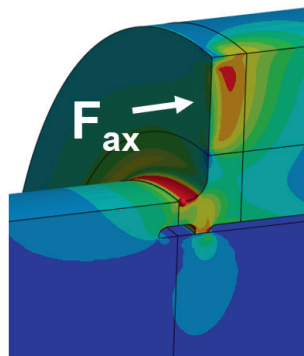


Elektronenstrahlschweißen von Druckkämmen - Gestaltung der Schweißnahtkerbe

Neumann, M.; Lohregel, A.

Um Steifigkeitsanpassungen durch Einstiche an Druckkämmen vornehmen zu können, ist es notwendig, eine andere Welle Nabe Verbindung vorzusehen, als den meist genutzten Pressverband. Viel Spielraum bietet hierbei eine Schweißnahtverbindung. Durch die umlaufende Axialkraft auf den Druckkamm, liegt eine hohe Spannungsamplitude im Bereich der Schweißnaht vor. Die metallurgische Kerbe der Schweißnaht und die geometrische Kerbe, die sich aus der Geometrie des Druckkamms ergibt, müssen örtlich getrennt werden. Dies wurde im Verbundvorhaben „TurboGetEff“ mit der PILLER Blowers & Compressors GmbH untersucht.



In order to be able to make stiffness adjustments through recesses to thrust cones, it is necessary to provide a shaft-hub connection other than the most commonly used press fit. A welded joint offers many options. Due to the rotating axial force on the thrust cone, there is a high stress amplitude in the area of the welded joint. The metallurgical notch of the weld seam and the geometric notch resulting from the geometry of the thrust cone must be separated locally. This was investigated in the project "TurboGetEff" with PILLER Blowers & Compressors GmbH.

Problematik

Durch Dickenunterschiede von Druckkamm und Zahnrad kommt es zu unterschiedlichen Steifigkeiten der Kontaktpartner. Der oftmals dünnere Druckkamm wird unter der Axiallast stärker deformiert. Es kommt zum Kantentragen, bei dem die Schmierstalthöhe einseitig stark abnimmt, siehe Abbildung 1. Zur Vermeidung von Kantentragen, sollten die Steifigkeiten im Kontaktgebiet identisch sein. Dies könnte beispielsweise durch Einstiche im Druckkamm oder Zahnrad erreicht werden, /1, 2/. Üblicherweise wird der Druckkamm mithilfe eines Pressverbands gefügt. Da der Druckkammkontakt mit einer umlaufenden Axialkrafteinleitung mit großem Hebelarm belastet wird, neigt die Welle-Nabe-Verbindung (WNV) zum Klaffen, /3/. Der Druckkamm wird daher oft sehr breit ausgeführt und nimmt unnötig viel Platz auf der Ritzelwelle ein. Bei Druckkämmen mit kleinen Durchmessern kann es zudem durch die elastische Deformation des Druckkamms auf der belasteten Stirnseite zu kleinen Schlupfbewegungen im Pressverband kommen, was zu Passungsrost führen kann. Dies ist in Abbildung 2 dargestellt. Um Steifigkeitsanpassungen an Druckkämmen vornehmen zu können und so Kantentragen entgegen zu wirken, ist es notwendig,

eine andere Art von WNV einzusetzen. Bei Verwendung des Pressverbands würden dünnere Druckkämme oder Druckkämme mit Einstichen zu Pressungsverlusten führen, wodurch die Gefahr des Klaffens und Passungsrostes steigt. Eine alternative Möglichkeit ist eine Verbindung von Druckkamm und Ritzelwelle über Elektronenstrahlschweißen. Dieses Verfahren zeichnet sich durch geringen Verzug aus, was notwendig ist, damit der Druckkamm durch die Montage möglichst geringe Schiefstellung erfährt, denn diese würde wiederum zum Kantentragen beitragen.

