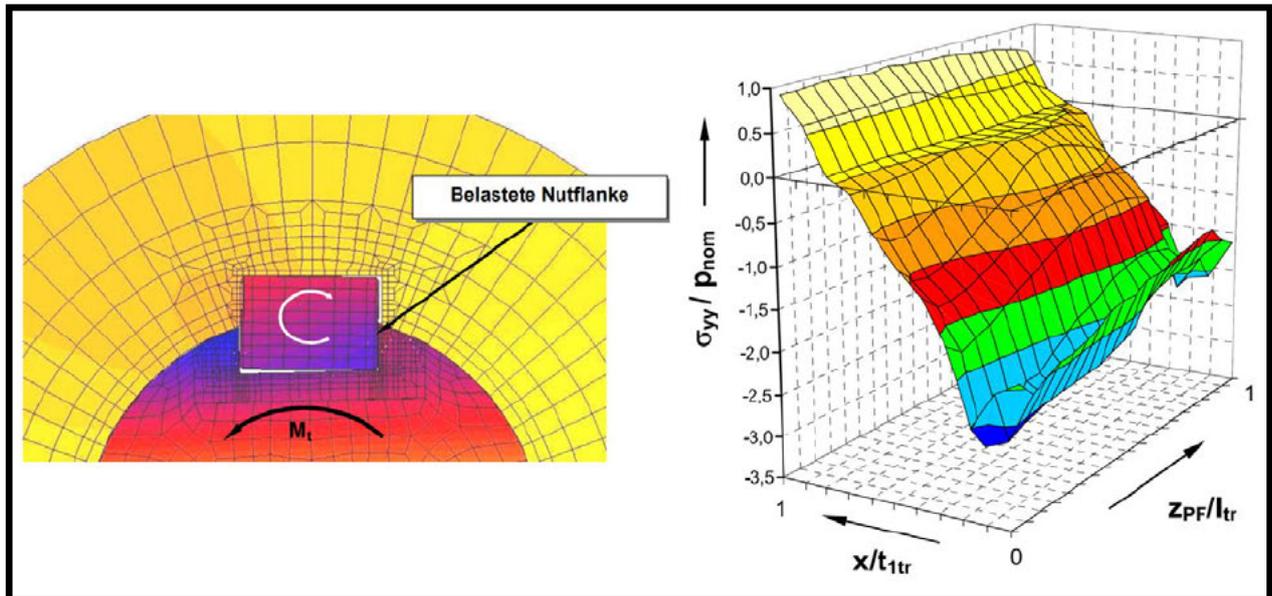


Abbildung 15: FE-Ergebnisse von Forbrig bei statischer Torsion [FbrgF-06]

Hierbei stellt Forbrig u. A. die Kippfigur der Passfeder in der PF-Nut sowie die Verteilung der Normalspannung dreidimensional über die tragende Länge und Höhe der belasteten Wellennutflanke dar. Diese Ergebnisse bieten sich als zusätzliches Analysewerkzeug für die hier durchgeführten FE-Berechnungen an und werden im Abschnitt 3.2 näher untersucht [FbrgF-06].

## 2 Gestaltung einer Passfederverbindung

Zur Erstellung des FE-Modells einer PFV muss sich zuallererst auf eine Geometrie geeinigt werden. Hierbei sollen zum einen die in der Lehrveranstaltung Konstruktion A vermittelten Kompetenzen hinsichtlich der Gestaltung von Wellen und Achsen sowie Passfederverbindungen berücksichtigt werden. Außerdem sollte die Geometrie so gewählt werden, dass Forbrigs FE-Ergebnisse für die hier durchgeführten Untersuchungen genutzt werden können. Hierbei wird sich bei der Geometriewahl für einen Abschnitt eines Antriebsstranges entschieden, dessen Aufbau im Folgenden vorgestellt wird.

Die Abmessungen der Passfederverbindung werden über den Fügedurchmesser der Welle entschieden (s. Abbildung 16):

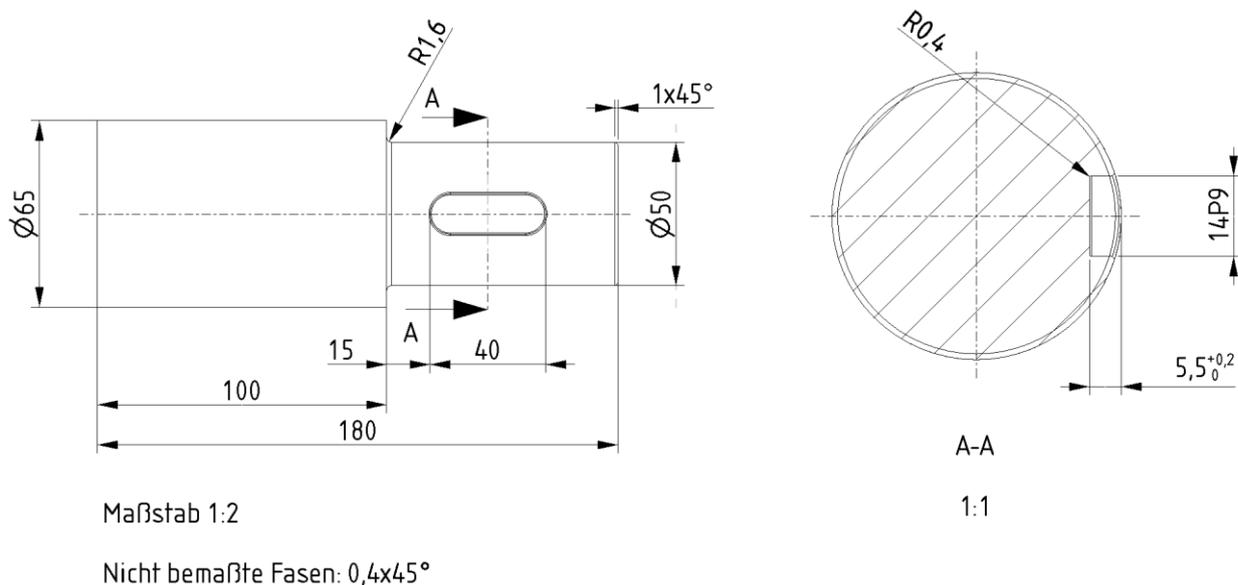


Abbildung 16: Wellengeometrie (Nicht maßstabsgerecht)

Für diese Arbeit wird ein Wellenabschnitt mit einer Gesamtlänge von 180 mm festgelegt. Für die Erstellung der Wellengeometrie werden weiterhin die Hinweise für die Gestaltung von Wellen und Achsen beachtet. Hierbei findet zum einen die DIN 748-1 für die Gestaltung von zylindrischen Wellenenden Anwendung (s. Anhang A). Zum anderen wird darauf geachtet, dass nicht zu große Durchmessersprünge erfolgen:

➤ Faustregel:  $\frac{D_W}{d} = \frac{65 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = 1,3 \leq 1,4$

Das Wellenende wird angefasst, um eine einfache Montage der Nabe zu gewährleisten. Weiterhin wird ein empfohlener Mindestabstand der Passfedernut zum Wellenabsatz von einer halben Passfederbreite nicht unterschritten.

Für die Wellennut wird die Fingerfräsernut N1 gewählt, was eine rundstirnige Passfeder der Form A, C oder E voraussetzt. Da die PF-Formen C und E Querbohrungen für die Halteschrauben vorsehen (s. Abbildung 3), wird eine Passfeder der Form A festgelegt. Bei einem Wellen-Fügedurchmesser von  $d=50$  mm, können die Maße der Passfedernut aus der DIN 6885 entnommen werden (s. Anhang A). Weiterhin muss eine Länge für die Wellennut bzw. für die Passfeder festgelegt werden. Hierfür sieht die DIN 6885 die in Abbildung 17 gezeigten Standardlängen vor:

Passfeder- und Keillängen $l$	8	10	12	14	16	18	20	22	25	28	32
	36	40	45	50	56	63	70	80	90	100	110
	125	140	160	180	200	220	250	280	320	360	400

Bezeichnung einer Passfeder Form A mit Breite  $b = 10$  mm, Höhe  $h = 8$  mm und Länge  $l = 50$  mm nach DIN 6885: **Passfeder DIN 6885 – A10 × 8 × 50.**

Abbildung 17: Passfederlängen nach DIN 6885-1 [RM-23] -TB 12-2 a)

Somit ergibt sich eine Passfeder mit der Normbezeichnung DIN 6885-A14x8x40. Hierbei entsteht eine Verbindung mit einer vergleichsweise kurzen Passfeder. Diese Auswahl resultiert aus einer geplanten Parameterstudie, die in dieser Arbeit nicht stattfinden kann.

In der folgenden Abbildung 18 wird die Nabengeometrie dargestellt:

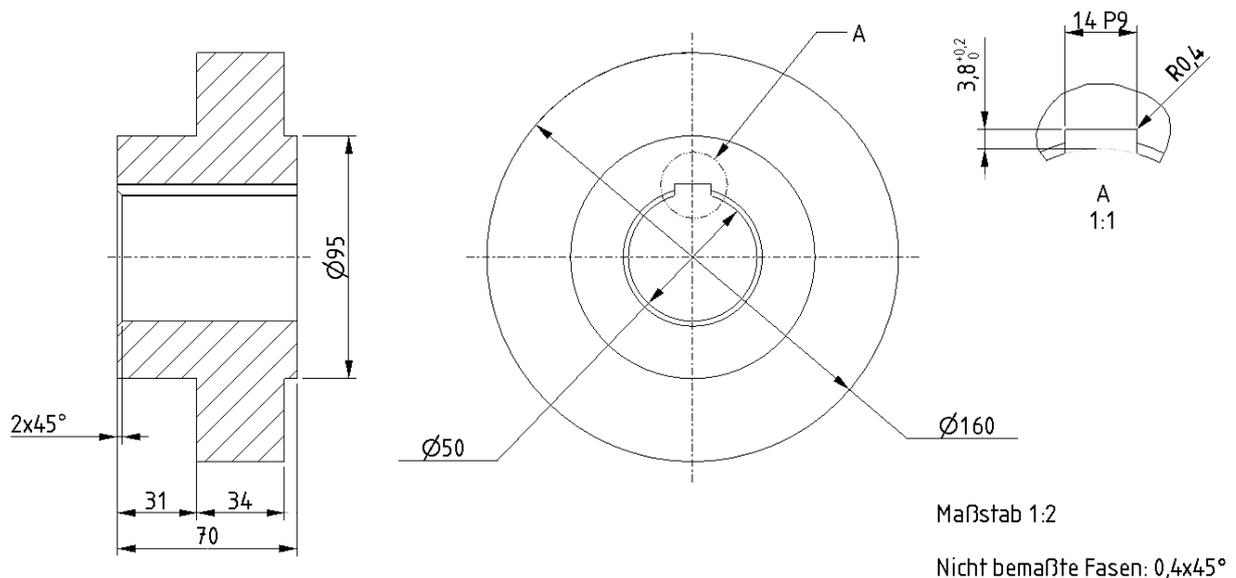


Abbildung 18: Nabengeometrie (Nicht maßstabsgerecht)

Für die Nabengeometrie wird eine passende Scheibenkupplung nach DIN 116 gewählt. Der Einfachheit halber werden hier lediglich die groben Abmessungen übernommen. Zum Beispiel die Schraubenlöcher für die Verbindung der zweiten Kupplungshälfte werden nicht nachgebildet, da diese für eine Untersuchung der PFV in erster Näherung keine Relevanz finden.

Die Abmessungen der Nabennut sind ebenfalls in der DIN 6885 nachzuschlagen. Entsprechende Auszüge der DIN 116 sowie der DIN 6885 sind im Anhang zu finden (s. Anhang A).

Eine Übersicht der wesentlichen PFV-Abmessungen bietet die folgende Abbildung 19:

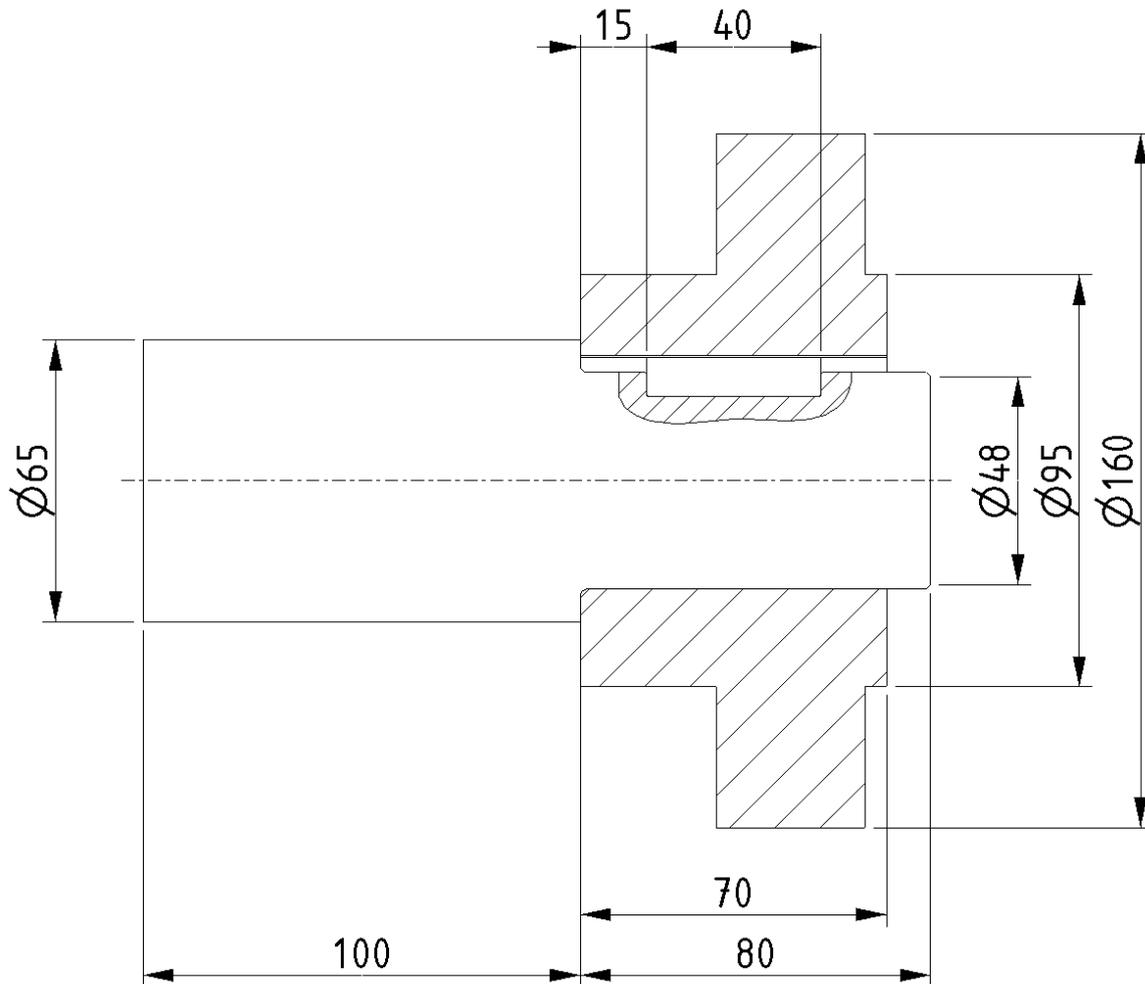


Abbildung 19: PFV-Übersicht (nicht maßstabsgerecht)

Da der Untersuchungsgegenstand der FE-Analyse die PFV bildet, wird lediglich der entsprechende Abschnitt des Antriebstrangs untersucht. Mit der Annahme, dass die zweite Kupplungshälfte ebenfalls eine PFV bildet, kann näherungsweise von einem symmetrischen Problem ausgegangen werden. Diese Modellauswahl erhöht die Berechnungseffizienz bei gleichzeitiger Zeitersparnis. Hierbei sei erwähnt, dass es sich um ein erfundenes Beispiel handelt, welches aber repräsentativ für ausgeführte PFV steht [Masch1-15].

Die technischen Zeichnungen der vorgestellten PFV sind im Anhang B zu finden.

## 2.1 Analytische Untersuchung der Passfederverbindung

Da die Abmessungen der PFV feststehen, kann nun eine analytische Untersuchung nach der DIN 6892 erfolgen. Die folgende Tabelle 2 zeigt die Eingangsgrößen für die analytischen Nachweise nach MC und MB:

Eingangsgrößen für einen Nachweis nach MC und MB (n. DIN 6982)		
Benennung:	Berechnungsgröße:	Quelle:
Wellen-Fügedurchmesser	$d=50 \text{ mm}$	/
PF-Nut Breite	$b=14 \text{ mm}$	DIN 6885-1
PF-Höhe	$h=9 \text{ mm}$	DIN 6885-1
PF-Länge	$l_{PF}=40 \text{ mm}$	DIN 6885-1
Wellennuttiefe	$t_1=5,5 \text{ mm}$	DIN 6885-1
Fase an den Nutkanten	$s_1=s_2=0,4 \text{ mm}$	DIN 6885-1
PF-Rundung	$r=0,6 \text{ mm}$	DIN 6885-1
Abgesetzter Nabendurchmesser	$D=95 \text{ mm}$	DIN 116
Passfederanzahl	$n=1$	/
Reibschlussfaktor	$K_R=1$	DIN 6885-1
Anwendungsfaktor	$K_A=1$	DIN 6892
Torsionsmoment	$M_t=500 \text{ Nm}$	/
Streckgrenze der Nabe (C45E)	$Re=490 \text{ N/mm}^2$	RM TB 1-1
Sicherheitsfaktor gegen das Überschreiten der Fließgrenze	$S_F=1,1$	RM TB 12-1
Lastspitzenhäufigkeitsfaktor	$f_L=1$	DIN 6892

Tabelle 2: Eingangsgrößen für eine analytische Untersuchung n. DIN 6892

In dieser Ausarbeitung steht die Erstellung eines validen FE-Modells im Vordergrund. Somit spielt der in den Methoden B und C durchgeführte Festigkeitsnachweis durch eine Gegenüberstellung der wirksamen Flächenpressung  $p_m$  bzw.  $p_{max}$  mit der zulässigen Flächenpressung  $p_{zul}$  der jeweiligen Komponente in dieser Ausarbeitung eine untergeordnete Rolle. Deswegen erfolgt lediglich ein Nachweis für die Nabe in den Methoden B und C. Dabei wird von einer Kupplung bestehend aus dem Vergütungsstahl 42CrMo4 ausgegangen. Weiterhin werden für die Welle und die Nabe die Indizes 1 bzw. 2 verwendet.

Nachfolgend wird eine analytische Untersuchung der konstruierten PFV nach der DIN 6892, Methode B und C bei einer statischen Torsionsbelastung von  $M_t = 500 \text{ Nm}$  durchgeführt.

### 2.1.1 Untersuchung nach Methode C

Der Nachweis nach MC wird mit der Ermittlung des äquivalenten Torsionsmomentes nach Gleichung (1.1) begonnen:

$$M_{teq} = K_A \cdot M_t = M_t = 500000 \text{ Nmm}$$

Anschließend erfolgt die Bestimmung der tragenden Höhen in der Welle und der Nabe. Gemäß den Gleichungen (1.2) und (1.3) folgt:

$$h_{tr1} = t_1 = 5,5 \text{ mm}$$

$$h_{tr2} = h - t_1 = 9 \text{ mm} - 5,5 \text{ mm} = 3,5 \text{ mm}$$

Beim Einsatz einer Passfeder  $n = 1$  greift in MC die Beziehung (1.4):

$$\varphi = 1$$

Da die Passfeder von beiden Komponenten vollständig eingeschlossen ist, ist die tragende Länge  $l_{tr}$  für die Welle und die Nabe identisch. Die tragende Länge für rundstirnige Passfedern ergibt sich aus der Gleichung (1.6):

$$l_{tr} = l_{pF} - b = 40 \text{ mm} - 14 \text{ mm} = 26 \text{ mm}$$

Mit den ermittelten Größen errechnet sich die mittlere Flächenpressung aus der Gleichung (1.7):

$$p_{m1} = \frac{2 \cdot M_{teq}}{d \cdot h_{tr1} \cdot l_{tr} \cdot n \cdot \varphi} = \frac{2 \cdot 500000 \text{ Nmm}}{50 \text{ mm} \cdot 5,5 \text{ mm} \cdot 26 \text{ mm} \cdot 1 \cdot 1} = 139,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$p_{m2} = \frac{2 \cdot M_{teq}}{d \cdot h_{tr2} \cdot l_{tr} \cdot n \cdot \varphi} = \frac{2 \cdot 500000 \text{ Nmm}}{50 \text{ mm} \cdot 3,5 \text{ mm} \cdot 26 \text{ mm} \cdot 1 \cdot 1} = 219,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Abschließend erfolgt der Festigkeitsnachweis der Nabe mit den Gleichungen (1.8) und (1.9):

$$p_{m2} = 219,8 \text{ MPa} \leq f_L \cdot p_{zul2} = f_L \cdot \frac{R_{emin}}{S_F} = 1 \cdot \frac{490 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,1} = 445,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Der Festigkeitsnachweis für die Nabe wäre damit erfüllt. Nun kann die Untersuchung nach MB erfolgen.

### 2.1.2 Untersuchung nach Methode B

Für die Methode B kann das äquivalente Torsionsmoment  $M_{teq}$ , der Tragfaktor  $\varphi$  sowie die tragende Länge  $l_{tr}$  vom vorherigen Abschnitt 2.1.2. übernommen werden:

$$M_{teq} = M_{tmax} = 500000 \text{ Nmm} \quad (1.1) \quad \varphi=1 \quad (1.4) \quad l_{tr} = 26 \text{ mm} \quad (1.6)$$

Die MB berücksichtigt weitere geometrische Eigenschaften der PFV, wie die Fasen der Nutkanten sowie die Rundungen an der Passfeder. Somit müssen die tragenden Nuthöhen mit den Gleichungen (1.10) und (1.11) neu ermittelt werden:

$$\begin{aligned} h_{tr1} &= t_1 - (r + s_1) - \frac{\left(d - \sqrt{d^2 - (b + 2 \cdot s_1)^2}\right)}{2} = \\ &= 5,5 \text{ mm} - (0,6 + 0,4) \text{ mm} - \frac{\left(50 \text{ mm} - \sqrt{(50 \text{ mm})^2 - (14 + 2 \cdot 0,4)^2 \cdot (\text{mm})^2}\right)}{2} = 3,4 \text{ mm} \\ h_{tr2} &= h - t_1 - (r + s_2) + \frac{\left(d - \sqrt{d^2 - (b + 2 \cdot s_2)^2}\right)}{2} \\ &= 9 \text{ mm} - 5,5 \text{ mm} - (0,6 + 0,4) \text{ mm} - \frac{\left(50 \text{ mm} - \sqrt{(50 \text{ mm})^2 - (14 + 2 \cdot 0,4)^2 \cdot (\text{mm})^2}\right)}{2} = \\ &= 3,6 \text{ mm} \end{aligned}$$

Wie bereits im Abschnitt 1.3.1 beschrieben wurde wird von einer Spiel- oder Übergangspassung zwischen dem Fügedurchmesser der Welle sowie dem Nabeninnendurchmesser ausgegangen. In diesem Fall gilt für den Reibschlussfaktor  $K_R$ :

$$K_R = 1$$

Für die Berechnung der maximalen Flächenpressung fehlt nur noch der Lastverteilungsfaktor  $K_\lambda$ , dessen Bestimmung graphisch mit der Abbildung 9 erfolgt. Vorher muss geprüft werden, ob das Diagramm für die gewählte PFV verwendet werden kann:

$$1,6 \leq \frac{D}{d} = \frac{95 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = 1,9 \leq 3$$

Somit ist das Diagramm für die vorliegende PFV gültig.

Weiterhin wird das Verhältnis zwischen der tragenden Länge und dem Fügedurchmesser für die Verwendung des Diagramms benötigt:

$$\frac{l_{tr}}{d} = \frac{26 \text{ mm}}{50 \text{ mm}} = 0,52$$

Gemäß der Abbildung 10 ergibt sich für die gewählte PFV-Geometrie die Lastein- bzw. Lastableitungsform C. Bei einer Passfederanzahl von  $n = 1$  kann der Lastverteilungsfaktor gemäß der Gleichung (1.15) direkt aus Abbildung 9 abgelesen werden:

$$K_\lambda = K'_\lambda = 1,05$$

Abschließend kann die maximale Flächenpressung  $p_{max}$  in den Komponenten mit der Gleichung (1.12) bestimmt werden:

$$p_{max1} = \frac{2 \cdot K_\lambda \cdot K_R \cdot M_{tmax}}{d \cdot h_{tr1} \cdot l_{tr} \cdot n \cdot \varphi} = \frac{2 \cdot 1,05 \cdot 500000 \text{ Nmm}}{50 \text{ mm} \cdot 3,4 \text{ mm} \cdot 26 \text{ mm} \cdot 1 \cdot 1} = 237,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$p_{max2} = \frac{2 \cdot K_\lambda \cdot K_R \cdot M_{tmax}}{d \cdot h_{tr2} \cdot l_{tr} \cdot n \cdot \varphi} = \frac{2 \cdot 1,05 \cdot 500000 \text{ Nmm}}{50 \text{ mm} \cdot 3,6 \text{ mm} \cdot 26 \text{ mm} \cdot 1 \cdot 1} = 224,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Analog zur MC erfolgt der Festigkeitsnachweis für die Nabe mit Gleichung (1.8) sowie (1.9):

$$p_{max2} = 224,4 \text{ MPa} \leq f_L \cdot p_{zul2} = f_L \cdot \frac{R_{emin}}{S_F} = 1 \cdot \frac{490 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,1} = 445,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Weiterhin müsste ein Tragfähigkeitsnachweis für die Welle nach DIN 743 erfolgen, welcher in dieser Arbeit nicht durchgeführt wird. Somit ergeben sich die in Tabelle 3 gezeigten Ergebnisse für die analytisch bestimmten Flächenpressungen nach DIN 6892:

	Flächenpressung in der Welle	Flächenpressung in der Nabe
Methode C	$p_{m1} = 139,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$p_{m2} = 219,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Methode B	$p_{max1} = 237,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$p_{max2} = 224,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Tabelle 3: Analytische bestimmte Flächenpressungen nach DIN 6892

Die mit den Methoden B und C ermittelten Ergebnisse sind wichtig, da die im späteren Verlauf vorgestellten FE-Ergebnisse verifiziert werden müssen. Im nächsten Abschnitt erfolgt eine Vorstellung des grundlegenden FE-Modellaufbaus.

### 3 Erstellung eines FE-Modells der Passfederverbindung

#### 3.1 Pre-Processing Ausgangsmodell

Die nachfolgende FE-Struktur des Ausgangsmodells [kurz AM] wird hier lediglich in Steno erläutert. Eine detaillierte Modellbeschreibung ist in der angehängten Dokumentation (s. Anhang C) zu finden. Die Geometrie der PFV wurde bereits im vorangegangenen Kapitel festgelegt und kann nun in Abaqus umgesetzt werden. Hierbei erfolgt, wie in CAD, zunächst eine Erstellung der entsprechenden Einzelteile (in Abaqus „Parts“), die darauffolgend zu einer Baugruppe (in Abaqus „Assembly“) vereint werden (s. Abbildung 20):

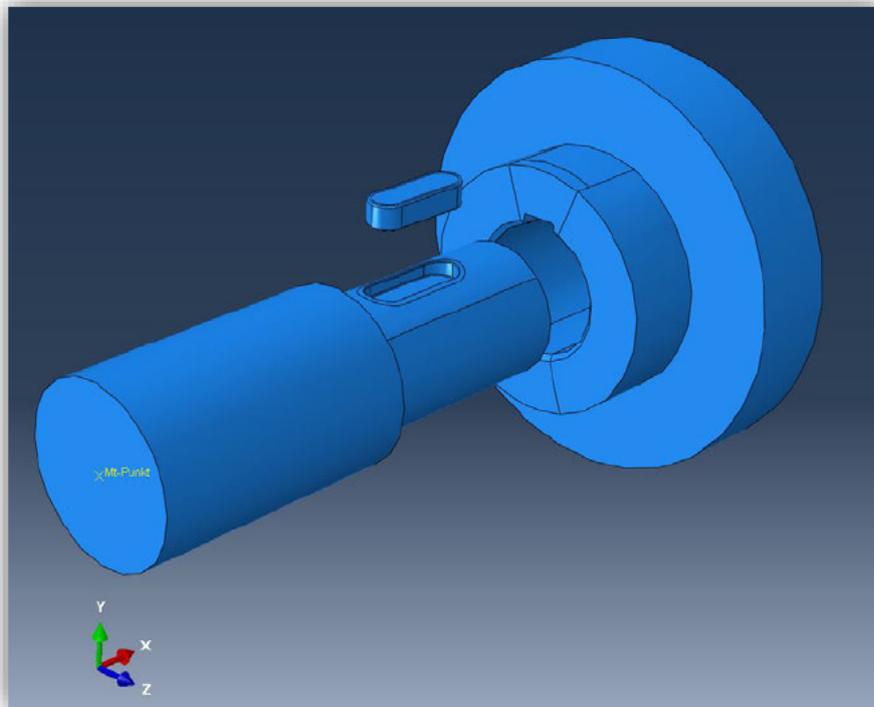


Abbildung 20: FE-PFV Assembly (Explosionsansicht)

Anschließend kann die Implementierung des Materials (in Abaqus „Materials“) erfolgen. Hierbei wird ein rein elastisches Material mit den folgenden Werkstoffgrößen definiert:

- Dichte:  $\rho = 7,86 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
- Elastizitätsmodul:  $E = 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
- Querkontraktionszahl:  $\nu = 0,3$

Mit diesen Werten kann das Verformungsverhalten eines duktilen Stahls simuliert werden.

Die Dichte ist für das vorliegende FE-Problem nicht relevant. Der Vollständigkeit halber wird sie dennoch mit aufgeführt. Die Materialien müssen den Einzelteilen zugeordnet werden.

Für das Modell wurde zuerst eine Vernetzung (in Abaqus „Mesh“) mit quadratischen Hexaedern versucht. Mit dieser Vernetzung konnte in vertretbarer Zeit keine lauffähige FE-Berechnung erzeugt werden. Deswegen werden für die Modellvernetzung quadratische Tetraeder mit 10 Knoten (C3D10) für eine dreidimensionale Spannungsanalyse vorgesehen [3ds-19].

Dabei muss jedes Einzelteil sinnvoll zerteilt (in Abaqus „Partition“) werden, um lokale Elementgrößen (in Abaqus „Local Seeds“) präzise implementieren zu können. Die Einstellung von lokalen Elementgrößen ist wichtig, da hierdurch die Berechnungseffizienz gesteigert werden kann. Zum anderen schränkt die verwendete Abaqus Lehr-Lizenz die maximale Knotenanzahl auf 250.000 Knoten ein. Die Partitionierungen dienen lediglich dazu, zusätzliche Kanten in den Einzelteilen (s. Abbildung 20) zu erzeugen und verursachen keine physischen Schnitte oder Teilfugen in den Bauteilen. Die Vernetzung der Welle wird in der folgenden Abbildung 21 dargestellt:

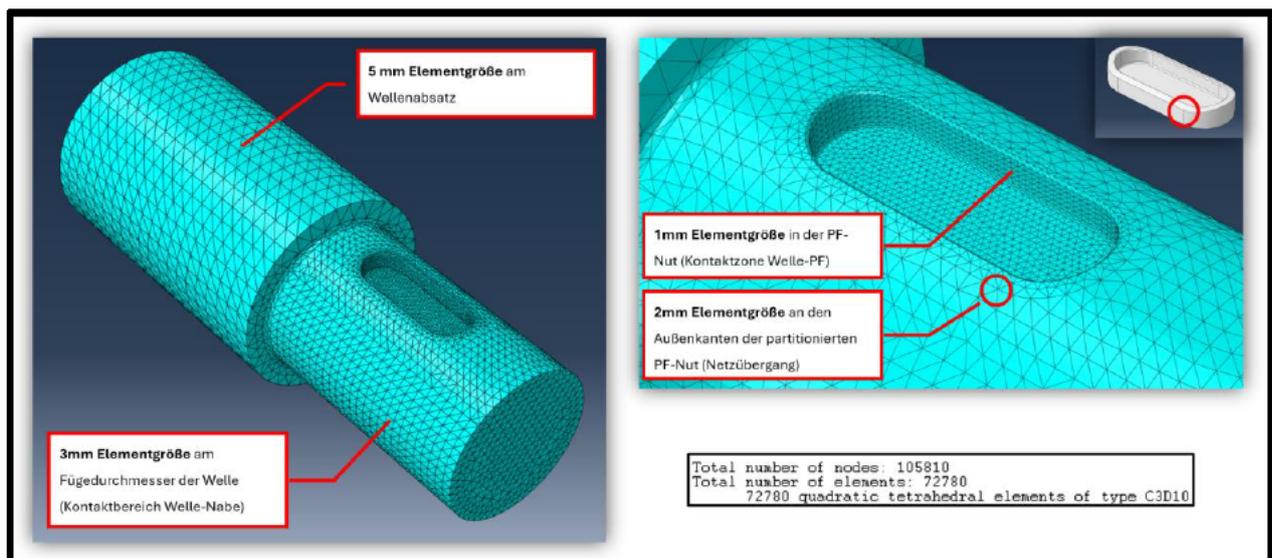


Abbildung 21: FE-Netz der Welle

Hierbei wird durch eine Partitionierung der Wellenabsätze für den größeren Absatz bei einem Durchmesser von 65 mm und einer Länge von 100 mm eine Elementgröße von 5 mm gewählt. Die PF-Nut wird ebenfalls partitioniert, um in der Kontaktzone zur Passfeder eine Vernetzung mit 1 mm Elementen einzustellen. Der prismatische Nutbereich hat dabei eine Länge von  $l_T=26$  mm und eine Höhe von  $t_1=5,5$  mm. Der Fügedurchmesser mit  $d=50$  mm bildet die Kontaktzone zum Nabeninnendurchmesser und erhält 3 mm Elemente bei einer Länge von 80 mm. Die Welle setzt sich aus 72.780 Tetraeder-Elementen mit 105.810 Knoten zusammen.

Mit 89.426 Knoten wird die Nabenvernetzung in Abbildung 22 gezeigt:

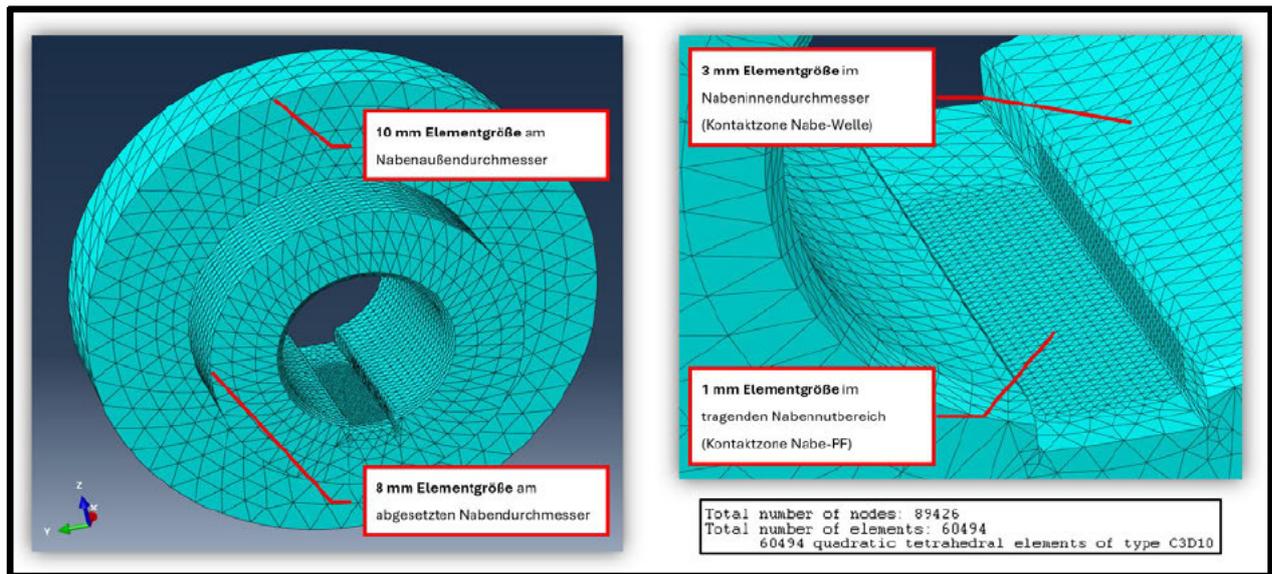


Abbildung 22: FE-Netz der Nabe

Diese hat ebenfalls 1 mm Elemente im tragenden Nabennutbereich zur Passfeder sowie 3 mm Elemente im Nabeninndurchmesser, welche die Kontaktzone zum Wellenfügedurchmesser bildet. Hierbei besitzt die Nabe eine Länge von 70 mm. Der mit 1 mm Elementen vernetzte Nabennutbereich wird hierbei größer gewählt, als die eigentliche Passfeder lang ist. Dies ist eine Vorbereitung für die Parameterstudie, die in dieser Arbeit nicht erfolgen kann. Das Netz der Nabe vergrößert sich in radialer Richtung. Als letztes erfolgt die Vernetzung der Passfeder in Abbildung 23:

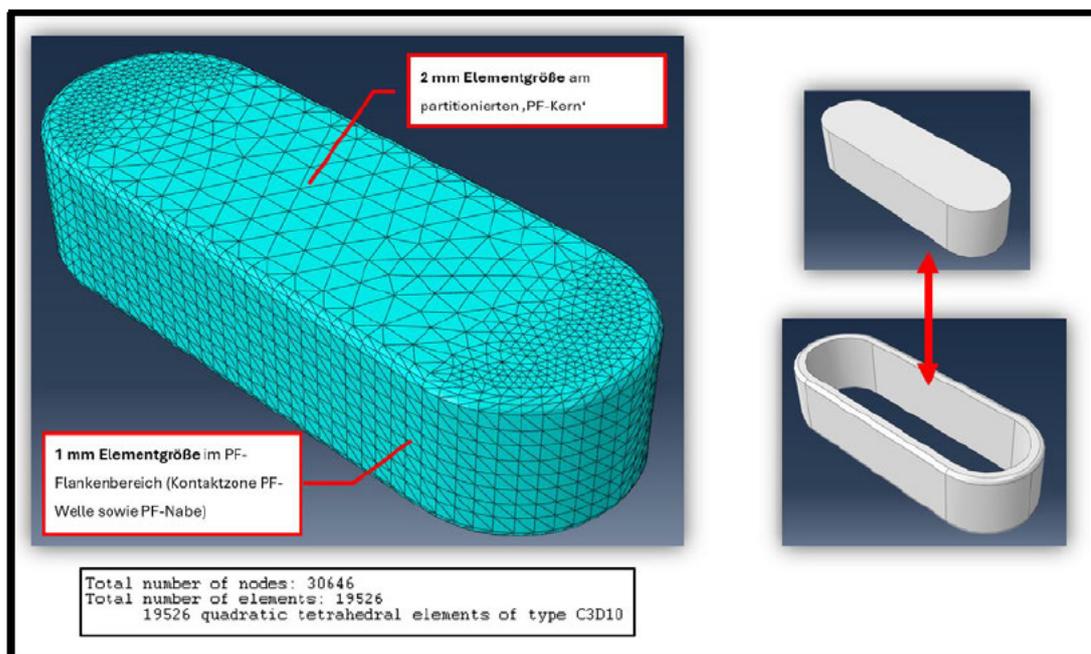


Abbildung 23: FE-Netz der Passfeder

Die Passfeder wird so partitioniert, dass sich ein Kern und ein Außenmantel ergibt. Der Außenmantel stellt die Kontaktzone zu den tragenden Nutflanken sowie zu den Nutendbereichen der Welle dar und erhält eine lokale Netzgröße von 1mm bei einer Passfederhöhe  $h=9$  mm und einer tragenden Länge  $l_{tr}=26$  mm. Die Vernetzung vergrößert sich zum Mantel der PF auf 2 mm Elemente. Mit einer Knotenanzahl von 30.646 Knoten für die PF ergibt sich insgesamt ein Tetraeder Netz für das gesamte Modell, bestehend aus 225.882 Knoten.

Als nächstes folgt die Implementierung der Lasten (in Abaqus „Loads“) und der Randbedingungen (in Abaqus „BCs“). Hierzu wird ein mechanisches Modell der PFV erstellt (s. Abbildung 24):

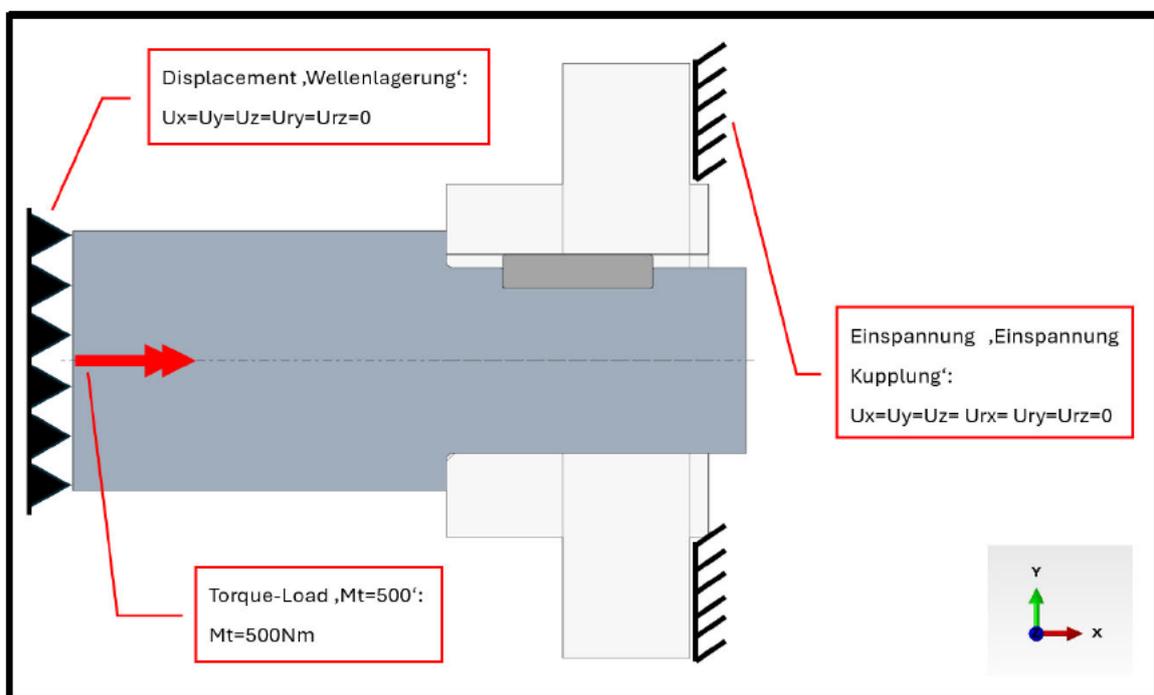


Abbildung 24: Mechanisches Modell V1 der PFV

Hierbei soll die Momentübertragung simuliert werden, indem das Drehmoment von der linken Schnittfläche der Welle eingeleitet wird, während die abgesetzte Fläche der Scheibenkupplung als konservative Annahme raumfest (in Abaqus „Encastre“) eingespannt ist. Die Lasteinleitung erfolgt somit wellenseitig bei einer Ableitung der Last durch die Kupplung.

Hierbei wird für die Lasteinleitung ein Referenzpunkt (in Abaqus „Reference Point“) erstellt, welcher mit einer Zwangsbedingung (in Abaqus „Constraint“) an die Wellenschnittfläche gebunden wird, sodass diese stets dieselben Bewegungen durchführen (s. Abbildung 25):

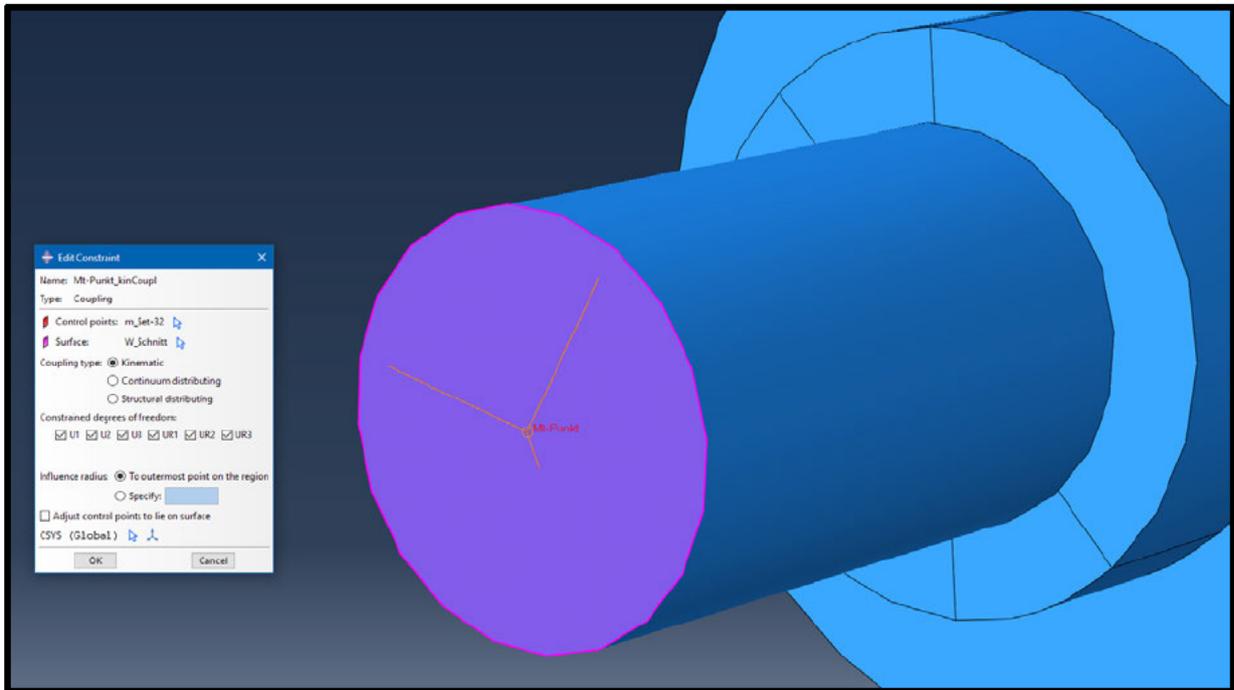


Abbildung 25: Zwangsbedingung zwischen der Wellenschnittfläche und Referenzpunkt

Weiterhin wird eine Wellenlagerung durch eine Randbedingung initiiert, die lediglich Rotationen um die Wellenachse ( $U_{rx}$ ) (s. Abbildung 24) zulässt. Diese Randbedingung müsste eigentlich nicht eingeführt werden, da die Welle ebenso durch den Kontakt zwischen dem Fügedurchmesser und dem Nabeninnendurchmesser gelagert werden würde. Jedoch bringt diese Maßnahme numerische Stabilität in die FE-Berechnung. Eine Validierung und Verifizierung der Lasteinleitung über den Referenzpunkt sowie Randbedingung ‚Wellenlagerung‘ ist in der angehängten FE-Dokumentation (s. Anhang C1) zu finden.

Als nächstes erfolgt die Definition von Kontaktarten (in Abaqus „Interaction Properties“), die das Verhalten der Wirkflächenpaare (in Abaqus „Interactions“) möglichst akkurat nachbilden. Dabei muss in den Einstellungen ein Normal- und Tangentialverhalten definiert werden. Für das FE-Modell werden zwei Kontaktarten sowie sieben Kontaktpaarungen gebildet. Hierbei sollte die Kontaktdefinition zuerst erfolgen, da diese auf eine Kontaktpaarung angewendet werden muss.

Die Vorstellung der Kontaktarten sowie der dazugehörigen Kontaktpaarungen erfolgt hintereinander. Nachfolgend wird die Definition der ersten Kontaktart „Stahlkontakt“ sowie die entsprechenden Flächenpaarungen vorgestellt. Für den „Stahlkontakt“ werden folgende Einstellungen für das Tangential- und Normalverhalten (in Abaqus „Tangential Behavior“ bzw. „Normal Behavior“) vorgenommen:

- Normalverhalten: „Hard Contact“ auf Standardeinstellungen
- Tangentialverhalten: „Penalty“ mit einem Gleitreibungskoeffizienten von  $\mu=0,05$

Weiterhin werden die dazugehörigen Wirkflächenpaarungen in Abbildung 26 dargestellt:

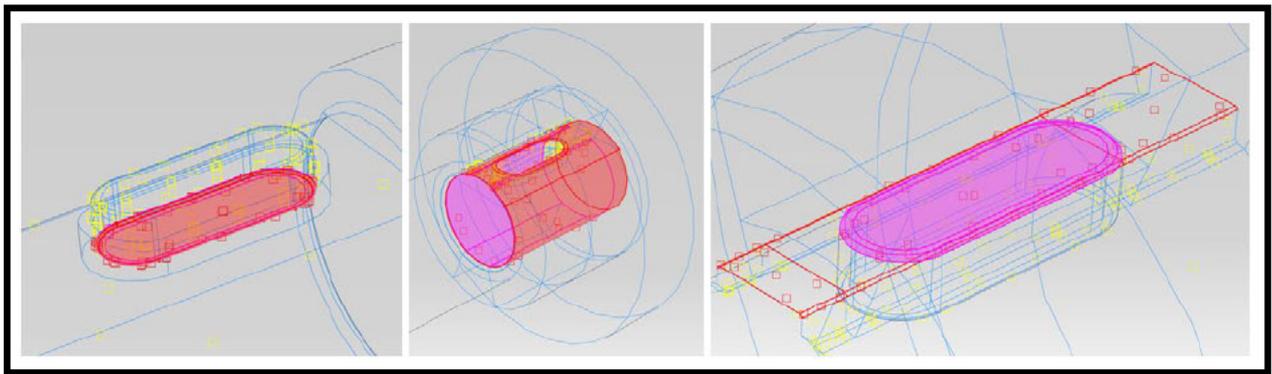


Abbildung 26: Flächenpaarungen 'Stahlkontakt'

Hierbei werden zum einen jeweils eine Paarung zwischen der unteren sowie oberen Passfederfläche und dem Wellen- bzw. Nabennutgrund inklusive den Nutgrundradien gebildet. Ebenfalls wird ein Kontaktpaar zwischen dem Wellen-Fügedurchmesser und dem Nabeninnendurchmesser erstellt. Für die Einstellung des Tangentialverhaltens einer Stahl-Stahl Paarung sind Reibwerte u. A. im Roloff/Matek zu finden (s. Tabelle 4):

TB 4-1 Reibungszahlen				
a) Haft- und Gleitreibungszahlen (Anhaltswerte für den Maschinenbau)				
Werkstoffpaarung	Haftreibungszahl $\mu_0$ <sup>1)</sup>		Gleitreibungszahl $\mu$	
	trocken <sup>2)</sup>	geschmiert	trocken <sup>2)</sup>	geschmiert
Stahl auf Stahl	0,2...0,8	0,10	0,2...0,7	0,10
Kupfer auf Kupfer	–	–	0,6...1,0	0,10
Stahl auf Gusseisen	0,2	0,10	0,20	0,05
Gusseisen auf Gusseisen	0,25	0,15	0,20	0,10
Gusseisen auf Cu-Legierung	0,25	0,15	0,20	0,10
Bremsbelag auf Stahl	–	–	0,5...0,6	–
Stahl auf Eis	0,03	–	0,015	–
Stahl auf Holz	0,5...0,6	0,10	0,2...0,5	0,05
Holz auf Holz	0,4...0,6	0,15...0,20	0,2...0,4	0,10
Leder auf Metall	0,60	0,20	0,2...0,25	0,12
Gummi auf Metall	–	–	0,50	–
Kunststoff auf Metall	0,25...0,4	–	0,1...0,3	0,04...0,1
Kunststoff auf Kunststoff	0,3...0,4	–	0,2...0,4	0,04...0,1

<sup>1)</sup> Die Haftreibungszahl  $\mu_0$  einer Werkstoffpaarung ist meist geringfügig größer als die Gleitreibungszahl  $\mu$ . Sie ist nur für den Grenzfall des Übergangs in die Bewegung definiert.

<sup>2)</sup> Bei technisch üblichen, geringen Verunreinigungen.

Tabelle 4: Reibungszahlen [RM-23] -TB 4-1 a)

Für den „Stahlkontakt“ wird ein geringer Reibungskoeffizient von  $\mu=0,05$  gewählt, um eine Spiel- bzw. Übergangspassung zwischen dem Wellenfuge- und dem Nabeninnendurchmesser zu simulieren. Dieser Wert ist geringer als ein übliches Maß für eine Stahl-Stahl-Paarung. Hierbei handelt es sich um einen mündlich vereinbarten Erfahrungswert.

Das Normalverhalten des Stahlkontaktes wird mit einem harten Kontakt (in Abaqus „Hard contact“) auf Standardeinstellung erzeugt. Diese Einstellung lässt keine Steuerung des Kontaktes zu, sodass sich eine beliebige Pressung beim Aufeinandertreffen der Flächenpaare einstellt [MIT-117] (s. Abbildung 27):

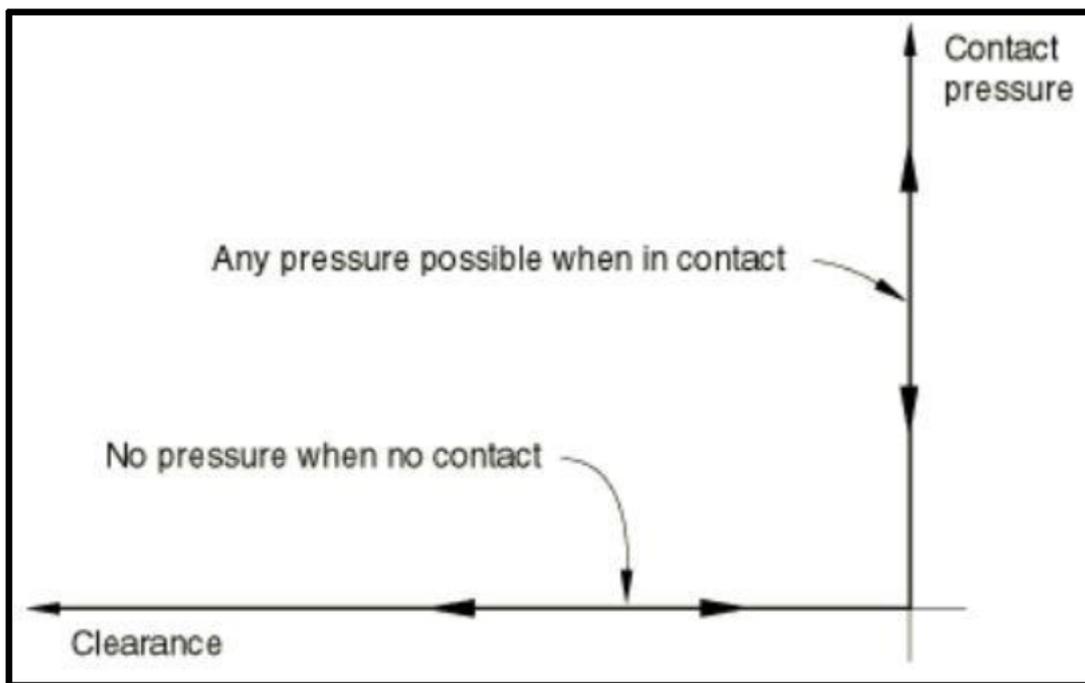


Abbildung 27: Verhalten der Flächenpressung bei einem 'Hard Contact' auf Standardeinstellungen [MIT-117]

Die zweite Kontaktart erhält die Bezeichnung „Passfederflankenkontakt“ und wird mit den folgenden Einstellungen definiert:

- Normalverhalten: „Hard Contact“ auf Standardeinstellungen
- Tangentialverhalten: „Penalty“ mit einem Gleitreibungskoeffizienten von  $\mu=0,2$

Die Kontaktarten „Stahlkontakt“ und „Passfederflankenkontakt“ unterscheiden sich somit lediglich in ihren tangentialen Reibwerten. Für den ‚Passfederflankenkontakt‘ ergeben sich die in Abbildung 28 gezeigten Kontaktpaare:

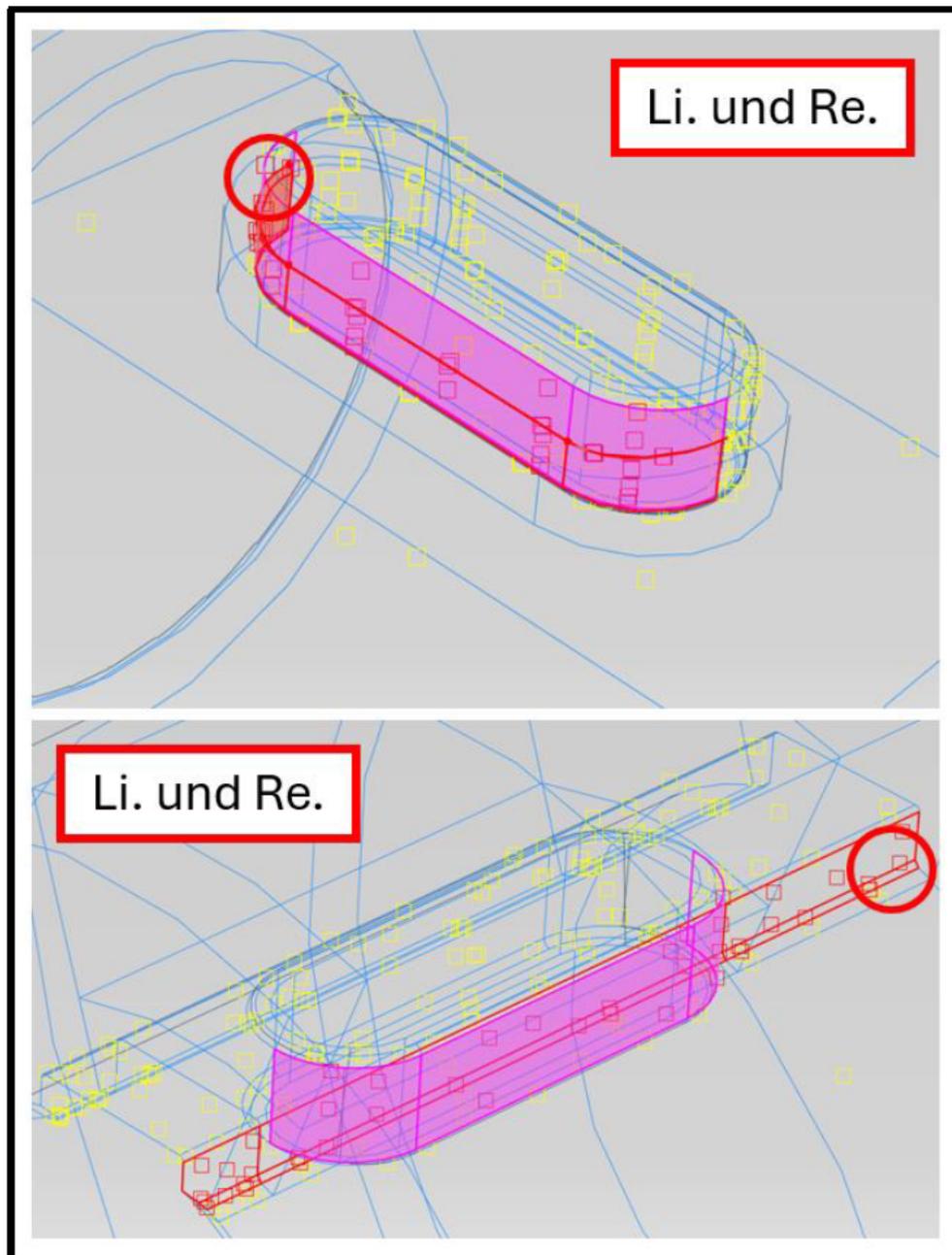


Abbildung 28: Flächenpaarungen 'Passfederflankenkontakt'

Es werden jeweils die beidseitigen Nutflanken der Welle und der Nabe mit den Flanken der Passfeder gepaart, sodass sich 4 Kontaktpaare ergeben. Hierbei sind die Fasen der jeweiligen Nutkante mit inbegriffen. Mit einem erhöhten Reibwert von  $\mu=0,2$  soll dabei ein strammer Sitz der PF in der Wellen- und Nabennut simuliert werden.

Mit dem bis hier vorgestellten Modellaufbau müssen in jeder Berechnung die in Abbildung 24 dargestellten Randbedingungen, das Torsionsmoment von 500 Nm sowie alle Kontaktpaarungen der Abbildungen 26 und 28 im FE-Modell initiiert werden. Das Aufbringen des Torsionsmomentes sollte weder zeitgleich noch vor der Aktivierung der Kontakte erfolgen, da Kontaktrechnungen numerisch anspruchsvoll sind und sich weiterhin ein ungenaues Modellverhalten entstehen könnte. Deswegen muss die FE-Berechnung hierarchisch in sinnvolle Zwischenschritte (in Abaqus „Steps“) gegliedert werden. Hierzu bietet die nachfolgende

Tabelle 5 eine Übersicht:

	1. Schritt ‚Initial‘	2. Schritt ‚Kontakt‘	3. Schritt ‚Kraftaufbringung‘
Randbedingungen	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
Kontakte		<b>X</b>	<b>X</b>
Torsionsmoment			<b>X</b>

*Tabelle 5: FE-Berechnungsschritte*

Der Berechnungsschritt ‚Initial‘ ist Programmstandard und bietet sich für die Einführung der Randbedingungen an. Der zweite Schritt in der FE-Berechnung „Kontakt“ dient zur Initiierung aller zuvor vorgestellten Kontaktpaare. Abschließend wird im Schritt „Kraftaufbringung“ das Torsionsmoment von 500 Nm aufgebracht. Damit ist das FE-Modell fertig erstellt. Weitere Hinweise zur Kontakterstellung und zu den Berechnungsschritten sind im Anhang C2 zu finden.

Im folgenden Abschnitt wird die Vorgehensweise bei der Auswertung der FE-Ergebnisse erläutert.

### 3.2 Vorgehensweise bei der FE-Auswertung

Der Schwerpunkt der hier durchgeführten FE-Analysen liegt auf der wirkenden Flächenpressung in den tragenden Nutflanken von Welle und Nabe. Zur quantitativen Beurteilung werden die analytischen Ergebnisse nach der DIN 6892 herangezogen. Für die qualitative Bewertung der Flächenpressung sind zusätzliche Ressourcen erforderlich. Forbrigs weitreichende experimentelle und numerische Untersuchungen (s. Abschnitt 1.4) umfassen u. A. FE-Analysen an einem PFV-Modell unter statischer Torsionsbelastung. Um Forbrigs FE-Ergebnisse für qualitative Bewertungen nutzen zu können, wird das in Abbildung 15 gezeigte Flächendiagramm näher untersucht (s. Abbildung 29):

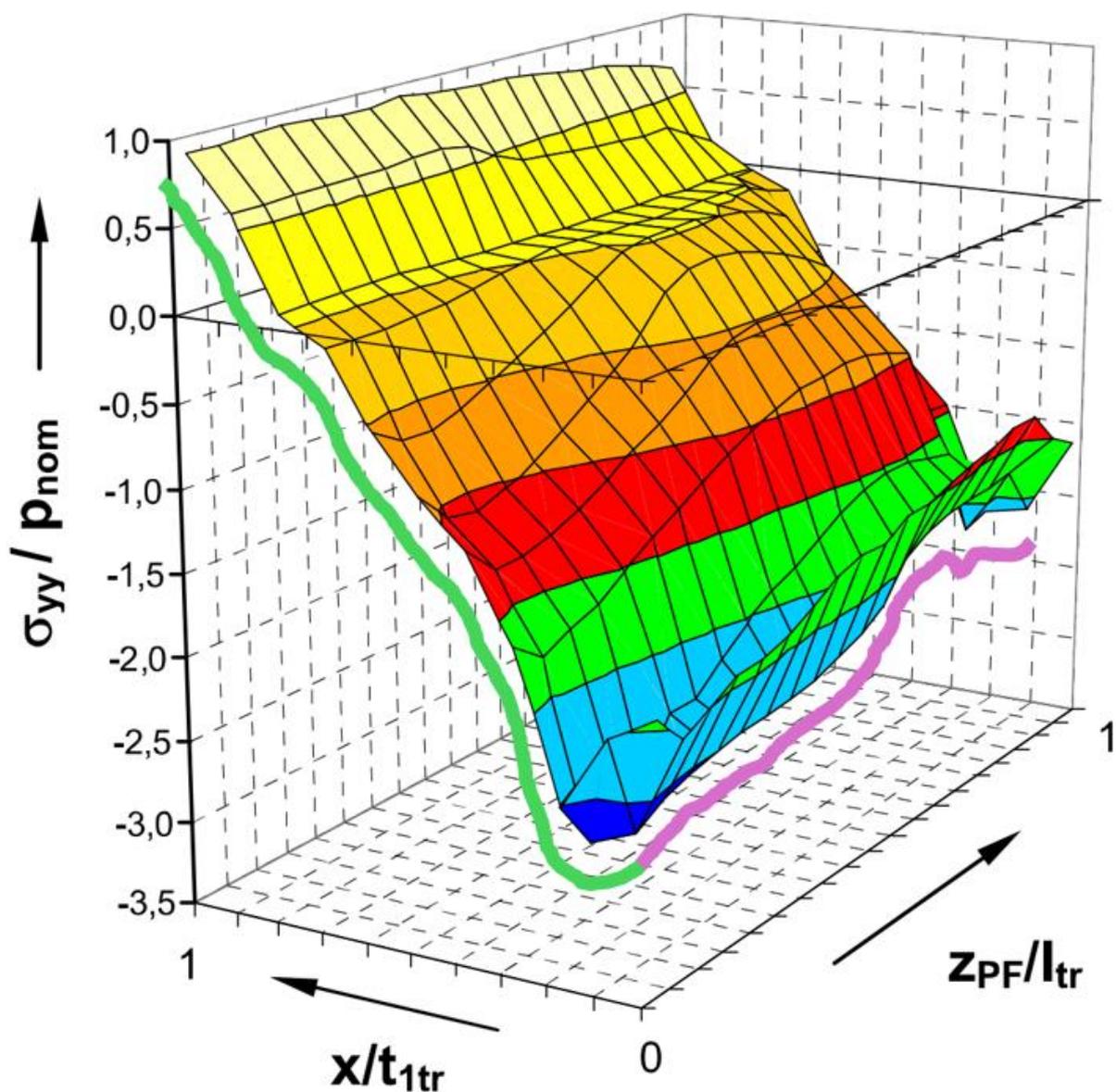


Abbildung 29: FE-Ergebnisse von Forbrig bei statischer Torsion [FbrgF-06]

Hierbei wird die auf der belasteten Wellennutflanke wirkende Normalspannung auf eine bezogene Pressung normiert und dreidimensional über die tragende Länge und Höhe aufgetragen. Zusätzlich kann Forbrigs Verformungsfigur der PF (s. Abbildung 15) für qualitative Bewertungszwecke herangezogen werden. Um eine verbesserte Vergleichbarkeit mit den hier durchgeführten numerischen Ergebnissen zu gewährleisten, werden weiterhin Forbrigs bezogene Auswertekoordinaten für die FE-Analysen übernommen (Abbildung 30):

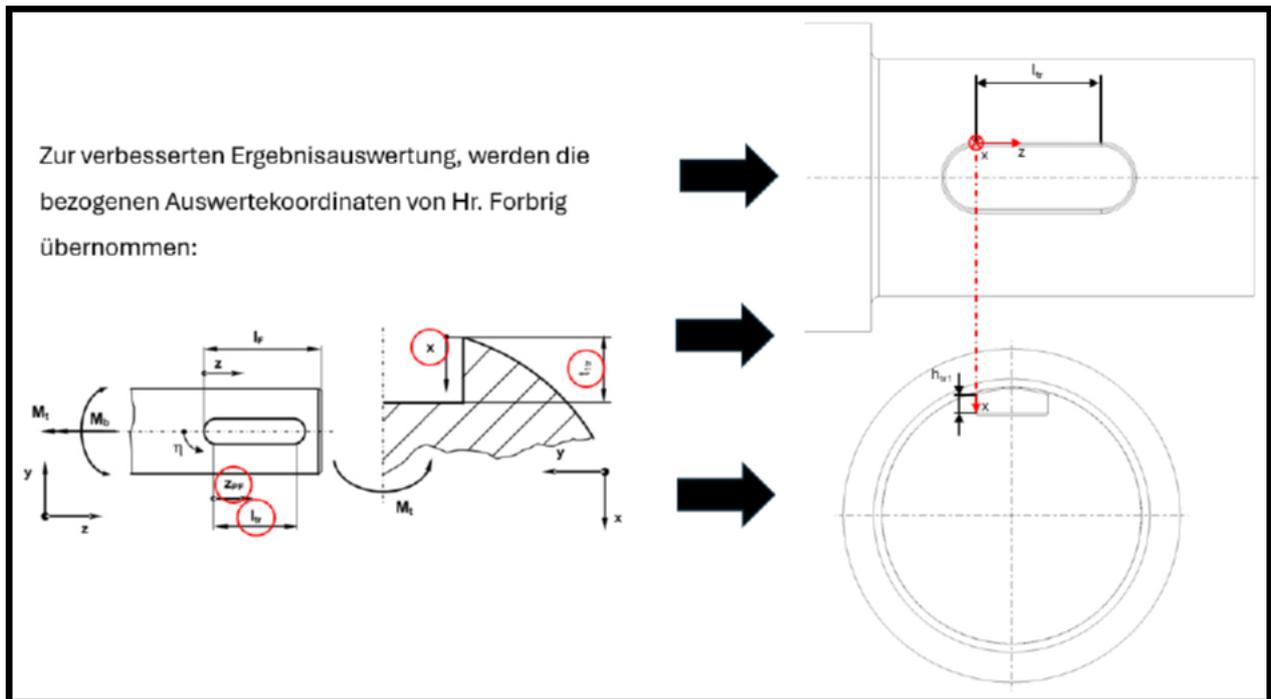


Abbildung 30: Bezogene Auswertekoordinaten von Forbrigs FE-Ergebnissen [FbrgF-06]

Davon ausgehend, dass sich die Normalspannung hauptsächlich aus der Pressung der Passfeder zusammensetzt, wird ein kritischer Pfad entlang des 3D-Verlaufes gezogen (s. Abbildung 29), um die Verteilung der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennuthöhe und -länge separat betrachten zu können. Diese Verteilungen werden vereinfacht in Abbildung 31 dargestellt.

