



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Analyse der Leistungsfähigkeit von Schraubenverbindungen mit lackierten Bauteilen

Schraubenfachtagung Hochschule Offenburg

13.09.2016



# Agenda

## Agenda – Strukturierung des Vortrages

---

- Ausgangssituation
- Stand von Normen und Richtlinien
- Problematik –  
Schraubenverbindungen mit lackierten Bauteilen  
inkl. Thema und Abgrenzung
- Referenzanwendungsfall Mobilkran Kugeldrehkranz
- Versuche und Ergebnisse
- Zusammenfassung und Ausblick

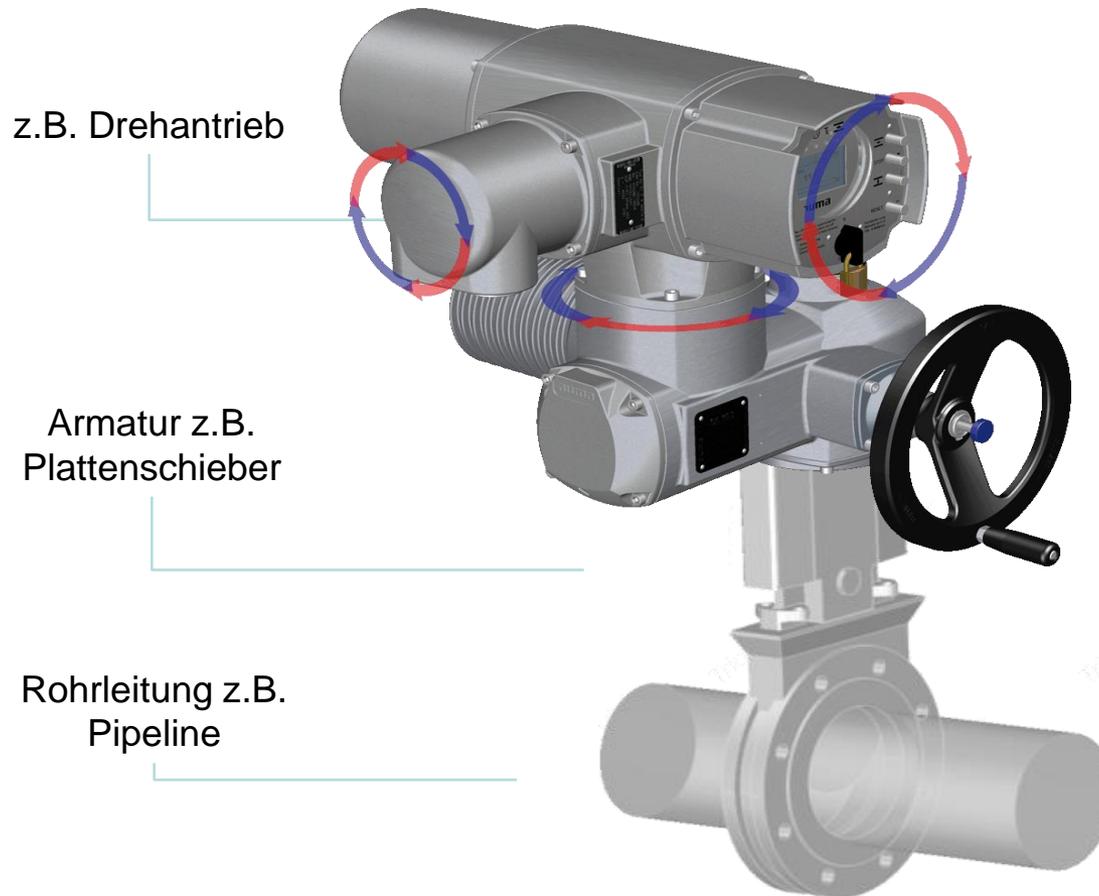


# Ausgangssituation

## AUMA Stellantriebe

# Praxisbericht - Industriearmaturen

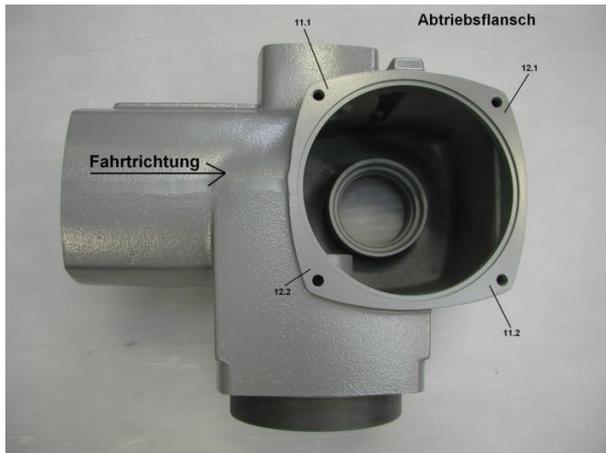
## AUMA automatisiert Armaturen mit Stellantrieben



# Montage mit lackierten Einzelteilen und Baugruppen



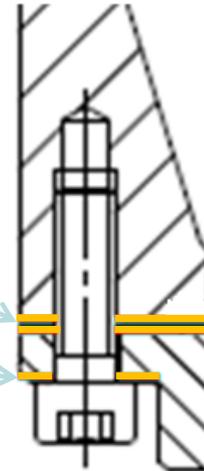
# Herausforderung: Pulverlack in der Schraubverbindung



## Wie verhält sich der Pulverlack?

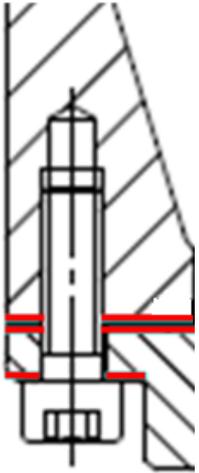
2 Pulverlackschichten in  
der Trennfuge

Pulverlackschicht unter dem  
Schraubenkopf



Pulverlack	Grundlack	Decklack
Schichtdicke je Pulverlackschicht	60 $\mu\text{m}$ – 80 $\mu\text{m}$	60 $\mu\text{m}$ – 80 $\mu\text{m}$
Gesamtschichtdicke je Pulverlackschicht	120 $\mu\text{m}$ – 160 $\mu\text{m}$	
Gesamtschichtdicke in Schraubverbindung	360 $\mu\text{m}$ – 480 $\mu\text{m}$	

## Herausforderung – Lack im Kraftfluss



**Warum ist dies eine Herausforderung?**

M 24 x 3; 10.9; 100 mm Klemmlänge

Anzug auf 90% Streckgrenze.

Wie sehr längt sich dabei die Schraube?

Was hat die Längung der Schraube mit der Gesamtschichtstärke im Kraftfluss zu tun?

**Wie?**

**Worin genau besteht das technische Risiko?**



# Stand von Normen und Richtlinien

# Fazit bzgl. Normen und Richtlinien

## DIN EN ISO 12944

- **„Ein Beschichtungsstoff ... darf auf die Reibfläche aufgetragen werden.“**  
- vorausgesetzt:
- **„mit einem geeigneten Reibbeiwert“**
- **... es „sind Beschichtungssysteme zu verwenden, die nicht zu einer unzulässigen Abnahme der Vorspannung führen.“**
- **„Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben sind so gegen Korrosion zu schützen, daß die Schutzdauer der des Korrosionsschutzes für das Bauwerk entspricht.“**

## DIN EN 1090-2:

- **Verlust der Vorspannkraft  $\leq 10\%$ .... Geeignet für Verbindungen mit Zug und Schubbeanspruchung. **Info:** Anzug drehmomentgesteuert auf 70% Re.**
- Verlust der Vorspannkraft  $\leq 30\%$ .... Geeignet für Verbindungen mit Schubbeanspruchung.

