

---

**Strukturierte Zusammenfassung der Dissertation**  
*Beitrag zur Erweiterung des Vollstanznietens zum Fügen der Aluminiumlegierung*  
*EN AW-2024 mittels Hilfsfügeteil aus Aluminium*

vorgelegt von  
M. Sc. Felix Holleitner

---

## **1 Einleitung**

Im strukturellen Leichtbau moderner Verkehrsflugzeuge werden großflächig hochfeste Aluminiumwerkstoffe der 2000er und 7000er Legierungen in den Bereichen von Rumpf und Flügeln verarbeitet. Für die Installation von z. B. Kupplungen für Spante und Stringer oder Halter für Kabelführungen und Verkleidungen ist das Vollnieten (VN) etabliert. Hierbei handelt es sich um einen Aluminiumniet mit einem angestauchten Kopf und einem glatten Schaft. Unter der Gewährleistung einer zweiseitigen Zugänglichkeit zur Fügestelle wird der überstehende Nietschaft mithilfe einer Quetschzange gestaucht, sodass eine kraft- und formschlüssige Verbindung entsteht. Der Montageprozess ist von vielen manuellen Tätigkeiten gekennzeichnet. Hierzu zählen das (mehrfache) Positionieren der Werkstücke mit Klemmzangen und Hilfsverbindern sowie zeitintensive Arbeitsschritte wie das Bohren und das Entgraten von Vorlöchern.

Angesichts einer Vielzahl erforderlicher Fügeverbindungen im Bereich von Sekundäranwendungen wie Haltern (ca. 4.000 Stk.), bietet das Verfahren mit selbststanzendem Vollstanzniet (VSN) großes Potenzial, die Effizienz in der Endmontage von Flugzeugen zu steigern. Indem der Vollstanzniet das Vorlochen mit dem Fügevorgang kombiniert, können manuelle Arbeitsschritte wie das Einbringen und Nacharbeiten der Vorlöcher eingespart werden.

Demgegenüber stehen die hohen Anforderungen an die Fügetechnik. Dazu zählt z. B. das Vermeiden von Korrosionserscheinungen infolge unterschiedlicher elektrochemischer Potentiale zwischen Aluminiumbauteilen und Fügeelementen aus Stahl. Bislang werden deshalb VN aus Aluminium (Al) und Verbindungselemente aus Titan verwendet. Zu den weiteren Synergieeffekten des werkstoffgleichen Fügens zählen die angeglichenen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Niet und Bauteilen, wodurch positive Auswirkungen auf die Verbindungseigenschaften unter Betriebsbedingungen und hohen Temperaturschwankungen zu erwarten sind.

## **2 Problemstellung**

VSN, die üblicherweise aus Stahl hergestellt werden, erschweren eine Substitution des vorlochfreien Fügeverfahrens in der Flugzeugendmontage in Hinblick auf die erläuterten Synergieeffekte werkstoffgleicher Verbindungen. Die Verwendung geeigneter Vollstanzniete aus Aluminium ist daher als sehr erstrebenswert zu bewerten. Voraussetzung für das Fügen der hochfesten Aluminiumlegierungen ist ein VSN mit einer ausreichenden Festigkeitsreserve. Am Markt ist bis dato jedoch kein geeigneter Niet aus Aluminium verfügbar, der den Festigkeitsanforderungen genügt. Für diese Problemstellung konnte in einer früheren Forschungsarbeit die Aluminiumlegierung 7068 T651 als Nietwerkstoff erfolgreich qualifiziert werden. Das

