[UNTERNEHMEN] DACHTHEMA PRODUKT



# UNTERSUCHUNG DER FREQUENZ-EIGENSCHAFTEN EINER OBERLEITUNG MIT HILFE VON SIMULATIONSTOOLS

Deutsch

eb – Elektrische Bahnen, Ausgabe 02-03/2023 Autoren: Dipl.-Ing. Olaf Krumme, Dipl.-Ing. Tobias Sawala

## Untersuchung der Frequenzeigenschaften einer Oberleitung mit Hilfe von Simulationstools

#### Olaf Krumme, Offenbach am Main; Tobias Sawala, Bochum

Es wurden Methoden zur Untersuchung der Frequenzeigenschaften von zwei flexiblen Oberleitungsbauarten mit Hilfe von Simulationstools zur Berechnung des dynamische Zusammenwirken zwischen Stromabnehmer und Oberleitung entwickelt. Die Untersuchung dient der Ermittlung kritischer Stromabnehmerabstände hinsichtlich der Befahrungsqualität mit mehreren Stromabnehmern. Durch dynamische Simulationen wird überprüft, ob die Resonanzfrequenzen einen Hinweis über kritische Stromabnehmerabstände geben können.

#### Investigation of the frequency properties of an overhead contact line using simulation tools

Methods were developed to study the frequency characteristics of two types of flexible overhead contact line types using simulation tools to calculate the dynamic interaction between the pantograph and the overhead contact line. The investigation serves to determine critical pantograph distances with regard to the quality of running with several pantographs. Dynamic simulations are used to check whether the resonance frequencies can provide an indication of critical pantograph distances.

#### Étude des propriétés fréquentielles d'une ligne aérienne de contact à l'aide d'outils de simulation Des méthodes ont été développées pour étudier les caractéristiques en fréquence de deux types de lignes aériennes de contact flexibles à l'aide d'outils de simulation pour calculer l'interaction dynamique entre le pantographe et la caténaire. L'investigation sert à déterminer les distances critiques entre pantographes en ce qui concerne la qualité du comportement avec ceux-ci. Les simulations dynamiques sont utilisées pour vérifier si les fréquences de résonance peuvent donner une indication concernant les distances critiques entre pantographes.

## 1 Motivation

Bisher wurden Oberleitungsbauformen für den Einsatz eines oder zweier Stromabnehmer pro Zug ausgelegt. Dies spiegelt sich auch in der Interoperabilitäts-Richtlinie [1] und der zugehörigen TSI Energie [2] und TSILOC & PAS [3] wider. Die nötigen Anforderungen an und die Validierung von Mess- und Simulationssystemen für das dynamischen Zusammenwirken zwischen Stromabnehmer und Oberleitung werden in den Normen EN 50317 [4] und EN 50318 [5] festgelegt.

Durch neuere Betriebs- und Fahrzeugkonzepte verfügen aus mehreren elektrischen Triebfahrzeugen zusammengestellte Züge bereits häufig über mehr als zwei Stromabnehmer. Dies führt beim Nachweis der Befahrbarkeit von Oberleitungen zu einem hohen Aufwand für die einzelnen Zugkonfigurationen. Bestehende Oberleitungsanlagen werden dann unter Betriebsbedingungen genutzt, für die sie nicht ausgelegt wurden. Der hierdurch signifikant höhere Verschleiß an Fahrdraht und Schleifleiste resultiert in einer reduzierten Lebensdauer der Komponenten.

Rail Power Systems (RPS) hat eine langjährige Erfahrung bei der Auslegung von Oberleitungsbauformen und Errichtung von Oberleitungsanlagen. Für den Nachweis des dynamischen Zusammenwirkens zwischen Stromabnehmer und Oberleitung stehen zwei Software-Tools zur Verfügung:

- TracFeed<sup>®</sup> CATMOS<sup>®</sup> für die Berechnung der Saitenschwingung nach dem Ansatz von d'Alembert
- TracFeed OSSCAT f
  ür die vollst
  ändig dreidimensionale Berechnung von Kettenwerken und Oberleitungsstromschienen nach der Finiten-Elemente-Methode (FEM)

Beide Tools sind nach der in den TSI benannten EN 50318:2002 [6] validiert, *TracFeed CATMOS* ebenfalls nach Ausgabe EN 50318:2018.

Aktuelle Untersuchungen zum Mehrstromabnehmerbetrieb von Oberleitungsanlagen schlagen vor, das dynamische Ausschwing- oder Überfahrverhalten der Oberleitung als Bemessungsgröße für das Verhalten der nachlaufenden Stromabnehmer zu verwenden [7], oder zeigen anhand von Messungen und Simulationen Stromabnehmerabstände auf, die Extremwerte oder gar Resonanzen beim Fahrverhalten aufweisen [8].

Beide Ansätze zeigen die Notwendigkeit auf, das Eigenschwingungsverhalten von Oberleitungen detaillierter zu untersuchen. In der aktuell geforderten Nachweisführung liegt der Fokus auf der Kontaktkraft und dem Fahrdrahtanhub, was dazu führt, dass aktuelle Simulationssysteme das dynamische Verhalten der Oberleitung zwar abbilden können, aber nicht im Detail auswerten.