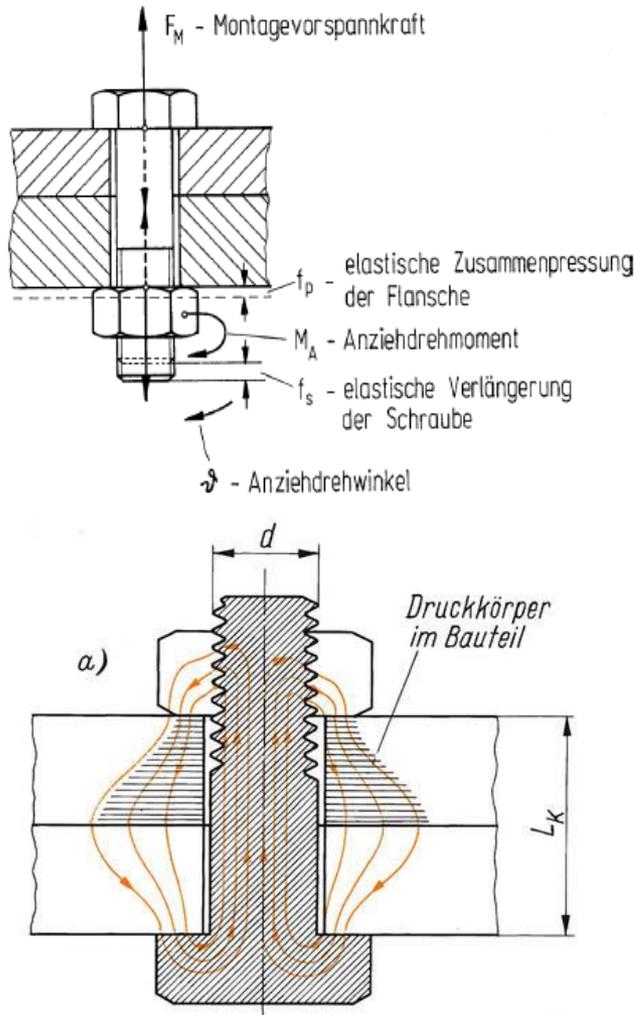
## VDI 2230:

- **Organische Beschichtungen mit integrierten Festschmierstoff oder Wachsdispersion sind der Reibzahlklasse B (0,08 bis 0,16) zuzuordnen.**  
Gleitlacke, Trockenschmierstoffe.



# Problematik– Schraubenverbindungen, Vorspannkraft, lackierte Bauteile, Leistungsfähigkeit

# Vorspannkraft in ausreichender Höhe erzeugt den Kraftfluss. Gleiten wird durch Reibschluss vermieden.

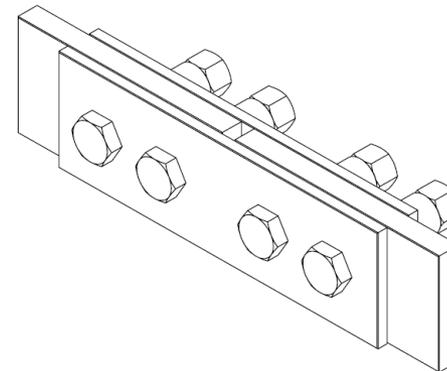


In der Montage wird die Vorspannkraft  $F_M$  und somit der Kraftfluss erzeugt.

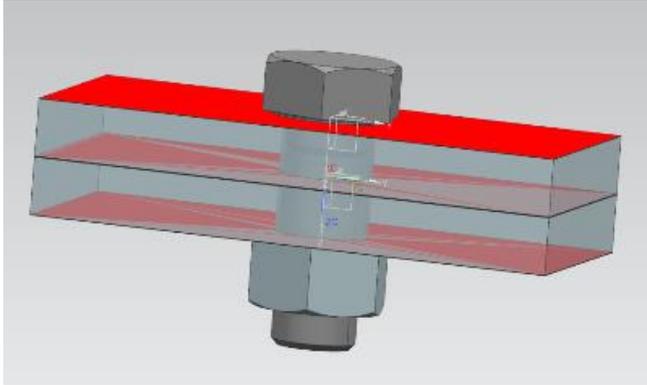
$$F_M = \frac{M}{\left(0,16 \times P + 0,58 \times d_2 \times \mu_{th} + \frac{D_{Km}}{2} \mu_b\right)}$$

**Betriebssicherheit** verlangt:

Mindestvorspannkraft oder Mindestklemmkraft muss gewährleistet sein, damit **kein Gleiten in der Trennfuge** entsteht. Sonst Folgeschäden und Versagen der Verbindung.



# Korrosionsschutz - Lackierte Bauteile – Lackschicht in die Reibfläche – Wirkprinzip beeinflusst – Wirkung fraglich



**Wie?** - Im Maschinenbau und Fahrzeugbau „normativ“ nicht eindeutig geregelt.

**Richtlinie VDI 2230 enthält sich.**

DIN EN 13001-4 in Entstehung, k. A.

**Stahlbau:**

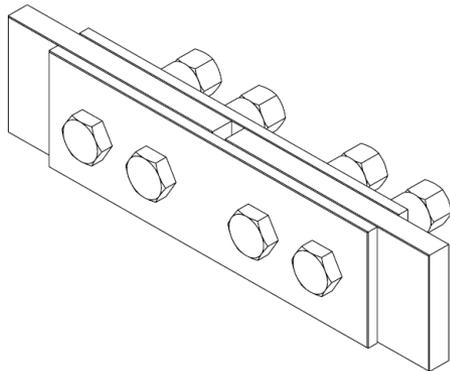
**DIN EN ISO 12944 – verlangt es...**

DIN EN 1090-2 - regelt es... StBau spezifisch.

**Praxis:**

**Unsicherheiten** führen zu Maskierungen und zum Risiko: Wasserstoffversprödung.

Hochfeste Schrauben: 12.9 – 16.8



**Folge:**





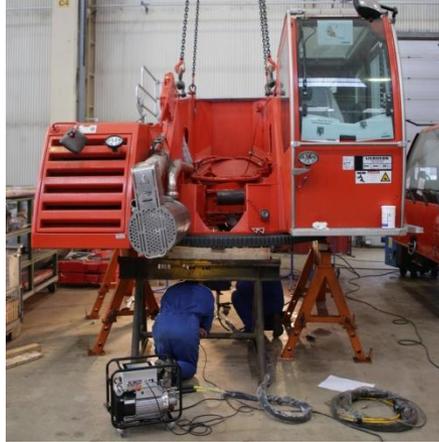
# Referenzanwendungsfall

## LIEBHERR Mobilkran – Drehkranz

Verbindung von Oberwagen zu Unterwagen

# Analoge Problemstellung Liebherr – Mobilkräne

## Drehkranz-Verschraubung



Anhand des Referenz-Anwendungsfalles galt es die Entwicklung, die Optimierung sowie den Fähigkeitsnachweis bzgl.:

- eines **sicheren Schraubmontageprozesses unter Anwendung des streckgrenzengesteuerten Anziehverfahrens (Gradientenverfahren)**;
- **geeigneter Lacksysteme hinsichtlich Vorspannkraftverlust, Reibung und Korrosionsschutz**

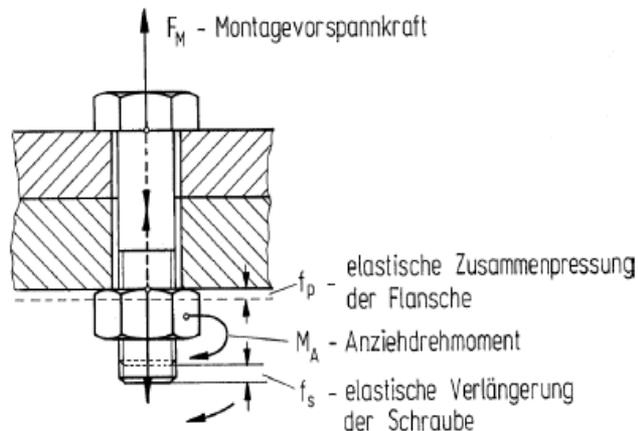
zu erbringen.



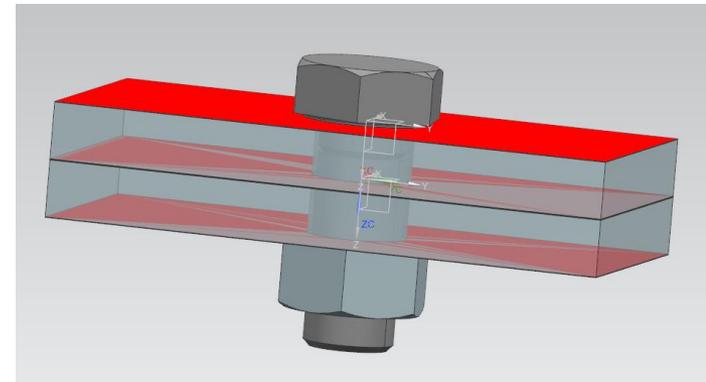
# Schraubmontageprozess unter Anwendung des streckgrenzengesteuerten Anziehverfahrens (Gradientenverfahren)

## Schraubmontage mit lackierten Bauteilen

- Die Montagevorspannkraft erfüllt die Funktion einer Schraubenverbindung, zwei oder mehr Bauteile so zu verbinden, dass sie wie ein Ganzes wirken.
- Korrosionsschutzlacke beeinflussen** die Schraubmontage und deren Ergebnisse entscheidend,
- insbesondere im Hinblick auf **Reibung**, erforderliche **Drehmomente und Drehwinkel**, das sich ergebende Setzverhalten **sowie** die effektiv **resultierende Montagevorspannkraft**.



