

Einflussfaktoren auf die Vorspannkraft großer Schrauben bei Windenergieanlagen

Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Dipl.-Ing. Tim Rutkowski
Leibniz Universität Hannover - Institut für Stahlbau

Zusammenfassung

Im Rahmen eines vom Deutschen Institut für Bautechnik geförderten Forschungsvorhabens wurden umfangreiche Vorspannkraftmessungen an den Flanschverschraubungen von Windenergieanlagen (WEA) durchgeführt. Ziel der durchgeführten Arbeiten war es, mögliche Einflussfaktoren für von der Norm abweichende Vorspannkraften zu identifizieren. Der vorliegende Beitrag stellt die Resultate der Untersuchungen vor.

1 Einleitung

Die Vorspannkraften planmäßig vorgespannter Schraubenverbindungen sind häufig sicherheitsrelevant. Bei Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen, die dynamischen Biegemomenten ausgesetzt sind, sinkt die Lebensdauer der Verbindung bei zu niedriger Vorspannkraft überproportional.

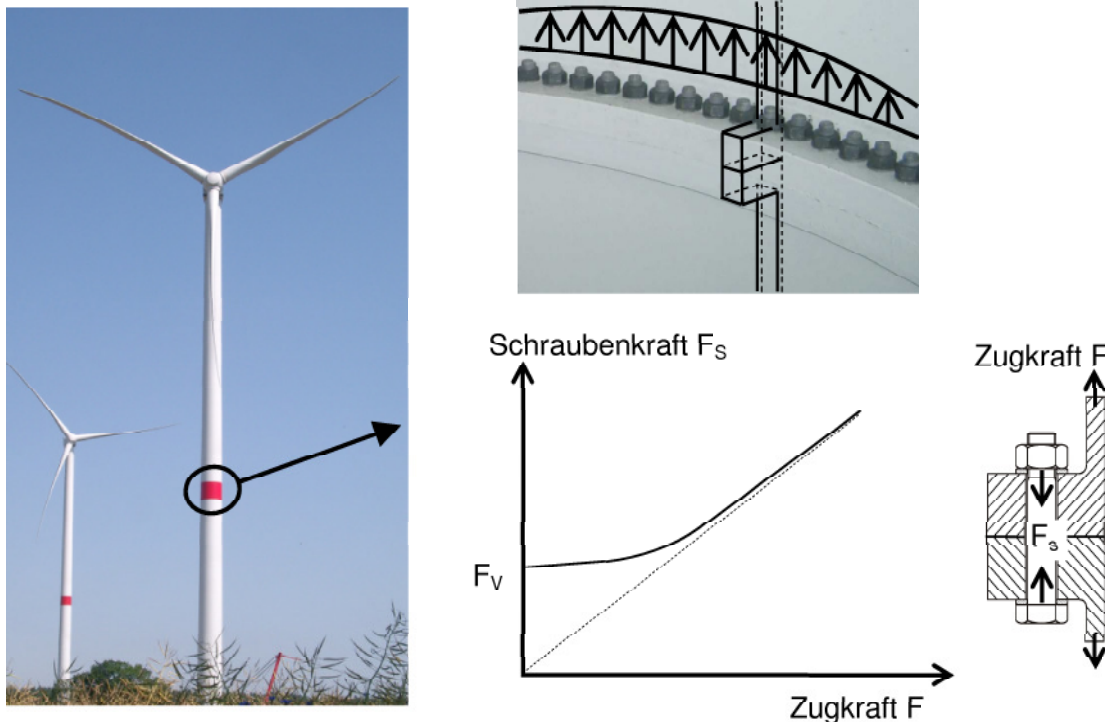


Abbildung 1-1: WEA mit Ringflanschverbindung, qualitativer Schraubenkraftverlauf

Im Verlauf eines Forschungsprojektes [1] wurde daher überprüft, ob die gängige Montagepraxis von HV-Schraubenverbindungen Fehlerquellen enthält, die möglicherweise zu niedrige Vorspannkraft bewirken. Dazu wurden während der Montage und der Wartung von Windenergieanlagen der Megawatt-Klasse die Vorspannkraft von 1100 HV-Schrauben untersucht.

2 Messverfahren

Nach eingehender Prüfung alternativer Verfahren wurde zur Bestimmung der Schraubenkräfte ein mechanisches Verfahren eingesetzt. Die Verlängerung der Schraube Δl , die sich beim Anziehen einstellt, wurde mit einer Bügelmessschraube gemessen. Unter Berücksichtigung der Axialsteifigkeit [2] der Schraube k_s wurde anschließend daraus die erzielte Vorspannkraft ermittelt (Abb. 2-1).

