

# Schraubenverbindungen bei optimierten Produkten – Herausforderungen für das Lebenszyklusverhalten

**C. Friedrich**

**Universität Siegen, Fak. IV, Department Maschinenbau, MVP**

**Schraubenfachtagung Hochschule Offenburg,  
Offenburg, 13.09.2016**



Prof. Dr.-Ing. C. Friedrich  
Department Maschinenbau  
Institut für Konstruktion  
MVP  
Tel. +49-(0)271-740-4625  
[christoph.friedrich@uni-siegen.de](mailto:christoph.friedrich@uni-siegen.de)



# MVP: Theoretische und experimentelle Optimierung von innovativen Bauteilsystemen für die Zukunft



- MVP: Maschinenelemente, Verbindungstechnik, Produktinnovation
- Zusammenbringen von Funktionsverhalten und Wirtschaftlichkeit für innovative Produkte; Erfahrung mit Produktentwicklung, Simulation, Auslegungsmethoden, Absicherungsmethoden, Kosten- und Leistungsrechnung, Innovationsmethoden – also eine ideale Kombination
- Veranstalter der Schraubfachausbildung, Modul 2, des deutschen Schraubenverbands, weltweite Vernetzung mit Experten
- Fokussierung auf nichtlineares Schädigungsverhalten und Auslegung mit modernen Werkzeugen
- Zur Verbesserung der Industrieunterstützung Ausgründung der AFS Advanced Fastening Solutions GmbH
- Kommende Fachveröffentlichungen, teilweise zusammen mit HS OG:
  - DVM Berlin Additive Manufacturing Nov. 2016,
  - ASME American Society of Mechanical Engineers Vorspannkraftrelaxation mit Lackschichten Nov. 2016,
  - Landshuter Leichtbaukolloquium März 2017 Losdrehen und Additive Manufacturing,
  - VDI Schädigungsmechanismen an Schraubenverbindungen Februar 2017



## Themen des Vortrags

# Schraubenverbindungen bei optimierten Produkten –

## Herausforderungen für das Lebenszyklusverhalten

1. Bedeutung,  
Grundlagen, Unsicherheiten

2. Produktoptimierung heute,  
Produktinnovation

3. Montage: Vorspannkraftstreuung  $\Delta F_V$   
Betrieb: Vorspannkraftrelaxation  $\Delta F_{Vrelax}$

---

4. Zusammenfassung und Ausblick:  
Was ist in Zukunft zu tun?

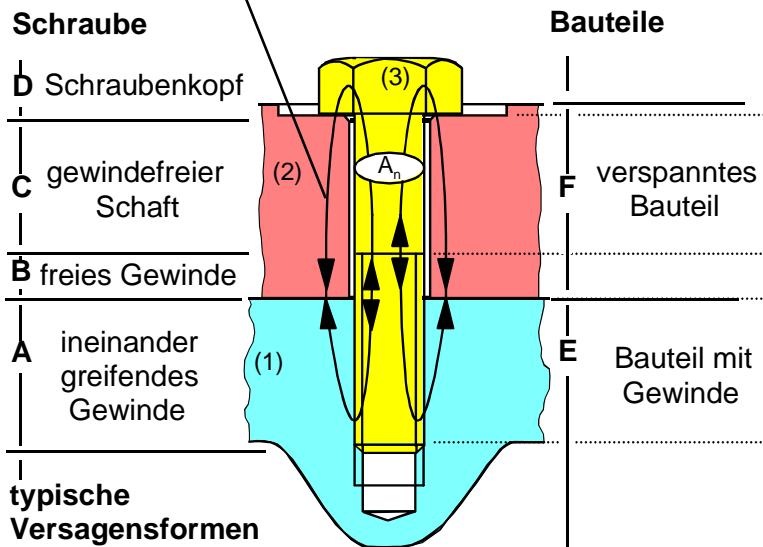
# 1. Bedeutung von Schraubenverbindungen



- Schraubenverbindungen sind das Rückgrat aller innovativen Produkte, da Produkte ja einen wirtschaftlichen Lebenslauf benötigen.
- Vorteilhaft ist die einfache Handhabung bei sehr hohem Kraftübertragungspotential und Zuverlässigkeit (!) sowie viel Know-How und Erfahrung.
- Das bedeutet, Schraubenverbindungen sind der Schlüssel zu innovativen Produkten.
- Das bedeutet auch, Schraubenverbindungen sind höchst funktionsrelevant und haben eine sehr große Schadensbedeutung – stellen Sie sich vor, eine Schraube in einem Getriebe fällt aus, was unmittelbar katastrophale Folgen hat.

# 1. Mechanik von Schraubenverbindungen

## Situation: Geschlossener Kraftfluss



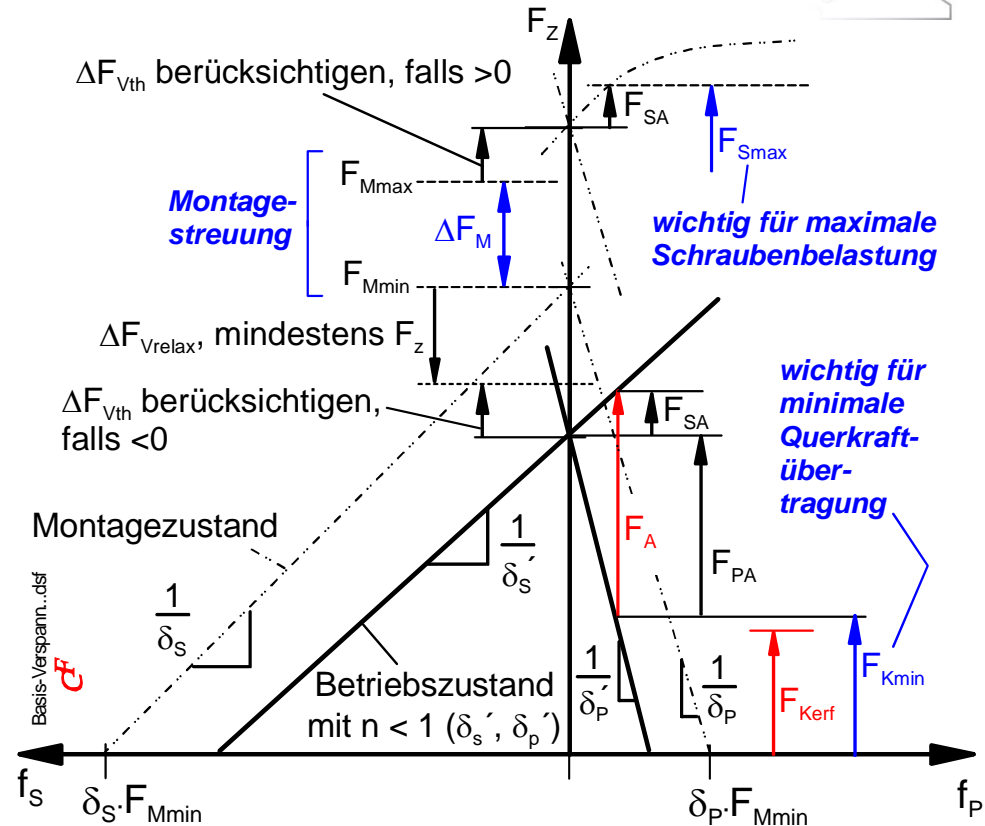
### typische Versagensformen bei Schrauben

- Abscheren des Schraubenkopfes
- Abscheren der Flanken der Schraubendringsgewinde
- Bruch im Kopf-Schaft-Übergang
- Bruch im Schraubenschaft - **erwünscht!**
- Bruch im freien Gewinde - **erwünscht!**
- Bruch im ersten tragenden Gewindegang
- Abscheren der Gewindeflanken

### typisches Bauteilversagen

- Fließen
- Rissbildung
- Kriechen

## Erfassung: Erweitertes Verspannungsschaubild



➤ Entscheidend ist die Vorspannkraft/Klemmkraft in einer Verbindung, nicht das Anziehdrehmoment.

