

# Modell für die Beurteilung der elektrotechnischen Sicherheit urbaner Seilbahnen

Themenbereich 8

Wolfgang EMMER<sup>1</sup>, Ernst SCHMAUTZER<sup>2</sup>, Stephan PACK<sup>3</sup>, Elisabeth HUFNAGL<sup>4</sup>

## Motivation und zentrale Fragestellung

Vor allem in Ballungsräumen ergibt sich, bedingt durch die wachsende Bevölkerung, das Erfordernis von Innovationen im Rahmen der Stadtentwicklung und Raumnutzung. Neben den heute üblichen städtischen Verkehrssystemen wie z.B. Bus, Straßenbahnen, U- und S-Bahnen, Individualverkehr mit LKW, PKW, Fahrrädern usw. sowie Fußgängern gewinnen daher urbane Seilbahnen immer mehr Interesse. Allerdings ergeben sich im Rahmen der Planung, des Baus und des Betriebs von Seilbahnen bei der Sicherstellung der elektrischen Sicherheit neue Herausforderungen, wenn sich die Seilbahnen im Nahbereich von vorhandener Infrastruktur befinden und Blitzschlägen ausgesetzt sind. In dieser Arbeit wird einerseits der Energieverbrauch von Seilbahnen, des Individualverkehrs und des öffentlichen Personenverkehrs beleuchtet und andererseits ein Universalmodell zur Berechnung der elektrischen Beeinflussungen vorgestellt. Ergänzend dazu werden Aspekte des Blitzschutzes aufgezeigt. Aufbauend darauf werden Maßnahmen zur Begegnung der zuvor aufgezeigten Fragestellungen erörtert.

## Methodische Vorgangsweise

Nach einem kurzen Vergleich diverser Verkehrsmittel im städtischen Bereich mit urbanen Seilbahnen hinsichtlich des Energieverbrauchs werden aus technischer Perspektive in einem ersten Schritt die möglichen elektrotechnischen Beeinflussungsszenarien beschrieben und anerkannte, dem Stand der Technik entsprechende, Grenzwerte für den Schutz von Personen und Betriebsmitteln angegeben.

Als nächstes wird ein Modell (siehe Abbildung 1 und 2) für die Berechnung der elektrischen Beeinflussung von Seilbahnen vorgestellt. Dabei werden alle relevanten Komponenten einer Seilbahnanlage (Stationen, Stützen, Seile, Kabinen, Erdungs- und Blitzschutzanlagen ...) sowie der beeinflussenden Systeme (Freileitungen, Kabel, Eisenbahnanlagen, U-/S- und Straßenbahnen, ...) in eine Ersatzschaltung übergeführt und zu einem universellen Modell zusammengeführt. Zuletzt werden für die Beurteilung Orte ausgewählt, an denen Gefährdungen auftreten können, um dort basierend auf den Berechnungsergebnissen entsprechende Schutzmaßnahmen zu treffen.

## Verkehrstechnische Einordnung urbaner Seilbahnen hinsichtlich des Energieverbrauchs

Um den Energieverbrauch diverser Verkehrsmittel miteinander in Bezug zu setzen, wird als Größe meist der Energieverbrauch in kWh in Bezug zu den Personenkilometern herangezogen. Tabelle 1 (entnommen aus [2]) zeigt den spezifischen Endenergieverbrauch je Personenkilometer verschiedener städtischer Verkehrsmittel in Spalte 2. Zusätzlich zu diesen Werten ist in Spalte 3 auch eine Gegenüberstellung des spezifischen Endenergieverbrauchs der Verkehrsmittel je Person zu finden, um die Längen- bzw. Geschwindigkeitsabhängigkeit der Einheit „Endenergieverbrauch je Personenkilometer“ zu eliminieren (dabei wird von einer mittleren zurückgelegten Weglänge, die eine Person mit dem jeweiligen Verkehrsmittel in Wien zurücklegt, ausgegangen). Daraus folgt einerseits, vergleicht man zum Beispiel U-Bahnen und Seilbahnen, dass der spezifische Endenergieverbrauch je Personenkilometer von Seilbahnen gegenüber U-Bahnen ungünstiger abschneidet als je Person, da

<sup>1</sup> Jungautor, Technische Universität Graz, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Inffeldgasse 18/I, 8010 Graz, +43 316 873-8065, emmer@tugraz.at, www.ian.tugraz.at

<sup>2</sup> Technische Universität Graz, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Inffeldgasse 18/I, 8010 Graz, +43 316 873-7555, schmautzer@tugraz.at, www.ian.tugraz.at

<sup>3</sup> Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Inffeldgasse 18/I, 8010 Graz, +43 316 873-7416, pack@tugraz.at, www.hspt.tugraz.at

<sup>4</sup> Jungautorin, Wiener Netze GmbH, K-PST Netzplanung Strom & Telekommunikation, Erdbergstraße 236, 1110 Wien, +43 50128 9218, elisabeth.hufnagl@wienernetze.at, www.wienernetze.at

Personen die U-Bahnen für längere Strecken benutzen, und andererseits mit Seilbahnen geringere Wegstrecken zurückgelegt werden und somit, bezogen auf die kWh/Person, deutlich effizienter sind.