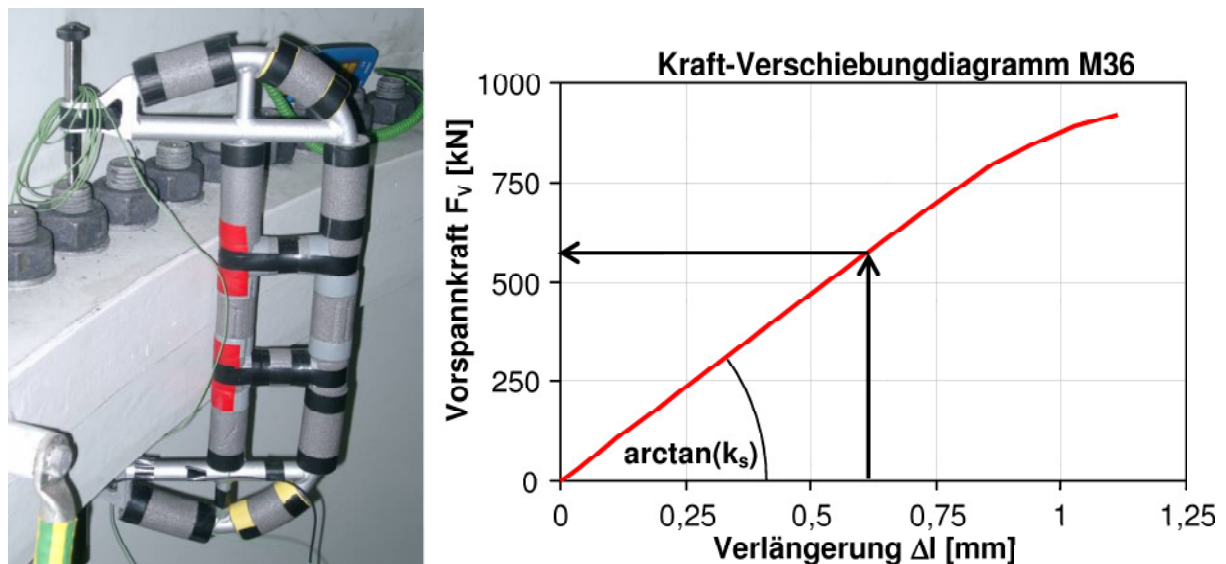


Abbildung 2-1: Bügelmessschraube an Flanschverbindung und Kraft-Verschiebungs-Diagramm

Die Messungen fanden während der Montage von Windenergieanlagen und der ersten planmäßigen Wartung der Schraubenverbindungen statt. Als Montagewerkzeug kamen handelsübliche Geräte zum Einsatz, wie sie auch von den Aufstellern benutzt werden. Die elektrisch oder hydraulisch betriebenen Werkzeuge wurden zusätzlich mit einer Messvorrichtung versehen, um die während des Anziehens aufgebrauchten Montagedrehmomente und die erzielten Mutterdrehwinkel aufzuzeichnen. Damit sollten abweichende Drehmomente ausgeschlossen werden.

3 Resultate der Feldmessungen

Die Vorspannkraft, die während der einzelnen Messkampagnen ermittelt wurden, zeigten jeweils nur geringe Streuungen innerhalb der einzelnen Messreihen. Es konnten jedoch größere

Abweichungen zwischen verschiedenen Messkampagnen festgestellt werden. Die während der Schraubenmontage aufgebrachten Drehmomente erwiesen sich dabei in allen Fällen als korrekt und der Norm entsprechend (DIN 188800-7 [3]). Ein stichprobenartiger Vergleich der Reibeigenschaften der verwendeten HV-Garnituren im Anziehprüfstand zeigte nur geringe Differenzen (Abb. 3-1). Die Mittelwerte der erzielten Vorspannkkräfte für verschiedene Schraubenchargen lagen auf ähnlichem Niveau (mittlere Säulen). Während der Feldmessungen zeigten die untersuchten Schraubenchargen sowohl wesentlich geringere (Charge 1) als auch höhere Vorspannkkräfte (Charge 2). Da während der Feldmessungen zur Montage die gleichen Drehmomente wie bei den Labormessungen verwendet wurden, sind die Abweichungen zwischen den Labor- und Feldmessungen damit nicht zu erklären. Ein systematischer Unterschied der Reibeigenschaften zwischen Labor und Feldmontage kann ausgeschlossen werden. Eine Verschlechterung der Reibeigenschaften von Schrauben unter Baustellenbedingungen z.B. durch Verschmutzung ist zwar möglich, lag aber bei den durchgeführten Messungen nicht vor. Auch ist eine wesentliche Verbesserung der Reibeigenschaften der Schraubengarnituren bei Feldmessungen nicht erklärbar, wenn ein nicht zulässiges Nachschmieren der Garnituren ausgeschlossen wird.

