

Ermüdungsfestigkeit von Schrauben

Dipl.-Ing. Marc Seidel, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

Appelstr. 9A, 30167 Hannover

seidel@stahl.uni-hannover.de, <http://www.stahlbau.uni-hannover.de>

1 Einleitung

Für viele Komponenten von Windenergieanlagen ist aufgrund der hohen dynamischen Beanspruchung ein Ermüdungsfestigkeitsnachweis zu führen. Dies trifft im besonderen Maße auf die Schrauben z.B. in Ringflanschverbindungen (Abbildung 1) zu, da ihre Ermüdungsfestigkeit durch die hohe Kerbwirkung im Gewinde sehr niedrig ist. Vereinzelt Berichte über aufgetretene Schadensfälle [1] zeigen die Relevanz dieser Fragestellung.

Abbildung 2 zeigt eine typische Ermüdungsbruchfläche aus einem Dauerschwingversuch unter überwiegender Axialbeanspruchung. Die sukzessiv entstehende sichelförmige Anrißfläche ist als hellere Fläche im rechten Bildteil erkennbar. Die relativ große Restbruchfläche (dunklere Fläche im linken Bildteil) deutet in diesem Fall auf eine hohe Restvorspannkraft hin.

Die Belastung der Ringflanschverbindung resultiert aus der Biegebeanspruchung des Turmes infolge der Eigengewichts- und Windlasten. Die hochfesten Schrauben der Ringflanschverbindung werden vorgespannt, da so die Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma$ in der Schraube im Vergleich zu den Spannungsschwingbreiten in der Turmschale verhältnismäßig niedrig sind. Durch die Wirkung der Vorspannung und des exzentrischen Kraftangriffs ergibt sich ein kompliziertes Tragverhalten. Die Ermittlung der Übertragungsfunktion zwischen

äußerer Belastung und der Belastung der Schraube in der Ringflanschverbindung durch zentrische Zugkraft F_S und überlagertes Biegemoment M_S wird in [3] ausführlich behandelt.

Der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit erfolgt nach Eurocode 3 [4] für nicht periodische Beanspruchung durch Ermittlung der Schadenssumme nach PALMGREN-MINER in der Form

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1,0 \quad (1)$$

Die zu einer Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ gehörige ertragbare Spannungsspielzahl N_i ist mit der um die Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungs- und Widerstandsseite erhöhten Spannungsschwingbreite zu ermitteln. Die Anzahl der Spannungsspiele Σn_i innerhalb der Lebensdauer von 20 Jahren liegt bei Anlagen der MW-Klasse in der Größenordnung von $\Sigma n_i = 10^8 \dots 10^9$.

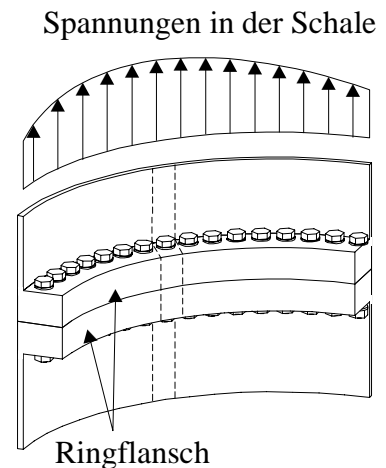


Abbildung 1: Ausschnitt einer Ringflanschverbindung



Abbildung 2: Ermüdungsbruchfläche einer Schraube unter überwiegender Axialbeanspruchung [2]

2 Einordnung in eine Kerbgruppe

2.1 Allgemeines

Im Eurocode 3 Teil 1 [4] werden zentrisch zugbeanspruchte Schrauben der Kerbgruppe 36* zugeordnet. Davon abweichend wird im Eurocode 3 Teil 2 die Detailkategorie 50* angegeben [5].