## 2 Simulation von dynamischen Kettenwerkseigenschaften

Die experimentelle Ermittlung von dynamischen Kettenwerkseigenschaften wird schon seit Jahrzehnten, analog zu einer angeschlagenen Saite, über Abwurfversuche durchgeführt. Der Vorteil einer solchen Betrachtung liegt darin, dass die Eigenschaften der Oberleitung isoliert vom Stromabnehmer und somit ohne aufwendige Messfahrten betrachtet werden können. Heute werden Abwurfversuche insbesondere für die Abstimmung der Dämpfung von Simulationssystemen verwendet.

Die analytischen Grundlagen entstammen der Theorie zur Saitenschwingung [9]. Die Besonderheit der schwingenden Saite liegt dabei darin, dass ihre Eigenfrequenzen allein harmonische Vielfache einer Grundfrequenz bilden. Diese Frequenz kann analytisch über:

$$f = \frac{1}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \frac{c}{2 \cdot L} \tag{1}$$

berechnet werden. Dabei ist L die Saitenlänge,  $\sigma$  die mechanische Spannung und p die Dichte, c ist die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit. Dieser Eigenschaft verdankt die Saite ihre Eignung im Bereich der Saiteninstrumente, es entstehen Klänge, die sich zusammensetzen, aus der Grundfrequenz und deren harmonischen Vielfachen.

Für den Fall einer 50m langen Saite aus mit einer Spannkraft von 10kN, einem Durchmesser von 12mm, sowie einer Dichte von 8,8e-9t/mm<sup>3</sup> ergeben sich die in Bild 1 dargestellten ersten 16 Eigenfrequenzen als Vielfache der Grundfrequenz, auch Fundamentalfrequenz genannt.

Jeder Eigenfrequenz ist eine charakteristische Schwingungsform (Eigenmode oder Eigenform) zugeordnet. Bild 2 zeigt die entsprechenden Eigenformen für die ersten fünf Moden.

Wird eine Saite angeschlagen und anschließend das freie Ausschwingen betrachtet, findet man eine Bewegung als Überlagerung aller, theoretisch unendlich vielen, Eigenformen der Saite mit unterschiedlich starken Amplituden vor.

Während die analytische Gleichung der schwingenden Saite in der Regel nur in zwei Dimensionen aufgestellt und gelöst wird, gibt es beim dreidimensionalen Fall zusätzliche Schwingformen, deren Amplituden in lateraler Richtung dominieren. Ohne Be-



#### Bild 1:

Die ersten 16 Eigenfrequenzen einer Saite mit der Länge 50 m bilden sich als ganzzahlige Vielfache der Fundamentalfrequenz bei 1,0 Hz heraus (Bilder 1 bis 3 und 5 bis 11: RPS, bearb. *eb*).



#### Bild 2:

1 - Fundamental-Mode1; 2 - Mode2; 3 - Mode3; 4 - Mode4; 5 - Mode5

rücksichtigung der Schwerkraft stehen sich immer zwei Frequenzpaare mit identischen Frequenzen gegenüber, deren Schwingform sich jeweils in *y*- oder *z*-Richtung (Richtung quer zur Fahrtrichtung des Zuges) ausbildet.

Bei Oberleitungsanlagen werden die Schwingformen in *y*- und *z*-Richtung am Seitenhalter gekoppelt. Eine Anregung der Oberleitung beim Anhub durch den Stromabnehmer in *y*-Richtung resultiert somit auch immer in einer (oft geringen) Schwingung in *z*-Richtung.

Ebenso führt eine gleich starke Auslenkung aus der Ruhelage abhängig vom Ort der Auslenkung zu einer unterschiedlich starken Anregung der einzelnen harmonischen Eigenformen. Bei einer mittigen Anregung werden beispielsweise nur ungerade Vielfache der Grundfrequenz angeregt.

Bekannt sind die Untersuchungen der British Railways (BR), die innerhalb der Berichte des Forschungsund Versuchsamts (*Office for Research and Experiments*, ORE) des Internationalen Eisenbahnverbandes (UIC) [10] bis [12] veröffentlicht worden sind. Die Abwurfversuche wurden an einem Kettenwerksaufbau mit zwei 80-m-Feldern durchgeführt, der – um die Messung zu erleichtern – auf eine Fahrdraht-

Die ersten fünf Eigenformen einer Saite.

## Fachwissen Fahrleitung



#### Bild 3:

Ausbreitung der Wellen beim Abwurfversuch.



#### Bild 4:

Berechnete (1) und gemessene Auslenkung (2) (Grafik: digitalisiert aus [2], bearb. *eb*).

höhe von 1,4 m herabgesetzt wurde. Das Abwurfgewicht wurde damals direkt am mittig stehenden Mast aufgehängt. Die schon von *Bucksch* [13] hergeleitete Interpretation der Messergebnisse kann heute mit aktuellen Simulationsprogrammen anschaulich visualisiert werden. Das *obere* Diagramm in Bild 3 zeigt das Kettenwerk mit mittig positionierter Masse bei t=0 s in *blau* und die Entlastung und Ausbreitung der Welle in Fahrdraht und Tragseil bis t=0,6 s. Im mittleren Diagramm ist die Wellenausbreitung bis zu den begrenzenden Masten und die jeweilige Reflektion bei etwa 0,9 s zu erkennen. *Unten* ist bei t=1,75 s die Ausgangslage wieder erreicht.