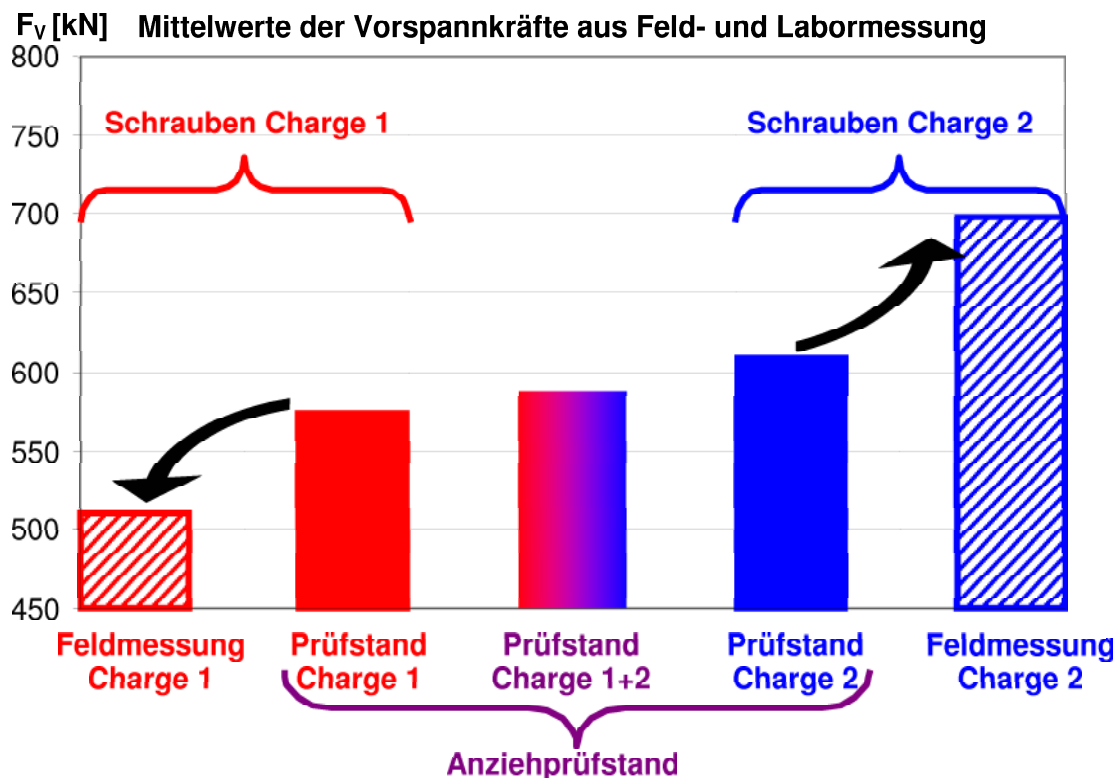


Abbildung 3-1: Mittelwerte der Vorspannkkräfte aus Labor- und Feldmessungen

Da nahe liegende Fehlerquellen wie veränderte Reibeigenschaften oder unterschiedliche Montagedrehmomente ausgeschlossen werden konnten, wurden die während den Feldmessungen verwendeten hydraulischen und elektrischen Montagewerkzeuge vergleichend untersucht.

4 Labormessungen

Um die während der Feldmessungen verwendeten Montagewerkzeuge näher zu untersuchen, wurden Labormessungen an Flanschverschraubungen durchgeführt. Dabei wurde jeweils eine Schraube mit einem Elektroschrauber angezogen und anschließend mit einem Hydraulikschrauber bei gleichem maximalem Drehmoment nachgezogen. Auf diese Weise wurde eine bessere Vergleichbarkeit der Einzelmessungen erzielt, da der Einfluss der Streuungen der Reibbeiwerte als Einflussfaktor für die Vorspannkraft reduziert wurde. Eine systematische Verbesserung der Reibeigenschaften der Garnituren beim Nachziehvorgang konnte ausgeschlossen werden, da zwischen Vor- und Nachziehvorgang mit identischen Verschraubungsgeräten kaum Vorspannkraftänderungen auftraten.

