



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Alvaro David Basilius Trick

# **Schiffstaugliche Konzeption der Messung und Überwachung von relevanten Kräften in einer Schraubenverbindung mittels sensorintegrierender Maschinenelemente**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

Alvaro David Basilius Trick

# **Schiffstaugliche Konzeption der Messung und Überwachung von relevanten Kräften in einer Schraubenverbindung mittels sensorintegrierender Maschinenelemente**

**Bachelorarbeit** eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang **Maschinenbau Entwicklung und Konstruktion** (dual, ausb.-int. PSO  
2012)

am Department **Maschinenbau und Produktion**

der Fakultät **Technik und Informatik**

der **Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg** (HAW Hamburg)

in Zusammenarbeit mit:

Firma

Blohm + Voss B. V. & Co. KG

Abteilung

ZKHM

Adresse – Straße

Hermann-Blohm-Straße 3

Adresse – Stadt

20457 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Benjamin Kloss-Grote

Zweitprüfer : Dipl. Ing. (FH) Ralph Berg

Abgabedatum: 07.03.2024

Matrikelnummer: XXXXXXXXXX

---

## **Kurzfassung**

Diese Bachelorarbeit behandelt die Messung und Überwachung von relevanten Kräften in einer Schraubenverbindung. Das Ziel liegt in der Konzeption eines Messaufbaus. Dieser soll sogenannte „sensorintegrierende Maschinenelemente“ zur Messung und Überwachung von den in einer Schraubenverbindung auftretenden relevanten Kräften verwenden. Darüber hinaus soll die Konzeption des Messaufbaus den Einsatz an Bord eines Schiffes ermöglichen. Dies erfordert zunächst die Analyse von Schraubenverbindungen inklusive der wirkenden Kräfte, sowie baulich bedingter Probleme. Ein möglicher Einsatzort an Bord eines Schiffes wird mit Hilfe einer Anforderungs- und Nutzenanalyse ausgewählt.

Stichworte:

Schraube, Schraubenverbindung, Maschinenelemente, Marineschiff, Kraftmessung

## **Abstract**

This bachelor's thesis addresses measuring and monitoring relevant forces in a bolted joint. The objective is to conceptualize a measurement setup that utilizes "sensor-integrated machine elements" to measure and monitor the relevant forces occurring in a bolted connection. Furthermore, the design of the measurement setup should enable its use on board a ship.

This initially requires the analysis of bolted joints, including the forces at play and structurally related problems. A potential location for deployment on board a ship is selected through a requirements and benefits analysis.

Keywords:

Bolt, bolted joint, machine elements, naval vessel, force measurement

---

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	X
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
Symbol- und Formelzeichenverzeichnis .....	XII
1. Einleitung.....	1
1.1. Motivation.....	1
1.2. Inhalt der Arbeit.....	2
1.3. Zielsetzung.....	2
2. Schraubenverbindungen – Analyse.....	3
2.1. Normung von Schrauben .....	3
2.1.1. Herstellung.....	3
2.1.2. Werkstoffe und Festigkeiten.....	3
2.2. Verspannungszustände und Kraftverhältnisse .....	4
2.2.1. Auftretende Kräfte in vorgespannten und belasteten SV .....	5
2.2.2. Montagebeanspruchung .....	6
2.2.3. Betriebsbeanspruchung .....	7
2.3. Varianz der geometrischen und rheologischen Parameter.....	8
2.4. Montage der Schraubenverbindung .....	9
2.4.1. Auslegung der Schraubenverbindung .....	9
2.4.2. Anziehen von Schraubenverbindungen .....	10
2.4.3. Streuungen beim Anziehen von Schraubenverbindungen .....	14
2.5. Vorspannkraftänderungen.....	16
2.5.1. Vorspannkraftverluste durch Setzen .....	17
2.5.2. Vorspannkraftverluste durch Kriechen und Relaxation .....	18
2.5.3. Temperaturabhängige Vorspannkraftänderung.....	18

---

2.5.4.	Vorspannkraftänderung durch selbsttätiges Losdrehen .....	20
3.	Kraftmessung und -überwachung in SV .....	21
3.1.	Messbare Kräfte in SV .....	21
3.2.	Messverfahren und ihre Vor-/Nachteile .....	22
3.2.1.	Messen im Kraftnebenfluss .....	23
3.2.2.	Messen im Kraftfluss .....	25
3.3.	Sensorintegrierende Maschinenelemente (SiMe).....	35
3.4.	Anforderungen an die SiMe für schiffstaugliche Anwendungen .....	35
3.5.	SiMe-Produktvorstellung .....	36
3.5.1.	DiaForce®-System.....	36
3.5.2.	SmartBolt® .....	37
3.5.3.	InterBolt™ .....	39
3.5.4.	TensionDisc .....	41
3.6.	Gegenüberstellung .....	42
4.	Situations- und Problemanalyse – SV an Bord von Marineschiffen.....	44
4.1.	SV mit hohem Risiko für Funktionsverlust.....	44
4.2.	Nutzenanalyse – Einbau von SiMe.....	44
4.3.	Auswahl und Analyse geeigneter Schraubenverbindungen .....	45
5.	Konzeption von Messung und Überwachung der Schraubenkraft.....	56
5.1.	Verwendung von SiMe .....	56
5.2.	Auswahl des Anziehverfahrens .....	56
6.	Aufbau eines Messaufbaus .....	57
6.1.	Messung an Bord .....	57
6.2.	Messung auf einem Prüfstand.....	57
6.2.1.	Dynamische Erweiterung mit simulierten Schwingungseinflüssen .....	58
6.2.2.	Erweiterung mit Möglichkeit des Heat-Cyclings .....	58
7.	Verarbeitung und Verwendung Versuchsergebnisse .....	59

---

---

7.1.	Gemessene Vorspannkraft während der Montage der Schraubenverbindung	59
7.2.	Kontinuierliche Schraubenkraftmessung .....	59
8.	Fazit.....	60
9.	Ausblick: Einbindung in schiffsinterne Überwachungssysteme .....	60
	Quellenverzeichnis .....	61
	Literaturquellen .....	61
	Abbildungsquellen.....	64
	Anhang .....	IX
	Anhang A1 – Anforderungsliste .....	IX
	Anhang B1 – Schraubenberechnung .....	X
	Anhang C1 – Materialdaten Schraubenwerkstoff.....	XI
	Anhang D1 – E-Mailverkehr mit Klawon, S. ....	XII
	Anhang D2 – E-Mailverkehr mit Westphal, T. ....	XV
	Anhang D3 – E-Mailverkehr mit Interbolt .....	XVIII
	Anhang D4 – E-Mailverkehr mit SmartBolt.....	XX
	Anhang E1 – Übersicht und Preisliste SmartBolt (Ausschnitt) .....	XXII
	Anhang F1 – Produktdatenblätter .....	XXIV
	Eigenständigkeitserklärung.....	XXVIII

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Überführung einer zentrisch verspannten Verbindung in das Federmodell [VDI 2230, 2015].....	4
Abbildung 2 - Verspannungsschaubild für den Montagezustand [VDI 2230, 2015]....	5
Abbildung 3 - Schematische Darstellung des verspannten Bereiches in einer Durchsteckverbindung [Wittel, H., 2019].....	5
Abbildung 4 - Verspannungsschaubild für verschiedene Betriebszustände zentrisch verspannter und zentrisch belasteter SV [VDI 2230, 2015] .....	6
Abbildung 5 - Streuung des Anziehdrehmoments [Kloss-Grote, B.] .....	8
Abbildung 6 - Aufteilung des Anziehdrehmoments in Abhängigkeit der Reibungszahl [Schaumann, P.; Rutkowski, T.].....	8
Abbildung 7 - Drehmoment- / Drehwinkel-Verlauf beim streckgrenzengesteuerten Anziehen [Schaumann, P.; Rutkowski, T.].....	12
Abbildung 8 - Hydraulischer Spannzylinder [Schaumann, P.; Rutkowski, T.] .....	13
Abbildung 9 - Zusammenhang zwischen Anziehungsfaktor und Streuung der Montagevorspannkraft [VDI 2230, 2015] .....	14
Abbildung 10 - Einfluss des Anziehverfahrens auf die Streuung und damit auf den erforderlichen Schraubendurchmesser bei FKL 12.9 [VDI 2230, 2015].....	15
Abbildung 11 - Schädigungsmechanismen bei montierten SV im Betrieb [Dümpelmann, C.].....	16
Abbildung 12 - Vorspannkraftminderung einer SV aufgrund einer Verformung um den Setzbetrag [VDI 2230, 2015] .....	17
Abbildung 13 - Auswirkung des Wärmeausdehnungskoeffizienten auf die Vorspannkraft; V.l.n.r.: Vorspannkraft ändert sich nicht; Vorspannkraft verkleinert sich; Vorspannkraft erhöht sich [Schweizer, A.].....	19
Abbildung 14 - Die Wirkung der Betriebstemperatur auf das Verspannungsdreieck: E-Moduli (a); Wärmeausdehnung (b) [Gerstmayr, G.; et. al.].....	19
Abbildung 15 - Übersicht über Messverfahren zur Messung von Kräften in SV .....	22
Abbildung 16 - Verknüpfung eines Messkörpers mit DMS und der Verschaltung in einer Wheatstone-Brücke zur Erzeugung einer Ausgangsspannung [Baumer GmbH].....	23
Abbildung 17 - Kraftmessung im Kraftnebenfluss [Baumer GmbH] .....	24
Abbildung 18 - Kalibrierung von Dehnungssensoren [Baumer GmbH].....	24
Abbildung 19 - Kraftmessung nach dem piezoelektrischen Prinzip [Kistler Group] ..	25
Abbildung 20 - Drift von PE Sensoren [Kistler Group] .....	26

---

Abbildung 21 – Kraftmessring [Hottinger Brüel & Kjaer GmbH].....	26
Abbildung 22 - Schematische Darstellung des Dünnschichtsystems [Fraunhofer Institut].....	27
Abbildung 23 - Beschichtungsschritte des Schichtsystems [Von Daacke, S.; Overmeyer, L.].....	27
Abbildung 24 - Einseitige mechanische Längenmessung [Schaumann, P.; Rutkowski, T.].....	28
Abbildung 25 - Messmethode der Vorspannkraft beim Reflexionsverfahren [Gerstmayr, G.; et. al.].....	29
Abbildung 26 - Einfluss der Spannung auf die Schallgeschwindigkeit (a); Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit (b) [Gerstmayr, G.; et. al.].....	30
Abbildung 27 - Mögliche Applikation von DMS an Schrauben; links: Innenapplikation mit Zentralbohrung; rechts: Außenapplikation mit Zentral- und Querbohrung [Dümpelmann, C.].....	31
Abbildung 28 - DMS-Schraube M36 HV zur Messung von Schraubkraft, Biege- und Torsionsmoment [Schaumann, P.; Rutkowski, T.].....	31
Abbildung 29 - Schematische Darstellung einer Schraube mit DMS in Zylinderform eingesetzt [AMA Digital Networks GmbH; ZSE Electronic Mess-Systeme & Sensortechnik GmbH].....	32
Abbildung 30 - Schematischer Aufbau der Sensorise SmartScrew [Sensorise GmbH] .....	32
Abbildung 31 - Platzierung des IP-Steckers in der Sensorise SmartScrew [Sensorise GmbH] .....	33
Abbildung 32 - Draufsicht auf eine Messeinrichtung mit einem applizierten linearen DMS [Chorzewski, D.; Hofmann, S.].....	34
Abbildung 33 - Querschnitt durch die SmartBolt® [Industrial Indicators] .....	37
Abbildung 34 - Farbanzeige für die Vorspannkraft [Industrial Indicators] .....	37
Abbildung 35 - Inkremente der SmartBolt® Farbanzeige [Industrial Indicators] .....	38
Abbildung 36 - Sensor-Einheit des InterBolt™ Systems [Secure Bolting Systems Ltd.] .....	39
Abbildung 37 - Aufbau des Interbolt Sensors [Sedwell Ltd.].....	39
Abbildung 38 - Netzwerkaufbau InterBolt™ [Secure Bolting Systems Ltd.].....	40
Abbildung 39 - TensionDisc Kraftmessring und Lesegerät [Secure Bolting Systems Ltd.] .....	41

---

---

Abbildung 40 - Kurzstrecken-Übertragung von Messdaten des TensionDisc-Systems mittels Infrarottechnik [Secure Bolting Systems Ltd.].....	41
Abbildung 41 - Tabelle der Flanschverbindungen [Anhang D2].....	46
Abbildung 42 - Draufsicht auf einen Flansch mit Dichtnut [Anhang D1] .....	47
Abbildung 43 - Übersicht über SV [VDI 2230, 2015].....	47
Abbildung 44 - Isolierter Abgasstrang [Anhang D1].....	48
Abbildung 45 - Verschraubung EDiMot-Rahmen [Anhang D2].....	49
Abbildung 46 - Technische Zeichnung Verschraubung EDiMot [Zeichnung NVL B. V. & Co. KG] .....	50
Abbildung 47 - Verspannungsschaubild Befestigung EDiMot-Rahmen .....	51
Abbildung 48 - Expansionshülse Maße [Zeichnung NVL B. V. & Co. KG].....	52
Abbildung 49 - Beispielhafte Unterteilung der Schraube in Bereiche zur Nachgiebigkeits-Berechnung [examio GmbH] .....	52

---

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 - Abkürzungsverzeichnis .....	XI
Tabelle 2 - Symbol- und Formelzeichenverzeichnis .....	XVI
Tabelle 3 - Übersicht über ausgewählte SiMe-Produkte.....	43
Tabelle 4 - Quellen der Abbildungen .....	68

---

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung/Bedeutung/Erklärung
Abb.	Abbildung
DIN	(Norm des) Deutschen Instituts für Normung
DMS	Dehnungsmessstreifen
DNV	Det Norske Veritas (Klassifikationsgesellschaft im Schiffbau)
EDiMot	Diesel-Motor, zur Stromerzeugung verwendet
FE	Finite Elemente
IST	Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik
KFZ	Kraftfahrzeug
LED	light-emitting diode
PE	Piezoelektrisch
PES	Piezoelektrische Sensoren
SiMe	Sensorintegrierende Maschinenelemente
SiO <sub>2</sub>	Siliciumdioxid
SV	Schraubenverbindung
TAzV	Technische Anlage zum Vertrag

Tabelle 1 - Abkürzungsverzeichnis

## Symbol- und Formelzeichenverzeichnis

Symbol oder Formelzeichen	Bezeichnung/Bedeutung/Erklärung
%	Prozent
€	Euro
°C	Grad Celsius
A	Fläche
$A_0$	zutreffende kleinste Querschnittsfläche der Schraube
$\alpha_A$	Montageunsicherheitswert/Anziehungsfaktor
$A_{d3}$	Fläche bei Kerndurchmesser
$A_{ers}$	Ersatzquerschnitt
$A_H$	Querschnittsfläche der Hülse
$A_N$	Fläche bei Nenndurchmesser
$\alpha_P$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient der Platten
$\alpha_S$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient der Schraube
$A_{ss}$	Fläche Schraubenschaft
c	Steifigkeit
d	Nenndurchmesser Schraube
$d_3$	Kerndurchmesser Schraube
$\Delta F_V$	Vorspannkraftänderung
$\Delta F_{Vth}$	Änderung der Vorspannkraft infolge einer Temperatur ungleich der Raumtemperatur, thermische Zusatzkraft

<b>Symbol oder Formelzeichen</b>	<b>Bezeichnung/Bedeutung/Erklärung</b>
$\delta_G$	Nachgiebigkeit eingeschraubter Gewindeteil
$\delta_{GM}$	Nachgiebigkeit Gewindeteil der Schraube
$\delta_H$	Nachgiebigkeit der Hülse
$d_h$	Durchmesser Durchgangsloch
$\delta_K$	Nachgiebigkeit Schraubenkopf
$\delta_M$	Nachgiebigkeit der Mutter
$\delta_P$	elastische Nachgiebigkeit der verspannten Teile
$\delta_S$	elastische Nachgiebigkeit der Schraube
$\delta_{SH}$	Nachgiebigkeit Schraube und Hülse
$\delta_{SS}$	Nachgiebigkeit Schraubenschaft
$\Delta_T$	Temperaturdifferenz
$d_w$	Außendurchmesser der ebenen Kopfauflage
$E$	E-Modul
$F_A$	Axialkraft
$F_{A \max.}$	Maximale Axialkraft
$F_B$	beliebig gerichtete Betriebskraft an einer Verbindung
$F_K$	Klemmkraft
$F_{K \text{ erf.}}$	Berechnung der erforderlichen Klemmkraft
$F_{KA}$	Klemmkraft zum Verhindern des Aufklaffens

Symbol oder Formelzeichen	Bezeichnung/Bedeutung/Erklärung
$F_{KP}$	Klemmkraft zum Abdichten gegen ein Medium
$F_{KQ}$	Klemmkraft zur Übertragung einer Querkraft
$F_M$	Montagevorspannkraft
$F_{M\ min}$	Berechnung der Mindestmontagevorspannkraft
$F_{M\ zul}$	Zulässige Montagevorspannkraft
$F_{PA}$	Anteil der Axialkraft, der die Belastung der verspannten Teile verändert, Plattenzusatzkraft
$F_Q$	Querkraft
$F_{RV}$	Rückfederungsverlust
$F_S$	Schraubenkraft
$F_{SA}$	axiale Schraubenzusatzkraft
$F_{V\ min.}$	Mindestvorspannkraft
$F_V = F_{M\ min} - F_Z$	Vorspannkraft nach Setzen
$F_{VM}$	Montagevorspannkraft bei hydraulischem reibungs- und torsionsfreien Anziehen
$F_{VRT}$	Vorspannkraft bei Raumtemperatur
$F_{VT}$	Vorspannkraft bei Betriebstemperatur
$f_z$	plastische Verformung durch Setzen, Setzbetrag
$F_Z$	Vorspannkraftverlust infolge Setzens im Betrieb
$g$	Erdbeschleunigung

Symbol oder Formelzeichen	Bezeichnung/Bedeutung/Erklärung
km	Kilometer
kN	Kilonewton
kW	Kilowatt
$l_G$	Länge eingeschraubter Gewindeteil
$l_H$	Länge der Hülse
$l_k$	Klemmlängenverhältnis
$l_k$	Länge Schraubenkopf
$l_M$	Länge Mutter
$l_s$	Längung der Schraube
$l_{ss}$	Länge Schraubenschaft
M	Kennzeichnung eines metrischen Gewindes
m	Meter
$M_A$	Anziehdrehmoment bei der Montage zum Vorspannen einer Schraube auf $F_M$
$M_G$	im Gewinde wirkender Teil des Anziehdrehmoments (Gewindemoment)
$M_{GR}$	Im Gewinde wirkendes Reibungsmoment
$M_{Gst}$	Nutzmoment
$M_k$	Reibungsmoment in der Kopf- oder Mutterauflage, Kopfreibmoment
mm	Millimeter
$M_{sb}$	Zusatzbiegemoment, auf die Schraube wirkend
$M_y$	Drehmoment um Schraubenachse

Symbol oder Formelzeichen	Bezeichnung/Bedeutung/Erklärung
$\nu$	Ausnutzungsgrad der Streckgrenzenspannung (Grenze der Vollplastifizierung des gefährdeten Querschnitts) beim Anziehen
N	Newton
Nm	Newtonmeter
$\varnothing$	Durchmesser
$R_{eL}$	Untere Streckgrenze
$R_{eL}/R_m$	Streckgrenzenverhältnis
$R_m$	Mindestzugfestigkeit
$R_{p0,2 \min}$	0,2% Dehngrenze der Schraube nach DIN EN ISO 898-1
s	Schlüsselweitendurchmesser
$\sigma_M$	Zugspannung in der Schraube in Folge von $F_M$
$\sigma_{M \text{ zul}}$	Zulässige Zugspannung in Folge von $F_M$
$\sigma_{\text{red}}$	Von Mises Vergleichsspannung/GEH
$\sigma_{\text{red}}$	reduzierte Spannung, Vergleichsspannung
$\sigma_{\text{red},M}$	Vergleichsspannung im Montagezustand
$\sigma_Z$	Zugspannung in der Schraube im Betriebszustand
$\tau_M$	Torsionsspannung im Gewinde im Montagezustand
W	Watt

Tabelle 2 - Symbol- und Formelzeichenverzeichnis

# 1. Einleitung

## 1.1. Motivation

Schraubenverbindungen sind an Bord von Marineschiffen in hoher Anzahl vorhanden und erfüllen diverse Zwecke. Viele verbaute Baugruppen und Komponenten sind auf die Zuverlässigkeit der Funktion dieser Verbindungen angewiesen. Hierbei kann es sich beispielsweise um die Befestigung von Schaltschränken an dem jeweiligen Fundament, aber auch das Sicherstellen der Dichtwirkung an Flanschverbindungen handeln.

Diese Verbindungen sind besonderen Bedingungen ausgesetzt, da stetig Vibrationen und gegebenenfalls Schockeinflüsse, sowie Temperaturänderung auf sie einwirken. Diese können die sichere Funktion einer Schraubenverbindung wesentlich beeinflussen.

Die fachgerechte Montage spielt in der Gewährleistung der Funktion eine prägnante Rolle. Diese wird allerdings oftmals ungenügend genau durchgeführt. Hierbei ist anzumerken, dass auch Herstellerangaben zu beispielsweise dem Anzugsdrehmoment eine gewisse Ungenauigkeit mit sich bringen.

Daraus haben sich auf Seite der in die Fertigung involvierten Instanzen der NVL, zu der auch Blohm + Voss gehört, die Frage nach einer Kontrolle der fachgerechten Montage, sowie gegebenenfalls einer fortwährenden Überwachung der für die Funktionserfüllung relevanten Kräfte der Schraubenverbindungen ergeben.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, einen Messaufbau zu konzipieren, um das Auftreten von Fehlern in Schraubenverbindungen an Bord vorzubeugen. Hierfür soll die Montage weitgehender als mit einem schlichten Drehmomentschlüssel kontrolliert werden und die Möglichkeit zur fortwährenden Messung der relevanten Kräfte geschaffen werden.

## **1.2. Inhalt der Arbeit**

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird zunächst eine allgemeine Analyse von Schraubenverbindungen durchgeführt. Hierbei liegt der Fokus zunächst auf Verspannungszuständen und Kraftverhältnissen. Dies dient dem Verständnis, welche Kräfte für eine Kontrolle von Schraubenverbindungen zu messen sind.

Eine detailliertere Analyse von Schrauben und Schraubenverbindungen zielt darauf ab, zu verstehen, welche Parameter und Umweltbedingungen Einfluss auf Schraubenverbindungen sowohl bei der Montage als auch im Betriebszustand haben.

Im Anschluss wird eine Literaturrecherche zu sensorintegrierenden Maschinenelementen mit dem Fokus auf eine Anwendung in Schraubenverbindungen durchgeführt. Ziel dessen ist es, den derzeitigen Stand der Technik zu ermitteln, um eine Basis für den später zu konzipierenden Messaufbau zu erhalten.

Auf Basis solcher Umweltbedingungen mit Fokus auf den Einsatzort in einem Marineschiff wird mittels einer Anforderungs- und Nutzenanalyse eine Auswahl an Schraubenverbindungen getroffen, für welche das Überwachungskonzept am ehesten angewendet werden sollte.

Zu guter Letzt folgt die Konzeption eines Messaufbaus, mit welchem die Messung und Überwachung zunächst auf einem Prüfstand umsetzbar ist.

Im weiteren Ausblick werden mögliche Iterationen, bis hin zum möglichen Einsatz mit gegebenenfalls Integration in die schiffsinternen Überwachungssysteme, erläutert.

## **1.3. Zielsetzung**

Ziel der Bachelorarbeit ist es, Verständnis über Varianzen in Schrauben und die Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf Schraubenverbindungen zu erlangen. Weiterführendes Ziel ist, auf Basis dieser Kenntnisse und der Recherche zu sensorintegrierenden Maschinenelementen einen Messaufbau zu konzipieren, der als Basis für weitere Verbesserungen und in Zukunft für den Gewinn von empirischen Daten zu Schrauben und Schraubenverbindungen dienen kann.

## 2. Schraubenverbindungen – Analyse

### 2.1. Normung von Schrauben

#### 2.1.1. Herstellung

Kalt geformte, gerollte Gewinde haben eine höhere Dauerhaltbarkeit, glattere Oberfläche und wirtschaftlichere Fertigung gegenüber geschnittenen Gewinden.

Die Toleranzen für die Abmessungen der Bolzen- und Muttergewinde sind nach DIN 13 T14 und T15 (abgestimmt mit ISO 965/1) gegeben.

Schrauben und Muttern werden nach drei Toleranzklassen eingeteilt:

- Fein für Präzisionsgewinde
- Mittel für allgemeine Verwendung
- Grob für Gewinde ohne besondere Anforderungen

Den Toleranzklassen sind in Abhängigkeit von Einschraubgruppen bestimmte Toleranzqualitäten und -lagen zugeordnet, wobei auch etwaige galvanische Schutzschichten berücksichtigt sind

#### 2.1.2. Werkstoffe und Festigkeiten

Die Mindestanforderungen an Güte, Prüfung und Abnahme der Schrauben und Muttern sind in den technischen Lieferbedingungen nach DIN 27 T1 bis T28 festgelegt. Diese beziehen sich auf die fertigen Teile ohne Rücksicht auf Herstellungsverfahren und Aussehen.

##### 1. Ausführung

Gekennzeichnet durch die Produktklassen A (mittel), B (mittelgrob) und C (grob), wodurch maximale Rautiefen der Oberflächen, zulässige Toleranzen sowie Mittigkeit und Winkligkeit festgelegt sind.

##### 2. Festigkeitsklasse nach DIN 898-1

Für Schrauben und Muttern aus Stahl bis 39 mm Gewindedurchmesser gekennzeichnet mit zwei mit einem Punkt getrennten Zahlen. Die erste Zahl (Festigkeitskennzahl) gibt 1/100 der Mindestzugfestigkeit  $R_m$  in  $N/mm^2$ , die zweite das 10-fache des Streckgrenzenverhältnisses  $R_{eL}/R_m$  an. [Wittel, H., 2019]

## 2.2. Verspannungszustände und Kraftverhältnisse

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird nicht die grundlegende Berechnung von Schraubenverbindungen (SV) behandelt. Es werden zur Ausarbeitung des Mess- und Prüfkonzeptes nötige Zusammenhänge und Definitionen erläutert.

Es werden hierbei ausschließlich vorgespannte Schraubenverbindungen analysiert. Dies sind Schraubenverbindungen, die vor dem Angreifen einer Betriebskraft  $F_B$  durch eine Montagevorspannkraft  $F_M$  belastet sind. Diese Vorspannung entsteht durch das Festdrehen der Schraube oder Mutter. [Wittel, H., 2019]

Als primäres Leitwerk gilt hierbei die Richtlinie 2230 des „Verein Deutscher Ingenieure“: VDI 2230 Bl. 1 – „Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen“. Folgend als „VDI 2230“ bezeichnet. Aus dieser Richtlinie wird ebenfalls das mechanische Modell übernommen. Die Schraube und verspannten Teile werden als Zug- bzw. Druckfeder mit den elastischen Nachgiebigkeiten  $\delta_s$  und  $\delta_p$  betrachtet (Abb. 1). [VDI 2230, 2015]

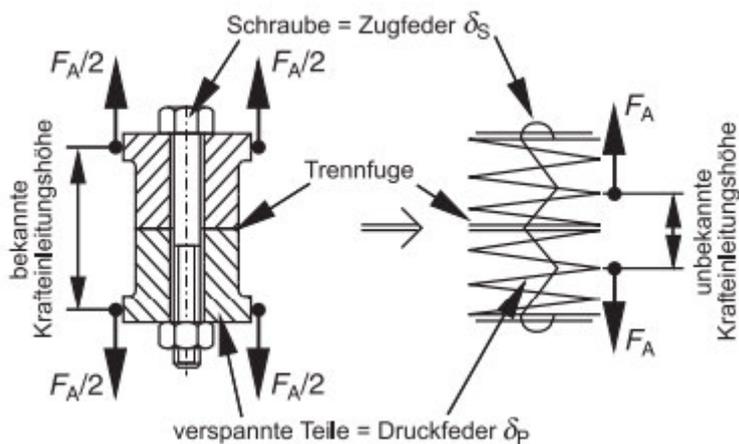


Abbildung 1 - Überführung einer zentrisch verspannten Verbindung in das Federmodell [VDI 2230, 2015]

### 2.2.1. Auftretende Kräfte in vorgespannten und belasteten SV

Zur Darstellung der sich einstellenden Kräfte und Verschiebungen in der SV führt die VDI 2230 das sogenannte „Verspannungsschaubild“ ein. Dieses Kraft-Weg-Diagramm zeigt die Verformungskennlinien der Schraube und der verspannten Teile, zum Teil auch „Platten“ genannt. Hierbei wird die Plattenkennlinie gespiegelt und verschoben, um einen Schnittpunkt mit der Schraubenkennlinie zu erzeugen (Abb. 2). [Wittel, H., 2019; VDI 2230, S. 22, 2015]

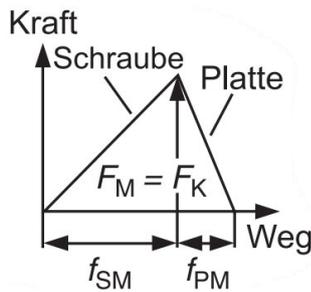


Abbildung 2 - Verspannungsschaubild für den Montagezustand [VDI 2230, 2015]

Die in einer belasteten SV auftretenden Kräfte lassen sich in drei wesentliche Kräfte unterscheiden, die zum Teil weiter aufgeteilt werden können.

Zunächst entsteht bei der Montage der Verbindung eine Montagevorspannkraft  $F_M$ . Diese erzeugt in der Trennfuge eine Klemmkraft  $F_K$ . Ohne jegliche Belastung und vereinfacht dargestellt, lässt sich in diesem Fall  $F_M$  zu  $F_K$  gleichsetzen (Abb. 2).

