

1. Einleitung

Verfahren zur Berechnung von Zugspannungen und Durchhängen gehören zu den wichtigsten Werkzeugen in der Projektierung und Auslegung von Freileitungen. In der Literatur sind drei grundsätzliche Verfahren bekannt [1], die sich im Berechnungsaufwand, aber auch in der Genauigkeit wesentlich unterscheiden:

- Das Verfahren unter Anwendung eines reinen linearen Dehnungsmodells (Linear elastic model; LE-Verfahren) beschreibt die mechanische Dehnung durch den E-Modul und die thermische Dehnung durch den linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Die plastische Verformung durch Kriech- oder Setzvorgänge wird nicht berücksichtigt.
- Das Verfahren unter Anwendung eines linearen Dehnungsmodells unter vereinfachter Einbindung des Kriech- und Setzverhaltens (Simplified plastic elongation model, SPE-Verfahren) verwendet das gleiche lineare Basismodell, berücksichtigt aber zusätzlich die plastische Verformung des Leiters über eine fiktive, der plastischen Verformung äquivalente Temperaturerhöhung.
- Das Verfahren unter Anwendung eines nicht linearen Dehnungsmodells (Experimental plastic elongation model; EPE-Verfahren) bildet das mechanische Dehnungsverhalten durch ein Modell höherer Ordnung ab und verwendet für die thermische Dehnung weiterhin ein lineares Modell. Dabei werden Leiterkern und Außenlagen getrennt voneinander betrachtet. Die Parametrierung des Modells erfolgt über Zugspannungs-Dehnungs-Versuche im Labor.

In Deutschland wird üblicherweise das SPE-Verfahren angewendet. Im Zuge des erstmaligen Einsatzes sogenannter HTLS-Leiter wurde festgestellt, dass Programme zur Durchhangs- und Abstandsberechnung von Freileitungsseilen unter Verwendung des SPE-Modells die physikalischen Eigenschaften von HTLS-Leitern nur unzureichend abbilden. Sie weisen Schwächen bei der Bestimmung derjenigen mechanischen Belastung auf, bei der die Belastung allein auf die Seele des Leiters übergeht (Kniepunkt; engl: Transitionpoint; TP). Das Kriechdehnungsverhalten des Leiters, das im SPE-Modell durch eine äquivalente Temperaturerhöhung ausgedrückt wird, wird ebenfalls nur näherungsweise abgebildet.

Um eine technisch ausreichende Abbildung mit einer entsprechenden Genauigkeit in der Berechnung der Durchhänge und Abstände zu ermöglichen, ist die Anwendung des „Experimental plastic elongation model“ (EPE-Modell) nach [1] erforderlich. Hierbei werden die bei Typmusterprüfungen ermittelten Daten der Zugspannungs-Dehnungs-Prüfung herangezogen, um ein physikalisch genaueres Modell des Leiterverhaltens zu erstellen. Prinzipiell gilt, dass die physikalischen Eigenschaften der HTLS-Leiter mit Ausnahme der so genannten GAP-Seile sich nicht von Standard-Leitern unterscheiden. Das bedeutet, dass das EPE-Verfahren auch für Standard-Leiter anwendbar ist, sofern das entsprechende Datenmodell vorliegt, wobei der Kniepunkt (TP) für die Standardleiter in einem Temperaturbereich liegt, der jenseits der thermischen Belastungsgrenze liegt.

2. Physikalische Zusammenhänge

2.1 Spannungs-Dehnungs-Verhalten

2.1.1 Ergebnisse aus Spannungs-Dehnungs-Versuchen

Bestandteil von Typmusterprüfungen für Leiterseile sind nach EN 50182 Zugversuche mit Lastwechselspielen, aus denen Leiterparameter ermittelt werden. Bild 2.1 zeigt das hierbei ermittelte Kraft-Dehnungs-Verhalten eines Verbundseiles und eingebettet das entsprechende Verhalten der Leiterseele.