*Tabelle 1: Richtwerte für den Energieverbrauch verschiedener städtischer Verkehrsmittel*

Richtwerte – Verkehr		
Fahrzeug	Spezifischer Endenergieverbrauch	
	kWh / (PersonenkM) [2]	kWh / Person *)
<b>Städtischer Individualverkehr</b>		
Personenkraftwagen (VKM)	0,4 – 0,6 [2]	3 – 4,5 *)
Personenkraftwagen (Elektroantrieb) **)	0,2 [3], [4]	1,5 *)
<b>Öffentlicher Personenverkehr</b>		
Bus (LPG)	0,1 – 0,15 [2]	1,23 [1]
U-Bahn	0,02 – 0,05 [2]	0,74 [1]
Straßenbahn	0,07 – 0,08 [2]	0,40 [1]
Seilbahn	0,11 ***)	0,29 ***)

\*) Diesen Werten liegt die durchschnittliche Weglänge einer PKW-Fahrt im Binnenverkehr der Stadt zugrunde (vgl. Studie Frey et al., [1])

\*\*) Für Kurzstrecken liegt der Besetzungsgrad eines PKW bei ca. 1,5 Personen

\*\*\*) Berechnung Fa. Doppelmayr Seilbahnen für eine 3S-Bahn mit folgenden Eckdaten: 2,7 km, 3 Sektionen, 5.500 h/Jahr, 20 % Auslastung, einschließlich Gebäude

## Sicherheitsrelevante elektrotechnische Aspekte

Neben politischen und ökonomischen Aspekten, umweltrelevanten Fragestellungen und Entwicklungsprognosen sind v.a. die technischen Fragestellungen im Fokus von Planung, Genehmigung und Ausführung eines Seilbahnbau. Aus elektrotechnischer Sicht muss sowohl die Funktionsfähigkeit als auch die elektrische Sicherheit der Seilbahnanlage gewährleistet sein. Da sich Seilbahnen speziell im städtischen Bereich auch im Einflussbereich von anderen elektrischen Anlagen befinden, müssen zur Gewährleistung der elektrischen Sicherheit mögliche Beeinflussungen solcher Anlagen berücksichtigt werden und gegebenenfalls entsprechende Maßnahmen zur Sicherheit von Anlage und Personen getroffen werden.

Elektrische Anlagen, Infrastrukturen, wie z.B. Freileitungen, Kabel, Eisenbahnanlagen, U-Bahnen, Elektrobusse und Straßenbahnen etc. sowie elektrische Anlagen (z.B. Ladestationen), Blitzschutzanlagen, Erdungsanlagen können durch folgende elektrische Mechanismen sicherheitsrelevant beeinflusst werden:

- ohmsche Beeinflussung – z.B. Potenzialdifferenzen verursacht durch Stromflüsse in Leitern und durch Strömungsfelder im Erdreich, Spannungstrichter und Spannungsverschleppungen im Bereich der Seilbahnanlagen,
- induktive Beeinflussung – z.B. Längsspannungen induziert durch andere Hochspannungssysteme (Bahn, öffentliche Stromversorgung) in Leitern naheliegender Seilbahnanlagen,
- kapazitive Beeinflussung – z.B. durch naheliegende Hochspannungssysteme (Freileitungen) influenzierte Spannungen und Ableitströme und
- elektromagnetische Beeinflussung – z.B. durch niederfrequente elektromagnetische Felder verursacht durch Nieder- und Hochspannungssysteme sowie Funkeinrichtungen im Hochfrequenzbereich,
- transiente Beeinflussung – z.B. durch impulsförmige Spannungen und Ströme in Versorgungssystemen oder durch abgeleitete Ströme von Blitzentladungen,
- unkontrollierte Entladungen – z.B. durch Unterschreiten des Trennungsabstandes in der Nähe von Blitzschutzsystemen (Ableitungen, Erdungsanlagen).