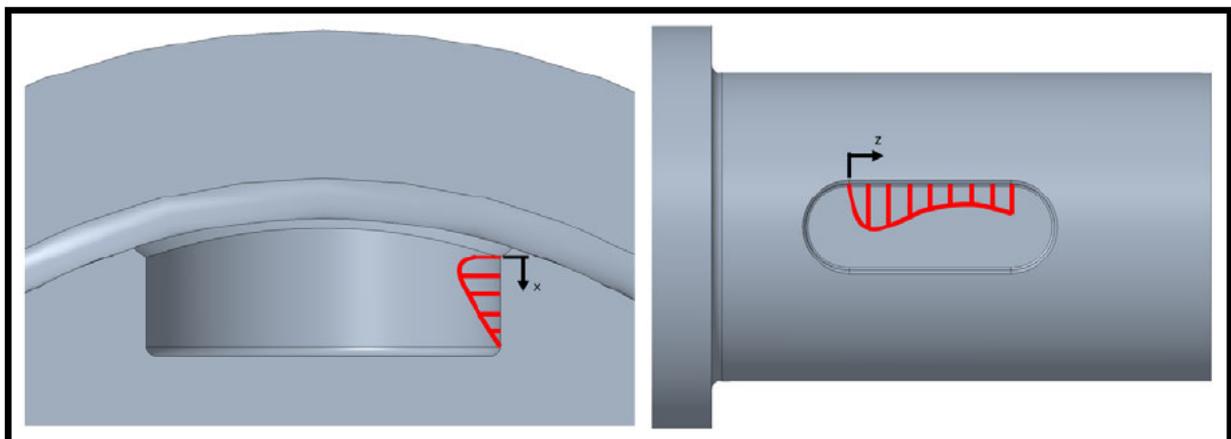


Abbildung 31: Vereinfachte Verteilung der Flächenpressung

Das Maximum der Flächenpressung stellt sich am Anfang der Wellennut ein, wo gleichzeitig die Lasteinleitung stattfindet. Dabei nimmt die Pressung entlang der tragenden Länge ab, bis sie im letzten Drittel, im Bereich der Lastableitung wieder leicht ansteigt. Entlang der tragenden Wellennuthöhe wird dabei von einem näherungsweise linearen Anstieg der Pressung ausgegangen, die unterhalb der Nutkante ihr Maximum erreicht und nachfolgend leicht abnimmt. Für die Nabe liegt kein FE-Ergebnis vor, welches für die vorliegende Simulation genutzt werden kann. Somit ist eine qualitative Bewertung der Flächenpressung innerhalb der Nabennutflanke nur eingeschränkt möglich.

Um die Flächenpressung im FE-Modell präzise erfassen zu können, müssen Pfade (in Abaqus „Paths“) entlang der Elementknoten gezogen werden. Dieser Vorgang erfolgt gemäß den Abbildungen 32 und 33.

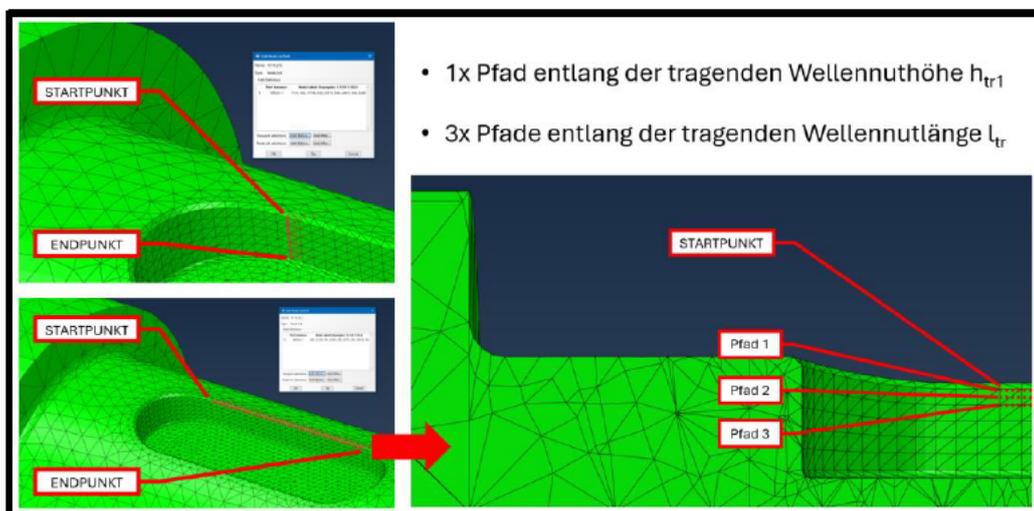


Abbildung 32: Pfade in FEM an der Welle

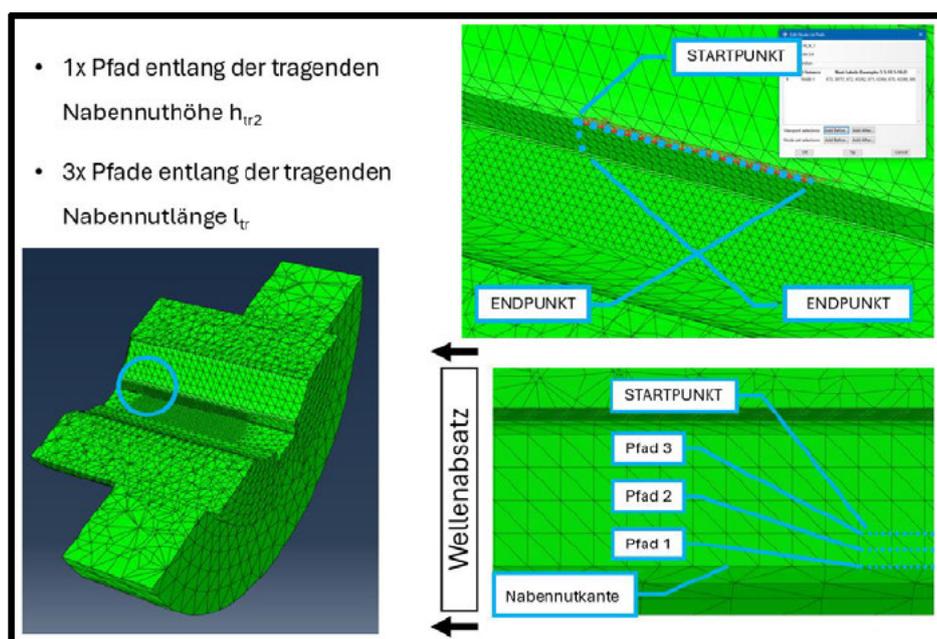


Abbildung 33: Pfade in FEM an der Nabe

Die Referenzergebnisse von Forbrig zeigen, dass sich das Maximum der Flächenpressung nicht auf der Nutkante, sondern leicht unterhalb einstellt. Deswegen werden 3 Pfade an und unterhalb der Nutkante entlang der tragenden Wellennutlänge erstellt. Der Startpunkt der Pfade ( $z=0$ ) bildet der Übergang vom rundstirnigen zum prismatischen Bereich der belasteten Wellennutflanke. In diesem Bereich wird außerdem ein Pfad entlang der tragenden Wellennuthöhe gezogen, dessen Startpunkt auf der Nutkante ( $x=0$ ) liegt und am Übergang zum Nutgrundradius endet. Die Pfadvergabe in der Nabe erfolgt analog zur Welle. Weiterhin werden zwei weitere Pfade an den belasteten PF-Flanken gezogen, die auf der Höhe von den 3. Pfaden der Welle bzw. der Nabe liegen.

Die jeweiligen Ergebnisse entlang der Pfade werden von Abaqus in Excel importiert und grafisch ausgewertet. Dabei wird die in Abbildung 34 gezeigte Diagrammstruktur festgelegt.

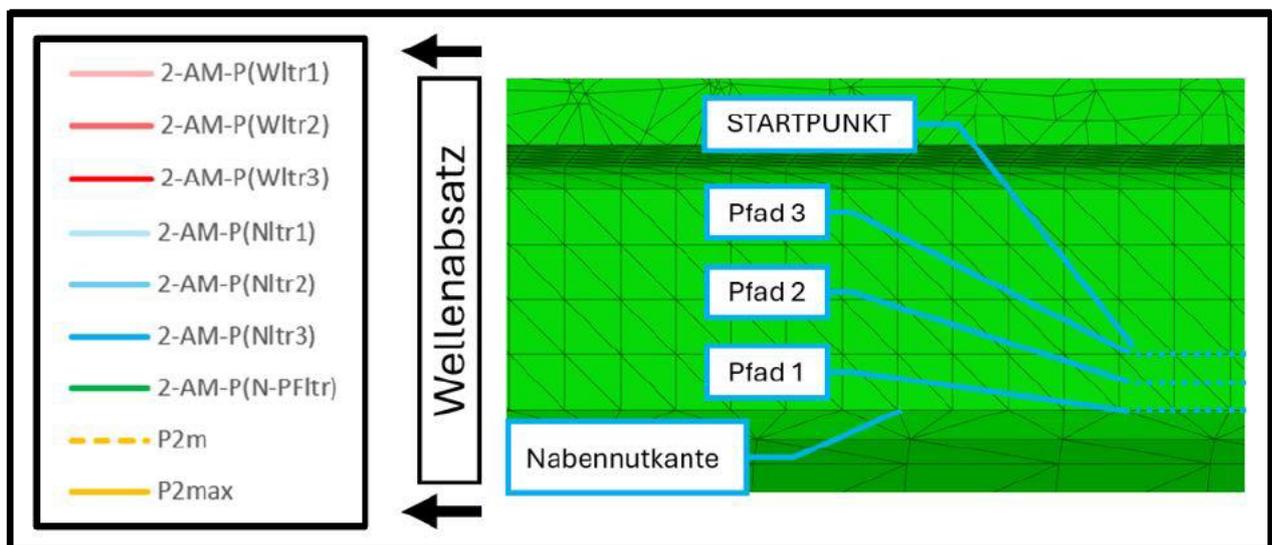


Abbildung 34: Grundlegende Diagrammstruktur

Hierbei wird folgende Farbgebung für die Ergebnisse in den Diagrammen verwendet:

#### Farbgebung:

- Welle: Rot
- Nabe: Blau
- Passfeder: Grün
- Analytische Ergebnisse: Orange

#### Sichtbarkeit:

- Pfad 1: 70% Transparenz
- Pfad 2: 40% Transparenz
- Pfad 3: 0% Transparenz

Die Graphen entlang der tragenden Länge (Pfad 1-3) unterscheiden sich außerdem hinsichtlich ihrer Transparenz. Weiterhin wird die analytisch bestimmte Flächenpressung nach MC als gestrichelte Linie in die Diagramme aufgetragen. Wenn Ergebnisse aus verschiedenen Berechnungen in einem Diagramm dargestellt werden, wird ebenso mit gestrichelten Linien gearbeitet.

Im Folgenden werden diverse FE-Ergebnisse vorgestellt und untersucht, weswegen eine einheitliche Vorgehensweise bei der Auswertung festgelegt werden muss:

1. Die Verschiebung des Modells ist die primäre Berechnungsgröße einer FE-Berechnung und sollte stets zuerst untersucht werden. Deswegen werden vorweg die Kippfigur der PF in der Nut sowie die Verformung der belasteten Nutflanken bewertet und anschließend die tangentielle Verschiebung der Nutkanten (Pfad 1) mit Zylinderkoordinaten untersucht.
2. Erst wenn die Verschiebungen sinnvoll sind, kann die Spannungsverteilung in einem FE-Modell ausgewertet werden. Hierzu wird die Abaqus-Output-Größe „CPRESS“ in der belasteten Wellen- und Nabennutflanke untersucht. Mit „CPRESS“ wird die Spannung ausgegeben, die Normal auf einer Fläche wirkt, wenn Kontaktflächen aufeinandertreffen. Diese Größe eignet sich besonders für die vorliegende FE-Analyse.
3. Anschließend wird der CPRESS-Verlauf entlang der Pfade in Diagrammen aufgetragen. Damit kann der Flächenpressungsverlauf entlang der tragenden Nuthöhen und -längen qualitativ und quantitativ untersucht werden.
4. Darauffolgend wird eine manuelle Konvergenzstudie der Flächenpressung durchgeführt. Hierfür wird das Netz in den Kontaktzonen der PF einmal auf 2 mm Elemente vergrößert und auf 0,5 mm Elemente verfeinert. Nachfolgend wird die Veränderung der Flächenpressung in den belasteten Nutflanken über die Elementgrößen aufgetragen.
5. Abschließend erfolgt ein Fazit zu den Berechnungsergebnissen

Die Untersuchung der Flächenpressung erfolgt stets zuerst für die Welle und anschließend für die Nabe. Mit der Festlegung der Auswertemethodik, kann nun die Untersuchung der FE-Ergebnisse durchgeführt werden. Weitere Informationen hinsichtlich der Vorgehensweise bei der FE-Auswertung sind im Anhang C3 zu finden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Ausgangsmodells mit dem Berechnungskürzel [2-AM] untersucht.

### 3.3 Ausgangsmodell [2-AM]-Post-Processing

Die Gesamtverformung der Passfeder in der PF-Nut wird in der folgenden Abbildung 35 dargestellt:

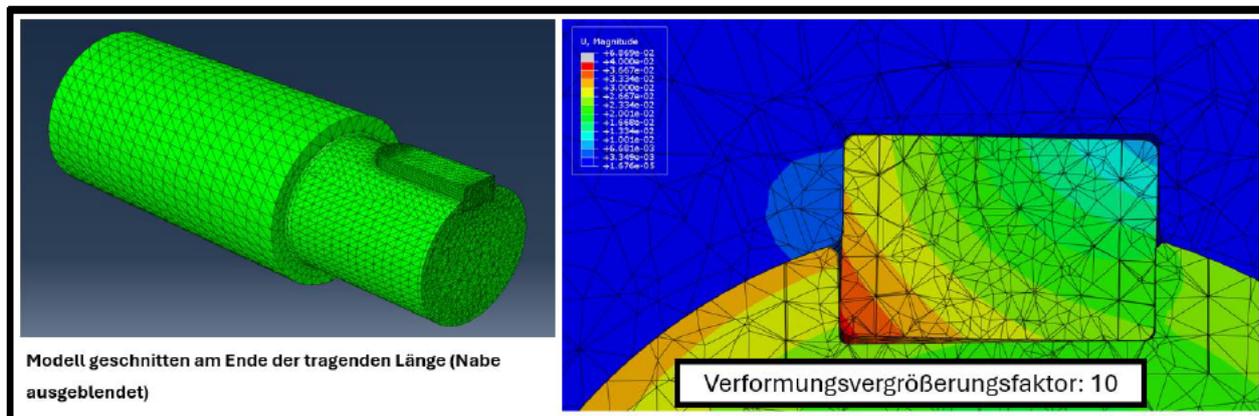


Abbildung 35: [2-AM]-PF-Verformungsfigur

Hierbei entspricht die Kippfigur dem Referenzergebnis der Abbildung 15. Die PF kippt in der Nut bei einer gleichzeitigen Weitung der Wellen- und Nabennut. Weiterhin wird in Abbildung 36 die Verformung der belasteten Nutflanken untersucht

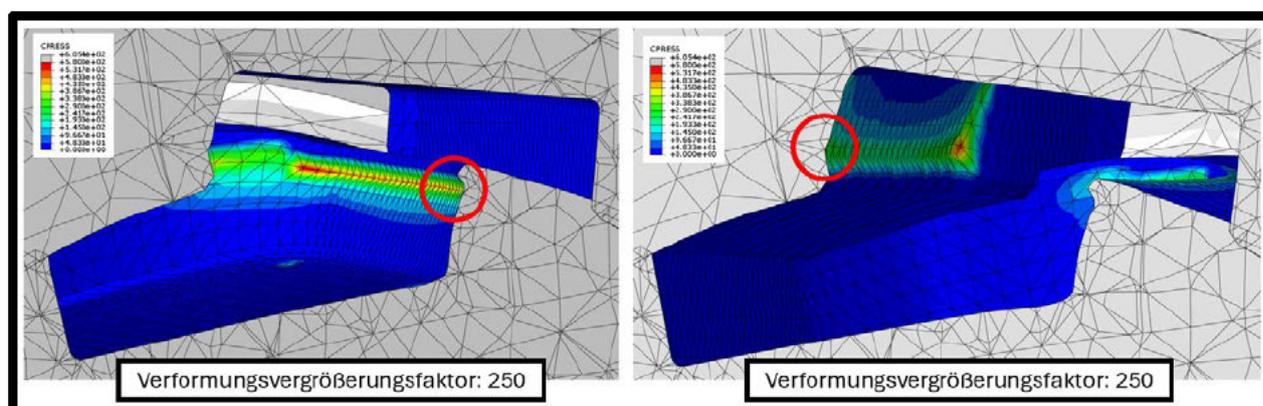


Abbildung 36: [2-AM]-Verformung der belasteten Nutflanken

Was hier auffällt, ist die Wölbung der Nutflanken unter den Nutkanten. Da hier geradstirnige Flächen aufeinandertreffen, sollte sich an diesen Stellen keine lokale Verformung einstellen. Weiterhin wird ein Abdruck der Passfeder in der belasteten Nabennutwand ersichtlich, was grundsätzlich richtig ist.

Das Diagramm 1 zeigt die tangentielle Verschiebung der belasteten Nutkanten:

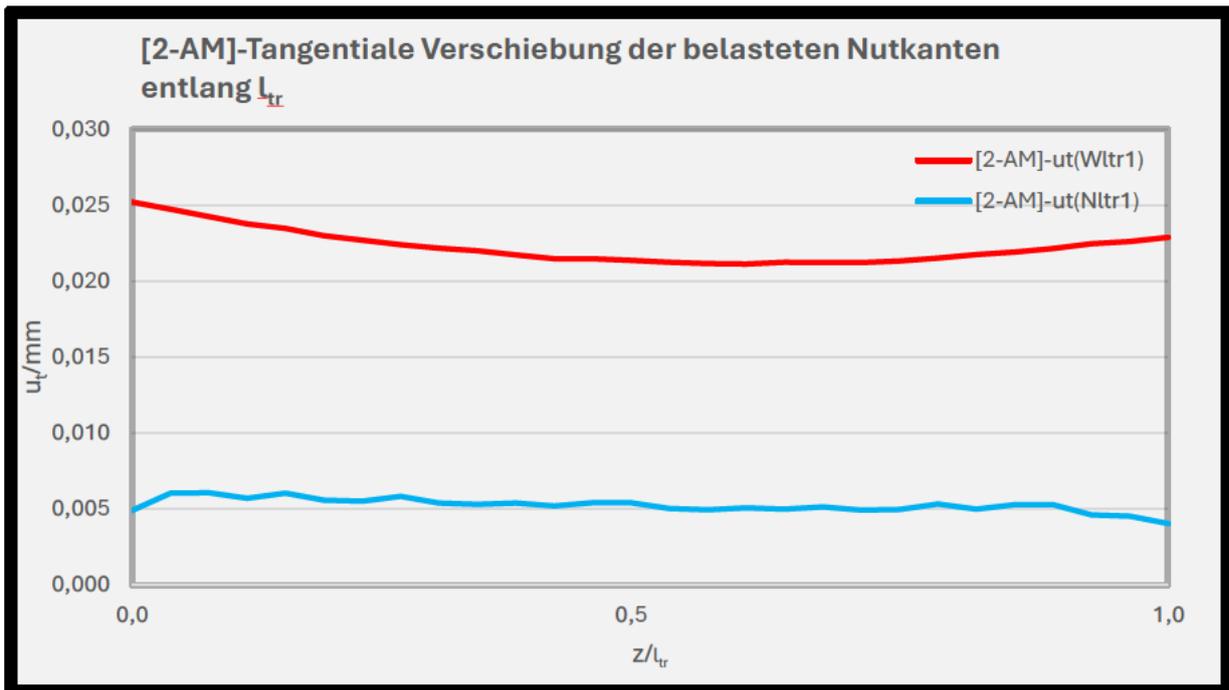


Diagramm 1: [2-AM]-Tangentiale Verschiebung der belasteten Nutkanten

Hier fällt zunächst einmal auf, dass die tangentielle Verschiebung der Nabennutkante deutlich kleiner als bei der Welle ausfällt. Das könnte aus den Randbedingungen resultieren, da die Welle im Vergleich zur Nabe mehr Bewegungsfreiraum hat. In der tangentialen Verschiebung der Nabennutkante lässt sich dabei der PF-Abdruck (s. Abbildung 36) in der Nabennutwand leicht erkennen. Die Verschiebung der Wellennutkante erscheint ebenfalls sinnvoll. Der Verlauf deutet darauf hin, dass im Bereich der Lasteinleitung ( $z=0$ ) eine größere Verdrillung der Welle als im Bereich der Lastableitung ( $z=l_{tr}$ ) stattfindet. Hierbei wird die Wellendverdrillung in Lastableitungsrichtung durch die Einspannung der Kupplung zunehmend gehemmt.

Da die Untersuchung der Modellverformung abgeschlossen ist, können eine Analyse der Beanspruchungen erfolgen. Die Untersuchung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke wird mit der Betrachtung der CPRESS-Verteilung in der folgenden Abbildung 37 begonnen:

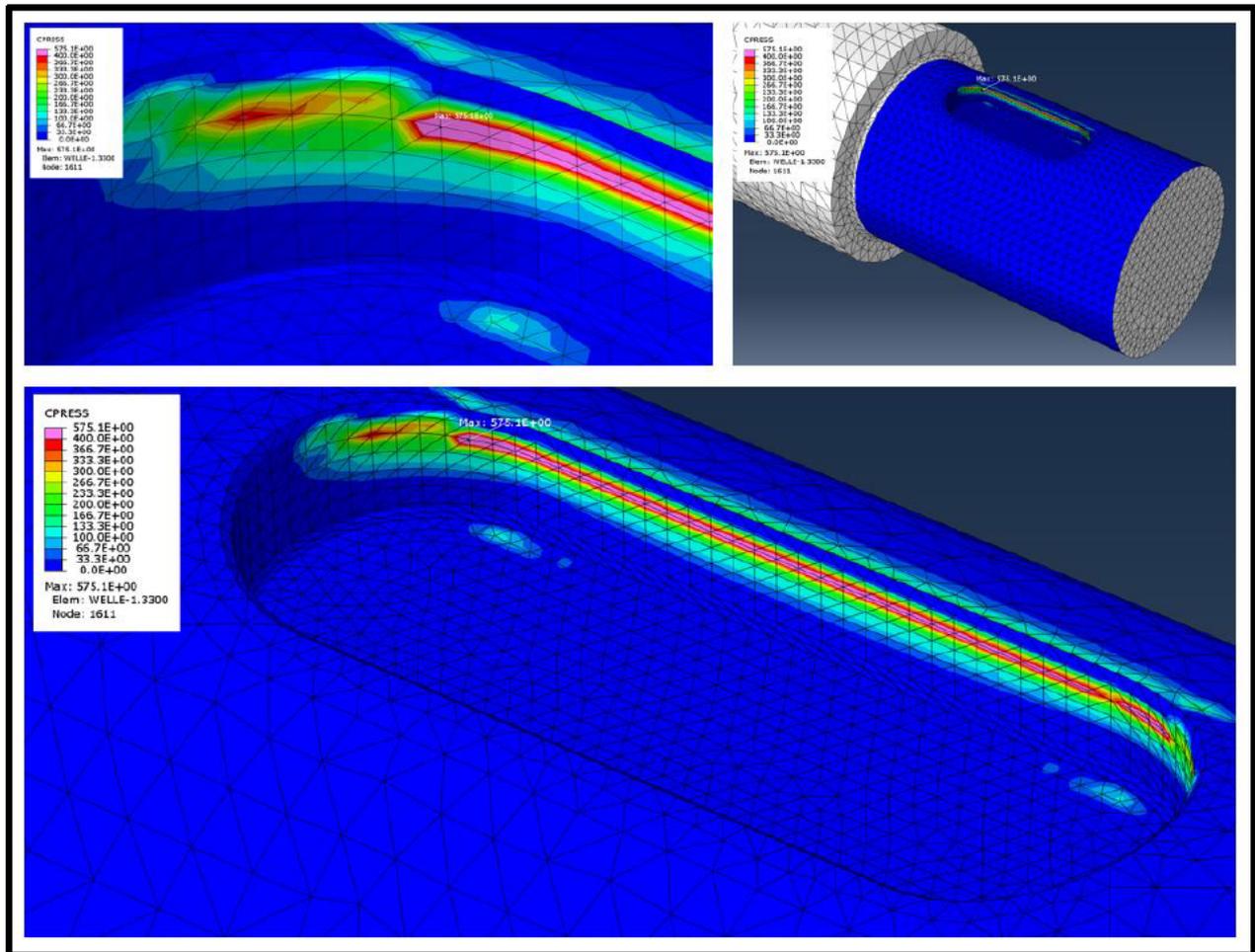


Abbildung 37: [2-AM]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke

Die größte Flächenpressung stellt sich hierbei deutlich unter der Nutkante ein. Das Maximum herrscht dabei im rundstirnigen Bereich der Wellennut, was eigentlich nicht der Fall sein sollte. Weiterhin scheint es, als ob nur ca. die Hälfte der tragenden Nabennutflanke an der Kraftübertragung beteiligt ist.

Für weitere Untersuchungen wird der Flächenpressungsverlauf im nachfolgenden Diagramm 2 gezeigt:

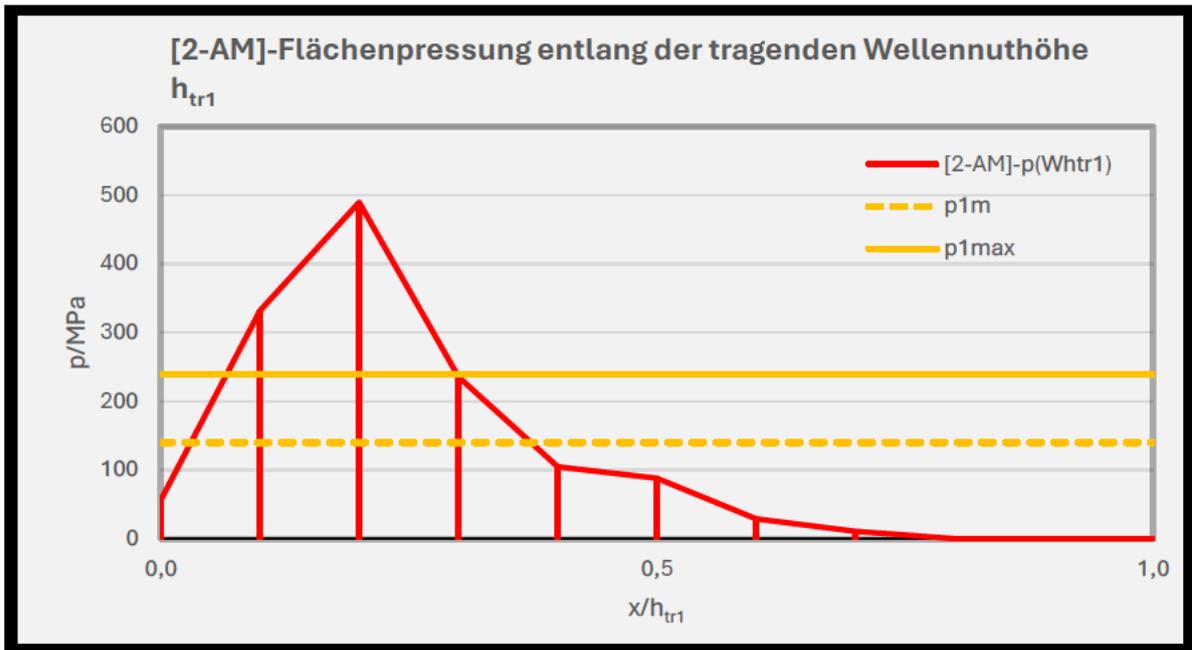


Diagramm 2: [2-AM]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennuthöhe

Hier zeigt sich, dass nicht die komplette tragende Wellennuthöhe an der Drehmomentübertragung beteiligt ist. Bei einem hohen Gradienten ergibt sich eine Flächenpressung von 500 N/mm<sup>2</sup>. Diagramm 3 trägt die Flächenpressung entlang der tragenden Wellennutlänge auf:

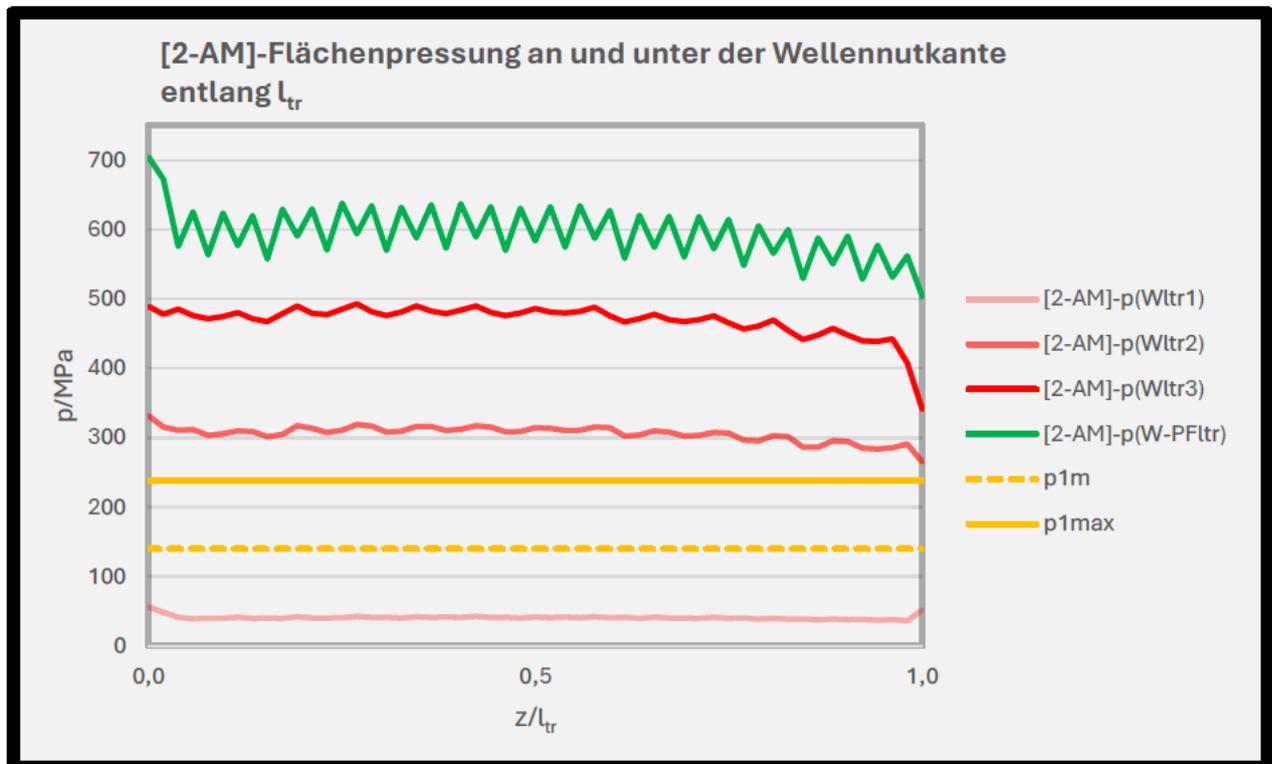


Diagramm 3: [2-AM]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennutlänge

Durch den Abstand der Graphen erkennt man auch hier den steilen Gradienten der Flächenpressung.

Weiterhin wirkt die Flächenpressung entlang der Pfade näherungsweise konstant, was nicht dem Referenzergebnis von Forbrig entspricht. Insgesamt sind die Ergebnisse in der belasteten Wellennutflanke nicht zufriedenstellend.

In der Abbildung 38 wird die Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke gezeigt:

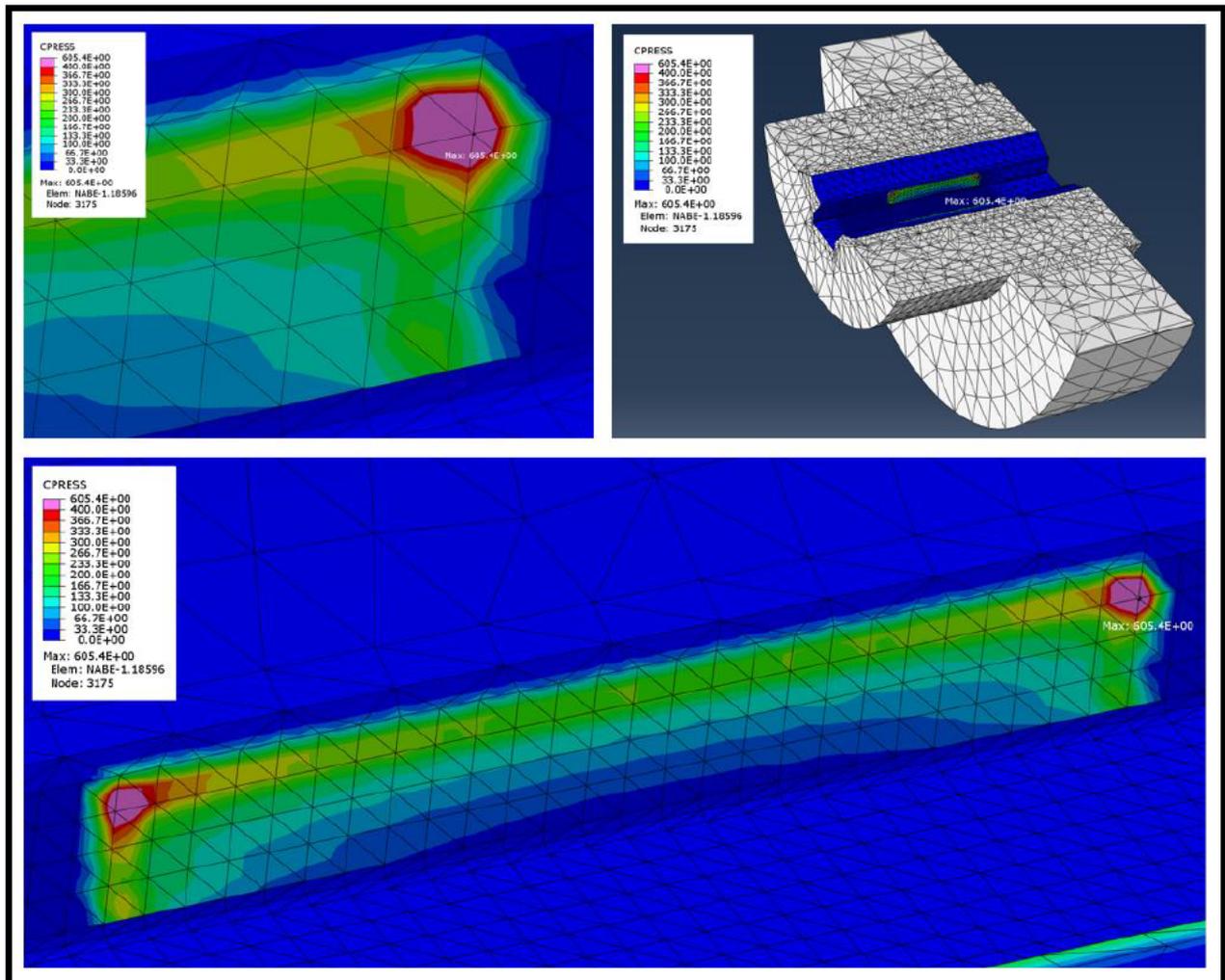


Abbildung 38: [2-AM]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke

Die größte Flächenpressung stellt sich sichtbar an den Enden des tragenden Bereiches der Nabennut unterhalb der Nutkante ein. Das Maximum liegt dabei im Bereich der Lastableitung ( $z=l_r$ ). Die Pressung nimmt zum Zentrum der Nabennutwand ab.

Weiterhin wird die Pressung entlang der tragenden Nabennutflanke im Bereich der Lasteinleitung betrachtet (s. Diagramm 4):

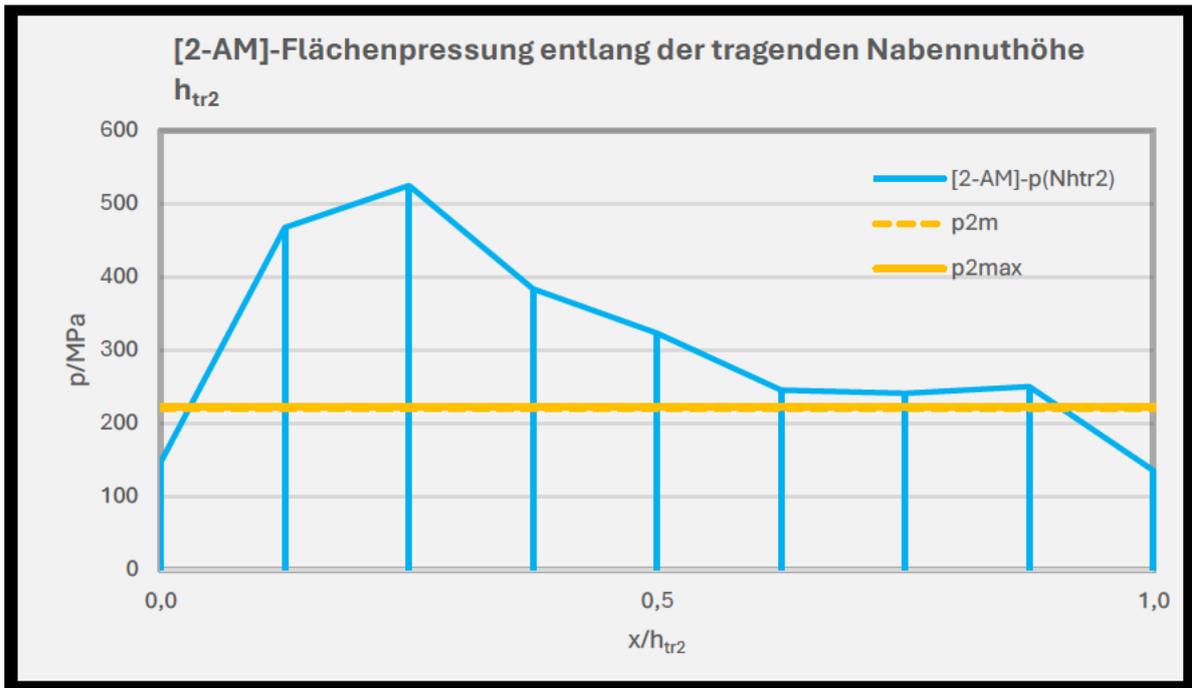


Diagramm 4: [2-AM]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennuthöhe

Auch in der Nabe entsteht ein hoher Gradient der Flächenpressung von der Nutkante aus. Mit etwas über 500 N/mm<sup>2</sup> liegt der Betrag der Pressung deutlich über den analytischen Ergebnissen. Weiterhin muss der Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennutlänge mit Diagramm 5 betrachtet werden:

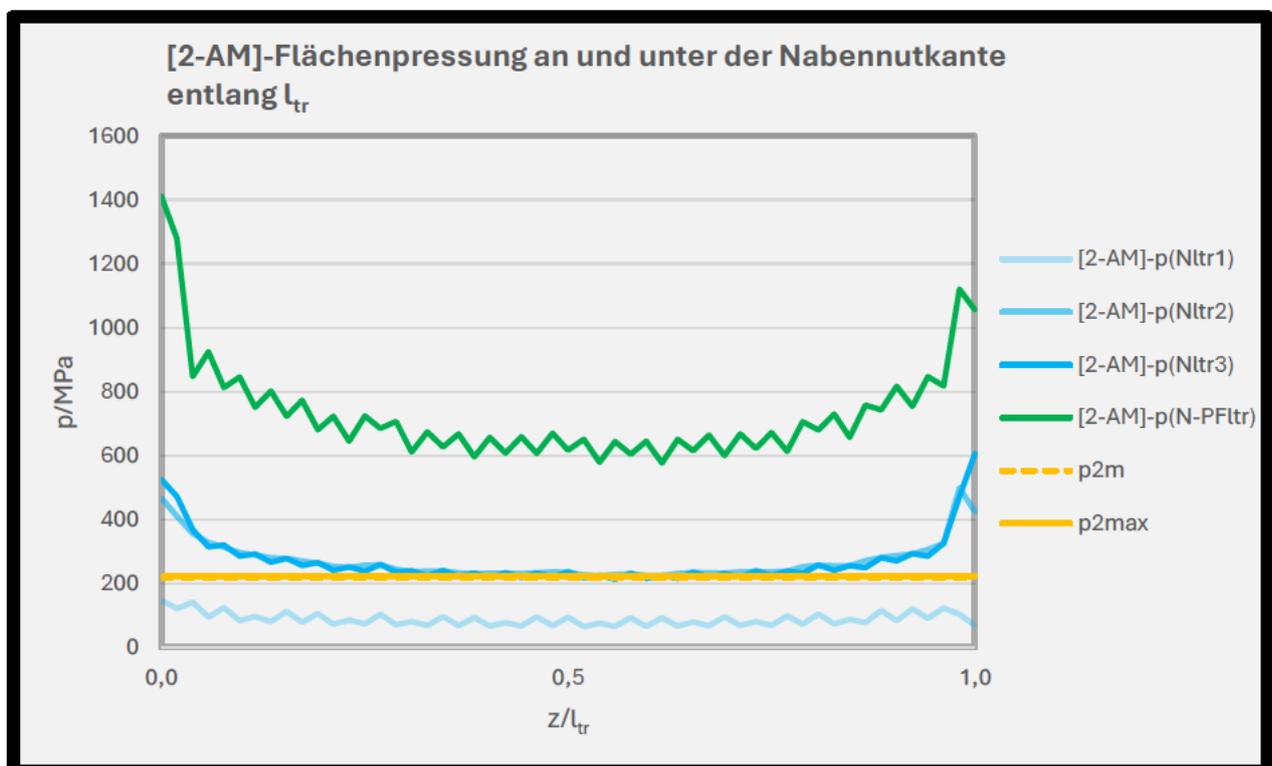


Diagramm 5: [2-AM]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennutlänge

Gemäß der Abbildung 38 liegt die größte Flächenpressung bei einem hohen Gradienten deutlich an den Enden der tragenden Länge und nimmt zur Mitte stark ab. Eine qualitative Bewertung kann zu diesem Zeitpunkt noch nicht erfolgen, da kein Referenzergebnis für die Pressung in der Nabe vorliegt. Abschließend erfolgt eine Konvergenzbetrachtung der Flächenpressung mit Diagramm 6 sowie ein Zwischenfazit:

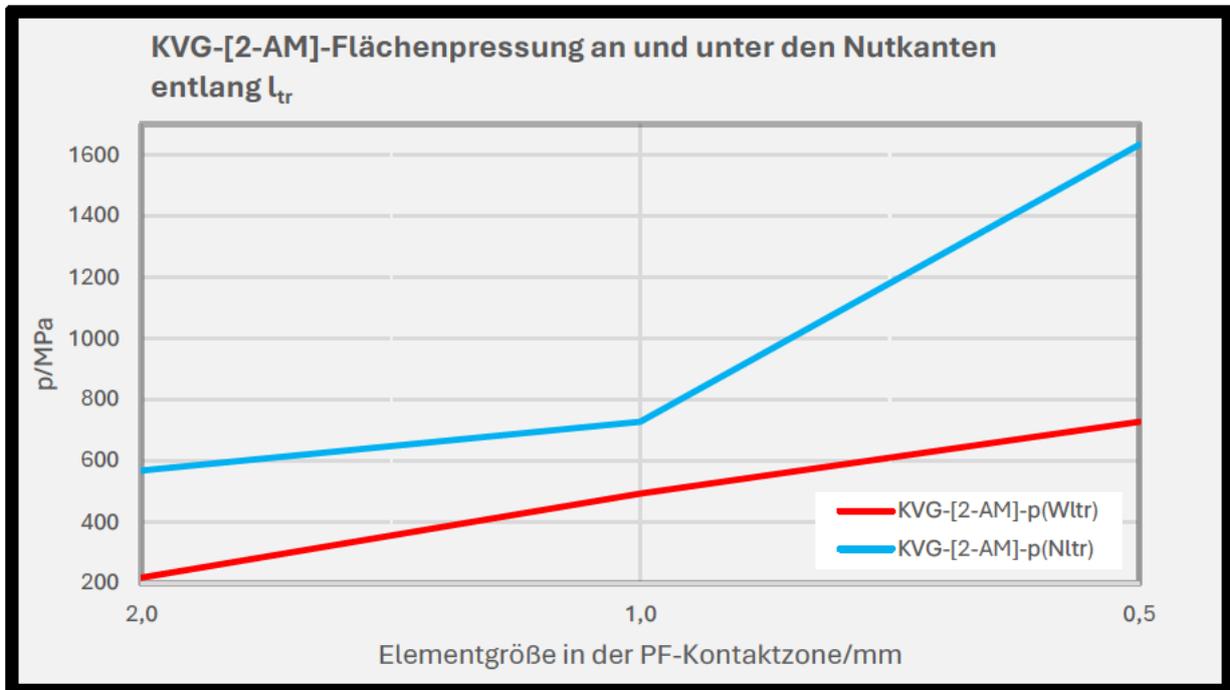


Diagramm 6: [2-AM]-Konvergenzprüfung der Flächenpressung

Insgesamt sind die Ergebnisse in dieser Berechnung noch nicht zufriedenstellend. Während die Verformungen des Modells qualitativ sinnvoll erscheinen, sind die Ergebnisse der Flächenpressung in der belasteten Wellen- und Nabennutflanke hinsichtlich des Verlaufes und des Betrages weder qualitativ noch quantitativ zufriedenstellend. Hierbei fällt besonders in der Welle die Wölbung der Nutflanken unterhalb der Nutkante auf, wo sich gleichzeitig auch die größte Pressung einstellt (s. Abbildung 37). Hierbei könnte eine geometrische Singularität entstanden sein, die weitere Untersuchungen erfordert. Hinweise zum Berechnungsverlauf sind in der angehängten Dokumentation des FE-Entwicklungsverlaufes (s. Anhang C4) zu finden.

Die Flächenpressung steigt bei einer Netzverfeinerung von 1 auf 0,5 mm Elemente rapide an. Somit wird hier keine Konvergenz vermutet. In der Welle lässt sich ebenfalls keine Abminderung der Pressung bei einem feiner werdenden Netz und somit keine Konvergenz der Flächenpressung feststellen. Hierbei sei erwähnt, dass diese Betrachtungen nicht ausreichen, um eine eindeutige Konvergenz der Ergebnisse festzustellen. Hierfür wären weitere Netzverfeinerungen nötig die mit vertretbarem Aufwand in dieser Arbeit nicht durchführbar sind.

## 4 Optimierung der FE-PFV

Die Ergebnisse der Berechnung [2-AM] sind nicht zufriedenstellen, weswegen eine Optimierung des FE-Modells gefordert ist. Hierfür werden verschiedene Änderungen an der FE-Struktur des Ausgangsmodells vorgenommen und dessen Einflüsse auf die Ergebnisse untersucht. Um eine Identifikation und Vergleichbarkeit der FE-Ergebnisse zu gewährleisten, muss eine eindeutige Struktur für den Berechnungsverlauf festgelegt werden (s. Tabelle 6):

Berechnungsnummer	FE-Modelländerung	Berechnungskürzel
2	Ausgangseinstellungen	[2-AM]
2.1	Entfernung der Fasen aus dem PF-Flankenkontaktpaarungen	[2.1-OF- $\mu=0,2$ ]
2.2	Erhöhung der Reibungszahl im ‚Passfederflankenkontakt‘ auf $\mu=0,3$	[2.2-OF- $\mu=0,3$ ]
2.3	Einführung eines linearen Normalkontaktes in den ‚Passfederflankenkontakt‘ bei einem $SSF=0,2$	[2.3-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,2]
2.4	Verringerung des $SSF$ auf 0,02	[2.4-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,02]
2.5	Verringerung des $SSF$ auf 0,003	[2.5-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]
2.6	Rückführung der Fasen in den ‚Passfederflankenkontakt‘	[2.6-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]

Tabelle 6: FE-Berechnungsstruktur

Die Einführung der Berechnung des Ausgangsmodells mit dem Kürzel [2-AM] ist bereits erfolgt. Nachfolgend wird eine Berechnung [2.1] durchgeführt, in der die Fasen der Wellen- und Nabennutkanten aus den Kontaktpaarungen des Passfederflankenkontaktes entfernt werden. Darauf folgt eine Berechnung [2.2] mit einem erhöhten Reibungskoeffizienten  $\mu$  im tangentialen Verhalten des Passfederflankenkontaktes. Anschließend wird eine neue Normalkontakteinstellung für den Passfederflankenkontakt eingeführt, dessen Verhalten mit 3 Berechnungen [2.3-2.5] untersucht wird. Mit der darauffolgenden Berechnung [2.6] wird der Einfluss der Fasen an den Nutkanten untersucht. Hierzu werden die Fasen wieder in Kontaktpaarungen des Passfederflankenkontakten zurückgeführt. Dabei wird die Modellstruktur der Berechnung [2.5] verwendet.

#### 4.1 Entfernung der Fasen aus dem PF-Flankenkontakt und Erhöhung des Reibwertes

Die FE-Ergebnisse des Ausgangsmodells haben keine zufriedenstellenden Ergebnisse geliefert. Hierbei stellt sich eine besonders hohe Pressung unter der Nutkante ein, wo sich gleichzeitig eine lokale Wölbung der Nut bildet. Ob hier eine geometrische Singularität vorliegt, soll mit der nachfolgenden Berechnung [2.1-OF- $\mu=0,2$ ] überprüft werden. Hierbei werden die Fasen über den Wellen- und Nabennutkanten aus den Kontaktpaarungen („Interactions“) des PF-Flankenkontaktes entfernt (s. Abbildung 28). Anschließend erfolgt eine Berechnung, mit einem tangentialen Reibwert von  $\mu=0,3$  (s. Tabelle 4) im ‚Passfederflankenkontakt‘ („Interaction Properties“) mit dem Kürzel [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]. Damit soll der Einfluss des Reibungskoeffizienten auf das FE-Modell eingehender untersucht werden. Aus vorherigen Versuchen hat sich ergeben, dass eine Berechnung mit einer erhöhten tangentialen Reibungszahl innerhalb einer Kontakteinstellung numerisch anspruchsvoll ist. Deswegen wird mit der Berechnung [2.6] eine temporäre Randbedingung eingeführt, mit der die untere Passfederfläche raumfest eingespannt wird (s. Abbildung 39).

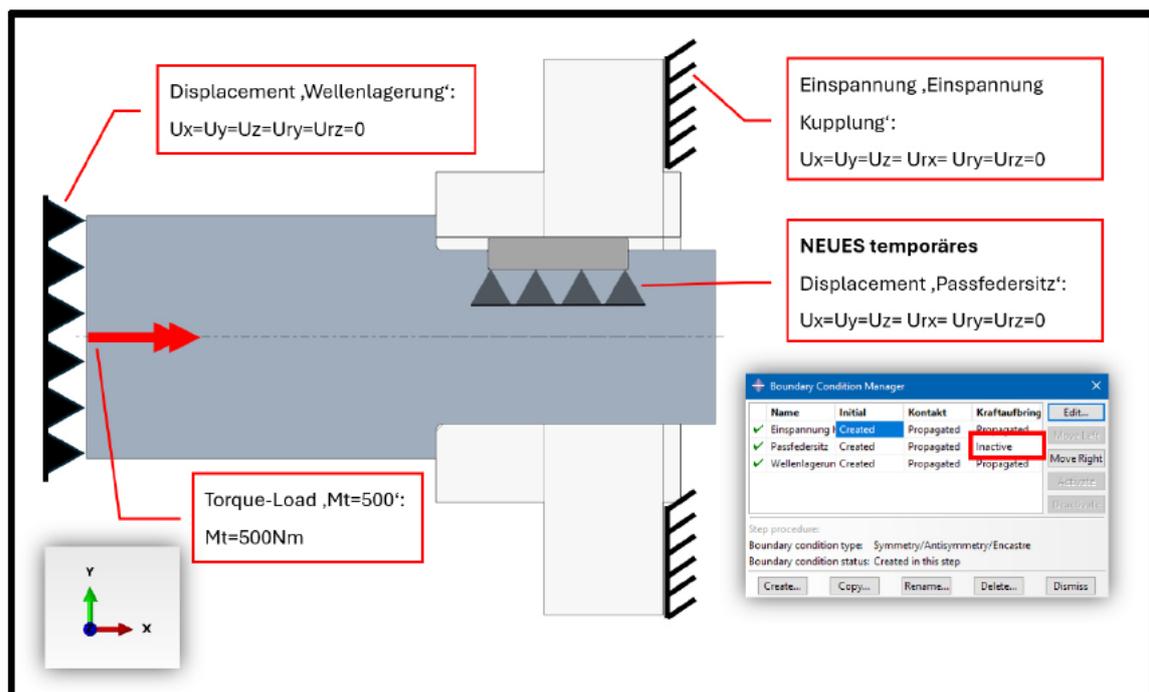


Abbildung 39: Mechanisches Modell V2 der PFV

Diese Randbedingung wird im letzten Berechnungsschritt „Kraftaufbringung“ (s. Tabelle 5) deaktiviert. Weitere Informationen zu dieser neuen Randbedingung sind in der angehängten Dokumentation des FE-Modells unter Anhang C6 zu finden. Die FE-Ergebnisse beider Berechnungen werden im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt.

4.1.1 [2.1-2.2]-Post-Processing

Die Auswertung der FE-Ergebnisse beginnt mit einer Betrachtung der Kippfigur der PF in der PF-Nut (s. Abbildung 40):

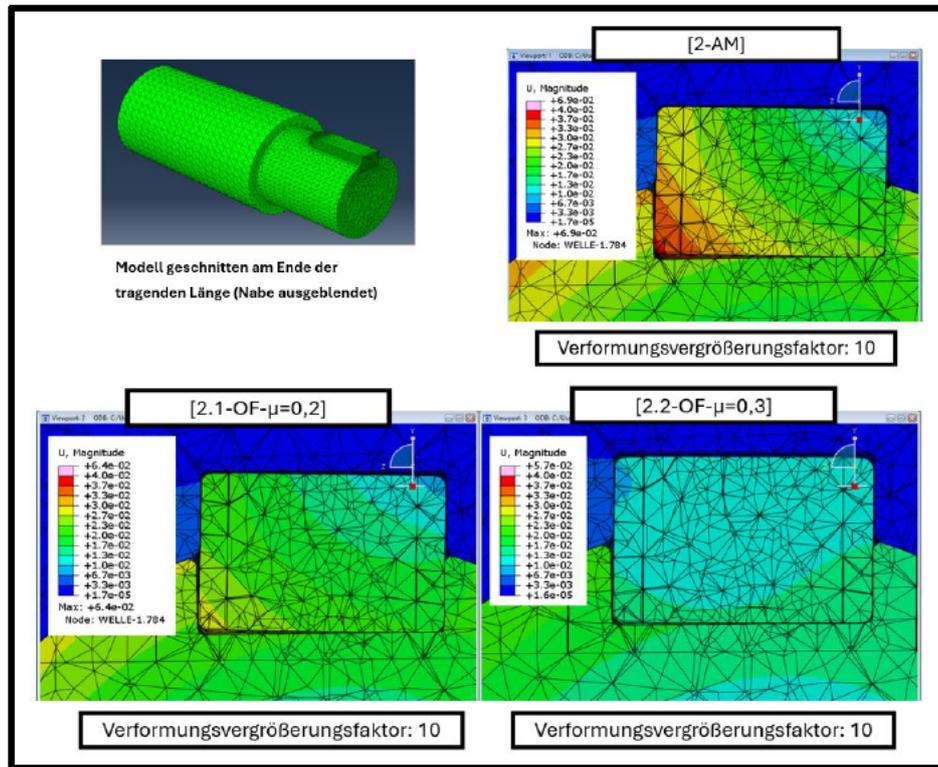


Abbildung 40: [2.1-2.2]-PF-Verformungsfigur

Verglichen mit dem Ergebnis der Berechnung [2-AM], wird die Kippbewegung der PF durch das Rausnehmen der Fasen aus den Flankenkontakten leicht vermindert. Diese Kippbewegung wird in [2.2-OF- $\mu=0,3$ ] durch einen erhöhten Reibungskoeffizienten noch weiter verringert. Grundsätzlich ist das ein sinnvolles Modellverhalten, da die Relativbewegung der PF durch einen höheren Reibwert gehemmt werden sollte. Als nächstes wird die Verformung der belasteten Nutflanken in Abbildung 41 untersucht:

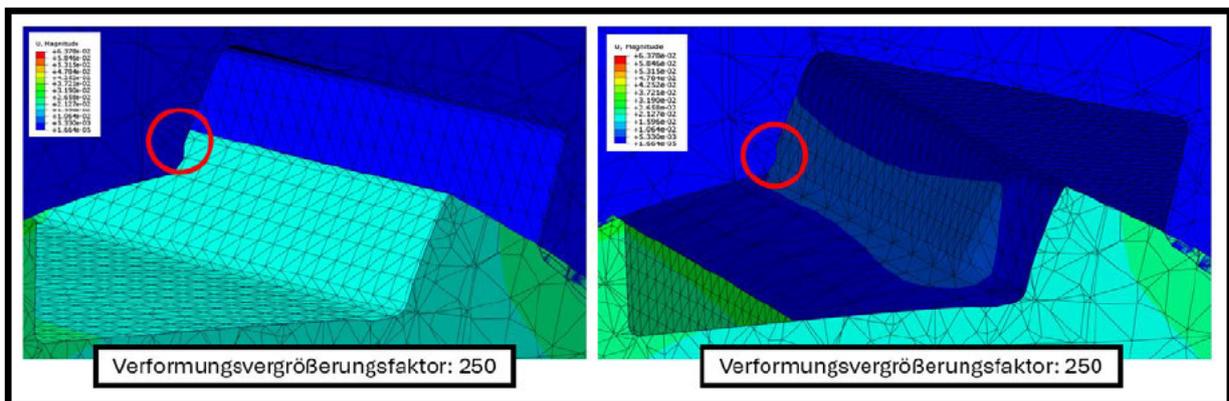


Abbildung 41: [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Verformung der belasteten Nutflanken

Hierbei bildet sich keine Wölbung in der Wellennutflanke. In der belasteten Nabennutflanke bleibt eine leichte Wölbung unter der Nutkante erkennbar. Diese Restwölbung könnte durch das Eindringen der PF in die Nabennutflanke entstehen. Weiterhin wird bei einem erhöhtem Verformungsvergrößerungsfaktor die Weitung der Wellen- und Nabennut eindeutig sichtbar. In der Berechnung [2.2] hat sich das Verformungsverhalten der belasteten Nutflanken nicht verändert. Die tangentielle Verschiebung der Nutkanten wird im nachfolgenden Diagramm 7 dargestellt:

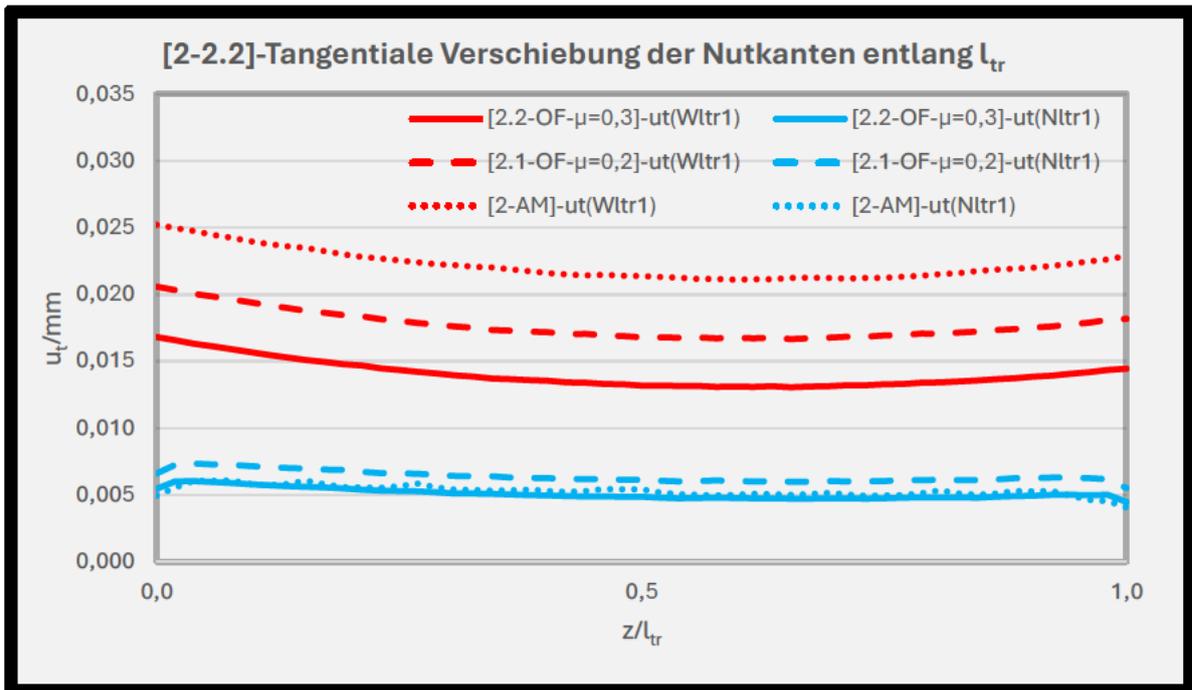


Diagramm 7: [2.1-2.2]-Tangentiale Verschiebung der belasteten Nutkanten

Hierbei wird die tangentielle Verschiebung in der Wellennutkante durch die Entfernung der Fasen aus den Kontaktpaaren und die darauffolgende Erhöhung der Reibzahl immer weiter verringert. Gleichzeitig ist die tangentielle Verschiebung der Nabennutkante nahezu gleichgeblieben. Qualitativ ergeben sich keine Änderungen im Verlauf der tangentialen Verschiebung der Nutkanten.

Nun erfolgt die Untersuchung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke, beginnend mit der CPRESS-Verteilung der Berechnung [2.1] (s. Abbildung 42):

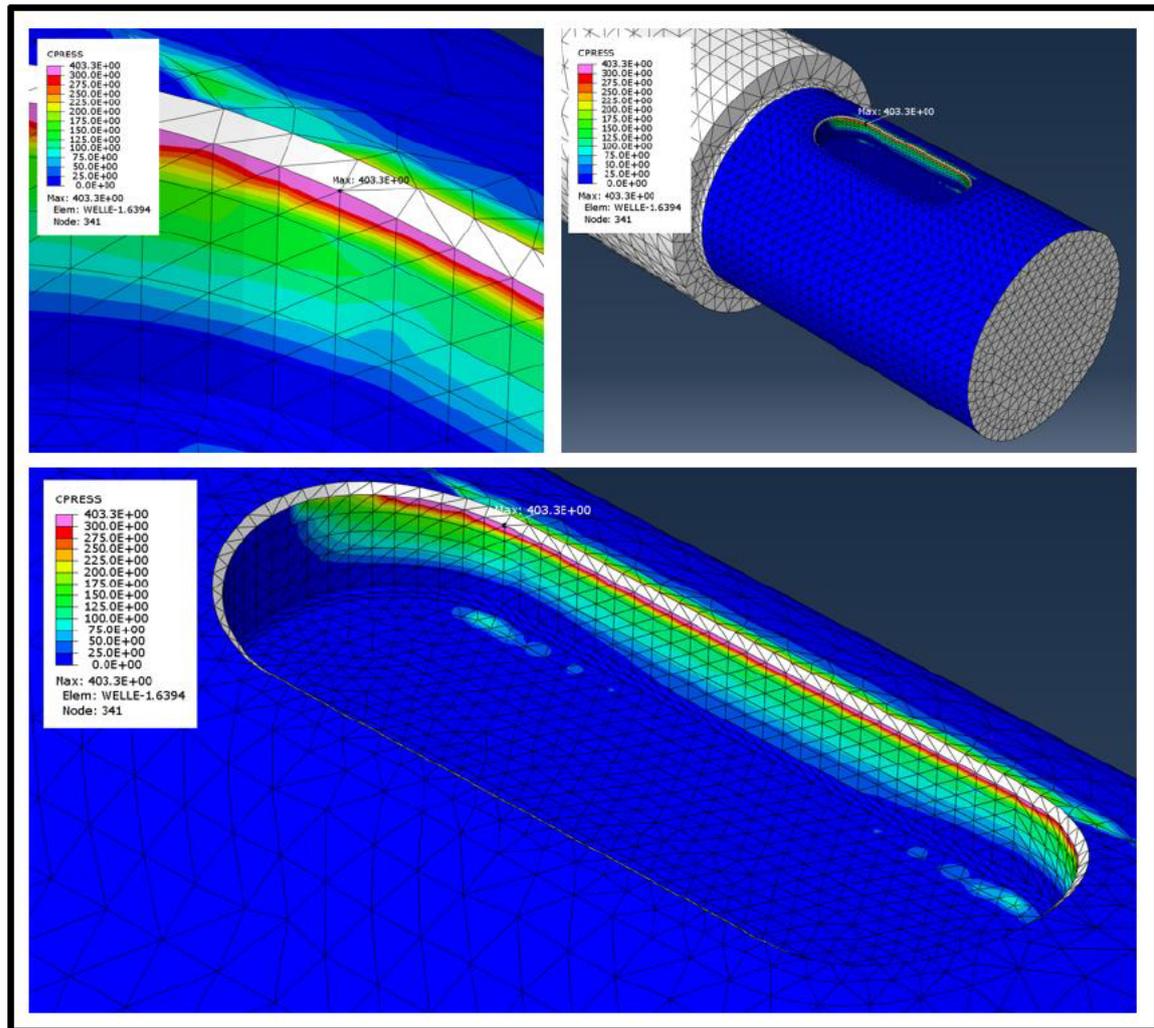


Abbildung 42: [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke

Hierbei kann man an den ausgegrauten Fasen erkennen, dass diese keinen Kontakt mehr darstellen und somit nicht mehr mit CPRESS erfasst werden können. Durch die Entfernung der Fasen aus PF-Flankenkontaktpaarungen liegt die größte Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke nun an der Nutkante. Das Maximum stellt sich dabei im Übergangsbereich vom rundstirnigen zum geradstirnigen Wellennutbereich ein. Im Vergleich zur CPRESS-Verteilung der Berechnung [2-AM] wird hier nahezu die komplette Wellennutwand beansprucht.

