

Mechanische Analyse von Fahrdrähten zur fachgerechten Verlegetechnik

DI Dr.techn. Rudolf Heuer

Ao. Universitätsprofessor an der
Technischen Universität Wien, Forschungsbereich für Baumechanik & Baudynamik



Übersicht

Aufgabenstellung

Ursachen des „unsicheren“ Fahrdrahtzustandes

Maßgebende Materialparameter (exp. Untersuchungen)

Simulation der Fahrdrahtverlegung & Restwelligkeit

Kreichverhalten

Schlussfolgerung

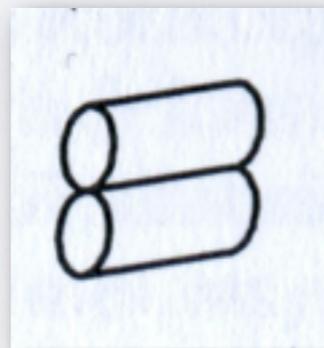
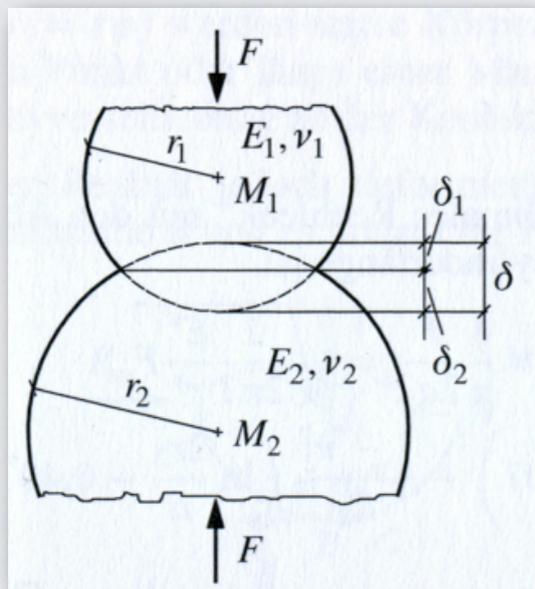
Aufgabenstellung

Um die Güte der Stromabnahme zwischen den Stromabnehmern und dem Fahrdraht für das gewählte Oberleitungssystem sicherzustellen, muss der Fahrdraht im verlegten Endzustand eine definierte **konstante Nennzugkraft** haben. Die dabei eingepprägten Normalspannungen dürfen unter Berücksichtigung eines Sicherheitsbeiwertes nicht zum Erreichen der Traglast führen. Das gewählte Systemdesign ist von den geforderten höchsten Betriebsgeschwindigkeiten und den elektrischen Leistungsanforderungen abhängig.

Die aus den Prozessen Fahrdrahtfertigung und Fahrdrahtmontage eingepprägte und verbleibende „**Fahrdraht-Restwelligkeit**“ so weit wie möglich vermieden bzw. durch den Montageprozess zusätzlich reduziert werden.

Ursachen des „unsicheren“ Fahrdrahtzustandes

1. Eingeprägte Deformationsgrößen während des Herstellungsprozesses bzw. Lagerung und/oder Transport
2. Imperfektionen im aufgewickelten Fahrdraht infolge Radialpressung (Kontaktproblem)



$$r_1 = r_2 = r, E_1 = E_2 = E, \nu_1 = \nu_2 = \nu$$

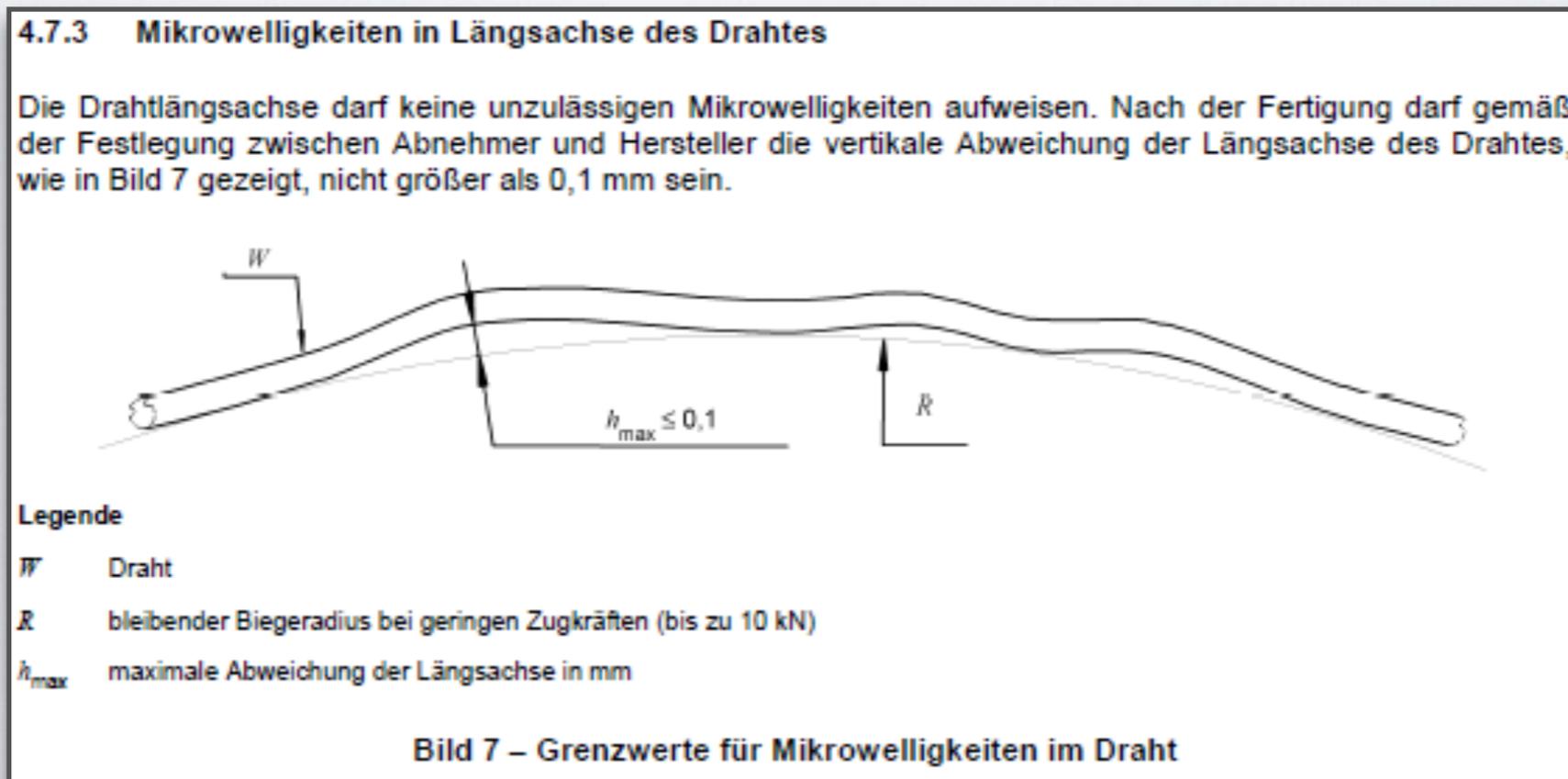
Elastischer Grenzzustand wird im betrachteten Fall NICHT erreicht.

$$F_{\max} = R_m^2 \pi (1 - \nu^2) \frac{r R}{E}$$

3. Instabilitäten während des Aufwickelvorganges auf die Fahrdrahttrommel

Aufgrund der Querschnittsgeometrie und des Spannungszustandes können **KIPPEN** und **BIEGEDRILLKNICKEN** ausgeschlossen werden.