Um die Sicherheit für den Personenschutz zu gewährleisten, sind Grenzwerte für Berührungsspannungen in Normen (siehe [3], [4] und [7]) zu finden (siehe Tabelle 2). Werden die dort angegebenen Berührungsspannungen überschritten, geben EN 50122-1, EN 50522, EN 50341 und EN 50110 zusätzliche anerkannte erforderliche Maßnahmen zum Personenschutz an.

Tabelle 2: Normativ zulässige Berührungsspannung

	Abschalt-Zeit in s	Berührungs- Spannungs- grenze in V (EN 50122-1)	Berührungs- Spannungs- grenze in V (EN 50522)	Berührungs- Spannungs- grenze in V (E 8001-1)
Gleichspannung	Kurzzeit (0,2s)	520	-	-
	Langzeit (> 300)	120	-	120(90)
Wechselspannung	Kurzzeit (0,2s)	645	537	-
	Langzeit (> 300)	60	80	65(50)

Anmerkung: Die Berührungsspannungsgrenze gemäß ÖVE/ÖNORM E 8001-1 gilt für die Schutzmaßnahme Nullung und FI-Schutzschaltung

Um die Sicherheit von Personen und die Funktionalität elektrischer Einrichtungen zu gewährleisten, sind in der Vorschrift ÖVE/ÖNORM EN 62305 (Blitzschutz) Ausführungsbestimmungen von und Abstandsbestimmungen zu Blitzschutzsystemen angeführt, die je nach räumlicher Situation unkontrollierten Entladungen oder Überschlägen an Näherungsstellen vorbeugen.

## Simulationsmodell

Das im Folgenden vorgestellte Beeinflussungsmodell berücksichtigt sowohl die ohmsche als auch die induktive Beeinflussung. Die Seilbahn mit ihren Seilen und Masten wird als Kettenleitermodell aufgebaut und ist ohmsch und induktiv mit den Kettenleitermodellen für Freileitungen, Kabel, Eisenbahnsystemen und U-Bahnssystemen gekoppelt. Die ohmsch und induktiv eingekoppelten Spannungen in die Seilbahn werden als Spannungsquellen in das Kettenleitermodell implementiert. Als Berechnungsergebnisse werden die Erdungsspannungen, die induzierten Spannungen im Seil, auf die Kabine, die Berührungsspannungen im Bereich der Seilbahn und der Masten ausgegeben.

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 1 und 2) zeigen das Beeinflussungsmodell des gesamten Seilbahnsystems und das Kettenleitermodell für die Berechnung der Gefährdungsspannungen und Ströme sowie das Modell einer repräsentativen Seilbahnstation.

