

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Wirtschaftliche und ökologische Anforderungen sowie ein erhöhtes gesellschaftliches Bewusstsein für Klimaschutz führen zu steigenden Anforderungen in der Technik. Daher werden effizientere und ressourcenschonende Lösungen gefordert. Die Reduktion der Systemmasse ist besonders für zu beschleunigende Systeme wie z.B. in der Luftfahrt, im Automobilbereich oder in der Roboterindustrie entscheidend, da die Massenträgheit direkten Einfluss auf die aufzubringende Energie nimmt.

Die Materialwahl einer Konstruktion wird in Abhängigkeit der Betriebsanforderungen im Hinblick auf den Leichtbau für einzelne Komponenten getroffen. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) weisen hervorragende spezifische Eigenschaften, wie eine hohe Festigkeit und Steifigkeit bei geringem Gewicht, auf. Hingegen sind metallische Materialien bei Betrachtung der Schlagzähigkeit und der Prozesskosten überlegen. Diese mögliche Ergänzung der unterschiedlichen Materialeigenschaften führt zu einer steigenden Anwendung von Mischbauweisen. Ein Beispiel ist der BMW i3 mit seiner Fahrgastzelle aus CFK und der Bodengruppe aus Aluminium. Eine materialgerechte Umsetzung der Verbindungsstellen ist unabdingbar, um Mischbauweisen effizient einzusetzen.

Oft werden konventionelle Nietverbindungen angewandt, um CFK mit Metall in hochbeanspruchten Lasteinleitungsbereichen zu verbinden, da große Erfahrungswerte und ein hoher Automatisierungsgrad existieren. Dennoch stellt die Nietverbindung keine faserverbundgerechte Verbindungs-technologie dar, da der Lastpfad durch im Bohrprozess zerstörte Fasern unterbrochen ist. Weiterhin weisen Faserverbundwerkstoffe eine geringe Widerstandsfähigkeit gegen Lochleibungs- und Scherlasten auf. Folglich ist eine Materialaufdickung im Lasteinleitungsbereich notwendig und der Gewichtsvorteil der Mischbauweise wird nicht optimal ausgenutzt. Faserverbundgerechte Übergangsstrukturen zwischen Metall und CFK sind gefordert, um einen kontinuierlichen Lastpfad sicherzustellen und um das Leichtbaupotential bestmöglich ausschöpfen zu können.

Umgeleitete Fasern in Schlaufenverbindungen gewährleisten einen kontinuierlichen Lastpfad. Daher ist die Übertragung hoher punktueller Lasten möglich. Anwendung finden Schlaufen beispielsweise in Rotorblatt- oder Turbinenschaufelanbindungen. Für Mischbauweisen bieten Schlaufen eine gewichtsminimierte und faserverbundgerechte Lösung zur Verbindung von Komponenten.

Zur Realisierung eines schlanken Übergangs von CFK zu Aluminium in Mischbauweisen müssen Schlaufen innerhalb der Wandstärke des CFKs und des Aluminiums integriert werden. Die damit verbundenen Fragestellungen sind in der interdisziplinären DFG-

geförderten Forschergruppe FOR1224 "Bauweisen für CFK-Aluminium-Übergangsstrukturen im Leichtbau" (Kurzname: *Schwarz-Silber*) untersucht worden. Die vorliegende Arbeit betrachtet den CFK-seitigen Anschluss von Schlaufen.

Die betrachteten Schlaufen in der Übergangsstruktur bestehen aus zwei miteinander verschliffenen Faserovingen und werden daher Schlaufe-Schlaufe-Verbindung genannt. Schlaufe-Schlaufe-Verbindungen weisen Innenradien  $< 2$  mm auf. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Geometrie einer Schlaufe-Bolzen-Verbindung großen Einfluss auf die Kraftübertragung hat. Schlaufe-Schlaufe-Verbindungen weisen eine abweichende Geometrie zu den Schlaufe-Bolzen-Verbindungen auf. Der Herstellprozess beeinflusst die Schlaufengeometrie. Um eine Vorauslegung von Schlaufen in Übergangsstrukturen zu ermöglichen, ist die Analyse des Einflusses der Geometrie und des Herstellprozesses auf die Kraftübertragung notwendig. Weiterhin müssen vorhandene analytische Modelle auf ihre Gültigkeit für Schlaufen mit kleinen Innenradien in Übergangsstrukturen geprüft und ggf. erweitert werden.