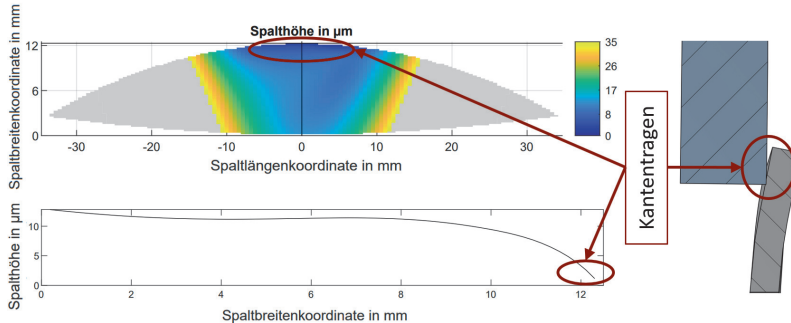


Abbildung 1: Problematik des Kantentragens, /2/

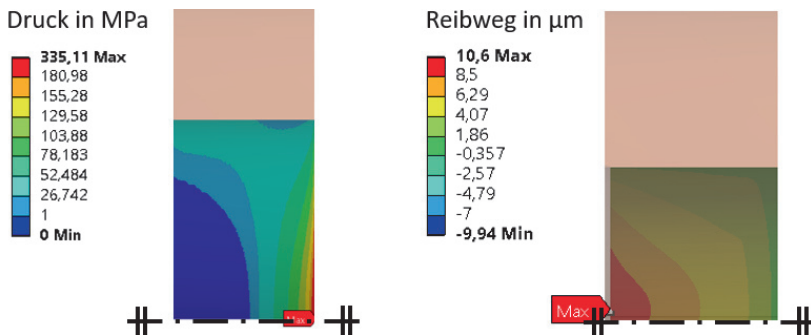


Abbildung 2: Problematik des Klaffens (links, $b = 30 \text{ mm}$, $D_a = 130 \text{ mm}$) und Passungsrostgefährdung (rechts, $b = 47 \text{ mm}$, $D_a = 170 \text{ mm}$); $F_{ax} = 30 \text{ kN}$, H6s5

Variation Schweißnahtgeometrie

Die im Folgenden untersuchte Verbindung ist in Tabelle 1 beschrieben. In Abbildung 3 ist auf der linken Seite ein Halbschnitt der Ritzelwelle mit Druckkamm dargestellt. Im eingekreisten Bereich liegt die Schweißnaht. Zudem ist ein Absatz zur Zentrierung des Druckkamms auf der Ritzelwelle zu sehen.

Tabelle 1: Randbedingungen Druckkammsimulation

Überdeckung Druckkamm	12,5 mm
Außendurchmesser Druckkamm	132,7 mm
Breite Druckkamm	37 mm
Breite des hochbelasteten Bereichs der Druckellipse	ca. 6°
Kraft auf Druckkamm (Untersuchung Reibweg)	23,5 kN
Kraft auf Druckkamm (Untersuchung Klaffen)	30 kN

In einem ersten Schritt wird die Geometrie in Abbildung 3 untersucht. Der umrandete und grau eingefärbte Bereich in der rechten Abbildung entspricht der 1 mm breiten Schweißnaht und der nicht eingefärbte Bereich entspricht der 3 mm breiten Wärmeeinflusszone (WEZ), die durch das Elektronenstrahlschweißen zustande kommt. In diesem Bereich liegt eine metallurgische Kerbe vor. Die maximale Spannung liegt an der Wurzel der Schweißnaht, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Der Spannungsfluss ist durch die sehr scharfe Kerbe am Zentrierabsatz stark behindert.

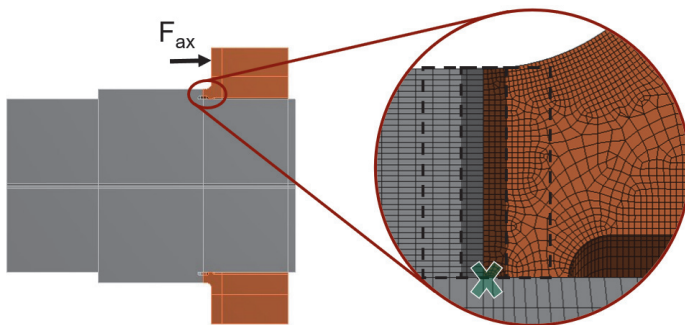


Abbildung 3: Druckkamm und Ritzelwelle im Schnitt (links) und Kerbengeometrie im Bereich der Schweißnaht (rechts), Kerbe gekennzeichnet