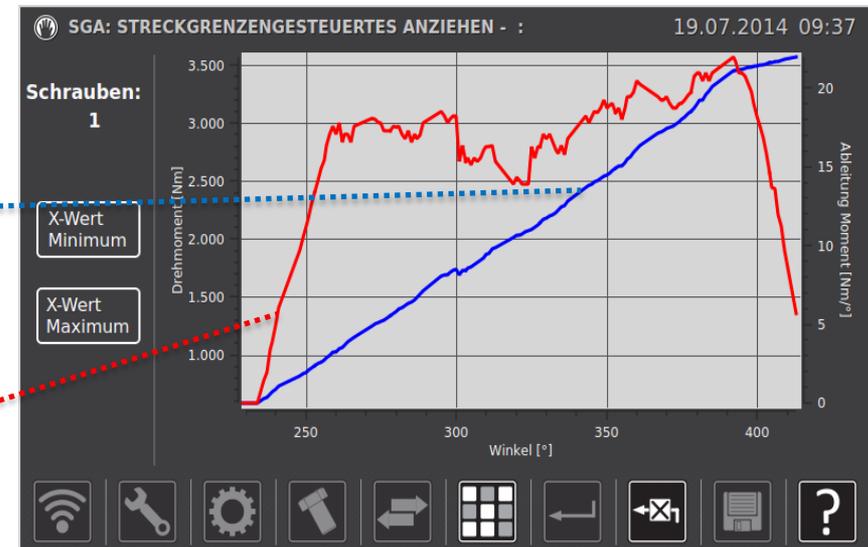
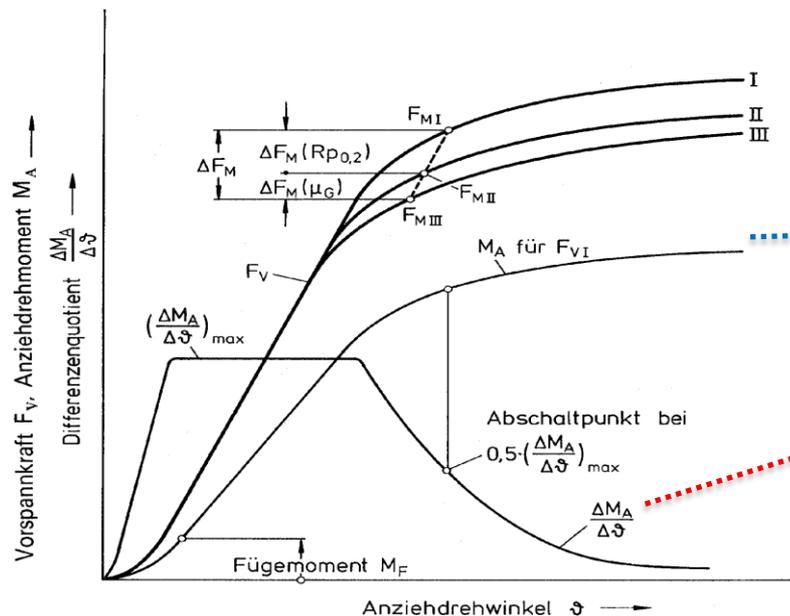
Quelle: Kloos, K.-H.; Thomala, W.: Schraubenverbindungen, Kap. 8



Quelle: Eigendarstellung Hochschule Offenburg

# Streckgrenzgesteuerte Schraubmontage via Gradientensteuerung

- **Ziel: Maximale Nutzung der Leistungsfähigkeit der Schraubverbindung.**
- **Streckgrenzgesteuertes Anziehen** der Schraubverbindung bis zur plastischen Verformung der Schraube
- Die **Reibung in der Kopfauflage hat keinen negativen Einfluss** auf das Prozessergebnis der Vorspannkraft.
- **Materialprobleme**, Oberflächenprobleme und Prozessprobleme können frühzeitig erkannt werden.- **Analysetool.**



Quelle: Praxisdaten SGA – Fa. Juko Technik GmbH (Smartorc)

