Sicherheitskritische Verschraubungen im Ingenieurholzbau

Safety-critical screwed joints in engineered wood construction

Le vissage en situation sécuritaire critique dans la construction bois d'ingénieur

Markus Fischer
Dipl. Wirtschafts-Ing. (FH)
TBB Industrial Tools Services GmbH
Dingolfing, Deutschland

Sicherheitskritische Verschraubungen im Ingenieurholzbau

Ein Erfahrungsbericht zu sicherheitskritischen Verschraubungen aus anderen Industriebereichen, um mögliche Synergieeffekte aufzuzeigen.

1. Intention

„Mensch, wenn ich das gewusst hätte, dass es so etwas schon gibt, dann …" So oder so ähnlich sind häufig die Reaktionen, wenn es zwischen Fachleuten zu einem interdisziplinären Austausch kommt. Mit diesem Referat soll nochmals angestoßen werden, was die Hochschule Rosenheim bereits 2008 mit dem weltweit größten Anbieter für industrielle Schraubmontagetechnik, dem schwedischen Konzern Atlas Copco, begonnen hat: nämlich vorhandene Richtlinien und Systeme aus anderen Industriezweigen auf mögliche Synergieeffekte für die Holz ver- und bearbeitende Industrie zu durchleuchten.
Bei den Recherchen zu diesem Beitrag ist mir zudem aufgefallen, dass im Ingenieurholzbau der Begriff der „sicherheitskritischen Verschraubung" nicht geläufig ist. Warum dieser Begriff in anderen Segmenten verwendet wird und wofür, soll daher auch Teil dieser Arbeit sein.

2. Inhalt

Es wird auf folgende Punkte eingegangen, um einen kleinen Einblick zu gewähren und Diskussionen anzuregen:

- Klassifizierung von Schraubfällen,
  oder: Wie und warum werden in der Automobilindustrie Schraubfälle zu sicherheitskritischen Verschraubungen?
- Welche Folgen hat die Klassifizierung für den Montage- und Prüfprozess von Anlagen und Bauten?
- Welche Montage- und Prüfmittel werden in anderen Industriezweigen eingesetzt und welche werden bereits erfolgreich im Ingenieurholzbau eingesetzt?

Auf die Bereiche Windenergieanlagen und Automobilhersteller wird vertieft eingegangen.

3. Gesetzes- und Normenlage

Das 1990 in Kraft getretene Produkthaftungsgesetz (BGBl. I S. 2198) geht auf die EG-Richtlinie vom 25.07.1985 zurück, deren Inhalte in den EU-Ländern in nationales Recht umgesetzt wurden. Das Produkthaftungsgesetz ergänzt die Regelungen zur Produkthaftung nach den §§ 823 ff. BGB. Die Produkthaftung besagt, dass für sämtliche Ansprüche gehaftet werden muss, die aus einem fehlerhaften Produkt herrühren. Der Verkäufer, der auf Gewährleistung in Anspruch genommen wird, hat seinerseits gegenüber dem Hersteller einen Anspruch auf Gewährleistung. Dieser Anspruch umfasst übrigens die gesamte Lieferkette.
Interessant wird es bezüglich der Haftungstatbestände nach §§ 823 ff. BGB. Hier wird darauf hingewiesen, dass unbedingt nach dem Stand der Technik gefertigt werden muss und das fehlerhafte Produktionsmittel oder organisatorische Fehler ebenfalls zur Haftung führen, da der Hersteller auch diesbezüglich eine Sorgfaltspflicht hat. Das bedeutet zum Beispiel, dass er seine Produktionsmittel entsprechend regelmäßig auf ihre Fähigkeit für den Einsatz im Fertigungsprozess hin untersuchen muss, was aber auch eine wichtige Aussage in der ISO 9001 ist. Ein Produktbeobachtungsfehler kommt aus unserer Erfahrung ebenso häufig zum Tragen. Dieser besteht, wenn der Hersteller die Beobachtung der in Verkehr gebrachten Produkte hinsichtlich noch unbekannt gebliebener schädlicher Eigenschaften und möglicher gefährlicher Anwendungsmöglichkeiten unterlässt.
Grundsätzlich gilt in Deutschland die Voraussetzung für eine Haftung des Herstellers nach §§ 823 ff. BGB nur dann als erfüllt, wenn er einen der Haftungstatbestände durch vorsätzliches oder fahrlässiges Verhalten verschuldet hat, oder wenn er die oben beispielhaft genannten „Herstellerpflichten" verletzt.