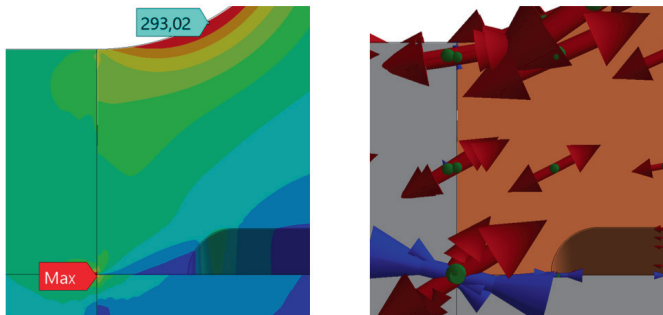


Abbildung 4: Maximale Spannung in der Schweißnahtwurzel

Um die Kerbe zu entschärfen, wird der Zentrierabsatz von der Schweißnaht entfernt, siehe Abbildung 5. Die Kerbe in der Wurzel ist mit dem zur Schweißnahtsimulation herangezogenen kritischen Radius r_{FEM} nach Gleichung 1 ausgeformt und nach Empfehlung von /4/ vernetzt. Dabei ist r_{Geo} der geometrische Kerbradius (Worst Case: $r_{Geo} = 0$), r^* die materialabhängige Ersatzstrukturlänge und s der Mikrostützwirkungsfaktor (für ebenen Spannungszustand und GEH 2,5), /5/.

$$r_{FEM} = r_{Geo} + s \cdot r^* \quad (1)$$

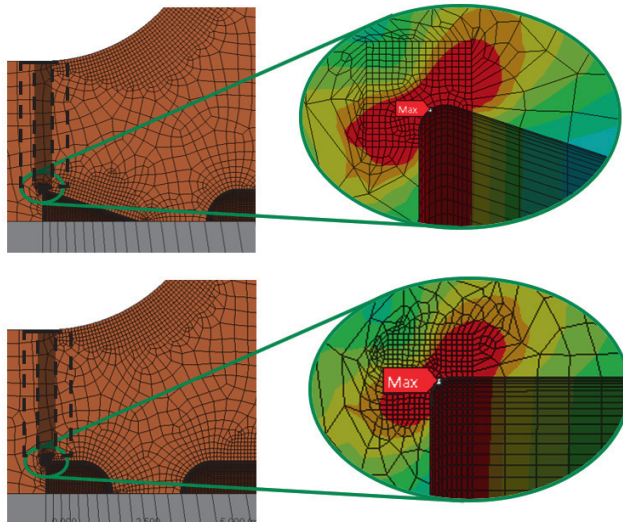


Abbildung 5: Kerboptimierung der Schweißnahtwurzel, max. Spannung 1162 MPa (oben) und 1068 MPa (unten)

Bisher liegt die geometrische Kerbe im Bereich der WEZ und durch den kleinen kritischen Radius ist die Spannung hoch. Deshalb wird durch einen Einstich in die Ritzelwelle die geometrische Kerbe von der metallurgischen getrennt.

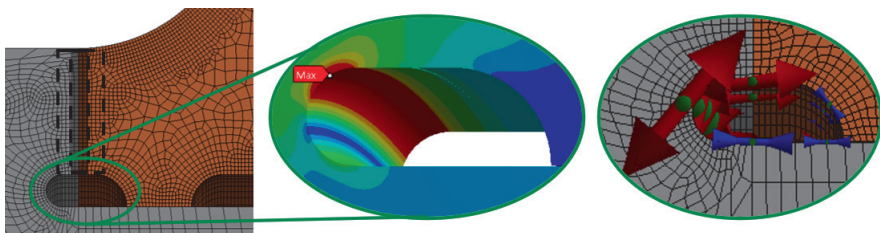


Abbildung 6: Kerboptimierung, Einstich in Ritzelwelle, max. Spannung 540 MPa

Finale Kerbgeometrie im Bereich der Schweißnaht

Die finale Kerbgeometrie im Bereich der Schweißnaht ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Schweißnahtgeometrie ist an einen Stumpfstoß angelehnt, so liegt in der Schweißnahtwurzel keine geometrische Kerbe vor. Die maximalen Ausschlagspannungen treten an den grün gekennzeichneten Stellen (geometrische Kerben) auf. Der Zentrierabsatz ist mit einer Presspassung von H5s5 versehen. Diese stellt sicher, dass der Reibweg ausreichend gering ist und der Zentrierabsatz nicht klappt. Zudem führt sie zu einer Versteifung der Druckkammgeometrie, wodurch die gekennzeichneten Kerben weniger stark durch die umlaufende Axialkraft belastet werden. Nachteilig wirkt sich die hohe Zugmittelspannung durch die Presspassung des Zentrierabsatzes auf die Kerbe an der Außenseite des Druckkamms aus. In einer Parametervariation hat sich die gewählte Geometrie als beste Kombination aus den verschiedenen Radien, Passungen, Einstichbreite und -tiefe (bzw. Schweißnahtdicke) und Druckkammweiten herausgestellt. Die finale Druckkammgeometrie ist im Vergleich zum Pressverband kompakter.