Quelle: Kloos, K.-H.; Thomala, W.: Schraubverbindungen, Kap. 8

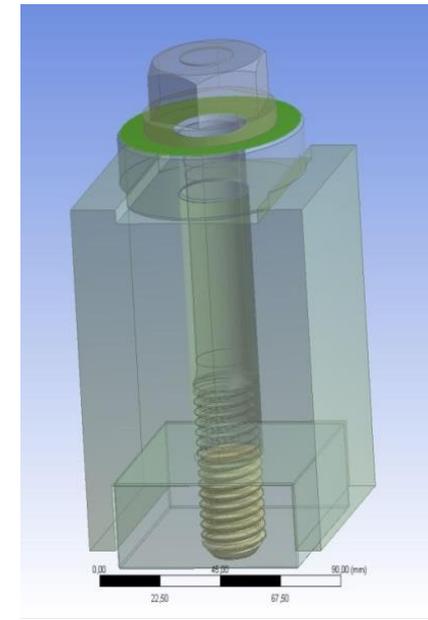


# Eco2Touch - Schraubmontageversuche im Labor

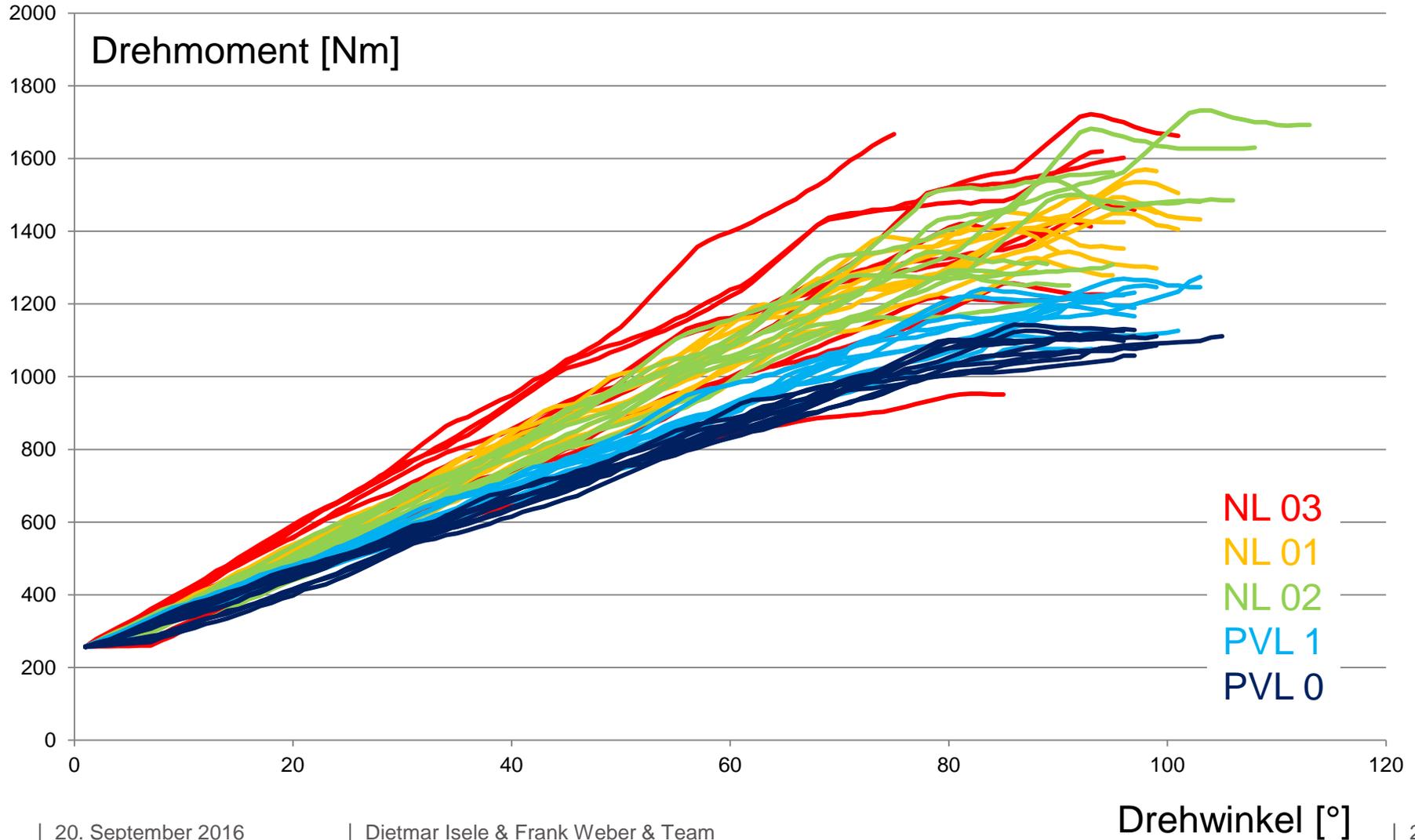
## Realitätsnaher Versuchsaufbau



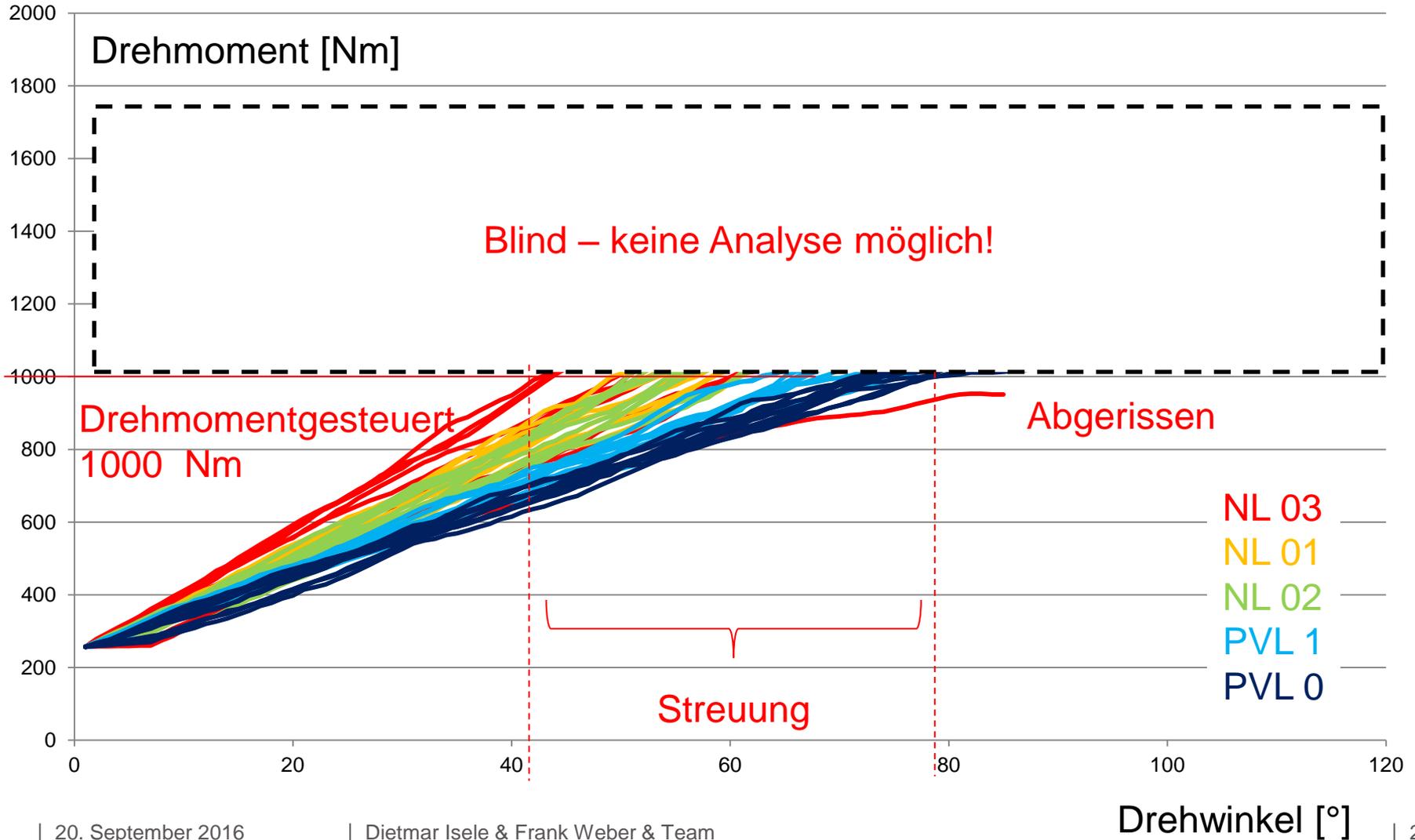
- Das Anziehen der Verbindungen erfolgte mit der Eco2Touch von JUKO Technik und dem Werkzeug Avanti 1 von Hytorc (max.1780 Nm)
- **Fünf verschiedene Lackschichten mit jeweils 10 Prüfkörpern somit insgesamt 50 Prüfkörper im Vergleich zu unlackierten Bauteilen.**
- Die Bezeichnungen der Beschichtungen lauteten:
  - PVL-0 } Pulverlacke
  - PVL-1 }
  - NL 01 } Nasslacke
  - NL 02 }
  - NL 03 }



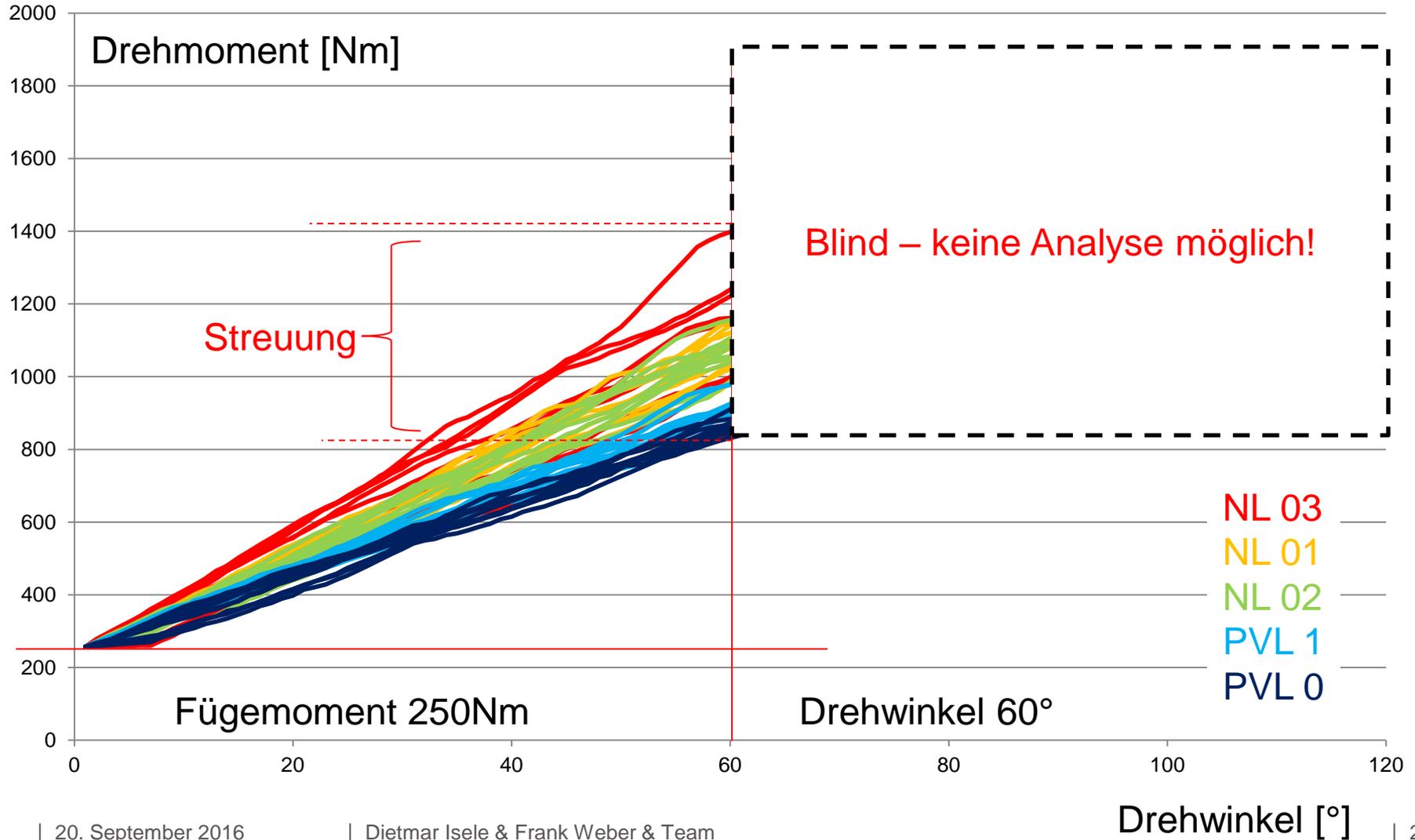
# Vergleich der Drehmoment-Drehwinkel-Kurven verschiedener Lackschichten