## 1.2 Zielsetzung und Herangehensweise

Das Ziel dieser Arbeit ist, die Geometrie- und Prozesseinflüsse auf die Kraftübertragung von Schlaufe-Schlaufe-Verbindungen in CFK-Aluminium-Übergangsstrukturen zu bewerten und einen analytischen Berechnungsansatz zur Vorauslegung bereitzustellen. Die Arbeit gliedert sich in drei Teilabschnitte: theoretische Analyse von Schlaufe-Schlaufe-Verbindungen mit Aufstellung eines Berechnungsansatzes zur Vorauslegung, experimentelle Analyse der Geometrie- und Prozesseinflüsse sowie Validierung des Berechnungsansatzes (Abbildung 1).

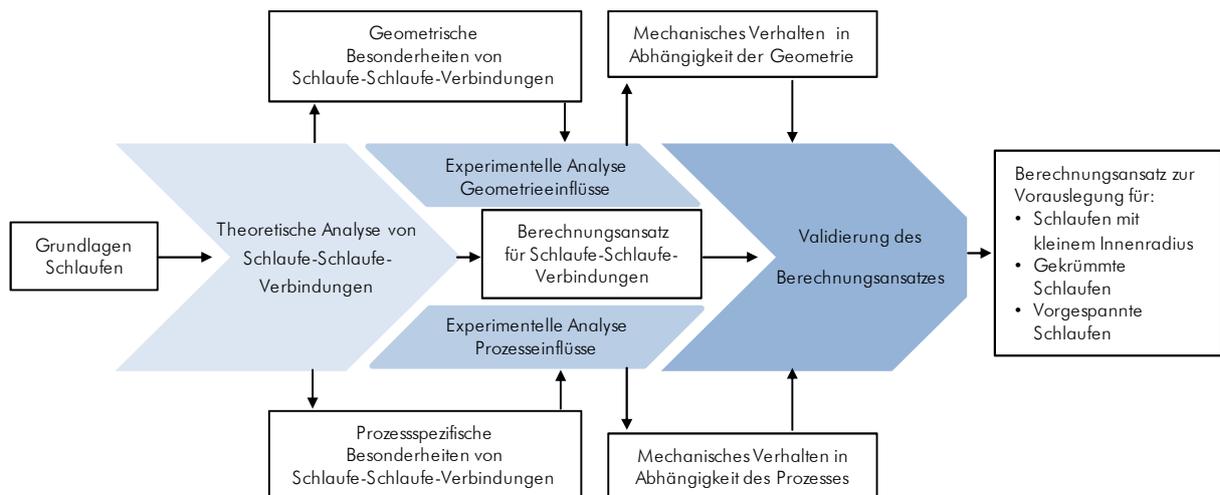


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Analyse von Geometrie und Prozesseinflüssen auf Schlaufe-Schlaufe-Verbindungen

In der theoretischen Analyse von Schlaufe-Schlaufe-Verbindungen in Übergangsstrukturen werden die geometrischen Charakteristika gegenüber den in der Literatur beschriebenen konventionellen Schlaufenverbindungen herausgestellt und abgegrenzt. Eine Prozessanalyse stellt den fertigungsbedingten Einfluss auf die Schlaufengeometrie heraus. Die Auswirkungen der Geometrieänderung auf die Kraftübertragung werden diskutiert. Aus diesen Erkenntnissen wird ein Berechnungsansatz für die Vorauslegung abgeleitet und ein experimentelles Vorgehen erarbeitet.

