

Mechanische Analyse von Fahrdrähten zur fachgerechten Verlegetechnik

Rudolf Heuer, Wien (AT)

Plasser & Theurer entwickelte eine Fahrleitungs-Installationsmaschine (FUM), bei der die Fahrdraht- und Trageilverlegung besonders zeiteffizient, unter vorgegebener Nennzugkraft erfolgt. Der folgende Beitrag beschreibt die mechanische Modellierung des Verlegevorganges. Dabei zeigt sich für unterschiedliche Profil- und Rillenfahrdrähte, dass sich die FUM sehr gut für die Fahrdrahtverlegung eignet und die Mikrowelligkeit nach EN 50149 sicher vermieden wird.

MECHANICAL ANALYSIS OF CONTACT WIRES IN ORDER TO ACHIEVE PROFESSIONAL METHODS FOR PAYING OUT THE WIRE

Plasser & Theurer developed a wiring machine (FUM), in which the wire laying is carried out in a particularly time-saving manner under a given nominal tensile force. The following article describes the mechanical modeling of the laying process. For different profile and grooved contact wires, it turns out that the FUM is very suitable for the laying of the considered wires, and the microwaves as mentioned in EN 50149 are safely avoided.

ANALYSE MÉCANIQUE DE FILS DE CONTACT EN VUE D'UNE TECHNOLOGIE DE DÉROULEMENT APPROPRIÉE

Plasser & Theurer a développé un engin de pose de la caténaire (FUM), à avancement continu, pour l'installation rapide et simultanée du fil de contact et du câble porteur avec la tension définitive. Le présent article décrit la modélisation numérique des aspects mécaniques du procès de la pose du fil de contact. Il s'est avéré que le FUM est particulièrement approprié pour la pose de fils de contact rainurés de différents profils est que les micro-vagues mentionnées dans la EN 50149 sont évitées sans faute.

1 Einführung

Vertikale Wellen am Fahrdraht können die Güte der Stromabnahme sehr beeinträchtigen, weshalb der Fahrdraht mit einer definierten konstanten Nennzugkraft vorgespannt sein muss. Die dabei eingepprägten Normalspannungen dürfen unter Berücksichtigung eines Sicherheitsbeiwertes nicht zum Erreichen der Zugfestigkeit des Fahrdrahtes führen. Das gewählte Oberleitungs-Systemdesign ist von den geforderten höchsten Betriebsgeschwindigkeiten und den elektrischen Leistungsanforderungen abhängig. Die aus den Prozessen Fahrdrahtfertigung und Fahrdrahtmontage verbleibende Fahrdraht-Restwelligkeit muss so weit wie möglich vermieden oder durch den Montageprozess zusätzlich reduziert werden.

Plasser & Theurer entwickelte eine Fahrleitungs-Installationsmaschine (FUM), bei der die Fahrdrahtverlegung besonders zeiteffizient, unter Nennzugkraft erfolgt. Die Zugkraft wird durch den Einsatz einer Friktionswinde stufenweise bis zur eingestellten Nennzugkraft gesteigert.

In mehreren Untersuchungen wurde die zu erwartende Restwelligkeit im Profildraht der ÖBB, Bauform CF-120 in der Legierung CuAg 0,10 und in den Rillendrähten Bauform AC-120 und AC-150 in der Legierung CuMg 0,5 nach deren Verlegung mit Hilfe der FUM ermittelt. Details und Querschnittzeichnungen dieser Bauformen siehe [1].

