



DISSERTATION

ZEITANALYSE UND ENERGIEOPTIMIERUNG FÜR DEN BEWEGLICHEN SEILFANGSCHUH

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors
der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

o. Univ. Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Edwin Engel

am

Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen - TU Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien

von

Dipl. -Ing. Mohamed Hassan

Wien, im November 2005

.....

meiner Frau und unseren Kindern



Kurzfassung

Förderseile von Seilbahnen und Schlepliften können aus ihren tragenden Rollen entgleisen. Dadurch können Menschenleben in Gefahr gebracht und großer materieller Schaden entstehen. Eine der möglichen Ursachen für Seilentgleisungen ist der Seitenwind. Besondere Gefahr besteht, wenn das Seil bzw. die Seilbahn seitlichen Windböen ausgesetzt ist.

Bis jetzt sind keine einwandfrei funktionierenden Systeme im Einsatz, die solche Entgleisungen mit ihren Folgen sicher verhindern können. Die gegenständliche Arbeit beschäftigt sich mit dieser Problematik. Ihr Ziel ist es, ein neues System zu entwickeln und zu untersuchen, das Seilentgleisungen mit großer Wahrscheinlichkeit verhindert und damit hilft, Gefahren für Menschenleben und materielle Güter zu vermeiden.

Dieses neue Entgleisungsschutzsystem musste zunächst im Labor- und im Feldversuch getestet werden. Es war notwendig einen Prototypen herzustellen, mit dem eine Erprobung im praktischen Betrieb durchgeführt werden kann.

Um eine endgültige Beurteilung der Verlässlichkeit des neuen Entgleisungsschutzsystems treffen zu können, ist eine Untersuchung der zeitlichen Abläufe im Falle einer Seilentgleisung notwendig. Somit kann eine Gegenüberstellung von Seilentgleisungszeit und Systemreaktionszeit erstellt werden.

Um eine hohe Sicherheit zu gewährleisten, soll das System durch elektrische Kräfte immer in Bereitschaft gehalten werden, und durch mechanische Kräfte, im Falle einer Entgleisung, in Aktion treten. Es hat zur Folge, dass während der gesamten Betriebszeit der Seilbahn Energie verbraucht wird. Um die dadurch entstehenden Kosten zu verringern, ist eine Energieoptimierung im praktischen Einsatz erstrebenswert. Es wird daher ein mathematisches Modell entworfen, welches das dynamische Verhalten des gesamten Systems beschreibt. Dieses Modell soll für die Berechnung (bzw. Optimierung) des Energieverbrauches und für die Dimensionierung der Systemkräfte herangezogen werden.

Summary

Promotion ropes of aerial ropeways (cable railways) and ski-tows can derail from their basic rollers. Thus, human lives can be brought in danger and high material damage can be caused. One of the possible causes for rope derailing is the cross-wind. Specific danger exists, if the rope and/or the aerial ropeway are exposed to lateral gusts of wind.

Up to now, there are no perfect systems in use, which can prevent such derailing and their consequences. The current thesis deals with this problem. Its goal is it to develop and examine a new system, which prevents rope derailing with large probability and thus helps to avoid danger for human lives and damage of material goods.

This new derailing protection system had to be tested first in the laboratory and afterwards in the field. It was therefore necessary to develop a prototype, with which field tests can be performed by a practical enterprise.

In order to be able to find a final evaluation of the reliability of the new derailing protection system, an investigation of the temporal operational sequences in the case of rope derailing is necessary. So it will be possible to provide a time analysis and to compare the rope derailing time with the system reaction time.

In order to be able to ensure a high security, the system has to be kept always in a state of readiness by electrical forces, and has to be in case of a derailing, put into action by mechanical forces.

As a consequence, during the entire period of operation of the aerial ropeway energy is consumed. In order to minimize the resulting costs energy optimization is necessary for field use. Therefore a mathematical model is sketched, which describes the dynamic behaviour of the entire system. This model should always be consulted for the computation (and/or optimization) of the energy consumption and the dimensioning of the system components.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen der Technischen Universität Wien.

Insbesondere bedanke ich mich herzlich bei meinem Betreuer Herrn o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Edwin Engel, der mich stets mit seinem umfassenden Wissen und seinem großen Erfahrungsschatz unterstützt und fachlich beraten hat.

Mein Dank gilt auch Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Hadrian, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft für die Zweitbegutachtung meiner Dissertation und für seine Verbesserungsvorschläge im elektrotechnischen Teil.

Bedanken möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Norbert Ostermann, Vorstand des Institutes für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen für seine wertvollen Ratschläge und Anregungen insbesondere, bei der Entwicklung des Grundkonzeptes.

Auch den beteiligten Firmen, den Unternehmen im Seilbahnwesen und Institutionen, die in der Entwicklungs- und Testphase unterstützend beigetragen haben, gilt mein besonderer Dank;

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie für die finanzielle Förderung der Entwicklung und Erprobung des Prototyps;

Firma Kuhnke GmbH (Herrn Ing. Wolfgang Wendl und Herrn Dipl.-Ing. Torsten Grunwald) für die gute Zusammenarbeit bei der Entwicklung eines neuen Hubmagnetes für den Prototyp;

Firma Pilz (Geschäftsführer Herrn Reinhard Strobl) auch für seine Bereitschaft bei weiteren Testversuchen des neuen Entgleisungsschutzsystems unterstützend zu wirken.

Ich bedanke mich auch für die anregenden Diskussionen mit Herren Dipl.-Ing. Dr. techn. Rainald Löscher, Dipl.-Ing. Dr. techn. Rudolf Knasmillner, TU-Wien- TVFA , Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Hinterndorfer TU-Wien- TVFA, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Alois Steindl, Institut für Mechanik und Mechatronik sowie meinem Studienkollegen Herrn Cand. Dipl.-Ing. Franz Langwieser, welche mir alle einen wichtigen Bezug zur Praxis vermitteln konnten.

Weiters bedanken möchte ich mich bei meinem Freund Herrn Hofrat Yusuf Matuska und meinem Kollegen Dipl.-Ing. Andreas Oberhauser für die Durchsicht der Ausarbeitung.

Mein besonderer Dank gilt auch der Technischen Universität Wien, an der ich einen umfangreichen Wissensschatz erwerben durfte.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Familie, die es akzeptierte, dass ich oft keine Zeit hatte, wenn sie mich brauchte.

Mohamed Hassan

November 2005

Inhaltsverzeichnis

1	AUFGABENSTELLUNG	10
2	KAPITELÜBERSICHT	12
3	SEILSCHWINGUNGEN DURCH SEITENWIND	13
3.1	Mathematisches Modell.....	13
3.2	MATLAB-Simulation zur Untersuchung der seitlichen Auslenkung	19
3.2.1	Auswirkung der Windböenfrequenz auf die seitliche Auslenkung des Seiles	20
3.2.2	Auswirkung der Windböenstärke	21
3.2.3	Auswirkung der Windstärke bei Windböenüberlagerung	22
3.2.4	Auswirkung der Windböe ohne konstanten Anteil	23
3.3	Berechnung der kritischen Zeit.....	24
4	GRENZLAGEN	26
4.1	Definition des Anlaufwinkels.....	26
4.1.1	Grenzlagen des Förderseiles	27
4.2	Einflussparameter auf den Anlaufwinkel	28
4.3	Einfluss des Seitenwindes auf den Anlaufwinkel.....	29
5	ENTGLEISUNGSSCHUTZ FÜR BEWEGTE SEILE VON SEILBAHNEN UND SCHLEPPLIFTEN	35
5.1	Grundlage der Entwicklung	35
5.2	Stand der Technik	35
5.2.1	Tastrollen, Tastfühler	35
5.2.2	Isolierte Seilrolle	36
5.2.3	Magnet-Schalter	36
5.2.4	Seillageüberwachung	36
5.2.5	Feststehende Seilfangschuhe	37
5.2.6	Bruchstabschalter.....	37
5.2.7	Gewichtsrolle	37

5.2.8	Rollenbatterie gegen Drallstau	37
5.2.9	Seitliche Kraft aufnehmen	38
5.2.10	Mechanischer Schutz	38
5.3	Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik	39
5.4	Zielsetzung	39
5.4.1	Meldeeinrichtung	39
5.4.2	Sicherheitseinrichtung	40
5.5	Systementwicklung	41
5.6	Signalerfassung (Sensoren)	42
5.7	Signalverarbeitung (Steuerung)	43
5.7.1	Hardware	44
5.7.2	Software (SW)	44
5.8	Kommunikation und Schnittstellen	45
5.8.1	Leitungen (direkt Verdrahtung)	46
5.8.2	Bussysteme	46
5.8.3	Andere Kommunikationssysteme	47
5.9	Aktoren	47
6	PROTOTYP	49
6.1	Signalerfassung	50
6.2	Signalverarbeitung	51
6.2.1	Steuereinheit:	51
6.2.2	Regelung der Magnetspannung	52
6.3	Signalausgabe	53
6.3.1	Der Aktor (Fangeinrichtung)	53
6.3.2	Konstruktion des Aktors	56
6.3.3	Stationseinrichtung (Meldereinrichtung und Überwachungssystem) ...	59
6.4	Daten- und Energieübertragung	59
6.5	Erprobung	60
6.5.1	Labortest	60
6.5.2	Feldversuche	61
6.6	Beurteilung	62

6.6.1 Eignung	62
6.6.2 Anwendung	62
6.6.3 Zeitbewertung.....	62
6.6.4 Optimierung.....	63
7 ZEITANALYSE	64
7.1 Seilentgleisungszeit.....	65
7.2 Signalisierungszeit	66
7.2.1 Signalerfassungszeit (Schaltzeit des Sensors).....	66
7.2.2 Signalübertragungszeit.....	67
7.2.3 Signalverarbeitungszeit	68
7.2.4 Reaktionszeit der Fangeinrichtung (des mechanischen Teils)	70
7.2.5 Gesamte Reaktionszeit des Entgleisungsschutzes:	74
7.3 Zusammenfassung und Gegenüberstellung.....	74
8 ENERGIEBERECHNUNG UND -OPTIMIERUNG	76
8.1 Beschreibung des dynamischen Verhaltens einer Fangeinrichtung	76
8.2 Mathematischer Hintergrund für die Energieberechnung	77
8.2.1 Modellerstellung zur Dimensionierung und Berechnung des Hubmagneten:.....	78
8.3 Elektrische Energie	81
8.3.1 Herleitung der Kraftgleichung aus den einzelnen Kräften des Aktors.....	82
8.4 Optimierung der Leistung und des Energieverbrauches	85
8.5 Beispiel für die Energieoptimierung	88
8.6 Lösungsvorschläge für die Energieoptimierung.....	90
8.6.1 Optimieren der nötigen Energie in der Haltephase.....	92
8.6.2 Optimieren der nötigen Energie in der Anzugsphase	93
8.7 Maßnahmen zur Gewährleistung der Energieversorgung	97
8.7.1 Vorschläge für die Gewährleistung der Energieversorgung	97
8.8 Zusammenfassung	101

9	VISUALISIERUNG = INSTANDHALTUNG UND QUALITÄTSMANAGEMENT	102
9.1	Randbedingungen für das in Folge beschriebene Monitoring	102
9.2	Die seitlichen Seilbewegungen in der Betriebsstation abbilden.....	104
9.3	Menü zur Auswertung der aufgezeichneten Daten (Historie)	105
9.3.1	Vorteile der Seilbahnvisualisierung.....	108
9.4	Seilbahnmonitoringzentrale (Online Kontrolle)	108
9.4.1	Vorteile der Seilbahnmonitoringzentrale	110
9.5	Detektion entgleisungskritischer Seitenwindböen	110
10	SICHERHEITSMASSNAHMEN	111
10.1	Kommunikationssicherheit.....	111
10.2	Sichere Maßnahmen zur Vermeidung eines Fehlalarms.....	112
10.3	Wichtige Kriterien betreffend der gewählten Sensoren.....	112
10.4	Risiko eines Blitzschlages und Schutzmaßnahmen	114
10.4.1	Blitz schlägt direkt in einen Sensor ein	114
10.4.2	Direkter Blitzeinschlag in das Seil.....	114
10.4.3	Blitz schlägt in der Nähe eines Sensors ein	114
11	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	116
12	LITERATURVERZEICHNIS	117
13	ANHANG	122

1 Aufgabenstellung

Das neu entwickelte Seilentgleisungsschutzsystem, das auf der Idee eines beweglichen Seilfangschuhes basiert, enthält unter anderem zwei wesentliche offene Fragen:

Erstens ist zu untersuchen, ob das gesamte System schnell genug ist, um beim Entgleisungsvorgang eines Seiles rechtzeitig zu reagieren und das Seil aufzufangen.

Dazu ist es einerseits notwendig die Zeit zu berechnen, die das Seil benötigt, um von seiner Normallage über den Rollenbord zu springen (Seilentgleisungszeit).

Andererseits ist die Zeit zu berechnen, die das System benötigt, um eine Entgleisung zu erkennen und bis zum endgültigen Zeitpunkt, in dem sich die Fangeinrichtung in der ausgefahrenen Fangposition befindet (Systemreaktionszeit) zu reagieren. Diese Systemreaktionszeit errechnet sich aus der Signalerfassungszeit, der Signalübertragungszeit, der Signalverarbeitungszeit und der Reaktionszeit der Fangeinrichtung.

Erst nach der Gegenüberstellung der Entgleisungszeit und der Systemreaktionszeit ist eine endgültige Beurteilung der Verlässlichkeit des entwickelten Systems möglich.

Daher soll bewiesen werden, dass im Falle einer Entgleisung, der bewegliche Fangarm sich in der Fangposition befindet, noch bevor das Seil den Rollenbord verlässt.

Die zweite Fragestellung beschäftigt sich mit der Energieversorgung der Fangeinrichtung, die während der gesamten Betriebszeit sichergestellt werden muss.

Da der Energieverbrauch des gesamten Systems sehr hoch ist, ist zu untersuchen, wie diese Energie minimiert werden kann, sodass auch mit einfachen Energiequellen z.B. einer Batterie die Versorgung ermöglicht werden kann.

Für die Energieoptimierung ist daher ein mathematisches Modell zu entwerfen, welches das dynamische Verhalten der Fangeinrichtung beschreibt und für die Optimierung der Energie herangezogen werden kann.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen diese beiden offenen Fragen beantwortet werden.

2 Kapitelübersicht

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in ihrem inhaltlichen Aufbau in acht Kapitel:

Zu Beginn werden die möglichen Einflussparameter des Windes, die zu einer Seilentgleisung führen können untersucht.

Mit Hilfe einer MATLAB - Simulation wird der Unterschied zwischen dem Einfluss des konstanten Seitenwindes und dem Einfluss der seitlichen Windböe deutlich sichtbar.

Anschließend (Kapitel 4) wird der Einfluss des Seitenwindes auf den Anlaufwinkel (Entgleisungswinkel) des Seiles auf die Rollbatterie genauer erforscht.

Im 5. Kapitel wird ein Entgleisungsschutz entwickelt, der insbesondere für Seil-schwebbahnen und für Schlepplifte eingesetzt werden soll. Dieser beruht auf der Idee einer automatisch gesteuerten Fangeinrichtung, die eine bevorstehende Seilentgleisung erkennt, meldet und rechtzeitig vor der Entgleisung des Seiles aktiv wird und damit das entgleisende Seil auffängt.

Aus dieser Idee einer beweglichen Fangeinrichtung wird nun ein neu entwickelter Prototyp hergestellt, der sowohl im Labor als auch im Feldversuch getestet wird. Das Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnwesen wurde mit dieser Entwicklung vom österreichischen Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (**bmvit**) beauftragt. Dieser Prototyp wird im 6. Kapitel genau beschrieben.

Im darauf folgenden Kapitel werden die zeitlichen Abläufe bei der Entgleisung und dem Auffangen des Seils durch den Fangschuh genauer untersucht, um die Verlässlichkeit des entwickelten Systems beurteilen zu können.

Im 8. Kapitel wird die Optimierung des Energieverbrauchs des Entgleisungsschutzes genauer behandelt. Die Möglichkeiten für ein intelligentes Instandhaltungsmanagement durch eine moderne Visualisierung werden im 9. Kapitel aufgezeigt, um die Sicherheit von Seilbahnanlagen zu erhöhen.

Abschließend werden die Sicherheitsmaßnahmen im System beschrieben.

3 Seilschwingungen durch Seitenwind

3.1 Mathematisches Modell

Mittlere Windgeschwindigkeit:

Die mittlere Windgeschwindigkeit V ergibt sich als Integral der Momentangeschwindigkeit $v(t)$ über den mittleren Zeitraum t , gebrochen durch die Zeit [01].

$$V = \frac{1}{t} * \int_0^t v(t) * dt \quad \text{Gl- 1}$$

Die Windgeschwindigkeit ist weder über die Zeit noch über die Seillänge konstant. Die als Wind bezeichnete Luftbewegung lässt sich an jedem Ort, durch die Angabe der momentanen Windgeschwindigkeit und der momentanen Windrichtung darstellen (siehe Abbildung 1).

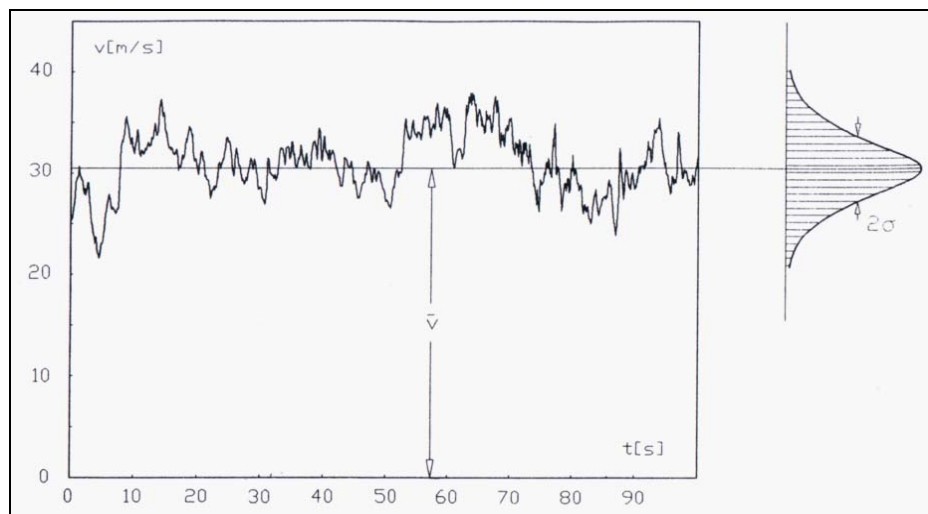


Abbildung 1: Statistische Beschreibung der Windgeschwindigkeit durch eine Gauß-Verteilung [02]

Windstaudruck pro Flächeneinheit:

$$q_{st}(t) = \frac{\rho}{2} * v^2(t) \quad \text{Gl- 2}$$

Der Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Staudruck wird durch die Nährungsbeziehung

$$q_{st} = \frac{V^2}{16} \quad \text{GI- 3}$$

beschrieben [11].

Berechnung der Windkraft auf das Seil:

Zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens von einem zwischen zwei Stützpunkten, im Abstand ℓ mit der mittleren Spannkraft S , gespanntem Seil in böigem Wind, muss zunächst die Windlast beschrieben werden.

$$F_w = q_{st}(t) \cdot A \quad \text{GI- 4}$$

A die vom Wind getroffene Fläche

Die aus dem Wind auf das Seil einwirkende Kraft pro Längeneinheit des Seiles ergibt sich, bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit unter Anwendung von GI- 2, als:

$$F_{ws}(t) = \frac{\rho}{2} \cdot V^2(t) \cdot d \cdot C_s \quad \text{GI- 5}$$

d Seildurchmesser

C_s ein dimensionsloser formabhängiger Windwiderstandsbeiwert (in DIN 1055 Teil 4 als aerodynamischer Kraftbeiwert bezeichnet),

ρ die Luftdichte von $1,25 \text{ kg/m}^3$

V die Windgeschwindigkeit,

Das Seil erfährt durch diese Kraft eine seitliche Auslenkung [03]:

$$Z(t) = F_{ws}(t) \cdot \frac{\ell^2}{8S} = \frac{\rho}{2} \cdot V^2(t) \cdot d \cdot C_s \cdot \frac{\ell^2}{8S} \quad \text{GI- 6}$$

Für schwankende Windgeschwindigkeiten und sich bewegende Strukturen wird die Windkraft zusätzlich durch die Trägheitskräfte und die Relativgeschwindigkeit zwischen Wind und Seil beeinflusst.

Mit Hilfe eines dynamischen Modells sollen die auf das Seil einwirkenden Kräfte bei Seitenwind beschrieben werden. Ohne Massenträgheit würde sie bei der Auslenkung $Z(t)$ in Feldmitte im Gleichgewicht mit der Windkraft $F_{ws}(t)$ stehen.

$$Z(t) = \frac{\ell^2}{8S} * F_{ws}(t) \quad \text{GI- 7}$$

Während der seitlichen Auspendelung entspricht nach dem D'Alembert'schen Trägheitsprinzip in jedem Seilelement das Produkt aus Seilmasse m pro Längeneinheit und der Beschleunigung $\frac{d^2Z}{dt^2}$ einer Rückstellkraft ΔF_{ws} gemäß

$$\Delta F_{ws}(t) = m * \frac{d^2Z}{dt^2} \quad \text{GI- 8}$$

$$m = \frac{q}{g} \quad \text{GI- 9}$$

- q Seilgewicht pro Längeneinheit
- g Erdbeschleunigung (9,81 m/s²)

Diese Rückstellkraft ist jedoch variabel entlang des Seiles. Geht man von der nahe liegenden Annahme aus, dass während des Schwingungsvorganges die horizontalen Seillinien stets affine Seilparabeln 2. Ordnung sind, dann ist die Rückstellkraft ebenfalls entlang der Seillinie nach Art einer Parabel 2. Ordnung verteilt. Dies würde im Folgenden zu einer partiellen Differentialgleichung führen.

Näherungsweise kann man jedoch von einer gedachten konstanten horizontalen Trägheitskraft $\Delta F_{ws}(t) = \text{konstant}$ ausgehen, die eine gleich große seitliche Auslenkung zur Folge hätte. Führt man die GI- 7 und GI- 8 zusammen, dann entsteht die Beziehung für die momentane seitliche Seilauslenkung

$$Z(t) = F_{ws}(t) \cdot \frac{\ell^2}{8S} - c \cdot m \cdot \frac{\ell^2}{8S} \cdot \frac{d^2}{dt^2} Z(t) \quad \text{GI- 10}$$

mit den Anfangsbedingungen $Z(0) = 0, \frac{d^2}{dt^2} Z(0) = 0$

Lösung der Differentialgleichungen:

Hierbei sind folgende Differentialgleichungen zu lösen und daraus ein mathematisches Modell aufzustellen, um das dynamische Verhalten des Seiles durch Seitenwind genauer zu untersuchen.

Berechnung bei einer konstanten Windgeschwindigkeit:

Ausgehend von der GI- 10 folgt eine harmonische Gleichung zweiter Ordnung

$$\frac{d^2}{dt^2} Z(t) + A \cdot Z(t) = B \quad \text{GI- 11}$$

mit der allgemeinen Lösung:

$$Z(t) = \frac{B}{A} - \frac{B \cdot \cos(\sqrt{A} \cdot t)}{A} = \frac{B}{A} \cdot [1 - \cos(\sqrt{A} \cdot t)] \quad \text{GI- 12}$$

Wobei A, B und C Konstante sind, die sich aus Seilbahnparametern wie folgt sich ergeben:

$$A = \frac{8S}{cm\ell^2},$$

$$B = \frac{W_o}{cm},$$

$$C = \frac{K}{cm}$$

Die Annahme „Seilparabeln“ ist dann erfüllt, wenn man den Mittelwert der größten

Rückstellkraft Δw um den Faktor $c = 0,73$ abmindert und sodann als konstant über die Feldlänge betrachtet [03] und [6].

Berechnung bei einer konstanten Windgeschwindigkeit überlagert von einer Windböe:

Bei dieser Berechnung wird wieder von der Gl- 10 ausgegangen, es muss aber für die Windböe eine Annahme getroffen werden.

Es wird eine „sin²“ Funktion für die Windböe angenommen.

Die Windgeschwindigkeit ergibt damit wie folgt:

$$V = W + K \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot t}{T_0}\right) \quad \text{Gl- 13}$$

W ist der konstante Anteil der Windgeschwindigkeit

K ist die Amplitude der Windböe; Die Veränderlichkeit der Windgeschwindigkeit mit der Zeit wird als Böigkeit des Windes bezeichnet.

t ist die Zeit

T₀ ist die Dauer der Windböe

Wird die Gl- 13 in die Gl- 10 eingesetzt, ergibt sich eine Differentialgleichung zweiter Ordnung:

$$\frac{d^2}{dt^2} Z(t) + A \cdot Z(t) = B + C \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot t}{T_0}\right) \quad \text{Gl- 14}$$

Die allgemeine Lösung¹ dieser Differentialgleichung ist

$$Z(t) = \frac{CA \cos(2 \cdot d \cdot t) + 4(2B + C)(d^2 - \frac{A}{4})}{8Ad^2 - 2A^2} - \frac{\cos(\sqrt{A} \cdot t)(4Bd^2 + 2Cd^2 - BA)}{4Ad^2 - A^2} \quad \text{Gl- 15}$$

¹ Diese allgemeine Lösung wurde mit Hilfe der Software (Matemtica und Maple) gefunden.

Differentialgleichung zur Untersuchung der Seilauslenkung durch Seitenwind

Ausgehend von der Gl- 10 (wobei die Annahme für die Windböe in die Gl- 13 für den Windstaudruck die Gl- 2 bzw. Gl- 5 eingesetzt wurde) ergibt sich für Berechnung der seitlichen Seilauslenkung (in der Feldmitte) eine nicht lineare Differenzialgleichung zweiter Ordnung.

$$\frac{d^2}{dt^2} Z(t) = \frac{d \cdot \rho \cdot C_s}{2 * c \cdot m} \left[W_o + K \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{T_o} t \right) - \frac{d}{dt} Z(t) \right]^2 - \frac{8S}{c \cdot m * \ell^2} Z(t) \quad \text{Gl- 16}$$

Die Differentialgleichung wurde mit Hilfe der Software MATLAB numerisch gelöst und für die Simulation im nächsten Abschnitt verwendet.

3.2 MATLAB-Simulation zur Untersuchung der seitlichen Auslenkung

Ausgehend von den aufgestellten mathematischen Modellen (Gl- 16) werden in diesem Abschnitt Einflussparameter des Windes und deren Auswirkung auf die seitliche Auslenkung des Seiles genauer betrachtet. Zur Untersuchung werden zwei unterschiedliche Seile herangezogen.

	Seil 1	Seil 2
Seilspannkraft	$S_1 = 500\text{kN}$	$S_2 = 100\text{kN}$
Seilgewicht pro Längeneinheit	$q_1 = 100 \text{ kg/m}$	$q_2 = 40\text{kg/m}$
Feldlänge	$l_1 = 1000\text{m}$	$l_2 = 200\text{m}$
Seildurchmesser	$d_1 = 50\text{mm}$	$d_2 = 34\text{mm}$
Erdbeschleunigung	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	
Luftdichte	$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^2$	
	$c = 0,73$	
Formbeiwert des Seiles	$C_s = 1.2$	
<p>Angenommene Werte: Dabei wurde der Wind mit dem Grundwert W als konstanter Anteil gewählt und mit der Windböe der Stärke „$K \cdot \sin^2(f * t)$“ periodisch überlagert.</p> <p>T Zeit [s] $f = \frac{\pi}{T_0}$ Frequenz T_0 Dauer der Böe in [s]</p>		
Dauer der Böe	$T_0 = [2.5\text{s} \dots 40\text{s}]$	
Amplitude (Stärke) der Windböe	$K = [0 \dots 20\text{m/s}]$	
Windstärke (konstanter Anteil)	$W = [0 \dots 40\text{m/s}]$	

Tabelle 1

3.2.1 Auswirkung der Windböenfrequenz auf die seitliche Auslenkung des Seiles

Da die Windböe eine unterschiedliche Dauer (Periodendauer) bzw. Frequenz annehmen kann, werden hier verschiedene Werte und deren Auswirkung auf die seitliche Auslenkung des Seiles untersucht.