4. Mikrowelligkeit (EN 50149) nach Abtrommeln und Verlegung des Fahrdrahtes



Mechanische Modellierung des elasto-plastischen Fahrdrahtes

Numerische Berechnung

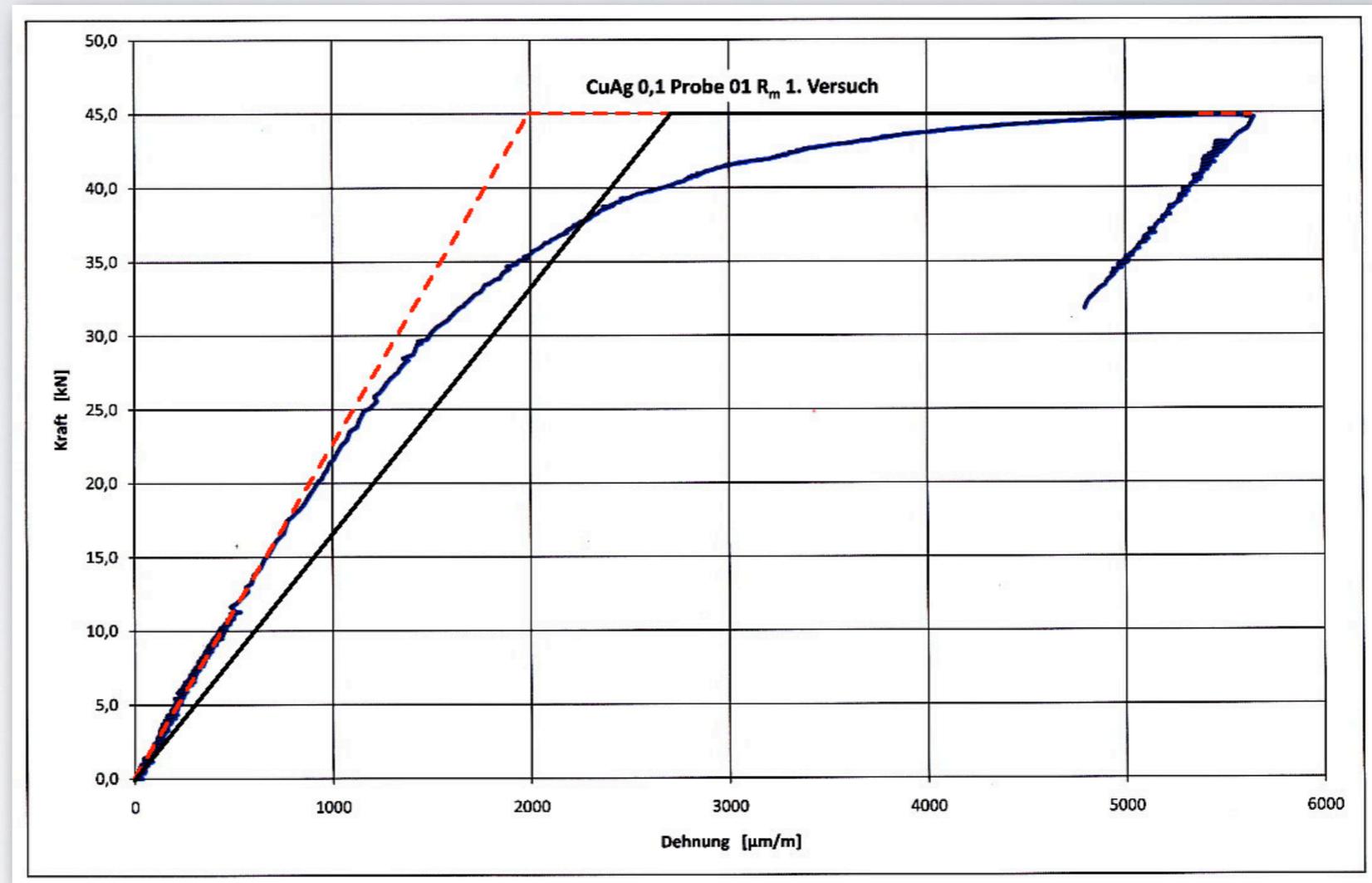
- (Querschnittsfläche)
- Schwerlinien
- Flächenhalbierende
- Flächenträgheitsmomente

Experimentelle Ermittlung

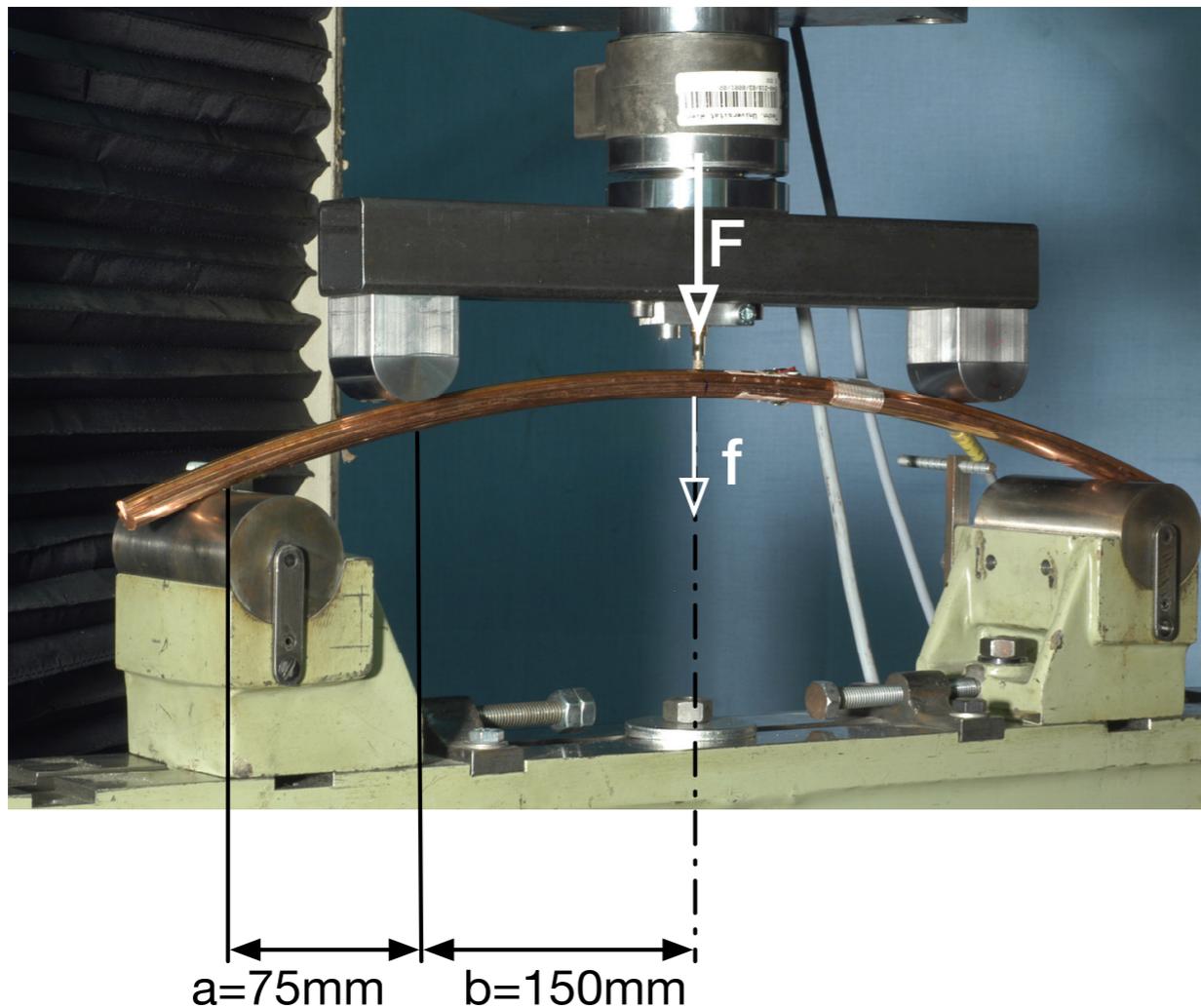
- Zugfestigkeit
- Bruchkraft (Traglast)
- Bruchdehnung
- Elastizitätsmodul
- Querdehnzahl