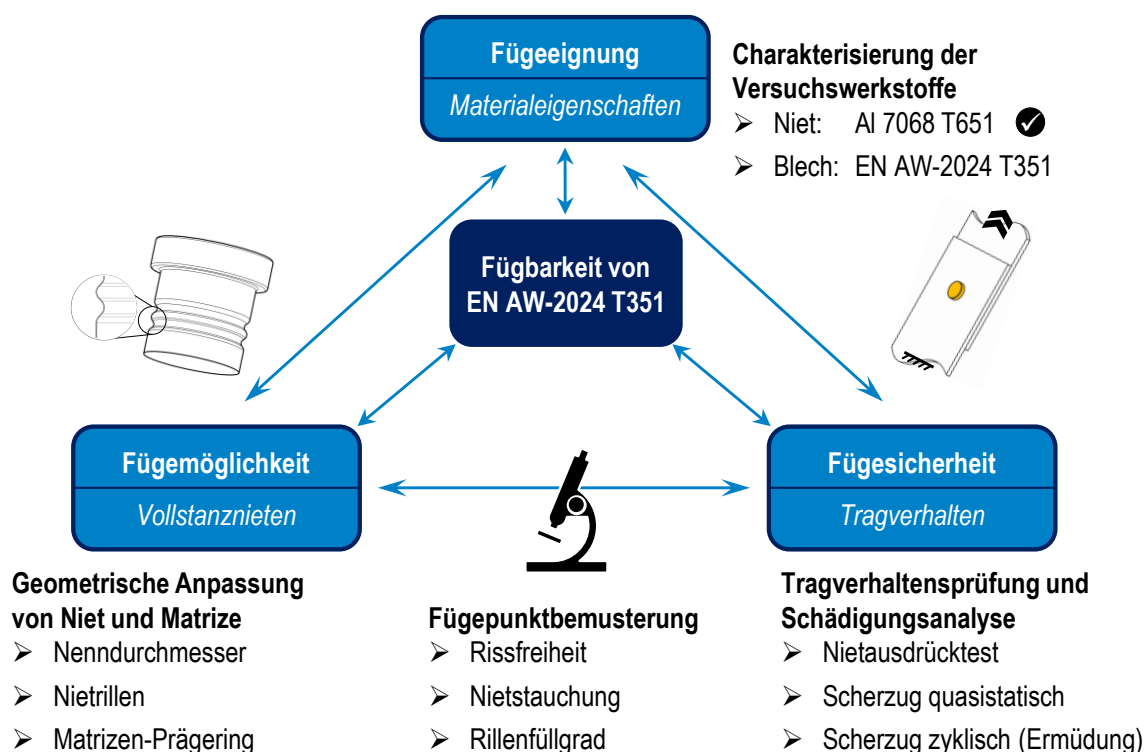
werkstoffgleiche Fügen von EN AW-2024 T351 im industriellen Anwendungsbereich mit einer Gesamtblechdicke von 3 - 5 mm war mit diesem Niet jedoch noch nicht möglich. Der Niet wurde hierbei unzulässig stark gestaucht, sodass keine kraft- und formschlüssige Verbindung hergestellt werden konnte. Ebenso fehlen belastbare Aussagen zu den Tragverhaltenseigenschaften des Al-VSN im Vergleich zu einem konventionellen VSN aus Stahl, als Grundvoraussetzung den Stahl-VSN durch den Al-VSN substituieren zu können. Des Weiteren ist eine Einordnung der Tragfähigkeit des Al-VSN im Vergleich zum Al-VN erforderlich, um den Al-VSN für die adressierten Fügeanwendungen in der Flugzeugendmontage adaptieren zu können.

Die bislang nicht gegebene Fügbarkeit von EN AW-2024 T351 mit einer Gesamtblechdicke von mind. 3,0 mm mittels des Al-VSN sowie die offenen Fragestellungen hinsichtlich des Lastübertragungsverhaltens des Al-VSN begründen den weiteren Forschungsbedarf in dieser Arbeit.

### 3 Zielstellung

Als übergeordnetes Ziel der Arbeit wird die Erweiterung des Vollstanznietens zum Fügen der Aluminiumlegierung EN AW-2024 T351 mittels Hilfsfügeteil aus Aluminium erklärt. Dies soll den Weg zur Qualifizierung des vorlochfreien Fügens in der Flugzeugendmontage ebnen.

Die Fügbarkeit von EN AW-2024 T351 setzt eine ganzheitliche Betrachtung der Fügeanwendung voraus. Nach FÜSSEL müssen dazu die Wechselwirkungen zwischen der Fügeignung der Werkstoffe, der Fügemöglichkeit des Fügeverfahrens und der Fügbarkeit durch einen systematischen Tragfähigkeitsnachweis untersucht werden. Den Lösungsweg zum Nachweis der Fügbarkeit von EN AW-2024 T351 mit einer praxisgerechten Gesamtblechdicke von mind. 3,0 mm mittels VSN aus Al 7068 T651 ist nachfolgend veranschaulicht.