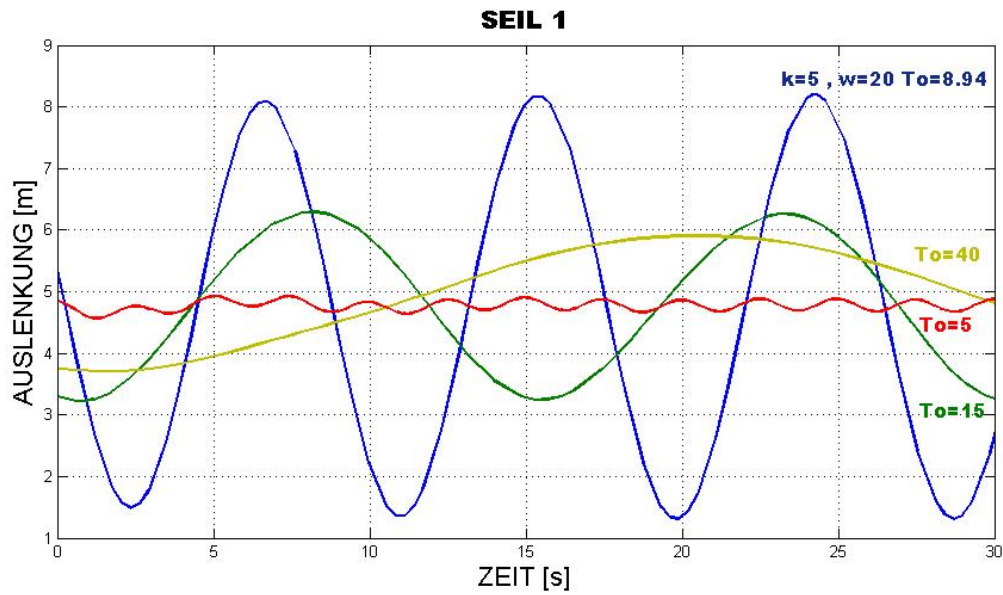


Abbildung 2: für Seil 1: Auslenkung in der Seilfeldmitte, bei $W = 20\text{m/s}$ und $K=5\text{m/s}$, in Abhängigkeit von der Bögigkeitsdauer T_o [von 2.5s bis 40s]

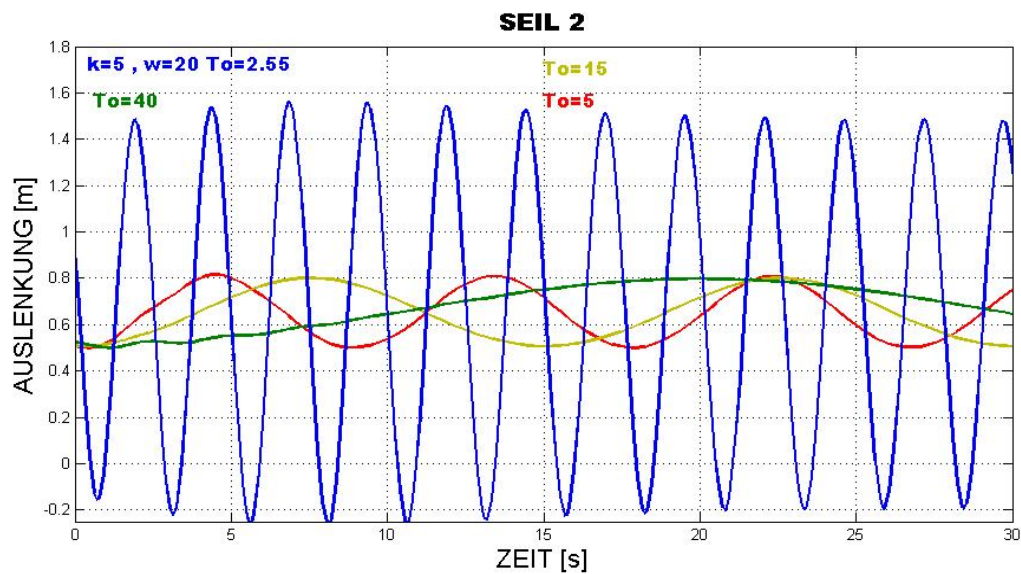


Abbildung 3: für Seil 2: Auslenkung in der Seilfeldmitte, bei $W = 20\text{m/s}$ und $K=5\text{m/s}$, in Abhängigkeit von der Bögigkeitsdauer T_o [von 2.5s bis 40s]

Aus beiden Simulationen ist leicht zu erkennen wie groß die Entgleisungsgefahr ist, wenn die Windböenfrequenz mit der Eigenfrequenz des Seiles übereinstimmt. Deshalb es ist sehr wichtig, bei der Planungsphase einer Seilbahn auf die Eigenfrequenz (bzw. die Eigenfrequenzparameter) des Seiles zu achten.

Eigenfrequenz des Seiles (Vergleiche auch [03], [04], [05], [06]):

$$f = \frac{1}{2 \cdot \ell_1} \sqrt{\frac{S \cdot g}{q}}$$

GI- 17

3.2.2 Auswirkung der Windböenstärke

Bei dieser Untersuchung wird für die Windgeschwindigkeit die Annahme

$$V = W + K \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot t}{T_0}\right)$$

mit einem konstanten Anteil $W=20$ m/s (T_0 bei Eigenfrequenz) eingesetzt und die Windböenstärke simuliert.

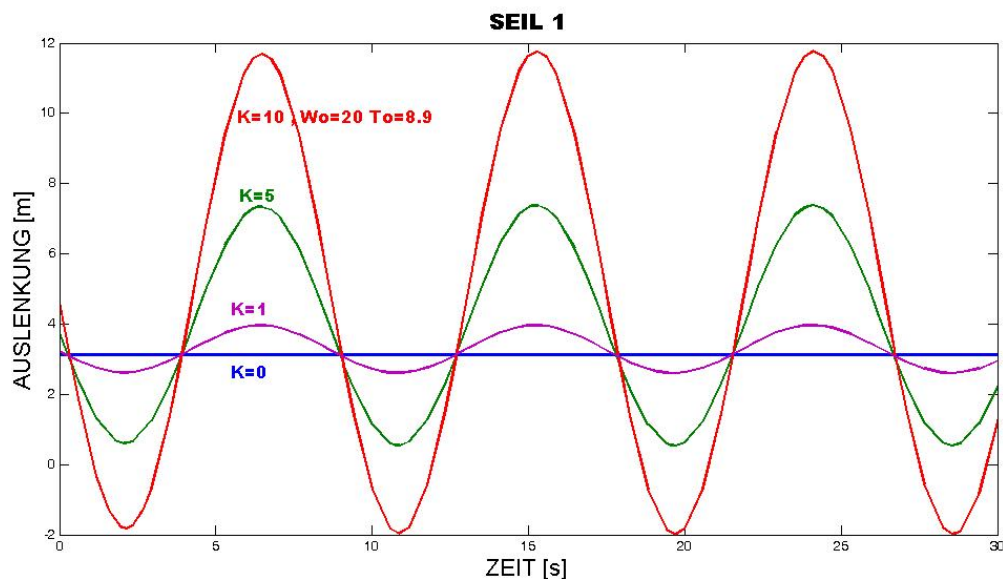


Abbildung 4: für Seil 1: Auslenkung in der Seilfeldmitte, bei $W = 20$ m/s und $K = 0, 1$ m/s, 5 m/s, 10m/s in Abhängigkeit von der Windböenstärke

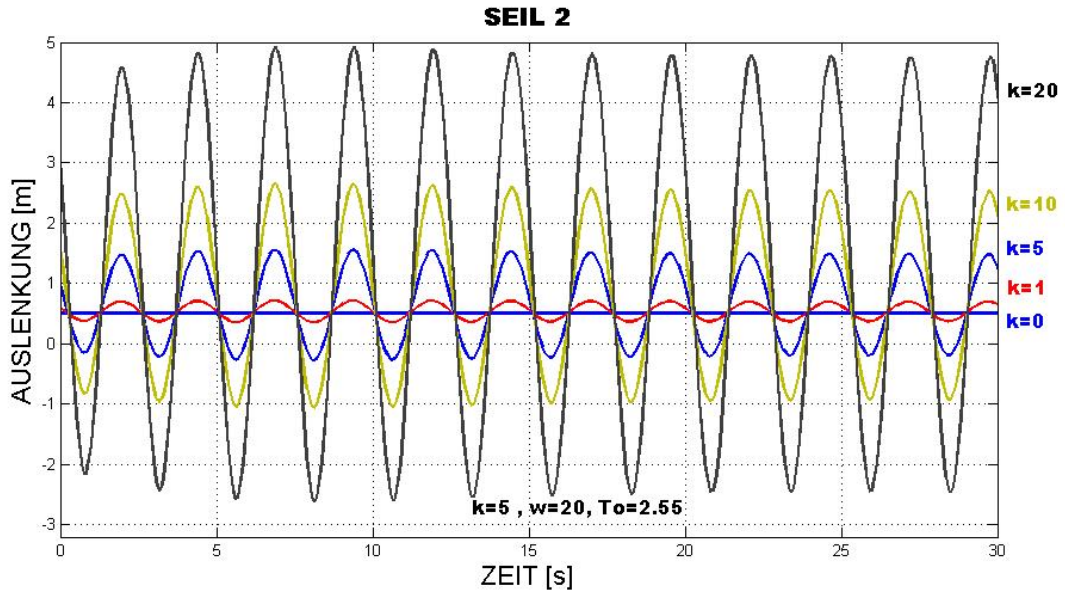


Abbildung 5: für Seil 2: Auslenkung in der Seilfeldmitte, bei $W = 20$ m/s und $K = 0, 1$ m/s, 5 m/s, 10 m/s in Abhängigkeit von der Windböenstärke

3.2.3 Auswirkung der Windstärke bei Windböenüberlagerung

Auswirkung der Windstärke (des konstanten Anteils), bei Überlagerung von Windböe mit der Amplitude $K=5$, auf die seitliche Auslenkung des Seiles;

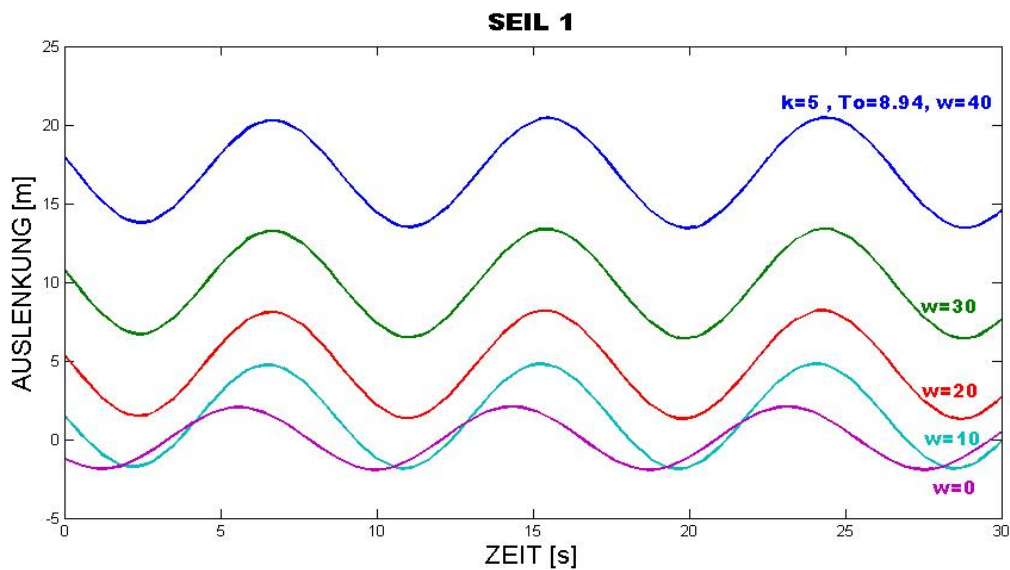


Abbildung 6: für Seil 1: Auslenkung in der Seilfeldmitte, bei $K = 5$ m/s und $W = 0$ m/s, 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s, 40 m/s in Abhängigkeit von der Windstärke

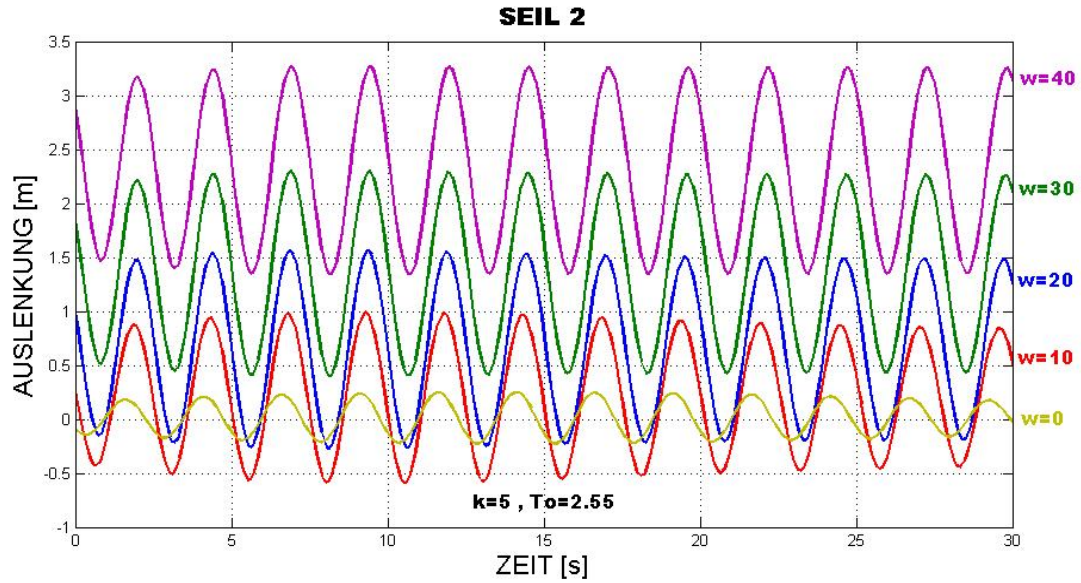


Abbildung 7: für Seil 2: Auslenkung in der Seilfeldmitte, bei $K=5\text{m/s}$ und $W=0\text{ m/s}, 10\text{ m/s}, 20\text{ m/s}, 30\text{m/s}, 40\text{m/s}$ in Abhängigkeit von der Windstärke

3.2.4 Auswirkung der Windböe ohne konstanten Anteil

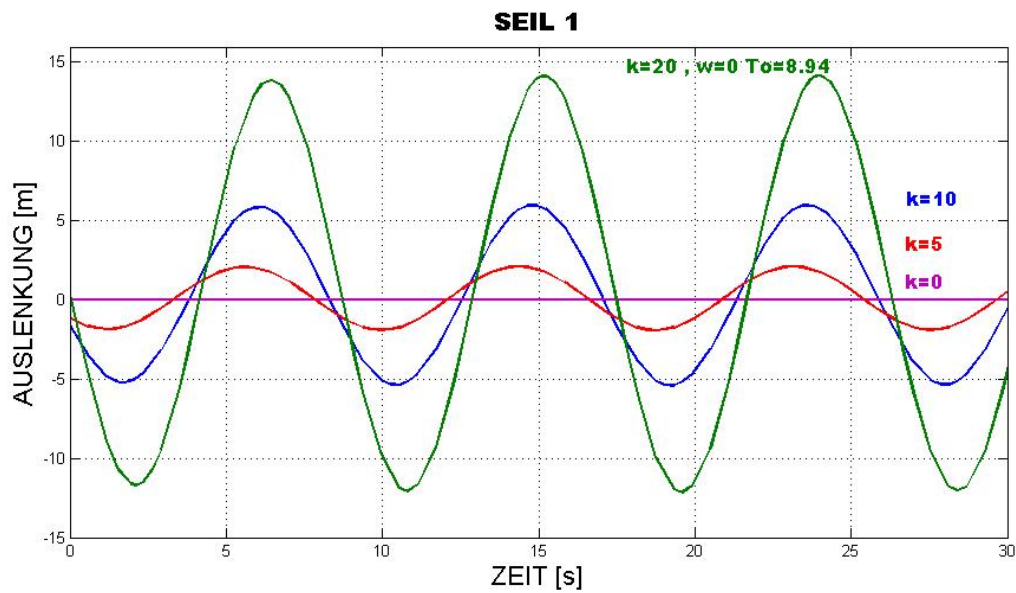


Abbildung 8: für Seil 1: Auslenkung in der Seilfeldmitte, bei $W = 0\text{ m/s}$ und $K = 0, 1\text{m/s}, 5\text{ m/s}, 10\text{m/s}, 20\text{m/s}$ in Abhängigkeit von der Windstärke

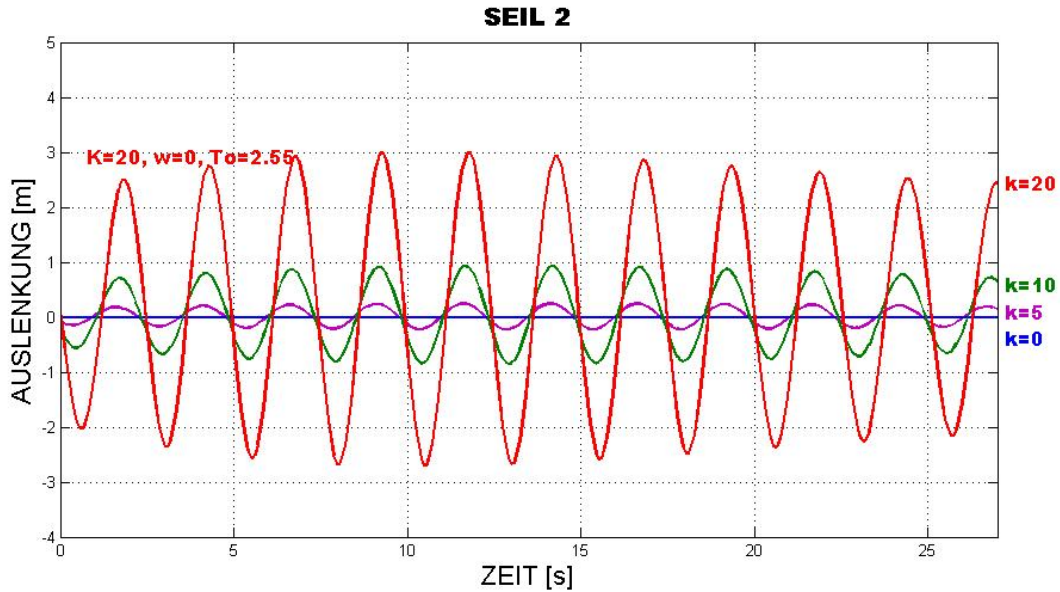


Abbildung 9: für Seil 2: Auslenkung in der Seilfeldmitte, bei $W=20$ m/s und $K= 0, 1$ m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s in Abhängigkeit von der Windstärke

3.3 Berechnung der kritischen Zeit

Die kritische Zeit wird definiert als die Zeit, die das Seil benötigt, um von der Normallage (Ruhelage) bis zur maximalen Auslenkung (Entgleisungsgefahr) zu gelangen.

Die kritische Zeit errechnet sich aus dem mathematischen Modell, das für die Berechnung der maximalen Auslenkung diente.

Um den riskantesten Sicherheitszustand (Resonanzfrequenz) zu berücksichtigen, werden die Berechnungen auch mit der Eigenfrequenz durchgeführt.

Seil 1:

Eigenfrequenz des Seiles (vergleiche auch [03], [04], [05], [06]):

$$f = \frac{1}{2 \cdot \ell_1} \sqrt{\frac{S^* \cdot g}{q}} = 0.1119 \text{ Hz}$$

wobei S , ℓ , q , und g aus der Tabelle 1 für das Seil 1 zu entnehmen sind.

Böigkeitsdauer: To [s]	Frequenz: f [Hz]	Dauer einer Schwingung [s]	Maximale Auslenkung [m]	Zeit bis max. Auslenkung [s]
2.55	0.4	2.306	4.8504	1.153
8.9	0.112	4.718	8.856	2.359
15	0.06	15.708	6.270	7.854
40	0.025	41.88	5.9064	20.94

Tabelle 2: kritische Zeit für des Seil 1

Seil 2:

Eigenfrequenz des Seiles (S =100kN, $\ell =200\text{m}$):

$$f = \frac{1}{2 \cdot \ell_2} \sqrt{\frac{S^* g}{q}} = 0,3915 \text{ Hz}$$

Böigkeitsdauer: To [s]	Frequenz: f [Hz]	Dauer einer Schwingung [s]	Maximale Auslenkung [m]	Zeit bis max. Auslenkung [s]
2	0.5	2.41	0.9372	1.2
2.55	0.4	3.66	1.6032	1.83
8.9	0.112	9.890	0.80916	4.9
15	0.06	15.127	0.8004	7.563
40	0.025	41.460	0.7956	20.73

Tabelle 3: kritische Zeit für das Seil 2

4 Grenzlagen

Im Seilbahnbetrieb kann das Seil auf der Rollenbatterie aus verschiedenen Gründen mit einem Winkelfehler (Anlaufwinkel) auflaufen, was zu einer Seilentgleisung führen kann. Da dieser Winkel für die Entgleisungssicherheit stark ausschlaggebend ist, werden in diesem Abschnitt verschiedene Einflussparameter dargestellt und anschließend der Einfluss des Seitenwindes (sowohl mit konstanter Windgeschwindigkeit als auch mit überlagerter Windböe) auf den Anlaufwinkel genauer untersucht.

4.1 Definition des Anlaufwinkels

Durch die Rollenlast wird das Seil vertikal in die Rille mit der Kraft F_y gedrückt und durch eine seitliche Seilbewegung auf den Rollen verschoben, die durch seitliche Kräfte F_z verursacht wurden. Es entsteht der seitliche Anlaufwinkel α (Abbildung 10).

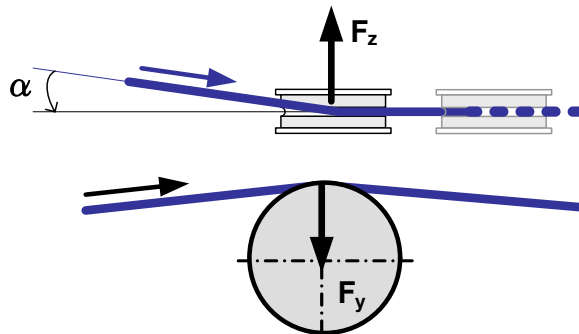


Abbildung 10: Rollenlast (F_z) und Seitenkraft (F_y) auf einer Förderseil-Tragrolle bei schrägem Seillauf

Beispielsweise entstehen Seitenkräfte F_z , wenn das Seil durch Seitenwind schräg auf der Rolle läuft, wodurch das Seil aus der Rille seitlich verschoben wird. Im räumlichen Berührungsbereich zwischen dem Seil und der Rille entstehen Kontaktkräfte, die das Gleichgewicht mit den äusseren Kräften F_z und F_y halten, vorausgesetzt, dass das Führungsvermögen der Rolle nicht überschritten wird.

Sonst springt das Seil aus der Rille. Bei einem Entgleisungsvorgang von Förderseilen überschreitet der Anlaufwinkel im allgemeinen zwei Grenzen (siehe Abbildung 11 vergleiche auch [07]):

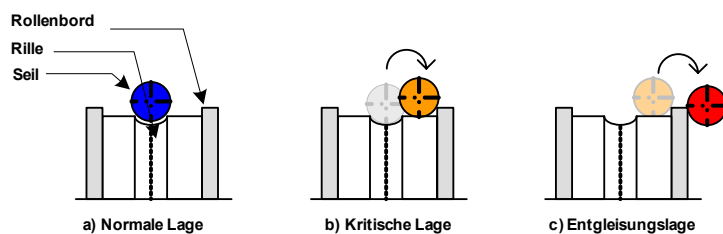
1. Der kritische seitliche Anlaufwinkel α_1

Der kritische seitliche Anlaufwinkel einer Rollenbatterie ist als der größte Anlaufwinkel definiert, bei dem das Seil im quasistationären Fall noch in den Rollenrillen läuft. Überschreitet der Anlaufwinkel diesen Wert ($\alpha > \alpha_1$), dann beginnt das Seil die Futterrille zu verlassen, um sich dem Flansch des Rollenbordes zu nähern.

2. Der seitliche Entgleisungswinkel α_2

Der seitliche Entgleisungswinkel ist als der größte Anlaufwinkel definiert, bei dem das Seil den Rollenbord gerade überspringt. Ist der Anlaufwinkel $\alpha = \alpha_2$, dann tritt eine Seilentgleisung ein. α_2 hängt dem Rollendruck und der Höhe und Form des gegenständlichen Rollenbords ab.

4.1.1 Grenzlagen des Förderseiles



**Abbildung 11: Seilgrenzlagen; a) Seil in der Ideallage b) Seilentgleisung aus der Rille
c) Seilentgleisung über den Rollenbord**

Es gibt drei definierte Lagen für das Seil auf den Rollen.

1. Seil verläuft in der Mitte der Rille

→ Normallage (Abbildung 11a); Anlaufwinkel $\alpha < \alpha_1$ (Idealfall $\alpha = 0$);

2. Kritische Seillage, wenn das Seil aus der Seilrille herausläuft, aber noch nicht

den Rollenbord überspringt; Abbildung 11b $\rightarrow \alpha_1 < \alpha < \alpha_2$

3. die dritte Grenzlage tritt dann ein, wenn es zur Seilentgleisung kommt ($\alpha > \alpha_2$)
Abbildung 11c.

Tritt bei einer Rolle der Rollenbatterie die kritische Lage ($\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ siehe Abbildung 11b) ein, kann man nicht mehr von einem sicheren Seilbahnbetrieb sprechen. In diesem Falle können nämlich die Fahrzeugklemmen zu Beginn der Rollenüberfahrt an die Bordscheibe stoßen, und die dadurch initiierten dynamischen Wippbewegungen die Entgleisung des Seiles aus der Rolle auslösen.

4.2 Einflussparameter auf den Anlaufwinkel

Die wesentlichen Kriterien für die Anlaufwinkel hat E. Engel bereits wie folgt festgehalten [08], [09], [03]:

- Für die Seilentgleisungssicherheit ist die Rollenlast, nicht die Stützenlast maßgebend;
- Maßgebend ist die Länge des auflaufenden Seilfeldes;
- Die Höhe des Rollenbordes ist von entscheidender Bedeutung;
- Die ordnungsgemäße Lage des Seiles ist in der Rille;

Dabei wurde das Problem in zwei Teilprobleme geteilt:

- a) Sicherheit gegen Verlassen der Rille;
- b) Sicherheit gegen Verlassen der Rolle, das ist die Überwindung der Bordscheibe und damit die Seilentgleisung;

E. Engel hat sich mit diesen beiden Problemen beschäftigt, wobei er sich nach den ersten Untersuchungen [08], [09], auf das Problem der eigentlichen Seilentgleisung konzentriert hat. Ebenso setzte sich G. Piskoty in seiner Dissertation [07] im Jahre 1995 mit dem Problem der Lagesicherheit des Seiles in der Seilrille auseinander.

4.3 Einfluss des Seitenwindes auf den Anlaufwinkel

Seitenwinde gefährden die Sicherheit der Seilbahn dahingehend, dass sie von der Seite auf das Seil drücken und eine seitliche Auslenkung wie im Kapitel „Schwingungen durch Seitenwind“ behandelt, verursachen. Jede seitliche Auslenkung des Seiles bedeutet zugleich eine Vergrößerung des Anlaufwinkels. Deshalb ist es erstrebenswert die Grenzwerte des kritischen Winkels α_1 und des Entgleisungswinkels α_2 im Zusammenhang mit der Windstärke bzw. Windböigkeit genauer zu untersuchen.

In Österreich werden diesbezügliche Untersuchungen derzeit so gehandhabt, dass bei einer Windgeschwindigkeit zwischen 50 km/h (13,889 m/s) und 60 km/h (16,667 m/s) gegen Verlassen des Seiles aus der Rille eine Sicherheit von 1 und gegen Seilentgleisung eine Sicherheit von 2 als ausreichend empfunden wird.

Dabei ist es sehr aufschlussreich zu untersuchen, wann der Anlaufwinkel α die Grenzwerte α_1 bzw. α_2 überschreitet und bei welcher Windstärke die Grenzwerte α_1 bzw. α_2 auftreten, insbesondere unter der Berücksichtigung von Windböen.

Es werden für diese Untersuchungen zwei Rechenmodelle für zwei unterschiedliche Seilbahnen mit folgenden Parametern aufgestellt.

	Seil 1	Seil 2
Seilspannkraft	$S_1 = 500\text{kN}$	$S_2 = 100\text{kN}$
Seilgewicht	$q_1 = 100 \text{ kg/m}$	$q_2 = 40\text{kg/m}$
Feldlänge	$l_1 = 1000\text{m}$	$l_2 = 200\text{m}$
Seildurchmesser	$d_1 = 50\text{mm}$	$d_2 = 34\text{mm}$

Tabelle 4

Ausgehend von der Gl- 6 (im vorherigen Kapitel) folgt für den seitlichen Anlaufwinkel nach der Parabelannahme Gl- 19:

$$Z = F_{ws} \cdot \frac{\ell^2}{8S} = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot d \cdot C_s \cdot \frac{\ell^2}{8S}, \quad \text{Gl- 18}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{4 \cdot Z}{\ell}\right) = \arctan\left(\frac{\rho \cdot d \cdot v^2 \cdot C_s \cdot \ell}{4 \cdot S}\right). \quad \text{Gl- 19}$$

Abbildung 12 zeigt den seitlichen Anlaufwinkel der zwei Förderseile (siehe Tabelle 4) an den Stützenrollen in Abhängigkeit von der konstanten Windgeschwindigkeit.

