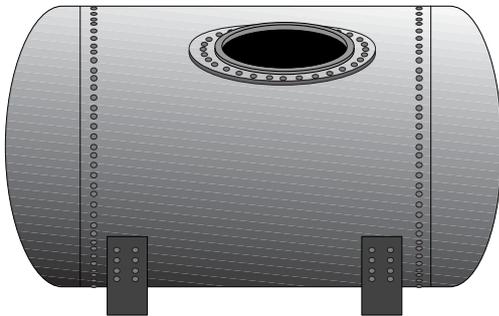


## 6.1.2 Niet-, Stift- und Bolzenverbindungen

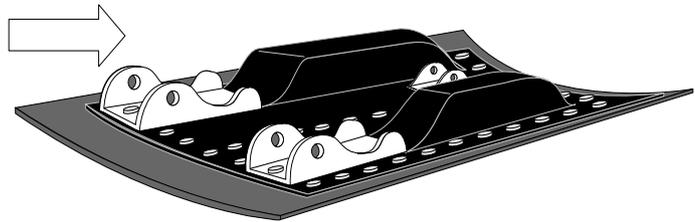
### Probleme, Schäden, Abhilfen

#### Niete erhalten neue Aufgaben im Maschinenbau

Druckkessel historischer Bauweise



Hybridbauweise einer Schubdüsenklappe



**Nietungen in Stahlbauten** (z.B. Brücken) und **Druckkesseln** (z.B. Dampfkessel) sind Vergangenheit. Niete finden heute eine Vielzahl anderer, unterschiedlicher Anwendungen (Bild 6.1.2-1). Gerade im **Leichtbau** mit einer Tendenz zu **Hybridkonstruktionen**. Klebverbindungen sind problematisch, wenn erhöhte **Betriebstemperaturen** vorliegen (Bild 6.1.2-2). In solchen Fällen bieten sich Nietungen (Bild 6.1.2-2) an. Vorläufer sind z.B. nichtmetallische **Kupplungs- und Bremsbeläge** (Bild 6.6.2.2-3).

Unter dem **Begriff Niet** (engl. rivet) wird im Folgenden nicht nur die übliche Nietform mit Setzkopf, Schaft und anzuformendem Schließkopf verstanden (Lit. 6.1.2-1). Beim sog. (**Blindniet** ('**Popniet**', **Ziehniet**, engl. blind rivet, pop rivet, Bild 6.1.2-5) der in unterschiedlichen Ausbildungen am Markt ist, bildet sich der Schließkopf durch Aufweitung auf der nicht zugänglichen Seite. Dieser Vorteil ist aber auch problematisch. Ein solcher Niet kann 'ausgebohrt' und damit von außen entfernt werden und getauscht. Das ist bei Anwendungen **geschützter Zugänglichkeit** (z.B. Transporträume wie LKW-Anhänger, Bild 6.1.2-5) unerwünscht.

Auch Komponenten wie kleine einseitig eingienietete Achsen von Gelenken (Bild 6.1.2-11) werden hier unter dem Begriff Niet behandelt. Als **Bolzenverbindung** lassen sie **Schwenkbewegungen** zu (Bild 6.1.2-11). Solche Bolzen sind zerstörungsfrei entfernbar (ziehbar) und werden mit geeigneten Maßnahmen wie Verschraubung oder Splint gesichert. Für Befestigungen an faserverstärkten Kunststoffteilen verwendet man Niete mit Gewinden. Entsprechend ist die Funktion des Niets durchaus unterschiedlich. Sie beschränkt sich nicht nur auf eine Fixierung über Scherung des Schafts. In besonderen Fällen werden **axiale Kräfte** (Fixierung von eingeschobenen Bauteilen) aufgenommen oder Biegemomente übertragen (Achsen kleinerer Bauteile).

Eine besondere Stellung nehmen Niete traditionell in der **Luftfahrt** ein. Es begann mit Nietungen an Leichtmetallblechen für tragende Strukturen von Luftschiffen sowie Rumpfen und Flügeln von Flugzeugen. Werden heute **faserverstärkte Kunststoffe** (FVK), insbesondere mit Kohlefasern

(CFK) verwendet liegt das im Trend der **Hybridbauweise** (Bild 6.1.2-2). Um dem Stellenwert dieser **wichtigen Anwendung des modernen Leichtbaus** gerecht zu werden, sind deren Problematiken in diesem Kapitel intensiver behandelt (Bild 6.1.2-8 bis Bild 6.1.2-10). **Faserverstärkte Lamine** haben sehr vorteilhafte **charakteristische Eigenschaften**. Dazu gehören niedriges Gewicht, hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit, gute Korrosionsfestigkeit und, als besonders wichtig, **exzellente Schwingungsdämpfung** und **Schwingfestigkeit** (Band 1 Bild 3-11). Eigenschaften sind zu berücksichtigen die man eigentlich nur bei Metallen erwartet. Es handelt sich um **Krieeffekte** (Bild 6.1.2-9) und **Stützwirkung** (Bild 6.1.2-10) mit **Spannungsumlagerungen**. Auch wenn sich das makroskopische Verhalten ähnelt, die eigentlichen Mechanismen (im Mikrobereich) können sich deutlich von Metallen unterscheiden. Nachteilig ist bei FVK-Werkstoffen eine relativ **niedrige Druckfestigkeit**. Das muss im Auflagebereich des Nietkopfs und der Flächenpressung an der Kontaktfläche zum Nietschaft bei **Gestaltung** und **Auslegung** vom Konstrukteur berücksichtigt werden.

Obwohl in Funktionsprinzip und Anbringung einfach benötigen Nietungen **Fachkunde, Erfahrung und Geschick**. Es handelt sich oft eher um einen manuellen Prozess mit den dafür typischen Problemen der Reproduzierbarkeit. Die **zerstörungsfreie Prüfung** auf innenliegende, nicht von außen sichtbare, Fehler wie Anrisse unter den Nietköpfen oder ungünstige Form des Nietschafts ist ebenfalls problematisch.

**Bild 6.1.2-1** (Lit. 6.1.2-14 und Lit. 6.1.2-15): *Niete finden besonders in älteren Maschinentypen, insbesondere Flugtriebwerken Anwendungen. Sie nutzen die spezifischen Eigenschaften und Vorteile einer Nietung. Typische Anwendungen sind:*

- **Zusammenbau bzw. Verbindung von Blechteilen** (Rahmen unten): *Ein früheres Konstruktionsprinzip war, Bauteile wie komplexe Gehäuse als Schweißkonstruktion aus einer Vielzahl Einzelstücken herzustellen. Dieses Prinzip fand besonders bei Turbomaschinen Anwendung (Skizze unten links). **Aerodynamische Konturen im Heißgasstrom** wurden anschließend genieteten Blechstrukturen realisiert. Eine solche Bauweise lässt den Abbau dieser Führungsblende bei einer Überholung zu. Dazu werden die Niete entfernt. So wird die tragende innere Struktur einer **Inspektion bzw. zerstörungsfreien Prüfung** (Eindringprüfung) zugänglich. Danach wird die Blechummantelung wieder mit einer Nietung angebracht. Diese Technik hat sich hervorragend bewährt. Sie erfordert jedoch **Erfahrung und***

*ausgiebige Erprobung, um Ermüdungsrisse durch Gasschwingungen und Thermoermüdung ausreichend sicher auszuschließen (Bild 6.10.3.1.2-18 und Bild 6.10.3.1.2-19).*

**Vorteile:**

- **Einfache Demontage und Montage** von Blechstrukturen. Angenietete **Verschleißbereiche** wie am Flammrohr eines Fackelzünders mit Überhitzungsschäden (Skizze unten rechts) oder frettinggeschädigte Zonen (Band 1 Kapitel 5.9.3) von **Brennkammern** lassen sich mit einer Nietung einfach austauschen.

- **Schwingungsdämpfende Wirkung** der Reibung zwischen den verbundenen Blechoberflächen.

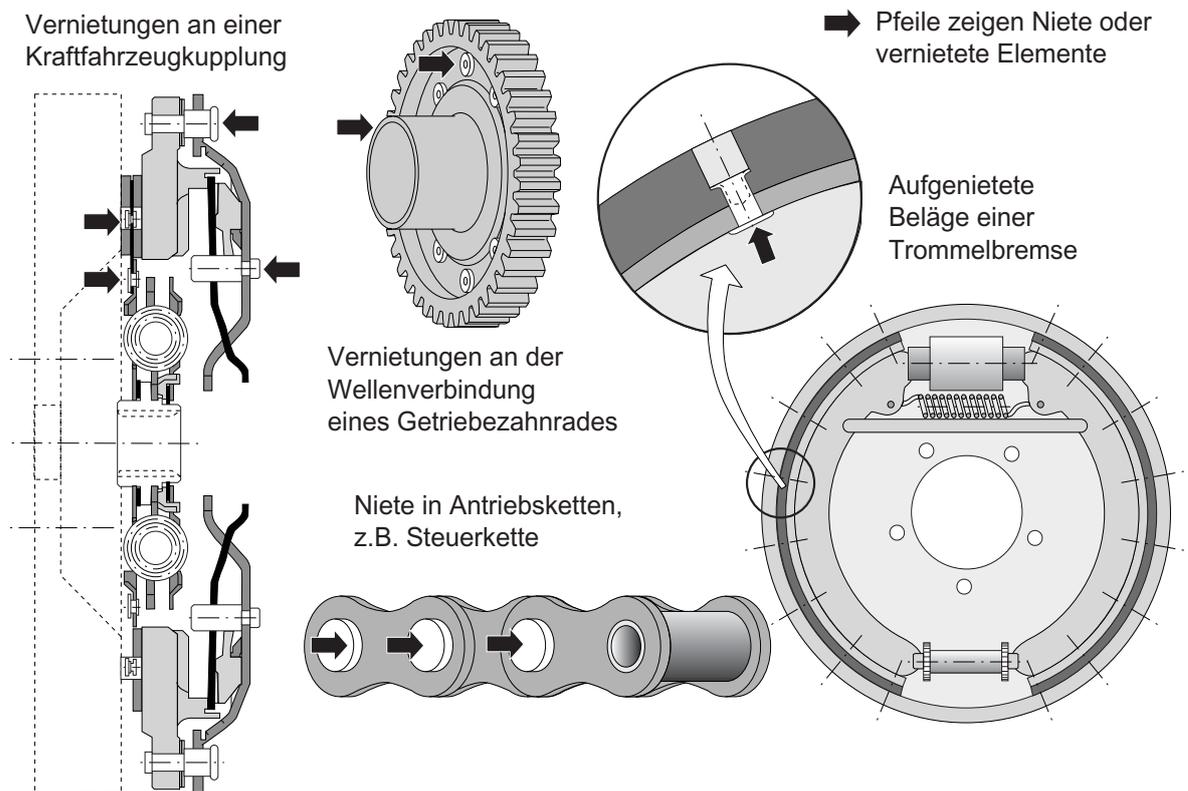
- **Toleranz der elastischen genieteten Blechstrukturen gegenüber zyklischen Wärmedehnungen.**

**Nachteile:**

- **Aufwändigerer Ab- und Anbau** im Vergleich zu einteiligen, tragenden Strukturen (z.B. Gussteile, gefräste Schmiedeteile).

