

# Kurzfassung vom 14.06.2022

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20563 N

## Thema

Ermittlung von Setzbeiträgen organischer Beschichtungen im Kraftfluss von Schraubenverbindungen unter besonderer Berücksichtigung von Einzelschichtstärken, sowie des Temperatureinflusses

## Berichtszeitraum

01.04.2019 bis 31.12.2021

## Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Baumaschinen und Baustoffanlagen e.V.

## Forschungseinrichtung

Hochschule Offenburg

Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik

77652 Offenburg

Gefördert durch:

## Kurzfassung

Die Schraubenverbindung ist ein fester Bestandteil nahezu jeder Konstruktion des Maschinenbaus und insbesondere auch bei Baumaschinen. Obwohl Schrauben, Muttern und Scheiben mit den dazugehörigen Gewinden und Festigkeitsklassen umfassend genormt und wissenschaftlich in nahezu jeder Hinsicht untersucht sind, ergeben sich in der praktischen Anwendung immer wieder bisher ungeklärte Problemstellungen. So ist auch der Verbleib von Korrosionsschutzlackschichten im Krafftfluss Stand heute nicht abschließend geklärt.

Für den Maschinen- und Anlagenbau gibt die allgemein anerkannte Richtlinie VDI 2230 Blatt 1 eine systematische Handlungsanweisung zur Berechnung und Dimensionierung von Schraubenverbindungen. Hierbei ist die Zielgröße von Schraubenverbindungen das Erreichen und Aufrechterhalten einer erforderlichen Mindestvorspannkraft bzw. Mindestklemmkraft. Dennoch gibt es für Konstrukteure Anwendungsfälle, die nicht von der Richtlinie abgedeckt werden. Einer dieser Fälle ist das Verschrauben von lackierten Bauteilen. Hier fehlt dem Konstrukteur die Möglichkeit, den zu erwartenden Vorspannkraftverlust durch Setzen abzuschätzen. Die Tabelle mit den Richtwerten für Setzbeträge der VDI 2230 Blatt 1 weist seit der aktuell gültigen Fassung der Richtlinie (2015) explizit darauf hin, dass die angegebenen Werte nur für Teile aus Stahl ohne Beschichtung gelten.

Da die Auslegung von Schraubenverbindungen mit organischen Korrosionsschutzschichten im Krafftfluss derzeit nicht eindeutig geregelt ist, gibt es große Unsicherheiten bei den Anwendern. Um diese Unsicherheiten der möglicherweise auftretenden Vorspannkraftverluste zu umgehen, werden Beschichtungen in den Kontaktflächen der Schraubenverbindung vermieden, indem diese Stellen vor der Beschichtung maskiert werden. Allerdings entsteht hierdurch ein hoher Aufwand, da das Maskieren in der Regel manuell ausgeübt wird. Das manuelle Maskieren ist zeitaufwendig, kostenintensiv und darüber hinaus fehleranfällig. Fehlerhafte Maskierungen führen beispielsweise zu einseitiger Lackierung der Kontaktfläche Scheibe/Bauteil und hierdurch zu einer Schiefstellung der Schraube. Insbesondere für den Fall, dass nach der Endmontage kein Überlackieren der ehemals maskierten Flächen mehr stattfindet, entstehen kritische Schwachstellen in dem ansonsten sehr hochwertigen Korrosionsschutz. Bereits nach der Endlackierung von neuen Produkten beginnt die Korrosion an den ehemals maskierten Stellen.

In diesem Forschungsprojekt wurden systematische Untersuchungen an modernen maschinenbautypischen organischen Beschichtungssystemen durchgeführt. Durch Versuche an einseitig beschichteten Prüflingen konnten für die untersuchten Systeme spezifische belastungs- und temperaturabhängige Setzbeträge ermittelt werden. Diese Setzbeträge wurden durch eine Korrelationsbetrachtung mit durchgeführten Relaxationsversuchen an beschichteten Bauteilen vergleichend bewertet.

In Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde ein mehrschichtiger Beschichtungssystemaufbau bestehend aus Grundbeschichtung (GB), Zwischenbeschichtung (ZB) und Deckbeschichtung (DB) auf Bindemittelbasis von Epoxidharz und Polyurethan mit Systembezug zur DIN EN ISO 12944-5, ohne metallische Korrosionsschutzpigmente, verwendet. Dieses Beschichtungssystem soll einen Schutz für die höchste Korrosivitätskategorie C5vh bieten.

Dieses ausgesuchte Korrosionsschutzsystem wird in den Konfigurationen, auch in Zwischenstufen des mehrschichtigen Aufbaus untersucht, um die Vorgaben für niedrigere Korrosionsschutzkategorien abzubilden und den Einfluss der Einzelschichtstärken zu erfassen. Insgesamt ergeben sich somit die vier, in Tabelle 1 aufgeführten, Systemaufbauten.

**Tabelle 1: Übersicht der zu untersuchenden Systemaufbauten**

Einschichtaufbau	Zweischichtaufbau 1	Zweischichtaufbau 2	Dreischichtaufbau
Grundbeschichtung Epoxidharz-Basis	Grundbeschichtung Epoxidharz-Basis	Grundbeschichtung Epoxidharz-Basis	Grundbeschichtung Epoxidharz-Basis
	Zwischenbeschichtung Epoxidharz-Basis	Deckbeschichtung Polyurethan-Basis	Zwischenbeschichtung Epoxidharz-Basis
			Deckbeschichtung Polyurethan-Basis

Um die zahlreichen möglichen Einflussfaktoren auf das Verhalten der Beschichtung isoliert zu untersuchen, werden einseitig lackierte Prüfbleche mit einer Stempelgeometrie in einer entwickelten Vorrichtung der Hochschule Offenburg belastet. Diese Vorrichtungen werden anschließend mit dem verspannten Prüfblech in einem Klimaschrank der Prüftemperatur für 94 h ausgesetzt (100 h-Versuch). Als Prüftemperaturen wurden 23°C als Raumtemperatur, 50°C und 80°C als erhöhte Temperaturen ausgewählt. Zur statistischen Absicherung wurde jede Variation der Versuchsparameter sechsfach untersucht.