Eine direkte Gegenüberstellung von Messung und Simulation zeigt eine gute Übereinstimmung (Bild 4). Die schon im Originalbericht angeführten Unzulänglichkeit der Messreihe, zu geringe mechanische Impedanz am Zwischenmast, sowie die offene Frage zum Nullpunkt der Auslenkungen, mit beziehungsweise ohne Durchhang am Seitenhalter, führt aber auch heute noch zu Abweichungen.

In den Versuchen und ebenso in der Simulation führt die Dämpfung im System zu Intermodendispersion und somit zu je nach Frequenz beziehungsweise Eigenform unterschiedlichen Wellenlaufzeiten. Hierdurch verändert sich die Wellenform mit ausgeprägtem Scheitelwert im Laufe der Zeit. Überlagert wird dies durch die unterschiedlichen Wellenlaufzeiten in Fahrdraht und Tragseil, sowie durch im Versuch auftretende Abweichungen von den Modellannahmen. Durch ein Ablesen der Wellenlaufzeiten, oder durch Berechnung mit der Schnellen Fourier-Transformation (FFT) können aus dem Ausschwingverhalten die Eigenfrequenzen der Oberleitung ermittelt werden. TracFeed OSSCAT stellt alternative Methoden zum Abwurfversuch auf der realen Strecke zur Verfügung.

## 3 Anwendung der Frequenzanalysemethoden in TracFeed OSSCAT

Simulationssysteme zur Ermittlung des dynamischen Systemverhaltens der Oberleitung auf Basis der Finiten-Elemente-Methode stellen das Modell der Oberleitung über die Systemmatrizen M (Massenmatrix), K (Steifigkeitsmatrix) und D (Dämpfungsmatrix) dar. Neben der dynamischen Co-Simulation mit Stromabnehmermodellen, bietet sich daher die Möglichkeit das Verhalten der Oberleitungsanlage allein zu bewerten.

Das sich so ergebende Eigenwertproblem wird in der technischen Mechanik in der Regel ohne Berücksichtigung der Dämpfung gelöst, welche für die Simulation mit Stromabnehmern hingegen in die Lösung eingeht.

Das zu lösende Eigenwertproblem für den ungedämpften Fall ist:

$$\boldsymbol{K} \boldsymbol{\Phi} = \lambda \boldsymbol{M} \boldsymbol{\Phi} \tag{2}$$

darin die Eigenwerte  $\lambda$  und die Eigenvektoren  $\boldsymbol{\Phi}$ . Über das charakteristische Polynom

$$p = \det(\boldsymbol{K} - \lambda \boldsymbol{M}) \tag{3}$$

## Fahrleitung Fachwissen

#### Bild 5:

Mit TracFeed OSSCAT ermittelte Eigenmoden (y-Richtung). beim betrachteten Kettenwerk mit zwei Feldern finden sich Vielfache zweier Grundfrequenzen (erste Zeile) symmetrischer (Spalte links) und antimetrischer Form (Spalte rechts)

und

$$(\boldsymbol{K} - \lambda \boldsymbol{M}) \boldsymbol{\Phi} = 0 \tag{4}$$

gelingt die Ermittlung der Eigenfrequenzen (über  $\lambda = \varpi^2$ ) und der Eigenformen  $\boldsymbol{\Phi}$ .

Somit ergeben sich für das ORE-Kettenwerk mit zwei Feldern, die in Bild 5 dargestellten ersten zehn Eigenfrequenzen und Eigenformen, jeweils mit einer dominanten Amplitude in *y*-Richtung:

Deutlich wird die Analogie zur Schwingung der einfachen Saite. Bei einer Anregung am mittleren Mast liegt bei den antimetrischen Eigenformen, im Gegensatz zu den symmetrischen Eigenformen, links und rechts vom mittleren Mast eine Umkehrung der Schwingungsrichtung vor. Somit werden diese Schwingformen nicht angeregt.

Die mit *TracFeed OSSCAT* ermittelten Eigenmoden 1 bis 3 finden sich auch in der Betrachtung von [13] wieder. Abweichend zu der hier gezeigten Betrachtung werden dort allerdings vier Felder in die Ermittlung der Moden einbezogen, was die Eigenformen an den Randbereichen leicht beeinflusst.

TracFeed OSSCAT ist ein 3D-Simulationstool. Neben den gezeigten Modi sind daher auch immer Schwingformen enthalten, die ihre maximale Amplitude quer zur Fahrtrichtung aufweisen. Aufgrund der Fixierung der Querrichtung am mittleren Mast treten bei diesen Modi nur Schwingformen mit Schwingungsknoten an dieser Stelle auf (Bild 6).

Reale Kettenwerke werden aus einer Vielzahl von Einzelfeldern zusammengesetzt und müssten, analog zum oben beschriebenen Vorgehen, immer in Form einer komplette Nachspannlänge abgebildet werden, um die Strukturdynamik des kompletten Fahrdrahtabschnittes korrekt abzubilden. Die oben gezeigten Modi bilden sich bei einer Feldanzahl >> 2 nicht mehr global aus. Es treten lokal begrenzte Eigenformen auf.

Der Einfluss auf die Ergebnisse der Modalanalyse ist im Bild 7 aufgezeigt. Dazu wurde das oben gezeigt Kettenwerk aus der ORE-Untersuchung auf vier, sechs, zwölf und 24 identische Felder verlängert.