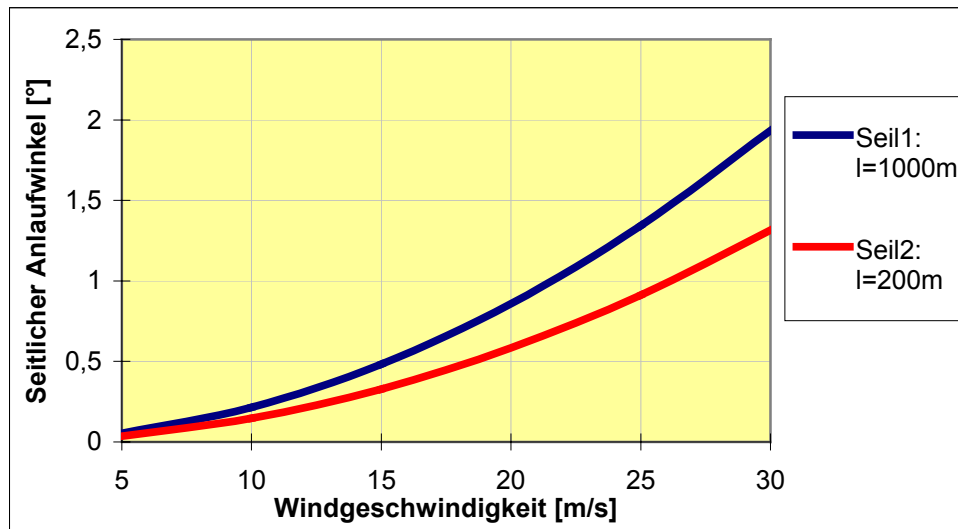


Abbildung 12: Seitlicher Anlaufwinkel in Abhängigkeit von der konstanten Windstärke

Für die Berechnung des Anlaufwinkels, unter Berücksichtigung von Windböigkeit ziehen wir wieder die Gl- 12 bis Gl- 15 (aus dem vorherigen Kapitel) heran.

Für die Windgeschwindigkeit setzen wir

$$V(t) = W_0 + K \cdot \sin^2 \frac{\pi \cdot t}{T_0} \quad \text{Gl- 20}$$

ein und berechnen über folgende Gleichungen die Seilauslenkung

$$Z(t) = F_{ws}(t) \cdot \frac{\ell^2}{8S} - c \cdot m \cdot \frac{\ell^2}{8S} \cdot \frac{d^2}{dt^2} Z(t) \quad \text{Gl- 21}$$

mit der Anfangbedingungen $Z(0) = 0, \frac{d^2}{dt^2}Z(0) = 0$ und

$$\frac{d^2}{dt^2}Z(t) = \frac{d \cdot \rho \cdot C_s}{2 \cdot c \cdot m} \left[W_o + K \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{T_o} t\right) - \frac{d}{dt}Z(t) \right]^2 - \frac{8S}{c \cdot m \cdot \ell^2} Z(t) . \quad \text{Gl- 22}$$

Der Anlaufwinkel ergibt sich aus der Berechnung der seitlichen Auslenkung (Gl- 22) und wird anschließend in die Gl- 19 eingesetzt. Abbildung 13 zeigt den seitlichen Anlaufwinkel beider Förderseile in Abhängigkeit von der konstanten Windgeschwindigkeit von 20m/s, überlagert mit einer Windböe der Stärke

$K \cdot \sin^2 \frac{\pi t}{T_0}$, wobei für die Berechnung die Eigenfrequenzen ($f_i = 1/T_i$) der zwei Seilbahnen eingesetzt wurden ($T_1=8,9s$ und $T_2=2,55s$).

Seil 1: $W_o=20m/s$ $f = 0,39 \text{ Hz}$			Seil 2: $W_o=20m/s$ $f = 0.11 \text{ Hz}$		
K [m/s]	Z [m]	α [°]	K [m/s]	Z [m]	α [°]
0	3.753	0.86	0	0.501	0.57
1	4.606	1.06	1	0.751	0.86
5	8.196	1.88	5	1.501	1.72
10	12.79	2.93	10	2.71	3.10
			20	4.83	5.517

Tabelle 5

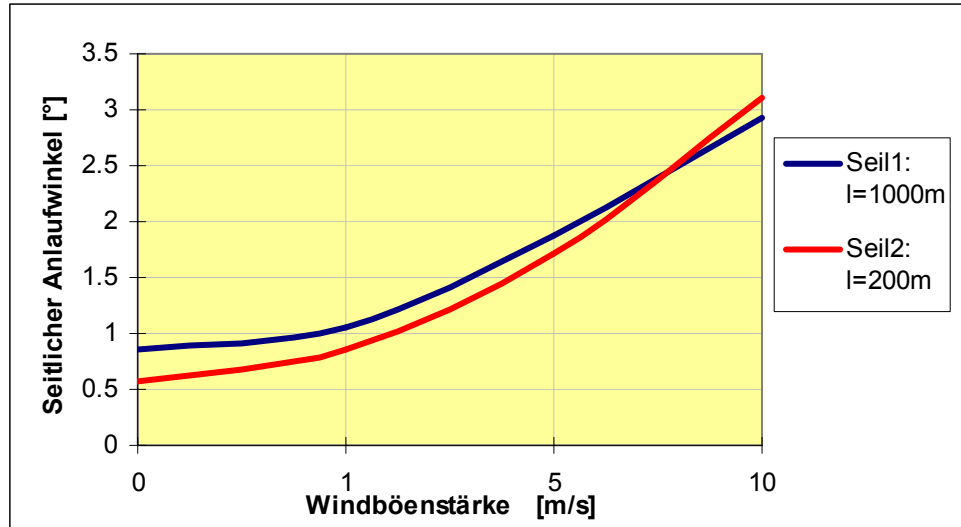


Abbildung 13: Seitlicher Anlaufwinkel in Abhängigkeit von der konstanten Windstärke überlagert mit einer Windböe $W_0 = 20 \text{ m/s}$, $T_0 = 2,55 \text{ s}$, $k = 0, 1, 5, 10, 20 \text{ [m/s]}$

Vergleicht man die Werte bei $k=0$ und $W=20 \text{ m/s}$ in Abbildung 13 mit dem in Abbildung 12 bei der gleichen Windgeschwindigkeit $w=20 \text{ m/s}$, so stimmen beide Winkelwerte für beide Seile überein ($\alpha_{\text{Seil1}} = 0.86^\circ$ und $\alpha_{\text{Seil2}} = 0.574^\circ$, Abbildung 5).

Abbildung 14 zeigt den Zusammenhang zwischen den Anlaufwinkel und der Frequenz, mit welcher die Windböe schwingt.

Seil 1:			Seil 2:		
T_0 [s]	Z [m]	α [°]	T_0 [s]	Z [m]	α [°]
			2	0.94	1.08
2.55	4.85	1.12	2.55	1.61	1.84
8.9	8.86	2.03	8.9	0.88	1.01
15	6.27	1.44	15	0.80	0.92
40	5.91	1.35	40	0.796	0.91

Tabelle 6

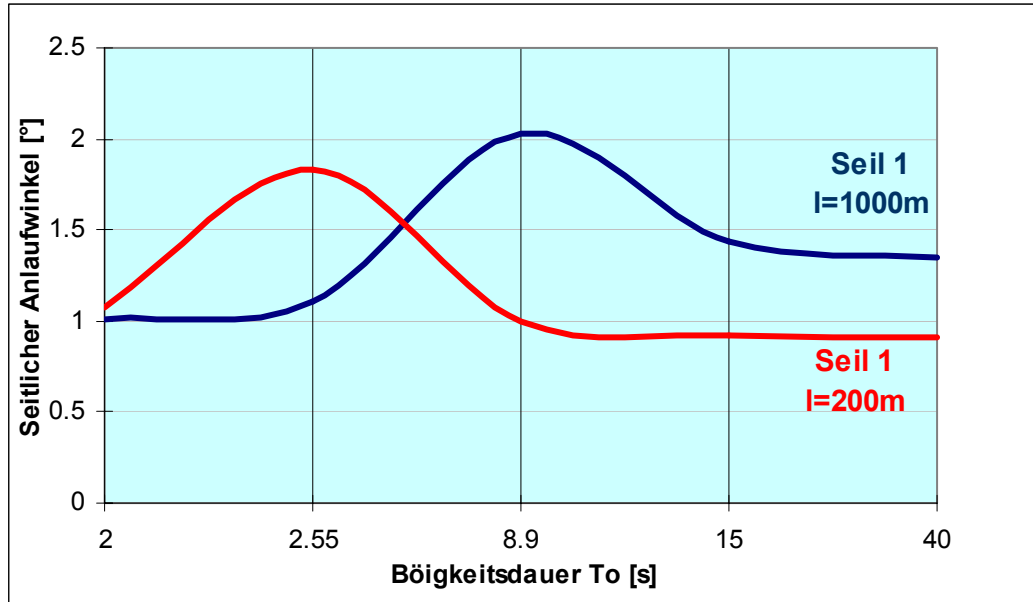


Abbildung 14: Seitlicher Anlaufwinkel α in Abhängigkeit von unterschiedlicher Dauer der Windböe

Abschließend wird ein Beispiel dargestellt, in dem die Windgeschwindigkeit nur aus Windböigkeit besteht. Das bedeutet $W_0=0$ und es folgt daraus für die Geschwindigkeit:

$$V(t) = K * \sin^2 \left(\frac{\pi t}{T_0} \right)$$

GI- 23

Seil 1:		
K [m/s]	Z [m]	α [°]
0	0	0
5	2.08	0.477
10	5.90	1.35
20	14.09	3.23

Seil 2:		
K [m/s]	Z [m]	α [°]
0	0	0
5	0.2466	0.283
10	0.924	1.059
20	2.993	3.43

Tabelle 7

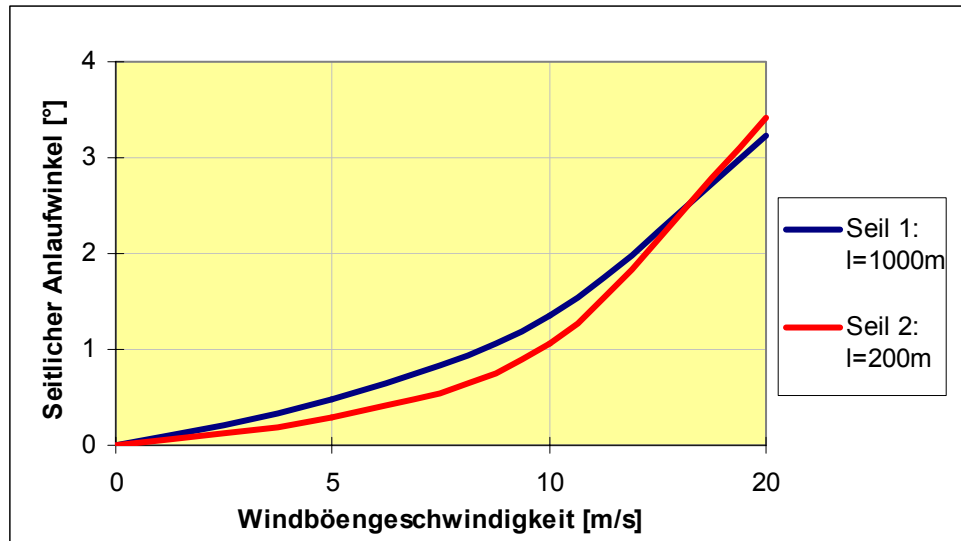


Abbildung 15: Seitlicher Anlaufwinkel für verschiedene Windgeschwindigkeiten, wenn der Wind nur böig ist und keine konstante Überlagerung hat ($W_o = 0$, $K = [0 .. 20]$ [m/s], $T_o = 2,55s$)

5 Entgleisungsschutz für bewegte Seile von Seilbahnen und Schleppliften

5.1 Grundlage der Entwicklung

Der Gegenstand dieser Arbeit ist es, einen weitgehenden Schutz gegen das Entgleisen von Seilen bei Seilbahnen zu entwickeln, insbesondere für Zug- und Förderseile von Seilschwebbahnen und von Schleppliften. Den Ausgangspunkt dafür bildet die Idee einer beweglichen, automatisch gesteuerten Fangeinrichtung, die eine bevorstehende Seilentgleisung erkennt, meldet und rechtzeitig vor dem Entgleisen des Seiles in Aktion tritt und damit das entgleisende Seil auffängt. Die vorliegende Entwicklung erscheint wünschenswert, da es derartige Einrichtungen bisher nicht gibt.

5.2 Stand der Technik

Im Folgenden werden Beispiele für konstruktive Maßnahmen bzw. Vorschläge überblicksartig (nach ihre Funktionsprinzipien) dargestellt:

5.2.1 Tastrollen, Tastfühler

Die ersten bekannt gewordenen Vorschläge zielten darauf, die ordnungsgemäße Seillage durch eine angepasste schmale Tastrolle [13] oder durch einen schmalen Tastfühler [14] in Verbindung mit einem elektrischen Schalter zu kontrollieren. Sobald das Seil seine ordnungsgemäße Lage seitlich verlässt, weicht die Tastrolle / der Tastfühler aus und betätigt den angeschlossenen Schalter, der die Bahn anschließend zum Stehen bringt. Diese Einrichtung, die störungsanfällig (Vereisung, Verschleiß) erscheint, hatte u.a. den Nachteil, dass bei einer Abschaltung die Schalteinrichtung leicht beschädigt und die Bahn ohne Montagearbeit nicht wieder in Betrieb gesetzt werden kann. Die Einrichtung fand daher keine Verbreitung.

5.2.2 Isolierte Seilrolle

Der Vorschlag geht davon aus, dass ein elektrisch geerdetes Förderseil beim Anlaufen am Rollenbord der Seilrolle, noch bevor es die Rolle durch Entgleisen verlässt, die Bahn abbremst [15]. Dabei wird die Auflaufrolle der Rollenbatterie mit einem elektrisch nicht leitenden Futter ausgestattet, elektrisch isoliert gelagert und mit einem Schalter verbunden, der beim Anlaufen des (über die übrigen Rollen geerdeten) Seiles an diesem Rollenbord betätigt wird. Eine praktische Anwendung fand dieser Gedanke, wegen der begrenzten Zuverlässigkeit bisher nicht.

5.2.3 Magnet-Schalter

Schon seit Mitte der sechziger Jahre [16] wurden Versuche und Patente bekannt gegeben, die richtige Seillage mit Hilfe eines Magneten [17] in Verbindung mit einem Schalter zu überwachen. Verlässt das Seil seine Sollage (bzw. definierte Grenzlage), dann tritt der Magnet in Funktion und betätigt einen Schalter, der die Bahn abbremst. Der Ausfall des Magnetfeldes wird aber vom Schalter nicht bemerkt, so dass die Einrichtung von begrenzter Sicherheit ist. Nach einer Betätigung der Schalteinrichtung ist eine Wiederaufnahme des Betriebes der Bahn erst nach entsprechenden Montagearbeiten möglich. Die den oben beschriebenen Lageüberwachungsvorschlägen anhaftenden Nachteile für den praktischen Betrieb und ihre zum Teil begrenzte Eigensicherheit haben bisher eine verbreitete Anwendung in der Praxis nicht ermöglicht.

5.2.4 Seillageüberwachung

Näherungsschalter im Bereiche der Einlaufrollen der Stützen zur berührungslosen Lageüberwachung (seitlich, auch lotrecht) des Seiles auf den Rollen [18] und [19] können als Vorwarnung vor einer möglichen Seilentgleisung dienen und das rechtzeitige Stillsetzen der Bahn ermöglichen (derzeit serienmäßig angewendet).

5.2.5 Feststehende Seilfangschuhe

Starre Fangschuhe, die neben den Seilrollen angebracht sind, sollen das entgleiste Förderseil am Abstürzen hindern, indem sie es auffangen. Praktische Erfahrungen und systematische Versuche (vgl. [03], [08], [09] und [20]) haben gezeigt, dass Seilfangschuhe dieser Art in vielen Fällen übersprungen werden und daher unwirksam bleiben. Die Ursache dafür liegt in der beengten konstruktiven Ausführung, die die Freigängigkeit der seitlich auspendelnden Fahrbetriebsmittel beim Stützenübergang berücksichtigen muss (derzeit serienmäßig angewendet).

5.2.6 Bruchstabschalter

Das entgleiste Förderseil betätigt einen Bruchstabschalter, durch den eine elektrische Verbindung zum Antrieb unterbrochen wird. Die Bahn wird durch die Bahnsteuerung abgebremst und der Betrieb damit stillgelegt. Dabei hat der Bruchstab keinen Einfluss auf das entgleiste Seil (derzeit verbreitet angewendet).

5.2.7 Gewichtsrolle

Eine besondere nach dem Waagebalkenprinzip konstruierte drehbare Rolle der Stützenbatterie wirkt als Schalter. Wenn der Rollendruck des Seiles nach der Seilentgleisung verschwindet, dreht sich die Rolle, durch ihr Eigengewicht nach unten und betätigt einen Schalter, der die Bahn abbremst und stilllegt (derzeit verbreitet angewendet).

5.2.8 Rollenbatterie gegen Drallstau

Besonders gestaltete Rollenbatterien zur besseren Bewältigung eines Drallstaus auf den Stützen [21] können verwendet werden, indem bei mehrrolligen Batterien die mittleren Rollen mit einem seitlich möglichst steil ansteigenden Futter bis zum Rollenrand ausgestattet werden. Ein Bord ist bei diesen Rollen nicht erforderlich.

5.2.9 Seitliche Kraft aufnehmen

Für den kritischen Schräglaufwinkel auf der Batterie sind die Seitenkräfte an deren einzelnen Rollen maßgebend. Folglich wirkt sich eine gleichmäßigere Seitenkraftaufteilung positiv auf das Führungsvermögen der Rollenbatterie aus [07].

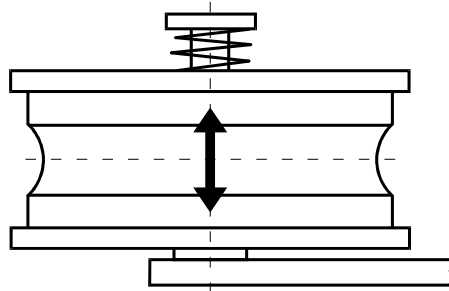


Abbildung 16: Seitliches Kraftaufnehmen zur Verbesserung des Führungsvermögens der Rollen [07]

Vor Einsetzen dieser Methode in der Praxis sollten jedoch die denkbaren Nebenwirkungen (z.B. dynamisches Verhalten) abgeklärt werden.

5.2.10 Mechanischer Schutz

Abbildung 17 zeigt einen konstruktiven Entgleisungsschutz [22], der während des Betriebes der Bahn eine Seilentgleisung auf den Stützen für beide Fahrtrichtungen verhindert.

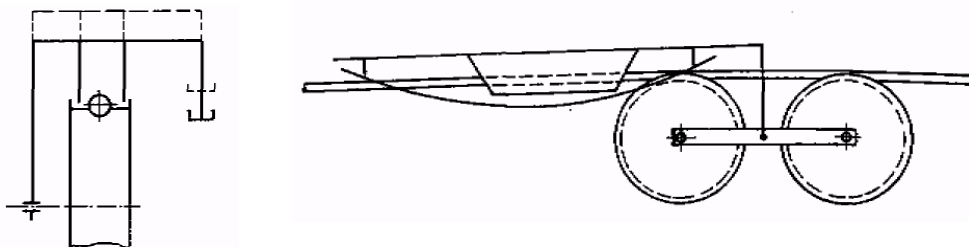


Abbildung 17: Konstruktiver Entgleisungsschutz

Eine praktische Erprobung dieser Konstruktion im Betrieb steht noch aus.

5.3 Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik

- Von allen oben genannten Maßnahmen werden nur wenige im Seilbahnbetrieb angewendet:
 - o Gewichtsrollen
 - o Bruchstabschalter
 - o Feste Seilfangschuhe
 - o Seillageüberwachung (in beschränkter Form)
- Nach dem derzeitigen Stand der Technik im Seilbahnwesen kommen Schutzvorrichtungen gegen die Gefahr des Seilentgleisens zur Anwendung, die entweder erst nach der eingetretenen Entgleisung wirksam werden (=Abschalte-Einrichtungen des Antriebes) oder ein Auffangen des entgleisten Seiles mit nur begrenzter Wahrscheinlichkeit ermöglichen (=feststehende Fangschuhe).
- Eine Schutzvorrichtung, die eine Seilentgleisung über den Rollenbord einer Stützenrolle hinaus verhindert, wird bis jetzt im Seilbahnwesen nicht verwendet.

5.4 Zielsetzung

Das Ziel der gegenständlichen Entwicklungsarbeit ist es, Vorrichtungen zu finden, die zwei Anforderungen erfüllen:

Lagekontrolle des Seiles während und außerhalb des Betriebes

→ **Meldeeinrichtung**

Sicherheitseinrichtung während des Betriebes gegen Entgleisen

→ **Sicherheitseinrichtung**

5.4.1 Meldeeinrichtung

Seitliche Abweichungen der momentanen Seillage aus der Solllage (Rillenmitte) über einen definierten Meldepunkt hinaus sollen sowohl in der Datenbank des Systems registriert, als auch in der Antriebsstation für die Überwachung angezeigt

werden, ohne dass dadurch automatische Reaktionen ausgelöst werden.

Derartige Abweichungen der Seillage können fallweise bei mäßigem Seitenwind, zufolge von Drallstau oder anderen Ursachen auftreten. Sie sind unbedenklich für den sicheren Betrieb der Seilbahn und sollen keine Betriebsstörungen auslösen.

5.4.2 Sicherheitseinrichtung

Seitliche Abweichungen der Seillage über einen definierten Sicherheitspunkt hinaus, die eine Gefahr einer bevorstehenden Seilentgleisung beinhalten, sollen, zusätzlich zur Aktivierung der Meldeeinrichtung, folgende automatische Reaktionen auslösen:

a) Fangposition

Der Fangvorrichtung wird aus der Normallage in die ausgefahrene Lage (= Fanglage) bewegt.

b) Der Antrieb wird automatisch abgeschaltet.

Dabei sind zwei Fälle möglich:

1) Ohne Seilentgleisung

Das Seil entgleist nicht über den äußeren Rollenbord, sondern kehrt selbständig oder durch gezielte Einwirkungen wieder in seine Sollage, wenigstens aber innerhalb des Meldepunktes, zurück. In diesem Falle kann der Fangschuh von der Station aus wieder in seine Normallage gebracht und der Antrieb der Bahn eingeschaltet werden.

2) Nach der Seilentgleisung

In diesem Falle kann die Fangvorrichtung von der Station aus nicht in seine Normallage zurückgebracht werden und auch der Antrieb der Bahn nicht wieder eingeschaltet werden. Erst muss das Seil wieder in seine Sollage, wenigstens aber innerhalb des Meldepunktes, zurück gebracht werden². Erst dann kann die

² Außerdem steht in den österr. Seilbahn Richtlinie 2004 diesbezüglich folgendes:
Nach einer durch eine Sicherheitseinrichtung ausgelösten Stillsetzung der Anlage darf ein

Fangeinrichtung von der Station aus wieder in ihre Normallage gebracht und der Antrieb der Bahn eingeschaltet werden.

5.5 Systementwicklung

Das unter 5.4 gesteckte Ziel wird durch ein System mit folgenden Funktionseinheiten realisiert:

- Signalerfassung (Sensoren)
- Signalverarbeitung (Steuerung)
- Signalübertragung (Schnittstellen und Datenkommunikation)
- Signalausgabe (Aktoren) und Visualisierung
- Visualisierung (Meldereinrichtung)

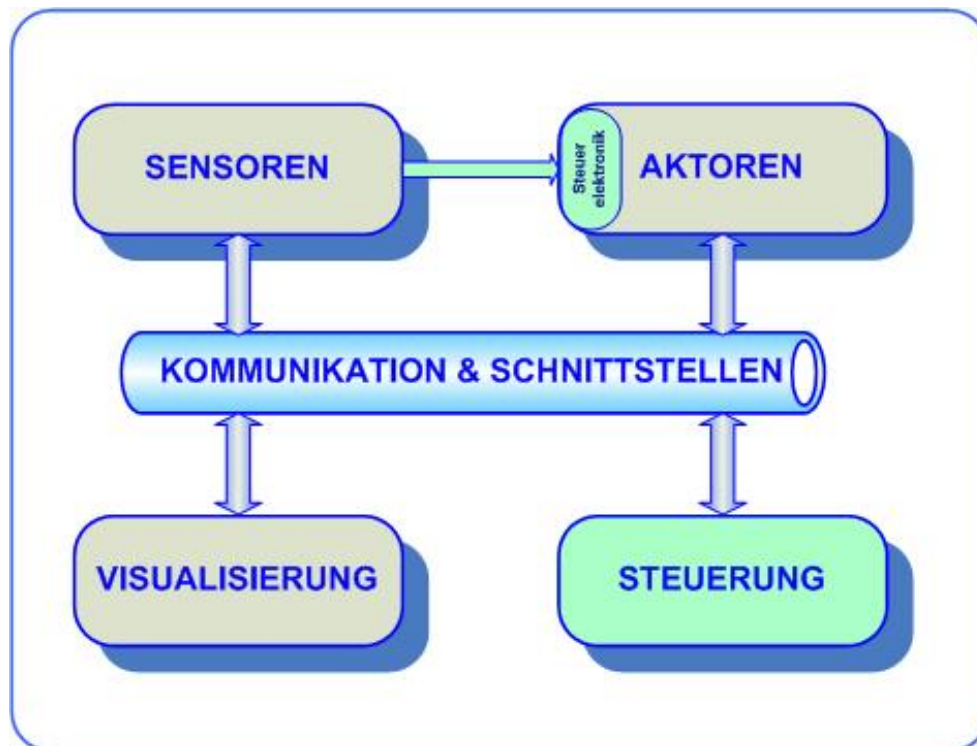


Abbildung 18: Systemkomponenten des Entgleisungsschutzes

neuerliches Anlaufen der Anlage erst möglich sein, nachdem die der Situation angemessenen Maßnahmen getroffen worden sind.

5.6 Signalerfassung (Sensoren)

Für die Signalerfassungsaufgaben können mehrere Arten von Sensoren eingesetzt werden, die verschiedene physikalische Funktionsprinzipien haben.

Es gibt beispielsweise

- Optische Sensoren
- Ultraschallsensoren
- Kapazitive Sensoren
- Magnetische Sensoren
 - Wirbelstromsensoren
 - Induktive Sensoren

Nach einer Literatur- [23] [24] [25] und Internetrecherche³ (siehe Anhang Firmenadressen) zwecks Auffindung einer passenden Methode für die Signalerfassung wurden die verschiedenen Möglichkeiten bei Verwendung berührungsloser Näherungssensoren oder Abstandsmessung genauer untersucht. Es folgt eine Kurzfassung der Ergebnisse dieser Untersuchung:

Die optischen und Ultraschallmeßmethoden sind aufgrund des physikalischen Prinzips für die vorgegebenen Bedingungen der Signalerfassung nicht geeignet. Diese zwei Methoden besitzen zwar hohe Genauigkeit, setzen aber für die einwandfreie Funktion eine freie Messstrecke zum Seil voraus. Diese Bedingung kann im Seilbahnwesen auf der Stütze (raue Umweltbedingungen: Eis, Schnee, Schmutz, etc.) nicht erfüllt werden.

Obwohl der kapazitive Sensor robust und auch für die Erkennung von metallischen Objekten gut geeignet ist, scheidet er auch wegen rauer Umweltbedingungen auf der Stütze aus. Auch wegen seiner Empfindlichkeit gegenüber fast allen Materialien würde der Messwert alleine durch die Veränderung der Umweltbedingungen

³ Auch zugesendete Informationsdokumente von Sensorenherstellerfirmen (siehe auch Anhang Firmenadressen)

verfälscht werden.

Die untersuchten Möglichkeiten bei magnetischen Sensoren lassen sich in zwei Gruppen unterteilen:

- die das Magnetfeld messenden Sensoren (Hall-Sensoren, Feldplatten und Sättigungskernsonden) sowie

- Sensoren, die Änderungen in ihrem Streufeld auswerten (induktive und Wirbelstromsensoren).

Bei der ersten Gruppe besteht als grundsätzliches Problem die Erzeugung des Magnetfeldes. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn die Position eines Dauermagneten mit ausreichender Feldstärke erkannt werden soll. Da das Anbringen eines Dauermagneten auf dem Seil nicht möglich ist, muss das Feld vom Sensor selbst erzeugt werden. Daher es ist besser, induktive Sensoren einzusetzen.

Nachdem die Funktionsprinzipien beider Arten der Sensoren (Wirbelstrom- und induktive Sensoren) in Betracht gezogen worden waren, wurde die Entscheidung zugunsten der Verwendung von induktiven Sensoren für die Signalerfassung getroffen.

Induktive Näherungssensoren haben neben den gleichen Vorteilen, die die anderen Sensoren (berührungsfrei, robust, erschütterungsunempfindliche, hohe Lebensdauer, schnelle Schaltzeit) besitzen, auch noch folgende Vorteile:

- Lichtunempfindlichkeit (Nachteil der optische Sensoren)
- Unempfindlichkeit gegen raue Umweltbedingungen (Nebel, Regen, Schnee)
- Schmutzunempfindlichkeit (gegenüber kapazitiven Sensoren)

5.7 Signalverarbeitung (Steuerung)

Die von den Sensoren erfassten Signale werden von der Steuerhardware und/oder Steuersoftware bearbeitet und entsprechende Steuersignale erzeugt.

Die Steuersignale werden an die Ausgänge gelegt und über Schnittstellen an die Eingänge des Kommunikationssystems weitergegeben.

An das Kommunikationssystem sind beispielsweise folgende Aktoren bzw. Systeme direkt oder über Schnittstellen angeschlossen:

- Fangeinrichtungen an den Stützen;
- Überwachungssysteme und Meldeeinheiten bzw. Warneinrichtungen;
- Funksysteme oder weiterleitende Kommunikationssysteme z.B. GSM, GPS, Internet, ... ;
- Antriebsstation der Seilbahn und der Seilbahnsteuerung;

Die von den Sensoren erfassten Signale werden auf zwei Arten bearbeitet:

5.7.1 Hardware

Die Steuerhardware ist dafür zuständig, auf die von Sensoren erfassten Signale zu reagieren und das System direkt zu steuern.