Die Stempelgeometrie der Vorrichtung wurde so ausgebildet, dass sie die Kontaktfläche zwischen Bauteil und Unterlegscheibe einer M16-Schraubenverbindung abbildet. Durch die bekannte Stempelfläche und einer im Kraftfluss der Vorrichtung liegenden Kraftmessdose kann die auf die Beschichtung wirkende Ausgangs-Flächenpressung, gezielt gesteuert werden. Da der Fokus auf der Flächenpressung im Kontakt liegt, sind die Ergebnisse bei Vernachlässigung von Randeffekten nicht von der Kontaktfläche abhängig.

Parallel zu den Untersuchungen zum Verhalten einzelner Lackschichten, werden Langzeitversuche an realen Schraubenverbindungen durchgeführt. Die Probenkörper sind hierbei so unterteilt, dass die nominellen Flächenpressungen der Trennfugen den untersuchten Flächenpressungen der Stempelversuche entsprechen. Die zweischnittigen Probekörper werden mit zwei M16 Sensor-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 mit dem Schraubmontageprüfstand an der Hochschule Offenburg streckgrenzengesteuert montiert und der Vorspannkraftverlauf über die Auslagerungsdauer von 1000 h aufgezeichnet.

Zur Bewertung der untersuchten Beschichtungssysteme wurden insgesamt 500 Einzelversuche an Prüfblechen und 124 Bauteilversuche durchgeführt. Durch die Vielzahl an Ergebnissen war es möglich, detailliert die Einflussgrößen auf den Vorspannkraftverlust unter rein statischer Belastung nach der Montage beschichteter Schraubenverbindungen aufzuzeigen.

So konnte gezeigt werden, dass der auf die Verbindung wirkende Temperatureinfluss das Vorspannkraftverhalten maßgeblich bestimmt. Die Höhe der wirkenden Flächenpressung auf die Kontaktfläche ist diesem treibenden Faktor zwar untergeordnet, aber auf keinen Fall zu

vernachlässigen wie bei metallisch blanken Verbindungen. In diesem Zusammenhang ist die hohe Bedeutung der Vernetzungsdichte eines duromeren organischen Beschichtungssystems zu nennen. Nur Systeme mit einer hohen Vernetzungsdichte sind in der Lage der kombinierten Belastung aus erhöhter Temperatur und hoher Flächenpressung standzuhalten. Dies bedingt jedoch auch ausreichend Aushärtezeit des Systems nach dem Beschichtungsvorgang, was aus praktischer Sicht das größte Hindernis zur durchgängigen Beschichtung von Schraubverbindungen sein wird. Durch die mit hoher Vernetzungsdichte ebenfalls einhergehende geringere Duktilität des Beschichtungsstoffes, ist aufgrund der Neigung zum Abplatzen um die Scheibenaufgabe herum, die Trockenschichtstärke einer spröden Beschichtung auf ein geringes Maß zu begrenzen. In dem im Maschinenbau üblichen Anwendungsfall eines zweischichtigen Systemaufbaus aus einer eher spröden Epoxidharz-Grundbeschichtung mit anschließender eher duktilen Polyurethan-Deckbeschichtung muss auch bei ausreichender Trocknungszeit der Beschichtung sichergestellt werden, dass die Anwendungstemperatur nicht auf eine für die Deckbeschichtung unzulässige Höhe ansteigt. Ab wann ein System als „ausreichend ausgehärtet/vernetzt“ anzusehen ist und ob es zu einer weiter fortschreitenden Aushärtung bereits verspannter Beschichtungsflächen kommt, muss in weiterführenden Forschungsprojekten untersucht werden.

Ebenfalls wurden in dem abgeschlossenen Forschungsprojekt die Setzbeträge und Vorspannkraftverluste unter der rein statische wirkenden Schraubenvorspannkraft und konstanter Temperatur ermittelt. Zur Auswirkung maschinenbautypischer dynamischer Belastungen unter erhöhter Temperatur und Temperaturwechsel ist ein Folgeprojekt geplant.

Im Hinblick auf die aktuell gültigen Richtlinien und Normen zeigt sich, dass eine analytische Vorhersage des Vorspannkraftverlustes nach VDI 2230 Blatt 1, durch die Bestimmung lackspezifischer Setzbeträge möglich ist. Hierbei ist jedoch auf die tatsächliche Höhe der örtlich verteilt vorliegenden Flächenpressung auch in innenliegenden Trennfugen zu achten, wozu aktuell keine analytische Berechnungsmethode in der Richtlinie enthalten ist. Bei der Durchführung von experimentellen Untersuchungen, wie sie nach VDI 2230 Blatt 1 insbesondere für „kritischen Verbindungen“ angeraten und unter anderem in der DIN EN 1090-2 Anhang I „Bestimmung der Vorspannkraftverluste bei dicken Oberflächenbeschichtungen“ beschrieben sind, ist dringen die Durchführung bei der maximal möglichen Einsatztemperatur der Verbindung notwendig. Aussagen zum Vorspannkraftverlust aufgrund organischer Beschichtungen durch bei Raumtemperatur durchgeführten Versuchen sind nicht aussagekräftig.