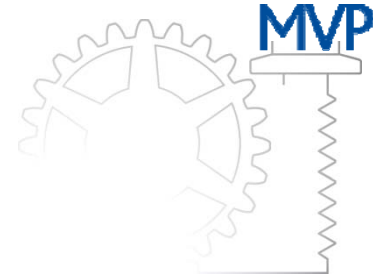
➤ Wichtig ist zu unterscheiden:

A) Montage:  $t = 0$  (Vorspannkraftaufbau mit Streuung)

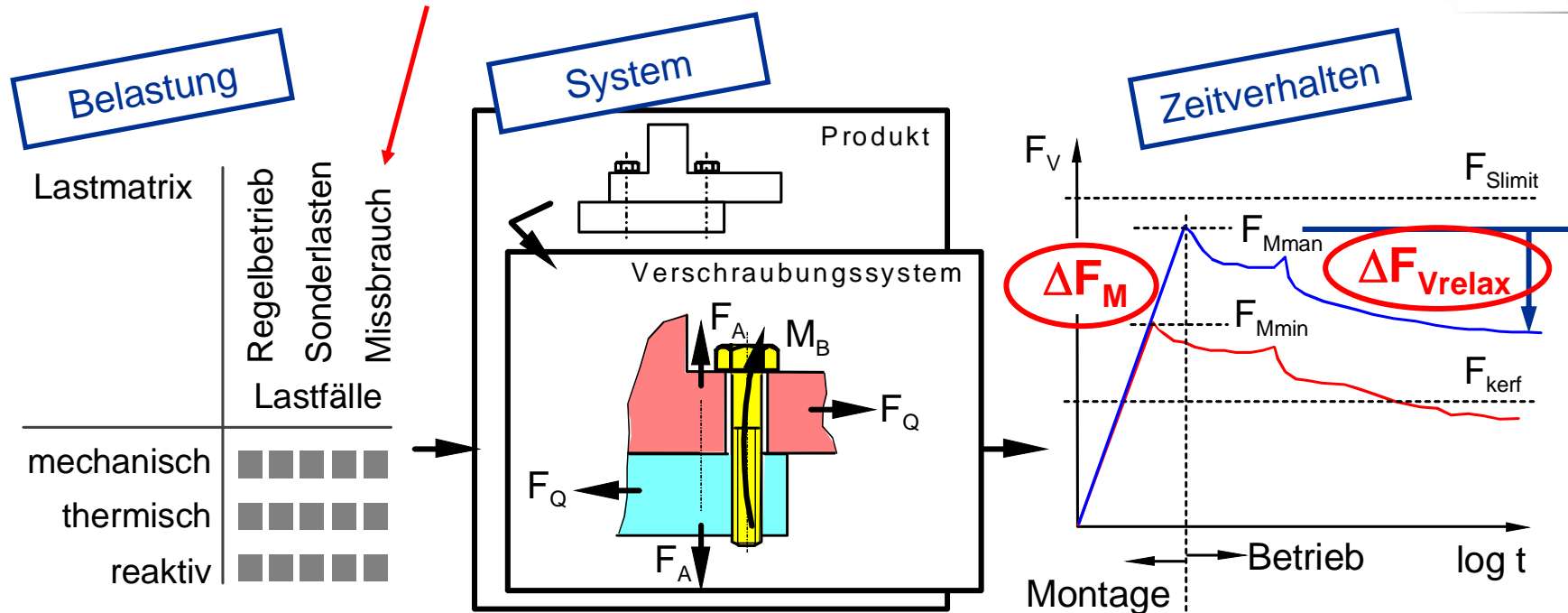
B) Betrieb:  $t > 0$  (Vorspannkraftgeschichte mit Funktionsverhalten)

Weiteres dazu:  
Schraubfachausbildung  
des DSV oder  
Seminare AFS

## 2. Produktoptimierung heute: Vorspannkraftgeschichte beachten



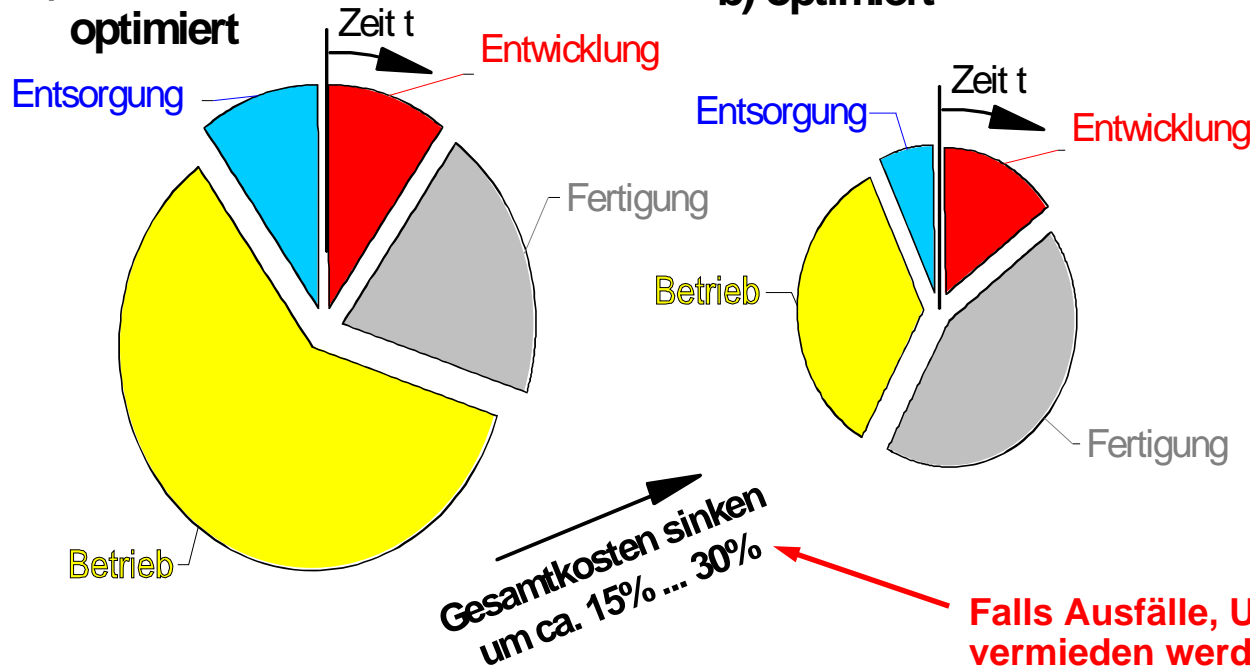
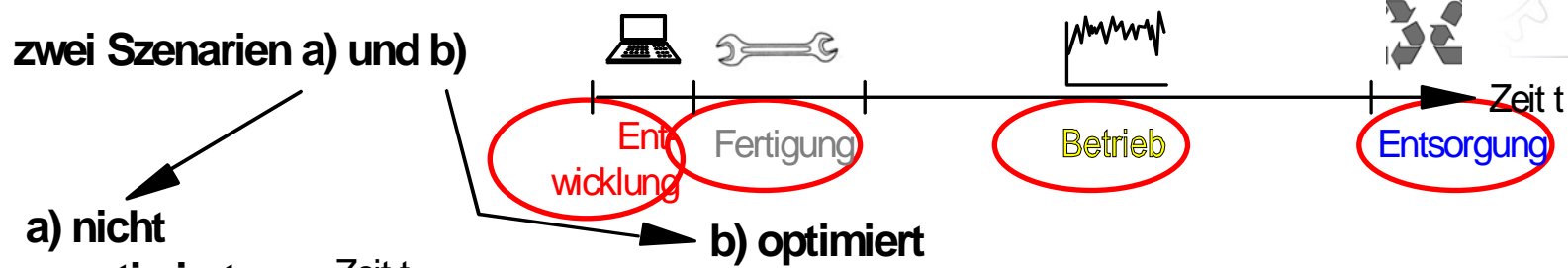
Nach Produkthaftungsgesetz auch zu berücksichtigen