Unter der Annahme, dass eine auf die Schraube wirkende axiale Betriebskraft  $F_B$  über die verspannten Teile eingeleitet wird, folgt die anteilige Übertragung dieser über den verspannten Bereich der Trennfuge und über die Schraube (Abb. 3).

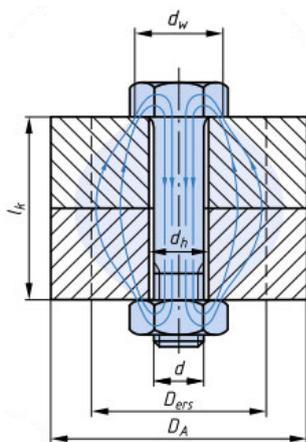


Abbildung 3 - Schematische Darstellung des verspannten Bereiches in einer Durchsteckverbindung [Wittel, H., 2019]

Somit folgt zusätzlich zur Montagevorspannkraft eine Belastung der Schraube durch den belastenden Anteil der Betriebskraft. Diesen Anteil nennt man Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ . Der verbleibende Anteil  $F_{PA}$  (Plattenzusatzkraft) entlastet die verspannten Teile. Hierbei ist zu vermerken, dass dieses Aufteilungsverhältnis maßgeblich vom Wirkungsort der Betriebskraft und dem elastischen Verhalten der Verbindungselemente abhängig ist (Abb. 4). [VDI 2230, 2015]

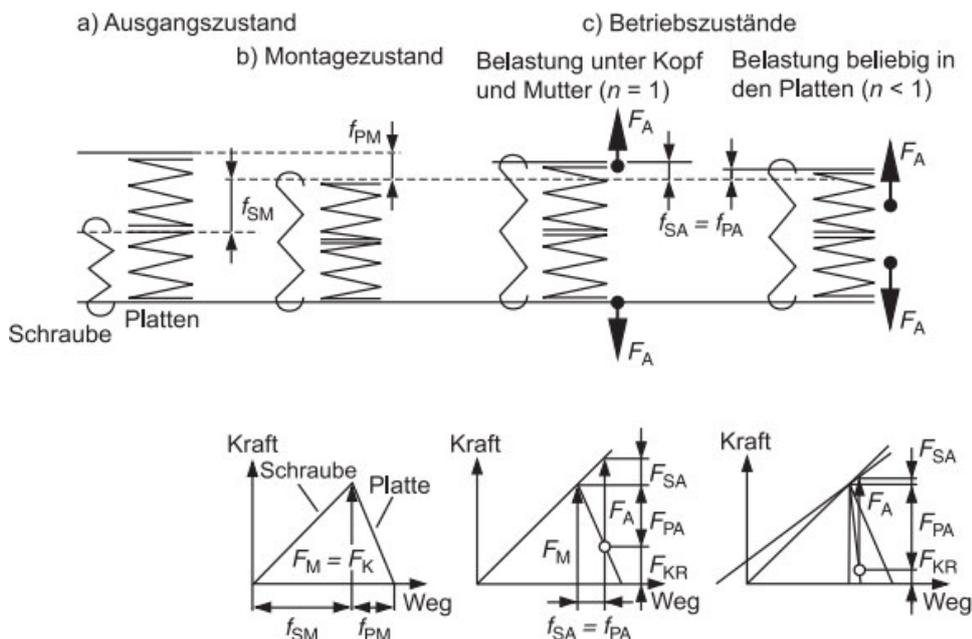


Abbildung 4 - Verspannungsschaubild für verschiedene Betriebszustände zentrisch verspannter und zentrisch belasteter SV [VDI 2230, 2015]

### 2.2.2. Montagebeanspruchung

Zumeist geht das Aufbringen der Vorspannkraft mit einem Drehen der Schraube relativ zum Innengewinde einher. In Folge dessen wird nicht nur eine Zugspannung  $\sigma_M$  durch die Vorspannkraft sondern auch eine Torsionsspannung  $\tau_M$  aufgrund des Gewindemoments  $M_G$  erzeugt. Die maximal mögliche Vorspannkraft einer Schraube entspricht der Kraft, die zum Erreichen der Streckgrenze notwendig ist. Diese wird durch die aufgebrachten Zug- und Torsionsspannungen beeinflusst.

Zur Berechnung dieser Kraft muss der mehrachsige Verspannungszustand auf einen äquivalenten einachsigen Verspannungszustand reduziert werden. Zur Berechnung dieser Vergleichsspannung  $\sigma_{red}$  wird die Gestaltänderungsenergiehypothese verwendet.

$$\sigma_{red} = \sigma_{red,M} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3\tau_M^2} \quad (2.1)$$

Durch Einsetzen der entsprechenden Parameter und der kleinsten Querschnittsfläche der Schraube  $A_0$ , sowie dem Ausnutzungsgrad der Streckgrenzenspannung  $\nu$  ergibt sich die zulässige Montagevorspannkraft  $F_{M\ zul}$  zu:

$$F_{M\ zul} = \sigma_{M\ zul} \cdot A_0 \cdot \nu \quad (2.2)$$

Hierbei ist  $A_0$  die kleinste zutreffende Querschnittsfläche der Schraube und  $\nu$  der Ausnutzungsgrad ( $\leq 1$ ) der Mindeststreckgrenze  $R_{p0,2\ min}$  der Schraube (nach DIN EN ISO 898-1) durch die Vergleichsspannung im Montagezustand.

Es ist anzumerken, dass bei Anziehverfahren ohne Torsionsbeanspruchung die Berücksichtigung dieser in der Berechnung der Vergleichsspannung entfällt.

Bei herkömmlichen drehmomentgesteuerten Anziehverfahren wird nur eine anteilige Ausnutzung von üblicherweise 90% zugelassen. Dies dient der Vermeidung einer Überschreitung der Streckgrenze im Betriebsfall.

Zur Festlegung der zulässigen Montagevorspannkraft sind unter anderem die Grenzflächenpressung (an den Auflageflächen), thermische Belastungen und Nachgiebigkeiten zu Berücksichtigen. [VDI 2230, 2015]

### 2.2.3. Betriebsbeanspruchung

Die Zugspannung  $\sigma_Z$  als Resultat der axialen Belastung im Betrieb lässt sich in der Regel in die zulässige Montagevorspannkraft  $F_{M\ zul}$ , die Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , das Zusatzbiegemoment  $M_{Sb}$  und die – bei temperaturbeanspruchten Verbindungen vorhandene – thermische Zusatzkraft  $\Delta F_{Vth}$  einteilen. Im Idealfall sind Biegemomente vernachlässigbar.

Diese führen (im Vergleich zum Montagezustand) zu einer erhöhten Beanspruchung. Hierbei ist sicherzustellen, dass die zusätzliche Beanspruchung der Schraube nicht zu einer plastischen Verformung der Schraube führt, aus der eine Vorspannkraftverlust resultiert, bzw. dass der Vorspannkraftverlust nicht in der Unterschreitung der erforderlichen Klemmkraft resultiert. [VDI 2230, 2015]

### 2.3. Varianz der geometrischen und rheologischen Parameter

In der korrekten Auslegung und Montage einer Schraubenverbindung spielen bis zu 200 Einflussfaktoren eine Rolle.

Hierbei ist die Reibung am wichtigsten. Nur ca. 10% des Anziehdrehmomentes werden zum Befestigen benutzt. Der Rest wird zum Überwinden der Reibung benötigt. Daher kann eine 5%-ige Änderung des Reibwertes die Schraubenkraft bis zur Hälfte reduzieren. [VDI 2230, 2015]

Das Anziehdrehmoment fließt – bei Verwendung eines konventionellen drehenden Anziehverfahrens – in die in Abbildung 5 gezeigten Komponenten. Dies sind nur überschlägige Werte.

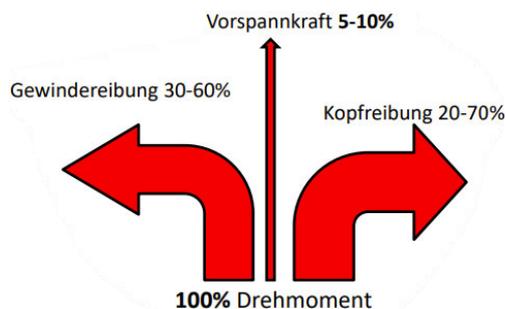


Abbildung 5 - Streuung des Anziehdrehmoments [Kloss-Grote, B.]

Da die Aufteilung der Anteile des Anziehdrehmoments abhängig von der Reibungszahl sind, kann eine andere Darstellung, in Abbildung 6 dargestellt, sinnvoller sein.

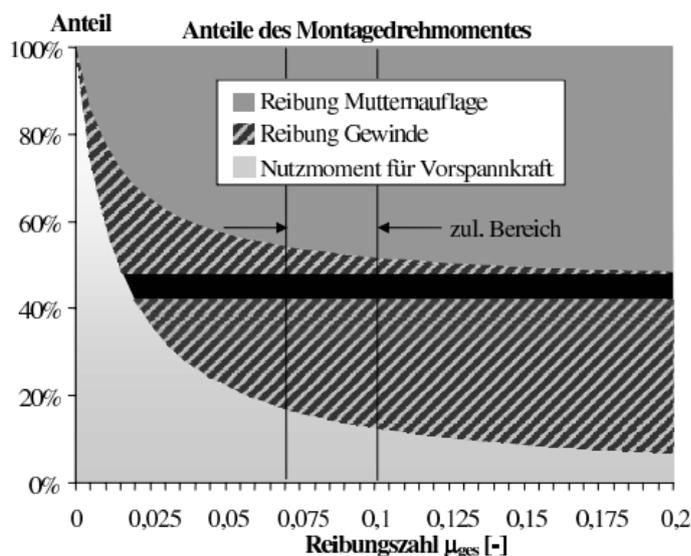


Abbildung 2-7: Reibungsanteile beim Anziehen einer Schrauben M36 HV

Abbildung 6 - Aufteilung des Anziehdrehmoments in Abhängigkeit der Reibungszahl [Schaumann, P.; Rutkowski, T.]

Da diese Reibungswerte trotz aller angewendeten Normen in Sachen Fertigung, Material und Geometrie, streuen, ist ein präzises Anziehen einer SV mit konventionellen Methoden nur schwer umsetzbar. Daher werden Schrauben meist mit einem Sicherheitsfaktor von 1,8 bis 2 ausgelegt, um diese Varianzen abzudecken. Somit sind Schrauben meistens sehr viel größer und somit teurer als die nötige Vorspannkraft eigentlich fordern würde. [Quality Engineering, 2012]

Wenn die Oberflächen der SV von sehr guter Qualität sind und geringe Reibungswerte vorliegen, kann mehr Vorspannkraft bei gleichem Anziehdrehmoment erzeugt werden und wenn zusätzlich glattere Oberflächen vorhanden sind, kann auch von geringeren Setzverlusten ausgegangen werden, wovon die bleibende Klemmkraft ebenfalls profitiert.

## 2.4. Montage der Schraubenverbindung

### 2.4.1. Auslegung der Schraubenverbindung

Die notwendige Montagevorspannkraft berechnet sich unter Beachtung der Vorspannkraftänderungen durch Setzen  $F_Z$  und Temperaturänderungen  $\Delta F'_{Vth}$ , sowie der geforderten Mindestklemmkraft  $F_{Vmin}$  nach:

$$F_{Mmin} = F_{Vmin} + F_Z + \Delta F'_{Vth} \quad (2.3)$$

Durch Einsetzen des Zusammenhangs zwischen der Mindestvorspannkraft  $F_{Vmin}$  und der erforderlichen Klemmkraft  $F_{Kerf.}$ , sowie dem Kraftverhältnis bei exzentrischer Verspannung und exzentrischer Krafteinleitung über die verspannten Teile  $\phi_{en}^*$  folgt:

$$F_{Mmin} \geq F_{Kerf.} + (1 - \phi_{en}^*) \cdot F_{Amax} + F_Z + \Delta F'_{Vth} \quad (2.4)$$

Die Mindestklemmkraft ergibt sich aus den an die SV gestellten Anforderungen:

- Übertragung einer vorhandenen Querkraft  $F_Q$  und/oder eines Drehmoments  $M_Y$  um die Schraubenachse durch Reibschluss.  $\rightarrow F_{KQ}$ 
  - Hierbei werden Haft- oder Gleitreibung, innere kraft- und drehmomentübertragende Trennfugen und der Reibradius berücksichtigt.
- Abdichten gegen ein Medium:  $\rightarrow F_{KP}$ 
  - Zur Absicherung einer Dichtfunktion ist ein Klemmkraftanteil in Abhängigkeit von der Dichtfläche und des maximalen Medieninnendrucks erforderlich.
- Verhindern des Aufklaffens:  $\rightarrow F_{KA}$

Somit gilt:

$$F_{K\text{ erf.}} \geq \max(F_{KQ}; F_{KP} + F_{KA}) \quad (2.5) \text{ [VDI 2230, S. 71, 2015]}$$

### 2.4.2. Anziehen von Schraubenverbindungen

Das zum Erreichen der Montagevorspannkraft  $F_M$  nötige Moment nennt sich Anziehdrehmoment  $M_A$ . Es setzt sich auf dem Gewindemoment  $M_G$  – dem im Gewinde wirkenden Reibungsmoment  $M_{GR}$ , sowie dem Nutzmoment  $M_{GSt}$  – und dem Reibungsmoment in der Schraubenkopf- oder Mutternaufgabe  $M_K$  (Kopfreibmoment) zusammen.

$$M_A = M_G + M_K \quad (2.6)$$

Sollten losdreh- und lockerungssichernde Maßnahmen verwendet werden, müssen an dieser Stelle gegebenenfalls Zusätze berücksichtigt werden.

Die Verfahren zum Anziehen von SV lassen sich in drehende und ziehende Verfahren unterteilen. Drehende Verfahren wiederum können in drehmomentgesteuertes, drehwinkelgesteuertes und streckgrenzengesteuertes Anziehen unterteilt werden. Hierbei erfolgt die Erfassung der erzeugten Montagevorspannkraft indirekt als z.B. Funktion des Anziehdrehmoments, der elastischen Längenänderung, des Drehwinkels oder durch die Ermittlung des Fließbeginns der Schraube.

### 2.4.2.1. Drehende Verfahren

#### Drehmomentgesteuertes Anziehen

Das Anziehen der SV erfolgt durch anzeigende oder Signal gebende Drehmomentschlüssel oder motorische Drehschrauber. Durch die einfache Handhabung und kostengünstigen Anziehgeräte ist dieses Verfahren weit verbreitet.

#### Drehwinkelgesteuertes Anziehen

Bei diesem Anziehverfahren wird sich die theoretische, direkte Proportionalität des zurückgelegten Drehwinkels zur Steigung des Gewindes zu Nutze gemacht, um indirekt die Längenänderung der Schraube zu messen. Die Druckverformungen in den verspannten Teilen und elastische sowie plastische Verformungen in der Trennfläche bis zum vollflächigen Anliegen werden mit gemessen. Da diese Prozesse nicht vorausbestimmbar und unregelmäßig sind, wird der Drehwinkel erst ab einem Schwellmoment gemessen und zusätzlich weiterhin das Drehmoment. Der bestimmende Drehwinkel muss vorher in Versuchen am Originalbauteil ermittelt werden. Da mit diesem Verfahren die Streckgrenze überschritten wird ist es nur bei Schrauben mit ausreichendem Verformungsvermögen anzuwenden und die Wiederverwendbarkeit dieser Schrauben ist stark eingeschränkt. [VDI 2230, 2015]

#### Streckgrenzengesteuertes Anziehen

Die Steuergröße für die aufzubringende Montagevorspannkraft dieses Verfahrens ist der Fließbeginn der Schraube.

Zunächst erfolgt das Anziehen bis zu einem Schwellmoment und daraufhin bis in etwa die Streck-/Dehngrenze in Folge der Gesamtbeanspruchung aus Zug- und Torsionsspannung erreicht ist.

$$\sigma_{red} \approx R_{p0,2} \quad (2.7)$$

Das Abschaltsignal wird ausgelöst durch den Abfall des Differenzquotient aus Drehmoment und Drehwinkel  $\frac{dM_A}{d\theta}$  auf einen bestimmten Bruchteil des zuvor ermittelten Höchstwerts (siehe Abb. 7).

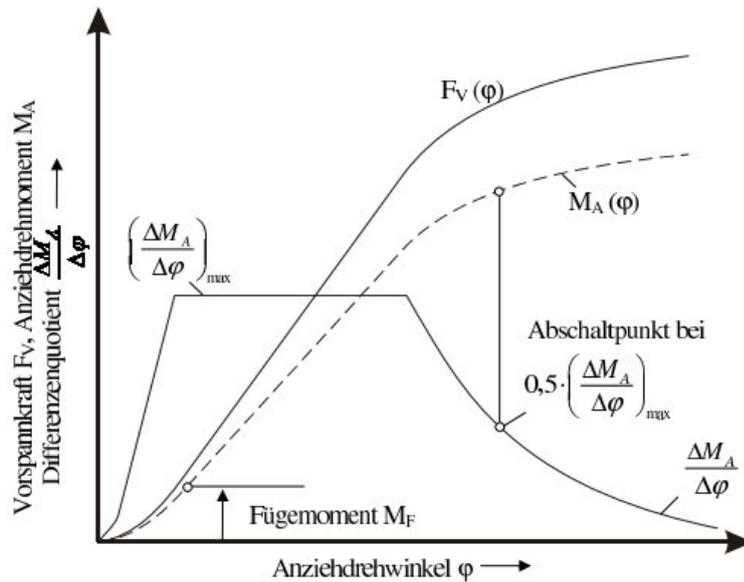


Abbildung 7 - Drehmoment- / Drehwinkel-Verlauf beim streckgrenzengesteuerten Anziehen [Schaumann, P.; Rutkowski, T.]

Aufgrund der kaum auftretenden plastischen Verlängerung der Schraube gibt es beinahe keine Einschränkungen in der Wiederverwendbarkeit.

Streckgrenzengesteuertes Anziehen liefert größere Montagevorspannkraft als drehmomentgesteuertes Anziehen, da bei kleinerer Streuung der Vorspannkraft die Gesamtbeanspruchung  $\sigma_{red}$  der Schraube gleich bleibt. [VDI 2230, 2015]

### 2.4.2.2. Ziehende Verfahren

#### Hydraulisches reibungs- und torsionsfreies Anziehen

Dieses Verfahren ist ausschließlich auf Durchsteckverbindungen mit über die Mutter überstehendem Gewinde anwendbar.

Nach dem Einsetzen der Schraube in die Verbindung erzeugen hydraulische Spannzylinder (Abb. 8) die Montageverspannkraft  $F_{VM}$  durch axiales Längen der Schraube. Im Anschluss wird die Mutter ange dreht, bis diese am Bauteil anliegt, woraufhin die Hydraulik die Spannung löst.

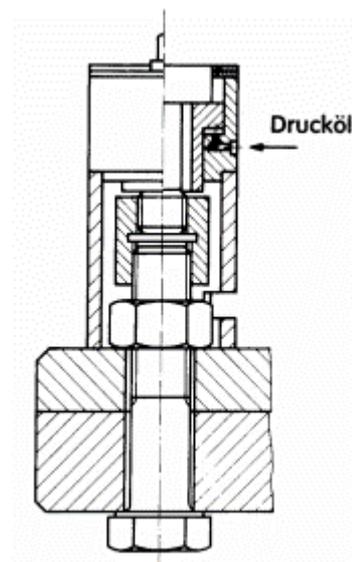


Abbildung 8 - Hydraulischer Spannzylinder [Schaumann, P.; Rutkowski, T.]

Hierbei sind Rückfederungsverluste  $F_{RV}$  gegeben, die abhängig von der Oberflächengüte, sowie der Qualität der verspannten teile abhängig sind. Danach verbleibt die Montagevorspannkraft  $F_M$  in der SV. Um die Rückfederungsverluste möglichst gering zu halten, wird empfohlen kleine Klemmlängenverhältnisse ( $\frac{l_k}{d} \leq 4$ ) zu meiden.

Da das Anziehen der SV ohne rotatorische Vorgänge abläuft entfallen jegliche Reibungseinflüsse.

### 2.4.3. Streuungen beim Anziehen von Schraubenverbindungen

Die Montagevorspannkraft in SV wird beeinflusst durch:

- Die Reibungsverhältnisse in den sich relativ zueinander bewegenden Kontaktflächen (Gewinde und Auflage)
- Die geometrische Form der Verbindung (Scheube, Mutter, verspannte Teile)
- Die Festigkeit der Verbindung
- Das Anziehverfahren und das Anziehgerät

Durch diese Einflüsse entsteht beim Anziehen der SV eine Streuung der Montagevorspannkraft zwischen  $F_{Mmin}$  und  $F_{Mmax}$ . Hierbei muss sichergestellt sein, dass die maximale Vorspannkraft nicht größer als die zulässige Schraubenkraft wird. Um ein Überschreiten der Streckgrenze der Schraube aufgrund der Streuung zu vermeiden, sind bei der Berechnung minimale Reibungszahlen zu verwenden. Der berechnete Wert stellt somit den oberen Grenzwert dar. Verfahrens- und werkzeugbedingte Streuungen sind abzuziehen. Dies geschieht durch den Anziehfaktor bzw. Montageunsicherheitswert. [VDI 2230, S. 71, 2015]

$$\alpha_A = \frac{F_{Mmax}}{F_{Mmin}} \quad (2.7)$$

Die Berücksichtigung der Anziehungsfaktoren ist zwingend zu beachten, da unterschiedliche Anziehverfahren unterschiedlich starke Streuungen aufweisen. Hydraulisches reibungs- und torsionsfreies Anziehen streut aufgrund der ausbleibenden Reibungseinflüsse wesentlich weniger als drehende Anziehverfahren. Der Zusammenhang zwischen Anziehfaktor und Streuung der Montagevorspannkraft kann aus Abbildung 9 entnommen werden.

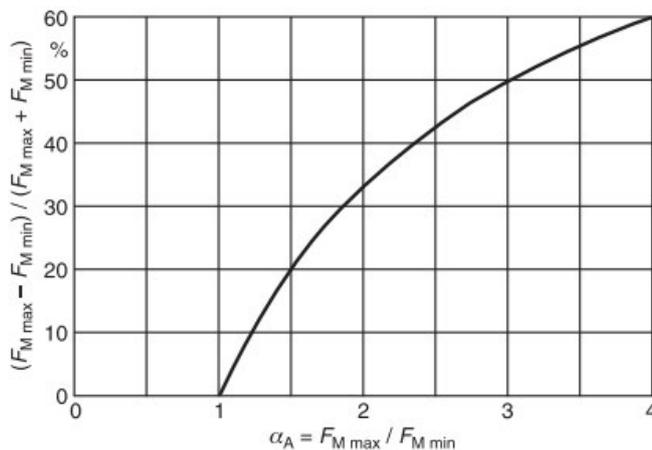


Abbildung 9 - Zusammenhang zwischen Anziehfaktor und Streuung der Montagevorspannkraft [VDI 2230, 2015]

Des Weiteren muss die maximale Montagevorspannkraft kleiner bleiben als die zulässige Schraubenkraft  $F_{S\ zul}$ . Diese entspricht nach VDI 2230 bei nicht streckgrenzen- oder drehwinkelgesteuerten Anziehverfahren für Schrauben bis Größe M39 einer 90%igen Ausnutzung der Mindeststreckgrenze  $R_{p0,2}$ . [Wohlfahrt, H., 2018]

Zur Einhaltung dieser Grenze ist die Beachtung der Anziehungsfaktoren ebenfalls notwendig, da je nach verwendetem Anziehverfahren und somit je nach Streuung der erforderliche Schraubendurchmesser variiert (Abb. 10).

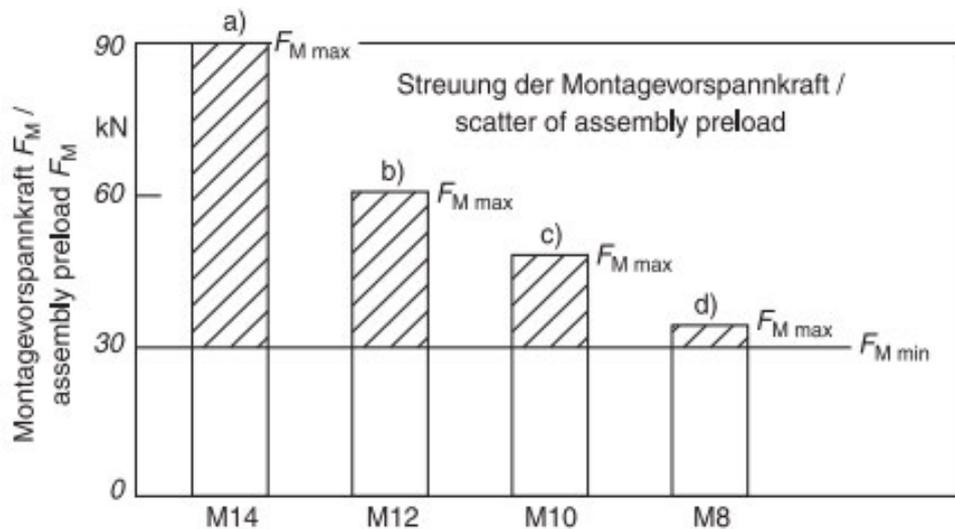


Abbildung 10 - Einfluss des Anziehverfahrens auf die Streuung und damit auf den erforderlichen Schraubendurchmesser bei FKL 12.9 [VDI 2230, 2015]

Hieraus geht hervor, dass z. B. bei Verwendung eines Anziehverfahrens mit dem Montageunsicherheitswert  $\alpha_{A1} = 2,5$  (z. B. Drehschraubermontage) gegenüber  $\alpha_{A2} = 1,2$  (z.B. Drehwinkelmontage) eine um etwa 45 % größere Schraubenabmessung erforderlich ist (z.B. M12 statt M8).

## 2.5. Vorspannkraftänderungen

Die Änderung der Vorspannkraft  $F_V$  einer Schraube gegenüber der Montagevorspannkraft  $F_M$  kann unter anderem durch folgende Ursachen entstehen:

- Anziehen weiterer Schrauben in der Umgebung (bspw. beim Anziehen der Radbolzen eines KFZ)
- Setzen der Kontaktflächen
- Selbsttätiges Losdrehen
- Relaxation der Werkstoffe
- Temperaturwechsel
- Überlastung der Verbindung

Die eben genannten Punkte sind eine Auswahl der Schädigungsmechanismen bei SV im Betrieb. Abbildung 11 zeigt eine ausführlichere Übersicht inklusive der Zusammenhänge zwischen den Mechanismen.

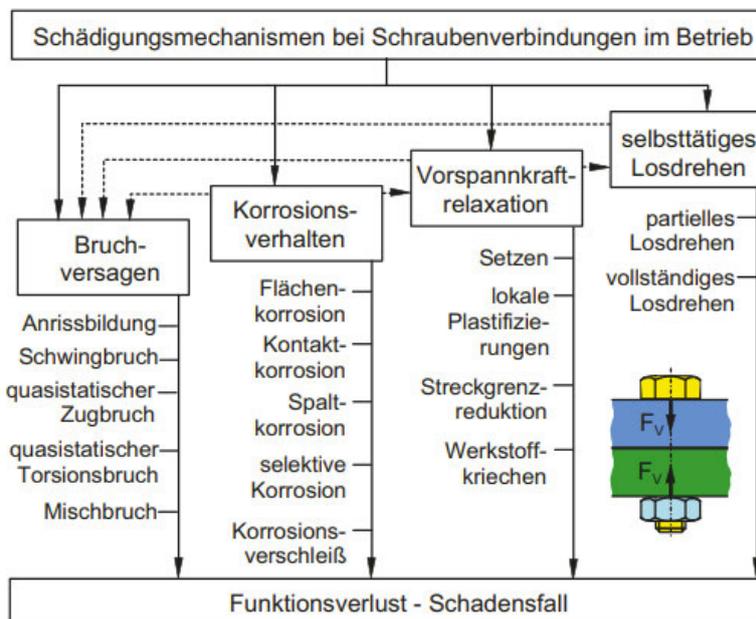


Abbildung 11 - Schädigungsmechanismen bei montierten SV im Betrieb [Dümpelmann, C.]

Sollte die Berechnung bei als kritisch erkannten Verbindungen unzureichend sein, müssen Untersuchungen am Originalteil durchgeführt werden.

### 2.5.1. Vorspannkraftverluste durch Setzen

„Setzen“ beschreibt örtlich plastische Verformungsvorgänge, die in einer SV nach der Montage auftreten. Hierbei findet ein plastisches Einebnen von Oberflächenrauigkeiten in den Trennfugen statt. Unter Trennfugen versteht man u.a. Auflageflächen und belastete Flanken der gepaarten Gewinde. Dies geschieht bereits bei Belastungen unterhalb der Streckgrenze oder Oberflächenpressung.

Während der Montage auftretendes Setzen führt nicht zur Minderung der Vorspannkraft. Die durch das Anziehen erzielte Montagevorspannkraft wird nur durch die nach abgeschlossener Montage auftretenden Verformungen  $f_Z$  um den Betrag  $F_Z$  vermindert. Von  $F_{Mmin}$  bleibt dann nur die Vorspannkraft  $F_V = F_{Mmin} - F_Z$  übrig (siehe Abb. 12).  $F_V$  muss mindestens gleich der erforderlichen Vorspannkraft  $F_{Verf}$  sein.