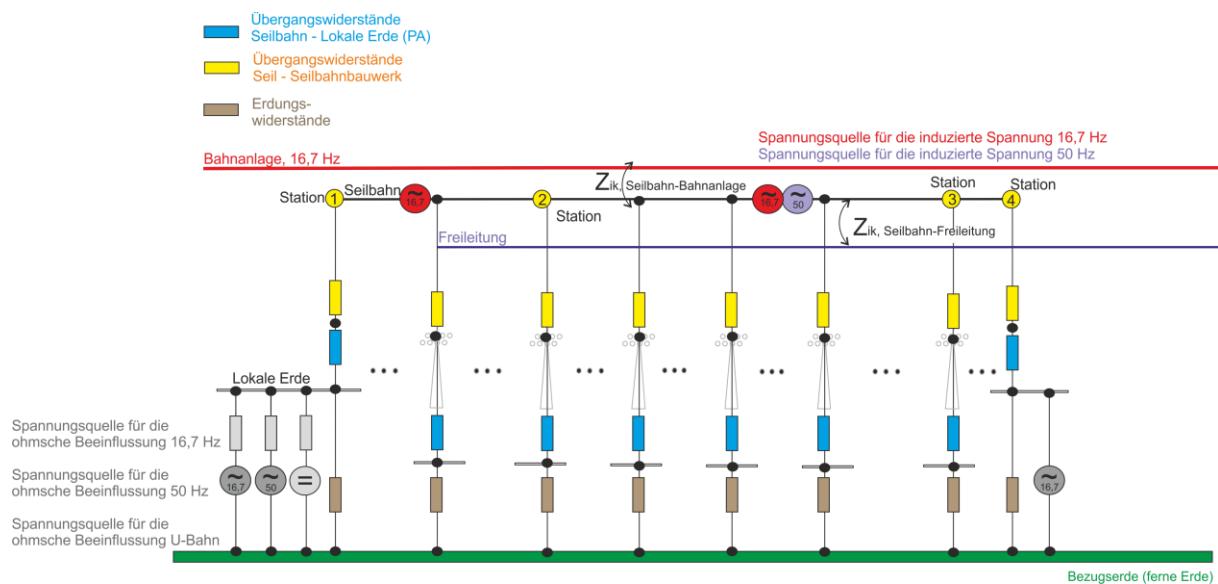


Abbildung 1: Eletrotechnisches Beeinflussungsmodell einer urbanen Seilbahn

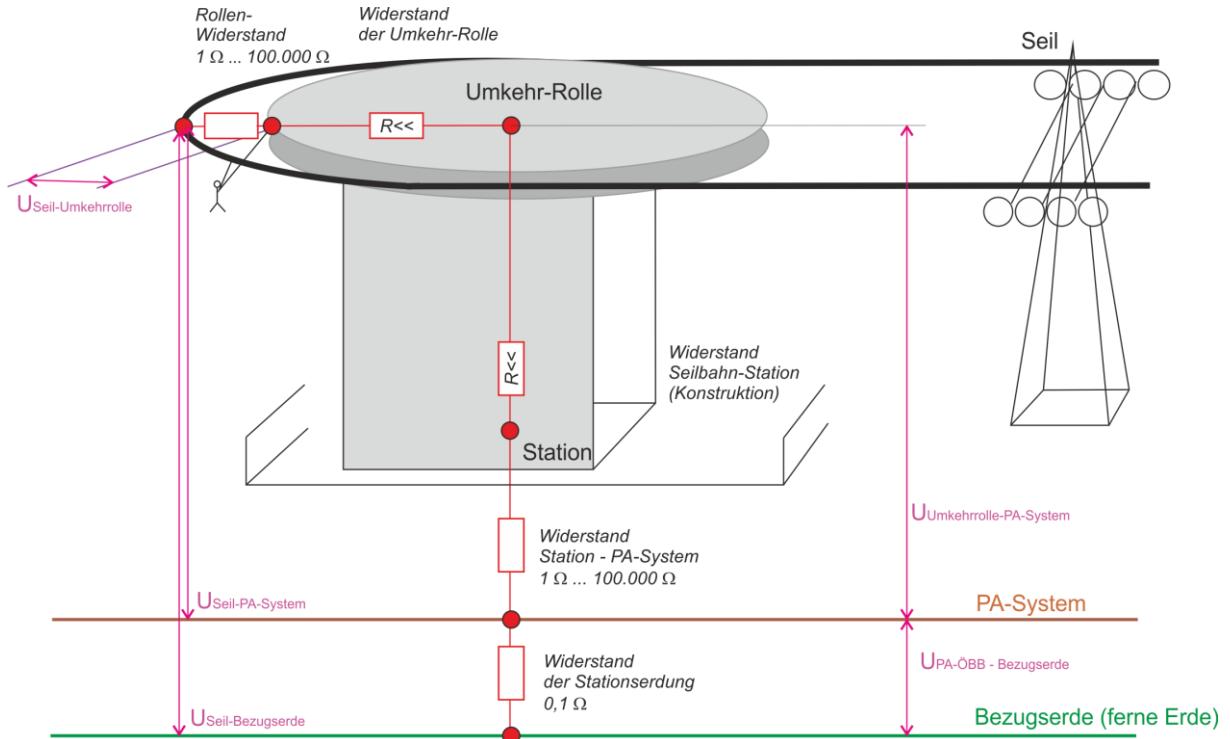


Abbildung 2: Elektrotechnisches Beeinflussungsmodell einer Seilbahnstation im Detail [1]

Abhängig vom induzierenden Strom und den geometrischen Verhältnissen (Abstände und räumliche Anordnung der induzierenden und induzierten Leiter) können die induzierten Spannungen gemäß folgender Formel [10] berechnet werden:

$$U_{induziert} = Z'_{ik} \cdot l \cdot I_{induzierend} \quad (1)$$

$U_{induziert}$	induzierte Spannung in V, komplex
$Z'_{ik}$	Koppelimpedanz in $\Omega/m$ , komplex
$I_{induzierend}$	induzierender Strom in A, komplex
$l$	Länge der Beeinflussung in m

$$Z'_{ik} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(h_i + h_k + 2p)^2 + x_{ik}^2}}{d_{ik}} \quad (2)$$

$$p = \frac{1}{\sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\rho}}} = e^{j\frac{\pi}{4}} \frac{1}{\sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}}} = (1 - j) \frac{\delta_E/\sqrt{2}}{1.85137} \quad (3)$$