## 4 Ergebnisse

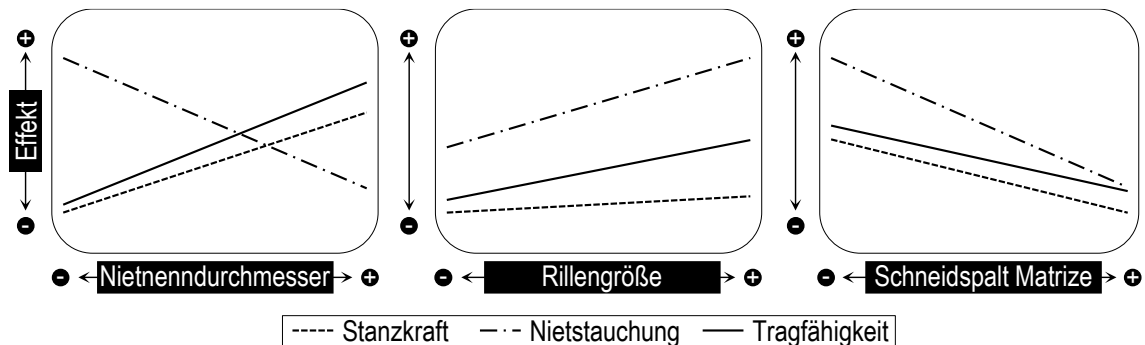
Der Fokus in den experimentellen Untersuchungen lag auf der Fügbarkeit und der Fügbarkeit des Al-VSN zum Fügen von EN AW-2024 T351. Die **Fügeeignung** der Aluminiumlegierung 7068 T651 als Nietwerkstoff konnte bestätigt werden. Das Material verfügt über sehr gute Festigkeitskennwerte, gleichzeitig auch über eine ausreichende Duktilität. Letztgenannte Eigenschaften ist von besonderer Bedeutung angesichts der hohen setzprozessinduzierten Nietbeanspruchung und verringert das Risiko von Beschädigungen am Niet.

Im Rahmen der **Fügemöglichkeit** wurden die geometrischen Merkmale von Niet und Matrize gezielt angepasst. In diesem Zusammenhang erwies sich das Vorgehen zur Ermittlung einer geeigneten anwendungsbezogenen Nietgröße (Schaftdurchmesser) als sehr hilfreich. Indem die zu erwartende Stanzkraft auf die Nietquerschnittsfläche bezogen wird, kann aus dem Verhältnis der prognostizierten Nietbeanspruchung und der Nietbeanspruchbarkeit (Dehngrenze des Nietwerkstoffs) auf eine mögliche Stauchung oder Beschädigung des Niets geschlossen werden. Die Scherfestigkeit der Al-Bleche EN AW-2024 T351 konnte mit einem Beiwert von  $c = 0,64$  abgeschätzt werden.

Mit dem Al-VSN  $\varnothing 4,8$  mm ließ sich eine Blechpaarung von EN AW-2024 T351 bis zu einer Gesamtdicke von 3,2 mm qualitätsgerecht fügen. Der Al-VSN wurde hierbei um bis zu 3,7 % komprimiert. Die weitere Erhöhung der Gesamtdicke führte zu einer Zunahme der Nietstauchung und hatte abgescherte Rillen zur Folge. Die Vergrößerung des Nietschaftdurchmessers auf das nächstgrößere Standardmaß von Fügeelementen im Flugzeugbau von 5,6 mm, ermöglichte das Verbinden einer Blechpaarung von insgesamt 3,8 mm Gesamtdicke. Es bleibt anzumerken, dass die Nietgröße (-durchmesser) eine selbstlimitierende Stellgröße ist. Nicht nur, dass ein immer größerer Niet die Anwendung hinsichtlich erforderlicher Loch- und Randabstände einschränkt, geht die Vergrößerung des Nietdurchmesser auch stets mit einer Erhöhung der Durchstanzkraft einher. Dementsprechend steigt auch die Nietbeanspruchung.