Schematische Darstellung des nichtlinearen Übertragungsverhaltens bei Schraubenverbindungen von der Belastung über das Verbindungssystem zum Vorspannkraftverlauf

- Hohe Werkstoffausnutzung im Leichtbau macht Beachtung von nichtlinearen Abhängigkeiten nötig
- hierdurch Wechsel von Schädigungsmechanismen möglich. z.B. selbsttätiges Losdrehen statt Dauerbruch

## 2. Produktoptimierung heute: Kostenanteile von Schraubenverbindungen im Produktlebenslauf



relative Verbindungskosten...fr.dsif

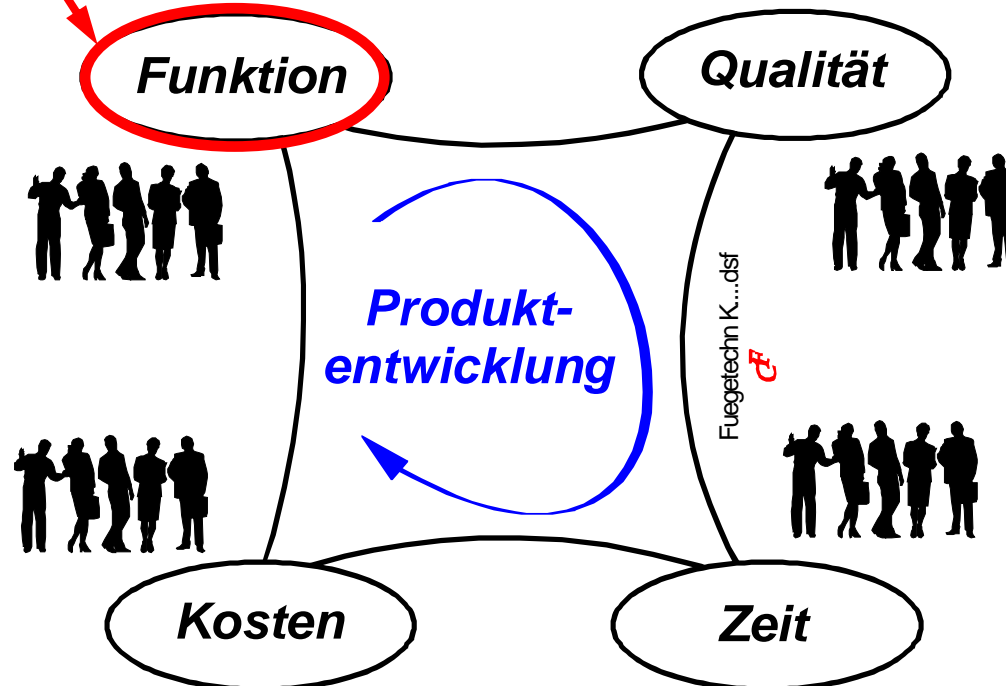
Falls Ausfälle, Unfälle und Rückrufe vermieden werden, noch viel mehr...

- Entwicklung:** Auslegung, Konstruktion, Spezifikation, Dokumentation, Erprobung
- Fertigung:** Bauteilfertigung (Bohrungen, Gewinde, Auflagefläche, Trennfuge)
- Betrieb:** Wartung, Reparatur, anteilige Energiekosten bei bewegten Komponenten
- Entsorgung:** Demontage, Logistik