Was nun technische Normen anbelangt, so bezeichnet die Rechtsprechung (BVerwG NJW 1978, 1540) diese als „antizipierte Sachverständigengutachten". Die Folge ist, dass vor Gerichten die Richtigkeit einer Norm kaum widerlegbar ist und diese somit einen„quasi-gesetzlichen" Charakter angenommen hat.

Um unter anderem der Gesetzeslage nachzukommen und Sicherheit bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit der Produktion zu gewährleisten, wurden unter anderem folgende Normen und Richtlinien erarbeitet, die hier von besonderem Interesse sein dürften:

DIN EN ISO 6789	Anforderungen und Prüfverfahren für handbetätigte Drehmoment-Werkzeuge (z.B. „Knickschlüssel")
ISO 5393	Leistungsprüfverfahren für motorisch betriebene Schraubwerkzeuge
DIN25201-1	Konstruktionsrichtlinie für Schienenfahrzeuge und deren Komponenten. Beinhaltet auch die Kategorisierung von Schraubfällen bezüglich ihrer Wichtigkeit.
VDI 2862	Einsatz von Schraubsystemen in der Automobilindustrie. Voraussichtlich ab 2012: Blatt 2 – Einsatz von Schraubsystemen im Aggregate- und Anlagenbau, Blatt 3 – Einsatz von Schraubsystemen in der Petrochemischen Industrie
DIN EN 1090	Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken

An der VDI 2862 kann gut verdeutlicht werden, wie weit solche Richtlinien gehen, um die prozesssichere Verschraubung in der industriellen Montage zu gewährleisten. Kurz zusammengefasst werden folgende Punkte und somit eine klare Vorgehensweise beschrieben:

1. Klassifizierung der Schraubfälle in Risikoklassen
2. Auswahl des richtigen Anziehverfahrens passend zur Risikoklasse
3. Daraus resultierend die Vorgaben für die Montagewerkzeugtechnologie, die zum Einsatz kommen muss
4. Vorgaben zu Überwachung des Montagewerkzeugs
5. Vorgaben zur Überwachung des Montageprozesses

4. Beispiele für die Ausführung sicherheitskritischer Montageprozesse

a) Dokumentation der Montagedaten

Für Schraubverbindungen, die der Risikoklasse A nach der VDI 2862 unterliegen, sprich, bei deren Versagen mittelbare oder unmittelbare Gefahr für Leib und Leben besteht (dies sind beispielsweise bei einem Motorrad nahezu 90 % aller Schraubverbindungen), müssen die Schraubergebnisse zur Weiterverarbeitung vom Schraubsystem ausgegeben werden. Das heißt nicht nur, dass der Werker direkt ein akustisches, optisches oder haptisches Signal über den Verlauf des Montageprozesses erhält, sondern dass montagerelevante Daten wie Uhrzeit, Datum, erreichtes Drehmoment oder verschraubter Drehwinkel erfasst und digital weiterverarbeitet werden.
Mit der direkten Messung des Drehmoments beim Einschrauben kann zum Beispiel verhindert werden, dass eine Schraube bereits beim Eindrehen überlastet wird und bricht. Übliche Schrauber in der Industrie stoppen, bevor dies geschieht. Darüber hinaus können solche Systeme über den Drehwinkel Informationen an den Werker ausgeben, wie zum Beispiel, ob überhaupt die Kopfauflage der Schraube erreicht wurde oder ob es einen Gewindefehler gab. Ebenso Informationen darüber, ob zum Beispiel eine Dichtung bereits benutzt oder ob etwa zwei anstatt einer Unterlegscheibe verwendet wurden. Solche Daten werden häufig mit der Information über die Position des Schraubers gepaart – so zum Beispiel bei der Wartung von Achsen an Zügen – damit sichergestellt werden kann, dass an dieser Position auch alle Schrauben mit dem richtigen Drehmoment verschraubt wurden.
Am Ende der Montagekette oder der Wartungsaufwendung kann dann vollautomatisch ein Report mit allen relevanten Daten zur Anlage, Maschine und Bauwerk ausgegeben werden. Dieser gilt als Beleg für die Sorgfalt des Herstellers.