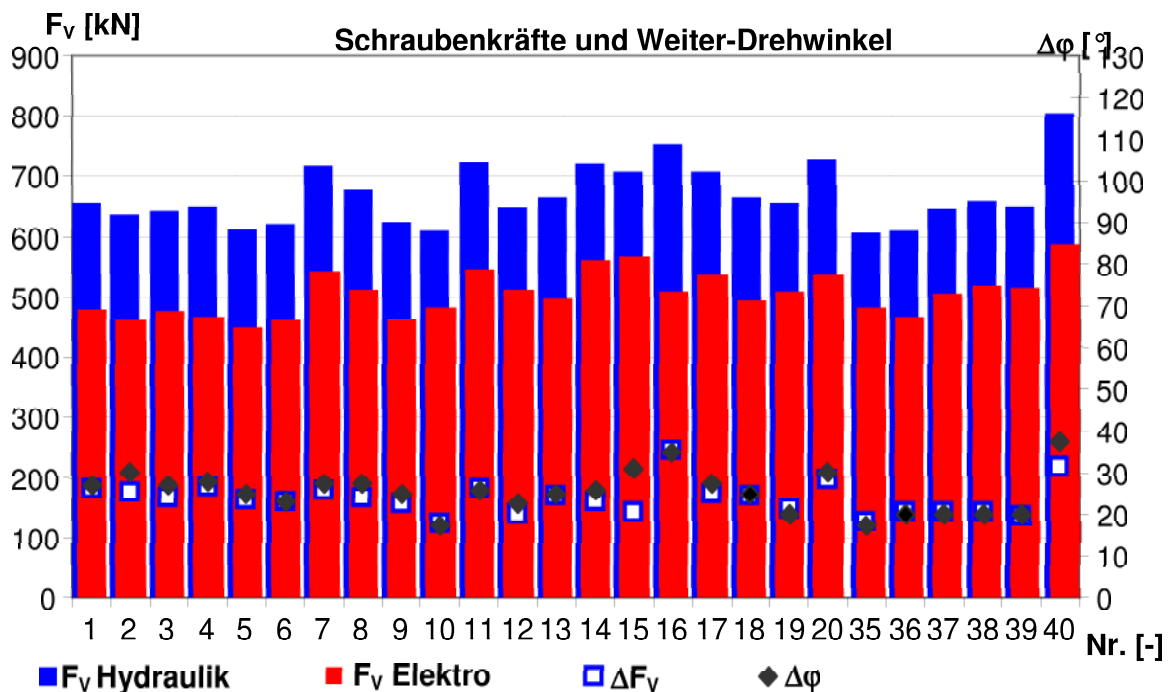


Abbildung 4-1: Resultate An- und Nachziehversuch mit verschiedenen Verschraubungsgeräten

Trotz des gleichen maximalen Drehmoments wurden die Schrauben mit dem Hydraulikschrauber aufgrund der längeren Einwirkungsdauer des maximalen Drehmomentes stärker angezogen (Abb. 4-1). Der aufgezeichnete Drehwinkel korrespondiert dabei sehr gut mit den gemessenen Vorspannkräften, so dass ausgeschlossen werden kann, dass Setzungen zwischen den beiden Montagevorgängen zu nennenswerten Vorspannkraftrückgängen und Weiterdrehwinkeln führten.