Für die Hardwaresteuerung könnte beispielsweise eine oder mehrere folgender Komponenten herangezogen werden:

- SPS (Speicher programmierbare Steuerung),
- PSS (Programmierbare Sicherheitsteuerung),
- μ c (Mikrokontrolle) oder
- CPU (Central Processing Unit), ein dafür geeigneter Rechner, der mit dem Seilbahnsicherungssystem auch zusammengeschlossen sein könnte;

5.7.2 Software (SW)

5.7.2.1 Entscheidungstools

Entscheidungstools sollen durch den Vergleich mit den Referenzwerten (aus dem Datenbanksystem) erkennen, ob es sich um eine echte Seilentgleisung handelt.

→ das System lehren → System muss immer intelligente Entscheidungen treffen (z.B. durch Vergleiche mit Datenbank Daten)

Mit dieser Software soll unbedingt ein Fehlalarm vermieden werden.

Ein Fehlalarm würde hohe Kosten für den Betreiber nach sich ziehen, da der Seilbahnbetrieb unplanmäßig zum Stillstand gebracht wird.

5.7.2.2 Visualisierungssoftware

Software für die Applikation und Visualisierung (siehe auch Kapitel 9) :

- für Überwachungszwecke und Meldungen
- für Bedienung und manuelle Steuerung des Systems
- für die Verwaltung von Daten (Datenbank, Informationen vergleichen und Entscheidungstools)

Ein Seilentgleisungsdetektor (Sensoren auf den Stützen) misst eine geeignete Messgröße und leitet die Signale über das Kommunikationssystem an die Systemsteuerung weiter.

Die Systemsteuerung hat die Aufgabe in erster Linie die Aktoren zu steuern und die Steuersignale, auch an die Steuersoftware, weiterzuleiten.

Die Steuerungssoftware hat zum einen die Aufgabe, die Daten so aufzubereiten, dass eine Seilentgleisung durch den Vergleich mit Referenzwerten sicher erkannt werden kann (Fehlalarm ausschließen oder erkennen).

Zum anderen muss die Steuerungssoftware im Falle einer Seilentgleisung die nötigen Alarmierungs-, Meldungs- und Visualisierungssignale bzw. -daten verarbeiten und über das Kommunikationssystem an die Meldeeinrichtung und die Visualisierungszentrale weiterleiten.

5.8 Kommunikation und Schnittstellen

Das Kommunikationssystem ist deshalb notwendig, um alle Systemkomponenten miteinander zu verbinden und durch Datenaustausch zu kommunizieren. Das

Kommunikationssystem soll für die Datenübertragung folgende Eigenschaften besitzen:

- Zuverlässigkeit
- hohe Datensicherheit
- hohe Verfügbarkeit
- schnelle Datenübertragung (Echtzeit)
- Erweiterbarkeit (neue Systemkomponenten)

Die Schnittstellen sind die Verbindungen einer Systemkomponente mit diesem Kommunikationssystem, über die die Übertragung von Daten und Steuersignalen erfolgt.

Die Kommunikation zwischen den Systemkomponenten kann auf verschiedene Arten ermöglicht werden.

5.8.1 Leitungen (direkt Verdrahtung)

Über Drähte (Kupfer- oder Lichtleiter) werden Sensoren und Aktoren durch ein analoges/digitales Signal mit der Steuerung oder Auswerteeinheit direkt verbunden. Für jede Verbindung zwischen Sensor oder Aktor und der Steuerung ist bei dieser Technik ein 2-aderiges Kabel notwendig.

5.8.2 Bussysteme

Bei der Verwendung von Bussystemen werden alle Systemkomponenten (Sensoren, Aktoren, Steuerung, ...) an ein Buskabel (je nach Bussystem 2-, 4- oder 5-adrig) angeschlossen.

Durch den Einsatz von Bussystemen lassen sich die Installations- und Wartungskosten sowohl in der Signalerfassungsebene (Feldebene) als auch in der Steuerungsebene deutlich reduzieren.

Vor dem Ersteinsatz sollte allerdings sorgfältig geprüft werden, welches Bussystem den optimalen Nutzen in der beabsichtigten Anwendung verspricht (abhängig von Seilbahnlänge, Datenmengen, Anzahl der Stützen bzw. Systemkomponenten, ...).

Eine wirtschaftlich effiziente Lösung wäre die Verwendung von bestehenden Bussystemen.

Lichtwellenleiter

Bei besonders langen Seilbahnen mit vielen Stützen (bzw. bei hohen Datenmengen für die Visualisierung) ist es sehr nützlich die Daten über LWL zu übertragen.

5.8.3 Andere Kommunikationssysteme

Es können auch Funk-, GPS oder andere Netzsysteme, alleine oder in Kombination mit anderen Kommunikationssystemen für die Datenübertragung verwendet werden, wenn diese die Eigenschaften gemäß Abschnitt 5.8 erfüllen.

5.9 Aktoren

Als Aktor wird hier die Fangeinrichtung bezeichnet, die für das entgleiste Seil so konstruiert wird, dass sie von diesem mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht übersprungen werden kann. Diese Fangvorrichtung ist ein beweglicher Seilfangschuh [10] der beim Entgleisen des Seiles automatisch aus seiner Normal-lage so weit nach außen bewegt wird, dass er das Seil sicher auffängt. Er muss derart konstruiert sein, dass er die Vorbeifahrt eines Fahrbetriebsmittels, auch nach der Seilentgleisung, nicht behindert.

Vorschläge für einen beweglichen Seilfangschuh sind seit mehreren Jahrzehnten gemacht worden, kamen jedoch nicht zum Einsatz, da ein geeignetes System zur Seillageüberwachung und Steuerung des Seilfangschuhes nicht verfügbar war.

Abbildung 19 stellt ein mögliches Steuerungssystem für die Steuerung der Bewegung dieser Aktoren dar. Die Steuersignale an den Aktoren sind immer als Reaktionen auf die von den Lageüberwachungssensoren empfangenen Abweichungen von der Normallage zu sehen.

Um eine sichere (und auch schnelle durch die direkte Sensor-Aktor-Steuerung) Aktorsteuerung zu erreichen, werden die Steuersignale auf zwei Wege übertragen, da durch Steuerungsredundanz die Sicherheit des System (besonders im Entgleisungsfall) erhöht wird (Abbildung 19).

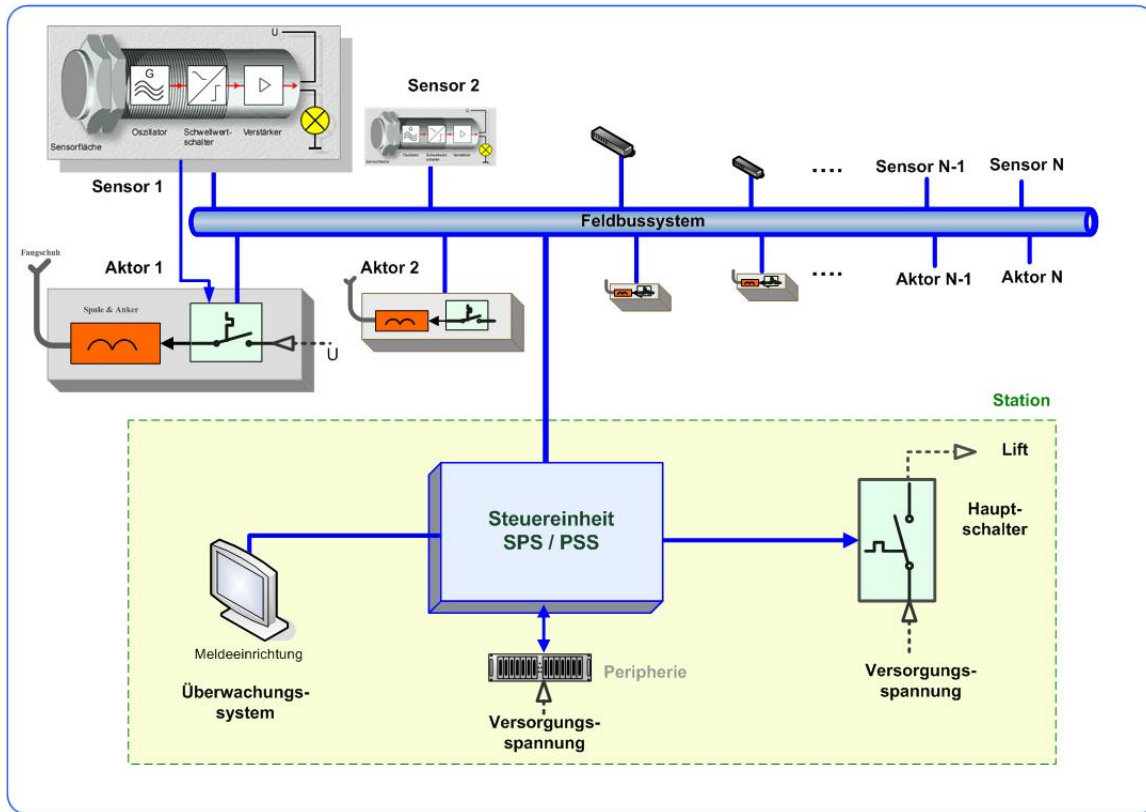


Abbildung 19

Jede Stütze der Seilbahn kann mit zwei solchen Fangeinrichtungen ausgestattet werden, je eine für beide Fahrrichtungen.

Alle Aktoren werden über das Kommunikationssystem gesteuert. Jeder Aktor empfängt und sendet fortlaufend Signale von bzw. zur Steuereinheit und der Visualisierungssoftware.

6 Prototyp

Der entwickelte Prototyp in diesem Kapitel geht von den unter den Patentnummern AT411983B [10] und AT 388146B [12] und erteilten Patenten aus. Dieser neu entwickelte Prototyp wurde sowohl im Labor des Institutes für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnwesen der TU Wien getestet und es wurden Naturversuche unter betrieblichen Verhältnissen (an der Seilbahn) mit ihm durchgeführt, um auftretende Fehler und Ungenauigkeiten zu korrigieren, ihn zu verbessern und zu optimieren.

Das Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnwesen wurde mit dieser Entwicklung vom österreichischen Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (**bmvit**) beauftragt.

Die Hauptkomponenten dieses Systems sind:

1. Sensoren für die Signalerfassung
2. Aktor (Fangeinrichtung) und Meldeeinrichtung → Signalausgabe
3. Steuerungssystem für die Signalverarbeitung
4. Daten- und Energieübertragung



Abbildung 20: Komponenten des Prototyps

Im folgenden Abschnitte werden diese Komponenten des Prototyps genauer erläutert.

6.1 Signalerfassung

Zur Signalerfassung wurden zwei unterschiedliche Näherungssensoren eingesetzt. Als erster Sensor ist der im Seilbahnwesen zur Überwachung der Seillage bereits bekannte und bewehrte Näherungssensor verwendet worden. Zu Vergleichszwecken wurde noch ein zweiter Näherungssensor, mit einer höheren Schaltzeit, getestet. Beide Sensoren waren im Labor auf ihren Schaltabstand, ihre Schaltzeit und auf ihre aktive Fläche hin genauer untersucht worden, bevor sie auf die Stütze zur Durchführung der Naturversuche montiert wurden.

Beim Austritt des Metallseiles aus dem Ansprechbereich (Abbildung 21) generiert der Sensor ein Signal (vergleiche auch [12]). Melde- und Seilentgleissignale werden auf diese Weise vom Sensor erfasst und an die Eingänge der Steuereinheit gesendet.

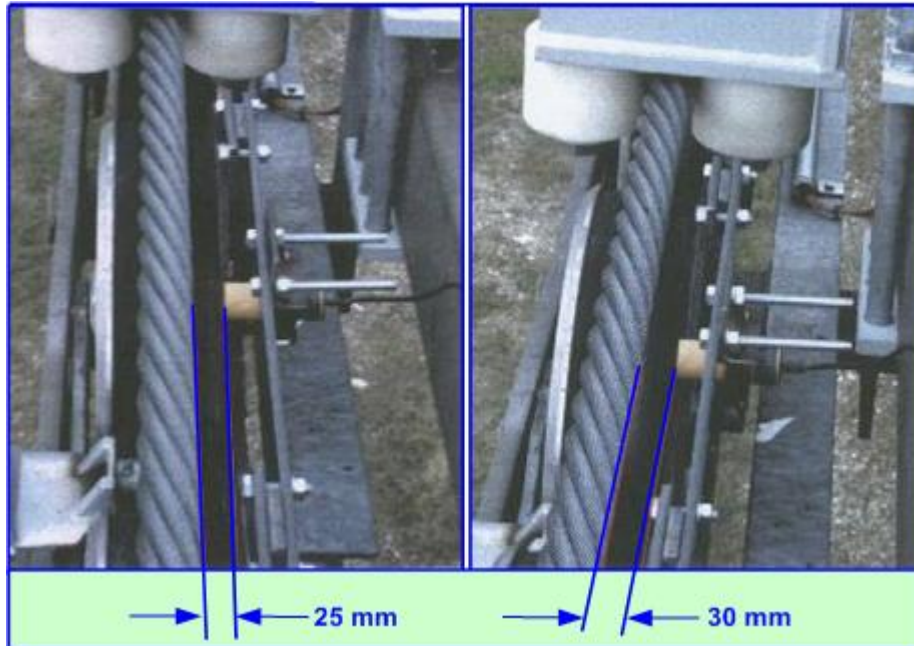


Abbildung 21: bei einer Abweichung 5 mm von der Normallage schaltet die Steuerung die Meldeeinrichtung von grün auf rot

6.2 Signalverarbeitung

6.2.1 Steuereinheit:

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zu Testzwecken ein Steuergerät entwickelt und hergestellt. Am Gehäuse des Steuergeräts befinden sich die Bedienungsanlage und die Meldereinrichtung, die zum Betätigen bzw. Beobachten der Versuche dienen.

Die entwickelte Steuereinheit ersetzt bei den gegenständlichen Labor- und Naturversuchen die künftigen Einrichtungen im Fangschuh und in der Antriebsstation. Die Steuereinheit enthält elektrische und elektronische Komponenten, die allen extremen Umweltbedingungen an der Stütze der Seilbahn standhalten. Die vom Sensor induzierten Signale werden in der Steuereinheit verarbeitet und je nach Signalart

- an den Elektromagneten des Fangschuhs bzw.
- an das Überwachungssystem und die Meldeeinrichtung (Antriebsstation)

geleitet.

Signalverarbeitung:

Die vom Sensor erfassten Signale werden von der Steuerelektronik empfangen und bearbeitet. Anschließend werden die Steuersignale an die Ausgänge gesendet, die bestimmte Aktionen auszulösen haben.

Steuersignale:

Die Steuersignale werden von der Steuereinheit in Abhängigkeit von den Eingangssignalen erzeugt und an die Ausgänge geleitet.

Über die Ausgänge werden folgende Aktionen gesteuert:

- Aktorsteuerung
- Steuerung der Antriebsstation
- Steuerung der Meldereinrichtung
- Steuerung der Magnetkraft

6.2.2 Regelung der Magnetspannung

Durch die Regelung der Magnetspannung wird folgendes erreicht:

- die Magnetkraft wird gesteuert;

Da die Anziehungskraft eines Elektromagneten mit wachsendem Abstand (=Hub) sinkt, wird die Magnetspannung zwischen 12V und 24V mittels regeltechnischer Methoden an die Magnetkraftkennlinie angepasst.

- die Schaltzeit des Magneten wird verkürzt;

Die höheren Schaltzeiten sind durch Beschaltungsmaßnahmen beeinflussbar (in diesem Fall verkürzte Einschaltzeit), wobei die Abschaltzeit des Aktors durch die Druckfeder zusätzlich verkleinert wird.

6.3 Signalausgabe

6.3.1 Der Aktor (Fangeinrichtung)

Der um ein Gelenk drehbar gelagerter Fangschuh wird durch einen Elektromagneten, in der Normallage gehalten und eine Druckfeder in die Fanglage bewegt.

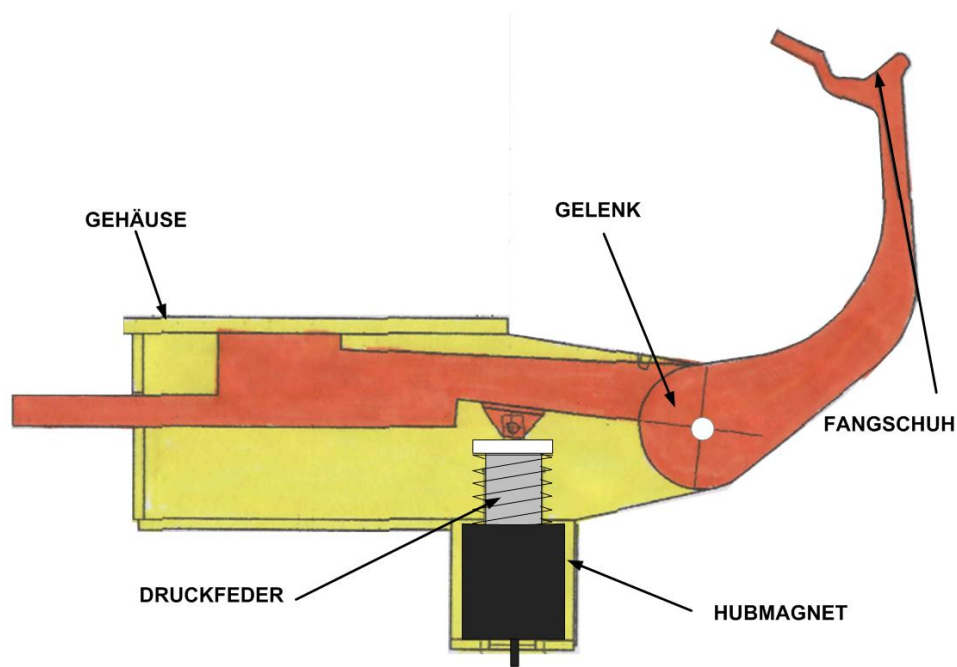


Abbildung 22: Aufbau des Aktors

Im folgenden Teilabschnitt werden die Komponenten des Aktors, die in der Abbildung 22 dargestellt sind, näher erläutert.

6.3.1.1 Gelenk

Das Gelenk des drehbaren Teiles ist derart ausgebildet, dass es die von einem entgleisten Seil erzeugten Längskräfte und Gehängestöße aufzunehmen vermag. Der drehbare Teil befindet sich hinsichtlich des Gelenkes in einem labilen Gleichgewicht (Waagebalken); in der Fanglage hingegen wirkt der ausladende Schuh auf die Fanglage durch das Eigengewicht stabilisierend.

6.3.1.2 Feder

Fällt die Kraft des Elektromagneten aus, dann drückt die Druckfeder (als Spiralfeder

ausgebildet) den Schuh in die Fanglage und hält ihn dort fest.

In der Normallage des Schuhs ist die Federkraft um ein bestimmtes Maß geringer als die Kraft des Elektromagneten.

Die Spiralfeder/Druckfeder wird als Sicherheitselement betrachtet. Da diese Feder während der gesamten Verwendungsdauer nur eine sehr geringe Zahl von Lastwechseln erfährt, ist erfahrungsgemäß die Wahrscheinlichkeit ihres Versagens unbedeutend gering.

6.3.1.3 Aktorgehäuse

Das Gehäuse enthält die elektronische Signalverarbeitung, die Feder und den Elektromagneten.

Das Gehäuse ist durchbrochen von

- den elektrischen Leitungen (dicht)
- dem Schlitz für den Fangschuh
- dem Hebelfortsatz zur manuellen Betätigung.

Der außen liegende Schlitz für den Fangschuh wird durch eine elastische Manschette gegen Wassereintritt abgedichtet.

6.3.1.4 Elektromagnet

Der eingebaute, auswechselbar befestigte Gleichstrommagnet mit feststehender Wirkung und beweglichem Kern (=Anker) entwickelt eine Kraft, die größer ist als die Druckkraft der gespannten Feder.

Im Prototyp wurde ein Hubmagnet der Type RM80 (siehe Abbildung 23), von der Firma Kuhnke, für die Bewältigung folgender mechanischer Kräfte verwendet:

- $F_{\text{mech}} = 70\text{N}$ anzuziehen bei einem Hubweg $s = d + x = 21\text{ mm}$ und
- $F_{\text{mech}} = 90\text{N}$ Haltkraft bei einem Hubweg $s = d = 2\text{ mm}$ anzuhalten

Hochleistungs-Hubmagnet RM 080

Hochleistungs-Hubmagnet RM 080

Gewicht:
Magnet: ca. 2900 g
Anker: ca. 500 g
Standard:
Spannung: 24 V DC
Litze: 20 cm
Isolierstoffklasse: F ($T_{\text{Grenz}} = 155\text{ °C}$)

Isolationsgruppe
nach: VDE 0110 C 450
Prüfspannung: 2500 V (eff)

Wartungsfreie Ankerlagerung
(DU-Lager) für höchste Lebensdauer.
Bei Ausführung mit Standard-Hubbe-
grenzung Hub 20 mm.
In Sonderausführung mit eingebauter
Rückholfeder lieferbar.



Heavy Duty Linear Solenoid RM 080

Heavy duty linear solenoid RM 080

Weight:
Complete
solenoid: appr. 2900 g
Armature: appr. 500 g
Standard:
Voltage: 24 V DC
Flying leads: 20 cm
Insulation class: F (max. permissible
temperature = 155 °C)

Insulation group
according to: VDE 0110 C 450
Test voltage: 2500 V (eff)

Service-free DU armature bearing for
maximum durability.
Stroke of version with standard stroke
limiter: 20 mm.
Return spring optional.

Zul. rel. Einschaltdauer ED) ¹⁾	%	100	45	25	15	5	% Perm. duty Cycle (ED) ¹⁾
Nennaufnahme P_N	W	37	94	149	226	685	W Nominal coil power P_N
Anzugszeit (ED)	ms	75				34	ms Actuation time (ED)

¹⁾ Bei Montage auf eine Kühlfläche ist eine höhere ED zulässig (bitte anfragen)

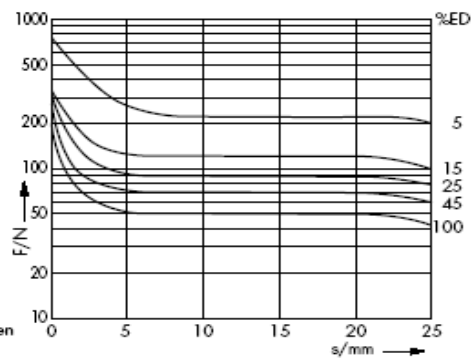
¹⁾ If solenoid is mounted directly onto a flat metal surface the duty cycle can be extended (please ask for advice)

Kraft-Weg-Diagramm $F = f(s)$

W = Waagerechte Kennlinie

Kraft bei waagerechter Bewegungsrichtung und bei 90 % Nennspannung und betriebswarmer Wicklung

Hub $s = 0$ entspricht dem angezogenen, bestromten Zustand



Force vs. Stroke diagramm $F = f(s)$

W = horizontal characteristic

Force measured when operating in horizontal position, at 90 % rated voltage and winding at operating temperature

stroke $s = 0$ corresponds to armature in fully home position

**Abbildung 23: Datenblatt, des im Prototyp eingebauten Magnetes
der Type RM 080 von der Firma Kuhnke (vor der Energieoptimierung) [26]**

Während der Testphasen der Fangeinrichtung hat ein Hubmagnet einen Stromverbrauch von $I=6,21\text{A}$ bei einer Versorgungsspannung von 24V verbraucht (bzw. $12,42\text{A}$ bei 12V Versorgungsspannung) was eine Leistung von

$$P=149\text{ W}$$

pro Magnet bedeutet.

Wie deutlich zu erkennen ist, ist der Energieverbrauch für die Betriebsdauer sehr hoch. Dieser hohe Leistungsverbrauch wird im Kapitel „Energieberechnung und -optimierung“ minimiert.

6.3.2 Konstruktion des Aktors

6.3.2.1 Dimensionierung

Maßgebend für die Abmessungen und Tragfähigkeit der mechanischen Teile sind;

a) der Stützendruck

Der für die Versuche entwickelte Prototyp ist derart konstruiert, dass er für eine 8-rollige Batterie mit ca. 60 kN Stützendruck geeignet ist.

b) die Gehänge-Freigängigkeit

Maßgebend ist die vorhandene Konstruktion des Gehänges (Abbildung 24), der Fahrbetriebsmittel und deren Genauigkeit bei einer seitlichen Auspendelung von 35% , wenn der Schuh in der Fanglage ist.

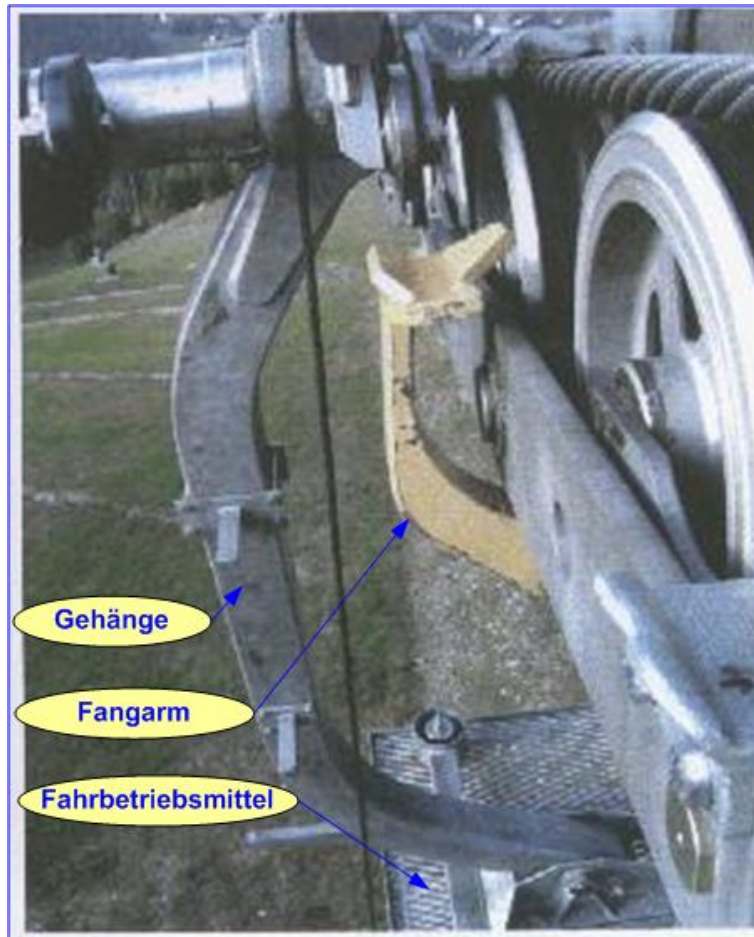


Abbildung 24: Das Fahrbetriebsmittel kann auch bei ausgefahrenem Fangschuh (Fangposition) ungehindert vorbeifahren

Bei einer stärkeren Auspendelung des Fahrbetriebsmittels als 35 % erscheint im Hinblick auf die gekrümmte Formgebung des Schuhs und seine gefederte Lagerung ein Anstoßen des Gehänges während der Vorbeifahrt ungefährlich.

6.3.2.2 Ausladung

Die Neigung der Verbindungslinie zwischen der Rollenbordkante und dem Außenbord des Fangschuhs ist ein Maß für die Auffang-Wahrscheinlichkeit des entgleisenden Seiles durch den Fangschuh.

In der Normallage wirkt der entwickelte Prototyp günstiger als die bisher üblichen festen Seilfangschuhe, die auf den Rollenwiegen befestigt sind. Wie Versuche

gezeigt haben wirkt insbesondere die Anordnung beim Batterielager günstiger als die bisherige Anordnung der festen Schuhe.

In der Fanglage wächst der obige Neigungswinkel des verwendeten Prototypen bei 3,6 cm horizontaler Ausladung.

Dieses Maß wurde so gewählt, dass alle derzeit verwendeten Gehängekonstruktionen die ausreichende Freigängigkeit bei 35 % seitlicher Auspendelung haben.

