

# **Das Zusammenspiel von Simulation, Regelwerk und Messung beim Festigkeitsnachweis**

**CADFEM Feierabendveranstaltung BFH Burgdorf 2016**

Beat Schmied  
Dozent im Nebenamt für Festigkeitslehre & FEM  
Schmied Engineering GmbH, CH-4563 Gerlafingen  
Basierend auf Thesarbeit von Markus Bürgi 2014

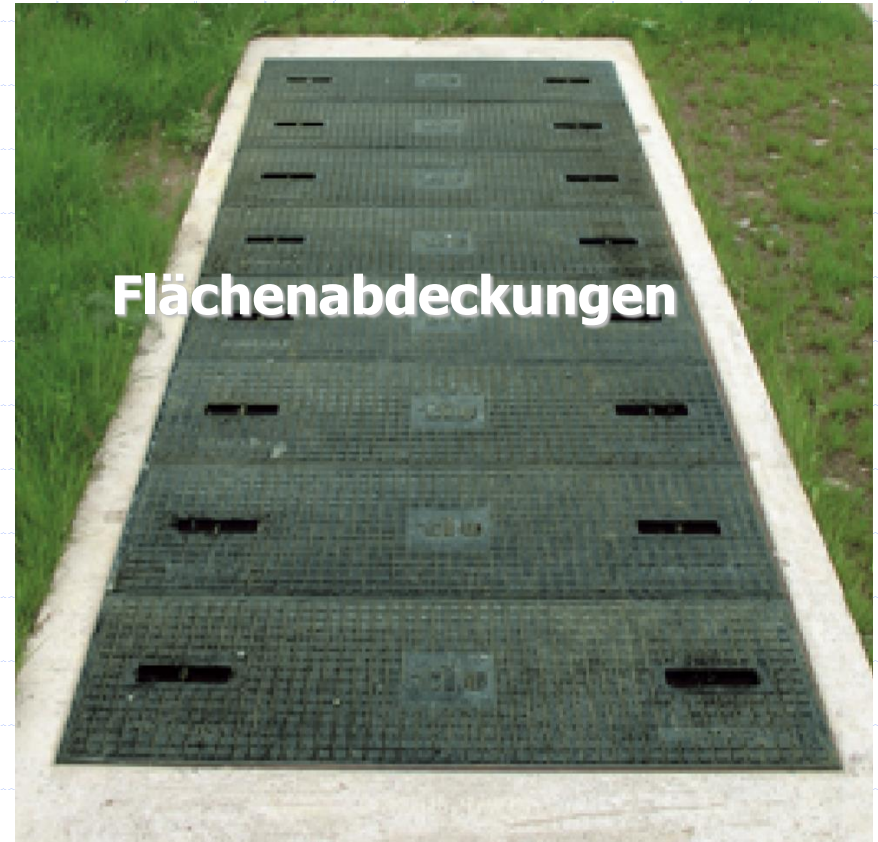
## Worum geht es?

**Nottaris Bauguss AG  
Oberburg**



**Materialeinsatz optimieren  
und trotzdem  
Misserfolg bei Abnahme vermeiden**

**Flächenabdeckungen**



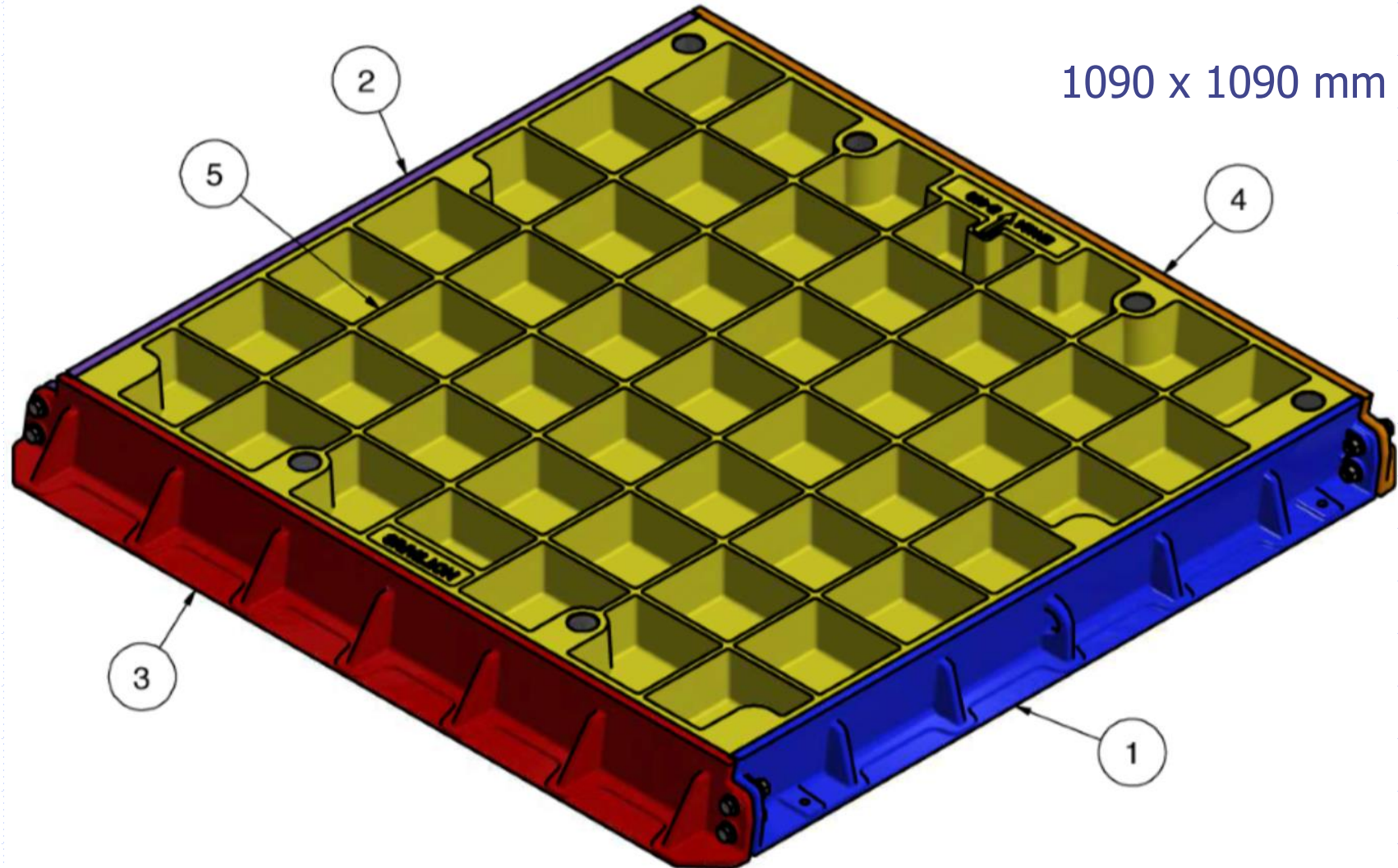
# Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung und Test
2. Simulationen mit linear-elastischem Materialverhalten
3. Simulationen mit elastisch-plastischem Materialverhalten
4. Nachweiskonzept für neue Entwicklungen
5. Statischer Nachweis gegen Bruch basierend auf FKM
6. Resümee