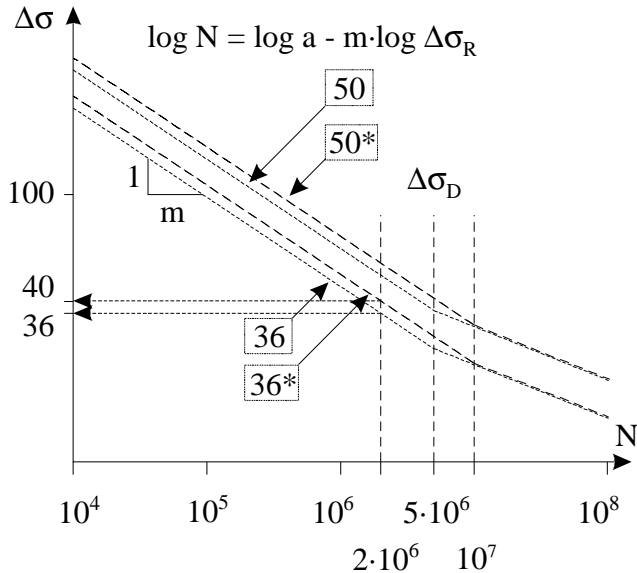


Abbildung 3: Ermüdungsfestigkeitskurven nach Eurocode 3

Im Entwurf zum Eurocode 3 Teil 1-9 [6] wird ebenfalls die Kerbgruppe 50* genannt. Hier wird erstmals explizit auch die Berücksichtigung der Biegespannungen gefordert. Für große Schraubendurchmesser wird zudem eine Reduktion der Ermüdungsfestigkeit mit folgendem Faktor vorgeschrieben:

$$\alpha_{\text{red}} = \left(\frac{30}{d} \right)^{0,25} \quad \text{für } d > 30\text{mm} \quad (2)$$

Für Schrauben M36 würde das eine Reduktion auf eine nominell nicht vorhandene Kerbgruppe 48* gegenüber 50* bedeuten. Die Abnahme der Ermüdungsfestigkeit in diesem Größenbereich wird demzufolge gering eingestuft.

In der vorrangig im Bereich des Maschinenbaus angewendeten VDI-Richtlinie 2230 [7] werden Dauerfestigkeitswerte für zentrisch schwingbeanspruchte Schrauben genannt, die deutlich über den Werten liegen, die sich aufgrund der Vorschriften des Bauingenieurbereichs ergeben. Auch in den Vorschriften des Germanischen Lloyd [8] ist ein Passus enthalten, der für maschinenbauliche Komponenten eine höhere Kerbgruppe zulässt. Für Komponenten, die in den baurechtlichen Bereich fallen, kann diese Besserstellung nicht in Anspruch genommen werden! Hier sind die einschlägigen Bauvorschriften, z.B. der Eurocode 3 [4] und die DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen [9] maßgebend.

2.2 Auswertung von Versuchsergebnissen zur Einordnung in eine Kerbgruppe

Da die Schraube das ermüdungsgefährdete Element der Verbindung darstellt, ist die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils Schraube primärer Untersuchungsgegenstand der experimentellen Forschung verschiedener Autoren gewesen. Die nachfolgend zitierten Versuchsergebnisse beziehen sich jeweils auf die isoliert geprüfte Schraube, deren Beanspruchung infolge der Schwingbreiten der Schraubennormalkraft und des Schraubenbiegemomentes im wesentlichen durch die Geometrie der Schraube und der Mutter bestimmt wird. Maßgebend für die Ermüdungsfestigkeit sind die lokalen Spannungen, die infolge geometrischer Kerben ein Vielfaches der Nennspannung betragen. Der Widerstand in Form der Schraubenbeanspruchbarkeit wird durch viele Faktoren,

wie z.B. den Werkstoff und den Verarbeitungsprozeß bestimmt, hier insbesondere durch das Vorhandensein von Eigenspannungen. Die nachfolgend vorgestellte Auswertung von Versuchsergebnissen beschränkt sich darum auf Schrauben, die denen im Windenergiebereich eingesetzten entsprechen.