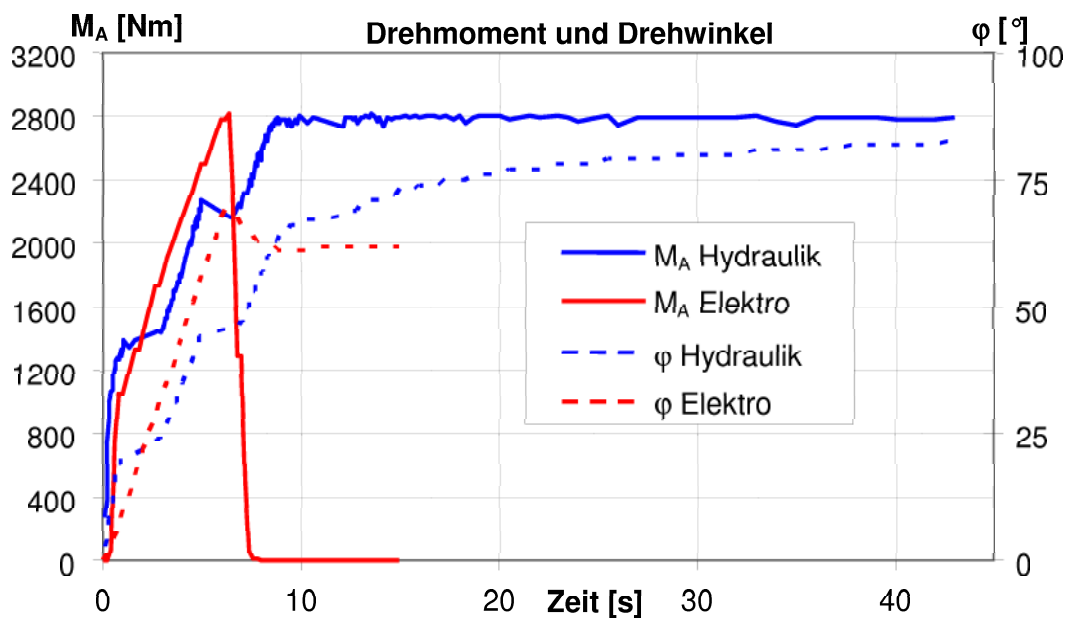


Abbildung 4-2: Zeitlicher Verlauf des Montagedrehmomentes und des Mutterdrehwinkels

In Abb. 4-2 wird der zeitliche Verlauf eines typischen Verschraubungsvorgangs dargestellt. Die Verläufe von Drehmoment und Drehwinkel in Abhängigkeit von der Zeit bei Einsatz eines Elektroschraubers zeigen, dass bis zum Abschalten des Schraubers nach ca. 6 Sekunden ein konstantes Verhältnis von Drehmoment und Drehwinkel bzw. Vorspannkraft vorhanden ist. Der Rückgang des Drehwinkels ist durch die Entlastung des Schraubers nach Beendigung des Schraubvorganges bedingt und führt nicht zu einer Änderung des Mutterdrehwinkels oder der Vorspannkraft.

Der zeitliche Verlauf des Drehmoments des Hydraulikschraubers zeigt bis zum Erreichen des Maximalwertes nach ca. 9 Sekunden ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit dem erzielten Drehwinkel. Durch eine längere Verweildauer des maximalen Drehmomentes auf der Mutter wird der Drehwinkel und damit die erzielte Vorspannkraft signifikant gesteigert werden (hier: Drehwinkelzunahme 16° entspricht etwa 130 kN Vorspannkraftzunahme).

Von einem konstanten Verhältnis von Drehmoment und Vorspannkraft unabhängig von der Art des Verschraubungsvorgangs kann daher nicht immer ausgegangen werden.

5 Numerische Untersuchungen

Die vorangegangenen Versuche zeigen Abweichungen des Drehmoment-Vorspannkraftverlaufs von der theoretischen Vorhersage entsprechend Gleichung 1 gemäß [4]. Maßgebende Faktoren sind darin die Geometrie und Reibbeiwerte des Schraubengewindes bzw. der Reibflächen.

$$M_A = F_V \left[\frac{P}{2\pi} + \mu_G \frac{d_2}{\sqrt{3}} + \mu_K \frac{D_{Km}}{2} \right] \quad \text{Gl. 1}$$

Um mögliche Einflussfaktoren aus der Schraubenmontage zu identifizieren, die in der Gleichung 1 nicht berücksichtigt werden, aber einen nennenswerten Effekt auf die erzielbare Vorspannkraft haben, wurde der Anziehvorgang einer HV-Schraube mittels eines 3-D-FE-Modells simuliert (Abb. 5-1). Die Reibbeiwerte in der Mutterauflage und im Gewinde wurden dabei als konstant angenommen.