# 1. Aufgabenstellung und Test



## Quadratische Abdeckung aus Sphäroguss



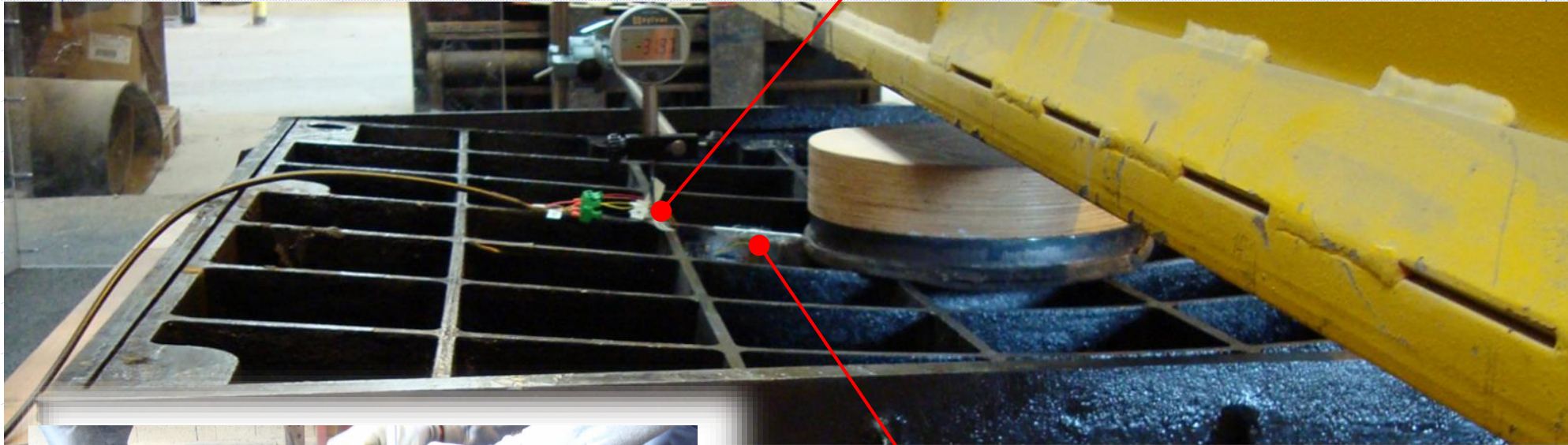
## Test bei Creabeton Materiaux AG



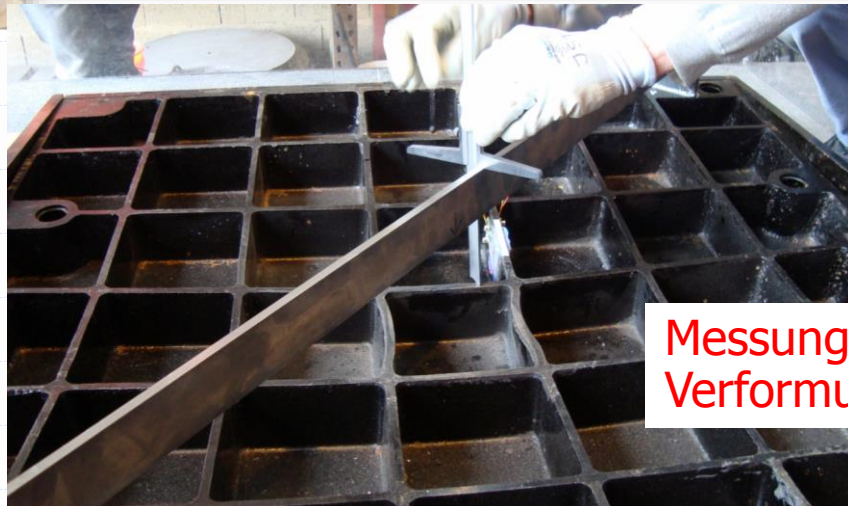


# Messungen

Messuhr für Verformung unter Last

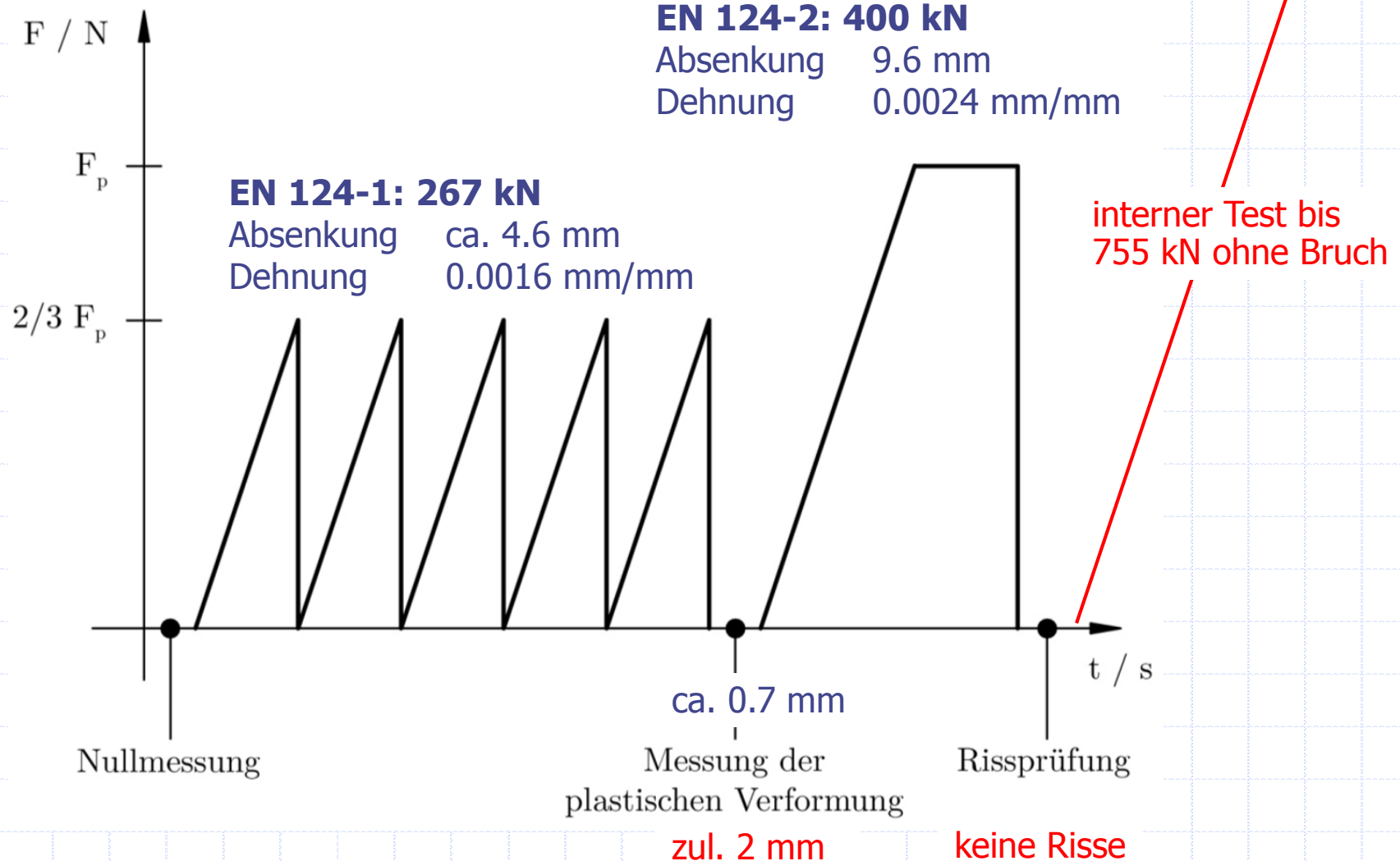


DMS



Messung plastische Verformung

# Prüfung und Zulassung nach EN 124







## **2. Simulationen mit linear-elastischem Materialverhalten**

**Prüfkraft 267 kN**

## Abdeckung mit Rahmen - Modell

Vereinfachungen gegenüber Test:

- Viertelmodell mit Symmetrien
- starre Auflage statt Holzunterbau
- reibungsbehaftete Kontakte

A: EN124-1 mit Rahmen

Kraft:

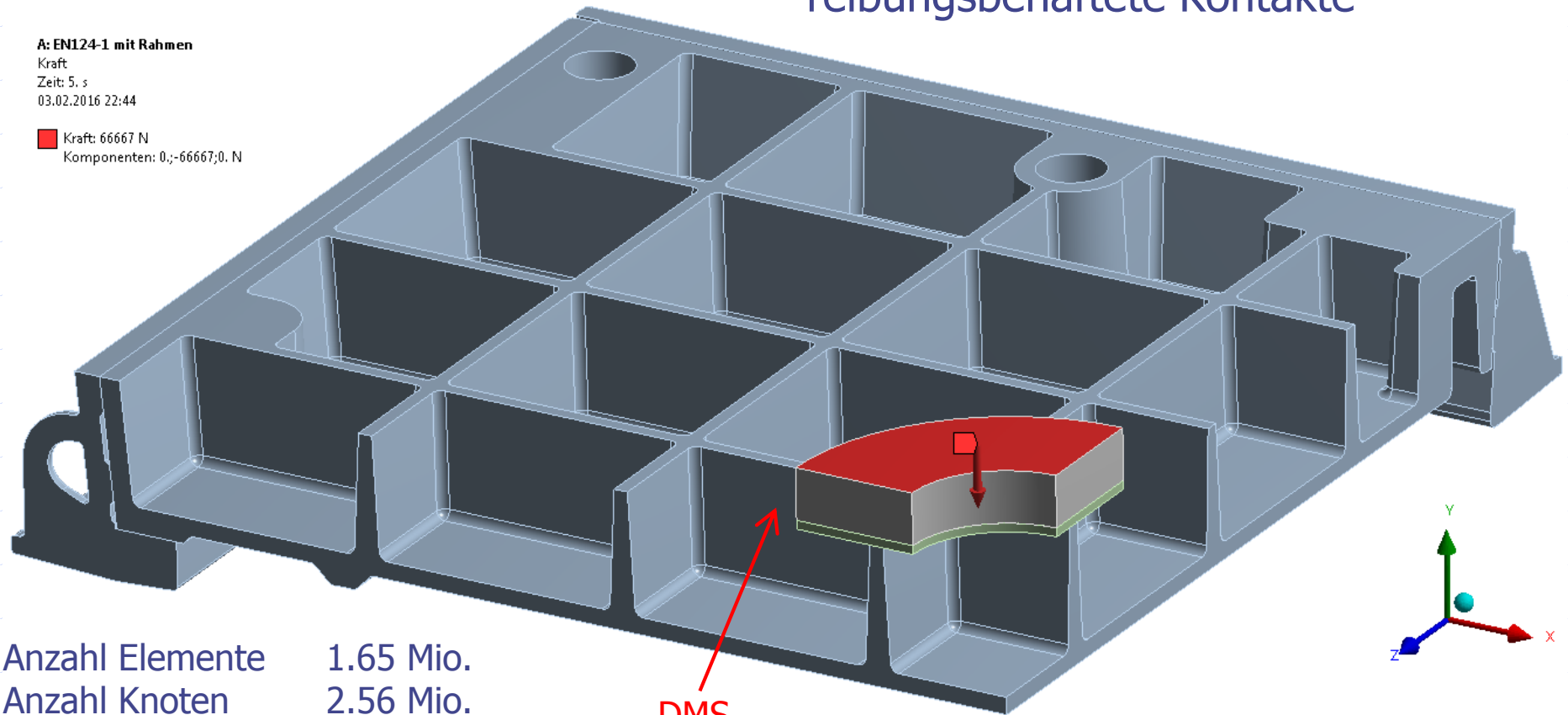
Zeit: 5. s

03.02.2016 22:44



Kraft: 66667 N

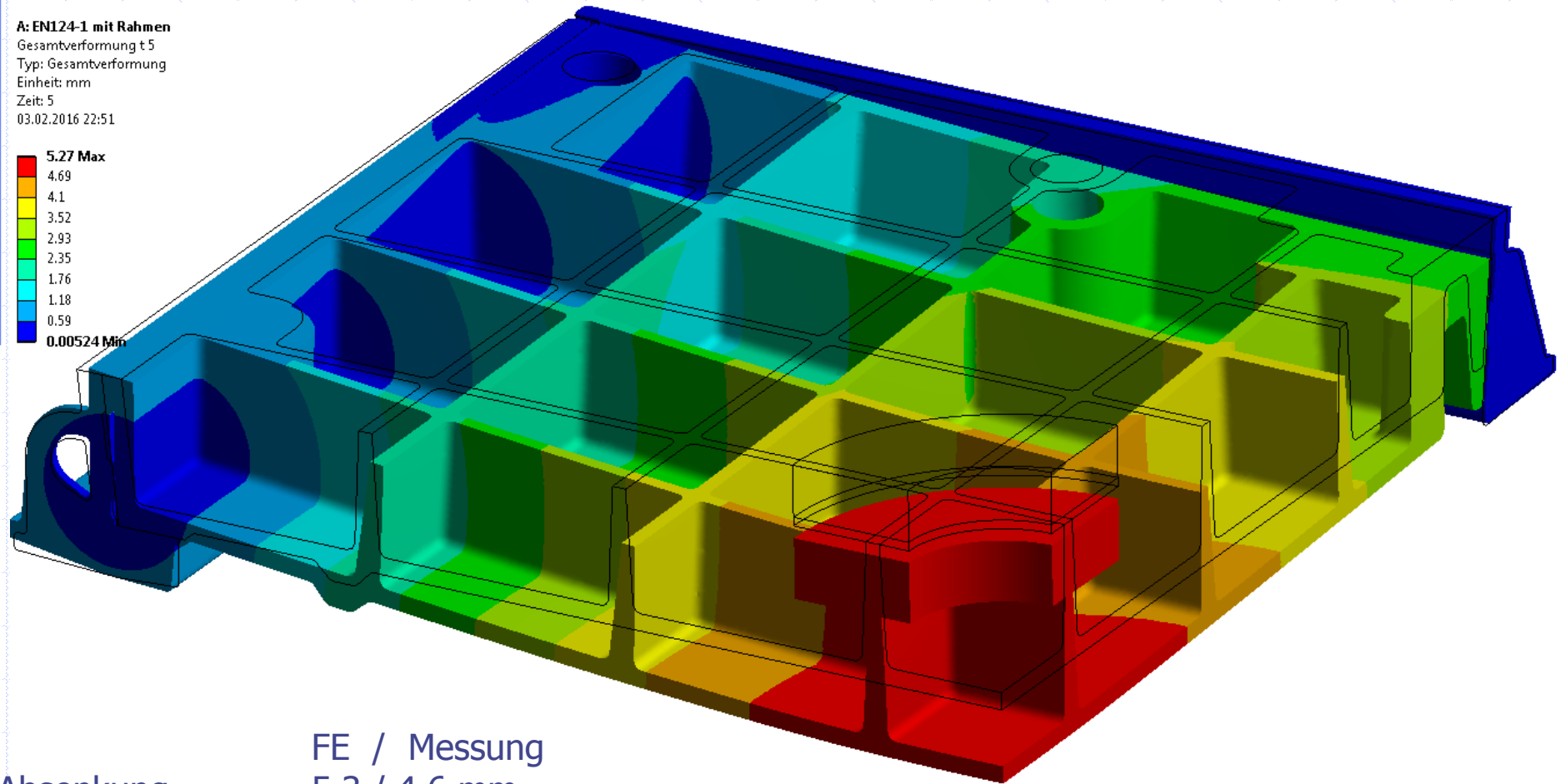
Komponenten: 0,-66667;0, N



Anzahl Elemente	1.65 Mio.
Anzahl Knoten	2.56 Mio.
Rechenzeit	ca. 6 Tage

DMS

5.27 Max  
4.69  
4.1  
3.52  
2.93  
2.35  
1.76  
1.18  
0.59  
0.00524 Min



## FE / Messung




## Abdeckung ohne Rahmen - Modell

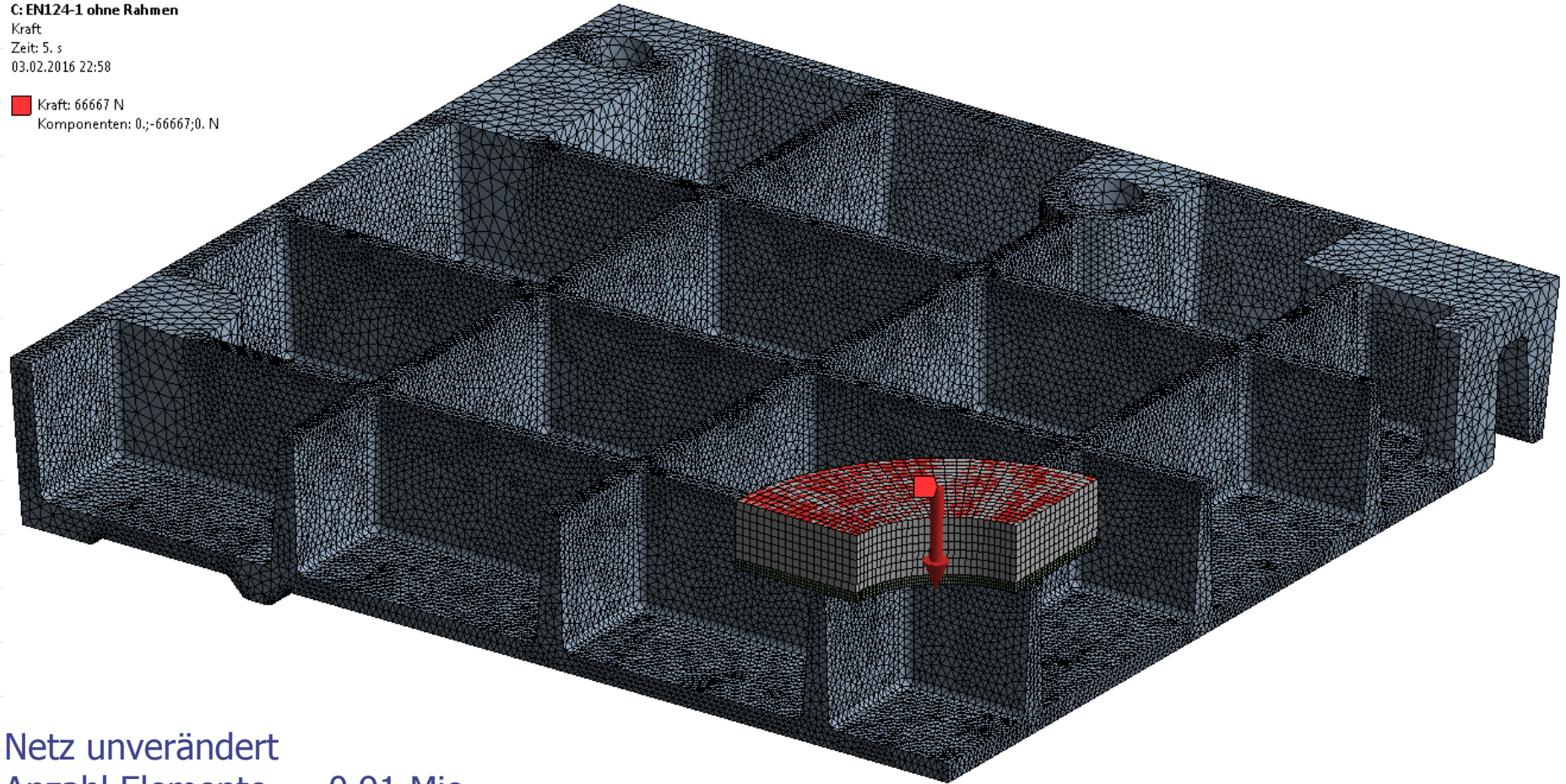
C: EN124-1 ohne Rahmen

Kraft

Zeit: 5. s

03.02.2016 22:58