Bei Lastanstieg folgt der Kraftdehnungsverlauf des Leiterseiles einem nicht linearen Verhalten. Bei Konstanthaltung der anliegenden Kraft dehnt sich das Seil durch das so genannte Kriechen weiter. Die anschließende Entlastung folgt einem linearen Verhalten. Der hierdurch entstehende Hystereseverlauf wiederholt sich, je weiter man die Belastung steigert und wieder entlastet. Wird die Haltekraft des vorherigen Belastungszyklus erreicht, folgt das Verhalten wiederum dem nicht linearen Verlauf.

Der Kraft-Dehnungs-Verlauf der Leiterseele stellt sich nahezu linear dar.

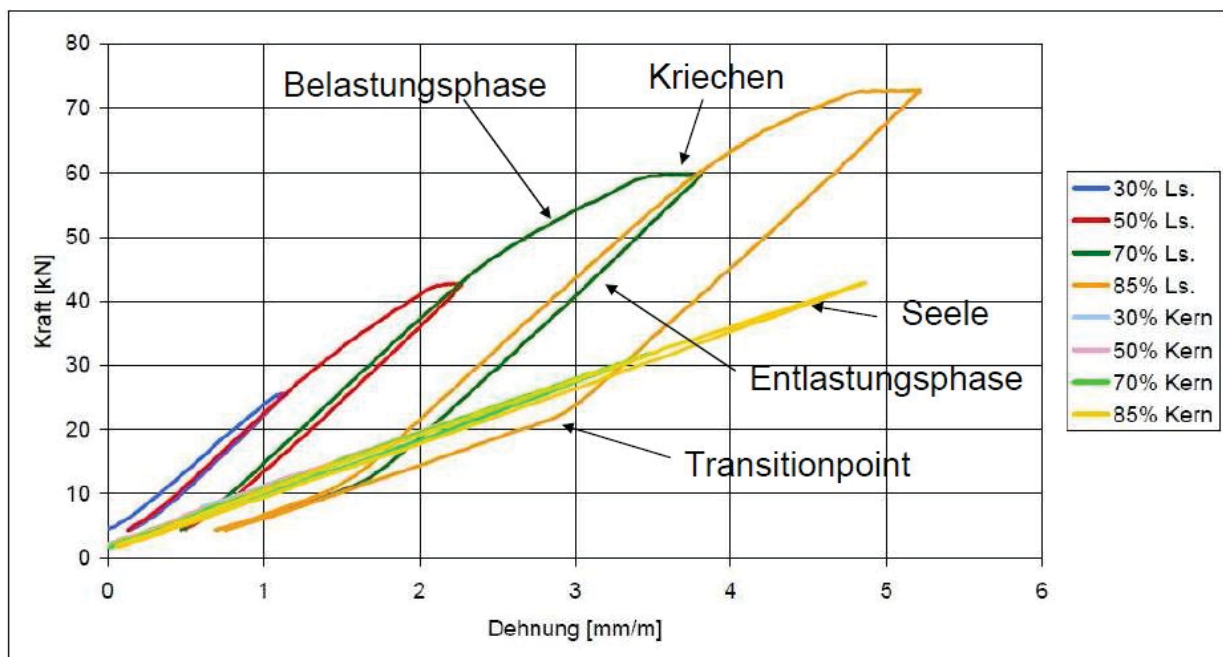


Bild 2.1: Ergebnisse eines Stress-Strain-Versuches

Führt man nach einer durch eine sehr hohe Belastung hervorgerufenen Dehnung eine Entlastung durch, erkennt man in der nachfolgenden Entlastungskurve einen Knick. Der nachfolgende Kurvenverlauf hinter dem Knick läuft parallel zur Be-/Entlastungskurve der Leiterseele. Daraus folgt, dass bei Entlastung des Leiterseiles nach entsprechender, bleibender Dehnung ein Zustand erreicht wird, bei dem die Außenlage keinen Beitrag mehr zur Kraftaufnahme leistet. Diesen Punkt nennt man Kniepunkt (Transitionpoint; TP).

In dem hier beschriebenen Laborversuch wird die Entlastung bei konstanter Werkstatt-Temperatur durch Nachlassen der Zugmaschine herbeigeführt. Bei einem in der Freileitung installierten Leiter geht die Entlastung mit einer Temperaturänderung einher. Somit überlagern sich thermische und elastische Dehnung. Das Zusammenspiel zwischen Zugspannung und Leitertemperatur bestimmt die Anteile der Dehnungskomponenten und somit die Ausgestaltung der Durchhangskurve.