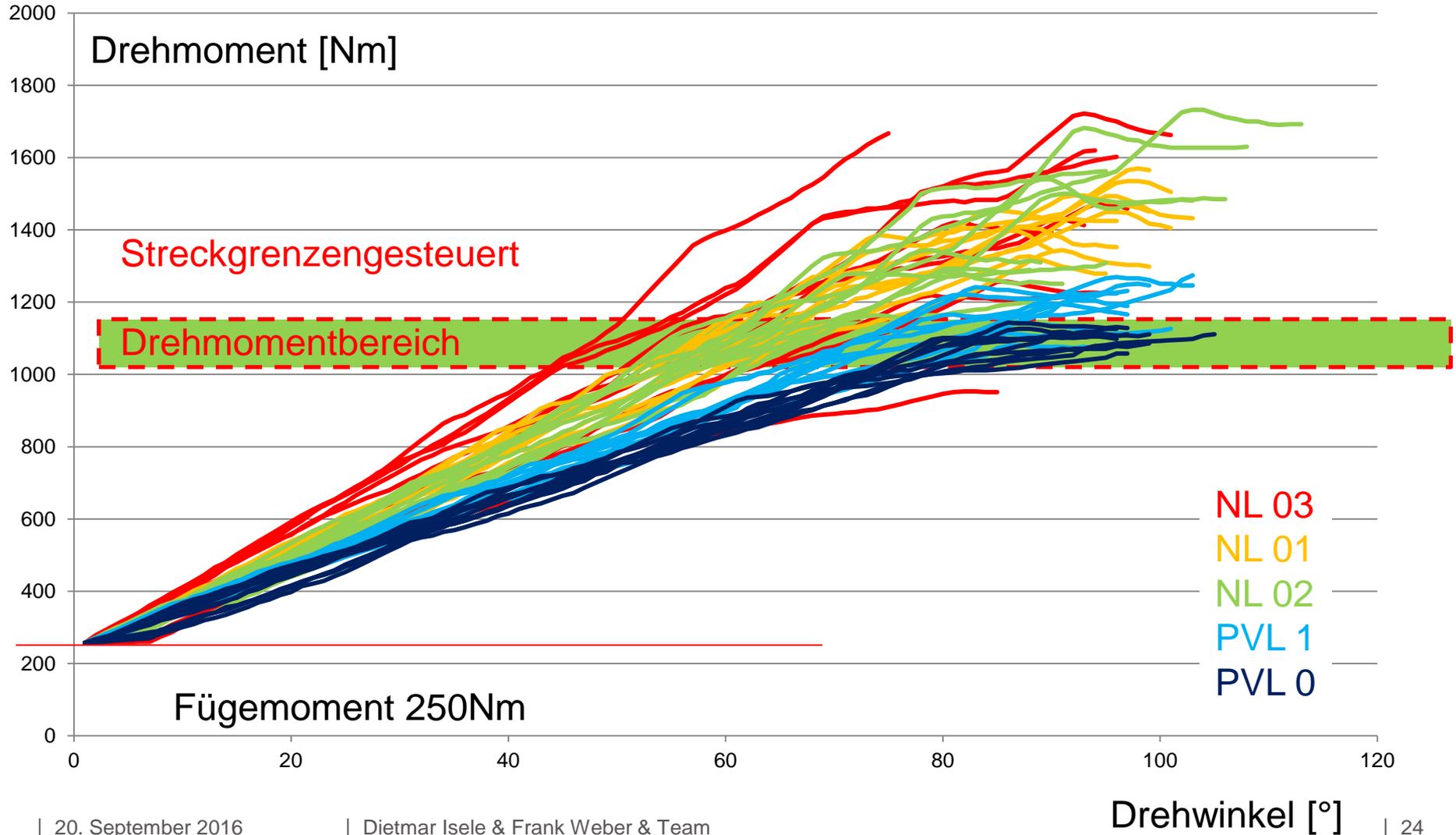
# Vergleich der Drehmoment-Drehwinkel-Kurven verschiedener Lackschichten



# Vergleich der Drehmoment-Drehwinkel-Kurven verschiedener Lackschichten



# Vergleich der Drehmoment-Drehwinkel-Kurven verschiedener Lackschichten



## Ergebnisse der Schraubmontageversuche

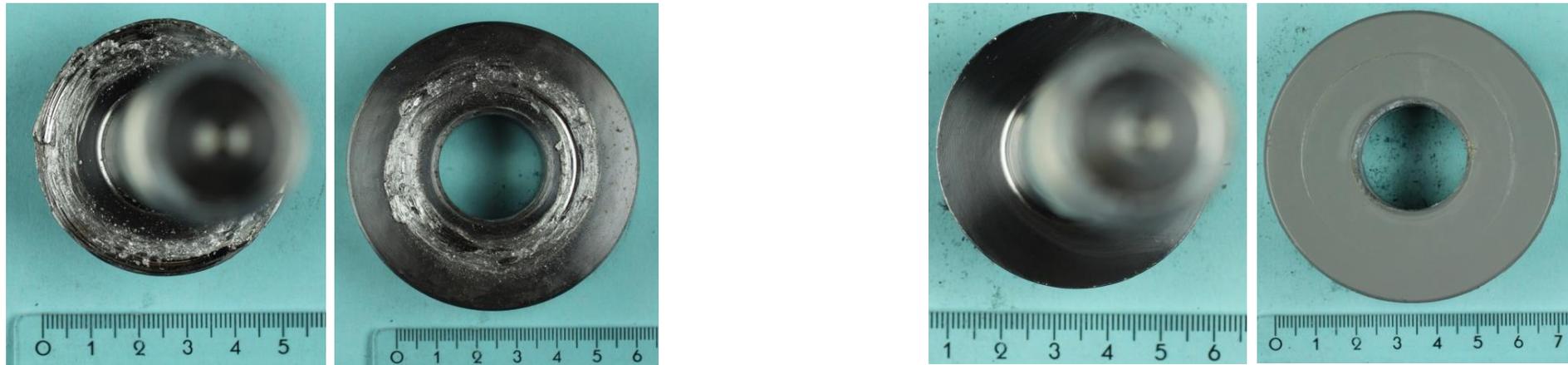
- Die **Eco2Touch ist** durch Anwendung des streckgrenzengesteuerten Anzugverfahrens **in der Lage beliebige Schraubverbindungen bzgl. Ihres möglichen Potentials zu analysieren**
- Die Eco2Touch von JUKO Technik ist in Verbindung mit dem Hytorc Werkzeug in der Lage, Schraubenverbindungen mit den analysierten Lackschichten im Kraftfluss **wiederholgenau streckgrenzengesteuert anzuziehen**
- **Die untersuchten Lackschichten unterscheiden sich zum Teil erheblich in der Neigung zur Abrasion und dem Reibwert**





# Vorauswahl von Lacksystemen

## Vergleich der Extreme – Unterschiede nur in der Kopfauflage

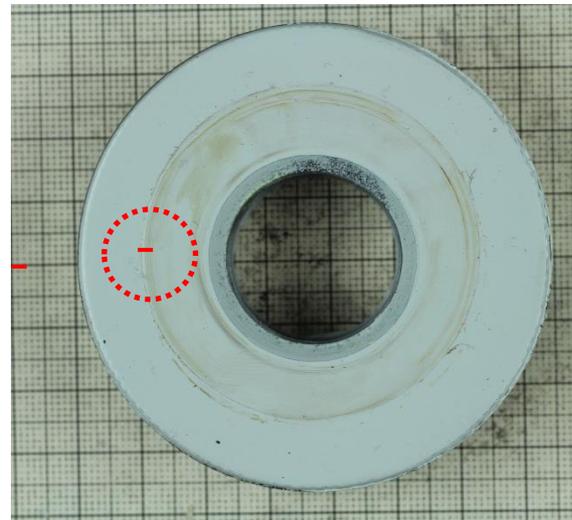
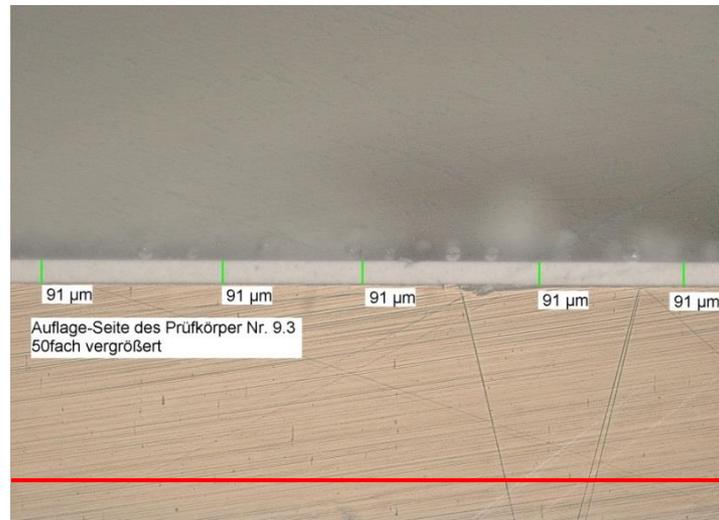
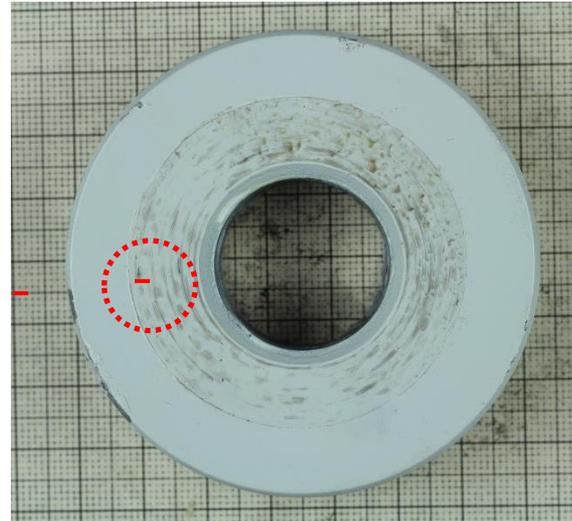