 Kraft: 66667 N  
Komponenten: 0; -66667; 0. N



Netz unverändert

Anzahl Elemente 0.91 Mio.

Anzahl Knoten 1.46 Mio.

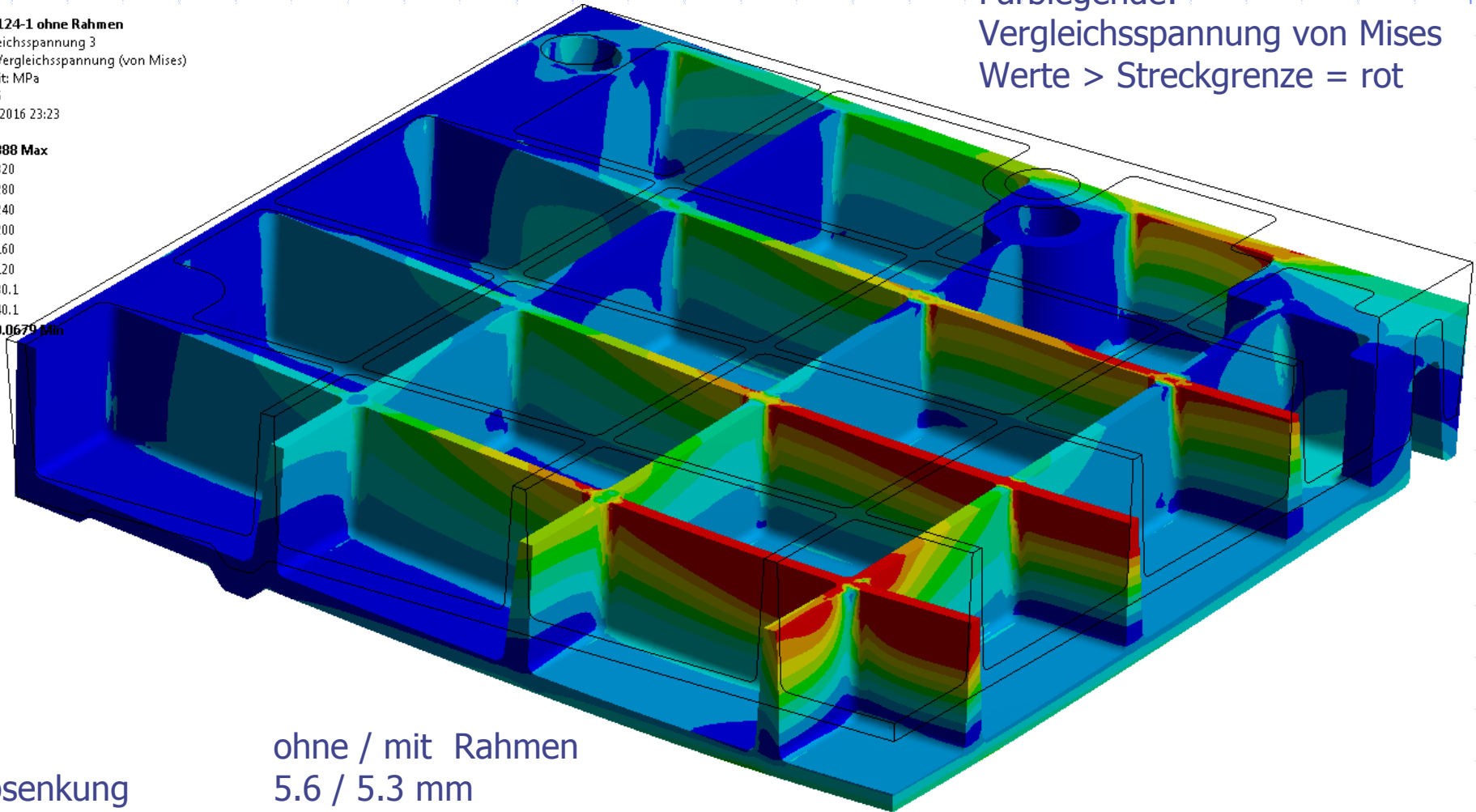
Rechenzeit ca. 1.4 Stunden

## Abdeckung ohne Rahmen - Ergebnisse

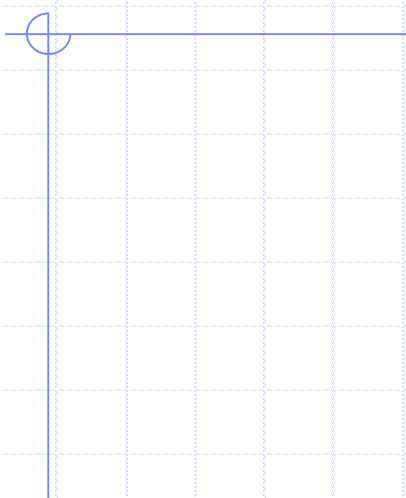
Farblegende:  
Vergleichsspannung von Mises  
Werte > Streckgrenze = rot

C: EN124-1 ohne Rahmen  
Vergleichsspannung 3  
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)  
Einheit: MPa  
Zeit: 5  
03.02.2016 23:23