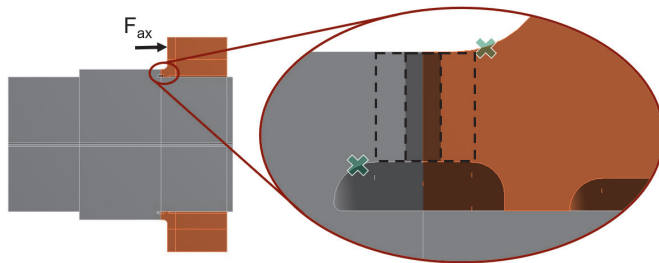


Abbildung 7: Druckkamm und Ritzelwelle im Schnitt (links) und Kerbgeometrie im Bereich der Schweißnaht (rechts), geometrische Kerben gekennzeichnet

Auffällig ist die stark unsymmetrische Geometrie des Einstichs in die Ritzelwelle (graues Bauteil). Diese ergibt sich aus einer Parametervariation der Verrundungen in diesem Bereich. Betrachtet man Abbildung 8, so wird deutlich, dass die höchstbelasteten Stellen zugbelastet sind und in der Einstichgeometrie oben Zug und unten Druckspannungen vorliegen.

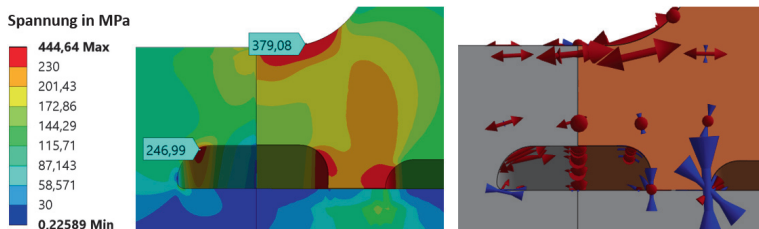


Abbildung 8: Spannungsverteilung (links) und Hauptspannungsrichtungen (rechts)

Die eingeleitete Kraft wird somit um die Einstichgeometrie herumgeleitet. Um die Umlenkung dieser Spannung so kontinuierlich wie möglich zu gestalten, ist die Tiefe des Einstichs so gering wie möglich und mit einem großen Radius ausgeführt (Verhältnis des größeren zum kleineren Radius von 5:1). Durch die unsymmetrische Einstichgeometrie kann die maximale Spannung in diesem Bereich um 40 % gegenüber einer symmetrischen Einstichgeometrie gesenkt werden.

Zusammenfassung

Durch geschickte Ausformung der Kerbgeometrie im Schweißnahtbereich und eine ausreichend hohe Presspassung kann die geometrische Kerbe von der metallurgischen Kerbe getrennt werden. Zudem kann die Gefahr von Klaffen und Passungsrost im Zentrierabsatz reduziert werden. Mit der vorgestellten Verbindungsmethode sind Steifigkeitsanpassungen von Druckkamm und Zahnrad ohne Einflussnahme auf die Festigkeit der WNV möglich. Dies ist die Grundvoraussetzung um Kantentragen durch Deformation unter Last entgegenzuwirken.

Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Vorhabens TurboGetEff (FKZ:03EN4037A-B) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Die Autoren danken dem BMWK für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- /1/ Heinrich, C.: Druckkammsimulation unter Berücksichtigung der Platten- und Wellensteifigkeit. In: 17. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: 1. und 2. Oktober 2019 in Aachen, Seite 126 – 137. <http://dx.doi.org/10.18154/RWTH-2019-08782>
- /2/ Neumann, M.; Heinrich, C.; Lohrengel, A.: TurboGetEff: Effizienzsteigerung eines Turboantriebsstrangs unter Einsatz von Druckkammern. In: Reibung, Schmierung und Verschleiß, 64. Tribologie-Fachtagung 2023 (Tagungsband), Gesellschaft für Tribologie, 25.-27.09.2023. Seite 436-446
- /3/ Thoden, D.: Über die Verformung von dicken Kreisringplatten unter exzentrischer Axiallast. In: Institutsmitteilung Nr. 34, Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 2009
- /4/ A. Hobbacher, Recommendations for fatigue design of welded joints and components, New York: Welding Research Council, 2009.
- /5/ M. Wozasek, Kerbfallkatalog für die Schweißnahtberechnung nach IIW, Graz: Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften, Institut für Leichtbau, 2012.