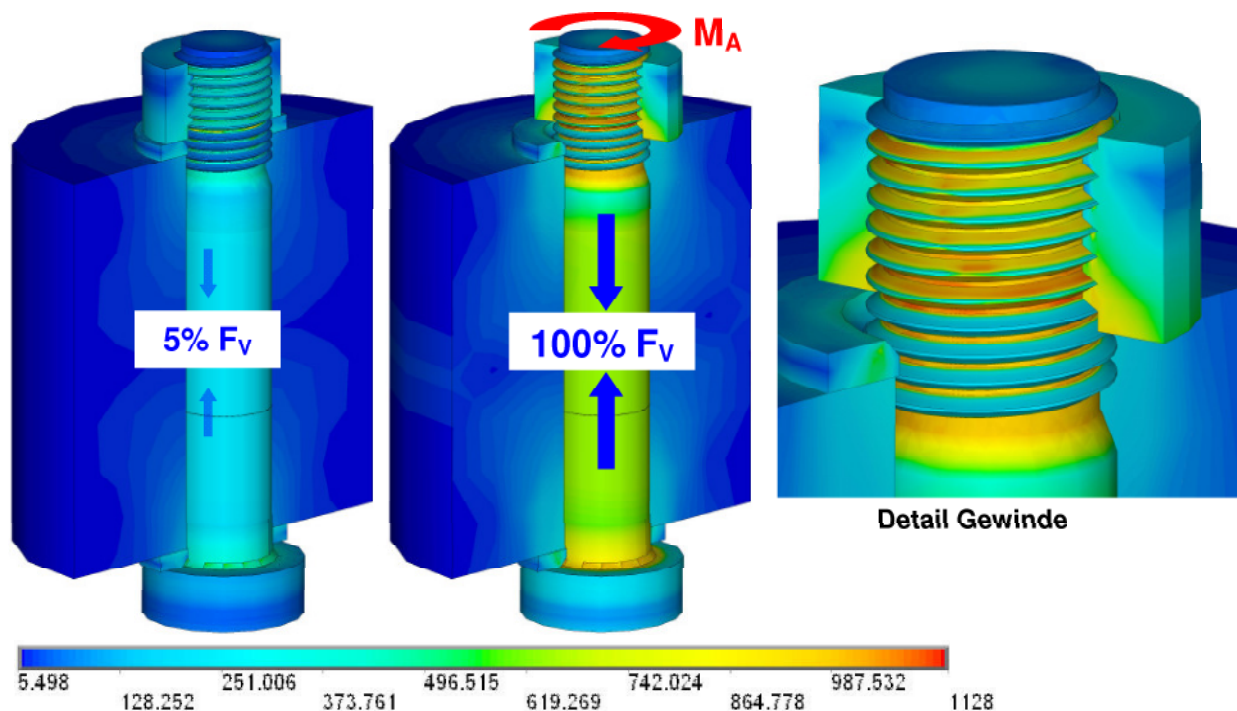


Abbildung 5-1: Vergleichsspannung beim Anziehvorgang einer Schraube M36 HV

Als ein Faktor, der die Vorspannkraft beeinflussen kann, wurden Querkräfte während des Anziehvorganges untersucht. Diese treten bei der Verwendung des Drehmomentverfahrens immer auf, wenn das Montagegerät außerhalb der anzuziehenden Verbindung abgestützt wird. Weiterhin wurden geometrische Imperfektionen in der Verbindung als Einflussparameter untersucht. Dabei wurde eine Schiefstellung der Mutter erzeugt, indem eine keilförmige Unterlegscheibe mit einem Neigungswinkel ϕ implementiert wurde.

Beide Sonderfälle zeigen das gleiche Anziehverhalten wie die perfekte Verbindung. In Abbildung 5-2 sind die Resultate der Simulationen dargestellt. Die geringen Abweichungen zur Berechnung der Vorspannkraft nach Gl.1 ergeben sich in erster Linie aus kleinen Differenzen des mittleren Reibungsdurchmessers D_{km} . Vor dem Hintergrund von relativ großen Schwankungen der Reibungskoeffizienten sind diese Abweichungen für die Praxis ohne Belang.