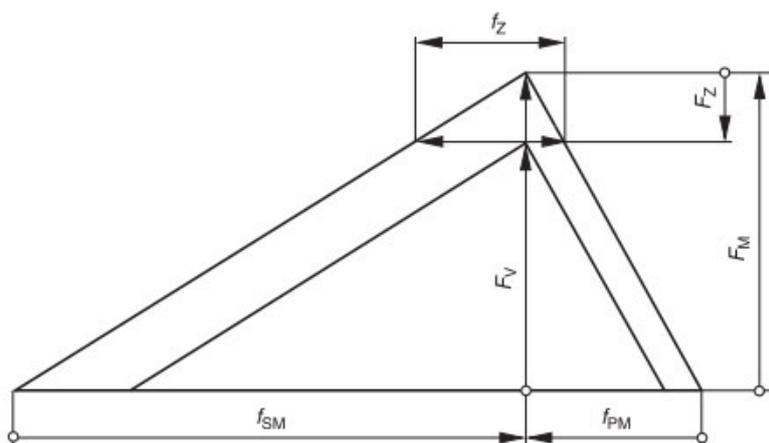


Abbildung 12 - Vorspannkraftminderung einer SV aufgrund einer Verformung um den Setzbetrag [VDI 2230, 2015]

Wird ein Anziehverfahren verwendet, bei dem keine Einebnung der Oberflächen während des Anziehens stattfindet (z.B. hydraulisches reibungs- und torsionsfreies Anziehen), dann können die nach der Montage auftretenden Setzbeträge deutlich größer sein, als bei z.B. drehwinkelgesteuertem Anziehen.

Der Setzbetrag ist abhängig von der Art der Betriebsbelastung, der Anzahl der Trennfugen und von der Größe der Rauigkeit der gepaarten Oberflächen. Zudem sind Setzbeträge bei weicheren Materialien wie zum Beispiel Aluminium größer als bei Stählen.

Um bei hochfesten, stark vorgespannten SV die Setzbeträge nicht zu vergrößern wird empfohlen, keine Sicherungsbleche, Unterlegscheiben oder Federringe unter dem Schraubenkopf oder der Mutter zu verwenden. Zusätzlich sollten die Flächen unter Kopf und Mutter stets gut bearbeitet und rechtwinklig zur Schraubenachse sein. [VDI 2230, 2015]

### 2.5.2. Vorspannkraftverluste durch Kriechen und Relaxation

Die Berücksichtigung von Setzverlusten nach bspw. aus der VDI 2230 entnommenen Tabellen ist nur zulässig, solange die Flächenpressung nicht die Grenzflächenpressung des verspannten Werkstoffs überschreitet. Wenn diese überschritten wurde, kann bereits bei Raumtemperatur ein Kriechen des Werkstoffs in den Auflageflächen stattfinden, wodurch die Setzbeträge  $f_z$  unkontrolliert größer werden können.

Als Kriechen wird ein zeitabhängiger Vorspannkraftverlust aufgrund plastischer Verformungen in einer oder mehrerer Komponenten der Sv bezeichnet. Dieser zeitabhängige Vorspannkraftverlust wird als Relaxation bezeichnet.

Die Größe der Relaxation wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Werkstoffe: Die Kriechneigung der einzelnen Komponenten der SV ist bedingt durch die thermische Stabilität und die Festigkeitseigenschaften der verwendeten Werkstoffe.
- Zeit: Kriechverformungen nehmen bei konstanter äußerer (mechanischer und thermischer) Belastung mit der Zeit zu.
- Temperatur: Mit zunehmender Temperatur steigt die Kriechrate. Für metallische Werkstoffe sind Kriechvorgänge spätestens ab Temperaturen oberhalb von ca. 40 % der Schmelztemperatur relevant.
- Belastungen: Je höher die Spannungen in einem Bauteil sind, desto größer ist auch die Kriechrate. [VDI 2230, S.73-74, 2015]

### 2.5.3. Temperaturabhängige Vorspannkraftänderung

Allgemein gesprochen ist der Elastizitätsmodul temperaturabhängig. Des Weiteren sind die thermischen Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Materialien unterschiedlich, womit gegebenenfalls eine Differenz dieser Koeffizienten zwischen der Schraube und den verspannten Teilen einer SV vorliegen kann. Diese Differenz wiederum kann zu deutlichen thermisch induzierten Vorspannkraftänderungen  $\Delta F_{VT}$  führen. Hat beispielsweise die Schraube einen geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als die verspannten Teile oder wird weniger erwärmt, so längt diese sich verhältnismäßig weniger, wodurch die Vorspannkraft steigt. Sollte die Wärmeausdehnung der Schraube und der Platten gleich groß sein, so würde die Vorspannkraft abnehmen (Abb. 13).

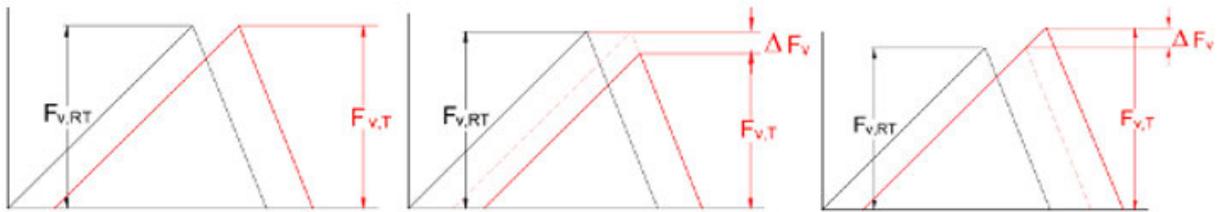


Abbildung 13 - Auswirkung des Wärmeausdehnungskoeffizienten auf die Vorspannkraft; V.l.n.r.: Vorspannkraft ändert sich nicht; Vorspannkraft verkleinert sich; Vorspannkraft erhöht sich [Schweizer, A.]

Diese Veränderung der Vorspannkraft bei gleichen Ausdehnungen lässt sich auf den mit steigender Temperatur sinkenden Elastizitätsmodul der Materialien zurückführen.

Abbildung 14 zeigt qualitativ die Wirkung der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Schrauben und verspannten Teile als auch die Temperaturabhängigkeit der E-Moduli.

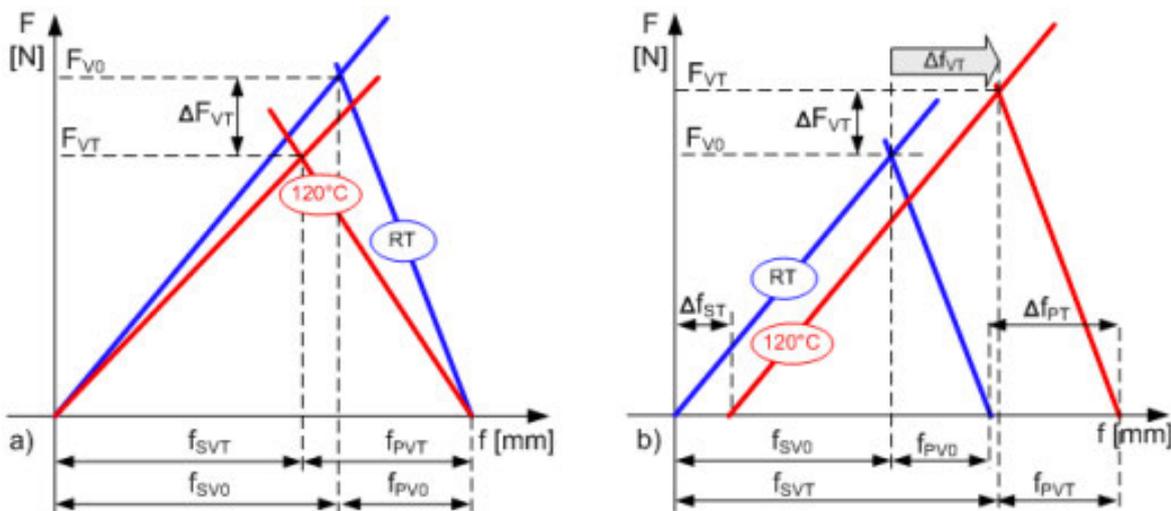


Abbildung 14 - Die Wirkung der Betriebstemperatur auf das Spannungsdreieck: E-Moduli (a); Wärmeausdehnung (b) [Gerstmayr, G.; et. al.]

Da wesentliche Differenzen in der Wärmeausdehnung zwischen der allgemein gut wärmeleitenden Umgebung und der in der Bohrung isolierten Schraube vorliegen können, müssen nicht nur Betriebszustände mit der niedrigsten und höchsten stationären Temperatur betrachtet werden, sondern auch instationäre Temperaturfelder. Hiermit ist beispielsweise ein Erwärmungsvorgang gemeint, bei dem sich die verspannten Teile schneller erwärmen als die einigermaßen isolierte Schraube. Würde man hierbei allerdings nur die maximale Betriebstemperatur betrachten, nachdem diese einige Zeit vorlag, so wäre vermutlich die Schraube ähnlich stark erwärmt, wie die Umgebung.

Bei der Montage der SV sollte somit die Temperatur zum Montagezeitpunkt im Vergleich zur geplanten Betriebstemperatur berücksichtigt werden. [VDI 2230, 2015]

#### 2.5.4. Vorspannkraftänderung durch selbsttätiges Losdrehen

Das selbsttätige Losdrehen von Schrauben kann als Folge von Relativbewegungen (bspw. Vibrationseintrag aufgrund von Schwingungen) zwischen den Kontaktflächen auftreten. Eine weitere Ursache kann vorliegen, wenn das aus der Vorspannkraft und der Gewindesteigung herrührende innere Losdrehmoment die Selbsthemmung aufhebt. Dies geschieht durch eine Reduzierung der Gewindereibungszahl und/oder durch dynamische wirkende Querkräfte/Momente um die Schraubenachse.

In manchen Fällen kann dies zu einer Unterschreitung der erforderlichen Vorspannkraft führen. In solchen Fällen sollten „Losdrehsicherungen“ verwendet werden. Darunter versteht man Sicherungselemente, die in der Lage sind, das bei Relativbewegungen entstehende innere Losdrehmoment zu blockieren oder zu verhindern. Dies können sperrende Sicherungselemente sein, die das Losdrehen durch eine Verzahnung verhindern oder stoffschlüssige Sicherungselemente, die das Gewinde verkleben. Alternativ könnten auch am Schraubenkopf Schweißpunkte gesetzt werden. [Wittel, H., 2019]

Eine konstruktiv richtig ausgelegte SV, die zulässig vorgespannt ist, braucht in der Regel keine zusätzliche Schraubensicherung. Dies gilt besonders bei hochfesten Schraubenwerkstoffen, genügender Schraubennachgiebigkeit  $\delta_S$ , genügender Klemmlänge ( $l_k \geq 5d$ ) [Wohlfahrt, H., 2019] und einem Minimum von Trennfugen. [VDI 2230, 2015]

### 3. Kraftmessung und -überwachung in SV

Auf Basis der vorangegangenen Erläuterungen zu den Kraft- und Verspannungsverhältnissen, dem Anziehen, sowie den Schädigungsmechanismen einer SV, ist ersichtlich, dass eine Messung der Kräfte in der SV sinnvoll ist. Hierfür müssen zunächst die messbaren Kräfte identifiziert werden.

#### 3.1. Messbare Kräfte in SV

In einer SV dienen grundsätzlich zwei Merkmale zur Erfassung von Kräften.

Einerseits die in der Schraube vorliegenden Spannungen, worüber sich Rückschlüsse auf die Vorspann- bzw. Schraubenkraft ziehen lassen. Hierbei wird die Vorspannkraft gemessen, wenn keine Betriebskräfte anliegen. Andernfalls folgt eine indirekte Messung der Schraubenkraft, aus der mithilfe der Kenntnis über die anliegende Betriebskraft, den Kraftangriffspunkt, sowie der Nachgiebigkeiten der Komponenten, Rückschlüsse auf die Vorspannkraft geführt werden können.

Andererseits können auch die auf die verspannten Teile wirkenden Kräfte gemessen werden. Auch hier gilt, dass bei einer Messung ohne anliegende Betriebskräfte ein direkter Rückschluss auf die Vorspannkraft folgt, da gemäß dem Wechselwirkungsprinzip die Vorspannkraft als Zugkraft eine entsprechende Druckkraft erzeugt, die Klemmkraft genannt wird. Dies gilt allerdings nur vereinfacht, ohne Berücksichtigung jeglicher Setz- und Relaxationsvorgänge. Bei Anliegen einer Betriebskraft verändern sich die Kraftverhältnisse, sodass bei der Messung nicht die Klemmkraft erfasst wird, sondern die Restklemmkraft.

Bei der Entscheidung, ob die in der Schraube oder in den verspannten Teilen wirkende Kraft gemessen werden soll, müssen folgende Faktoren berücksichtigt werden:

- Zugänglichkeit der SV (Raum für den Einbau von Messmitteln)
- Nachgiebigkeiten der Komponenten (eine steifere Verbindung ist weniger empfindlich gegenüber Veränderungen durch den Einbau von Messmitteln)
- Aufgabe der SV (z.B. Abdichten gegen ein Medium)
- Ziel der Messung (Kontrolle der Klemmkraft oder Kontrolle der maximalen Kräfte in der Schraube)

### 3.2. Messverfahren und ihre Vor-/Nachteile

Bei Messverfahren zur Erfassung von Kräften in Schraubenverbindungen wird unterschieden nach Verfahren, die im Kraftfluss oder im Kraftnebenfluss messen. Es folgt eine Übersicht über die Unterteilung der angesprochenen Messverfahren.

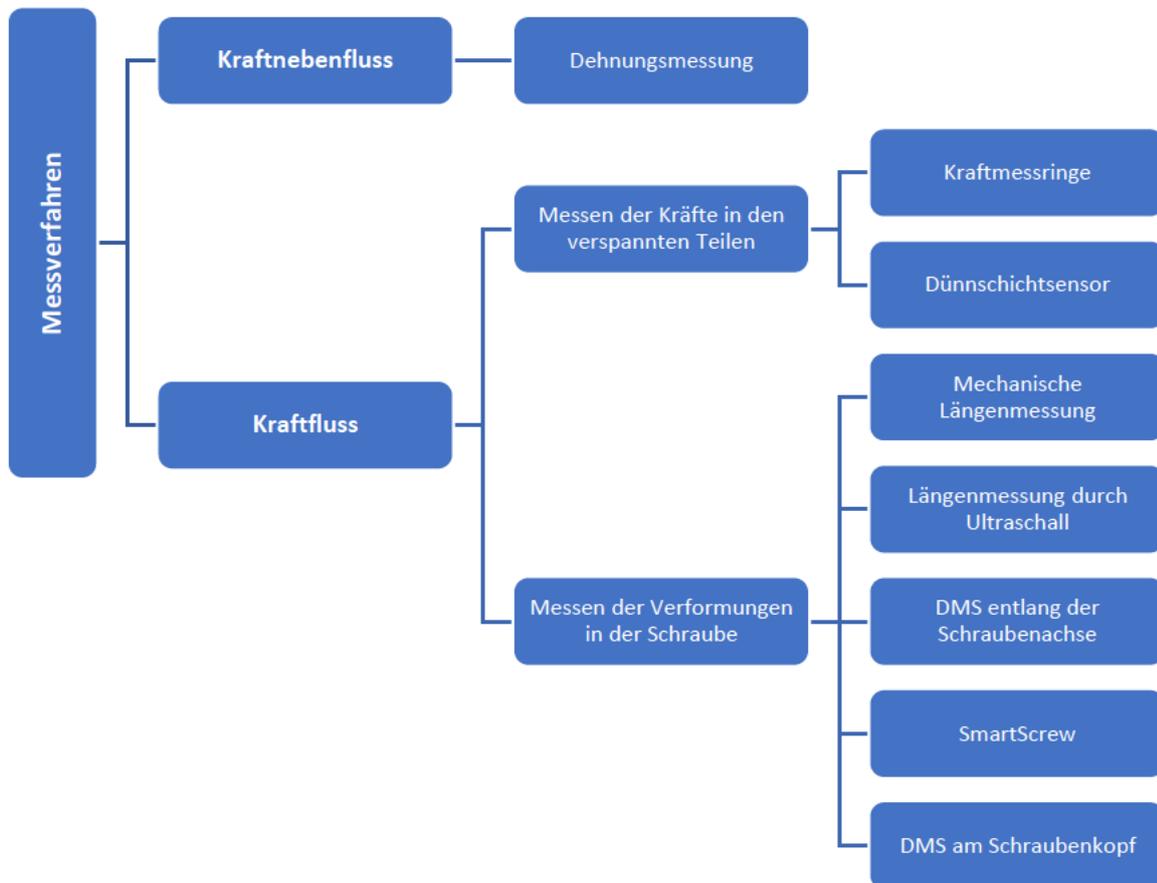


Abbildung 15 - Übersicht über Messverfahren zur Messung von Kräften in SV

### 3.2.1. Messen im Kraftnebenfluss

Im Kraftnebenfluss wird fast ausschließlich mit Dehnungsmessern, wie bspw. Dehnungsmessstreifen (DMS) gearbeitet. Hier wird die Verformung der verbauten Komponenten außerhalb des hauptsächlich Kraftflusses ermittelt.

DMS sind metallisch-elektrische Messelemente, die auf dem physikalischen Effekt, dass sich der elektrische Widerstand eines Drahts beim Verformen proportional zu seiner Dehnung ändert, basieren. Heute wird meist eine sehr dünne Metallfolie ( $t \approx 0,005 \text{ mm}$ ) eingesetzt, aus der ein Mäander herausgeätzt wird. Diese werden meist auf einen Messkörper aus hochfestem Werkstoff aufgeklebt und in einer Wheatstone-Brücke verschaltet. Diese Schaltung dient zur Erfassung kleinster Widerstandsänderungen und mithilfe eines Temperatur-Messwiderstands auch zur Kompensation von Temperaturänderungen. So kann die Verformung des Messkörpers in eine Änderung des elektrischen Widerstands und somit in ein Spannungssignal übersetzt werden (Abb. 16). [Kistler Group]

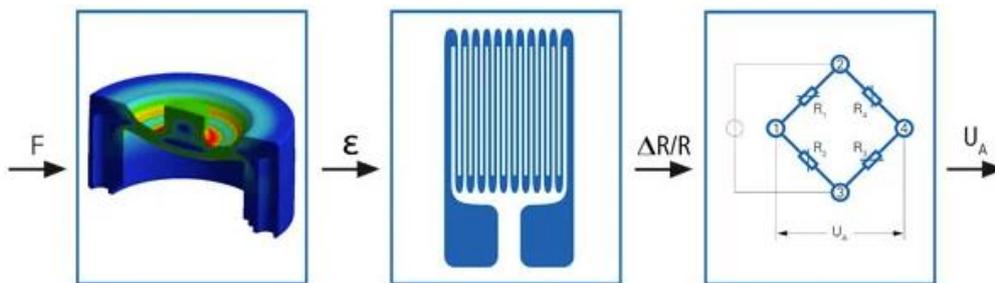


Abbildung 16 - Verknüpfung eines Messkörpers mit DMS und der Verschaltung in einer Wheatstone-Brücke zur Erzeugung einer Ausgangsspannung [Baumer GmbH]

In Abbildung 17 ist eine Vorrichtung zu sehen, die sich aufgrund der aufgebrachtten Kraft verformt. Diese Verformung wird durch einen angebrachten Dehnungssensor registriert.

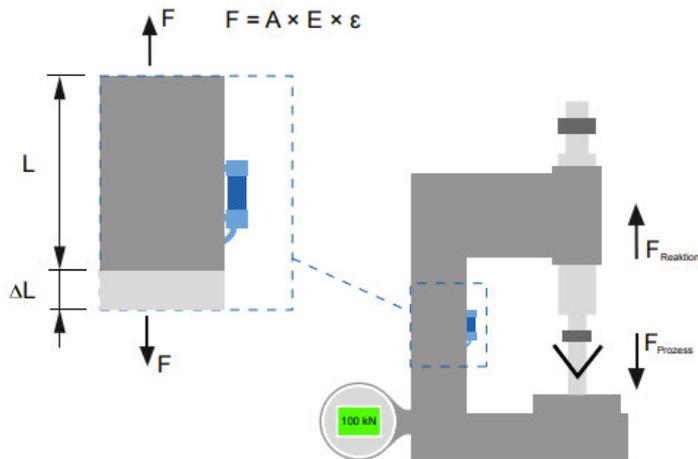


Abbildung 17 - Kraftmessung im Kraftnebenfluss [Baumer GmbH]

Messungen im Kraftnebenfluss haben den Nachteil, dass die Sensoren in der Einbausituation kalibriert werden müssen (Abb. 18). Zusätzlich wird das zu vermessende Objekt Teil des Messsystems, wodurch Fertigungstoleranzen auch Einflüsse auf die Messgenauigkeit haben können.

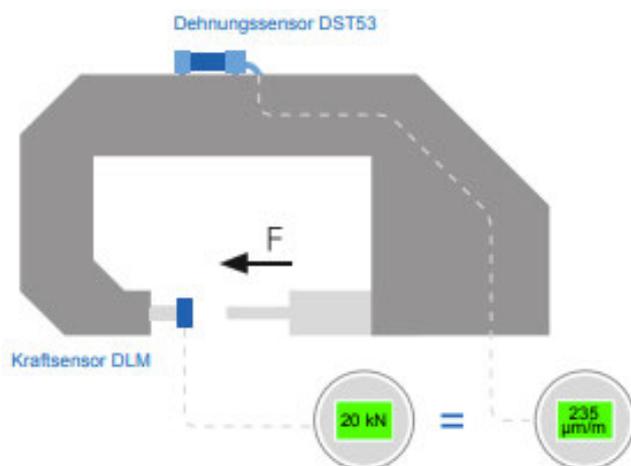


Abbildung 18 - Kalibrierung von Dehnungssensoren [Baumer GmbH]

Vorteilhaft ist die Möglichkeit, Dehnungssensoren auf bestehenden Strukturen aufzuschrauben, wodurch diese schnell einsetzbar sind. Zusätzlich kann durch die Parallelschaltung von mehreren Sensoren eine Kompensation von unerwünschten Dehnungseinflüssen erreicht werden. [Hottinger Brüel & Kjaer GmbH]

### 3.2.2. Messen im Kraftfluss

Wesentlich genauer ist die Messung direkt im Kraftfluss. Bei dieser Art der Messung muss die gesamte Kraft durch den Aufnehmer fließen, um diese akkurat festzustellen. Wichtig dabei sind eine zentrische Krafteinleitung und eine ausreichend steife Auflagefläche. Hierbei kann sowohl mit Kraftaufnehmern als auch mit Dehnungsaufnehmern gearbeitet werden. Diese Art der Messung kann wiederum unterteilt werden in die Messung von Verformungen der Schraube und die der verspannten Teile. [Baumer GmbH]

#### 3.2.2.1. Messen der Kräfte in den verspannten Teilen

Um im Kraftfluss die auf die verspannten Teile wirkenden Kräfte zu ermitteln, kann sowohl mit DMS-, als auch Piezotechnologie gearbeitet werden. Je nach Anforderungen an die Messung kann die Verwendung einer der beiden Prinzipien von Vorteil sein.

Piezoelektrische Sensoren (PES) beschreibt eine Gruppe von Sensoren, die vom piezoelektrischen Effekt Gebrauch machen. Dieser beschreibt die Eigenschaft bestimmter Festkörper bei mechanischer Belastung eine elektrische Ladung zu erzeugen. Durch die einwirkende Kraft findet eine Verformung der Molekularstruktur statt. Hierbei entstehen Dipole, zwischen denen sich eine Spannung aufbaut. Diese können mithilfe eines Ladungsverstärkers als Messsignal verwendet werden, da die elektrischen Ladungen proportional zur einwirkenden Kraft sind (Abb. 19).

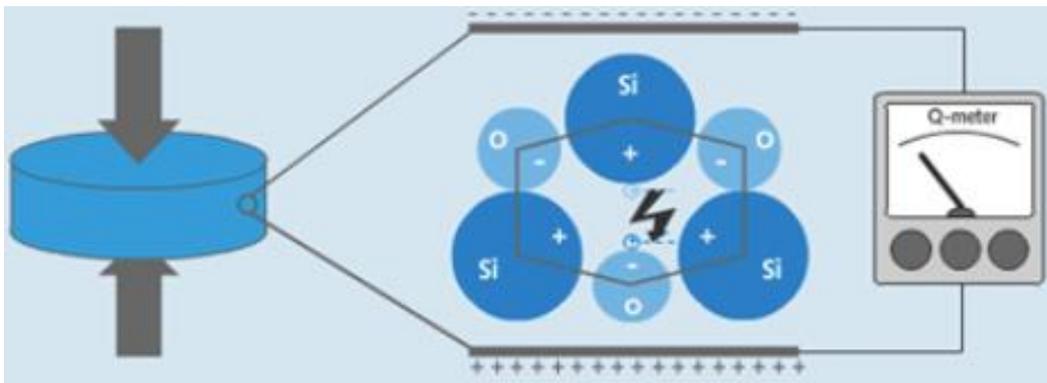


Abbildung 19 - Kraftmessung nach dem piezoelektrischen Prinzip [Kistler Group]

Eines der wichtigsten PE-Materialien ist der Quarzkristall, bestehend aus Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), da dieser robust gegenüber Temperaturschwankungen ist. [Kistler Group]

PES haben meist einen leichten Drift, der insbesondere bei kleinen Kräften stark ins Gewicht fällt. Drift bezeichnet den zeitabhängigen Ladungsverlust von elektrischen Ladungen. Dieser entsteht durch die natürliche Volatilität von elektrischen Ladungen und dem Umstand, dass eine perfekte Isolation beinahe unmöglich umzusetzen ist. PES sind besser geeignet für hochfrequente Messereignisse und können steifer gebaut werden, da die zum Aufbau des Messsignals nötige Verschiebung auf molekularer Ebene in der Gitterstruktur des piezoelektrischen Kristalls abläuft (Abb. 20).

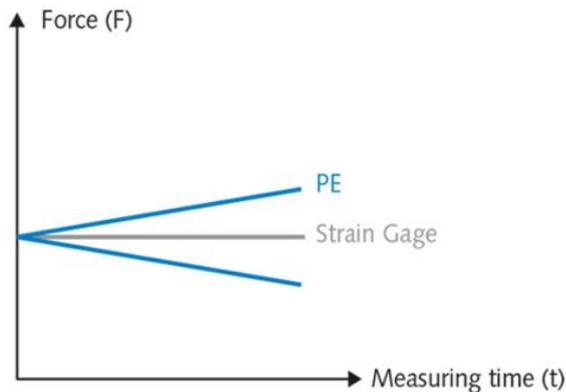


Abbildung 20 - Drift von PE Sensoren [Kistler Group]

DMS-basierte Sensoren sind langzeitstabil und kompensieren Temperaturänderungen besser als PE Sensoren. Diese müssen allerdings weicher gebaut sein, um die zur Erfassung durch DMS nötigen Verschiebungen zuzulassen. Daher sind sie ungeeignet für hochfrequente Messereignisse.

### Kraftmessringe

Kraftmessring gibt es in verschiedenen Ausführungen, die entweder auf DMS oder piezoelektrische Komponenten zurückgreifen.



Abbildung 21 – Kraftmessring [Hottinger Brüel & Kjaer GmbH]

Unabhängig der verwendeten Technologie können Kraftmessringe statt Unterlegscheiben verbaut werden und die aufgebrachte Kraft registrieren (Abb. 21). Der wesentliche Nachteil dieses Verfahrens ist die Veränderung der Charakteristika der SV. Der Einbau der Kraftmessringe verändert die Steifigkeit der Gesamtkonstruktion. Zusätzlich entstehen weitere Trennfugen im Vergleich zu einer SV die bspw. ohne Unterlegscheibe verbaut wurde. Besonders bei SV, die hohen Kräften standhalten müssen, sind die Kraftmessringe relativ

große Konstruktionen und beeinflussen somit noch mehr das Verhalten der Gesamtkonstruktion. [Hottinger Brüel & Kjaer GmbH

Von Vorteil ist die Möglichkeit, durchgehend – auch bei veränderlicher und erhöhter Temperatur – die Vorspannkraft zu messen, sowie die einfache Verwendbarkeit, da keine Präparation der Schrauben notwendig ist. Der Einsatz von Kraftmessringen liefert auch bei Schrauben kleinerer Größen ( $\geq M6$ ) genaue Messergebnisse. [Gerstmayr, G.]

### Dünnschichtsensor

Das Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) hat eine Unterlegscheibe mit piezoelektrisch basierter Dünnschicht-Technologie entwickelt. Der Aufbau des Dünnschichtsystems ist in Abbildung 22 und 23 dargestellt.

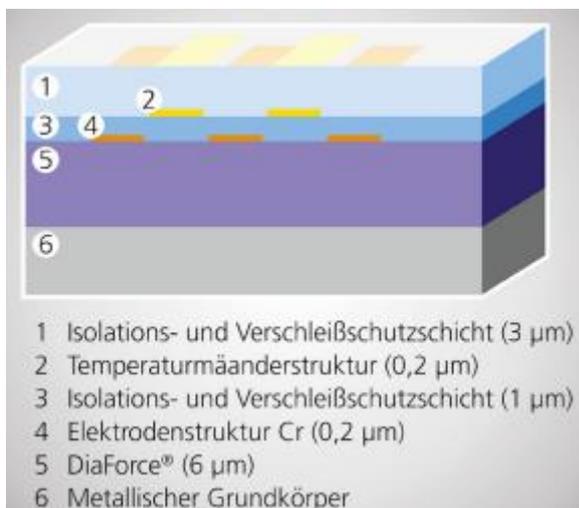


Abbildung 22 - Schematische Darstellung des Dünnschichtsystems [Fraunhofer Institut]



Abbildung 23 - Beschichtungsschritte des Schichtsystems [Von Daacke, S.; Overmeyer, L.]

Mit dieser können ähnlich wie mit einem herkömmlichen Kraftmessring die auftretenden Kräfte gemessen werden. Bei einer SV der Größe M18 kann das System bis zu 150 kN bei maximal 100 °C aufnehmen.