Bei einer Feldanzahl über sechs scheint es eine obere und untere Schranke für die betrachtetet Ei-

#### Bild 6:

Mit *TracFeed OSSCAT* ermittelte Eigenmoden (laterale oder *z*-Richtung).

im Gegensatz zu den Modi in *y*-Richtung, treten die symmetrischen und antimetrischen Modi in lateraler Richtung bei fast identischer Frequenz auf





#### Bild 7:

Eigenfrequenzen in *y*-Richtung bei 1,2 Hz und 1,3 Hz für ein Kettenwerk mit zwei Feldern (1), vier Feldern (2), sechs Feldern (3), zwölf Feldern (4) und 24 Feldern (5).

genform zu geben. Diese lokalen Effekte können bei einer Feldanzahl unter sechs nicht korrekt wiedergegeben werden.

Das für die Untersuchung benutzte Kettenwerk hatte dabei exakt identische Felder. Variieren die Feldlängen oder zum Beispiel die Länge des verbauten Y-Beiseils über die verschiedenen Felder, streuen die ermittelten Eigenfrequenzen stärker.

Es wird deutlich, dass es bei der Abbildung von realen Kettenwerken unter alleiniger Zuhilfenahme der Modalanalyse keine eindeutige "kritische" Eigenfrequenz ermittelt werden kann, aus der dann Folgerungen zur Befahrung abgeleitet werden könnten.

## 4 Anwendung der Modalanalyse an Re 200 und TracFeed ALU 2000

Mit der in zuvor beschriebenen Möglichkeiten das Kettenwerk auf die Frequenzeigenschaften mittels Modalanalyse zu überprüfen, wurde im Simulationsprogramm *TracFeedOSSCAT* ein Kettenwerk der *Re 200*, mit einer Feldlänge von 80 m, sowie eine Variante der *TracFeed ALU2000* aufgebaut. Die beiden Simulationsmodelle verfügen über zehn Felder, die ein Kettenwerk zwischen Festpunkt und Radspanner abbilden. Auf Parallel- und Abspannfelder wurde hingegen verzichtet.

Die Modalanalyse ergab eine Vielzahl von Eigenmoden, welche sich zwischen den einzelnen Feldern teilweise nur an der dritten Stelle hinter dem Komma unterschieden. Die Vermutung anhand der Ergebnisse war, dass die Verschiebung der Resonanzfrequenzen auch auf die Änderung der Zugkraft im Tragseil und Fahrdraht an den Seitenhaltern, im Verlauf des Kettenwerks vom Radspanner zum Festpunkt zurückzuführen ist. Die Zugkraft im Fahrdraht nimmt zum Festpunkt hin ab und zur Zugkraft im Tragseil kommt noch die über die Hänger eingeleitete Gewichtskraft des Kettenwerkes hinzu.

Aufgrund der Ergebnisse der ersten Modalanalyse wurden die Kettenwerke auf vier Felder eingekürzt. Die Oberleitungsbauart *Re 200* hat für angelenkte und umgelenkte Stützpunkte einen unterschiedlichen Aufbau der Y-Seile und Y-Beiseilhängern. Um mögliche Unterschiede im Resonanzverhalten zu identifizieren, wurden zwei Oberleitungsmodelle erstellt, welche sich in der Reihenfolge von angelenkten und umgelenkten Stützpunkten unterscheiden. Die Modalanalyse des verkürzten Oberleitungsmodells führte zu einer deutlich verringerten Anzahl an Resonanzfrequenzen, welche die Vermutung des Driftens der Resonanzfrequenzen bestätigt. Die Reihenfolge der Stützpunkte hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse.

Neben der Modalanalyse ist es mit *TracFeed OSS-CAT* möglich, virtuelle Abwurfversuche durchzuführen oder das Kettenwerk mittels eines Sweep-Versuches an einem gewählten Ort mit festgelegten Frequenzen und Amplituden anzuregen.

Der Vorteil einer Modalanalyse ist die deutlich geringere Rechenzeit gegenüber dem virtuellen Abwurfversuch und der Sweep-Anregung. Dies ermöglicht einen schnellen Eindruck über die Frequenzen eines Kettenwerkes. Die Modalanalyse liefert jedoch keine Informationen, welche der ermittelten Frequenzen kritische Resonanzfrequenzen sind. Eine Möglichkeit, um mittels Amplituden Rückschlüsse auf die kritischen Frequenzen ziehen zu können, ist die Durchführung eines virtuellen Abwurfversuches am Kettenwerk. Auf den Sweep-Versuch mit einer Anregung des Kettenwerkes mit unterschiedlichen Frequenzen wurde vorerst verzichtet.

## 5 Virtueller Abwurfversuch an *Re 200* und *TracFeed ALU2000*

Für den virtuellen Abwurfversuch wurde der Fahrdraht am vorletzten Feldhänger vor dem mittleren Stützpunkt im Modell durch eine Kraft ausgelenkt und durch Entfernen dieser Kraft zum Schwingen angeregt. Das Vorgehen der unsymmetrischen Anregung wurde gewählt, um zu vermeiden, dass etwaige Frequenzen bei symmetrischer Anregung, wie bei Abwurf in Feldmitte oder am Stützpunkt, verloren gehen.

Bei den untersuchten Modellen wurde eine Kraft von 100N an der *Re200* und 150N an der *Trac-Feed ALU2000* eingebracht. Da die Elastizität der Kettenwerksoberleitung an dem gewählten Punkt, vorletzter Feldhänger, unterschiedlich ist, führte dies zu einer unterschiedlichen Auslenkung des Fahrdrahtes.