	F <sub>75%F<sub>p</sub></sub> kN	T <sub>75%F<sub>p</sub></sub> Nm	T <sub>th 75%F<sub>p</sub></sub> Nm	T <sub>b 75%F<sub>p</sub></sub> Nm	Wkl <sub>75%F<sub>p</sub></sub> °	μ <sub>tot 75%F<sub>p</sub></sub>	μ <sub>th 75%F<sub>p</sub></sub>	μ <sub>b 75%F<sub>p</sub></sub>	F <sub>F</sub> -Streckgrenze kN	T <sub>F</sub> -Streckgrenze Nm	Wkl <sub>F</sub> -Streckgrenze °
2.1	221,16	2344,14	323,19	2020,96	173,00	0,31	0,08	0,46	327,95	4367,94	61,00
7.1	220,52	473,52	326,96	146,56	156,00	0,05	0,08	0,03	328,05	704,11	56,00
Range	0,64	1870,62	3,77	1874,40	17,00	0,26	0,00	0,43	0,10	3663,83	5,00

DIN EN ISO 16047:2013-01 Kapitel 10 Versuchsauswertung: „Wenn nicht anders vereinbart, muss die Bestimmung bei einem Vorspannkraftniveau erfolgen, das 75 % der Prüfkraft (0,75 F<sub>p</sub>) des Referenzteiles oder des Prüfteiles beträgt, wobei der kleinere Wert gilt.“  
 Prüfkraft F<sub>p</sub>=293kN (siehe DIN EN ISO 898-1:2013-05 Tabelle 5)

**Im Ergebnis eindeutig: Rechts Bauteil i. O., Schraube i. O.**  
**Verschleißschutz und Korrosionsschutz gegeben!**

# Lackschichten trotz Streckgrenze bei 320kN unzerstört



**Besonderheit:**  
Prüflinge via  
M24-10.9  
Drehkranz-  
schraube auf  
Re angezogen;  
60min bzgl.  
Vorspannkraftrela-  
xation gehalten  
und wieder  
geöffnet.

**Ergo:**  
i.d.R.  
Lackschicht  
unzerstört.

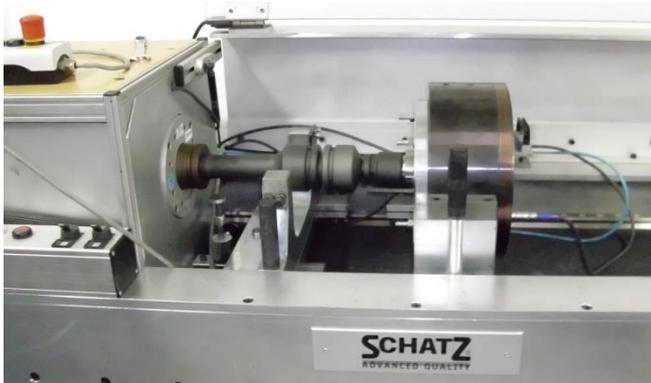
Schliffbilder der  
Schraubenkopfauflage  
Prüfling: Oben 7.1 – ER 1936 sowie  
Unten: 9.3 – PVL 1

# Ermittlung von Kopf- und Gewindereibung nach ISO 16047

Lackiert, Gewinde und Kopf geschmiert Nr	$F_{75\% F_p}$ kN	$T_{75\% F_p}$ Nm	$T_{th 75\% F_p}$ Nm	$T_b 75\% F_p$ Nm	$Wkl_{75\% F_p}$ °	$\mu_{tot 75\% F_p}$	$\mu_{th 75\% F_p}$
7.1	220,52	473,52	326,96	146,56	156,00	0,05	0,08

$\mu_{th}$ : Reibkoeffizient Gewinde  
 $\mu_{tot}$ : Reibkoeffizient gesamt  
 $\mu_b$ : Reibkoeffizient Kopf

Lackiert, Gewinde und Kopf geschmiert Nr	$\mu_b 75\% F_p$	$F_{F\text{-Streckgrenze}}$ kN	$T_{F\text{-Streckgrenze}}$ Nm	$Wkl_{F\text{-Streckgrenze}}$ °
7.1	0,03	328,05	704,11	56,00



## Reibungskoeffizient in der Kopfauflage $\mu_b$ :

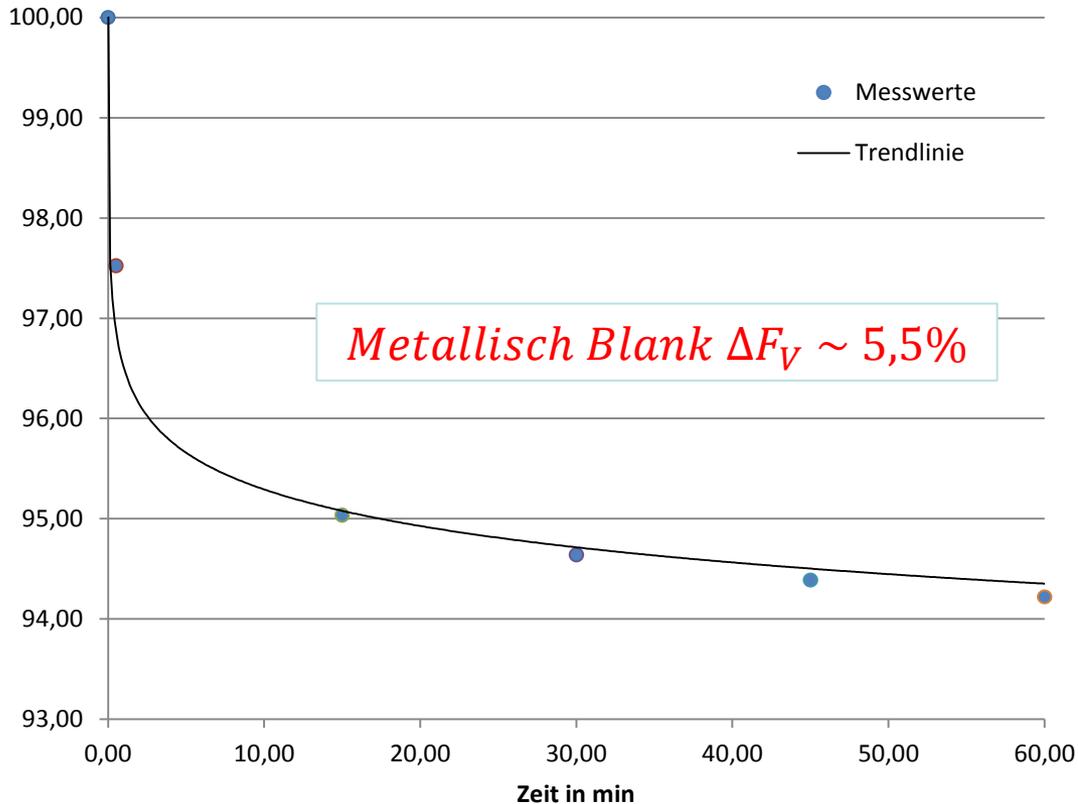
- $\mu_b$  max bei NL 03 :  $\mu_b = 0,14$
- $\mu_b$  min bei PVL 1:  $\mu_b = 0,05$
- Range = 0,09

## Hinweis:

- Geschmierter Kopf und metallisch blankes Bauteil haben denselben Koeffizienten wie ungeschmierter Kopf und mit PVL-1 lackiertes Bauteil:  $\mu_b=0,05$

**Vortrag Morgen !**

# Prozentualer Vorspannkraftverlust über 60 min bei RT



Die Untersuchung erfolgte an 50 lackierten Kopfaufbauteilen mit Schrauben M24 der Festigkeit 10.9. Die Messwerte sind arithmetisch gemittelte Werte.