$d_{ik} = \sqrt{x_{ik}^2 + (h_i - h_k)^2}$  Abstand zwischen den gekoppelten Leitern in m

$f$  Frequenz in  $s^{-1}$

$h_i$  Höhe des induzierenden Leiters in m

$h_k$  Höhe des induzierten Leiters in m

$p$  komplexe Erdstromtiefen in m

$x_{ik}$  horizontaler Abstand zwischen den gekoppelten Leitern in m

$Z'_{ik}$	Koppelimpedanz in $\Omega/m$
$\alpha = \sqrt{\omega \mu_0 / \rho}$	in $m^{-1}$
$\delta_E = 1.8514 / \alpha$	Erdstromtiefe für einen unendlich langen Leiter in m
$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$	magnetische Konstante in Vs/Am
$\rho$	spezifischer Erdwiderstand in $\Omega \cdot m$
$\omega = 2\pi f$	Kreisfrequenz in $s^{-1}$

Ausgehend von den Formeln (1) bis (3) werden die induzierten Spannungen in der Seilbahn für jeden Beeinflussungsabschnitt der A.C. Beeinflussungsfälle (16,7 Hz und 50 Hz) berechnet.

Der Übergangswiderstand zwischen dem Seil und der Seilbahnkonstruktion (Widerstand der Rollen) wird einmal als niederohmig ( $10\ \Omega$ ) und einmal als hochohmig ( $100.000\ \Omega$ ) angenommen, um verschiedene Gefahrenszenarien zu ermitteln, die in der Praxis auftreten können.

Die Berechnung der Erderwiderstände kann über folgende Formeln für einen Fundamenterder (4) bzw für einen vermaschten Erder (5) vorgenommen werden (siehe [11]):

$$R_A = 2 \cdot \rho / \sqrt{4 \cdot L \cdot B \cdot \pi} \quad (4)$$

$L, B$	Seitenlängen des Erders in m
$\rho$	spezifischer Erdwiderstand in $\Omega \cdot m$

$$R_A = \rho / (2 \cdot D) \quad (5)$$

$D$  diagonale Länge des Erders in m  
 $\rho$  spezifischer Erdwiderstand in  $\Omega \text{m}$

Abbildung 3 zeigt ein Beispiel eines Spannungstrichters  $U_T(x)$  an einem Erder. Das Erderpotential  $U_E$  kann durch Multiplikation mit dem Erderwiderstand mit dem Erdstrom berechnet werden. Das Potential, das in das Erdungssystem der Seilbahn eingekoppelt wird kann aus dem Wert des Spannungstrichters an dem Ort, wo das Seilbahnerdungssystem sich befindet herausgelesen werden.

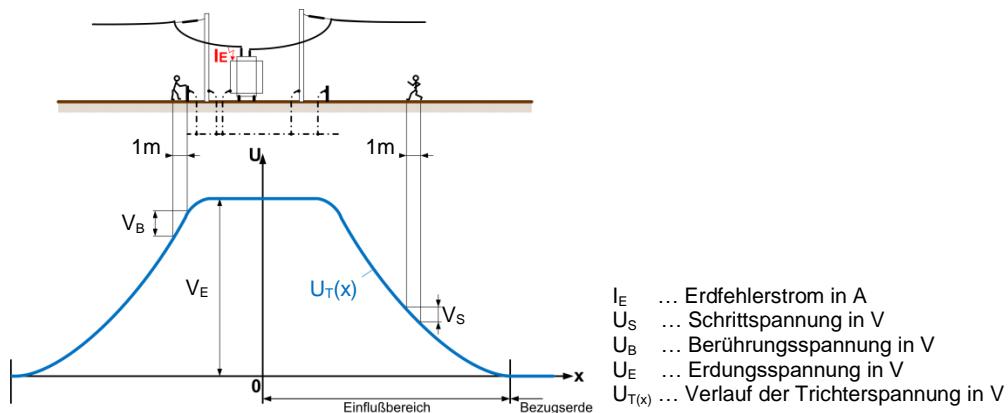


Abbildung 3: Schritt- und Berührungsspannungen

Man benötigt für die Evaluierung der gefährlichen Spannungen die Berücksichtigung mehrerer Beeinflussungsfälle abhängig von dem Beeinflussungsmechanismus, der Frequenz, dem Betriebsfall bzw. Fehlerfall der beeinflussenden Systeme, wie auch im folgenden Schema (Abbildung 4) dargestellt.