z.B. Elastizitätsmodul

Zugversuch

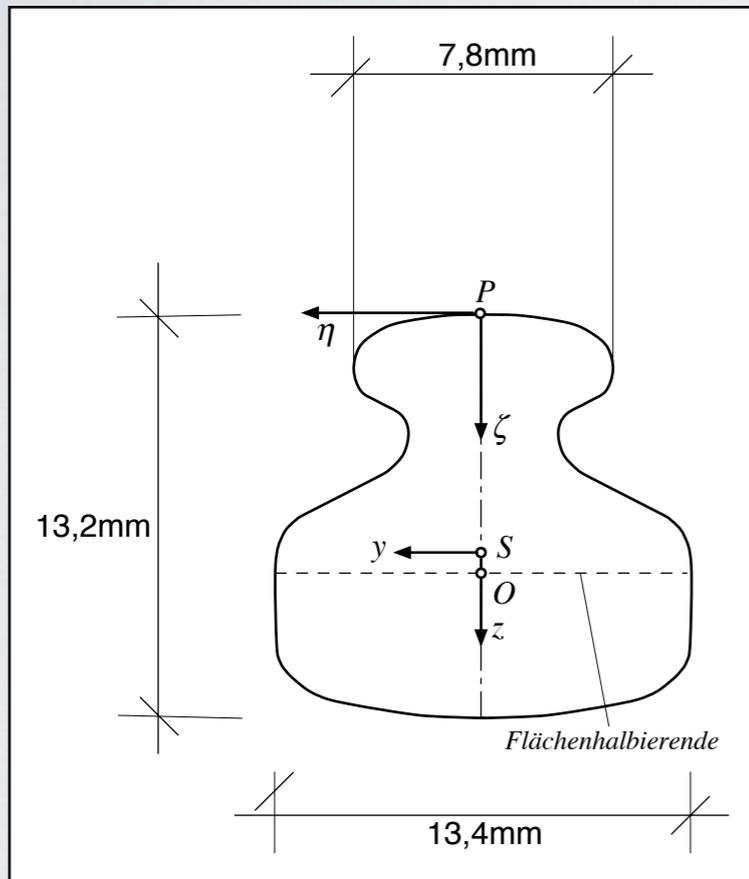


4-Punkt-Biegeversuch

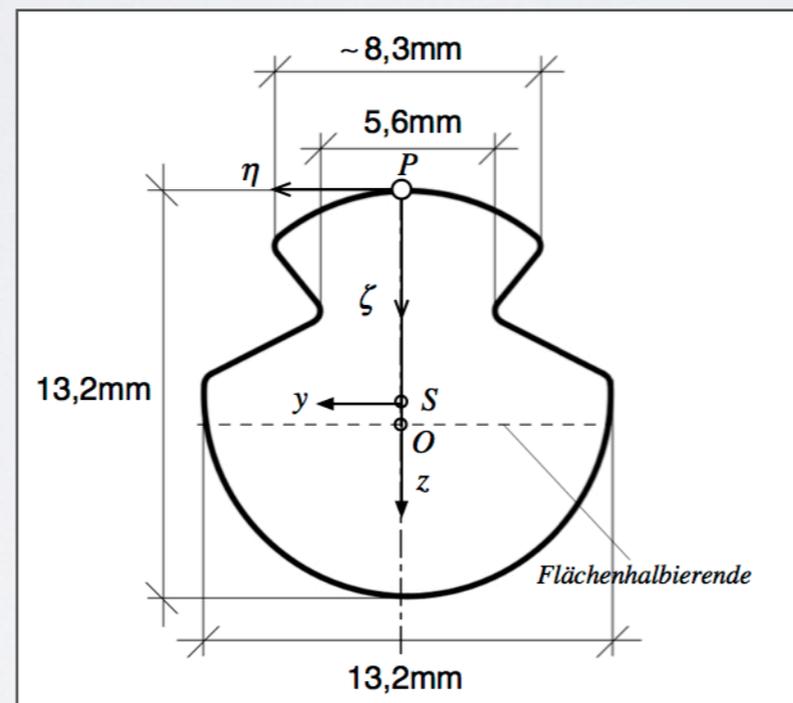


$$f = \frac{F}{E_0 J_y} \frac{ab^2}{2} \Rightarrow E_0$$

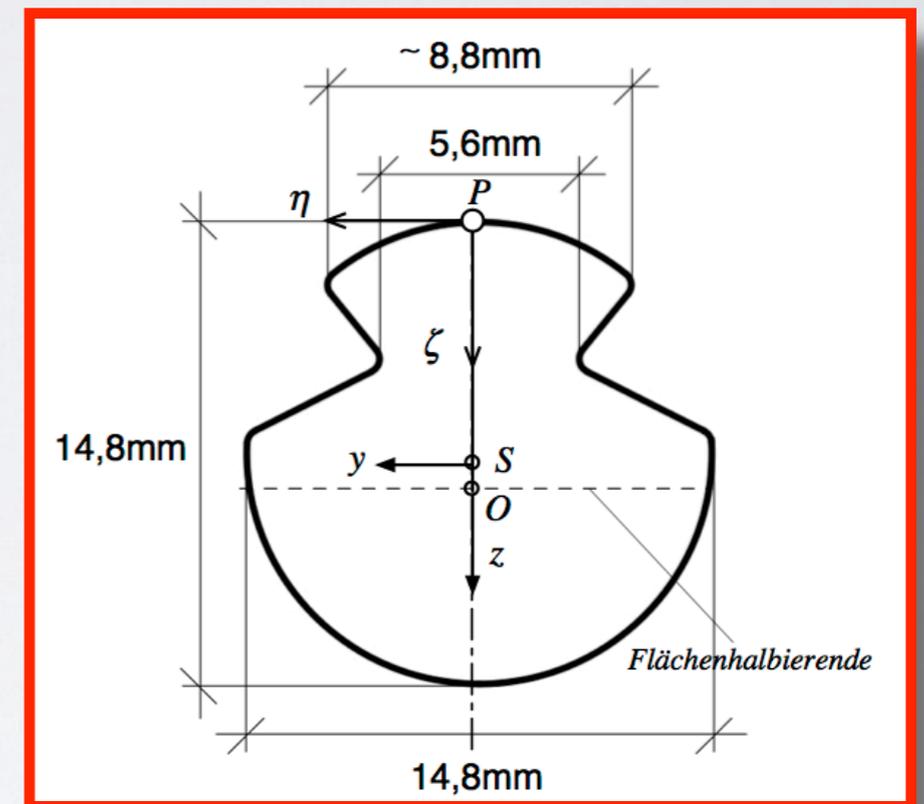
Maßgebende Geometrie- und Materialparameter



FD 120mm²
(Legierung CuAg 0,10)



AC 120mm²
(Legierung CuMg 0,5)



AC 150mm² RiM 150
(Legierung CuMg 0,5)

Da alle Rollen der Verlegemaschinen (Fahrdrahttrommel, Umlenkrolle, Friktionswindensystem) kreisförmige Geometrien – und somit jeweils konstante Krümmungen - aufweisen, kann dem gekrümmten Fahrdraht ein Spannungszustand aus dem Lastfall „Reine Biegung“ (konstant verteilte Biegemomentenbeanspruchung, keine Querkraft) zugewiesen werden.

!!WICHTIG: Die Biegerichtung des Fahrdrahtes auf der Fahrdrahttrommel ist beizubehalten!!

Die in einzelnen Abschnitten überlagerte **Normalkraftbeanspruchung** wird iterativ, unter Beachtung der **N-M-Interaktionsbeziehungen** berücksichtigt.