**Intensive Betriebserprobung.**

Auch heute kommen eine Vielzahl Niete und vernietete Elemente im Maschinenbau in unterschiedlichsten Varianten zur Anwendung, Beispiel Kfz.



**Bild 6.1.2-1**

- Bei mehrwandigen Konstruktionen Gefahr einer **Schwingungsanregung** als Resonator (Band 1 Bild 5.4- 7.1 und Bild 5.4-7.2).
- **Keine direkte Sichtbarkeit und Prüfbarkeit** der ummantelten Struktur im Betrieb.

**Positionsfixierung** (oben links): Bei manchen OEMs werden Niete zur **Fixierung der axialen Position** („Bladewalking“) von **Turbinenrotorschaukeln** in der Scheibe verwendet (Lit. 6.1.2-14). Offenbar sind die Axialkräfte auf den Nietkopf ausreichend niedrig, die erforderliche Sicherheit zu gewährleisten. Trotzdem werden immer wieder Fälle bekannt, bei denen diese Nietenversicherung versagte (Lit. 6.1.2-14). Es kam zu umfangreichen Folgeschäden:

- **FOD** durch herausfallende Nietteile.

- **Anstreifen** der verrutschten Schaufel.
- **Vibrationen** bzw. **Unwuchten** bei kleinerem Schaufelversatz im Bereich von Spielen/Toleranzen (Lit. 6.1.2-16). Gefahr von Dichtungsschäden (z.B. Labyrinth) und Lagerschäden.

Ursache für das Versagen der Niete ist gewöhnlich der **Nietkopf**. Typische Auslöser sind

- zu kurze **Anstauchung** (Länge, Durchmesser),
- Beim Anstauchen unbemerkte **Rissbildung** unter dem Kopf (Bild 6.1.2-3),
- Schwächung durch **Schwingverschleiß** (Fretting),
- Außergewöhnlich hohe **Axialkräfte als Folgeschäden**.

Als Abhilfe, offenbar um eine bessere Kraftverteilung zu erreichen, wurde in einem Fall unter dem Nietkopf eine **Beilagscheibe** angebracht.

Wegen der genannten Problematiken scheint man bei neuen Triebwerkstypen die axiale Fixierung einer Rotorbeschaufelung kaum mehr einzusetzen.

**Einseitige Befestigung von Achsen und Hebeln** (Skizzen oben rechts): Typisches Anwendungsbeispiel ist die **Leitschaufelverstellung** in Verdichtern (Bild 6.1.2-8). Dabei wird eine **Achse**, auf der ein Gelenk angebracht ist, einseitig **in einen Hebel eingienietet**. Auf diese Weise überträgt die Nietung, anders als in der üblichen Funktion, Biegekräfte. Bei außergewöhnlich großen Verstellkräften, z.B. als Folge von Korrosion oder FOD, kann es zur Überlastung der Nietverbindung kommen. Eine veränderte Schaufelstellung kann über **Strömungsstörungen umfangreiche Verdichterschäden** auslösen.

**Verdrehsicherung**: Nieten bieten sich wegen ihrer relativ einfachen Austauschbarkeit als mechanische **Sicherung von Laschen gegen Verdrehung** an. Die gesicherten Teile werden dabei nicht geschädigt. Müssen eine größere Zahl Muttern, z.B. einer Flanschverbindung gegen Drehen gesichert und **positioniert** werden, nutzt man geeignet geformte **Blehbänder, die eingienietet** werden.

**Fixierung von Muttern** kann durch Einnieten einer speziellen Variante erfolgen (**Einnietmutter**).

Das **Schließen von Bohrungen** wird manchmal benötigt, um beispielsweise abgebohrte Risse in einer **Gehäusewand abzudichten** oder den Luftstrom durch Bohrungen zu beeinflussen. Solche Maßnahmen sind natürlich nur vorschriftsgemäß entsprechend Angaben des OEM zulässig. Hier ist zu berücksichtigen, dass **Wärmedehnungen und Reibverschleiß zum Herausfallen des Niets** führen kann. Natürlich darf der Niet nicht derartig in die Boh-

rung gepresst sein, dass er eine erneute Rissbildung begünstigt.

**Wuchten von Rotoren** kann mit Nieten auf unterschiedliche Weise erfolgen. Der Niet kann direkt **radial in einen Umfangsbund** eingebracht werden. Es lässt sich auch ein **Wuchtgewicht mit einem Axialniet** fixieren.

**Schwingungsdämpfung, -verstimmung**: Diese Anwendung sei nur der Vollständigkeit erwähnt. Sie ist in modernen Triebwerken nicht bekannt und heute eher ein Provisorium. Es handelt sich um lockere Nieten, die als sog. **Klappnieten** im Bereich der Blattspitze angebracht werden.

**Bild 6.1.2-2** (Lit. 6.1.2-17): Nieten bieten sich als Füge- und Befestigungselement von Leichtbaustrukturen, insbesondere aus **faserverstärkten Werkstoffen** an. Das Bild zeigt 'progressive' Anwendungen in der **Zelle moderner Verkehrsflugzeuge** und der **Schubdüse eines Kampfflugzeugs**. Es geht in erster Linie um die Verbindung des **Faserverbundwerkstoffs mit einer metallischen Struktur**. Dabei sind jedoch einige technische 'Hürden' zu überwinden.

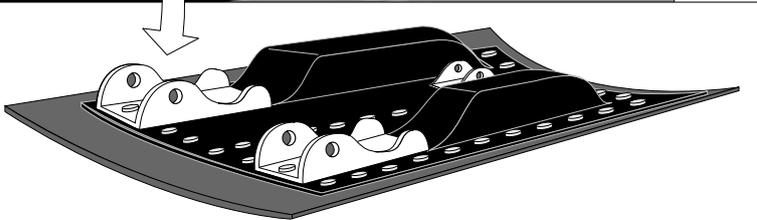
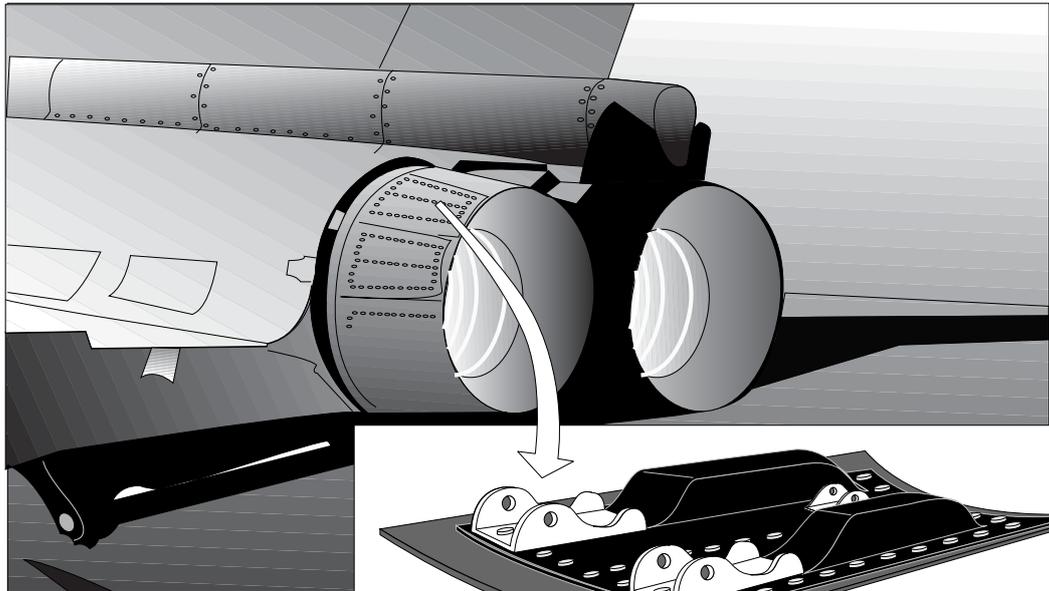
Bei **Flugzeugzellen** aus CFK (Kohlefaser-Kunststoff/Epoxid) verhindert die Gefahr von **Korrosion durch Elementbildung der edel wirkenden Kohlefasern** in Kontakt mit Al-Legierungen (Bild 6.1.2-5) der üblichen Nieten deren Einsatz. Es musste deshalb auf **Nieten aus Titanlegierungen** übergegangen werden. Dabei werden die **Kräfte beim Nietvorgang** deutlich höher. Offenbar haben nicht zuletzt diese Probleme zu langjährigen Verzögerungen bei der Entwicklung eines Verkehrsflugzeugs geführt.

Ebenfalls bedenklich ist der deutlich höhere **E-Modul** von Titanlegierungen und die niedrigere **Wärmedehnung** im Vergleich zu Al-Legierungen. So besteht die Gefahr einer **Überlastung von Faserstruktur oder Niet** wenn ein **Dehnungsausgleich** erforderlich ist.

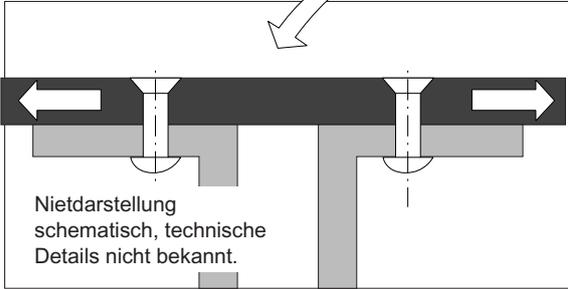
In **Schubdüsen von Kampfflugzeugen** (Bilder oben) kommen **keramische Hochtemperatur-**

# Niet-/Bolzenverbindungen Probleme, Schäden, Abhilfen

Nietverbindungen erfahren gerade in Hybridbauweisen des modernen Leichtbaus eine Renaissance.



Äußere Schubdüsenklappe aus C-Faser verstärkter Keramik (CMC) mit metallischen Nieten und Scharnieren (kein Anspruch auf Detailgenauigkeit)



Nietdarstellung schematisch, technische Details nicht bekannt.

Modernes Verkehrsflugzeug mit Rumpf und Flügeln aus CFK.

**Bild 6.1.2-2**

*Faserverbunde (C-Faser/SiC bis 700°C und SiC-Faser/SiC bis 850 °C) zum Einsatz. Sie haben eine **Pseudozähigkeit**. Die Faserstruktur verhindert ein spontanes sprödes Versagen an örtlichen Spannungsspitzen wie an Nietlöchern.*

*Hier ist die **Einleitung der Gas-/Verstellkräfte in die metallische Struktur** eine Herausforderung. Sie wurde mit Nieten aus Hochtemperaturlegierungen gelöst.*

**Bild 6.1.2-3** (Lit. 6.1.2-9 und Lit. 6.1.2-10): **Versagende Nietverbindungen** können, je nach Anwendung und Funktion (Bild 6.1.2-1) gravierende **Folgeschäden** auslösen. Dazu gehören:

- Die Bruchstücke des Niet wirken als **Fremdkörper** und erzeugen FODs.
- Der Ausfall der Nietfunktion führt zum **Versatz fixierter Bauteile**.
- **Funktionsausfall** von Bauteilen. Ein Beispiel ist der Bruch einer Verdichter-Leitschaukelverstellung (Bild 6.1.2-11).

Das Versagen von der Nietung geschwächter Bauteile beruht meist auf Fehlern im Niet und/oder vom Nietvorgang. Eher selten ist eine ungewöhnlich hohen Betriebsbelastung der Grund.