Abgesehen von zusätzlichen Trennfugen beeinflusst dieses Verfahren die Eigenschaften der SV nicht wesentlich und ist somit besser geeignet als Kraftmessringe. Allerdings ist dieses auf dem „DiaForce®-Dünnschichtsystem“ basierende Produkt noch nicht frei am Markt erhältlich, da es sich noch in der Erprobungsphase befindet.

### 3.2.2.2. Messen der Verformungen in der Schraube

Für die Erfassung der Verformungen der Schraube stehen diverse Erfassungsorte und Technologien zur Verfügung.

#### Mechanische Längenmessung

Wenn eine Schraube im unbelasteten Zustand vermessen wurde und verbaut beidseitig zugänglich ist, so kann die Längung der Schraube schlichtweg durch eine mechanische Längenmessung im belasteten Zustand festgestellt werden. Hierfür kommen bspw. Messschrauben in Frage. Sollte die verbaute Schraube nur einseitig zugänglich sein, so kann die Länge eines in die Schraube eingebrachten Stiftes zur Messung benutzt werden (Abb. 24).

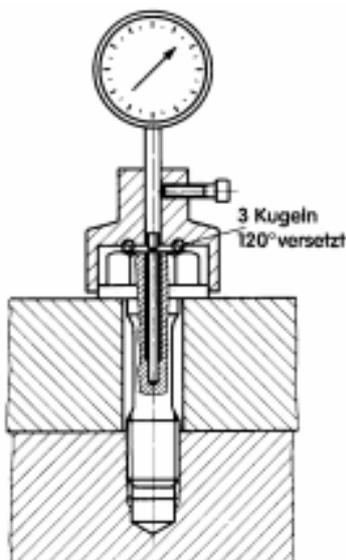


Abbildung 24 - Einseitige mechanische Längenmessung [Schaumann, P.; Rutkowski, T.]

Bei der Berechnung der Verformung aus der Länge des Stiftes sind die Steifigkeit der Schraube und Temperatureinflüsse zu berücksichtigen.

Vorteilhaft an diesem Verfahren – besonders bei beidseitiger Zugänglichkeit – ist die einfache Anwendung und der minimale Aufwand zur Vorbereitung der Schrauben. Es müssen lediglich die Messpunkte an den Enden der Schraube definiert und präpariert werden.

Von Nachteil ist wiederum, dass durch die menschliche Handhabung Fehler entstehen können und die Auflösung der Messergebnisse wesentlich vom eingesetzten Gerät abhängig ist.

### Längenmessung durch Ultraschall

Eine häufig verwendete Technik ist das Messen der Schraubenlänge mittels Ultraschallverfahren. Hierbei wird ein Prüfkopf, der meist nach dem piezoelektrischem Effekt arbeitet auf den Schraubenkopf oder das -ende aufgesetzt. Der Prüfkopf erzeugt einen Schallimpuls, der beim Impuls-Reflexionsverfahren auch zum Empfang der Signale verwendet wird (Abb. 25). Zur Einleitung einer Longitudinalwelle mit minimierter Oberflächenreflexion ist eine Flüssigkeit zwischen Werkstoff und Prüfkopf notwendig. Dies gilt als Nachteil der Methode.

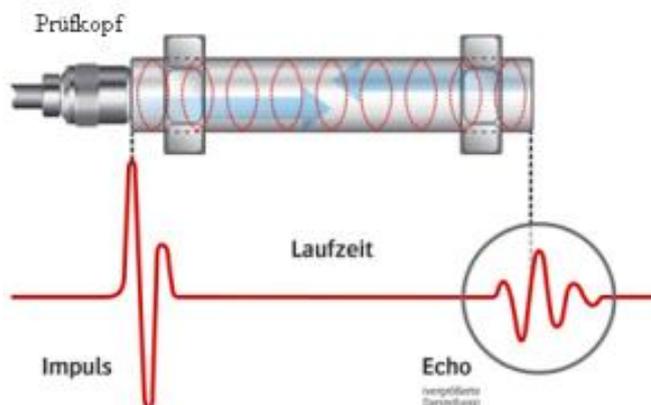


Abbildung 25 - Messmethode der Vorspannkraft beim Reflexionsverfahren [Gerstmayr, G.; et. al.]

Von Vorteil sind der einfache Transport und die einfache Handhabung des Messgeräts, sowie die Möglichkeit Vorspannkraftmessungen am Originalaufbau durchzuführen.

Das Verfahren ist empfindlich gegenüber störenden Einflüssen und bringt gewisse Anwendungsgrenzen mit sich. Die Schraube muss eine gewisse Mindestlänge erfüllen, um ausreichend genaue Messergebnisse zu ermöglichen. Zusätzlich muss die erzielte Längung der Schraube ebenfalls ausreichend groß sein, da bei geringer Längung Messschwankungen durch das manuelle Aufsetzen des Prüfkopfes zu großen relativen Messfehlern führen können. Um dies Fehler zu vermeiden, muss die Vorspannkraft mehr als 10% der Dehngrenze betragen. Des Weiteren muss die Messung bei stationärer Temperatur durchgeführt werden. Somit muss für Messungen bei erhöhter Temperatur der Schraubverband zunächst auf Umgebungstemperatur gekühlt werden, wodurch der Einfluss der unterschiedlichen

thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Schraube und der verspannten Teile auf die Vorspannkraft nicht erfasst werden kann.

Bei der Messung müssen die Einflüsse auf die Schallgeschwindigkeit der Temperatur, sowie der vorherrschenden Spannung in der Schraube beachtet bzw. gemessen und entsprechend kompensiert werden. Die Veränderung der Schallgeschwindigkeit aufgrund von Spannungen im Material nennt man den akusto-elastischen Effekt. Dieser wird durch einen Spannungsfaktor kompensiert. Im Falle der Temperatur muss die Schallgeschwindigkeit auf eine genormte Temperatur zurückgerechnet werden (Abb. 26).

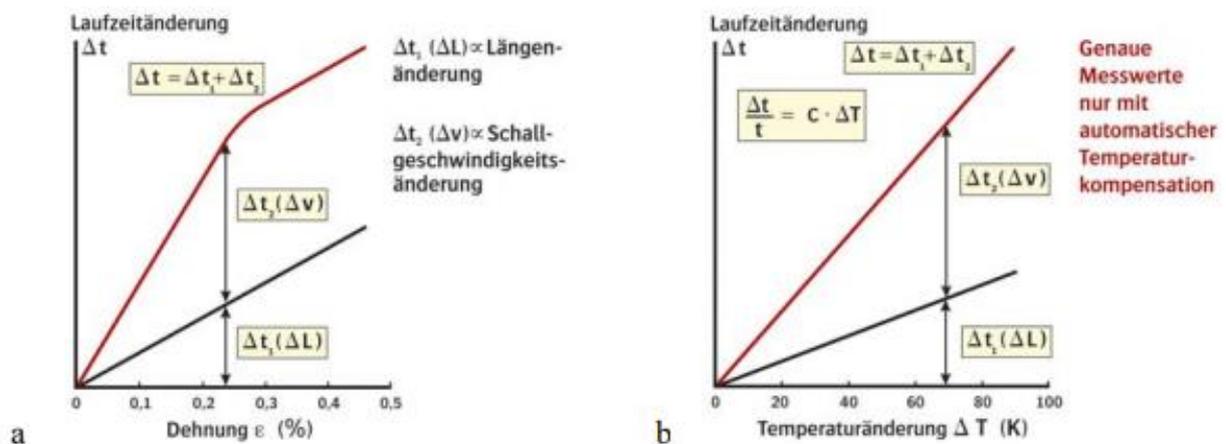


Abbildung 26 - Einfluss der Spannung auf die Schallgeschwindigkeit (a); Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit (b) [Gerstmayr, G.; et. al.]

Um Ultraschallmessungen zuverlässig anwenden zu können, müssen die jeweiligen Endflächen der Schraube plan bearbeitet werden, um eine ebene Auflage und geradlinige Reflexion der Schallwellen zu gewährleisten. Nach der Bearbeitung muss die Schraube im unbelasteten Zustand vermessen werden, um einen Vergleichspunkt für die Messung im belasteten Zustand zu haben.

Die Firma Intellifast GmbH hat zur Optimierung der Ultraschallmessung ein System entwickelt. Hierbei werden auf die Schrauben in 3 Schichten permanente Transducer aufgedampft. Diese umgehen die Notwendigkeit eines Zwischenmediums und optimieren die Messgenauigkeit auf bis zu  $\pm 3\%$ . Zusätzlich werden die Laser verwendet, um auf die Schraube Codes aufzutragen, die von einem entsprechenden Gerät gelesen werden können. Somit werden die Informationen über bspw. Material und Länge im unbelasteten Zustand direkt an das Messsystem übermittelt und das Potenzial für menschliche Fehler bei der Dateneingabe wird minimiert. [Quality Engineering; Intellifast GmbH]

## Längenmessung mittels DMS entlang der Schraubenachse

Durch das Aufbringen der Vorspannkraft wird der Schaft der Schraube gelängt. Somit verringert sich auch der Durchmesser. Um sich diese Eigenschaften zur Erfassung der anliegenden Kräfte zu Nutze zu machen, können DMS am Schraubenschaft angebracht werden. Somit wird die Längung des Schafts aufgenommen und kann mithilfe der Querschnittsfläche des Schafts und den Materialeigenschaften zur Ermittlung der in der Schraube wirkenden Kraft verwendet werden. DMS haben den Vorteil, dass die Messung sehr lange kontinuierlich erfolgen kann, womit nicht nur die Beanspruchung während des Anziehvorgangs aufgezeichnet wird, sondern auch der Verlauf des Vorspannkraftrückgangs infolge von Setzungen. Hierfür können die DMS sowohl am Schaft, als auch im Schaft angebracht werden (Abb. 27). [Schaumann, P; Rutkowski, T.]

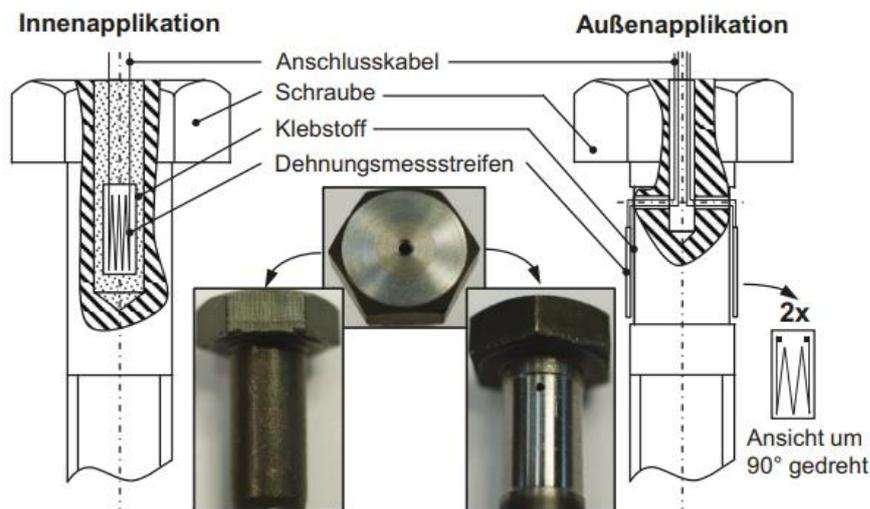


Abbildung 27 - Mögliche Applikation von DMS an Schrauben; links: Innenapplikation mit Zentralbohrung; rechts: Außenapplikation mit Zentral- und Querbohrung [Dümpelmann, C.]

Für die Messung außen am Schaft, ist ein gewindeloser Bereich notwendig. Hieran können die entsprechende Anzahl an DMS angeklebt werden (Abb. 28). Allerdings muss die Verkabelung dieser einen Ausgang in Form einer Bohrung durch den Schraubenkopf erhalten. Der aufwendigen Vorbereitung steht die Möglichkeit zur Verwendung von Originalschrauben und somit die Möglichkeit der Nachrüstung gegenüber.



Abbildung 28 - DMS-Schraube M36 HV zur Messung von Schraubkraft, Biege- und Torsionsmoment [Schaumann, P.; Rutkowski, T.]

Die im Vergleich aufwendigere Methode ist das Aufbringen der DMS in einer Bohrung entlang der Schraubenachse (Abb. 29). Hier entfällt zwar eine Ausgangsbohrung für Kabel, aber das Aufbringen der DMS ist aufgrund der geringen Bohrungsgröße wesentlich aufwendiger. Der Bohrungsdurchmesser sollte unter einem fünftel der Nennggröße der Schraube liegen.

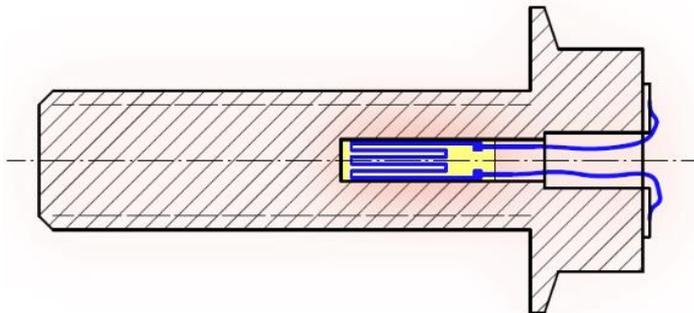


Abbildung 29 - Schematische Darstellung einer Schraube mit DMS in Zylinderform eingesetzt [AMA Digital Networks GmbH; ZSE Electronic Mess-Systeme & Sensortechnik GmbH]

Die Nachrüstung solcher Schrauben wird von der Firma ZSE Electronic Mess-Systeme & Sensortechnik GmbH vertrieben.

### Sensorise SmartScrew

Die Verringerung des Durchmessers in Folge der Längung kann über das Prinzip der Proportionalität der Änderung des elektrischen Widerstands eines Drahtes und der Verformung dessen ermittelt werden. Ein haardünner Draht wird im tiefsten Punkt der Gewindeverzahnung um die Schraube herum gewickelt und mit Kleber gesichert. Durch die Längung der Schraube infolge der Vorspannkraft verringert sich der Durchmesser der Schraube und es erfolgt eine Kompression des Drahtes, sowie eine Verformung, die eine Veränderung des elektrischen Widerstands als Folge hat. Unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Schraube und der Umgebungstemperatur, kann hieraus ein Rückschluss auf die Schraubenkraft folgen (Abb. 30).

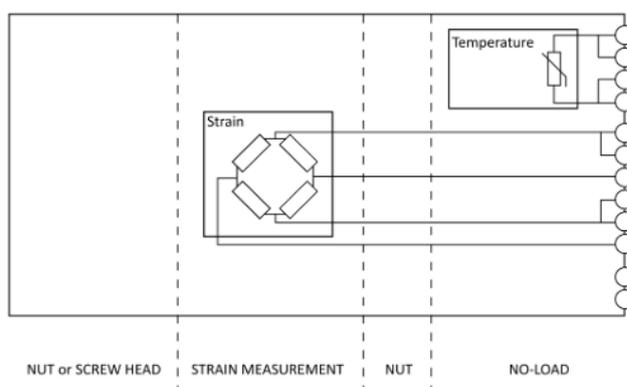


Abbildung 30 - Schematischer Aufbau der Sensorise SmartScrew [Sensorise GmbH]

Aufgrund der existierenden Fertigungstoleranzen muss die Schraube nicht verändert werden, um dem Draht Platz zu bieten. Von Nachteil ist, dass derzeit keine kabellose Datenübertragung möglich ist und somit die Integration eines IP-Steckers in den nicht belasteten Gewindegängen notwendig ist. Dieser schwächt zwar die Schraube nicht, beschränkt aber die Verwendung auf Durchgangsbohrungen (Abb. 31).



Abbildung 31 - Platzierung des IP-Steckers in der Sensorise SmartScrew [Sensorise GmbH]

## DMS am Schraubenkopf

Die aufgebrachte Vorspannkraft hat nicht nur die Längung der Schraube entlang des Schafts zur Folge, sondern auch die Verformung des Schraubenkopfes. Dieser wird durch die Zugkraft „platt“ gezogen, wodurch dieser sich parallel zur Auflagefläche verbreitert. Diese horizontale Verformung lässt sich mit DMS erfassen. Untersucht wurde dieser Zusammenhang durch u.a. die Széchenyi Universität, Ungarn, die Technische Universität Clausthal, sowie dem CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH. [Chorzewski, D.; Hofmann, S. | CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH | Horváth, P.; Tóth, P.]

Die Proportionalität zwischen der Schraubenkraft und der Verformung des Schraubenkopfes wurde von allen Parteien auf einer Vergleichsbasis zwischen FE-Modellen und realen Versuchsergebnissen untersucht und als zufriedenstellend befunden.

Somit können, nachdem der Schraubenkopf spanend bearbeitet auf ein hinreichend genaues Maß gebracht wurde, DMS aufgebracht werden. Abbildung 32 zeigt die Draufsicht auf die Schraube in einer Messeinrichtung mit applizierten linearen DMS. [Chorzewski, D.; Hofmann, S.]

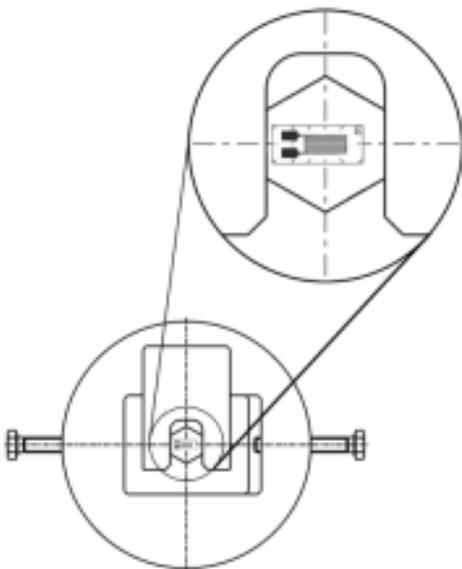


Abbildung 32 - Draufsicht auf eine Messeinrichtung mit einem applizierten linearen DMS [Chorzewski, D.; Hofmann, S.]

Diese Methode hat gegenüber den am Schaft angebrachten DMS den Vorteil, dass keine Bohrungen längs oder quer in den Schaft eingebracht werden mussten und der Aufwand zur Vorbereitung wesentlich geringer ist. Als Nachteil kann das Beschädigungspotenzial der DMS gesehen werden, da diese frei auf dem Kopf aufliegen und somit leicht durch bspw. Anziehergeräte beschädigt werden können.

### **3.3. Sensorintegrierende Maschinenelemente (SiMe)**

Maschinenelemente sind standardisierte Basiselemente des Maschinenbaus, d.h. Elemente mit definierter Gestalt und Auslegung, die nicht weiter zerlegbar sind. SiMe stellen eine Erweiterung dieser in Form von integrierter Sensorik dar. Diese Sensorik kann zur Datenerfassung und -aufbereitung für unterschiedliche prozessrelevante Messaufgaben dienen. Bei der Integration dieser sensorischen und mikroelektronischen Komponenten soll die Gestalt der ursprünglichen Maschinenelemente beibehalten werden, während die Primärfunktion erhalten bleibt und Bauraumneutralität vorliegt. [DFG]

SiMe können in diversen Gebieten zum Einsatz kommen. Bspw. in der Forschung zur direkten Erfassung von Versuchsdaten in den verbauten Komponenten und Elementen aber auch in der Industrie, wie z.B. sensorintegrierte Schrauben in Windkraftanlagen oder Zahnräder in Bergbauanwendungen.

Schwierigkeiten bei der Konzeptionierung und Umsetzung von SiMe sind:

- Bauraumneutralität
- Keine Beeinträchtigung der Primärfunktion
- Datenübertragung
- Energiegewinnung

### **3.4. Anforderungen an die SiMe für schiffstaugliche Anwendungen**

Mögliche Anforderungen an SiMe an Bord von Marineschiffen können aus der „Anforderungsliste – Sensorintegrierende Maschinenelemente in schiffbaulichen Anwendungen“ im Anhang entnommen werden.

Hierbei ist zu beachten, dass diese nur ein Entwurf für eine mögliche Anforderungsliste darstellt und auf Basis einer konkreten SV entworfen wurde. Diese hat bspw. stark erhöhte thermische Anforderungen im Vergleich zu anderen SV. Hierfür ist Abschnitt 4 zu beachten.

## 3.5. SiMe-Produktvorstellung

### 3.5.1. DiaForce®-System

An der Erprobung des in Abschnitt 3.2.2.1 gezeigten Dünnschichtsystems hat unter anderem das Institut für Transport- und Automatisierungstechnik der Leibniz Universität Hannover mit dem Projekt „InUse – Intelligente Unterlegscheibe zur Messung der Kräfte in Schraubenverbindungen“ gearbeitet. Hierbei wurde nachgewiesen, dass das Prinzip der berührungslosen Datenübermittlung der realen Klemmkräfte innerhalb von SV realisierbar ist, es aber noch den Automatisierungsgrad der Fertigung der Teile zu erhöhen, um die Marktreife zu erreichen. [Von Daacke, S.; Overmeyer, L. | phi]

Auch das Fraunhofer Institut selbst hat noch weitere Forschungsschritte unternommen und die „Intelligente Schraubenverbindung Q-Bo®“ entwickelt. Hierbei wurde das DiaForce®-System mit Modulen zum „Energy-Harvesting“ – sprich der Energiegewinnung aus der Umgebung – kombiniert, um eine bis zu 15 Jahre autark agierende Sende- und Messeinheit zu erzeugen. Auch hier ist die Funktion unter gewissen Rahmenbedingungen, wie genügend Licht für Solarzellen, o.ä. nachweisbar, aber noch keine Marktreife realisierbar. [Fraunhofer Institut]

Sollten solche Produkte die Marktreife erlangen, hätten Sie gegenüber konventionellen Mess-Systemen den Vorteil, dass diese lange Zeit autark eingesetzt werden und drahtlos Daten übertragen können, sodass kaum menschliche Präsenz vor Ort notwendig ist. Zudem müssen die Schrauben selbst nicht manipuliert werden, was zu der bestmöglichen Tragfähigkeit der SV beiträgt.

Allerdings setzen solche Systeme die Verwendung einer Unterlegscheibe voraus, was in einigen Anwendungen unerwünscht sein kann. Zudem sind dem System Grenzen gesetzt in Sachen Belastung durch sowohl die auf die Scheibe wirkende Kraft, als auch die Umgebungstemperatur.

Aufgrund des Mangels an vertriebsbereiten Dünnschicht-Mess-Systemen werden diese in diesem Abschnitt nicht weiter betrachtet.

### 3.5.2. SmartBolt®

Die Firma Industrial Indicators produziert in der Nähe von Washington, Maryland, USA ein Produkt, was Sie SmartBolt® nennen. Das Produkt ist laut Hersteller bereits etabliert in Verwendung von Firmen wie General Electric oder der NASA.

Der Sensor macht sich das Prinzip der Längungsmessung mittels in die Schraube eingesetzten Stift zunutze.

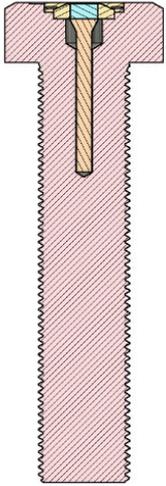


Abbildung 33 - Querschnitt durch die SmartBolt® [Industrial Indicators]

Wie in Abbildung 33 zu sehen, ist in die Schraubenachse in einer Bohrung ein Stift eingelassen. Das obere Ende des Stifts ist mit einem piezochromen Material versehen. Durch die Längung der Schraube verändert sich der Druck auf das Material, wodurch ein Farbwechsel stattfindet. Hierdurch wird am im Schraubenkopf eingelassenen Signalgeber ein Farbsignal ausgegeben, womit die korrekte Vorspannung angezeigt wird (Abb. 34).

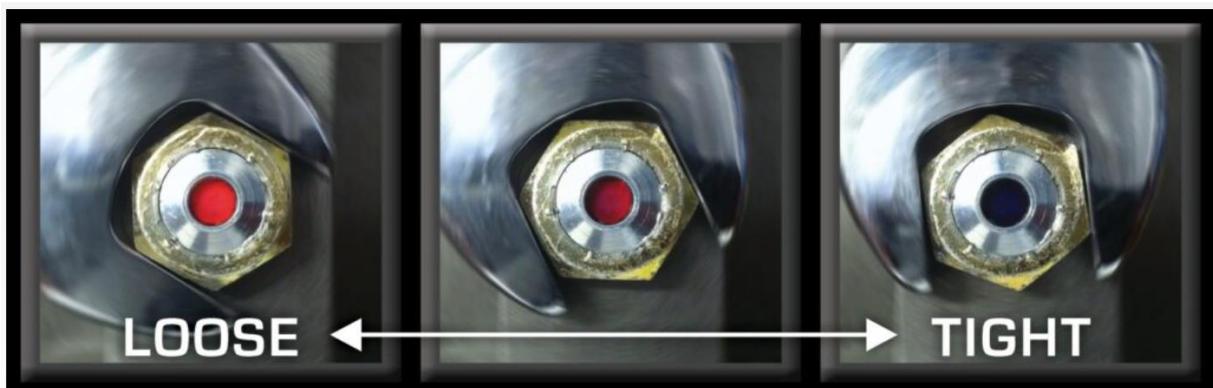


Abbildung 34 - Farbanzeige für die Vorspannkraft [Industrial Indicators]

Hierbei wandelt sich die Farbe des Ausgangssignals in 25% Inkrementen bis zur gewünschten Längung der Schraube (Abb. 35).

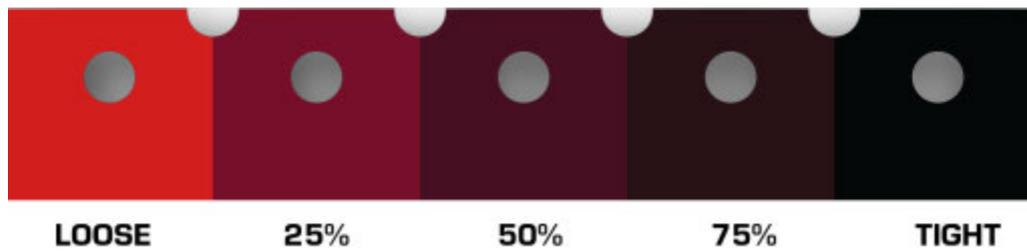


Abbildung 35 - Inkremente der SmartBolt® Farbanzeige [Industrial Indicators]

Die SmartBolts® sind in verschiedenen Sechskant-Ausführungen, Größen zwischen M10 und M64 und in gängigen Festigkeitsklassen erhältlich.

Um eine ausreichende Längung zu gewährleisten, als dass zuverlässig ein Farbsignal ausgegeben werden kann, muss die Belastung der Schraube mit mindestens 30% der maximal zulässigen Schraubenkraft erfolgen.

Da keine Kompensation von Temperaturdifferenzen stattfindet, ist der zulässige Temperaturbereich beschränkt von -20 °C bis +75 °C.

### 3.5.3. InterBolt™

Die Firma Secure Bolting Systems Limited vertreibt unter dem Vertriebsnamen TensionPro unter anderem das Produkt InterBolt™ (Abb. 36; Patentnummer UK00003766056).

[Intellectual Property Office]



Abbildung 36 - Sensor-Einheit des InterBolt™ Systems [Secure Bolting Systems Ltd.]

Der Sensor macht sich das Prinzip der Längenmessung, wie auch die zuvor behandelte SmartBolt®, zunutze.

Hierfür wird in eine Schraube ein Loch mit 4 mm Durchmesser gebohrt. In dieses Loch wird ein Messstift eingesetzt und am Grund des Loches fixiert. Welche Methode für diese Fixierung verwendet wird, ist nicht weiter spezifiziert. Auf den Schraubenkopf wird eine Kappe mit Datentransmitter und LED-Anzeige gesetzt. Darunter befindet sich ein Sensor zur Längenmessung. Hierfür ist eine Mindestdistanz zwischen dem Sensor und dem Stift vorgesehen (Abb. 37).

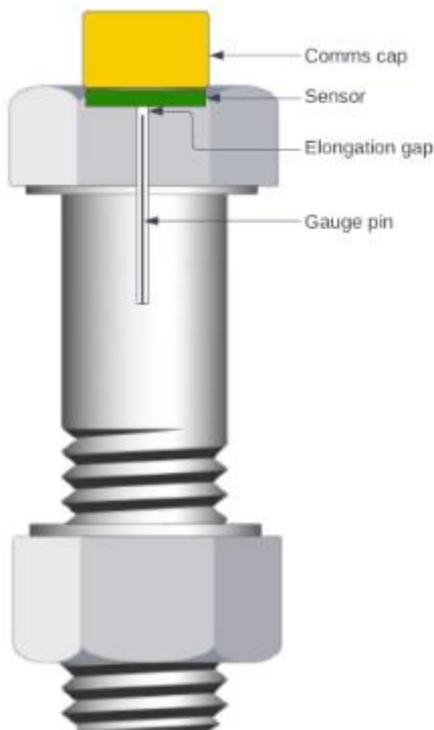


Abbildung 37 - Aufbau des Interbolt Sensors [Sedwell Ltd.]

Die Sensorschrauben sind ab Größe M10 erhältlich. Der Sensor kann auch in durch den Kunden bereitgestellte Schrauben eingesetzt werden. Das System verspricht Messungen mit 95% Genauigkeit. Laut Herstellerangaben können die Sensoren bis zu 1000 g Schockbelastungen verkraften. Die Sensoren werden über das gesamte Belastungsspektrum kalibriert. Um Fehler durch thermische Einflüsse zu verhindern, ist der Sensor mit einem Temperatursensor ausgestattet, womit sowohl die Kalibrierungs-Temperatur festgestellt wird, als auch die Temperatur während der Messung, um diese bei der Berechnung der Längung zu berücksichtigen. Der Sensor ist zertifiziert arbeitsfähig zwischen -10 °C und +50 °C. [Sedwell Ltd.]