2 Ursachen des „unsicheren“ Fahrdrahtzustandes

Der Fahrdraht durchläuft ab seiner industriellen Herstellung bis zu seiner Verlegung mehrere Prozesse, die zu unerwünschten Imperfektionen und Welligkeit führen können. Dies sind vor allem:

- Eingepprägte Verzerrungen und Krümmungen während des Herstellungsprozesses
- Lokale Instabilitäten wie Kippen und Biegedrillknicken während des Auflegens des gefertigten Drahtes auf die Trommel
- Imperfektionen im aufgewickelten Fahrdraht infolge Radialpressung (Kontaktproblem)

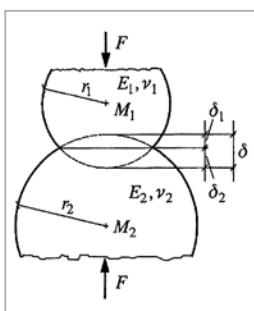


Bild 1:

Elastisches Kontaktproblem gemäß Hertz'scher Pressung zwischen zwei kreisförmigen Querschnitten (Grafik: J. Winkler et al. [2]).

δ Eindrückung, Abplattung

E Elastizitätsmodul

F einwirkende Kraft

M Kreismittelpunkt des Rundkörpers

r Radius

ν Querdehnzahl

Index:

1 Körper 1

2 Körper 2

- d) Bleibende vertikale Deformationen (Mikrowelligkeit) nach dem Abtrommeln und dem Verlegen des elasto-plastisch aufgewickelten Fahrdrahtes

Unter der Annahme, dass der Fahrdrahthersteller die erforderlichen Genauigkeitsanforderungen nach a) einhält, und da bei den untersuchten Fahrdrahtgeometrien die Instabilitätszustände nach b) ausgeschlossen werden können, sind für die vorliegende Untersuchung nur die beiden letztgenannten Ursachen c) und d) repräsentativ.

3 Mechanische Modellierung der Radialpressung zwischen zwei Fahrdrahtlagen

Bei der Idealisierung gemäß Hertz'scher-Flächenpressung, siehe zum Beispiel [2], berühren sich zwei Fahrdrahtlagen im aufgewickelten Zustand entlang einer (gekrümmten) Linie.

Als idealisierte Querschnittsgeometrie werden effektive Kreisquerschnitte mit den Radien $r_1=r_2=r$ gewählt, siehe Bild 1. Die Materialien verhalten sich bis zum Erreichen der Zugfestigkeit ideal-elastisch, die Kontaktkräfte werden näherungsweise nur in Richtung der jeweiligen Flächennormalen übertragen. Weiterhin wird für die Eindrückung oder Abplattung δ vorausgesetzt, dass diese klein gegenüber den Querschnittsradien ist.

Als Ergebnis der Berechnungen ergibt sich die Bedingung der maximal zulässigen Abwickelkraft F_{\max} von der Speichertrommel, bei der es zu keinen bleibenden Deformationen oder lokalen Eindrückungen kommt:

$$F_{\max} < R_m^2 (1 - \nu^2) rR/E \quad (1)$$

Darin bezeichnet R_m die Zugfestigkeit des Fahrdrahtes, E den Elastizitätsmodul, ν die Querdehnzahl und R den Radius der Fahrdrahttrommel.

4 Mechanische Modellierung des Fahrdrahtes mit elasto-plastischem Querschnitt

Im Rahmen ausführlicher Studien werden seit 2011 folgende Fahrdrähte hinsichtlich ihrer Restwelligkeit nach der Verlegung mit Hilfe der FUM, wie in Bild 2 dargestellt, untersucht:

- Profilhahndraht der ÖBB, Bauform CF-120, CuAg 0,10
- Rillenhahndrähte, Bauform AC-120 und AC-150, CuMg 0,5

Im Folgenden wird die Vorgangsweise der mechanischen Modellierung exemplarisch für den Rillenhahndraht AC-120 erläutert (Bild 3).



Bild 2: Fahrleitungs-Installationsmaschine (FUM) (Foto: Plasser & Theurer).