Die folgende Abbildung 43 zeigt die CPRESS-Verteilung der Wellennutflanke für die Berechnung [2.2]:

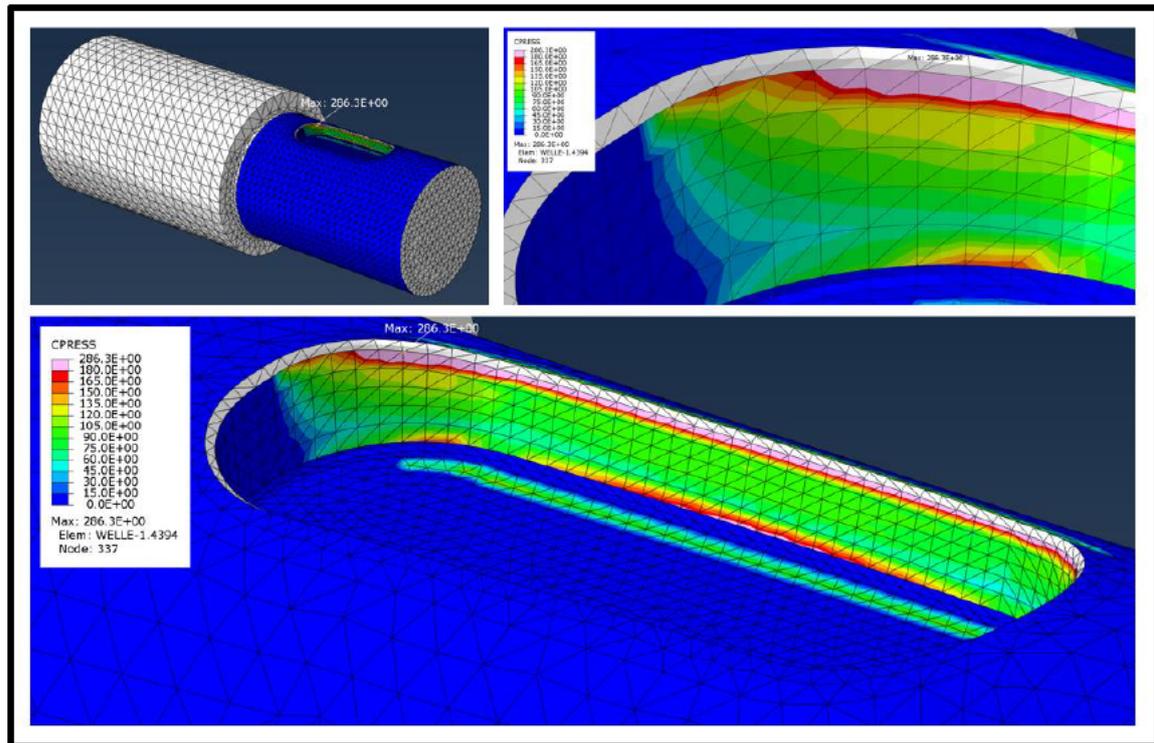


Abbildung 43: [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke

Auch hier herrscht die größte Flächenpressung an der Nutkante der Welle. Dabei stellt sich die maximale Flächenpressung wie in Berechnung [2-AM] im Nutendbereich der Welle ein. Weiterhin kann man eine komplette Beanspruchung der belasteten Wellennutflanke erkennen. Dieses könnte mit der verminderten Kippbewegung der PF zusammenhängen. Darauffolgend wird die Flächenpressung entlang der tragenden Wellennuthöhe im Lasteinleitungsbereich mit Diagramm 8 ausgewertet:

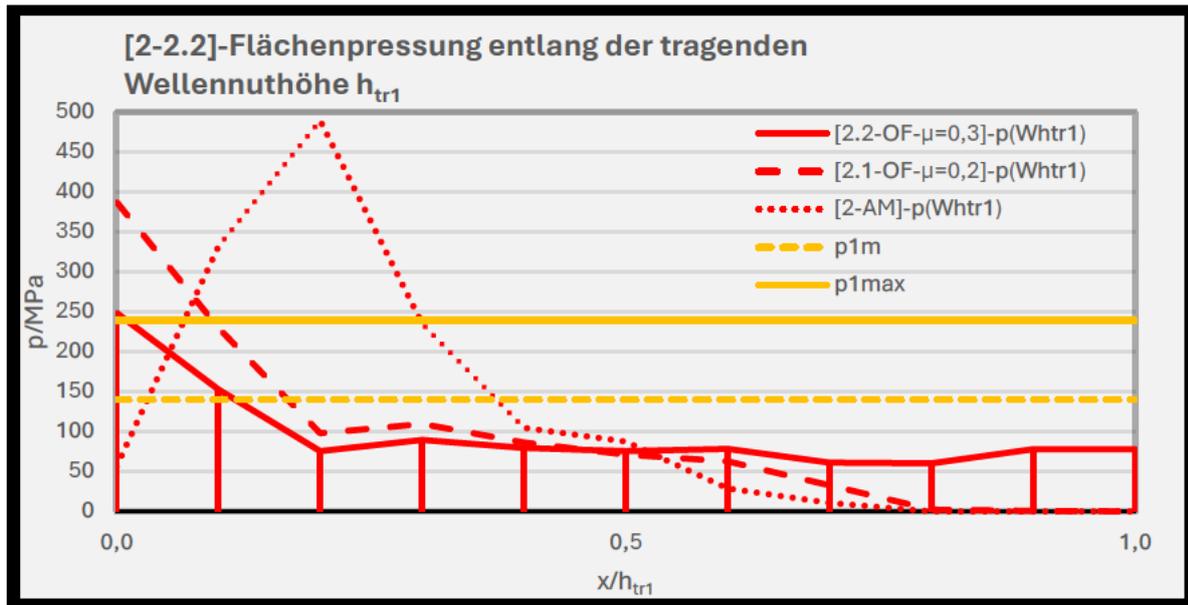


Diagramm 8: [2.1-2.2]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennuthöhe

Hier wird nochmal deutlich, wie durch die Entfernung der Fasen aus den Flankenkontaktpaaren die maximale Flächenpressung hoch zur Wellennutkante wandert, was nicht dem gewünschten Verlauf aus Abbildung 31 entspricht. Hierbei wird die Flächenpressung in der Berechnung [2.1] um ca. 100 N/mm<sup>2</sup> reduziert. Die Erhöhung des Reibungskoeffizienten  $\mu$  mindert die Pressung weiter ab, sodass diese nun im Bereich der analytisch bestimmten Flächenpressung der MB liegt. In den Berechnungen [2.1] und [2.2] kann man weiterhin erkennen, wie die Pressung ab der Nutkante bei einem hohen Gradienten näherungsweise linear abnimmt und sich anschließend eine konstante Verteilung einstellt. Als nächstes erfolgt die Untersuchung der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennutlänge im prismatischen Nutbereich (s. Diagramm 9):

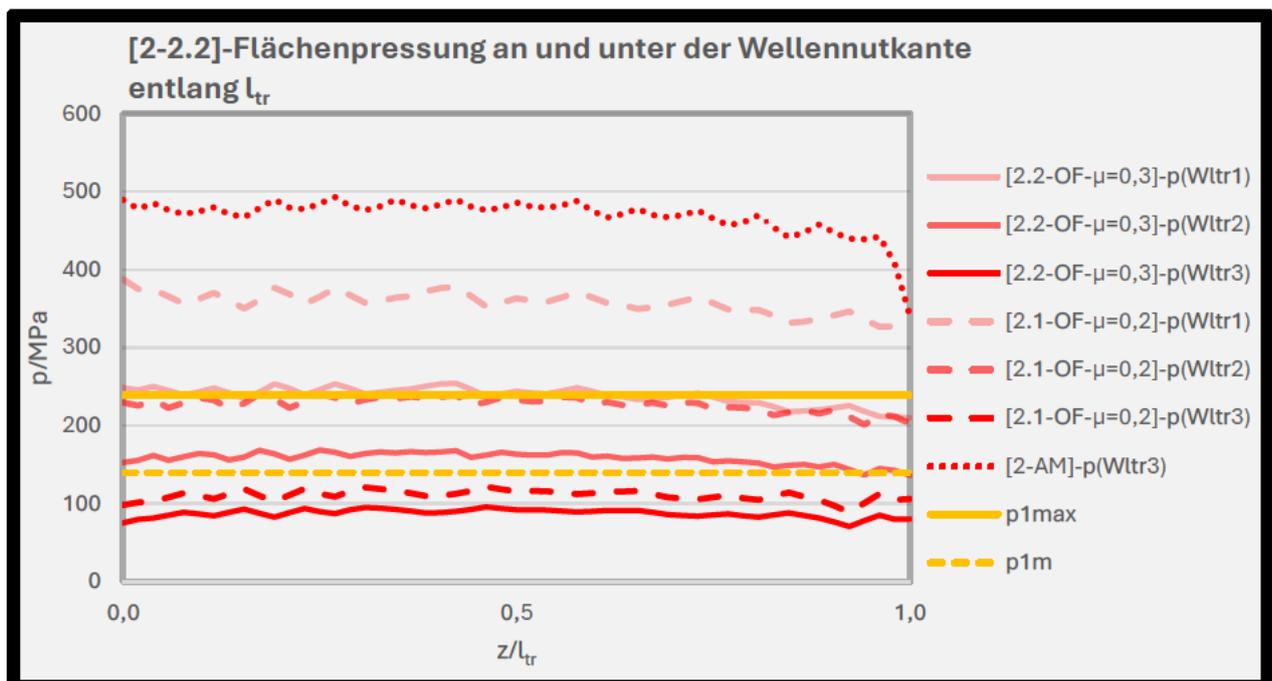


Diagramm 9: [2.1-2.2]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennutlänge

Hierbei wird zum Vergleich lediglich der höchstbeanspruchte Pfad 3 der Ausgangsrechnung [2-AM] mit ins Diagramm genommen. Auch hier wird sichtbar, dass die Entfernung der Fasen aus den Kontaktpaaren sowie die Erhöhung des tangentialen Reibwertes  $\mu$  zu einer deutlichen Reduzierung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke führen. In der Berechnung [2.2] wurde die Flächenpressung nun in den Bereich des analytischen Wertes MB gebracht. Qualitativ konnte in beiden Berechnungen nicht der gewünschte Verlauf aus den Referenzergebnissen von Forbrig erzielt werden.

Nun kann die Analyse der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke erfolgen, startend mit der CPRESS-Verteilung der Berechnung [2.1] (s. Abbildung 44):

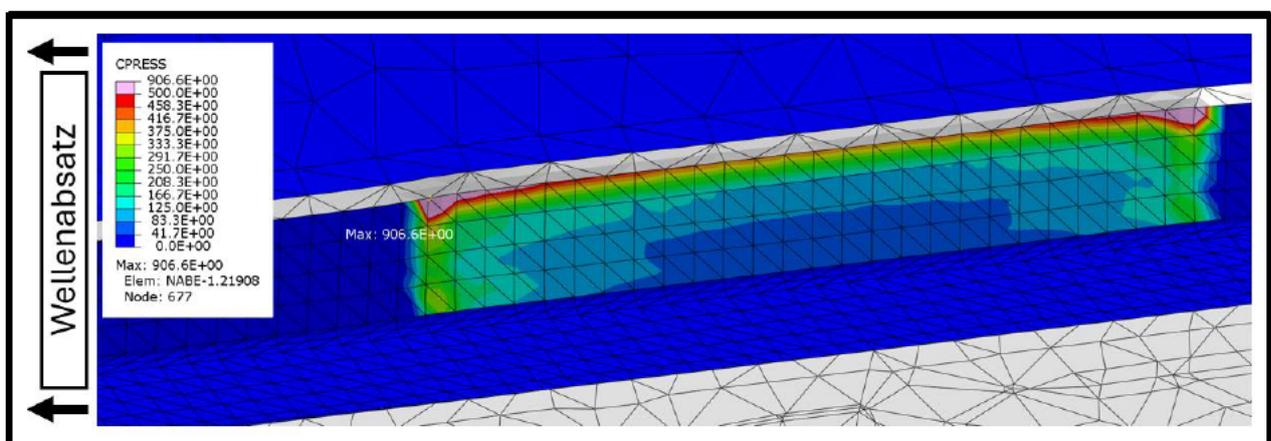


Abbildung 44: [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke

Wie in der Wellennut, herrscht die größte Flächenpressung nun an der Nutkante der Nabe und nicht mehr leicht unterhalb. Dabei liegt die maximale Flächenpressung am linken Ende des tragenden Nabennutbereich, wo die Lasteinleitung erfolgt. Ansonsten ähnelt die Verteilung qualitativ dem Ergebnis von [2-AM] mit einer Abnahme der Pressung zum Zentrum der Nutwand im Bereich des Nabennutgrundes.

Weiterhin wird die CPRESS-Verteilung der Nabennut der Berechnung [2.2] in der folgenden Abbildung 45 gezeigt:

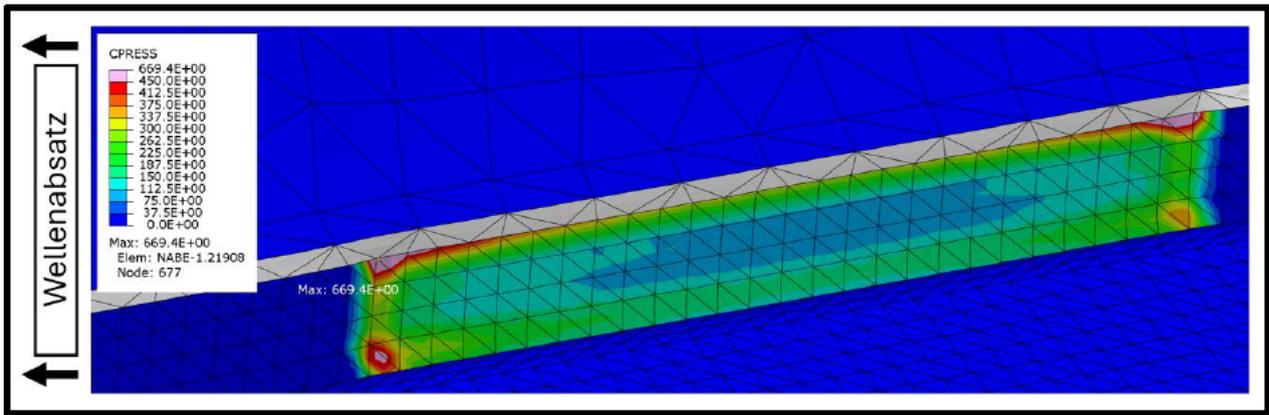


Abbildung 45: [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke

Mit der größten Pressung an der Nabennutkante sowie einem Maximum bei der Lasteinleitung ähnelt die Flächenpressungsverteilung dem Ergebnis aus Berechnung [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]. Jedoch wird hier die gesamte Nabennutflanke beansprucht. Weiterhin stellen sich weitere Spitzen an den Enden der tragenden Nabennutwand im Bereich zum Nutgrundradius ein. Das folgende Diagramm 10 zeigt den Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennuthöhe:

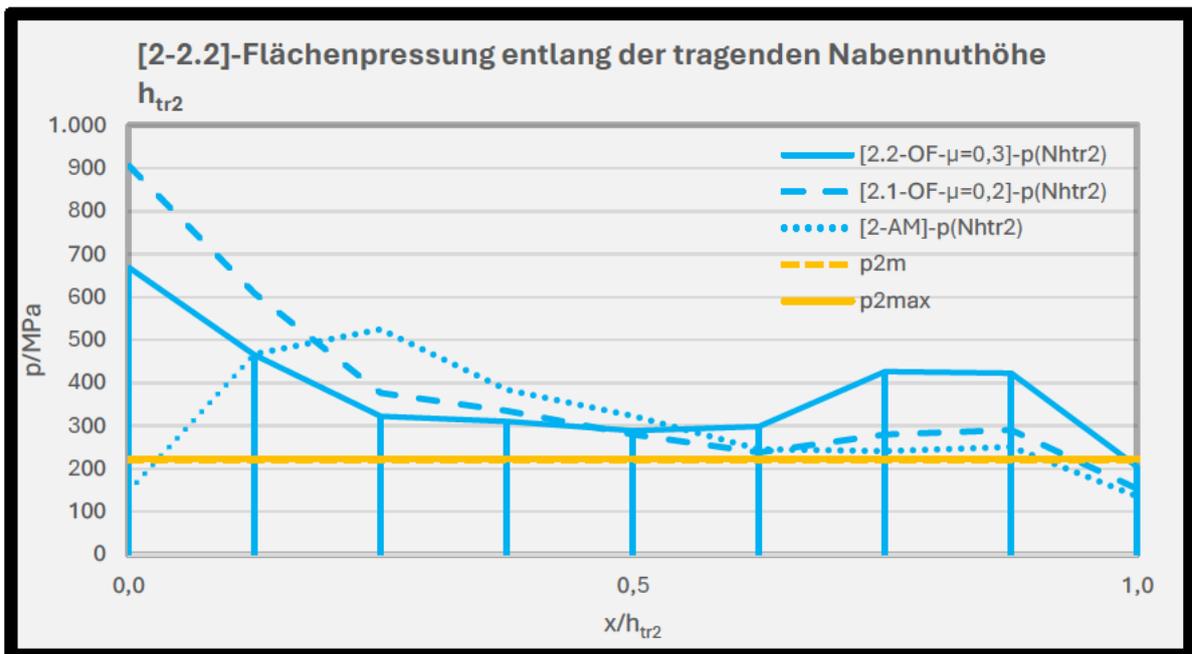


Diagramm 10: [2.1-2.2]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennuthöhe

Auch hier zeigt sich, dass das Entfernen der Fasen aus den Flankenkontaktpaarungen dazu führt, dass die maximalen Pressungen zur Nabennutkante wandern, wie es auch bei der Welle der Fall ist. Hierbei stellt sich wie in der Welle ein großer Gradient der Flächenpressung ein. Ein unerwünschtes Ergebnis ist außerdem, dass die Flächenpressung in Berechnung [2.1] rapide gestiegen ist. Die Erhöhung des Reibungskoeffizienten in Berechnung [2.2] vermindert den Betrag der Flächenpressung, aber der Wert liegt immer noch über dem Ergebnis des Ausgangsmodells [2-AM]. Weiterhin folgen die Verläufe entlang der tragenden Nabennutlänge in Diagramm 11:

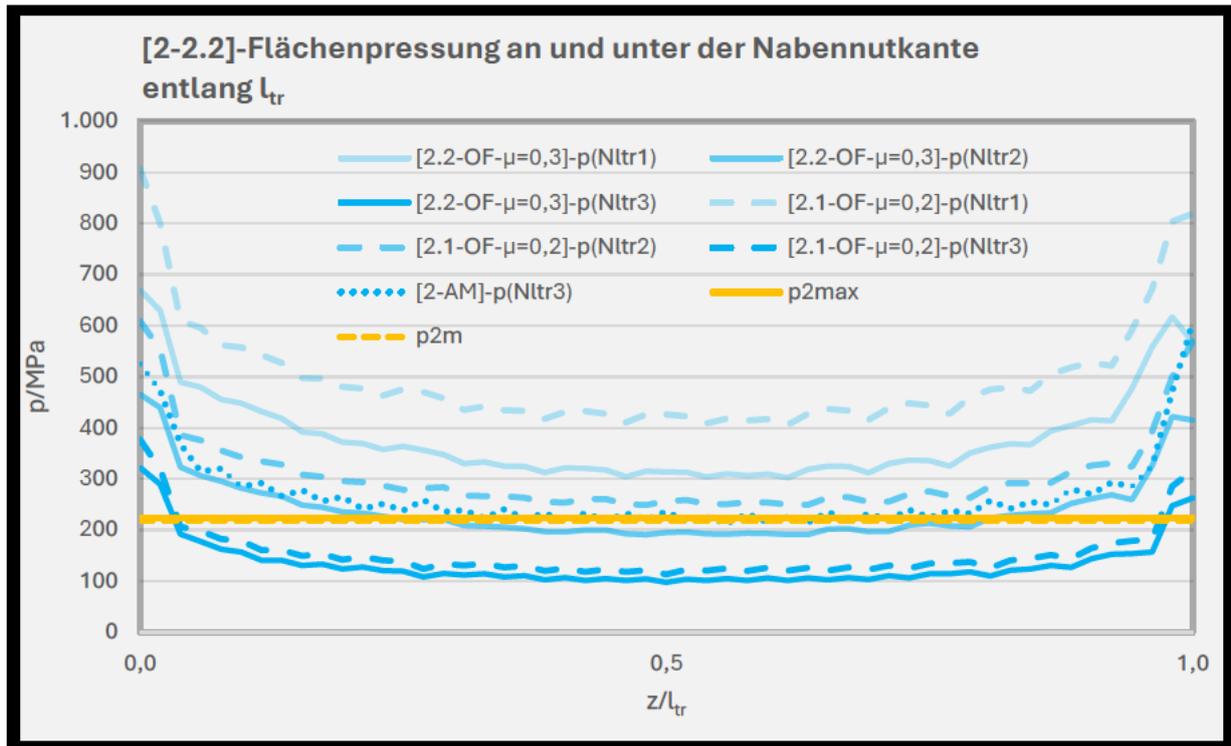


Diagramm 11: [2.1-2.2]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennutlänge

Hierbei hat sich am qualitativen Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennutlänge nichts verändert. Die größte Flächenpressung stellt sich mit einem hohen Gradienten stets an den Enden des tragenden Nabennutbereiches ein und nimmt zur Mitte hin ab, sodass ein parabolischer Verlauf entsteht.

Abschließend erfolgt die Konvergenzbetrachtung für die Flächenpressung in Diagramm 12 sowie ein Fazit zu den Berechnungen [2.1] und [2.2]:

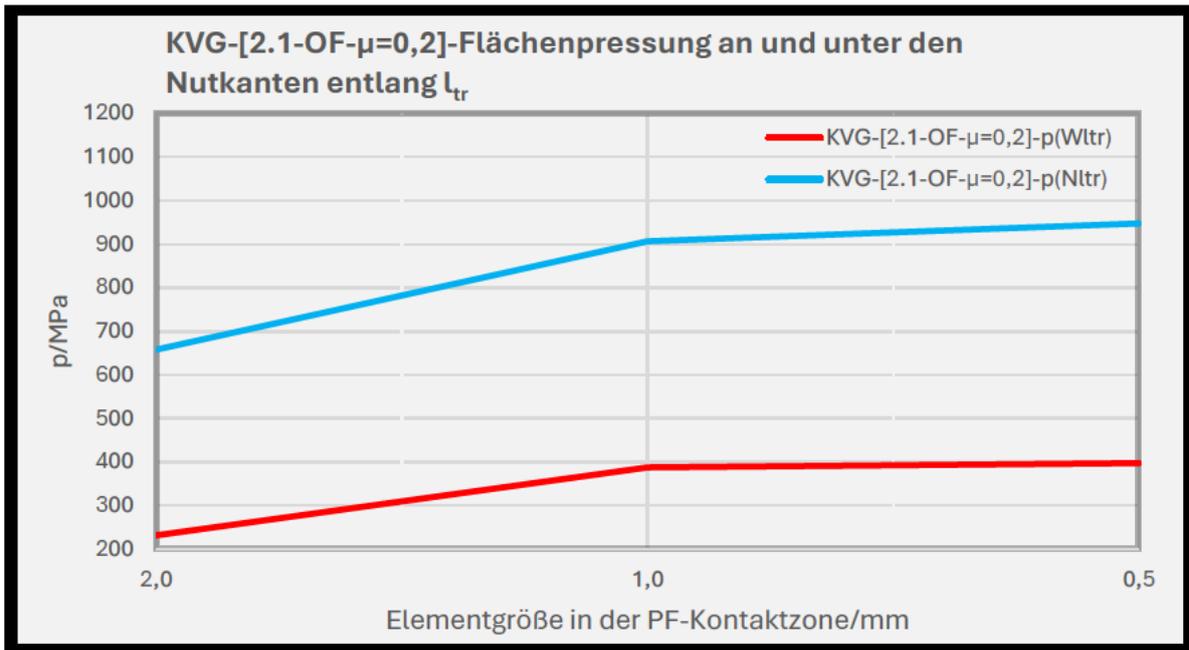


Diagramm 12: [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Konvergenzprüfung der Flächenpressung

Durch das Entfernen der Fasen aus den Kontaktpaarungen des Passfederflankenkontaktes wird die lokale Verformung unterhalb der Wellennutkante reduziert. In der belasteten Nabennutflanke bleibt eine leichte Wölbung erhalten, was aus dem Abdruck PF in der Nabennutwand resultieren könnte (s. Abbildung 41). Bei der Kippfigur der PF hat sich in beiden Rechengängen keine qualitativen Änderungen ergeben. Die Verteilung der Flächenpressung in den Nutflanken der Welle und der Nabe hat sich dahingehend verändert, dass sich die größte Pressung nun an den Nutkanten einstellt (s. Abbildung 42). Dabei hat sich die Pressung in der Welle so weit reduziert, dass sie in der Berechnung [2.2-OF- $\mu=0,3$ ] nahezu die analytisch bestimmte Flächenpressung nach MB erreicht (s. Diagramm 9). Gegensätzlich zur Welle hat sich die Pressung in der belasteten Nabennutflanke im Vergleich zur Berechnung [2-AM] erhöht (s. Diagramm 11). Dabei bleibt der parabolische Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennutlänge erhalten. Bei der Welle konnte der gewünschte qualitative Verlauf der Flächenpressung auch in diesen Berechnungen nicht hergestellt werden. Bessere Ergebnisse liefert die Konvergenzbetrachtung der Flächenpressung der Berechnung [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]. Hier könnte bei einer weiteren Netzverfeinerung von einer Konvergenz der Pressung sowohl in der Wellen- als auch in der Nabennutflanke ausgegangen werden. Die Rechenzeit der Berechnung [2.2-OF- $\mu=0,3$ ] beträgt ca. 9 Stunden, weswegen für diese Berechnung keine Konvergenzbetrachtung durchgeführt werden kann.

Eine ausführlichere Betrachtung beider Berechnungen ist in den Anhängen C5 und C6 zu finden

## 4.2 Nutzung einer weicheren Kontakteinstellung

In der Berechnung [2.2-OF- $\mu=0,3$ ] konnte die numerisch bestimmte Flächenpressung in der Welle quantitativ in den Bereich der analytischen Ergebnisse der MB nach DIN 6892 gebracht werden. Mit einer ca. 9-stündigen Berechnungszeit stellt sich ein erhöhter Reibwert im „Passfederflankenkontakt“ als numerisch anspruchsvoll heraus. Dabei wird in der Berechnung lediglich ein quantitativer Erfolg erzielt, während die qualitative Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke immer noch unbefriedigend ist.

Für die folgenden Berechnungen wird der tangentielle Reibwert des Passfederflankenkontaktes wieder auf  $\mu=0,2$  zurückgestellt, so wie es in den Berechnungen [2-AM] sowie [2.1-OF- $\mu=0,2$ ] der Fall ist. Die Einstellungen im „Stahlkontakt“ (s. Abschnitt 3.1) bleiben dabei unverändert. Weiterhin wird für den „Passfederflankenkontakt“ eine neue Einstellung des Normalkontaktes vorgenommen. Für die folgenden Berechnungen wird eine „weiche“ Kontaktformulierung (in Abaqus „Softened Contact“) für das Normalverhalten gewählt (s. Abbildung 46).

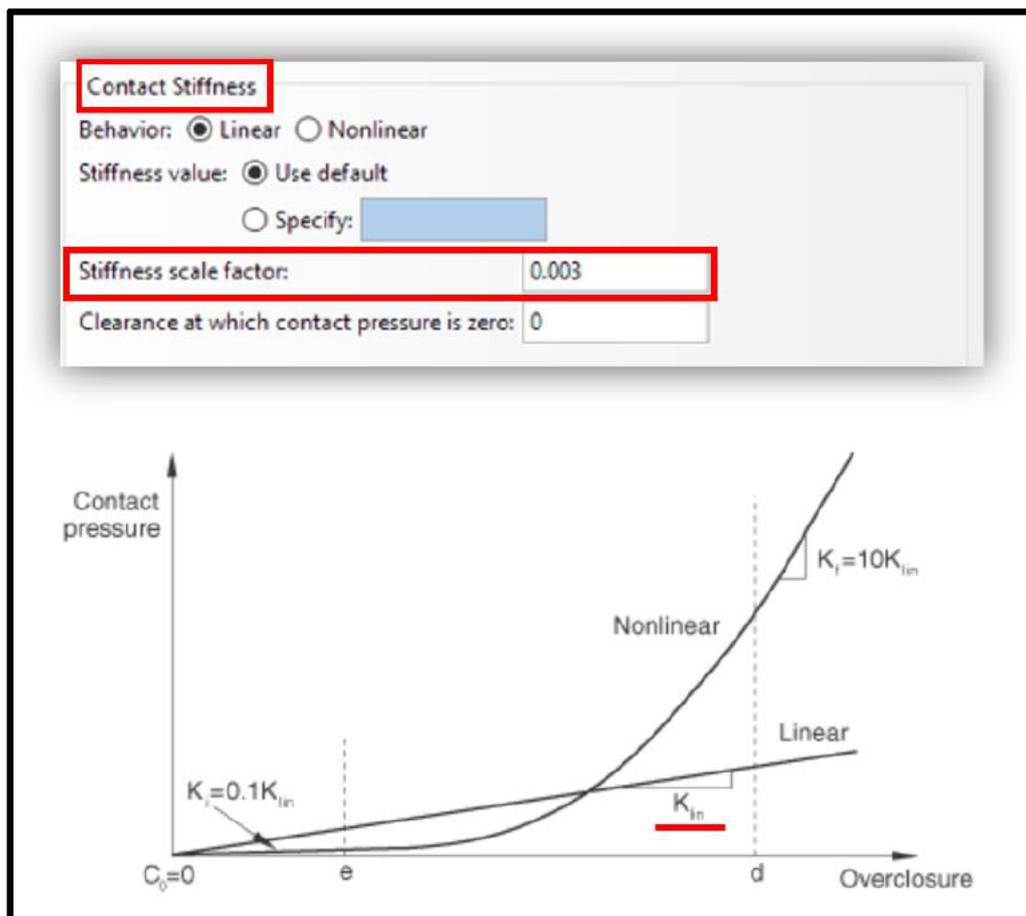


Abbildung 46: Verhalten der Flächenpressung bei einem linearem „softened contact“ [MIT-217]

Mit dieser Einstellung wird die Beziehung zwischen der Flächenpressung und dem gegenseitigen Eindringen der Wirkflächenpaare (in Abaqus „Pressure-Overclosure“) approximiert.

Die Kontaktkraft verhält sich dabei proportional zur gegenseitigen Eindringungstiefe der Kontaktpartner. Somit wird ein gewisses Maß an Penetration und damit mehr Verformung zwischen den Kontaktflächen zugelassen. Gleichzeitig sorgt diese Methode für numerische Stabilität und kann die Berechnungseffizienz steigern [MIT-217]. Innerhalb der Berechnungen wird der „Stiffness Scale Factor“ (kurz SSF) variiert. Hierbei werden drei Berechnungen mit folgenden Werten für den SSF durchgeführt:

- SSF=0,2 → [2.3-OF- $\mu=0,2$ - SSF=0,2]
- SSF=0,02 → [2.4-OF- $\mu=0,2$ - SSF=0,02]
- SSF=0,003 → [2.5-OF- $\mu=0,2$ - SSF=0,003]

Die Ergebnisse der Berechnungen [2.3-2.5] werden im nachfolgenden Abschnitt präsentiert.

#### 4.2.1 [2.3-2.5]-Post-Processing

Startend mit der Untersuchung der Verformung wird die Kippfigur der PF in der Abbildung 47 gezeigt:

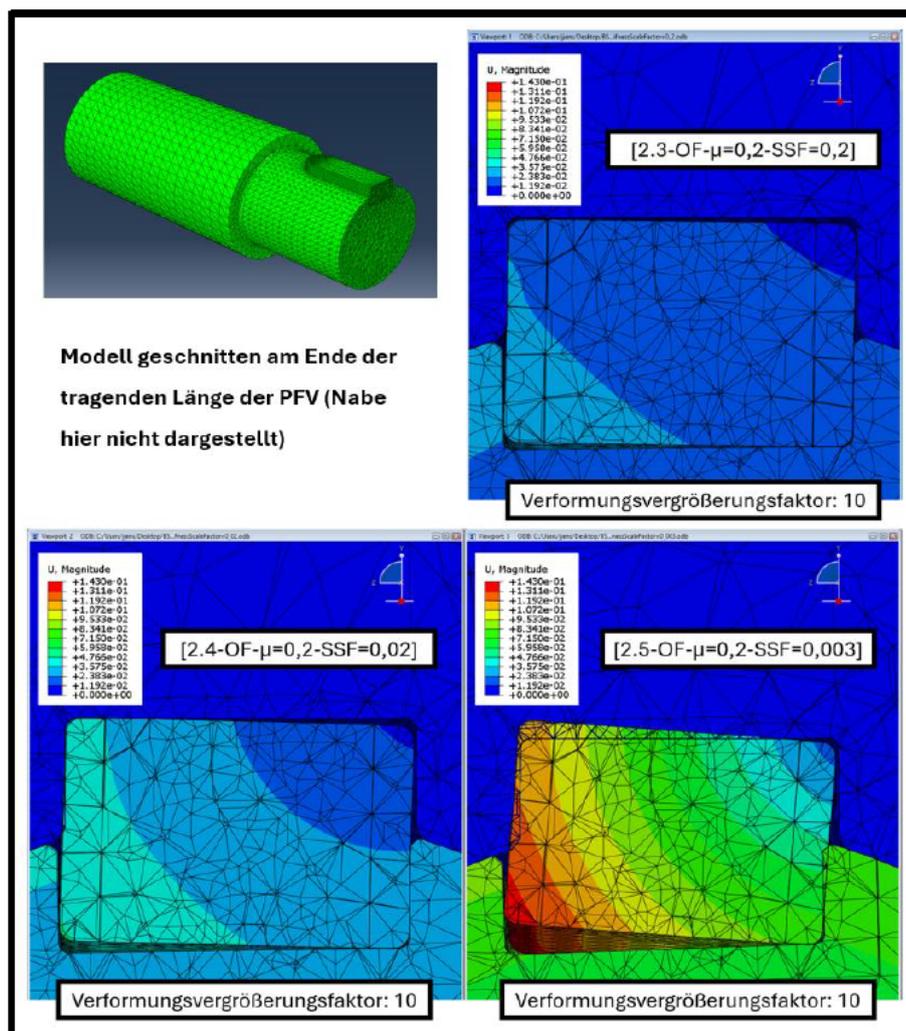


Abbildung 47: [2.3-2.5]-PF-Verformungsfigur

Hierbei wird ein sichtbarer Anstieg der Verformung mit sinkendem SSF deutlich. Weiterhin kann man insbesondere in Berechnung [2.5] die Eindringung der PF in den Nabennutgrund erkennen, die mit der neuen Einstellung des Normalverhaltens einhergeht.

Nachfolgend die Verformung der belasteten Nutflanken in Abbildung 48:

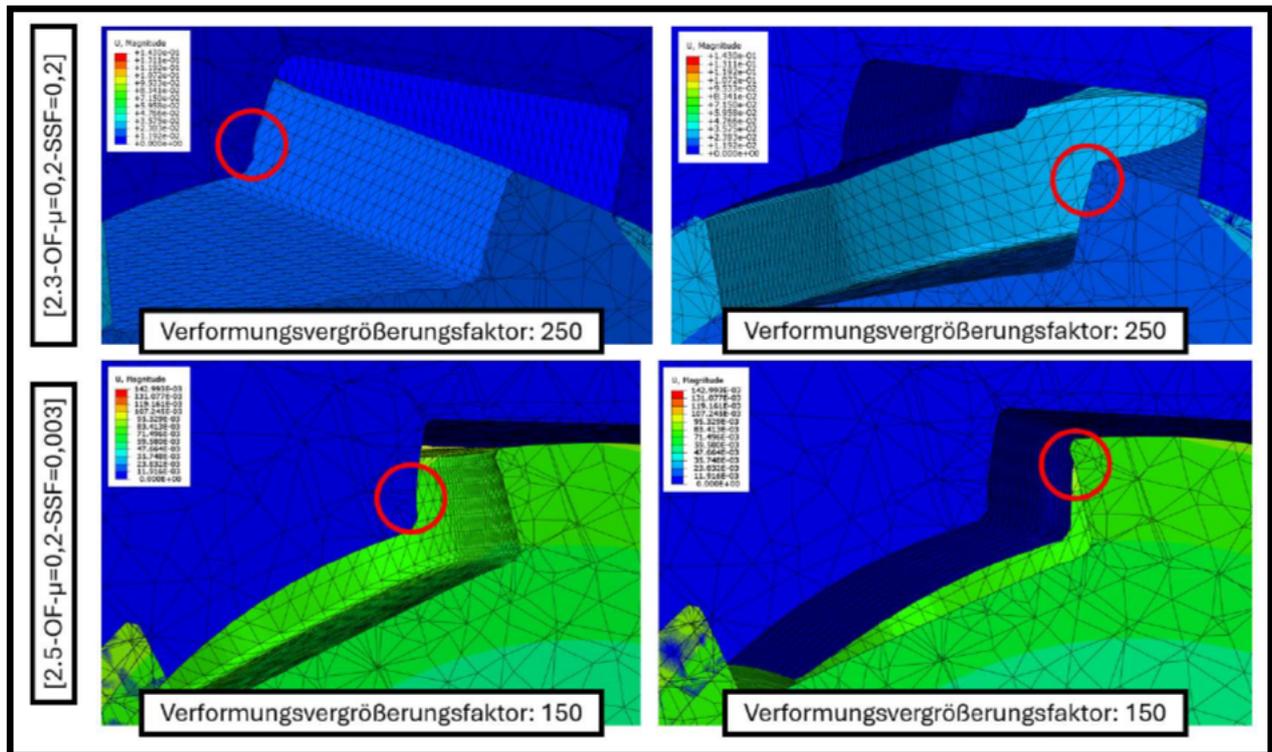


Abbildung 48: [2.3] u. [2.5]-Verformung der belasteten Nutflanken

Hierbei wird in beiden Ergebnissen eine leichte Wölbung unter Wellen- und Nabennutkante ersichtlich. Weiterhin bleibt ein Abdruck der PF in der Nabennutwand erhalten. Auffällig ist der Unterschied der relativen Verformung zwischen Welle und Nabe. Während sich das Ergebnis der Berechnung [2.3] mit dem Verformungsbild der vorangegangenen Ergebnisse vergleichen lässt, ist die Verformung in Berechnung [2.5] drastisch angestiegen. Somit ist die Nachgiebigkeit der Kontaktzone mit einer Verringerung des SSF deutlich angestiegen. Das Verformungsbild der Berechnung [2.4] verhält sich analog und wird hier nicht dargestellt.

Als nächstes wird die tangentielle Verschiebung der Wellennutkante betrachtet (s. Diagramm 13):

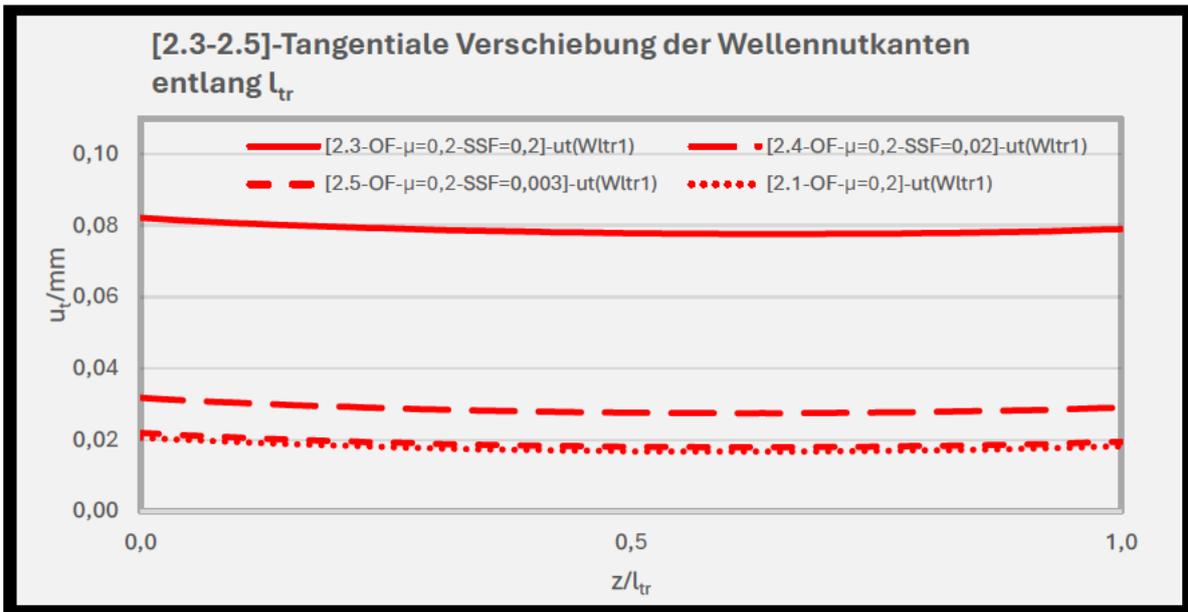


Diagramm 13: [2.3-2.5]-Tangentiale Verschiebung der belasteten Wellennutkante

Hierbei wird zusätzlich die tangentielle Verschiebung aus Berechnung [2.1] ins Diagramm genommen, da diese bis auf die „Hard Contact“ Einstellung im Normalverhalten die Modellstruktur der Berechnungen [2.3-2.5] besitzt. Im Vergleich zu den vorangegangenen Ergebnissen ergeben sich keine qualitativen Neuerrungen. Die größere Verschiebung stellt sich weiterhin auf der Lasteinleitungsseite ( $z=0$ ) ein. Was jedoch auffällt, ist der Größenunterschied in der Berechnung [2.3] zu den anderen Ergebnissen. Hierbei liegt die Verschiebung deutlich über den Ergebnissen der Berechnungen [2.3], [2.4] sowie [2.1]. Die Verschiebung der Nutkanten nimmt mit kleiner werdenden SSF ab, bis sie in den Berechnungen [2.5] und [2.1] nahezu deckungsgleich verlaufen. Diagramm 14 stellt den Verlauf der tangentialen Verschiebung für die Berechnungen [2.3-2.5] sowie [2.1] dar:

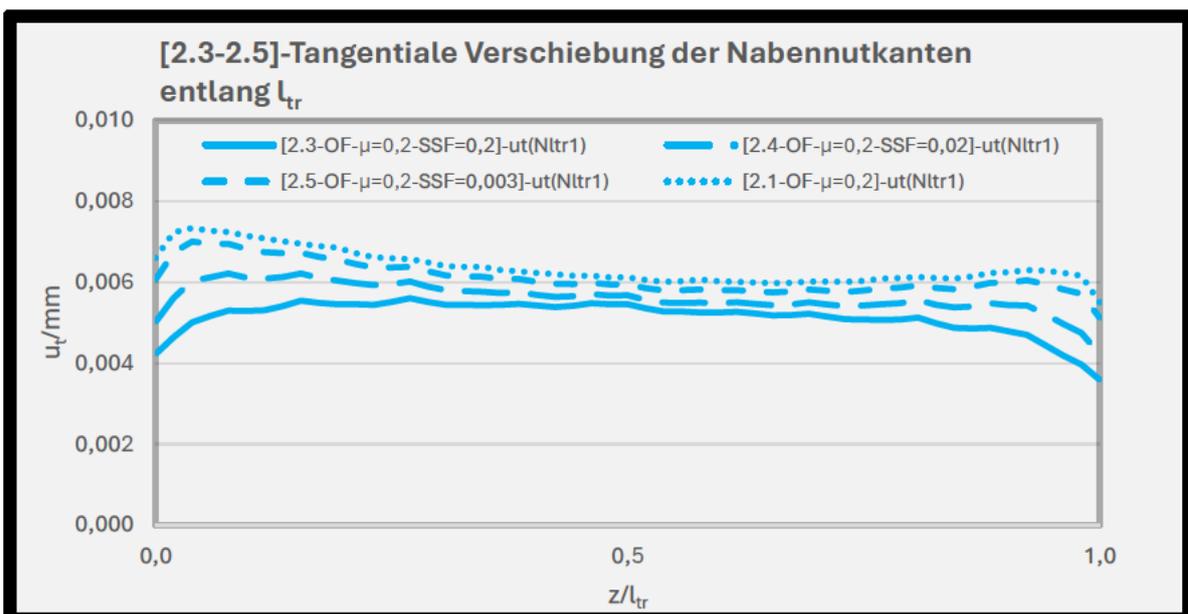


Diagramm 14: [2.3-2.5]-Tangentiale Verschiebung der belasteten Nabennutkante

Die tangentielle Verschiebung der Nabennutkante fällt wie in den vorangegangenen Berechnungen betragsmäßig deutlich kleiner aus. Weiterhin nähert sich wie bei der Welle die Verschiebung der Nutkante, mit kleiner werdenden SSF dem Ergebnis der Berechnung [2.1] an. Hierbei wird wieder der Abdruck der PF in der Nabennutkante sichtbar. In der Berechnung [2.3] ergibt sich eher eine Krümmung der Nutkante, bei einer gleichzeitigen Verringerung der Verschiebung, die der tangentialen Verschiebung der Wellennutkante ähnelt.

Als nächstes kann die Untersuchung der Flächenpressung in den belasteten Nutflanken erfolgen. Die Flächenpressungsverteilung in der Wellennutflanke wird in Abbildung 49 gezeigt:

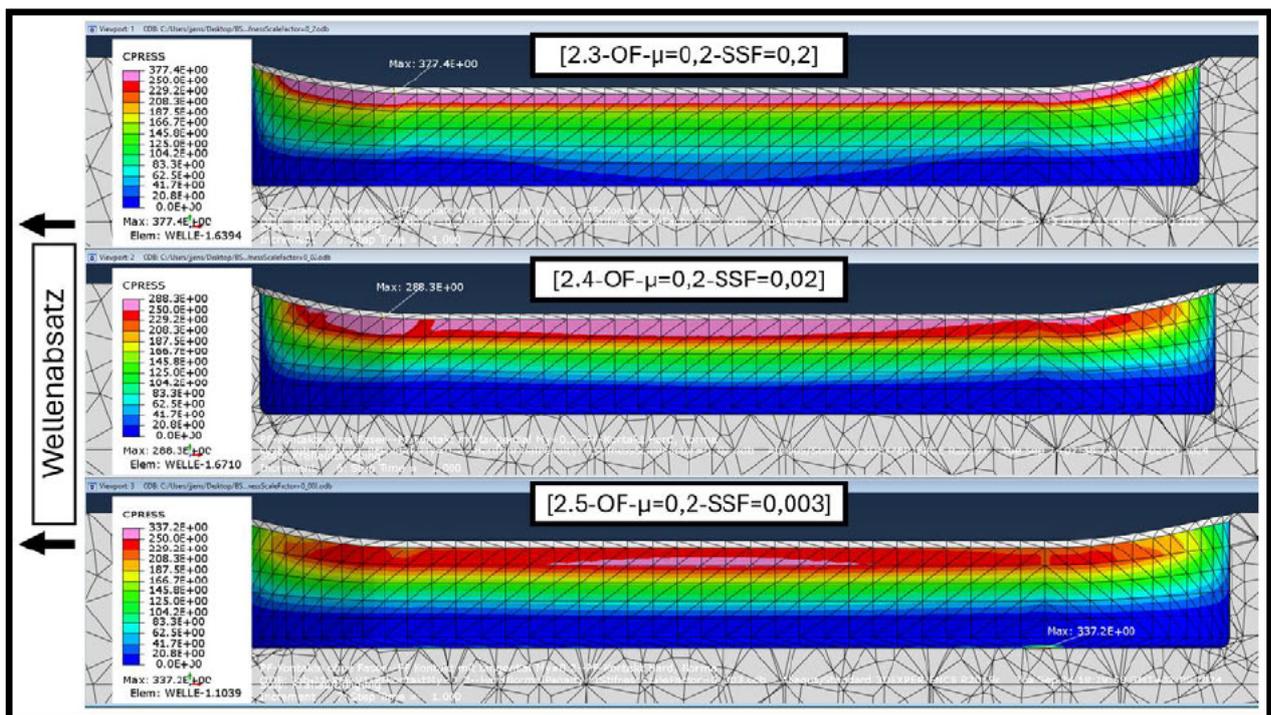


Abbildung 49: [2.3-2.5]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke

Qualitativ ergeben sich in der Flächenpressungsverteilung keine Änderungen bei einem variiertem SSF. Jedoch nimmt die Flächenpressung mit kleiner werdenden SSF in der Wellenflanke ab.

Der Verlauf der Pressung entlang der tragenden Wellennuthöhe wird in Diagramm 15 aufgetragen:

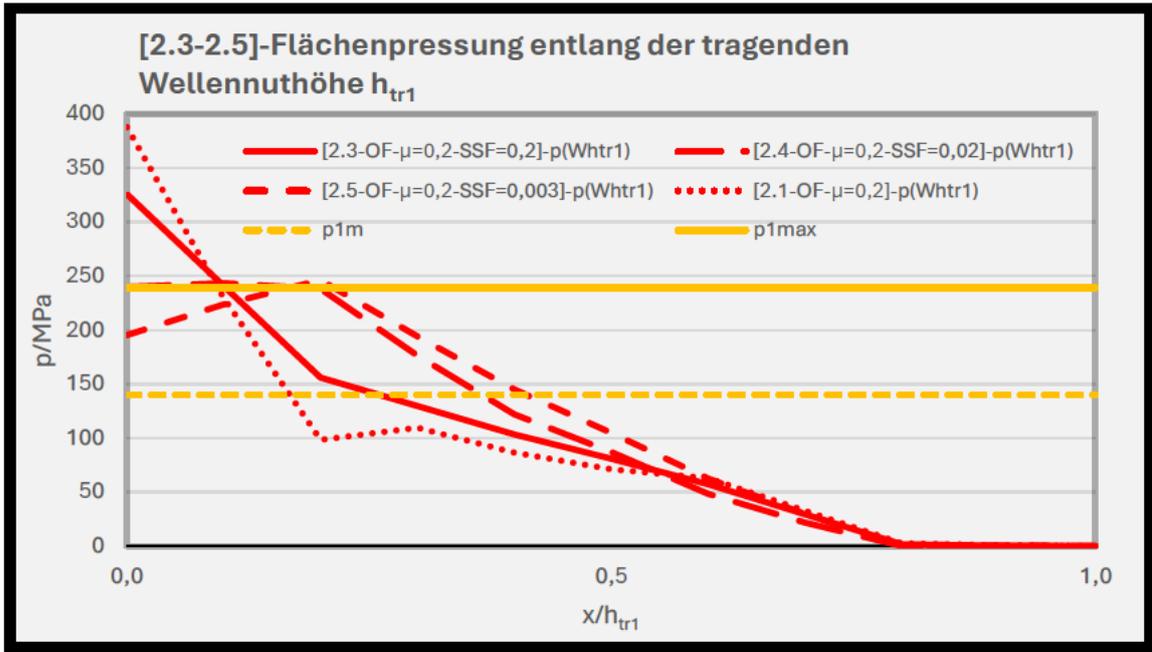


Diagramm 15: [2.3-2.5]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennuthöhe

Hier lässt sich ebenfalls die Reduzierung der Flächenpressung und dessen Gradienten mit sinkendem SSF erkennen. Weiterhin wandert das Maximum der Flächenpressung mit kleiner werdenden SSF, sodass sich der Verlauf entlang der tragenden Wellennuthöhe ab Berechnung [2.4] grundlegend ändert. Dabei wird mit dem Ergebnis in Berechnung [2.5] ein Erfolg erzielt, dessen qualitativer Verlauf dem Referenzergebnis von Forbrig ähnelt (s. Abbildung 31). Weiterhin muss die Flächenpressung entlang der tragenden Wellennutlänge analysiert werden (s. Diagramm 16):

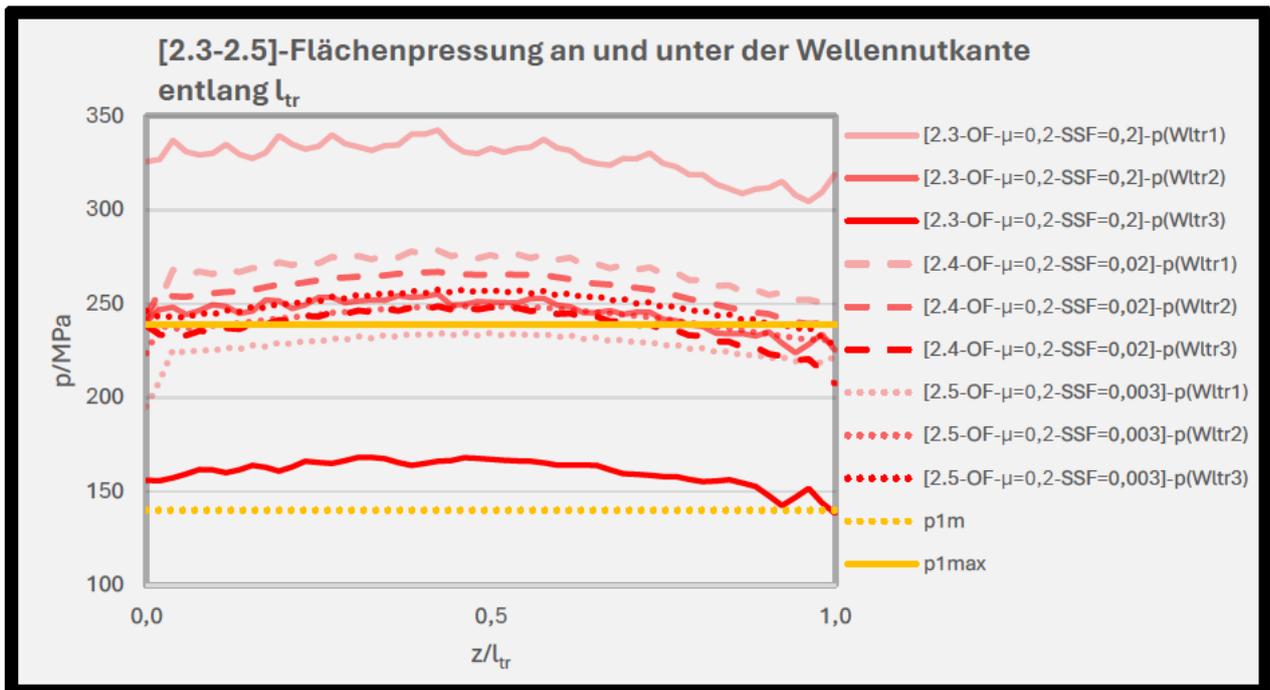


Diagramm 16: [2.3-2.5]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennutlänge

Auch hier wird eine deutliche Abnahme mit kleiner werdendem SSF deutlich. Jedoch lässt sich erkennen, dass ab einem  $SSF=0,02$  die Reduzierung der Flächenpressung abnimmt. Hierbei liegen die Verläufe der Berechnung [2.5] nur leicht unter den Ergebnissen aus Berechnung [2.4]. Qualitativ lässt sich ab Berechnung [2.4] deutlich erkennen, dass sich die größte Flächenpressung nahezu in der Mitte ( $z=l_{tr}/2$ ) der tragenden Länge einstellt anstatt auf der Lasteinleitungsseite ( $z=0$ ). Somit konnte qualitativ nur in der tragenden Wellennuthöhe ein Erfolg erzielt werden. Quantitativ liegen der Ergebnisse der Berechnung [2.5] leicht über der analytisch bestimmten Flächenpressung nach MB.

Die Untersuchung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke beginnt mit der Abbildung 50:

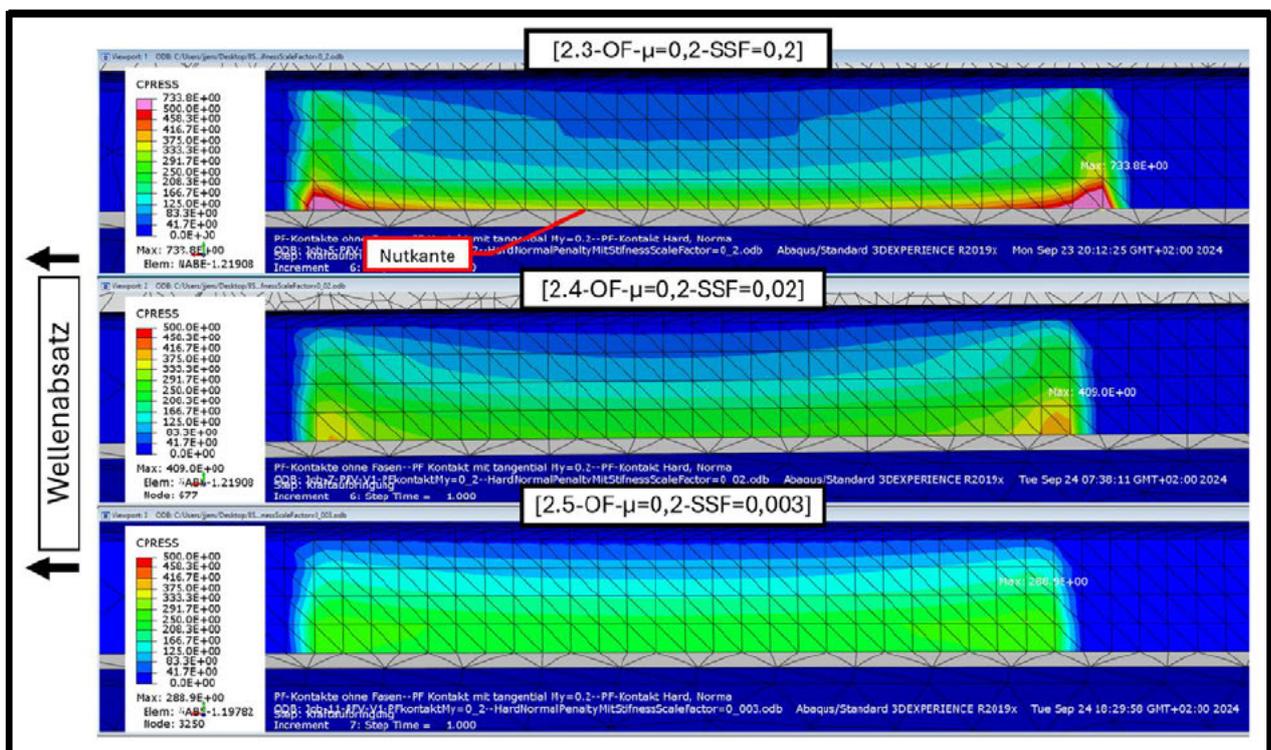


Abbildung 50: [2.3-2.5]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke

Auch in der Nabe lässt sich eine deutliche Abminderung der Flächenpressung mit kleiner werdenden SSF erkennen. Gleichzeitig nimmt die Pressung an den Enden der tragenden Nutflanke ab, sodass sich in Berechnung [2.5] eine sichtbar gleichmäßigere Verteilung der Flächenpressung einstellt.

Nachfolgend wird der Pressungsverlauf entlang der tragenden Nabennuthöhe mit Diagramm 17 untersucht:

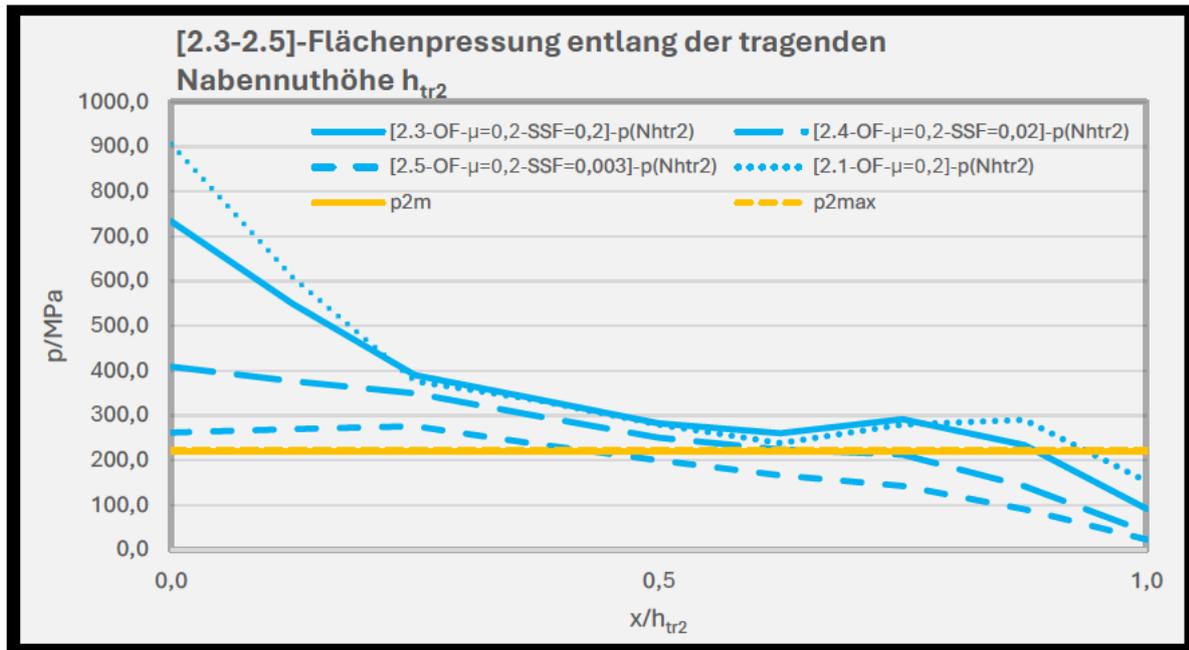


Diagramm 17: [2.3-2.5]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennuthöhe

Wie bei der tragenden Wellennuthöhe nimmt sowohl der Betrag als auch der Gradient der Flächenpressung mit sinkendem SSF ab. Hierbei wandert das Maximum der Flächenpressung in Berechnung [2.5] unter die Nabennutkante, ähnlich zum Referenzergebnis (s. Abbildung 31). Weiterhin liegt der Betrag der Flächenpressung [2.5] nur noch leicht über dem analytisch bestimmten Ergebnis der Methoden nach DIN 6892. Weiterhin zeigt Diagramm 18 den Flächenpressungsverlauf entlang der tragenden Nabennutlänge:

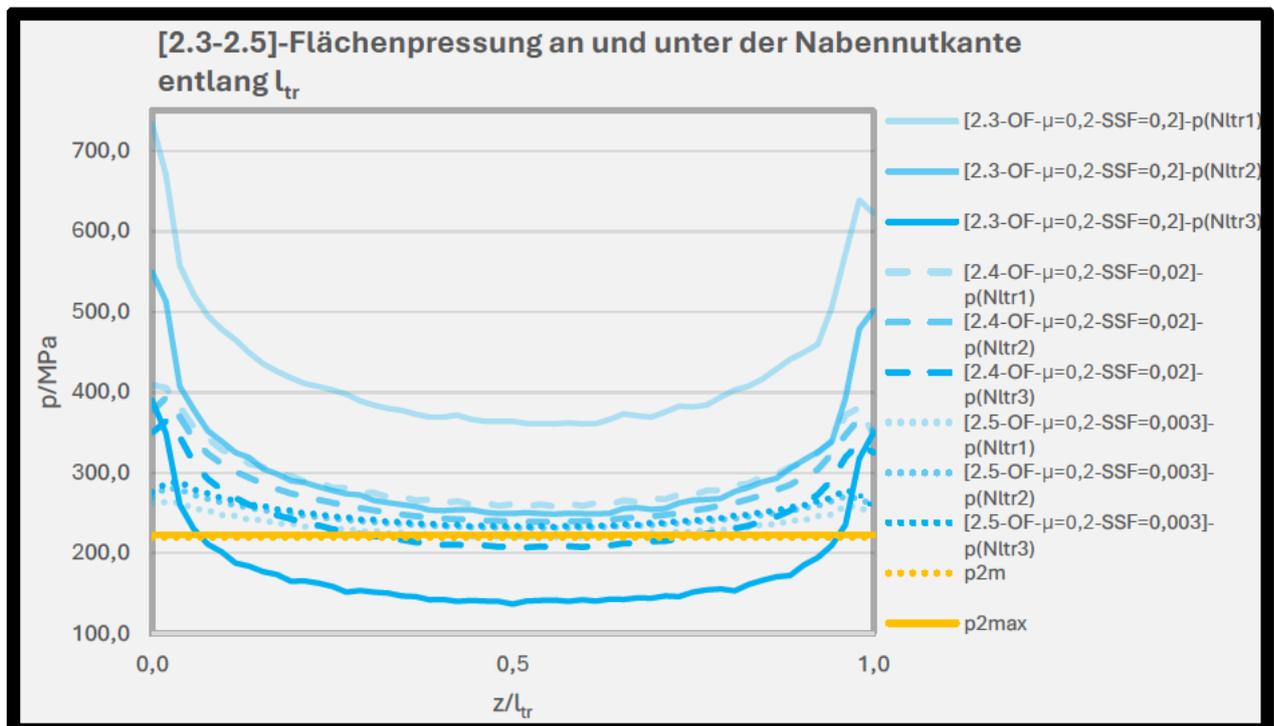


Diagramm 18: [2.3-2.5]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennutlänge

Auch hier bestätigen sich die Annahmen der vorangegangenen Ergebnisse. Mit sinkendem SSF nimmt zum einen der Betrag und zum anderen der Gradient der Flächenpressung ab. Weiterhin verteilt sich die Pressung in der Berechnung [2.5] gleichmäßiger über die tragende Nutlänge, so wie es die Abbildung 50 vermuten lässt. In den Berechnungen [2.4-2.5] bleibt weiterhin ein näherungsweise parabolischer Flächenpressungsverlauf erhalten. Quantitativ wird die Pressung in Berechnung [2.5] in die Nähe der analytisch bestimmten Ergebnisse gebracht werden.

Abschließend erfolgt ein Fazit zu den Ergebnissen sowie die Konvergenzprüfung der Flächenpressung in den belasteten Nutflanken (s. Diagramm 19).

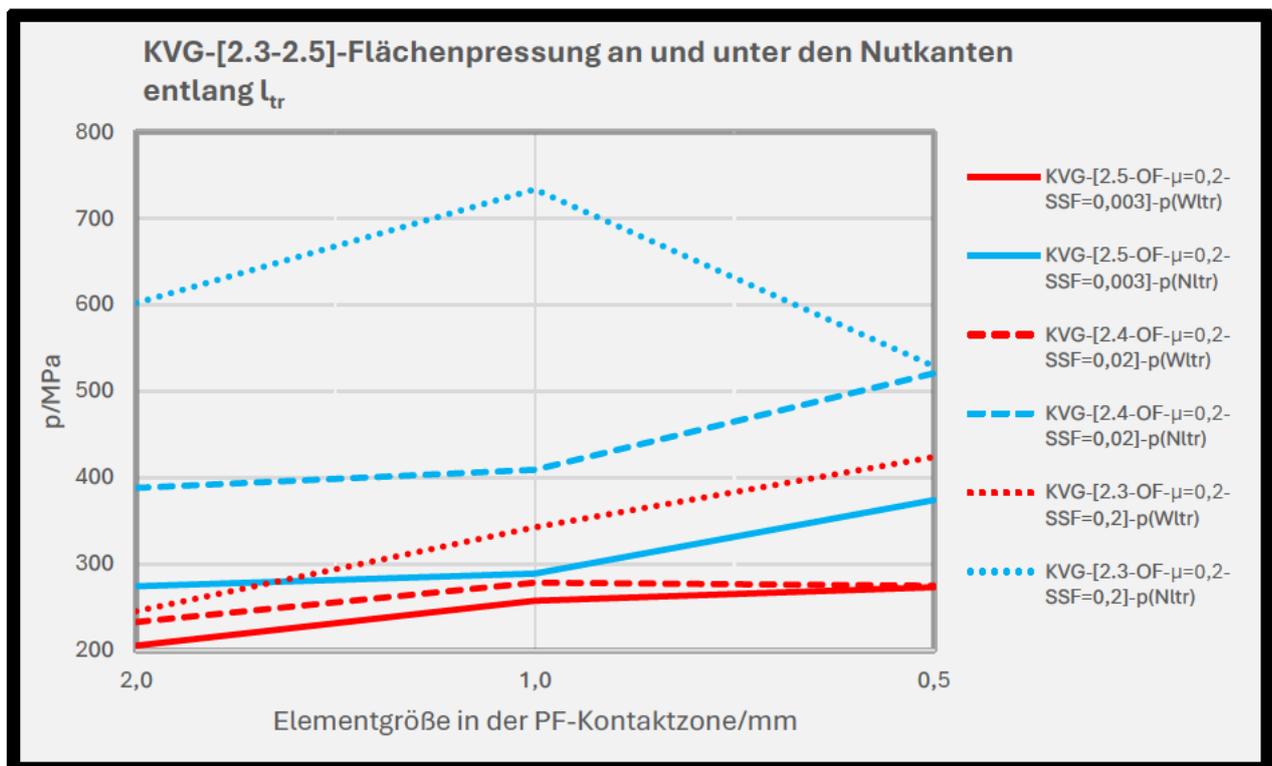


Diagramm 19: [2.3-2.5]-Konvergenzprüfung der Flächenpressung

Mit der Einführung eines weicheren Normalkontaktes und der Variation des SSF haben sich interessante Ergebnisse ergeben. Die tangentielle Verschiebung der belasteten Wellennutflanke hat sich qualitativ nicht geändert. Quantitativ nehmen die Verschiebungen mit sinkendem SSF ab bis der Verlauf der Berechnung [2.5-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003] nahezu mit dem Ergebnis in [2.1-OF- $\mu=0,2$ ] bei einem „Hard“ Normalkontakt übereinstimmt (s. Diagramm 13). Ähnliches Verhalten kann bei der tangentialen Verschiebung der Nabennutkante beobachtet werden. Hier nehmen jedoch die tangentialen Verschiebungen mit kleiner werdenden SSF ab. Aber auch hier stellt sich in Berechnung [2.5] nahezu das Ergebnis aus [2.1] ein. Hierbei wird in der Welle vermutet, dass ein sinkender SSF gemäß der Abbildung 47 zunehmend gegenseitige Eindringung der Flächenpaare erlaubt. Somit wird mit der Einführung eines „Softened“ Normalkontaktes in [2.3-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,2] deutlich mehr Nachgiebigkeit in der Kontaktzone zugelassen. Mit kleiner werdenden SSF nimmt die Modellverformung in der Kontaktzone ab, weil immer mehr

gegenseitige Penetration zugelassen wird. In der Nabe nimmt die Verformung leicht zu bei größer werdender gegenseitiger Penetration der Kontaktflächen. Weiterhin wird eine deutliche Reduzierung der Flächenpressung mit kleiner werdenden SSF erzielt. Dabei bildet sich in der tragenden Wellennuttliefe ein Verlauf, der dem Referenzergebnis qualitativ ähnelt (s. Diagramm 15). Entlang der tragenden Wellennuttlänge konnte qualitativ kein Durchbruch erzielt werden. Quantitativ konnte der Betrag der Flächenpressung in der Berechnung [2.3] sowohl in der Welle als auch in der Nabe in die Nähe der analytisch bestimmten Pressung nach DIN 6892 gebracht werden. Dabei hat sich in der belasteten Nabennutflanke eine gleichmäßige Verteilung der Pressung eingestellt (s. Diagramm 18).