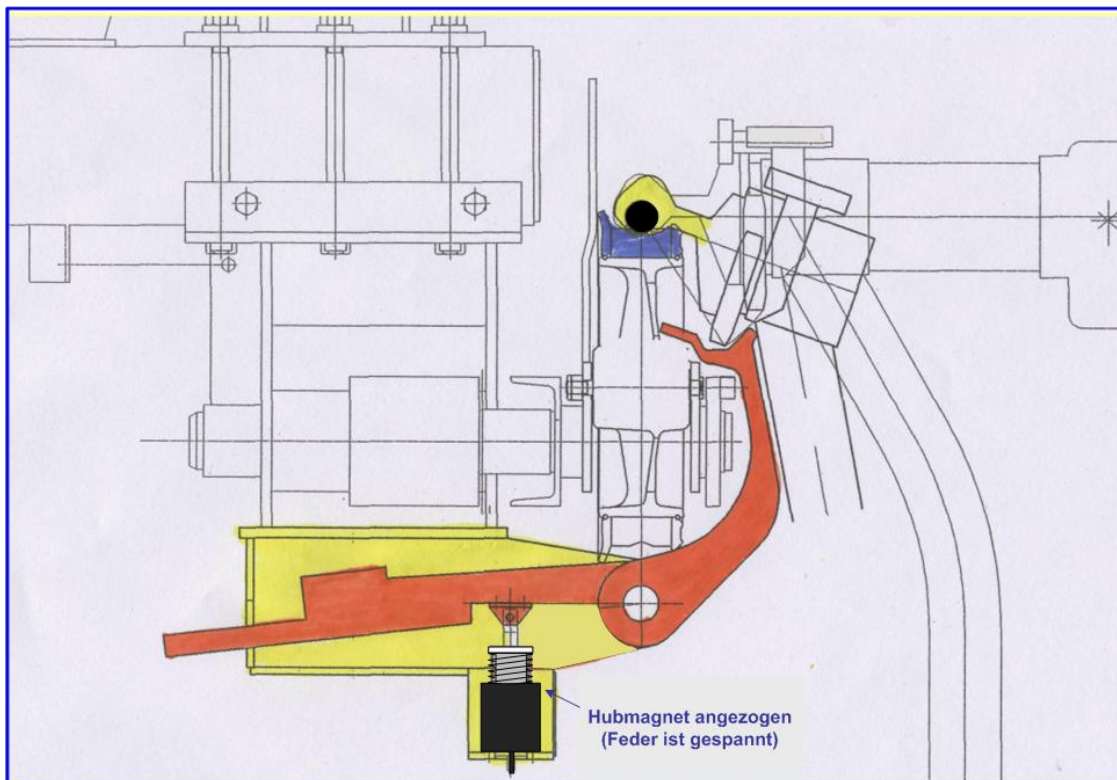
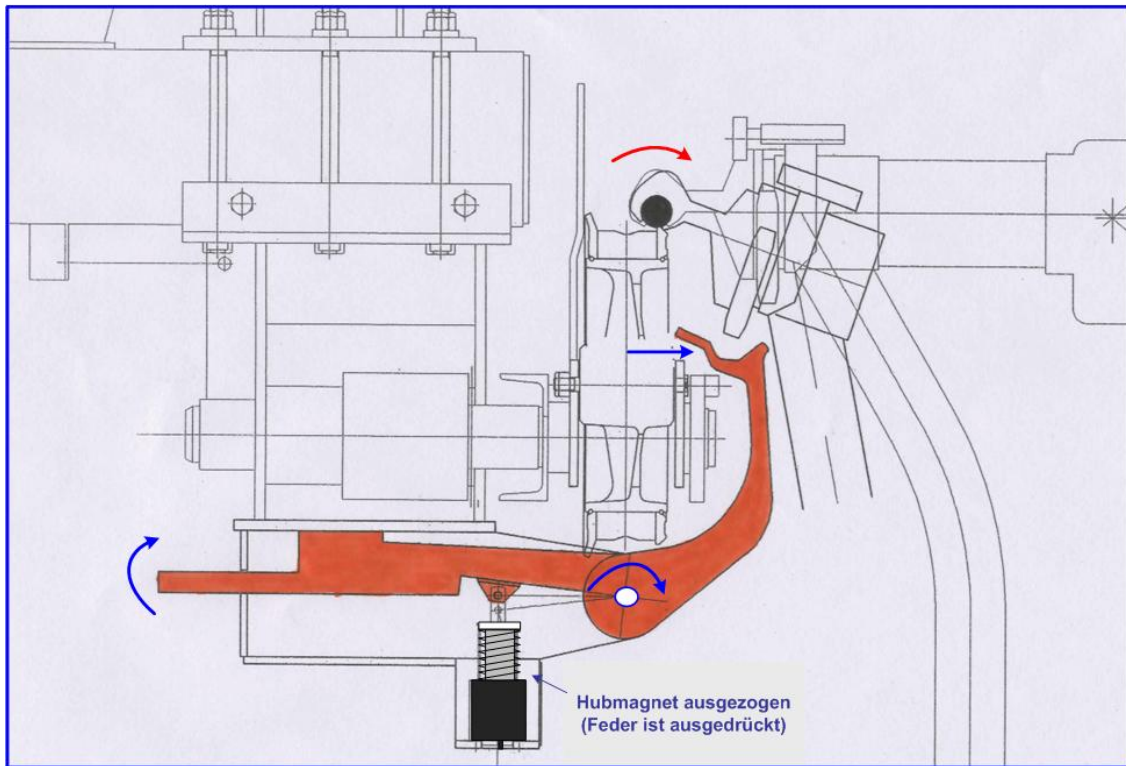


Abbildung 25: Skizze der Fangeinrichtung in der Normallage (Seilbahn ist in Betrieb); die Magnetkraft zieht den Fangarm ein und die Feder wird gedrückt;



**Abbildung 26: Skizze der Fangeinrichtung in der Fanglage
(Seilbahn ist ausgeschaltet)**

6.3.3 Stationseinrichtung (Meldereinrichtung und Überwachungssystem)

Die von den Stützeinrichtungen gesendeten Signale werden in der Antriebsstation der Bahn entsprechend verarbeitet und dann die Meldeeinrichtung aktiviert.

6.4 Daten- und Energieübertragung

Datenübertragung:

Für die Datenübertragung zwischen Sensor, Steuergerät, Aktor und Meldeeinrichtung wurden Kupferleitungen verwendet.

Energieversorgung:

Die gesamte Anlage (Stützenausrüstung, Stationseinrichtung) wird durch eine netzunabhängige Stromversorgung auf der Grundlage einer 24V Gleichspannung

betrieben. Durch Spannungsregelung wird der Strom unmittelbar nach dem Systemeinschalten auf minimalen Ruhestrom zurückgeschaltet(vgl. Pkt. 6.2.2 Regelung der Magnetspannung)

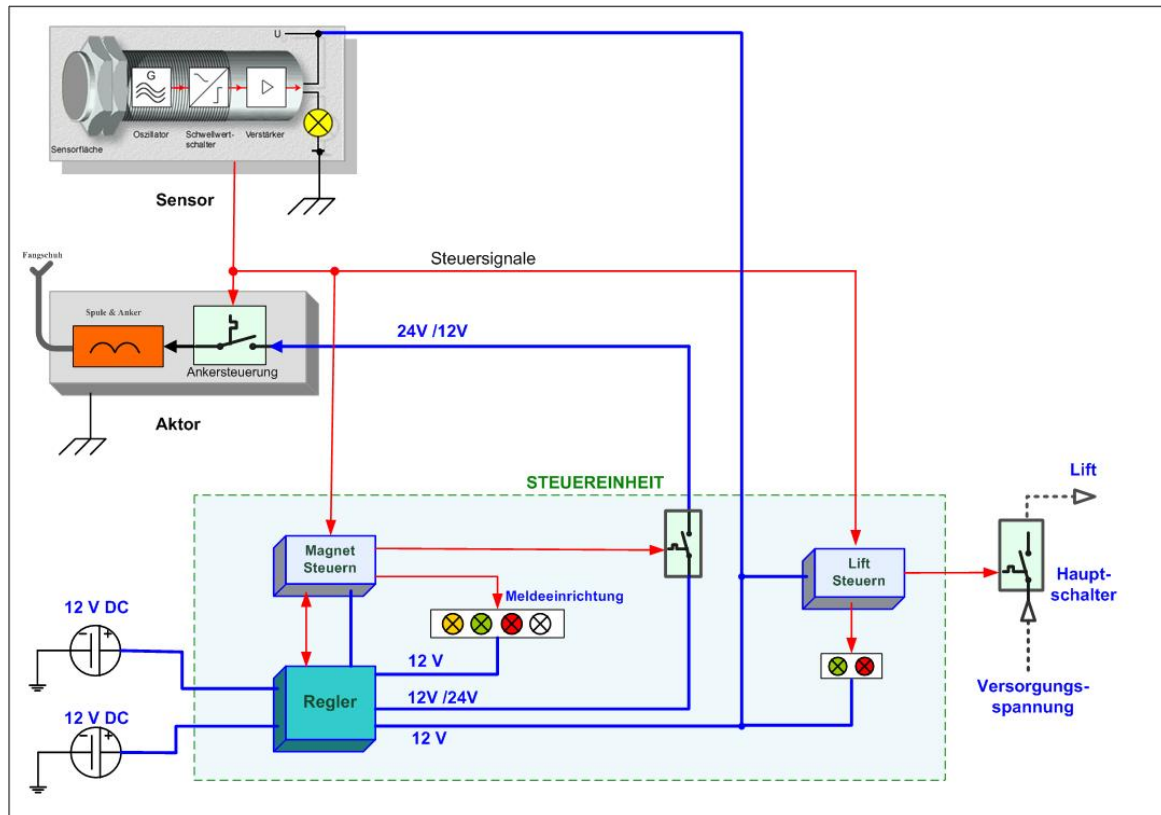


Abbildung 27: Schema der Testanlage des Prototyps

6.5 Erprobung

6.5.1 Labortest

Die Funktionstüchtigkeit des hergestellten Fangschuhs wurde zunächst im Labor des Institutes für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen der TU Wien erprobt.

Als Ersatz für die erforderlichen elektrischen/elektronischen Stationseinrichtungen wurde eine mobile Schalteinrichtung aufgebaut, die mit optischen Anzeigen ausgestattet wurde, welche die Schaltbefehle am Antrieb anzeigen.

6.5.2 Feldversuche

Die Erprobung der entwickelten Einrichtung unter betrieblichen Verhältnissen fand am 12. Oktober 2004 an der koppelbaren Einseil-Umlaufbahn 4 EUB⁴ Hirschenkogel am Semmering, N.Ö. statt.

- Der Fangschuh wurde am Bergstrang der Stütze 8 montiert, die eine 8-rollige Batterie hat.
- Die seitliche Seilauslenkung aus den Rillen der Stützenrollen wurde dadurch erzielt, dass auf die betreffende Rollenbatterie einlaufseitig zwei Kunststoffrollen durch eine Schraubenspindel gegen das Seil gedrückt wurden.



Abbildung 28: Entgleisungseinrichtung

⁴ von Firma Doppelmayr hergestellt (siehe Anhang Firmenadressen)

- Ein Sensor wurde einlaufseitig an der Rollenbatterie der Stütze angebracht, da die Versuche nur für die Bergfahrt vorgesehen waren.
- Die Versuche konnten nur für das Leerseil ausgeführt werden.
- Die Fahrgeschwindigkeit wurde von 2,0 m/s bis 5,0 m/s variiert.

6.6 Beurteilung

6.6.1 Eignung

Der Labortest und die Naturversuche haben zweifelsfrei bewiesen, dass das realisierte System eines beweglichen Seilfangschuhs geeignet ist, Seilentgleisungen mit einem anschließenden Abstürzen des Seiles mit größter Wahrscheinlichkeit zu verhindern.

Auf dieser Grundlage können die derzeit üblichen Grenzwerte für einige Anlageverhältnisse neu überdacht werden, wie etwa

- die Mindestrollendrucke
- die Feldweiten
- die Fahrgeschwindigkeit
- die betrieblichen Grenzen des Seitenwindes
- die Rollenbordhöhen

Ferner erscheint es künftighin möglich, auf bisherige Schutzeinrichtungen mit begrenzter Wirksamkeit (z.B. feste Fangschuhe, Bruchstäbe, Schaltrollen) zu verzichten.

6.6.2 Anwendung

Das entwickelte System ist für neu zu errichtende Anlagen ebenso wie für die Nachrüstung bestehender Bahnen geeignet.

6.6.3 Zeitbewertung

Für die endgültige Beurteilung der Verlässlichkeit des entwickelten Systems ist eine Untersuchung der zeitlichen Abläufe maßgebend, die anfallen, wenn der

Entgleisungsfall des Seiles eintritt. Diese zeitlichen Abläufe sind:

- die Zeit, bis das Seil von der Grenzlage bis zur Rollenbordkante gelangt;
- die Zeit, die das elektrische und elektronische System ab dem Sensorsignal benötigt, bis der Fangschuh betätigt wird;
- die Zeit, die der Fangschuh benötigt, um aus der Normlage in die Fanglage zu gelangen;

Die Ermittlung und Gegenüberstellung dieser drei Zeitanteile, die einer eingehenden Untersuchung bedarf, werden im Kapitel „Zeitanalyse“ genauer untersucht.

6.6.4 Optimierung

Der hergestellte Prototyp bedarf hinsichtlich seines mechanischen Teils, nämlich des beweglichen Seilfangschuhs (Aktors) und der Steuereinheit bei serienmäßiger Herstellung folgender Zielsetzung:

- Minimierung des Energieverbrauchs des Hubmagneten (diese Thema wird im Kapitel 8 „Energieberechnung und -optimierung“ ausführlich behandelt)
- Testen und Überwachung des Seilbahnbetriebes durch bessere Visualisierung (Siehe Kapitel 9 “Visualisierung = Instandhaltung und Qualitätsmanagement“);
- konstruktive Verbesserungen des Aktors (es wird dafür ein eigenes Projekt injiziert);

Für unterschiedliche Bahnsysteme und Stützendrucke werden unterschiedlich große Konstruktionen zu entwickeln sein (z.B. Umlaufbahnen, Schleplifte, ...).

7 Zeitanalyse

Wie im 6. Kapitel „Prototyp“ erwähnt wurde, ist für die endgültige Beurteilung der Verlässlichkeit des entwickelten Entgleisungsschutzsystems, eine Untersuchung der zeitlichen Abläufe notwendig, die anfallen, wenn der Seilentgleisungsfall eintritt. Diese zeitlichen Abläufe sind:

1. Seilentgleisungszeit:

die Zeit, in der das Seil von der kritischen Grenzlage bis zur Rollenbordkante gelangt;

2. Systemreaktionsreaktionszeit:

a. die Zeit, die benötigt wird bis ein Entgleisungsfall erkannt wird und bis die Steuersignale an die Aktoren gesendet werden

(Signalisierungszeit);

b. die Zeit, die der Fangschuh benötigt, um aus der Normallage in die Fanglage zu gelangen **(mechanische Reaktionszeit der Fangeinrichtung);**

Die Ermittlung und Gegenüberstellung dieser drei Zeitanteile ist Gegenstand dieses Kapitels.

Der zeitliche Ablauf ab dem Zeitpunkt, an dem die seitliche Abweichung der Seillage über den definierten Sicherheitspunkt (= kritische Seillage) hinaus geht, welcher die Gefahr einer bevorstehenden Seilentgleisung enthält, bis zu dem Zeitpunkt, an dem sich die Fangeinrichtung in der ausgefahrenen Fangposition befindet, wird in folgende zeitliche Abschnitte eingeteilt:

1. Signalerfassungszeit
2. Signalübertragungszeit
3. Signalverarbeitungszeit
4. Reaktionszeit der Fangeinrichtung (der mechanische Teil); diese setzt sich

wiederum aus folgende Zeitenräumen zusammen:

- Abschaltzeit des Hubmagneten
- Federbeschleunigungszeit
- Fallbeschleunigungszeit der Fangschuhmasse

7.1 Seilentgleisungszeit

Dieser Punkt wurde ausführlich in den Kapiteln 3 „Schwingung durch Seitenwind“ und „Grenzlagen“ bearbeitet. Die Ergebnisse der Untersuchung von zwei Seilen in den erwähnten Kapiteln sind in der unten stehenden Tabelle zusammengefasst.

Böigkeitsdauer: To [s]	Maximale Auslenkung [m]	Zeit bis max. Auslenkung [s]
Seil 1		
2.55	4.8504	1.153
8.9	8.856	2.359
15	6.270	7.854
40	5.9064	20.940
Seil 2		
2	0.9372	1.2
2.55	1.6032	1.83
8.9	0.80916	4.9
15	0.8004	7.563
40	0.7956	20.73

Tabelle 8: „schnellste“ Entgleisungszeit für Seil1= 1.153s und Seil 2=1.2s

7.2 Signalisierungszeit

7.2.1 Signalerfassungszeit (Schaltzeit des Sensors)

Die Zeit zwischen der kritischen Seillage des zu detektierenden Seiles aus dem Bereich des Steuerfeldes und dem Schalten des Ausgangssignals des Näherungssensors liegt im Allgemeinen in der Größenordnung von nur wenigen Millisekunden⁵.

Diese Schaltzeiten hängen von mehreren Faktoren ab. Zum einen von herstellerbedingten Faktoren der im Oszillatorschwingkreis gespeicherten Energie, die wiederum abhängig ist von der Induktivität, der Kapazität und der Schwingkreisgüte bzw. der Oszillatorfrequenz und des Oszillatortyps. Zum anderen hängt die Zeit wesentlich von der Größe der Wirbelstromverluste im Schwingkreis ab. Diese hängen wiederum von der Größe des Objekts, vom Material und vom Abstand zur Sensoroberfläche ab. Damit ergeben sich bei Näherungssensoren (hersteller- und bauartenspezifisch) in der Regel Werte für die Bedämpfungszeit zwischen 0,2 und 2 ms und zwischen 0,3 und 3 ms für das Entdämpfen.

Es sind zwei Schaltzeiten zu unterscheiden, die den Schaltzyklus des Sensors beschreiben (siehe Abbildung 29).

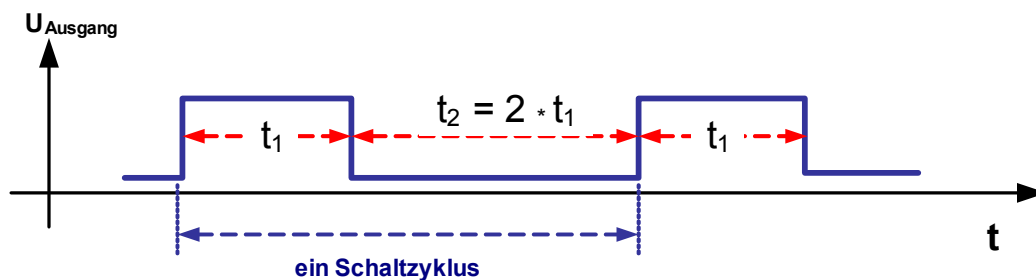


Abbildung 29: Schaltzyklus des Näherungssensors

t_1 Schaltzeit: Sensor setzt den Ausgang auf einen neuen Wert (1)

⁵ Nach intensiven Recherchen bei verschiedenen Herstellerfirmen von Näherungssensoren

t_2 Zeitpause: Sensor behält den alten Wert am Ausgang ($t_2 \leq 2 \cdot t_1$) Sensor geht wieder auf seinen Ausgangswert zurück (0)

Diese Schaltzeiten haben einen wesentlichen Einfluss auf die maximalen Schaltfrequenzen und die maximale Schaltgeschwindigkeit, mit der der Sensor die Seilbewegung sicher erfassen kann.

7.2.2 Signalübertragungszeit

7.2.2.1 Signalübertragung über Leitungen (Kupfer- oder Lichtwellenleiter)

Anhand eines simplen Beispiels soll die Übertragungszeit eines Kupferleiters berechnet werden.

Die Übertragungszeit für den am weitest entfernten Sensor bzw. Aktor einer Seilbahn mit der maximalen Länge $L=3000$ m (zwischen Tal- und Bergstation) wird wie folgt errechnet:

$$T_{\text{Ü,max}} = L/c_0 = 3000\text{m} / 2,998 \cdot 10^8 \text{m/s} = 10\mu\text{s}$$

c_0 Lichtgeschwindigkeit
(elektrische Signale breiten sich mit $c \approx c_0 = 2,99 \cdot 10^8$ m/s aus)

Die gesamte Signalübertragungszeit beträgt daher:

$$T_{\text{Ü,ges}} = 2 \cdot T_{\text{Ü,max}} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 20\mu\text{s}$$

D.h. ein Signal, das vom Sensor erfasst wurde, wird innerhalb von $10\mu\text{s}$ am Eingang der Steuereinheit anliegen.

7.2.2.2 Signalübertragung über Bussystem

Bei der Signalübertragung über Bussysteme hängt bekanntlich die Übertragungszeit von der Art des Bussystems, der Länge der Busleitung, der Anzahl der Slaves (Anzahl der Sensoren und Aktoren) und der Datenübertragungsrate sehr stark ab.

Bei diesem Sicherheitssystem könnte ein Profibus-DP eingesetzt werden. Eine Zykluszeit von $10\mu\text{s}$ ergibt sich, weil es sich hier um eine kleine Datenrate und eine geringe Anzahl von Sensoren und Aktoren handelt.

Um auch längere Seilbahnen mit einer höheren Anzahl von Stützen zu berücksichtigen, können wir (sicherheitshalber) die Übertragungszeit von $200\mu\text{s}$ bis 1 ms annehmen.

Hier ist es erwähnenswert, dass sich bei der Verwendung von Lichtwellenleitern, durch die wesentlich hohe Datenmenge, kürzere Übertragungszeiten ergeben (große Bandbreite \rightarrow hohe Übertragungsrate⁶, Wellenlängen Multiplex).

7.2.3 Signalverarbeitungszeit

Derzeit gibt es auf dem Markt SPS- und PSS- Steuerungen mit sehr hohen Taktfrequenzen bzw. schnellen Zykluszeiten (Zykluszeit + Bussystemzeit $\leq 10\text{ms}$).

Die drei zuvor erklärten Zeitphasen werden nun anhand eines Beispiels genauer erläutert und berechnet:

Signalerfassungszeit:

Sie beträgt für einen Sensor mit $f = 100\text{Hz}$ $\rightarrow T = 1/100\text{Hz} = 0,01\text{s} = 10\text{ms}$

\rightarrow Schaltzeit $t = 2 \cdot 10\text{ms} = 20\text{ms}$

Um alle möglichen Sicherheitsrisiken zu berücksichtigen, werden in der Berechnung längere Zykluszeiten angenommen (worst case).

Sensor Zykluszeit = $t_{\text{Sensor}} = 23\text{ ms}$

⁶ durch erhöhte Übertragungskapazität ergibt sich eine kürzere Übertragungszeit;

Steuerungs-Zykluszeit= $t_{\text{SPS}} = 10 \text{ ms}$

$$\begin{aligned} \rightarrow t_{\text{worst case}} &= (t_{\text{Sensor}}/t_{\text{SPS}}) * t_{\text{SPS}} + 2 * t_{\text{SPS}} \\ &= \text{int}(23/10)*10+2*10= 40\text{ms} \end{aligned}$$

$t_{\text{worst case}}$ die längste Zeitdauer, die sich aus diesen Zyklen ergeben kann
($t_{\text{Sensor}}/t_{\text{SPS}}$) als ganze Zahl angenommen

Das Zeitdiagramm in der Abbildung 30 zeigt den Ablauf der Zyklen:

Wird das Seil, zum Zeitpunkt t_0 , den definierten kritischen Sicherheitspunkt überschreiten (siehe Abbildung 30 erster Balken), dann reagiert der Sensor spätestens nach dem Ablauf seines aktuellen Zyklusses.

Damit wird das Signal erst mit dem Beginn des zweiten Sensorzyklusses übertragen. Das SPS hat somit drei Zyklen lang einen „falschen“ Wert (30 ms alter Wert) gelesen.

Beim vierten Zyklus kann das SPS die Signalverarbeitung durchführen, wobei das Gerät einen Zyklus von 10 ms benötigt (siehe Abbildung 30 dritter Balken).

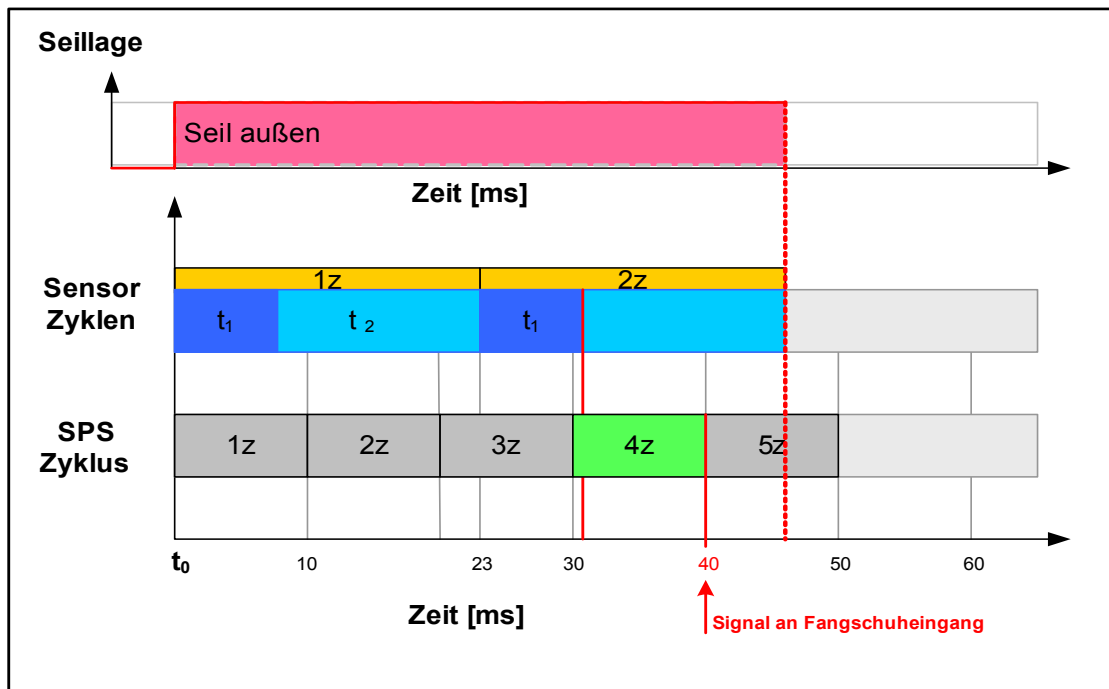


Abbildung 30: „Worst case“ eine Zeitanalyse ab der Erfassung der Seilentgleisung bis zur Steuerung der Fangeinrichtung

- z Zyklus (1z ist der erste Zyklus)
- t₁ Schaltzeit
- t₂ Zeitpause , t₂ = 2 * t₁

7.2.4 Reaktionszeit der Fangeinrichtung (des mechanischen Teils)

Um die Reaktionszeit der Fangeinrichtung festzustellen, definieren wir zwei Zustände:

- **Anfangszustand:** Steuersignal liegt am Eingang der Fangeinrichtung (der Fangarm ist noch in der normalen, angezogenen Lage);
- **Endzustand:** die Fangeinrichtung ist in der ausgefahrenen Fanglage;

Die Reaktionszeit ist infolge dessen die Zeitspanne zwischen dem Anfangszustand und dem Endzustand.

Um die genaue Zeitspanne zwischen den beiden Zuständen festzustellen, wurde eine spezielle Testanlage im Labor entwickelt, wobei das Erfassen der Reaktionszeit der Fangeinrichtung auf zwei unterschiedlichen Wegen erreicht wurde:

1. Akustische Erfassung
2. Erfassen mit Hilfe von Näherungssensoren

7.2.4.1 Erfassen der Reaktionszeit über akustische Signale

Da das Auftreten des Anfangszustandes zugleich den Abbruch des Hubmagnetstromes bedeutet, wurde der Anfangszustand im Labor künstlich (ähnlich einem Endschalter) als Stromabbruch des Hubmagneten dargestellt.

Der Endzustand ist dann abgeschlossen, wenn der Arm der Fangeinrichtung in der Endposition aufschlägt, dabei ist ein akustisches Signal zu hören.

Um ein akustisches Signal beim Anfangszustand zu realisieren, wurde mit Hilfe von

Sensoren, genau nach Beginn des Zugvorgangs des Fangarmes, der Strom des Hubmagnetes ausgeschaltet und dadurch ein akustisches Signal ausgelöst.

Die zwei aufeinander folgenden Signale wurden im Labor erfasst und mit Hilfe einer Software (MEDA⁷) die Zeit zwischen dem ersten akustischen Signal (Anfangszustand) und dem darauf folgenden Signal (Endzustand) gemessen (siehe Abbildung 31).