Die Voraussetzungen und die Vorgehensweise bei der Aufstellung der grundlegenden Gleichungen für die Bestimmung des Spannungszustandes im Fahrdraht sind – mit Ausnahme des (elasto-plastischen) Werkstoffgesetzes – im Wesentlichen dieselben wie in der elementaren linear elastischen Biegetheorie für stab- und balkenartige Strukturen:

- Die Querschnittsabmessungen seien klein gegenüber den Radien der Fahrdrahttrommel beziehungsweise der Umlenkrollen und sie seien über die Länge des Fahrdrahtes konstant.
- Dominante Schnittgrößen seien abschnittsweise konstante Biegemomente und konstante Längskräfte.
- Die Bernoulli-Hypothese [3] soll für die elastischen und die plastischen Bereiche des Fahrdrahtes gelten.

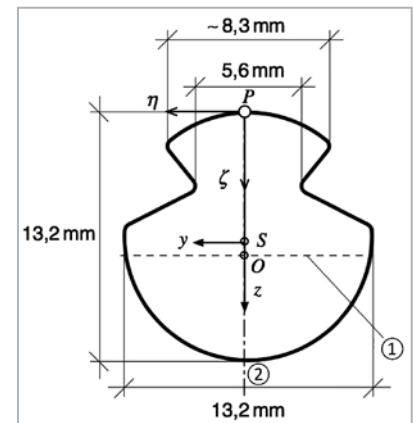


Bild 3: Querschnitt des Rillenhahndrahtes AC-120, Legierung CuMg 0,5 (Grafik: R. Heuer).
 ① horizontale Flächenhalbierende
 ② vertikale Flächenhalbierende
 O Schnittpunkt der horizontalen und vertikalen Flächenhalbierenden
 η, ζ Achsen durch den Punkt der Krafteinleitung
 S Schwerpunkt
 y, z Achsen durch den Schwerpunkt

Die für die Modellierung maßgebenden Materialparameter Zugfestigkeit R_m und Elastizitätsmodul E werden experimentell ermittelt, die Querschnittswerte Schwerpunkt S , Flächenträgheitsmomente sowie die Lage der Flächenhalbierenden O des Fahrdrahtes numerisch berechnet. Bild 4 zeigt den Aufbau des 4-Punkt-Biegeversuchs zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls.

Da alle Rollen der FUM (Fahrdrahttrommel, Umlenkrolle, Friktionswinde) kreisförmige Geometrie und somit jeweils konstante Krümmung aufweisen, kann dem gekrümmten Fahrdraht ein Spannungszustand aus dem Lastfall Reine Biegung mit konstant verteilten Biegemomenten und ohne Querkraft zu-

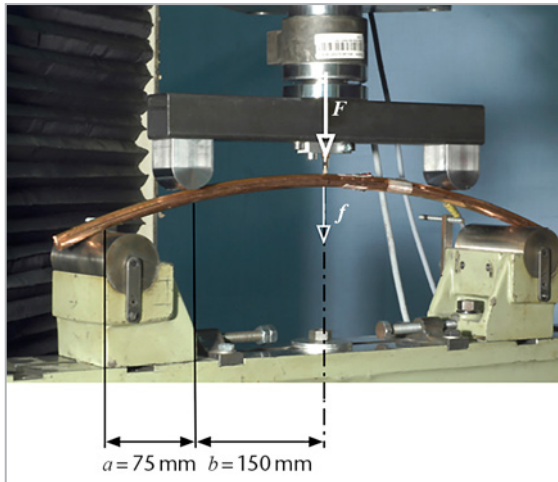


Bild 4:
4-Punkt-Biegeversuch (Foto: R. E. Knasmillner, TVFA).
 F einwirkende Kraft
 f resultierende Einsenkung

gewiesen werden. Die überlagerte Normalkraftbeanspruchung wird iterativ berücksichtigt.