2.3 Ermüdungsfestigkeit unter zentrischem Zug

Zur Überprüfung der Einstufung im Eurocode 3 und wegen der offensichtlichen Diskrepanzen der unterschiedlichen Vorschriften wurden verschiedene Versuchsergebnisse gemeinsam statistisch ausgewertet. Dabei wurden nur Untersuchungen berücksichtigt, die mit schlußvergüteten und feuerverzinkten Schrauben durchgeführt wurden, da dies die vorherrschend verwendete Schraubenart für Ringflanschverbindungen ist. Für folgende Untersuchungen lagen die Zahlenwerte der Versuche vor:

- LACHER [11] führte Dauerschwingversuche mit feuerverzinkten Schrauben M20 10.9 durch. Es handelte sich um übliche schlußvergütete HV-Schrauben.
- VALTINAT [12] führte Versuche an Schrauben M30 10.9 durch, die bis in den plastischen Bereich angezogen wurden. Geprüft wurden normal- und hochtemperaturverzinkte HV-Schrauben.
- KUPERUS [13] führte ebenfalls Versuche an feuerverzinkten HV-Schrauben der Größe M20 durch. Es wurden verschiedene Testreihen mit torsionsfrei und torsionsbehaftet vorgepannten Schrauben durchgeführt.

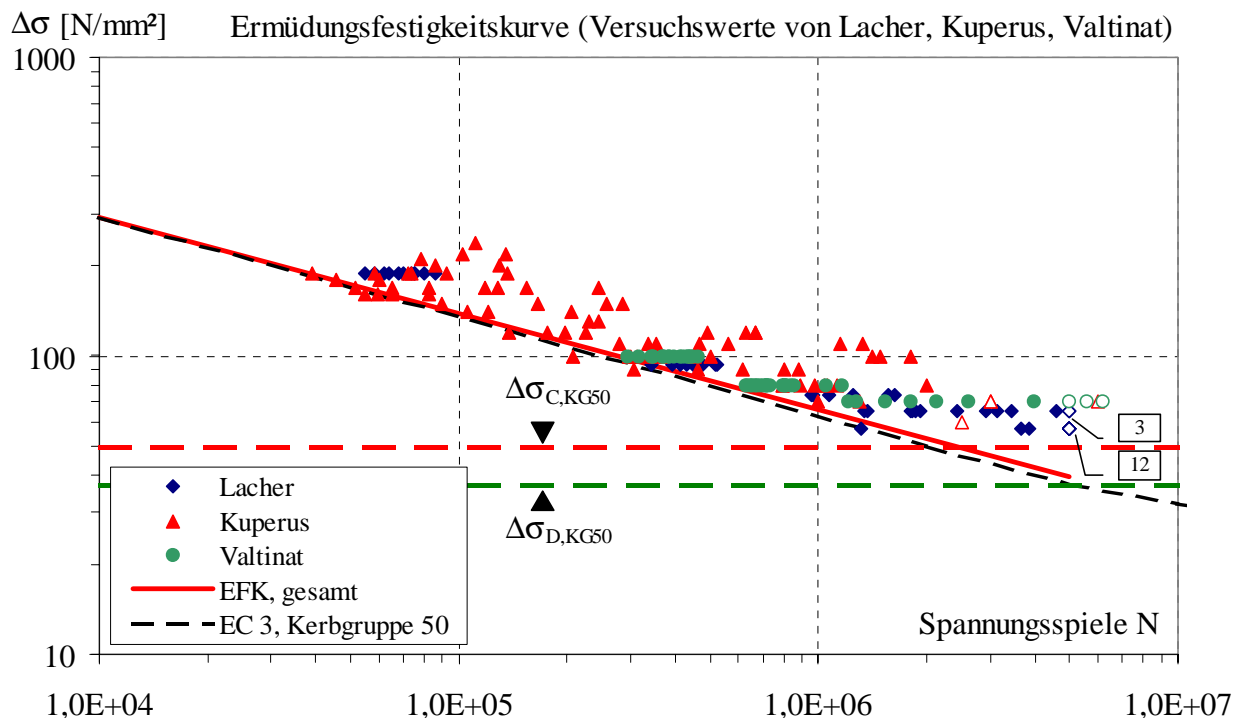


Abbildung 4: Statistische Auswertung von Dauerschwingversuchen axial beanspruchter HV-Schrauben (Durchläufer sind durch weiße Füllung der Symbole gekennzeichnet)