## 2. Produktinnovation: Neue Funktionalität ist nötig und muss betont werden

- Innovation
- Anwendernutzen
- Marktattraktivität
- Marktpositionierung

- Produktqualität
- Prozessqualität
- QS-Aufwand
- Fehlerbehandlung

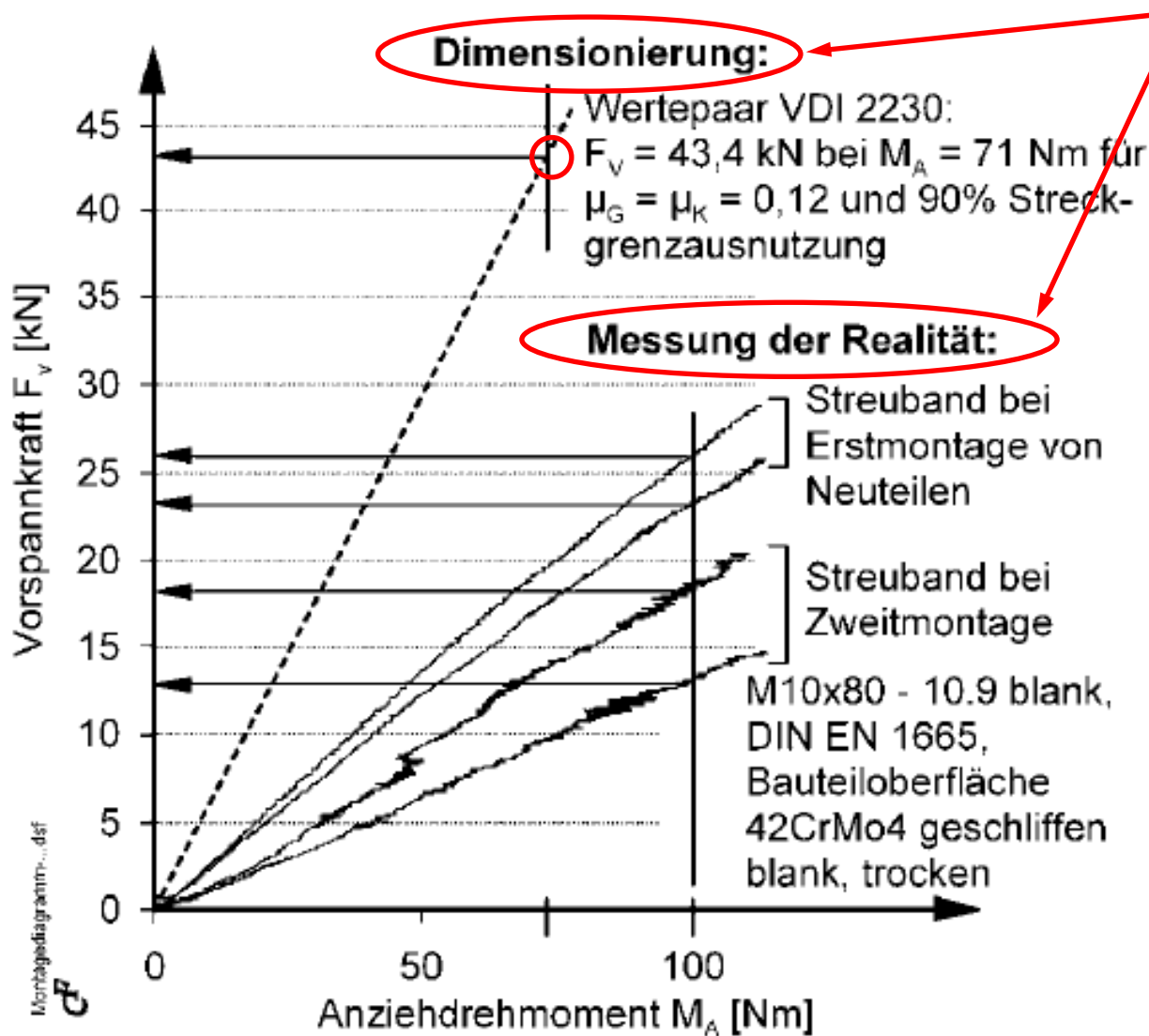


- Gesamtkosten Produkt
- Gesamtkosten Prozess
- Marktpreis
- Controlling

- Schnelligkeit
- Flexibilität
- Projektmanagement
- Änderungsmanagement



## 2. Risiko für zu kleine Montagevorspannkraft: Unterschied zwischen Dimensionierung und Messung der Realität

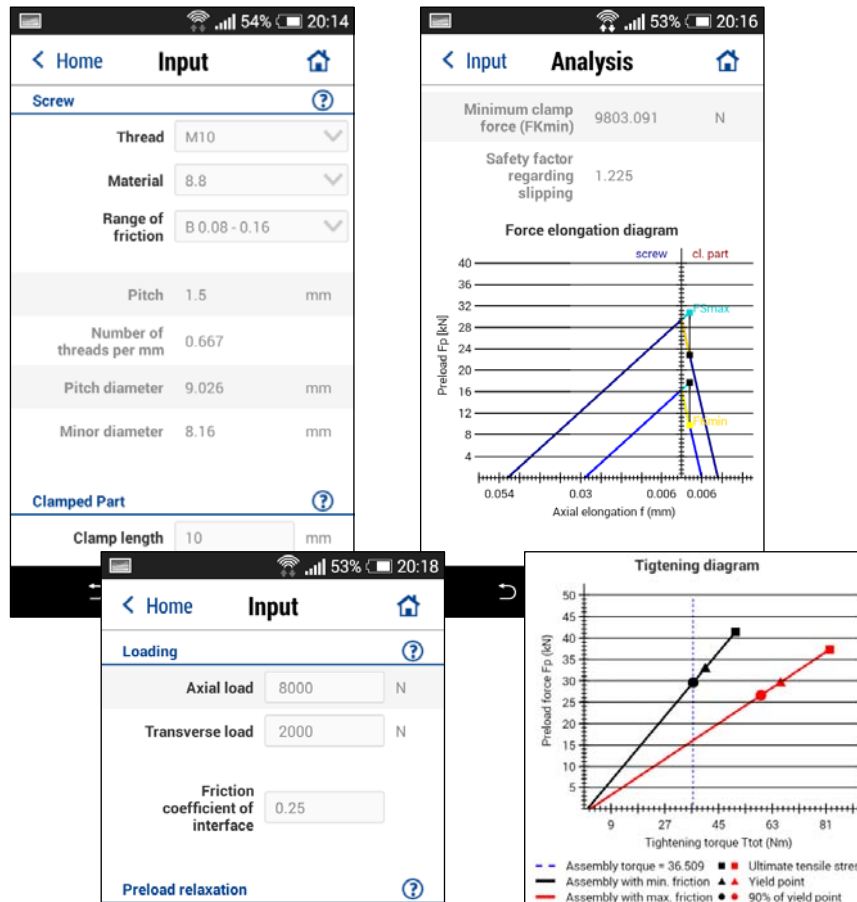




➤ Eine viel zu kleine Vorspannkraft in der Realität im Vergleich zur Auslegung darf nicht auftreten, ist aber immer wieder zu finden.

- Was tun?
- System bei Auslegung genau kennen (Reibungszahlen und Systemverhalten,
  - genau montieren, mit Vorspannkraftüberwachung und Prozesskontrolle, ggf. Nachrechnung bzw. Abgleich von Montagedaten mit Rechnung

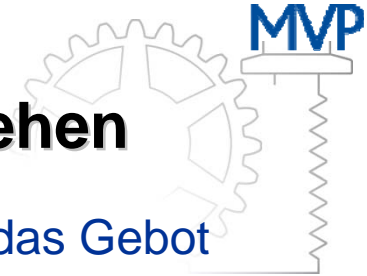
## 2. Verbesserung: Mobile App-Berechnung mit Streuungen

### SCREW-DESIGNER Basic



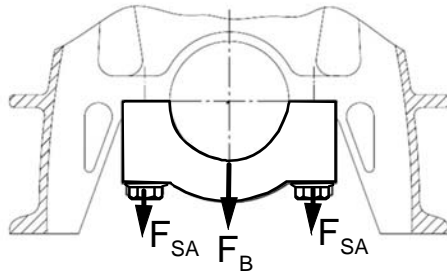
- Eine neue Schraubenberechnung, unmittelbar auf Basis der Richtlinie VDI 2230, bezieht Streuungen mit ein und erlaubt so eine verbesserte Verbindungszuverlässigkeit.
- Behandelt: maximale/minimale Montagevorspannkraft, Vorschlag für Montagedrehmoment, axiale Belastung, Querbelastung, Relaxationsfaktor, dynamische Graphiken mit Streuung, z.B. Reibungszahlklassen, Hilfe.
- Die Bedienung ist einfach
- Kostenloser Download unter  
- Entwickler und Anbieter: AFS GmbH

## 2. Heute nötig für Auslegung: Last-Verformungsverhalten einbeziehen



**Klassischer Maschinenbau (VDI 2230)**

a) Starrkörperansatz



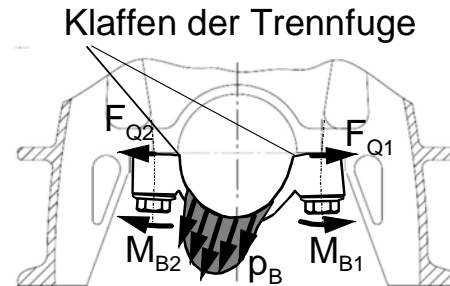
**Starrkörper:**  $F_{SA} = \Phi F_B / 2$

- einfache Mechanik
- geeignet für traditionelle Auslegung mit steifen Bauteilen und mäßigen Vorspannkräften
- schnelle Abschätzung statt Auslegung

Quelle: MVP 2015

**Optimierte Produkte (Leichtbau)**

b) Lastverformungsansatz



**verformte Struktur:**  
 $F_{SA} = f(\text{Geometrie, Werkstoff-Fließgrenze, Reibung, } p_B)$

- es entstehen im System weitere Schnittkräfte und Schnittmomente, z.B.  $F_Q, F_{Q2}$  und  $M_{B1}, M_{B2}$
- sinnvoll für hohe Vorspannkräfte und hohe Belastungen
- numerische Berechnung ratsam (FEM)