Das Nieten selbst und damit in erster Linie die **Herstellung des Schließkopfs** (Bild 6.1.2-4), kann Ursache von Fehlstellen sein, die im Betrieb zum Versagen führen. Sie sind in vielen Fällen verfahrensspezifisch. Radialrisse entstehen, wenn die Bohrung von der Durchmesserzunahme des Nietschafts überlastet wird. Das kann ein Versagen der vernieteten Querschnitte auslösen (Skizze oben, Bild 6.1.2-6, Bild 6.1.2-7 und Bild 6.1.2-8).

Bei **konventionellen Vollnieten** werden in erster Linie **zwei Verfahren** angewendet:

**Warmnietung** ist für das Anbringen vieler Nieten wie an Strömungsführenden Blechstrukturen geeignet. Dazu kann sich eine umfunktionierte **Punktschweißmaschine** eignen. Mit zeitgesteuerter Anpresskraft und Stromdurchgang (Widerstandsaufheizung) wird der Schließkopf des eingesteckten Niets geformt. Treten beim Nieten Probleme auf, zeigen sich diese meist in einer von außen **gut sichtbaren radialen Rissbildung** am Schließkopf (Skizze oben links). Problematisch sind besonders von außen nicht sichtbare Fehler und Risse. Sie sind mit **seriengeeigneten, zerstörungsfreien Prüfverfahren nicht ausreichend sicher detektierbar**. Es handelt sich um **Verformungs-**

**fallen, Kriechrisse** bzw. **Gewaltrisse** oder **Warmrisse**. Typische Risslagen befinden sich am **Übergang des Schließkopfs zum Schaft** (Skizze oben rechts). Bei ungünstiger Temperaturverteilung kann es aber auch zur Warmrissbildung in anderen Ebenen des Schaftquerschnitts kommen.

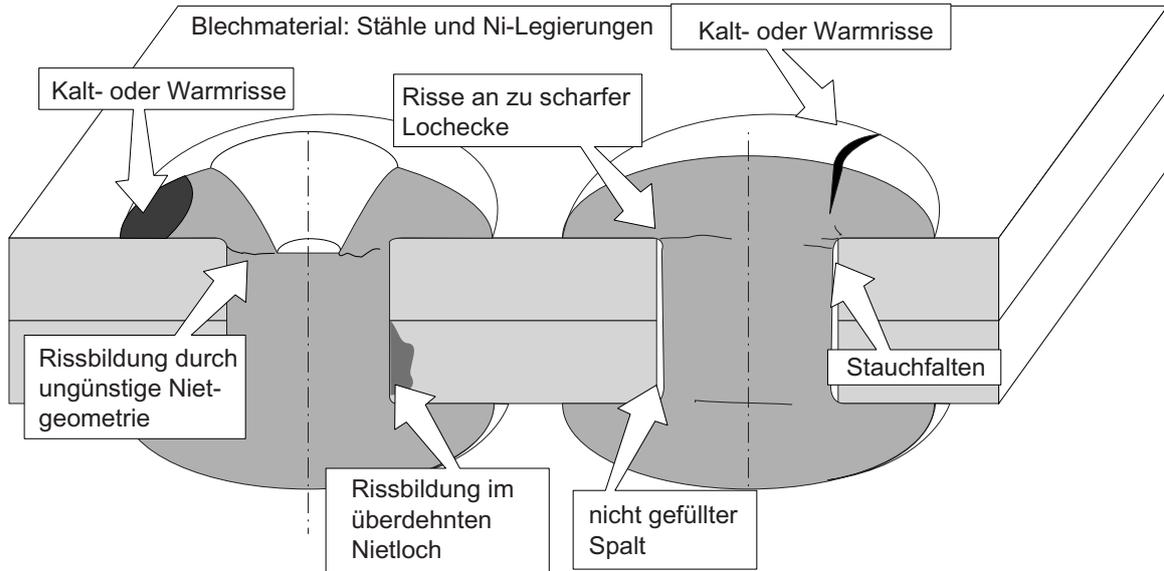
**Kaltnietungen** werden an schwer zugänglichen Stellen auch mit Hand oder handgeführtem Werkzeug hergestellt. Hier hängt von der **ausführenden Person** besonders viel ab. **Verhalten und Aussehen des Nietkopfs** bei der **Anformung** für die Beurteilung des Endergebnisses (äußeres Bild, Sitz/eventuelles Spiel) entscheidend. Dafür ist **Erfahrung** Voraussetzung. Auch scheinbar kleine Auffälligkeiten am neuen Niet vor der Nietung sollten auf Ursache und Auswirkung überprüft werden. Zu beachten sind Länge, Form und Oberflächenzustand. Bei der Herstellung des Setzkopfes sind Verformungsverhalten und Oberfläche zu beobachten. Das gilt besonders für Nieten die einer **axialen Fixierung**, z.B. von Turbinenrotorschaukeln dienen.

Der Schließkopf **durchgehend oder einseitig hohler Nieten** entsteht auch mit dem **Aufweiten**, ähnlich dem Ziehniet. Der Kopf liegt hier jedoch auf der zugänglichen Seite. Für eine bessere Anformung und gegebenenfalls zum Schutz der Auflageflächen werden **Beilagscheiben** unter den Kopf gesetzt.

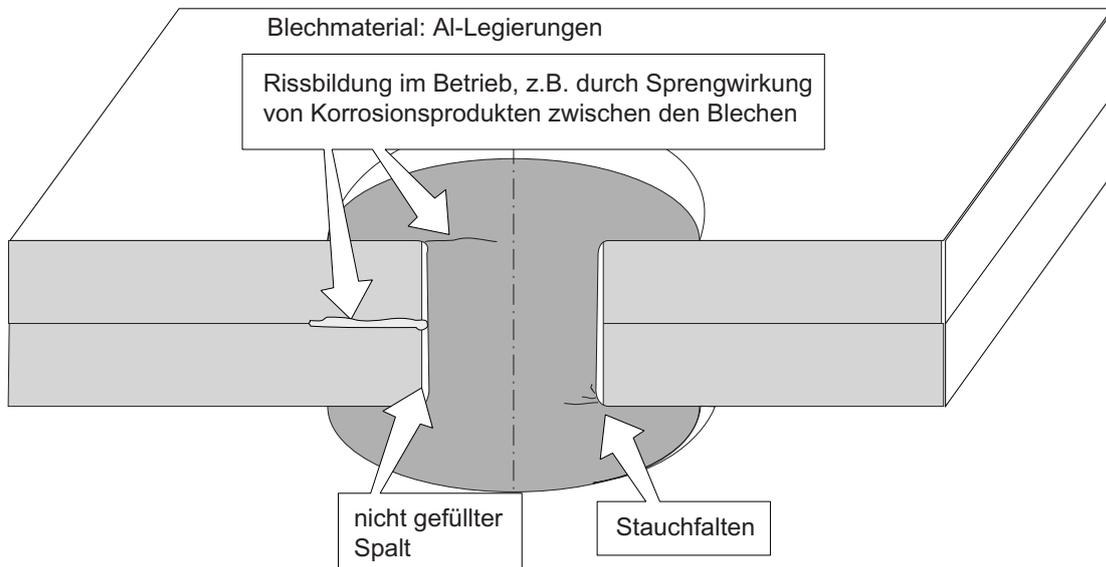
# Niet-/Bolzenverbindungen Probleme, Schäden, Abhilfen

Nietung ist auch in der Triebwerkstechnik eine alte und bewährte Technologie. Sie bleibt trotzdem problematisch.

Probleme an Warmnietungen massiver Niete mit einer Punktschweißmaschine



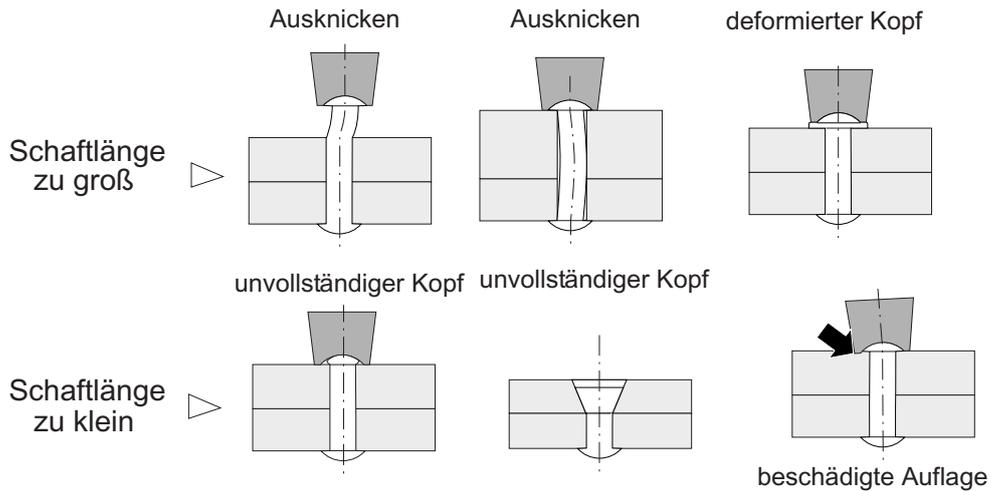
Probleme an Kaltnietungen von Verkleidungen (z.B. Gondel, Pylon) und Zellenbeplankungen.



**Bild 6.1.2-3**

Die Erfahrung zeigt, dass beim Nieten als nicht automatisiertem Vorgang Fachkenntnis, Erfahrung und Geschick die Qualität gewährleisten muss.

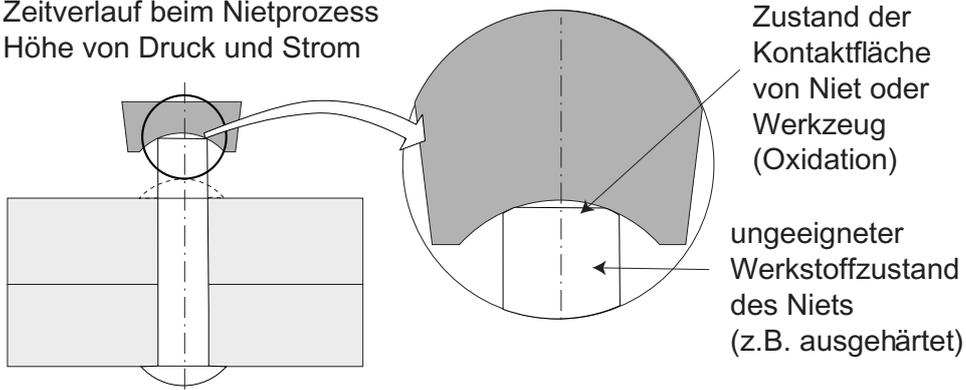
### Fehler beim Nieten



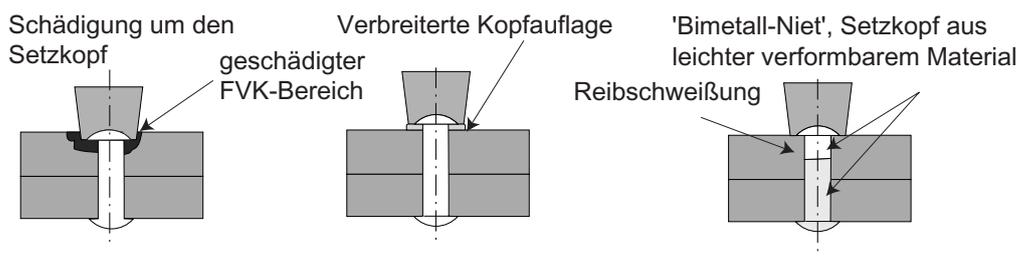
### Zusätzliche Probleme beim Nieten mit einer Punktschweißmaschine

nicht optimierte Maschinendaten:

- Zeitverlauf beim Nietprozess
- Höhe von Druck und Strom



### Schädigungen beim Nietvorgang in faserverstärkten Kunststoffen (FVK)



**Bild 6.1.2-4**

**Bild 6.1.2-4** (Lit. 6.1.2-9): Nieten als eines der ältesten Verbindungsverfahren ist einfach und bewährt. Trotzdem birgt es gerade in einer Zeit, in der das **Handwerkliche** in den Hintergrund zu treten scheint, nicht zu unterschätzende **Probleme**. Auch wenn diese trivial anmuten, erfordert ihre Vermeidung **Erfahrung**. Das gilt sowohl für den Nietvorgang als auch für die nachträgliche Beurteilung der Betriebstauglichkeit (Blindniete siehe Bild 6.1.2-5).