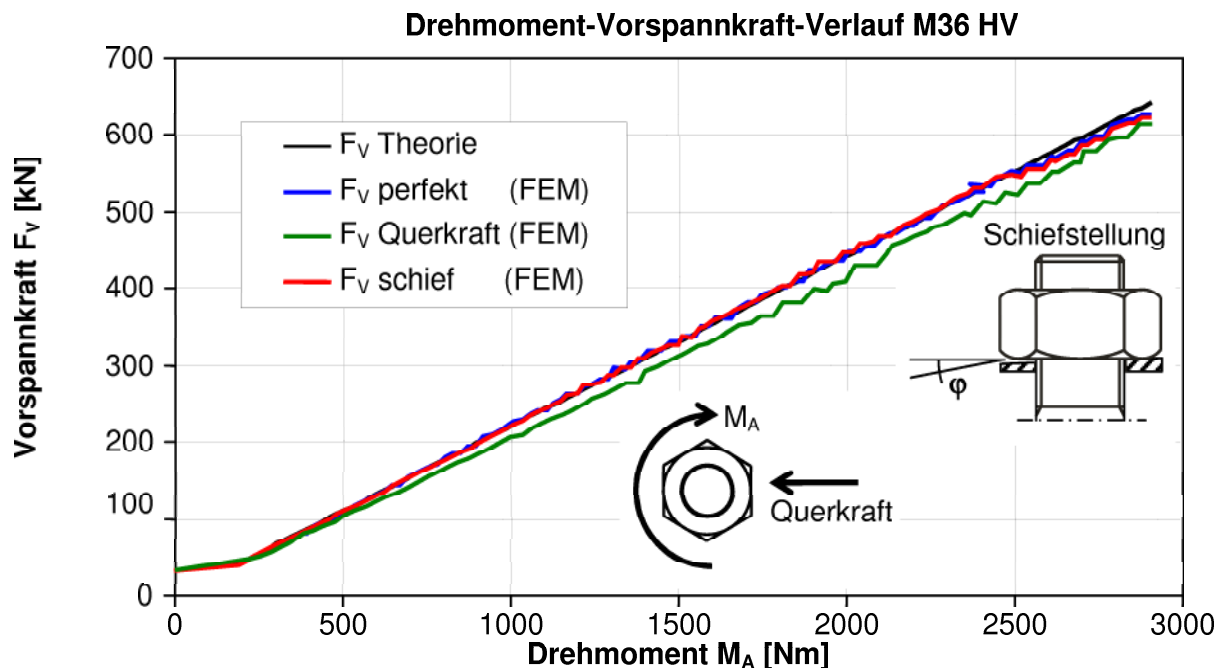


Abbildung 5-2: Drehmoment-Vorspannkraftverlauf für perfekte und imperfekte Verbindung, mit und ohne Querkrafteinfluss

Aufgrund der FE-Untersuchungen kann Gleichung 1 als hinreichend für die untersuchten Anwendungsfälle vorausgesetzt werden, wenn dabei die Reibung als konstant angesehen wird. Wie die experimentellen Anziehversuche jedoch gezeigt haben, ist diese Annahme offenbar nicht zutreffend.

Die Herleitung von Gleichung 1 beruht auf der Annahme eines quasi statisch ablaufenden Verschraubungsvorganges mit konstanten Reibfaktoren. Wenn eine dieser beiden Voraussetzungen nicht erfüllt ist, worauf die durchgeführten Messungen hindeuten, muss der zeitliche Kraft- bzw. Momentverlauf berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wurde eine Bewegungsgleichung für die Mutter aufgestellt, bei der die Reibungsmomente im Gewinde und in der Mutterauflage nicht als konstant vorausgesetzt werden (Gl. 2). Größe und Wirkungsweise der auftretenden Drehmomente werden dabei analog zu Gleichung 1 angenommen.

$$M_A \neq F_V \left[\frac{P}{2\pi} + \mu_G \frac{d_2}{\sqrt{3}} + \mu_K \frac{D_{km}}{2} \right] \Rightarrow \Theta \cdot \ddot{\varphi} = \sum M_i(\varphi, t) \quad \text{Gl. 2}$$

mit Θ : Massenträgheitsmoment Mutter + Verschraubungsgerät (Nuss)

φ : Drehwinkel Mutter

$M_i(\varphi, t)$: zeitlich veränderliche Momente infolge Reibung, Montagedrehmoment

Für die wirkenden Reibungsmomente können entweder gesetzmäßigen Formulierungen (bspw. Coulombsche oder viskose Reibung) oder auch Regressionskennlinien aus Experimenten angenommen werden. Die Lösung der Differentialgleichung erfolgt bei Annahme eines gegebenen zeitlichen Verlaufes des Montagedrehmomentes durch numerische Integration.

Berechnungen mit konstanten Reibkoeffizienten im Zeitbereich zeigen ein nahezu konstantes Verhältnis von Drehmoment und Drehwinkel, entsprechend Gl. 1. Der während der Schraubenmontage beobachtete asymptotische Verlauf des Drehwinkel (und der Vorspannkraft) kann damit nicht nachgebildet werden. Mit einem geschwindigkeitsabhängigen Ansatz für die Reibbeiwerte kann der gemessene Verlauf des Drehwinkel wesentlich besser dargestellt werden (Abb. 5-3, rote Linie).