Fahrleitungsumbaumaschine (FUM; Plasser & Theurer)



Fahrdrahtverlegung mit FUM:

Je nach Verformungsgrad unterscheidet man bei „Reiner Biegung“
4 verschiedene Spannungszustände

1. Vollständig elastischer Zustand

Über den Querschnitt durchgehende lineare Spannungsverteilung: $\sigma(\zeta) = \frac{M}{J_y} (\zeta - \zeta_s)$

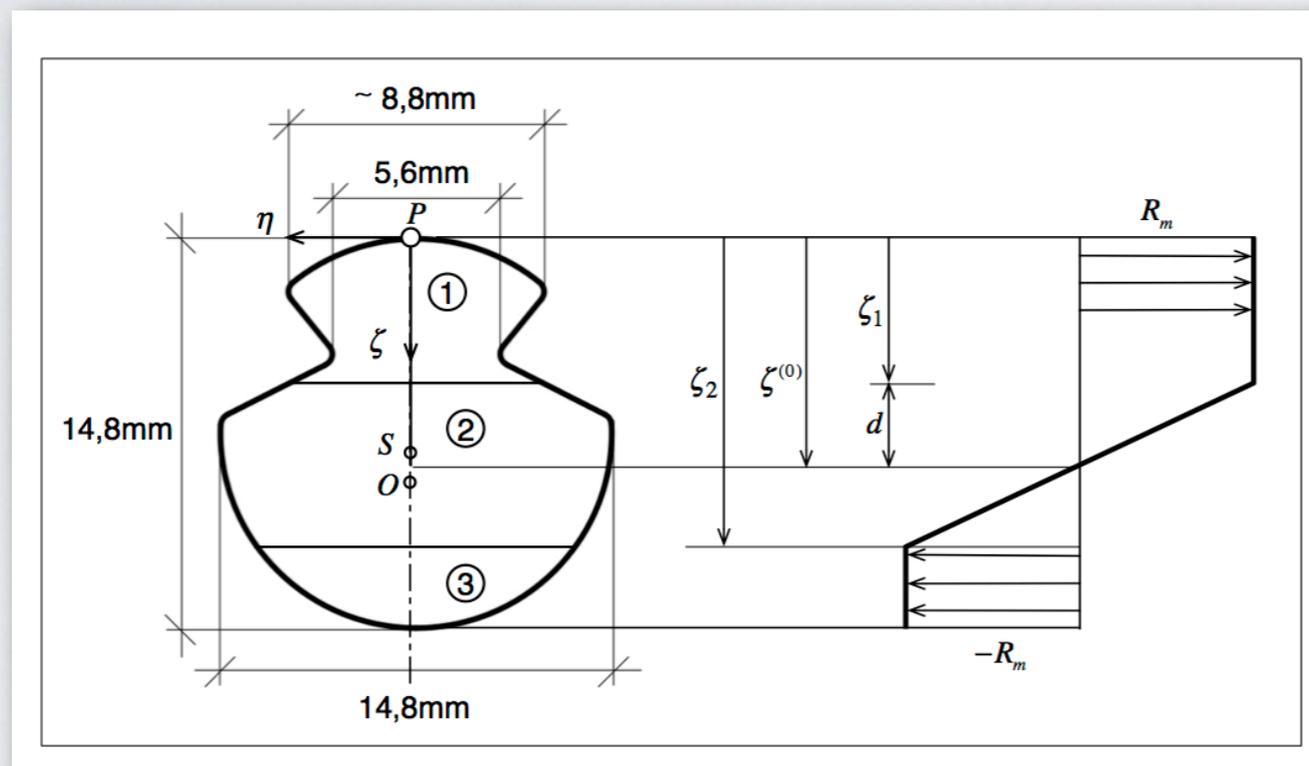
Spannungsnulllinie verläuft durch den Flächenschwerpunkt, Beginn der Plastifizierung am oberen Querschnittsrand: $M = M_F = R_m J_y / \zeta_s$

Mindestdurchmesser OHNE plastische Verformung: $d_{\min}^e = \frac{2 E \zeta_s}{R_m} = 4170 \text{ mm}$

2. Einseitig plastischer Zustand

Ausbreitung der plastischen Zone im oberen Querschnittsbereich

3. Zweiseitig plastischer Zustand = maßgebend



Bedingungen zur Berechnung der Spannungsnulllinie und des zugehörigen Momentes:

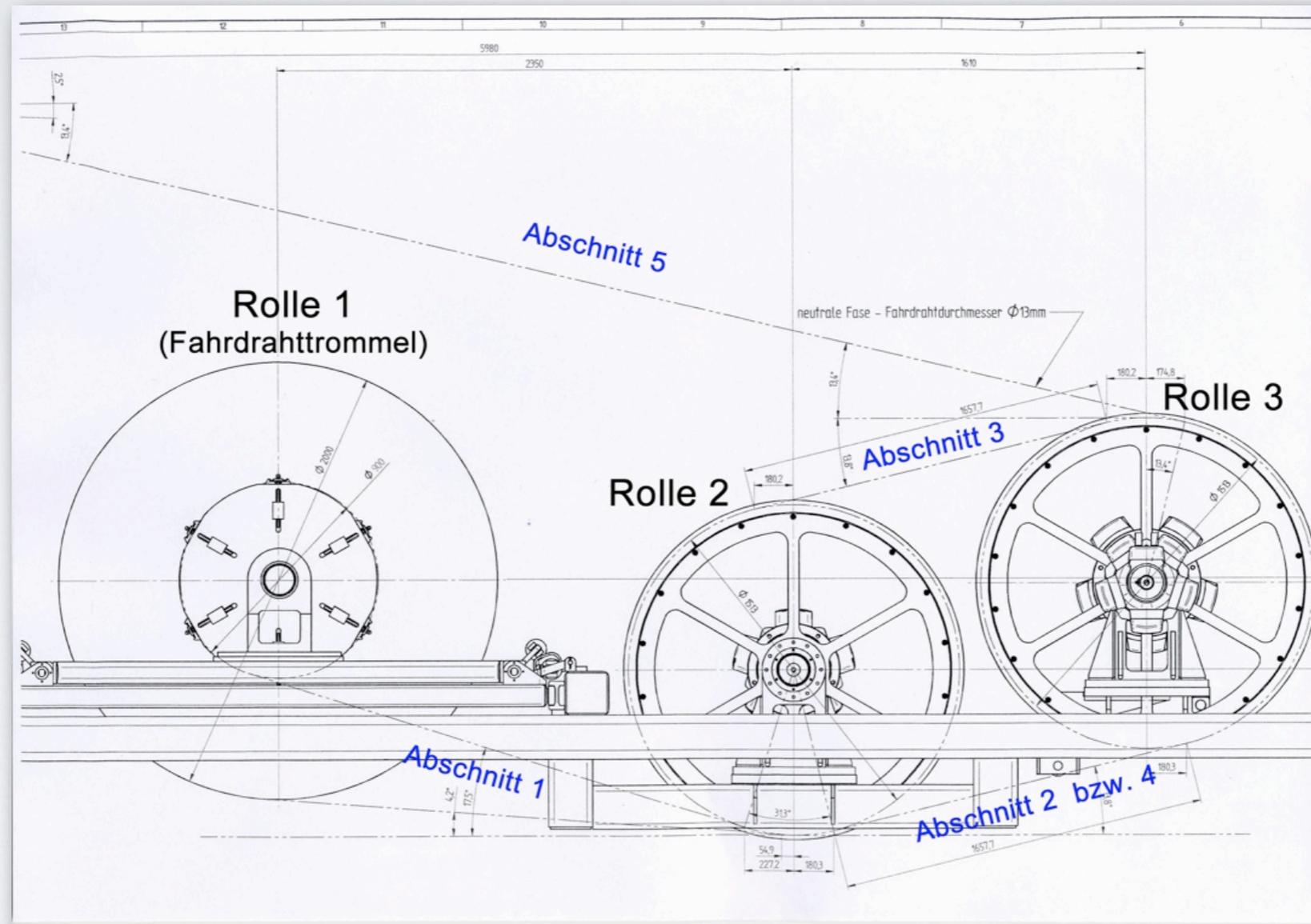
$$N = \int_A \sigma(\zeta) dA = 0$$

$$M = \int_A \sigma(\zeta) \zeta dA$$

4. Vollplastischer Zustand

Tragmoment:
$$M_T = R_m \frac{A}{2} (\zeta_{Su} - \zeta_{So})$$

Simulation der Fahrdrahtverlegung mit FUM (Plasser & Theurer)