#### Bild 8:

Hängerbewegung im Zeitbereich in *y*-Richtung bei der Fahrleitungsbauart *Re200*. bis t=2s – einbringen der Kraft; bis t=4s – Pause; ab t=4s – Ausschwingen des Fahrdrahtes



#### Bild 9

Hängerbewegung im Frequenzbereich in y-Richtung bei der Fahrleitungsbauart Re200.

Bild 8 stellt exemplarisch den Zeitverlauf des Abwurfversuchs an der *Re 200* für alle Hängerfußpunkte des angeregten Feldes und des Nachbarfeldes dar. Die daraus ermittelten Hängerbewegungen im Frequenzbereich sind Bild 9 wiedergegeben. Hierbei handelt es sich um die Hängerbewegung in *y*-Richtung. Bei einer Oberleitung entstehen jedoch auch Hängerbewegungen und Resonanzfrequenzen in *z*-Richtung. Diese könnten bei der Betrachtung der Windanfälligkeit einer Oberleitung von Bedeutung sein, sind jedoch in ihrer Amplitude deutlich kleiner als in *y*-Richtung, da die Anregung in *y*-Richtung erfolgte. Dieser Aspekt wurde im Weiteren nicht verfolgt, da er bei der Bewertung der Befahrungsqualität nicht betrachtet wird.

Aus der Veröffentlichung [7] geht die Hypothese hervor, dass die kritischen Stromabnehmerabstände

einer Oberleitung aus den Resonanzfrequenzen der Oberleitung herzuleiten sind. Demnach wird angenommen, dass die kritischen Stromabnehmerabstände x aus der Formel (5) ermittelt werden können. Wobei  $f_{FOCL}$  die Resonanzfrequenzen der Oberleitung sind,  $v_{zug}$  die Fahrgeschwindigkeit des Zuges und a für die vier Fälle der Phasenlage der schwingenden Oberleitung bei Durchfahrt eines Zuges steht.

$$x = \frac{v_{Zug}}{f_{FOCL}} \cdot a \quad \text{mit } a = 0,25; 0,50; 0,75; 1,00$$
 (5)

Aus den im virtuellen Abwurfversuch mit *TracFeed OSSCAT* ermittelten Resonanzfrequenzen wurden mit Hilfe der Formel (5) die Stromabnehmerabstände für verschiedene Geschwindigkeiten (80, 120, 160, 180, 200, 230, 250) km/h ermittelt.

## **Fachwissen Fahrleitung**



#### Bild 10:

Visualisierung der Standardabweichung im Bereich von 0 Hz bis 20 Hz über verschiedene Stromabnehmerabstände und Geschwindigkeiten.

## 6 Dynamischen Simulationen an TracFeed ALU2000

Um diese Hypothese zu überprüfen, wurde im nächsten Schritt das Modell der TracFeed ALU2000 im Simulationsprogramm TracFeed CATMOS mit einem Auswertebereich von 1000 m erstellt. Dies beinhaltete eine Nachspannung in Modellmitte. Dieses nach EN 50318:2002 und EN 50318:2018 validierte Simulationsprogramm ist bei RPS seit vielen Jahren Einsatz. Während TracFeed OSSCAT (nach im EN 50318:2002 validiert) ein sehr vielseitig einsetzbares FEM-basiertes Programm zur Simulation von flexiblen wie starren Oberleitungen ist, verwendet TracFeed CATMOS die Wellengleichungen nach [14, Abschnitt 9.3.3.4. Durch diesen Ansatz existieren für die Simulation mit TracFeed CATMOS abweichende Randbedingungen wie zum Beispiel

- der Annahme, dass die Zugkraft im Fahrdraht und Tragseil über die Nachspannlänge konstant ist,
- keine vollständige 3D-Simulation,
- auch die Dämpfung ist anders realisiert als bei FEM-Programmen.

Dafür ist *TracFeed CATMOS* sehr schnell und ermöglicht so, an einem Oberleitungsmodell viele Simulationen in sehr kurzer Zeit durchzuführen. Diese Eigenschaft wurde genutzt, um 20 verschiedene Oberleitungsmodelle, gekennzeichnet durch

- fünf verschiedene Feldlängen,
- zwei unterschiedliche Fahrdrahtseitenlagen und
- zwei Beseilungen
- zu untersuchen.

Dabei wurden jeweils die Parameter

• Stromabnehmerabstand bei zwei Stromabnehmern: von 8 m bis 410 m mit einer Schrittweite von 1 m und Geschwindigkeit (80, 120, 160, 180, 200, 230, 250) km/h

variiert. Dies ergab in Summe über 56000 Simulationsläufe.

Zusätzlich wurden einige Simulationen auch mit anderen Stromabnehmermodellen wiederholt, um den Einfluss des Stromabnehmermodells besser bewerten zu können.

## 7 Auswertung der dynamischen Simulationen

Eines der wichtigsten Kriterien für die Bewertung der Befahrungsqualität ist die Standardabweichung der mittleren Kontaktkraft im Auswertebereich. Auf diese fokussiert sich im Folgenden die Auswertung der Untersuchung. Gleichwohl sind auch die Kriterien wie Anhub am Stützpunkt, maximale Kontaktkraft und statistisches Minimum der Kontaktkraft, vertikale Verschiebung des Kontaktpunktes auswertbar und für eine Bewertung nach EN 50367 [15] und EN 50119 [16], sowie Validierung nach EN 50318 wesentlich.