Bezeichnungen: $\Delta\sigma_{C,KG50} = 50 \text{ N/mm}^2$: Nennwert der Ermüdungsfestigkeitskurve für Kerbgruppe 50
 $\Delta\sigma_{D,KG50} = 36,8 \text{ N/mm}^2$: Wert der Dauerfestigkeit für Kerbgruppe 50

Die Versuche sind in Abbildung 4 zusammenfassend dargestellt und ausgewertet. Die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeitskurve (EFK) für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\dot{U}} = 97,7\%$ erfolgte analog zu [11] durch Auswertung im Gaußschen Wahrscheinlichkeitsnetz auf verschiedenen Spannungsniveaus. In der realen Verbindung sind zu allen Versuchsreihen vergleichbare Verhältnisse möglich, da sich je nach vorliegenden Reibungsverhältnissen unterschiedliche Torsionsspannungen einstellen und auch eine Überspannung in den plastischen Bereich möglich ist.

Darum ist die gemeinsame Auswertung aller Versuche im Hinblick auf die praktische Anwendung sinnvoll. Zum Vergleich mit dem Eurocode 3 ist die Ermüdungsfestigkeitskurve für die Kerbgruppe 50 eingetragen. Diese deckt sich im Zeitfestigkeitsbereich sehr gut mit der aus allen Versuchsergebnissen ermittelten Wöhlerlinie.

Zu sehr ähnlichen Ergebnissen kommt eine Zusammenfassung amerikanischer Versuchsergebnisse an Ankerbolzen von VAN DIEN et al. [14] mit den Ergebnissen verschiedener Autoren, siehe dazu auch [3].

Von WIEGAND/THOMALA [15] wurden die statistisch ausgewerteten Ergebnisse von Dauerschwingversuchen an feuerverzinkten HV-Schrauben M30 10.9 mitgeteilt, wobei für die Auswertung, die nur zur Ermittlung der Dauerfestigkeit erfolgte, zwei nicht näher spezifizierte Prüfhorizonte mit jeweils zehn Proben vorlagen. Umgerechnet auf den Spannungsquerschnitt und eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{U}} = 97,7\%$ ergibt sich die Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D = 67,6$ N/mm². Dieser Wert deckt sich qualitativ in etwa mit den Ergebnissen von VAN DIEN [14], der für Spannungsamplituden $\Delta\sigma < 62$ N/mm² keine Dauerbrüche festgestellt hat. Bei LACHER [11] treten hingegen auf dem Spannungsniveau $\Delta\sigma = 57$ N/mm² überwiegend Durchläufer ($N > 5 \cdot 10^6$) auf, es sind aber auch einige Brüche zu verzeichnen. Nach der Auswertung von LACHER [11] beträgt die Dauerfestigkeit feuerverzinkter HV-Schrauben M20 10.9 bei Auswertung für $P_{\bar{U}} = 97,7\%$ etwa $\Delta\sigma_D = 52,5$ N/mm². Als Knickschwingspielzahl, d.h. die Schwingenspielzahl bei der sich der Übergang zur Dauerfestigkeit vollzieht, ermittelt er $N_D = 2 \cdot 10^6$ (für $P_{\bar{U}} = 50\%$). In der Kerbgruppe 50 liegt die Dauerfestigkeit bei $\Delta\sigma_D = 36,8$ N/mm², so daß sich in der Tendenz eine im Vergleich zur Zeitfestigkeit hohe Dauerfestigkeit ergibt.