Anhand der experimentellen Erkenntnisse wird eine Aussage zur Skalierbarkeit der Kraftübertragung auf kleine Innenradien getroffen. Der Einfluss von axialen Krümmungen sowie von fertigungsbedingten Vorspannkräften auf die Kraftübertragung wird bewertet. Die aufgestellten Berechnungsansätze zur Vorauslegung von Schlaufe-Schlaufe-Verbindungen werden in einem Vergleich der theoretischen Kräfte mit den experimentellen Bruchkräften validiert.



## 2 Grundlagen Schlaufenverbindungen

### 2.1 Kraffteinleitung in Faserverbundwerkstoffe

Mit dem steigenden Einsatz von Mischbauweisen in Leichtbaustrukturen ist die Dimensionierung von Verbindungselementen zur Kraffteinleitung in Faserverbundwerkstoffe entscheidend. In Abhängigkeit verschiedener Kriterien, wie z.B. Lasten, zur Verfügung stehender Bauraum, Fail-Safe-Verhalten, Möglichkeiten der Qualitätssicherung, Wartung und Reparatur, wird die Art der Verbindung ausgewählt [1]. Allgemein werden stoffschlüssige, kraftschlüssige und formschlüssige Verbindungen unterschieden. Bevorzugt werden die Kleb-, die Bolzen- und die Schlaufenverbindung eingesetzt (Abbildung 2).

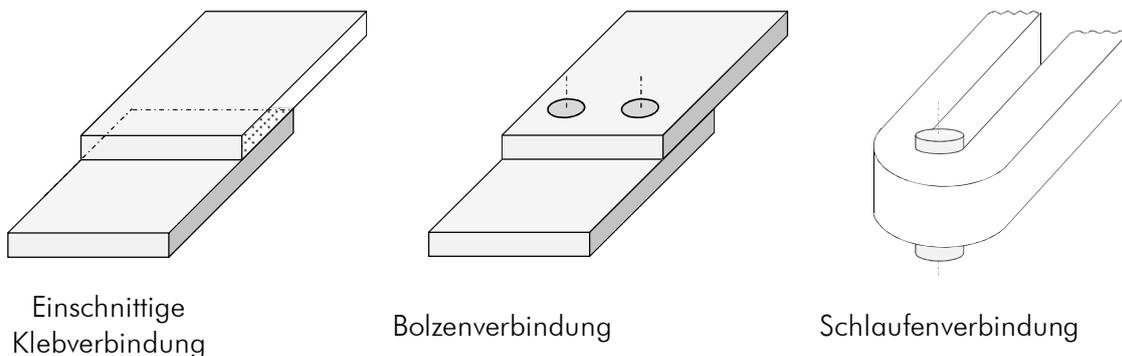


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Kleb-, Bolzen- und Schlaufenverbindung zur Kraffteinleitung in Faserverbundwerkstoffe nach [1]

Eine Klebverbindung eignet sich für dünne Strukturen und erfordert eine große Klebfläche. Materialaufdickungen sind nicht notwendig. Einzig der Klebstoff stellt ein zusätzliches Gewicht in der Verbindungsstelle dar. Nachteilig sind die hohen Prozessanforderungen zur Reproduzierbarkeit, zur Qualitätskontrolle und zur Wartung [1].

Bolzen werden zum Verbinden von dicken, hochbelasteten Laminaten eingesetzt. Vorteilhaft sind die großen Erfahrungswerte und ein sich ankündigendes Versagen durch Lochleibung. Die Bohrungen reduzieren den lasttragenden Querschnitt und wirken als Kerbe. Materialaufdickungen und der metallische Bolzen haben ein hohes zusätzliches Gewicht zur Folge [1].

Punktförmige Lasten können bei geringem Bauraum mit Hilfe von Schlaufenverbindungen eingeleitet werden. Dem aufwendigen Herstellverfahren steht eine hohe Lastübertragung entgegen. Die den Bolzen umschlingenden Fasern sind nicht unterbrochen und

weisen einen kontinuierlichen Lastpfad auf. Dadurch ist eine hohe Lastübertragung ohne zusätzliche Materialaufdickungen möglich [1].