Da die mittlere Kontaktkraft über die Anzahl der Simulationen etwas schwankt und dies auch Einfluss auf die Standardabweichung hat, soll als Kriterium für die Qualität der Stromabnahme hier die Standardabweichung bezogen auf die mittlere Kontaktkraft der jeweiligen Simulation ( $F_{\sigma}/F_{m}$ ) dienen. Im Zulassungsprozess von Oberleitungen und Stromabnehmern wird die Standardabweichung der mittleren Kontaktkraft im Bereich von 0Hz bis 20Hz betrachtet. In der Norm EN 50318:2018 (Validierung von Simulationssystemen für das dynamische Zusammenwirken zwischen Dachstromabnehmer und

## Fahrleitung Fachwissen



#### Bild 11:

Visualisierung der Standardabweichung im Bereich von 0Hz bis 5Hz über verschiedene Stromabnehmerabstände und Geschwindigkeiten.

Oberleitung), wird dies noch weiter unterteilt in die Frequenzbereiche 0 Hz bis 5 Hz und 5 Hz bis 20 Hz.

Die Bild 10 zeigt die Auswertung aller mit *Trac-Feed CATMOS* durchgeführten dynamischen Simulationen für Standardabweichung der Kontaktkraft im Bereich von 0 bis 20 Hz, einer konstanten Feldlänge und ohne Nachspannung im Modell. Farblich dargestellt ist die normierte Standardabweichung des zweiten Stromabnehmers, wobei die *hellgelben* Flächen, Bereiche einer hohen Standardabweichung darstellen und die *dunkelblauen* Flächen, Bereiche mit einer niedrigen Standardabweichung.

Die eingezeichneten Geraden aus Formel (5) repräsentieren die aus den virtuellen Abwurfversuchen mit *TracFeed OSSCAT* ermittelten, möglichen kritischen Stromabnehmerabstände, ihrer Phasenlagen und ihrer Vielfachen.

Die Geraden mit Volllinie stellen die möglichen kritischen Stromabnehmerabstände der ersten Resonanzfrequenz mit ihren vier Phasenlagen und deren Vielfache dar. Die weiteren Geraden bilden das Ergebnis für die zweite (*gestrichelt*) und dritte (*Strich-Punkt-Linie*) Resonanzfrequenz ab. Die Maxima der Standardabweichung sind im Bild weniger bei den erwarteten kritischen Stromabnehmerabständen zu finden. Vielmehr liegen sie in der Nähe der Überlagerung der verschiedenen Resonanzfrequenzen.

Es wurde vermutet, dass aufgrund der Unterschiede in der Art der Dateneingabe und den Randbedingungen der Simulation, die Oberleitungsmodelle in beiden Simulationsprogrammen nicht vollständig übereinstimmen. Die in *TracFeed OSSCAT* ermittelten Frequenzen liegen bei 0,67 Hz für die erste Resonanzfrequenz, 0,73 Hz für die zweite Resonanzfrequenz und 0,81 Hz für die dritte Resonanzfrequenz. Zur Absicherung wurde im Simulationsprogramm *TracFeed CATMOS* bei der Durchfahrt des Stromabnehmers stichprobenartig der vertikale Verlauf zweier Hängerfußpunkte aufgezeichnet und mittels FFT ausgewertet. Die erste Resonanzfrequenz, mit der das Kettenwerk schwingt, betrug hier 0,66 Hz. Dies zeigt anders als erwartet eine sehr gute Übereinstimmung beider Simulationsprogramme.

In der dynamischen Simulation treten die Maxima der Standardabweichung, im Frequenzbereich von 0 bis 20 Hz, bestimmter Stromabnehmerabstände nicht so klar hervor. Jedoch ist zu erkennen, dass die größten Werte der Standardabweichung oft in der Mitte der Ergebnisse aus Formel (5) für die erste Resonanzfrequenz und Faktoren a=1 und 1,25 liegen, sowie 2 und 2,25; 3 und 3,25.

Betrachtet man die oben beschriebene Auswertung für die Standardabweichung im Bereich von 0 Hz bis 5 Hz in Bild 11 zeichnet sich dieses Bild noch deutlicher ab.

Wird die Auswertung für alle untersuchten Feldlängen und auf Modelle mit Nachspannungen erweitert, zeichnet sich ein sehr komplexes Bild ab. Hier hatten nicht immer die größten Feldlängen die höchste Standardabweichung, der Einfluss der Nachspannung gewann deutlich an Bedeutung. Die Resonanzfrequenzen der Oberleitung wurden in der Untersuchung nur für eine Feldlänge ermittelt. Dies müsste für weitere Feldlängen wiederholt werden und überprüft werden, ob die kritischen Stromabnehmerabstände auch für diese im Bereich der oben genannten Faktoren der Formel aus (1) zutreffen.