Die meisten Probleme (Rahmen oben) sind **von außen sichtbar** oder können **beim Nietvorgang** auffallen (Rahmen oben). Dabei ist auch auf das **Spiel des Nietschafts in der Bohrung** zu achten. Das benötigt „**Gefühl**“ bei ausreichender Erfahrung. Hinweise auf eine nicht passende **Nietlänge** sind ernst zu nehmen. Gegebenenfalls ist dies einer beurteilungsbefugten Stelle zu melden.

Im Rahmen unten wird auf erfahrungsbasierte **Probleme beim Warmnieten** (Rahmen unten) mit einer adaptierten **Punktschweißmaschine** hingewiesen. Dieses Verfahren wird bei Nieten aus **warmfesten Legierungen** wie hochlegierten aushärtbaren Stählen (A 286) angewandt. Hier spielt die strikte Einhaltung **optimierter und abgesicherter Einstellparameter** der Maschine für die Sicherheit der Nietung eine wichtige Rolle.

Sowohl das **Werkzeug** als auch der **Nietzustand** müssen dem für die Nachweise entsprechen. Abweichungen die den **Verformungsprozess** (Verschleiß des Kopfwerkzeugs) oder den aufheizenden **Stromdurchfluss** verändern (Oxidation) sind kritisch. Treten **Verformungsprobleme und Rissbildung** auf, ist der **Nietwerkstoff** auf den geeigneten bzw. **vorgeschriebenen Gefügestand** (z.B. Aushärtung, Lösungsglühung) zu überprüfen.

**Bild 6.1.2-5** (Lit. 6.1.2-1): **Nietung mit Zieh-nieten** (Blindniete, engl. pop rivets, blind rivets) hat durchaus Vorteile. Es ist jedoch erfahrungsgemäß in einer 'Maschinenbauumgebung' **äußerst problematisch**.

Die Nietungen lassen sich einfach, ohne größeren Kraftaufwand durchführen. Deshalb bieten sie sich für kleine, schnelle Reparaturen von Blechteilen an. Eine besondere Eigenart der Niete ist, dass der **Schließkopf auf der Gegenseite des Nietwerkzeugs** (Nietzange) entsteht (Skizze oben rechts). So kann er sich einer **visuellen Prüfung entziehen**. Damit besteht bei einem **zu großen Bohrungsdurchmesser** die Gefahr, dass auf der Rückseite der Dornkopf (engl. mandrel head) **in die Bohrung gezogen oder gar durchgezogen** wird (engl. pull through). Das wird von im Vergleich zum Nietwerkstoff 'weichem' Material (z.B. Leichtmetalle, Kunststoff) begünstigt. Entsprechend schlecht wird der Schließkopf ausgebildet (Skizze unten links). In einem solchen Fall besteht akute Gefahr des **Herausrutschens**, d.h. eines Versagens der Nietung. Im Extremfall wird das **Rückblech vom Nietkopf überhaupt nicht erfasst** (Skizze unten rechts). Zieh-niete sind nur erlaubt, wenn sie explizit im Handbuch vorgeschrieben sind.

**In keinem Fall dürfen in eigener Entscheidung Massivniete mit Schließkopf gegen Blindniete (z.B. im Rahmen von Wartungsarbeiten) ausgetauscht werden. Im Zweifelsfall ist der OEM zu fragen.**

### **Potenzielle Gefahren bei Zieh-nieten:**

- Bei der Nietung wird der **Nietdorn funktionsnotwendig abgerissen**. Ein Rest kann versehentlich in der Maschine verbleiben. Typisches Beispiel ist der Ansaugbereich einer Turbomaschine. Umfangreiche **Fremdkörperschäden** sind dann die Folge.

Wird die vorgesehene **Klemmlänge des Niets überschritten**, besteht die Möglichkeit, dass der **Dornkopf abfällt oder abplatzt**.

Der Dornkopf kann auch von einem **falsch eingestellten Nietwerkzeug** (Druckluft) gelöst werden. Das ist der Fall, wenn man den Nietdorn zu schnell bzw. mit zu viel Kraft zieht. Die Folge ist neben **einem losen Niet** auch **FOD-Gefahr**.

- **Schlechter Sitz bzw. loser Sitz des Niets** ist gewöhnlich auf einen **zu niedrigen Druck auf den Setzkopf** beim Nietvorgang zurückzuführen. Dies kann mehrere Ursachen haben:

Ein **zu kleiner Bohrungsdurchmesser** verhindert das Durchschieben des Niets bis zur vollkommenen Setzkopfaufgabe. Dabei liegt bevorzugt der Übergang vom Setzkopf zum Schaft an.

- **Lockert sich bei Vibrationen mit Verschleiß** (Fretting) und/oder **Korrosion** der Dornkopf im Niet, können sich **Dornkopf und Niet lösen** und in die Maschine gelangen. Dann ist mit umfangreichem **FOD** zu rechnen. Das wird von der Verwendung eines Niets mit **zu kurzer Klemmlänge** gefährlich begünstigt.

Ist die **Klemmlänge** für die zu nietenden Querschnitte **zu groß**, kann der Niet ebenfalls **lose sitzen**.

**Korrosionsprobleme** (galvanische Korrosion/wässrige Korrosion) werden von unterschiedlich edlen **Werkstoffen des Niets und der zu verbindenden Bleche** begünstigt. Der notwendige Elektrolyt wird unter Betriebsbedingungen bei Zutritt von **Schwitzwasser**, besonders in Meeresatmosphäre, (Kochsalz) gebildet. **Korrosionsprodukte** wie von Al- und Mg-Legierungen, können wegen ihres vergrößerten Volumens im Bereich der Nietbohrung eine **Sprengwirkung** entfalten. **Bröseln die Korrosionsprodukte heraus, lockert sich der Niet.** **Anfressungen** in Nietbohrungen begünstigen mit ihrer **Kerbwirkung** in hochbeanspruchten Zonen die Bildung von Rissen. Zusätzlich kann **Korrosion das Wachstum der Risse beschleunigen**.

- Ist die **Gegenseite** dieses, deshalb auch „Blindnietung“ genannten Verfahrens, **nicht visuell prüfbar**, erhöht sich die Gefahr eines **unbemerkten fehlerbehafteten Schließkopfs**. Das ist beispielsweise in einem geschlossenen Innenraum der Fall. Eine ungenügende Ausbildung des Nietkopfs kann im Betrieb unter Vibrationen und Reibverschleiß (Fretting) zum **Herausfallen des Niets** führen (Skizze unten links).

**Eingeschränkte Anwendbarkeit:** Die leichte Ersetzbarkeit durch **Ausbohren und Anbringen bei einseitiger Zugänglichkeit** genügt nicht den Anforderungen der **Zutrittssicherheit** von Räumen. Ein Beispiel sind von Zollplomben gesicherte LKW (Rahmen unten).

**Abhilfen:**

- Voraussetzung für eine fehlerfreie Blindnietung ist der **richtige, vorschriftsgerechte Bohrungsdurchmesser**.

- **Richtige Auswahl des Nietwerkstoffs.** Ist dieser gegenüber dem Material der Bohrung zu hart (z.B. rostfreier Stahl in Plastik) besteht die Gefahr, dass der Dornkopf durchgezogen wird.

- **Richtige Klemmlänge** (engl. grip length) des Niets. Sie ist notwendig der Nietkopf alle Blechlagen sicher erfasst.

- Um **Korrosion** möglichst zu vermeiden sollte das **Nietmaterial dem zu verbindenden Werkstoff entsprechen**. Am sichersten ist eine isolierende Zwischenschicht wie Lack.

**Merksatz:**

Wegen der einfachen Ersetzbarkeit dürfen Blindniete **nicht für die Sicherung zugangsbeschränkter Räume** verwendet werden. Ein Beispiel ist die Befestigung der Sicherungslaschen für Planen verplombter LKW (Bild 6.1.2-5).

# Niet-/Bolzenverbindungen Probleme, Schäden, Abhilfen

Die Anwendung von Blindnieten erscheint einfach, ist aber von potenziellen Problemen begleitet.