Bild 1: Gesteuertes Schraubsystem für Direktverschraubungen bis 1200 mm Schraubenlänge. Diese Systeme sind barcodefähig, d.h. der Werker scannt die Schraubenschachtel ein, und das Schraubsystem weiß genau, wie weit er die Schraube belasten darf. In Kombination mit einer zu scannenden Auftragsnummer weiß das System auch, wie viele Schrauben in Ordnung verschraubt werden müssen, zählt diese mit und kann das Gesamtergebnis protokollieren – und damit die sachgemäße Montage nachweisen.

Bild 2: Funkgesteuerter Akkuschrauber mit Positionserfassung, automatischer Verheiratung der Montagedaten mit den Fahrzeugdaten und Werkerführung/Visualisierung.

b) Prüfung von Montagewerkzeugen

Die DIN EN 1090 über die Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken schreibt vor, dass bei vorverspannten Schraubverbindungen die Montagewerkzeuge mindestens einmal am Tag, bei Druckluftschraubern (etwa Schlagschraubern) immer beim Wechseln der Schlauchlänge, auf Genauigkeit überprüft werden müssen. Eine Überprüfung muss auch nach gewissen Vorkommnissen, wie harten Schlägen, Fall des Geräts, Überlastung u. Ä. erfolgen.
Die Überprüfung soll nach der ISO 6789 durchgeführt werden. Dies bedeutet einen Prüfaufwand von mindestens 20 Minuten pro Drehmomentschlüssel pro Tag, plus den Zwischenprüfungen aufgrund unsachgemäßer Behandlung des Werkzeugs.
Der hohe Zeitaufwand kommt zustande, da bei der Prüfung des Schlüssels ausgeschlossen werden muss, dass der Prüfer das Werkzeug verkantet oder nach dem Auslösen des Werkzeugs weiterzieht. In diesen Fällen und somit immer auch in der Produktion, ist zwar eine Auslösegenauigkeit von +-4 % erreichbar, nicht aber eine Drehmomentgenauigkeit mit dieser Präzision. Hier sind eher Werte von + 15 bis 35 % zu erwarten.