888 Max  
320  
280  
240  
200  
160  
120  
80.1  
40.1  
0.0679 Min



Absenkung	ohne / mit Rahmen
	5.6 / 5.3 mm
Dehnung bei DMS	0.0021 / 0.0020 mm/mm



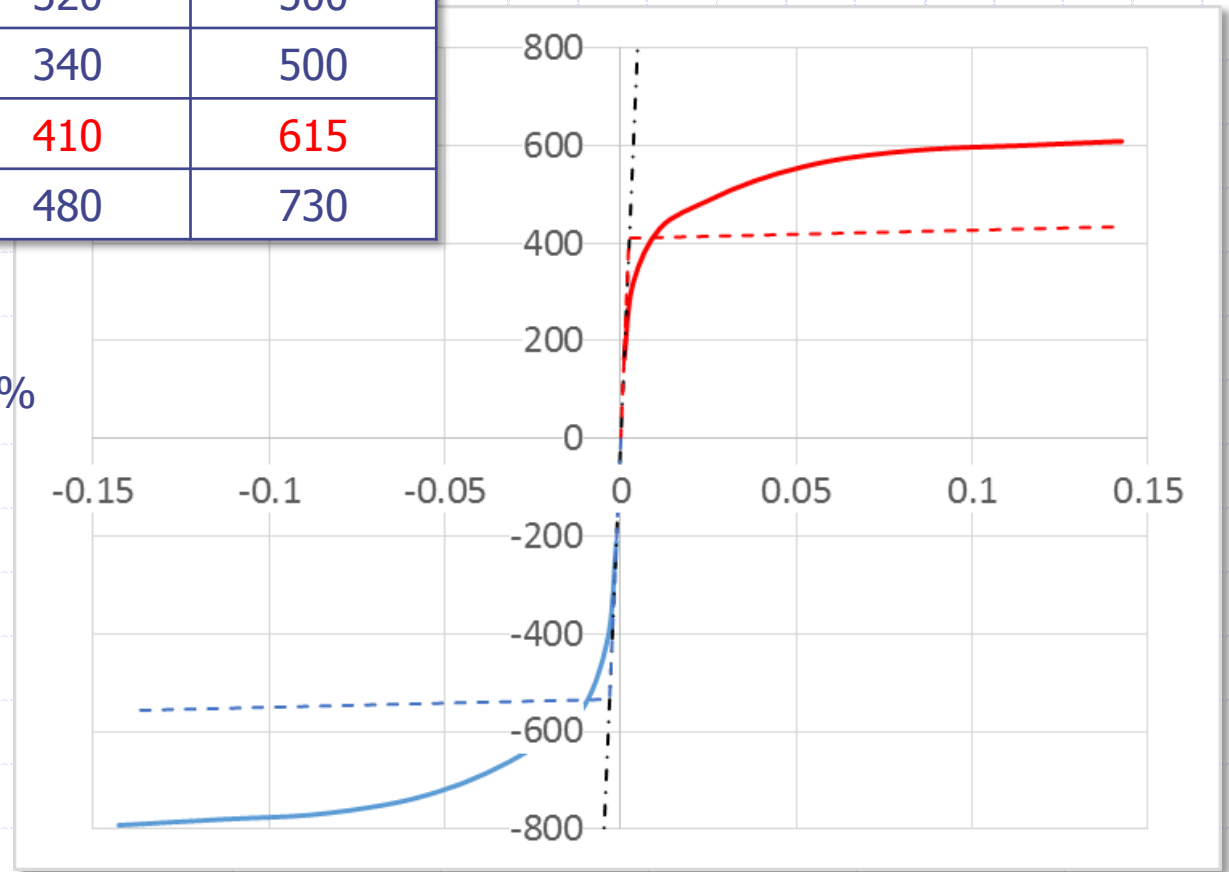
# **3. Simulationen mit elastisch-plastischem Materialverhalten am Modell ohne Rahmen**



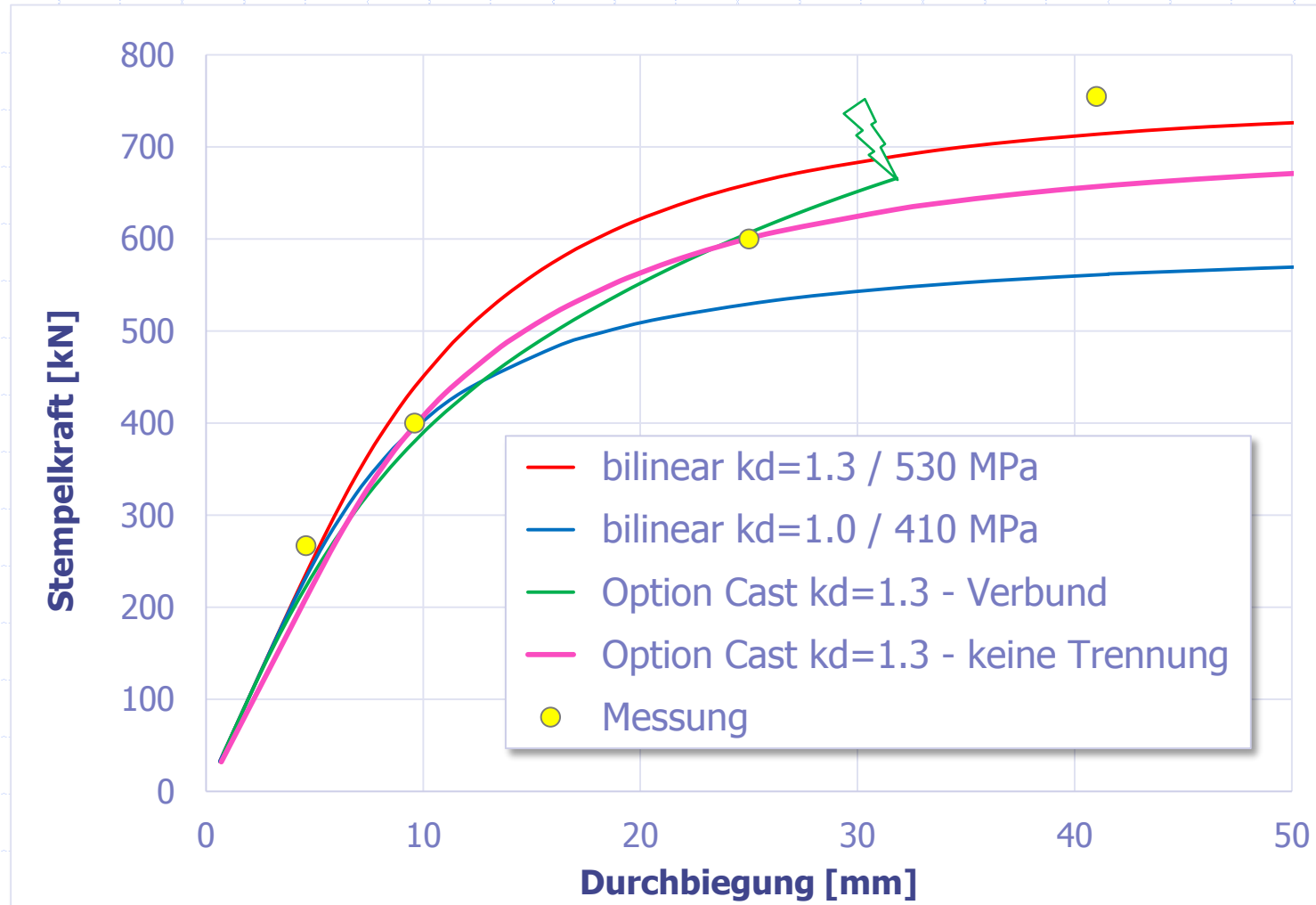
# Spannungs-Dehnungs-Diagramm

	$P_{\ddot{u}}$	$R_p$	$R_m$
FKM	97.5%	320	500
21 Zug- proben	90%	340	500
	50%	410	615
	10%	480	730

- Zugbelastung für  $P_{\ddot{u}}_{50\%}$
- - - bilinear nach FKM  
 $R_{p\_ersatz} = 0.5(R_m + R_p)$
- Druckbelastung
- - - mit  $k_d = 1.3$  nach FKM



