

Vorspannkraftverluste durch Setzen und selbsttätiges Losdrehen planmäßig vorgespannter Schraubenverbindungen

Vom Fachbereich 13 – Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt

zur
Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs

genehmigte
DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Roland Friede

aus Langen (Hessen)

Referent:

Prof. Dr.-Ing. J. Lange

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. P. Schaumann

Tag der Einreichung:

29. Juni 2010

Tag der mündlichen Prüfung:

25. Oktober 2010

Darmstadt 2010

D 17

Inhaltsverzeichnis

	Bezeichnungen	V
1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	HV-Schraubenverbindungen	5
2.1	Überblick zur Forschungsentwicklung von HV-Schrauben	5
2.2	Wirkungsweise von HV-Schraubenverbindungen	6
2.2.1	Scher-Lochleibungsverbindungen	6
2.2.2	Zugbeanspruchte HV-Schraubenverbindungen	7
2.3	Anziehdrehmoment und Vorspannkraft	10
2.4	Montageverfahren	11
2.4.1	Drehmomentenverfahren	11
2.4.2	Drehwinkelverfahren	12
2.4.3	Kombiniertes Verfahren	13
2.5	Reibung	13
2.5.1	Coulombsches Reibungsgesetz	13
2.5.2	Adhäsion	13
2.5.3	Gleitfugen in SL-Verbindungen	14
2.6	Sicherung von Schraubenverbindungen	14
2.7	Setzprozesse in HV-Schraubenverbindungen	15
2.7.1	Der Setzeffekt	15
2.7.2	Stand und Entwicklung der Forschung zum Setzverhalten	16
2.7.3	Sicherungselemente	20
2.7.4	Stand der Normung	21

2.8	Selbsttätiges Losdrehen bei HV-Schraubenverbindungen	23
2.8.1	Effekt des selbsttätigen Losdrehens unter Axialbelastung	23
2.8.2	Effekt des selbsttätigen Losdrehens unter Querbeanspruchung	23
2.8.3	Stand und Entwicklung der Forschung zum selbsttätigen Losdrehen	25
2.8.4	Sicherungselemente	28
2.8.5	Stand der Normung	30
3	Versuche zum Setzverhalten	31
3.1	Versuchsprogramm und Aufbau der Versuche	31
3.1.1	Versuchsprogramm	31
3.1.2	Probekörper	31
3.1.3	Verwendete Beschichtung	32
3.1.4	Messungen	33
3.2	Versuchsdurchführung	34
3.2.1	Durchführung der statischen Setzversuche	34
3.2.2	Durchführung der zyklischen Versuche	34
3.3	Ergebnisse und Interpretation	36
3.3.1	Anziehvorgang	36
3.3.2	Ergebnisse der statischen Setzversuche	37
3.3.3	Ergebnisse der zyklischen Setzversuche	40
3.3.4	Last-Verschiebungsverhalten	41
3.4	Praxisrelevanz statischer Setzverluste	42
3.5	Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf	44
3.5.1	Zusammenfassung	44
3.5.2	Weiterer Forschungsbedarf	46
4	Versuche zum selbsttätigen Losdrehen	47
4.1	Versuchsprogramm und Aufbau der Versuche	47
4.1.1	Versuchsprogramm	47
4.1.2	Probekörper	48
4.1.3	Messungen	49
4.2	Versuchsdurchführung	51
4.2.1	Ermittlung der Last-Verformungskurve	51
4.2.2	Zyklisch querbeanspruchte Versuche – allgemein	51
4.2.3	Zyklisch querbeanspruchte Versuche mit Zugeinfluss	53
4.2.4	Zyklische Zugversuche	53

4.2.5	Vergleich des verwendeten Versuchsaufbaus mit dem Junker Prüfstand	54
4.3	Ergebnisse und Interpretation	54
4.3.1	Einfluss der Klemmlänge auf das selbsttätige Losdrehen	55
4.3.2	Einfluss einer Beschichtung auf das selbsttätige Losdrehen	56
4.3.3	Einfluss äußerer Zugkräfte auf das selbsttätige Losdrehen	57
4.3.4	Zyklischer Zugversuch	58
4.3.5	Einfluss des Verschiebeweges auf das selbsttätige Losdrehen	59
4.3.6	Einfluss von Sicherungselementen auf das selbsttätige Losdrehen	60
4.3.7	Weitere Ergebnisse	61
4.3.8	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Parameter	62
4.3.9	Last-Verformungskurven	62
4.3.10	Vorspannkraft nach dem Anziehen	62
4.3.11	Entwicklung der Vorspannkraft	65
4.3.12	Bewegungen in den Gleitfugen	66
4.3.13	Verdrehungsmessung	67
4.4	Setzen und selbsttätiges Losdrehen	67
4.4.1	Setzverluste	68
4.4.2	Grenzgleitung	69
4.5	Praxisrelevanz des selbsttätigen Losdrehens	71
4.6	Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf	71
4.6.1	Zusammenfassung	71
4.6.2	Weiterer Forschungsbedarf	73
5	Auswirkungen von Vorspannkraftverlusten in Schraubenverbindungen	75
5.1	Auswirkungen von Vorspannkraftverlusten auf die Steifigkeit	76
5.1.1	Steifigkeit von GV-Verbindungen	76
5.1.2	Steifigkeit von Stirnplattenverbindungen	76
5.2	Auswirkungen von Vorspannkraftverlusten bei Ermüdungsbeanspruchung	78
5.3	Auswirkungen von Vorspannkraftverlusten auf die Dauerhaftigkeit	78
5.4	Umgang mit Setzverlusten in der Norm	79

6	Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf	81
6.1	Zusammenfassung	81
6.2	Regeln zum Umgang mit Vorspannkraftverlusten	84
6.2.1	Größe akzeptabler Vorspannkraftverluste	84
6.2.2	Regelungen für die Berücksichtigung von Setzeffekten	84
6.2.3	Regelungen für die Berücksichtigung von selbsttätigem Losdrehen	85
6.2.4	Umgang mit Schadensfällen aufgrund von Vorspannkraftverlusten	85
6.3	Weiterer Forschungsbedarf	86
7	Verzeichnisse	89
7.1	Literaturverzeichnis	89
7.1.1	Veröffentlichungen	89
7.1.2	Normen und Richtlinien	94
7.2	Tabellenverzeichnis	98
7.3	Abbildungsverzeichnis	98
	Anhang A – Versuche zum Setzen	101
	Anhang B – Versuche zum Losdrehen	105
	Anhang C – Steifigkeitsermittlung	109