Für jeden in Abbildung 4 gezeigten Beeinflussungsfall müssen detaillierte Berechnungen sowohl für den Normalbetrieb als auch für verschiedene Fehlerfälle der verschiedenen beeinflussenden benachbarten Systeme durchgeführt werden, um das Worst-Case-Szenario für die Beeinflussung zu ermitteln und die geeigneten Schutzmaßnahmen anzuwenden.

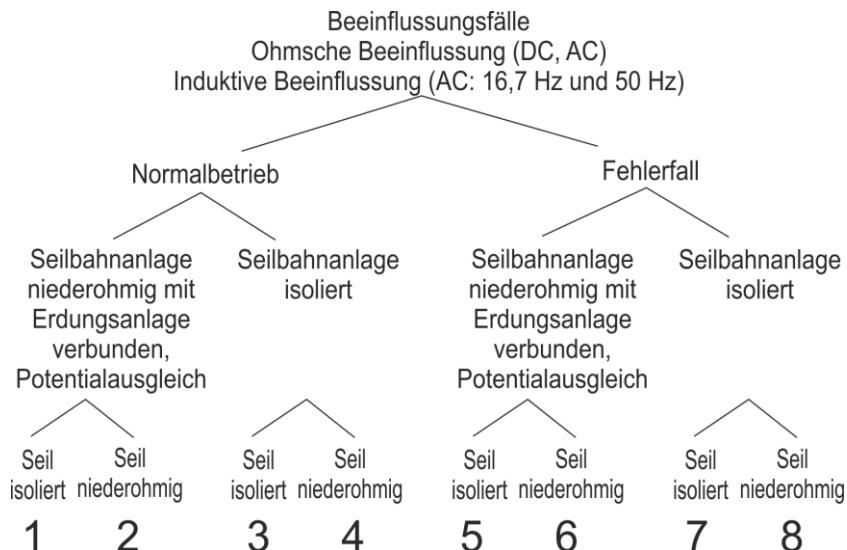


Abbildung 4: Verschiedene Beeinflussungsfälle für die Berechnung der Berührungsspannungen [1]

Für jeden Beeinflussungsfall werden an den relevanten Orten die Spannung zwischen dem Seil und den Seilbahnrollen, die Spannung zwischen den Rollen und dem Potentialausgleichssystem der Seilbahnstation, die Spannung zwischen dem Potentialausgleichssystem der Seilbahnstation und der Bezugserde, die Spannung zwischen dem Seil und dem Potentialausgleichssystem der Seilbahnstation und die Spannung zwischen dem Seil und der Bezugserde sowie dem Strom über die Rollen berechnet.

Schließlich werden die ermittelten Ströme und Spannungen für den ohmschen und induktiven Beeinflussungsfall jeweils für D.C. bzw. A.C. summiert bewertet und gegebenenfalls notwendige Maßnahmen zum Schutz von Personen, Anlagen und Betriebsmitteln festgelegt. Diese Maßnahmen können zum Beispiel Maßnahmen analog zur gerade veröffentlichten OVE-Richtlinie R 15: 2018-12, Potenzialausgleichs-, Erdungs-, Blitzschutz- und Überspannungsschutzkonzepte in Gebäuden sein, aber auch ein besonders sorgfältig ausgeführter Blitzschutz und ein niederinduktiver Potenzialausgleich sowie gegebenenfalls elektrotechnische Trennungen von elektrischen Systemen unterstützen den Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag sowie die EMV

## Aspekte zum Blitzschutz

Seilbahnanlagen sind seilunterstützte Verkehrsmittel, die über weite Distanzen mit teilweise großen Abständen zur Erdoberfläche geführt werden und daher in exponierter Lage bezogen auf die Orographie betrieben werden. Dadurch sind Seilbahnanlagen auch atmosphärischen Entladungen (Blitzentladungen) ausgesetzt und müssen die Anforderungen bezüglich des Blitzschutzes hinsichtlich der Personensicherheit und der technischen Zuverlässigkeit erfüllen.

Die Normenreihe ÖVE/ÖNORM EN 62305 stellt ein Gesamtkonzept zum Blitzschutz dar und es werden folgende Gesichtspunkte umfassend berücksichtigt:

- die Gefährdung durch den Blitzstrom und das transiente Magnetfeld bei direkten und indirekten Blitzeinschlägen,

- die Schadensverursachung durch Schritt- und Berührungsspannungen, gefährliche Funkenbildung, Feuer, Explosion, mechanische und chemische Wirkungen und Überspannungen,
- die Art der zu schützenden Objekte, wie Gebäude, Personen, elektrische und elektronische Anlagen, Versorgungsleitungen,
- mögliche Schutzmaßnahmen zur Schadensvermeidung bzw. Schadensminimierung, wie Erdung, Potenzialausgleich, räumliche Schirmung, Leitungsführung und -schirmung.