Normalkräfte

Erforderliche Endzugkraft: $N_5 = N_E = 27 \text{ kN}$

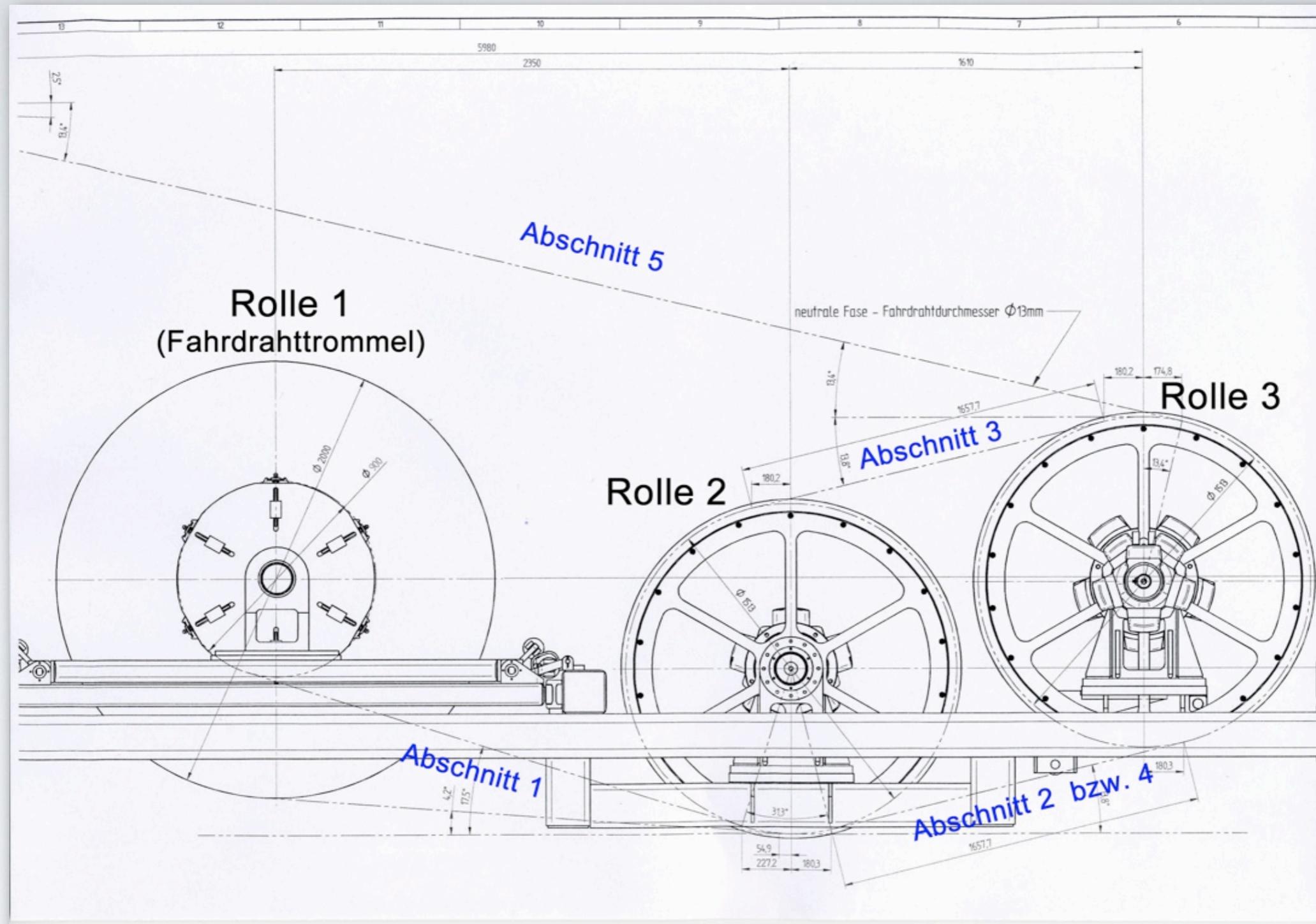
EULERSche Seilreibungsgleichung: $N(\varphi) = N(\varphi = 0) \cdot \exp(\mu \varphi)$

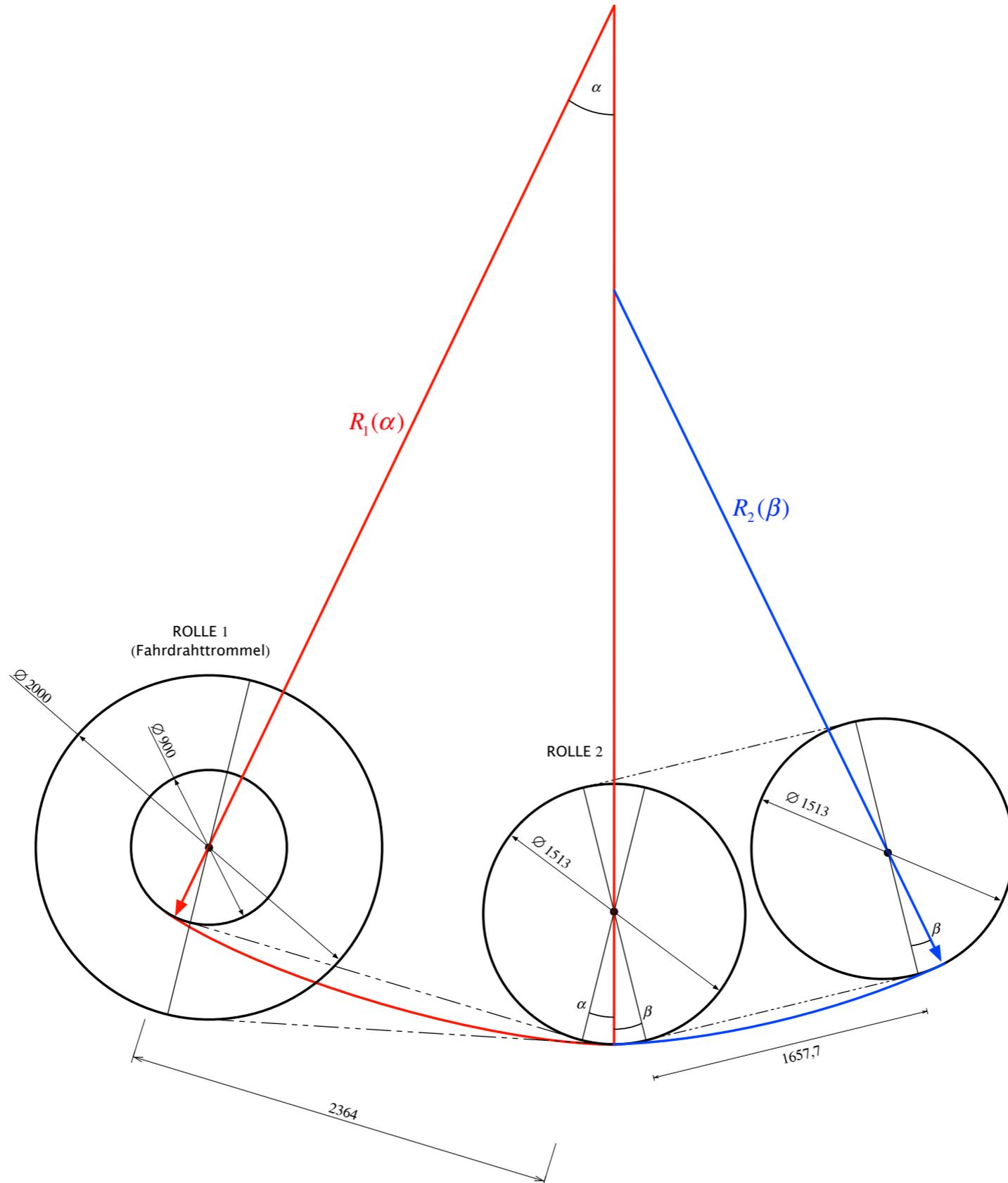
φ ... Umschlingungswinkel $\mu = 0,2$... Reibungszahl