Mit ausgewählten Stromabnehmerabständen im Bereich zwischen 200 m und 250 m wurden zum Vergleich auch dynamische Simulationen mit *Tracfeed OSSCAT* durchgeführt. Hier zeigte sich, dass kein klares Maximum der Standardabweichung existiert, es war vielmehr ein Plateau zu erkennen. Dies dürfte unter anderem auch auf die sich verändernden Seilzugkräfte im Oberleitungsmodell zurückzuführen sein und damit ein "verschmiertes" Frequenzspektrum der Oberleitung. Dies kann auch eine Ursache sein, weshalb FEM-basierte Simulationsprogramme wie *Trachfeed OSSCAT* in den zulässigen Toleranzbereichen nach EN 50318:2018 eher bessere Ergebnisse liefern als vergleichbare Messfahrten, wohingegen *Tracfeed CATMOS* hier tendenziell schlechtere Ergebnisse liefert. Dennoch befinden sich die Ergebnisse der beiden Simulationsprogramme innerhalb der in der Norm festgelegten Grenzen.

Auch zeigte sich in der Untersuchung, dass die Wahl der Art des mechanischen Ersatzmodells für Stromabnehmer einen großen Einfluss auf die Ergebnisse bestimmter Stromabnehmerabstände hat. Simulationsprogramme für das dynamische Zusammenwirken zwischen Stromabnehmer und Oberleitung sind in der Regel in der Lage verschiedene Typen mechanischer Ersatzmodelle für Stromabnehmer zu verwenden. So ist es möglich, dass es für einen realen Stromabnehmer verschiedene Ersatzmodelle für die Verwendung in der Simulation gibt. Diese unterscheiden sich nicht nur in den Freiheitsgraden und Anzahl der Ersatzmassen, sondern auch in der Art, wie die Daten generiert wurden, wie zum Beispiel auf einem realen Stromabnehmerprüfstand, einem virtuellen Stromabnehmerprüfstand über Mehrkörpersimulation oder analytischen Formeln aus der Stromabnehmerkonstruktion. Dies trifft auch auf den Stromabnehmer aus EN 50318:2018 Anhang B.2 zu. Hinter diesem Modell steht ein realer Stromabnehmer, für den Rail Power Systems über verschiedene Varianten der Ersatzmodelle verfügt. Der in der Norm veröffentlichte Parametersatz besitzt keine Freiheitsgrade für Rotation. Vergleicht man diesen mit den Ergebnissen des Ersatzmodells mit Rotationsfreigabe und den zwei Schleifleisten der Palette, sind für einige Simulationen deutliche Unterschiede in den Ergebnissen über die verschiedenen Stromabnehmerabstände erkennbar. Hier zeigte sich, dass ein hoher Detailierungsgrad des Stromabnehmermodells die Aussagefähigkeit der Simulationen deutlich verbessert.

## 8 Ausblick

Die Frequenzanalyse kann helfen, die Entwicklung leistungsfähiger Oberleitungen zu unterstützen. Konstruktionen mit kleinen Amplituden der Resonanzfrequenzen und ein möglichst breites Spektrum verbessern in jedem Fall die Befahrungseigenschaften.

Die Fragestellung, können Resonanzfrequenzen des Kettenwerkes zur Bestimmung der kritischen Stromabnehmerabstände genutzt werden, lässt sich jedoch noch nicht abschließend bewerten. Dazu müssen weitere Untersuchungen zu den Resonanzfrequenzen für verschiedene Oberleitungsbauarten und Feldlängen durchgeführt und mit Simulationsergebnissen verglichen werden. Ebenso sollten weitere Stromabnehmertypen und deren mechanische Ersatzmodelle in die Untersuchung einbezogen werden. Um den am besten geeigneten Ort für die Bestimmung einer für eine Oberleitungsbauart repräsentativen Resonanzfrequenz zu ermitteln, sollten Abwurfversuche an verschiedenen Orten einer Nachspannlänge durchgeführt oder simuliert werden.

Die Untersuchungen zeigten auch, dass teilweise nur einzelne Stromabnehmerabstände die Grenzwerte überschreiten, bei der Mehrheit der Stromabnehmerabstände die Grenzwerte jedoch eingehalten werden. Insofern stellt sich die Frage, ob Oberleitungen wirklich für alle denkbaren Fälle, mit der Folge eines deutlich erhöhten finanziellen Aufwandes für die Elektrifizierung, ausgelegt werden müssen.

TracFeed CATMOS mit seiner Eigenschaft, mehrere tausend Simulationen an einem Oberleitungsmodel innerhalb weniger Stunden durchzuführen und automatisiert auswerten zu lassen, kann derart umfassende Analysen effizient unterstützen. TracFeed CAT-MOS ist nach EN 50318:2018 validiert und hat sich durch sehr viele in der Vergangenheit durchgeführte Vergleiche zwischen Messung seit Jahren in der Praxis weltweit bewährt.

Mit *TracFeed OSSCAT* kann gezielt das Frequenzverhalten von Oberleitungen untersucht werden und damit verschiedene Oberleitungsdesigns mit geringem Aufwand verglichen werden und Oberleitungen für bestimmte Stromabnehmerabstände optimiert werden.

## Literatur

- [1] Richtlinie (EU) 2016/797 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2016 über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union (Neufassung). In: Europäisches Amtsblatt L138 vom 26.05.2016, S. 44–101.
- [2] Verordnung (EU) Nr. 1301/2014 der Komission vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems "Energie" des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union. In: Europäisches Amtsblatt L356 vom 12.12.2014, S. 179–227.
- [3] Verordnung (EU) 1302/2014 der Komission vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems "Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen" des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union. In: Europäisches Amtsblatt L 356 vom 12.12.2014, S. 228–393.
- [4] EN 50317:2012: Bahnanwendungen Stromabnahmesysteme – Anforderungen und Validierung von Messungen des dynamischen Zusammenwirkens zwischen Stromabnehmer und Oberleitung.