## 2.2 Schlaufenverbindungen

### 2.2.1 Definition der Schlaufe

Schlaufenverbindungen stellen eine werkstoffgerechte Anschlussform zur Einleitung von Zugkräften in faserverstärkte Kunststoffe dar und eignen sich besonders für punktuelle Lasteinleitungen in hochbelasteten Strukturbauteilen [1], wie z.B. Rotorblätter von Helikoptern, Verdichterschaufeln von Turbinen und Verankerungen von Zuggliedern [1][2][3][4][6]. Die hohe Belastbarkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht ist auf die unidirektionale Anordnung der durchgehenden Faserstränge in Lastrichtung zurückzuführen. Die hohe Zugfestigkeit der einzelnen Fasern kann optimal ausgenutzt werden, da die Faserstränge und damit der Kraftverlauf nicht unterbrochen werden (Abbildung 3, links). Neben der Schlaufe selbst und dem Umlenkkörper (zumeist Bolzen) ist kein zusätzliches Verbindungselement nötig [1]. Zur Beschreibung der Schlaufe wird ein polares Koordinatensystem herangezogen (Abbildung 3, rechts). Die radiale Richtung ( $r$ ) verläuft vom Innenradius  $r_i$  zum Außenradius  $r_o$  quer zu den Fasern und die axiale Richtung ( $z$ ) entlang der Bolzenachse, während die tangentielle Richtung über den Umfangswinkel  $\gamma$  parallel zu den Fasern definiert ist. Die Schlaufenhöhe  $h$  beschreibt die Materialdicke Schlaufenscheitel mit der Querschnittsfläche  $A$ . Das Radienverhältnis beschreibt das Verhältnis von Außen- zu Innenradius ( $r_o/r_i$ ).

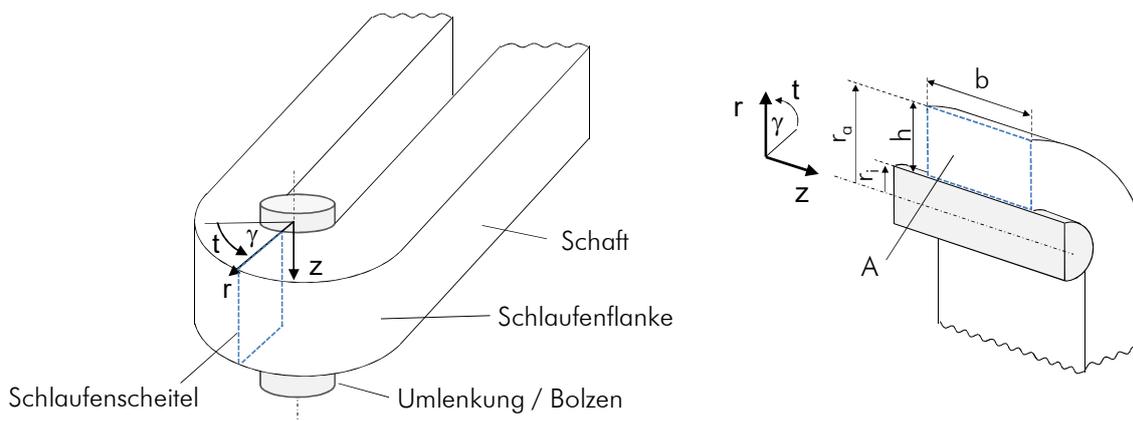


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Schlaufenanschlusses um einen steifen Bolzen nach [1]

### 2.2.2 Konstruktionsweisen

Es wird zwischen Parallelschleife und Augenschleife unterschieden (Abbildung 4, links). Während die Faserstränge bei Parallelschleifen im Abstand des Bolzendurchmessers zueinander ab der Bolzenmitte parallel verlaufen, laufen die Faserstränge bei Augenschleifen bis zum Kontakt mittig aufeinander zu. Die daraus resultierenden Aufziehspannungen mindern die Tragfähigkeit der Augenschleife. Folglich werden höhere Festigkeiten mit der Parallelschleife erreicht [1].