Hinsichtlich der Konvergenz stellt sich in der Berechnung [2.3] eine rapide Änderung der Flächenpressung in der Nabe mit feiner werdendem Netz ein. Ob sich hier eine oszillierende Konvergenz einstellt, kann in dieser Betrachtung nicht festgestellt werden. Bei der Welle lässt sich dabei keine Minderung der Flächenpressung und somit keine Konvergenz der Pressung feststellen. Dafür könnte in den Berechnungen [2.4] und [2.5] von einer Konvergenz der Pressung in der belasteten Wellennutflanke ausgegangen werden. Anders sieht es in der belasteten Nabennutflanke aus. Hier kann bei dieser Betrachtung nicht von einer Konvergenz der Flächenpressung in der Nabe ausgegangen werden.

Weitgehendere Betrachtungen der Ergebnisse sind in der Dokumentation des vorliegenden FE-Modells zu finden (s. Anhang C7).

### 4.3 Rückführung der Fasen in die PF-Flankenkontaktpaarungen

Um den Einfluss der Fasen an den Nutkanten näher zu untersuchen, werden diese nun wieder in die Flankenkontaktpaarungen des Passfederflankenkontaktes zurückgeführt (s. Abbildung 28). Dabei wird die Modellstruktur der Berechnung [2.5-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003] des vorangegangenen Abschnitts 4.2 verwendet. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Berechnung [2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003] untersucht und mit denen der FE-Analyse [2.5] verglichen.

#### 4.3.1 [2.6]-Post-Processing

Die Kippfigur der Passfeder innerhalb der PF-Nut wird in der nachfolgenden Abbildung 51 dargestellt:

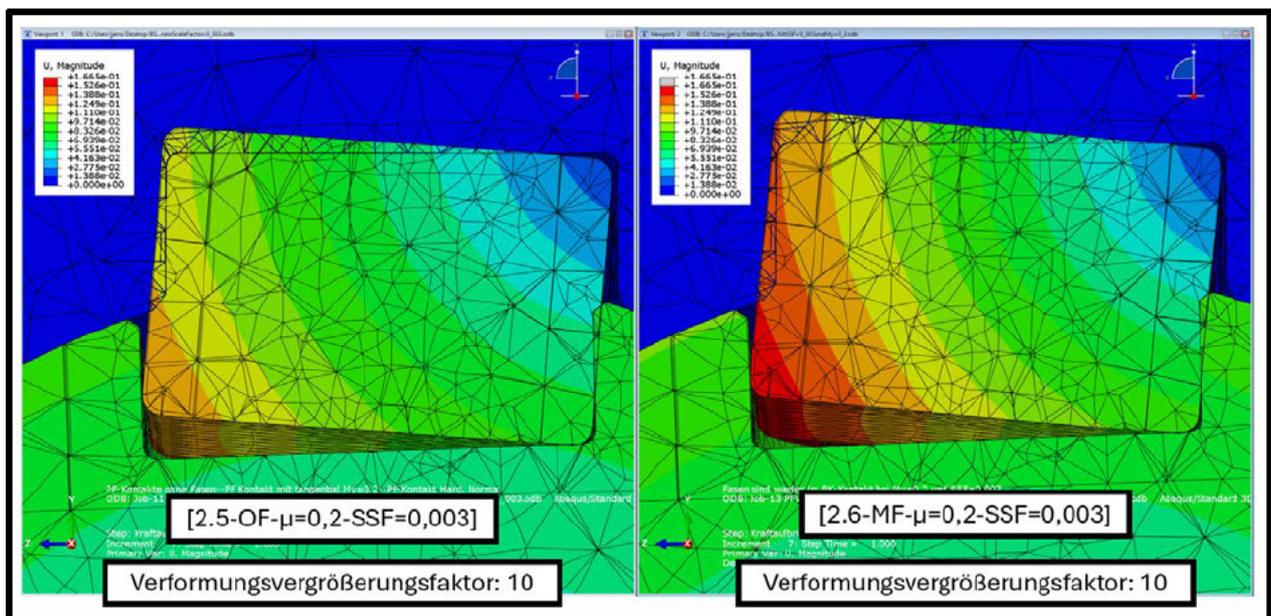


Abbildung 51: [2.5-2.6]-PF-Verformungsfigur

Hierbei fällt die Kippbewegung in der Berechnung [2.6] etwas größer aus als es [2.5] der Fall ist. In beiden Ergebnissen ist die Eindringung der PF in den Nabennutgrund zu erkennen, die mit der Einführung des „Softened“ Normalkontaktes einhergeht.

Weiterhin wird die Verformung die Nutflankenverformung der Berechnung [2.6] mit Abbildung 53 untersucht:

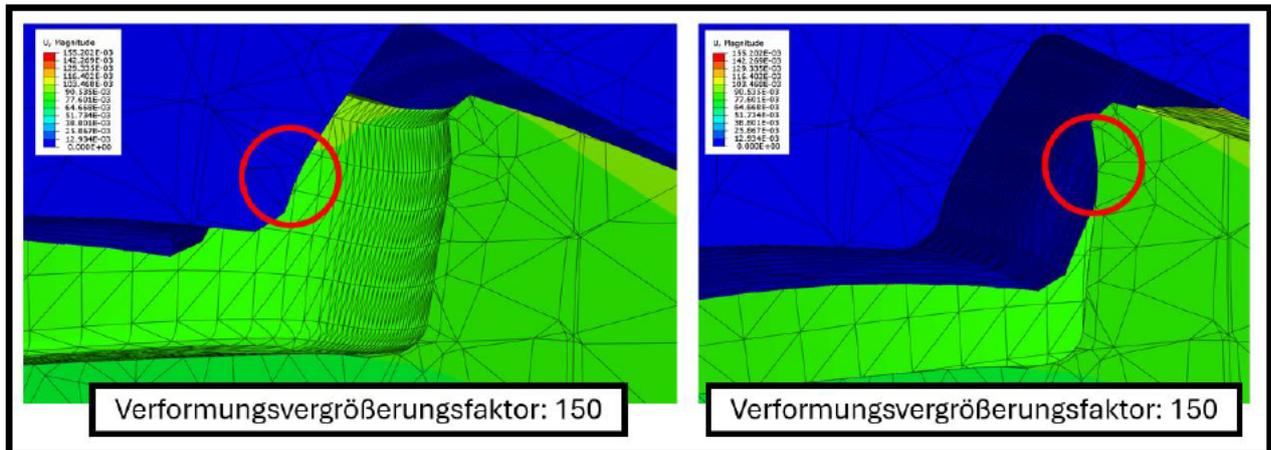


Abbildung 52: [2.6]-Verformung der belasteten Nutflanken

Unterhalb der Nutkanten lässt sich ebenfalls eine leichte Wölbung der belasteten Nutflanken erkennen. Im Vergleich zur Berechnung [2.5] ergeben sich keine Änderungen am Verformungsbild (s. Abbildung 48).

Die tangentielle Verschiebung der Nutkanten wird in Diagramm 20 dargestellt:

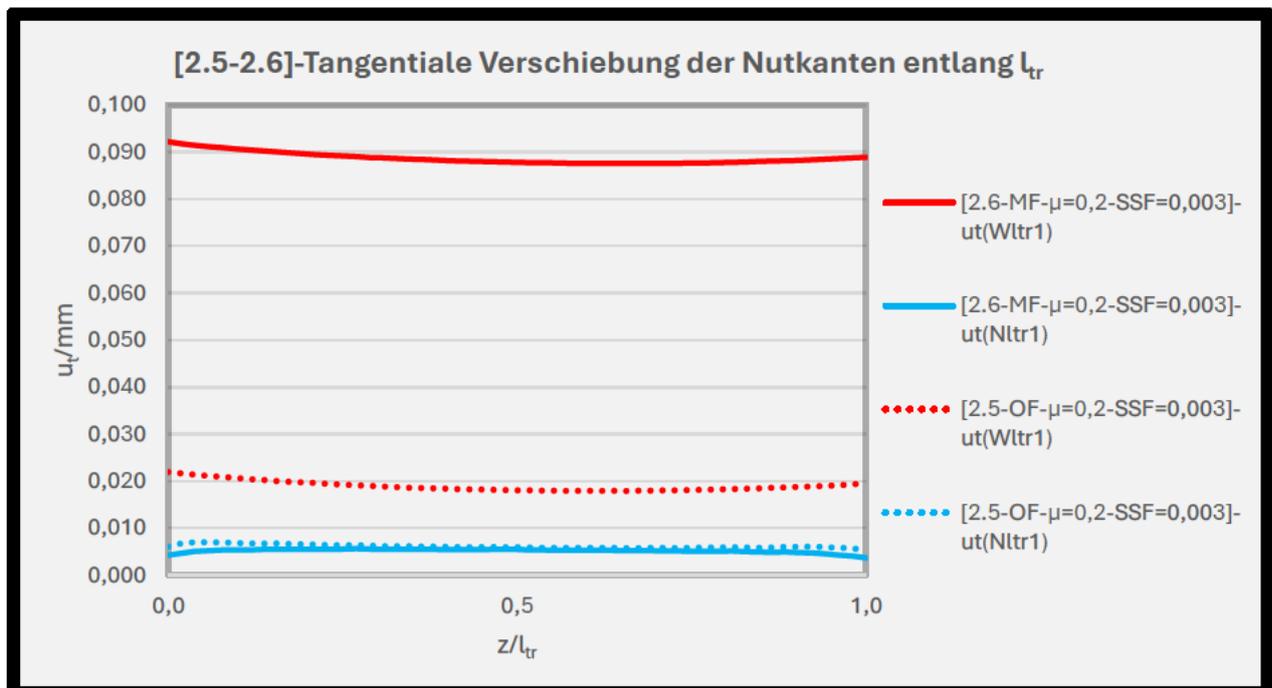


Diagramm 20: [2.5-2.6]-Tangentiale Verschiebung der belasteten Nutkanten

Die Rückführung der Fasen in die Flankenkontaktpaarungen führt zu einem rapiden Anstieg der tangentialen Verschiebung der Wellennutkante. Dabei ändert sich die Verschiebung der Nabennutkante minimal und verläuft nahezu deckungsgleich mit dem Ergebnis aus Berechnung [2.5]. Qualitativ gibt es hierbei keine Änderungen am Verlauf.

Die Flächenpressungsverteilung innerhalb der belasteten Wellennutflanke wird in der nachfolgenden Abbildung 53 gezeigt:

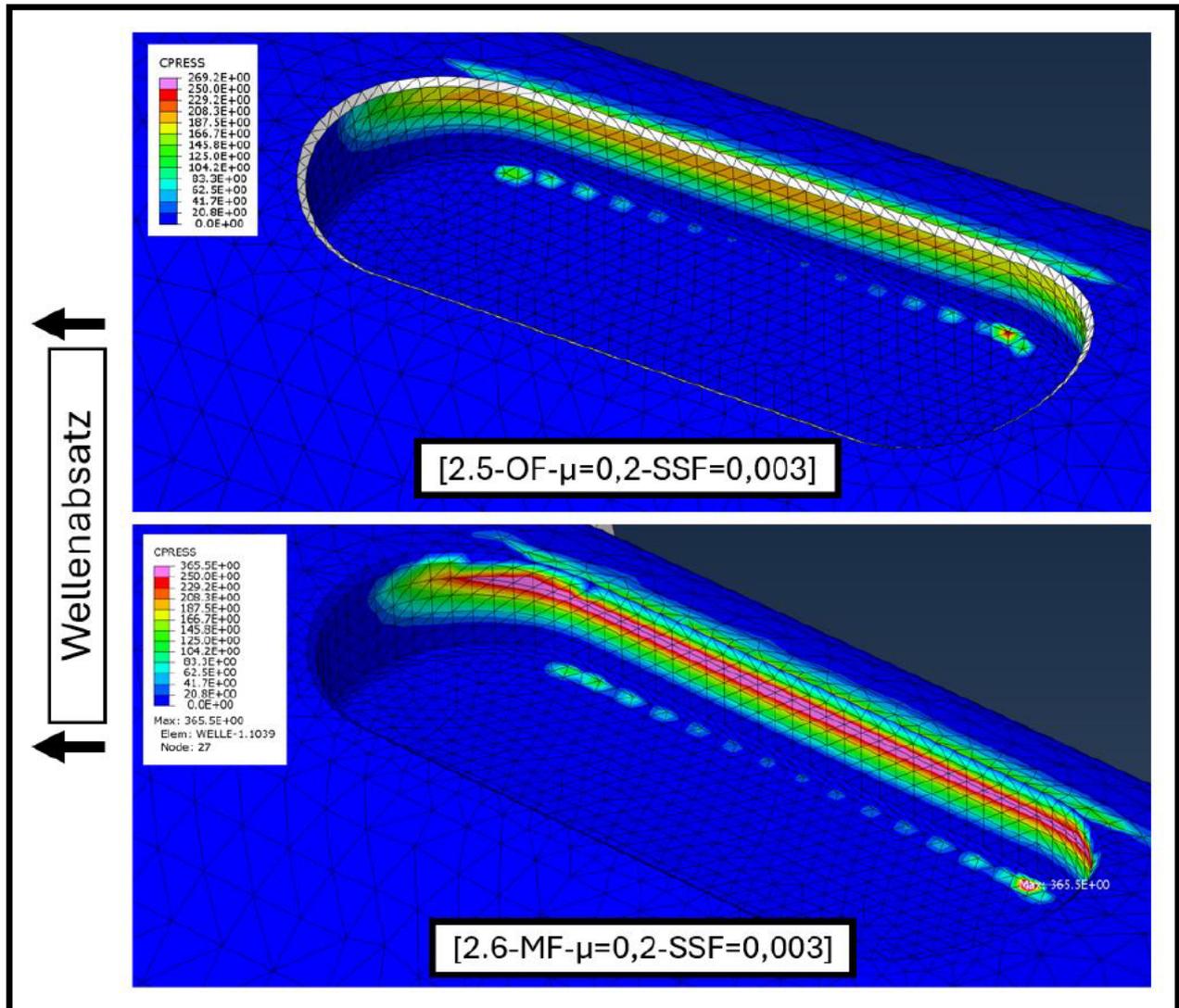


Abbildung 53: [2.5-2.6]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke

Dabei lässt sich mit der Rückkehr der Fasen in die Kontaktpaare eine deutliche Konzentration unterhalb der Wellennutkante erkennen wie es auch in Berechnung [2-AM] der Fall ist (s. Abbildung 37). Weiterhin ist die Flächenpressung im Vergleich zum Ergebnis der Berechnung [2.5] wieder angestiegen.

Nachfolgend wird die Betrachtung des Flächenpressungsverlaufes mit Diagramm 21 durchgeführt:

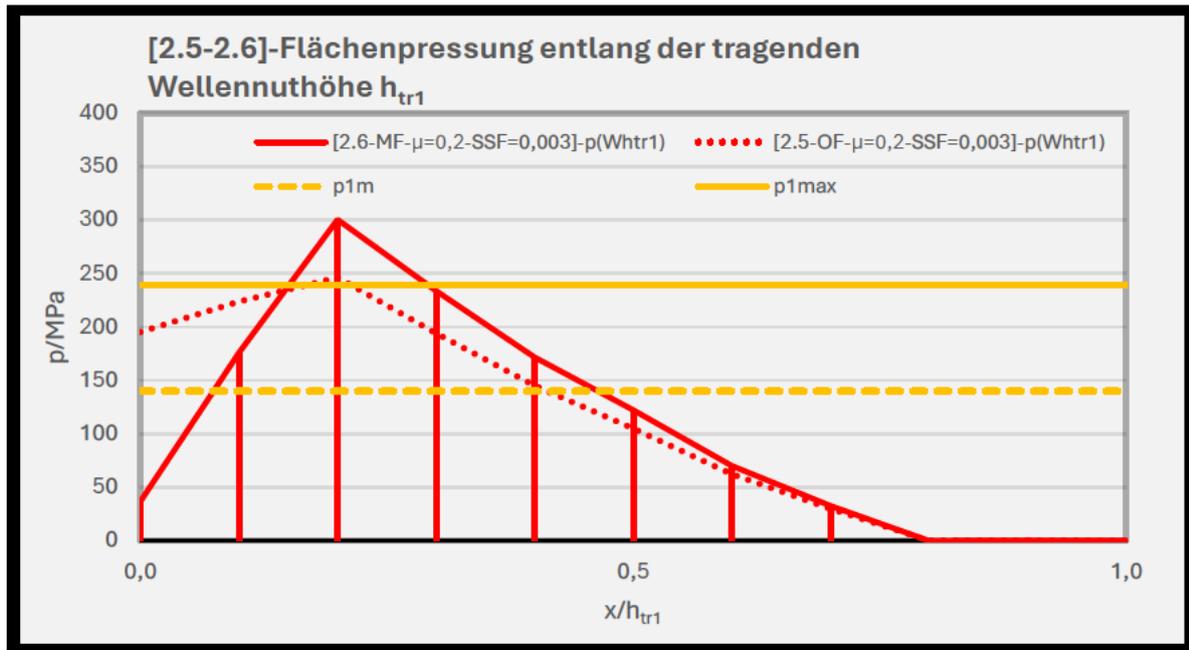


Diagramm 21: [2.5-2.6]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennuthöhe

Verglichen mit dem Verlauf der Berechnung [2.5] stellt sich mit der Rückführung der Fasen in die Kontaktpaarungen ein hoher Gradient der Flächenpressung ein, wie in den Ergebnissen des Ausgangsmodells [2-AM] der Falls ist (s. Diagramm 2). Der Betrag der Flächenpressung hat sich im Vergleich zur Berechnung [2.5] sichtbar erhöht und entspricht damit nicht mehr der analytisch bestimmten Pressung nach MB. Dabei stellt sich maximale Flächenpressung auf derselben Nuthöhe ein. Nachfolgend wird die Flächenpressung entlang der tragenden Wellennutlänge untersucht (s. Diagramm 22):

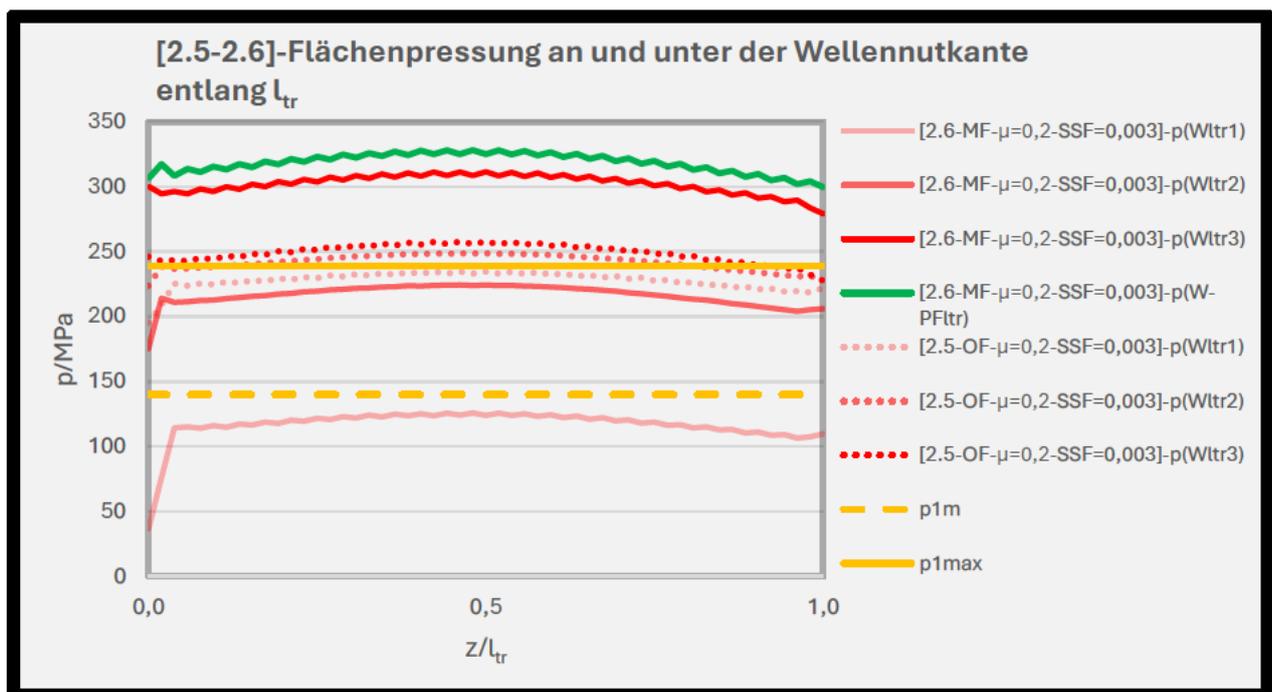


Diagramm 22: [2.5-2.6]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennutlänge

Hierbei wird nochmal der hohe Gradient der Flächenpressung durch die Abstände der Verläufe deutlich, der sich mit der Rückkehr der Fasen in die Kontaktpaare ergibt. Weiterhin fällt auf, dass sich die Verläufe beider Berechnungen qualitativ ähneln und damit auch hier der gewünschte Verlauf aus dem Referenzergebnis nicht erzeugt wird. Die Flächenpressung an der belasteten Passfederflanke liegt dabei leicht über der Pressung in der Wellennutflanke.

Die Untersuchung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke startet mit der folgenden Abbildung 54:

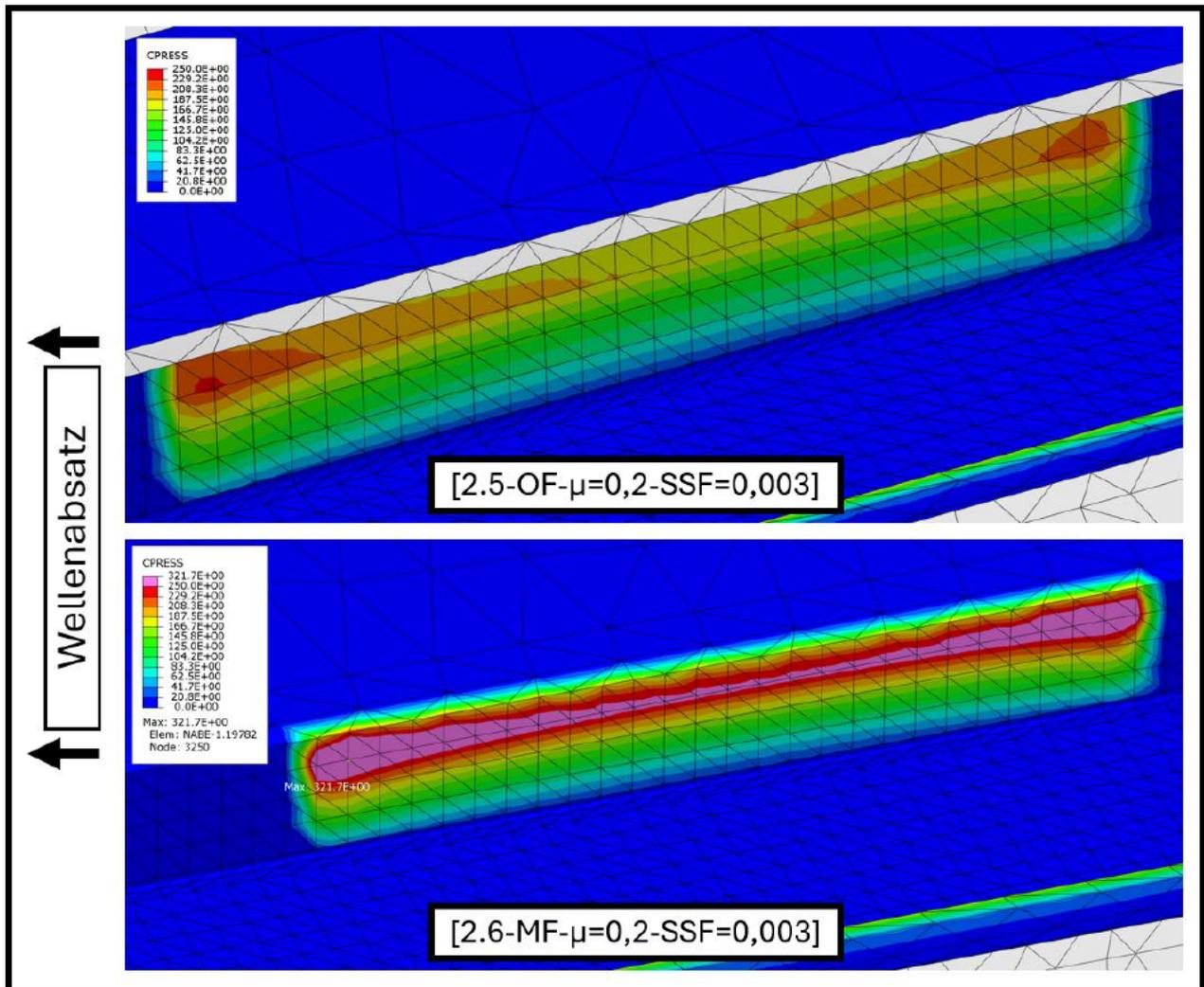


Abbildung 54: [2.5-2.6]-Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke

Auch in der Nabennutflanke führt die Rückführung der Fasen in die Flankenkontaktpaarungen zu einem Anstieg der Flächenpressung. Die Konzentration der höchsten Flächenpressung stellt sich weiterhin unterhalb der Nabennutkante ein. Wie in den vorangegangenen Ergebnissen herrscht die maximale Flächenpressung weiterhin an den Enden des tragenden Nutflankenbereiches. Der Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennuthöhe zeigt das nachfolgende Diagramm 23:

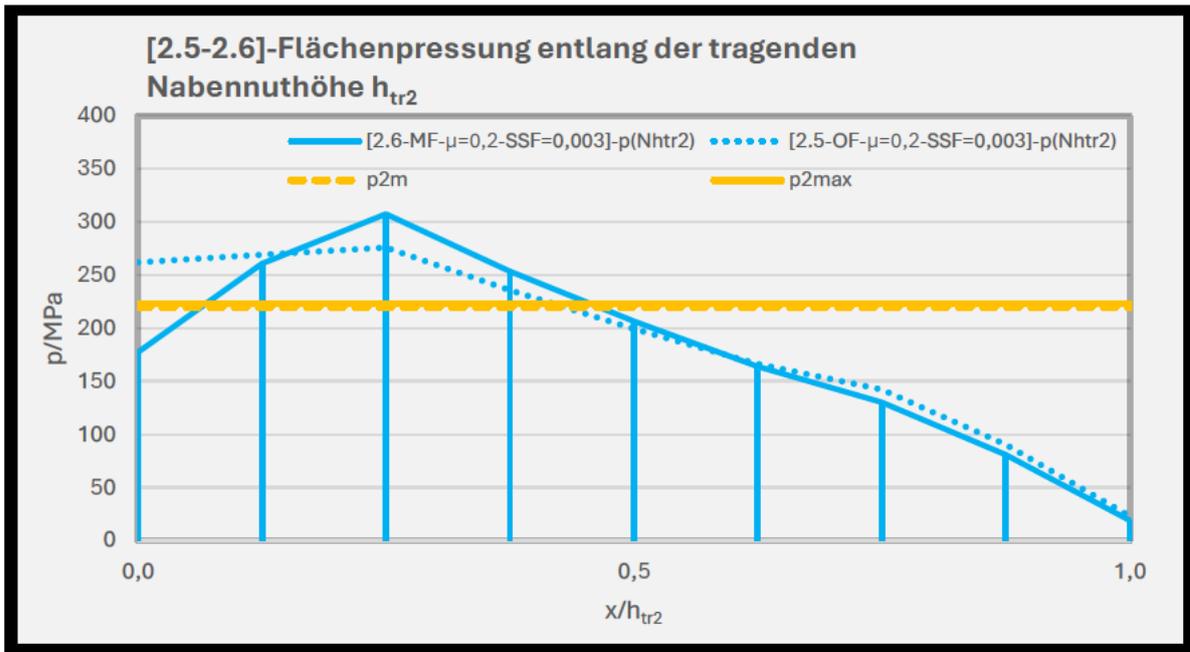


Diagramm 23: [2.5-2.6]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennuthöhe

Im Vergleich zur Welle wird die Flächenpressung in der Berechnung [2.6] entlang der tragenden Nuthöhe etwas weniger erhöht. Jedoch stellt sich auch hier im Bereich der Nutkante ein hoher Flächenpressungsgradient ein. Nachdem das Maximum der Flächenpressung bei ca.  $z=0,25$  erreicht ist, mindert sich der Verlauf näherungsweise deckungsgleich mit dem Ergebnis aus [2.5] ab. Dabei stellt sich auch hier in beiden Berechnungen die maximale Flächenpressung auf derselben Nuthöhe ein. Die Analyse wird mit der Betrachtung der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennutlänge (s. Diagramm 24) fortgeführt:

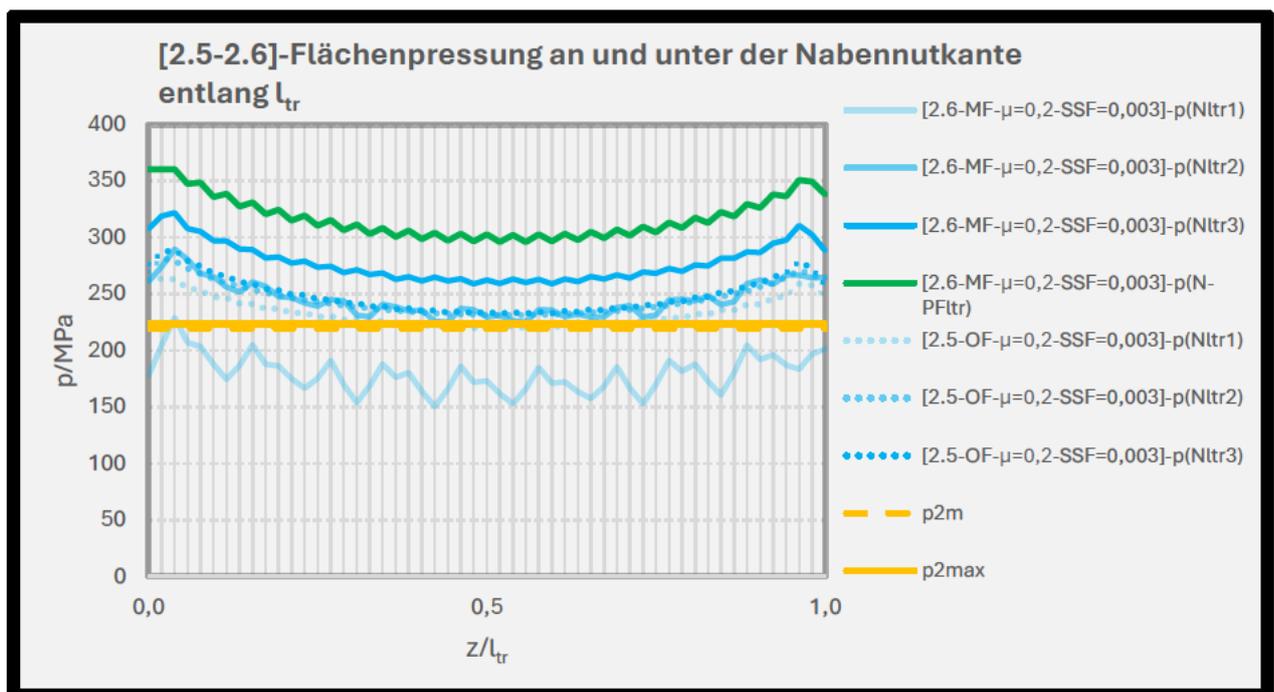


Diagramm 24: [2.5-2.6]-Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Nabennutlänge

Auch wie ersichtlich, dass die Flächenpressung durch das Zurückbringen der Fasen in die Flankenkontaktpaare zu einem Anstieg der Flächenpressung in der Nabe führt. Ein näherungsweise parabolischer Verlauf der Pressung entlang der tragenden Nabennutlänge bleibt weiterhin erhalten. Die Flächenpressung an der Passfeder ist im Vergleich zur Nabe leicht überhöht.

Abschließend erfolgen das Fazit sowie die Konvergenzbetrachtung zur Berechnung [2.6] (s. Diagramm 25):

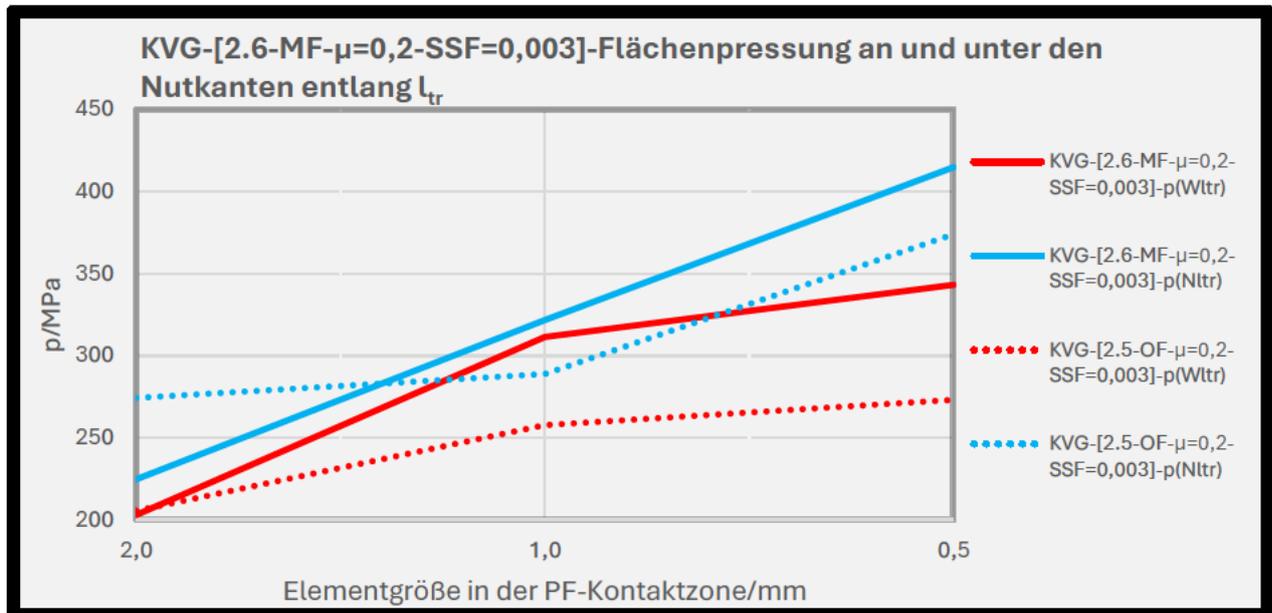


Diagramm 25: [2.5-2.6]-Konvergenzprüfung der Flächenpressung

Die vorangegangenen Erkenntnisse zeigen, dass die Fasen in den Flankenkontaktpartnern zu einer Erhöhung der Flächenpressung sowie dessen Gradienten im Bereich der Nutkanten führen. Hierbei lässt sich in den Abbildungen Abbildung 53 Abbildung 54 eine deutliche Konzentration der Flächenpressung unter den Nutkanten erkennen. Mit der Erhöhung der Flächenpressung in der Nabe und der Welle werden weiterhin die analytisch bestimmten Ergebnisse nach der DIN 6892 überstiegen. Außerdem hat sich am Verlauf der Welle mit einem Maximum der Flächenpressung in der Mitte der tragenden Nutlänge ( $z=0,5$ ) nicht geändert (s. Diagramm 22). Somit konnte mit Berechnung [2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003] weder qualitativ noch quantitativ ein Erfolg erzielt werden. Weitgehendere Betrachtungen finden sich in der FE-Dokumentation (s. Anhang C8)

Hinsichtlich der Konvergenz der Flächenpressung ergibt sich für die Welle qualitativ der Verlauf der Berechnung [2.5-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]. Hierbei wird mit einer feiner werdenden Vernetzung der Kontaktzone eine Konvergenz der Flächenpressung in der Welle vermutet. In der Nabe ist die Flächenpressung mit zunehmend feineren Netz kontinuierlich angestiegen. Somit wird eine Konvergenz der Flächenpressung in der Nabe nicht ersichtlich.

#### 4.4 Schlussbetrachtung der FE-Ergebnisse

Zur Bewertung des Modellverhaltens werden die FE-Ergebnisse in diesem Abschnitt zusammenfassend betrachtet.

##### 4.4.1 Bewertung der Modellverformung

Die Verformungsfigur der Passfeder in PF-Nut stimmt in allen Berechnungen näherungsweise mit dem Referenzergebnis von Forbrig überein. Gemäß Abbildung 55 entsteht eine Weitung der Wellen- und Nabennut, die der Passfeder die Kippbewegung ermöglicht.

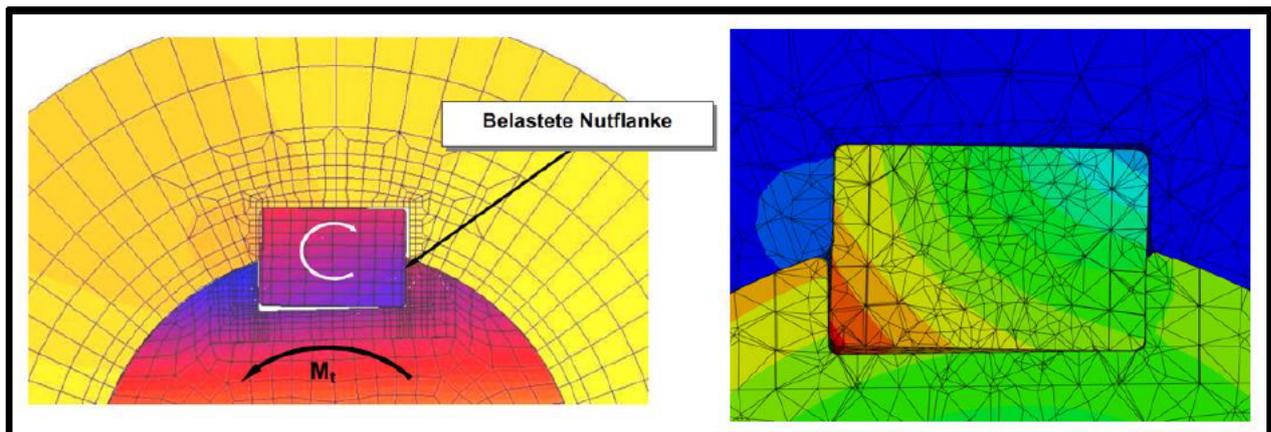


Abbildung 55: Vergleich der PF-Kippfiguren [FrbgF-06]

Weiterhin ergibt sich bei einem „Softened“ Kontakt mit geringen SSF-Werten eine Eindringung der PF in den Nabennutgrund (s. Abbildung 47). Bei der Betrachtung der Nutflankenverformung ist im Ergebnis des Ausgangsmodells eine starke Wölbung der Nutflanken unterhalb der Nabennutkanten aufgefallen (s. Abbildung 36). Dieses Verformungsverhalten wird mit der Entfernung der Fasen entschärft (s. Abbildung 41). Mit der Berechnung [2.6] werden die Fasen bei einem „Softened“ Kontakt in der PF-Kontakt wieder in die Flankenkontaktpaare zurückgeführt. Hierbei ergeben sich ebenfalls keine starken lokalen Verformungen in den belasteten Nutflanken (s. Abbildung 48). Der Verlauf der tangentialen Verschiebung verhält sich qualitativ in allen Berechnungen ähnlich. Hierbei ergeben sich lediglich betragsmäßige Unterschiede. In der Welle entsteht infolge der Wellenverdrillung ein gekrümmter Verlauf (s. Diagramm 1). Hierbei stellt sich auf der Lasteinleitungsseite ( $z=0$ ) eine größere Verschiebung als auf der Lastableitungsseite ( $z=l_{tr}$ ) ein. Dieses Verformungsverhalten ist sinnvoll, da die Wellenverdrillung durch die eingespannte Nabe zunehmend gehemmt wird. Bei der tangentialen Verschiebung der Nabennutkante kann man stets einen der Abdruck der PF beobachten, was ebenfalls ein sinnvolles Ergebnis ist.

#### 4.4.2 Quantitative Bewertung der Flächenpressung

Die Veränderung des Betrages der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke wird mit dem folgenden Diagramm 26 untersucht:

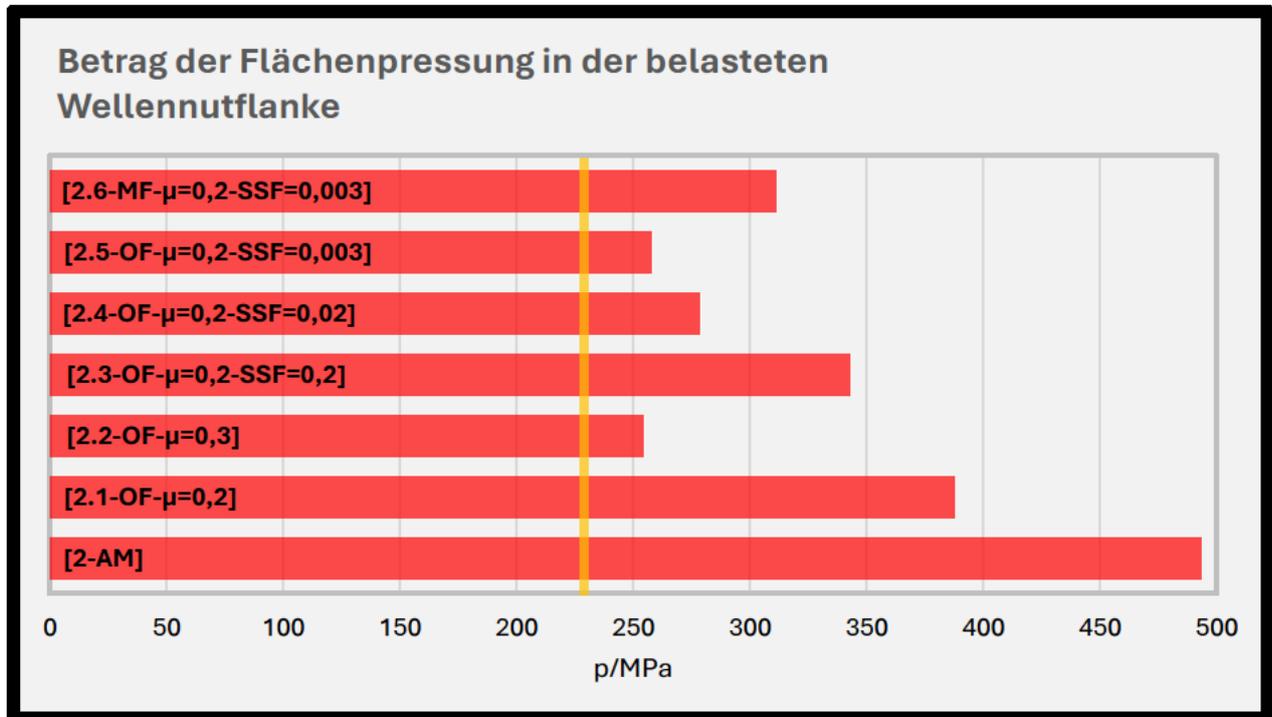


Diagramm 26: Betragsänderung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke

Mit allen hier durchgeführten Modellvariationen wird der Betrag der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke abgemildert. Hierbei führt ein erhöhter tangentialer Reibwert sowie ein „Softened“ Normalkontakt zu einer deutlichen Reduzierung der Flächenpressung. Gleichzeitig liegen die Pressungen dieser Berechnungen am dichtesten an der analytisch bestimmten Flächenpressung nach MB der DIN 6892 (gelber Balken).

Eine Übersicht über die Änderungen des Flächenpressungsbetrages wird mit dem nachfolgenden Diagramm 27 gegeben:

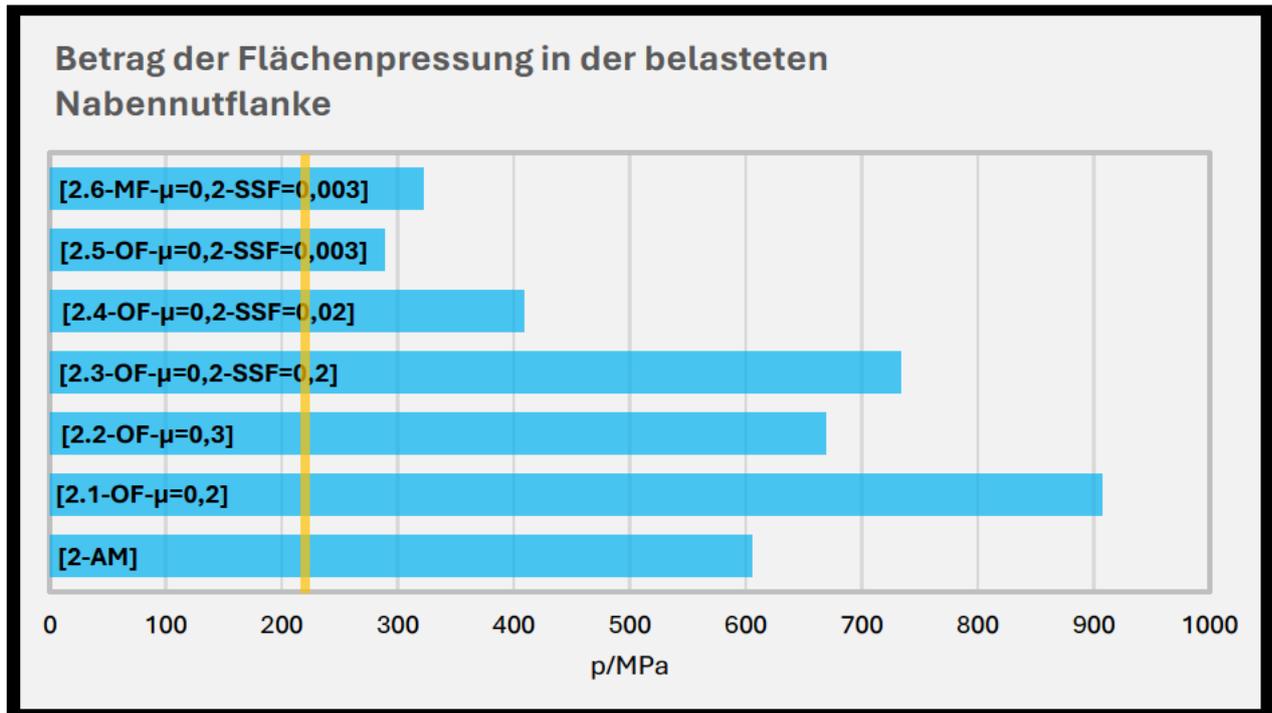


Diagramm 27: Betragsänderung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke

In der Nabe hat das Entfernen der Fasen aus den Flankenkontakten sowie die Erhöhung des Reibungskoeffizienten zu einer deutlichen Erhöhung der Flächenpressung in der Nabennutflanke geführt. Bei einem „Softened“ Normalkontakt mit geringen SSF-Werten kann die Pressung in der Nabe deutlich reduziert werden. Der Betrag der Flächenpressung in der Berechnung [2.5] liegt dabei am dichtesten an der analytisch bestimmten Flächenpressung nach MB der DIN 6892 (gelber Balken).

#### 4.4.3 Qualitative Bewertung der Flächenpressung

Die Verteilung der Flächenpressung wird im Wesentlichen durch die Fasen in den Flankenkontaktpaarungen beeinflusst (s. Abbildung 53). Wenn die Fasen in den Flankenkontakten implementiert sind, stellt sich die größte Flächenpressung deutlich unterhalb der Nutkanten ein. Hierbei bildet sich großer Gradient der Flächenpressung, der vor allem im Pressungsverlauf entlang der tragenden Nuthöhen sichtbar wird (s. Diagramm 21). Mit der Entfernung der Fasen aus Flankenkontaktpaarungen wandert das Maximum der Flächenpressung auf die Nutkanten (s. Diagramm 8) was nicht dem Referenzergebnis entspricht. Mit einem „Softened“ Normalkontakt kann dieses Problem gelöst werden. Hierbei wandert das Maximum der Flächenpressung bei geringen SSF-Werten wieder unter die Nutkanten (s. Diagramm 15). Mit der Berechnung [2.5] wird dabei ein Verlauf entlang der tragenden Wellennuthöhe erzeugt, der näherungsweise dem Referenzergebnis entspricht. Beim Flächenpressungsverlauf entlang der tragenden Wellennutlänge werden keine qualitativen Erfolge erzielt (s. Diagramm 28):

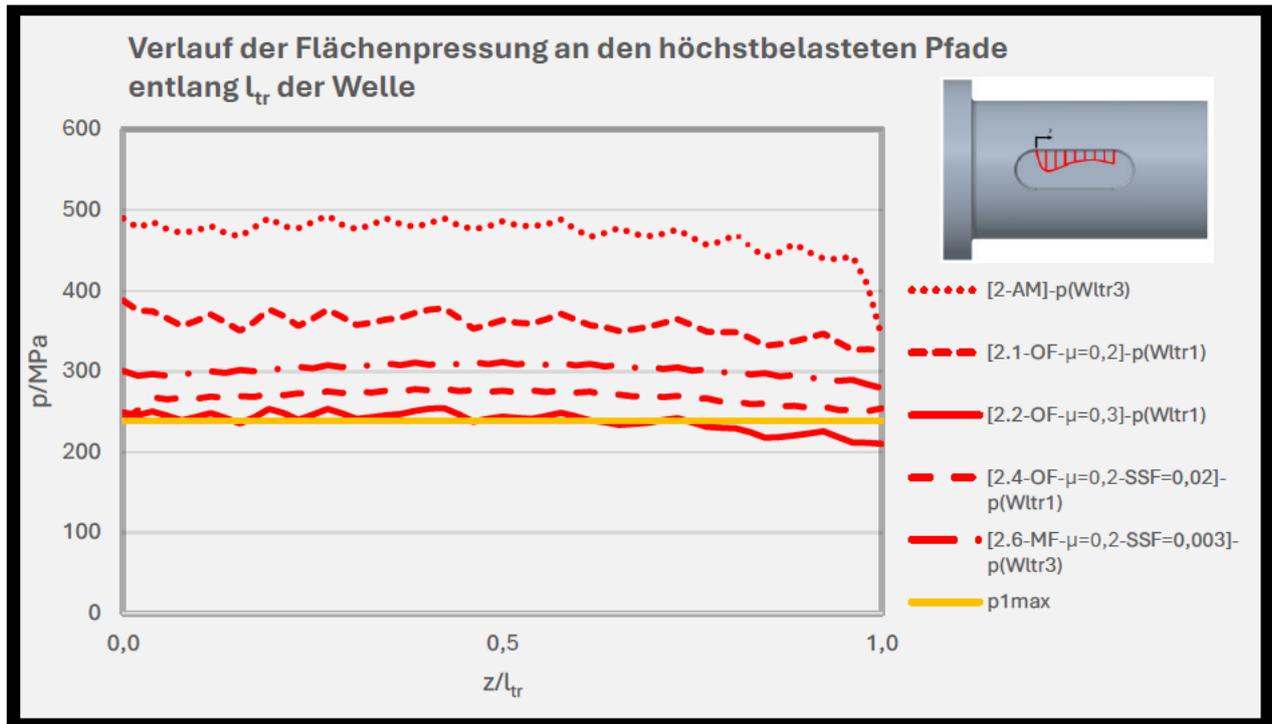


Diagramm 28: Verlauf der Flächenpressung an den höchstbelasteten Pfaden entlang  $l_{tr}$  in der Welle

Hierbei ergibt sich in allen Berechnungen ein gleichmäßiger Verlauf der Flächenpressung ohne ein signifikantes Maximum auf der Lasteinleitungsseite. Durch die hier durchgeführten Modelleinstellungen werden lediglich Änderungen im Betrag der Flächenpressung erzielt.

Weiterhin wird der Verlauf der Flächenpressung entlang der höchstbelasteten Pfade in der Nabennutflanke im nachfolgenden Diagramm 29 dargestellt:

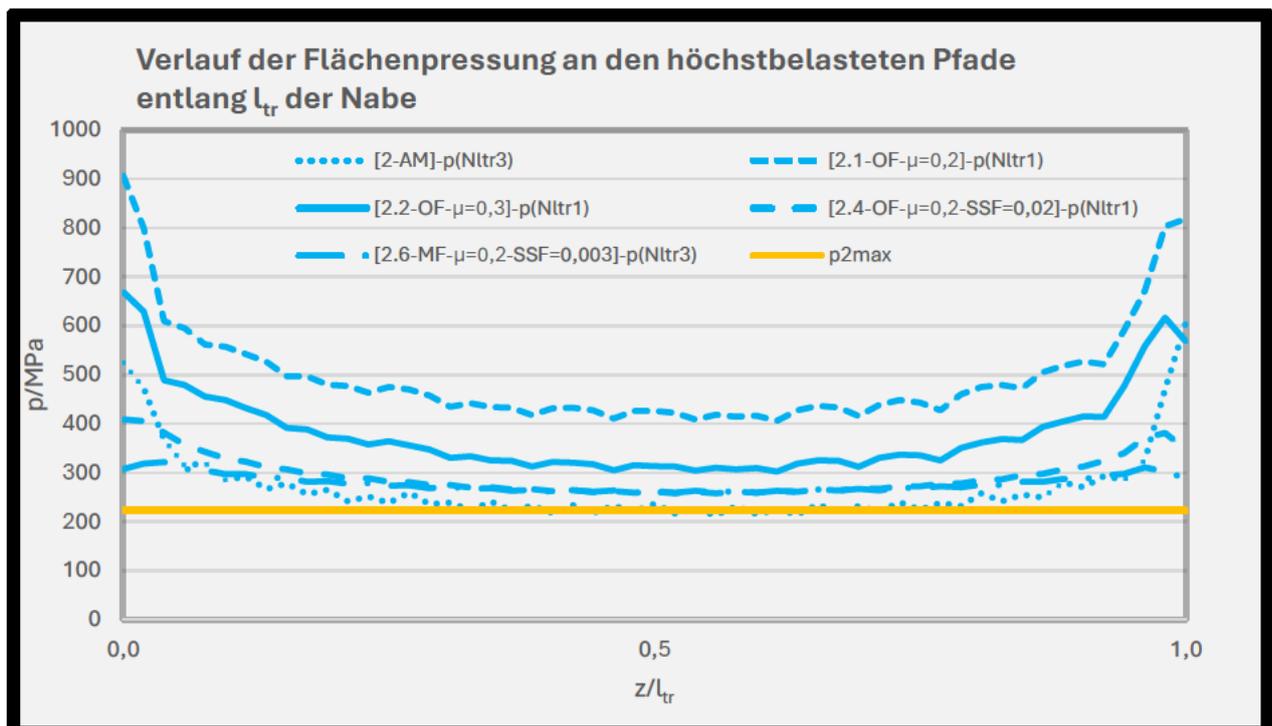


Diagramm 29: Verlauf der Flächenpressung an den höchstbelasteten Pfaden entlang  $l_{tr}$  in der Nabe

Entlang der tragenden Nabennutlänge hat sich stets ein näherungsweise parabolischer Verlauf der Flächenpressung eingestellt. In den Berechnungen [2-AM], [2.1] sowie [2.2] wird weiterhin ein hoher Gradient der Flächenpressung an den der tragenden Nabennutlänge sichtbar. Ein „Softened“ Normalkontakt mit geringen Werten für den SSF können den Gradienten der Flächenpressung deutlich reduzieren. Entlang der tragenden Nabennuthöhe zeigen die Verläufe der Pressung ein qualitativ ähnliches Verhalten zur Welle.

#### 4.4.4 Konvergenz der Flächenpressung

Weiterhin bietet die nachfolgende Tabelle 7 eine Übersicht über das Konvergenzverhalten der Flächenpressung in den belasteten Nutflanken:

	[2-AM]	[2.1]	[2.2]	[2.3]	[2.4]	[2.5]	[2.6]
KVG-Welle	Nein	Ja	/	Nein	Ja	Ja	Ja
KVG-Nabe	Nein	Ja	/	Evtl.	Nein	Nein	Nein

*Tabelle 7: Konvergenzeinschätzung der Flächenpressung in den tragenden Nutflanken*

Hierbei wird in der Berechnung [2.1] durch die Entfernung der Fasen aus den Flankenkontakten bei einem „hard“ Normalkontakt in der PF-Kontaktzone eine Konvergenz der Flächenpressung in den belasteten Nutflanken vermutet. Für die Berechnung [2.2] kann bei einer Berechnungszeit von ca. 9 Std. keine Konvergenzprüfung der Flächenpressung erfolgen. Mit der Verwendung eines „softened“ Normalkontaktes konvergiert die Flächenpressung in der Wellennutflanke bei geringen SSF-Werten. In der Nabe ist die Flächenpressung in der Berechnung [2.3] bei einer Netzverfeinerung von 1 mm auf 0,5 mm Elementen deutlich abgesunken (s. Diagramm 19). Hier ist eine Konvergenz in der Nabe schwer einschätzbar. In den Berechnungen [2.4] bis [2.6] lassen die Verläufe keine Konvergenz der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke vermuten.

Zusätzlich wird eine Berechnung mit einer nichtlinearen Geometrie (in Abaqus „Nlgeom“) bei einer Modellstruktur gemäß der Berechnung [2.1] (s. Abschnitt 0) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnung gleichen sich mit denen der Berechnung [2.1] und werden hier nicht weiter vorgestellt. Weitere Hinweise zur Nutzung von nichtlinearen Geometrien sowie zu den erzeugten FE-Ergebnissen sind in der angehängten FE-Dokumentation zu finden (s. Anhang C9).

## 5 Herstellung von 3D-Druck-Lerhmodellen

Ein zusätzliches Produkt der vorliegenden Arbeit bildet die Herstellung von 3D-Druck-Lerhmodellen einer PFV. Hierbei sollen neben einer richtig konstruierten Verbindung auch erfahrungsbasierte PFV-Gestaltungsfehler hergestellt werden. Mit den physischen Modellen soll den Studenten ein besseres Verständnis über den Aufbau und die Funktionsweise einer Passfederverbindung vermittelt werden. Hierbei wird sich der in Abbildung 56 gezeigte Modellentwurf mit der CAD-Software Creo erstellt:

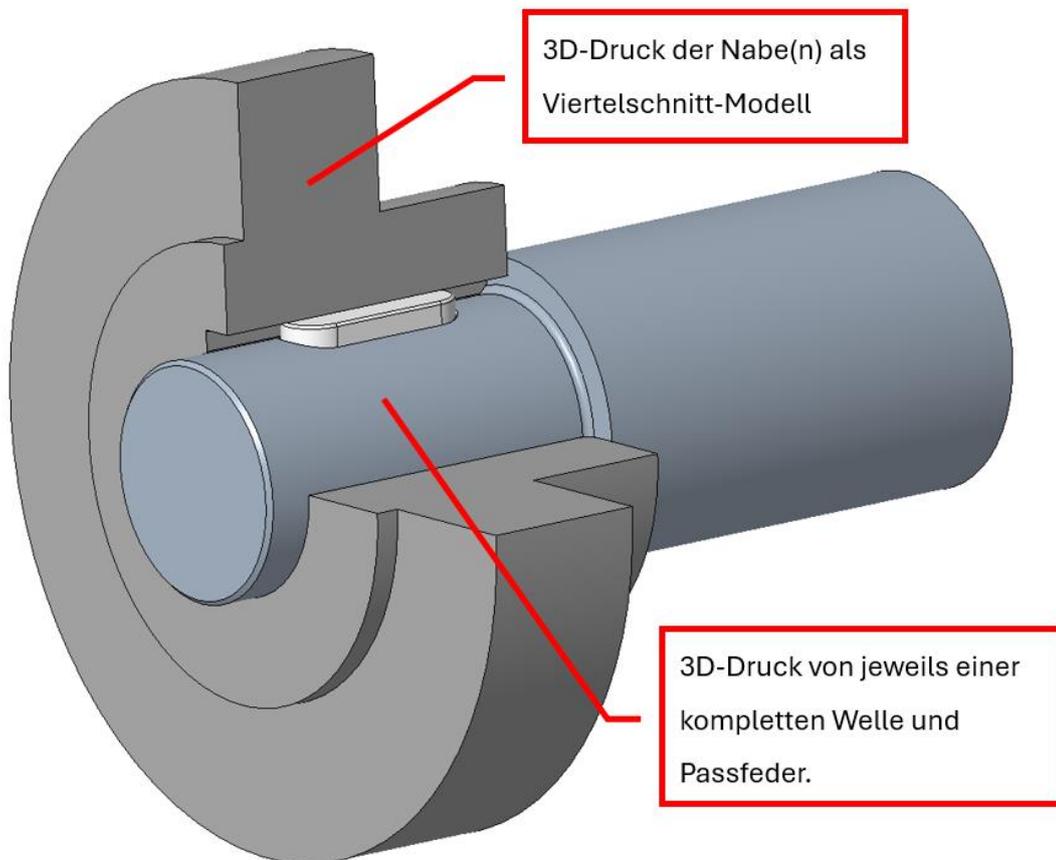


Abbildung 56: Grundsätzlicher Aufbau der 3D-Druck-Lerhmodelle

Hierbei sollen die Welle und die Passfeder jeweils als Volldruck hergestellt werden. In mündlicher Absprache hat sich ergeben, dass die meisten Fehler bei der PFV-Gestaltung in der Nabe stattfinden. Somit reicht es aus jeweils ein 3D-Druck-Modell einer Welle sowie einer Passfeder herzustellen. Die Variation der Nabe kann mit mehreren 3D-Druck-Modellen erfolgen. Hierbei sollen die Naben als Viertelmodell gedruckt werden. Mit dieser Modellgestaltung soll zum einen die Handhabung und zum anderen der Zusammenhalt der Modelle gewährleistet werden. Die Abbildung 56 zeigt außerdem das in dieser Arbeit untersuchte PFV-Modell, welches für den 3D-Druck der richtig konstruierten Passfederverbindung genutzt wird.

Der erste modellierte Gestaltungsfehler wird in der nachfolgenden Abbildung 57 gezeigt:

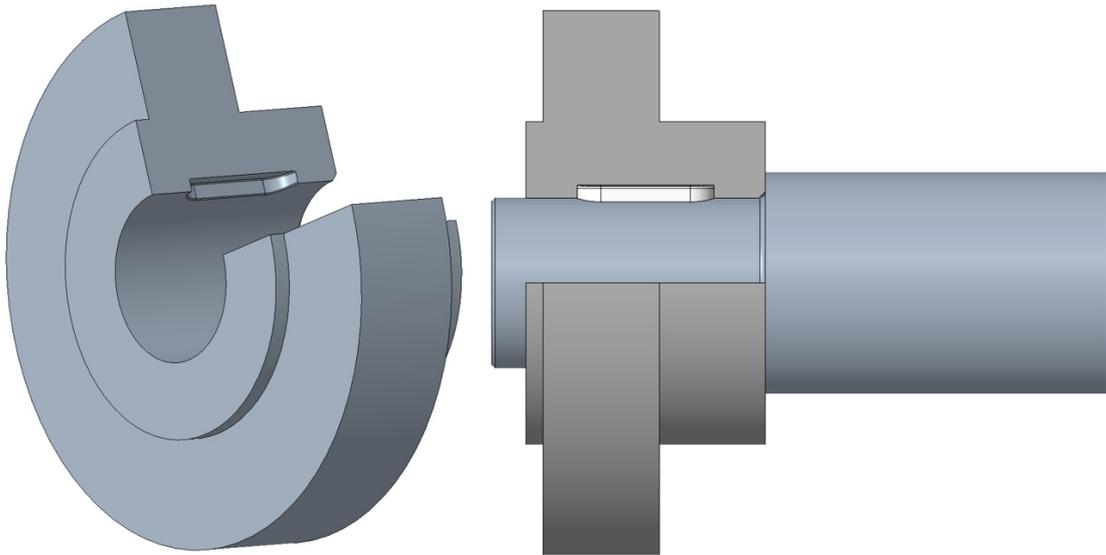


Abbildung 57: Gestaltungsfehler 1 'Wellennut in Nabe'

Hierbei wird die Nabe mit einer nicht durchgängigen Passfedernut versehen, die eine Montage und Demontage dieser Verbindung unmöglich macht. Weiterhin würde die Fertigung der Nabe eine Herausforderung darstellen. Abbildung 58 zeigt eine Nabe mit einer einseitig offenen Nut zum Wellenabsatz:

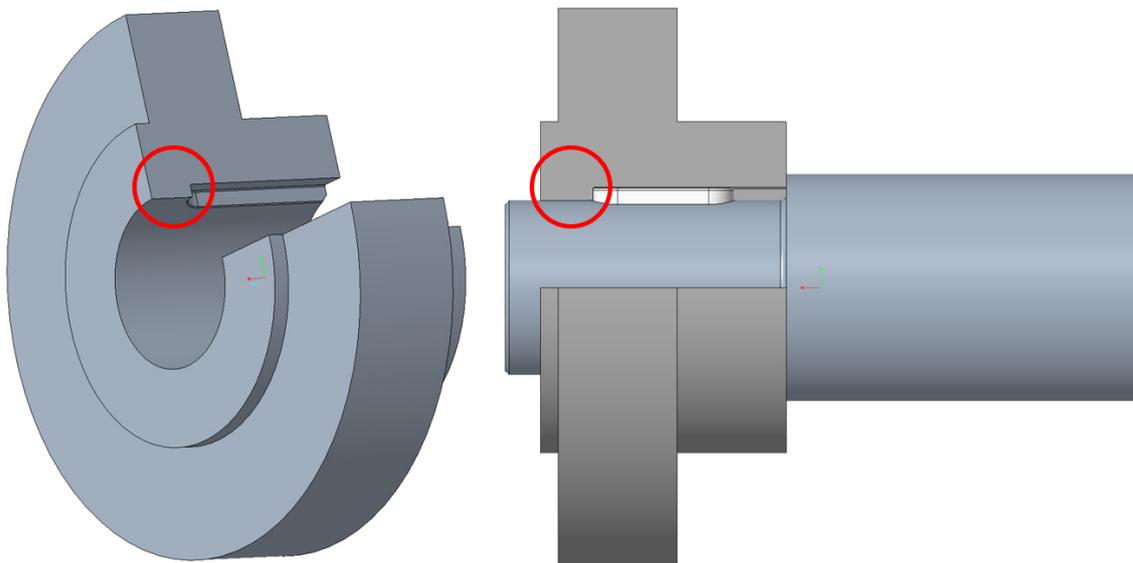
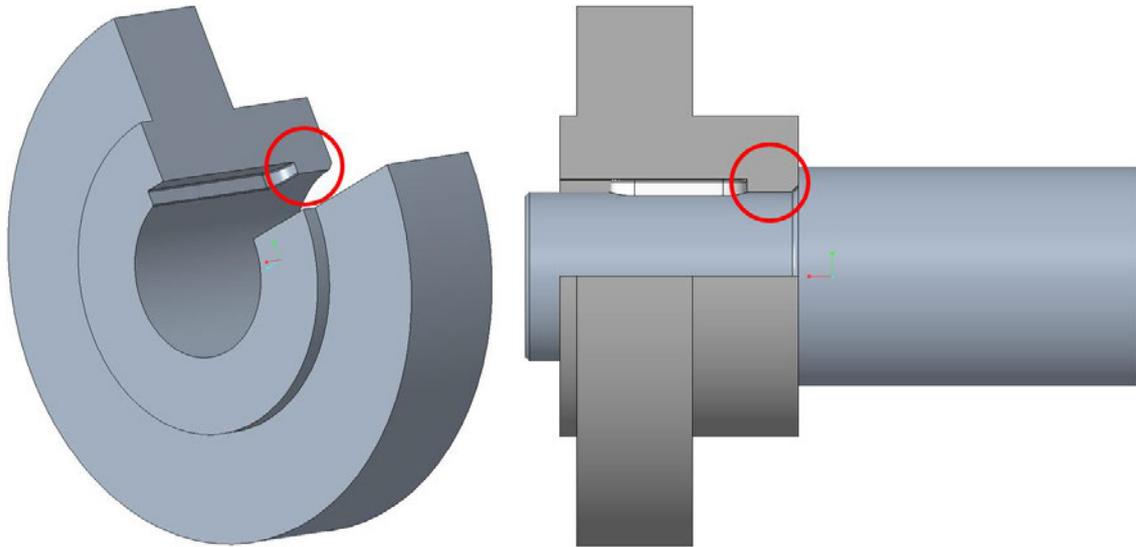


Abbildung 58: Gestaltungsfehler 2 'Einseitige Nabennut zum Wellenabsatz'

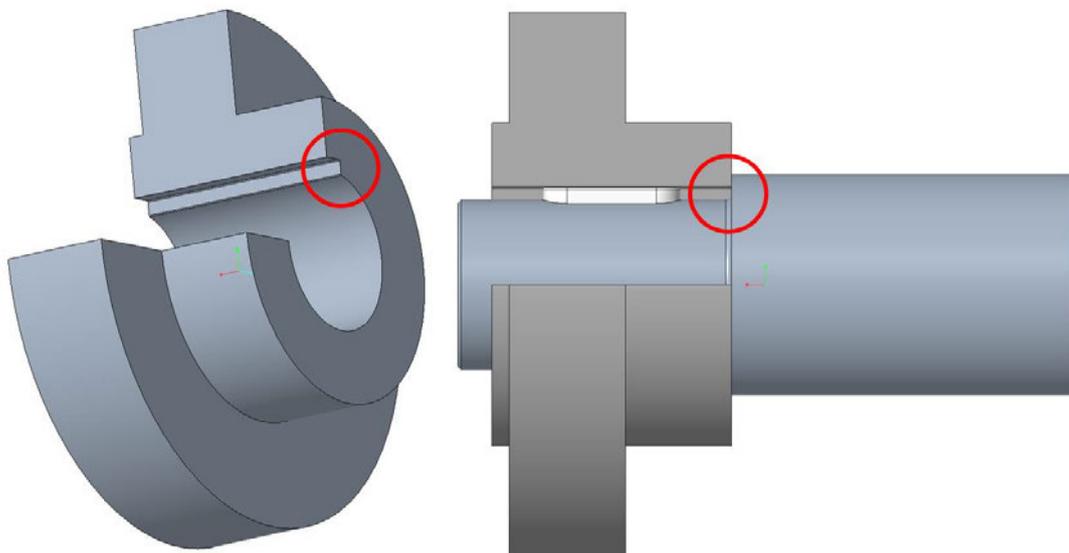
Diese Verbindung wäre zwar montierbar und demontierbar, ist aber fertigungstechnisch problematisch, da mit dieser Nutgestaltung kein Werkzeugauslauf für das Stoß- oder Räumwerkzeug gegeben ist.