Abschnitt		Reibungszahl: $\mu = 0,2$
Nr.	Beschreibung	
5	ab R3 in Verlegerichtung	$N_5 = N_E = 27,0 \text{ kN}$
4	zwischen R2 und R3 „unten“	$N_4 = 15,8 \text{ kN}$
3	zwischen R2 und R3 „oben“	$N_3 = N_4 = 15,8 \text{ kN}$
2	zwischen R2 und R3 „unten“	$N_2 = 8,45 \text{ kN}$
1	zwischen R1 und R2	$N_1 = N_2 = 8,45 \text{ kN}$
R1 ... Fahrdrahttrommel (Rolle 1)		
R2 ... Umlenkrolle (Rolle 2)		
R3 ... Friktionswinde (Rolle 3)		

$$\mu_{erf} = -\ln\left(\frac{N_{1,erf}}{N_5}\right) \frac{1}{5,808}$$

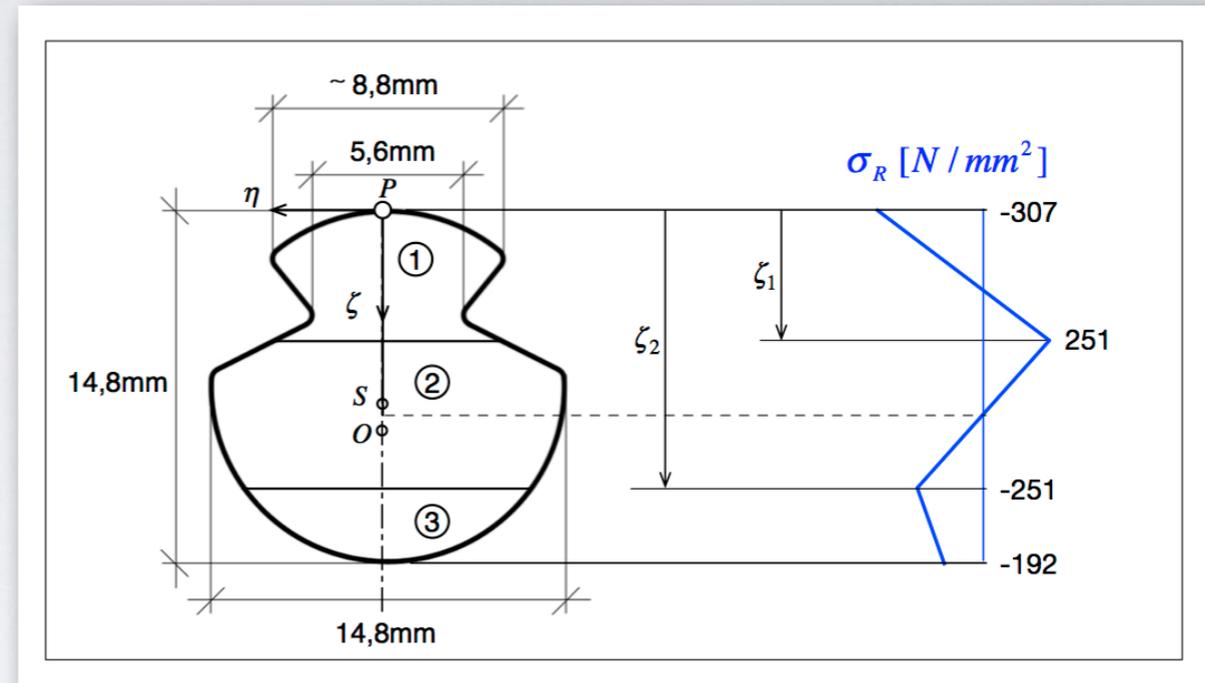
z.B.: $N_{1,erf} = 5,0 \text{ kN} \Rightarrow \mu_{erf} = 0,29$





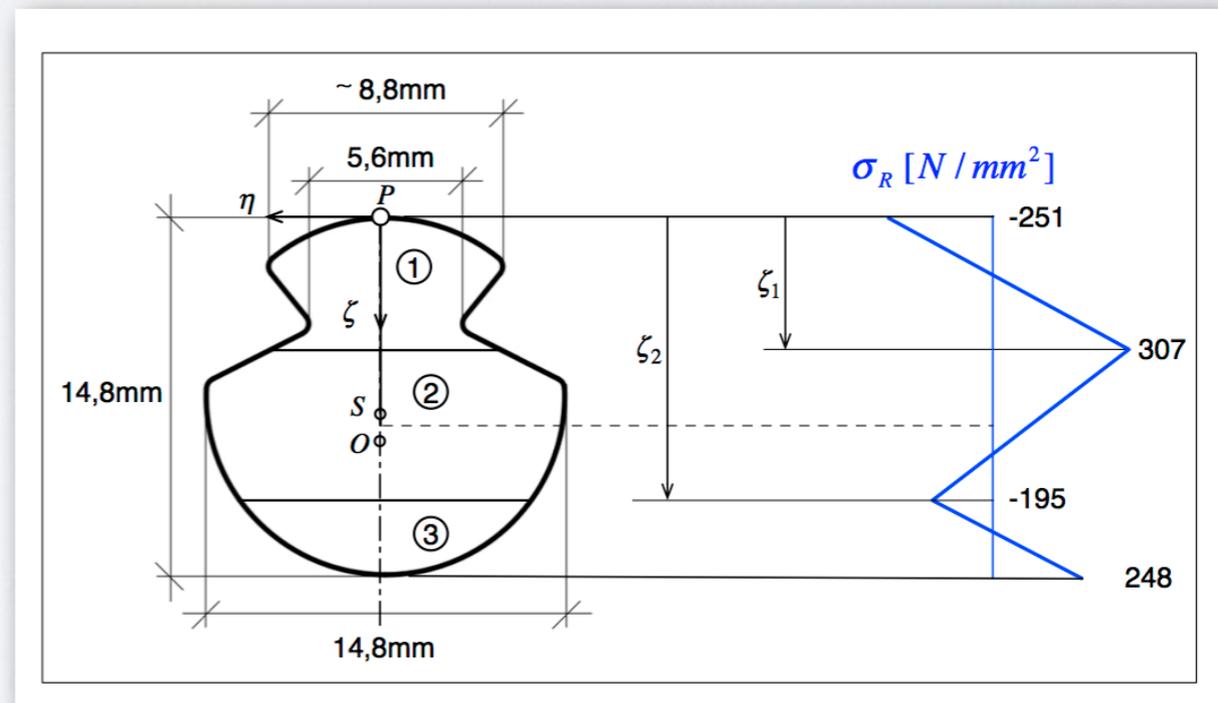
Restnormalspannungsverlauf nach Lösung der Fahrdrahtfixierung von der Fahrdrahttrommel