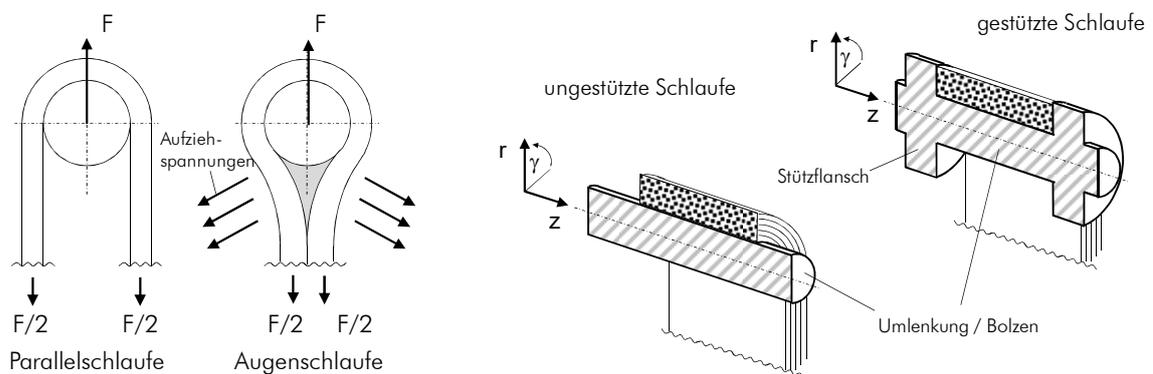


Abbildung 4: Parallelschleife und Augenschleife mit Aufziehspannungen (links) und seitlich ungestützte und gestützte Schleife (rechts) nach [1]

Ein weiterer konstruktiver Faktor, der die Tragfähigkeit beeinflusst, ist die seitliche Stützung (Abbildung 4, rechts). Im Falle einer ungestützten Schleife werden axiale Querdehnungen nicht verhindert. Aus den hohen radialen Druckspannungen quer zur Faser und der Möglichkeit des seitlichen Ausweichens resultiert ein Zwischenfaserbruch als Scherbruch [1]. Auf das Versagen der Matrix folgt der frühzeitige Faserbruch. Eine seitliche Stützung hingegen verhindert die Querdehnungen und ruft axiale Spannungen hervor. Die Druckfestigkeit erhöht sich und der Faserbruch ist festigkeitsbestimmend. Die Stützung kann beispielsweise mit einem Stützflansch umgesetzt werden [1]. Des Weiteren kann die Querdehnung durch Zwischenlagen mit anderer Faserorientierung reduziert werden [7]. Auf Zug beanspruchte gestützte Parallelschleifen weisen in Abhängigkeit des Materials und der Geometrie eine um den Faktor 1,6 – 4 höhere Tragfähigkeit als ungestützte Schleifen auf [9]. Bei dynamischer Belastung kann eine bis zu 1000-fache Erhöhung erzielt werden [7].

Die Tragfähigkeit einer Schleife kann nicht über eine reine Waddickenerhöhung gesteigert werden, da die Kontaktspannung zwischen Schleife und Umlenkung mit zunehmender Schlaufenhöhe, also dem Verhältnis von Außen- zu Innenradius ( $r_o/r_i$ ), steigt (Abbildung 5) [3]. Ebenso steigt die Kontaktspannung mit höherem Orthotropiegrad  $E_{längs}/E_{quer}$  [1]. Da die Kontaktspannung der radialen Druckkraft entspricht, wirkt bei Schleifen

mit großen Radienverhältnissen und hohem Orthotropiegrad eine seitliche Stützung besonders festigkeitssteigernd. Der Anschlussgütegrad  $\eta$ , der die Materialausnutzung infolge von Spannungsüberhöhungen bezogen auf die mittlere Spannung der Querschnittsfläche beschreibt [2], kann mit seitlicher Stützung erhöht werden.