Der nächste Gestaltungsfehler zeigt die folgende Abbildung 59



*Abbildung 59: Gestaltungsfehler 3 'Einseitige Nabennut zum Wellenende'*

Hierbei handelt es sich ebenso um eine nicht durchgängige Nut, die zum Wellenende geöffnet ist. Neben dem fehlenden Werkzeugauslauf, ist hier die Montage und Demontage der Verbindung nicht möglich. Der letzte Gestaltungsfehler wird in Abbildung 60 dargestellt:



*Abbildung 60: Gestaltungsfehler 4 'Nabe ohne Montagefase'*

Hierbei handelt es sich um einen unscheinbaren jedoch fatalen Gestaltungsfehler. Die Fase am Nabeninnendurchmesser gewährleistet zum einen ein einfaches Aufschieben der Nabe auf den Wellenfügedurchmesser und sorgt zum anderen für ein vernünftiges Anliegen der Nabe an der Wellenschulter. Das Weglassen dieser Fase würde zu einer Kollision der Nabenkante mit dem Wellenradius führen. Bei einer Nabe mit axialen Sicherungselementen würde es zu zusätzlichen Problemen bei der Montage kommen.

## 6 Zusammenfassung und Fazit

Das Ziel dieser Arbeit war ursprünglich eine FE-Analyse zur Untersuchung geometrischer Einflussgrößen auf das nichtlineare Tragverhalten einer Passfederverbindung. Diese Untersuchung erfordert ein FE-Modell das sowohl quantitativ als auch qualitativ valide Ergebnisse erzeugt. Diese Anforderung erwies sich als besonders herausfordernd. Deswegen musste ein Schritt zurückgegangen werden und der Schwerpunkt der Arbeit verlegte sich auf die Erstellung eines möglichst validen FE-Modells einer PFV. In der Entwicklungsphase sind einige Modellierungsaspekte hervorgetreten, die bei der Erstellung eines validen FE-Modells einer PFV beachtet werden sollten. Hieraus entstand somit das Ausgangsmodell.

Die wesentlichen Einflussparameter in den hier vorgestellten FE-Berechnungen bildeten, die Fasen in den Flankenkontaktpaarungen, der Reibungskoeffizient des tangentialen Kontaktverhaltens sowie eine „Softened“ Kontakteinstellung des Normalverhaltens. Während die Modellverformungen insgesamt sinnvoll wirkten, waren die Ergebnisse der Flächenpressung überwiegend unbefriedigend. Der Betrag der Flächenpressung in den belasteten Nutflanken konnte in einigen Berechnungen deutlich reduziert und in den Bereich der analytisch bestimmten Flächenpressungen nach der DIN 6892 gebracht werden. Mit den vorgenommenen Einstellungen wurde jedoch kein signifikanter Einfluss auf die Verläufe der Flächenpressung entlang der tragenden Nutflanken ausgeübt. Die Erzeugung einer qualitativ zufriedenstellenden Verteilung der Flächenpressung blieb somit aus. Dabei stellte die Konvergenz der Flächenpressung insbesondere in der belasteten Nabennutflanke ein zusätzliches Problem dar. Letztendlich ist die Erstellung eines validen FE-Modells einer Passfeder nicht gelungen.

Die erzeugten Ergebnisse sind dennoch nicht wertlos. Da der Entwicklungsverlauf in dieser Arbeit nicht vollumfänglich beschrieben werden kann, wurde dieser in einem parallel erstellten Bericht zusammengefasst und dieser Arbeit angehängt. Diese Dokumentation kann als Grundlage für zukünftige studentische Projekte im Bereich der FE-Analysen an Passfederverbindungen genutzt und erweitert werden. Letztendlich hat sich gezeigt, dass das gewählte FE-Problem auf die gewünschten Ergebnisse abgestimmt werden muss, weswegen eine iterative Vorgehensweise erforderlich wird. Hierbei könnten die folgenden Hinweise für weiterführende Untersuchungen zielführend sein:

- Die Nutzung einer längeren Passfeder für die vorliegende PFV könnte Berechnungseffizienz steigern. Die hier gewählte Länge sorgt für eine erhöhte Torsionssteifigkeit, die den numerischen Anspruch der FE-Berechnung steigert.

- Weiterhin könnte das FE-Netz der Nabe und der Welle optimiert werden. Der abgesetzte Wellendurchmesser ist für die hier durchgeführten FE-Analysen uninteressant. Dieser könnte beispielsweise gröber vernetzt werden. Gleichzeitig hat sich ergeben, dass die größte Flächenpressung im oberen Nutflankenbereich herrscht. Somit könnte man diesen Bereich feiner als den unteren Nutflankenbereich vernetzen.
- In den FE-Berechnungen wurde stets dieselbe Kontakteinstellung für die Welle und die Nabe verwendet. Dabei haben sich die Beanspruchungen in der Nabe teilweise anders als in der Welle verhalten. Eine separate Kontakteinstellung für die Nabenuotflanken hier Abhilfe schaffen. Außerdem könnten weitere Kontakteinstellungen untersucht werden.
- Weiterhin konnte der Einfluss einer nichtlinearen Geometrie nur in einer Berechnung untersucht werden. Hier sollten noch weitere Untersuchungen erfolgen.

Bei der Konstruktion der untersuchten Passfederverbindung sind die in der Lehrveranstaltung Konstruktion A vermittelten Gestaltungshinweise zu Wellen und Achsen sowie Passfederverbindungen eingeflossen. Der statische Nachweis der Passfederverbindung erfolgte mit den analytischen Berechnungsmethoden B und C der DIN 6892. Hiermit wurden grundlegende Schritte im Konstruktionsprozess einer Passfederverbindung an einem konkreten Anwendungsbeispiel anschaulich gemacht. Mit den hergestellten 3D-Druck-Lehrmodellen der Passfederverbindung kann weiterhin zusätzliches Verständnis über den Aufbau und die Funktionsweise dieser Welle-Nabe-Verbindung vermittelt werden.

## 7 Literatur

### DIN-Normen:

- [DIN 116] DIN 116: „Scheibenkupplungen – Maße, Drehmomente, Drehzahlen“. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1997.
- [DIN 6885] DIN 6885: „Passfedern, Nuten – Maße, Toleranzen, Masse“. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2021.
- [DIN 6892] DIN 6892: „Passfedern – Berechnung und Gestaltung“. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [DIN 748] DIN 748: „Gestaltung von zylindrischen Wellenenden“. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1990.

### Fachliteratur

- [FbrgF-06] F. Forbrig:  
Untersuchungen zur Gestaltfösigkeit von Passfederverbindungen.  
Dissertation, TU Chemnitz, 2006.
- [MilO-75] O. Militzer:  
Rechenmodell für die Auslegung von Wellen-Naben-  
Passfederverbindungen. Dissertation, Berlin: Fachbereich  
Konstruktion und Fertigung der Technischen Universität Berlin, 1975.
- [KdesM-23] B. Sauer, E. Leidich, u.a.:  
Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1, 10. Auflage, Landau  
Kaiserslautern: Springer Vieweg, S. 520-521, S. 525-527, 2023.
- [Masch1-15] B. Schlecht:  
Maschinenelemente 1: Festigkeit, Wellen, Verbindungen, Federn,  
Kupplungen, Hallbergmoos: Pearson Studium, S. 798-801, 2015.
- [RM-23] C. Spura, B. Fleischer, u.a.:  
Roloff/Matek Maschinenelemente, 26. Auflage, Hamm,  
Mönchengladbach: Springer Vieweg S. 418-420, 2023.

**Webseiten**

- [MIT-117] MIT: Contact pressure-overclosure relationships. „<https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEITNRefMap/simaitn-c-normalinteraction.htm>“ Abgerufen am 30.09.2024.
- [MIT-217] MIT: Contact constraint enforcement methods in Abaqus/Standard. „<https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEITNRefMap/simaitn-c-contactconstraints.htm>“ Abgerufen am 06.10.2024.
- [3ds-119] 3dassault systems: General-purpose continuum elements. „[https://help.3ds.com/2019/english/dssimulia\\_established/SIMACAEELMRefMap/simaelm-m-GeneralpurposeContinuumElements-sb.htm?contextscope=all&id=3c408d9d3b8f4d6a855396be958c53e1](https://help.3ds.com/2019/english/dssimulia_established/SIMACAEELMRefMap/simaelm-m-GeneralpurposeContinuumElements-sb.htm?contextscope=all&id=3c408d9d3b8f4d6a855396be958c53e1)“.  
Abgerufen am 07.11.2024

# 8 Anhang

## Anhang A

DK 621.824
DEUTSCHE NORMEN
Januar 1970

**DIN**  
**748**  
Blatt 1

### Zylindrische Wellenenden

Abmessungen      Nenn Drehmomente

Cylindrical shaft ends; dimensions, transmissible torques Ersatz für DIN 748

Zusammenhang mit der ISO-Empfehlung ISO/R 775 - 1969 siehe Erläuterungen

Maße in mm

Die zylindrischen Wellenenden sind bestimmt für die Aufnahme von Riemenscheiben, Kupplungen und Zahnrädern. Nicht angegebene Maße und Einzelheiten, z. B. Paßfeder, Anfassung, Zentrierbohrung und Oberflächengüte sind entsprechend zu wählen.

**Mit Wellenbund**

**Ohne Wellenbund**

Bezeichnung eines zylindrischen Wellenendes von  $d = 250$  mm Durchmesser und  $l = 410$  mm Länge<sup>3)</sup>:  
Wellenende 250×410 DIN 748

d	Toleranzfeld <sup>1)</sup>		l	r <sup>2)</sup>
	lang	kurz		
6				
7	16	—		
8				
9	20	—		
10				
11	23	15		
12				
14	30	18		0,6
16				
19	40	28		
20				
22	50	36		
24				
25	60	42		
28				
30				
32	80	58		1
35				
38				
40				
42	110	82		
45				

Reihe 1	Reihe 2	Toleranzfeld <sup>1)</sup>	l		r <sup>2)</sup>
			lang	kurz	
48	—	k6			1
50	—		110	82	1,6
55	—				
60	—				
65	—		140	105	1,6
70	—				
75	—				
80	—				
85	—		170	130	2,5
90	—				
95	—	m6			
100	—				
110	—		210	165	
120	—				
—	130				
140	—		250	200	4
—	150				
160	—				
—	170		300	240	
180	—				
—	190		350	280	6
200	—				

Reihe 1	Reihe 2	Toleranzfeld <sup>1)</sup>	l		r <sup>2)</sup>
			lang	kurz	
220	—		350	280	
—	240				
250	—		410	330	6
—	260				
280	—		470	380	
—	300				
320	—				
—	340				
360	—		550	450	
—	380	m6			
400	—				10
—	420				
—	440				
450	—		650	540	
—	460				
—	480				
500	—				
—	530				
560	—		800	680	16
—	600				
630	—				

Reihe 1 ist zu bevorzugen.  
Zentrierbohrungen nach DIN 332  
Paßfedern nach DIN 6885 Blatt 1  
Übertragbare Drehmomente siehe Seite 2  
Fußnoten siehe Seite 2  
Zylindrische Wellenenden für elektrische Maschinen siehe DIN 42 946  
Wellenenden für Druckluftmotoren siehe DIN 20 092

Fortsetzung Seite 2  
Erläuterungen Seite 3

Arbeitsausschuß Wellenenden, Achshöhen und Kupplungsflansche im Deutschen Normenausschuß (DNA)

Alleinverkauf der Normblätter durch Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin 30 und Köln
DIN 748 Bl. 1 Jan. 1970

Externe elektronische Ausgabegänge: Beuth-Nachschub, Angewandte Wissenschaften Hamburg - HIS - Fachbibliothek TWI-KdNr. 207296-ID:FWNALG36DARWKOY9E1ZT2R.2-2022-02-28 15:56:42

Frühere Ausgaben: DIN 748: 7. 36

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses, Berlin 30, gestattet.

Änderung Januar 1970: Verschiedene Durchmesser neu aufgenommen und einige gestrichelt. Längen in lang und kurz unterteilt. Übertragbare Drehmomente ergänzt. Siehe auch Erläuterungen.

DIN 6885-1:2021-11

Tabelle 1 — Maße und Grenzmaße der Passfedern, Teil 1

		Maße in Millimeter													
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	
Passfederquerschnitt Toleranzen nach DIN 6880 für Weilendurchmesser $d_1^a$	Breite $b$	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	
	Höhe $h$	2	3	4	5	6	7	8	8	9	10	11	12	14	
Wellennut	über	6	8	10	12	17	22	30	38	44	50	58	65	75	
	bis	8	10	12	17	22	30	38	44	50	58	65	75	85	
Wellennut	fester Sitz P9 leichter Sitz N9 mit Rückenspiel oder Übermaß	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	
	Tiefe $t_1^c$	1,2	1,8	2,5	3	3,5	4	5	5	5,5	6	7	7,5	9	
Nabennut	Breite $b^b$	0,1													
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	
	Tiefe $t_2^c$	1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	3,3	3,3	3,3	3,8	4,3	4,4	4,9	5,4
		0,2													
Nabennut	bei Übermaß $d$	0,1													
		0,5	0,9	1,2	1,7	2,2	2,4	2,4	2,4	2,4	2,9	3,4	3,4	3,9	4,4
$d_2$ Kleinmaß $e$	A	0,2													
		—	—	—	—	—	—	3	3	3	3,5	4	4,5	5	5,5
Schrägung oder Rundung $r_1$	$d_1^+$	2,5	3,5	4	5	6	8	8	8	9	11	11	12	14	
	min.	0,16	0,16	0,16	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	
Rundung des Nutgrunds $r_2$	max.	0,25	0,25	0,25	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	
	min.	0,16	0,16	0,16	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	
Länge $l$ $f$	Toleranz	Masse (7 850 kg/m <sup>3</sup> ) für Form B [kg/1 000 Stück] $g \approx$													
		Feder	0,188	0,423	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Nut	Nut	6	0,251	0,565	1,01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		8	0,314	0,707	1,26	1,95	—	—	—	—	—	—	—	—	
Nut	Nut	10	0,377	0,848	1,51	2,35	—	—	—	—	—	—	—	—	
		12	0,440	0,989	1,76	2,75	3,94	—	—	—	—	—	—	—	
Nut	Nut	14	0,502	1,13	2,01	3,14	4,52	—	—	—	—	—	—	—	
		16	0,565	1,27	2,26	3,53	5,09	7,93	—	—	—	—	—	—	
18	0,565	1,27	2,26	3,53	5,09	7,93	—	—	—	—	—	—	—		

07/15/2024 11:58:39

DK 621.825.24

DEUTSCHE NORMEN

Dezember 1971

Antriebs-elemente  
**Scheibenkupplungen**  
Maße, Drehmomente, Drehzahlen

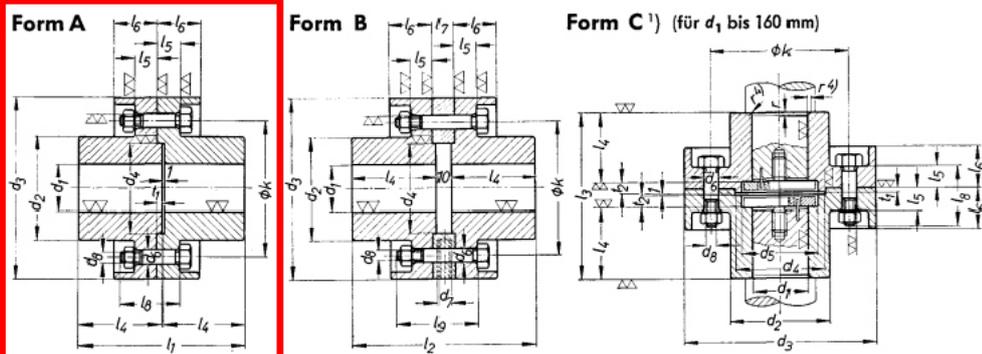
**DIN**  
**116**

Motor elements, flange couplings, principal measures, twisting moments, number of revolutions

Maße in mm

▽ (▽▽)

Oberflächen Reihe 2 DIN 3141



Bezeichnung einer vollständigen Scheibenkupplung Form A von Durchmesser  $d_1 = 140 \text{ mm}^2$ :  
Scheibenkupplung A 140 DIN 116

$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$k$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_6$	$l_7$	$r^1$	$t_1$	$t_2$	zu verwendende Sechskant-Paßschrauben nach DIN 609 für Form A und C	übertragbares Drehmoment $T$ nach DIN 748 <sup>3)</sup> Blatt 1	Drehzahl 1/min			
N7 <sup>2)</sup>	H7/h8			H7														$d_8$	Anzahl	max.			
25	58	125	50	45											1,6		8	M 10	45	60	3	46,2	2120
30						M 10									2		3					87,5	
35	72	140	65	55											2		10					150	2000
40																						236	
45	95	160	75	65											2		14	M 10	65	3		355	1900
50						M 10									3		3		50			515	
55	110	180	90	75	13										3		16	M 12	70	4		730	1800
60																						975	
70	130	200	100	85	13										16		20	M 12	60	80	6	1700	1700
80	145	224	115	95		M 10									20		4				8	2650	1600
90	164	250	135	105	17										18		4	M 16	80	100	8	4120	1500
100	180	280	150	120																	8	5800	1400
110	200	300	165	130																	8	8250	1320
120	225	335	185	145	17	M 10									18		5	M 16	85	105	10	12500	1250
(125)																							
140	250	375	210	160	21																8	19000	1180
160	290	425	240	180	25	M 12									6		28	M 20	105	125	10	30700	1120
180	325	450	265	—	25													M 24	110				
200	360	500	290	—	25														120	140	12	45000	1060
220	400	560	310	—	32	M 12													160		16	61500	1000
250	450	630	390	—	32														140	160	14	82500	950
																			160		16	118000	900

Eingeklammerte Größe 125 nicht für Neukonstruktionen

Fußnoten siehe Seite 2

Fortsetzung Seite 2

Fachnormenausschuß Maschinenbau im Deutschen Normenausschuß (DNA)

Alleinverkauf der Normblätter durch Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin 30 und Köln 12.71

DIN 116 Dez. 1971

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg - HIBS - Fachbibliothek TWI

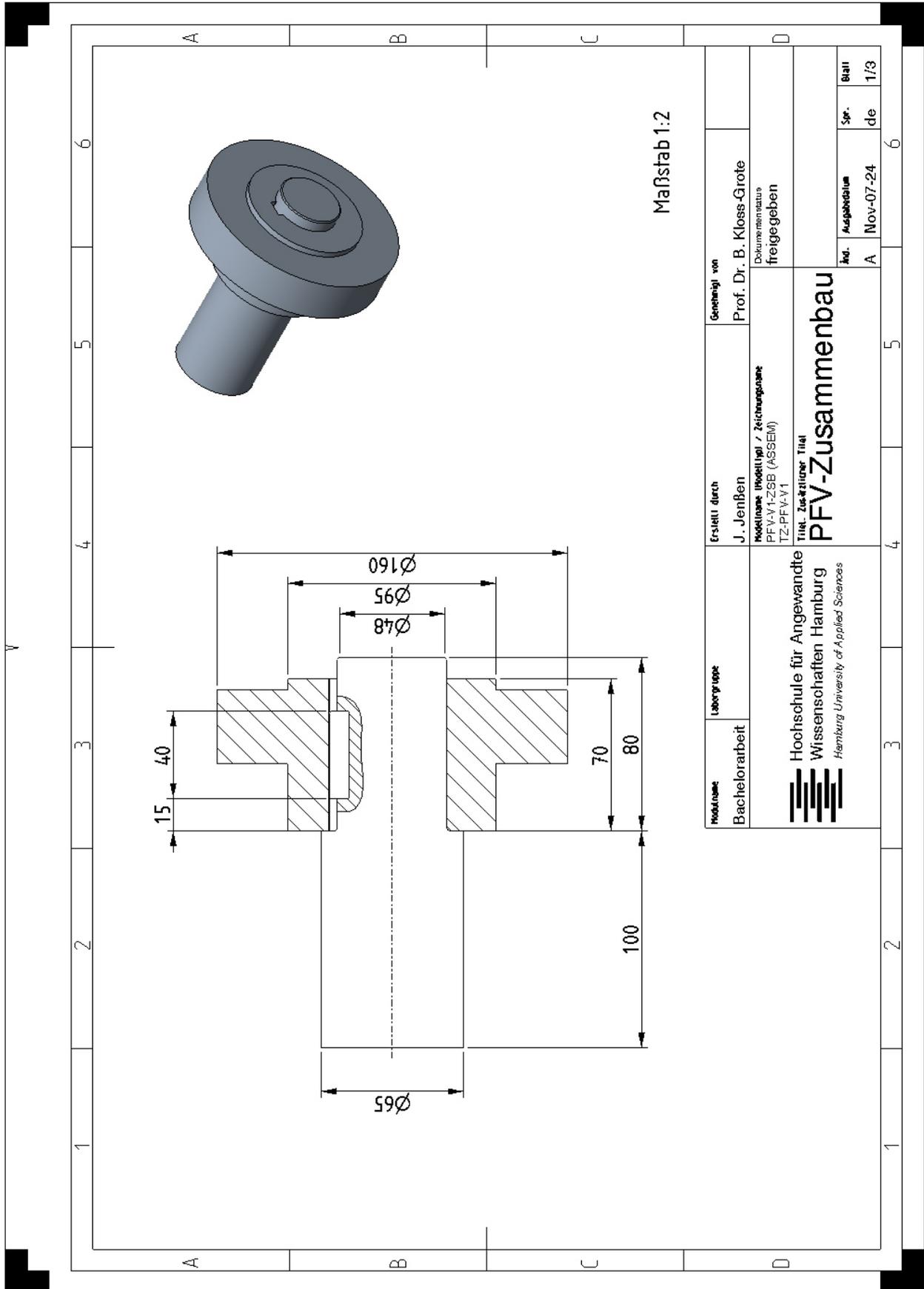
Frühere Ausgaben: 4.20, 2.22, 5.54, 8.66

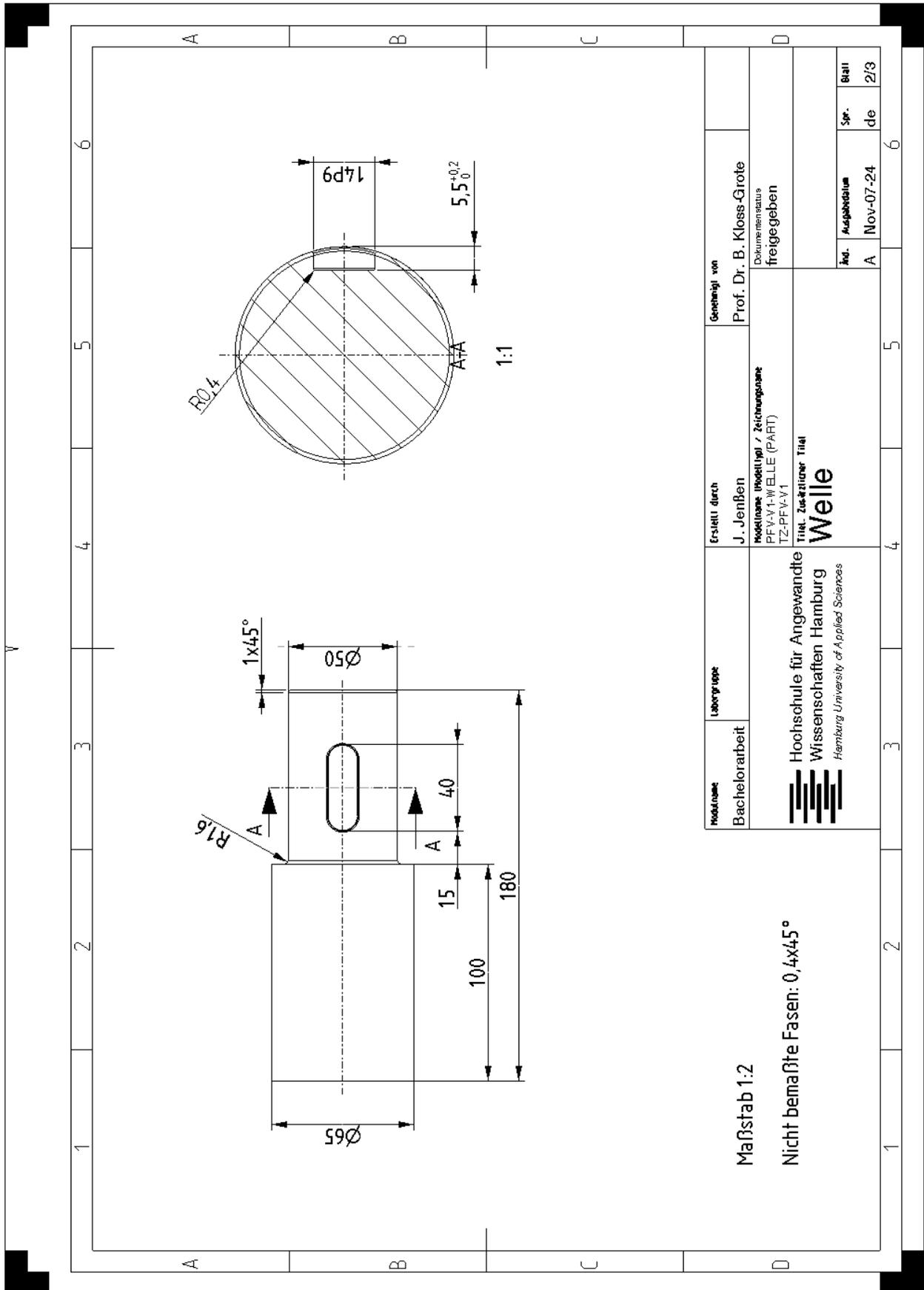
Printed copies are uncontrolled

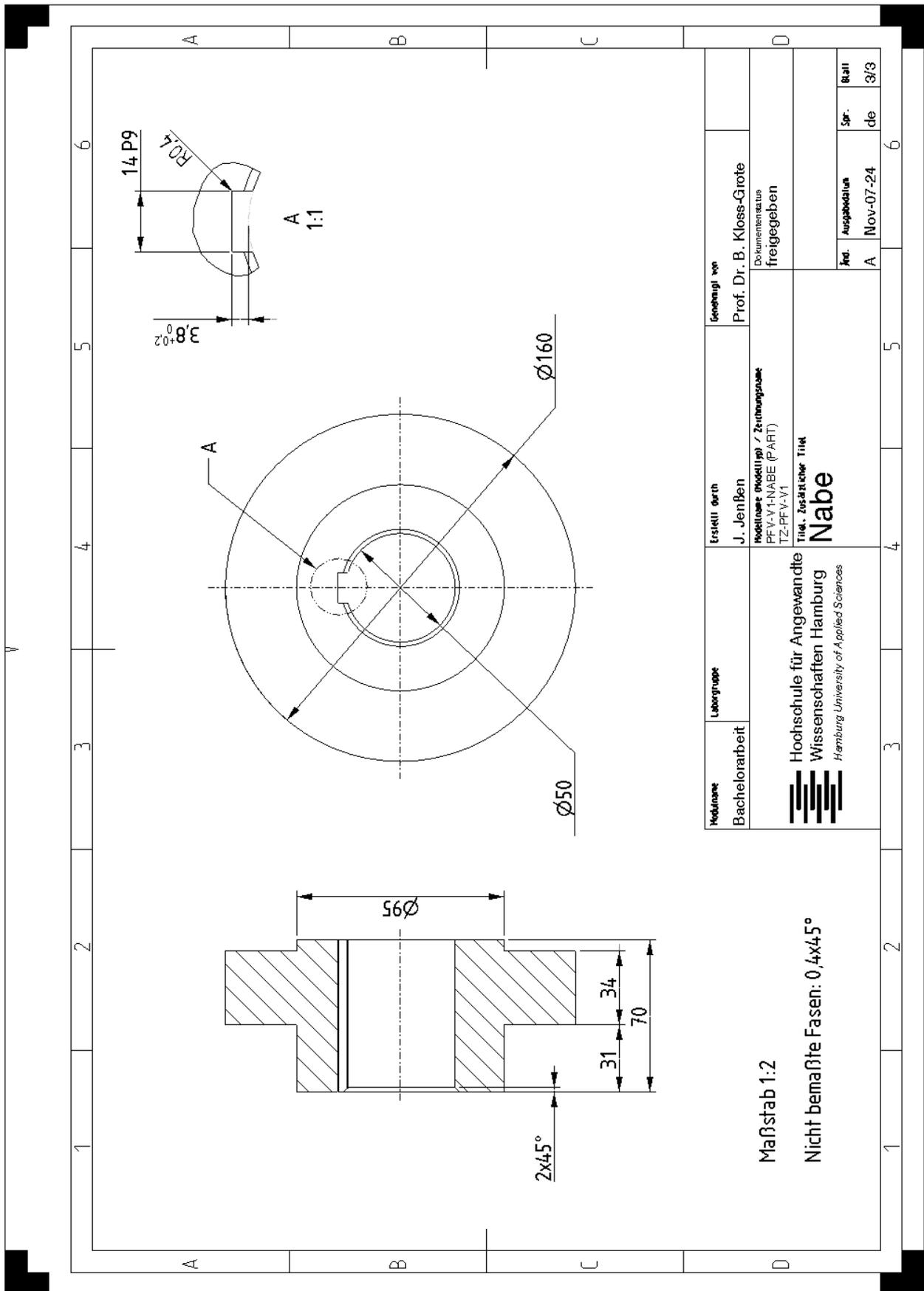
Änderung Dezember 1971: Oberflächenzeichen ergänzt.  $d_1 = 120$  hinzugefügt.

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses, Berlin 30, gestattet.

Anhang B







Maßstab 1:2

Nicht bemaßte Fasen: 0,4x45°

<b>Modulname</b>	<b>Laborgruppe</b>	<b>Erstellt durch</b>	<b>Genehmigt von</b>
Bachelorarbeit	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg <i>Hamburg University of Applied Sciences</i>	J. Jenßen Modulname (Modul) / Zeichnungsart PEV.V1-NABE (PART) TZ-PPV-V1 Titel, zusätzlicher Titel <b>Nabe</b>	Prof. Dr. B. Kloss-Grote Dokumententyp freigegeben
		<b>Art.</b>	<b>Ausgabedatum</b>
		A	Nov-07-24
		<b>Seit.</b>	<b>Blatt</b>
		de	3/3

## Anhang C

# Finite-Elemente-Analysen zum nichtlinearen Tragverhalten von Passfederverbindungen unter Berücksichtigung von konstruktiven Aspekten

FE-PFV-Dokumentation

Jonas Jenßen

## Vorwort und Hinweise

Diese Dokumentation ist im Rahmen der Bachelorthesis „Finite-Elemente-Analysen zum nichtlinearen Tragverhalten von Passfederverbindungen unter Berücksichtigung von konstruktiven Aspekten“ entstanden. In diesem Dokument wird der Entwicklungsverlauf des FE-Modells einer Passfederverbindung mit der CAE-Software Abaqus dokumentiert. Hierbei werden die wichtigsten Erkenntnisse und Ergebnisse des FE-Entwicklungsverlaufes präsentiert, untersucht und grafisch aufbereitet. Diese Dokumentation bildet gleichzeitig eine Anleitung zur Entwicklung eines numerisch funktionierenden FE-Modells einer Passfederverbindung. Hierzu werden diverse Einstellungen sowie Vorgehensweisen präsentiert. Dieses Dokument bildet keine Anleitung für den allgemeinen Umgang mit der CAE-Software Abaqus.

# 1 Einleitung

Hinweise zur Dokumentation und Allgemeines

## Verwendete Nomenklatur und Abkürzungen

Innerhalb dieser Dokumentation werden die gezeigten Abkürzungen sowie gezeigte Nomenklatur verwendet:

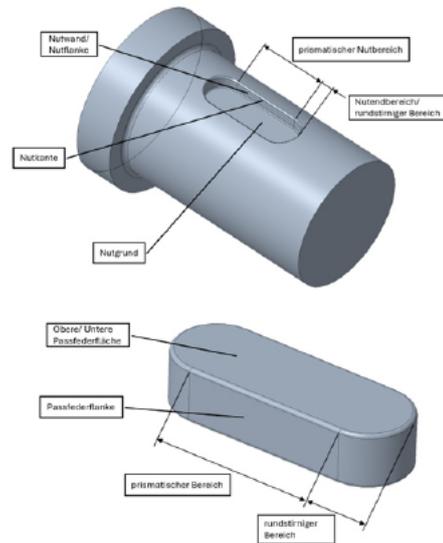
Abkürzungen	Bedeutungen
FE	Finite-Elemente
PFV	Passfederverbindung
PF	Passfeder
MB/ MC	Methode B bzw. Methode C (n. DIN 6892)
MF/ OF	Mit bzw. ohne Fase
SSF	Stiffness Scale Factor
KVG	Konvergenz
P	Pressung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$d$	mm	Fügedurchmesser der Welle
$D_w$	Mm	Abgesetzter Wellendurchmesser
$E$	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul
$G$	N/mm <sup>2</sup>	Schubmodul
$h_{tr}$	mm	Tragende Nuthöhe
$l_{tr}$	mm	Tragende Länge
$M_t$	mm	Torsionsmoment
$p$	N/mm <sup>2</sup>	Numerisch bestimmte Flächenpressung
$p_m$	N/mm <sup>2</sup>	Mittlere Flächenpressung nach Methode C (n. DIN 6892)
$p_{max}$	N/mm <sup>2</sup>	Maximale Flächenpressung nach Methode B (n. DIN 6892)
$u_t$	mm	Tangentiale Verschiebung
$\theta$	/	Wellenverdrillung
$\mu$	/	Gleitreibungszahl
$\nu$	/	Querkontraktionszahl
$\rho$	kg/mm <sup>3</sup>	Materialdichte
$\tau_t$	N/mm <sup>2</sup>	Schubspannung infolge von Torsion

## Bezeichnungen an der PFV

Innerhalb dieser Dokumentation werden die rechts dargestellten Bezeichnungen an einer Passfeder sowie an einer Passfedernut der Form N1 nach DIN 6885 verwendet. Bis auf den Nutend- bzw. rundstirnigen der Wellennut Bereich können diese Bezeichnungen analog auf die Nabennut übertragen werden.

Diese Begriffe wurden aus den Arbeiten von Forbrig [FrbgF-06] und der DIN 6885 übernommen



## Bezeichnungen der Berechnungen

Um eine eindeutige Identifikation und Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wird eine Struktur für die FE-Berechnungen festgelegt. Die gezeigte Tabelle gibt einen Überblick über die hier durchgeführten Berechnungen, angefangen mit der Berechnungsnummer. Die Berechnungsnummer zeigt in welcher Reihenfolge die Berechnungen durchgeführt wurden und steht am Anfang jedes Berechnungskürzels. In der Spalte ‚Änderung‘ kann man die wesentliche Modelleinstellung sehen, die für die jeweilige Berechnung vorgenommen wird. Die geänderten Modelleinstellungen werden in den entsprechenden Abschnitten erklärt. In der letzten Spalte wird der Berechnungskürzel aufgetragen. Dieser setzt sich aus der Berechnungsnummer sowie den vorgenommenen Modelleinstellungen zusammen.

Nummer	Änderung	Berechnungskürzel
2	Ausgangsmodell	[2-AM]
2.1	Entfernung der Fasen aus den PF-Flankenkontakten	[2.1-OF- $\mu=0,2$ ]
2.2	Erhöhung der Reibzahl auf $\mu=0,3$	[2.2-OF- $\mu=0,3$ ]
2.3	Änderung der Normalkontakteinstellung (SSF=0,2)	[2.3-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,2]
2.4	Verringerung des SSF auf 0,02	[2.4-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,02]
2.5	Verringerung des SSF auf 0,003	[2.5-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]
2.6	Fasen kommen wieder in die PF-Flankenkontakte	[2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]
2.7	Nutzung einer nichtlinearen Geometrie	[2.7-OF- $\mu=0,2$ -Nlgeom]



## Abaqus Modellbaum

Diese Folie zeigt den Modellbaum eines Abaqus-Modells. Hierbei sind die in diesem Dokument verwendeten Modelleinstellungen mit Hinweistexten versehen, welche Informationen über die allgemeine Funktion der jeweiligen Einstellung geben. Bei jeder nachfolgend vorgestellten Modelleinstellung kann auf diese Folie zurückgegriffen werden.

- PFV-V1-1mmQuadTET
- Parts (3)
- Materials (1)
- Calibrations
- Sections (1)
- Profiles
- Assembly
- Steps (3)
- Field Output Requests (1)
- History Output Requests (1)
- Time Points
- ALE Adaptive Mesh Constraints
- Interactions (7)
- Interaction Properties (2)
- Contact Controls
- Contact Initializations
- Contact Stabilizations
- Constraints (1)
- Connector Sections
- Fields
- Amplitudes
- Loads (1)
- BCs (3)
- Predefined Fields
- Remeshing Rules
- Optimization Tasks
- Sketches

- In „**Parts**“ erfolgt die Erstellung von Einzelteilen, ähnlich wie in einer CAD-Software
- In „**Materials**“ werden Werkstoffe durch die Eingabe von bekannten Werkstoffwerten wie das E-Modul definiert
- In „**Sections**“ wird der Werkstoff aus „**Materials**“ implementiert. Die Vergabe eines Materials auf ein „**Part**“ erfolgt über die hier definierten „**Sections**“.
- In „**Steps**“ können Berechnungsschritte erstellt werden.
- In „**Interactions**“ können Kontaktpaarungen gebildet werden
- In „**Interaction Properties**“ werden Kontaktarten definiert, die wiederum in „**Interactions**“ auf Kontaktpaarungen angewendet werden
- In „**Constraints**“ werden Beziehungen zwischen mehreren Körpern implementiert, um dessen Relativbewegungen zu steuern – Relative Einschränkung
- In „**Loads**“ erfolgt die Implementierung von Lasten auf das FE-Modell
- In „**BCs**“ werden Stützungen und Lagerungen in das FE-Modell implementiert – Direkte Einschränkung

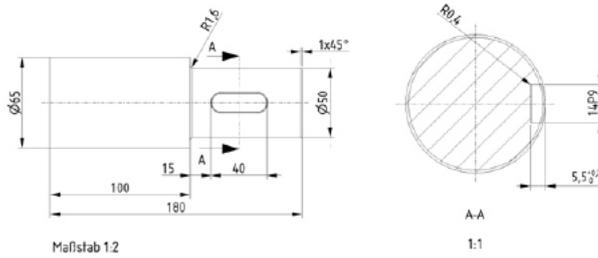
Jonas Jenßen
FE-PFV-Dokumentation
7



# 2-Ausgangsmodell

[2-AM]-Pre-Processing: **Modellgeometrie und Materialdefinition**

## [2-AM]-Pre-Proc: Wellengeometrie



Maßstab 1:2

Nicht bemessene Fasen: 0,4x45°

Bei der Erstellung der Wellengeometrie wurde sich nach der DIN 6885 für die PF-Nut sowie der DIN 748 für zylindrische Wellenenden gerichtet.

Weiterhin wurde folgende Gestaltungshinweise beachtet:

1. Durchmessersprung:  $\frac{D_{WV}}{d} = \frac{65}{50} = 1,3 \leq 1,4$
2. Abstand zwischen PF-Nut und Wellenabsatz: min b/2
3. Maximal empfohlene Längen der PF:  $\frac{l_{tr}}{d} = \frac{(40-14)}{50} = 0,52 \leq 1,3$

Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

DIN 6885-1:2023-01

Tabelle 1 – Maße und Geometrie der Profile, Teil 1

Profilform	Nennmaß	Nennmaß										Maße in Millimetern					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
DIN 6885-1	D	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	13	14
		80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	16
DIN 748	d	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	13	14
		80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	16

DIN 6885 Auszug (DIN 6885)

TB 11-1 Zylindrische Wellenenden nach DIN 748-1 (Auszug)



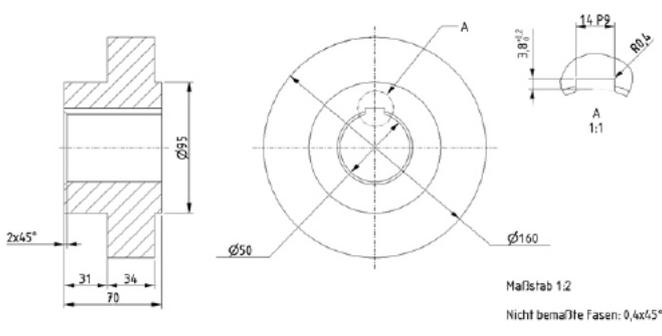
Maße in mm

Diameter d	Length l		Tolerance class T <sub>1</sub>	Radius R <sup>1)</sup>	Diameter d	Length l		Tolerance class T <sub>2</sub>	Radius R <sup>2)</sup>												
	lang	kurz				lang	kurz														
6	7	8	9	10	11	12	14	16	19	20	22	24	25	28	0,6	1	1	1	1		
30	32	35	38	40	42	45	48	50	55	60	65	70	75	80	80	110	140	170	k5	m6	
105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	110	140	170	200	k5	m6
180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250	140	170	200	230	k5	m6	

<sup>1)</sup> Andere Toleranzen sind in der Zeichnung anzugeben.  
<sup>2)</sup> Die Rundungswerte sind max. Werte an Stelle der Rundungen können auch Feinreihe nach DIN 509 (siehe TB11-4) vorgesehen werden.  
 Bezeichnung eines Wellenendes mit d = 40 mm Durchmesser und l = 110 mm Länge:  
 Wellenende DIN 748-1 (40x6 x 110)

DIN 748 Auszug (DIN 748)

## [2-AM]-Pre-Proc: Nabengeometrie



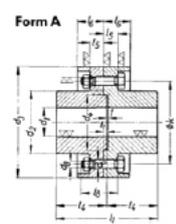
Maßstab 1:2

Nicht bemessene Fasen: 0,4x45°

Die Nabe soll eine Scheibenkupplung nach DIN 116 nachbilden. Hierbei werden lediglich die groben Abmessungen verwendet. Die PF-Nut richtet sich auch hier nach der DIN 6885. Weiterhin wird eine selbstgewählte Montagefase von 2x45° für einen guten Sitz an der Wellenschulter vorgesehen.

Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation



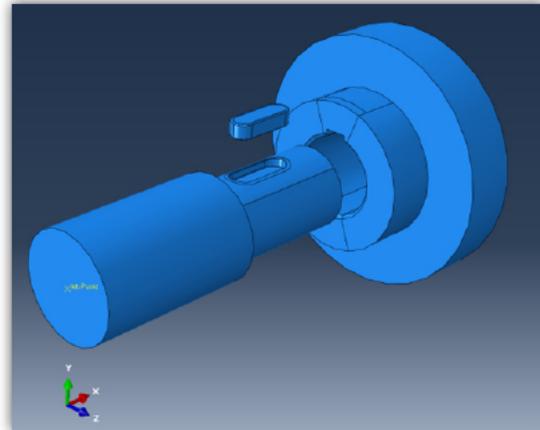
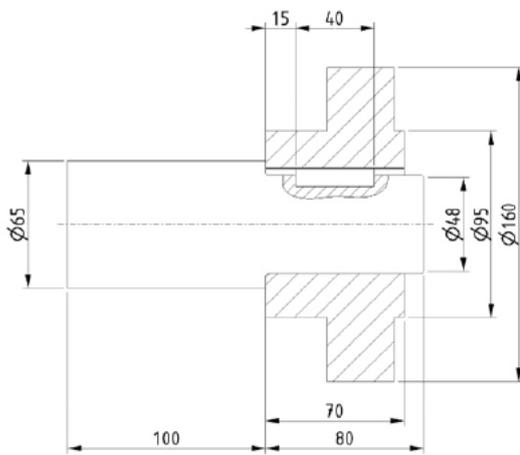
Anschlußwerte		DIN 116	
Scheibenkupplungen			
Maße, Drehmomente, Drehzahlen			
$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$
$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$
$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$
$r_5$	$r_6$	$r_7$	$r_8$
$r_9$	$r_{10}$	$r_{11}$	$r_{12}$
$r_{13}$	$r_{14}$	$r_{15}$	$r_{16}$
$r_{17}$	$r_{18}$	$r_{19}$	$r_{20}$
$r_{21}$	$r_{22}$	$r_{23}$	$r_{24}$
$r_{25}$	$r_{26}$	$r_{27}$	$r_{28}$
$r_{29}$	$r_{30}$	$r_{31}$	$r_{32}$
$r_{33}$	$r_{34}$	$r_{35}$	$r_{36}$
$r_{37}$	$r_{38}$	$r_{39}$	$r_{40}$
$r_{41}$	$r_{42}$	$r_{43}$	$r_{44}$
$r_{45}$	$r_{46}$	$r_{47}$	$r_{48}$
$r_{49}$	$r_{50}$	$r_{51}$	$r_{52}$
$r_{53}$	$r_{54}$	$r_{55}$	$r_{56}$
$r_{57}$	$r_{58}$	$r_{59}$	$r_{60}$
$r_{61}$	$r_{62}$	$r_{63}$	$r_{64}$
$r_{65}$	$r_{66}$	$r_{67}$	$r_{68}$
$r_{69}$	$r_{70}$	$r_{71}$	$r_{72}$
$r_{73}$	$r_{74}$	$r_{75}$	$r_{76}$
$r_{77}$	$r_{78}$	$r_{79}$	$r_{80}$
$r_{81}$	$r_{82}$	$r_{83}$	$r_{84}$
$r_{85}$	$r_{86}$	$r_{87}$	$r_{88}$
$r_{89}$	$r_{90}$	$r_{91}$	$r_{92}$
$r_{93}$	$r_{94}$	$r_{95}$	$r_{96}$
$r_{97}$	$r_{98}$	$r_{99}$	$r_{100}$

DIN 116 Auszug (DIN 116)

Profilform	Nennmaß	Nennmaß										Maße in Millimetern					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
DIN 6885-1	D	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	13	14
		80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	16
DIN 748	d	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	13	14
		80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	16

DIN 6885 Auszug (DIN 6885)

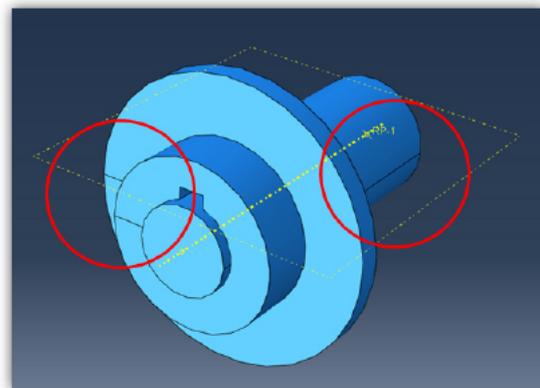
## [2-AM]-Pre-Proc: Modellgeometrie: PFV-Übersicht



## [2-AM]-Pre-Proc: Problemen mit rotierten Geometrien in Abaqus

Gegen die Intuition, werden die Welle und Nabe mit extrudierten Körpern erzeugt, anstatt eine rotierte Skizze zu nutzen, wie es bei rotationssymmetrischen Körpern üblich wäre.

In Abaqus entsteht bei Skizzenrotation eine Rotationskante im Modell (s. Bild). Diese kann bei der Netzerzeugung zu Problemen führen. Das Problem tritt bei einer lokalen Netzverfeinerung auf einer beliebigen Modellkante auf. Diese implementierte Netzverfeinerung kann auf die Rotationskanten übertragen werden, was eine vernünftige Vernetzung unmöglich macht.

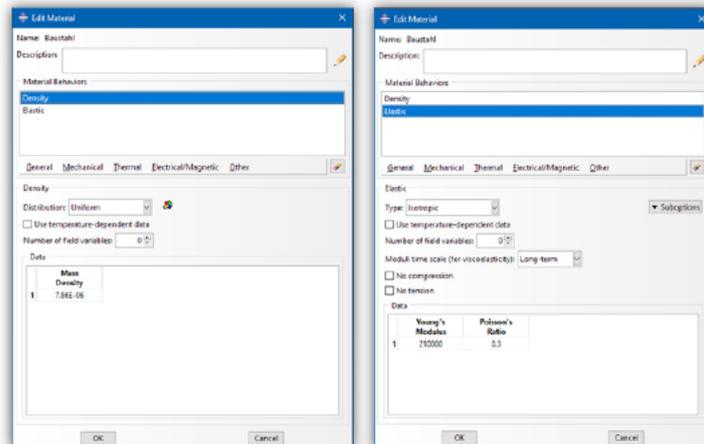


## [2-AM]-Pre-Proc: Materialdefinition

Für die Berechnung wird ein rein elastisches Material ‚Baustahl‘, mit folgenden Werkstoffwerten erstellt:

- (Dichte:  $\rho=0,00000786 \text{ kg/mm}^3$ )
- E-Modul:  $E=210000 \text{ MPa}$
- Poisson-Zahl:  $\nu=0,3$

Die Werkstoffdichte müsste für die durchgeführten Berechnungen nicht verwendet werden. Der Vollständigkeit halber wird sie dennoch angegeben.



Die verwendete FE-Software Abaqus besitzt kein Einheitensystem. Somit muss der Nutzer konsistent mit denselben Einheiten arbeiten. In dem vorliegenden Modellaufbau wurde mit den Einheiten Millimeter [mm], Kilogramm [kg], Newton [N] gearbeitet.

## Anhang C1

# 2-Ausgangsmodell

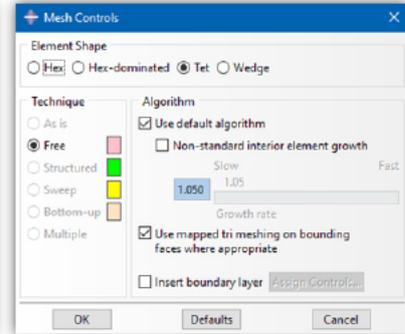
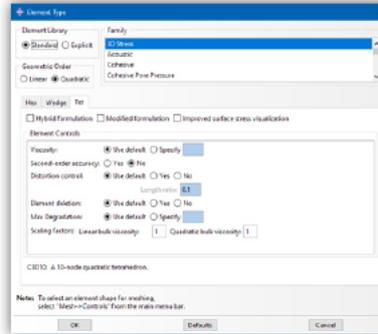
[2-AM]-Pre-Processing: **Vernetzung, Stützung und Belastung**

## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung - Elemente



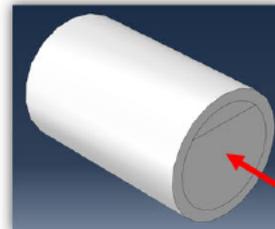
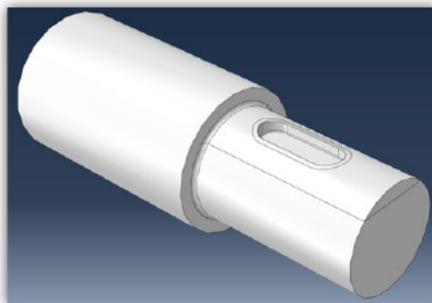
Für die Vernetzung („Mesh“) werden global quadratische Tetraeder genutzt.

Zu Anfang war eine globale Vernetzung mit quadratischen Hexaedern angedacht. Die Vernetzung war mit vertretbarem Aufwand leider nicht durchzuführen.



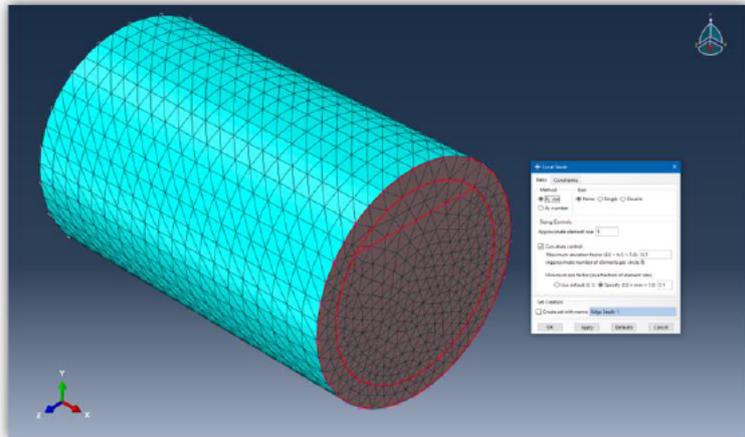
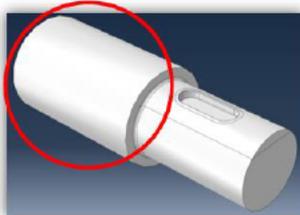
## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung-Welle „Partitions“

Für die Erstellung einer berechnungseffizienten Vernetzung sollten Bereiche, die ausgewertet werden müssen möglichst fein und uninteressante Bereiche gröber vernetzt werden. Um lokale Netzverfeinerungen („Local Seeds“) auf Bauteilkanten und Flächen aufzubringen, kann eine Partitionierung („Partition“) des Modells hilfreich sein. Mit Partitionen können zusätzliche Modellkanten erzeugt werden. Partitionen erzeugen keine physischen Schnitte oder Teilfugen im Modell. Die Partitionierung des Modells ist außerdem erforderlich, weil die von der HAW bereitgestellte Abaqus Lehr-Lizenz die globale Vernetzung auf eine maximale Knotenanzahl von 250.000 Knoten eingrenzt.



## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung-Welle „Local Seeds“

An den Kanten der Wellenfläche zum Absatz wird eine lokale Netzverfeinerung („Local Seeds“) von 5mm eingestellt.



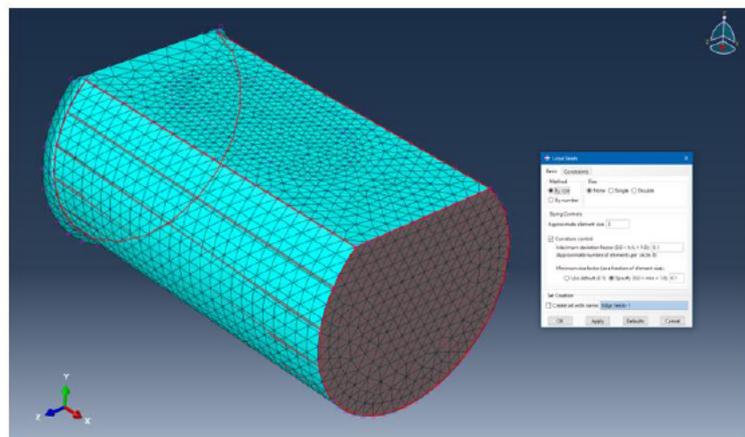
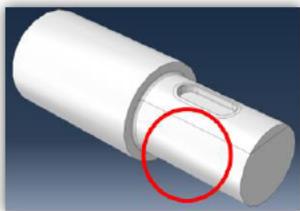
Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

17

## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung-Welle „Local Seeds“

Für die Kontaktzone zwischen den Fügedurchmessern wird eine lokale Elementgröße von 3 mm vergeben.



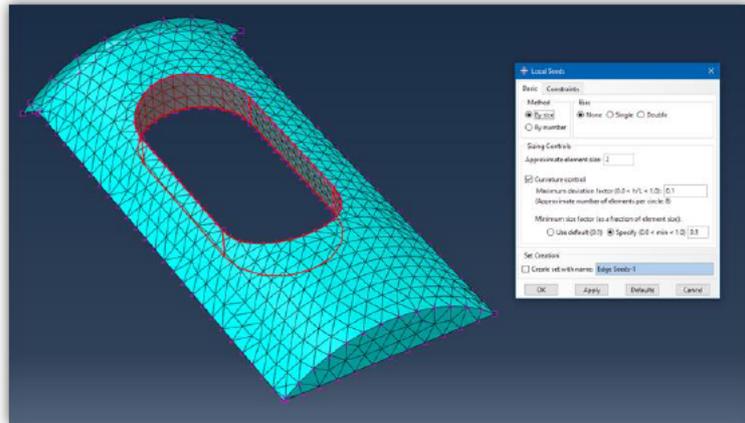
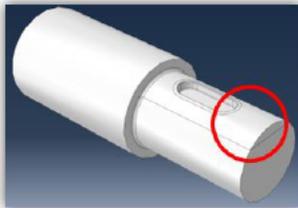
Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

18

## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung-Welle „Local Seeds“

Die Flächen der partitionierten Passfedernut erhalten 2 mm Elemente.



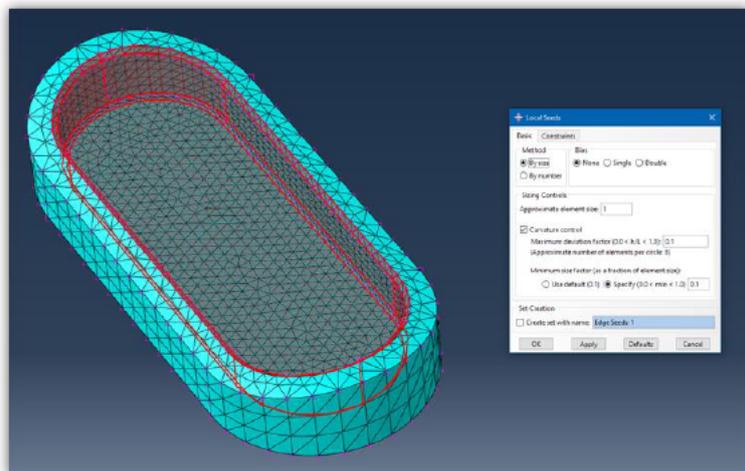
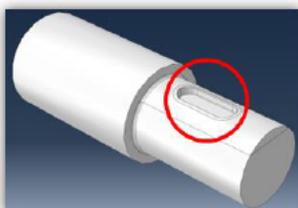
Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

19

## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung-Welle „Local Seeds“

Die gesamten Kontaktzonen zwischen der Passfedernut und der Passfeder erhalten 1 mm Elemente.



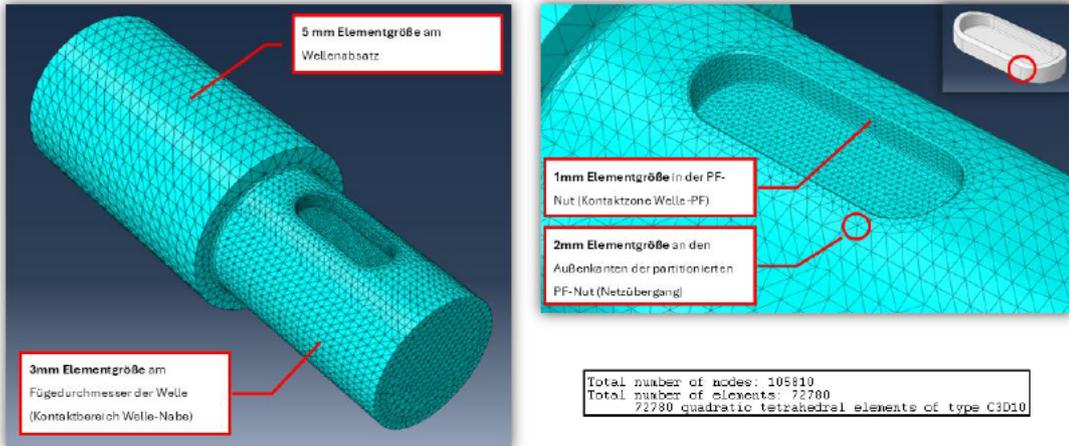
Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

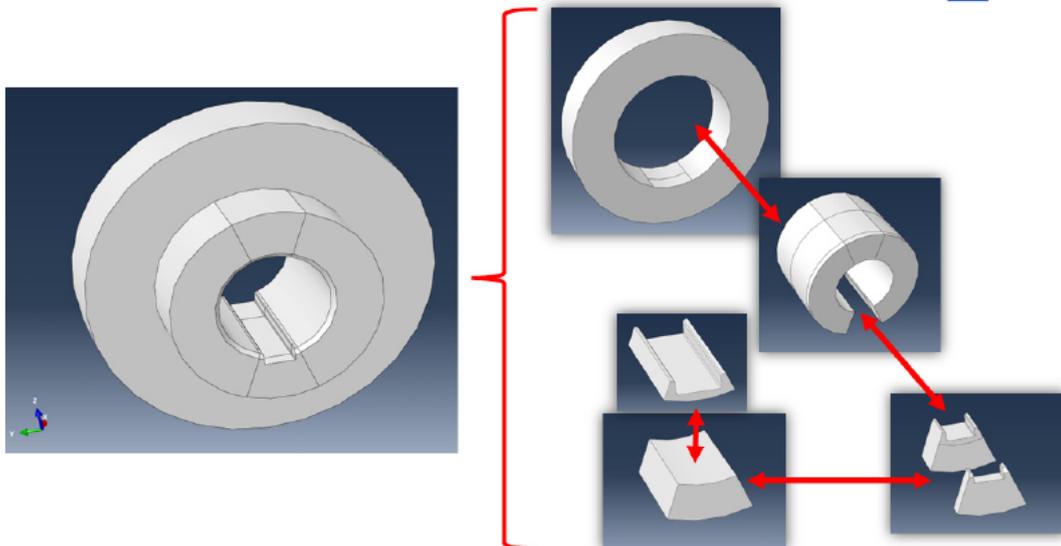
20

## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung-Welle Übersicht

Die untenstehende Darstellung bietet eine Übersicht über die verwendeten Elementgrößen bei Wellenvernetzung.

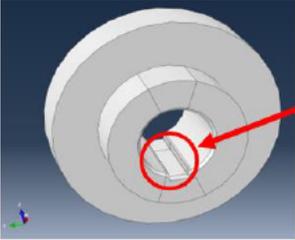


## [2-AM]-Pre-Proc: Nabe-Partitionierung



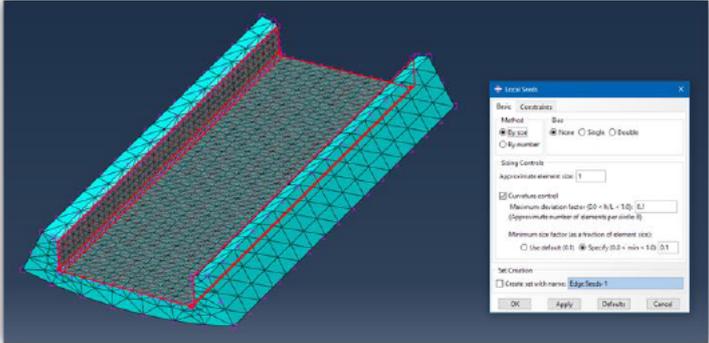
## [2-AM]- Pre-Proc: Vernetzung-Nabe ,Seeds'







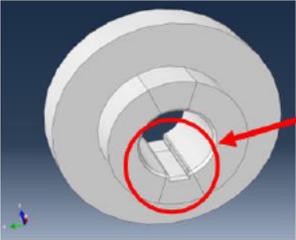
1 mm Elemente für den Kontaktbereich zwischen Passfeder und der Nabennut.

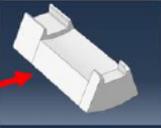


Jonas Jenßen
FE-PFV-Dokumentation
23

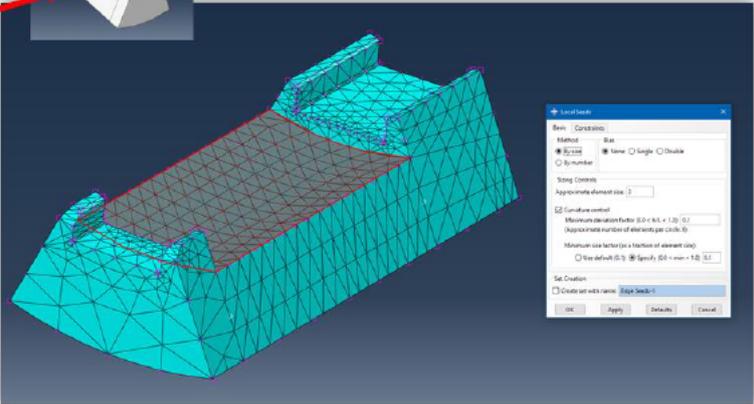
## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung-Nabe ,Seeds'





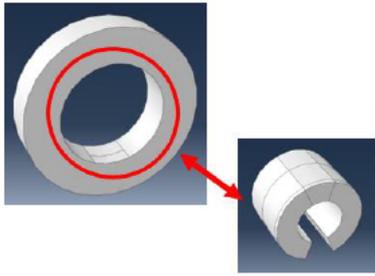


Der Teil der Nabennut, der tatsächlich mit der Passfeder in Kontakt tritt wird separiert. Die Zwischenfläche erhält 3 mm Elemente.

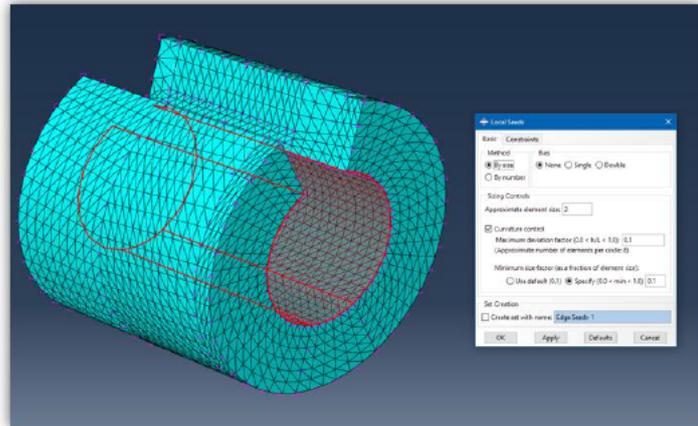


Jonas Jenßen
FE-PFV-Dokumentation
24

[2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung-Nabe ,Seeds‘

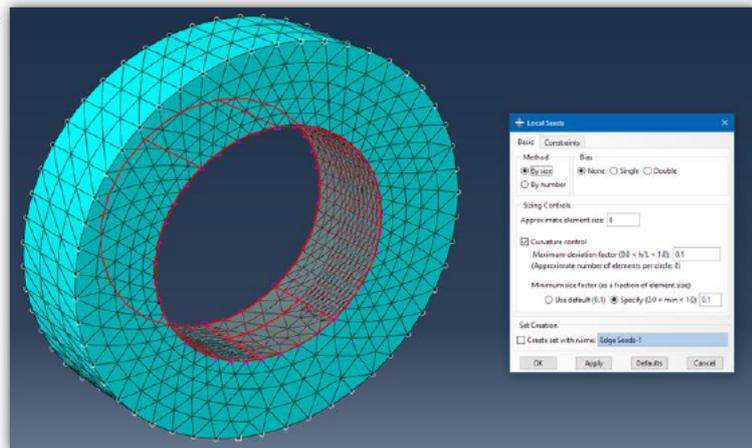
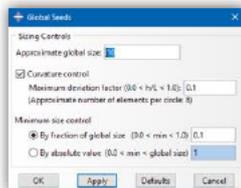


Wie bei der Welle werden in den Kontaktzonen des Fügedurchmessers 3 mm Elemente eingestellt.