Die LED Anzeige der Kommunikationskappe schaltet nach 2 Minuten Inaktivität ab und kann durch einen Magneten wieder „geweckt“ werden. Sie ermöglicht die einfache Erkennung der in der Schraube vorhandenen Kraft anhand der LED-Signale, die bis auf 20 m Entfernung sichtbar sind.

Für eine genauere Überwachung kann der Sensor kabellos Daten an ein Tablet, aber auch einen eigenen Gateway schicken. Hierfür wird sich auf LoRa<sup>®</sup> Kommunikationstechnik von Semtech gestützt. Hiermit ist eine drahtlos Kommunikation über 1 km Distanz möglich und das bei einer Batterie-betriebenen Betriebsdauer von 15 Jahren. Über den Gateway können die Daten über bspw. eine Internetverbindung an einen Computer geschickt werden, womit eine vollständige Remote-Überwachung möglich ist (Abb. 38).



Abbildung 38 - Netzwerkaufbau InterBolt™ [Secure Bolting Systems Ltd.]

### 3.5.4. TensionDisc

TensionPro vertreibt ebenfalls Kraftmessringe unter dem Namen TensionDisc (Abb. 39).



Abbildung 39 - TensionDisc Kraftmessring und Lesegerät [Secure Bolting Systems Ltd.]

Die Einordnung von Kraftmessringen in SiMe ist fragwürdig. Es kann argumentiert werden, dass es sich im Endeffekt um eine Unterlegscheibe handelt, die einen integrierten Kraftsensor hat. Zugleich verändert die Komponente aber die Charakteristika der SV wesentlich im Vergleich zu eine Unterlegscheibe.

Auf Basis der Anforderungsliste sind konventionelle Kraftmessringe ohnehin nicht geeignet, da diese eine Kabelverbindung benötigen.

Das Produkt TensionDisc umgeht dieses Problem allerdings mit einer Infrarot-Sendeeinheit (Abb. 40). Dies ist der Grund, weshalb es hier aufgeführt wird.



Abbildung 40 - Kurzstrecken-Übertragung von Messdaten des TensionDisc-Systems mittels Infrarottechnik [Secure Bolting Systems Ltd.]

Das System ist einsetzbar zwischen  $-40\text{ °C}$  und  $+80\text{ °C}$  und benötigt mindestens 10% der Vorspannkraft für eine genaue Messung. Es wird in Größen aufwärts von M20 vertrieben. Der Kraftmessring in Größe M20 kann Kräfte bis zu 166 kN aufnehmen, wobei die Auflösung auf 2 kN Genauigkeit beschränkt ist. Mit nur 14 mm Dicke ist der Kraftmessring verglichen mit anderen Produkten relativ dünn.

### 3.6. Gegenüberstellung

In Anbetracht des benötigten Bauraums, sowie der Verschlüsselung der Datenübertragung ist das Dünnschicht-System des Fraunhofer Instituts ideal geeignet für die gewünschten Anwendungen. Aufgrund der mangelnden Marktreife wird es aber auch hier aus der weiteren Betrachtung entnommen.

Die TensionDisc von TensionPro ist die nächstbeste Alternative, um eine Messung anhand einer Kraftmessung und nicht einer Längenmessung an der Schraube durchzuführen. Das System ist als solches hervorragend geeignet, um eine ausreichende Restklemmkraft festzustellen. Allerdings setzt es voraus, dass ein Mitarbeiter mitsamt dem Lesegerät vor Ort ist, um die vorliegende Kraft auslesen zu können. Selbst mit Infrarotübertragung ist dies nur auf wenige Centimeter Distanz möglich. Somit ist auch eine dauerhafte Überwachung über lange Zeiträume nicht möglich. Somit ist dieses Produkt in vielerlei Hinsicht ungeeignet.

In Sachen Messung der Schraubenlängung ist die SmartBolt® ein weitaus günstigeres Produkt als die InterBolt™. Dies kann den im Anhang hinterlegten E-Mails und Datenblättern entnommen werden. Eine einzige SmartBolt® kostet in der Ausführung M20 10.9 etwa 20 €. Die Mindestbestellmenge liegt zwar bei 10 Stück, womit der Preis bei der Mindestmenge ungefähr dem für einen InterBolt™-Sensor entspricht (ca. 200 €). Allerdings dürften beim InterBolt™-System noch Kosten für die Sendeinheiten, Tablets, etc. hinzugefügt werden.

Somit stellt die SmartBolt® zwar die weitaus günstigere Alternative zur InterBolt™ dar. Allerdings bietet das Produkt keinerlei Möglichkeit zur Erfassung tatsächlicher Messwerte. Es lässt sich erkennen, wann die entsprechende Vorspannkraft erreicht wurde und es kann durch optische Kontrolle vor Ort auch über lange Zeit sichergestellt werden, dass diese aufrecht erhalten wird, aber einen Messwert zu erhalten ist nicht möglich. Dies nimmt zwar das Risiko des Datendiebstahls, erfordert aber auch Präsenz vor Ort. Somit ist auch dieses Produkt ungeeignet.

Das InterBolt™-System, wenn auch weitaus kostspieliger, bietet die Möglichkeit, sowohl vor Ort optisch angezeigt die Vorspannung beim Anziehen zu kontrollieren, als auch auf einem Tablet den tatsächlichen Messwert einzusehen. Zusätzlich ist die Datenübertragung an einen PC möglich, womit die Langzeitüberwachung ohne die Notwendigkeit der Kontrolle vor Ort möglich ist. Somit ist – von derzeit am Markt verfügbaren Systemen – dieses System am besten geeignet für den Einsatz an Bord von Marineschiffen. Die gegebenen Temperatureinschränkungen verhindern den Einsatz in stark erwärmten Umgebungen. Dies hat sich allerdings bei allen Mess-Systemen als Einschränkung erwiesen.

Um eine bessere Vergleichbarkeit der SiMe-Produkte zu schaffen, folgt eine tabellarische Übersicht.

<b>Produkt</b> <b>Kriterium</b>	<b>DiaForce®-System</b>	<b>SmartBolt</b>	<b>Interbolt™</b>	<b>Tension-Disc</b>
<b>Messprinzip</b>	PE	Geheim, vermutlich Piezochromie [Google Patents   Naitove, M.   Przibram, K.]	Geheim, vermutlich Elektromagnetisch	Magneto-elektrisch
<b>Montageort</b>	Unter Schraubenkopf oder Mutter, als Unterlegscheibe	Wie eine herkömmliche Schraube	Wie eine herkömmliche Schraube	Unter Schraubenkopf oder Mutter
<b>Messwertverarbeitung</b>	Elektronisch, kabellose Übertragung über bspw. RFID	Ablesen der optischen Anzeige	Elektronisch, kabellose Übertragung	Elektronisch, Übertragung per Kabel oder Infrarot
<b>Hauptvorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringer Bauraum</li> <li>• Kaum Veränderung der SV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Stromversorgung nötig</li> <li>• Günstig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute Datenverarbeitung</li> <li>• Fernüberwachung möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Misst Klemmkraft</li> <li>• Langlebigkeit</li> </ul>
<b>Hauptnachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teuer</li> <li>• Nicht marktreif</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein direkter Messwert</li> <li>• Keine Fernüberwachung möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teures System</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kabel notwendig</li> <li>• Verändert SV</li> </ul>
<b>Preis</b>	Unbekannt	Ca. 20 € pro Stk. Gr. M 20	Ca. 200 € pro Stk. Gr. M20	Unbekannt

Tabelle 3 - Übersicht über ausgewählte SiMe-Produkte

## **4. Situations- und Problemanalyse – SV an Bord von Marineschiffen**

### **4.1. SV mit hohem Risiko für Funktionsverlust**

Das System Schiff beinhaltet enorm viele Schraubenverbindungen. Nicht alle dieser SV können und sollen mittels SiMe überwacht werden. Daher sollten die Schraubenverbindungen nach Relevanz der Funktion für die Gesamtfunktion des Systems Schiff betrachtet werden, sowie dem jeweiligen Risiko für Funktionsverlust.

Als Beispiel können Flanschverbindungen herangezogen werden. Wenn diese mit Druck beaufschlagt werden, erhöht sich das Risiko für Funktionsverlust. Wenn die SV zusätzlich noch starken thermischen Schwankungen ausgesetzt ist, erhöht sich das Risiko weiter. Nun muss aber noch die Relevanz der SV betrachtet werden. Kraftstoffleitungen der Antriebsmotoren sind zwingend funktionsfähig zu halten, da der Funktionsverlust die Funktionstüchtigkeit des Systems Schiff stark einschränkt. Somit lässt sich sagen, dass bspw. alle SV von Leitungen, die wesentliche Systeme des Schiffs mit bspw. Kraftstoff oder Kühlwasser versorgen, geeignete Kandidaten für den Einbau eines Überwachungssystems sind.

Ein weiterer wesentlicher Einfluss auf den Funktionsverlust von SV sind Vibrationen. Schiffe und somit SV an Bord von Schiffen sind oftmals wesentlichen Vibrationen, und auch Schockbelastungen ausgesetzt. Dementsprechend sind auch SV die wichtige Komponenten des Schiffs befestigen geeignete Kandidaten für den Einbau eines Überwachungssystems.

Als Beispiel hierfür kann die Befestigung des Rahmens der Stromerzeugungsaggregate auf dem Schiffsfundament herangezogen werden.

### **4.2. Nutzenanalyse – Einbau von SiMe**

Der Einbau von SiMe hat als Ziel als relevant erkannte SV zu überwachen. Hierbei soll eine Messung der in der SV wirkenden Kräfte stattfinden, als dass jeder Zeit feststellbar ist, welche Kraft in der SV vorliegt. Diese soll mit hinterlegten Soll-Werten abgeglichen werden können, so dass ein Absinken unter einen Mindestwert sofort angezeigt wird. Des Weiteren ist erwünscht, den Kräfteverlust über lange Zeit aufzunehmen und zu speichern, sodass auch für baugleiche oder vergleichbare SV der ein Wartungsplan erstellt werden kann. Dies hat als Ziel nicht alle relevanten SV überwachen zu müssen, sondern nur einzelne der jeweiligen Bauart.

### **4.3. Auswahl und Analyse geeigneter Schraubenverbindungen**

Anhand der vorangegangenen Analyse der SV mit Risiko für Funktionsverlust, bietet es sich an eine Auswahl anhand der Belastung aufgrund thermischer- und Vibrations-Einflüsse zu treffen. Ein weiterer Faktor in der Entscheidungsfindung ist die Relevanz der Komponente für das Gesamtsystem.

Es bietet sich an bei Betrachtung des Gesamtsystems Schiff einen der vorhandenen Verbrennungsmotoren zu betrachten. Auf Basis der gesammelten Erfahrung im Handwerks- und Ingeniersbetrieb an Bord, wird folgend die Komponente Stromerzeugungsaggregat, auch EdiMot genannt, betrachtet.

Ein Verbrennungsmotor benötigt nicht nur eine zuverlässige Zufuhr von Kraftstoff und Kühlwasser. Auch die Entsorgung der Abgase muss gesichert funktionieren, um die korrekten Strömungsverhältnisse zu gewährleisten. Dies kann bei KFZ-Saugmotoren weniger wichtig sein. Bei Schiffsaggregaten ist der Abgasstrang allerdings von größerer Bedeutung. Oftmals sind die Dieselmotoren als Abgasturbomotor-Variante ausgeführt. Somit ist der Abgasfluss ein wesentlicher Bestandteil der Leistungserzeugung im Aggregat.

Des Weiteren ist der Einbauort des Aggregats von einem Leck im Abgasstrang gefährdet. Meist ist dieser ein geschlossener Raum, der im Marineschiffbau aktiv be- und entlüftet wird.

EdiMots werden oftmals entweder als „ungekapseltes“ oder gekapseltes“ Aggregat verbaut. Dies bezieht sich lediglich darauf, ob das Aggregat in einem eigenen Gehäuse sitzt. Dies kann die Folgen eines Abgaslecks mindern, falls es im Innern der Kapsel auftritt, da diese Lüftungstechnisch keine direkte Verbindung zu den restlichen Räumlichkeiten besitzt.

Bei einer ungekapselten Variante kann ein Abgasleck dafür sorgen, dass der Aufbau der Zitadelle misslingt. Der Begriff Zitadelle beschreibt Bereiche an Bord eines Schiffes, die bei Bedarf gasdicht gemacht werden können. Hierfür muss sichergestellt sein, dass jegliche Zu- und Abfuhr von Luft nur durch kontrollierte Wege erfolgt. Somit wird ein leichter Überdruck von ca. 4 mbar erzeugt, wodurch bei Gefahren durch gefährliche Gase im Außenbereich die Crew im Inneren geschützt ist. Somit kann ein Leck im Abgasstrang sowohl den Druckaufbau verhindern, als auch die Luft im Innern der Zitadelle verunreinigen.

Daher bietet es sich an unter anderem Flanschverbindungen im Abgasstrang zu betrachten.

Als Beispiel dient ein Flansch mit Nenndurchmesser 300 mm, der mit 20 Schrauben Größe M20 Festigkeitsklasse 10.9 angezogen wird. Hierbei soll ein Anziehdrehmoment von 291 Nm verwendet werden (Abb. 41).

Rohteilabmessungen

Nennweite	Di(mm)	Da(mm)	DIk(mm)	DI(mm)	Di1(mm)	Da1(mm)	b	Schraube	Anz	Anzugsmoment
32	39	111	90	11	49	69,0 <sup>+0,2</sup>	15	M10	8	37Nm
50	57,5	129,5	108,5	11	67,5	87,5 <sup>+0,2</sup>	15	M10	10	37Nm
80	89,5	161	140	11	99,5	119,5 <sup>+0,2</sup>	15	M10	12	37Nm
100	108,5	181	160	11	118,5	138,5 <sup>+0,2</sup>	15	M10	14	37Nm
150	169,5	251	223	13,5	179,5	199,5	17,5	M12	14	65Nm
200	219	310	276,5	17,5	229	249 <sup>+0,2</sup>	20	M16	12	154Nm
300	325	435	393	22	341	361 <sup>+0,2</sup>	20	M20	20	291Nm
900	916	1052	1006	26	940	970 <sup>+0,2</sup>	25	M24	48	509Nm

Die Anzugsmomente sind für geschmierte Reibflächen berechnet!

Die Flansche müssen nach Bearbeitung mindestens folgende Dicke (b) aufweisen.

NW	32	50	80	100	150	200	300	900
b	13,5	13,5	13,5	13,5	16	18	17	22

Abbildung 41 - Tabelle der Flanschverbindungen [Anhang D2]

Das genannte Drehmoment gilt unter der Voraussetzung geschmierter Reibflächen.

Die Aufgabe der Flanschverbindung ist die Verbindung von Rohrsegmenten und zeitgleich die Abdichtung gegen das durchströmende Medium. In diesem Fall ist für diesen Zweck eine Nut für eine Dichtung vorgesehen (Abb. 42).

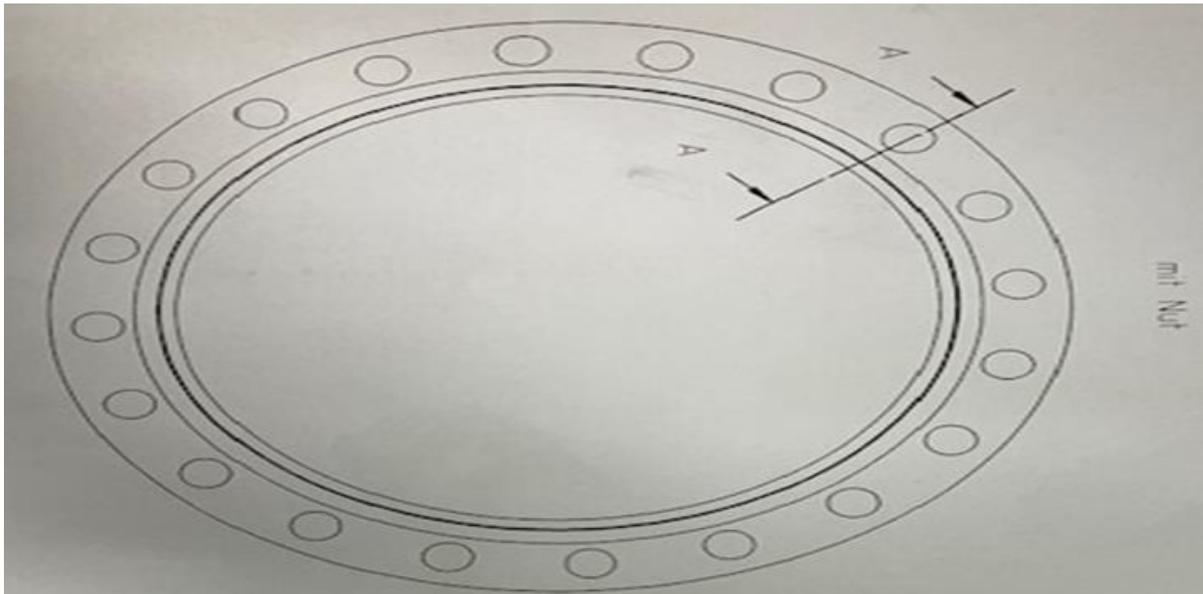


Abbildung 42 - Draufsicht auf einen Flansch mit Dichtnut [Anhang D1]

Auf Basis dieser Informationen kann die SV in einer Übersicht aus SV, entnommen aus VDI 2230, eingeordnet werden (Abb. 43). Somit liegt Nummer 5 vor. Eine rotationssymmetrische Mehrschraubenverbindung in Form eines Flansches mit Dichtring.

Einschraubenverbindungen		Mehrschraubenverbindungen						Schraubenverb.	
zentrisch oder exzentrisch		in einer Ebene		rotationssymmetrisch			symmetrisch	asymmetrisch	Schraubenachsen
Zylinder oder prismatischer Körper	Balken	Balken	Kreisplatte	Flansch mit Dichtring	Flansch mit Flächenauflage	rechteckige Mehrschraubenverbind.	Mehrschraubenverbindung		
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	Geometrie in Ebene	
								Belastung relevante Lasten	
$M_z, M_x, M_y, F_z, F_x, F_y$	$F_y, M_z, F_x$	$F_y, M_z, F_x$	$p$	$F_y, M_z, M_x, M_y$	$M_y, F_y, M_z, M_x$	$M_y, F_y, M_z, M_x, F_z$	$M_y, F_y, M_z, M_x, F_z$	Kräfte und Momente	
Axialkraft $F_A$ Querkraft $F_Q$ Betriebsmoment $M_B$	Axialkraft $F_A$ Querkraft $F_Q$ Moment in der Balkenhauptebene $M_z$	Axialkraft $F_A$ Querkraft $F_Q$ Moment in der Balkenhauptebene $M_z$	Innendruck $p$	Axialkraft $F_A$ (Rohrkraft) Betriebsmoment $M_B$ Innendruck $p$	Axialkraft $F_A$ Torsionsmoment $M_T$ Betriebsmoment $M_B$	Axialkraft $F_A$ Querkraft $F_Q$ Torsionsmoment $M_T$ Betriebsmoment $M_B$	Axialkraft $F_A$ Querkraft $F_Q$ Torsionsmoment $M_T$ Betriebsmoment $M_B$		
VDI 2230	bedingt nach VDI 2230		DIN EN 1591 AD 2000-Merkblatt B7	bedingt nach VDI 2230				Berechnung	
Balkenbiegetheorie mit Zusatzbedingungen		Plattentheorie		bedingt nach Ersatzmodellen			Finite Elemente Methode (FEM)		

Abbildung 43 - Übersicht über SV [VDI 2230, 2015]

Durch das Anziehen muss eine ausreichend große Restklemmkraft bestehen bleiben, als dass die Dichtwirkung gewährleistet wird. Daher kann an dieser SV die Messung und Überwachung der Kräfte als sinnvoll eingestuft werden.

Aufgrund der hohen Temperaturen der Abgase der Aggregate sind die Rohrsegmente zu weiten Teilen isoliert (Abb. 44):

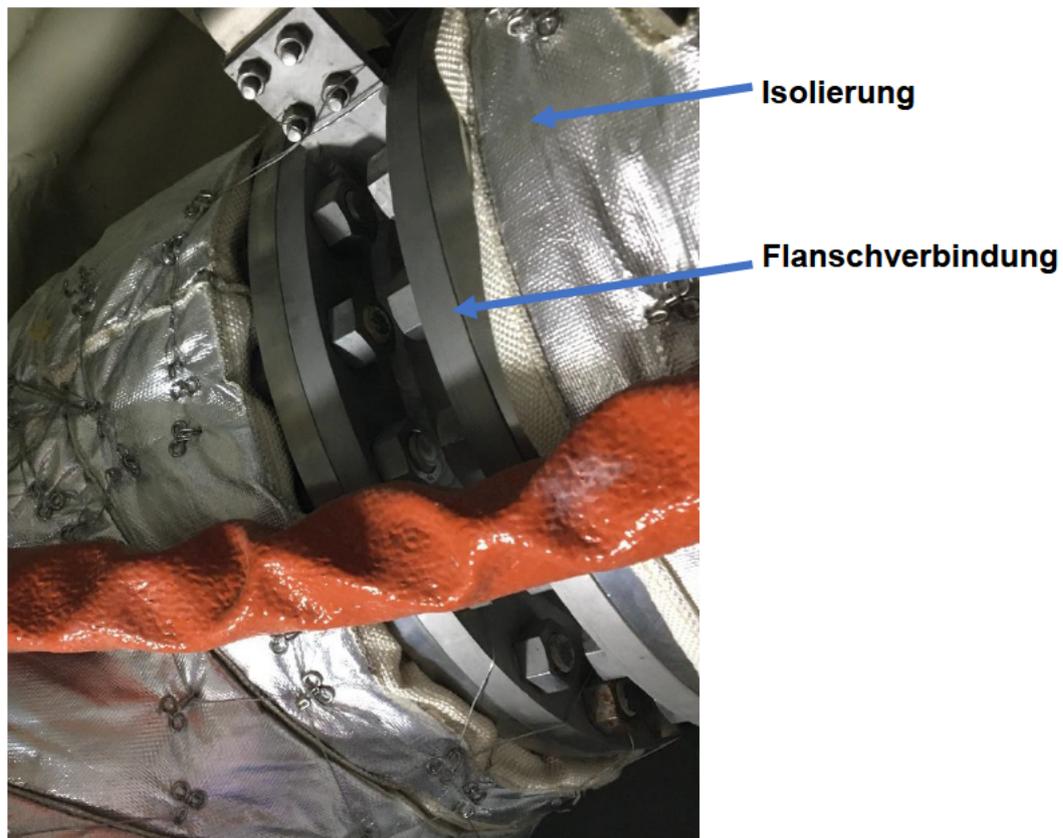


Abbildung 44 - Isolierter Abgasstrang [Anhang D1]

Die Verschraubungen der Flansche sind meistens zugänglich. Allerdings erwärmen die heißen Abgase die SV bis auf 400 °C. Somit sind bisher erhältliche Sensoren wie die InterBolt™ für diese Anwendung nicht geeignet.

Nun bietet sich an, eine vibrationsbelastete SV an der gleichen Kategorie von Aggregat zu betrachten.

EDiMots sind meist schwingungsgelagert auf einem eigenen Rahmen verbaut. Dieser Rahmen wird mit dem Schiffsfundament verschraubt (Abb. 45).

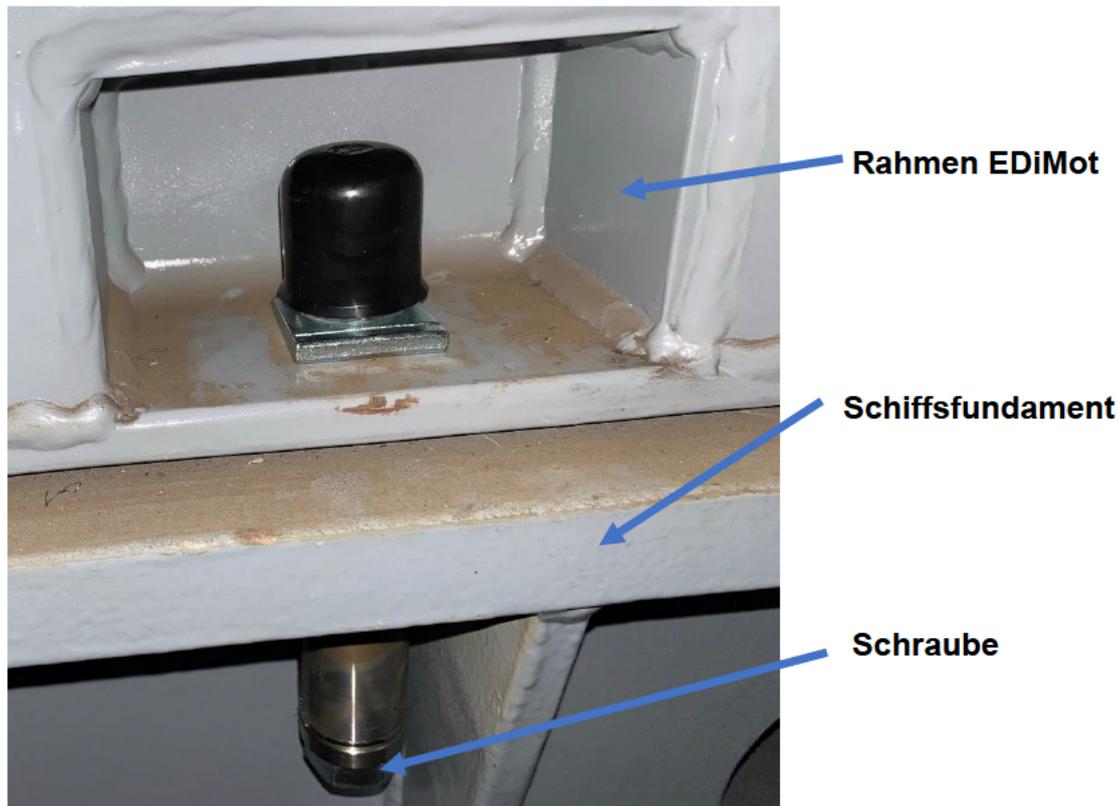


Abbildung 45 - Verschraubung EDiMot-Rahmen [Anhang D2]

Eben diese Verschraubungen erleiden durch die im Schiff vorhandenen Vibrationen einen starken Vibrationseintrag, weswegen diese ebenfalls vom Funktionsverlust gefährdet sind.

Im Falle des Funktionsverlusts einer einzelnen Verschraubung am Rahmen ist die potenzielle Konsequenz weitaus weniger beeinträchtigend, als bei einer dichtenden Flanschverbindung. Bei der Flanschverbindung kann eine einzige gelöste SV zum Verlust der Dichtfunktion führen. Die Folgen dessen wurden zuvor behandelt. Bei der Verschraubung des Rahmens wiederum ist eine gelöste SV kein Grund für sofortigen Funktionsverlust, da diese auch mit den restlichen SV vorübergehend Stand halten wird.

Die Ausführung der SV wurde mit Expansionshülsen gewählt, da der Einsatz dieser die Verwendung einer längeren Schraube und somit eine größere Klemmlänge ermöglichen. Somit kann eine starke Dehnung in der Schraube erzeugt werden, wodurch eine große Sicherheit gegen selbsttätiges Losdrehen aufgrund von Vibrations- und Schockbelastung erzeugt wird (Abb. 46).

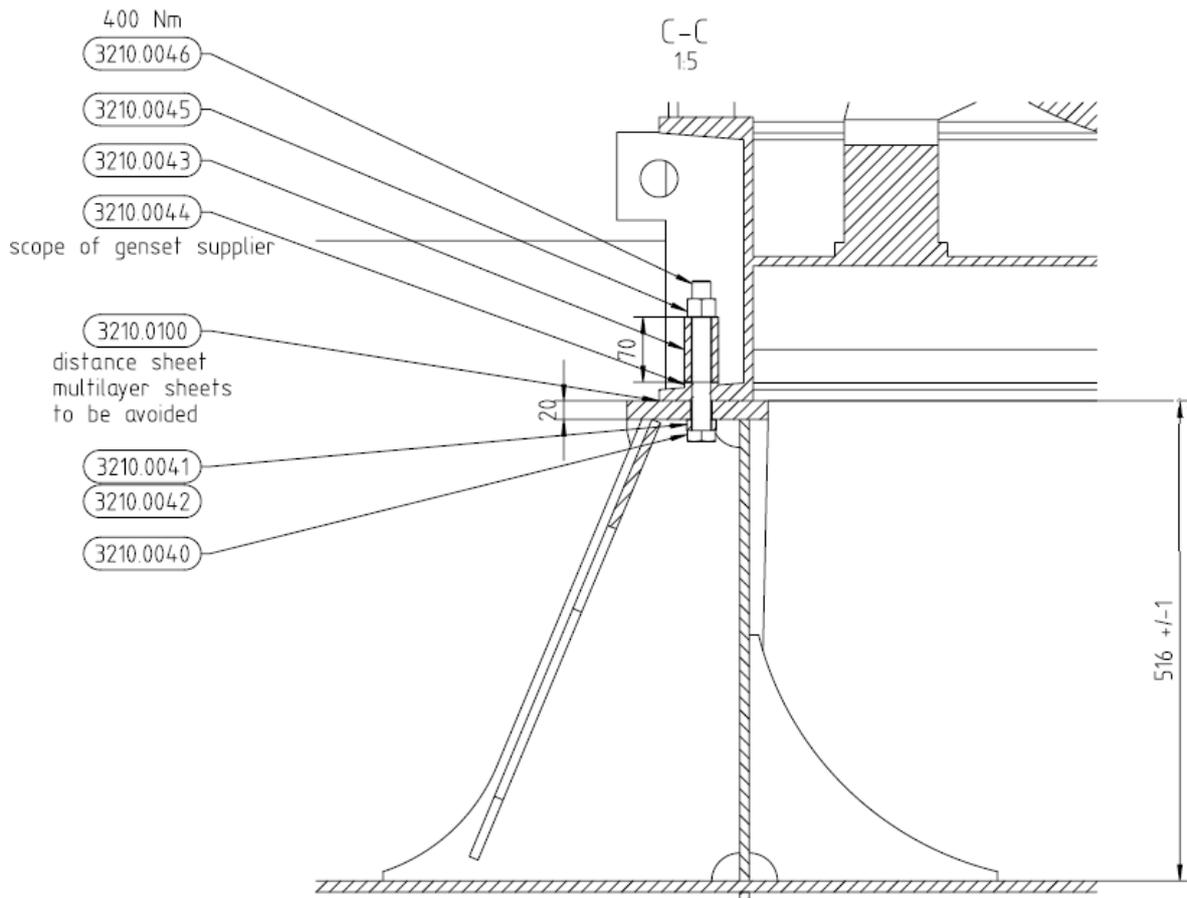


Abbildung 46 - Technische Zeichnung Verschraubung EDiMot [Zeichnung NVL B. V. & Co. KG]

Des Weiteren erzeugt eine hohe aufgebrachte Vorspannkraft Sicherheit gegen starken Vorspannkraftverlust durch zyklische thermische Belastung. Untersuchungen haben ergeben, dass der erste thermische Zyklus den verhältnismäßig größten Vorspannkraftverlust erzeugt und dass eine höhere Vorspannkraft die Verluste verringert. [Eraliev, O.; et. al.]