## Fahrleitung Fachwissen

- [5] EN 50318:2018: Bahnanwendungen Stromabnahmesysteme – Validierung von Simulationssystemen für das dynamische Zusammenwirken zwischen Dachstromabnehmer und Oberleitung.
- [6] EN 50318:2002: Bahnanwendungen Stromabnahmesysteme – Validierung von Simulationssystemen für das dynamische Zusammenwirken zwischen Dachstromabnehmer und Oberleitung.
- [7] Resch, U.: Oberleitungen für mehrere Stromabnehmer – Hypothese zum Nachweis der Befahrungseigenschaften. In: Elektrische Bahnen (118) 2020, H. 7-8, S. 302– 307.
- [8] Nijs, M.; Tobback, P.; Krötz, W.; Brotkorb, A.; Behrends, D.: Dynamisches Verhalten von Oberleitung und Stromabnehmern bei Mehrstromabnehmerbetrieb. In: Elektrische Bahnen 120 (2022), H. 12 S. 516–527.
- [9] Zahrte, S.: Die schwingende Saite. Periodische Lösungen der Wellengleichung. www.math.uni-hamburg.de/ home/muelich/ss08/vortraege/SchwingendeSaite2008ShtZ\_0407.pdf, abgerufen am 03.02.2023.
- [10] ORE A84/RP9/D: Frage 84 Verhalten der Stromabnehmer und Fahrleitungen bei Geschwindigkeiten über 160 km/h – Bericht Nr. 9 Theoretische Untersuchungen und experimentelle Versuche der BR (Statisches Verhalten) 1970.
- [11] ORE A84/RP 10/D: Frage 84 Verhalten der Stromabnehmer und Fahrleitungen bei Geschwindigkeiten über 160 km/h – Bericht Nr. 10 Theoretische Untersuchungen und experimentelle Versuche der BR (dynamisches Verhalten) 1970.
- [12] ORE A84/RP11/D: Frage 84 Verhalten der Stromabnehmer und Fahrleitungen bei Geschwindigkeiten über 160 km/h – Bericht Nr. 11 (Schlussbericht) Vergleich und Analyse der Versuchsergebnisse sowie Empfehlung für die Gestaltung von Stromabnehmern und Fahrleitungen 1970.
- [13] Bucksch, R.: Beitrag zum Verständnis des Schwingungsverhaltens eines Fahrdraht-Kettenwerkes. Sonderdruck aus: Wissenschaftliche Berichte AEG-TELE-FUNKEN 52 (1979), H. 5, S. 250–262.

- [14] Gukow, A.I.; Kießling, F.; Puschmann, R.; Schmieder, A.; Schmidt, P.: Fahrleitungen elektrischer Bahnen – Planung, Berechnung, Ausführung. 1. Aufl., Wiesbaden: Vieweg+ Teubner, 1997.
- [15] EN 50367:2020: Bahnanwendungen Ortsfeste Anlagen und Fahrzeuge – Kriterien zur Erreichung der technischen Kompatibilität zwischen Dachstromabnehmern und Oberleitung.
- [16] EN 50119:2020: Bahnanwendungen Ortsfeste Anlagen – Oberleitungen für die elektrische Zugförderung.

#### Autoren

**Dipl.-Ing. Olaf Krumme** (40), Studium Elektrotechnik/ Elektrische Energieversorgung an der Technischen Universität Dresden, seit 2010 Systemingenieur bei der Rail Power Systems GmbH (vormals Balfour Beatty Rail GmbH); Mitarbeit in internationalen und europäischen Normungsgremien TC 9/ MT 62486 und PT 62846 und CLC SC 9XC WG 07 und WG 09.

Adresse: Rail Power Systems GmbH, Frankfurter Straße 111, 63067 Offenbach am Main, Deutschland; Fon: +49 69 30859-608;

E-Mail: olaf.krumme@rail-ps.com

**Dipl.-Ing. Tobias Sawala** (42), Studium Maschinenbau an der Ruhr-Universität Bochum, Projektleiter Entwicklung bei der IBAF Institut für Baumaschinen, Antriebs- und Fördertechnik GmbH (IAMT-Gruppe) in Bochum; seit 2014 Entwicklungsleitung TracFeed<sup>®</sup> OSSSCAT.

Adresse: IBAF GmbH, Heinrichstraße 67, 44805 Bochum, Deutschland; E-Mail: tobias.sawala@iamt-gruppe.de

EISEBAHN-CERT Benannte Stelle Interoperabilität Heinemannstrasse 6 D-53175 Bonn Telefon: +49 (228) 9826-700 E-Mail: info@eisenbahn-cert.de www.eisenbahn-cert.de RPS/DE/226/0223



© 2023. Alle Rechte sind der Rail Power Systems GmbH vorbehalten.

•

Die in diesem Dokument angegebenen Spezifikationen betreffen gängige Anwendungsbeispiele. Sie bilden nicht die Leistungsgrenzen ab. Im konkreten Anwendungsfall können daher abweichende Spezifikationen erreicht werden. Maßgeblich sind allein die im jeweiligen Angebot formulierten oder vertraglich vereinbarten Spezifikationen. Technische Änderungen bleiben vorbehalten. TracFeed® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Rail Power Systems GmbH.