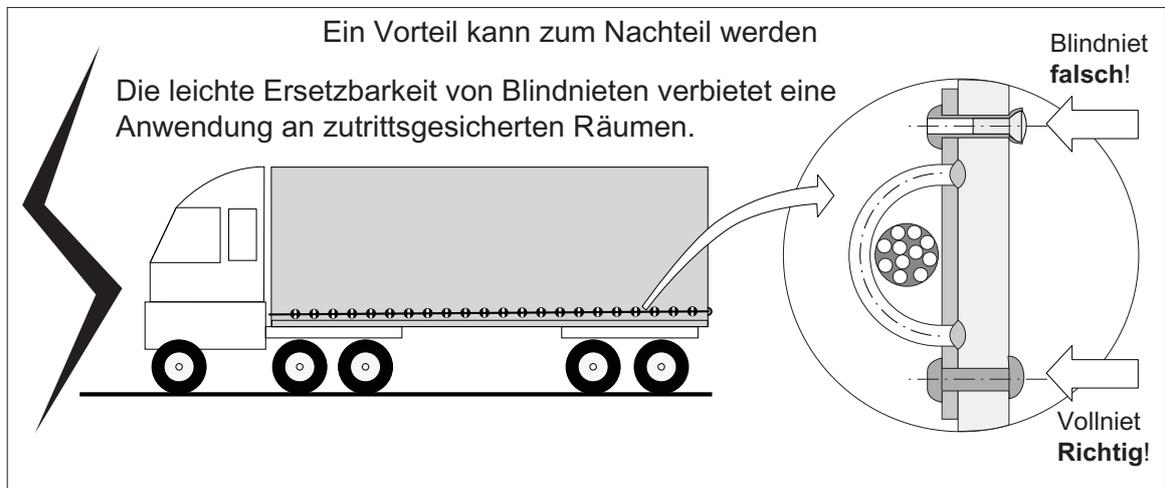
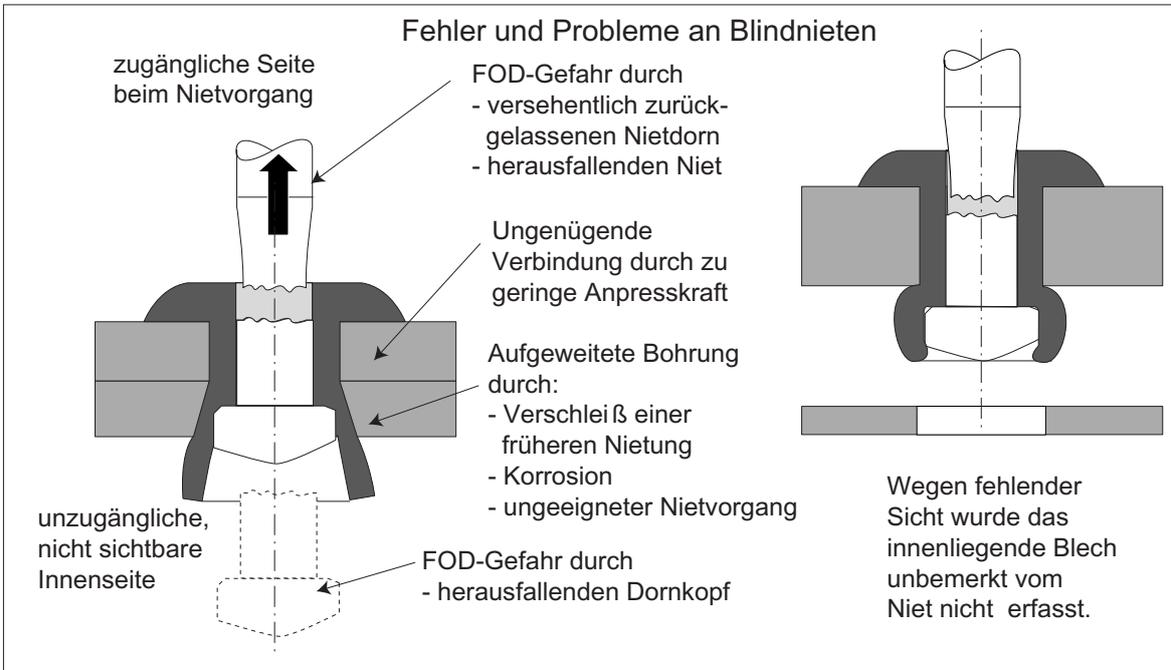
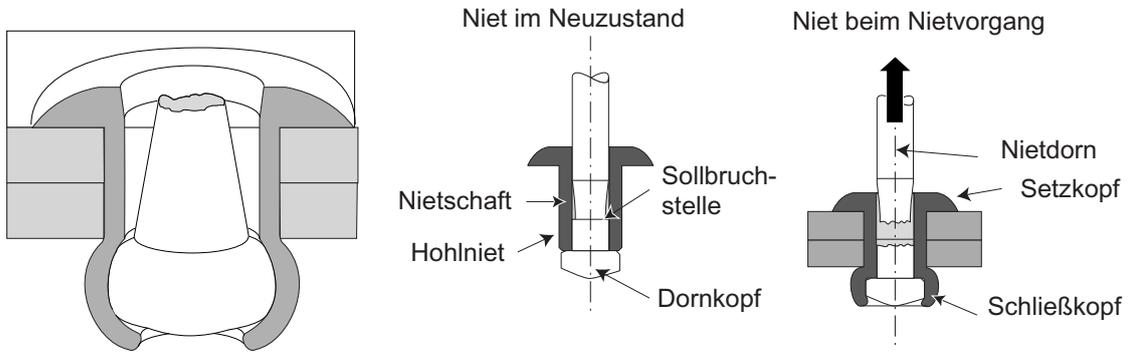


Bild 6.1.2-5

## Merksatz:

Bei Blindnieten ist darauf zu achten, dass nur die **für den Verwendungszweck spezifizierten Niete** verwendet werden. Das gilt auch für **Masshaltigkeit** und **Werkstoffe** sowie eventuelle **Beschichtungen**. Die Nietung muss mit den **spezifizierten Werkzeugen und Verfahrensparametern** erfolgen.

## Merksatz:

Das Vernieten von **Titanblechen mit Stahlnieten** oder umgekehrt ist äußerst problematisch. Es können gefährliche spröde Phasen mit Rissbildung entstehen. Bei Fretting fällt die Schwingfestigkeit im Betrieb extrem ab. Dies ist bei Nietungen leider häufig nicht auszu-schließen.

Die Verbindung von Nieten und Blech aus Titan geht oft mit Schädigungen an Schaft und Bohrung durch **Fressen** einher.

**Bild 6.1.2-6:** Als Beispiel für die Abhängigkeit der ermittelten Festigkeiten, Lebensdauern und Schwachstellen von Versuchsparametern soll diese zweischnittige Nietverbindung dienen. Sie sei von einer Kombination aus Zug-Druck- und Wechselbiegung beansprucht. Je nachdem welche schädigenden Einflüsse bei einer Prüfung wirksam werden werden **total unterschiedlichen Ergebnissen** erzielt. Deshalb ist es von entscheidender Bedeutung **alle relevanten Einflüsse zu berücksichtigen**. Das gilt auch für **Versuche und Nachweise**. Belastungsparameter müssen entsprechend ausreichend be-

triebsnah sein. Besonders gefährlich sind **Nachweise die höhere Festigkeiten oder eine längere Lebensdauer als im praktischen Betrieb vorgaukeln**. Dagegen bedeuten solche, die „auf der sicheren Seite liegen“ zwar möglicherweise erhöhten Zeitaufwand, Gewicht und Kosten, gefährden aber nicht die Betriebssicherheit.

Tritt z.B. während der mechanischen Belastung **Korrosion** auf, entsteht **Reibverschleiß** an den Kontaktflächen (Frettingzonen, Band 1 Bild 5.9.3-4), oder wirkt bei Heißeilen statische Ermüdung (Zeitstand, **Kriechen**; Band 1 Bild 5.3.2-4) kann das abhängig von der Belastungszeit zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Ist z.B. die zyklische Belastung im Betrieb niedrigfrequent und der Versuch wird zur Prüfzeitabkürzung hochfrequent durchgeführt wirken sich manche Einflüsse nicht (betriebsnah) aus. Solche Versuche können sowohl Einfluss auf die gemessenen Festigkeiten haben als auch die **Versagensstellen** verändern.

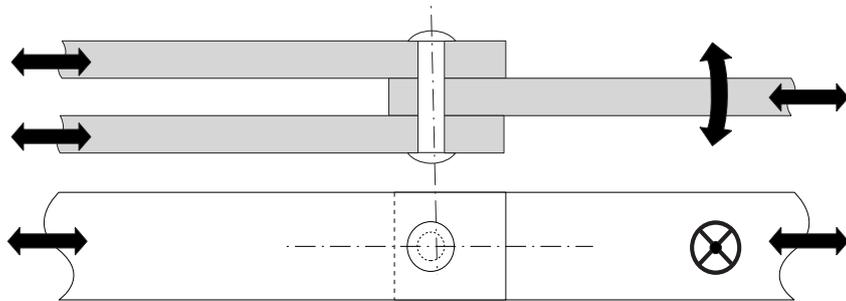
- Bei **stetig zügiger Belastung** ist je nach Dimensionierung ein Abscheren („A1“) des Niets oder einem Ausreißen („A2“) der mittleren Lasse zu erwarten.

- Wenn man annimmt, dass bei **hoher dynamischer Belastung** mit örtlich merklicher plastischer Verformung (im LCF-Bereich, Band 1 Bild 5.4.1.1-2) noch keine gefährliche Verschleißschädigung an den Kontaktflächen auftritt, dürfte ein Bruch am Steifigkeitssprung oder ein Abplatzen des Nietkopfes („B2“) infolge eines **Schwingbruchs** eintreten.

- Bei **niedriger dynamischer aber hochfrequenter Beanspruchung**, unterhalb der Dauerfestigkeit des ungeschädigten Werkstoffes, ist im Falle einer **Reibschädigung** mit einem Bruch der von der Nietbohrung ausgeht („C“) zu rechnen (Lit. 6.1.2-13).

# Niet-/Bolzenverbindungen Probleme, Schäden, Abhilfen

Abhängig von der Belastung können Nietverbindungen sehr unterschiedliche Schwachstellen zeigen.



<b>A1</b>		<p>Versagen bei zügiger Überlastung</p> <p>Abscheren des Niets</p>
<b>A2</b>		<p>Ausreißen der Lasche</p>

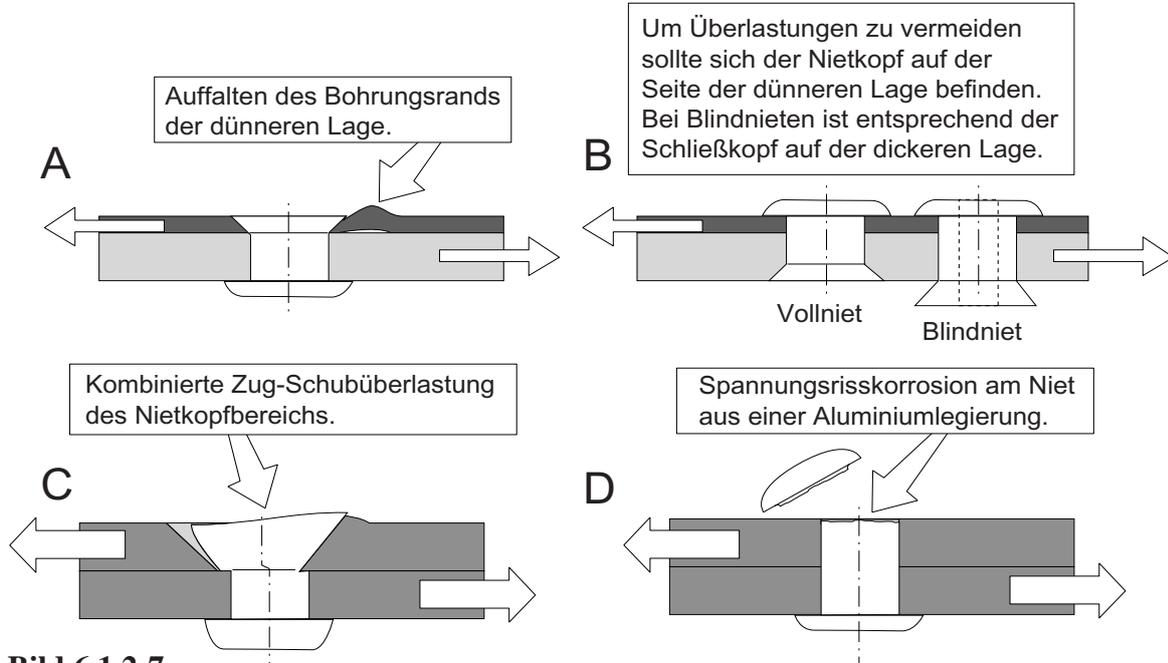
<b>B1</b>		<p>Versagen bei hoher dynamischer Beanspruchung</p> <p>durch Bruch am Steifigkeitssprung</p>
<b>B2</b>		<p>Schwingbruch am Nietkopf</p>

Typisches Versagen durch Schwingermüdung, insbesondere bei nicht ausreichend feststehendem Nietschaft.