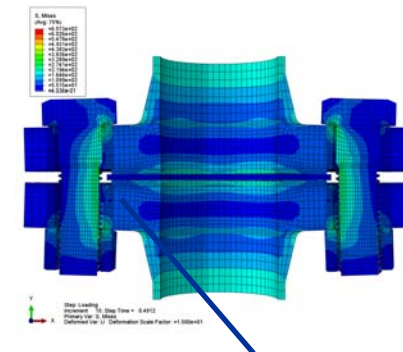
$p_B$ : Druckverteilung anstelle der Betriebskraft  $F_B$

Das ist das Gebot der Stunde, um

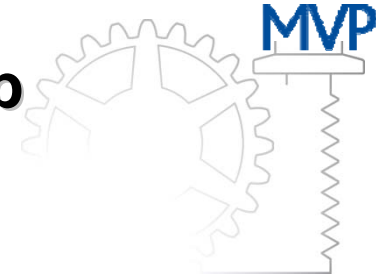
- Leistungsfähigkeit zu steigern und

- Fehlerrisiken zu vermindern

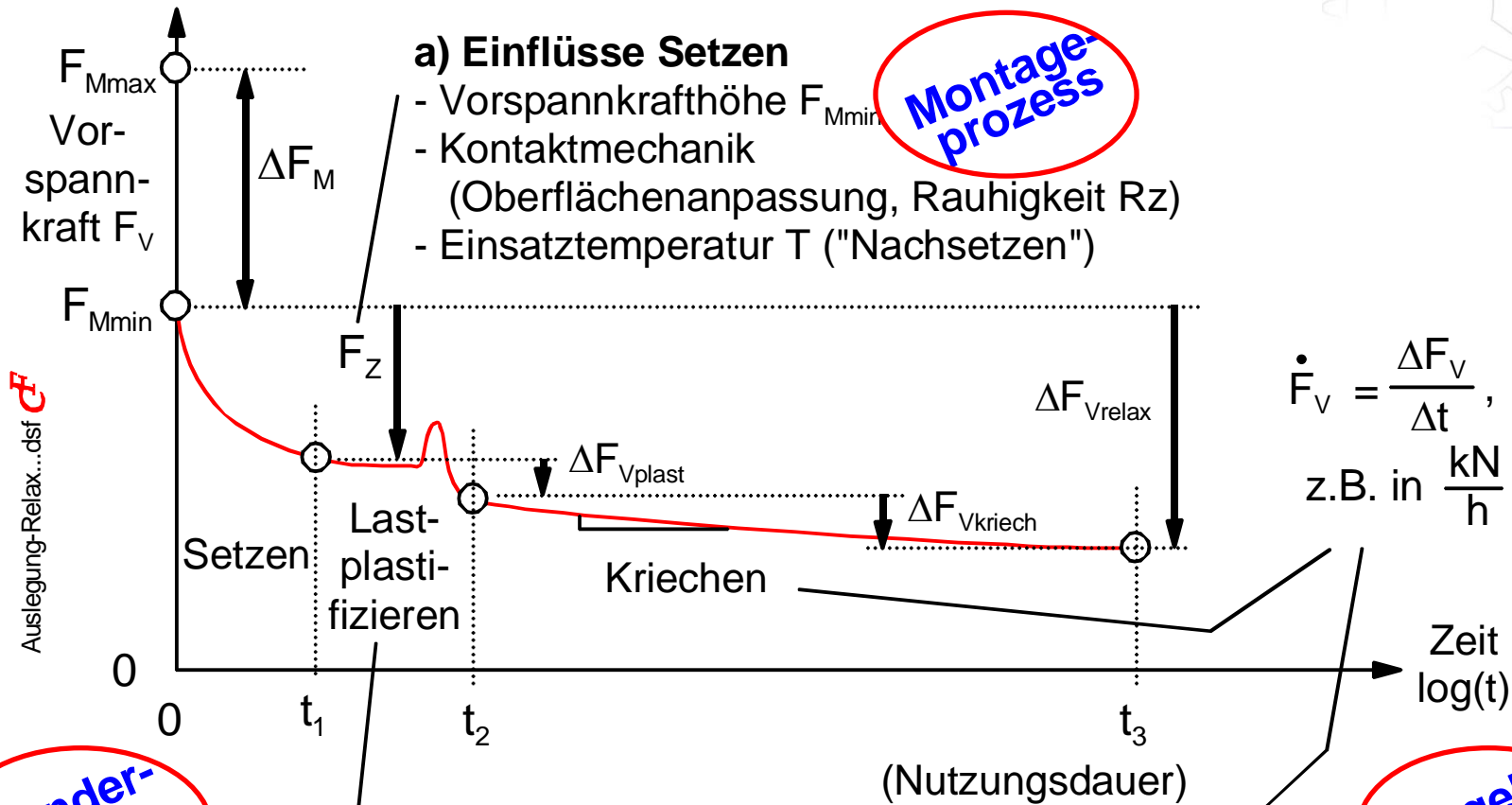
Hierzu ist Know-How und Erfahrung über die Richtlinie VDI 2230 hinaus nötig



Biegemoment in der Schraube



### 3. Vorspannkraftverluste im Betrieb



**a) Einflüsse Setzen**

- Vorspannkrafthöhe  $F_{Mmin}$
- Kontaktmechanik (Oberflächenanpassung, Rauigkeit  $R_z$ )
- Einsatztemperatur  $T$  ("Nachsetzen")

**Sonderlasten**

**b) Einflüsse Lastplastifizieren**

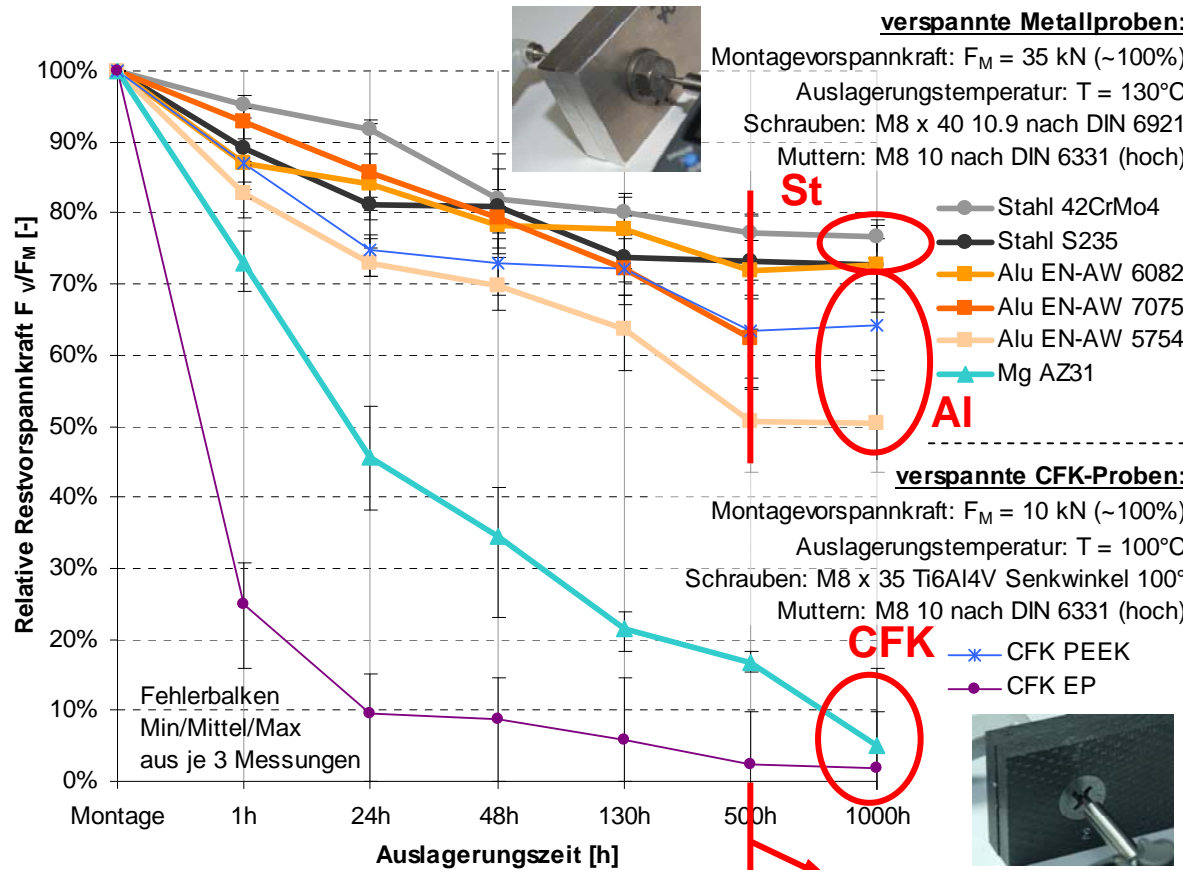
- mechanische Sonderlasten
- thermische Sonderlasten
- Werkstoffe im Kraftfluss (Warmstreckgrenze)
- Vorspannkrafthöhe  $F_V$