## Verformungen unter Last





## 4. Nachweiskonzept für Neuentwicklungen



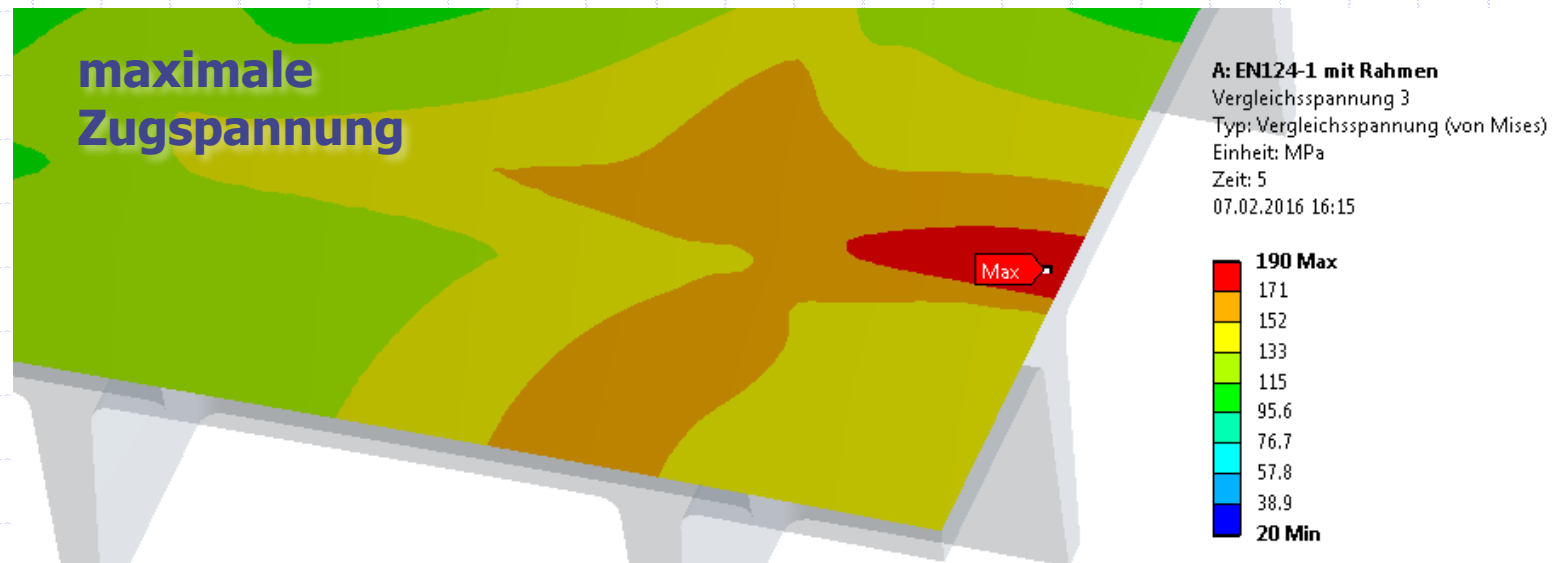
## Lösungsansatz

- Erkenntnis: Mit dem passenden Materialgesetz kann das Verhalten der Abdeckungen aus Sphäroguss genügend gut abgebildet werden, um aussagekräftige Vorausberechnungen machen zu können.
- Für das 1. Abnahmekriterium, die maximal bleibende Verformung, bei  $\frac{2}{3}$  der Prüfkraft ist die Simulation mit elastisch-plastischem Materialverhalten unvermeidlich. Es bleibt noch zu definieren, ob die Sicherheit respektive Reserve ins Materialgesetz oder bei der zulässigen Verformung eingebaut werden soll.
- Für das 2. Abnahmekriterium, die Rissfreiheit bei voller Prüfkraft, ist die Spannung zu beurteilen. Da bietet sich der statische Nachweis nach FKM an. Allerdings ist das Vorgehen so anzupassen, dass nur das Bruchkriterium enthalten ist.



## **5. Statischer Nachweis gegen Bruch basierend auf FKM**

# Spannungsauswertung





## Nachzuweisende Vergleichsspannungen

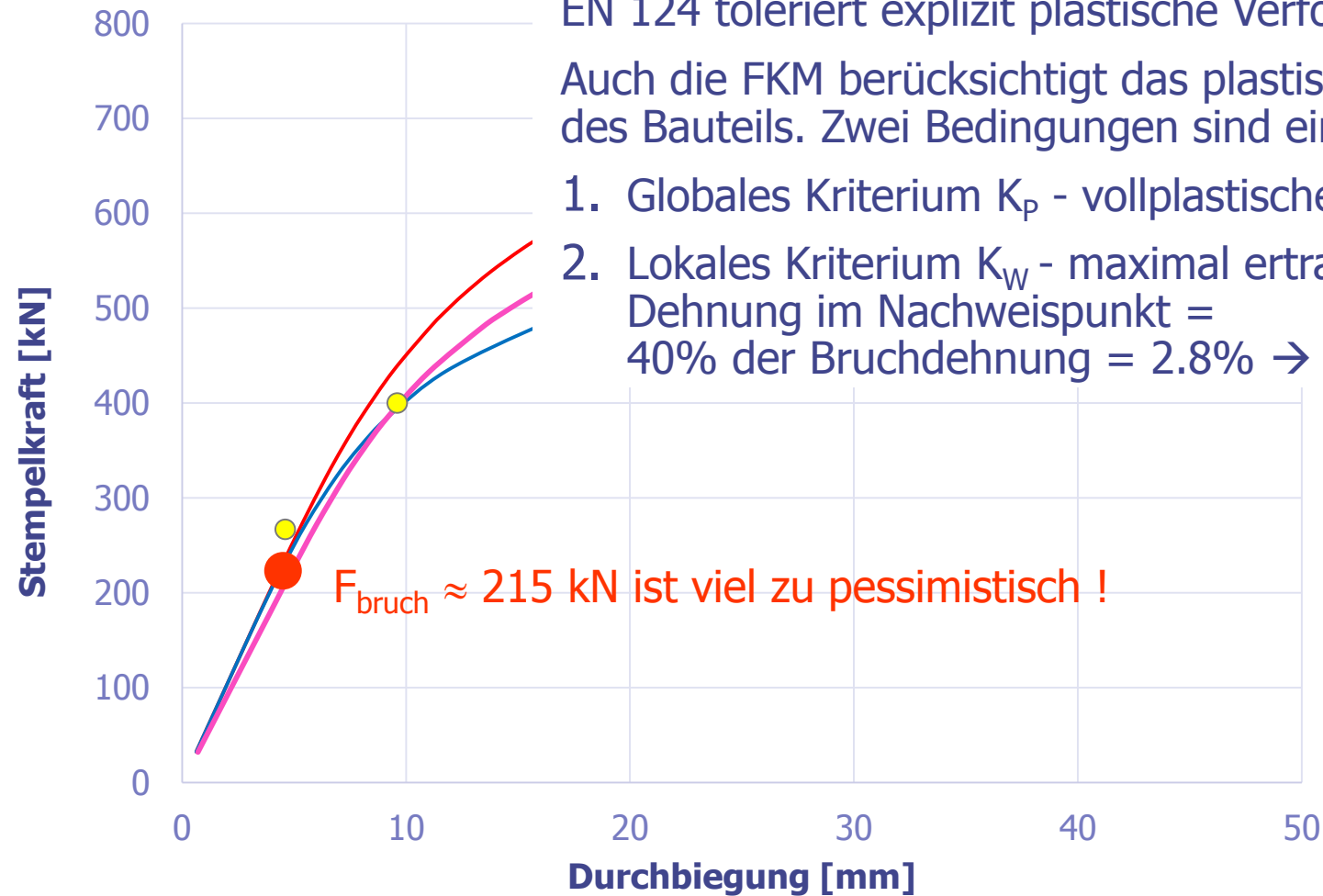
- Spannungsermittlung mit linear-elastischem Materialverhalten!
- Druckspannungen dürfen für den Nachweis um den Druckfestigkeitsfaktor  $f_{\sigma}=1.3$  reduziert werden.
- Für beschränkt duktile Werkstoffe kombiniert die FKM die Normalspannungshypothese und die Gestaltänderungsenergiehypothese.

Parameter			Druck	Zug
Prüfkraft	$F_{\text{test}}$	kN	400	
Hauptspannungen aus FE	$\sigma_1$	MPa	-90	320
	$\sigma_2$	MPa	-205	225
	$\sigma_3$	MPa	-1310	0
Von Mises aus FE	$\sigma_{\text{GH}}$	MPa	1170	285
<b>Vergleichsspannung</b>	$\sigma_V$	MPa	<b>930</b>	<b>295</b>

<b>Bruchfestigkeit</b>	$R_m$	MPa	500
------------------------	-------	-----	-----

$F_{\text{bruch}} \approx 215 \text{ kN}$   
???