<b>C</b>		<p>Versagen bei niedriger dynamischer Last und Reibschädigung (Fretting)</p> <p>aufgebrochener Schwingriss</p>
----------	--	--

Bild 6.1.2-6

## Typische Betriebsschäden an metallischen Nietverbindungen durch statische Belastung.



**Bild 6.1.2-7**

**Bild 6.1.2-7** (Lit. 6.1.2-1 und Lit. 6.1.2-5): Es handelt sich um **Versagensformen** einschittiger Verbindungen metallischer zugbeanspruchter Laschen.

**Auffalten** einer dünnen Lasche („A“): Der Bohrungsrand der dünnen Lasche wird durch die spitze Form auf Grund der Senkung geschwächt, keilförmig erfasst und gestaucht. Um dies zu vermeiden ohne die Lagendicken zu vergrößern sollte der Kopf hier pilzförmig ausgebildet sein („B“). So wird dieser nicht geschwächt und der zylindrische Nietschaft kommt in der dünnen Lasche maximal zum tragen. Grundsätzlich ist die **Auslegung für jede Lasche einzeln** durchzuführen. Das gilt auch für die Laschendicke.

Bei mittleren Laschendicken kontrolliert der Kopfbereich des Niets die Festigkeit der Verbindung.

Die Zugspannung aus der Biegebelastung des versenkten Nietkopfs wird der Scherbeanspruchung des Schafts überlagert. Dies kann zur **Überlastung am Übergang des Kops zum**

**Schaft** („C“) **führen**. Eine wichtige Rolle spielt die Deformation des versenkten Nietkopfs und die tragende scharfe Kante der Lasche. Abhilfe, falls irgend möglich, sind flach aufliegende Nietköpfe entsprechend dem Setzkopf auf der Gegenseite.

Auch ohne statische Überlastung kann der **Nietkopfs abbrechen** („D“). Typische Ursache ist **Risskorrosion** (Band 1 Kapitel 5.6.3) einer ungenügend wärmebehandelten hochfesten Al-Legierung. Abhängig von der konstruktiven Gestaltung kann bei **dynamischer Beanspruchung** der Kopf einen **Biege-Schwingbruch** erleiden („B2“ in Bild 6.1.2-6, Bild 6.1.2-8 und Bild 6.1.2-9).

**Bild 6.1.2-8** (Lit. 6.1.2-1, 6.1.2-5 und Lit. 6.1.2-12): Es ist damit zu rechnen, dass insbesondere mit Kohlefaser verstärkte Kunststoffe (CFK) in Großserien des Automobilbaus zum Einsatz kommen. Dies ist eine Folge der Notwendigkeit niedriger Fahrzeuggewichte, insbesondere bei KFz's mit Elektroantrieb (Lit. 6.1.2-11). Damit werden auch Probleme der Nietverbindungen Langfaser verstärkter Werkstoffe für den Konstrukteur interessant. Auch wenn überwiegend Klebetechniken eingesetzt werden.

Die Eigenschaften der Nietverbindungen faserverstärkter Werkstoffe (FVW), insbesondere der **Lagen und deren Aufbau** bestimmen die **Versagensform**. Homogene Metalle (siehe Bild 6.1.2-6) regieren weniger ausgeprägt. Zu den FVW gehören solche mit Kunststoffmatrix (FVK) und anorganischer/keramischer Matrix (CFK, engl. CFC, Bild 6.1.2-2).

Weil ein Versagen der FVK-Werkstoffe bei **dynamischer Beanspruchung** (Schwingungen) unterhalb der Bruchfestigkeit kaum zu erwarten ist (Lit. 6.1.2-12) sind Schadensbilder an FVK durch **Kurzzeitüberlastungen** von besonderer Bedeutung. Aus dem **Versagensbild** einer Nietverbindung lässt sich auf die ursächliche **Belastungsart** und/oder Probleme der **Herstellung** und **Werkstoffeigenschaften** schließen.

Die folgenden Überlegungen gelten für zugbeanspruchte Niet-/Bolzenverbindungen:

**Versagensspannung:** Es wird die zu den Versagens-/Schadensbildern (engl. Failure Modes) führende mittleren Spannung ermittelt. **Jede mögliche Versagensart** wird **für sich** betrachtet. Eine Verbindung sollte für möglichst viele Versagensarten ausgelastet sein. Sie sollte also möglichst nah an der versagensspezifischen, ausreichend sicheren Belastung liegen. Es kann sich jedoch lediglich um eine relativ grobe **Abschätzung** handeln. Typische Einflüsse:

**Werkstoff und Herstellung:** Dazu gehören

- Passung,
- Materialschädigung, insbesondere Kriechprozesse mit Umlagerung der Übertragungskräfte und Spannungen (Bild 6.1.2-9).

- Elastizität der Faserlagen.

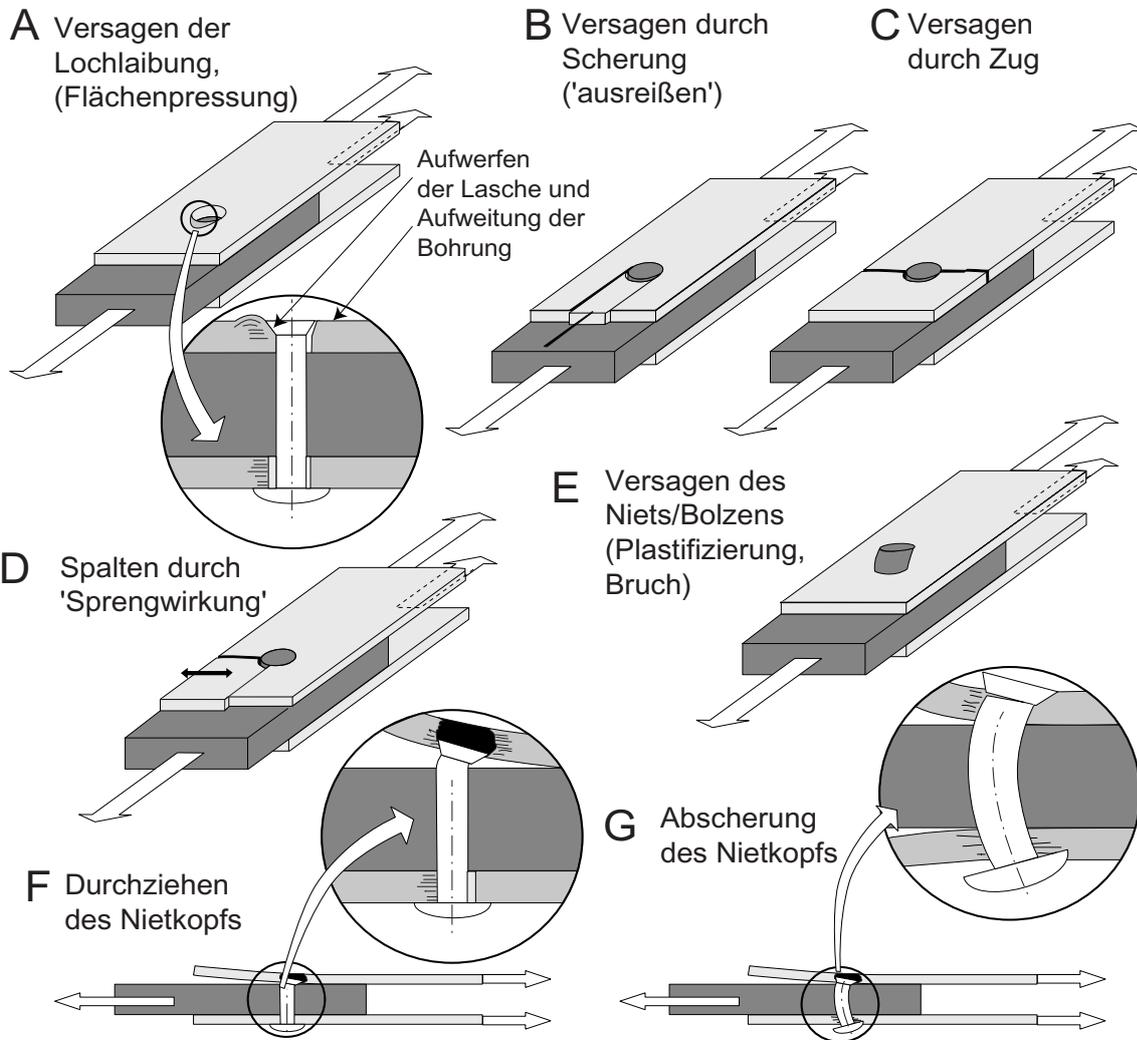
**Geometrie der Verbindung:** Besonders wichtig ist die Laschenbreite und der Bolzen-/Nietdurchmesser. **Wenn kein Versagensmodus dominiert sind sie optimal gewählt.** In diesem Fall gehen die Modii 'ineinander über'. **Glasfaser** verstärkten Kunststoffen (GFK) zeigen für Abweichungen einen deutlich schärferen Übergang als CFK. Dies ist also 'more forgiving'.

**Größeneinfluss:** Bei zweischnittigen Verbindungen gibt es für die Zugkraft ein **Optimum im Verhältnis Laschenbreite zu Nietdurchmesser**. Darüber bringt die Verbreiterung der Lasche keinen Vorteil. Es handelt sich damit um eine Änderung der Versagenart. Unterhalb dem Optimum bricht die Lasche am dünnsten Querschnitt durch die Bohrung („C“). Darüber als Folge der hohen Flächenpressung in der Bohrung (Ausreißen, „B“).

**Lagenaufbau:** Die **Reihenfolge** von Einzelschichten gewöhnlich unterschiedlicher Faserorientierung bestimmt die ertragbare Flächenpressung in der Lochlaibung. Wird die Reihenfolge verändert wirkt sich dies auf die Belastbarkeit aus. Die Lagen in Krafrichtung (0°-Lagen) verhalten sich am steifsten und tragen entsprechend viel. Sie sollten zur Erzielung einer ausreichenden Abstützung nicht als oberste Lage verwendet werden. Mit dem Anteil der Lagen gleicher Ausrichtung sinkt die Tragfähigkeit. Gegenüber diesen Einflüssen haben Auslegungen nach der klassischen Laminattheorie und computergestützten Berechnungen deutliche Schwächen.

**Verbindungs konstruktion:** **Zweischnittige Verbindungen** sind weit höher belastbar als einschnittige. Deren Unsymmetrie erzeugt ein überlagertes Biegemoment (Bild 6.1.2-7 und Bild 6.1.2-9). Zusätzlich können die Nietköpfe auf unterschiedliche Weise versagen bzw. Decklagen schädigen („F“ und „G“).

## Typische Schadensbilder in zweischnittigen FVK-Niet- und Bolzenverbindungen unter statischer Last.



Welche Einflüsse bestimmen den Versagensmodus einer der zweischnittigen Bolzenverbindung von zugbeanspruchten VK-Strukturen?