**c) Einflüsse Kriechen**

- Werkstoffe im Kraftfluss (Kriechverhalten)
- Vorspannkrafthöhe  $F_V$
- Spannungspeaks (Verbindungsgestaltung, z.B. Flächenpressung  $p$ )
- Einsatztemperatur  $T$  (Temperaturkollektiv)
- Nutzungsdauer  $t_3$

**Regelbetrieb**

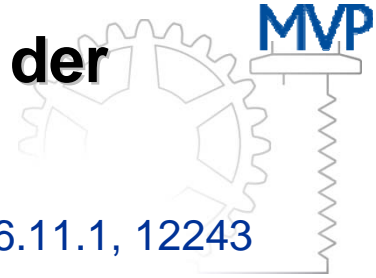
### 3. Beispiel für Messung der Vorspannkraftrelaxation



- unterschiedliches Verhalten für versch. Werkstoffklassen
- kaum Einfluss von Vorspannkraftrelaxation bei St-Werkstoffen, deshalb bei der traditionellen Auslegung oft vernachlässigt
- große Einflüsse für Leichtbauwerkstoffe; hier: geringere Kriechfestigkeit, thermisch sensible Warmfestigkeit; sehr große Vorspannkraftrelaxation bei Laminaten

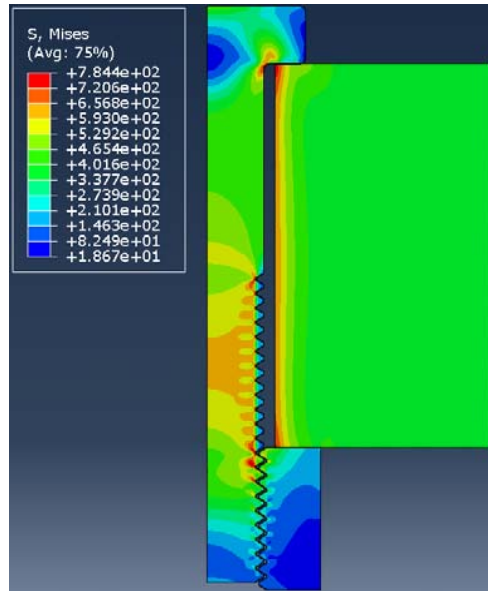
Relative Vorspannkraftrelaxation mit versch. verspannten Bauteilwerkstoffen im Vergleich, Schraubenverbindung MJ8,  $I_K$  16 mm, DSV mit Mutter; Metalle (Flanschkopfauflage,  $130^\circ\text{C}$ ,  $F_M = 25 \text{ kN}$ ), CFK-Werkstoffe (Senkkopfauflage, MJ Gewinde,  $100^\circ\text{C}$ ,  $F_M = 10 \text{ kN}$ )

### 3. Beispiel für rechnerische Vorhersage der Vorspannkraftrelaxation

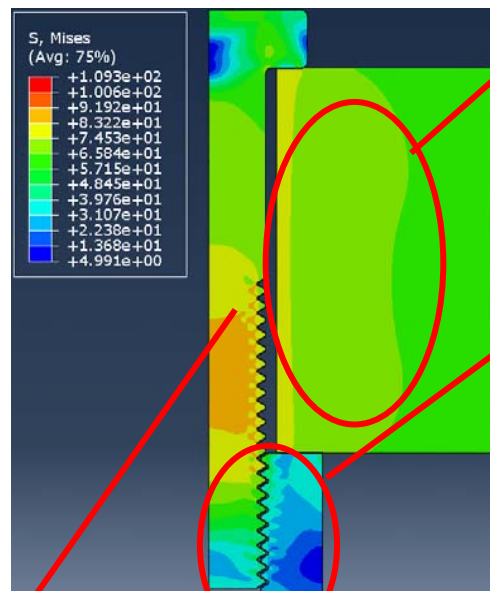


Beispiel M10 – 10.9, verspanntes Bauteil Aluminium, Mutter Stahl, Abaqus 6.11.1, 12243 Elemente, 19950 Knoten

Spannungsverteilung bei Montagevorspannkraft  $F_M = 35 \text{ kN}$



Spannungsverteilung nach 10000h bei 150 °C, Restvorspannkraft  $F_{VRest} = 15 \text{ kN}$

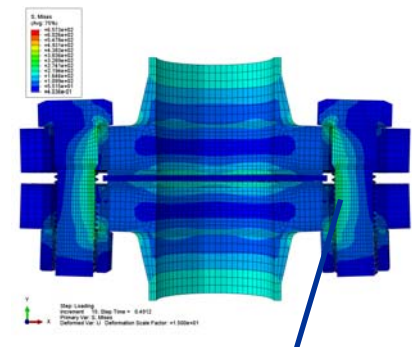


Kriechverformung des verspannten Bauteils

Spannungshomogenisierung im Gewindeeingriff

Spannungsverminderung in der Schraube

Typisch: erhöhte Montagevorspannkraft reduziert i.d.R. Vorspannkraftverluste im Betrieb – d.h. Vorspannkraft maximieren