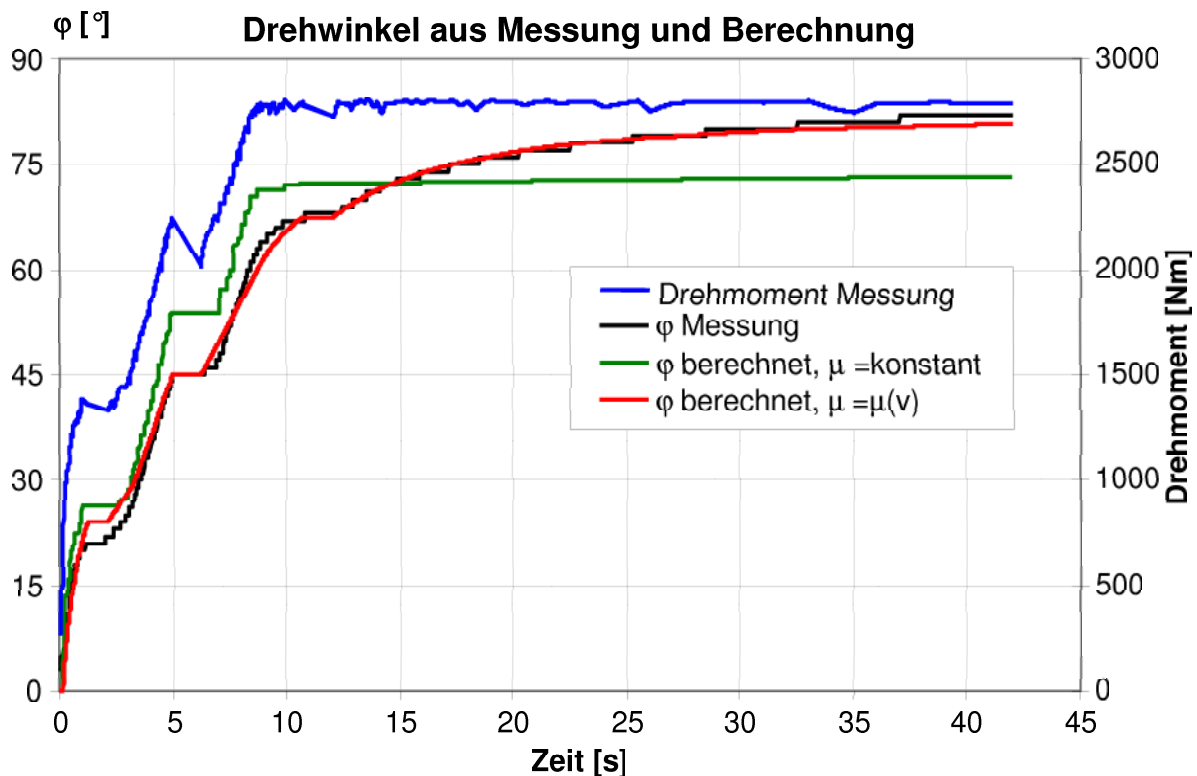


Abbildung 5-3: Gemessener Drehmoment und Drehwinkelverlauf, Berechnung mit unterschiedlichen Reibansätzen

6 Erkenntnisse und Ausblick

Die Ergebnisse des durchgeführten Forschungsvorhabens belegen, dass bei der momentanen Montagepraxis vorgespannter Schraubenverbindungen von Windenergieanlagen die angestrebten Vorspannkraften erreicht werden. Die Verwendung von unterschiedlichen Montagegeräten kann allerdings zu abweichenden Vorspannkraftniveaus führen. Dies ist in der Anziehcharakteristik der Geräte begründet. Die Geschwindigkeit des Anziehvorgangs bzw. die Dauer, mit der das maximale Drehmoment auf der Mutter verweilt, hat augenscheinlich einen signifikanten Einfluss auf die erzielbare Vorspannkraft von HV-Garnituren großer Durchmesser.

Bei der Verwendung von relativ schnell drehenden Verschraubungsgeräten, die bei Erreichen des maximalen Drehmomentes abschalten, ist es sinnvoll, die ohnehin notwendige Einstellung auf den vorhandenen Schraubfall nicht anhand des maximalen Drehmomentes sondern anhand der erreichbaren Vorspannkraft vorzunehmen. Auf diese Weise wird das gleiche Vorspannkraftniveau wie bei langsam drehenden Werkzeugen erreicht.

In zukünftigen Forschungsarbeiten werden die Reibeigenschaften von Schrauben näher untersucht. Dabei werden mögliche Einflussfaktoren wie die Flächenpressung in der Kontaktfläche oder die Reibgeschwindigkeit während der Prüfung konstant gehalten, um den Einfluss dieser Parameter auf das Reibverhalten zu bestimmen.

Die Autoren danken dem Deutschen Institut für Bautechnik für die Förderung des Projektes und den beteiligten Firmen für die breite Unterstützung: August Friedberg GmbH, Barbarino & Kilp GmbH, Fuchs Schraubenwerk GmbH, GE Energy GmbH, Maschinenfabrik Wagner GmbH & Co. KG, Nordex AG, Peiner Umformtechnik GmbH, Radolid Thiel GmbH, REpower Systems AG, Windwärts Energie GmbH.

7 Literatur

- [1] Schaumann, P.; Rutkowski, T.: Messung von erzielten Vorspannkraften unter realen Montagebedingungen. Abschlussbericht. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2006.
- [2] VDI 2230, Bl. 1: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Einschraubenverbindungen, zylindrische Einschraubenverbindungen. Beuth-Verlag Berlin. 2003
- [3] DIN 18800, Teil 7: Stahlbauten – Ausführung und Herstellerqualifikation, September 2002
- [4] Wiegand, H.; Kloos, K.-H.; Thomala, W.: Schraubenverbindungen. Berlin: Springer-Verlag 1988.