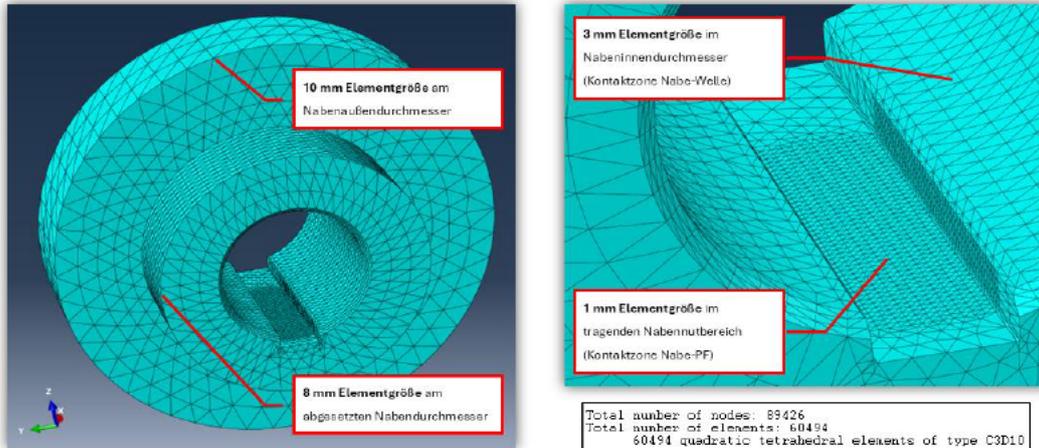
[2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung-Nabe ,Seeds‘

Der äußere Ring der Nabe wird vom abgesetzten Durchmesser separiert. Der Innendurchmesser des Rings erhält 8 mm Elemente. Die Außenkanten haben eine Elementgröße von 10 mm.



## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung-Nabe Übersicht

Die untenstehende Darstellung bietet eine Übersicht über die verwendeten Elementgrößen bei Nabenvernetzung.

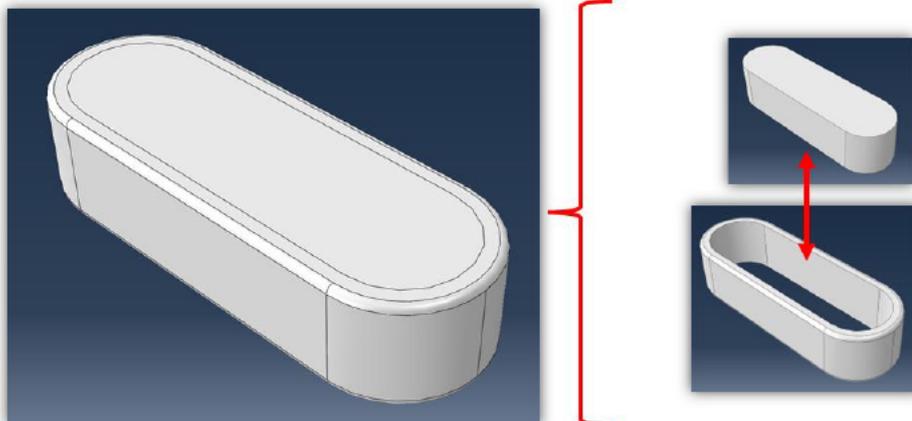


Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

27

## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung-PF-Partitionierung



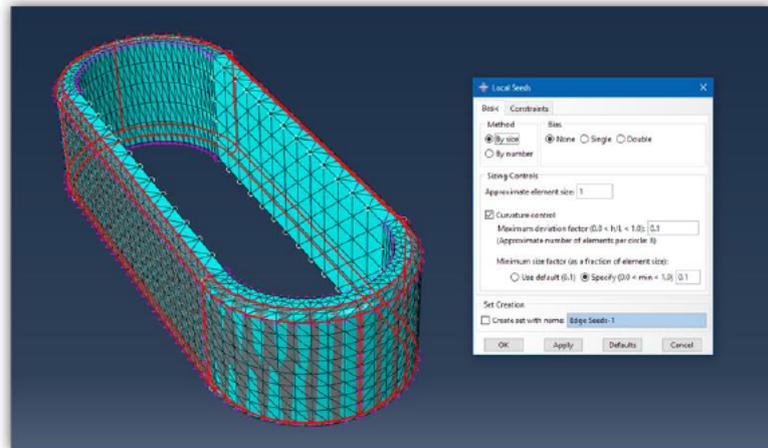
Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

28

## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung-Passfeder ‚Seeds‘

Da lediglich die Kontaktzonen der Passfeder 1 mm Elemente erhalten sollen, wird der äußere Mantelteil der Passfeder vom ‚Kern‘ getrennt.



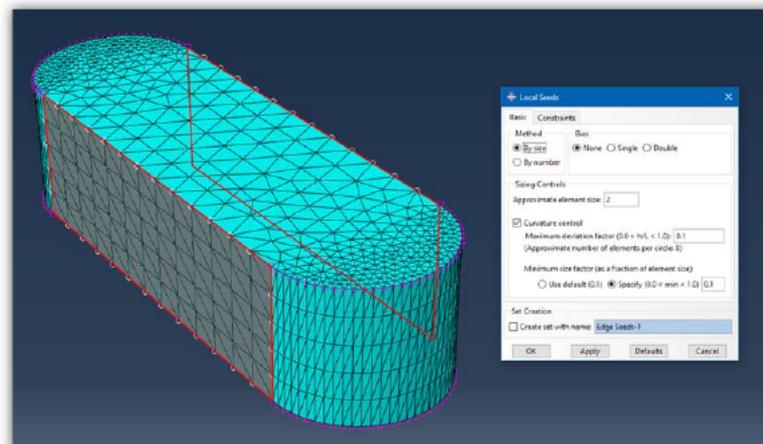
Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

29

## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung-Passfeder ‚Seeds‘

Die geraden Flächen des Passfeder Kerns erhalten 2 mm Elemente. Bei den rundstirnigen Flächen werden 1mm eingestellt.



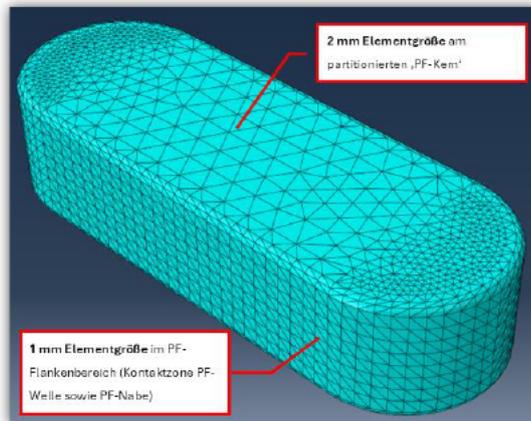
Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

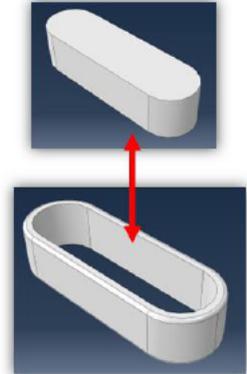
30

## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung – Passfeder Übersicht

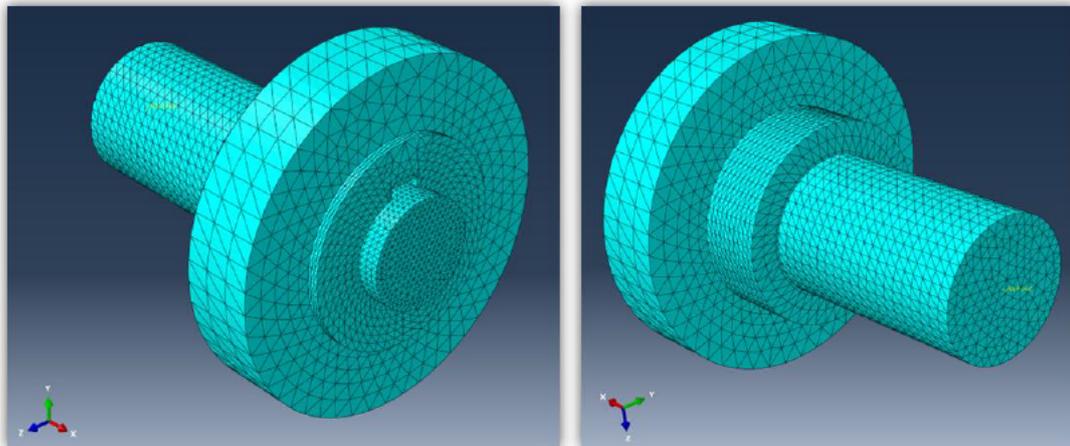
Die nebenstehende Darstellung bietet eine Übersicht über die verwendeten Elementgrößen bei Passfedervernetzung.



Total number of nodes: 30646  
 Total number of elements: 19526  
 19526 quadratic tetrahedral elements of type C3D10



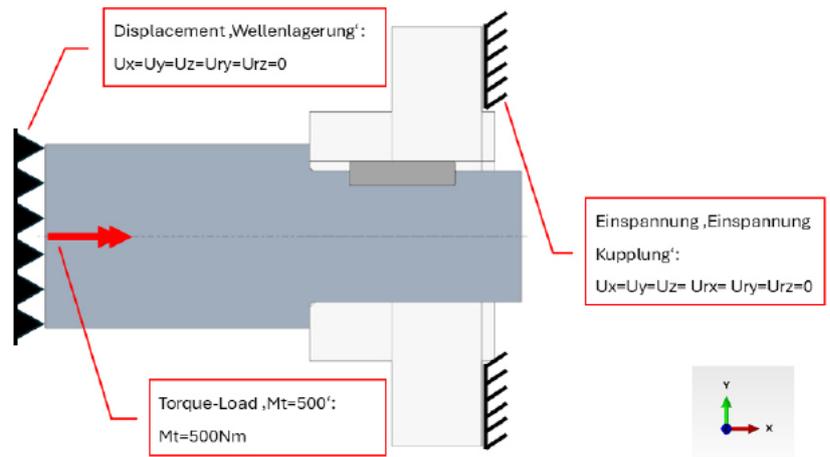
## [2-AM]-Pre-Proc: Vernetzung Übersicht



Total number of nodes: 225882  
 Total number of elements: 152800  
 152800 quadratic tetrahedral elements of type C3D10

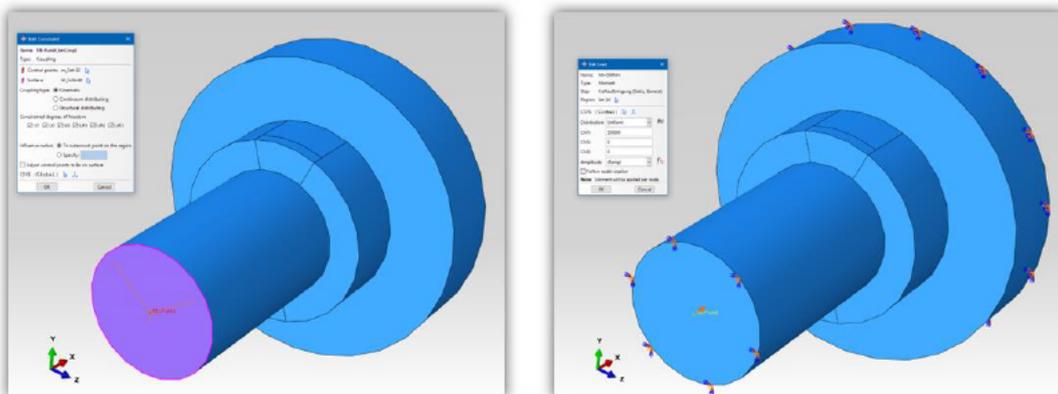
## [2-AM]-Pre-Proc: Mechanisches Modell

Mit diesen Randbedingungen („BCs“) soll ein Antriebsstrang simuliert werden. Da hier nur ein Ausschnitt betrachtet wird, wird die linke Wellen-schnittfläche gelagert. Weiterhin wird an der Wellenschnittfläche ein Torsionsmoment von 500Nm eingeleitet. Die abgesetzte Kupplungsfläche wird dabei als konservative Annahme eingespannt.



## [2-AM]-Pre-Proc: Lasteinleitung

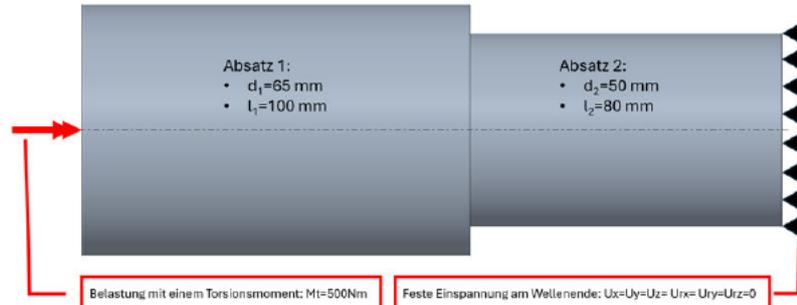
Die Einleitung des Drehmomentes erfolgt über einen Referenzpunkt auf der Wellenschnittfläche. Der Referenzpunkt wird mit einem „Kinematic-Coupling-Constraint“ auf der Wellenschnittfläche fixiert, wodurch die Wellenschnittfläche dieselben Bewegungen, wie der Referenzpunkt ausführt.



## [2-AM]-Pre-Proc: Validierung der Lasteinleitung

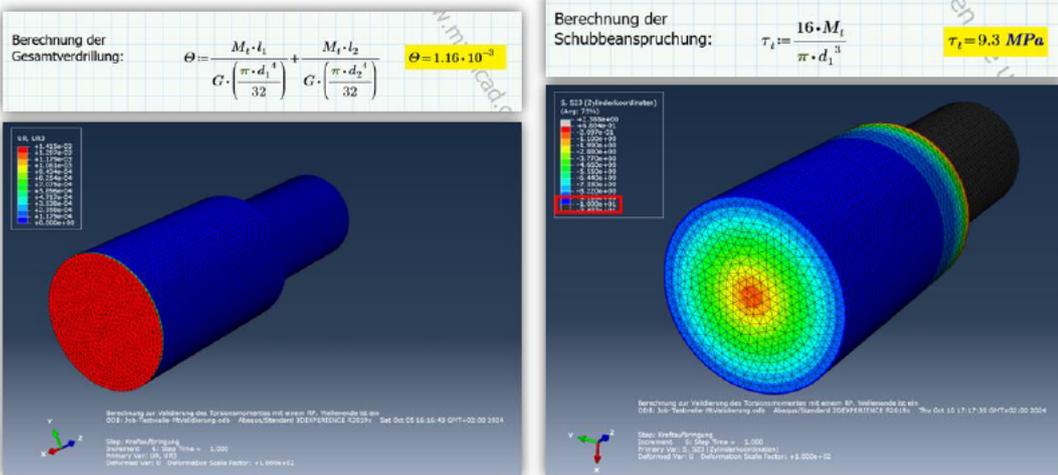
Bevor die eigentlichen PFV-Berechnungen durchgeführt werden können, muss die zuvor vorgestellte Lasteinleitungsmethode über den, am Wellenschnitt befestigten Referenzpunkt geprüft werden. Hierfür wird ein Modell der Welle ohne die PF-Nut, erzeugt. Dieses wird am Wellenende eingespannt während es bei derselben Lasteinleitungsmethode mit einem Torsionsmoment von 500 Nm an der Wellenschnittfläche belastet wird.

Die Schubbeanspruchung sowie die Wellenverdrillung wird mit den analytischen Ergebnissen verglichen.



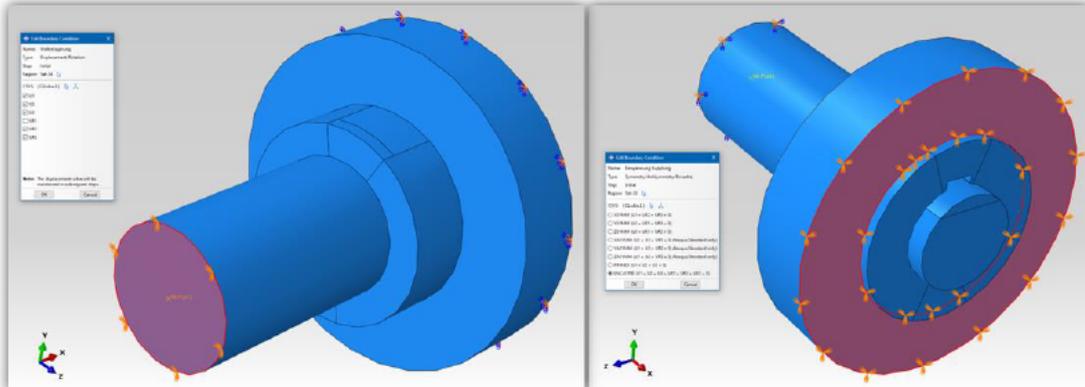
## [2-AM]-Pre-Proc: Validierung der Lasteinleitung

Die Ergebnisse der Verdrillung des Wellenschnittfläche sowie die Schubbeanspruchung am großen Durchmesser stimmen ca. mit den analytisch bestimmten Ergebnissen überein.



## [2-AM]-Pre-Proc: Lagerung/ Stützung

Als konservative Berechnung wird auf die abgesetzte Kupplungsfläche eine feste Einspannung „Encastre“ aufgebracht. Gleichzeitig erhält die Wellenschnittfläche ein „Displacement“, welches ausschließlich Rotationen um die Wellenachse zulässt.



## [2-AM]-Pre-Proc: RB ,Wellenlagerung“

Die RB ‚Wellenlagerung‘ wäre nicht unbedingt nötig, da die Welle über einen Kontakt zwischen dem Fügedurchmesser der Welle und dem Nabeninnendurchmesser ebenso gelagert werden würde. Dennoch bringt die Einführung dieser Randbedingung numerische Stabilität in die Berechnungen, wodurch die Rechenzeit verkürzt wird.

Step	Increment	Attn	Severe Abaqus Error	Equal Hour	Total Hour	Total Time/Step	Step Time/Step	Time/Step
1	1	1	21	1	22	0.1	0.1	0.1
1	2	1	5	0	5	0.2	0.2	0.1
1	3	1	1	0	1	0.15	0.15	0.05
1	4	1	1	0	1	0.125	0.125	0.03125
1	5	1	0	1	1	0.125	0.125	0.03125
1	6	1	0	1	1	1	1	0.0875
2	1	1	14	2	16	2	1	1

Submitted Mon Sep 9 11:08:10 2024  
 Completed: Analysis Input File Processor  
 Started: Abaqus/Standard  
 Completed: Abaqus/Standard  
 Completed: Mon Sep 9 10:42:11 2024

Rechenzeit ≈ 2 Std.

Berechnung mit aktiver Wellenlagerung

Step	Increment	Attn	Severe Abaqus Error	Equal Hour	Total Hour	Total Time/Step	Step Time/Step	Time/Step
1	1	1	32	1	33	0.1	0.1	0.1
1	2	1	2	1	3	0.175	0.175	0.0715
1	3	1	1	1	2	0.25	0.25	0.0915
1	4	1	1	0	1	0.243	0.243	0.1128
1	5	1	0	1	1	0.53125	0.53125	0.14815
1	6	1	0	1	1	0.794175	0.794175	0.223125
1	7	1	0	1	1	1	1	0.215525
2	1	1	10	2	1	3	1	1
2	1	2	3	1	4	1	1	0.25
2	1	3	19	1	19	1.0625	0.0625	0.0625
2	2	1	3	1	4	1.125	0.125	0.0225
2	3	1	3	1	4	1.21875	0.21875	0.04175
2	4	1	4	1	5	1.29375	0.29375	0.140625
2	5	1	4	0	4	1.5261	0.5261	0.21258
2	6	1	2	3	5	1.89562	0.89562	0.319452
2	7	1	3	1	4	2	1	0.113281

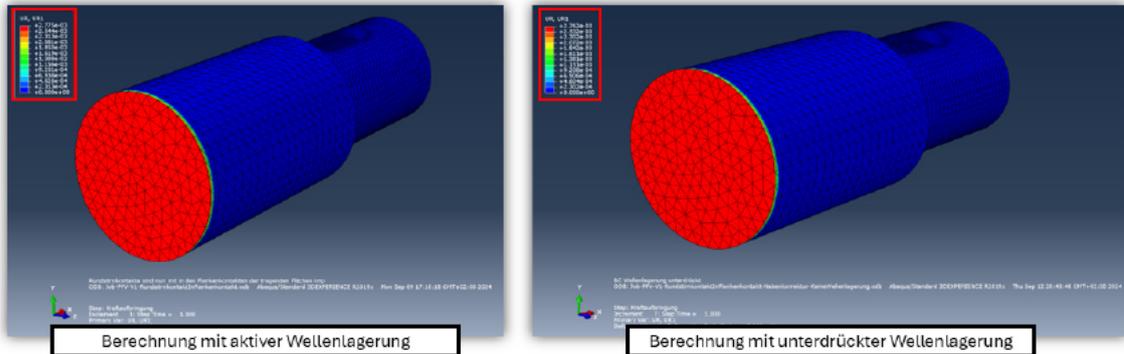
Submitted: Thu Sep 12 20:42:32 2024  
 Completed: Analysis Input File Processor  
 Started: Abaqus/Standard  
 Completed: Abaqus/Standard  
 Completed: Fri Sep 15 08:27:47 2024

Rechenzeit ≈ 3 1/2 Std.

Berechnung mit unterdrückter Wellenlagerung

## [2-AM]-Pre-Proc: RB ‚Wellenlagerung‘

Weiterhin wird die Wellenverdrillung mit aktiver und inaktiver RB ‚Wellenlagerung‘ verglichen. Hierbei liegen die Ergebnisse sehr dicht beieinander. Diese Randbedingung würde die Ergebnisse nicht verfälschen und kann zur numerischen Optimierung genutzt werden.



Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

39

## Anhang C2

# 2-Ausgangsmodell

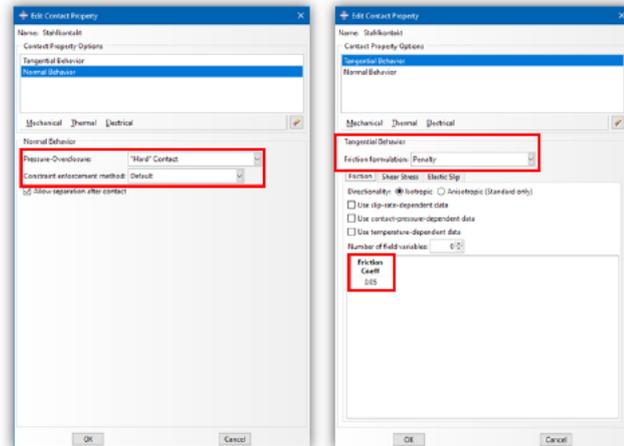
[2-AM]-Pre-Processing: **Kontaktdefinition und Kontaktpaarungen  
sowie Berechnungsschritte**

## [2-AM]-Pre-Proc: Kontaktdefinition ‚Stahlkontakt‘

Für das Ausgangsmodell werden zwei Kontaktinteraktionen („Interaction Properties“) definiert.

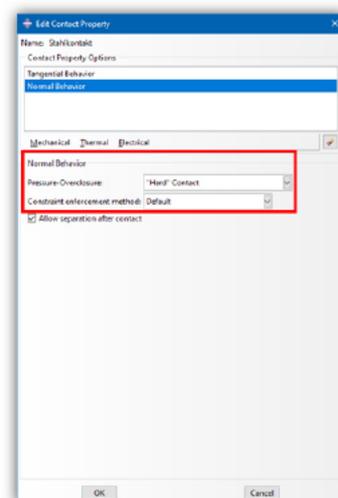
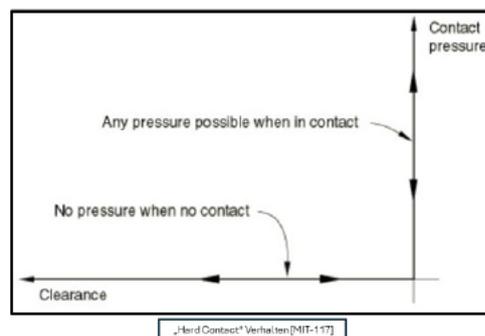
Der erste Kontakt „Stahlkontakt“ wird mit den folgenden Einstellungen implementiert.

- Normales Verhalten: ‚Hard‘ Contact auf Standardeinstellungen
- Tangentiales Verhalten: Penalty mit einem Reibungskoeffizienten  $\mu=0,05$



## [2-AM]-Pre-Proc: ‚Stahlkontakt‘-Normalverhalten

Die gezeigte Einstellung des Normalkontaktes führen dazu, dass sich so bald Kontaktflächen aufeinandertreffen, eine beliebige Pressung einstellt. Diese Einstellung lässt keine Steuerung der Pressung zu [MIT-117].



## [2-AM]-Pre-Proc: ‚Stahlkontakt‘-Tangentialverhalten

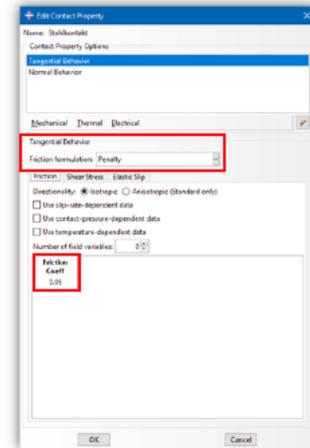
Bei der dargestellten Einstellung des tangentialen-Verhaltens, wird einer Stahl-Stahl-Werkstoffpaarung ausgegangen. Hierbei müsste bei einer geschmierten Paarung ein Reibungskoeffizient von  $\mu=0,1$  angesetzt werden. In mündlicher Absprache wurde sich jedoch auf einen Erfahrungswert von  $\mu=0,05$  für das Ausgangsmodell geeinigt.

**TB 4-1 Reibungszahlen**  
a) Haft- und Gleitreibungszahlen (Anhaltswerte für den Maschinenbau)

Werkstoffpaarung	Haftreibungszahl $\mu_0$ <sup>1)</sup>		Gleitreibungszahl $\mu$	
	trocken <sup>2)</sup>	geschmiert	trocken <sup>2)</sup>	geschmiert
Stahl auf Stahl	0,2...0,8	0,10	0,2...0,7	0,10
Kupfer auf Kupfer	-	-	0,6...1,0	0,10
Stahl auf Gusseisen	0,2	0,10	0,20	0,05
Gusseisen auf Gusseisen	0,25	0,15	0,20	0,10
Gusseisen auf Cu-Legierung	0,25	0,15	0,20	0,10
Bremsholz auf Stahl	-	-	0,5...0,6	-
Stahl auf Eis	0,03	-	0,015	-
Stahl auf Holz	0,5...0,6	0,10	0,2...0,5	0,05
Holz auf Holz	0,4...0,6	0,15...0,20	0,2...0,4	0,10
Leder auf Metall	0,60	0,20	0,2...0,25	0,12
Gummi auf Metall	-	-	0,50	-
Kunststoff auf Metall	0,25...0,4	-	0,1...0,3	0,04...0,1
Kunststoff auf Kunststoff	0,3...0,4	-	0,2...0,4	0,04...0,1

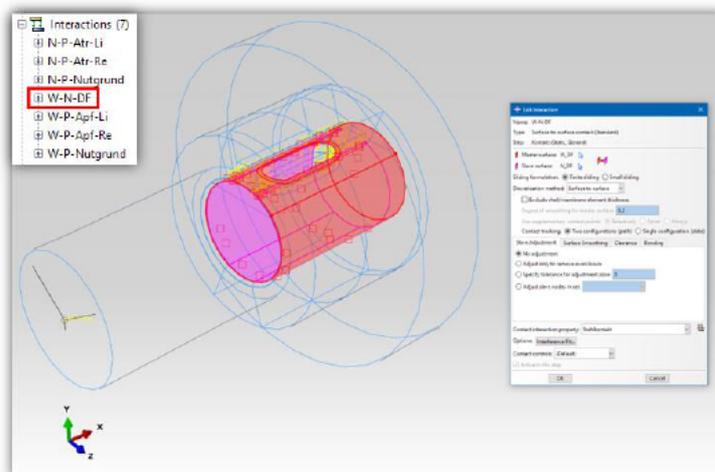
<sup>1)</sup> Die Haftreibungszahl  $\mu_0$  einer Werkstoffpaarung ist meist geringfügig größer als die Gleitreibungszahl  $\mu$ . Sie ist nur für den Grenzfall des Übergangs in die Bewegung definiert.  
<sup>2)</sup> Bei technisch üblichen, geringen Verunreinigungen.

Reibungszahl **RMS 2.9**



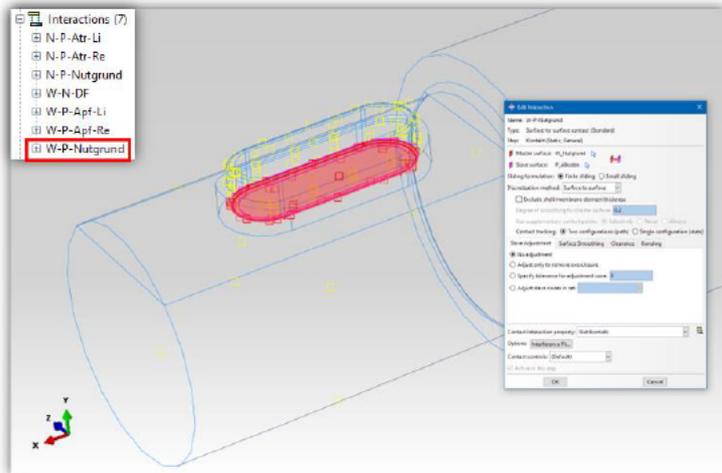
## [2-AM]-Pre-Proc: ‚Stahlkontakt‘-Paarung: ‚W-N-DF‘

Kontaktpaarung („Interaction“) zwischen Fügedurchmesser der Welle und dem Nabeninnendurchmesser



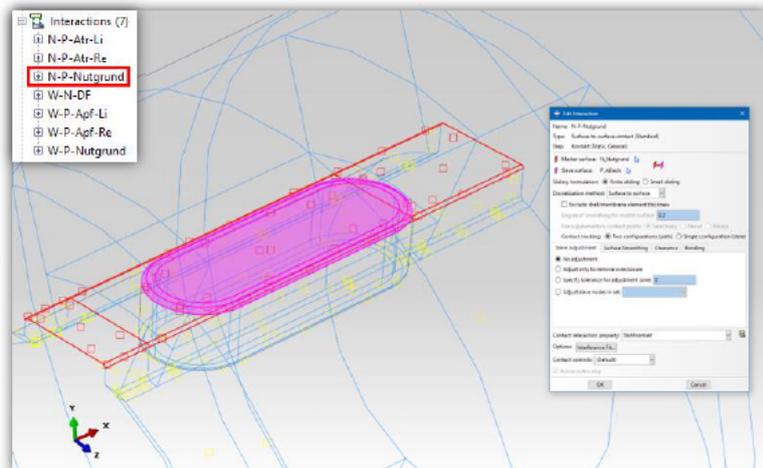
[2-AM]-Pre-Proc: ‚Stahlkontakt‘-Paarung: ‚W-P-Nutgrund‘

Kontaktpaarung zwischen der unteren Passfederfläche und dem Wellennutgrund, inklusive der Rundungen im Nutgrund sowie an der Passfeder.



[2-AM]-Pre-Proc: ‚Stahlkontakt‘-Paarung: ‚N-P-Nutgrund‘

Kontaktpaarung zwischen der oberen Passfederfläche und dem Nabennutgrund, inklusive der Rundungen im Nutgrund sowie an der Passfeder.

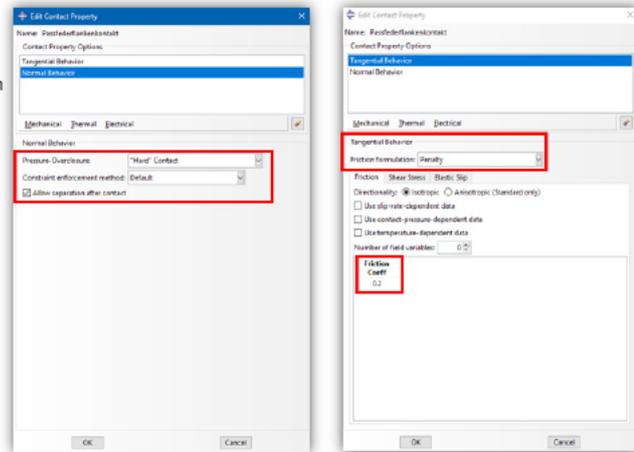


## [2-AM]-Pre-Proc: Kontaktdefinition ‚Passfederflankenkontakt‘



Außerdem wird der Kontakt „Passfederflankenkontakt“ mit den dargestellten Einstellungen erstellt. Dieser hat die folgenden Einstellungen

- Normales Verhalten: ‚Hard‘ Contact auf Standardeinstellungen (wie beim ‚Stahlkontakt‘)
- Tangentiales Verhalten: Penalty mit einem Reibungskoeffizienten  $\mu=0,2$



## [2-AM]-Pre-Proc: ‚Passfederflankenkontakt‘-Tangentialverhalten



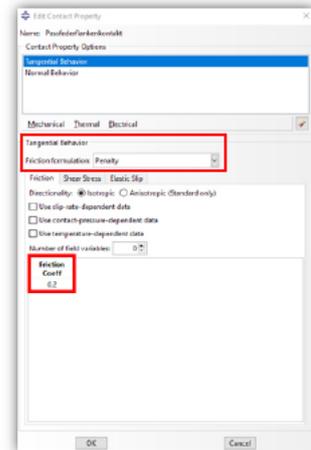
Für den Sitz der Passfeder in der Wellen- bzw. Nabennut wird von einem anderen Verhalten bei einer Interaktion der Flankenflächen ausgegangen. Mit einem Reibungskoeffizienten von  $\mu=0,2$ , was einer trockenen Stahl-Stahl-Paarung entspricht, soll ein strammer Sitz der Passfeder insbesondere in der Wellennut erzeugt werden.

**TB 4-1** Reibungszahlen  
a) Haft- und Gleitreibungszahlen (Anhaltswerte für den Maschinenbau)

Werkstoffpaarung	Haftreibungszahl $\mu_0^{(1)}$		Gleitreibungszahl $\mu$	
	trocken <sup>2)</sup>	geschmiert	trocken <sup>2)</sup>	geschmiert
Stahl auf Stahl	0,2...0,8	0,10	0,2...0,7	0,10
Kupfer auf Kupfer	–	–	0,6...1,0	0,10
Stahl auf Grauguss	0,2	0,10	0,20	0,05
Gusseisen auf Gusseisen	0,25	0,15	0,20	0,10
Gusseisen auf Cu-Legierung	0,25	0,15	0,20	0,10
Bremsbelag auf Stahl	–	–	0,5...0,6	–
Stahl auf Eis	0,03	–	0,015	–
Stahl auf Holz	0,5...0,6	0,10	0,2...0,5	0,05
Holz auf Holz	0,4...0,6	0,15...0,20	0,2...0,4	0,10
Leder auf Metall	0,50	0,20	0,2...0,25	0,12
Gummi auf Metall	–	–	0,50	–
Kunststoff auf Metall	0,25...0,4	–	0,1...0,3	0,04...0,1
Kunststoff auf Kunststoff	0,3...0,4	–	0,2...0,4	0,04...0,1

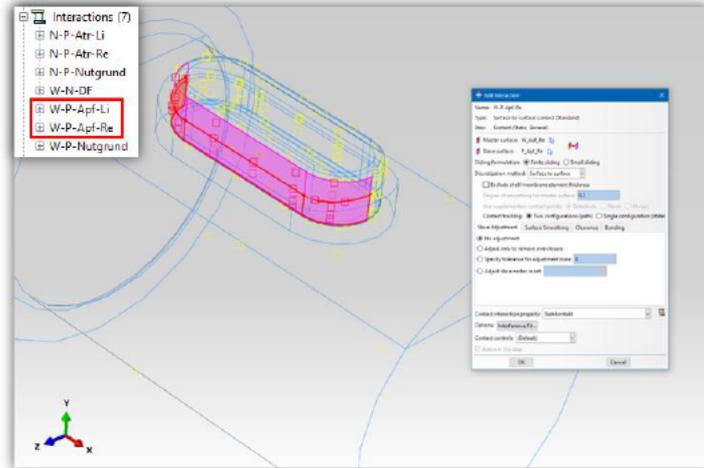
<sup>1)</sup> Die Haftreibungszahl  $\mu_0$  einer Werkstoffpaarung ist meist geringfügig größer als die Gleitreibungszahl  $\mu$ . Sie ist nur für den Grenzfall des Übergangs in die Bewegung definiert.  
<sup>2)</sup> Bei technisch üblichen, geringen Verunreinigungen.

Reibungszahlen [RM-23]



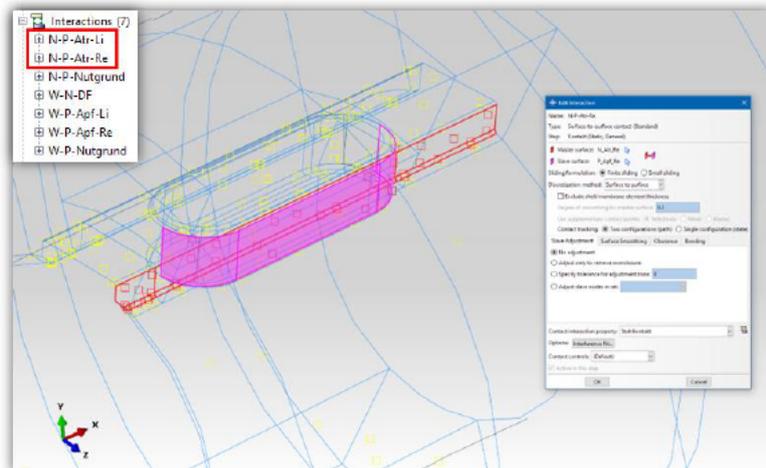
**[2-AM]-Pre-Proc: ‚Passfederflankenkontakt‘-Paarung: ‚W-P-Apf-Re und Li‘**

Kontakte (Re u. Li) zwischen den rundstirnigen sowie den tragenden Flächen der Passfeder und der Wellennutwand, inklusive der 0,4 mm Fasen der Wellennutkante.



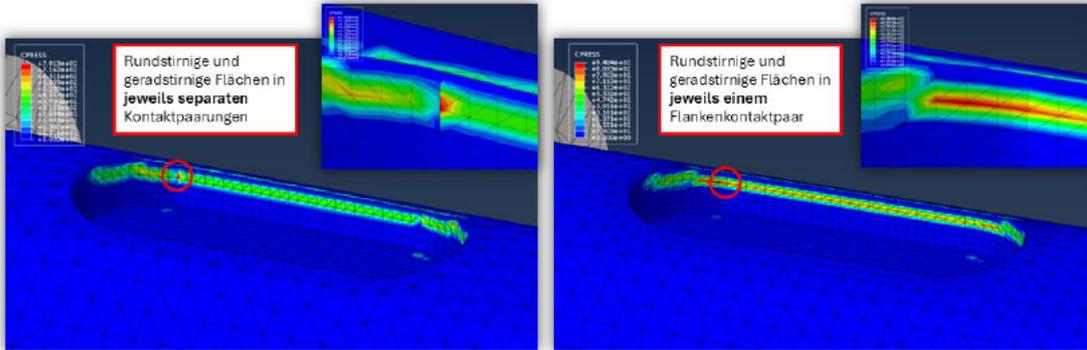
**[2-AM]-Pre-Proc: ‚Passfederflankenkontakt‘-Paarung: ‚N-P-Atr-Re‘**

Kontakte (Re u. Li) zwischen den rundstirnigen sowie den tragenden Flächen der Passfeder und der tragenden Nabennutwand, inklusive der 0,4 mm Fasen der Nabennutkanten.



## [2-AM]-Pre-Proc: Zu beachten bei Flankenkontakten

Vorherige Berechnungen haben gezeigt, dass die Flächen des rundstirnigen Bereiches der Passfeder und der Wellennut in jeweils einem vereinten Kontakt initiiert werden müssen. Bei Simulationen, in denen die rundstirnigen und geradstirnigen Flächen in separaten Kontaktpaarungen initiiert werden, entsteht eine merkwürdige Verteilung der Beanspruchung am Übergang vom prismatischen zum rundstirnigen Bereich der belasteten Wellennutflanke. Wenn die rundstirnigen und geradstirnigen Flächen in jeweils einer Flankenkontaktpaarung vereint werden, entsteht ein vernünftiger Übergang zwischen den Bereichen. Hier sieht man, dass es einen Unterschied macht, wie Kontaktpaarungen erstellt werden.



Rundstirnige und geradstirnige Flächen in jeweils separaten Kontaktpaarungen

Rundstirnige und geradstirnige Flächen in jeweils einem Flankenkontaktpaar

## [2-AM]-Pre-Proc: Berechnungsschritte



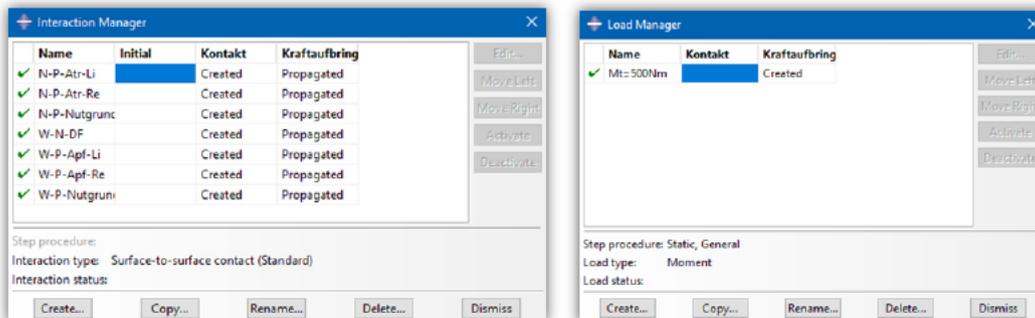
Für die Aufbringung der Lasten („**Loads**“) sowie der Initiierung der Kontakte müssen in Abaqus Berechnungsschritte („**Steps**“) erstellt werden, die in der FE-Analyse sequenziell ablaufen. Die Erstellung der Kontakte sowie die Aufbringung der Last erfolgt in separaten Schritten. Diese Maßnahme erhöht zwar die Berechnungszeit, führt aber gleichzeitig zu numerischer Stabilität und beugt unerwünschte Ergebnisse vor.

Der Berechnungsschritt „**Initial**“ ist Programmstandard und bietet sich für die Implementierung der Randbedingungen zur Stützung des Modells an. Somit werden in diesem Schritt die Randbedingungen ‚Einspannung Kupplung‘ sowie ‚Wellenlagerung‘ aktiviert („**Created**“) und aufrechterhalten („**Propagated**“).

Name	Initial	Kontakt	Kraftaufbringung
✓ Einspannung	Created	Propagated	Propagated
✗ Paarfedern	Created	Propagated	Propagated
✓ Wellenlagerung	Created	Propagated	Propagated

## [2-AM]-Pre-Proc: Berechnungsschritt ‚Kontakt‘

Weiterhin werden die Berechnungsschritte „Kontakt“ und „Kraftaufbringung“ erstellt. Im „Kontakt“ Schritt werden die zuvor vorgestellten Kontaktpaarungen aktiviert und für den darauffolgenden Schritt aufrechterhalten. Im finalen Schritt „Kraftaufbringung“ wird das Torsionsmoment in das Berechnungsmodell eingeleitet.



Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

53

## [2-AM]-Pre-Proc: Berechnungsschritte Übersicht

Die untenstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die definierten Berechnungsschritte und die dazugehörigen Randbedingungen, Lasten sowie Kontakte. Die schwarzen Kreuze symbolisieren, zu welchen Zeitpunkten welche Modelleinstellung aktiv wird.

Benennung	1. Initial	2. Kontakt	3. Kraftaufbringung
Einspannung Kupplung	X	X	X
Wellenlagerung	X	X	X
N-P-Atr-Li		X	X
N-P-Atr-Re		X	X
N-P-Atr-Nutgrund		X	X
W-P-Apf-Li		X	X
W-P-Apf-Re		X	X
W-P-Nutgrund		X	X
W-N-DF		X	X
Mt=500Nm			X

Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

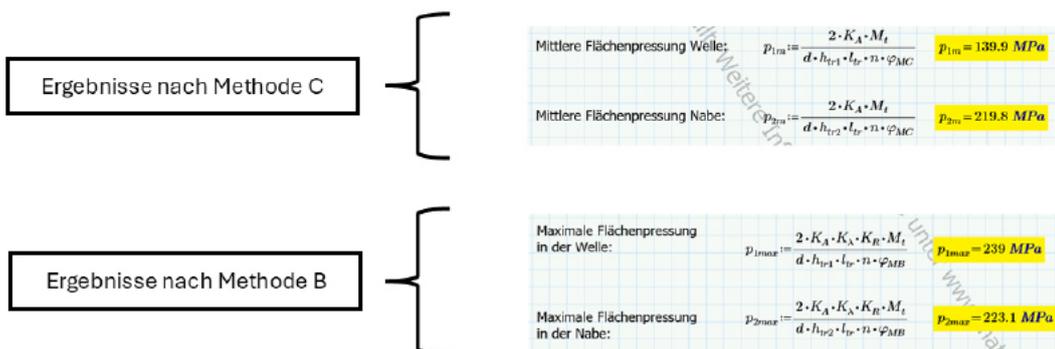
54

## 2-Ausgangsmodell

[2-AM]-Post-Processing-Vorgehen bei der Auswertung

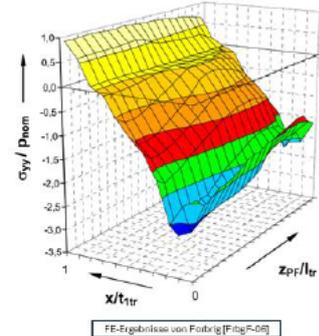
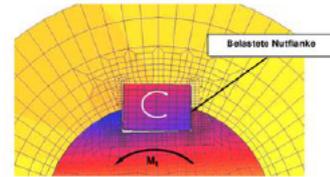
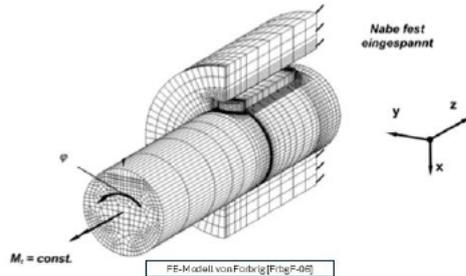
### [2-AM]-Post-Proc: Analytische Ergebnisse DIN 6892

Um den Wert der Flächenpressung einschätzen zu können werden die analytischen Ergebnisse nach den Methoden B und C der DIN 6892 für die vorgestellte PFV herangezogen.



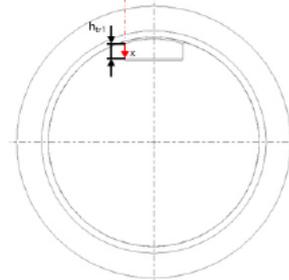
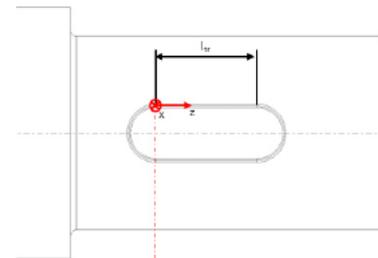
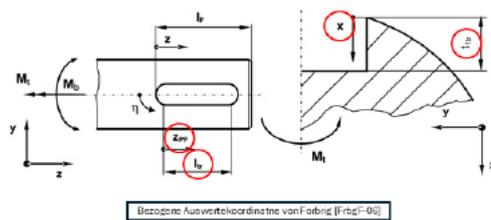
## [2-AM]-Post-Proc: Referenzergebnisse

Zur qualitativen Beurteilung werden außerdem die FE-Ergebnisse von Forbrig herangezogen, der ein FE-Modell mit vergleichbarer Struktur unter reiner statischer Torsion untersucht hat. Das dargestellte Flächendiagramm trägt die Normalspannung zur tragenden Wellennutflanke über die tragende Länge sowie der tragenden Wellennuttiefe auf. Des Weiteren stellt er in seiner Arbeit die Verformungsfigur der Passfeder in der PF-Nut dar. Diese Ergebnisse wurden mit der FE-Software Marc erzeugt. Ein brauchbares Ergebnis zur Pressung in der Nabennutwand wurde leider nicht gefunden.



## [2-AM]-Post-Proc: bezogene Koordinaten zur Auswertung

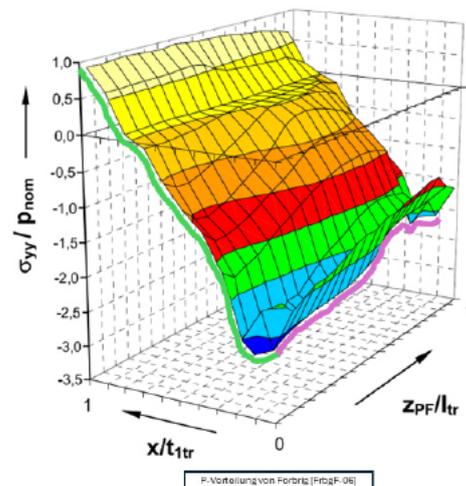
Zur verbesserten Ergebnisauswertung, werden die bezogenen Auswertekoordinaten von Hr. Forbrig übernommen:



## [2-AM]-Post-Proc: Referenzergebnisse

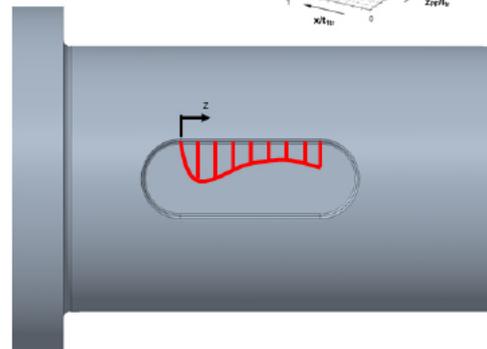
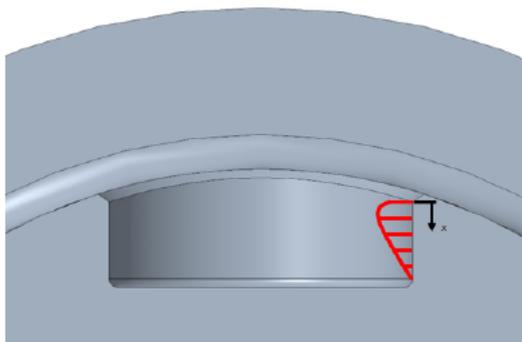
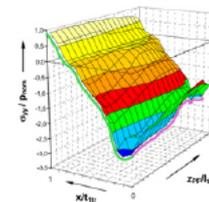
Zunächst muss das Flächendiagramm von Forbrig ausgewertet werden.

- Die Normalspannung steigt näherungsweise linear zur Wellennutkante an.
- Das Maximum stellt sich leicht unter der Wellennutkante ein.
- Am Anfang der tragenden Länge befindet sich das Maximum. Dort erfolgt die Lasteinleitung.
- Kurz vor dem Ende der tragenden Länge stellt sich ein Minimum in der Verteilung ein. Danach steigt die Kurve bis zum Ende der tragenden Länge leicht an.



## [2-AM]-Post-Proc: Qualitative Annahme

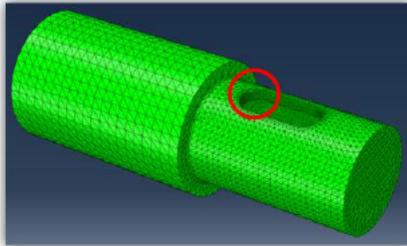
Aus den Ergebnissen von Forbrig werden die unten gezeigten Annahmen für den qualitativen Verlauf der Flächenpressung, entlang der tragenden Länge der Wellennut sowie der tragenden Nuttiefe angenommen. Die Maxima stellen sich hierbei am Anfang der tragenden Länge an der Wellennutkante ein. Da für die Verteilung der Flächenpressung in der Nabennutflanke leider keine verwendbaren Ergebnisse vorliegen, ist hier eine qualitative Bewertung nur eingeschränkt möglich.



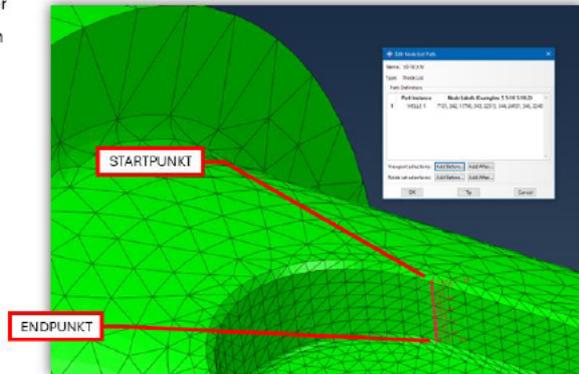
## [2-AM]-Post-Proc: Pfad entlang der tragenden Wellennuttiefe $h_{tr1}$

Für die Auswertung des Verlaufes der Flächenpressung, werden in Abaqus Pfade („Paths“) erstellt werden, an denen die entsprechenden FE-Ergebnisse gemessen werden können.

Ein Pfad wird am Anfang des prismatischen Bereiches der Wellennut, entlang der tragenden Wellennuttiefe  $h_{tr1}$ , von der Wellennutkante bis zum Nutgrundradius gezogen.

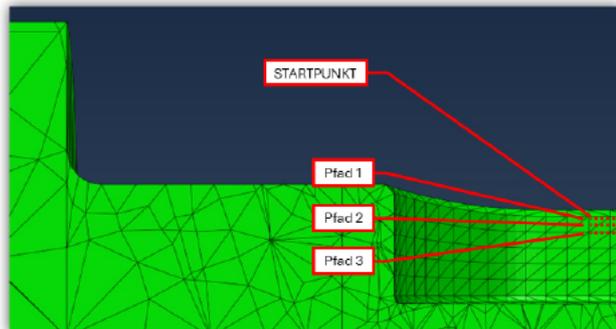
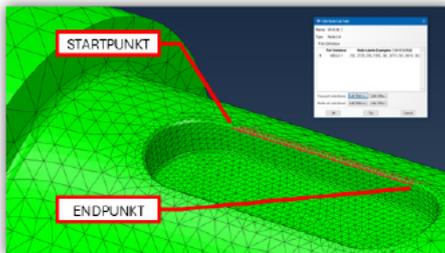


Ansichtsperspektive



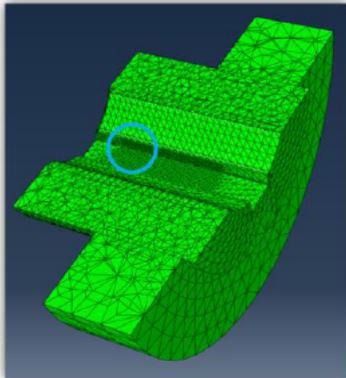
## [2-AM]-Post-Proc: Pfade entlang der tragenden Wellennutlänge $l_{tr}$

Da die Referenzergebnisse zeigen, dass das Maximum der Flächenpressung nicht direkt an der Nabennutkante, sondern etwas darunter liegt, werden 3 Pfade über die ersten 3 Knotenreihen an und unter der Wellennutkante, entlang der tragenden Länge  $l_{tr}$ , des prismatischen Bereiches gezogen. Die Nummerierung beginnt dabei an der Wellennutkante.

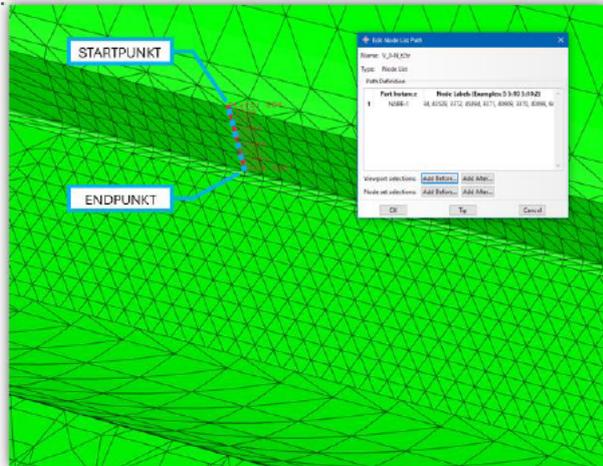


### [2-AM]-Post-Proc: Pfad entlang der tragenden Nabennuttiefe $h_{tr2}$

Ebenso wird an der Nabe ein Pfad am Anfang der tragenden Nutflanke, entlang der tragenden Nabennuttiefe  $h_{tr2}$  von der Nabennutkante bis zum Nutgrundradius erstellt.

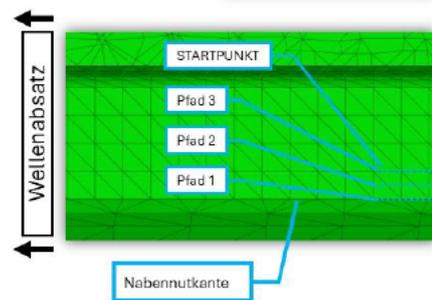
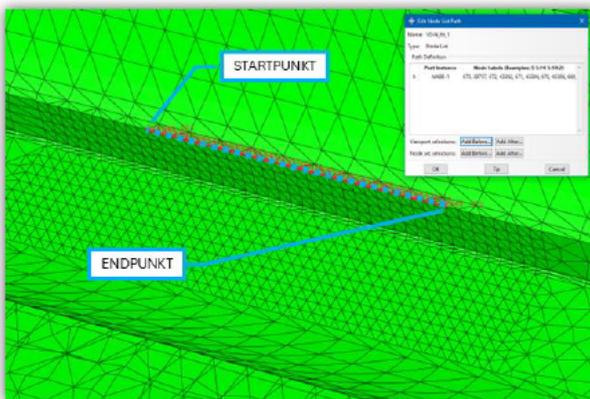
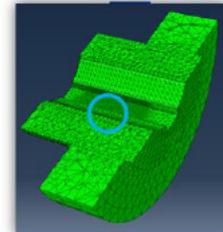


Ansichtsperspektive (Schnittdarstellung)



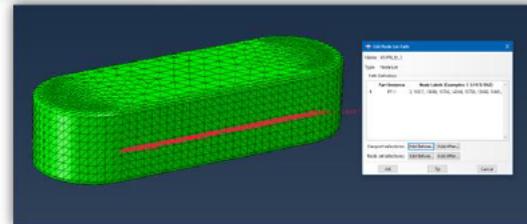
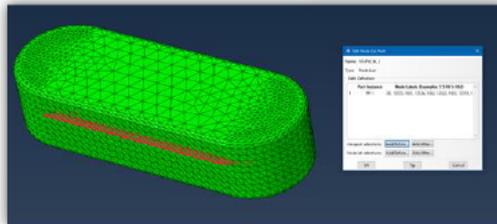
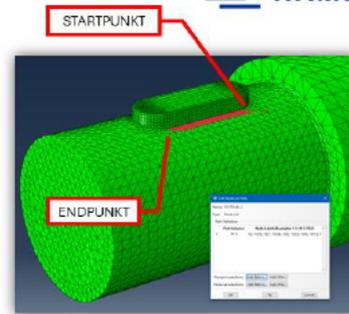
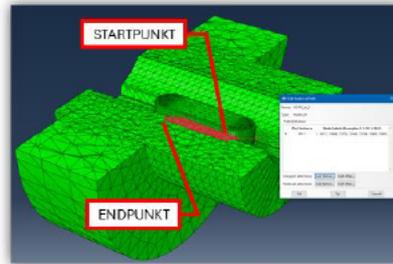
### [2-AM]-Post-Proc: Pfade entlang der tragenden Nabennutlänge $l_{tr}$

Außerdem werden wie bei der Welle 3 Pfade über die ersten 3 Knotenreihen an und unter der Nabennutkante, entlang der tragenden Länge, des prismatischen Bereiches gezogen. Die Nummerierung beginnt ebenso an der Nutkante, unter der Fase.



## [2-AM]-Post-Proc: Pfade entlang der tragenden Passfederflanke

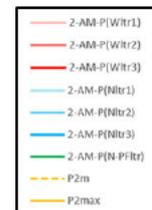
Zusätzlich werden 2 Pfade entlang der höchstbelasteten Knotenreihen der Passfeder gezogen. Beginn ist stets die Seite der Lasteinleitung.



## [2-AM]-Post-Proc: Diagramme

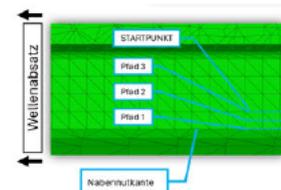
Alle in dieser Dokumentation gezeigten Diagramme wurden mit Excel erstellt. Hierbei wird die folgende Farbgebung in den Diagrammen festgelegt:

- Welle: **Rot**
- Nabe: **Blau**
- Passfeder: **Grün**
- Analytische Ergebnisse: **Orange**



Zusätzlich unterscheiden sich die Pfade entlang der tragenden Längen der Wellen bzw. Nabennut in ihrer Transparenz. Hierbei wird der unterste Pfad 3 (von der Nutkante aus betrachtet) am klarsten dargestellt, da aus den Referenzergbnisse hervorgeht, dass sich die maximale Flächenpressung unter den Nutkanten einstellt:

- Pfad 1: 70% Transparenz
- Pfad 2: 40% Transparenz
- Pfad 3: 0% Transparenz



Weiterhin werden die analytischen Ergebnisse der DIN 6892 nach **Methode B als Volllinie** und nach **Methode C als gestrichelte Linie** in die jeweiligen Diagramme aufgetragen.

Bei einem **Vergleich von Graphen** mit dem Ergebnis aus anderen Berechnungen, werden **gestrichelte Linien** verwendet.

## [2-AM]-Post-Proc: Ergebnisauswertung



**Vorgehensweise bei der Auswertung der FE-Ergebnisse:**

1. Verformungsfigur der Passfeder in der Wellen- bzw. Nabennut
2. Verschiebung der belasteten Nutflanken
3. CPRESS-Verteilung in der belasteten Wellen- bzw. Nabennutflanke
4. CPRESS-Verlauf entlang der Wellen- und Nabennuthöhe
5. CPRESS-Verlauf entlang der tragenden Wellen- und Nabennuttlänge
6. Konvergenzprüfung der Flächenpressung
7. Fazit und Berechnungsdauer

Entspricht die Kippfigur der PF dem Referenzergebnis?

Verformen sich die Nutflanken sinnvoll?

Ist die Verteilung von p sinnvoll?

Nabennuthöhe-entspricht der Verlauf von p dem Referenzergebnis?

Entspricht der Verlauf von p dem Referenzergebnis?

Jonas Jenßen
FE-PFV-Dokumentation
67

## Anhang C4



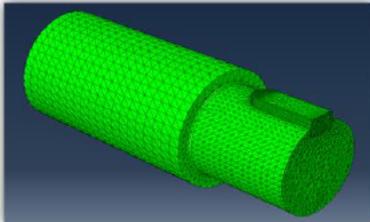
# 2-Ausgangsmodell

[2-AM]-Post-Processing-FE-Ergebnisse

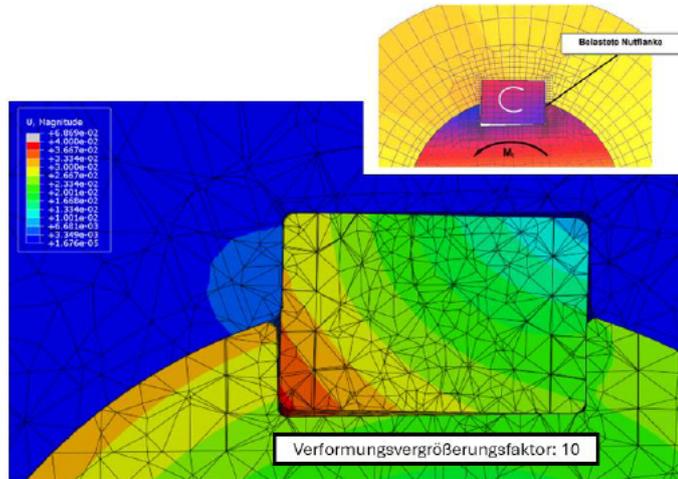
## [2-AM]-Post-Proc: Verformungsfigur der PF in der PF-Nut

Da keine analytischen Ergebnisse zum Kippen der Passfeder vorliegen, kann die gezeigte Verformungsfigur nur qualitativ bewertet werden. Qualitativ betrachtet verhält sich die Passfeder entsprechend dem Referenzergebnis.

Die Verformungsfigur der PF entspricht dem Referenzergebnis. Man kann eine Weitung der Wellen und Nabennut bei einem gleichzeitigen Kippen der Passfeder erkennen.



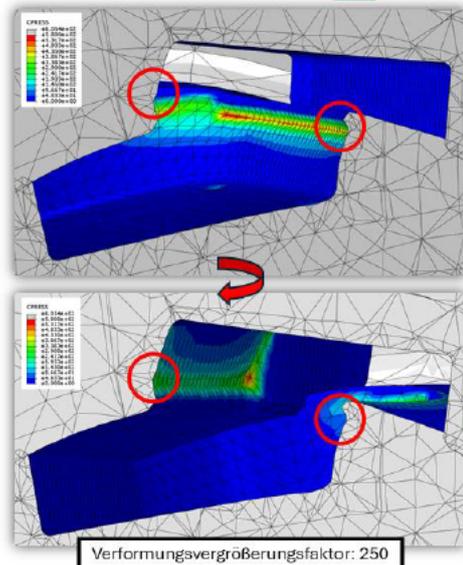
Modell geschnitten am Ende der tragenden Länge (Nabe ausgeblendet)



Verformungsvergrößerungsfaktor: 10

## [2-AM]-Post-Proc: Verformung der Nutflanken

In der Nabe ein Abdruck der Passfeder in der belasteten Nutflanke erkennbar, was grundsätzlich richtig ist. Auffällig ist eine lokale Verformung unter den Nutkanten. Bei einem erhöhten Verformungsvergrößerungsfaktor, stellt sich eine lokale Wölbung der belasteten Wellen- und Nabennutflanke unterhalb der Nutkanten ein. Dieses Phänomen wird auf der nächsten Folie näher untersucht.

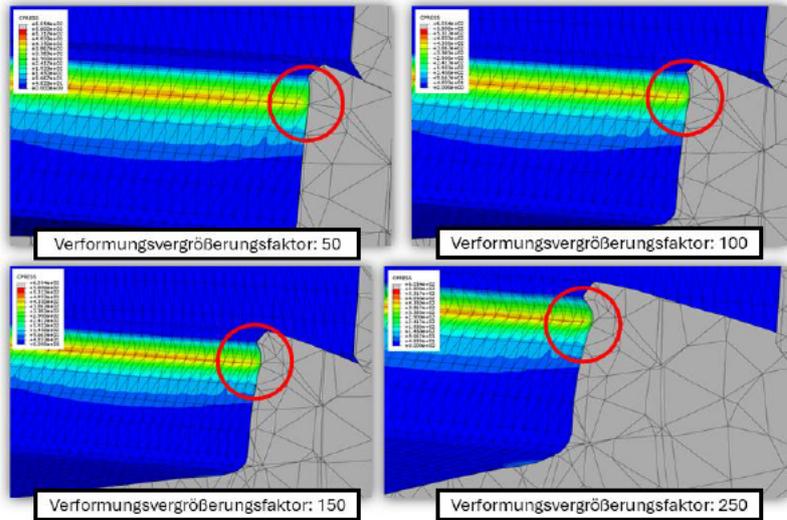


Verformungsvergrößerungsfaktor: 250

## [2-AM]-Post-Proc: Verformung der Nutkanten

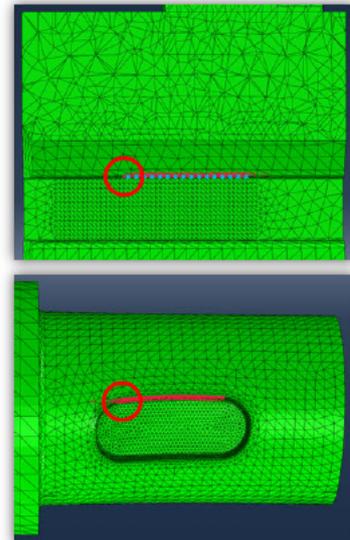
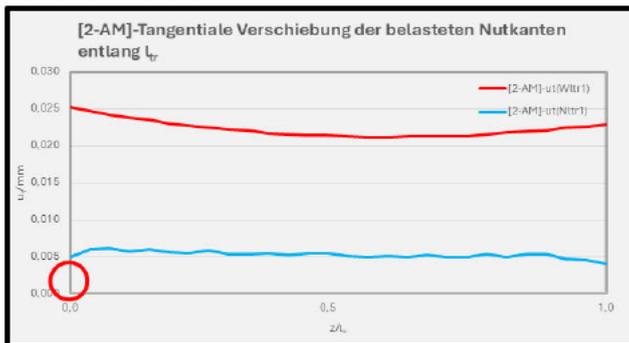
Die Wölbung der Nutkanten wird erst ab einem Verformungsfaktor von 150 richtig sichtbar.

Dieses Verformungsverhalten ist eher unerwartet, da hier eine geradstirnige Flächen aufeinandertreffen. Somit sollten sich die Flächen einheitlich verformen und nicht lokal.