Je nach Verformungsgrad unterscheidet man bei Reiner Biegung vier verschiedene Normalspannungszustände, siehe [4]:

- vollelastisch
- einseitig plastisch
- zweiseitig plastisch
- vollplastisch

Für die vorhandenen Rollendurchmesser der Speichertrommel von $900\text{ mm} \leq D \leq 2000\text{ mm}$ und der Umlenkrolle

und Friktionswinde von 1500 mm (Bild 5) zeigen die Berechnungen, dass sich der Fahrdrahtquerschnitt immer im Zustand der zweiseitigen Plastifizierung befindet (Bild 6).

5 Fahrdrahtverlegung mit Hilfe der FUM

5.1 Zustand im Abschnitt 1

Der Fahrdraht auf Rolle 1 (Bild 5, Fahrdrahttrommel) befindet sich in einem elasto-plastischen Spannungszustand. Nach Lösung der Fixierung des Fahrdrahtes von der Fahrdrahttrommel erfolgt Entlastung, woraus Restspannungen entstehen, die jedoch keine plastischen Bereiche aufweisen (Bild 7).

5.2 Zustand im Abschnitt 2 (und analog im Abschnitt 4)

Das freie Fahrdratende wird von der Fahrdrahttrommel über die Umlenkrolle (Bild 5, Rolle 2) gezogen und befindet sich somit in einer kreisförmig angenäherten, schwach gekrümmten Anfangskonfiguration. Die zu diesem Zeitpunkt noch geringe Anfangszugkraft erreicht ihren Endwert, sobald der Fahrdraht den letzten Abschnitt Nr. 5 erreicht hat. Der im zweiten Abschnitt resultierende Normalspannungsverlauf aus Restspannung und Zugnormalkraft weist im gesamten Fahrdratquerschnitt keine plastischen Bereiche auf. Die

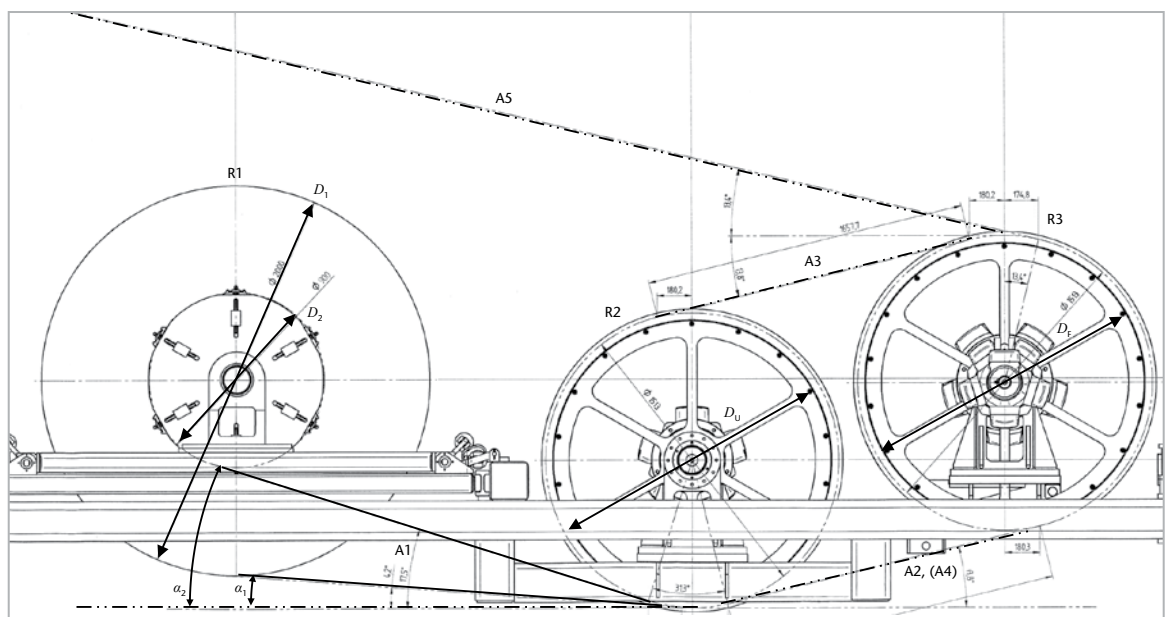


Bild 5:
Anordnung der Abschnitte und Rollen in der FUM (Plandokument: Plasser & Theurer)