# Plastisches Potential des Bauteils

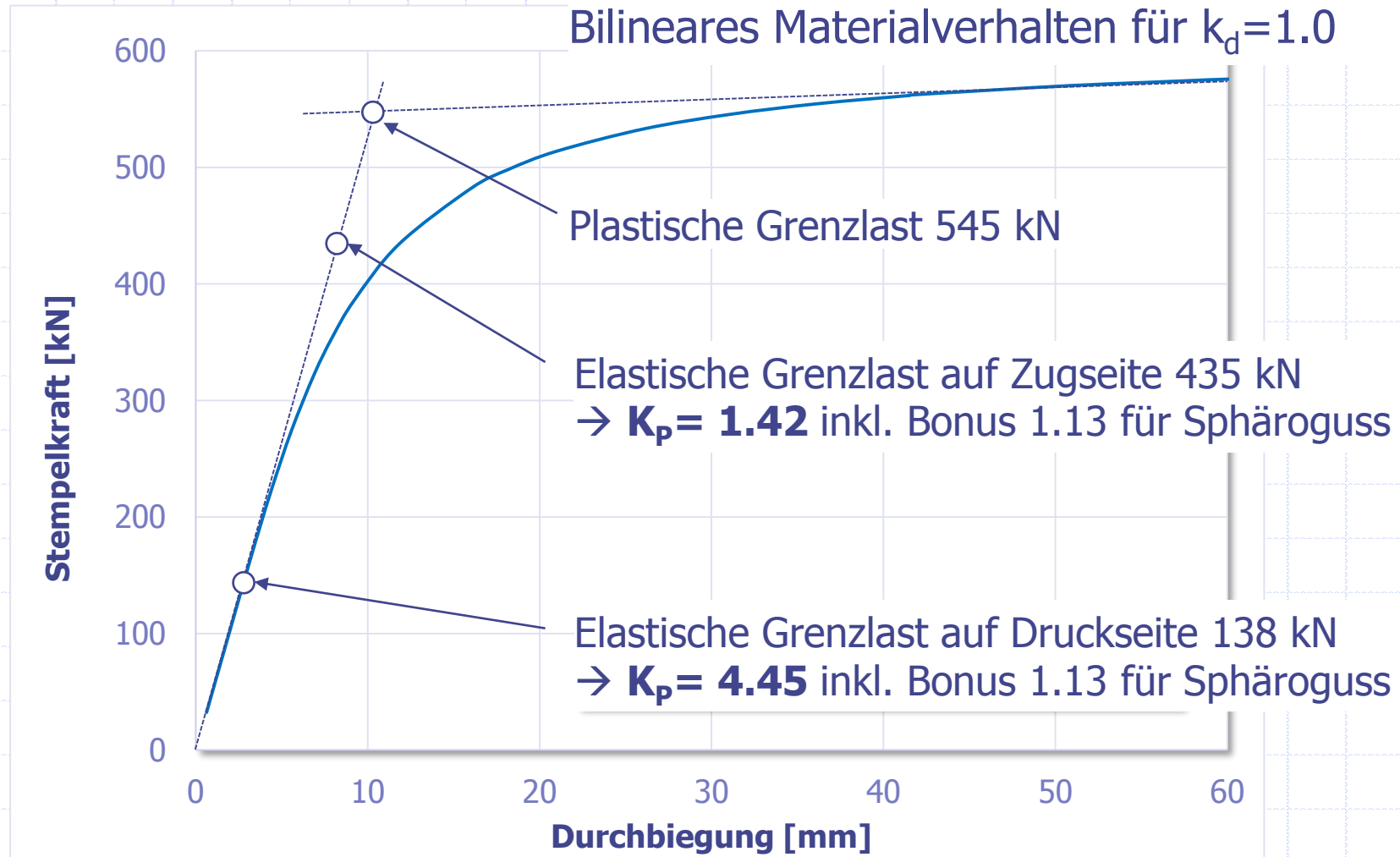


EN 124 toleriert explizit plastische Verformungen.  
Auch die FKM berücksichtigt das plastische Potential des Bauteils. Zwei Bedingungen sind einzuhalten:

1. Globales Kriterium  $K_p$  - vollplastischer Zustand
2. Lokales Kriterium  $K_w$  - maximal ertragbare Dehnung im Nachweispunkt = 40% der Bruchdehnung = 2.8%  $\rightarrow K_w = 3.86$

$F_{\text{bruch}} \approx 215 \text{ kN}$  ist viel zu pessimistisch !

## Globales Kriterium - plastische Formzahl $K_p$



## Bauteil-Bruchfestigkeit

- Nebst der Zugfestigkeit ist einzig das Plastifizierungsvermögen von Relevanz.
- Auch für die Druckspannung bildet die Zugfestigkeit die Basis, da der Druckfestigkeitsfaktor bereits bei der Spannungsermittlung angewendet wurde.

Parameter			Druck	Zug
Zugfestigkeit	$R_m$	MPa	500	
Plastische Formzahl	$K_p$	-	4.45	1.42
Plastische Werkstoffzahl	$K_W$	-	3.86	
Plastische Stützzahl	$n_{pl}$	-	3.86	1.42
<b>Bauteil-Bruchfestigkeit</b>	$\sigma_{SK}$	MPa	<b>1930</b>	<b>710</b>

## Statischer Nachweis gegen Bruch

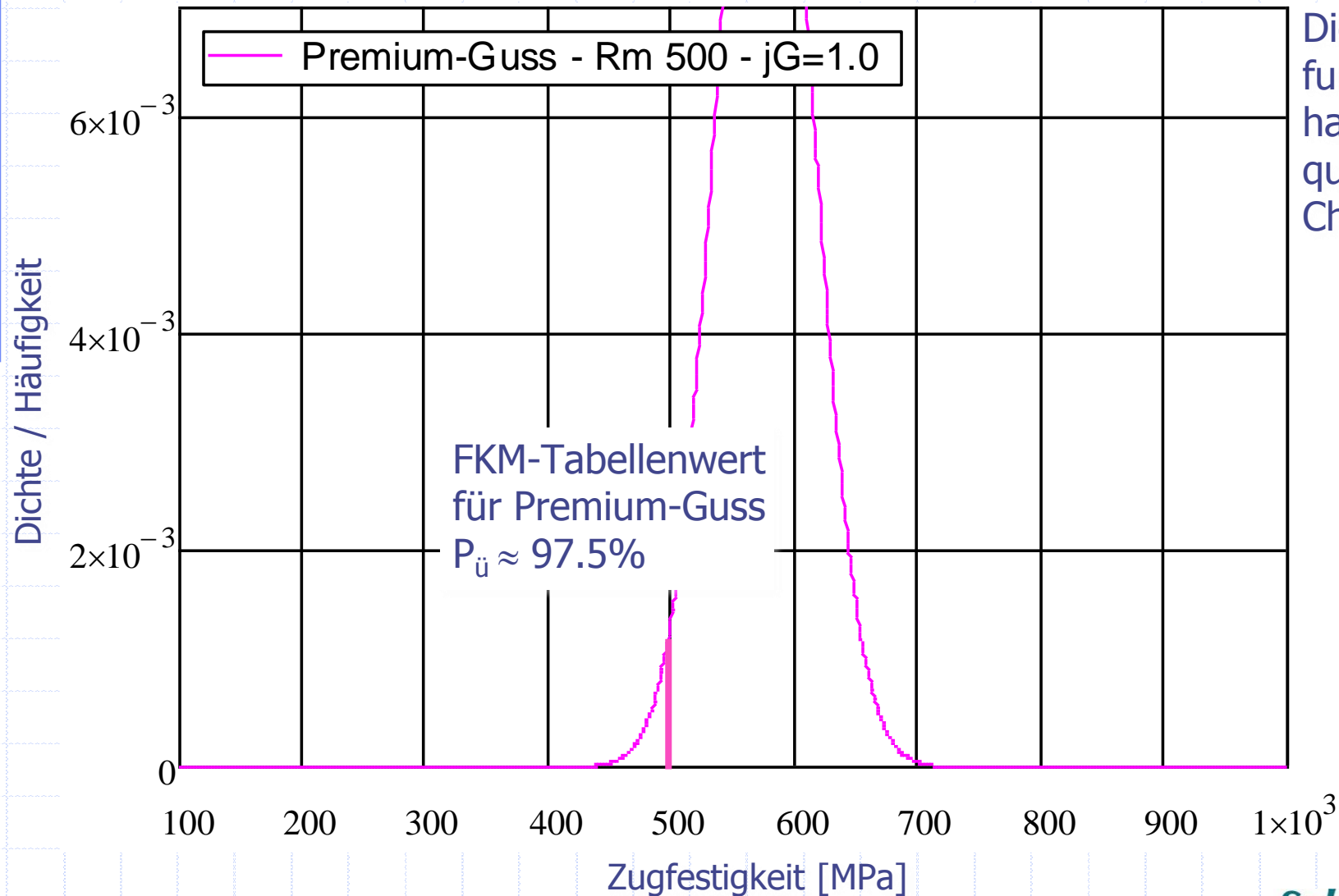
- Maximalkraft ist genau bekannt → Last-Teilsicherheitsfaktor 1.0
- Das Gussbauteil wird nicht zerstörungsfrei geprüft →  $j_G=1.4$
- Grund-Sicherheitsfaktor gegen Bruch →  $j_m=1.75$
- Gesamtsicherheitsfaktor somit →  $j_{ges}=2.45$

			Druck	Zug
Vergleichsspannung	$\sigma_V$	MPa	930	295
Bauteil-Bruchfestigkeit	$\sigma_{SK}$	MPa	1930	710
Gesamt-Sicherheitsfaktor	$j_{ges}$	-	2.45	
Auslastungsgrad Bruch	$a_{SK}$	%	118	102

Streng nach FKM ist der Auslastungsgrad also zu hoch. Doch wie ist das zu werten?