Wegen inhomogener Spannungsverteilung unterschiedliche Vorspannkraftrelaxation

### 3. Neue Möglichkeit zur Erfassung der Vorspannkraftrelaxation



Bildquelle: AFS GmbH

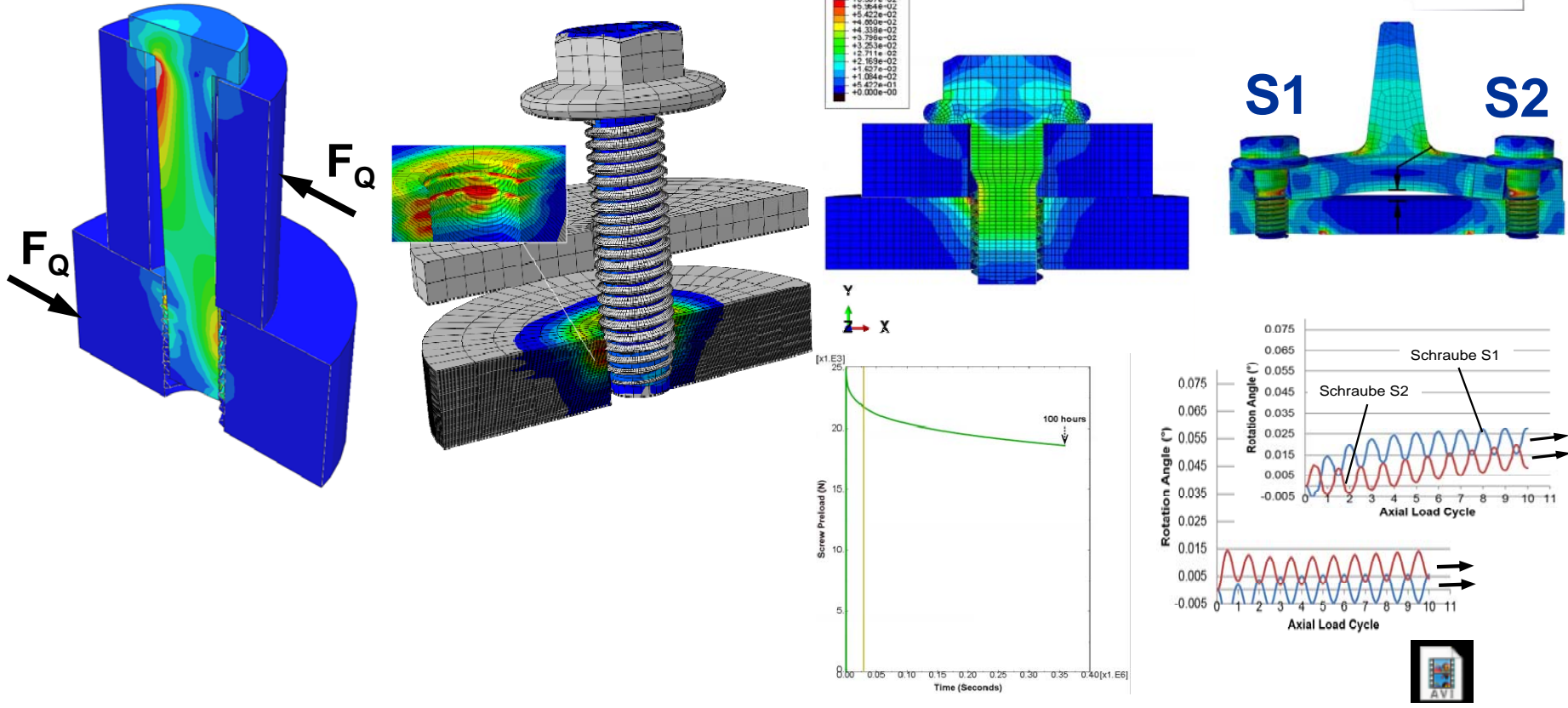


Bildquelle: Hochschule Offenburg

- Nutzung von neu entwickelten messenden Schrauben auf Basis der Dehnmessstreifentechnik (DMS).
- Erst der miniaturisierte Dehnungssensor erlaubt voll belastbare Schrauben, was für die Messung des Realverhaltens nötig ist (Realverhalten hängt ja von der Vorspannkrafthöhe ab, was keine nennenswerte Querschnittsschwächung zulässt).
- Zur Realisierung ist besonderes Know-How und Erfahrung zur Interpretation der Ergebnisse nötig, da Schraubtechnik und Messtechnik gekoppelt sind.

### 3. sonstige Beispiele, was heute rechnerisch zur Vorhersage möglich ist

University of Siegen – Dept. 11 – MVP – Prof. Dr. C. Friedrich – www.uni-siegen.de

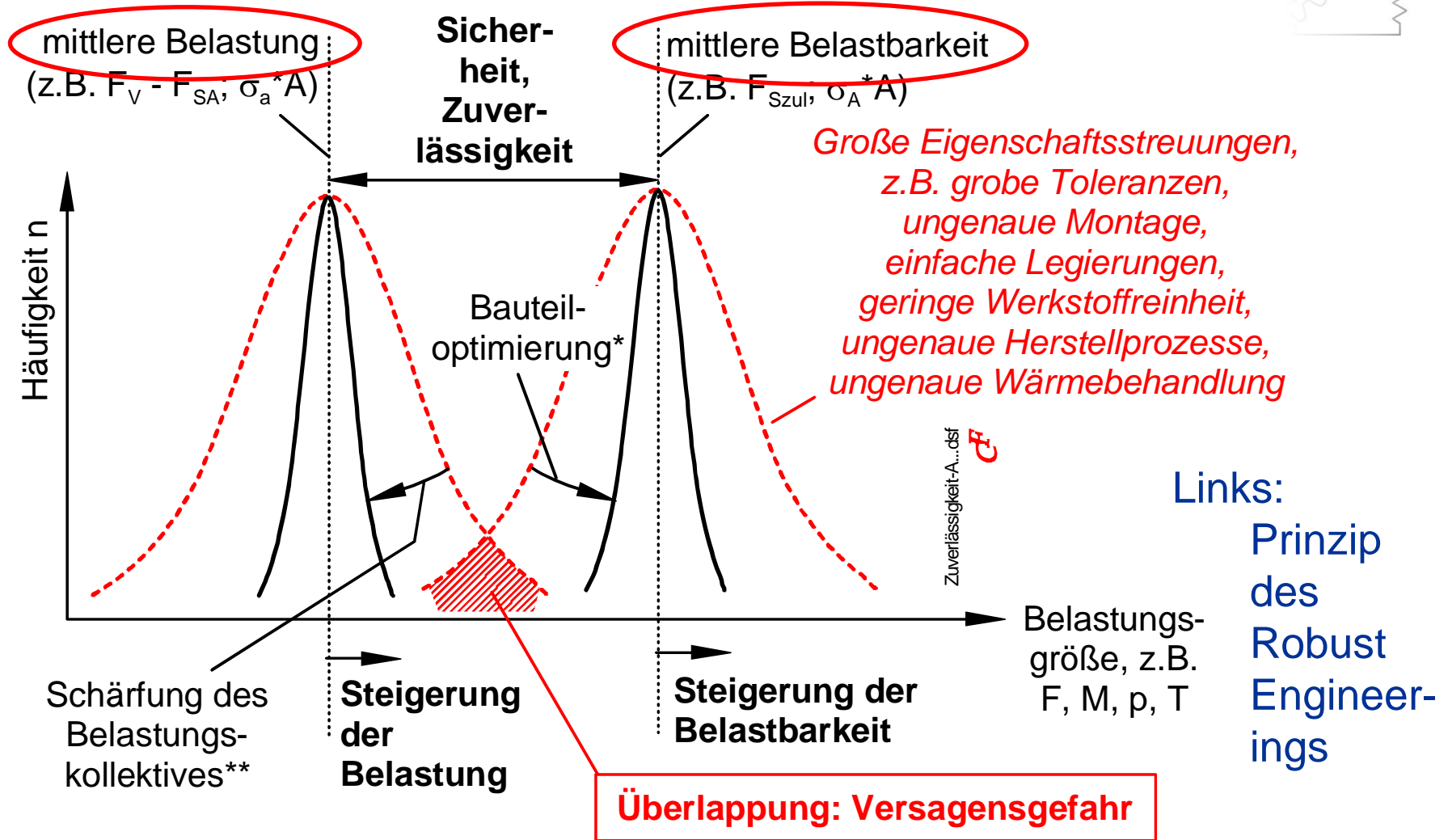


- Damit wird die Virtualisierung der Produktentwicklung umgesetzt, was erhebliche Geschwindigkeits- und Kostenvorteile bringt
- Fernziel ist die automatisierte Auslegung im Rechner mit Ingenieurentscheidungen.