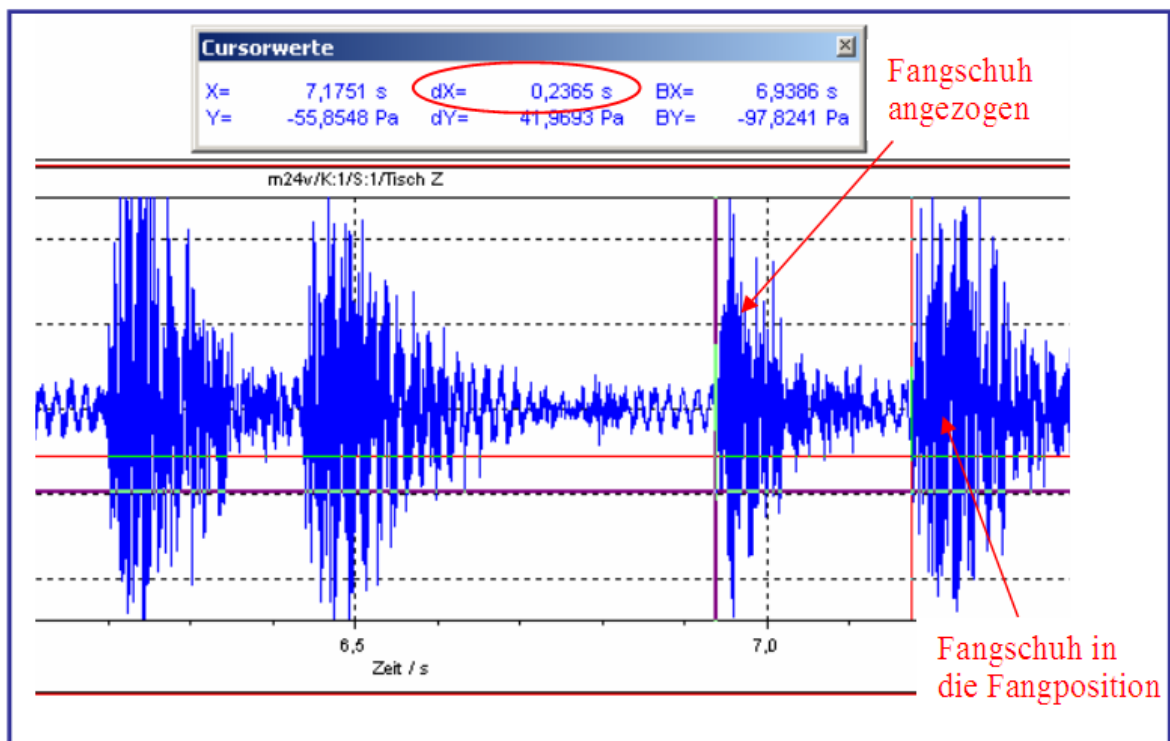


Abbildung 31: Beispiel zur Bemessung der Zeitdauer $T_{fang} = dx$ eines akustischen Signals das beim Anfangs- bzw. Endzustand aufgenommen wurde;

⁷ MEDA ist eine Software der Fa. Wölfel, für das rechnergestützte Messen und Analysieren von Schwingungen, Lärm und Erschütterungen
www.woelfel.de/wms/

7.2.4.2 Erfassung der Reaktionszeit durch Näherungssensoren

Über zwei Näherungssensoren (siehe Abbildung 32) wurden zwei Signale erzeugt. Der erste Sensor S1 liefert ein Dauersignal, solange der Fangarm in der normal angezogenen Position ist → Anfangszustand;

Der zweite Sensor S2 erzeugt ein Signal, wenn der Fangarm in der Fangposition ist → Endzustand;

Beide Signale werden über einen Datenlogger erfasst und von der Bewertungssoftware am Computer dargestellt.

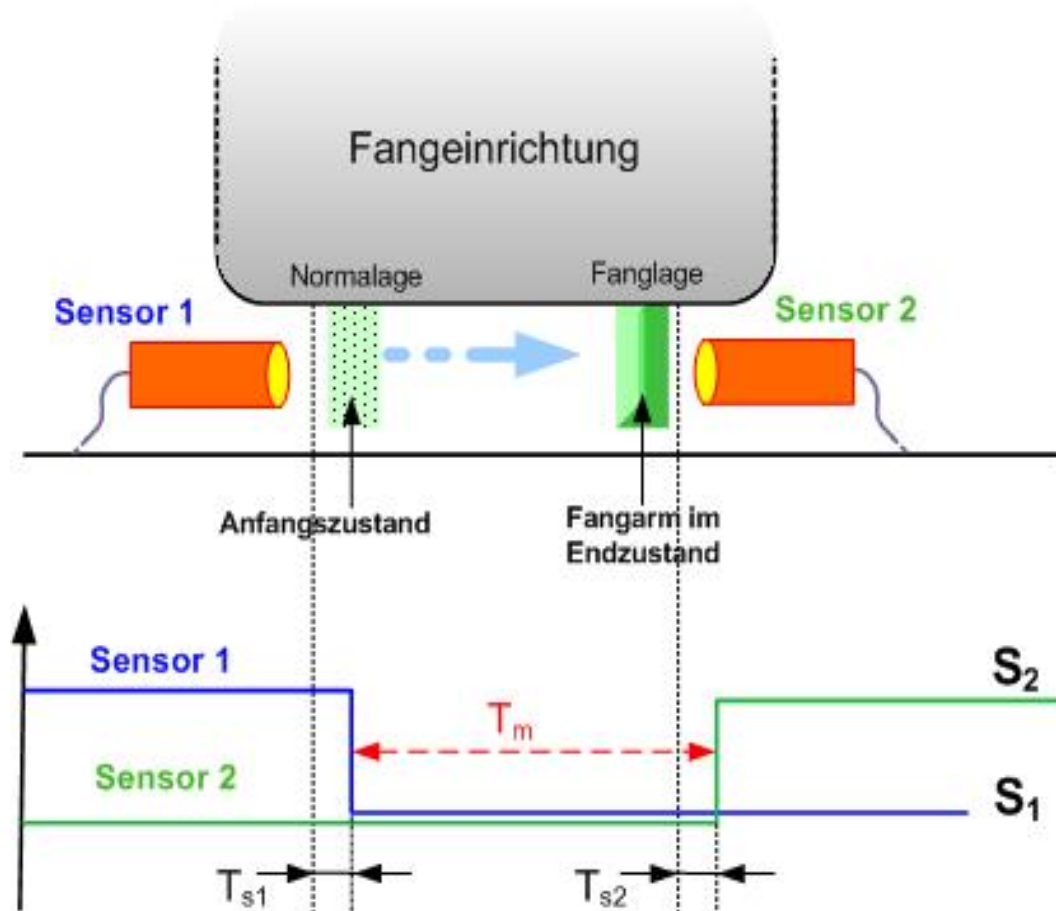


Abbildung 32: Anordnung zur Bestimmung der Fangschuhreaktionszeit

Die Reaktionszeit T_{fang} ergibt sich dann aus:

$$T_{fang} = T_m - T_s$$

- T_{fang} ist die gesuchte Reaktionszeit des Fangarmes
 T_m ist die gemessene Zeit zwischen beiden Sensorsignalen
 T_s ist die Differenz zwischen den Verzögerungszeiten (Schaltzeiten T_{s1} und T_{s2}) der beiden Sensoren⁸

Die Zeitmessungen wurden im Labor (mit Hilfe der beiden beschriebenen Methoden) mehrmals wiederholt und aus den daraus folgenden Messergebnissen der Mittelwert errechnet (siehe Abbildung 33).

Der Mittelwert wird wie folgt errechnet:

$$\text{Mittelwert} = \frac{(Mi_1 * Ni_1) + (Mi_2 * Ni_2) + \dots + (Mi_{10} * Ni_{10})}{Ni_1 + Ni_2 + \dots + Ni_{10}} = 0,23054s = 230ms$$

Mi_1 ein Messwert der Reaktionszeit des Fangschuhes t_{fang}

Ni_1 Anzahl des aufgetretenen Messwerts $T_{fang} = Mi_1$

→Reaktionszeit des Fangschuhes $T_{fang} = 230ms$

Bemerkung:

Es muss hier darauf hingewiesen werden, dass die 230 ms sehr großzügig berechnet wurden, da bei der Bemessung des Anfangszustandes immer die Verzögerungszeit der Testanlage (z.B. Ausschaltzeit bei der akustischen Methode) mit eingerechnet wurde.

⁸ da die verwendeten Sensoren unterschiedlichen Typs waren, hatten sie deshalb verschiedene Verzögerungszeiten;

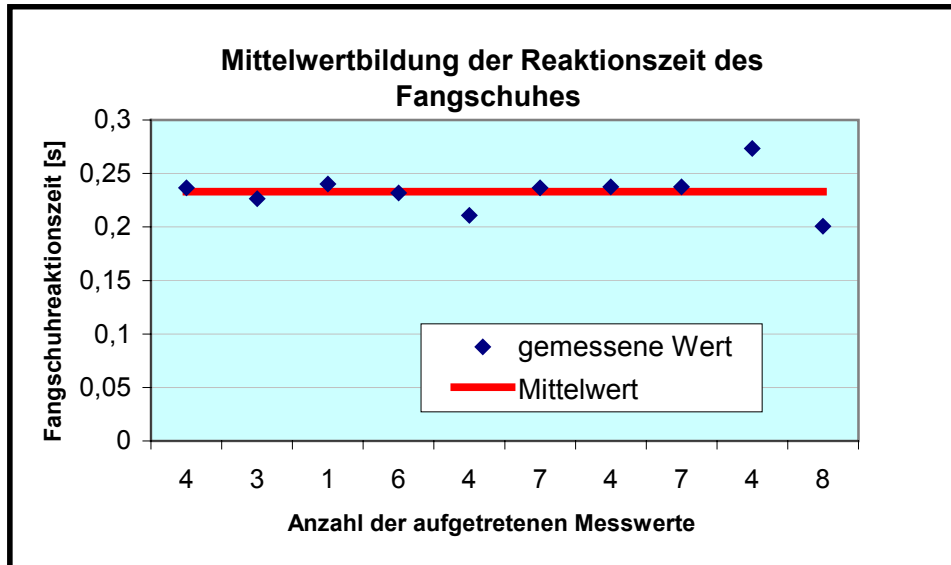


Abbildung 33: Mittelwertbildung der Reaktionszeit des Fangschuhes

7.2.5 Gesamte Reaktionszeit des Entgleisungsschutzes:

→ Benötigte Gesamtzeit des Systems = 230ms + 40ms = 270ms

7.3 Zusammenfassung und Gegenüberstellung

Die in diesem Kapitel dargestellten Testergebnisse und Simulationen haben gezeigt, dass die Zeit, die die entwickelte Fangeinrichtung vom Moment der Erkennung der Entgleisung bis zum Erreichen der Fangposition benötigt, wesentlich kürzer ist, als die Entgleisungszeit (Kapitel Seilschwingungen durch Seitenwind).

Auch wenn wir vom „schlimmsten Fall“ (worst case) ausgehen, das heißt, wenn das Seil durch einen böigen Seitenwind, der mit der Eigenfrequenz des Seiles übereinstimmt, entgleist, wird die Fangeinrichtung die Fangposition erreichen,

bevor das Seil endgültig entgleist ist.

Entgleisungszeit im „schlimmsten Fall“ (worst case)	= 1,153 Sekunden
Fangsystemreaktionszeit (Signalisierungs- und Aktorreaktionszeit)	= 270 ms = 0,27 Sekunden

Tabelle 9: Gegenüberstellung Entgleisungszeit und Fangsystemreaktionszeit

Die gesamte Fangsystemreaktionszeit ist im „schlimmsten Fall“ noch mehr als vier Mal schneller als die Entgleisungszeit.

8 Energieberechnung und -optimierung

Im allgemeinen werden die mechanischen und elektrischen Systeme getrennt behandelt. In diesem speziellen Fall (wie auch in der Mechatronik⁹) des elektromechanischen Aktors jedoch erweist es sich als sinnvoll, einen Begriff heranzuziehen, der beiden Systemen übergeordnet ist, nämlich die Energie.

Um die Strom bei der Einschaltphase zu optimieren und den Ruhestrom während der Betriebszeit zu minimieren, wird ein mathematisches Modell, das das dynamische Verhalten des gesamten Systems beschreibt, benötigt. Im nächsten Abschnitt werden zuerst die theoretischen Hintergründe dieses Modells hergeleitet, anschließend wird das mathematische Modell erstellt, das für die Berechnung (bzw. Optimierung) des Energieverbrauches und die Dimensionierung der Systemkräfte immer herangezogen werden kann.

8.1 Beschreibung des dynamischen Verhaltens einer Fangeinrichtung

Der Hubmagnet mit der Feder und dem Fangschuharm (als Masse), stellen gemeinsam ein elektromechanisches System dar (siehe Abbildung 34).

Dieses System wandelt elektromagnetische Kräfte in mechanische Kräfte um. In diesem Abschnitt werden die einwirkenden Kräfte im Aktor (Fangeinrichtung) hergeleitet und in dem mathematischen Modell als Systemgleichung dargestellt. Dieses mathematische Modell wird zur Energieberechnung des Hubmagneten dienen.

Ausgehend von den in Abbildung 34 dargestellten Kräften, kann eine Kraftgleichung (Gl- 24) für die einzelnen Kräfte F des Aktors hergeleitet werden.

⁹ Mechatronik: mechatronische Systeme verknüpfen mechanische und elektronische Komponenten, um die Leistungsfähigkeit klassischer Systeme zu verbessern und vollständig neue Funktionen zu realisieren;

$$F_{\text{Feder}} + F_{\text{Reibung}} + F_{\text{Gewicht}} - F_{\text{Magnet}} + F_{\text{Trägheitskraft}} = 0$$

GI- 24

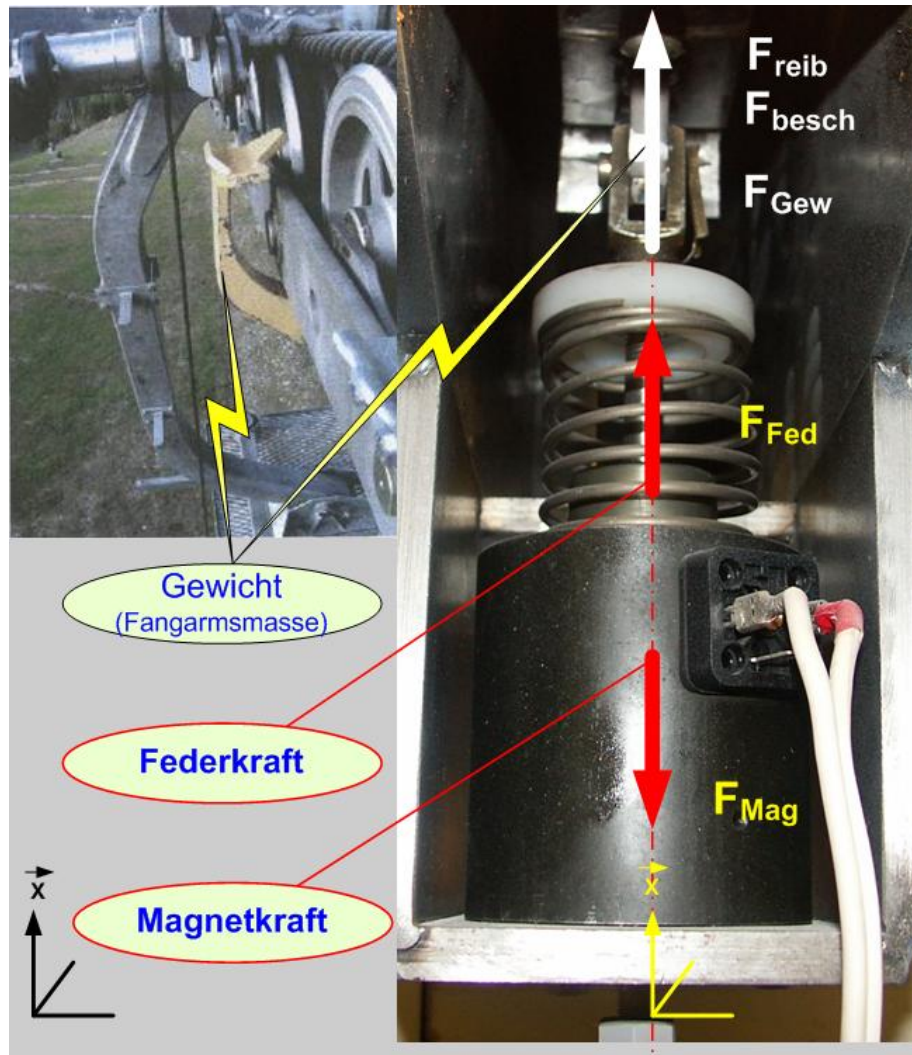


Abbildung 34: Herleiten der Systemkräfte

8.2 Mathematischer Hintergrund für die Energieberechnung

Um die Masse der Fangeinrichtung zu bewegen und zugleich die Feder vorzuspannen, wird elektrische Energie benötigt. In diesem Sinne muss sowohl das elektromagnetische, als auch das mechanische System analysiert werden.

Durch die magnetische Kraft und den zeitlich veränderbaren Luftspalt (veränderbare Induktivität) sind beide Systeme miteinander verkoppelt.

Deshalb ist es erstrebenswert, aus den Grundgleichungen des Hubmagneten gemeinsam mit der Federkraft und der Masse M der Fangeinrichtung zwei gekoppelte Differentialgleichungen herzuleiten: die eine resultiert aus der Kirchhoffschen Maschenregel (Abbildung 36) mit einer von der Position von der Masse M abhängigen Induktivität, die andere aus der Kraftgleichung mit der vom Strom I abhängigen magnetischen Kraft.

8.2.1 Modellerstellung zur Dimensionierung und Berechnung des Hubmagneten:

Das Magnetfeld wird durch eine Spule mit N Windungen, die auf einem Joch aus ferromagnetischem Material gewickelt sind, erzeugt. Dabei hat die Spule einen ohmschen Widerstand R_i .

Der bewegliche Teil der Fangeinrichtung wirkt in diesem Modell (siehe Abbildung 34 und Abbildung 35) als bewegliche Masse, die durch die Magnetkraft (bzw. Federkraft) bewegt bzw. positioniert wird.

Zwischen dem Joch¹⁰ und dem Anker¹¹ wird eine nichtmagnetische Distanzscheibe mit $\mu_r = 1$ und der Dicke d eingebracht (Abbildung 35).

Diese konstruktive Maßnahme wurde aus folgenden Gründen getroffen:

- um einen magnetischen Kurzschluss in dem Luftspalt zwischen Anker und Joch zu verhindern und
- diese Scheibe, auch Antiklebscheibe genannt, bewirkt ein rascheres „Abfallen“ des Hubmagneten und damit ein beschleunigtes Herausfahren der Fangeinrichtung; Für kritische Zeitabläufe spielt diese Scheibe daher eine sehr wichtige Rolle.

¹⁰ Das Joch ist der Magnetkern

¹¹ Der Anker ist der bewegliche Teil des Magneten

8.2.1.1 Berechnung des Magnetfeldes in der Luftspalte:

Bei der Hub-Modellierung wurde die Dicke der Distanzscheibe d zum Hubweg x addiert, sodass der sich die Breite des Luftspalts $s = x + d$ (Hubweg+ Dicke der Distanzscheibe) ergibt (Abbildung 35).

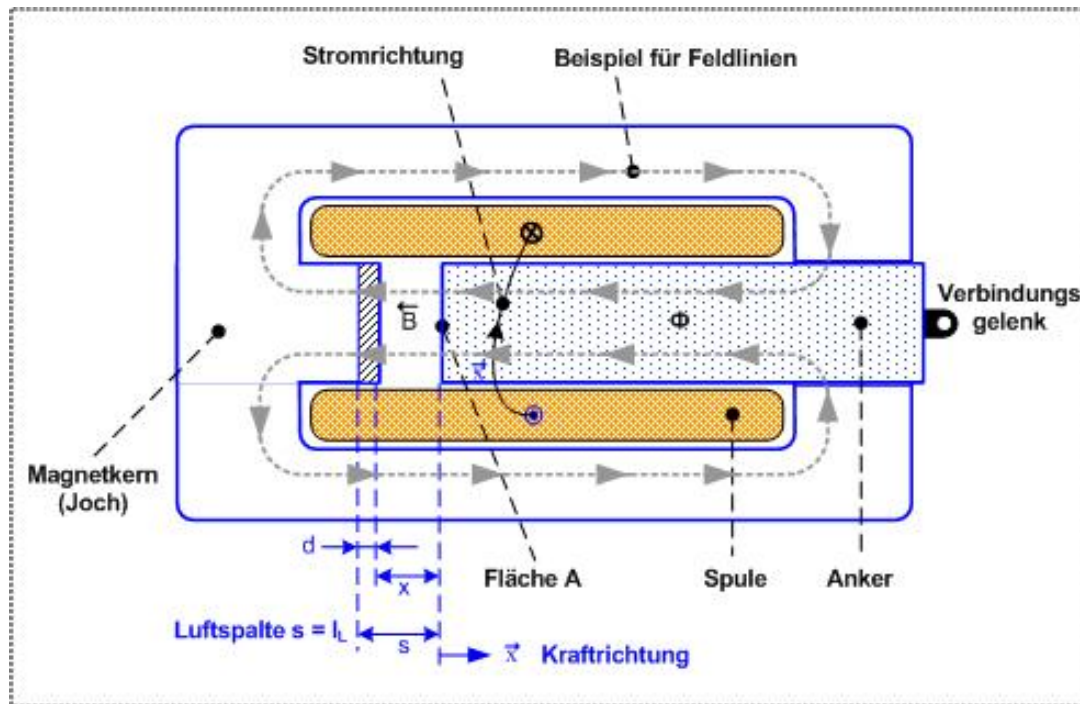


Abbildung 35: Hubmagnetkerngrößen und Komponenten

Durchflutungssatz:

$$\Theta = N \cdot i = \oint H \cdot dl = H_E \cdot l_E + H_L \cdot l_L = H_E \cdot l_E + H_L \cdot (x+d) \quad \text{GI- 25}$$

mit

Θ [A] Durchflutung

H [H] Magnetische Feldstärke im Eisen (H_E) und im Luftspalt (H_L)

L [m] Länge der Feldlinie im Eisen (l_E) und im Luftspalt ($l_L = d+x$)

N Windungszahl der Spule

i [A] Strom durch die Spule

$$\Phi = B \cdot A . \quad \text{GI- 26}$$

- Φ [W] magnetischer Fluss
 A [m²] Eisenquerschnittfläche, die von Magnetfluss zu beflissen ist
 B [T] magnetische Flussdichte .

$$B = H \cdot \mu_o \cdot \mu_r \quad \text{GI- 27}$$

- μ Permeabilität des Magnetkreises; Es gilt $\mu = \mu_o \cdot \mu_r$
 μ_o Magnetische Feldkonstante oder Permeabilität der Luft (genauer: des Vakuums); mit $\mu_o = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am
 μ_r Permeabilitätszahl (ist für Luft $\mu_r = 1$)

Die Flussdichte B geht „stetig“ durch die Grenzfläche zwischen Anker und Joch durch, d.h. die Flussdichte im Eisen ist gleich der Flussdichte im Luftspalt. In ferromagnetischen Materialien (z.B. idealem Eisen) ist im allgemeinen $\mu_r \geq 10^3$, somit kann H_E vernachlässigt werden und die magnetische Flussdichte im Luftspalt ergibt sich daher aus:

$$H = \frac{N \cdot I}{x + d} , \quad \text{GI- 28}$$

$$B = H \cdot \mu_o = \frac{N \cdot \mu_o \cdot I}{x + d} . \quad \text{GI- 29}$$

Es folgt für den gesamten Fluss durch die Spule (wobei $\Phi = \text{konstant}$):

$$\Phi = N \cdot \Phi' = \frac{N^2 \cdot \mu_o \cdot I \cdot A}{x + d} \quad \text{GI- 30}$$

mit:

- Φ' Fluss durch eine Windung.

Die Induktivität L errechnet sich aus dem Fluss dividiert durch den Spulenstrom:

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{N^2 \cdot \mu_o \cdot A}{x + d} \quad \text{GI- 31}$$

Diese wichtige Beziehung GI- 31 zeigt, dass die Induktivität (Abbildung 37 und damit auch die Kraft, Abbildung 38) von der mechanischen Position des Hubweges x abhängt. Durch diese Kraft kommt eine Kopplung zwischen dem mechanischen und dem elektromagnetischen System zustande.

8.3 Elektrische Energie

Durch Anwendung der Maschenregel auf den elektrischen Kreis des Hubmagnetes (siehe Abbildung 36) folgt:

$$U_0 = u_R + u_L, \quad \text{GI- 32}$$

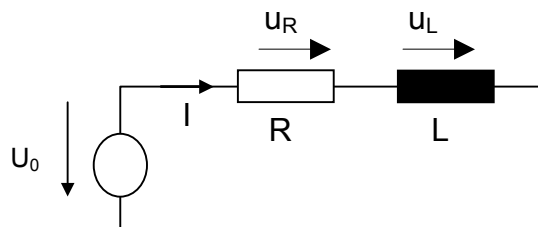


Abbildung 36: Ersatzschaltbild des Hubmagnetes

wobei die Spannung an der Spule wie folgt errechnet wird:

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL}{dt} = \frac{d(L \cdot i)}{dt}, \quad \text{GI- 33}$$

erhält man unter der Annahme, dass alle ohmschen Widerstände in R konzentriert sind, die Differentialgleichung für den elektrischen Kreis:

$$U_0 = i * R + L * \frac{di}{dt} + i * \frac{dL}{dt} . \quad \text{Gl- 34}$$

- R Gesamter Widerstand des Kreises mit $R = R_A + R_i$
- R_i Ohmscher Widerstand der Spule
- R_A Ohmscher Widerstand außerhalb der Spule (Anspeiseleitung)

Nach Einsetzen von Gl- 31 in Gl- 34 ergibt sich die Differentialgleichung des elektrischen Systems:

$$U(t) = I * R + \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{d+x} * \frac{dI}{dt} - \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{(d+x)^2} * I * \frac{dx}{dt} . \quad \text{Gl- 35}$$

Die magnetische Energie W_m ergibt sich aus der Beziehung

$$W_m = \frac{L * I^2}{2} . \quad \text{Gl- 36}$$

Setzt man L aus Gl- 31 ein, dann folgt für die elektrische Energie:

$$W_m = \frac{1}{2} * \frac{N^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{(d+x)} . \quad \text{Gl- 37}$$

8.3.1 Herleitung der Kraftgleichung aus den einzelnen Kräften des Aktors

Für den beweglichen Fangarm als Masse gilt die Kraftgleichung. Diese Kraft wird hier mit dem Prinzip der virtuellen Verschiebung ins Hubmagnetsystem berechnet. Ausgehend von den in Abbildung 34 dargestellten Kräften können die einzelnen Kräfte des Systems hergeleitet werden.

Die Summe aller wirkenden Kräfte im System ist stets gleich Null.

$$F_{\text{Feder}} + F_{\text{Reibung}} + F_{\text{Gewicht}} - F_{\text{Magnet}} + F_{\text{Trägheitskraft}} = 0$$

Dabei sind Masse, Federkraft und Magnetkraft die wesentlichen wirkenden Kräfte im System.

Die elektrische Kraft F_{Magnet} des Hubmagneten leitet sich aus der magnetischen Energie ab. Die elektrische Kraft F_{el} ist die Ableitung der magnetischen Energie

$$W_m = \frac{L \cdot I^2}{2} \text{ nach dem Hubweg } s = x+d :$$

$$F_{\text{Magnet}} = F_{el} = \frac{dW_m}{dx} = \frac{d}{dx} \left[\frac{N^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{2 \cdot (d+x)^2} \right] = \frac{1}{2} * \frac{N^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{(d+x)^2} \quad \text{Gl- 38}$$

N Windungszahl

A [m²] Eisenquerschnittsfläche, die von Magnetfluss durchflossen wird

d [m] Dicke der Antiklebscheibe

x [m] Hubweg

Die Gleichung Gl- 38 bewirkt eine Kopplung der beiden Differentialgleichungen Gl- 35 und Gl- 24 bzw. Gl- 43.

Bei Gleichstrommagneten ist die Stromaufnahme unabhängig von der Ankerstellung x und beträgt laut Ohmschem Gesetz:

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{Gl- 39}$$

Der Strom I bleibt somit konstant. Damit wird die Kraft, die auf den Anker des Hubmagneten ausgeübt wird, wie folgt errechnet:

$$F_{\text{Magnet}} = F_{el} = -\frac{1}{2} * \frac{N^2 \cdot U^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{R^2 \cdot (d+x)^2} \quad \text{Gl- 40}$$

Das Minuszeichen in Gl- 40 zeigt, dass die elektrische Kraft F_{Magnet} gegen die Masse und gegen die Federkraft wirkt. Dieser Zusammenhang ist für die Berechnung der Zugkraft des Hubmagneten von Bedeutung, denn die Gl- 40 stellt

die Zugkraftgleichung dar. In Abbildung 37 wird der charakteristische Verlauf der Zugkraftkurve gezeigt.

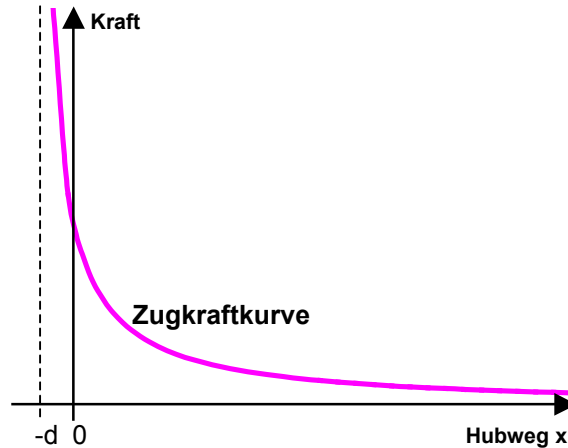


Abbildung 37: Zugkraftkurve des Gleichstrommagneten

Die Federkraft F_{Feder} ist die Kraft, die benötigt wird, um die Feder aus der Ruhelage b auszulenken.

$$F_{\text{Feder}} = M \cdot \Omega^2 (x - b) = \frac{x - b}{k} \quad \text{GI- 41}$$

- Ω Mechanische Resonanzfrequenz der federnd gelagerten Masse
- $M \cdot \Omega^2 = 1/k$ Federkonstante (M ist das Gewicht des Fangarms)
- b Länge der Feder in der Ruhelage
- x Länge der Feder in angezogener Lage (= der Hubweg s)

Der Reibungskraft F_{Reibung} (siehe Abbildung 34 und

Abbildung 35) ist zur Geschwindigkeit proportional und wirkt beim Anziehen des Fangarmes.

$$F_{\text{Reibung}} = M \frac{1}{\tau} * \frac{dx}{dt} \quad \text{Gl- 42}$$

τ Zeitkonstante.