$$\sigma_R(\zeta) < R_m = 470 \text{ N/mm}^2$$



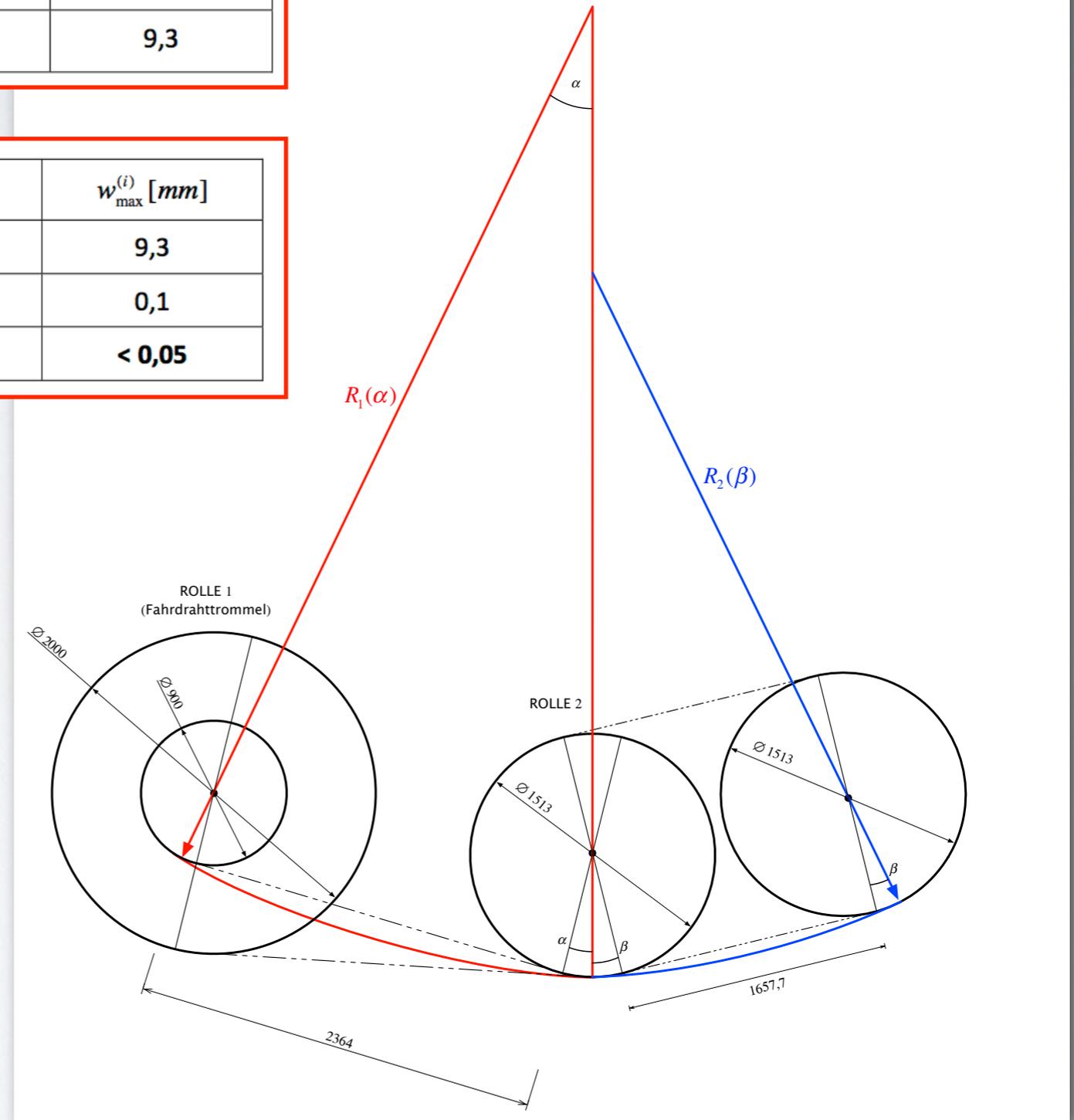
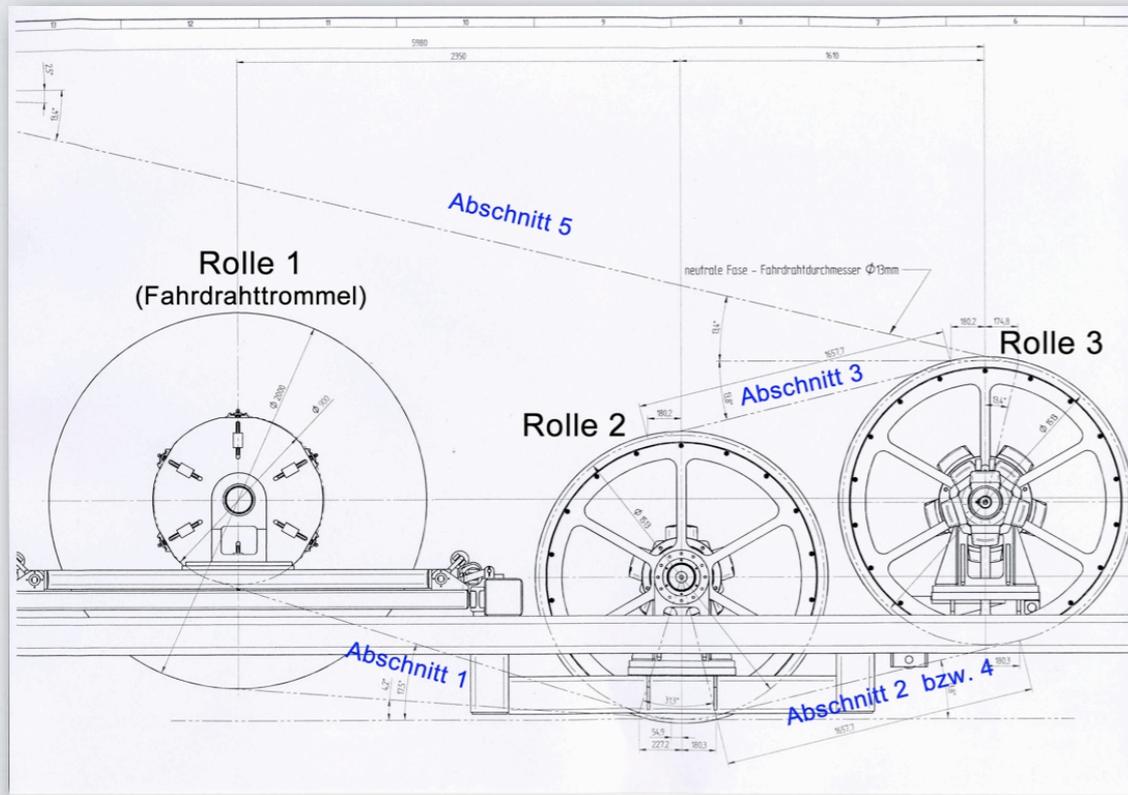
Normalspannungsverlauf in Abschnitt 2:

$$\sigma_R(\zeta) < R_m = 470 \text{ N/mm}^2$$



	$\beta = 5^\circ$	$\beta = 10^\circ$	$\beta = 15^\circ$	$\beta = 20^\circ$
$w_{\max}^{(2)} [mm]$	2,4	4,7	7,0	9,3

Abschnitt (i)	$\sigma_{\max} [N/mm^2]$	$\sigma_{\min} [N/mm^2]$	$\epsilon [\mu m/m]$	$w_{\max}^{(i)} [mm]$
2	307	-251	600	9,3
3	241	-165	1123	0,1
5	316	-90	1920	< 0,05