Verglichen damit ergibt sich nach VDI-Richtlinie 2230 [7] folgender Wert der Dauerfestigkeit für $d = 30$ mm Schraubendurchmesser bei $N = 2 \cdot 10^6$:

$$\Delta\sigma_{D,VDI2230} = 2 \cdot 0,85 \cdot (150/d + 45) = 2 \cdot 0,85 \cdot (150/30 + 45) = 85 \text{ N/mm}^2$$

Wird die Verminderung der Dauerfestigkeit infolge der Feuerverzinkung mit etwa 15% berücksichtigt, so ergibt sich ein Wert von $\Delta\sigma_{D,VDI2230} = 72$ N/mm². Dieser Wert liegt um rund 37% über dem von LACHER ermittelten Wert der Dauerfestigkeit und erscheint gegenüber den vorliegenden Versuchsergebnissen zu optimistisch.

2.4 Ermüdungsfestigkeit unter exzentrischer Beanspruchung

Untersuchungen an rein biegebeanspruchten bzw. kombiniert beanspruchten Schrauben liegen in der Literatur weit seltener vor als Berichte über zentrisch zugbeanspruchte Schrauben. Eine Auswertung der vorhandenen Literatur zeigt, daß die Schwingfestigkeit unter kombinierter Beanspruchung bei Bezug auf die Randspannung vermutlich höher ist als bei reinem Zug. Wenn wie nach Eurocode 3 Teil 1-9 vorgesehen der Nachweis mit der maximalen Randspannungsschwingbreite aus Normalkraft- und Biegemomentenanteil $\Delta\sigma = \Delta\sigma_N + \Delta\sigma_M$ gegen die Kerbgruppe 50 erfolgt, dann liegt der Nachweis auf der sicheren Seite.

2.5 Empfehlung für die Nachweisführung

Die durchgeführte Auswertung von Dauerschwingversuchen aus der Literatur läßt eine Einordnung hochfester, feuerverzinkter HV-Schrauben unter axialer Beanspruchung in die Kerbgruppe 50 sinnvoll erscheinen. Für die Anwendung im Windenergieanlagenbau ist zu beachten, daß die Versuche mit Schrauben bis M30 durchgeführt wurden, für größere Anlagen aber mittlerweile Schrauben bis M42 zum Einsatz kommen und die Schraubenhersteller ihr Angebot derzeit auf M48 ausweiten. Da bei größeren Schraubendurchmessern mit einer Abnahme der Ermüdungsfestigkeit zu rechnen ist, muß hier der Größeneinfluß berücksichtigt werden, z.B. nach Gl. (2).

2.6 Regelung im Windenergieanlagen-Bereich

Im Zusammenhang mit der Neufassung der DIBt-Richtlinie für WEA [9] wird diskutiert, ob der Nachweis für die Normalspannung alleine mit der Kerbgruppe 36* erfolgen kann. Bei Berücksichtigung der Biegeanteile soll Kerbgruppe 50* angesetzt werden. Nach Meinung der Verfasser sollte der Nachweis nach Möglichkeit immer unter Berücksichtigung der Biegeanteile erfolgen, da diese in Abhängigkeit von der Geometrie der Flanschverbindung stark variieren können. In [3] wird ein Berechnungsmodell vorgestellt, mit dem ohne Verwendung aufwendiger FE-Programme die kombinierte Beanspruchung näherungsweise bestimmt werden kann. Alternativ können auch FE-Modelle verwendet werden. Vom Institut für Stahlbau wurde zu diesem Zweck eine parametrisierte Eingabedatei für das Programmsystem ANSYS® entwickelt, die anhand von Versuchsergebnissen kalibriert wurde.

3 Zusammenfassung

Schrauben in Ringflanschverbindungen werden durch die dynamische Belastung der WEA einer schwingenden Beanspruchung ausgesetzt, so daß ein Ermüdungsnachweis geführt werden muß.