A1 – A5 Abschnitte 1 bis 5

R1 – R3 Rollen 1 bis 3

α_1 Anfangswinkel beim größten Abwicklungsdurchmesser

α_2 Anfangswinkel beim kleinsten Abwicklungsdurchmesser

D_1 größter Abwicklungsdurchmesser

D_2 kleinster Abwicklungsdurchmesser

D_f Durchmesser der Friktionswinde

D_0 Durchmesser der Umlenkrolle

elastische Restdeformation errechnet sich aus dem Fahrdrabt unter eingepprägter Krümmung bei gleichzeitiger Normalkrafteinwirkung gemäß „Theorie 2. Ordnung“. Dieser Restdeformation kann eine neue eingepprägte Krümmung zugeordnet werden. Der Maximalwert der Restdeformation wird im Rahmen ausführlicher Parameterstudien in Abhängigkeit unterschiedlich angenommener Anfangswinkel, $5^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$, berechnet.

5.3 Zustand im Abschnitt 3

Während der folgenden Umschlingung um die Friktionswinde (Bild 5, Rolle 3) wird einerseits die Normalkraft im Fahrdrabt gemäß *Euler'scher* Seilreibung [3] erhöht, andererseits der Fahrdrabt wieder elasto-plastisch verformt, ohne jedoch den vollplastischen Zustand zu erreichen. Für die Berechnung der Normalspannungen werden dabei die Interaktionsbeziehungen zwischen Normalkraft und Biegemoment berücksichtigt, welche die Zustände vollelastisch und vollplastisch begrenzen. Die Restdurchbiegung im Abschnitt 3 berechnet sich gemäß Abschnitt 2, jedoch unter Berücksichtigung der Belastungsvorgeschichte, mit modifizierter Anfangskrümmung und erhöhter Normalkraft.

5.4 Zustand in den Abschnitten 4 und 5

Die weitere Vorgangsweise für die Analyse der Normalspannungen und Restdeformation in den beiden letzten Abschnitten 4 und 5 folgen sukzessiv aus analogen Simulationsrechnungen.

Für den DB-Rillenfahrdrabt AC-120, CuMg0,5 resultiert in Abschnitt 5 für eine vorgegebene Endzugkraft von 27 kN eine Restwelligkeit von nur $w_{\max}^{(5)} < 0,05$ mm. Die Berechnungen für die anderen beiden Fahrdrabtaufbauten führen zu ähnlichen Resultaten. Zur Definition und zu Angaben über Grenzwerte der Restwelligkeit siehe [1] und [5].

Experimentelle Untersuchungen und Simulationsberechnungen bestätigen, dass sich die von Plasser & Theurer entwickelte Fahrleitungs-Installationsmaschine (FUM) sehr gut für die Verlegung der untersuchten Fahrdrähte eignet und die Mikrowelligkeit nach EN 50149 [1] sicher vermieden wird. Nähere Beschreibungen der Untersuchungen finden sich in [6] und [7].

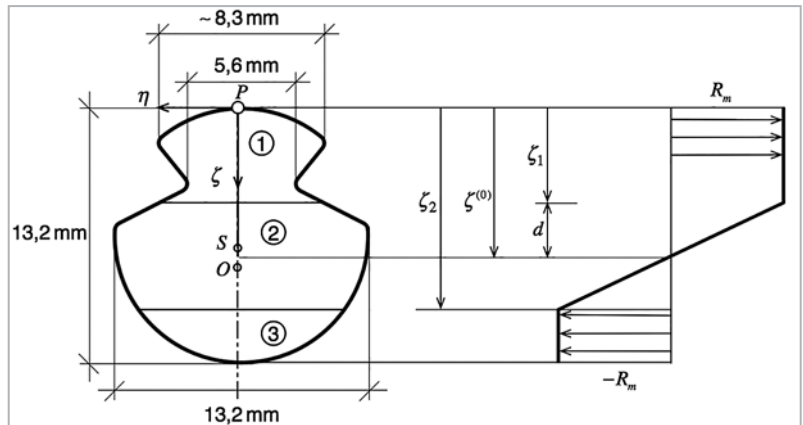


Bild 6:

Normalspannungsverlauf im zweiseitig plastifizierten Querschnitt des Fahrdrabtes (Grafik: R. Heuer).