Setzt man alle Kräfte in Gl- 24 ein, dann folgt daraus die Systemdifferentialgleichung:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + M \frac{1}{\tau} * \frac{dx}{dt} + \frac{x-b}{k} - \frac{1}{2} * \frac{N^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{(d+x)^2} + M \cdot g = 0 \quad \text{Gl- 43}$$

$M \cdot g$ Masse mal Erdbeschleunigung

$1/k$ Federkonstante

Das System ist durch eine nichtlineare Differentialgleichung bestimmt. Rechts in der Gl- 44 steht die elektrische Kraft F_{el} , die vom Hubmagneten zu bewältigen ist.

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + M \frac{1}{\tau} * \frac{dx}{dt} + M \cdot \Omega^2 (x-b) + M \cdot g = \frac{1}{2} * \frac{N^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{(d+x)^2} \quad \text{Gl- 44}$$

8.4 Optimierung der Leistung und des Energieverbrauches

Es handelt sich bei der Energieoptimierung, für diesen Entgleisungsschutz, in erster Linie um die Minimierung der elektrischen Energie. Diese elektrische Energie wird vom Hubmagneten benötigt, um folgende Aufgaben zu erfüllen:

- **Anzugskraft bei der Einschaltphase**
beim Einschalten hat der Hubmagnet die Aufgabe, den Fangschuharm in die Betriebslage zu bringen; (dabei tritt der größte Stromverbrauch auf);
- **Haltekraft bei der Betriebsphase (Ruhestromphase)**
während der gesamten Betriebszeit hat der Hubmagnet die Aufgabe, den Fangschuh in der Betriebslage zu halten;

Ausgehend von den Systemgleichungen Gl- 35 und Gl- 43 errechnen wir für beide Systemzustände (a und b) die elektrische Leistung aus der elektrischen Spannung bzw. aus dem Stromverbrauch.

Da sich das System vor und nach der Einschaltphase in stationärem Zustand befindet (das bedeutet keine Zeitänderung $\rightarrow \frac{d}{dt} = 0$), folgt für den elektrischen Kreis gemäß Gl- 35, wenn der Index „st“ den stationären Zustand charakterisiert:

$$U_{st} = I_{st} \cdot R \quad \text{Gl- 45}$$

Die Differentialgleichung Gl- 43 für den mechanischen Kreis vereinfacht sich zu:

$$\frac{x-b}{k} - \frac{1}{2} \cdot \frac{N^2 \cdot I_{st}^2 \cdot \mu_0 \cdot A}{(d+x)^2} + M \cdot g = 0 \quad \text{Gl- 46}$$

Diese Gleichung beschreibt das Gleichgewicht der Systemkräfte in stationärem Zustand. Verknüpft man beide Systemgleichungen Gl- 45 und Gl- 46, so ergibt sich der funktionelle Zusammenhang für das Quadrat der angelegten Spannung U_{st}^2 und für die Position x des Ankers wie folgt:

$$U_{st}^2 \cdot \frac{N^2 \cdot \mu_0}{2 \cdot R^2 \cdot M \cdot g} = \frac{(x_{st} - b)^2}{A} \left[\frac{1}{k \cdot m \cdot g} \cdot (x_{st} - b) + 1 \right] \quad \text{Gl- 47}$$

Daraus kann die Spannung und der Strom als Funktion des Hubweges s dargestellt werden:

$$U_{st}(x) = \sqrt{\frac{2 \cdot R^2 \cdot M \cdot g}{A \cdot N^2 \cdot \mu_0} \cdot (x_{st} + d)^2 \cdot \left[\frac{1}{k \cdot m \cdot g} \cdot (x_{st} - b) + 1 \right]} \quad \text{Gl- 48}$$

$$I_{st}(x) = \sqrt{\frac{2 \cdot M \cdot g}{A \cdot N^2 \cdot \mu_0} \cdot \left[\frac{1}{k \cdot m \cdot g} \cdot (x_{st} - b) + 1 \right] \cdot (x_{st} + d)^2} \quad \text{Gl- 49}$$

Bei einer angegebenen Spannung errechnet sich der Stromverbrauch für das System gemäß Gl- 49, wobei für die Berechnung der Anzugsphase für x_{st} der Hubweg x eingesetzt wird und bei der Berechnung des Haltestromes I_{halt} (in der Haltephase) für x_{st} die Dicke der Distanzscheibe d eingesetzt wird.

$$I_{halt}(x) = \sqrt{\frac{2.M.g.d^2}{A.N^2.\mu_0} * \left[\frac{(d-b)}{k.m.g} + 1 \right]} \quad \text{Gl- 50}$$

Die elektrische Leistung P , die im Hubmagneten anfällt, ergibt sich aus:

$$P = U * I = I^2 * R = U^2 / R \quad \text{Gl- 51}$$

Wenn alle mechanischen Kräfte, die der Magnet aufbringen soll, bekannt sind, errechnet man die Spannung mittels Gl- 40 wie folgt:

$$U = \sqrt{\frac{2.R^2.F_{mech}}{A.N^2.\mu_0} * (x+d)^2} = \frac{R*(d+x)}{N} \sqrt{\frac{2.F_{mech}}{A.\mu_0}} \quad \text{Gl- 52}$$

Daraus folgt für den Strom:

$$I = \sqrt{\frac{2.F_{mech}}{A.N^2.\mu_0} * (x+d)^2} = \frac{(d+x)}{N} \sqrt{\frac{2.F_{mech}}{A.\mu_0}} \quad \text{Gl- 53}$$

F_{mech} Alle mechanischen Kräfte ($F_{Feder} + F_{Reibung} + F_{Gewicht} + F_{Beschleunigung}$), die der Magnet aufbringen muss.

Bei bekannten, zu erbringenden mechanischen Kräften, errechnet sich der Stromverbrauch für das System gemäß Gl- 38 und Gl- 53. Wobei sich die Berechnung des Haltestromes I_{halt} in der Haltephase wie folgt ergibt:

$$I_{halt} = \sqrt{\frac{2.F_{mech}.d^2}{A.N^2.\mu_0}} = \frac{d}{N} * \sqrt{\frac{2.F_{mech}}{A.\mu_0}} \quad \text{Gl- 54}$$

Damit errechnet sich die elektrische Leistung P:

$$P = U * I = \frac{R * (d + x)^2}{N^2} * \frac{2.F_{mech}}{A..μ_0} \quad \text{GI- 55}$$

Mittels der Gleichungen GI- 49 bzw. GI- 50 und GI- 53 bzw. GI- 54 kann der minimale Strom berechnet werden. Damit ist ein optimierter minimaler Energieverbrauch zu erwarten.

8.5 Beispiel für die Energieoptimierung

Als demonstratives Beispiel wenden wir die Energieoptimierung auf den entwickelten Prototyp an.

Wenn bei einer Seilbahn mit 10 Stützen (das bedeutet 20 Fangeinrichtungen) ein Entgleisungsschutz in Betrieb genommen wird, werden alle 20 Hubmagneten eingeschaltet und verbrauchen natürlich gleichzeitig Strom. Bei einem solchen Vorgang entstehen folgende Probleme:

- ein hoher Stromverbrauch in der Einschaltphase
- dabei kann es zu einem kurzzeitigen Zusammenbruch der Versorgungsspannung kommen, was wiederum ein Stabilisierungssystem für die Versorgungsspannung notwendig macht
- Probleme mit der Verfügbarkeit der Energieversorgung während der Einschaltzeit
- Probleme eines hohen Energieverbrauches während der Betriebsphase (Ruhestrom wäre zu minimieren)

Im Prototyp wurde ein Hubmagnet der Type RM80 (siehe Abbildung 38) von der Firma Kuhnke¹² für die Bewältigung der mechanischen Kräfte verwendet.

¹² Siehe Anhang Firmenadresse

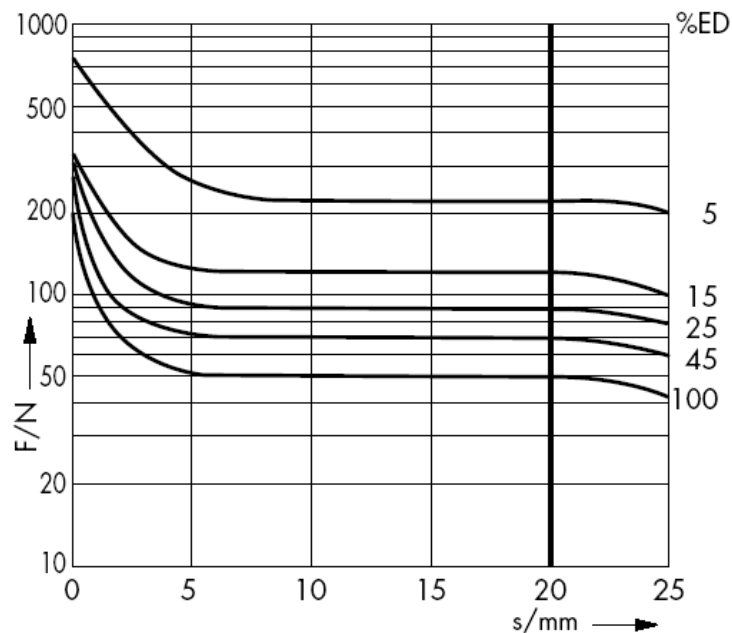


Abbildung 38: Kennlinie der Kraft in Abhängigkeit vom Hubweg der Type RM 080 Firma Kunhke (vor der Energieoptimierung) [26]¹³

In den Testphasen für die Fangeinrichtung hatte der Hubmagnet bei einer Versorgungsspannung von 24V einen Stromverbrauch von $I = 6,21A$ (bzw. $12,42A$ bei 12V Versorgungsspannung), was einer Leistung von $P = 149 W$ entspricht.

Diese Leistung wurde benötigt um:

- $F_{\text{mech}} = 70N$ anzuziehen bei einem Hubweg $s = d + x = 21mm$ zu leisten und
- $F_{\text{mech}} = 90N$ Haltkraft bei einem Hubweg $s = d = 2mm$ anzuhalten

Daraus folgt, dass für 20 Fangeinrichtungen eine Systemgesamtleistung P_{ges} von:

$$P_{\text{ges}} = 20 * 149W = 2980W$$

benötigt wurde.

Wie deutlich zu erkennen ist, wäre der Energieverbrauch während der

¹³ s.. ist der Hubweg dabei $s = d + x$, der den Luftspalt beschreibt
 %ED.. ist die Einschaltdauer des Magneten (z.B 100 % Schaltdauer)

Betriebsdauer enorm hoch.

8.6 Lösungsvorschläge für die Energieoptimierung

Gemäß der Gleichungen Gl- 48 bis Gl- 55 hängt die Kraft des Hubmagneten quadratisch von der Durchflutung ab. Erstrebenswert ist eine optimale Durchflutung, die einen minimalen Stromverbrauch (bzw. minimalen Ohmschen Widerstand) unter der Berücksichtigung der am Markt verfügbaren Komponenten bzw. Werkstoffe gewährleistet.

Es ist nicht zielführend, das Energieproblem allein nur aus dem technischen Modell heraus zu optimieren, vielmehr soll sowohl eine technisch als auch wirtschaftlich realisierbare Lösung angestrebt werden.

Nach Marktrecherchen wurde gemeinsam mit der Firma Kuhnke (Magnethersteller des Prototyps) nach einer realisierbaren Lösung gesucht.

Es wurden am verwendeten Magneten der Baureihe RM080 Berechnungen und Simulationen durchgeführt, um seinen Energieverbrauch zu minimieren.

Nach den Berechnungen und Modellsimulationen haben sich bei der Dimensionierung des Hubmagneten folgende Werte ergeben:

Festlegungen:

- Für die Kraft und den Hubweg sind jeweils zwei Bereiche zu betrachten:
 - Anzugskraft: 70 N bei 18 bis 22 mm Hubweg
 - Haltkraft: 90 N bei 0,2 mm Hubweg
- Sicheres Anziehen innerhalb von 300 ms
- Nach einer genauen Analyse wurde festgestellt, dass sich der verwendete Hubmagnet, mit dem standardmäßig eingesetzten Konus-Anker, nur bis zu einer Halte-/Dauer- Leistung von 17 W optimieren lässt (siehe Abbildung 39). Aus diesem Grund wurde ein Flach- Anker eingesetzt.

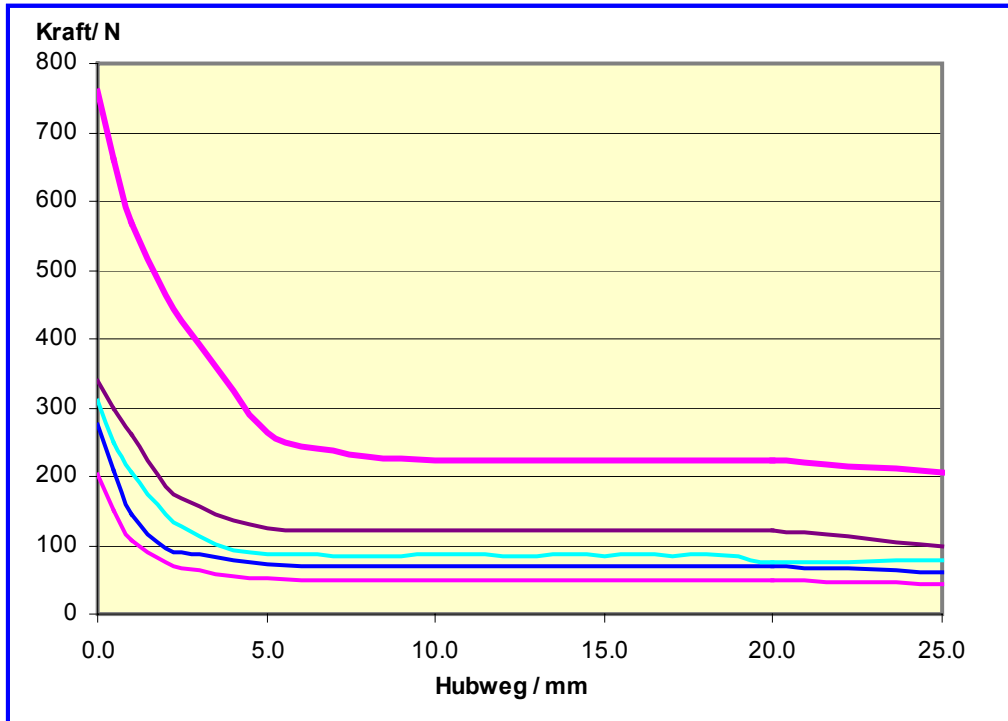


Abbildung 39: Kraft- Durchflutungskennlinie in einem Konus-Anker

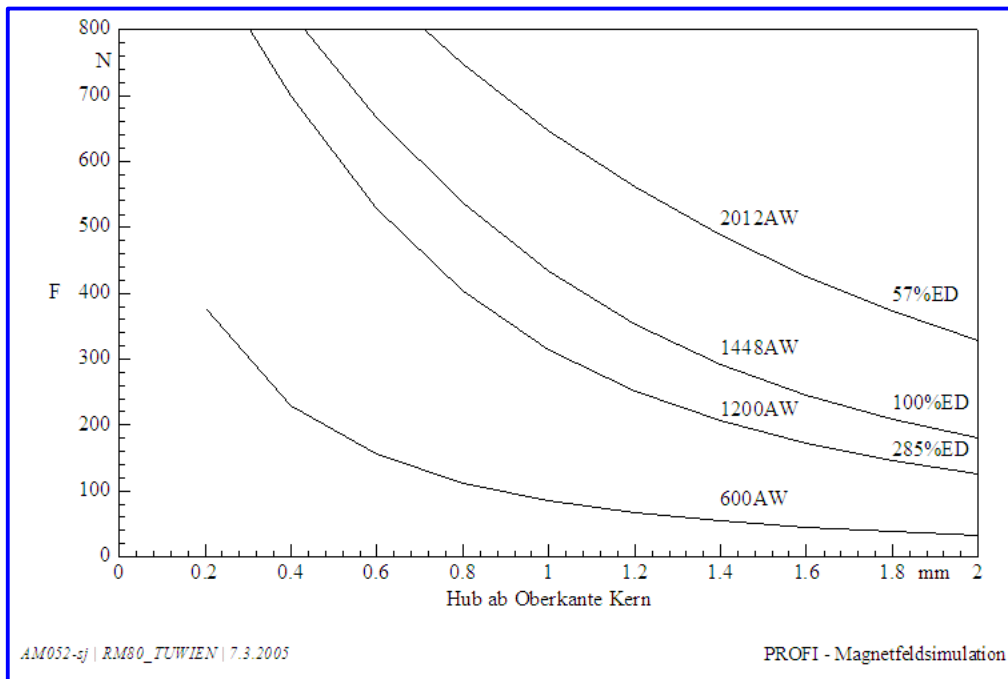


Abbildung 40: Kraft- Durchflutungskennlinie eines Flachanker Hubmagneten
der Type RM 080 Firma Kuhnke (nach der Energieoptimierung)

Abbildung 39 und Abbildung 40 stellen einen Vergleich zwischen Konus- und Flach- Anker dar. An den beiden Kennlinien für Konus- und Flachanker ist ersichtlich, dass mit dem Flachankersystem für die vorliegende Anwendung höhere Haltkräfte bei niedrigem Stromverbrauch erzielt werden können.

8.6.1 Optimieren der nötigen Energie in der Haltephase

Die Bestimmung der optimalen Durchflutung Θ für die Haltekraft ergibt sich (siehe Abbildung 40) aus

$$\Theta = I * N = 600 \text{ AW.}$$

[AW] ... abgeleitete Einheit für Ampere mal Windungsanzahl.

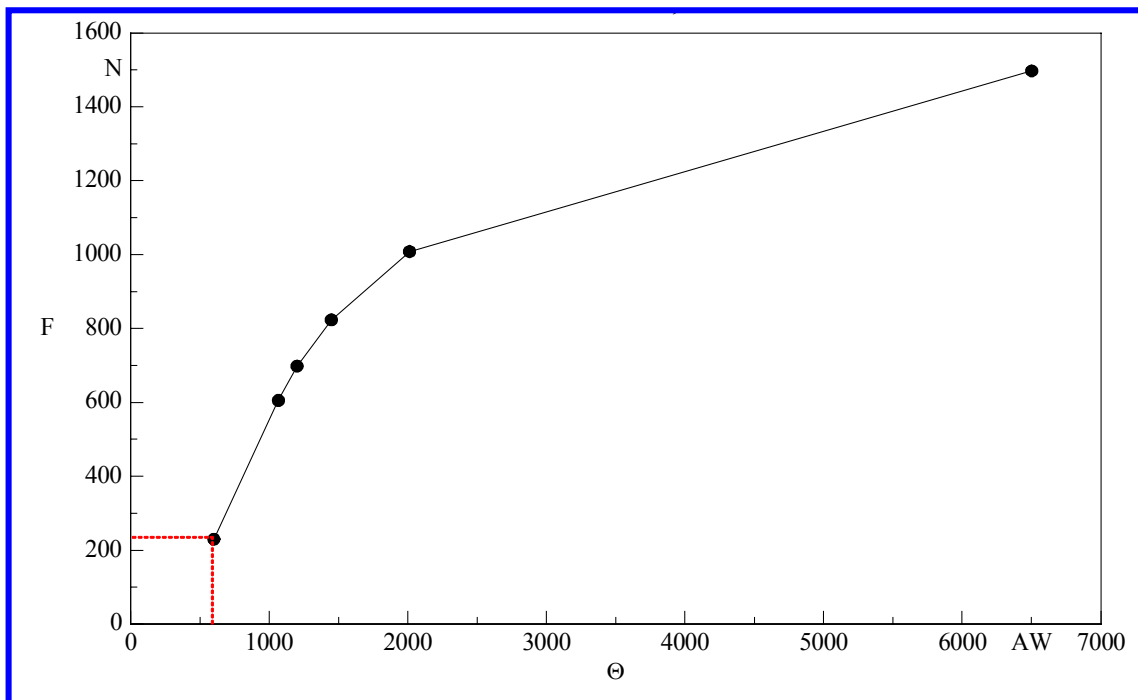


Abbildung 41: Simulation einer optimalen Durchflutung

Mithilfe der Software PROFI- Magnetfeldsimulation

Die Simulation zeigt (Diagramm Abbildung 41), dass die mechanische Kraft (Federkraft, Masse, ...) von 90 N bereits mit 600 AW (Ampere Windung) sehr

sicher gehalten wird.

Bei der Verwendung einer besonders dünnen Distanzscheibe $d = 0,2 \text{ mm}$ beträgt die Haftkraft des Magneten noch ca. 350 N .

Wärmeleistung und Erhitzung

Bei einer Spule mit der Durchflutung von 600 AW und 732 Windungen ergibt sich, bei einer für die Simulation angelegten Versorgungsspannung von $3,13 \text{ V- DC}$, ein Haltstrom der Stärke $I_{\text{halt}} = 600/732 = 0,82 \text{ A}$.

Bei einer Umgebungstemperatur von $+40^\circ\text{C}$ ergibt sich, durch den Ohmschen Widerstand der Spule, eine Eigenerwärmung des Magneten um ca. 10°C (bei einer Temperaturannahme von $T = 50^\circ\text{C}$ erreicht die Spule, mit 732 Windungen, einen ohmschen Widerstand von $R = 3,82 \Omega$).

Somit ergibt sich gemäß Gl- 55 eine Warmleistung P von:

$$P_{\text{halt}} = I * U = I^2 * R = U^2/R = 2,6 \text{ W}$$

Um die gleiche Leistung von $2,6 \text{ W}$ zu erzielen, wird bei einer Erhöhung der Spannung auf 12 V , der Strom auf $0,22 \text{ A}$ verringert.

Kalt-Halte-Leistung und Vereisungsgefahr

Bei tiefen Temperaturen um -40°C ohne Eigenerwärmung ergibt sich ein Widerstand $R (-40^\circ\text{C}, \text{min}) = 2,14 \text{ Ohm}$. Durch die Eigenerwärmung (min 10°C) wird ein Einfrieren des Hubmagneten (im Betrieb) verhindert.

Der Gl- 55 entsprechend ergibt sich eine Kalt-Halte-Leistung von $4,6 \text{ W}$.

Bei einer Spannungsversorgung von $U = 24 \text{ V- DC}$ kann ein Strom von

$I = 0,19167 \text{ A}$ erreicht werden.

8.6.2 Optimieren der nötigen Energie in der Anzugsphase

Das Diagramm Abbildung 42 zeigt, dass zum Anziehen des Magneten eine Durchflutung von 5750 AW sicher ausreicht.

Magnetkraft $= 130 \text{ N} >$ benötigte mechanische Kräfte $= 90 \text{ N}$

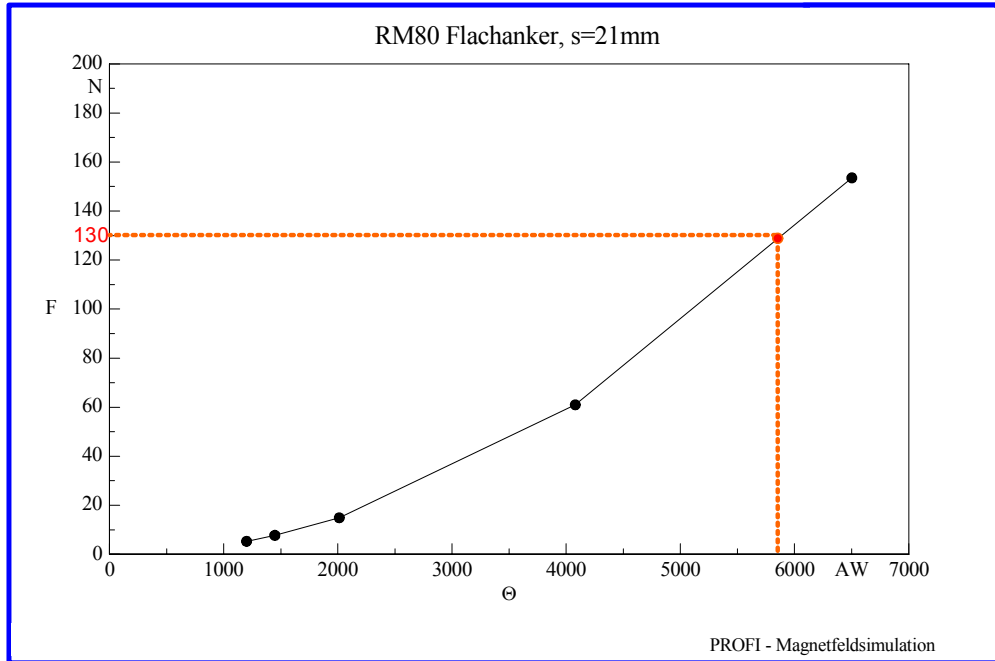


Abbildung 42: Simulation einer optimalen Kraftdurchflutungskennlinie, für die Anzugsphase

Abbildung 43 zeigt, dass die Anzugskraft bei einem 21 mm Hubweg s noch über 100 N beträgt.

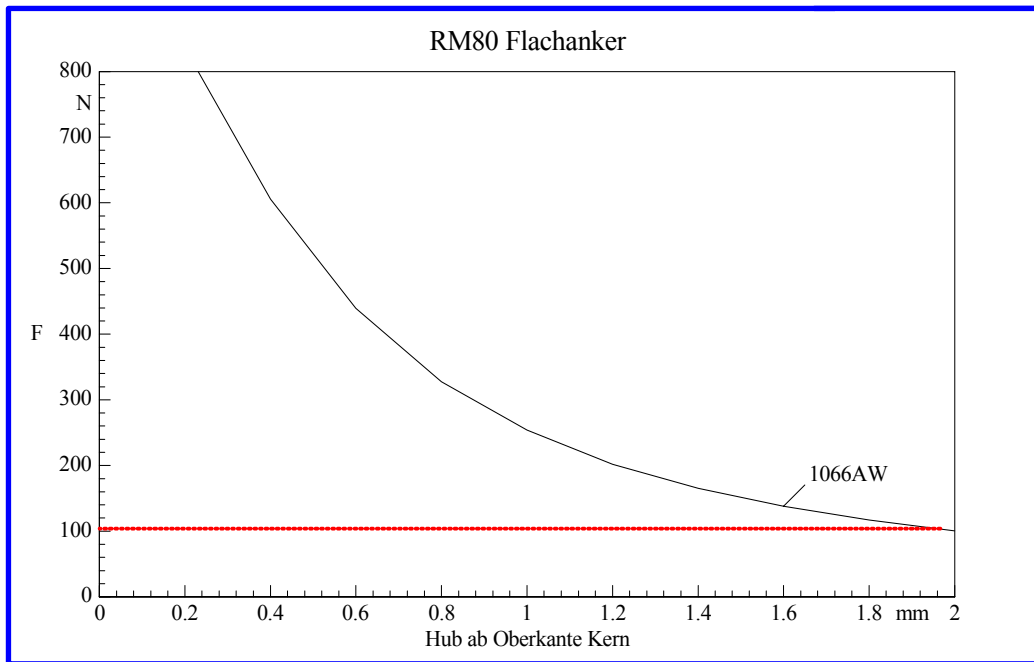


Abbildung 43: Simulation einer optimalen Kraft- Hubkennlinie, für die Anzugsphase, bei Durchflutung $\Theta=1066$ [AW]

An der oben ausgewählten Spule mit 732 Windungen wird deutlich, dass ein Strom der Stärke $I = \Theta / N = 7.85 \text{ A}$ erforderlich ist, d.h. eine Spannung von 30 V- DC benötigt wird, um den Strom auch im Warmzustand zu betreiben.

Bei kalten Temperaturen um -40°C ohne Eigenerwärmung ergibt sich ein Widerstand $R (-40^\circ\text{C}, \text{min}) = 2.14 \text{ Ohm}$, entsprechend einer Kalt-Anzugs-Leistung von 420 W. Diese Anzugsleistung sollte für ca. 300 ms zur Verfügung stehen. Da die Einschaltphase eines Magneten 300 ms dauert, kann das Problem der Stromspitze durch ein Hintereinanderschalten der Hubmagneten (in Gruppen oder einzelnen Magneten) gelöst werden (siehe Tabelle 10).

FS = 20		P _{ges} [W]		t _{ges} [s] Dauer der Einschaltphase
FSG	AG	Für große Seilbahnen	Für kleine Seilbahnen ¹⁴	
20	1	8300	2760	0,3
10	2	4200	1400	0,6
5	4	2100	700	1,2
2	10	840	280	3
1	20	420	140	6

Tabelle 10: Darstellung der momentanen Leistung während der Einschaltphase

FS Anzahl aller Fangschuhe einer Seilbahn; (bei der Erprobung des Prototyps wurde eine Seilbahn mit 10 Stützen ausgewählt. → FS = 20)

FSG Anzahl der Fangschuhe, die in einer Gruppe gemeinsam während der Schaltphase eingeschaltet werden;

¹⁴ **Große Seilbahnen:** sind z.B. Einseilumlaufbahnen mit 10 bis 15 Stützen die mit Fang-einrichtungen für 80kN Last ausgerüstet sind (20 bis 30 Magneten).

Kleine Seilbahnen: sind z.B. Schleplifte mit 5 bis 10 Stützen die mit Fang-einrichtungen für 20kN Last ausgerüstet sind (20 Magneten). Bei der Leistungsberechnung P_{ges} für kleine Seilbahnen wurde P_{ges}/3 der große Seilbahnen eingesetzt.