DVM4\_Self-loosening.avi



# 3. Abstand zwischen Belastung und Belastbarkeit ergibt Produktzuverlässigkeit

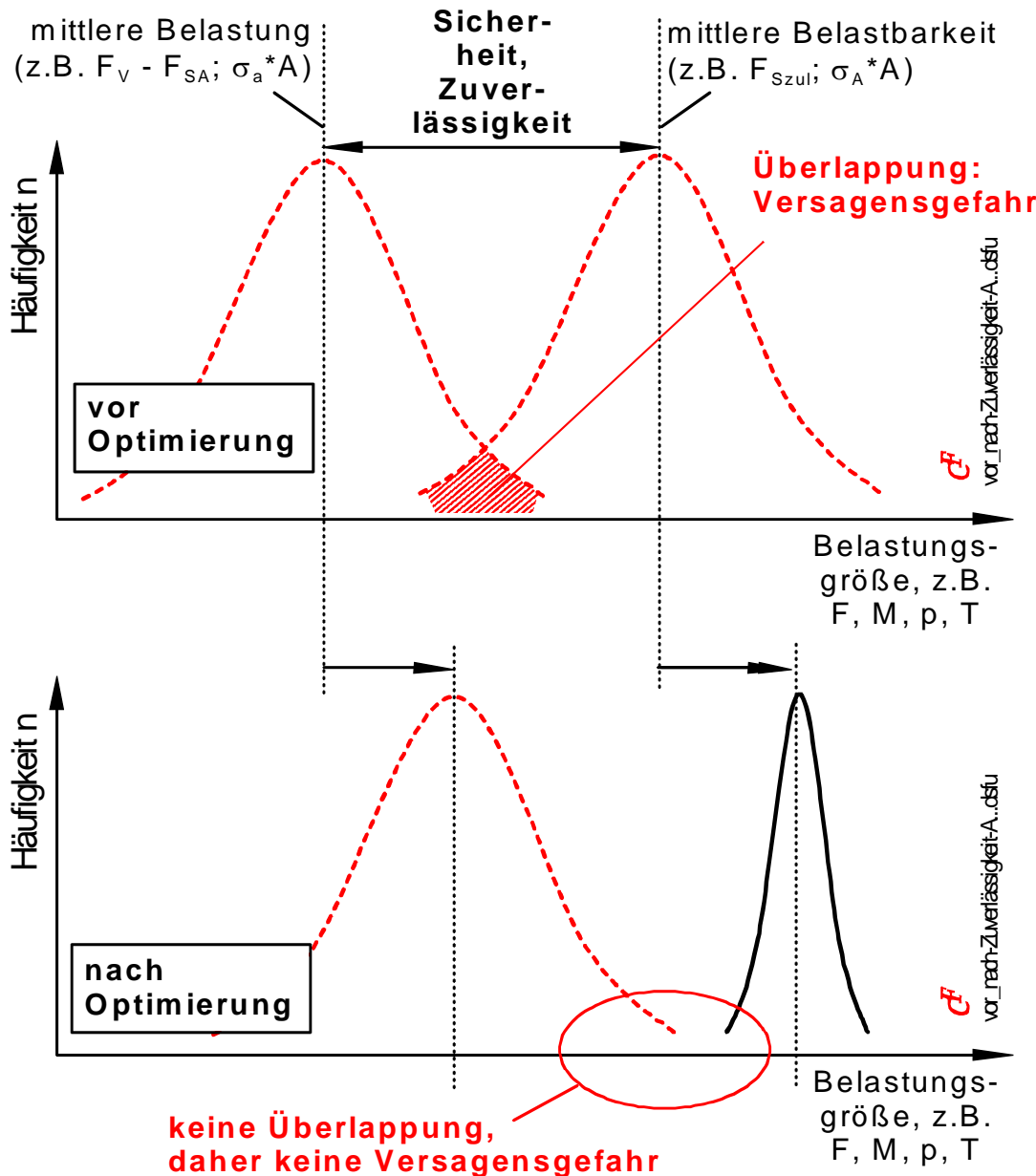


University of Siegen – Dept. 11 – MVP – Prof. Dr. C. Friedrich – www.uni-siegen.de

\* z.B. durch konstruktive Gestaltung, Werkstoff-/Oberflächenwahl, Fertigung inkl. Montage

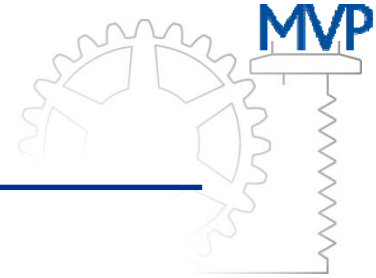
\*\* z.B. durch Schulung der Nutzer/Bediener, Betriebsanweisung, Zustandsüberwachung und Betriebseingriff

### 3. Beispiel der Produktzuverlässigkeit vor und nach der Verbindungsoptimierung



- Das schematische Diagramm links oben zeigt die Situation vor der Optimierung: Die höchsten Belastungen überschreiten die kleinste Belastbarkeit. So etwas ist nicht leicht zu erkennen (Grenzmuster und Belastungswahl).
- Diagramm links unten: Nach Verbindungsoptimierung wurde die Belastbarkeit angehoben und die Streuung verringert. Folge: Trotz erhöhter Belastung keine Überschneidung zwischen Belastung und Belastbarkeit, also keine Versagensgefahr.

## 4. Zusammenfassung und Ausblick: Was ist in Zukunft zu tun?



---

### Zusammenfassung:

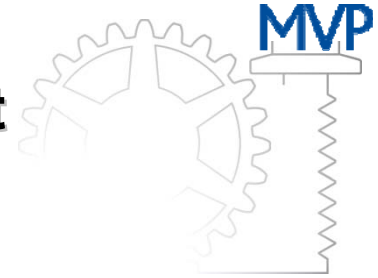
- Schraubenverbindungen sind entscheidend für das Lebenszyklusverhalten.
- Montage ist verantwortlich für Vorspannkraftstreuung.
- Betrieb ist verantwortlich für Vorspannkraftverluste.
- Optimierte Verbindungen reduzieren Versagensgefahr (und senken damit die Gesamtkosten).
- Bei optimierten Produkten unbedingt Last-Verformungsverhalten einbeziehen

---

### Ausblick: Was ist zu tun?:

- Montageprozess verbessern – was ist bei Ihnen denkbar?
- Vorspannkraftverluste ermitteln und vermindern
  - wie sieht es bei Ihren Verbindungen aus?
- Werkzeuge sind  
Montageeinrichtung optimieren, Montageprozess optimieren,  
(FE)-Berechnung nutzen, Versuch zur Absicherung optimieren,  
Know-How-Management optimieren
- Fachleute mit Erfahrung stehen für Unterstützung bereit; das erhöht die Effektivität zur Optimierung Ihrer Produkte

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Für Fragen und Unterstützung steht Ihnen gerne zur Verfügung...

- Prof. Dr.-Ing. C. Friedrich, Universität Siegen  
Maschinenelemente, Verbindungstechnik, Produktinnovation  
Tel. 0171-5754875, [christoph.friedrich@uni-siegen.de](mailto:christoph.friedrich@uni-siegen.de)