- ① und ③ plastifizierte Bereiche
- ② elastischer Bereich
- ζ_1 und ζ_2 Grenzen der plastifizierten Bereiche
- $\zeta^{(0)}$ Nulldurchgang der Normalspannung
- R_m Zugfestigkeit des Fahrdrabtes

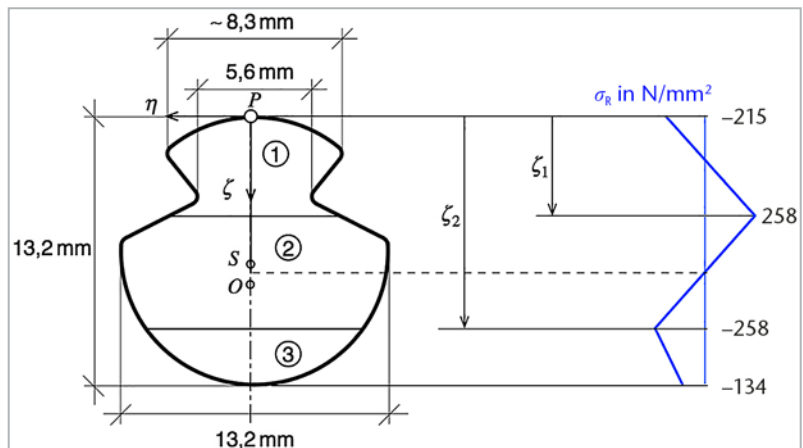


Bild 7:

Restnormalspannungszustand nach Lösung der Fixierung des Fahrdrabtes von der Fahrdrabttrommel (Grafik: R. Heuer)

- σ_r Restspannungen
- ① bis ③ elastische Bereiche
- ζ_1 und ζ_2 Wendepunkte des Restspannungsverlaufs

Literatur

- [1] EN 50149:2012: Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Elektrischer Zugbetrieb - Rillenfahrdrähte aus Kupfer und Kupferlegierung.
- [2] Winkler, J.; Aurich, H.: Taschenbuch der Technischen Mechanik. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006.
- [3] Ziegler, F.: Technische Mechanik der festen und flüssigen Körper. Wien: Springer, 1998.
- [4] Chakrabarty, J.: Theory of plasticity. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [5] Irsigler, M.: Qualitätskriterien für Fahrdrähte und die Montageprozesse. In: Eisenbahntechnische Rundschau, VDEI-ETR Nr. 4, April 2014.
- [6] Heuer, R.: Fahrdrabtwelligkeit und mechanische Modellierung des Verlegevorgangs. In: Eisenbahntechnische Rundschau, VDEI-ETR Nr. 3, April 2014.
- [7] Heuer, R.: Fahrdrabtwelligkeit und mechanische Modellierung des Verlegevorgangs. In: Jahrbuch Eisenbahningenieur-Kompodium, VDEI-EIK, 2014.

AUTOREN DATEN



DI Dr. techn. Rudolf Heuer (57), Ao. Universitätsprofessor an der TU Wien, Leiter des Laboratoriums für Modelldynamik.

Adresse: Technische Universität Wien, Forschungsbereich für Baumechanik und Baudynamik am Institut für Hochbau und Technologie, Karlsplatz 13/2063, 1040 Wien, Österreich; E-Mail: rudolf.heuer@tuwien.ac.at