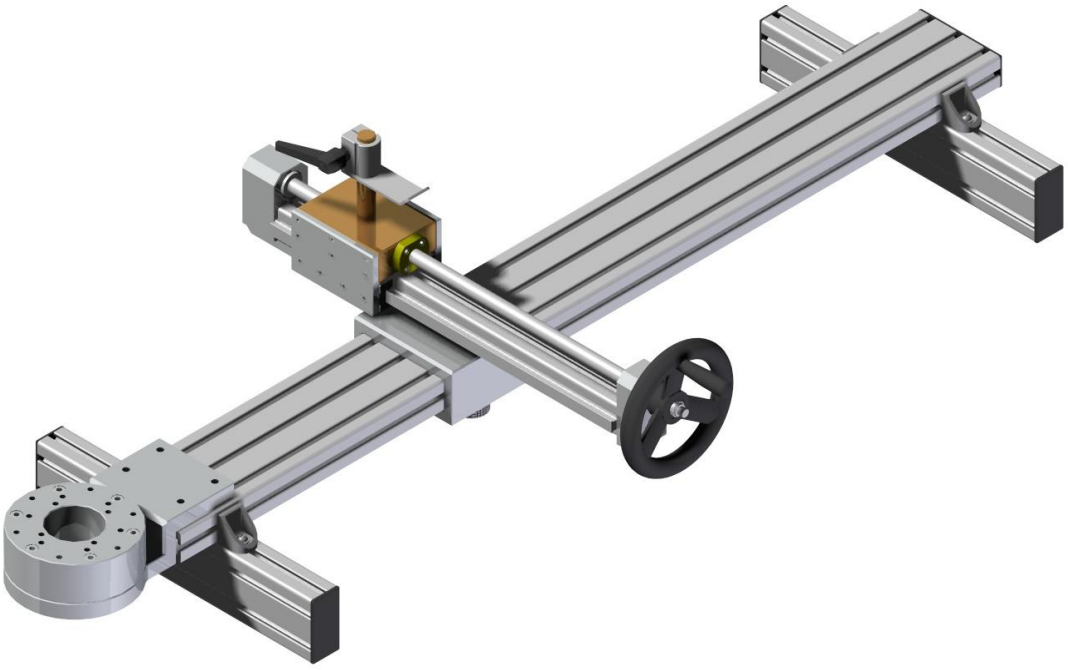

Bild 3: Beispiel für Prüfaufbau nach ISO 6789 zum täglichen Gegenmessen von Drehmomentschlüsseln

c) Prozessfähigkeitsprüfung

In der VDI 2862 wird die Prozessfähigkeitsprüfung als die Erkennung von „i.O." (in Ordnung) bewerteten „n.i.O"-Verschraubungen durch stichprobenartige Untersuchungen der Serienverschraubung bezeichnet, die durch geschulte Mitarbeiter mit geeigneten Messmitteln durchgeführt wird. Das bedeutet, dass der Mitarbeiter glaubt, die Verschraubung sei okay, und auch das Schraubsystem hat den Schraubvorgang als in Ordnung bewertet, aber die Verschraubung ist dennoch nicht in Ordnung. Diese Fälle können zum Beispiel bei Materialfehlern und -ermüdungen auftreten. Als allgemein plausibel gilt in der Regel die Ermittlung des Weiterziehmoments (nicht zu verwechseln mit dem Losbrechmoment oder dem Spitzenmoment, das von einem Schleppzeiger ermittelt werden würde). Hierzu benötigt man aber wiederum ein höherwertiges Prüfsystem, wie einen elektronischen Drehmomentschlüssel mit referenzfreier Drehwinkelerfassung.
In der DIN EN 1090 für die Stahltragwerke gibt es sehr restriktive Vorgaben bezüglich der Verschraubungen, die in der Regel nicht mit einfachen Schraubsystemen oder Schrauben realisiert werden können. Eine davon ist, dass Schraubverbindungen mit einer Vorspannkraftgenauigkeit von +-5 % ausgeführt werden müssen. Nach der VDI 2230 zur Berechnung und Auslegung von Schraubverbindungen ist ein derart genauer Anzug einer Schraube nicht über einen Drehmomentanzug möglich.
Hier kann unter anderem auf Schrauben zurückgegriffen werden, die mit einem Dünnschichtsensor zur direkten Messung der Schraubenlängung per Ultraschall während des Schraubprozesses ausgestattet sind. Damit sind auch Werte bis ca. +-4 % erreichbar.
Diese Methode hat den weiteren Vorteil, dass man selbst nach vier Jahren, wie es die Norm vorschreibt, noch immer direkt die Schraube prüfen kann. Bisher mussten die Schrauben entweder weitergezogen werden, was aufgrund von Korrosion und der hohen Auslastung oft nicht möglich ist, oder speziell ausgebildete Prüfer schlugen die Schrauben an, um an deren Klang zu erkennen, ob die Schrauben noch fest waren.