Diese Verschraubungen sind anhand der VDI 2230 und Angaben der DNV ausgelegt worden. Die überschlägige Berechnung ist im Anhang B1 zu finden.

Im Fall eines Aggregats mit 700 kW Nennleistung und 6.000 kg Gewicht sind 10 M20 Schrauben vorgesehen. Diese haben eine Gewindelänge von 140 mm und werden (bei geöltem Gewinde) mit 400 Nm Drehmoment angezogen. Dies gewährleistet eine überschlägige Schraubenlänge überhalb der vom DNV geforderten 0,25 mm Längung.

Aufgrund dieser starken Längung, der Größe der Schrauben und der Vorspannkraft, die die maximal aufnehmbare Kraft der InterBolt™ nicht übersteigt, sind diese SV auf den ersten Blick sehr gut geeignet für den Einsatz eines SiMe-Mess-Systems.

Um sicherzustellen, dass das InterBolt™-System geeignet ist, müssen die Betriebstemperaturen der SV ermittelt werden. Da diese nicht an Wärmequellen positioniert

sind, kann zur Ermittlung der Betriebstemperatur die Angabe zu Umweltbedingungen aus der technischen Anlage zum Vertrag – kurz TAzV – eines bestehenden Marineneubauprojektes herangezogen werden. In dieser TAzV ist die Lufttemperatur im Innenbereich definiert mit 0 °C bis +45 °C. Somit liegt der vorgegebene Temperaturbereich innerhalb des zertifizierten Bereichs des InterBolt™-Systems.

Der Veranschaulichung der Verspannungsverhältnisse dient das in Abbildung 47 dargestellte Verspannungsschaubild. Dies wurde überschlägig für die zuvor beschriebene SV berechnet und gezeichnet.

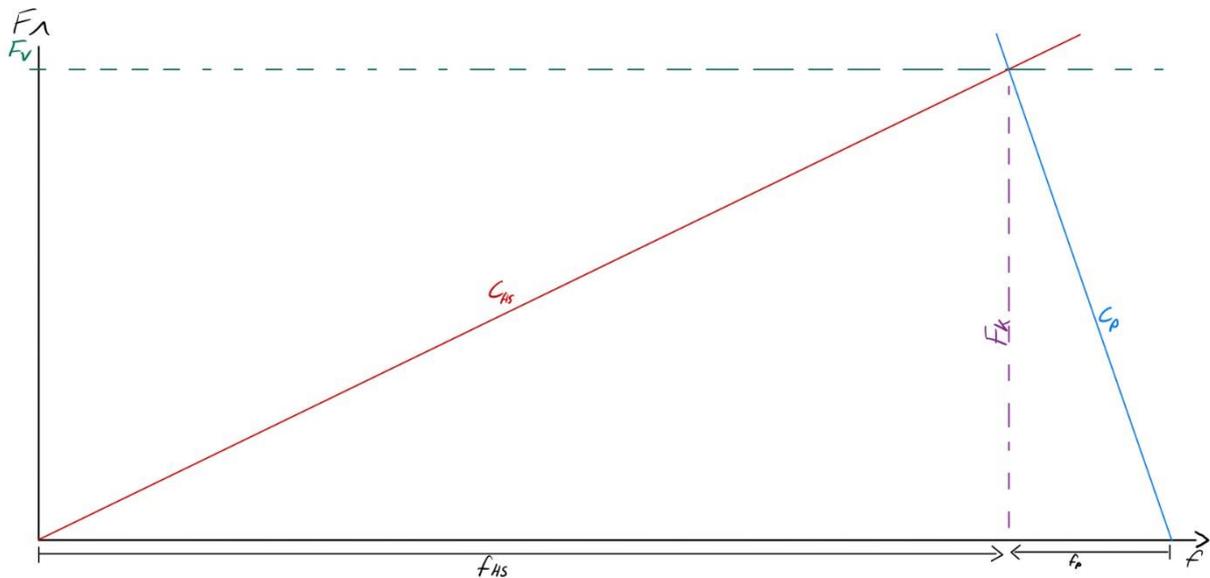


Abbildung 47 - Verspannungsschaubild Befestigung EDiMot-Rahmen

Für die Berechnung wurden folgende Annahmen getroffen:

- E-Modul aller Bauteile:  $E = 210 \frac{kN}{mm^2}$
- Länge der Schraube  $l_s = 140 \text{ mm}$
- Klemmlänge  $l_k = 40 \text{ mm}$
- Nicht eingegrenzter Druckkegel in den verspannten Teilen
- Durchgangsbohrung  $\varnothing 22 \text{ mm}$
- Kopfdurchmesser am Schraubenkopf  $30 \text{ mm}$
- Keine Betriebskraftbelastung
- Belastung nur durch Schockfall
  - Da die Schockrichtung in der Auslegung nicht definiert ist, wird der Schockfall vernachlässigt.

## Berechnung der Nachgiebigkeiten bzw. Steifigkeiten

Allgemein berechnet sich die Nachgiebigkeit einer Komponente wie folgt:

$$\delta = \frac{l}{E \cdot A} \quad (4.1)$$

Unter der Annahme, dass jegliche Kräfte außer der Montagevorspannkraft die verspannten Teile entlasten und die Schraube, Expansionshülse und Mutter belasten, werden die Nachgiebigkeiten all der belasteten Teile zusammengerechnet.

Für die Nachgiebigkeit der Hülse ergibt sich anhand Abbildung 48:

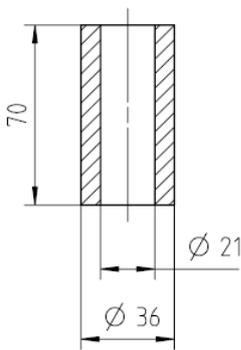


Abbildung 48 - Expansionshülse Maße [Zeichnung NVL B. V. & Co. KG]

$$\delta_H = \frac{l_H}{E \cdot A_H} = \frac{70 \text{ mm}}{210 \text{ kN} \cdot ((18 \text{ mm})^2 - (10,5 \text{ mm})^2) \cdot \pi} \approx 4,964 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mm}}{\text{kN}} \quad (4.2)$$

Die Schraube muss zur Berechnung der Nachgiebigkeit in mehrere Teile unterteilt werden, da sich die geometrischen Parameter entlang der Achse ändern (Abb. 49). Somit entsteht eine Reihenschaltung unterschiedlicher Nachgiebigkeiten.

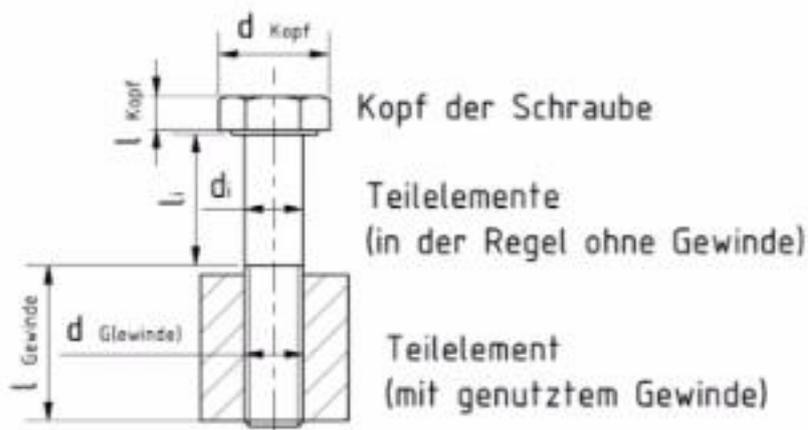


Abbildung 49 - Beispielhafte Unterteilung der Schraube in Bereiche zur Nachgiebigkeits-Berechnung [examio GmbH]

Mit der allgemeinen Formel für die Nachgiebigkeit ergibt sich für die Reihenschaltung mit der Nachgiebigkeit des Schraubenschafts  $\delta_{SS}$ , der Nachgiebigkeit des Schraubenkopfs  $\delta_K$  und der Nachgiebigkeit des Gewindeteils  $\delta_{GM}$ :

$$\delta_S = \delta_{SS} + \delta_K + \delta_{GM} \quad (4.3)$$

Für den Schraubenschaft folgt aus den Geometriedaten der SV:

$$\delta_{SS} = \frac{l_{SS}}{E \cdot A_{SS}} = \frac{2 \text{ mm}}{210 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (16,933 \text{ mm})^2} \approx 4,23 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Für den Schraubenkopf folgt:

$$\delta_K = \frac{l_k}{E \cdot A_N} = \frac{0,5 \cdot d}{E \cdot \frac{\pi}{4} d^2} = \frac{0,5 \cdot 20 \text{ mm}}{210 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (20 \text{ mm})^2} \approx 1,52 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Der Gewindeanteil setzt sich wie folgt zusammen aus der Nachgiebigkeit des eingeschraubten Gewindeteils  $\delta_G$  und der Nachgiebigkeit der Mutter  $\delta_M$ :

$$\delta_{GM} = \delta_G + \delta_M$$

Für den eingeschraubten Gewindeteil folgt:

$$\delta_G = \frac{l_G}{E \cdot A_{d_3}} = \frac{0,5 \cdot d}{210 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_3^2} = \frac{0,5 \cdot 20 \text{ mm}}{210 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (19,633 \text{ mm})^2} \approx 2,12 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Für die Nachgiebigkeit der Mutter ergibt sich:

$$\delta_M = \frac{l_M}{E \cdot A_N} = \frac{0,4 \cdot d}{E \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2} = \frac{0,4 \cdot 20 \text{ mm}}{210 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (20 \text{ mm})^2} \approx 1,21 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Somit ergibt sich die gesamte Nachgiebigkeit der Schraube zu:

$$\delta_S \approx 5,27 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Wird die Nachgiebigkeit der Schraube nun mit der der Hülse verrechnet ergibt sich eine Gesamtnachgiebigkeit der belasteten Teile von:

$$\delta_{SH} \approx 1,023 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Die Nachgiebigkeit der verspannten Teile bzw. Platten berechnet sich nach:

$$\delta_P = \frac{l_k}{E \cdot A_{ers}}$$

Unter der Annahme des nicht begrenzten Druckkegels ergibt sich der Ersatzquerschnitt zu:

$$A_{ers} = \frac{\pi \cdot (d_w^2 - d_h^2)}{4} + \frac{\pi}{8} \cdot d_w \cdot l_k \cdot [(x_2 + 1)^2 - 1]$$

Mit:

$$x_2 = \sqrt[3]{\frac{l_k \cdot d_w}{(l_k + d_w)^2}}$$

Ergibt sich für die Nachgiebigkeit der Platten:

$$\delta_P \approx 1,73 \cdot 10^{-4} \frac{mm}{kN}$$

Auf Basis dieser Nachgiebigkeiten können über den Zusammenhang

$$c = \frac{1}{\delta}$$

Die Steifigkeiten der Komponenten gewonnen werden. Über die aufgebrachte Vorspannkraft lässt sich somit das Verspannungsschaubild zeichnen.

Das Schaubild im Montagezustand genügt der Darstellung unter der Annahme, dass Betriebslasten wie folgt auftreten.

- Vereinzelt starke Belastungen durch auftretende Schock-Ereignisse.
- Schwingungen erzeugt durch Schwingungen des Aggregats und sich aus dem Schiffsfundament fortpflanzenden Körperschall-Vibrationen

Auftretende Schwingungen können als überlagerte Oberschwingungen auf die Schraubenkraft betrachtet werden. Diese zusätzliche Belastung ist vernachlässigbar aufgrund der erwarteten geringen Amplitude dieser.

Eine Schockbelastung ist in diesem Fall weitaus kritischer zu betrachten, als Schwingungen. Hierbei ist von Vorteil, dass je länger und/oder nachgiebiger die eingesetzte Schraube ist, desto geringer die zusätzliche Schraubenkraft  $F_{SA}$  im Falle einer Schockbelastung sein wird.

---

## Berechnung der temperaturbedingten Vorspannkraftänderung

Von Interesse ist oftmals die Veränderung der Vorspannkraft durch thermische Einflüsse.

Hierfür ist es notwendig die thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu kennen:

- typischer Schiffbaustahl:  $\alpha_P \approx 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$
- Schrauben aus Material 1.7709:  $\alpha_S \approx 11,6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$

Unter Berücksichtigung der aus der TAzV vorgegebenen Umweltbedingungen und der Annahme, dass sich unter diesen Bedingungen der E-Modul nicht wesentlich ändert, sowie keiner wesentlichen Temperaturdifferenz zwischen Platten und Schrauben folgt für die Änderung der Vorspannkraft:

$$\Delta F_V = F_{VRT} - F_{VT} = \frac{\alpha_S \cdot \Delta T - \alpha_P \cdot \Delta T}{\frac{1}{E \cdot A_S} + \frac{1}{E \cdot A_{ers}}} \approx -706,674 \text{ N}$$

Da  $\Delta F_V < 0$  und  $\alpha_S < \alpha_P$ , folgt eine Vorspannkraftsteigerung infolge von Temperaturänderung.

Diese Steigerung der Vorspannkraft stellt eine Erhöhung um weniger als 0,8% dar. Aufgrund dieser geringen Differenz und des Maßstabs im Verspannungsschaubild wird hier auf das Einzeichnen des Zustands bei erhöhter Temperatur verzichtet.

Die Schraube würde ihre Streckgrenze erst bei über 200 kN erreichen, weshalb die zusätzliche Belastung durch die Temperaturerhöhung unbedenklich ist. Auch im Schockfall bei einer Schocklast von 15 g bleibt eine ausreichende Schocksicherheit erhalten.

## **5. Konzeption von Messung und Überwachung der Schraubenkraft**

Anhand der vorangegangenen Analyse der Schraubenverbindung der EdiMots bietet es sich an die in der SV vorhandenen Kräfte anhand der Längung der Schraube festzustellen. Dies rührt aus der Auslegung der Schraube auf Dehnung.

### **5.1. Verwendung von SiMe**

Zur Messung der Vorspannkraft, sowie der kontinuierlichen Überwachung der Schraubenkraft bietet sich das Produkt InterBolt™ an. Hiermit können die nötigen Kräfte übertragen und zeitgleich gemessen werden, ohne dass der Bauraum stark eingeschränkt wird, oder die Auswahl des Anziehverfahrens beeinträchtigt wird. Weiterhin wird auch die Temperatur der Schraube gemessen, womit die Genauigkeit der Messung bei 95% angegeben wird.

### **5.2. Auswahl des Anziehverfahrens**

Die Verwendung des InterBolt™-Produkts bringt den Vorteil mit sich, dass es nicht notwendig ist teure Anziehgeräte zu verwenden, um beim Anziehen die Vorspannkraft, bzw. das Drehmoment mitgeteilt zu bekommen. Es kann jedes beliebige Verfahren zum Anziehen verwendet werden, da über das Tablet des InterBolt™-Systems in Echtzeit die in der Schraube vorhandene Kraft abgelesen werden kann.

Sollte genügend Raum vorhanden sein, bietet es sich an ein ziehendes Verfahren zu wählen, da somit ein Rückfedern der elastischen Verdrehung der Schraube vermieden wird.

Allerdings war in Abbildung 45 bereits sichtbar, dass die Platzverhältnisse in der Realität oftmals nicht der Erwartung entsprechen und bspw. nur einen konventionellen Drehmomentschlüssel zulassen. Durch die Verwendung des InterBolt™-Systems ist aber auch das kein Problem.

## 6. Aufbau eines Messaufbaus

Idealerweise wird bei der Messung von Kräften in Schraubenverbindungen die Messung vor Ort durchgeführt. Wenn dies nicht möglich ist, sollte bestenfalls ein Originalteil verwendet werden.

Somit bieten sich folgende Möglichkeiten an:

### 6.1. Messung an Bord

Wenn der Ausrüstungs- und Testbetrieb an Bord die Installation von mehreren InterBolt™-Schrauben zulässt, kann der direkte Einsatz an Bord sinnvoll sein. So können Messergebnisse direkt ohne jegliche Prüfstände gewonnen werden. Die Belastungen auf die SV sind zudem ohne jegliche Abweichungen vom realen Einsatz verfügbar.

Allerdings kann der direkte Einbau an Bord auch Nachteile mit sich bringen. Die Sensoren können leichter beschädigt werden als in einer kontrollierten Umgebung. Des Weiteren kann die Verbindung zu einer Datensammelstelle, bspw. einem Computer der Firma leicht ausfallen, sollte das Schiff sich auf zum Beispiel einer Probefahrt befinden. Die Stabilität der Datenverbindung mag abhängig von der verwendeten Sendart sein, dennoch bringt eine größere Distanz zwischen Sender und Empfänger, sowie die Umweltbedingungen auf See, ein größeres Risiko für Verbindungsverlust mit sich.

Mit angemessenem Risikomanagement und Verarbeitungsprotokollen sind dies mit Sicherheit Schwierigkeiten, die umgangen werden können durch beispielsweise eine Datenspeicherung an Bord, die nach Rückkehr in den Hafen erst ausgelesen wird.

### 6.2. Messung auf einem Prüfstand

Die zweite Möglichkeit stellt der Aufbau eines Prüfstands mit Originalteilen dar.

Hierbei muss sich entschieden werden, ob man ein gesamtes Aggregat-Gestell verwendet, oder nur einen Teil. Mit Sicherheit ist es nicht möglich bei Verwendung eines ganzen Gestells

auch ein Original-Aggregat aufgebaut zu haben. Dementsprechend müsste ein entsprechendes Gewicht verwendet werden, um den Originalzustand abzubilden.

Ein externer Prüfaufbau hat den Nachteil, dass er wesentlich kostspieliger ist, als der Einbau von Sensoren in einem bestehenden System. Zudem ist die Nachbildung von Umwelteinflüssen und Belastungen niemals zu 100% exakt gleich der realen Einbausituation.

Von Vorteil wiederum ist die Möglichkeit den Aufbau in einer kontrollierten Umgebung bspw. auf Schock- und Vibrationswiderstandsfähigkeit zu testen. Genauso können auch Belastungen überhalb der realen Bedingungen kontrolliert erzeugt werden, um die Grenzen des Systems zu testen.

### **6.2.1. Dynamische Erweiterung mit simulierten Schwingungseinflüssen**

Ein Beispiel der verstärkten Belastung auf einem Prüfstand ist die Simulation von Schwingungen bzw. Vibrationen. So kann in sehr kurzer Zeit das Verhalten der Schädigungsmechanismen wie dem selbsttätigen Losdrehen beobachtet werden. Der Einsatz an Bord hingegen könnte für diese Ergebnisse über mehrere Jahre hinweg notwendig sein. Aus diesem Grund ist heutzutage der Junker-Test eine weit verbreitete Test-Methode, um festzustellen, wie stark sich Schrauben bei Vibrationen losdrehen und welchen Einfluss die Vorspannkraft darauf hat.

### **6.2.2. Erweiterung mit Möglichkeit des Heat-Cyclings**

Des Weiteren bietet ein Prüfstand die Möglichkeit die SV und das Mess-System über die an Bord geltenden Umweltbedingungen hinaus zu testen. Dies könnte in Form von thermischen Belastungszyklen stattfinden. Hierbei steht es offen, ob man lediglich die SV stärker testen möchte, oder auch die angegebene Maximaltemperatur der Sensoren.

Besonders die Beobachtung des ersten thermischen Zyklus ist sinnvoll. In Versuchen wurde festgestellt, dass die erste thermische Belastung den größten Vorspannkraftverlust erzeugt.

## **7. Verarbeitung und Verwendung Versuchsergebnisse**

Abgesehen von der Extremfallanalyse sowohl der SV, als auch der Sensoren, können die empirisch gewonnenen Messdaten folgende Verwendung finden.

### **7.1. Gemessene Vorspannkraft während der Montage der Schraubenverbindung**

Die Messwerte aus den Anziehvorgängen können verwendet werden, um einerseits grundlegende Qualitätskontrolle zu betreiben. Die Kenntnis darüber, dass eine SV entsprechend angezogen wurde vermeidet Fehlfunktionen aufgrund von menschlichen Arbeitsfehlern.

Des Weiteren können so Daten über die Relation von Anzugsdrehmoment und -verfahren, sowie der daraus resultierenden Vorspannkraft gewonnen werden. Mit diesen Daten können die Vorgaben für die Montage von SV angepasst werden, um eine ausreichende Vorspannkraft auch ohne Messung sicherzustellen. Als Resultat dessen kann gegebenenfalls der Einbau von kleineren Schrauben folgen, was eine Kostenersparnis darstellt.

### **7.2. Kontinuierliche Schraubenkraftmessung**

Durch die kontinuierliche Messung der Schraubenkraft können Daten über das selbsttätige Losdrehen der SV mit ihrer Lebensdauer gewonnen werden. Hier kann als vorläufige Auslegung das Ergebnis aus entsprechenden Vibrationstests dienen, aber das Sammeln von Daten während des Betriebs sollte als Bestätigung der Auslegung folgen.

Somit kann einerseits sichergestellt werden, dass wichtige SV immer eine zur Funktionserfüllung ausreichende Schraubenkraft aufweisen. Bei Wartung des Schiffs können diese sofort lokalisiert und nachgezogen werden, sollte der Bedarf bestehen. Andererseits können die Daten über das Losdrehen der SV dazu dienen einen Wartungsplan zu erstellen, damit auch SV, die nicht überwacht werden, eine zugeschriebene sichere Lebensdauer erhalten und regelmäßig kontrolliert werden.

## 8. Fazit

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit fand eine Analyse von Schrauben und den auftretenden Kräften in Schraubenverbindungen statt. Im Anschluss wurden Messverfahren zur Erfassung dieser Kräfte betrachtet und analysiert, welche dieser Verfahren in Form von sensorintegrierenden Maschinenelementen einsetzbar sind. Der Einsatz dieser sensorintegrierenden Maschinenelemente wurde anhand von Beispielen aus dem Marineschiffbau, sowohl von Schraubenverbindungen als auch Umweltbedingungen, auf seine Umsetzbarkeit analysiert.

Im Laufe dieser Analyse wurde sowohl Fachlektüre, als auch die Produktdaten der Hersteller verwendet. Die Bewertung der Einsetzbarkeit von sensorintegrierenden Maschinenelementen im Marineschiffbau hat allerdings nur anhand der recherchierten Kenntnisse über Schraubenverbindungen, Messverfahren und Produkten stattgefunden.

Die Bestätigung der Annahmen anhand von experimentell ermittelten Versuchs- oder Simulationsergebnissen blieb auf Grund des zeitlichen Umfangs, sowie dem in der Arbeit gesetzten Fokus, aus.

## 9. Ausblick: Einbindung in schiffsinterne Überwachungssysteme

Eine Bestätigung der in dieser Arbeit verfassten Aussagen stellt ein wünschenswert Ziel in der Zukunft dar.

Wenn die Verwendbarkeit und Sinnhaftigkeit der Messdaten nachgewiesen werden kann, bietet es sich an, die Überwachung der Schraubenverbindungen von einem externen Ort zu entkoppeln und in die schiffsinterne Überwachungsstruktur zu integrieren. Somit ist es möglich, dass die Besatzung jederzeit eigenständig die Schraubenverbindungen kontrollieren und warten kann.

## Quellenverzeichnis

### Literaturquellen

Baumer GmbH: "Funktionsweise von Kraftsensoren", Datum unbekannt, [https://www.baumer.com/de/de/service-support/funktionsweise/funktionsweise-von-kraftsensoren/a/Know-how\\_function\\_force\\_sensor#:~:text=Zu%20den%20Produkten,Wie%20misst%20man%20Kraft%3F,und%20eine%20ausreichend%20steife%20Auflagefl%C3%A4che.](https://www.baumer.com/de/de/service-support/funktionsweise/funktionsweise-von-kraftsensoren/a/Know-how_function_force_sensor#:~:text=Zu%20den%20Produkten,Wie%20misst%20man%20Kraft%3F,und%20eine%20ausreichend%20steife%20Auflagefl%C3%A4che.), abgerufen 13.02.2024

Chorzewski, D.; Hofmann, S., "Messverfahren zur Ermittlung der Schraubenvorspannung mittels Dehnungsmessstreifen", 2015, [https://www.imw.tu-clausthal.de/fileadmin/IMW/documents/Institutsmitteilungen/2015/Messverfahren\\_zur\\_Ermittlung\\_der\\_Schraubenvorspannung\\_mittels\\_Dehnungsmessstreifen.pdf](https://www.imw.tu-clausthal.de/fileadmin/IMW/documents/Institutsmitteilungen/2015/Messverfahren_zur_Ermittlung_der_Schraubenvorspannung_mittels_Dehnungsmessstreifen.pdf), abgerufen 15.02.2024

CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, "Sicher ist sicher - Messung von Vorspannkraften in Schraubverbindungen", 16.04.2017, <https://www.cismst.de/news-2017-04-16/#:~:text=Gemessen%20werden%20kann%20die%20Vorspannkraft,einen%20zus%C3%A4tzlich%20integrierten%20RFID%2DTransponder.>, abgerufen 15.02.2024

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Datum unbekannt, <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/466650813?context=projekt&task=showDetail&id=466650813&>, <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/441853410?context=projekt&task=showDetail&id=441853410&>, abgerufen 10.02.2024

Eraliev, O.; et. al.: "Experimental investigation on self-lossening of a bolted joint under cyclical temperature changes", hrsg. von SageJournals, 12.08.2021, abgerufen 23.02.2024

Fraunhofer Institut: Auszug aus dem Jahresbericht 2022 "Intelligente Schraubverbindung Q-BoÖ", 2023, [https://www.ist.fraunhofer.de/content/dam/ist/de/documents/jb/2022/jb2022\\_de\\_intelligente-schraubverbindung-qbo.pdf](https://www.ist.fraunhofer.de/content/dam/ist/de/documents/jb/2022/jb2022_de_intelligente-schraubverbindung-qbo.pdf), abgerufen 14.02.2024

Google Patents, Patentanmeldung Fraunhofer Institut für Piezochromes Material, <https://patents.google.com/patent/DE102009035363>, abgerufen 03.03.2024

Horváth, P.; Tóth, P.: "Nondestructive Bolt Preload Measurement", hrsg. von Athens Journal of Technology and Engineering, Volume 5, Issue 2 - Pages 91-110, 06.2018, <https://www.athensjournals.gr/technology/2018-5-2-1-Horvath.pdf>, abgerufen 15.02.2024

Hottinger Brüel & Kjaer GmbH: "Messen von Kräften im Kraftnebenschluss", Datum unbekannt, <https://www.hbm.com/de/2955/messen-von-kraeften-im-kraftnebenschluss/>, abgerufen 11.02.2024

Intellectual Property Office, 15.03.2022, <https://trademarks.ipo.gov.uk/ipo-tmcase/page/Results/1/UK00003766056>, abgerufen 22.02.2024

Intellifast GmbH, Datum unbekannt, <https://www.intellifast.de/>, abgerufen 12.02.2024

Kistler Group: "Piezo vs. DMS", Datum unbekannt, <https://www.kistler.com/DE/de/piezo-vs.-dms/C00000145>, abgerufen 13.03.2024

Naitove, M.: "Tension Indicating Smart Bolts make mounting safer, more efficient", für Plastics Technology, 01.11.2019, <https://www.ptonline.com/articles/tension-indicating-smart-bolts-make-mold-mounting-safer-more-efficient>, abgerufen 03.03.2024

Produktionstechnik Hannover informiert (phi), 10.2011, <https://phi-hannover.de/wp-content/uploads/2021/06/phi-2011-2.pdf>, S. 16, abgerufen 14.02.2024

Przibram, K.: "Über Piezochromie (Farbänderung durch Druck) bei natürlichen Mineralien", 25.04.1929, hrsg. von Institut für Radiumforschung, [https://www.zobodat.at/pdf/SBAWW\\_138\\_2a\\_0263-0269.pdf](https://www.zobodat.at/pdf/SBAWW_138_2a_0263-0269.pdf), abgerufen 03.03.2024

Quality Engineering: "Identifikation von Permanent-Sensor-Schrauben mit Cognex Dataman 100", 04.06.2012, <https://quality-engineering.industrie.de/allgemein/fuer-permanente-kraft-im-wind/>, Abruf am 14.02.2024

Schaumann, P.; Rutkowski, T.: Forschungsbericht "Messung von erzielten Vorspannkräften unter realen Montagebedingungen", hrsg. von Fraunhofer IRB Verlag, 13.03.2006, abgerufen 14.02.2024

Sedwell Ltd., Datum unbekannt, <https://interbolt.co.uk/interbolt-system/interbolt/>, abgerufen 22.02.2024

Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI 2230 Blatt 1, "Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen", 2015

Von Daacke, S.; Overmeyer, L.: "InUse - Intelligente Unterlegscheibe zur Messung der Kräfte in Schraubverbindungen", hrsg. von Logistics Journal, 2013, [https://www.logistics-journal.de/archive/proceedings/2013/3782/vdaacke\\_2013wgtl.pdf](https://www.logistics-journal.de/archive/proceedings/2013/3782/vdaacke_2013wgtl.pdf), abgerufen 14.02.2024

Wittel, H. et. al. Roloff/Matek Maschinenelemente, 24. Auflage, 2019

Wohlfahrt, H.; et. al.: Dubbel "Bauteilverbindungen", hrsg. von Springer Verlag GmbH Deutschland, 2019

## Abbildungsquellen

Abb . Nr.:	Quelle
1	VDI 2230 Blatt 1, "Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen", S. 22, 2015
2	VDI 2230 Blatt 1, "Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen", S. 22, 2015
3	Wittel, H.; et. al.: "Roloff/Matek Maschinenelemente", S. 260, 24. Auflage, 2019
4	VDI 2230 Blatt 1, "Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen", S. 22, 2015
5	Kloss-Grote, B.: Skript „Konstruktion B – Schraubenverbindungen“, S. 82, Rev. H, Datum unbekannt
6	Schaumann, P.; Rutkowski, T.: Forschungsbericht "Messung von erzielten Vorspannkräften unter realen Montagebedingungen", hrsg. von Fraunhofer IRB Verlag, S. 12, 13.03.2006, abgerufen 14.02.2024
7	Schaumann, P.; Rutkowski, T.: Forschungsbericht "Messung von erzielten Vorspannkräften unter realen Montagebedingungen", hrsg. von Fraunhofer IRB Verlag, S. 15, 13.03.2006, abgerufen 14.02.2024
8	Schaumann, P.; Rutkowski, T.: Forschungsbericht "Messung von erzielten Vorspannkräften unter realen Montagebedingungen", hrsg. von Fraunhofer IRB Verlag, S. 14, 13.03.2006, abgerufen 14.02.2024
9	VDI 2230 Blatt 1, "Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen", S. 79, 2015
10	VDI 2230 Blatt 1, "Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen", S. 78, 2015

Abb . Nr.:	Quelle
11	Dümpelmann, C.: Dissertation "Erfassung der Strukturintegrität durch Messung der zeitabhängigen Vorspannkraft in Schraubenverbindungen", hrsg. von Universitätsverlag Siegen, S. 24, 2020, abgerufen 13.02.2024
12	VDI 2230 Blatt 1, "Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen", S. 72, 2015
13	Schweizer, A.: "Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagenbau", 02.12.2022, <a href="https://www.schweizer-fn.de/maschinenelemente/schraube/schraubenverbindung.php#klemmkraft_axialkraft">https://www.schweizer-fn.de/maschinenelemente/schraube/schraubenverbindung.php#klemmkraft_axialkraft</a> , abgerufen 14.02.2024
14	Gerstmayr, G.; et. al.: "Erfassung von Vorspannkraften in Schraubverbänden mittels Ultraschall", Datum unbekannt, <a href="https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/1016861/Erfassung_von_Vorspannkraften_in_Schraubverbindungen_mittels_Ultraschall.pdf">https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/1016861/Erfassung_von_Vorspannkraften_in_Schraubverbindungen_mittels_Ultraschall.pdf</a> , S. 5, abgerufen 14.02.2024
15	Eigene Darstellung
16	Baumer GmbH: "Funktionsweise von Kraftsensoren", Datum unbekannt, <a href="https://www.baumer.com/de/de/service-support/funktionsweise/funktionsweise-von-kraftsensoren/a/Know-how_function_force_sensor#:~:text=Zu%20den%20Produkten,Wie%20misst%20man%20Kraft%3F,und%20eine%20ausreichend%20steife%20Auflagefl%C3%A4che.">https://www.baumer.com/de/de/service-support/funktionsweise/funktionsweise-von-kraftsensoren/a/Know-how_function_force_sensor#:~:text=Zu%20den%20Produkten,Wie%20misst%20man%20Kraft%3F,und%20eine%20ausreichend%20steife%20Auflagefl%C3%A4che.</a> , abgerufen 13.02.2024
17	Baumer GmbH: "Kraftmessung mit Dehnungssensoren", Datum unbekannt, <a href="https://www.baumer.com/medias/__secure__/Baumer_Force-measurement-with-strain-sensors_DE_20211129.pdf?mediaPK=9034419929118">https://www.baumer.com/medias/__secure__/Baumer_Force-measurement-with-strain-sensors_DE_20211129.pdf?mediaPK=9034419929118</a> , abgerufen 13.02.2024
18	Baumer GmbH: "Kraftmessung mit Dehnungssensoren", Datum unbekannt, <a href="https://www.baumer.com/medias/__secure__/Baumer_Force-measurement-with-strain-sensors_DE_20211129.pdf?mediaPK=9034419929118">https://www.baumer.com/medias/__secure__/Baumer_Force-measurement-with-strain-sensors_DE_20211129.pdf?mediaPK=9034419929118</a> , abgerufen 13.02.2024
19	Kistler Group: "Piezo vs. DMS", Datum unbekannt, <a href="https://www.kistler.com/DE/de/piezo-vs.-dms/C00000145">https://www.kistler.com/DE/de/piezo-vs.-dms/C00000145</a> , abgerufen 13.03.2024

Abb . Nr.:	Quelle
20	Kistler Group: "Piezo vs. DMS", Datum unbekannt, <a href="https://www.kistler.com/DE/de/piezo-vs.-dms/C00000145">https://www.kistler.com/DE/de/piezo-vs.-dms/C00000145</a> , abgerufen 13.03.2024
21	Hottinger Brüel & Kjaer GmbH: "Messen von Kräften im Kraftnebenschluss", Datum unbekannt, <a href="https://www.hbm.com/de/2955/messen-von-kraeften-im-kraftnebenschluss/">https://www.hbm.com/de/2955/messen-von-kraeften-im-kraftnebenschluss/</a> , abgerufen 11.02.2024
22	Fraunhofer Institut: Auszug aus dem Jahresbericht 2022 "Intelligente Schraubverbindung Q-Bo <sup>®</sup> ", 2023, <a href="https://www.ist.fraunhofer.de/content/dam/ist/de/documents/jb/2022/jb2022_de_intelligente-schraubverbindung-qbo.pdf">https://www.ist.fraunhofer.de/content/dam/ist/de/documents/jb/2022/jb2022_de_intelligente-schraubverbindung-qbo.pdf</a> , abgerufen 14.02.2024
23	Von Daacke, S.; Overmeyer, L.: "InUse - Intelligente Unterlegscheibe zur Messung der Kräfte in Schraubverbindungen", hrsg. von Logistics Journal, 2013, <a href="https://www.logistics-journal.de/archive/proceedings/2013/3782/vdaacke_2013wgtl.pdf">https://www.logistics-journal.de/archive/proceedings/2013/3782/vdaacke_2013wgtl.pdf</a> , abgerufen 14.02.2024
24	Schaumann, P.; Rutkowski, T.: Forschungsbericht "Messung von erzielten Vorspannkräften unter realen Montagebedingungen", hrsg. von Fraunhofer IRB Verlag, S. 24, 13.03.2006, abgerufen 13.02.2024
25	Gerstmayr, G.; et. al.: "Erfassung von Vorspannkräften in Schraubverbänden mittels Ultraschall", Datum unbekannt, <a href="https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/1016861/Erfassung_von_Vorspannkräften_in_Schraubverbänden_mittels_Ultraschall.pdf">https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/1016861/Erfassung_von_Vorspannkräften_in_Schraubverbänden_mittels_Ultraschall.pdf</a> , S. 3, abgerufen 11.02.2024
26	Gerstmayr, G.; et. al.: "Erfassung von Vorspannkräften in Schraubverbänden mittels Ultraschall", Datum unbekannt, <a href="https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/1016861/Erfassung_von_Vorspannkräften_in_Schraubverbänden_mittels_Ultraschall.pdf">https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/1016861/Erfassung_von_Vorspannkräften_in_Schraubverbänden_mittels_Ultraschall.pdf</a> , S. 8, abgerufen 12.02.2024
27	Dümpelmann, C.: Dissertation "Erfassung der Strukturintegrität durch Messung der zeitabhängigen Vorspannkraft in Schraubenverbindungen", hrsg. von Universitätsverlag Siegen, S. 8, 2020, abgerufen 14.02.2024

Abb . Nr.:	Quelle
28	Schaumann, P.; Rutkowski, T.: Forschungsbericht "Messung von erzielten Vorspannkräften unter realen Montagebedingungen", hrsg. von Fraunhofer IRB Verlag , S. 21, 13.03.2006, abgerufen 14.02.2024
29	AMA Digital Networks GmbH, "Messschraube mit DMS zur Bestimmung von Axialkräften", Datum unbekannt, <a href="https://www.messweb.de/sensorik/messschraube-mit-dms-zur-bestimmung-von-axialkraeften">https://www.messweb.de/sensorik/messschraube-mit-dms-zur-bestimmung-von-axialkraeften</a> ; ZSE Electronic Mess-Systeme & Sensortechnik GmbH, Datum unbekannt, <a href="https://www.zse.de/sensoren-aufnehmer/dehnungsmessstreifen/allgemeine-messungen/dms-zur-dehnungsmessung-in-bolzen?utm_source=mw&amp;utm_medium=content&amp;utm_campaign=2010DMSBOLZEN">https://www.zse.de/sensoren-aufnehmer/dehnungsmessstreifen/allgemeine-messungen/dms-zur-dehnungsmessung-in-bolzen?utm_source=mw&amp;utm_medium=content&amp;utm_campaign=2010DMSBOLZEN</a> , abgerufen 14.02.2024
30	Sensorise GmbH, Datum unbekannt, <a href="https://sensorise.de/solutions/smartscrew/">https://sensorise.de/solutions/smartscrew/</a> , abgerufen 08.02.2024
31	Sensorise GmbH, Datum unbekannt, <a href="https://sensorise.de/solutions/smartscrew/">https://sensorise.de/solutions/smartscrew/</a> , abgerufen 08.02.2024
32	Chorzewski, D.; Hofmann, S., "Messverfahren zur Ermittlung der Schraubenvorspannung mittels Dehnungsmessstreifen", 2015, <a href="https://www.imw.tu-clausthal.de/fileadmin/IMW/documents/Institutsmitteilungen/2015/Messverfahren_zur_Ermittlung_der_Schraubenvorspannung_mittels_Dehnungsmessstreifen.pdf">https://www.imw.tu-clausthal.de/fileadmin/IMW/documents/Institutsmitteilungen/2015/Messverfahren_zur_Ermittlung_der_Schraubenvorspannung_mittels_Dehnungsmessstreifen.pdf</a> , S. 4, abgerufen 15.02.2024
33	Industrial Indicators, Datum unbekannt, <a href="https://smartbolts.com/how-it-works">https://smartbolts.com/how-it-works</a> , abgerufen 16.02.2024
34	Industrial Indicators, Datum unbekannt, <a href="https://smartbolts.com/how-it-works">https://smartbolts.com/how-it-works</a> , abgerufen 16.02.2024
35	Industrial Indicators, Datum unbekannt, <a href="https://smartbolts.com/how-it-works">https://smartbolts.com/how-it-works</a> , abgerufen 16.02.2024
36	Secure Bolting Systems Ltd., Datum unbekannt, <a href="https://www.tensionpro.co.uk/products/interbolt/">https://www.tensionpro.co.uk/products/interbolt/</a> , abgerufen 22.02.2024

Abb. Nr.:	Quelle
37	Sedwell Ltd., Datum unbekannt, <a href="https://interbolt.co.uk/interbolt-system/interbolt/">https://interbolt.co.uk/interbolt-system/interbolt/</a> , abgerufen 22.02.2024
38	Secure Bolting Systems Ltd., Datum unbekannt, <a href="https://www.tensionpro.co.uk/datasheets/DS-3000%20InterBolt.pdf">https://www.tensionpro.co.uk/datasheets/DS-3000%20InterBolt.pdf</a> , abgerufen 22.02.2024
39	Secure Bolting Systems Ltd., Datum unbekannt, <a href="https://www.tensionpro.co.uk/datasheets/DS-2500%20TensionDisc.pdf">https://www.tensionpro.co.uk/datasheets/DS-2500%20TensionDisc.pdf</a> , abgerufen 22.02.2024
40	Secure Bolting Systems Ltd., Datum unbekannt, <a href="https://www.tensionpro.co.uk/datasheets/DS-2500%20TensionDisc.pdf">https://www.tensionpro.co.uk/datasheets/DS-2500%20TensionDisc.pdf</a> , abgerufen 22.02.2024
41	Anhang D1
42	VDI 2230 Blatt 1, "Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen", S. 21, 2015
43	Anhang D1
44	Anhang D1
45	Anhang D2
46	Technische Zeichnung Nr. 13778-3296-K-990-000-00 NVL B. V. & Co. KG
47	Eigene Darstellung in Anlehnung an VDI 2230, 2015
48	Technische Zeichnung Nr. 13778-3296-K-990-000-00 NVL B. V. & Co. KG
49	examio GmbH, Datum unbekannt, <a href="https://www.ingenieurkurse.de/maschinenelemente-2/schraubenverbindungen/nachgiebigkeitsberechnung.html">https://www.ingenieurkurse.de/maschinenelemente-2/schraubenverbindungen/nachgiebigkeitsberechnung.html</a> , abgerufen 23.02.2024

Tabelle 4 - Quellen der Abbildungen

## Anhang

### Anhang A1 – Anforderungsliste



#### Anforderungsliste – Sensorintegrierende Maschinenelemente in schiffbaulichen Anwendungen

Dieses Dokument dient lediglich als Entwurf einer möglichen Anforderungsliste an sensorintegrierende Schraubenverbindungen im Anwendungsfall Flanschverbindung an einer Abgasanlage eines Schiffsdiesels.

In Zusammenarbeit mit Mitarbeitern der NVL-Group wurden die folgenden Anforderungen ausgearbeitet:

Lfd. Nr.	Art	Anforderung	Wert/Daten
1	W	Bauraum	Im Vergleich zu einer konventionellen Schraubenverbindung darf der Anstieg des benötigten Bauraums nicht mehr als 30% betragen.
2	F	Funktion	Die Primärfunktion der Schraubenverbindung darf nicht beeinflusst werden.
3	Z	Energie	Die Baugruppe muss energieautark agieren können.
4	W	Anbindung	Eine Anbindung an eine sammelnde Kommunikationseinheit muss kabellos erfolgen.
5	M	Daten	Die Datenübertragung zur Kommunikationseinheit muss verschlüsselt erfolgen und eine entsprechende Durchdringungsfähigkeit aufweisen, um eine Wärmeisolierung mit einer Schichtdicke bis zu 10 cm durchdringen zu können.
6	F	Wärme	Jegliche Komponenten der Baugruppe müssen Temperaturen bis 550°C, sowie schnellen (innerhalb von 30 Sek.) Temperaturschwankungen zwischen 100°C und 550°C standhalten können.
7	F	Vibrationen	Jegliche Komponenten der Baugruppe müssen den Vibrationen der Abgasanlage standhalten können.
8	M	Lebensdauer	Das Gesamte Modul muss eine Lebensdauer über das übliche Wartungsintervall (5 Jahre) hinaus aufweisen.

F = Festforderung, M = Mindestforderung, Z = Ziel, W = Wunsch

Die Auswahl des Einsatzortes/-systems hat anhand der Festforderungen Wärme und Vibration zu geschehen, um die Überwachung der Verbindung im höchsten Belastungsfall zu gewährleisten.

Hamburg den 16.10.2023

## Anhang B1 – Schraubenberechnung

N·V·L

Überschlägige Berechnung des Anzugsmomentes einer Fundamentschraube mit Schocklast

05.07.2022

Objekt	
Schiffs-Nr.	
Zeichnungs-Nr.	
Positions-Nr.	
Motor/Getriebe/Lager	GENSET
Gewicht in kg (betriebsfähig)	6000
Gewichtskraft in N	F= 58860 N

Vertraulich

markierte Felder können ausgefüllt werden!

## Fundamentschraube

Anzahl der Schrauben	10	Schraube $R_{\text{dH}}$ (N/mm <sup>2</sup> )	900
Steigung P (mm)	2,5	Kern-Ø (mm)	16,933
Aussen-Ø des Gewindes (mm)	20	Länge des Gewindes (mm)	120
Schaft-Ø 1 der Schraube (mm)	16,933	Länge des Schaftes 1 (mm)	2
Schaft-Ø 2 der Schraube (mm)	0	Länge des Schaftes 2 (mm)	0
Schaft-Ø 3 der Schraube (mm)	0	Länge des Schaftes 3 (mm)	0

Streckgrenze für eine Fundamentschraube 100%

F<sub>max</sub>= 202572 N

gewählte Vorspannkraft je Fundamentschraube

F<sub>p</sub>= 100000 N

mögliche Restkraftaufnahme Schock

F<sub>rest</sub>= 102572 N

Anzugsmoment Nm (Drehmomentschlüssel + geölten Gewinde)

T= 400 Nm

Schraubenlänge (mm) unter Berücksichtigung der Vorspannkraft

ΔL= 0,263 mm

Die vom DNV geforderte Mindestlänge beträgt

ΔL= 0,250mm

ΔL ok

## Schraubenanzug mit Drehmoment-Schlüssel

Vergleichsspannung (Zug- und Torsion) nicht reduzierter Schaft

δ<sub>z</sub>= 523 N/mm<sup>2</sup>

Vergleichsspannung (Zug- und Torsion) Dehnschraube

δ<sub>d</sub>= -

Zulässige Vergleichsspannung (Zug- und Torsion)

810 N/mm<sup>2</sup>

OK

Prozentuale Ausnutzung der zulässigen Spannung

58,1%

## Schraubenanzug mit hydraulischer Spannvorrichtung

Zugspannung bezogen auf den minimalen Schaft-Ø

δ<sub>t</sub>= 444,3258816

Zulässige Zugspannung der Schraube bei K=0,85

720 N/mm<sup>2</sup>

OK!

Prozentuale Ausnutzung der Zugspannung

61,7%

## Zugspannung bezogen auf den Gewindekern-Ø (Mutternsicherung)

δ<sub>v</sub>= 444 N/mm<sup>2</sup>

Prozentuale axiale Ausnutzung der Streckgrenze am Kern-Ø

49,4%

Eine zusätzlich Mutternsicherung ist bei langsam laufendem Motor

nicht erforderlich

Eine zusätzlich Mutternsicherung ist bei normal laufendem Motor

nicht erforderlich

Schocklast

G 15

Schockkraft

882900 N

mögliche Schockaufnahme Schrauben

1025723 N

Schocksicherheit

1,16176537

## Anhang C1 – Materialdaten Schraubenwerkstoff

**1.7707****Cr-Mo-V-legierter Vergütungsstahl****30CrMoV9****C** 0,26 – 0,34 **Si** max. 0,40 **Mn** 0,40 – 0,70 **Cr** 2,30 – 2,70 **V** 0,10 – 0,20 **Mo** 0,15 – 0,25

<b>Normenzuordnung</b>	DIN 17200	1.7707	30CrMoV9
<b>Hauptanwendung</b>	Der Vergütungsstahl 30CrMoV9 wird für Bauteile des Automobilbaus und des allgemeinen Maschinenbaus, wie z. B. Schrauben oder Nockenwellen, verwendet. Er ist unmittelbar mit dem Nitrierstahl 31CrMoV9 (1.8519) vergleichbar.		
<b>Technischer Lieferzustand</b>	Vergütet Weichgeglüht	900 – 1450 MPa Max. 248 HB	
<b>Schweißen</b>	30CrMoV9 ist nur schwer schweißbar und sollte daher in Schweißkonstruktionen nicht eingesetzt werden.		
<b>Warmumformung</b>	30CrMoV9 wird bei 1100 °C – 850 °C warm umgeformt und soll anschließend langsam abgekühlt werden.		
<b>Physikalische Eigenschaften</b>	Dichte (kg/dm <sup>3</sup> )	7,73	
	Elastizitätsmodul (10 <sup>3</sup> MPa)	210	
	Elektr. Widerstand bei 20 °C (Ω mm <sup>2</sup> /m)	0,19	
	Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C (W/m K)	43,0	
	Spez. Wärmekapazität bei 20 °C (J/kg K)	432	
	Wärmeausdehnung im weichgeglühten Zustand (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )		
	20 – 100 °C	11,5	
	20 – 200 °C	12,5	
	20 – 300 °C	13,3	
	20 – 400 °C	13,9	
<b>Mechanische Eigenschaften</b>	Im vergüteten Zustand bei Raumtemperatur:		
	Durchmesser (mm)	≤ 16	> 16 ≤ 40
	Streckgrenze (MPa)	1050	1020
	Zugfestigkeit (MPa)	1250 – 1450	1200 – 1450
	Bruchdehnung (L <sub>0</sub> = 5 d <sub>0</sub> ) (%)	9	9
	Brucheinschnürung (%)	35	35
	Kerbschlagarbeit ISO - V (J)	25	25
	Durchmesser (mm)	> 100 ≤ 160	> 160 ≤ 250
	Streckgrenze (MPa)	800	700
	Zugfestigkeit (MPa)	1000 – 1200	900 – 1100
	Bruchdehnung (L <sub>0</sub> = 5 d <sub>0</sub> ) (%)	11	12
	Brucheinschnürung (%)	45	50
	Kerbschlagarbeit ISO - V (J)	35	45
	Hinweis: Diese typischen Werte gelten für Längsproben, die bis 25 mm Durchmesser aus dem Kern, über 25 mm aus der Randzone, und zwar mit einem Randabstand von 12,5 mm herausgearbeitet werden. Abweichende Anforderungen können auf Anfrage berücksichtigt werden.		
<b>Wärmebehandlung</b>	Ms: 360 °C	Ac <sub>1</sub> : 775 °C	Ac <sub>3</sub> : 835 °C
	<b>Normalglühen:</b> Das Normalglühen sollte bei Temperaturen zwischen 870 °C und 900 °C mit anschließender Luftabkühlung durchgeführt werden.		
	<b>Weichglühen:</b> Weichglühen erfolgt bei Temperaturen von 680 °C – 720 °C mit einer sich anschließenden langsamen Ofenabkühlung.		

## Anhang D1 – E-Mailverkehr mit Klawon, S.

### Trick, Alvaro

---

**From:** Trick, Alvaro David Basilius <[REDACTED]>  
**Sent:** Freitag, 9. Februar 2024 12:30  
**To:** Trick, Alvaro  
**Subject:** WG: Bachelorarbeit Unterstützung  
**Attachments:** IMG\_4580.JPG; IMG\_4587.JPG; IMG\_4590.JPG; IMG\_4594.JPG

---

**Von:** Klawon, Stephan <[REDACTED]>  
**Gesendet:** Donnerstag, 8. Februar 2024 16:30  
**An:** Trick, Alvaro David Basilius <[REDACTED]>  
**Betreff:** AW: Bachelorarbeit Unterstützung

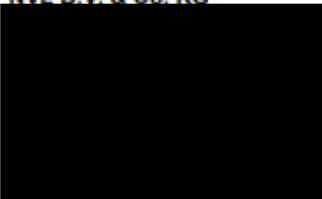
Hallo Alvaro,

angehängt ein Paar Bilder von Bord. Für die Auslegung der Schrauben liegen mir so keine Berechnungen vor. Durch die Flanschwahl ist die Größe der Schraube vorgegeben, die Länge ergibt sich aus der Flanschdicke; Dichtung, Mutter und mind. 3 Gewindegänge außerhalb der Mutter. Material Auswahl erfolgt durch den Anwendungsfall. Einen Querschnitt kann ich nicht liefern.

Mit freundlichem Gruß / With best regards,

**i. A. Stephan Klawon**  
Mechanical Design

**NVL B.V. & Co. KG**



LinkedIn ·  
Xing

---

**Von:** Trick, Alvaro David Basilius <[REDACTED]>  
**Gesendet:** Donnerstag, 8. Februar 2024 13:56  
**An:** Klawon, Stephan <[REDACTED]>  
**Betreff:** AW: Bachelorarbeit Unterstützung

Moin Stephan,

Danke für die bereits geschickten Infos.

Gibt es eine Berechnung zur Auslegung der Schrauben?

Und gibt es eine Zeichnung im Einbauzustand, in der eventuell ein Querschnitt durch Flansch und Schrauben zu sehen ist?

Ich kann diese Sachen leider nicht selbst aufrufen, da mein Zugriff auf die entsprechenden Ordner von jemandem entfernt wurde.

Jede weitere Hilfe ist sehr willkommen. Danke vorab.:

Beste Grüße

Alvaro Trick  
Dualer Student ZKHM

Blohm + Voss B.V. & Co. KG

Von: Klawon, Stephan <[REDACTED]>  
Gesendet: Donnerstag, 25. Januar 2024 15:50  
An: Trick, Alvaro David Basilius <[REDACTED]>  
Betreff: Re: Bachelorarbeit Unterstützung

Hallo Alvaro,

entschuldige bitte die späte Antwort, aber ich bin sehr mit K130 Vorprüfungen und Abnahmen beschäftigt.  
Die Flansche (Material 2.4605) DN 300 für die EDIMot's haben folgende Abmessungen und Anzugsmomente:

Rechteckmessungen

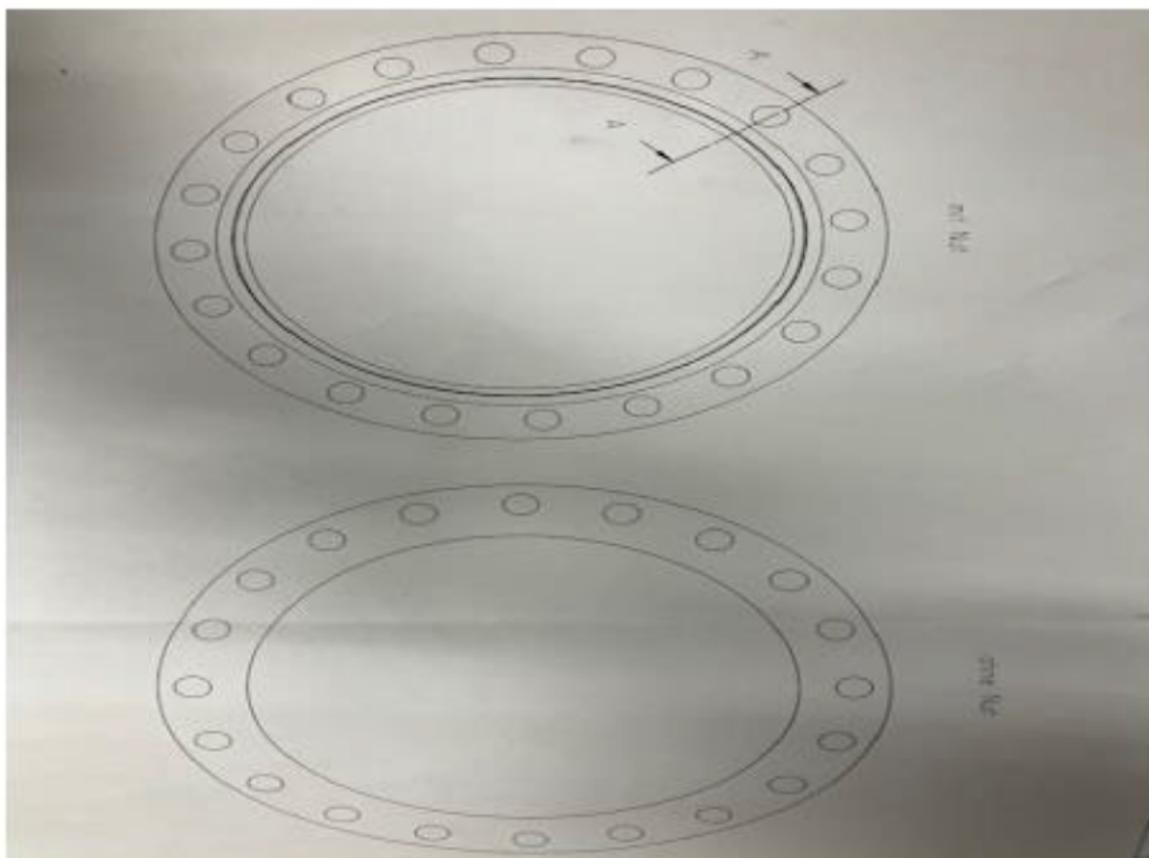
Nennweite	DN100	DN125	DN150	DN200	DN250	DN300	DN350	DN400	b	Sechsk. Anz	Anzugsmoment
32	39	111	90	11	49	68,0 <sup>±0,1</sup>	15	M10	8	37Nm	
50	57,5	119,5	108,5	11	67,5	87,5 <sup>±0,1</sup>	15	M10	10	37Nm	
80	89,5	161	160	11	99,5	118,5 <sup>±0,1</sup>	15	M10	12	37Nm	
100	108,5	181	180	11	108,5	138,5 <sup>±0,1</sup>	15	M10	14	37Nm	
150	169,5	251	223	13,5	179,5	199,5	17,5	M12	14	69Nm	
200	219	310	276,5	17,5	229	249 <sup>±0,1</sup>	20	M16	12	64Nm	
300	325	435	393	22	341	361 <sup>±0,1</sup>	28	M20	20	297Nm	
400	416	552	506	26	440	470 <sup>±0,1</sup>	35	M24	28	597Nm	

Die Anzugsmomente sind für geschmierte Flanschen berechnet.

Die Flansche müssen nach Bearbeitung mindestens folgende Dicke (b) aufweisen

NM	32	50	80	100	150	200	300	400
b	13,5	13,5	13,5	16	18	17	22	

Die Flanschverbindung hat eine Nut, in der die Dichtung gelegt wird.