- Verhältnis von Laschenbreite zu Bolzen-/Nietdurchmesser. Es ist optimal, wenn keine Versagensart dominiert ("A" bis "D"). Die übertragbare Zugkraft ist linear vom Abmessungsverhältnis abhängig.
- Verhältnis von Lochabstand zur Endkante zum Niet-/Bolzendurchmesser. Über einem verbindungs-spezifischen Wert erhöht der Kantenabstand die Zugfestigkeit nicht mehr. Darunter erfolgt der Bruch in Kraftflussrichtung (ausreißen "B"), darüber Versagen der Bohrung durch zu hohe Flächenpressung ("A").
- Der Werkstoffeinfluss/Lagenaufbau der FVK-Laschen beeinflusst besonders die zulässigen Lochlaibungsdrücke ("A"). Einfluss mit Finiten Elementen rechnerisch nur schwer erfassbar.

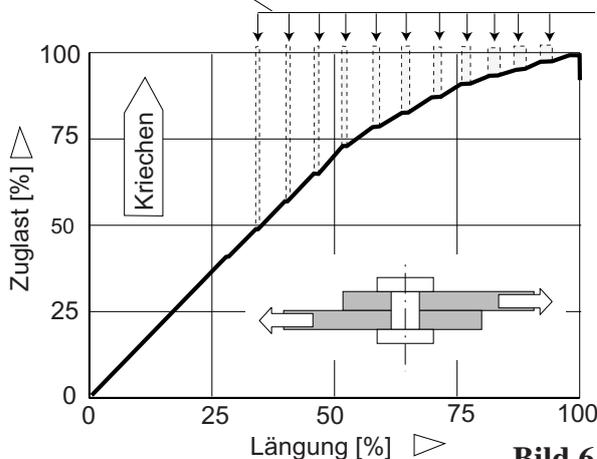
**Bild 6.1.2-8**

Bildtext vorhergehende Seite

## Bei Bolzenverbindungen von CFK sind bei Versagen Effekte zu beobachten die auf Kriechen schließen lassen.

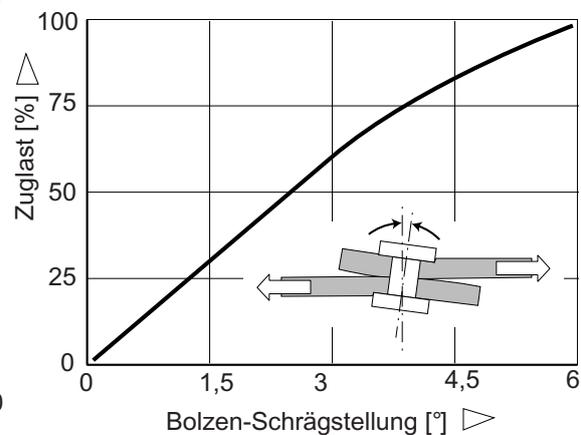
Typischer Zuglast-Dehnungsverlauf einer einschnittigen Nietverbindung.

Während der Längenmessung wurde die **Zugkraft in Zeitabschnitten von einigen Minuten konstant gehalten**. Dabei zeigte sich der **Treppenvorlauf** der auf **Kriechvorgänge** im CFK zurückgeführt wird.



Typischer Verlauf der Zuglast-Schrägstellung des Bolzens einer einschnittigen Nietverbindung

Ab einem gewissen Lasthorizont steigt die **Schrägstellung des Bolzens überproportional**. Möglicherweise auch hier die Folge eines Kriecheffekts.



**Bild 6.1.2-9**

**Bild 6.1.2-9** (Lit. 6.1.2-12): Der **statische Zugversuch** an mit Niet-/Bolzenverbindungen verbundenen CFK Platten zeigt einen für diesen Werkstoff unerwarteten Effekt.

Wird die Zugkraft im Verlauf des Versuchs jeweils einige Minuten nicht erhöht, beobachtet man **Treppentufen in der Belastungs-Dehnungskurve** (Diagramm links). Diese sind mit **Kriechvorgängen** im Kontaktbereich Bolzen/Bohrung zu erklären. Der Effekt beginnt ab einer bestimmten probenspezifischen Zuglast deutlich, hier etwa bei ca. 50% der Bruchlast. Die jeweilige Kriechlänge/-geschwindigkeit nimmt dann mit der Last zu. Das zeigt sich in der **Abflachung der Kurve** aus dem linearen (rein elastischen) Verlauf. In dieser Phase ist ein **Knistern** zu hören. Es entsteht durch Laminatschäden im Bohrungsbereich. Der Kriechvorgang lässt sich wie folgt erklären:

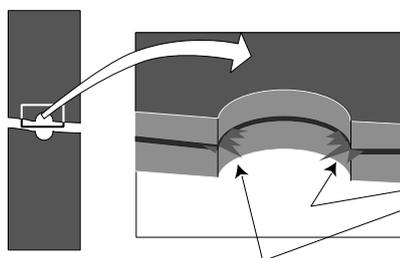
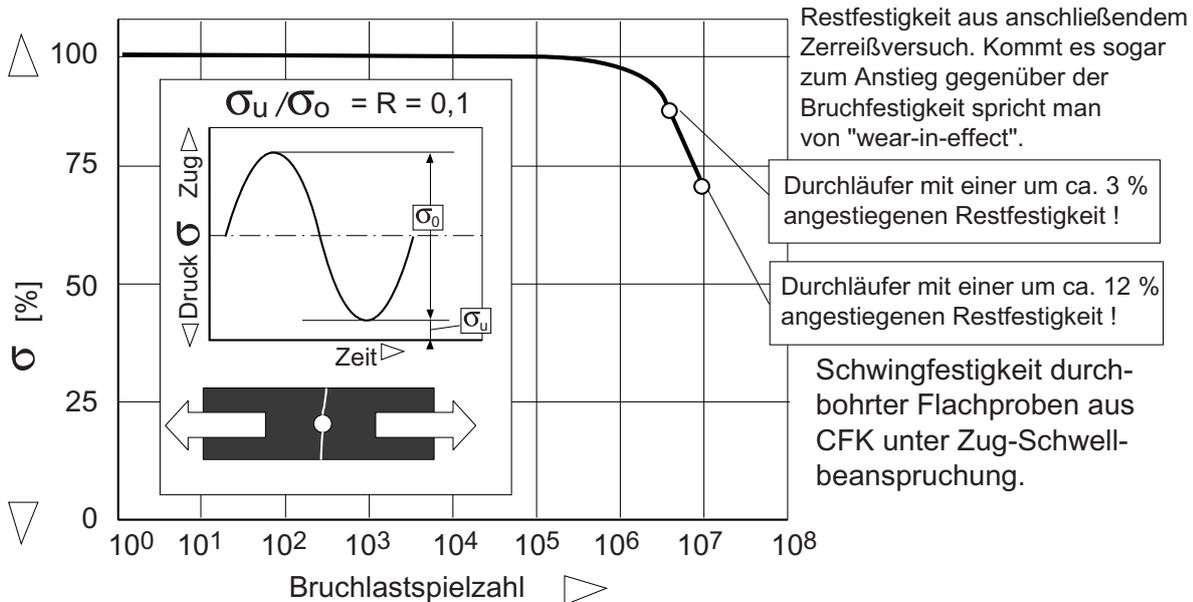
Von den rein elastischen, daher spröden und extrem warmfesten Kohlefasern ist keine plas-

tische Verformung als Kriechdehnung zu erwarten. Deshalb steht die **Matrix** unter Verdacht. Werden die tragenden **Fasern** vom Druck an der Bolzenauflage überlastet **knicken** sie. Damit wird die **Matrix** (Kunstharz) **höher belastet** und der Verbund zeigt bleibende Verformungen. Das Kriechen ist also ein **Schädigungsindiz/-maß**. Es bietet eine Chance an betriebsbeanspruchten **Bauteilproben** mit einem **nachträglichen Belastungsversuch** Rückschlüsse zu ziehen.

Als weiteren Effekt wurde eine **Bolzenschragstellung** beobachtet (Diagramm rechts). Sie nimmt ab ca. 50% der Bruchlast überproportional zu, d.h. die **Belastungs-Schrägstellungskurve** wird **flacher**. Das ist ebenfalls von einem **Knistern** begleitet. Auch hier dürfte es sich um eine **Schädigung** im Bereich der Bolzenanlage handeln.

Allgemein lässt sich feststellen, dass die Bruchdehnung von Proben untereinander stark streut. Das lässt sich mit typischen **Schwachstellen**

Unterhalb der Bruchnennspannung einer gekerbten CFK-Probe tritt offenbar keine nennenswerte Ermüdung auf. Im Gegenteil kann die nachträglich ermittelte Rest-Bruchfestigkeit sogar ansteigen ("wear-in-effect").



Verstärkte Ausfransungen von den Bruchausgängen an den Bohrungsändern in den 45°Lagen.

**Bild 6.1.2-10**

erklären. Sind sie in der Auslegung berücksichtigt handelt es sich nicht um Fehler (Band 1 Bild 3.2.1-1.1). Sie befinden sich im Laminat und beeinflussen Materialeigenschaften die sich auf Bruchpfade, Umlagerungen von Spannungen und Kraftübergang/-verteilung auswirken.

Gerade die **ungleichmäßige Verteilung der Flächenpressung auf der Berührungsfläche des Bolzens zur Bohrung** wird bei konventioneller Auslegung nicht ausreichend berücksichtigt. So erreicht der sog. **Ausnutzungsgrad lediglich ca. 30% (0,3)**. Das ist das **Verhältnis der maximalen Belastungskräfte von Verbindung zum Vollquerschnitt**.

**Bild 6.1.2-10** (Lit. 6.1.2-12): Allgemein lässt sich feststellen:

Bei einem Lastniveau unterhalb der Bruchnennspannung ist **kaum Ermüdung** zu erwarten. Die statische **Restfestigkeit** von Durchläufern kann sogar als Folge einer Art **Stützwirkung** gegenüber der Anfangsbruchfestigkeit ansteigen.

Die dargestellten Versuchsergebnisse können für Schwingbelastung unter Zugschwellbeanspruchung als typisch gelten. Genutzt wurde das sog. „**Restfestigkeitsabfall-Modell**“:

$\text{Bruchlastspielzahl} = C + (1-C) \cdot (\sigma_o / \text{statische Bruchfestigkeit})^D$

C und D sind versuchstechnisch ermittelte Parameter aus Versuchsergebnissen.

Sie ergeben sich aus Durchläufern welche die Bruchlastspielzahl bzw. Lebensdauer entsprechend ungekerbten Proben überschritten hatten. Dazu muss vorher eine sog. Restfestigkeitskurve aus Zerreiversuchen ermittelt werden. In den zwei dargestellten Fällen zeigte es sich, dass die Restfestigkeit der gekerbten Probe sogar die der glatten Probe mit gleichem tragenden Querschnitt übertraf. Offenbar trat eine Art **Trainieren** auf das als „**wear-in effect**“ bekannt ist.

Ist ausreichend Erfahrung vorhanden, scheint eine Chance zu bestehen aus der Restbruchfestigkeit integraler Proben betriebsbelasteter Bauteile auf mögliche gefährliche **Schädigungen rückzuschließen**.

Wie zu erwarten gehen **Brüche von den Bohrungsrndern** aus (Skizze unten). Das zeigen die **Ausfransungen in 45°-Lagen** an. Die **Kerbempfindlichkeit** ist verglichen mit Metallen **gering**. Obwohl es sich um einen spröden/nicht duktilen(nicht plastisch verformbaren) Werkstoff handelt beobachtet man bei gekerbten Proben wie Niet-/Bolzenverbindungen eine **Stützwirkung**. Sie beruht auf einer Umlagerung der Spannungen vom Kerbgrund in Richtung Probenrand. Damit kommt es zum **Abbau der Spannungsspitze im Kerbgrund**. Grund sind **Mikrorisse** mit denen die Tragfähigkeit im Kerbgrund abnimmt.