## [2-AM]-Post-Proc: Tangentiale Verschiebung der belasteten Nutkanten

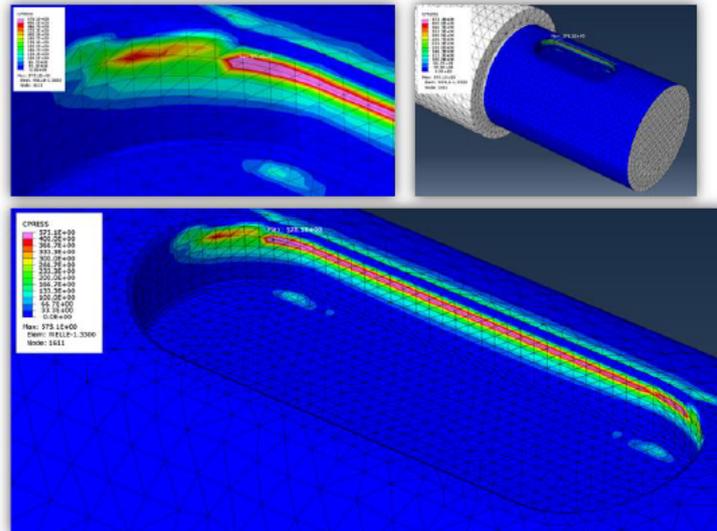
Auch die Verformungsfigur der belasteten Nutkanten kann lediglich qualitativ bewertet werden. Hierbei wird die tangentielle Verschiebung über ein Zylinderkoordinaten untersucht. Die Verformungsfigur erscheint insgesamt zufriedenstellend. Sowohl bei der Welle also auch bei der Nabe ist Verschiebung im Bereich der Lasteinleitung ( $z=0$ ) größer als bei der Lastableitung ( $z=l_p$ ). Das ist ein Resultat der Wellenverdrillung in Richtung der Lastableitung durch die Einspannung der Kupplung gehemmt wird. Weiterhin lässt sich im Verlauf der Nabe der Abdruck der PF erkennen.



## [2-AM]-Post-Proc: Verteilung der Flächenpressung an der belasteten Wellennutflanke

Die Flächenpressung wird mit der Abaqus Output-Größe CPRESS untersucht. Diese Größe stellt die Spannung, die normal zur Fläche wirkt dar.

Qualitativ sieht die Verteilung der Flächenpressung zufriedenstellend aus. Das Maximum der Flächenpressung stellt sich hierbei unter der Nutkante ein. Hier stellt sich die Frage, ob das ein Resultat der zuvor gezeigten Wölbung der Nutflanken ist. Das Maximum stellt sich dabei im rundstirnigen Bereich der Wellennutflanke ein, was weder den qualitativen noch den quantitativen Erwartungen entspricht.



Jonas Jenßen

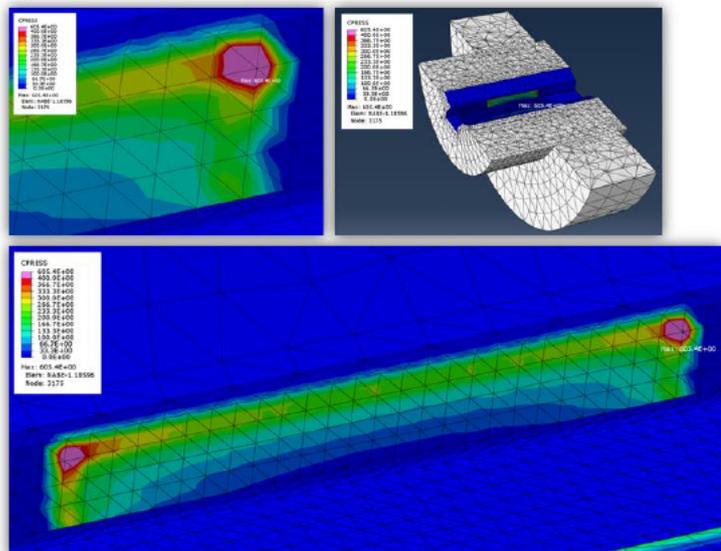
FE-PFV-Dokumentation

73

## [2-AM]-Post-Proc: Verteilung der Flächenpressung an der belasteten Nabennutflanke

Da keine Referenzergebnisse für die Verteilung der Flächenpressung vorliegt, kann hier qualitative Bewertung durchgeführt werden. Das Verhalten der Nabe muss in den Berechnungen aufmerksam beobachtet werden.

Genau wie bei der Welle stellt sich das Maximum in der 1. sichtbaren Knotenreihe von der Nabennutkante aus auf der Lastableitungsseite ein. Weiterhin herrschen die größten Flächenpressungen den Enden der tragenden Nabennutflanke ein, während sie zum Zentrum hin abnimmt.



Jonas Jenßen

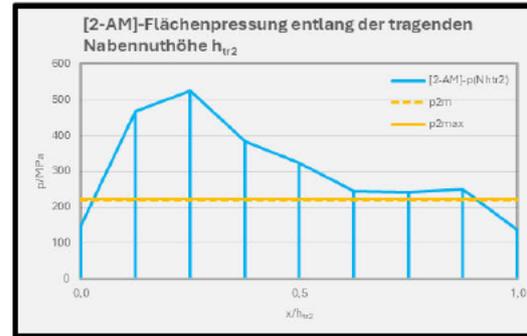
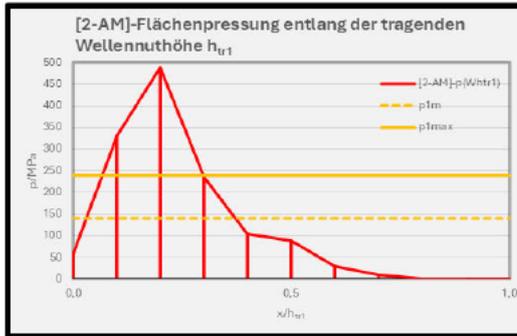
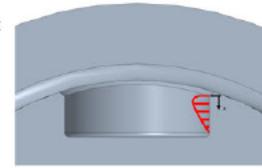
FE-PFV-Dokumentation

74

### [2-AM]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der tragenden Nuthöhen



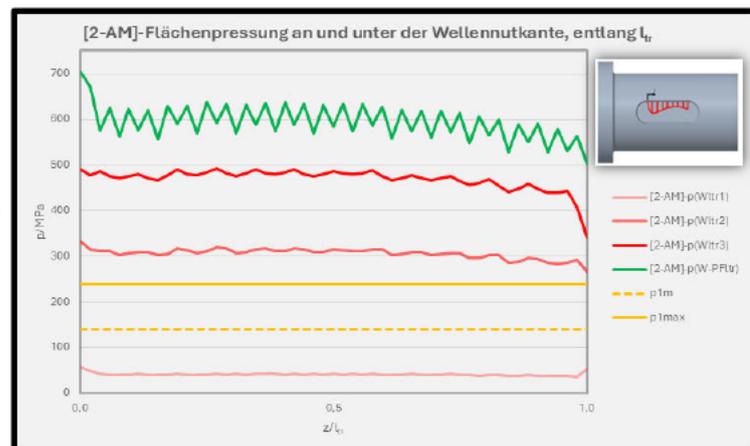
Der Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennuthöhe entspricht qualitativ nur bedingt dem Referenzergebnis. Hier wird nochmal deutlich, dass die größte Pressung unter der Nutkante liegt. Nicht so gut ist der hohe Gradient der Flächenpressung sowohl in der Welle als auch in der Nabe. Hierbei steigt die Flächenpressung von den Nutkanten aus rapide an. Weiterhin wird hier deutlich, dass nur ca. ¼ der belasteten Wellennutflanke beansprucht wird.



### [2-AM]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Wellennutflanke

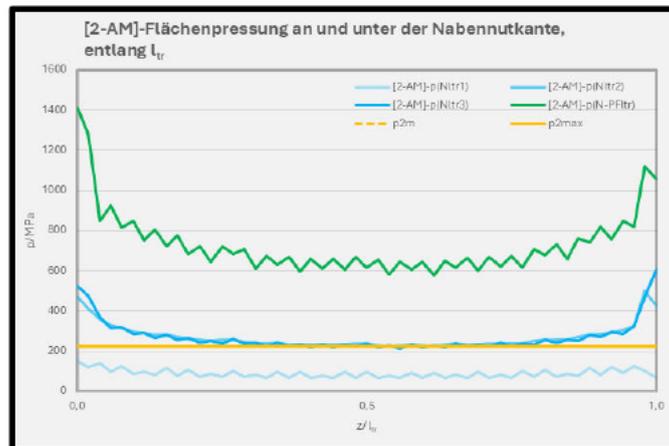


Der Verläufe der Pressung entlang der tragenden Wellennutflanke, an und unterhalb der Nutkante entsprechen weder qualitativ noch quantitativ den Erwartungen. Die Flächenpressung in der Wellennutflanke übersteigen die analytischen Ergebnisse nach DIN 6892 deutlich. Weiterhin wirken die Verläufe der Pressung entlang der tragenden näherungsweise konstant. Außerdem übersteigt die Flächenpressung an der Passfeder die Pressung an der Wellennutflanke.



## [2-AM]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Nabennutflanke

Die Verläufe der Flächenpressung in entlang  $l_r$  der belasteten Nabennutflanke weisen näherungsweise einen parabolischen Verlauf vor. Dabei liegen die Ergebnisse über den analytischen Ergebnissen der Methode B und C nach DIN 6892. Auch hier ist die Pressung an der Passfeder deutlich größer, als in der Nabe.

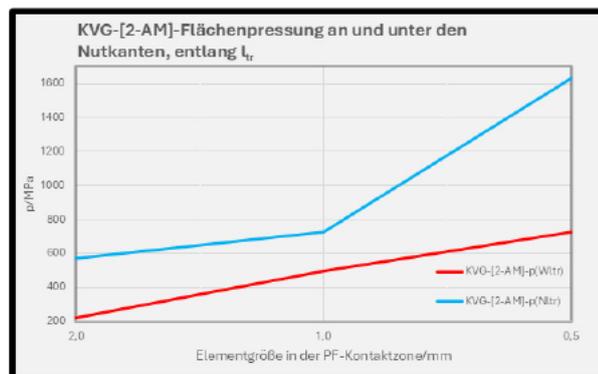


## [2-AM]-Post-Proc: Konvergenzbetrachtung

Zur Konvergenzprüfung werden zwei weitere Berechnungen, mit 0,5mm Elementen und 2mm Elementen, in der Kontaktzone zwischen der PF und der Welle bzw. der Nabe durchgeführt und die Ergebnisse der Flächenpressung an und unter belasteten Nutkanten, über die tragende Länge aufgetragen.

- Die Flächenpressung in der Welle könnte mit feiner werdendem Netz konvergieren
- In der Nabe lässt der Verlauf keine Konvergenz mit feiner werdendem Netz vermuten.

Hierbei sei erwähnt, dass diese Betrachtungen nicht ausreichen, um eine eindeutige Konvergenz der Flächenpressung festzustellen.



## [2-AM]-Post-Proc: Fazit und Berechnungsdauer



Der Ergebnisse des Ausgangsmodell weisen einige Mängel vor. Zum einen stimmen die Verläufe der Flächenpressung qualitativ nicht mit den Referenzergebnissen überein. Weiterhin liegen die Ergebnisse deutlich über den analytisch bestimmten Flächenpressung der Berechnungsmethoden nach DIN 6892. Das könnte ein Resultat der lokalen Verformungen unter den Nuktanten sein, wodurch eine Singularität in der Wellen- und Nabennutkante entsteht.

Bei einem Intel i5 Prozessor mit 4/4 Kernen Auslastung beträgt die Berechnungszeit mit allen Kernen etwas mehr als 4 ½ Stunden. Hierbei muss man berücksichtigen, dass eine Kontaktrechnung numerisch anspruchsvoll ist. Im Berechnungsschritt ‚Kraftaufbringung‘ kommt es zu numerischen Instabilitäten, wodurch Abaqus die Inkrementierung des Berechnungsschrittes selbständig verfeinert. Das führt zu einer zusätzlichen Verlängerung der Rechendauer.

Step	Increment	Alt	Severe Element Hour	Equal Hour	Total Hour	Total Time/Freq	Step Time/Freq	Time/TF Inc
1	1	1	25	0	25	0.1	0.1	0.1
1	2	1	4	0	4	0.175	0.175	0.175
1	3	1	1	1	2	0.25	0.25	0.25
1	4	1	1	0	1	0.3625	0.3625	0.3625
1	5	1	0	1	1	0.51125	0.51125	0.51125
1	6	1	0	1	1	0.76625	0.76625	0.76625
1	7	1	0	1	1	1	1	0.919625
2	1	1	2	1	3	1	0	1
2	1	20	4	1	5	1	0	0.25
2	1	20	5	1	6	1	0	0.3025
2	1	10	10	2	20	1.01563	0.015625	0.015625
2	2	1	6	1	7	1.02794	0.0279438	0.0177388
2	3	1	4	1	5	1.03966	0.0396623	0.0177388
2	4	1	4	2	6	1.05666	0.0566646	0.0177381
2	5	1	3	3	6	1.08391	0.0839079	0.0249472
2	6	1	6	1	7	1.12256	0.12256	0.0319168
2	7	1	6	1	7	1.17188	0.17188	0.0319162
2	8	1	4	1	5	1.23087	0.230874	0.0409693
2	9	1	4	1	5	1.40036	0.400358	0.133464
2	10	1	4	2	6	1.50659	0.506584	0.222229
2	11	1	3	2	5	1.60642	0.606423	0.305839
2	12	1	2	2	4	2	1	0.9090775

Log Errors Warnings Output Data File Message File Status File  
 Submitted: Wed Sep 10 10:16:24 2020  
 Name: C:\Users\jens\Documents\Abaqus\2020\2-AM\2-AM-Post-Proc\2-AM-Post-Proc.inp  
 Completed: Analysis Input File Processor  
 Status: Abaqus/Standard  
 Completed: Abaqus/Standard  
 Completed: Post-Proc: 10/16/20 17:23:24  
 Search Text  
 Text to Find:   Match case  Next  Previous  
 Buttons:

## Anhang C5

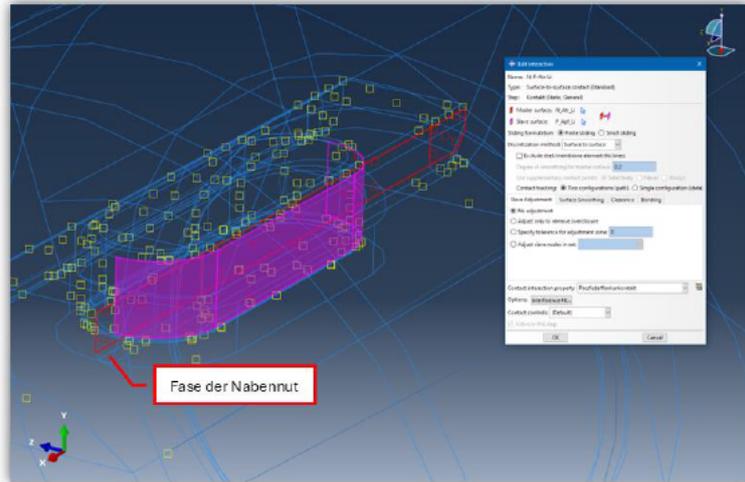


# 2.1 Entfernung der Fasen aus dem ‚Passfederflankenkontakt‘

[2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Pre-Processing

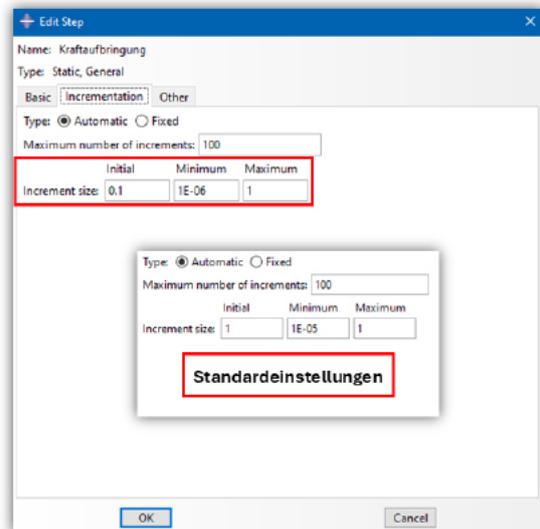
## [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Pre-Proc: Modelländerungen

In der vorherigen Rechnung hat sich eine Wölbung der belasteten Nutflanken, unterhalb der Nutkanten eingestellt. Um zu prüfen, ob hierdurch eine Singularität entsteht werden die Fasen aus den Flankenkontaktpaarungen genommen.



## [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Pre-Proc: Modelländerungen

Die Berechnungsdauer des Ausgangsmodells [2-AM] beträgt etwas weniger als 5 Stunden. Dabei kommt es im Berechnungsschritt „Kraftaufbringung“ zu numerischen Instabilitäten, welche die Berechnungsdauer zusätzlich verlängern. Um dem entgegenzuwirken, wird die Inkrementierung dieses Berechnungsschrittes angepasst. Das Startinkrement („Initial“) wird von 1 auf 0,1 verringert. Hierdurch startet der Schritt mit dem Inkrement 0,1 und erhöht in jedem Zwischenschritt bis das letzte Inkrement 1 („Maximum“) erreicht wird. Bei einem Inkrement von 1 ist der Berechnungsschritt fertiggestellt. Das führt unter Umständen zu einer längeren Berechnungsdauer, bringt aber gleichzeitig numerische Stabilität in die Berechnung. Optional kann außerdem das minimale Inkrement („Minimum“) angepasst werden. Wenn ein Zwischeninkrement diesen Wert unterschreitet wird die Berechnung abgebrochen. Mit diesen Einstellungen laufen die Berechnungen stabiler.

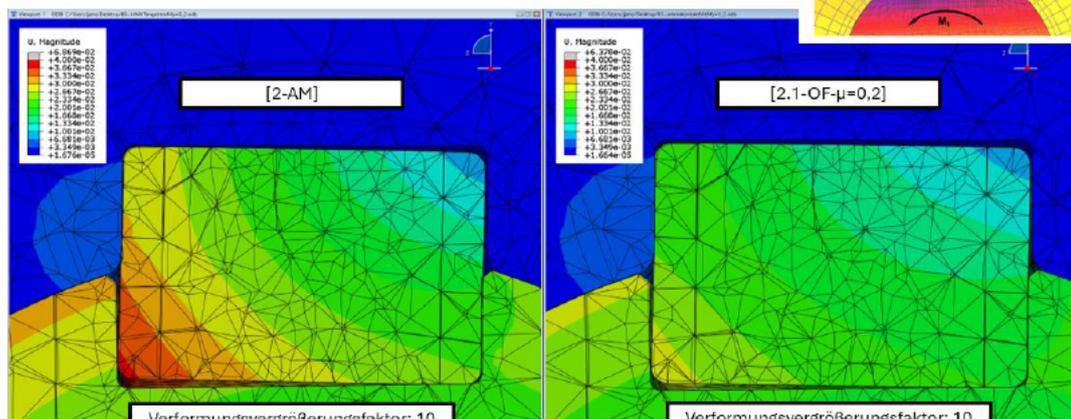
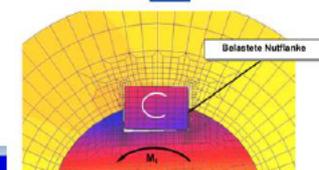


## 2.1 Entfernung der Fasen aus dem ‚Passfederflankenkontakt‘

[2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Post-Processing

### [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Post-Proc: Verformungsfigur der PF in der PF-Nut

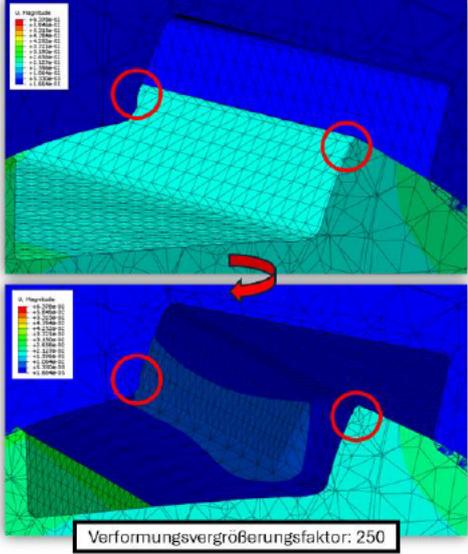
Auch hier stimmt die Kippfigur der PF qualitativ mit dem Referenzergebnis überein. Im Vergleich zum Ergebnis des Ausgangsmodells fällt die Kippbewegung hier kleiner aus. Ansonsten gibt es keine Auffälligkeiten.



## [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Post-Proc: Verformung der Nutkanten



Durch die Entfernung der Fasen aus den Flankenkontaktpaarungen zwischen PF und der Welle bzw. der Nabe, verformt sich nun nahezu die gesamte Nutflanke der Welle und der Nabe. Dennoch bleibt eine leichte Wölbung unterhalb der Nabennutkante sichtbar. Der Abdruck der PF in der Nabennutwand bleibt weiterhin erhalten.



Verformungsvergrößerungsfaktor: 250

Jonas Jenßen

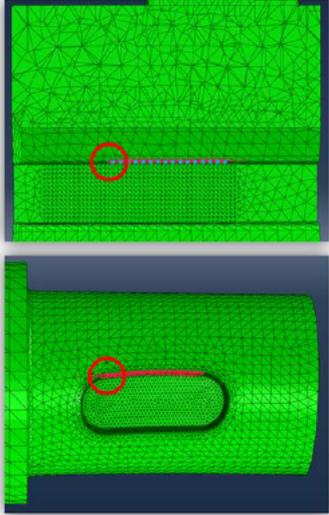
FE-PFV-Dokumentation

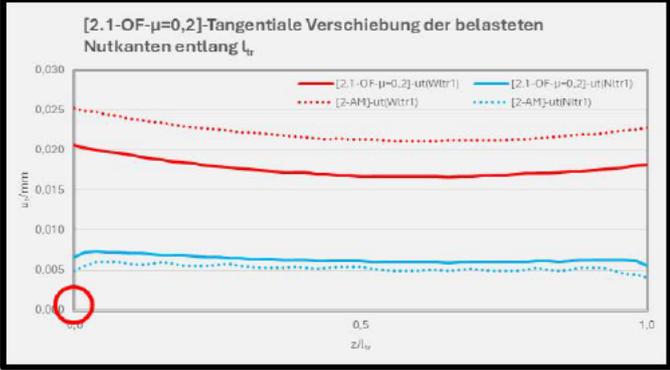
85

## [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Post-Proc: Tangentiale Verschiebung der belasteten Nutkanten



Qualitativ ist auch in dieser Berechnung die Verformungsverhalten der Nutkanten ok und unterscheidet sich nicht vom Ergebnis der Ausgangsrechnung. Betragsmäßig nimmt der Verschiebung der Wellennutkante ab, während sie an der Nutkante der Nabe leicht ansteigt.





Jonas Jenßen

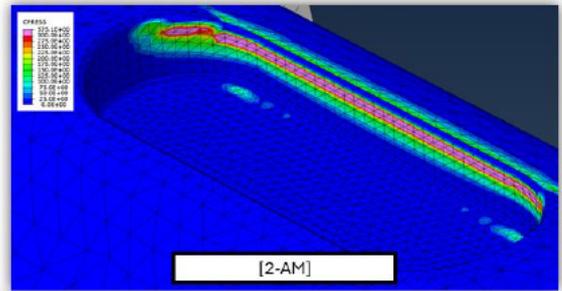
FE-PFV-Dokumentation

86

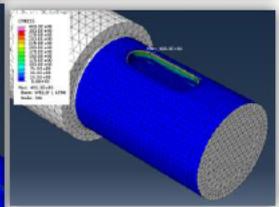
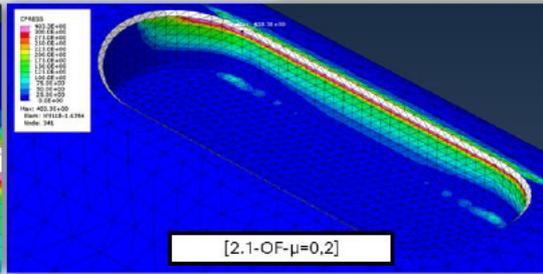
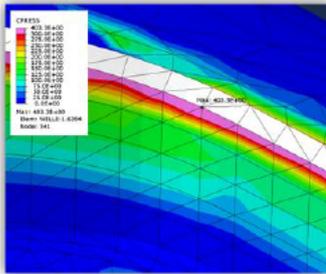
### [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Post-Proc: Verteilung der Flächenpressung an der belasteten Wellennutflanke



Die ausgegrauten Fasen zeigen, dass diese nicht mehr als Kontakt definiert sind. Hier wird klar ersichtlich, dass die maximale Pressung nun zur Wellennutkante hochgewandert ist, was qualitativ nicht mit dem Referenzergebnis übereinstimmt. Das Maximum der Flächenpressung liegt nun im Übergangsbereich der rundstirnigen und geradstirnigen bzw. tragenden Fläche der Wellennutflanke. Weiterhin ist die Pressung nun breiter über die belastete Wellennutflanke verteilt. Im Vergleich zu [2-AM] hat sich außerdem der Betrag der Pressung verringert.



[2-AM]



[2.1-OF- $\mu=0,2$ ]

Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

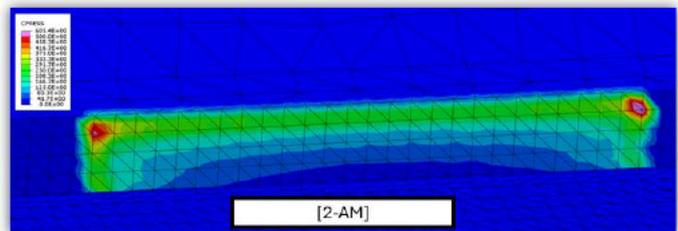
87

### [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Post-Proc: Verteilung der Flächenpressung an der belasteten Nabennutflanke - Vergleich

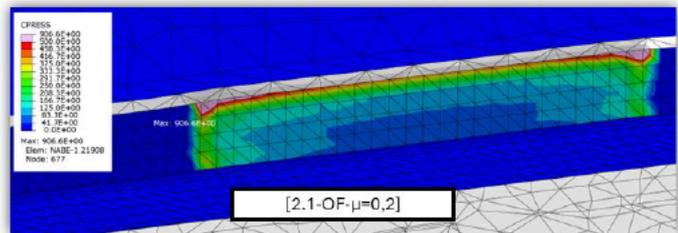
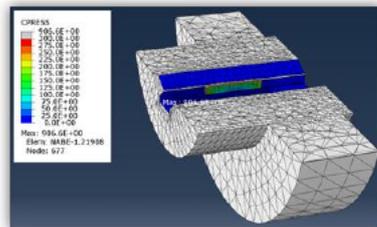


Wie in bei der Welle, liegt die Größte Flächenpressung nun an der Nutkante der Nabe. Dabei hat sich die Pressung stark erhöht. Bei einem Vergleich mit dem Ergebnis von [2-AM], ähneln sich die Verteilungen mit einer Abnahme der Pressung zum Zentrum der Nutflanke.

Wellenabsatz



[2-AM]



[2.1-OF- $\mu=0,2$ ]

Jonas Jenßen

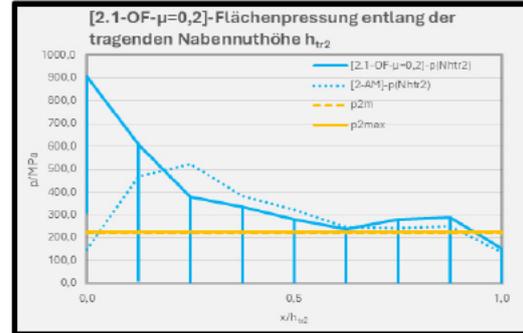
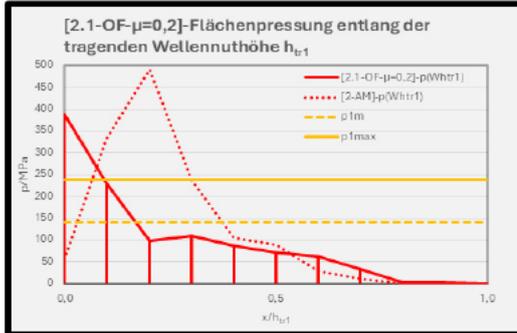
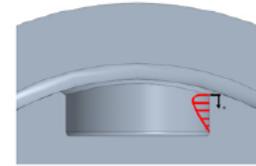
FE-PFV-Dokumentation

88

### [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der tragenden Nuthöhen



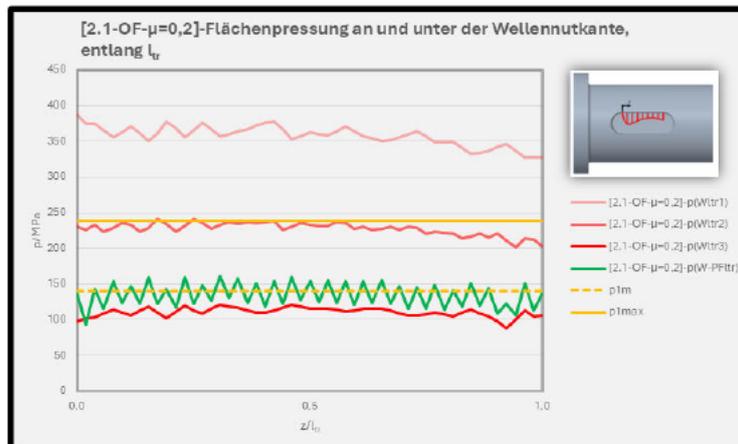
In den Diagrammen wird klar erkennbar, wie das Maximum der Flächenpressung nun direkt auf den Nutkanten liegt. Auffallend ist, dass die Pressung an der Wellennutkante verringert wurde, während sie an der Nabennutkante rapide angestiegen ist. Weiterhin bleibt ein starker Gradient der Pressung in beiden Verläufen erhalten.



### [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Wellennutflanke

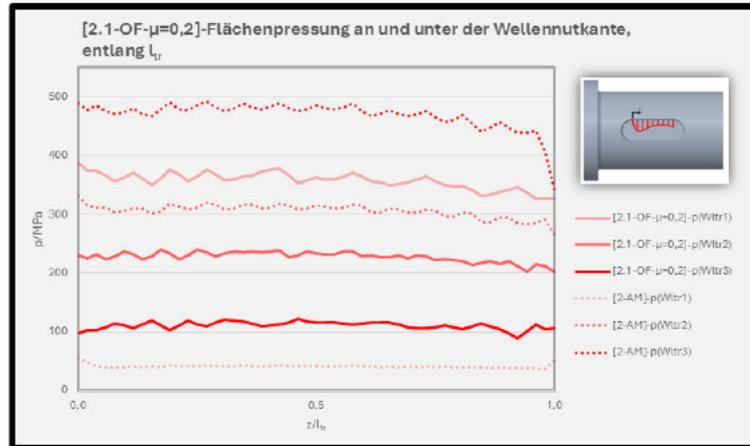


Qualitativ haben sich die Verläufe der Flächenpressung entlang  $l_r$  in der belasteten Wellennutflanke nicht verbessert. Die numerisch ermittelte Pressung übersteigt weiterhin die analytischen Ergebnisse. Auffallend ist, die Pressung an der Passfeder deutlich reduziert wurde.



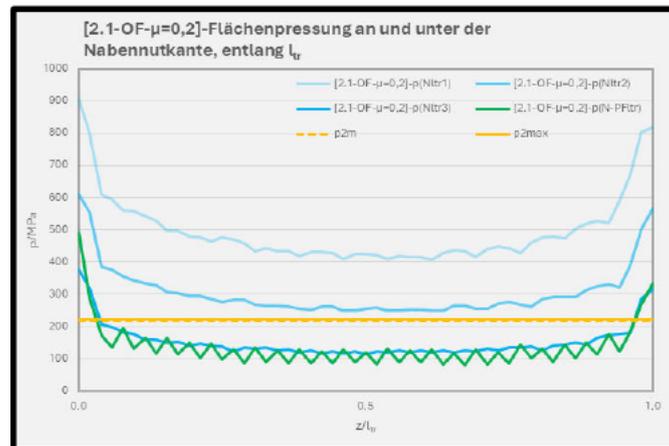
**[2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Post-Proc: Vergleich CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Wellennutflanke**

Im Vergleich zur Ausgangsrechnung [2-AM] konnte die Flächenpressung reduziert werden. Weiterhin liegen die Ergebnisse der Pfade nun dichter beieinander bzw. Insgesamt ist das Ergebnis noch nicht zufriedenstellend.



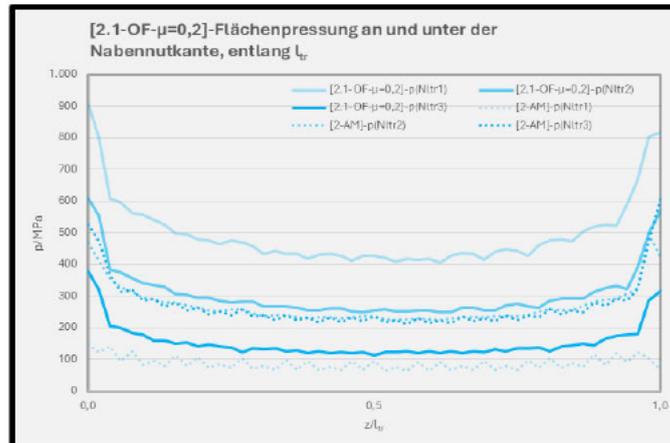
**[2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Nabennutflanke**

Im Gegensatz zur Welle hat sich die Pressung an und unter der belasteten Nabennutflanke rapide erhöht. Weiterhin bleibt ein Verlauf, der einer Parabel ähnelt.



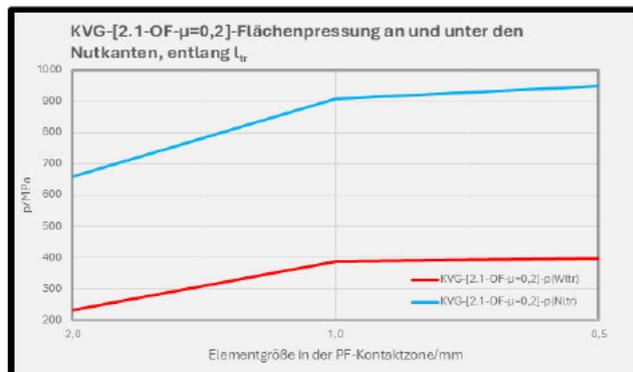
### [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Post-Proc: Vergleich CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Nabennutflanke

Die Verläufe entlang der Pfade liegen nun noch weiter auseinander. Qualitativ Verläufe mit denen der Ausgangsrechnung überein.



### [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Post-Proc: Konvergenzbetrachtung

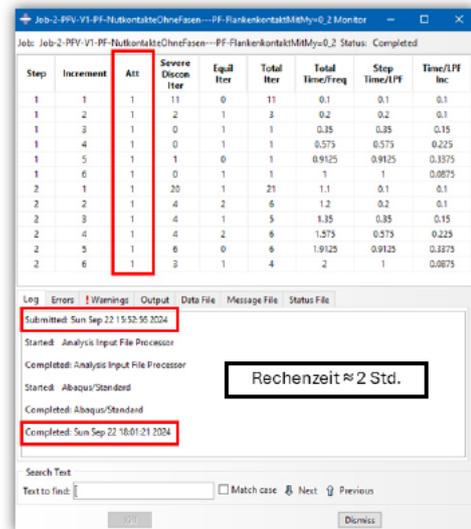
Bei einer weiteren Netzverfeinerung in den PF-Kontaktzonen könnte die Flächenpressung in der belasteten Wellen- und Nabennutflanke konvergieren.



## [2.1-OF- $\mu=0,2$ ]-Post-Proc: Fazit und Berechnungsdauer

Mit dieser Berechnung wird ebenfalls kein zufriedenstellendes Ergebnis erzeugt. Während die Verformungsfiguren bei insgesamt verringerter Verformung nahezu gleichgeblieben sind, hat sich die Verteilung der Pressung durch das Entfernen der Fasen komplett geändert. Zum einen ist das Maximum der Flächenpressung in der Wellen- und Nabennutflanke direkt auf die Nutkanten gewandert. Zum anderen wird die Pressung in der Wellennutflanke verringert während sich die Pressung in der Nabe von ca. rapide erhöht. Weiterhin entsprechen die qualitativen Verläufe der Pressungen entlang der tragenden Wellennuthöhe und -flanke nicht den Referenzergebnissen. Die Wölbung unter den Nutkanten wird durch die Entfernung der Fasen aus den Flankenkontakten entschärft. Weiterhin könnte bei einer weiteren Netzverfeinerung eine Konvergenz der Flächenpressung erzielt werden.

Mit dieser FE-Struktur dauert eine Berechnung etwas über 2 Std bei einem i5 Prozessor und einer Nutzung von 4/4 Kernen. Durch die feinere Inkrementierung des Schrittes ‚Kraftaufbringung‘ konnte weiterhin numerische Stabilität in den Rechenprozess gebracht werden.



Step	Increment	Att	Severe Discon Her	Equil Her	Total Her	Total Time/Freq	Step Time/PPF	Time/PPF Inc
1	1	1	11	0	11	0.1	0.1	0.1
1	2	1	2	1	3	0.2	0.2	0.1
1	3	1	0	1	1	0.35	0.35	0.15
1	4	1	0	1	1	0.575	0.575	0.225
1	5	1	1	0	1	0.9125	0.9125	0.3375
1	6	1	0	1	1	1	1	0.0875
2	1	1	20	1	21	1.1	0.1	0.1
2	2	1	4	2	6	1.2	0.2	0.1
2	3	1	4	1	5	1.35	0.35	0.15
2	4	1	4	2	6	1.575	0.575	0.225
2	5	1	6	0	6	1.9125	0.9125	0.3375
2	6	1	3	1	4	2	1	0.0875

## Anhang C6

# 2.2-Erhöhung des Reibwertes

## [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Pre-Processing

## [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Pre-Proc: Passfederflankenkontakt'- Tangentialverhalten



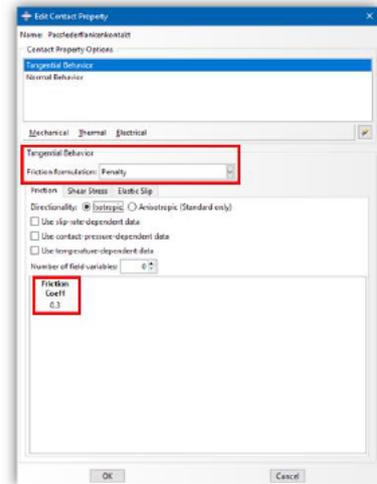
Um den Einfluss des Reibungskoeffizienten  $\mu$  eingehender zu untersuchen, wird dieser von  $\mu=0,2$  auf  $\mu=0,3$  erhöht. Die Fasen bleiben weiterhin aus den Flankenkontaktpaarungen zwischen den Passfeder- und den Wellen- bzw. Nabennutflanken ausgeschlossen.

**TB 4-1** Reibungszahlen  
a) Haft- und Gleitreibungszahlen (Anhaltswerte für den Maschinenbau)

Werkstoffpaarung	Haftreibungszahl $\mu_0^{(1)}$		Gleitreibungszahl $\mu$	
	trocken <sup>2)</sup>	geschmiert	trocken <sup>2)</sup>	geschmiert
Stahl auf Stahl	0,2...0,8	0,10	0,2...0,3	0,10
Kupfer auf Kupfer	-	-	0,6...1,0	0,10
Stahl auf Gusseisen	0,2	0,10	0,20	0,05
Gusseisen auf Gusseisen	0,25	0,15	0,20	0,10
Gusseisen auf Cu-Legierung	0,25	0,15	0,20	0,10
Bremsschlag auf Stahl	-	-	0,5...0,6	-
Stahl auf Eis	0,03	-	0,015	-
Stahl auf Holz	0,5...0,6	0,10	0,2...0,5	0,05
Holz auf Holz	0,4...0,6	0,15...0,20	0,2...0,4	0,10
Leder auf Metall	0,60	0,20	0,2...0,25	0,12
Gummi auf Metall	-	-	0,50	-
Kunststoff auf Metall	0,25...0,4	-	0,1...0,3	0,04...0,1
Kunststoff auf Kunststoff	0,3...0,4	-	0,2...0,4	0,04...0,1

<sup>1)</sup> Die Haftreibungszahl  $\mu_0$  einer Werkstoffpaarung ist meist geringfügig größer als die Gleitreibungszahl  $\mu$ . Sie ist nur für den Grenzfall des Übergangs in die Bewegung definiert.  
<sup>2)</sup> Bei technisch üblichen, geringen Verunreinigungen.

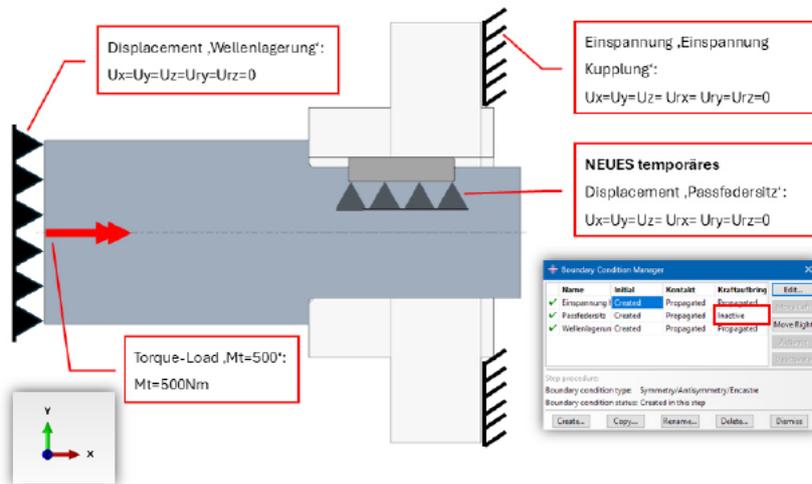
Reibungszahlen [BM-23]



## [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Pre-Proc: Modelländerungen



Die Berechnung mit einer Reibungszahl von  $\mu=0,3$  ist numerisch anspruchsvoll und erfordert zusätzliche Maßnahmen. Zur numerischen Stabilisierung wird eine temporäre Randbedingung implementiert, mit der die untere Passfederfläche im Berechnungsschritt „Kontakt“ raumfest fixiert wird. Da diese Randbedingung nicht den realen Bedingungen einer PFV entspricht, muss diese im Schritt „Kraftaufbringung“ wieder deaktiviert werden.

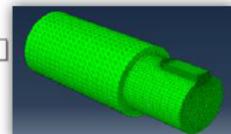
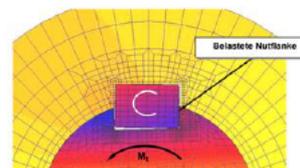


# 2.2-Erhöhung des Reibwertes

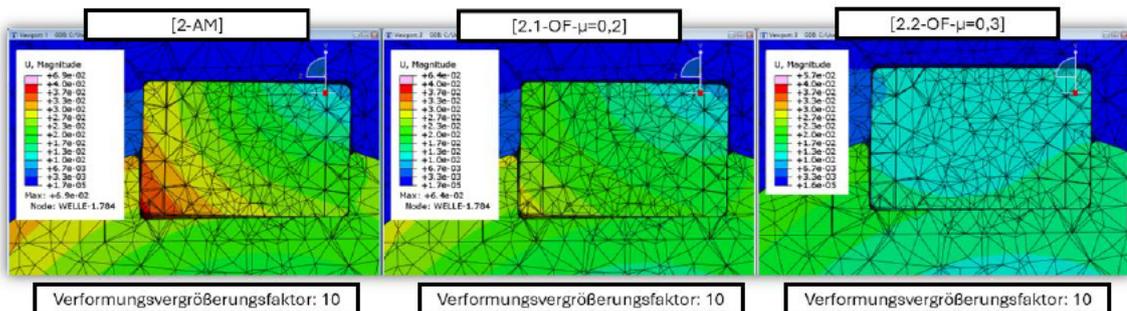
[2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Post-Processing

## [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Post-Proc: Verformungsfigur der PF in der PF-Nut

Die Kippfigur der Passfeder in der Wellen- bzw. Nabennut stimmt nach wie vor mit dem Referenzergebnis überein. Außerdem hat sich die Verformung der PFV insgesamt verringert. Das ist ein sinnvolles Ergebnis, da durch den erhöhten Reibwert die Relativbewegung der Passfeder gehemmt wird.



Modell geschnitten am Ende der tragenden Länge (Nabe ausgeblendet)



### [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Post-Proc: Verformung der Nutkanten HAW HAMBURG

Die starke lokale Verformung unterhalb der Nutkanten bleibt weiterhin aus. Eine leichte Wölbung unterhalb der Nabennutkante bleibt erkennbar. Der Abdruck der Passfeder in der Nabennutwand bleibt weiterhin erhalten.

Verformungsvergrößerungsfaktor: 250

Jonas Jenßen
FE-PFV-Dokumentation
101

### [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Post-Proc: Tangentiale Verschiebung der belasteten Nutkanten HAW HAMBURG

Qualitativ hat sich an der Verformungsfigur der Nutkanten nichts verändert. Jedoch wird die Verschiebung der Wellennutkante weiter reduziert, während sie an der Nabennutkante nahezu gleichgeblieben ist.

**[2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Tangentiale Verschiebung der Nutkanten entlang  $l_r$**

Series	Line Style	Color	Location
[2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-ut(Wtr1)	Solid	Red	Wellennutkante
[2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-ut(Ntr1)	Solid	Blue	Nabennutkante
[2.1-OF- $\mu=0,3$ ]-ut(Wtr1)	Dashed	Red	Wellennutkante
[2.1-OF- $\mu=0,3$ ]-ut(Ntr1)	Dashed	Blue	Nabennutkante
[2-AM]-ut(Wtr1)	Dotted	Red	Wellennutkante
[2-AM]-ut(Ntr1)	Dotted	Blue	Nabennutkante

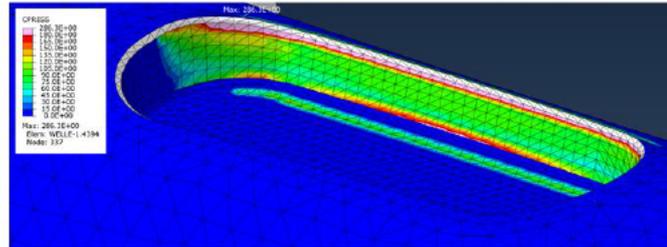
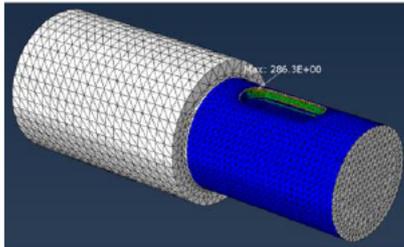
w<sub>t</sub>/mm

z/l<sub>p</sub>

Jonas Jenßen
FE-PFV-Dokumentation
102

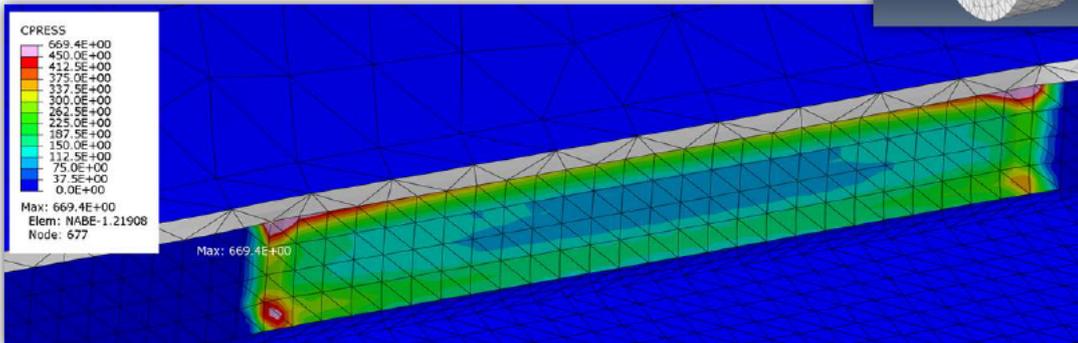
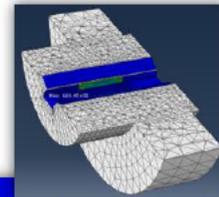
### [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Post-Proc: Verteilung der Flächenpressung an der belasteten Wellennutflanke

Auch hier herrscht die größte Flächenpressung weiterhin im Bereich der Wellennutkante. Das Maximum ist dabei wieder in den rundstirnigen Bereich der Wellennut gewandert, wie es in der Ausgangsrechnung ebenfalls der Fall ist.



### [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Post-Proc: Verteilung der Flächenpressung an der belasteten Nabennutflanke

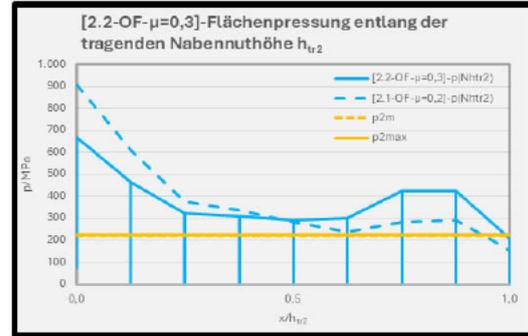
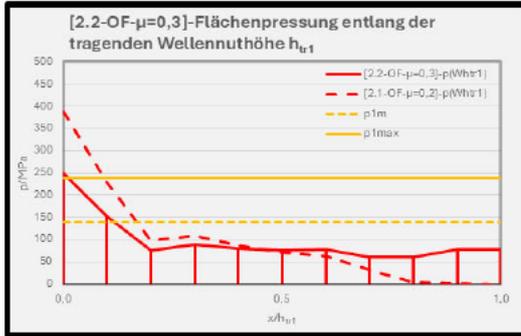
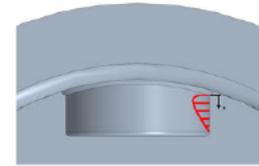
Durch den erhöhten Reibwert wird nun nahezu die gesamte Nabennutflanke beansprucht. Die größten Pressungen herrschen weiterhin an den Enden des tragenden Nabennutbereiches, während sie zum Zentrum hin abnimmt. Weiterhin stellen sich leichte Überhöhungen der Pressung oberhalb am Nutgrundradius ein.



### [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der tragenden Nuthöhen



Das Maximum der Flächenpressung liegt weiterhin auf den Nutkanten, was nicht dem Referenzergebnis entspricht. Quantitativ konnte die Flächenpressung entlang der tragenden Wellennuthöhe weiter reduziert werden, sodass sie bei der Welle nun im Bereich des analytischen Ergebnisses nach MB liegt. In der tragenden Nabennuthöhe konnte Pressung ebenfalls verringert werden. Jedoch liegt der Betrag der Flächenpressung noch weit über den analytisch bestimmten Pressungen. Ein hoher Gradient der Pressung bleibt ebenfalls erhalten.



Jonas Jenßen

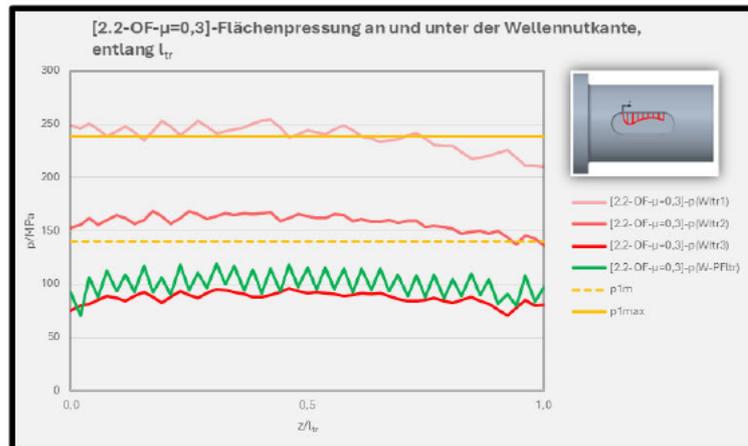
FE-PFV-Dokumentation

105

### [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Wellennutflanke



Auch in dieser Berechnung wird nicht der Verlauf aus dem Referenzergebnis erzeugt. Aber die Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke wird erstmals in den Bereich des analytischen Ergebnisses der Methode B (DIN 6892) gebracht werden.



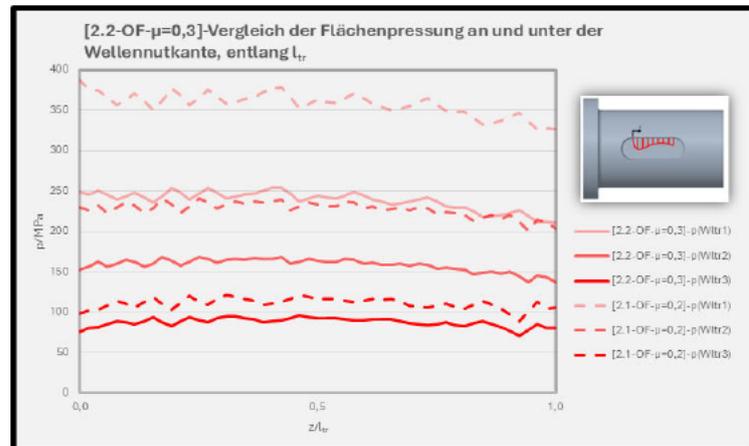
Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

106

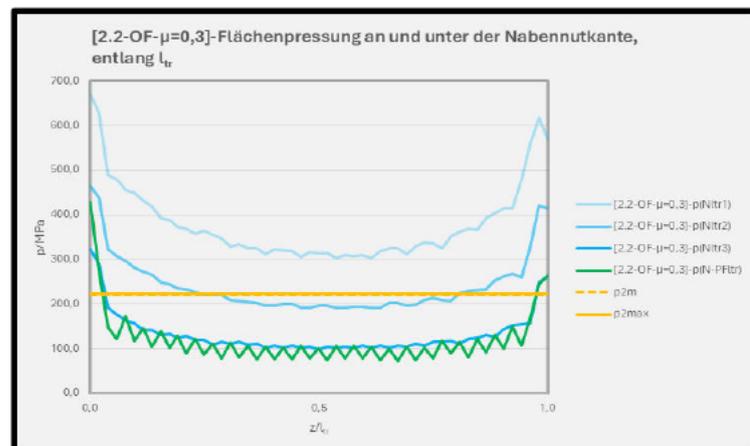
### [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Post-Proc: Vergleich CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Wellennutflanke

Im Vergleich zur vorherigen Berechnung [2.1-OF- $\mu=0,2$ ] wird hier neben der deutlichen Verringerung der Flächenpressung auch eine Absenkung des Gradienten deutlich



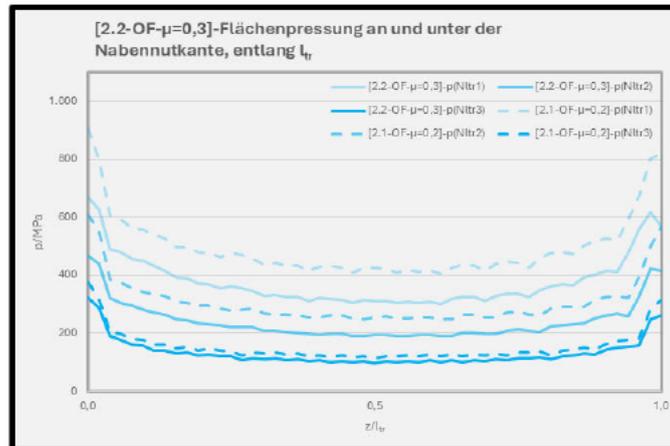
### [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Nabennutflanke

Der Wert der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke liegt weiterhin deutlich über den analytischen Ergebnissen der Methoden B und C nach DIN 6892. Qualitativ hat sich der Verlauf entlang der tragenden Länge der belasteten Nabennutflanke nicht verändert.



## [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Post-Proc: Vergleich CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Nabennutflanke

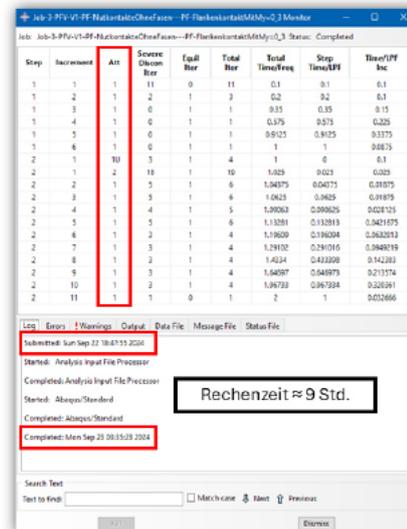
Genau wie bei der Welle wurde die Flächenpressung abgemildert und dessen Gradient reduziert.



## [2.2-OF- $\mu=0,3$ ]-Post-Proc: Fazit und Berechnungsdauer

Den Erwartungen entsprechend wird die Gesamtverschiebung der PF durch einen erhöhten Reibwert im „Passfederflankenkontakt“ reduziert. Außerdem konnte der Betrag der Flächenpressung in beiden Komponenten so weit reduziert werden, dass die Pressung in der Welle nun im Bereich des analytisch bestimmten Ergebnisses nach MB liegt. Bei der Verteilung der Flächenpressung in der Wellennutflanke konnte qualitativ noch kein Erfolg erzielt werden. In der belasteten Nabennutflanke behalten die Verläufe einen parabolischen Charakter.

Die Berechnungszeit mit einem  $\mu=0,3$  beträgt ca. 9 Std., weswegen hier leider keine Konvergenzprüfung der Flächenpressung möglich ist. Hierbei wird weiterhin ein Intel i5 Prozessor bei einer Auslastung von 4/4 Kerne genutzt. Innerhalb der Berechnung verläuft der Berechnungsschritt „Kontakt“ ohne Schwierigkeiten, während es im Schritt „Kraftaufbringung“ zu einer numerischen Instabilität kommt. Hier erkennt man, dass Berechnungen mit einem erhöhtem tangentialen Reibwerten numerisch fordernd sind und der Reibungskoeffizient mit Vorsicht hochgesetzt werden sollte.



## 2.3-2.5 Modell mit PF- Flankenkontakt Variation mit linearem Normalkontakt

[2.3-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,2]-[2.5-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Pre-Processing

### [2.3-2.5]-Pre-Proc: ‚Passfederflankenkontakt‘- Tangentialverhalten

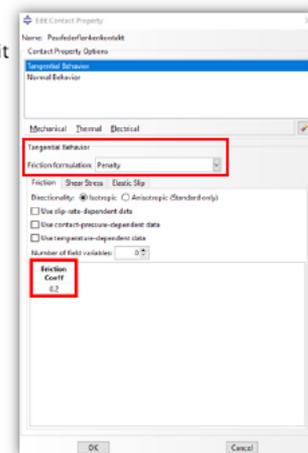
Die Berechnung mit einem erhöhten Reibungskoeffizienten von  $\mu=0,3$  [2.2-OF- $\mu=0,3$ ] liefert keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Außerdem liegt eine Rechenzeit von ca. 9 Std. nicht im Sinne des Nutzers. Deswegen wird der tangential Reibwert wieder von  $\mu=0,3$  auf  $\mu=0,2$  zurückgestellt.

**TB 4-1 Reibungszahlen**  
a) Haft- und Gleitreibungszahlen (Anhaltswerte für den Maschinenbau)

Werkstoffpaarung	Haftreibungszahl $\mu_0^1$		Gleitreibungszahl $\mu$	
	trocken <sup>2)</sup>	geschmiert	trocken <sup>2)</sup>	geschmiert
Stahl auf Stahl	0,2...0,8	0,10	0,2...0,2	0,10
Kupfer auf Kupfer	-	-	0,6...1,0	0,10
Stahl auf Gusseisen	0,2	0,10	0,20	0,05
Gusseisen auf Gusseisen	0,25	0,15	0,20	0,10
Gusseisen auf Cu-Legierung	0,25	0,15	0,20	0,10
Brennstoff auf Stahl	-	-	0,5...0,6	-
Stahl auf Eis	0,03	-	0,015	-
Stahl auf Holz	0,5...0,6	0,10	0,2...0,5	0,05
Holz auf Holz	0,4...0,6	0,15...0,20	0,2...0,4	0,10
Leder auf Metall	0,60	0,20	0,2...0,25	0,12
Gummi auf Metall	-	-	0,50	-
Kunststoff auf Metall	0,25...0,4	-	0,1...0,3	0,04...0,1
Kunststoff auf Kunststoff	0,3...0,4	-	0,2...0,4	0,04...0,1

<sup>1)</sup> Die Haftreibungszahl  $\mu_0$  einer Werkstoffpaarung ist meist geringfügig größer als die Gleitreibungszahl  $\mu$ . Sie ist nur für den Grenzfalle des Übergangs in die Bewegung definiert.  
<sup>2)</sup> Bei technisch üblichen, geringen Verunreinigungen.

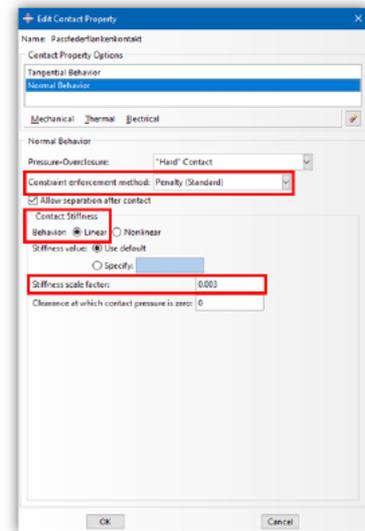
Reibungszahlen [RH 23]



## [2.3-2.5]-Pre-Proc: ‚Passfederflankenkontakt‘-Normalverhalten

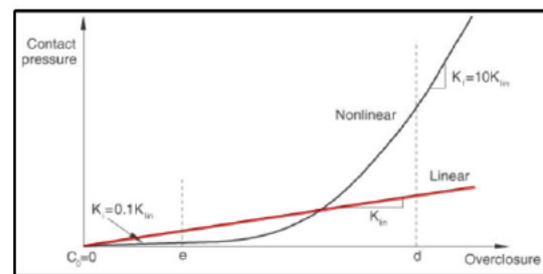
Anstatt weiter mit dem tangentialen Reibwerten zu experimentieren, wird ein neuer Ansatz für die Normalkontaktdefinition untersucht. Hierbei die ‚Constraint enforcement method‘ von ‚Default‘ auf ‚Penalty‘ wie bei der tangentialen Kontaktdefinition umgestellt. Weiterhin wird ein lineares Verhalten einer programmgesteuerten Steifigkeit („Stiffness Value“) eingestellt. Der Fokus in den kommenden Berechnungen liegt auf den ‚Stiffness scale factor‘ (kurz SSF), der mit folgenden Werten variiert wird:

- [2.3-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,2]: **SSF=0,2**
- [2.4-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,02]: **SSF=0,02**
- [2.5-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]: **SSF=0,003**



## [2.3-2.5]-Pre-Proc: ‚Passfederflankenkontakt‘-Normalverhalten

Diese Einstellung für ein weiches Normalverhalten („softened contact“) im Passfederflankenkontakt. Mit dieser Einstellung wird die Beziehung zwischen der Flächenpressung und dem gegenseitigen Eindringen der Wirkflächenpaare („pressure-overclosure“) approximiert. Die Kontaktkraft verhält sich dabei proportional zur gegenseitigen Eindringungstiefe der Kontaktpartner. Somit ein gewisses Maß an Penetration und damit mehr Verformung zwischen den Kontaktflächen zugelassen. Gleichzeitig sorgt diese Methode für numerische Stabilität und kann die Berechnungseffizienz steigern. [MIT-217]



Verhalten der Flächenpressung bei einem linearem „softened contact“ [MIT-217]

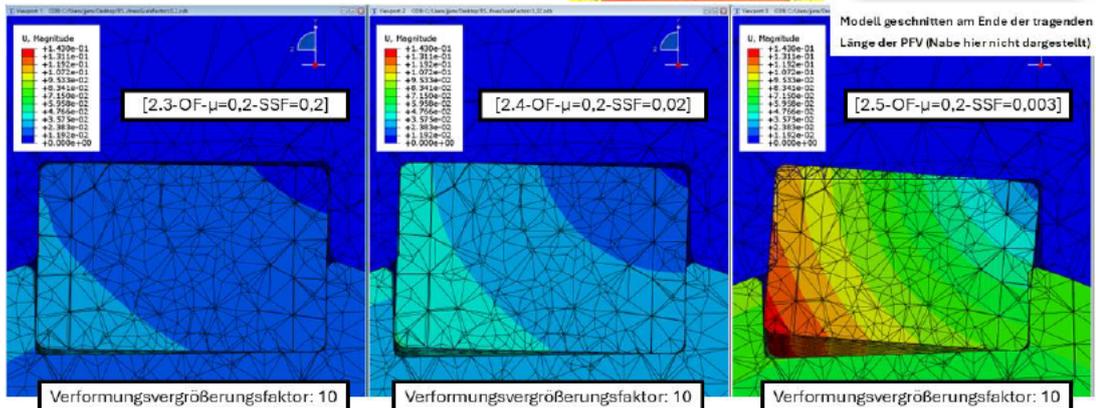
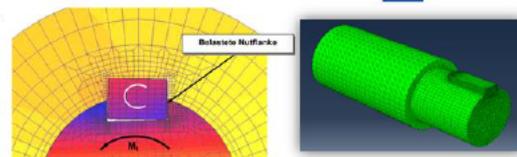
## 2.3-2.5 Modell mit PF-Flankenkontakt Variation mit linearem Normalkontakt

[2.3-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,2]-[2.5-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]

Post-Processing

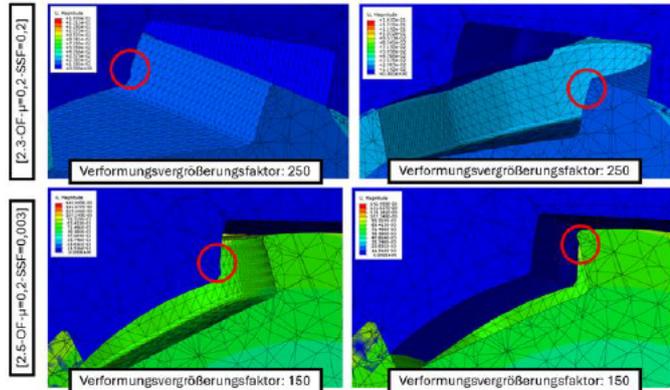
### [2.3-2.5]-Post-Proc: Verformungsfigur der PF in der PF-Nut

Qualitativ stimmt die Kippfigur nach wie vor mit der Verformungsfigur von Herrn Forbrig überein. Man kann deutlich erkennen, dass mit abnehmenden SSF die Modellverformung ansteigt. Gleichzeitig kann man in [2.5] eine deutliche Eindringung der PF in den Nabennutgrund erkennen.



## [2.3-2.5]-Post-Proc: Verformung der Nutkanten

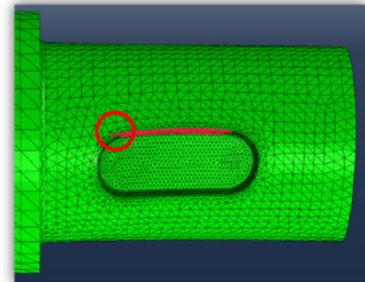
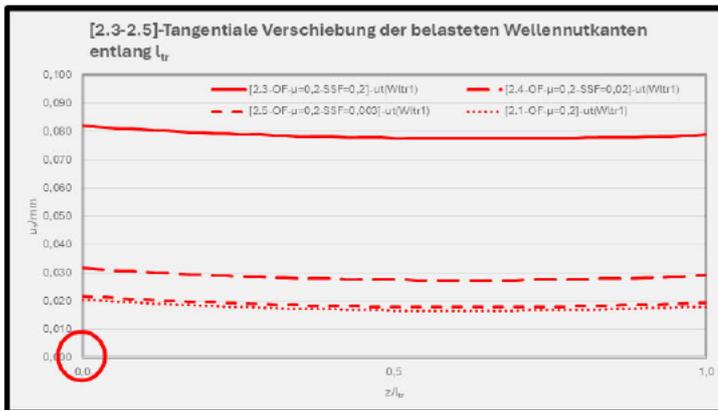
In den Berechnungen [2.3-2.5] kommt es zu keiner signifikanten Wölbung unterhalb den Nutkanten. Man sieht außerdem, dass die Verformung in [2.5] deutlich angestiegen ist. Außerdem bleibt ein sichtbarer Abdruck der PF in der belasteten Nabennutflanke erhalten.



## [2.3-2.5]-Post-Proc: Tangentiale Verschiebung der belasteten Wellennutkanten

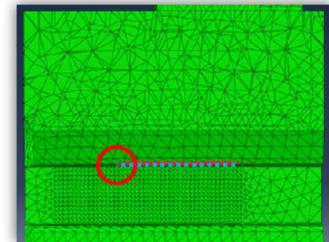
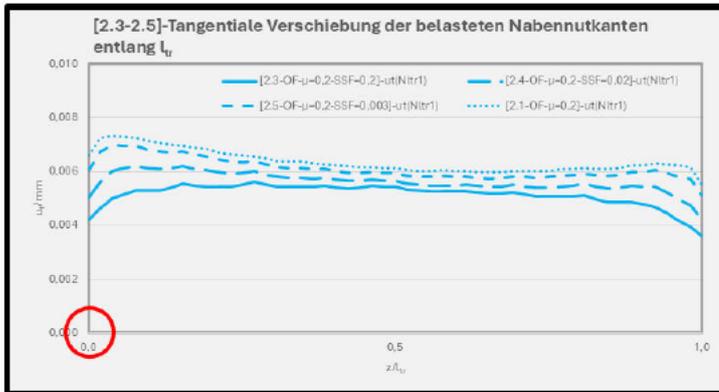
**Ergebnisvergleich mit Berechnung [2.1-OF-μ=0,2]**

Die tangentielle Verschiebung der Wellennutkante nimmt mit sinkendem Stiffness Scale Factor ab. Weiterhin liegt die tangentielle Verschiebung bei einem SSF=0,003 quantitativ im Bereich von der Berechnung [2.1].