Wie man aus Bild 2.1 erkennt, ist die Lage des Kniepunktes von der Vorbelastung abhängig. Setzt man eine definierte Grenzbelastung voraus, wird sich der Kniepunkt in einem durch eine recht hohe Leitertemperatur charakterisierten Entlastungsbereich einstellen. Diese Leitertemperatur kann in einem technisch nutzbaren Bereich (z.B. bei HTLS-Leitern) liegen. Bei vielen Standardleitertypen liegt sie jenseits der thermischen Grenztemperatur. Neben der Vorbelastung ist die Lage des Kniepunktes vom Verhältnis der E-Module zu den thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Außenlagen und Leiterseele abhängig.

Liegt der Kniepunkt in einem technisch nutzbaren Temperaturbereich, hat dies zur Konsequenz, dass der bei der Berechnung der Zugspannungen und Durchhängen zu berücksichtigende Spannungs-Dehnungs-Verlauf (Entlastungsphase) nicht mehr rein linear abgebildet werden kann, sondern bilinear durch zwei ineinander übergehende lineare Funktionen, definiert über zwei unterschiedliche E-Moduln und Längenausdehnungskoeffizienten, abzubilden ist. In der Folge muss die Berechnung von Zugspannungen im Temperaturbereich oberhalb des Kniepunktes in zwei Stufen erfolgen.

2.1.2 Parametrierung des SPE-Modells

In der bisherigen Verarbeitungsweise wurde die Steigung der Geraden in den Entlastungsphasen dazu verwendet, um das E-Modul für das Gesamtseil zu bestimmen. Zusätzlich wurde durch einen thermischen Dehnungsversuch der Längenausdehnungskoeffizient des gesamten Seiles ermittelt. Beide Parameter bilden die Basis für das SPE-Modell, in dem elastische und thermische Dehnung als linear angesehen werden.

Die lineare elastische Abbildung des Dehnungsverhaltens wurde quasi im Nullpunkt der Zugspannungsdehnungskurve im Bild 2.1 angesetzt. Zur Nachbildung der plastischen Verformung, hervorgerufen durch das Setzen/Recken des Seiles im Zuge starker Belastung und durch den Kriechvorgang, wurde für die Lastfälle, die zur Abstandsberechnung herangezogen werden, eine fiktive Temperaturerhöhung berechnet. Diese ist nach [3] abhängig von der Mittelzugspannung, vom Aluminium/Stahl-Verhältnis und von der rechnerischen Bruchkraft sowie von der anzusetzenden Betriebsdauer. Durch diese Methode werden die hier notwendigen Durchhänge mit ausreichender Genauigkeit abgebildet. Bei Leitern, deren Kniepunkt (TP) im thermisch nutzbaren Bereich liegt, ist die Anwendung dieser Methode nicht möglich. Zudem werden bei den statisch relevanten Lastfällen durch diese Methode tendenziell zu hohe Zugspannungen berechnet, was zu statischen Reserven führt.

2.1.3 Parametrierung des EPE-Modells

Das EPE-Modell verwendet die durch die Zugspannungs-Dehnungs-Versuche ermittelten Daten über das physikalische Verhalten des Leiters (Bild 2.1) und berücksichtigt die auftretende Hysterese. Dabei werden die jeweiligen Startpunkte der Entlastungsphase dazu verwendet, mit Hilfe der Methode „Minimierung der Fehlerquadrate“ für die initiale Belastungsphase ein Spannungs-Dehnungs-Modell höherer Ordnung zu ermitteln. Dies geschieht für Kern und Außenlage getrennt. Die dazu erforderliche Parameteranalyse ist in Abschnitt 7 und das mathematische Modell in Abschnitt 3 beschrieben. Damit ergibt sich das in Bild 2.2 dargestellte prinzipielle Spannungs-Dehnungs-Verhalten für die initiale Belastung getrennt nach Kern und Außenlagen.