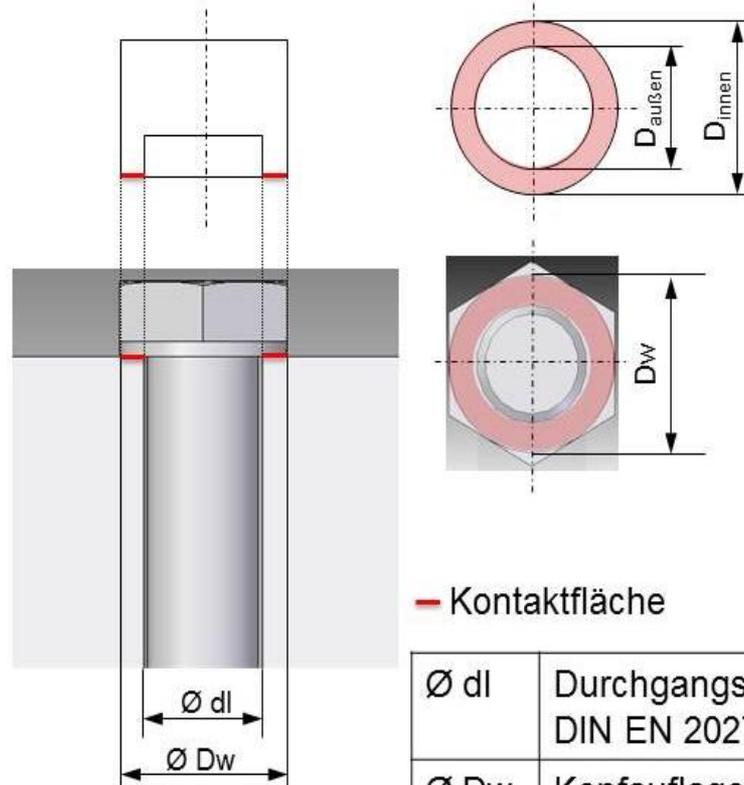


# Vorspannkraftverlustversuche im Labor – $p$ , $t$ , $T$

# Grundprinzip Kopfauflagefläche via Stempel abgebildet

Stempel (Model)

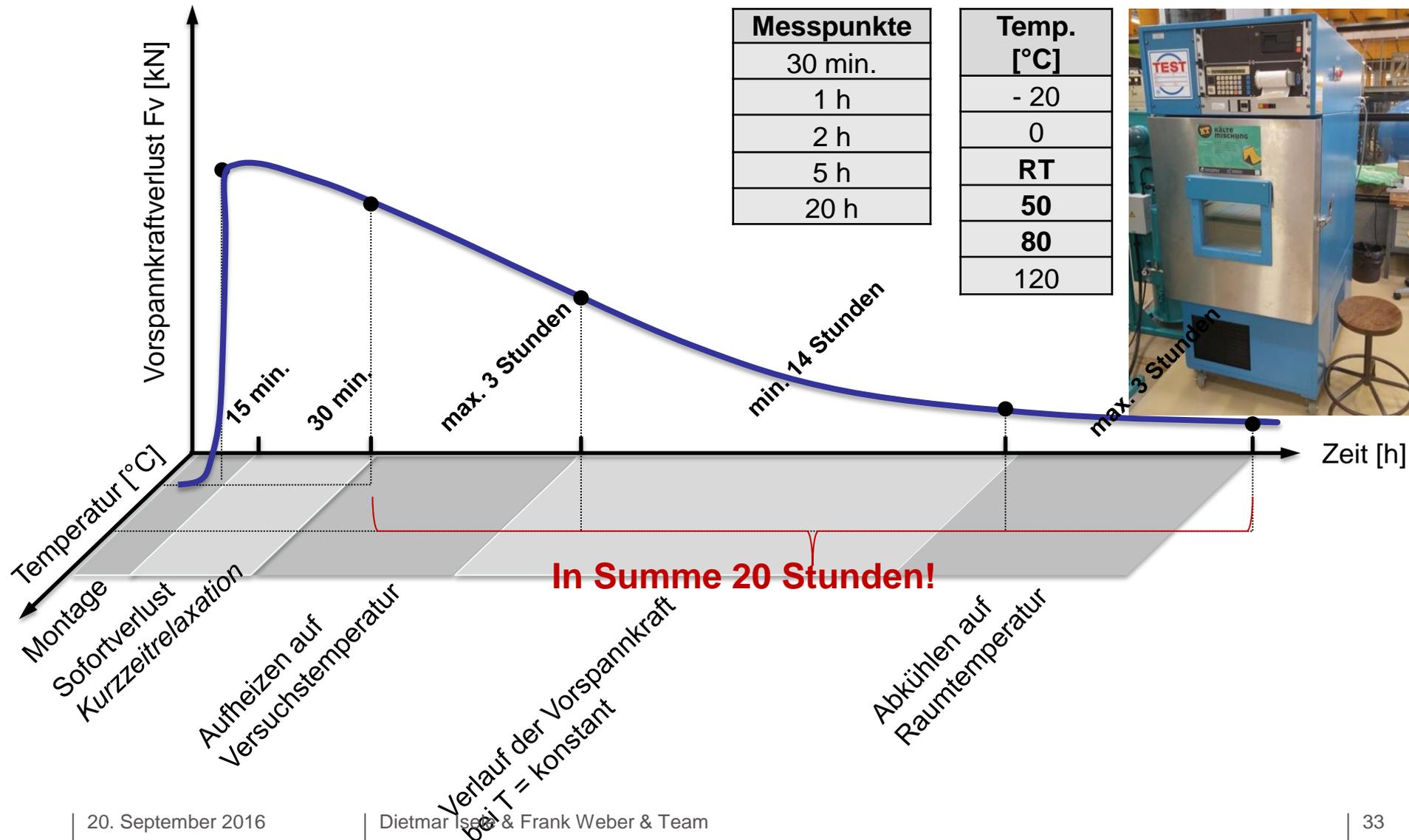
Verschraubungsfall (real)



— Kontaktfläche

$\varnothing dl$	Durchgangsbohrung DIN EN 20273 (fein)
$\varnothing Dw$	Kopfauflegedurchmesser

# Versuchsablauf, so dass eine Messreihe in 24h Zyklus passt... 4 Messreihen je Woche je Vorrichtung.





# Eindringtiefen quantifizieren

# Eindringtiefen

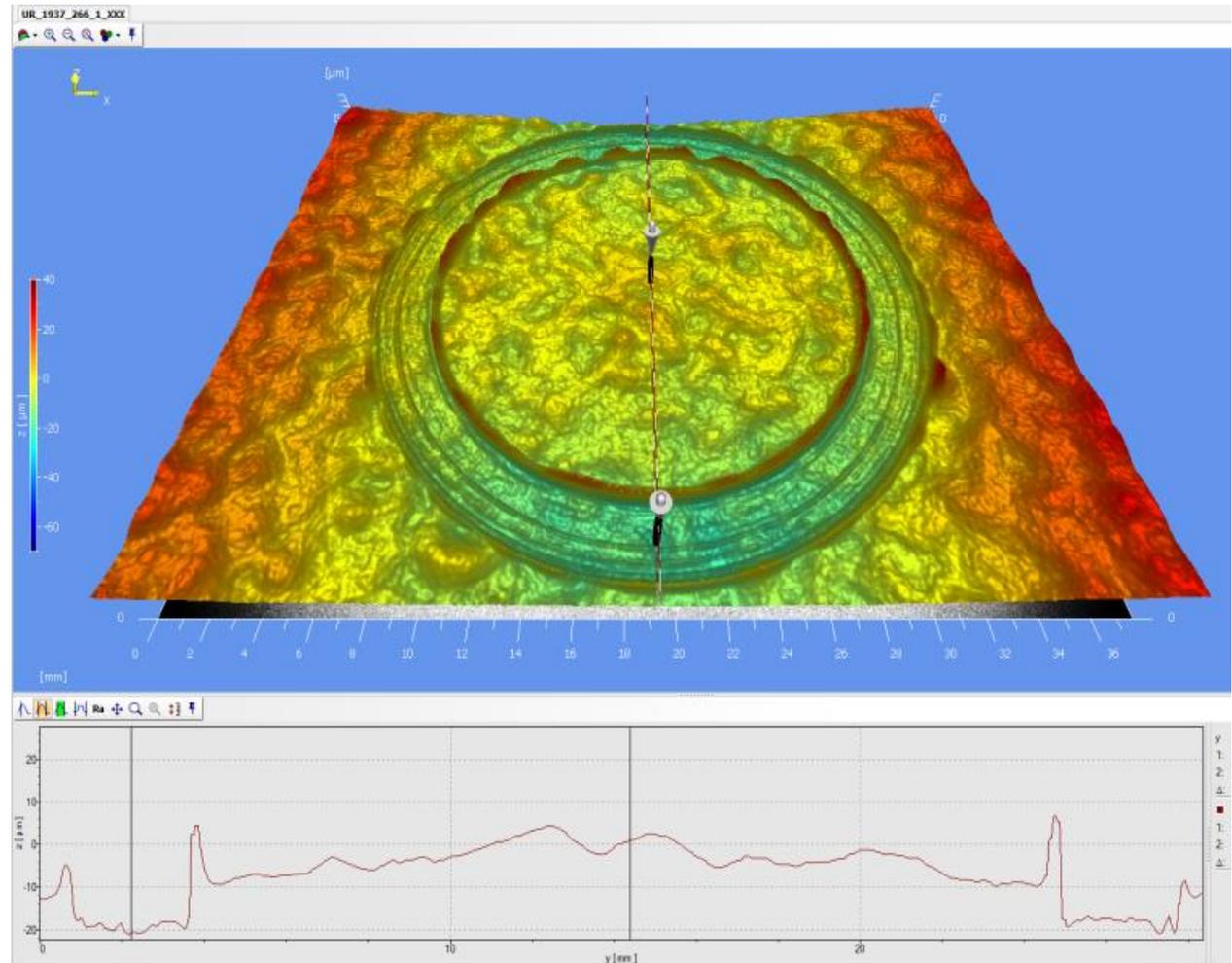
Messen der Eindringtiefe mit TMS100 (Weißlichtinterferometer)