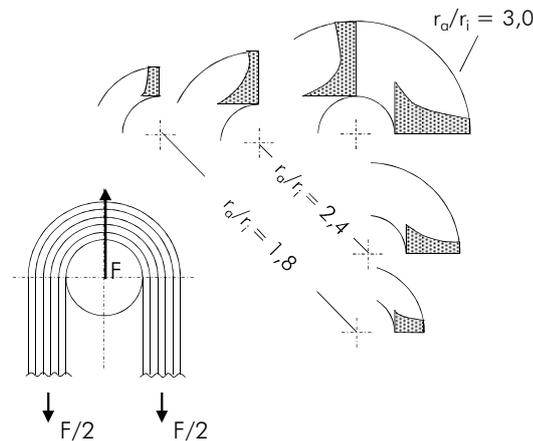


Abbildung 5: Spannungsüberhöhungen am Schlaufeninnenrand in Abhängigkeit vom Radienverhältnis  $r_a/r_i$  [10]

### 2.2.3 Versagen von Schlaufenverbindungen

Im Falle einer ungestützten Schlaufe werden axiale Dehnungen nicht verhindert. Aus den hohen radialen Druckspannungen quer zur Faser resultiert ein Zwischenfaserbruch (Zfb) als Scherbruch in der Matrix (Abbildung 6). Versagte Bereiche können zu den Seiten hin ausweichen. Fasern, die nicht mehr durch die Matrix gestützt sind, werden direkt belastet und versagen daher frühzeitig. Basierend auf dem Festigkeitskriterium von Puck ist gezeigt, dass bei ungestützten Schlaufen der Zwischenfaserbruch und bei gestützten Schlaufen der Faserbruch festigkeitsbestimmend ist [1]. Eine Betrachtung verschiedener Bruchkriterien (Puck, Tsai, Tsai/Hill und Hashin) zeigt sehr unterschiedliche Ergebnisse, so dass keine Aussage abgeleitet werden kann [5].

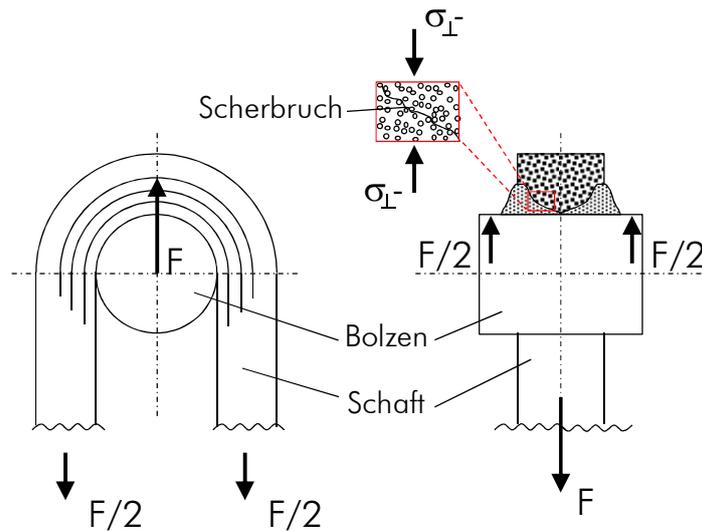


Abbildung 6: Scherbruch von seitlich ungestützten Schlaufen infolge radialer Druckspannung [1]

Die Schlaufe wird gedehnt. Die kürzeren inneren Fasern werden mehr gedehnt als die äußeren längeren Fasern. Eine radiale Stauchung findet infolge der weichen Matrix statt. Der starre Bolzen verhindert eine Stauchung der Innenfaser. Folglich nimmt die Stauchung nach außen hin zu. Die äußeren weniger gedehnten Fasern werden durch das radiale Stauchen auf eine kleinere Bogenlänge zusätzlich entlastet. Infolge von Spannungsspitzen erfolgt die Rissinitiierung an den inneren Fasern der Schlaufe [9]. Winistörfer geht davon aus, dass die Biegung am Umlenkpunkt die Ursache des Versagens ist [11]. Durch die Biegung entstehen quer auf die Faser wirkende Spannungen, die zum Scherversagen der Faser führen würden. Zwingmann merkt an, dass das Scherversagen der Faser theoretisch möglich ist, jedoch ist die Schubfestigkeit der Matrix parallel der Fasern geringer, so dass hier die Rissinitiierung entstehen sollte [5]. Es sei nicht auszuschließen, dass der Druck die Schubfestigkeit in der faserparallelen Ebene steigern kann und somit sich ein unübliches Versagensbild einstellt. Eine Aussage darüber, wann Schlaufen aufgrund von Zug- und wann aufgrund von Schubspannungen versagen, kann derzeit nicht getroffen werden.