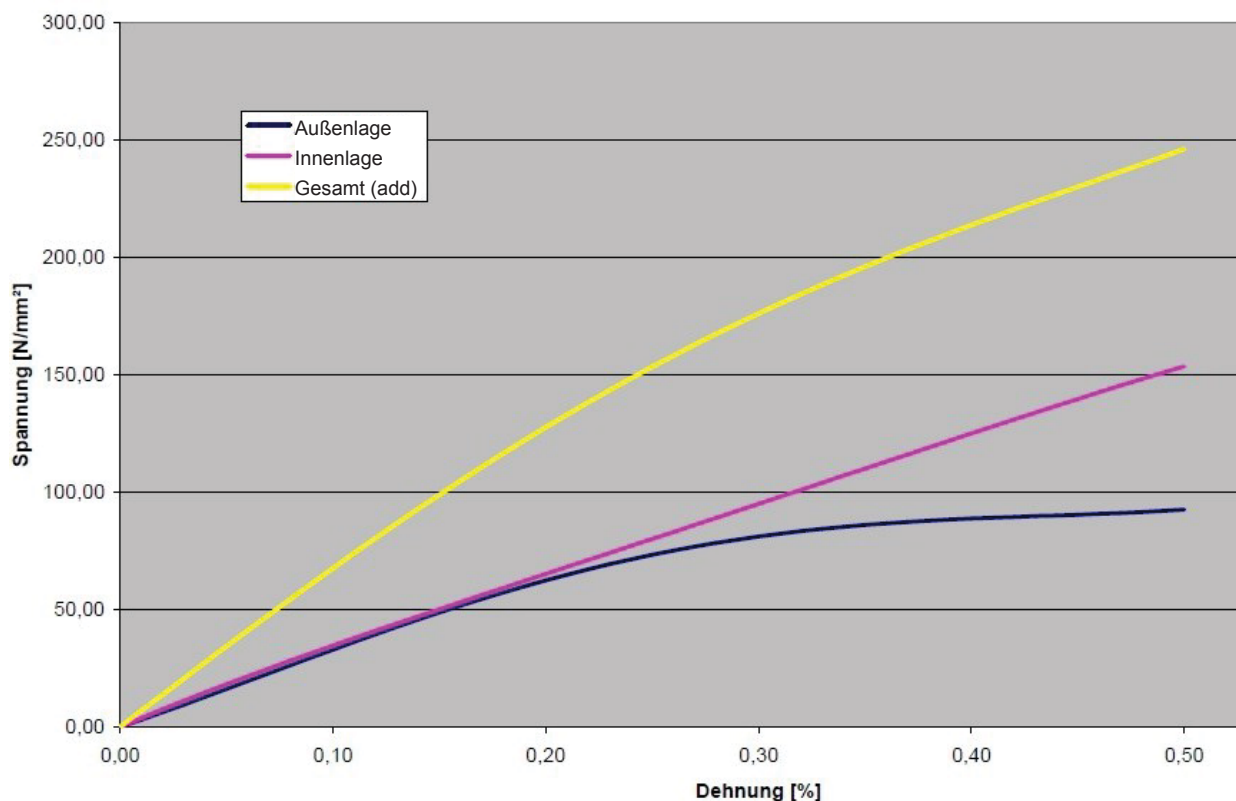


Bild 2.2: Prinzipieller Spannungs-Dehnungs-Verlauf bei initialer Belastung

Zur Nachbildung der Entlastungsphase (siehe Bild 2.3) wird aus der Steigung der Hysteresegeraden (Bild 2.1) der „finale“-E-Modul bestimmt.

Für die weitere Betrachtung vernachlässigt man zunächst das Kriechverhalten und geht von einer sich einstellenden maximalen Grenzbelastung aus. Hierbei lehnt man sich sinnvoller Weise an die Lastfälle der entsprechenden Freileitungsnorm an. Diese Grenzbelastung liegt dann üblicherweise bei einer Temperatur von -5°C und einer einfachen oder mehrfachen Eislast, kann aber auch durch kombinierte Eis-/Windlasten oder einer Windlast bei $+5^{\circ}\text{C}$ und entsprechend hoher Windbelastung gemäß der regional anzusetzenden Windzone ausgedrückt werden.