Unter Berücksichtigung der induktiven und kapazitiven Komponenten von elektrisch leitfähigen Komponenten der Seilbahnanlagen (wie z.B. Seile, Stützen, Stahlbauteile von Stationen, Versorgungsleitungen, Erdungsanlagen) können die vorgestellten Modelle zur Berechnung der elektrischen Beeinflussung herangezogen werden, um die transiente Stromaufteilung bei Blitzschlag abzuschätzen. Neben den Blitzschutzmaßnahmen (direkter und indirekter Blitzschutz) für die baulichen Anlagen der Seilbahn ist damit auch eine Beurteilung der auftretenden transienten Beeinflussungen möglich. Mit transienten Berechnungsmodellen, wie diese zur Berechnung bei Hochspannungsfreileitungen eingesetzt werden, ist die auftretende Spannungsverteilung bei Blitzströmen möglich, um geeignete Vorkehrungen zum Schutz von Personen gegen Schritt- und Berührungsspannungen oder gefährliche Funkenbildung zu treffen, aber auch den Überspannungsschutz an elektrischen oder elektronischen Systemen der Seilbahnanlage zusammen mit dem Potenzialausgleich umsetzen zu können.

Nicht außer Acht gelassen werden sollten aber auch organisatorische Maßnahmen während Gewitteraktivität im Einzugsbereich der Seilbahn, um eine Personengefährdung auf das kleinste Restrisiko minimieren zu können. Diese Maßnahmen begründen sich aber ganz speziell auf die räumliche Struktur (z.B. Ausführung der Stationen, Kabinen etc.) der Seilbahnanlage, den elektrischen und elektronischen Einrichtungen und den betriebsorganisatorischen Rahmenbedingungen.

## **Maßnahmen im Detail**

Um Überschreitungen von Berührungsspannungen zum Schutz von Personen sowie elektrischen Schlag zu verhindern, können folgende allgemeine Abhilfemaßnahmen zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs der Seilbahnanlage empfohlen werden:

- Ausführung des Anlagenbereichs im Sinne eines isolierten Raums oder
- Ausführung eines Potenzialausgleichs zwischen Kabine und Station im Zustiegsbereich für Fahrgäste, in dem die Kabine vom Seil entkoppelt ist;
- Zutrittsbeschränkungen im Bereich der Stationen, in der die Kabine noch mit dem Seil verbunden und berührbar ist;
- Herstellung des Potenzialausgleichs und Erdung des Seils bei Arbeiten in den Stationen und den Masten am Seil im Stillstand.

Die Berührungs- und Fehlerspannungen können durch Verbesserung der Erdungsanlagen der Seilbahnanlage insbesondere im Bereich der Seilbahnstützen und der Umkehrstationen weiter reduziert werden (üblicherweise werden für die Berechnung hohe Erdungswiderstände angenommen um den Worst Case abzubilden und die Planung entsprechend zukunftssicher gestalten zu können).

Da auch bei Einhaltung der Grenzen der zulässigen Berührungsspannungen z.B. gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50110 bzw. ÖVE/ÖNORM EN 50122 (wie auch der Körperströme gemäß IEC/TS 60479-1) unwillkürliche und schmerzhafte Muskelkontraktionen bei Elektrisierungen auftreten und zu Folgeunfällen oder Belästigungen führen können, sollte bei der Planung, Errichtung und dem Betrieb einer Seilbahnanlage ein besonders hohes Schutzziel angestrebt werden und durch Maßnahmen, wie z.B. Erdung, Potenzialausgleich, zusätzlicher lokaler Potenzialausgleich, Zutrittsbeschränkungen, Standortisolierung, isolierter Raum, ein erhöhter Schutz für Arbeitnehmer/innen und beförderte Personen gewährleistet werden.