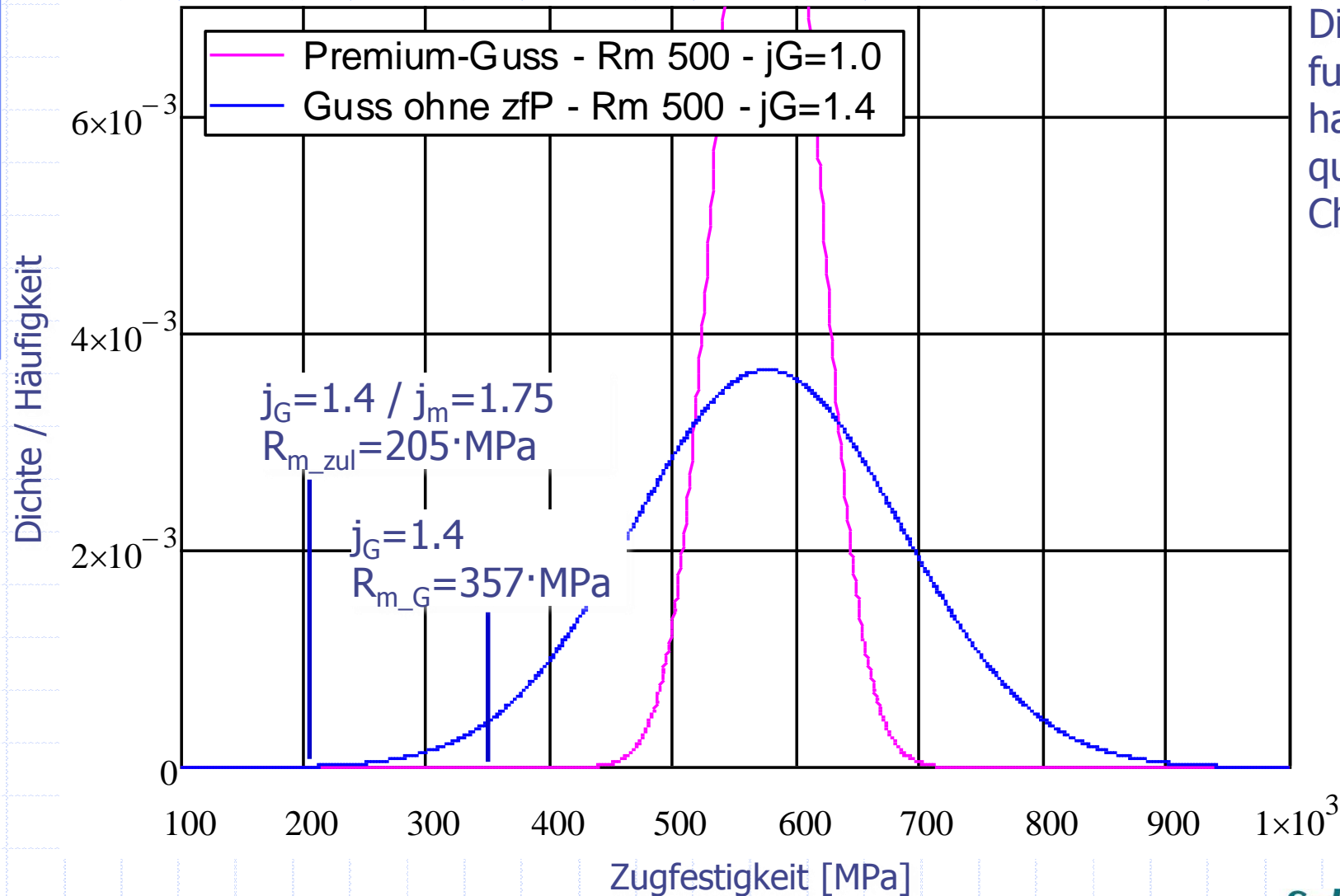


# Zugfestigkeiten im Vergleich - Ausgangswert

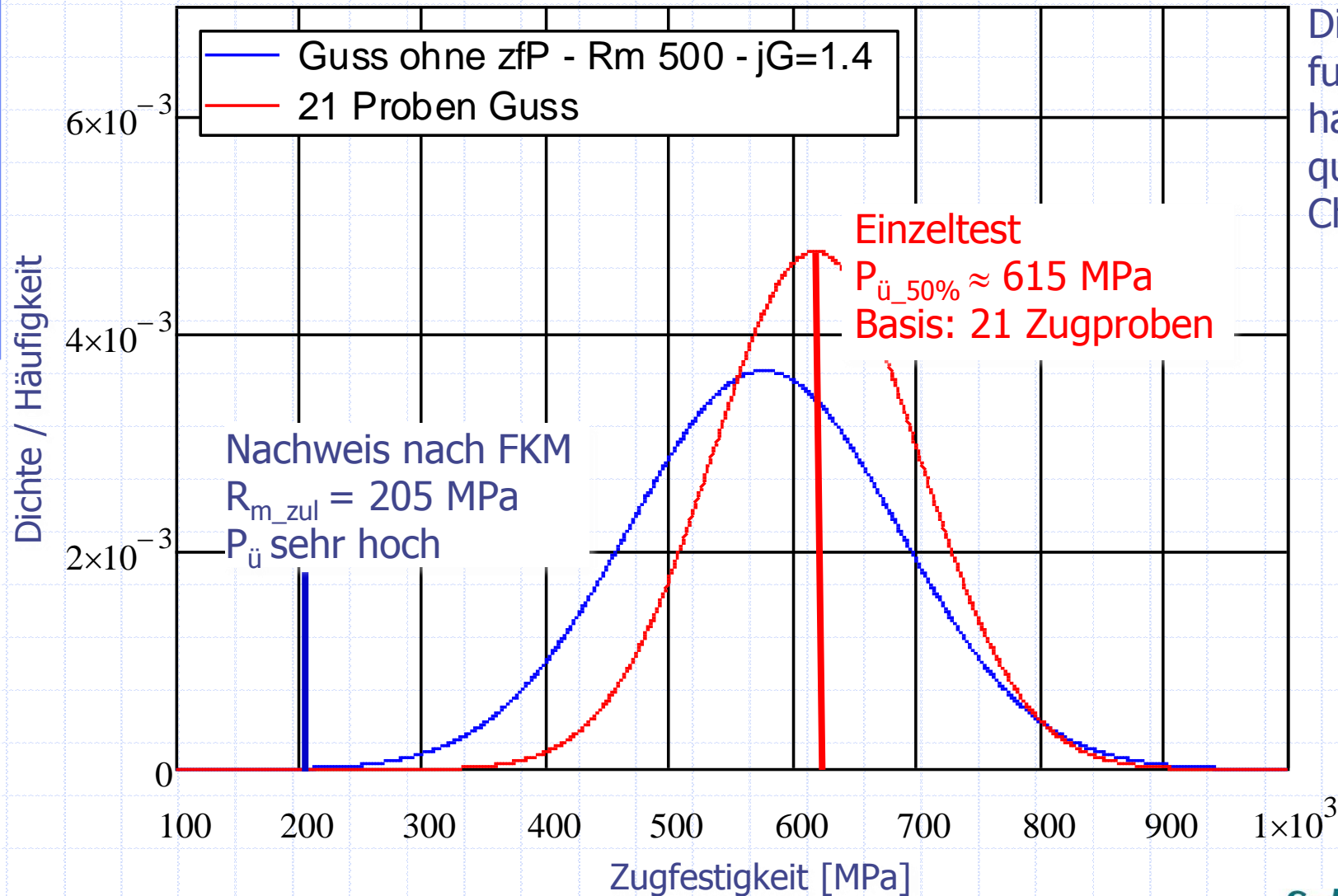


Die Dichtefunktionen haben bloss qualitativen Charakter

# Zugfestigkeiten im Vergleich - zulässiger Wert



# Zugfestigkeiten im Vergleich

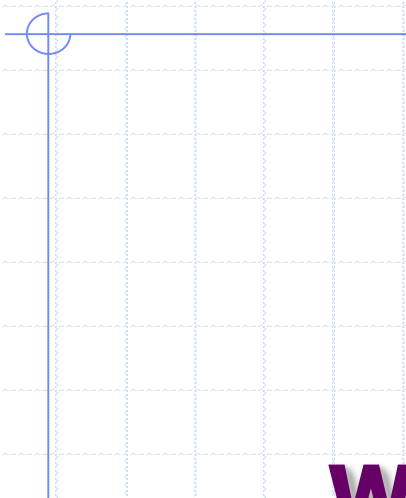


## 6. Resümee

## Resümee

- EN 124 definiert sehr hohe statische Lasten, dafür sind die Tests einfach und die Ermüdungsbeurteilung erübrigt sich.
- Solange die plastischen Verformung gering ist, stimmen Messung und Simulation recht gut überein. Mit zunehmender Plastifizierung wird der Vergleich immer schwieriger.
- Beim Messen sind die Fehlermöglichkeiten mindestens so gross wie beim Simulieren.
- Testprozedere und Messungen müssen im Voraus mit den Simulationen abgestimmt werden.
- Die akribische Dokumentation der Versuche ist für spätere Abgleiche wichtig (Zeichnungen, Fotos, Videos, Messaufzeichnungen, Protokolle)!





**Wird es Ihnen beim Simulieren  
langweilig, beantragen Sie den  
Abgleich mit einem Test.**