Ausgehend von einem Regulagezustand bei 10°C /Mittelzugspannung kann das Leiterseil im Laufe seiner Betriebsdauer zu irgendeinem Zeitpunkt diesen Grenzwert erreichen und sich entsprechend Bild 2.3 plastisch verformen. Bei einer nachfolgenden Entlastung geht das Leiterseil in ein lineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten über, charakterisiert durch den sogenannten finalen E-Modul. Der sich damit einstellende Leiterzustand wird in der Literatur als Finaler Zustand nach Erstbelastung (Final-after-load; faL) bezeichnet. Der Übergang vom initialen Verhalten in den Zustand faL ist im Bild 2.3 dargestellt. Hier ist zudem zu erkennen, dass abhängig vom Grad der Entlastung der Kniepunkt erreicht wird.

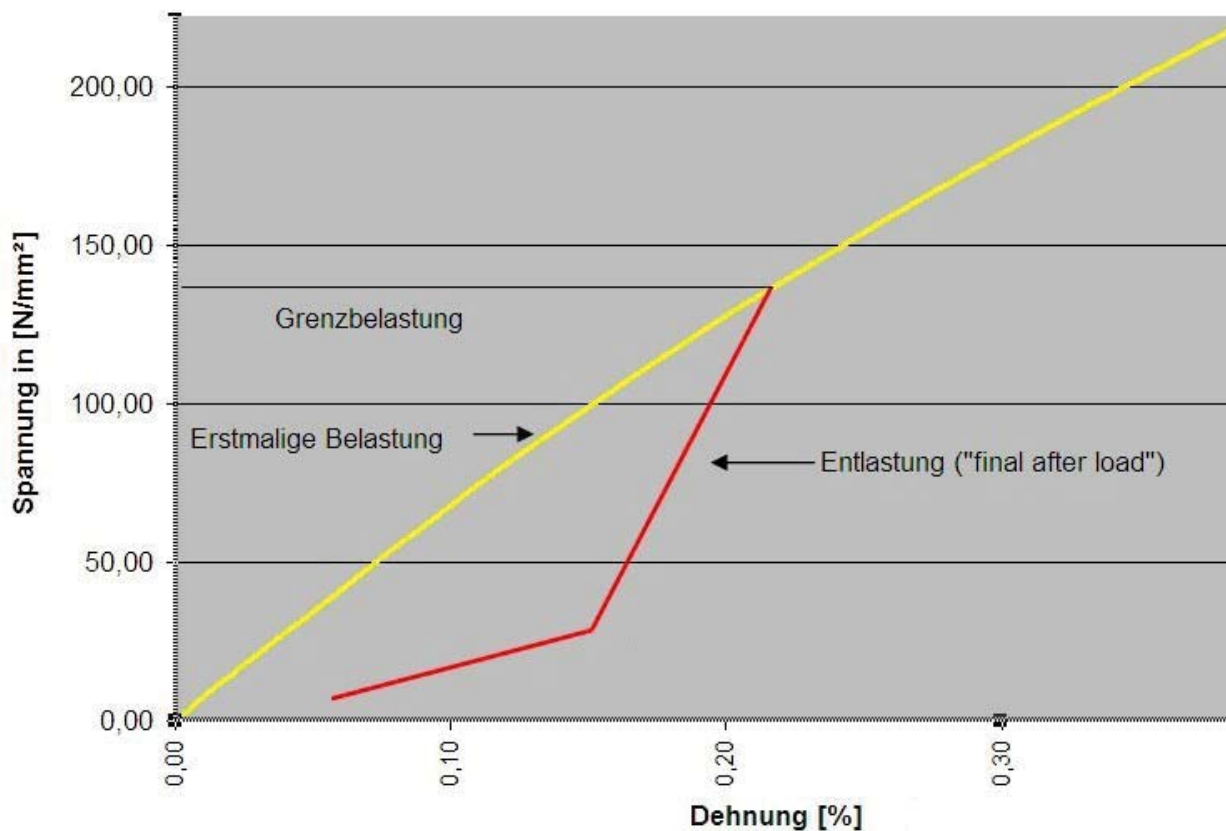


Bild 2.3: Übergang vom Initialverhalten auf den Zustand „Final-after-load“