Schürmann beschreibt die Spannungsüberhöhung am Übergang der Schlaufenflanke zum geraden Schaft als dimensionierende Spannung, die ebenso durch eine lokale Biegebeanspruchung hervorgerufen wird [1]. Ein Teil des gekrümmten Schlaufenbereiches verschiebt sich unter Belastung über den Ablaufpunkt in den eigentlich geraden Schaftbereich (Abbildung 7). Der Schaft verdreht sich in Richtung Bolzen und hat exzentrische Zugkräfte zur Folge. Zugspannungen entstehen infolge der Biegung an der Innenseite und erhöhen die ursprüngliche Zugspannung. Die Außenfasern werden durch eine Druckspannung infolge der Biegung entlastet. Die versagenskritischen Spannungen treten folglich am Innenradius im Bereich zwischen dem Scheitelpunkt und dem Ablaufpunkt auf. Dieser Versagensort konnte in experimentellen und numerischen Untersuchungen nachgewiesen werden [12].

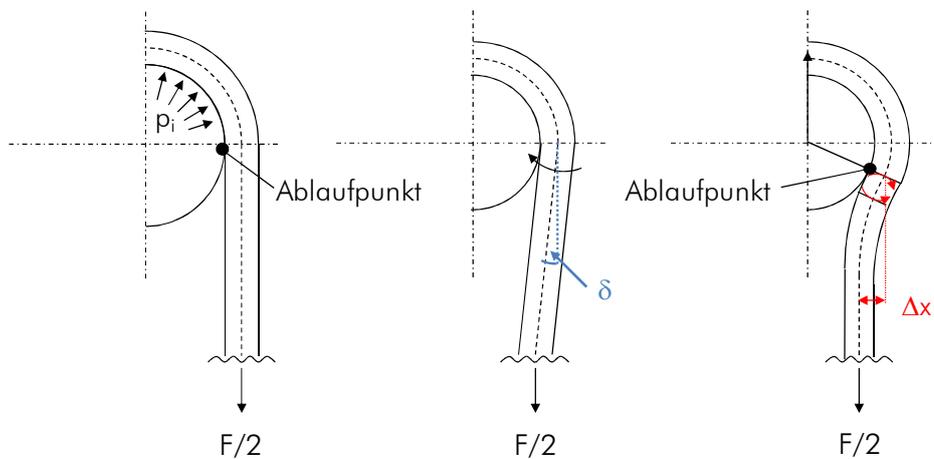


Abbildung 7: Biegebeanspruchung am Ablaufpunkt durch exzentrische Zugkraft resultierend aus der Dehnung des gekrümmten Bereiches in den geraden Schlaufenschaft nach [1]

Im Hinblick auf Spannungsüberhöhungen infolge des Orthotropiegrades sind GFK-Schlaufen vorteilhaft. Jedoch wird unter Berücksichtigung des Biegemomentes deutlich, dass eine hohe Dehnsteifigkeit wie z.B. von CFK-Schlaufen günstiger ist. Das Biegemoment wird durch eine geringe Dehnung über den Ablaufpunkt hinaus gemindert. Zum Geringhalten der Biegesteifigkeit wird empfohlen, flache Schlaufen zu wählen [1].

#### 2.2.4 Spannungsanalyse für Schlaufen

Analytische Ansätze zur Spannungsanalyse von Schlaufen basieren auf dem auf Innendruck belasteten Rohr. Die Schlaufe und damit der Spannungszustand werden als rotationssymmetrisch angenommen (Abbildung 8). Folglich liegt eine konstante Spannung in Schlaufenumfangsrichtung vor. Änderungen in Umfangsrichtung, wie z.B. durch das zusätzliche Biegemoment am Ablaufpunkt, werden nicht berücksichtigt.