Bild 4 und 5: Schrauben mit aufgedampften Dünnschichtsensoren werden nicht nur in großen Umfängen für die Montage von Windkrafttürmen verwendet, sondern auch für die Montage von Düsentriebwerken, wie hier von Rolls Royce. Dabei befindet sich die Sensorik zum Erkennen der Schraube (jede Schraube ist mit einem einzeln direkt zuweisbaren 2D-Code versehen) und zum Messen der Längenänderung beim Anziehen direkt vorne im Schrauber. (Quelle: Intellifast)

d) Spezialstrategien für Direktverschraubungen

Im Gegensatz zu den holzverarbeitenden Industrien, bei denen zumeist noch kein gesteigerter Wert auf die Einhaltung von Drehmomentvorgaben bei Montageprozessen gelegt wurde, war dies für alle anderen Segmente nahezu ausschließlich der Qualitätsindikator für eine Schraubverbindung. Die Industrien, die sich mit Holz beschäftigen, wissen, dass in dem recht inhomogenen Werkstoff Drehmomentvorgaben oft keinen Sinn machen. Das Gefühl des Werkers am Starttaster des Schraubers ist ausschlaggebend, auch wenn es einmal länger dauert. Durch das massenhafte Aufkommen von Direktverschraubungen über alle Industriesegmente hinweg in den letzten Jahren, verbreitet sich langsam aber sicher die Erkenntnis, dass das Drehmoment eigentlich nur eine Hilfsgröße ist. Die Vorspannkraft ist das eigentliche Ziel. Serienfertigungen sind jedoch darauf angewiesen, schnell und reproduzierbar Qualität zu fertigen, was wiederum zur Entwicklung von adaptiven Schraubstrategien führte, welche Reibwertunterschiede oder wechselnde Einschraubtiefen kompensieren können – und das auch bei Einschraubgeschwindigkeiten bis 3000 U/min, ohne dass man auf die Reaktionsgeschwindigkeit des Werkers hoffen muss. Als Beispiel sind hier die Momentenkompensation oder die Gradientenstrategie als Drehwinkelstrategie mit automatischer Erkennung der Kopfauflage über den Verlauf der Drehmoment-Drehwinkelkurve zu nennen.
Diese Strategien werden bereits mit großem Erfolg im Möbelbau, aber auch mit ersten Applikationen im Fenster- und Türenbereich eingesetzt. Dieses Verfahren ist auch bestens für die Verschraubung von Anschlüssen im Ingenieurholzbau geeignet, da sichergestellt werden kann, dass bis zum Schluss schnell verschraubt werden kann, ohne dass die Schrauben die Köpfe verlieren.

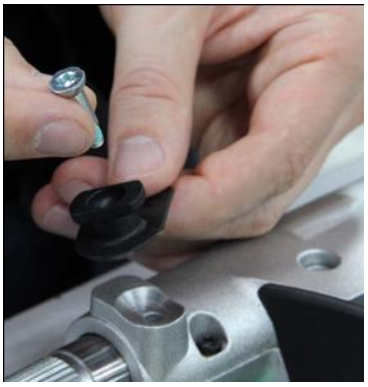

Bild 6,7,8: Ob bei der Montage der Sichtscheibe eines Backofens, eines Motors oder eines Sitzmöbels: Jedes Mal wird direkt in Metall, Kunststoff oder Holz verschraubt, ohne zuvor ein Gewinde zu fertigen. Drehmomente geben dabei keinen Aufschluss über die Anzugsqualität, daher müssen adaptive Anziehverfahren, wie die Gradientenstrategie, zur Anwendung kommen, um eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten. Da ein Versagen der Schraubstellen in jedem der Fälle zu enormen Kosten führen würde, entschieden sich die Konstrukteure jeweils, die Schraubstelle als kritisch zu bewerten und somit den Weg für eine hochwertige Montagetechnik frei zu machen.

5. Fazit

Hohe Kosten im Schadensfall, ein gerechtfertigtes Sicherheitsdenken und die fortschreitende technische Entwicklung in der Montagetechnik haben in nahezu allen Industriesegmenten in den letzten fünf bis zehn Jahren zu einer teils deutlichen Abkehr von althergebrachten Montage- und Prüfmethoden geführt. Sicherlich sind einige Methoden, die in anderen Industrien Anwendung finden, für den Ingenieurholzbau nicht oder nicht direkt von Nutzen, jedoch haben Beispiele, wie die gesteuerten Schraubsysteme mit Schraubdatenerfassung und automatischer Kopfauflagenerkennung gezeigt, dass sich ein Blick über den Tellerrand sehr wohl lohnt.