Im Folgenden werden diese Minderungsmaßnahmen im Detail angeführt:

- grundsätzliche Ausführung eines zusätzlichen lokalen Potenzialausgleichs,
- Ausführung eines Potenzialausgleichs z.B. durch Bürsten oder Schleifkontakte zwischen Kabine und Station im Zustiegsbereich für Fahrgäste, indem die Kabine vom Seil entkoppelt wird,
- Zutrittsbeschränkungen, Isolierung Spannung führender Teile, Standortisolierung oder isolierter Raum in Bereichen, in denen die Kabine noch mit dem Transportseil verbunden ist und wo ein zusätzlicher lokaler Potenzialausgleich nicht möglich ist,
- Herstellung einer Erdung und eines Potenzialausgleichs bei Arbeiten in den Stationen und an den Masten,
- Unterweisung und Schulung der Mitarbeiter/innen sowohl für elektrotechnische wie auch für nicht elektrotechnische Arbeiten,
- berührungssichere Ausführung von Klemmen und Kontaktstellen von Leitungen, Kabelschirmen etc., wo eine Spannungsverschleppung möglich ist,
- organisatorische Maßnahmen während Gewitteraktivität im Einzugsbereich der Seilbahn.

Grundsätzlich können eine oder mehrere dieser Maßnahmen je nach Möglichkeit und Zweckmäßigkeit ausgeführt werden.

## **Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

Bereits bei der Planung von urbanen Seilbahnen muss auf ohmsche, induktive, kapazitive und elektromagnetische Beeinflussungen sowie auf die transiente Stromausbreitung im Sinne von Fehlerströmen oder des Blitzschutzes Bedacht genommen werden. Unter Beachtung benachbarter elektrotechnischer Anlagen muss die Höhe der elektrischen Beeinflussung ermittelt und schutztechnisch geeignete und ökonomisch sinnvolle Maßnahmen auch hinsichtlich Blitzschutz getroffen werden. Adäquate Maßnahmen zum Schutz von Personen und Anlagen sind in dieser Hinsicht z.B.:

- geeignet dimensionierte Erdungsanlagen,
- durchdachter (lokaler örtlicher) Potenzialausgleich,
- niederimpedante Ausführung von Potenzialausgleichs-Leitern, niederohmige Verbindungen
- geeignete Blitzschutzkonzepte,
- Standortisolation,
- leitfähige Seilrollen,
- Personenschutz und zusätzliche Schutzmaßnahmen für ArbeitnehmerInnen,
- Beachtung von Näherungen und des Trennungsabstandes beim Blitzschutz.

Die Erfahrungen in der Praxis zeigen, dass damit beim Betrieb von urbanen Seilbahnen Personen-/Anlagen- und Blitz-Gefährdungen aus elektrotechnischer Sicht sicher beherrscht werden können. Es können somit im niederfrequenten Bereich einerseits für Personen gefährliche Berührungsspannungen und Körperströme durch ohmsch, induktiv oder kapazitiv eingekoppelte Spannungen und Ströme auf ungefährliche Werte begrenzt werden und andererseits können diese eingekoppelten Größen auch hinsichtlich des Schutzes von anderen technischen Betriebsmitteln, wie z.B. elektronische Geräte, Seile oder Seilrollen minimiert werden. Im transienten Bereich können Gefährdungen durch atmosphärische Entladungen, Potenzialverschleppungen oder elektromagnetische Kopplungen auf ein akzeptierbares Maß reduziert werden.

## Literatur

- [1] W. Emmer, E. Schmautzer, G. Tschinkel, Conductive and Inductive Interference of Urban Ropeways – Simulations and Measures of Potential Rises in Urban Ropeways Caused by nearby Railway Systems, HV Systems and Subways through Inductive and Conductive Interferences, IEEE EEEIC 2018
- [2] L. Fickert, E. Schmautzer, E. Hufnagl, Ausgewählte elektrotechnische Aspekte zu urbanen Seilbahnen, Österreichische Zeitschrift für Verkehrswissenschaft – ÖZV 1/2017
- [3] OVE E 8001-1: 2010-03-01, Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V – Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen) (Konsolidierte Version)
- [4] OVE EN 50122-1: 2017-11-01, Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung – Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag
- [5] OVE EN 50122-2: 2011-10-01, Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung – Teil 2: Schutzmaßnahmen gegen Streustromwirkungen durch Gleichstrombahnen
- [6] OVE EN 50122-3: 2011-10-01, Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung – Teil 3: Gegenseitige Beeinflussung von Wechselstrom- und Gleichstrombahnsystemen
- [7] ÖVE/ÖNORM EN 50522: 2011-12-01, Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV
- [8] IEC TS 60479-1:2005+AMD1:2016 CSV (Consolidated version) Sprache: Edition 4.1 (2016-07-12), Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects E 8001-1
- [9] ÖVE/ÖNORM EN 62305-1: Teil 1 bis Teil 4, Blitzschutz (Protection against lightning)
- [10] ITU-T Recommendations, Volume III: Capacitive, inductive and conductive coupling: physical theory and calculation methods
- [11] W. Koch, Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV, 3. Herausgabe, Springer-Verlag: Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1961