Auf der Widerstandsseite ist hierfür die Einordnung in eine Kerbgruppe nach Eurocode 3 erforderlich. Nach einer Auswertung der Versuchsergebnisse verschiedener Autoren, die mit feuerverzinkten HV-Schrauben durchgeführt wurden, kann die Kerbgruppe 50 zur Ermittlung der Schädigung verwendet werden. Abweichende Angaben aus dem maschinenbaulichen Bereich erscheinen im Vergleich zu optimistisch. Beim Vergleich mit anderen Versuchsergebnissen sollte stets darauf geachtet werden, daß die Dauerfestigkeit von Schrauben im Vergleich zum Zeitfestigkeitsbereich offensichtlich relativ groß ist. Es kann deshalb aus der Angabe von Dauerfestigkeitswerten für Schwingspielzahlen $N > 2 \cdot 10^6$ alleine nicht auf die Einstufung im Zeitfestigkeitsbereich mit Schwingspielzahlen $N < 2 \cdot 10^6$ geschlossen werden.

Auf der Einwirkungsseite ist die Summe aus Normalkraft- und Biegemomentenanteil zu berücksichtigen. Infolge der exzentrischen Beanspruchung der Verbindung ergeben sich Biegeanteile in Abhängigkeit von der Geometrie der Verbindung, die mit Hilfe geeigneter Rechenmodelle zu ermitteln sind.

4 Literatur

- [1] Bracht, W.: Orkan knickt S-46 – und nun? Erneuerbare Energien 6/2000, S. 41-43.
- [2] Lacher, G.; Kießlich, H.P.: Dauerschwingversuche als Grundlage zur Bemessung von hochfesten axial beanspruchten Schrauben der Güte 10.9 in Kopfplattenverbindungen: Schlußbericht zum Forschungsvorhaben. Institut für Stahlbau, Universität Hannover 1984.
- [3] Seidel, M.: Zur Bemessung geschraubter Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen. Hannover, Diss. in Vorbereitung.
- [4] ENV 1993-1-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1.1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau. April 1992.
- [5] ENV 1993-2: Eurocode 3, Part 2: Steel Bridges. 1997.
- [6] EN 1993-1-9: Eurocode 3, Part 1.9: Fatigue strength of steel structures. Draft 1999.
- [7] Entwurf VDI-Richtlinie 2230: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen. Zylindrische Einschraubenverbindungen. November 1998.
- [8] Germanischer Lloyd (Hrsg.): Vorschriften und Richtlinien, IV – Nichtmaritime Technik, Teil 1–Windenergie: Richtlinie für die Zertifizierung von Windkraftanlagen. Okt. 1999.
- [9] DIBt (Hrsg.): Richtlinie für Windenergieanlagen. Entwurf Februar 2001.
- [10] DIN 18800: Stahlbauten – Bemessung und Konstruktion. November 1990.

- [11] Lacher, G.; Kießlich, H.-P.; Bernert, J.: Schlußbericht zum Forschungsvorhaben IV/1-5-361/82: Zeit- und Dauerfestigkeit von hochfesten Schrauben der Güte 10.9 unter axialem Zug, Ermittlung der Wöhlerlinien. 1. Teilprogramm: Feuerverzinkte Schrauben M20. Universität Hannover, Institut für Stahlbau 1985.
- [12] Valtinat, G.; Ansorge, J: Schwingfestigkeit von hochtemperaturverzinkten Schrauben, die bis in den plastischen Bereich angezogen sind. Forschungsbericht zum AiF-Vorhaben Nr. 8522, TU Hamburg-Harburg 1993.
- [13] Kuperus, A.: The fatigue strength of tensile loaded tightened H.S.F.G. (High Strength Friction Grip) bolts. Stevin Laboratory, TU Delft 1974.
- [14] Van Dien, J.; Kaczinski, M.; Dexter, R.: Fatigue Testing of Anchor Bolts. In: Building an International Community of Structural Engineers - Proceedings of Structures Congress XIV. Chicago 1996.
- [15] Wiegand, H.; Thomala, W.: Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben. Drahtwelt 59 (1973), S. 542-551.