# Ermittlung der Eindringtiefe

Profilschnitt und Flächenschwerpunkt - LCS 3 hardened with 70°C and tested with 50°C

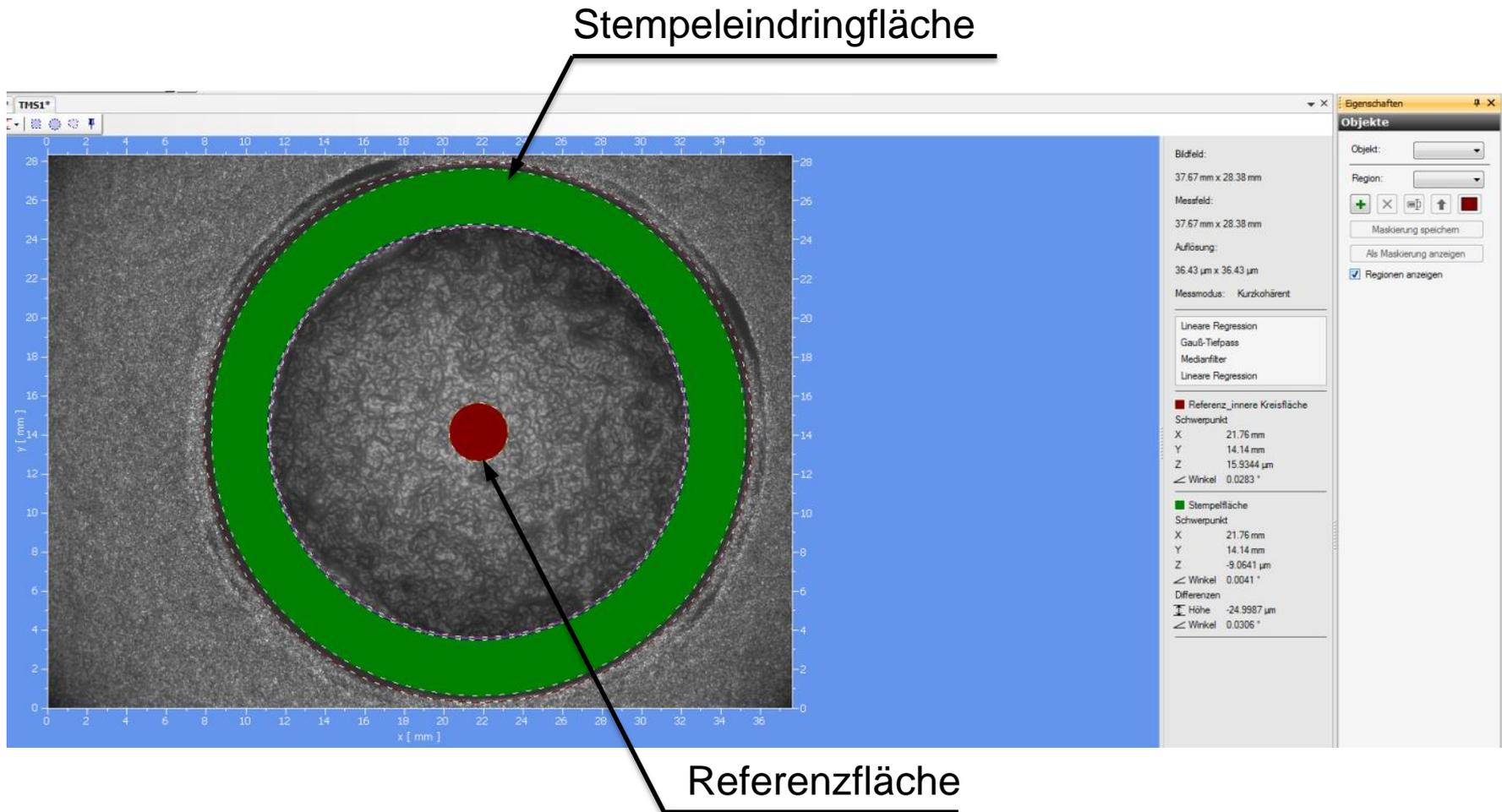
**3D-Ansicht  
Flächenschwerpunkt**



**2D-Ansicht  
Profilschnitt**

# Ermittlung der Eindringtiefe

## Profilschnitt und Flächenschwerpunkt





# Zusammenfassung & Ausblick

# Zusammenfassung

## Schraubmontage:

- Die Eco2Touch ist in der Lage, auch mit den analysierten Lackschichten im Kraftfluss wiederholgenau streckgrenzengesteuert anzuziehen
- **Das streckgrenzengesteuerten Anzugverfahrens ist in der Lage beliebige Schraubverbindungen bzgl. Ihres möglichen Potentials zu analysieren**

## Lacke in der Kopfauflage:

- **Lackschicht bleibt zusammenhängend**  
(Trotz mit M24-10.9 rein in Re, halten und wieder raus aus Re)
- **Lackschicht ist KO-Schutzschicht und Verschleißschutzschicht**
- Die verwendeten Lackschichten unterscheiden sich erheblich in der Neigung zur Abrasion und dem Reibwert → **Wahl des Schraubverfahrens entscheidet bzgl. Fähigkeit**
- **Unter den bisherigen, gegebenen Bedingungen: Vorspannkraftverlust „sehr nahe an“ metallisch blank insgesamt weniger als 10%.**

# Ausblick

- Projektergebnisse führen zur Entwicklung angepasster oder neuer Lacksysteme
- Direkt Vorspannkraftgesteuertes Montageverfahren mit Hilfe Intelligenter Messschrauben

## FreiLacke



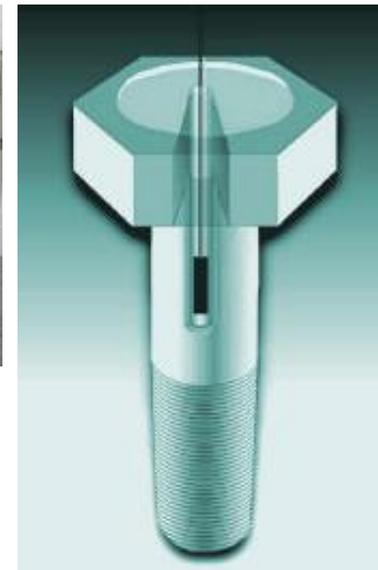
Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

smarttorc®  
intelligentboltingsystems



## Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

**Wenn Sie vor einer entsprechenden Aufgabenstellung stehen und das Know-How sowie die Erfahrung unseres Netzwerkes nutzen möchten dann sprechen Sie uns Bitte an. Danke.**

Jeder Anwendungsfall, jede Konstruktion und jedes Lacksystem haben spezifische Eigenheiten und besondere Unterschiede.

Wir verfügen über eine allgemeingültige Prüfmethodik, Konzepte und erste Lösungen – allerdings sind neue Anwendungen spezifisch zu analysieren und zu bewerten.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Dietmar Isele

Hochschule Offenburg

Fakultät Maschinenbau und  
Verfahrenstechnik

Badstr. 24

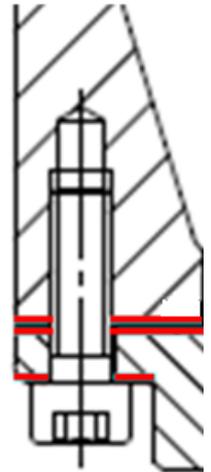
77652 Offenburg

**Fon 0781 205 4625**

Fax 0781 205 454625

Mobil 0174 3385458

**[Dietmar.Isele@hs-offenburg.de](mailto:Dietmar.Isele@hs-offenburg.de)**



## Wie?