### [2.3-2.5]-Post-Proc: Tangentiale Verschiebung der belasteten Nabennutkanten

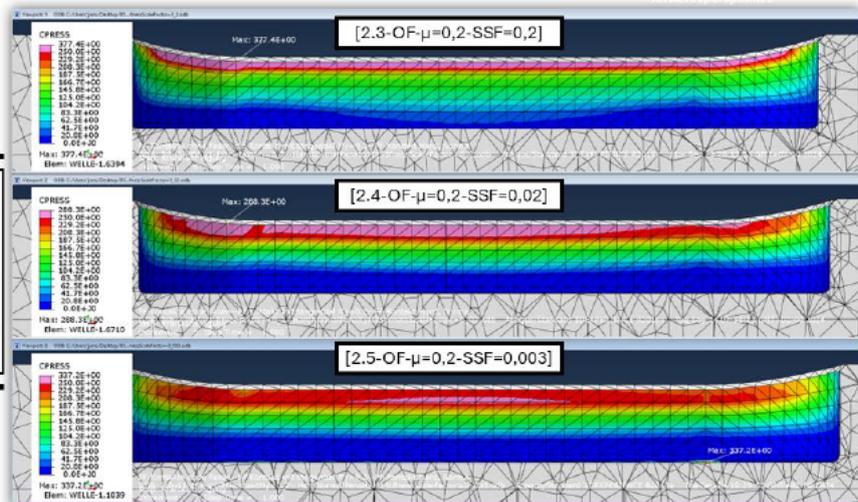
Die tangentielle Verschiebung der Nabennutkante nimmt gegensätzlich zur Welle mit kleiner werdenden SSF zu. Qualitativ ähneln sich die Verschiebungskurven der Nutkanten. Weiterhin nähert sich der Verlauf mit sinkendem SSF dem Ergebnis aus Berechnung [2.1] an.

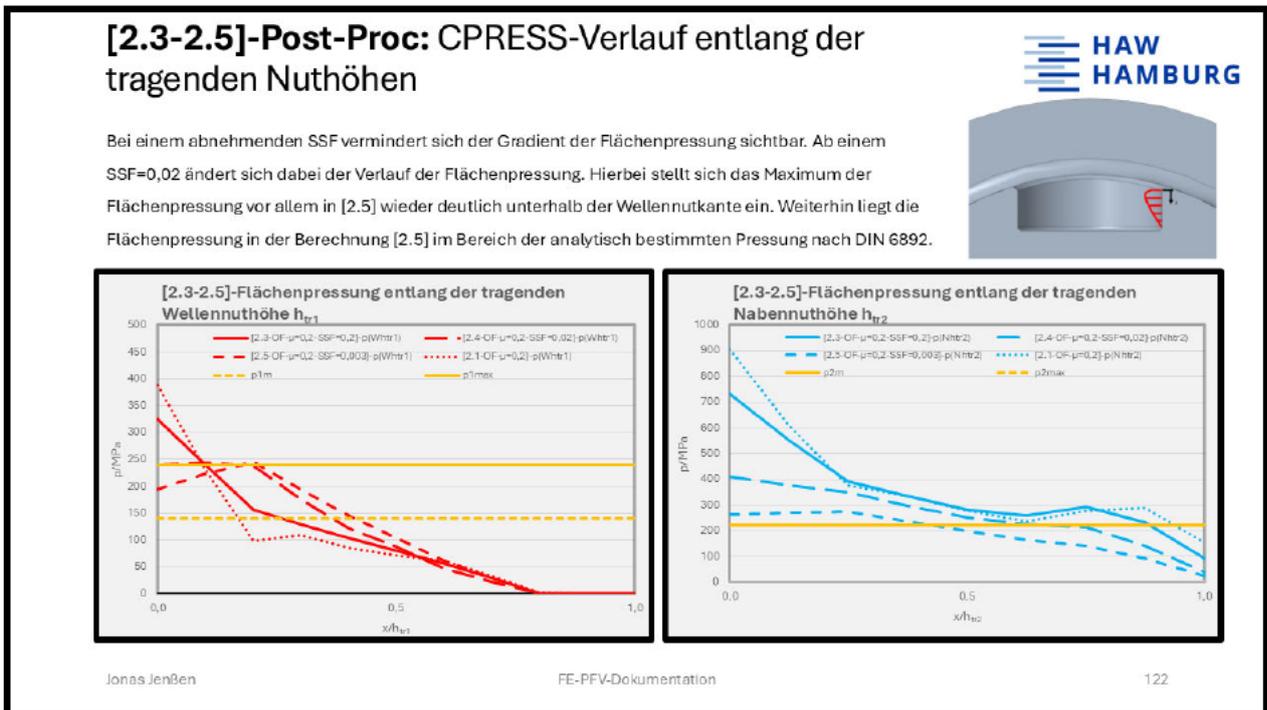
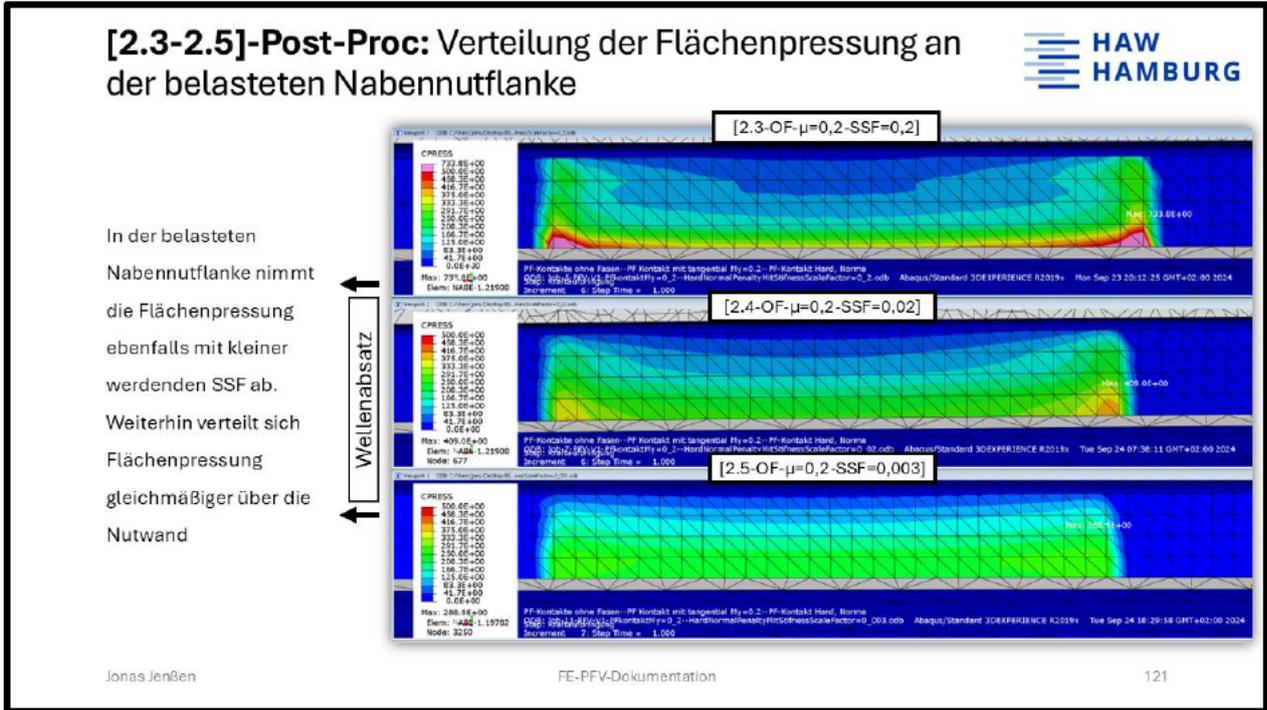


### [2.3-2.5]-Post-Proc: Verteilung der Flächenpressung an der belasteten Wellennutflanke

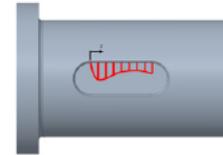
Verteilungen der Flächenpressung ähneln sich qualitativ. Dabei nimmt die Flächenpressung betragsmäßig mit abnehmenden SSF verringert.

Wellenabsatz

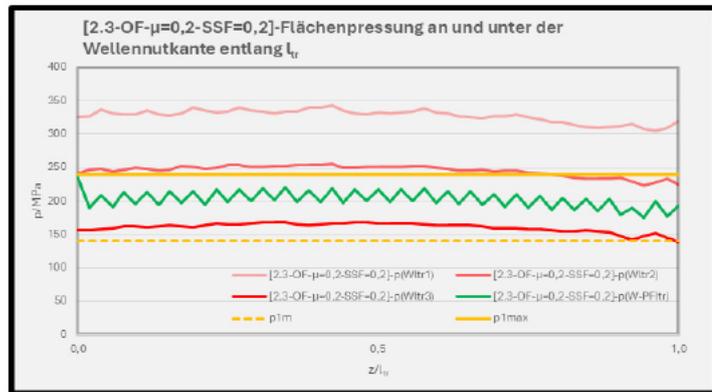




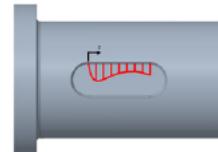
### [2.3-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,2]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Wellennutflanke



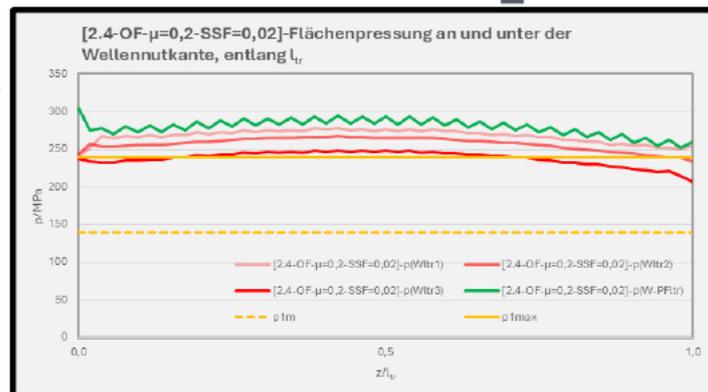
Die Verläufe der Flächenpressung in Berechnung [2.3] passen qualitativ nicht dem Verlauf aus dem Referenzergebnis. Dabei scheinen die maximalen Pressungen in der Mitte der tragenden Länge der Welle zu liegen. Weiterhin liegt die Pressung betragsmäßig über der analytisch bestimmten Flächenpressung nach MB. Darüber hinaus ist ein großer Gradient der Flächenpressung erkennbar



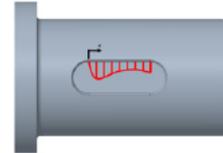
### [2.4-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,02]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Wellennutflanke



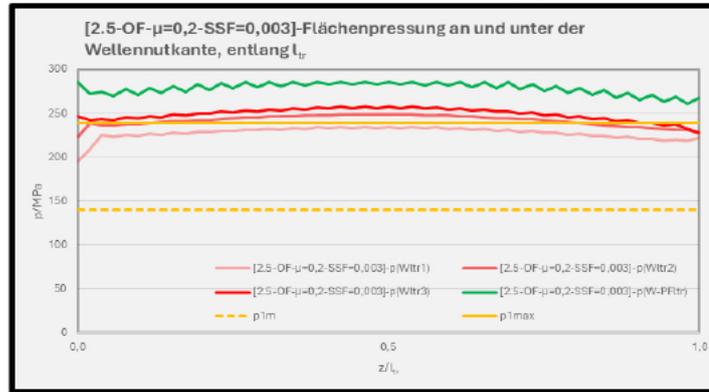
In der Berechnung [2.4] hat sowohl der Betrag als auch der Gradient der Flächenpressung deutlich abgenommen. Die Verläufe haben sich qualitativ nicht verbessert. Weiterhin liegen die Ergebnisse der Flächenpressung in der Nähe der analytisch bestimmten Ergebnisse für die Pressung nach MB.



**[2.5-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Wellennutflanke**

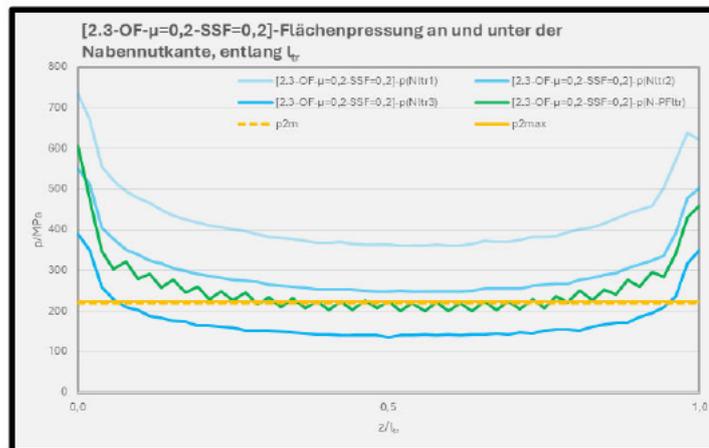


Bei einem  $SSF=0,003$  wird der Gradient und der Betrag der Flächenpressung weiter reduziert. Hierbei liegt die Flächenpressung im Bereich der analytisch bestimmten Pressung nach MB. Der qualitative Verlauf der Pressung hat sich hierbei nicht geändert und entspricht dem gewünschten Referenzergebnis.



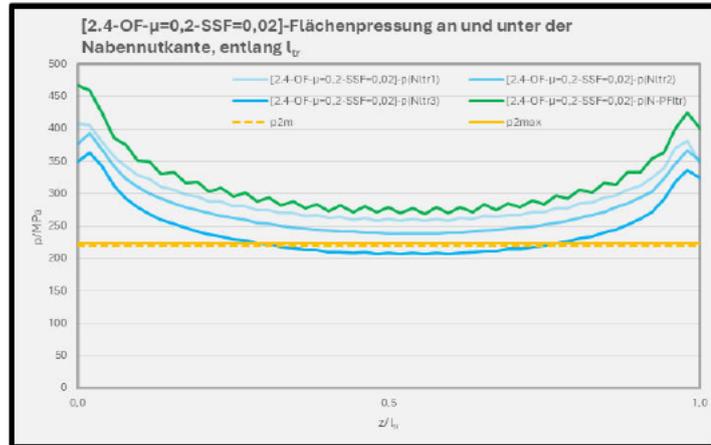
**[2.3-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,2]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Nabennutflanke**

Die Flächenpressung in der Nabe verläuft in der Berechnung [2.3] parabolisch. Hierbei lässt sich der hohe Gradient der Flächenpressung erkennen. Beträgsmäßig liegt die Flächenpressung über den analytisch bestimmten Ergebnissen nach DIN 6892.



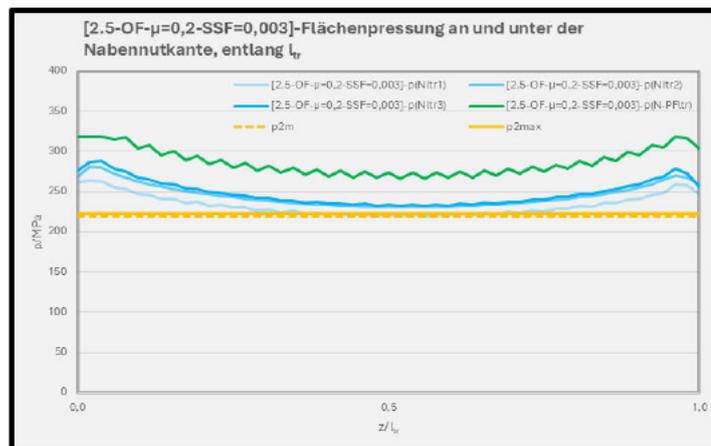
## [2.4-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,02]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Nabennutflanke

Mit einem  $SSF=0,02$  wird die Flächenpressung innerhalb der belasteten Nabennutflanke abgemildert. Hierbei liegen die Ergebnisse über der analytisch bestimmten Pressung nach DIN 6892. Ein parabolischer Verlauf bleibt weiterhin erhalten.



## [2.5-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Nabennutflanke

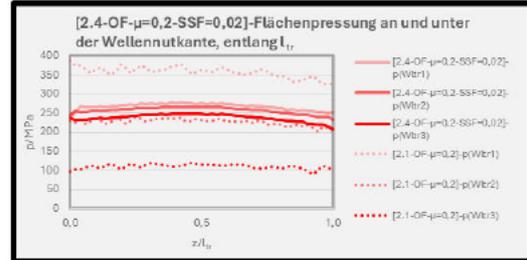
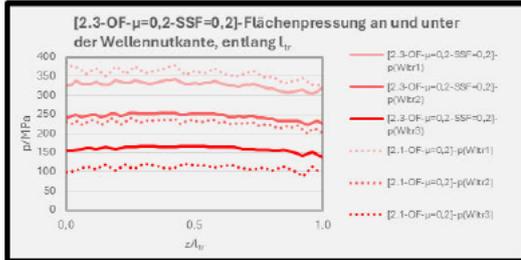
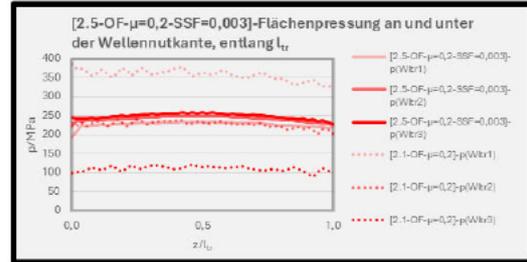
In der Berechnung [2.5] wird die Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke weiterhin reduziert. Hierbei ist der parabolische Verlauf deutlich abgeflacht. In dieser Darstellung wird sichtbar, dass die Flächenpressung betragsmäßig nicht im Bereich der analytisch bestimmten Pressungen liegen, wie zunächst angenommen.



### [2.3-2.5]-Post-Proc: Vergleich der CPRESS Verteilung in der Welle



Mit kleiner werdenden SSF wird sowohl der Betrag als auch der Gradient der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke reduziert. Die Reduzierung der Flächenpressung mildert ab einem SSF=0,02 ab. Der qualitative Verlauf der Flächenpressung wurde dabei nicht verbessert.



Jonas Jenßen

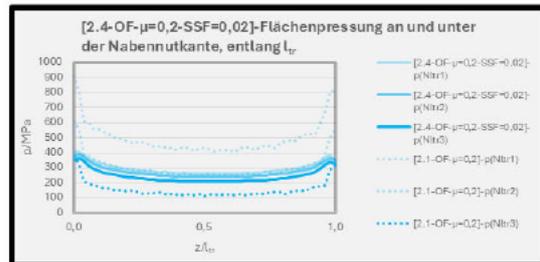
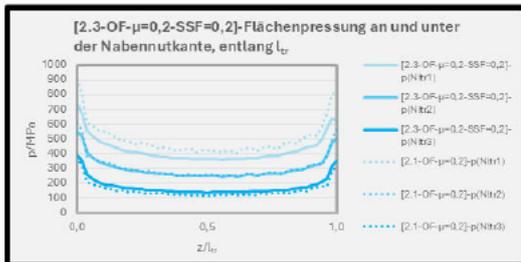
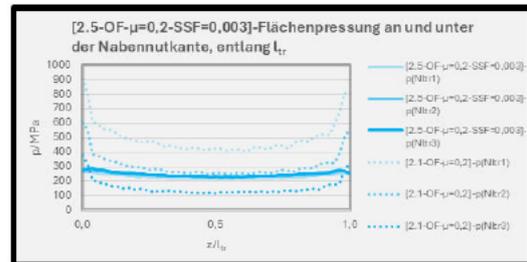
FE-PFV-Dokumentation

129

### [2.3-2.5]-Post-Proc: Vergleich der CPRESS Verteilung in der Nabe



Der Einfluss des SSF auf die Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke kann auf die Nabe übertragen werden.



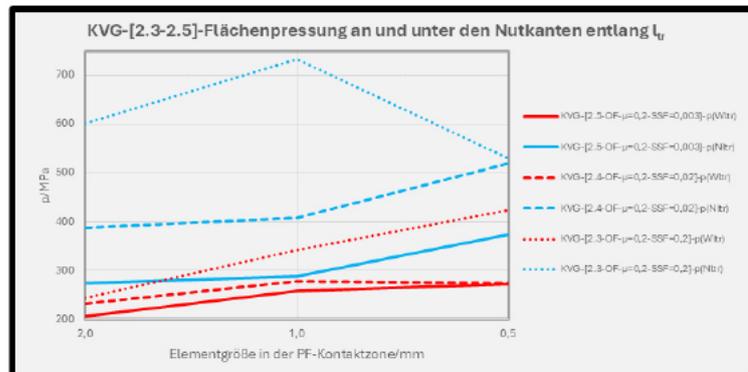
Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

130

## [2.3-2.5]-Konvergenzbetrachtung

In der Welle konvergiert die Flächenpressung vermutlich nur in den Berechnungen [2.4] und [2.5]. Bei der Berechnung [2.3] kündigt sich eine Konvergenz der Flächenpressung in dieser Darstellung nicht an. Die Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke lässt in dieser Betrachtung ebenfalls keine Konvergenz der Ergebnisse erkennen.



## [2.3-2.5]-Post-Proc: Fazit

Bei den Verformungsfiguren der Passfeder in der PF-Nut hat dessen Kippbewegung mit abnehmenden SSF sichtbar zugenommen. Gleichzeitig wird beim Ergebnis der Berechnung [2.5] eine Eindringung der PF in den Nabennutgrund sichtbar. Die tangentielle Verschiebung der Wellennutkante hat sich bei einem qualitativ gleichbleibenden Verlauf bei einem kleiner werdendem SSF verringert. Dabei verläuft der Verlauf bei einem SSF=0,003 fast deckungsgleich mit dem Ergebnis aus Berechnung [2.1]. Bei der Nabe ist die tangentielle Verschiebung der Nutkante mit abnehmenden SSF leicht angestiegen. Hierbei ähnelt der Verlauf in Berechnung in [2.3] eher der Verschiebung einer Wellennutkante. Bei einem kleiner werdendem SSF nähert sich der Verlauf der tangentialen Verschiebung der Nabennutkante dem Ergebnis der Berechnung [2.1] an, wie es bei der Welle der Fall ist. Ein sinkender SSF bewirkt weiterhin eine Abminderung des Betrages und des Gradienten der Flächenpressung in den belasteten Nutflanken. Hierbei kann der Betrag der Flächenpressung in der Wellennutflanke in den Bereich der analytisch bestimmten Pressung nach MB gebracht werden. Qualitativ entspricht der Verlauf der Flächenpressung entlang der tragenden Wellennuthöhe dem Referenzergebnis. Der Verlauf entlang der tragenden Wellennutlänge ist jedoch auch in dieser Berechnung nicht zufriedenstellen. Zusammenfassend wird mit einer Verringerung des SSF die Kontaktzone deutlich nachgiebiger bei einer gleichzeitigen Reduzierung der Flächenpressung.

## [2.3-2.5]-Post-Proc: Berechnungsdauer



Alle Berechnungen laufen stabil mit einer Berechnungsdauer von 2 Stunden (Intel i5 Prozessor mit 4/4 Kernen Auslastung).

Step	Increment	Alt	Severe Discr. Res	Equip. Res	Total Res	Total Time/Freq	Step Time/FF	Time/FF Inc
1	1	1	5	1	10	0.1	0.1	0.1
1	2	1	2	1	3	0.2	0.2	0.1
1	3	1	0	1	1	0.35	0.35	0.15
1	4	1	0	1	1	0.375	0.375	0.225
1	5	1	0	1	1	0.9125	0.9125	0.3375
1	6	1	0	1	1	1	1	0.3875
2	1	1	10	1	10	1.1	0.1	0.1
2	2	1	3	2	5	1.2	0.2	0.1
2	3	1	4	0	4	1.25	0.25	0.15
2	4	1	4	0	4	1.375	0.375	0.225
2	5	1	4	1	5	1.9125	0.9125	0.3375
2	6	1	2	1	3	2	1	0.3875

Rechenzeit ≈ 2 Std.

[2.3-OF- $\mu=0,2$ -SSF=0,2]

Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

133

## Anhang C8

# 2.6-Modell mit PF-Flankenkontakt mit SSF=0,003 und MF

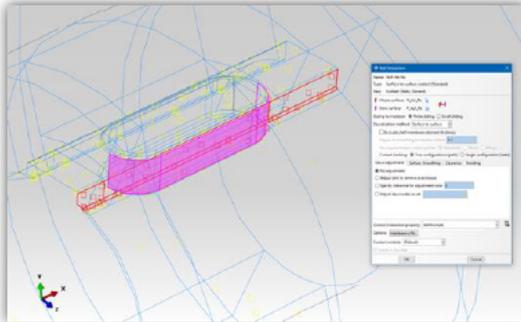


[2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]

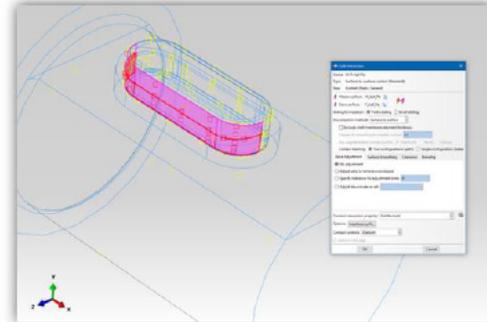
Pre-Processing

## [2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Pre-Proc: Modelländerungen

Um den Einfluss der Fasen an der Wellen- und Nabennutkanten weiter zu untersuchen, werden die Fasen wieder in die Flankenkontakte implementiert. Weiterhin bleibt ein SSF von 0,003 eingestellt. Somit ergibt sich eine Modellstruktur wie in Berechnung [2.5] mit einer Rückführung der Fasen in die Flankenkontaktpaarungen.



Jonas Jenßen



FE-PFV-Dokumentation

135

## 2.6-Modell mit PF- Flankenkontakt mit SSF=0,003 und MF

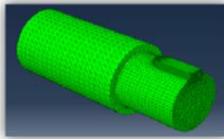
[2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]

Post-Processing

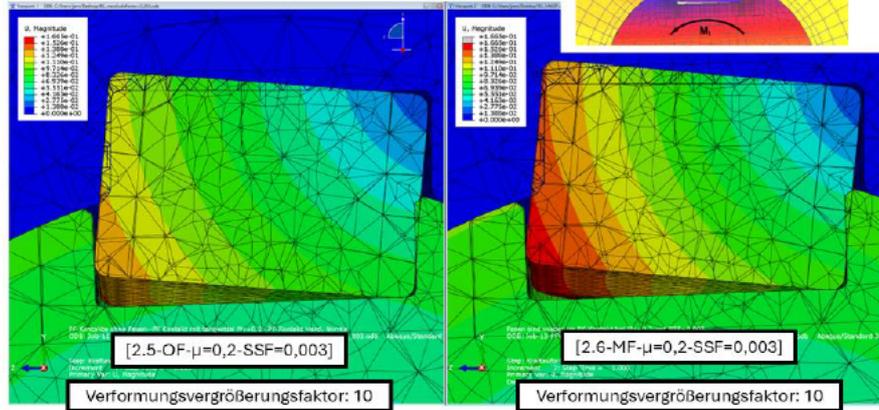
**[2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: Verformungsfigur der PF in der PF-Nut**



Qualitativ bleibt die Verformungsfigur der PF in der PF-Nut zufriedenstellend. Im Vergleich zum Ergebnis der Berechnung [2.5] ist die Kippbewegung der Berechnung [2.6] leicht angestiegen.



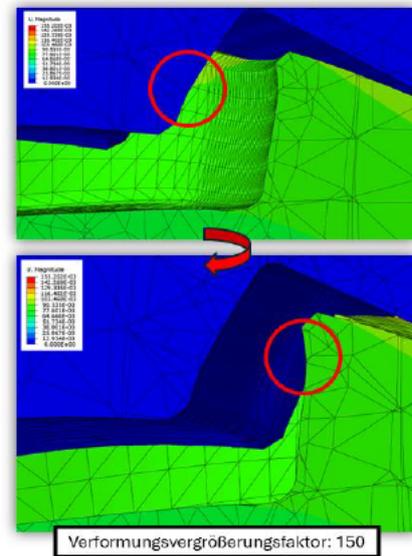
Modell geschnitten am Ende der tragenden Länge der PFV (Nabe hier nicht dargestellt)



**[2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: Verformung der Nutkanten**

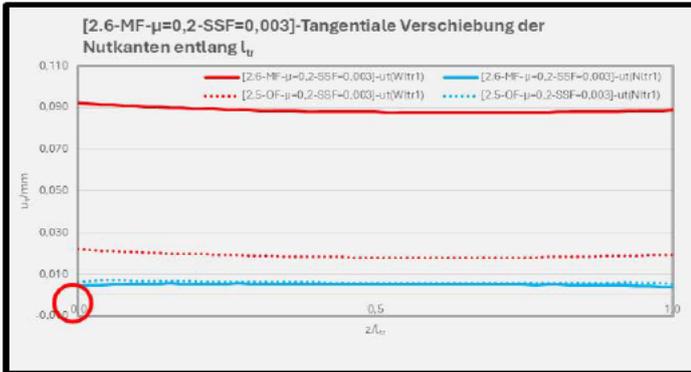


Die Verformung der belasteten Nutflanken ähnelt sich mit dem Ergebnis der Berechnung [2.5]. Hierbei lässt sich zum einen eine vergleichsweise große Verformung in der Kontaktzone zur PF erkennen. Gleichzeitig bleibt eine leichte Wölbung der Nutwand unterhalb der Nutkante erhalten. Hierbei scheinen die Fasen in den Flankenkontaktpaaren keinen Einfluss auf die Nutflankenverformung auszuüben.



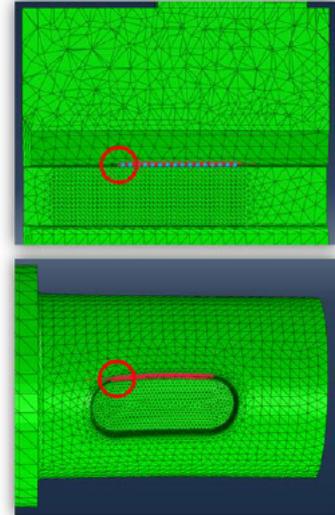
### [2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: Tangentiale Verschiebung der belasteten Nutkanten

Mit der Rückkehr der Fasen in die Flankenkontaktpaarungen steigt die tangentielle Verschiebung der Wellennutkante betragsmäßig deutlich an. Gegensätzlich zur Welle verläuft Verlauf der Verschiebung der Nabennutkante näherungsweise deckungsgleich mit dem Ergebnis der Berechnung [2.5]. Qualitativ ergeben sich keine Änderungen in den Verläufen der tangentialen Verschiebung.



Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

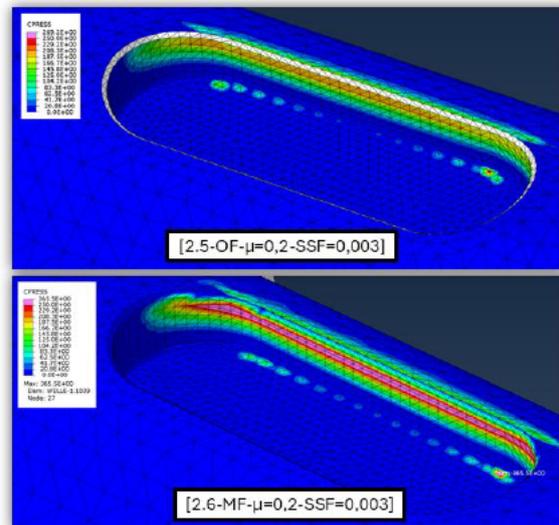


139

### [2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: Verteilung der Flächenpressung an der belasteten Wellennutflanke - Vergleich

Durch Rückführung der Fasen in die Flankenkontaktpaarungen stellt sich die größte Flächenpressung wie in der Berechnung [2-AM] die größte Flächenpressung unterhalb der Wellennutkante ein.

Wellenabsatz



Jonas Jenßen

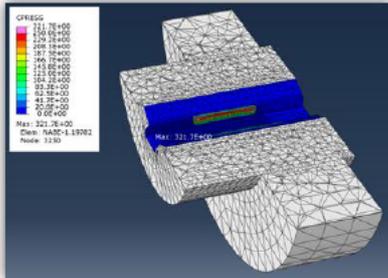
FE-PFV-Dokumentation

140

**[2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: Verteilung der Flächenpressung an der belasteten Nabennutflanke - Vergleich**

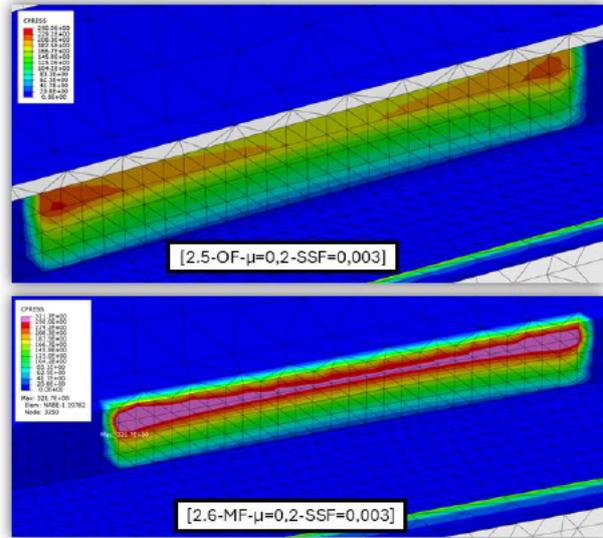


In der belasteten Nabennutflanke stellt sich ebenfalls eine Konzentration der Flächenpressung unterhalb der Nutkante ein. Die größte Flächenpressung herrscht weiterhin an den des tragenden Nabennutbereiches.



Jonas Jenßen

Wellenabsatz



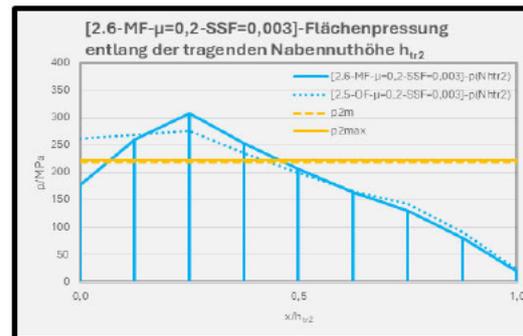
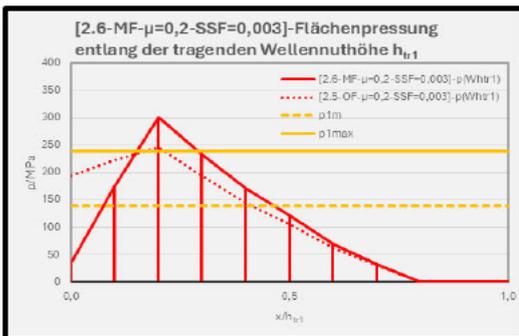
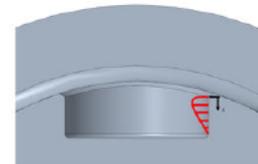
FE-PFV-Dokumentation

141

**[2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der tragenden Nuthöhen**



Entlang der tragenden Nuthöhen stellt sich mit der Rückkehr der Fasen in die Flankenkontaktpaarungen sowohl in der Welle als auch in der Nabe wieder ein großer Gradient der Flächenpressung ein. Gleichzeitig wird der Betrag der Flächenpressung erhöht.



Jonas Jenßen

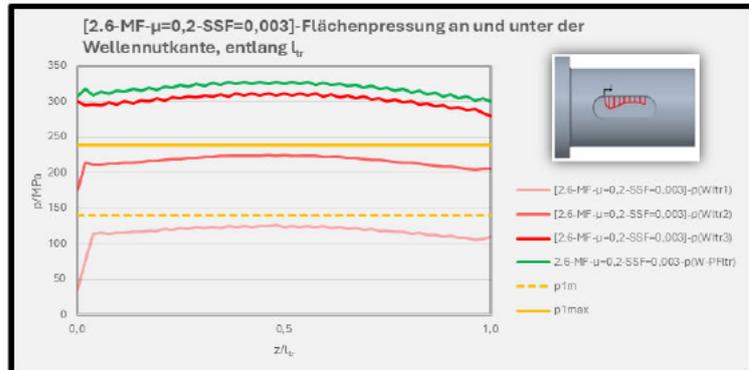
FE-PFV-Dokumentation

142

**[2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Wellennutflanke**



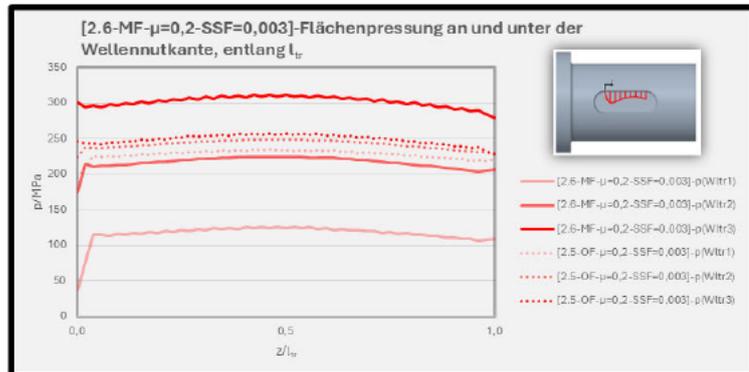
Auch in dieser Darstellung wird der große Gradient der Flächenpressung sichtbar. Hierbei liegt die Flächenpressung wieder betragsmäßig über der analytisch bestimmten Pressung nach MB. Die Flächenpressung an der Passfeder übersteigt die Pressung in der belasteten Wellennutflank nur leicht. Qualitativ ergeben sich keine signifikanten Änderungen am Verlauf der Flächenpressung.



**[2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: Vergleich CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Wellennutflanke**



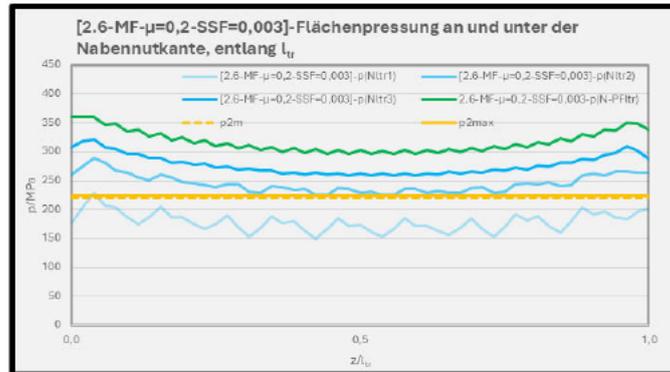
Hier wird ebenfalls deutlich, dass das Zurückführen der Fasen in die Flankenkontaktpaarungen sowohl den Gradienten als auch den Betrag der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke erhöht.



**[2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Nabennutflanke**



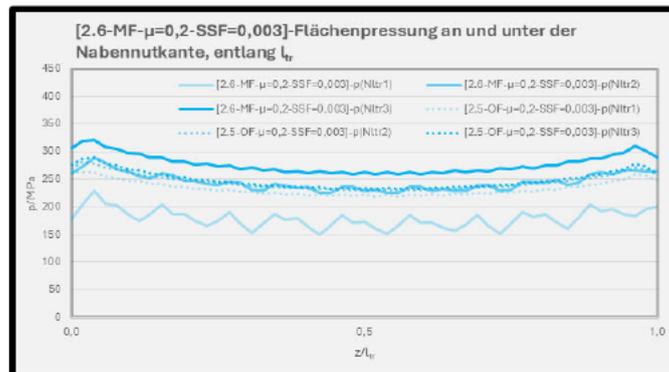
Der Verlauf der Flächenpressung behält einen näherungsweise parabolischen Verlauf bei. Betragsmäßig liegen die Pressungen über den analytisch bestimmten Pressungen nach der DIN 6892.



**[2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: Vergleich CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Nabennutflanke**

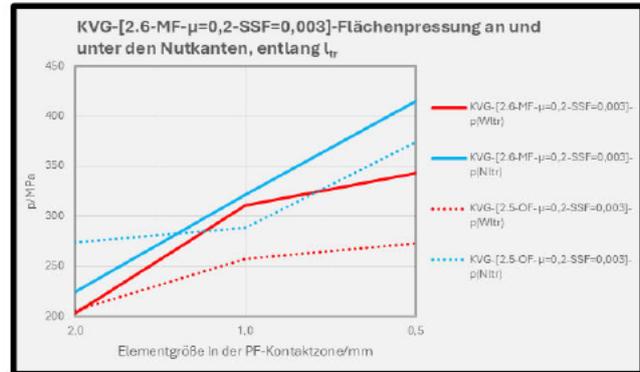


Auch in der Nabe wird der Gradient und der Betrag der Flächenpressung durch die Wiederkehr der Fasen in die Kontaktpaarungen erhöht. Diese Erhöhung fällt im Vergleich zur Welle jedoch kleiner aus.



## [2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: Konvergenzbetrachtung

Die Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke könnte ebenso in der Berechnung [2.5] mit feiner werdendem Netz in der PF-Kontaktzone konvergieren. Eine Konvergenz der Flächenpressung in der Nabennutflanke findet in dieser Betrachtung nicht statt.



## [2.6-MF- $\mu=0,2$ -SSF=0,003]-Post-Proc: Berechnungsdauer

Zusammenfassend hat die Rückführung der Fasen in die Flankenkontaktpaarungen keinen signifikanten Einfluss auf das Verformungsverhalten in der PF-Kontaktzone ausgeübt. Gleichzeitig wird jedoch der Betrag und der Gradient der Flächenpressung in den belasteten Nutflanken erhöht, sodass diese die analytisch bestimmten Pressungen übersteigen. Die qualitativen Verläufe entlang der tragenden Wellennutlänge bleiben weiterhin nicht zufriedenstellend.

Die Berechnung läuft stabil mit 2 ½ Std. Rechenzeit bei einem Intel i5 Prozessor mit 4/4 Kernen Auslastung.

Step	Increment	Alt	Severe Discn	Equl	Total	Total	Step	Time/FF
			Iter	Iter	Time/Freq	Time/FF	Iter	Iter
1	1	1	8	1	9	0.1	0.1	0.1
1	2	1	2	1	3	0.2	0.2	0.1
1	3	1	9	1	1	0.26	0.26	0.15
1	4	1	9	1	1	0.175	0.175	0.225
1	5	1	9	1	1	0.9125	0.9125	0.3375
1	6	1	9	1	1	1	1	0.4875
2	1	1	10	9	10	1.175	0.175	0.675
2	2	1	8	9	9	1.25	0.25	0.875
2	4	1	4	1	5	1.2625	0.2625	0.9125
2	5	1	11	9	11	1.5125	0.5125	0.9875
2	6	1	8	9	9	1.7647	0.7647	0.99125
2	7	1	4	1	5	2	1	0.29625

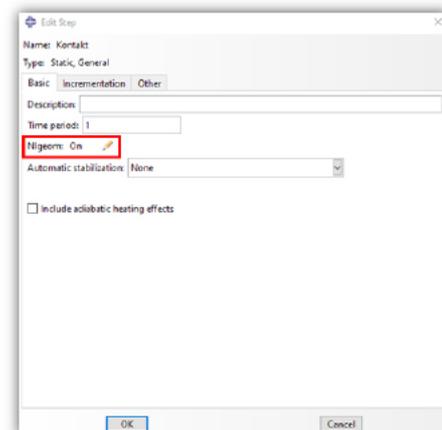
## 2.7-Modell mit nichtlinearer Geometrie

[2.7-OF- $\mu=0,2$ -Nlgeom]  
Pre-Processing

### [2.7-OF- $\mu=0,2$ -Nlgeom]-Pre-Proc:

Für die letzte Berechnung wird ein nichtlineares Geometrieverhalten (in Abaqus „Nlgeom“) eingestellt. Diese Einstellung eignet sich, wenn sich durch die einwirkenden Belastungen große Verformungen und Verschiebungen im FE-Modell ergeben [3ds-219]. Die Aktivierung einer nichtlinearen Geometrie erfolgt dabei in den Einstellungen eines erstellten Berechnungsschrittes.

Für diese Berechnung wird die FE-Struktur der Berechnung [2.1-OF- $\mu=0,2$ ] verwendet.

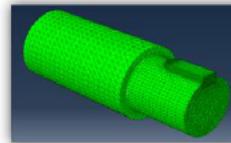


# 2.7-Modell mit nichtlinearer Geometrie

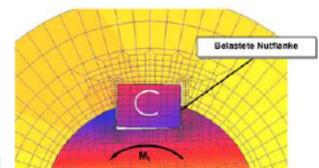
[2.7-OF- $\mu=0,2$ -Nlgeom]  
Post-Processing

## [2.7-OF- $\mu=0,2$ -Nlgeom]-Post-Proc: Verformungsfigur der PF in der PF-Nut

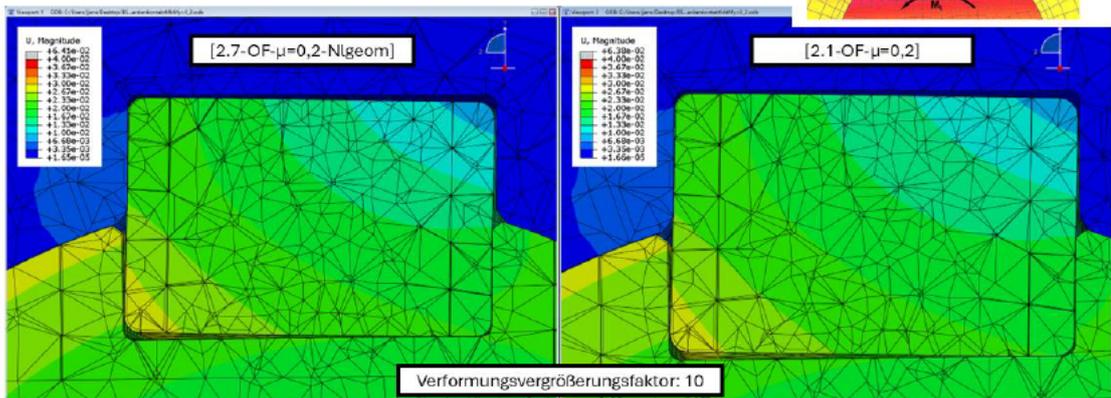
Es ergeben sich keine Änderungen im Verformungsverhalten des Modells.



Modell geschnitten am Ende der tragenden Länge (Nabe ausgeblendet)



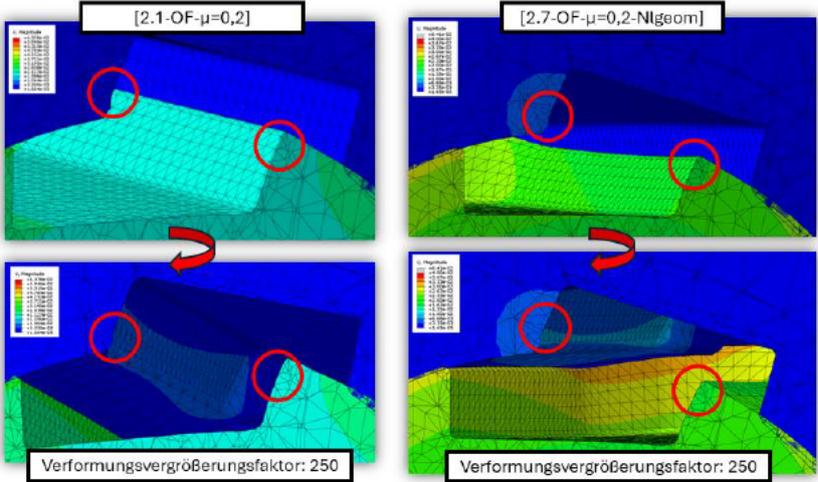
Belastete Nutflanke



### [2.7-OF- $\mu=0,2$ -Nlgeom]-Post-Proc: Verformung der Nutflanken



Es stellen sich die gleichen Verformungen in den Nutflanken wie in der Berechnung [2.1] ein



Verformungsvergrößerungsfaktor: 250

Verformungsvergrößerungsfaktor: 250

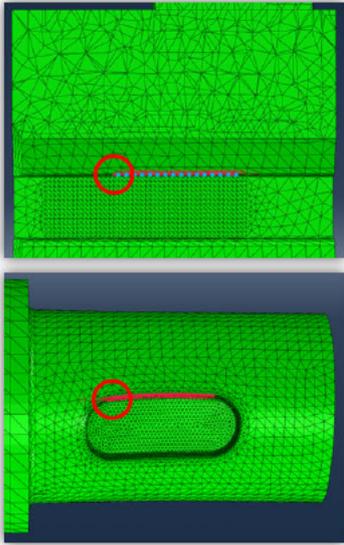
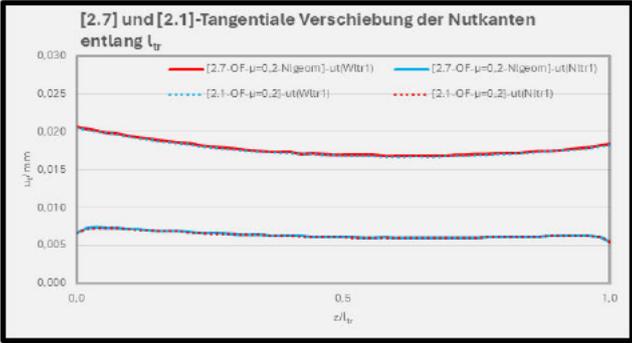
Jonas Jenßen FE-PFV-Dokumentation 153

### [2.7-OF- $\mu=0,2$ -Nlgeom]-Post-Proc: Tangentiale Verschiebung der belasteten Nutkanten



Die tangentielle Verschiebung der Nutflanken verhält sich analog zur Berechnung [2.1].

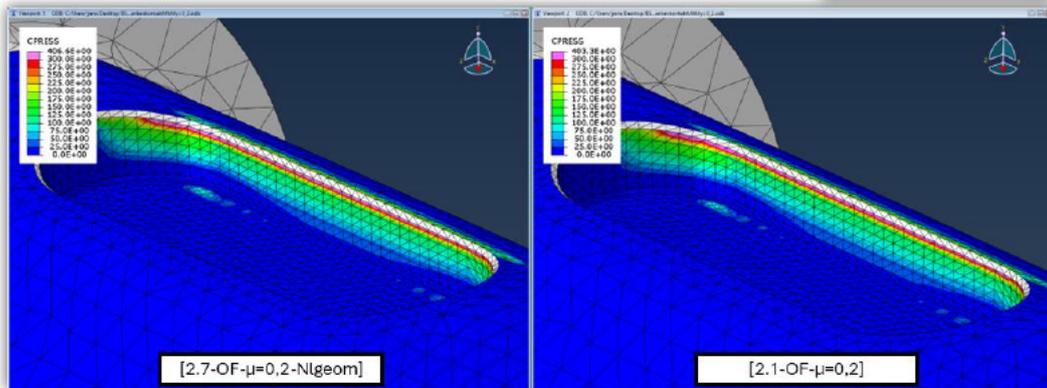
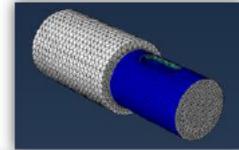
**Vorsicht: Für Berechnung [2.1] werden die Farbgebung für die Welle und die Nabe getauscht**

Jonas Jenßen FE-PFV-Dokumentation 154

### [2.7-OF- $\mu=0,2$ -Nlgeom]-Post-Proc: Verteilung der Flächenpressung an der belasteten Wellennutflanke

Bei der Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke ergibt sich auch ein nahezu gleiches Ergebnis wie in Berechnung [2.1].



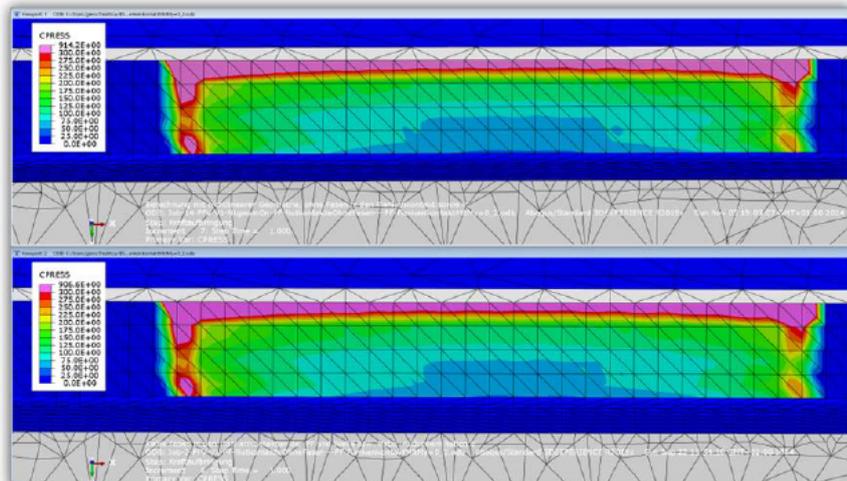
Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

155

### [2.7-OF- $\mu=0,2$ -Nlgeom]-Post-Proc: Verteilung der Flächenpressung an der belasteten Nabennutflanke

Bei der Verteilung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke ergibt sich ebenfalls ein nahezu gleiches Ergebnis wie in Berechnung [2.1].



Jonas Jenßen

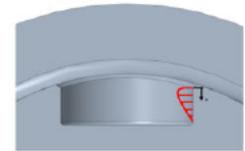
FE-PFV-Dokumentation

156

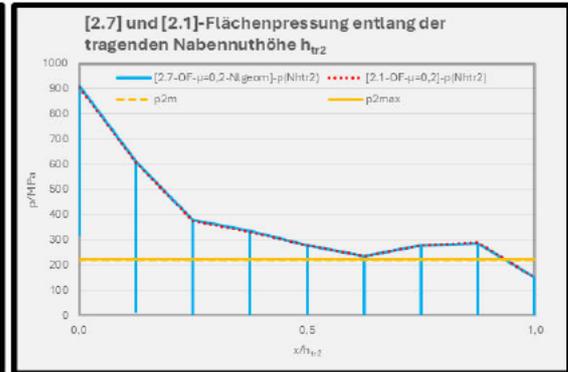
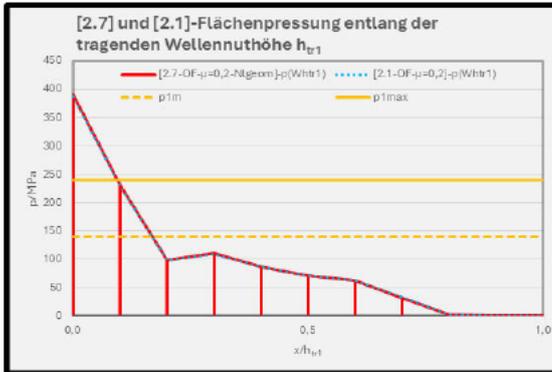
### [2.7-OF- $\mu=0,2$ -Nlgeom]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der tragenden Nuthöhen



Die Verläufe entlang der tragenden Nuthöhen laufen deckungsgleich mit den Ergebnissen der Berechnung [2.1].



**Vorsicht: Für Berechnung [2.1] werden die Farbgebung für die Welle und die Nabe getauscht.**



Jonas Jenßen

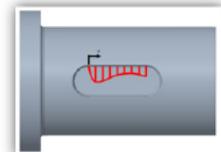
FE-PFV-Dokumentation

157

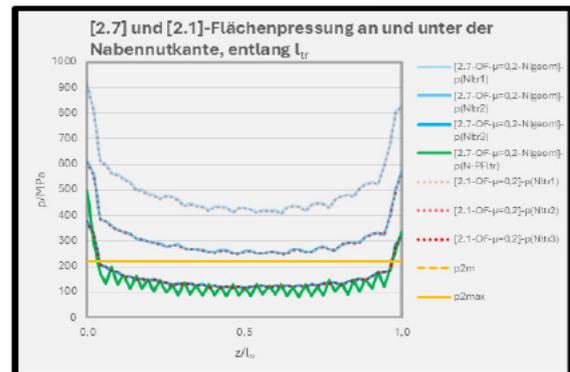
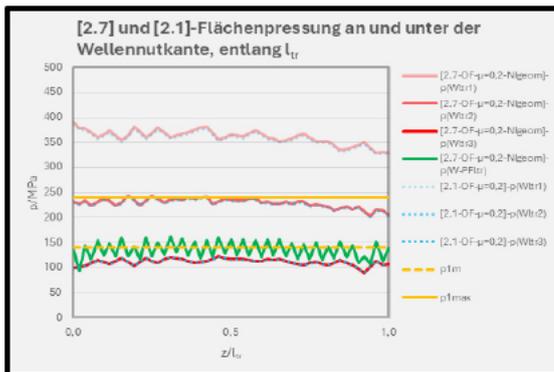
### [2.7-OF- $\mu=0,2$ -Nlgeom]-Post-Proc: CPRESS-Verlauf entlang der belasteten Nutflanken



Entlang der tragenden Nutlängen ergeben sich ebenfalls die gleichen Verläufe wie in Berechnung [2.1].



**Vorsicht: Für Berechnung [2.1] werden die Farbgebung für die Welle und die Nabe getauscht.**



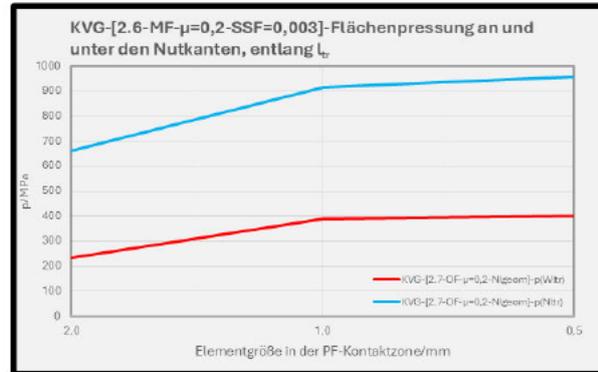
Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

158

## [2.7-OF- $\mu=0,2$ -Nlgeom]-Post-Proc: Konvergenzbetrachtung

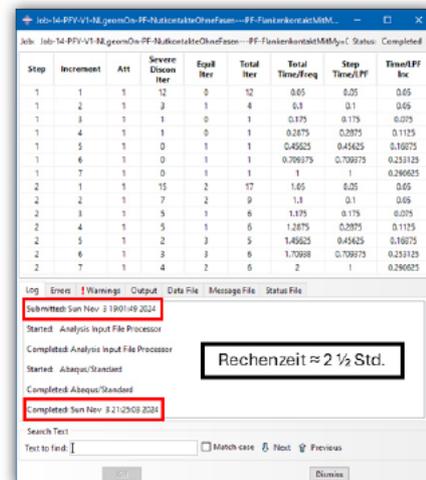
Hierbei kann von einer Konvergenz der Flächenpressung in der belasteten Wellen- und Nabennutflanke ausgegangen werden.



## [2.7-OF- $\mu=0,2$ -Nlgeom]-Post-Proc: Fazit und Berechnungsdauer

Mit der Modellstruktur der Berechnung [2.1-OF- $\mu=0,2$ ] in Verbindung mit einer nichtlinearen Geometrie werden nahezu die gleichen Ergebnisse erzeugt.

Bei einem Intel i5 Prozessor mit 4/4 Kernen Auslastung beträgt die Berechnungszeit mit allen Kernen ca. 2 ½ Stunden.

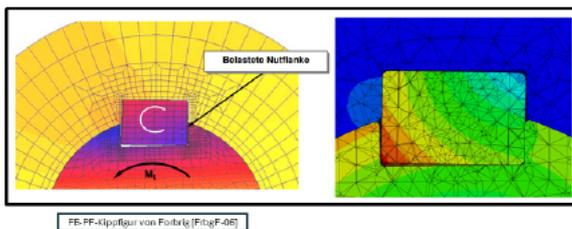


## Bewertung der Modellverformung

Die Verformungsfigur der PF in der PF-Nut stimmt in allen Berechnungen näherungsweise mit dem Referenzergebnis von Forbrig überein. Hierbei bildet sich durch das einwirkende Torsionsmoment eine Weitung der Wellen- und Nabennut. Hierdurch erhält die Passfeder Freiraum für eine Kippbewegung in der PF-Nut. Bei einem „Softened Contact“ bei geringen SSF-Werten dringt die PF in den Nabennutgrund ein.

Die starke lokale Verformung der Nutflanken unterhalb der Nutkanten kann durch das Entfernen der Fasen aus den Flankenkontaktpaarungen (s. [2.1]) oder durch einen „Softened Contact“ mit geringen SSF-Werten (s. [2.6]) vermindert werden. Weiterhin ist in allen Ergebnissen ein Abdruck der Passfeder in der Nabennutwand erkennbar, was ein sinnvolles Verhalten ist.

Bei der tangentialen Verschiebung der belasteten Nutkanten ergeben sich lediglich quantitative Unterschiede. In der Welle entsteht infolge der abnehmenden Wellenverdrehung ein gekrümmter Verlauf, dessen Verschiebung auf der Lasteinleitungsseite größer ist. In der tangentialen Verschiebung der Nabennutflanke wird weiterhin ein Abdruck der PF deutlich. Beide Ergebnisse erscheinen grundsätzlich sinnvoll.



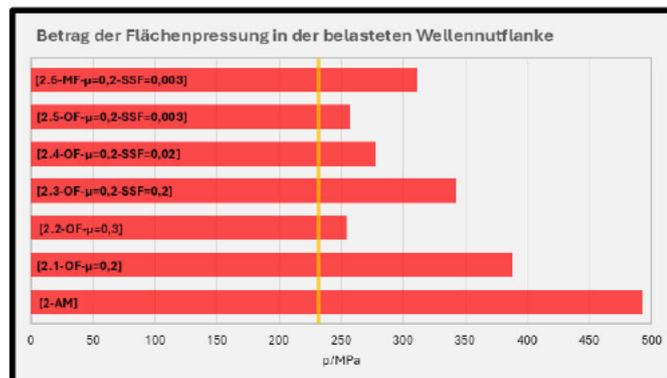
Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

161

## Quantitative Bewertung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke

Mit allen hier durchgeführten Modellvariationen wird der Betrag der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke abgemildert. Hierbei führt erhöhter tangentialer Reibwert sowie ein „softened“ Normalkontakt zu einer deutlichen Reduzierung der Flächenpressung. Gleichzeitig liegen die Pressungen dieser Berechnungen am dichtesten an der analytisch bestimmten Flächenpressung nach MB der DIN 6892 (gelber Balken).



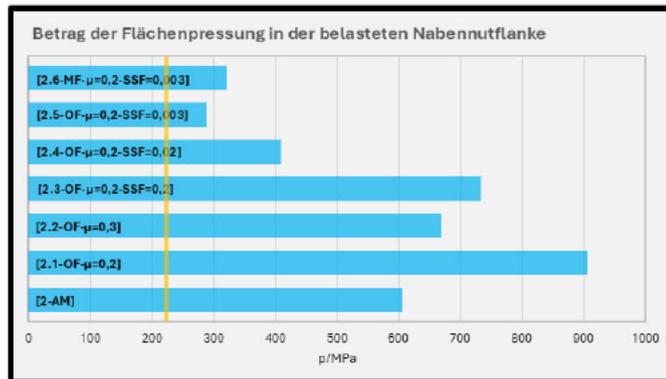
Jonas Jenßen

FE-PFV-Dokumentation

162

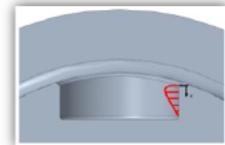
## Quantitative Bewertung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke

In der Nabe hat das Entfernen der Fasen aus den Flankenkontakten sowie die Erhöhung des Reibungskoeffizienten zu einer deutlichen Erhöhung der Flächenpressung geführt. Bei einem „Softened Contact“ mit geringen SSF-Werten kann die Pressung in der Nabe deutlich reduziert werden. Der Betrag der Flächenpressung in der Berechnung [2.5] liegt dabei am dichtesten an der analytisch bestimmten Flächenpressung nach MB der DIN 6892 (gelber Balken).

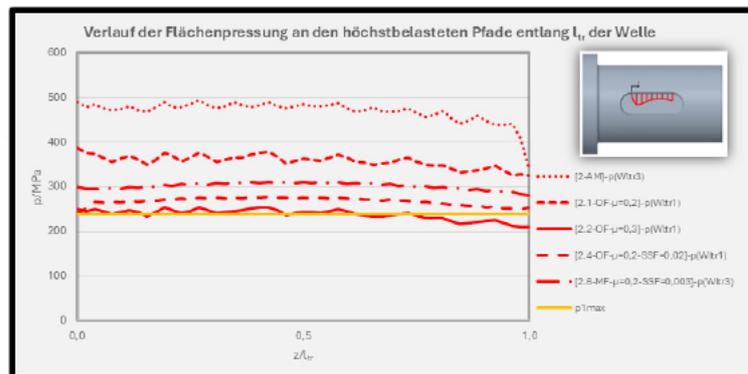


## Qualitative Bewertung der Flächenpressung in der belasteten Wellennutflanke

Die Verteilung der Flächenpressung wird im Wesentlichen durch die Fasen in den Flankenkontaktpaarungen beeinflusst. Wenn die Fasen in den Flankenkontakten implementiert sind, stellt sich die größte Flächenpressung deutlich unterhalb der Nutkanten ein. Dabei bildet sich großer Gradient der Flächenpressung, der im Pressungsverlauf entlang der tragenden Nuthöhen sichtbar wird (s. [2-AM]). Mit der Entfernung der Fasen aus Flankenkontaktpaarungen wandert das Maximum der Flächenpressung auf die Nutkanten (s. [2.1]-[2.3]) was nicht dem Referenzergebnis entspricht.

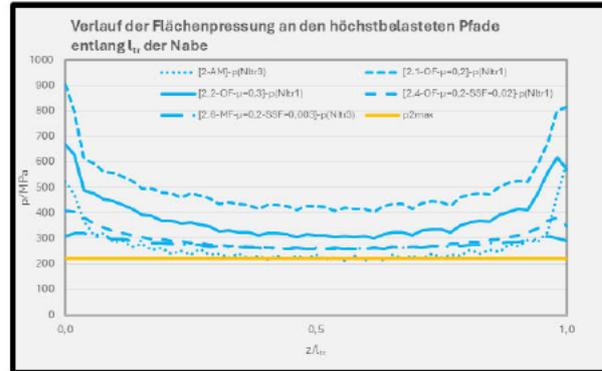


Mit einem „softened“ Normalkontakt kann dieses Problem gelöst werden. Hierbei wandert das Maximum der Flächenpressung bei geringen SSF-Werten (s. [2.4]-[2.5]) wieder unter die Nutkanten. Mit der Berechnung [2.5] wird dabei ein Verlauf entlang der tragenden Wellennuthöhe erzeugt, der näherungsweise dem Referenzergebnis entspricht. Der qualitative Flächenpressungsverlauf entlang der tragenden Wellennuttlänge wird in keiner Berechnung signifikant beeinflusst.



## Qualitative Bewertung der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke

Entlang der tragenden Nabennuttlänge bildet sich stets ein näherungsweise parabolischer Verlauf der Flächenpressung. In den Berechnungen [2-AM], [2.1] sowie [2.2] wird weiterhin ein hoher Gradient der Flächenpressung an den der tragenden Nabennuttlänge sichtbar. Ein „Softened Contact“ Normalkontakt mit geringen Werten für den SSF können den Gradienten der Flächenpressung deutlich reduzieren. Entlang der tragenden Nabennuthöhe zeigen die Verläufe der Pressung ein qualitativ ähnliches Verhalten zur Welle.



## Konvergenz der Flächenpressung in den belasteten Nutflanken

In der Berechnung [2.1] wird durch die Entfernung der Fasen aus den Flankenkontakten bei einem „hard“ Normalkontakt in der PF-Kontaktzone eine Konvergenz der Flächenpressung in den belasteten Nutflanken vermutet. Für die Berechnung [2.2] kann bei einer Berechnungszeit von ca. 9 Std. keine Konvergenzprüfung der Flächenpressung erfolgen. Mit der Verwendung eines „softened“ Normalkontaktes konvergiert die Flächenpressung in der Wellennutflanke bei geringen SSF-Werten (s. [2,4]-[2.5]). In der Nabe ist die Flächenpressung in der Berechnung [2.3] bei einer Netzverfeinerung von 1 mm auf 0,5 mm Elementen deutlich abgesunken. Hier ist die Konvergenz nicht sicher festzustellen. In den Berechnungen [2.4] bis [2.6] lassen die Verläufe keine Konvergenz der Flächenpressung in der belasteten Nabennutflanke vermuten. In der Berechnung [2.7] stellt sich gemäß der Berechnung [2.1] eine Konvergenz der Flächenpressung in der Nabe und der Welle ein.

	[2-AM]	[2.1]	[2.2]	[2.3]	[2.4]	[2.5]	[2.6]	[2.7]
KVG-Welle:	Nein	Ja	/	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
KVG-Nabe:	Nein	Ja	/	Evtl.	Nein	Nein	Nein	Ja





## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Jenßen

Vorname: Jonas

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit  bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Finite-Elemente-Analysen zum nichtlinearen Tragverhalten von Passfederverbindungen bei statischer Torsionsbelastung unter Berücksichtigung von konstruktiven Aspekten

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Haseldorf

Ort

14.11.2024

Datum