Die Schrauben und Muttern sind aus dem Material 1.7709.  
Die Temperaturen sind von ca. 30-400 Grad, kein unterschied zwischen außen und innen.

Ab Montag bin ich wieder im Büro.

Gruß,

Stephan Klawon

Von meinem iPhone gesendet

Am 11.01.2024 um 13:04 schrieb Trick, Alvaro David Basilius

<[REDACTED]>:

Moin Stephan,

Ich schreibe derzeit meine Bachelorarbeit über die sensorintegrierende Messung von Kräften in Schrauben.

Hierfür muss ich einige ausgewählte Schraubenverbindungen an Bord unserer Marineschiffe analysieren.

Ralph Berg hat vorgeschlagen, dass ich mich an dich wende, um Informationen über die Verbindung an den Abgasflanschen der EDiMots der K130 zu bekommen.

Mich interessiert, welche Art von Flansch dort verwendet wird. Sprich Dicke, Durchmesser, Material, Oberfläche, vllt. Nach welcher Norm gefertigt wurde. Welche Art von Dichtung vorliegt und welche Schrauben verwendet wurden. Infos über die Berechnung der Auslegung der Verbindung wären

## Anhang D2 – E-Mailverkehr mit Westphal, T.

### Trick, Alvaro

---

**From:** Trick, Alvaro David Basilius <[REDACTED]>  
**Sent:** Donnerstag, 8. Februar 2024 15:16  
**To:** Trick, Alvaro  
**Subject:** WG: 20240115\_Bachelorarbeit Unterstützung  
**Attachments:** IMG\_1528.jpeg; IMG\_1527.jpeg

---

**Von:** Westphal, Torsten <[REDACTED]>  
**Gesendet:** Donnerstag, 8. Februar 2024 14:03  
**An:** Trick, Alvaro David Basilius <[REDACTED]>  
**Cc:** Berg, Ralph <[REDACTED]>  
**Betreff:** AW: 20240115\_Bachelorarbeit Unterstützung

Moin Alvaro,

das wäre vom Projekt aus dem südeuropäischen Raum. Reicht Dir das?

Mit freundlichen Grüßen/ With best regards

**Torsten Westphal**  
Blohm+Voss | ZKHM | +49 40 3119 4892

---

**Von:** Trick, Alvaro David Basilius <[REDACTED]>  
**Gesendet:** Donnerstag, 8. Februar 2024 13:52  
**An:** Westphal, Torsten <[REDACTED]>  
**Cc:** Berg, Ralph <[REDACTED]>  
**Betreff:** AW: 20240115\_Bachelorarbeit Unterstützung

Moin Torsten,

Ich habe gestern mit meinem Prof. gesprochen. Er hat darum gebeten, dass ich - wenn möglich - Bilder der behandelten Schraubenverbindungen einfüge. Denkst du, dass es möglich ist, Bilder von den Schrauben an den EDiMot-Gestellen zu bekommen?

Ich denke man könnte da auch bestimmt Bilder von K130 nehmen. Da ich aber keine Foto-Genehmigung habe, kann ich leider schlecht einfach an Bord gehen und davon Bilder machen.

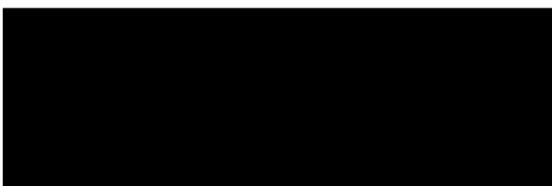
Hast du eine Idee, wie ich an Bilder komme?

Ich müsste eigentlich auch eins vom Abgasflansch der EDiMots machen. Also wenn es möglich ist, an beide zu kommen, wäre es super.

Beste Grüße

**Alvaro Trick**  
Dualer Student ZKHM

**Blohm + Voss B.V. & Co. KG**



---

**Von:** Westphal, Torsten <[redacted]>  
**Gesendet:** Montag, 15. Januar 2024 10:00  
**An:** Trick, Alvaro David Basilius <[redacted]>  
**Betreff:** 20240115\_Bachelorarbeit Unterstützung

Moin Alvaro,

habe das Verzeichnis in Deinen Ordner kopiert. Bitte um vertrauliche Handhabung.



Grüße  
Torsten

---

**Von:** Trick, Alvaro David Basilius <[redacted]>  
**Gesendet:** Donnerstag, 11. Januar 2024 15:04  
**An:** Westphal, Torsten <[redacted]>  
**Betreff:** AW: Bachelorarbeit Unterstützung

Moin,

Danke für die schnelle Antwort.  
Bist du sicher, dass der Ordner der richtige ist?  
Wenn es der richtige ist, dann habe ich keinen Zugriff darauf. An wen muss ich mich wenden um den zu bekommen?

VG  
Alvaro

---

**Von:** Westphal, Torsten <[redacted]>  
**Gesendet:** Donnerstag, 11. Januar 2024 13:38  
**An:** Trick, Alvaro David Basilius <[redacted]>  
**Betreff:** AW: Bachelorarbeit Unterstützung

Tach auch,

[schau mal hier hinein:](#)



Bei Fragen meldest Du Dich einfach.  
Torsten

---

**Von:** Trick, Alvaro David Basilius <[redacted]>  
**Gesendet:** Donnerstag, 11. Januar 2024 12:59

**An:** Westphal, Torsten [REDACTED]  
**Betreff:** Bachelorarbeit Unterstützung

Moin Torsten,

Ich schreibe derzeit meine Bachelorarbeit. Im Zuge dessen muss ich ein paar Schraubenverbindungen an Bord von unseren Schiffen auswählen.

Ralph hatte vorgeschlagen, dass eine dieser Verbindungen vom MMPV kommt. Genauer: Die Befestigung des Gestells der GenSets an das Schiffsfundament.

Ich wende mich dabei an dich, da du meine ich Systemhausherr bist.

Ich würde gerne wissen, welche Verbindung dort verwendet wird. Sprich Art, Größe, Unterlegscheiben ja/nein? Etc. Es wäre super, wenn du mir Zeichnungen und Berechnungen zur Auslegung der Schrauben schicken oder mir verraten könntest, wo ich das finde.

Sollte das keinen Sinn machen, können wir auch gerne per Webex reden.

Besten Dank vorab für jegliche Hilfe.

Beste Grüße

**Alvaro Trick**  
Dualer Student ZKHM

**Blohm + Voss B.V. & Co. KG**



## Anhang D3 – E-Mailverkehr mit Interbolt

### Trick, Alvaro David Basilius

---

**Von:** David Metzger <[REDACTED]>  
**Gesendet:** Donnerstag, 29. Februar 2024 14:09  
**An:** Trick, Alvaro David Basilius  
**Betreff:** Re: Order inquiry Interbolt

**ACHTUNG:** Diese E-Mail wurde von einem externen Absender verschickt. Öffnen Sie keine Links oder Anhänge, deren Absender Sie nicht kennen oder wissen, dass dieser Inhalt sicher ist.  
**CAUTION:** This email was sent from an external sender. Do not click on links or open attachments unless you recognize the sender and you know the content is safe.

1. It's a proprietary method.
2. Magnetoelectric

Regards,  
Dave Metzger  
[REDACTED]

On 29 Feb 2024, at 12:30, Trick, Alvaro David Basilius <[REDACTED]> wrote:

Hi David,

Thank you very much for your speedy answer.

I have stumbled upon more questions regarding your products. I hope you can help me with those.

1. How does the Interbolt-System measure the elongation gap? It says on the website, that it uses a gauge pin principle. But that doesn't entirely explain which exact method is being used to measure the gap between the sensor and the pin.
2. You sell a product called Tensiondisc. Does it use strain-gauge-technology or piezoelectric-technology for force measurements?

Any further help for my thesis is greatly appreciated.

Best regards

**Alvaro Trick**  
Dualer Student ZKHM

**Blohm + Voss B.V. & Co. KG**  
[REDACTED]

---

**Von:** David Metzger <[REDACTED]>  
**Gesendet:** Montag, 12. Februar 2024 12:22

An: Trick, Alvaro David Basilius <[REDACTED]>; Interbolt  
<[REDACTED]>  
Betreff: RE: Order inquiry Interbolt

**ACHTUNG:** Diese E-Mail wurde von einem externen Absender verschickt. Öffnen Sie keine Links oder Anhänge, deren Absender Sie nicht kennen oder wissen, dass dieser Inhalt sicher ist.  
**CAUTION:** This email was sent from an external sender. Do not click on links or open attachments unless you recognize the sender and you know the content is safe.

Hi Alvaro,

The price of these InterBolt sensors is project dependent, its not really a catalogue/price list type product.

A budgetary, indicative cost would be 200.00 euro per sensor.

Kind regards,

Dave Metzger

---

**From:** Trick, Alvaro David Basilius <[REDACTED]>  
**Sent:** Monday, February 12, 2024 10:44 AM  
**To:** Interbolt <[REDACTED]>  
**Subject:** Order inquiry Interbolt

Dear Interbolt-Team,

My name is Alvaro Trick. I am currently working on my bachelors thesis, in order to finish my dual studies in mechanical engineering with Blohm + Voss B. V. & Co. KG.

The thesis is considering sensor-integrated machine elements such as your interbolt-product.

For this purpose I have been instructed to research the cost of such products. Since no price is stated on your website, I would appreciate any information regarding a potential order of size M20, strength 10.9 bolts. Order sizes 1/20/100.

Any help at all is greatly appreciated.

Best regards  
Alvaro Trick

Beste Grüße

Alvaro Trick  
Dualer Student ZKHM

Blohm + Voss B.V. & Co. KG  
[REDACTED]

## Anhang D4 – E-Mailverkehr mit SmartBolt

### Trick, Alvaro David Basilius

---

**Von:** Marina Martinez <[REDACTED]>  
**Gesendet:** Donnerstag, 29. Februar 2024 22:34  
**An:** Trick, Alvaro David Basilius  
**Betreff:** RE: SmartBolts  
**Anlagen:** SmartBolts-Product Catalog.pdf

**ACHTUNG:** Diese E-Mail wurde von einem externen Absender verschickt. Öffnen Sie keine Links oder Anhänge, deren Absender Sie nicht kennen oder wissen, dass dieser Inhalt sicher ist.  
**CAUTION:** This email was sent from an external sender. Do not click on links or open attachments unless you recognize the sender and you know the content is safe.

Hello Alvaro,

You are very welcome. I am happy to help!

Due to proprietary reasons, I can't share too much regarding the inner working of the SmartBolt and the visual indicator. What I can share is that SmartBolts use a fix pin built into the bolt that will move linearly according to the amount of tension in the bolt. When there is 0 tension, the indicator will be a bright red color. As tension is applied the indicator will gradually transition from red to black. At the time 100% of the design tension has been applied, the indicator will be black. Each SmartBolt is designed to the requirements of the customer, so this color transition remains constant respective to the amount of load applied to the bolt. There are no electronic parts, LED lights, or batteries that would need to be replaced over time. The SmartBolt is also reusable as long as it has not been stretched past the proof load of the fastener.

I hope this helps. Let me know if you have any other questions, have a great day!

Marina Martinez

**SmartBc**



**fir**

**BACK IN BLACK**

---

**From:** Trick, Alvaro David Basilius <[REDACTED]>  
**Sent:** Thursday, February 29, 2024 7:34 AM  
**To:** Marina Martinez <[REDACTED]>  
**Subject:** AW: SmartBolts

Hello Marina,

Thank you very much for your reply and all the attached information.

I have a question regarding the inner workings of your product smartbolt.

How does the colour-indicator change colour? It doesn't specify the principle on the website. Is it a piezochromatic effect of a polymer or is it a LED light or something else? I'd love to know how exactly the elongation generates a colour change.

Any help figuring out those details for my thesis is greatly appreciated.

Best regards

**Alvaro Trick**  
Dualer Student ZKHM

**Blohm + Voss B.V. & Co. KG**



---

**Von:** Marina Martinez <[redacted]>  
**Gesendet:** Dienstag, 13. Februar 2024 23:21  
**An:** Trick, Alvaro David Basilius <[redacted]>  
**Betreff:** SmartBolts

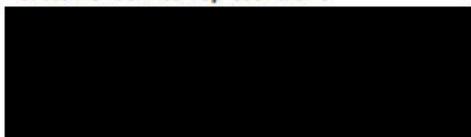
**ACHTUNG:** Diese E-Mail wurde von einem externen Absender verschickt. Öffnen Sie keine Links oder Anhänge, deren Absender Sie nicht kennen oder wissen, dass dieser Inhalt sicher ist.  
**CAUTION:** This email was sent from an external sender. Do not click on links or open attachments unless you recognize the sender and you know the content is safe.

Hello Alvaro,

Thank you for your interest in SmartBolts for your thesis. You can find pricing available for a few M20 class 10.9 lengths on our website on the product page. With M20s, we have a minimum order quantity of 10 pieces and the pricing would not change from 10 to 20 bolts. At 100, there would likely be a 15-20% discount depending on length. I hope this helps! Let me know if you have any other questions! I've also attached information on SmartBolts for your review. [Here](#) is a link to our demo video on YouTube as well. Have a great day!

**SmartBolts®**  
An Industrial Indicators brand

**Marina Martinez**  
Customer Service Representative



f in ▶

**BACK IN BLACK**

## Anhang E1 – Übersicht und Preisliste SmartBolt (Ausschnitt)

Available DTI SmartBolt Specifications	
<b>Bolt Types</b>	HHCS, HVCS, HFLB, SHCS, STUD, and more
<b>Bolt Diameter Ranges</b>	7/16" (M10) to 2 1/2" (M64)
<b>Bolt Length Ranges</b>	1 1/4" (30mm) to 24" (600mm)
<b>Available Material Grades</b>	Grade 5, Grade 8, Class 8.8, Class 10.9, and more
<b>Available Finishes</b>	Plain, Clear Zinc, Yellow Zinc, and more
<b>Thread Length</b>	Partial or Full
<b>Available Design Tension Range</b>	30 - 90% of Modified Proof Load
<b>Operating Temperature Range</b>	- 4°F to 168°F (- 20°C to 75°C)
<b>Grip Lengths</b>	Minimum Grip Lengths apply to some partially threaded and all fully threaded bolts
<b>Optional Features</b>	Protective Recess, Contamination Seal, Made in USA Bolt

### SmartBolt Terminology

- **Head Type**
  - **HHCS – Hex Head Cap Screw** – Features a bearing surface that is flat and washer faced.
  - **HVCS – Heavy Hex Head Cap Screw** – Features a greater width across wrenching flats with a bearing surface that is washer faced and flat.
  - **HFLB – Hex Flange Bolt** – Features an enlarged bearing surface that extends beyond the hex head like a built in washer.
  
- **Bolt Dimensions**
  - **Nominal Diameter** – Standard (rounded) size of the unthreaded body or major diameter of the threads.
  - **TPI / Pitch** – The pitch is the distance between two successive thread crests or roots. Pitch is usually specified for metric fasteners. TPI stands for "threads per inch" and is used with inch fasteners. Pitch is equal to the reciprocal of TPI.
  - **Length** – The length of a bolt as measured from underneath the head (bearing surface).
  
- **Grade/Class** – The grade or class is used to describe the fastener material properties.
  - **Grade 5** - SAE J429 Grade 5 is an inch property grade of medium carbon (or alloy) steel
  - **Grade 8** - SAE J429 Grade 8 is an inch property grade of medium carbon alloy steel
  - **Class 8.8** - ISO 898-1 Class 8.8 is a metric property class of medium carbon steel
  - **Class 10.9** - ISO 898-1 Class 10.9 is a metric property class of carbon alloy steel

Case Product Code	Case Price (MSRP)	Case Quantity	Price Per Bolt (MSRP)	Model	Head Type	Diameter	Thread	Length	Grade	Finish	Thread Type	Design Tension	Specials	Design Tension (kN)	Proof Load (kN)
C-10171	\$513.75	25	\$24.55	DTI	HHCS	M16	2	45	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	82	117
C-10172	\$506.75	25	\$24.27	DTI	HHCS	M16	2	50	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	82	117
C-10173	\$515.00	25	\$24.60	DTI	HHCS	M16	2	55	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	82	117
C-10174	\$520.75	25	\$24.83	DTI	HHCS	M16	2	60	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	82	117
C-10175	\$537.50	25	\$25.50	DTI	HHCS	M16	2	70	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	86	122
C-10176	\$549.75	25	\$25.99	DTI	HHCS	M16	2	80	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	90	129
C-10177	\$566.75	25	\$26.67	DTI	HHCS	M16	2	90	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	90	129
C-10178	\$577.25	25	\$27.09	DTI	HHCS	M16	2	100	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	90	129
C-10179	\$597.00	25	\$27.88	DTI	HHCS	M16	2	110	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	90	129
C-10180	\$599.25	25	\$27.97	DTI	HHCS	M16	2	120	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	90	129
C-10181	\$718.75	25	\$28.75	DTI	HHCS	M16	2	140	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	90	129
C-10182	\$514.00	25	\$32.56	DTI	HHCS	M16	2	160	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	90	129
C-10183	\$545.00	10	\$54.50	DTI	HHCS	M20	2.5	50	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	96	137
C-10184	\$549.30	10	\$54.93	DTI	HHCS	M20	2.5	55	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	96	137
C-10185	\$544.70	10	\$54.47	DTI	HHCS	M20	2.5	60	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	96	137
C-10186	\$570.90	10	\$57.09	DTI	HHCS	M20	2.5	70	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	96	137
C-10187	\$572.50	10	\$57.25	DTI	HHCS	M20	2.5	80	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	96	137
C-10188	\$262.20	10	\$26.22	DTI	HHCS	M20	2.5	90	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	102	146
C-10189	\$264.90	10	\$26.49	DTI	HHCS	M20	2.5	100	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	102	146
C-10190	\$294.10	10	\$29.41	DTI	HHCS	M20	2.5	110	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	102	146
C-10191	\$306.70	10	\$30.67	DTI	HHCS	M20	2.5	120	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	102	146
C-10192	\$291.30	10	\$29.13	DTI	HHCS	M20	2.5	140	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	102	146
C-10193	\$329.50	10	\$32.95	DTI	HHCS	M20	2.5	160	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	102	146
C-10194	\$346.40	10	\$34.64	DTI	HHCS	M20	2.5	180	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	102	146
C-10195	\$357.30	10	\$35.73	DTI	HHCS	M20	2.5	200	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	102	146
C-10196	\$399.40	10	\$39.94	DTI	HHCS	M20	2.5	220	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	102	146
C-10197	\$406.80	10	\$40.68	DTI	HHCS	M20	2.5	240	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	102	146
C-10198	\$362.20	10	\$36.22	DTI	HHCS	M20	2.5	260	8.8	CZ	FTL	70%P	Contamination Seal	102	146
C-10199	\$292.30	10	\$29.23	DTI	HHCS	M20	2.5	50	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	134	190
C-10200	\$295.60	10	\$29.56	DTI	HHCS	M20	2.5	55	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	134	190
C-10201	\$297.20	10	\$29.72	DTI	HHCS	M20	2.5	60	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	134	190
C-10202	\$310.60	10	\$31.06	DTI	HHCS	M20	2.5	70	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	134	190
C-10203	\$310.50	10	\$31.05	DTI	HHCS	M20	2.5	80	10.9	YZ	FTL	70%P	Contamination Seal	134	190

## Anhang F1 – Produktdatenblätter

# tensionpro

THE BOLT TENSIONER EXPERTS

## SERIES: **tensiondisc** Load Washer

## DATASHEET DS-2500



**TensionDisc** low profile load washers are specially designed load sensors that monitor bolt loads in bolted joint assemblies.

A simple hand-held reader, wired or infrared connection, allows for simple reading of the bolt load. The data can be exported via USB to a PC. Optional connectivity options allow for multiple uses of the data.

The load washers are simple to use, accurate and reliable for long term use. The low profile allows fitting into a typical bolted assembly without making a big change to the bolt grip length.

### Ideal for:

- Measuring Bolt Residual Load
- Torque/Load calibration
- Bolt tensioner load/pressure calibration

### Versatile data connectivity

- Wired hand held reader (CMS)
- Infrared to hand held reader (PMS)
- RS-232/Analogue converter to PC
- IIoT Node (LoRa)
- Network with PDI

### TensionDisc Specification

Cable Lengths	1m standard, 5m and 10m optional
Temperature Range	-40° +80° C
Minimum load	10% full scale load
Maximum load	130% full scale load
Total accuracy	<±3% full scale. Depending on bolt joint design
Linearity	<±2% full scale
Hysteresis	<±1% full scale
Creep	<±0.1% full scale
Repeatability	<±0.5% full scale
Sealing rating	IP66
Material	Stainless steel 17-4PH
Power supply	Powered through reader
Connection	M12 male 5 pole connector
Intrinsic safe code	II 2 G, EEx Ib IC T4 (upon special request)

### RS-232/Analogue Converter

Process data on PC or DAQ. With in-built relay to set alarm or switch off connected pump or tooling.



### IIoT Node



The magnetic mounted IIoT node connects to LoRa network for remote monitoring. 10 year battery life for long-term monitoring of residual bolt load.

[www.tensionpro.co.uk](http://www.tensionpro.co.uk)

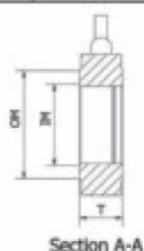
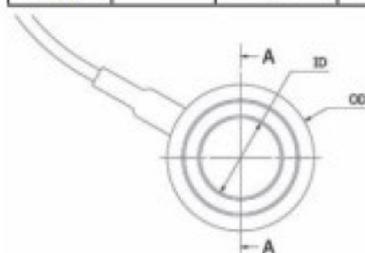
# tensionpro

THE BOLT TENSIONER EXPERTS

## DATASHEET DS-2500

### SERIES: **tensiondisc** Load Washer

Bolt Thread Size		Clearance Hole	Outside Diameter	Overall Thickness	Weight	Max Load	Load Resolution	Measuring Face ID	Measuring Face OD
T		ID	OD	A	W	L	r	IM	OM
inch	Metric	mm	mm	mm	kg	kN	kN	mm	mm
	M20	20.4	37	14	0.07	166	2	22	27.7
	M22	22.4	40	14	0.09	208	2	24.2	31.4
	M24	24.4	44	14	0.10	239	2	26.4	33.3
	M27	27.4	50	14	0.14	315	3	29.7	38
	M30	30.6	64.3	17	0.21	385	5	33	42.8
	M33	33.6	68.4	17	0.22	480	5	36.3	46.6
	M36	36.6	72.8	17	0.30	560	5	39.5	51.1
	M39	39.6	78	17	0.30	670	5	42.9	55.9
	M42	42.6	83	20	0.45	772	5	46.2	60
	M45	45.6	87.6	20	0.51	905	10	49.5	64.7
	M48	48.6	92	20	0.59	1018	10	52.3	69.5
	M52	52.6	97.2	20	0.67	1221	10	57.2	74.2
	M56	56.6	102	20	0.80	1406	15	61.5	78.7
	M60	60.8	108	23	1.06	1647	20	66	83.4
	M64	64.8	114	23	1.20	1794	20	70.4	88.2
	M64-NV	64.8	120	23	1.31	2100	20	73.5	93
	M72	72.8	124	23	1.36	2250	20	79.2	104
	M72-NV	72.8	124	23	1.37	2500	20	78.4	110
7/8		22.6	47.0	14	0.13	214	2	25.8	32.9
1		25.8	52.0	14	0.16	280	2	29.0	37.1
1-1/8		29.0	57.1	14	0.19	354	3	32.2	41.4
1-1/4		32.3	67.0	17	0.29	437	5	35.5	45.7
1-3/8		35.5	73.0	17	0.34	529	5	38.7	50.0
1-1/2		38.7	78.0	17	0.39	629	5	41.9	54.3
1-5/8		41.9	84.0	17	0.54	739	5	45.4	58.6
1-3/4		45.1	86.0	20	0.61	857	10	48.9	63.6
1-7/8		48.2	92.0	20	0.70	983	10	52.4	67.9
2		51.4	98.0	20	0.82	1119	10	55.9	72.2
2-1/4		57.8	108.8	23	1.16	1436	15	62.9	81.8
2-1/2		64.3	116.6	23	1.29	1748	15	69.9	90.6
2-3/4		70.8	124.0	23	1.37	2000	20	77.0	99.0



[www.tensionpro.co.uk](http://www.tensionpro.co.uk)

# tensionpro

THE BOLT TENSIONER EXPERTS

## SERIES: InterBolt™ Intelligent Bolt Load Monitoring

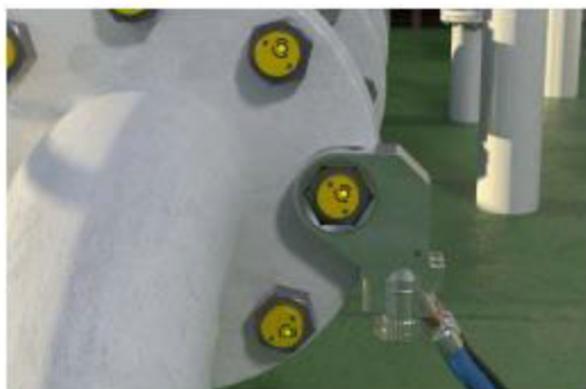
## DATASHEET DS-3000



InterBolt is available in a wide range of bolts and studs, from M20 upwards. There is no maximum diameter or load that the InterBolt can be applied to.

The InterBolt technology can also be embedded into customer supplied bolts with turnaround times of less than 28 days.

**15 year battery life**  
**1 km wireless communication**



The best way to ensure high integrity of bolted connections is to measure bolt load or tension, instead of bolt torque.

Historically, direct measurement of bolt load has required specialised equipment and technicians to be on-site so is infeasible for many applications.

InterBolt technology integrates bolt load monitoring directly into the bolt or threaded stud itself.

InterBolt is integrated into an IIoT network so can provide real-time bolt load monitoring. The cloud platform enables asset owners to identify loose fasteners remotely and in real-time, eliminating the need for manual on-site inspection.

The technology can also provide real-time load measurements to technicians during installation and re-tightening activities to ensure bolts are tensioned to the correct preload. This is achieved through an inbuilt LED indicator that illuminates red, amber or green, as well as integration into ruggedised tablets/ HMIs.

- High accuracy (97%) bolt load measurements
- Remote monitoring through cloud platform, enabling real-time access to bolt preload data 24/7, 365 days a year
- Local bolt load monitoring through integrated LED indicator (red/ amber/ green to represent bolt load) and connectivity to ruggedised tablets/ HMIs
- Wireless communication range of 1km
- Battery powered with a 15-year battery life
- Robust design
- Ingress protection to IP68
- Shock tested to 1000g
- Extended temperature range

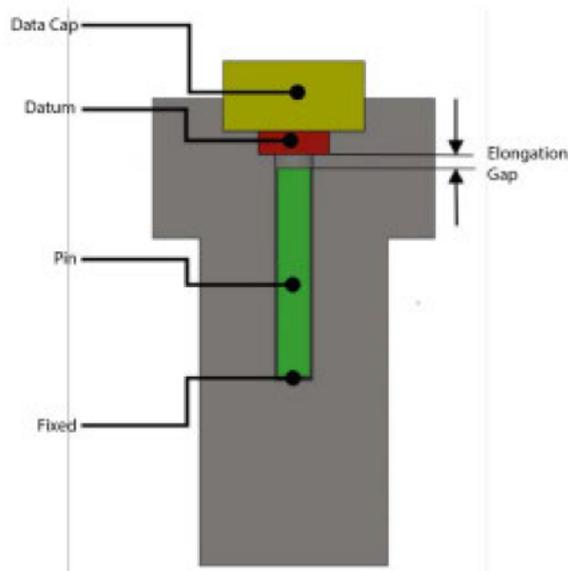
[www.tensionpro.co.uk](http://www.tensionpro.co.uk)

# tensionpro

THE BOLT TENSIONER EXPERTS

## SERIES: InterBolt™ Intelligent Bolt Load Monitoring

# DATASHEET DS-3000



### How it works

The bolt is drilled with a small 4mm diameter hole and a measuring pin is assembled and fixed at the bottom of the hole using a specialised permanent bonding technique. The data-cap and datum is assembled into the top of the bolt or stud.

### Bolt Load & Bolt Strain

When the bolt is loaded it stretches, just like a very stiff spring. This stretch, or bolt strain is completely proportional to the bolt load. The gap between the cap datum and the measuring pin therefore also changes with different bolt load. The data cap measures electronically very precisely the elongation gap and converts it into the bolt load.

### Calibrated

The InterBolt is calibrated across the full load range of the bolt from zero to full proof stress.

### Load Verification

The InterBolt has the target load pre-set according to the application requirements with simple LED indicator that illuminates red, amber or green. The exact load figure can also be read and recorded on a connected tablet display.

### Load Monitoring

The InterBolt communicates the bolt load data through a LoRa low power high range wireless signal. The exceptional system and power management allows for a 15 year battery life and a 1 km or more range.

### Versatile Gateway and System Integration

The InterBolt system includes simple gateway options to link the LoRa signal with customer requirements of cellular, Ethernet and wifi to connect to customer network or InterBolt cloud applications.



[www.tensionpro.co.uk](http://www.tensionpro.co.uk)

# Eigenständigkeitserklärung



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Hamburg University of Applied Sciences

## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

<b><u>Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit</u></b>		
Hiermit versichere ich,		
Name:	<input style="width: 100%;" type="text" value="Trick"/>	
Vorname:	<input style="width: 100%;" type="text" value="Alvaro David Basilius"/>	
dass ich die vorliegende Bachelorarbeit <input type="checkbox"/> bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:		
Schiffstaugliche Konzeption der Messung und Überwachung von relevanten Kräften in einer Schraubenverbindung mittels sensorintegrierender Maschinenelemente		
ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.		
- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -		
Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der <input style="width: 100px;" type="text" value="-bitte auswählen-"/> ist erfolgt durch:		
Hamburg	03.03.2024	Unterschrift im Original
Ort	Datum	Unterschrift im Original