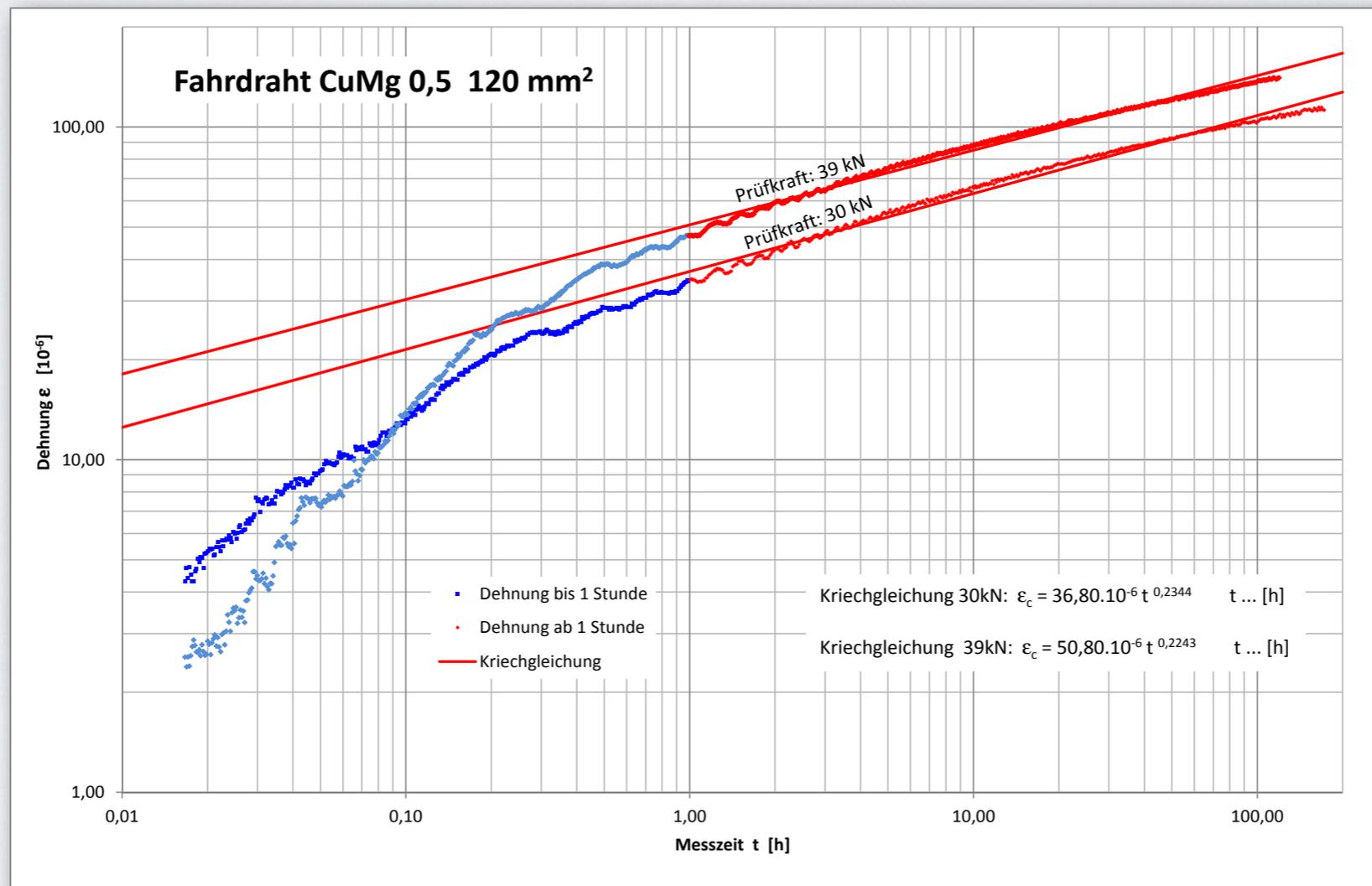


Kriechverhalten

Experimentelle Untersuchungen am CuMg 0,5 120mm²

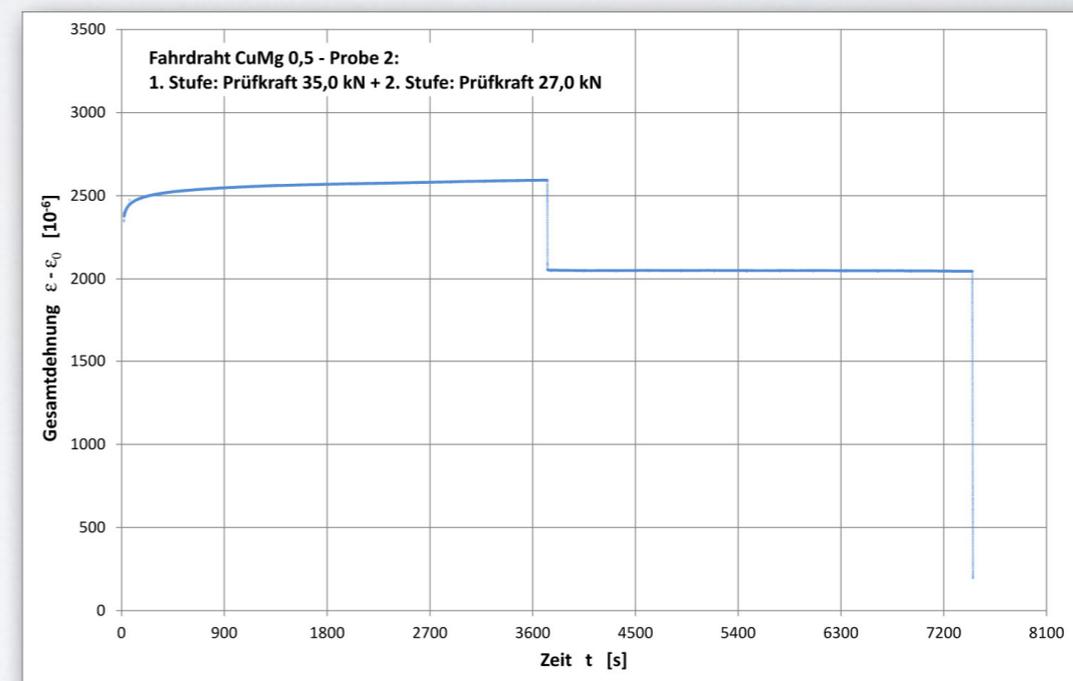
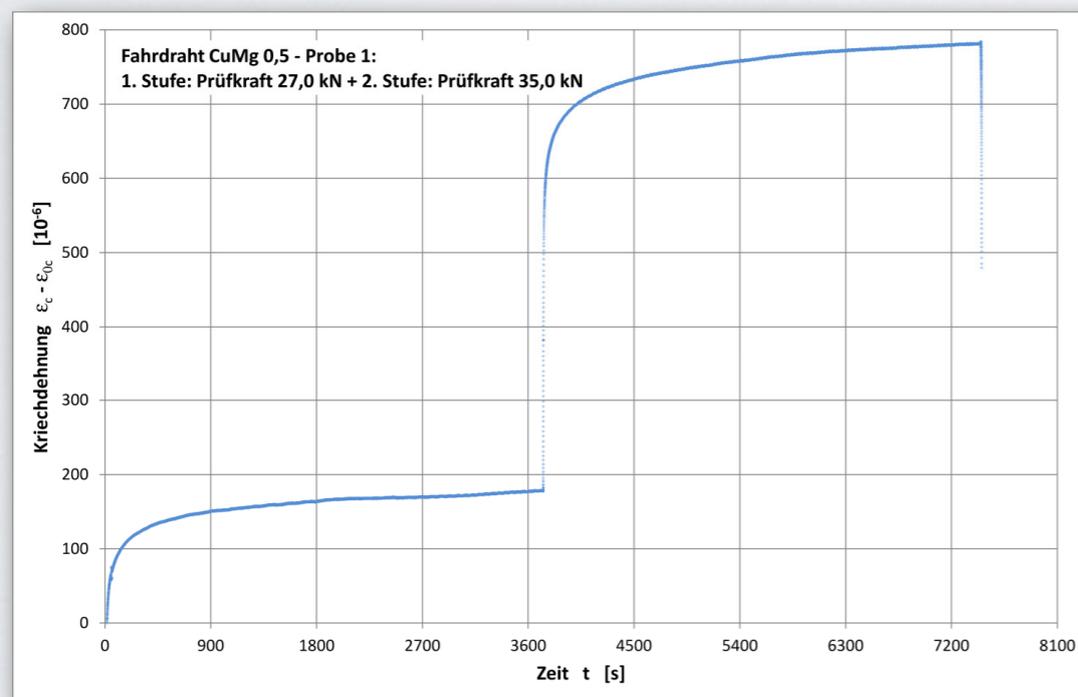
Technischen Versuchs- und Forschungsanstalt GmbH (TVFA Wien):

Langzeitprüfung: 3 Tage = 72 Stunden bei 20°C. Die Proben wurden vor der Kriechprüfung in einem Belastungsversuch für die Dauer von ca. 1 min mit der jeweiligen Prüfkraft der Kriechprüfung vorbelastet. Der dominante Kriechanteil (blauer Kurvenabschnitt) tritt innerhalb der ersten Stunde auf.



Kurzzeitkriechverhalten: Im Belastungsprogramm war für jede der beiden Kraftstufen (bei Be- und Entlastung) eine Haltezeit von 3600 s bei konstanter Prüfkraft eingestellt. Für die Aufbringung der Prüfkraft am Beginn der Prüfung und die Änderung der Prüfkraft von einer Stufe zur nächsten war eine Zeitspanne von 120s gewählt.

Daraus lässt sich ableiten, dass eine höhere Vorbelastung (Zugkraft) im Fahrdraht vor der endgültigen Montage der Fahrdrahtaufhängungen (Ausleger und Nachspannvorrichtungen) die Montagegenauigkeit noch steigern würde.



Eine zusätzliche Induktion von Feinwelligkeiten im Fahrdraht zufolge Kriechdehnung unter konstanter Zugkraft kann ausgeschlossen werden kann.

Schlussfolgerung

- ➔ Jene von der Fa. Plasser&Theurer entwickelte Fahrleitungsumbaumaschine (FUM) eignet sich gut für die Verlegung von ÖBB Profilmahdraht FD 120 sowie für DB Rillenfahrdrähte RiM 120 und 150.
- ➔ Unter den Voraussetzungen, dass der Fahrdraht präzise hergestellt und aufgewickelt wurde (ohne Einprägung unzulässig großer Verzerrungen und Krümmungen), sind bei ordnungsgemäßer Verlegung unter der vorgegebenen konstanten Nennzugkraft keine Restwelligkeiten von zu erwarten.
- ➔ Auftretende Kriechdehnungen erzeugen keine zusätzliche Restwelligkeit. Für die exakte Positionierung der Fahrdrahtaufhängungen bereits während des Montageprozesses mit Nennzugkraft muss jedoch berücksichtigt werden, dass der dominante axiale Kriechanteil innerhalb der ersten 30 Minuten auftritt.