Weiterhin wurde ein maßgeblicher Einfluss der Nietrillengeometrie auf die Nietbeanspruchung und den Formschluss festgestellt. Tiefe Rillen erhöhen die Nietstauchung und die Gefahr einer Nietbeschädigung. Demgegenüber trägt ein großes mit Blechmaterial gefülltes Rillenvolumen wesentlich zur Tragfähigkeit der Nietverbindungen bei. Der Rillenfüllgrad wird von der Geometrie des Matrizenprägers beeinflusst. Dieser muss über ein ausreichend hohes Volumen das vollständige Füllen der Nietrillen sicherstellen. Ein kleiner Schneidspalt zwischen Niet und Matrize begünstigt den Materialfluss des Blechs in Richtung der Nietrillen während des Prägevorgangs im VSN-Setzprozess. Dies führt gleichzeitig aber auch zu einer höheren Nietbeanspruchung beim Durchstanzen der Bleche. Die Überbeanspruchung des Al-VSN beim Fügen von EN AW-2024 T351 ist angesichts der limitierten Festigkeit des Nietwerkstoffs zumeist unumgänglich. Sofern die Nietverbindung rissfrei und die Nietrillen einen ausreichenden Formschluss sicherstellen, kann eine geringe Nietstauchung jedoch toleriert werden.

Die grundsätzliche Abhängigkeit der Stanzkraft, der Nietstauchung und der zu erwartenden VSN-Tragfähigkeit von der Niet- und Matrizengeometrie (von gering/klein (-) bis hoch/groß (+)) fassen die nachfolgenden Effektdiagramme zusammen. Sie sind als qualitative Prinzip-Skizze zu interpretieren.



Die Überprüfung der **Fügesicherheit** wurde anhand eines systematischen Tragfähigkeitsnachweises geführt und ergab insgesamt ein sehr gutes Lastübertragungsverhalten der AI-VSN-Verbindungen. Die Einordnung der Tragfähigkeit des AI-VSN im Vergleich zum Stahl-VSN muss in Abhängigkeit von der Beanspruchungsrichtung jedoch differenziert betrachtet werden. Während unter einer kopfzug-ähnlichen Beanspruchung das Lastübertragungsverhalten des AI-VSN im Vergleich zum Stahl-VSN deutlich reduziert ist, sind die Tragverhaltenseigenschaften unter einer Scherzugbeanspruchung gleichwertig. Zu diesem Ergebnis führten auch die Prüfungen der Verbindungsproben unter zyklischer Scherzuglast, die angesichts überwiegend zeitlich veränderlicher Beanspruchungen von zusammengesetzten Strukturen von hoher praktischer Bedeutung sind. Die Substitution des Stahl-VSN durch den AI-VSN ist damit für einen definierten Anwendungsbereich, bezogen auf die maximale Fügeteilefestigkeit und -dicke, grundsätzlich möglich.

Im Vergleich der Verbindungen mit dem AI-VSN und dem etablierten AI-VN bestehen wiederum größere Unterschiede unter einer vorwiegend-ruhenden Scherzuglast. Die übertragbare Last ist beim AI-VN wesentlich größer als beim AI-VSN, wie es die Verbindungsprüfung ergab. In Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit weisen die beiden Fügeverfahren zum Verbinden der 3,0 mm dicken Blechpaarung von EN AW-2024 T351 vergleichbare Resultate auf. Während die zu übertragene Betriebslast beim AI-VN weit unter den quasi-statischen Festigkeitskennwerten liegt, kann der AI-VSN zyklische Lasten im Bereich der quasi-statischen Gebrauchstauglichkeit der Verbindung übertragen. Defekte am AI-VSN wurden nicht festgestellt und das Versagen der Verbindungen konnte stets auf das Blechmaterial zurückgeführt werden. Folglich kann für den AI-VSN eine hohe Gebrauchstauglichkeit konstatiert werden.

Die **Fügbarkeit** von EN AW-2024 T351 mit einer praxisgerechten Gesamtblechdicke von mind. 3,0 mm ist mit den entwickelten AI-VSN gegeben, sodass das vorlochfreie Fügen von Sekundärstrukturen in der Flugzeugendmontage perspektivisch eingesetzt werden kann. Das Ergebnis zeigt auch, dass durch die gezielte Anpassung der geometrischen Merkmale die Anforderungen an eine praxistaugliche Verbindungslösung erfüllt werden konnten.