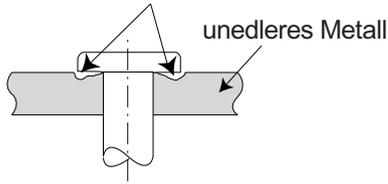
**Bild 6.1.2-II** (Lit. 6.1.2-8): Im vorliegenden Fall wurde für den „Verstellpin“ der Einzelleitschaufeln (Rahmen unten) der „**korrosionsfeste**“ Werkstoff vom Typ eines stickstoffgehrteten rostfreien „18 8 Stahls“ nach ASTM A276 mit Legierungsanteilen von 16-18%Cr; 8-9% Ni, 7-9% Mn und 0,08 % N verwendet. Interessanterweise handelt es sich hier trotz einer Luftfahrtanwendung nicht um eine Luftfahrtnorm. Beim Nietvorgang entstanden **hohe Zugeigenspannungen** im Schaft. Es wurde ein Zusammenhang zwischen **Salzablagerungen** und **Spannungsrissskorrosion** beobachtet.

Der konstruktionsbedingte Ringkanal (Pfeil 1) wurde offenbar durch die Lager-, Sitz- und Passflächen **nicht ausreichend abgedichtet**. So konnte **salzhaltiges Schwitzwasser (Meeresatmosphäre)** eindringen. Beim Triebwerksstart ist zu erwarten, dass diese Salzlösung mit einer erhöhten Konzentration im kochenden Zustand auf die **ausgeprägte Kerbe** (Pfeil 2) am Pin einwirkt. Das ergibt hier eine sehr aggressiven Korrosionsbelastung. Von der Kerbe ging dann unter Einwirkung der hohen **Zugeigenspannungen** als Folge der Nietung an vielen Schaufeln ein **SpRK-Riss** (Pfeil 3) durch den „Verstellpin“-Querschnitt aus.

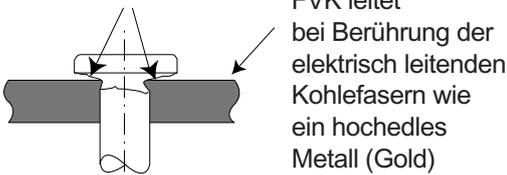
Neben dem nicht gut geeigneten Werkstoff wurde der Schaden also auch von einer „**unglücklichen**“ **konstruktiven Gestaltung** unterstützt. Die Verdichter moderner Kampfflugzeuge weisen meist mehrere verstellbare Leitschaufelstufen auf. Ein Versagen des Verstellmechanismus führt mit einer unkontrollierten Verstellung einzelner Schaufeln oder des ganzen Apparates zu Strömungsinstabilitäten. Es kommt zu gefährlichen Schwingungen mit Folgeschäden. Bei einmotorigen Flugzeugen besteht dann akute Absturzgefahr.

## Korrosion an Niet- und Bolzenverbindungen.

verstärkter Angriff infolge Spaltkorrosion

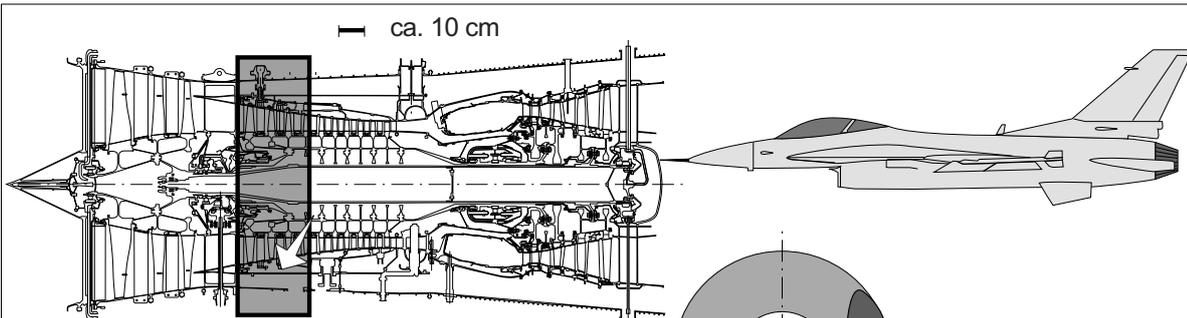
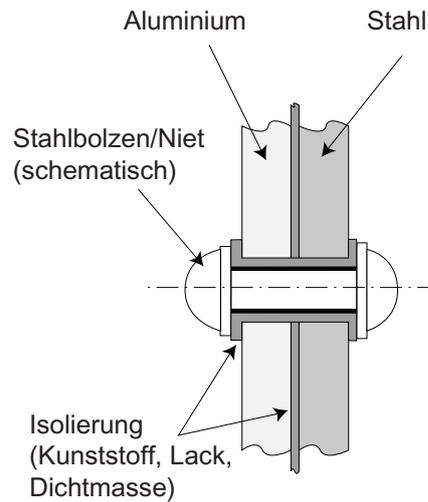


Angriff des metallischen Bolzens/Niets

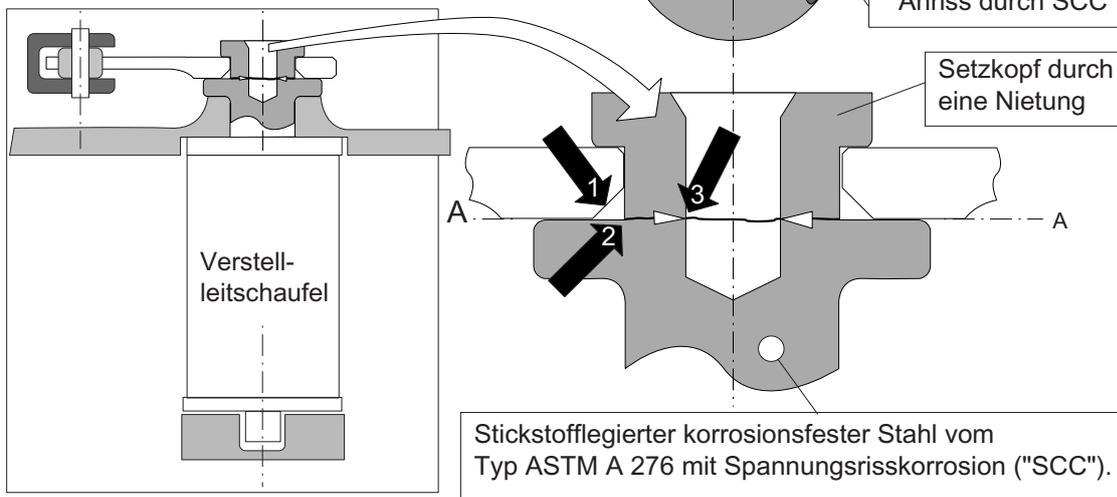
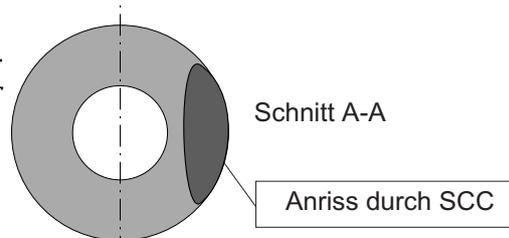


Wegen der Korrosion werden bei Kohlefasern (CFK) Bolzen und Niete aus Titanlegierungen verwendet.

Korrosionsschutz durch elektrische isolierende Beilagen/Schichten.



Spannungsrisskorrosion an einer vernieteten Schwenkachse durch **Zugeigenspannungen** aus der **Setzkopferstellung**.



**Bild 6.1.2-11**

## Literatur zu Kapitel 6.1.2

- 6.1.2-1** W.J.Jensen, „Failures of Mechanical Fasteners“, Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 11, Failure Analysis and Prevention“, American Society for Metals (ASM), 1986, ISBN 0-87170-007-7, Seite 544-549.
- 6.1.2-2** G.Niemann, HiWinter, B.-R.Höhn, „Maschinenelemente“, Erster Band, 4. Auflage, 2005, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-25125-1 Seite 360-385 und 464-477.
- 6.1.2-3** H.Schürmann, „Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“, 2., bearbeitete und erweiterte Auflage, 2007, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 978-3-540-72189-5, Seite 514-548.
- 6.1.2-4** L.Budde, „Technische Innovationen und Trends in der Fügetechnik - Alternativen und/oder Ergänzungen zum Schrauben?“, Vortrag am Deutschen Museum in München, 15. Mai 2003, Seiten 15, 19, 24 - 35.
- 6.1.2-5** K.Stellbrink, „Preliminary Design of Composite Joints“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., DLR-Mitteilung 92-05, 2005, (Kindervater FVK 2000/01), Seite 30 - 51.
- 6.1.2-6** M.Busch, „Das Bohrnieten zum schädigungsarmen Fügen von FVK-Teilen“, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, Jahresbericht 1999, Seite 1-3.
- 6.1.2-7** U.Huber, „Faserverbund- und Sandwichtechnologie“, Skript zur Vorlesung SS 2008, Seite 31,32 und 48-52.
- 6.1.2-8** H.J.Kolkman, G.A. Kool, R.J.H. Wanhill, „Aircraft Crash Caused by Stress Corrosion Cracking“, ASME-Paper 94-GT-298, Proceeding von „International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition“, The Hague, Netherlands- June 13-16, 1994.
- 6.1.2-9** Zeitschrift „Machine Design“, November 10, 1981, Seite 82 und 83.
- 6.1.2-10** J.LoConte, „Resolving Common Blind Rivet Problems“, Zeitschrift „American Fastener Journal“, July/August 1999, www.huck.com, Seite 1 und 2.
- 6.1.2-11** G.Honsel, „Das Auto von der Rolle“, Zeitschrift „Technology Review“, Dezember 2010, Seite 52-56.

- 6.1.2-12** T.Sandner, R.Hornfeck, „Experimentelle Untersuchung von Spannungen und Festigkeitseigenschaften an bauteilnahen CFK-Proben und Abgleich mit numerischen Berechnungsverfahren“, Forschungsprojekt der Staedtler Stiftung in 2009, Dezember 2010, Seite 1-51.
- 6.1.2-13** „Handbuch der Schadenverhütung“, Allianz Versicherungs-AG München und Berlin, 1972, Seite 307, 312 und 313.
- 6.1.2-14** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 2“, ISBN 3-00-008429-0, 2001, Kapitel 6.2, Kapitel 7.2 und Kapitel 7.3.
- 6.1.2-15** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 3“, ISBN 3-00-017733-7, 2000, Kapitel 12.6.2 und Kapitel 12.6.3.
- 6.1.2-16** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 5“, ISBN 978-3-00-025780-3, 2008, Kapitel 23.
- 6.1.2-17** F.Lert, P.Loubet, F.Robineau, „AFT-Body M88-2 - Aircraft Nozzles“, Firmenangaben der ‘SAFRAN Snecma Propulsion Solide’, [www.snecma-propulsion-solide.com](http://www.snecma-propulsion-solide.com).