- AG Anzahl der Magnetgruppen. $AG = FS/FSG$
- t_{ges} Dauer der Einschaltphase aller Magnete (bis die Einschaltphase abgeschlossen ist);
 $t_{ges} = t_{an} * AG$
- t_{an} ist die Einschaltzeit, die ein Magnet oder eine Magnetgruppe während der Einschaltphase benötigt; (der im Prototyp eingebaute Magnet benötigte eine Einschaltzeit von 300 ms)
- P_{ges} gesamte Leistung aller Magneten bei der Einschaltphase (verbrauchte momentane Leistung)
 $P_{ges} = P_{Anz} * AG = P_{Anz} * FS/FSG$
- P_{Anz} die Leistung, die ein Magnet während der Einschaltphase benötigt
 $P_{Anz} = 420W$

Für die bei der Erprobung des Prototyps ausgewählte Seilbahn dauert die Einschaltphase gemäß der Tabelle 10 (letzte Zeile):

$$t_{ges} = 20 * 300 \text{ ms} = 6 \text{ s}$$

Damit wurde die Energiespitze sehr abgeflacht. In der Einschaltphase erreicht man damit eine stabile Versorgungsspannung.

Durch die Widerstandsänderungen von Kupfer (0.393% / °C) fließt (bei einer Spannungsansteuerung) ein Strom von 7.85 A bis 14 A bei 30 V- DC in der Anzugsphase. Bei einer Stromansteuerung reicht ein Stromregler mit einem Konstantstrom von ca. 8 A aus. Dafür benötigt aber jeder Magnet seine separate Ansteuerung / Zuleitung.

Hierbei ist zu beachten, dass immer die erforderliche Leistung die Stärke des Magneten bestimmt. Eine Änderung des Spulendrahtes führt bei gleichem Wickelraum nur zu einer Änderung von Strom und Spannung, aber nicht zu einer Änderung der benötigten Leistung!

8.7 Maßnahmen zur Gewährleistung der Energieversorgung

Es ist notwendig bei der Energieversorgung des Entgleisungsschutzes eine sichere und stabile Versorgungsspannung zu planen. Um diese Sicherheit zu gewährleisten, müssen folgende Fälle berücksichtigt werden:

- Stromausfall → Notstromaggregate
- Spannungsüberbrückung (bis der Notfallgenerator seine Leistung erbringen kann)
- Spannungsabfall
- Überspannung und Spannungsspitze

8.7.1 Vorschläge für die Gewährleistung der Energieversorgung

8.7.1.1 Normaler Betrieb (Netzstrom):

Abbildung 44 zeigt ein Schema einer allgemeinen unterbrechungsfreien Stromversorgung. Der Normalbetrieb beschreibt eine vom Netz stabile Spannungsversorgung. Dabei wird die Netzspannung (230V oder 400V Wechselfspannung) nach ihrer Umwandlung in 24 V Gleichspannung, an den Ausgang und an das Batterieladegerät direkt weitergeschaltet.

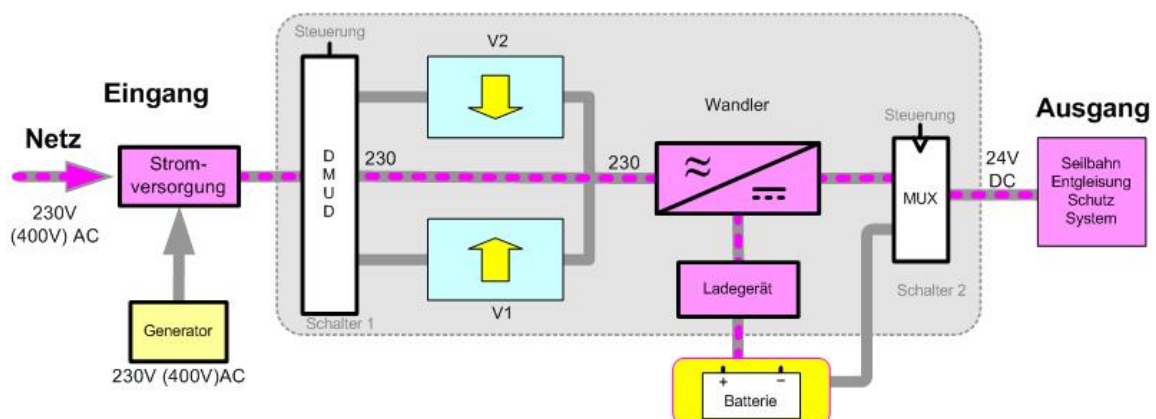
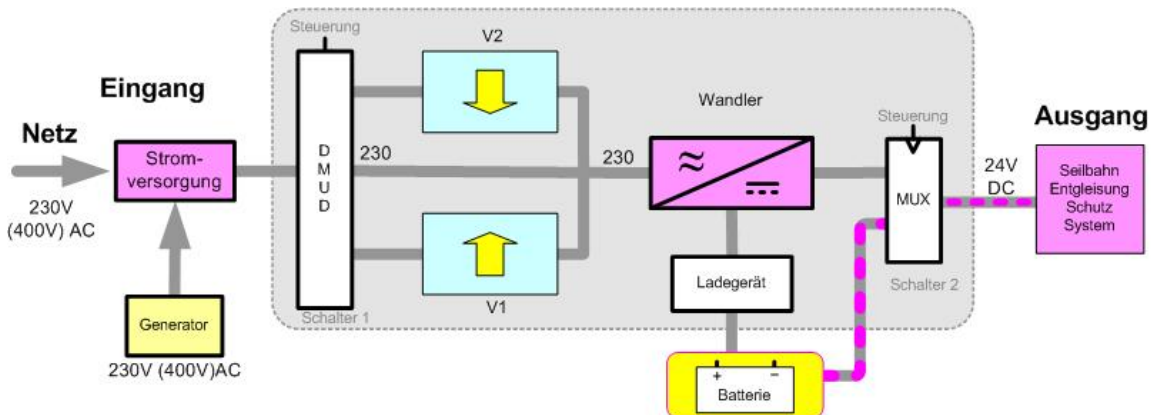


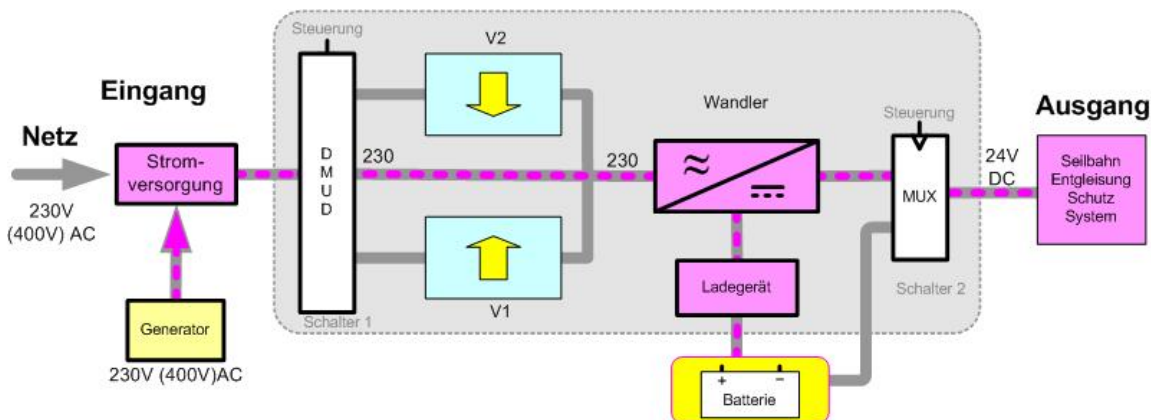
Abbildung 44: allgemeines Schema für eine sichere Energieversorgung

8.7.1.2 Stromausfall (Überbrückungsstrom & Notfallstrom):

Bei einem Stromausfall wird (wie es bei Seilbahnen üblich ist) ein Notstromaggregat automatisch gestartet¹⁵. Allerdings dauert es eine gewisse Zeit, bis dieses Notstromaggregat startet und auch seine 100 %-ige Leistung erbringt. Eine Recherche zeigt, dass die am Markt angebotenen Notstromaggregate eine Startzeit¹⁶ von mindestens mehreren Sekunden bis einigen Minuten benötigen.



a) Überbrückungsstrom



b) Notfallstrom

Abbildung 45: Eine mögliche Lösung bei Stromausfall

¹⁵ In den Vorschriften für die Seilbahnen wird verlangt, dass jede Seilbahnanlage über einen Notantrieb verfügt, dessen Energieversorgung vom Hauptantrieb unabhängig ist.

¹⁶ Aus diesem Grund werden solche Notstromaggregate, in manchen Fällen z.B. bei Krankenhäusern 24 Stunden in Betrieb sein, um bei einem Stromausfall ohne Stormunterbrechung das Krankenhaus mit Energie versorgen zu können.

Die in Abbildung 45 a) und b) zeigten eine mögliche Lösung, die in der Praxis bei einem Netzstromausfall für die Energieversorgung eingesetzt werden kann.

Wird die Netzenergie unterbrochen, schaltet das System automatisch auf Batteriebetrieb um (siehe Abbildung 45a.). Dieses Umschalten mithilfe elektronischer/digitaler Bauteile (Diode oder Multiplexer¹⁷) erfolgt in Mikrosekunden, wodurch eine unterbrechungsfreie Stromversorgung erreicht wird. Auf dieselbe Weise wird von Batteriebetrieb auf Notstrombetrieb umgeschaltet, wenn das Notstromaggregat seine 100%-ige Leistung erreicht hat (Abbildung 45b). Die Überbrückungsstromdauer hängt von der Batteriekapazität¹⁸ ab (eine 24V Batterie kann für eine Überbrückungsdauer von 50min bis einigen Stunden je nach Kapazität reichen).

8.7.1.3 Spannungsabfall, Überspannung und Spannungsspitze:

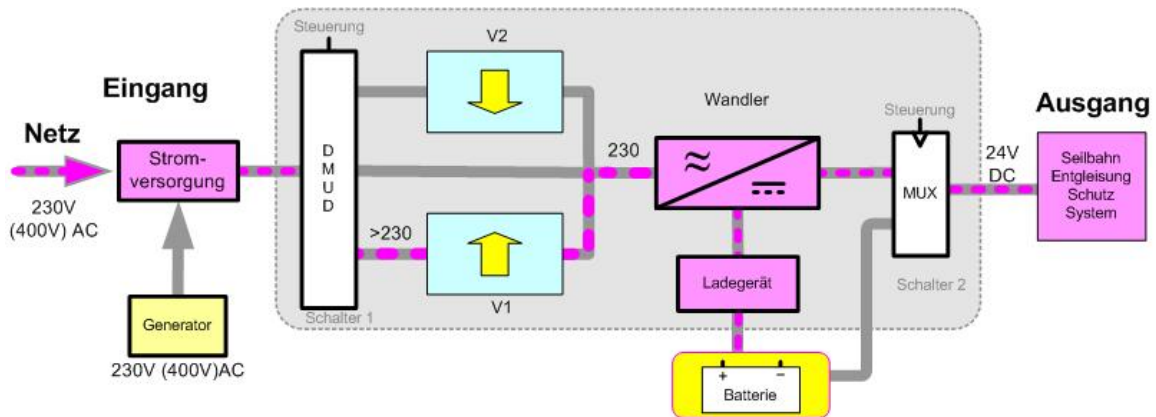
Über die beiden Verstärker V1 und V2 werden die Spannungen bei einem Spannungsabfall erhöht (durch V1) bzw. bei einer Spannungserhöhung durch V2 auf den Sollwert verringert.

Dabei wird über ein Vergleichsmodul (Comperator, nicht in der Abbildung), die Istspannung mit der Sollspannung ständig verglichen und darüber hinaus werden Steuersignale an den Schalter 1 (DMUX¹⁹) gesendet, um diesen in die richtige Option zu schalten (Abbildung 46 a und b).

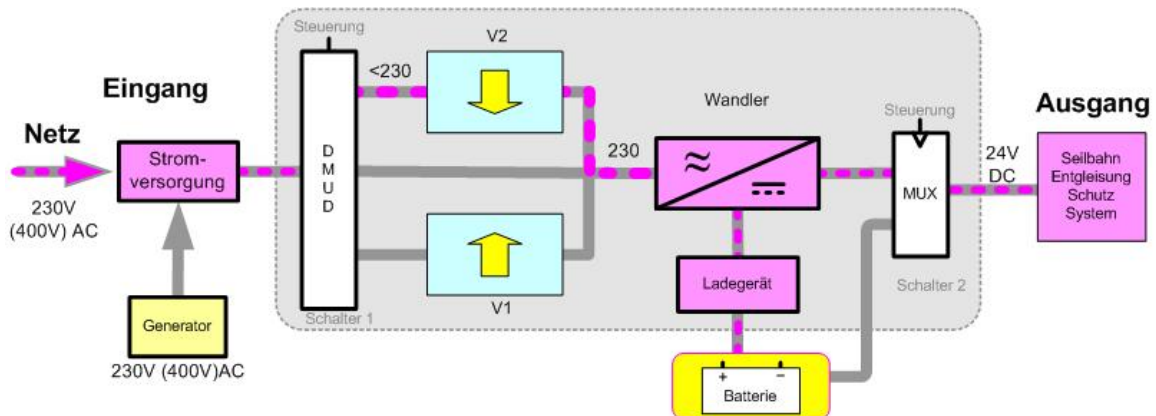
¹⁷ **Multiplexer** (kurz **MUX**) ist ein Selektionsschalter, mit dem aus einer Anzahl von Eingangssignalen (über ein oder mehrere Steuersignale) eines ausgewählt und zum Ausgang durchgeschaltet werden kann.

¹⁸ Die Batterie-Kapazität drückt das Leistungsvermögen (Betriebsdauer, wird in Amperestunden Ah angegeben) einer Batterie aus.

¹⁹ **Demultiplexer** (kurz **DMUX**) ist ein Selektionsschalter, mit dem ein Eingangssignal zu einem aus mehreren Ausgängen (über ein oder mehrere Steuersignale) durchgeschaltet werden kann. Ein Demultiplexer ist ein gesteuerter Wahlschalter.



a. Spannungen, die kleiner als die Sollspannung sind, werden über V1 erhöht



b. Spannungen, die größer als die Sollspannung sind, werden über V2 verringert

Abbildung 46: Spannungsstabilisierung im Falle eines Spannungsabfalls oder einer Spannungserhöhung

Es gibt eine Reihe von Firmen, die bei der Realisierung der zuvor beschriebenen Energieversorgungssysteme herangezogen werden können (einige davon sind im Anhang Firmenadressen zu finden).

8.8 Zusammenfassung

- Durch die Energieoptimierung wurde der Leistungsverbrauch von 149W auf 2,6-4,6W verringert (pro Fangschuh).
- Für den praktischen Betrieb einer Seilbahn mit z.B. 10 ausgerüsteten Stützen ist der Energieverbrauch:
 $P(\text{halt, kalt})=4,6\text{W} * 20=92\text{W}$ für einige Minuten bis die Magnete warm werden
- Wenn die maximale Stromstärke 12 A beträgt und eine Batterie mit einer Kapazität von 300 Ah verwendet wird, kann diese einen maximalen Strom von 12 A für über 20 Stunden zur Verfügung stellen
- Bei einer Unterbrechung der Versorgung nach der Aufwärmphase (ca. 2 Minuten), kann die gleiche Batterie das System für über 30 Stunden mit Strom versorgen

9 Visualisierung = Instandhaltung und Qualitätsmanagement

Es ist erstrebenswert alle seitlichen Bewegungen des Seiles in Echtzeit zu erfassen und in der Betriebsstation, sowohl auf einem Überwachungsbildschirm abzubilden (visualisieren), als auch in eine Datenbank zu speichern (registrieren).

- Durch die Visualisierung kann die Seilbewegung live überwacht werden, um eine Qualitätskontrolle durchzuführen, Fehler frühzeitig zu erkennen und Folgeschäden zu vermeiden.

→ Qualitätskontrolle der Seilbahn

- Die registrierten Daten können jederzeit analysiert werden, um im Falle eines instabilen Seilverlaufes auf den Rollen, diese genau zu untersuchen und damit mögliche Fehlerursachen festzustellen und zu eliminieren.

→Wartungs- und Instandhaltungsmanagement

Durch den Einsatz von Abstandssensoren (anstelle von Näherungssensoren), kann die Seilabweichung von der Rillenmitte, in Echtzeit, gemessen werden.

Die erfassten Daten werden in der Betriebsstation von der Steuereinheit bzw. Steuerungssoftware verarbeitet. Ein Softwaremodul visualisiert die Seilbewegung (Richtung und Abweichung) auf dem Überwachungsbildschirm und speichert die momentane Seillage in eine Datenbank.

9.1 Randbedingungen für das in Folge beschriebene Monitoring

Folgende Punkte sollten bei der Visualisierung der Seillage beachtet werden:

- 1) **Einlaufende Rolle:** Bei der Abbildung der Seilbewegung auf dem Bildschirm wird von jeder Stütze nur die einlaufende Rolle dargestellt.
- 2) **Maßstab:** Die Rollen- und Seilmaßstäbe müssen verhältnismäßig übereinstimmen (siehe Abbildung 47).
- 3) **Darstellung der Seillage:** Den unterschiedlichen Seillagen werden folgende Farben für die live- Überwachung auf dem Bildschirm zugeordnet:

Grün → Seil ist in der Normallage (Mitte des Rillenfutters) → Solllage: Dabei wird die Solllage immer grün im Hintergrund als stehendes Bild dargestellt.

Gelb → Das Seil ist zwar in der Rille, aber seitlich verschoben (z.B. bei leichtem Seitendruck).

Orange → Das Seil hat die Rillenkante bereits verlassen oder die Rillenkante ist abgenutzt. Das Seil bleibt in seiner dortigen Lage stehen.

Rot → Wenn das Seil sich von der Rillenkante nach außen bewegt, oder wenn das Seil sich zwischen der Rillenkante und der Rollenbordscheibe befindet.

Rot und Blinken (Rolle + Seil) → Das Seil ist bereits bei der Bordscheibe angelangt.

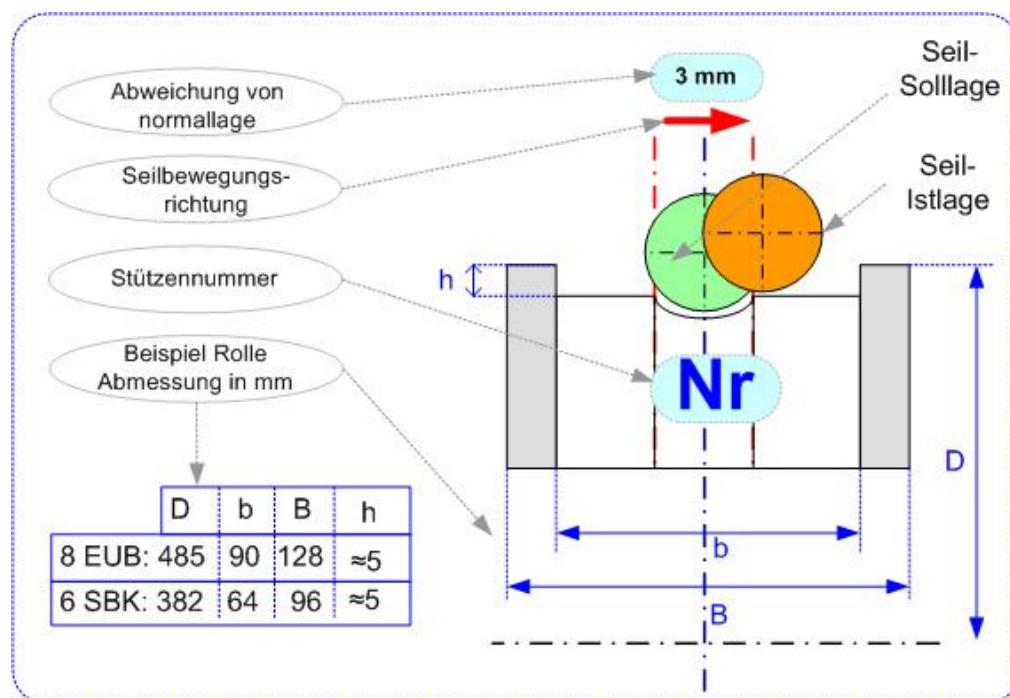


Abbildung 47: Schema einer Abbildung einer Rolle auf dem Bildschirm

4) **Bewegungsrichtung:** Der rote Pfeil in der Abbildung 47 zeigt die momentane Bewegungsrichtung des Seiles.

5) **Abweichung:** Die Angabe über die momentane Abweichung des Seiles von

der Normallage wird über dem roten Pfeil in der Maßeinheit mm angezeigt.

- 6) **Auflösung:** Eine hohe Auflösung bei der Visualisierung²⁰ ist hier stets notwendig, um Seilklemmen und Spleißstellen als solche zu erkennen. Werden diese erkannt und auf dem Bildschirm dargestellt so können sie auch kontrolliert und gezählt werden (dafür ist ein eigenes Software Modul nötig).

9.2 Die seitlichen Seilbewegungen in der Betriebsstation abbilden

Es ist sehr wichtig, bei der Visualisierung die Überschaubarkeit, das bedeutet mit möglichst wenigen Elementen die notwendige Information am Bildschirm darzustellen, zu gewährleisten.

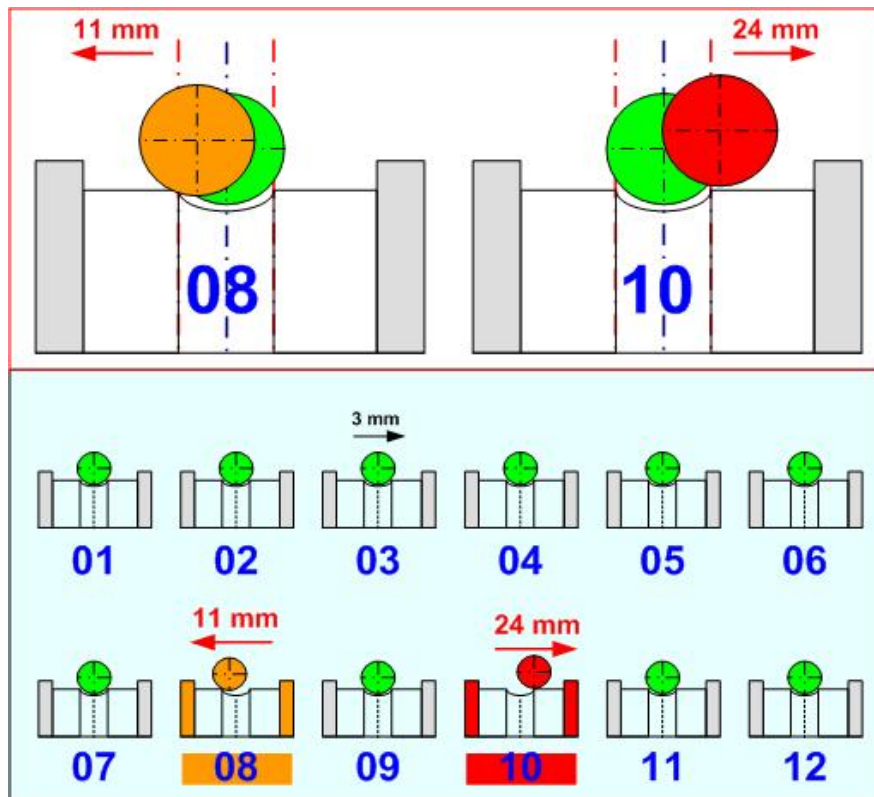


Abbildung 48: Abbildung der seitlichen Seilbewegung in der Betriebsstation

²⁰ Bei der Auflösung handelt sich um folgendes des:

1. Signalerfassungsauflösung → Sensoren (Abtastrate, Schaltzeiten, ..),
2. Signalausgabe → hohe Auflösung bei der Darstellung auf dem Bildschirm (Abbildungsinformation) und
3. Bildschirmauflösung

Ein denkbarer Lösungsvorschlag wäre z.B. immer nur die zwei Rollen abzubilden (Abbildung 48), bei denen das Seil die größte Abweichung von der Normallage hat (worst case).

9.3 Menü zur Auswertung der aufgezeichneten Daten (Historie)

Die in der Datenbank gespeicherten Informationen über die Seilbewegungen, (Abweichungswerte zu jedem Zeitpunkt) können über ein Menü²¹ in unterschiedlichen Formen dargestellt werden (Abbildung 48 und Abbildung 49).

Durch Anklicken der Abbildung der jeweiligen Rolle am Bildschirm können folgende Informationen aufgerufen werden:

- Daten werden als Tabelle (Zeitwert und Abstandswert) oder
- als Diagramm gezeichnet (Abstand in Abhängigkeit von der Zeit) oder
- als Visualisierungsbilder (dabei kann ausgewählt werden, ob die seitliche Seillage, Seilklemmen Anzahl, Seilklemmen Abstand, Spleißstellen, ... am Bildschirm dargestellt werden)

Bei der Darstellung von Diagrammen kann zwischen folgenden Unterpunkten ausgewählt werden:

- Ob die Daten online (live) angezeigt werden, oder
- nur über ein bestimmtes Zeitintervall (Stunde, Betriebstage, ..), oder
- Ereignisorientiert (z.B. Abweichungswert, Häufigkeit, Grenze,) oder
- Zeit- und ereignisorientiert (z.B. eine Stunde vor/nach dem Auftreten der max. Abweichung, ..).

Über den Verlauf der Kurve im Diagramm kann der Zustand des Seiles auf der

²¹ Menüaktivierungsvorschlag:

Doppelklick auf das Bild der Stütze, dann wird diese Rolle vergrößert im oberen Teil des Bildschirms gezeigt.

Klick auf die rechte Maustaste: → Menü (Historie, Online Überwachung,...) → Eingabeformular (zur Bestimmung des Zeitintervalles, der Ereignisse, Grenzen, ..) → ausgewähltes Menü wird im oberen Teil des Bildschirms in Form eines Diagramms gezeichnet bzw. als Tabelle dargestellt.

Rolle genauer betrachtet werden und über die Ursachen der Seilbewegung können genaue Angaben getroffen werden.

Es gibt eine Reihe von Störungsursachen, die über die im Diagramm gezeichneten Kurven erkannt werden können.

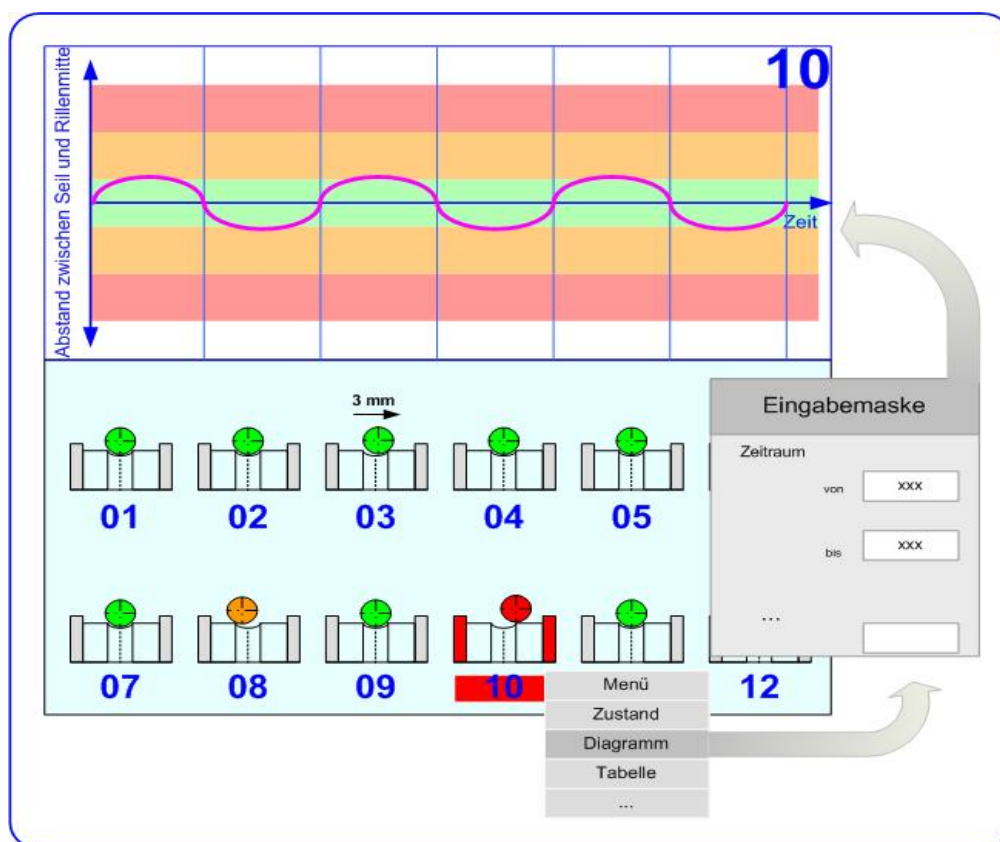


Abbildung 49: Darstellung der registrierten Daten in Form einer Kurve

Eine Rolle mit hoher horizontaler Schwingungstoleranz verursacht beispielsweise einen Kurvenverlauf wie der in Abbildung 49 dargestellte Verlauf zeigt.

Ebenso ergeben sich bei gequollener Gummifütterung, Spur- und Fluchtfehlern (Abbildung 50) für die Seildarstellung charakteristische Kurvenverläufe.

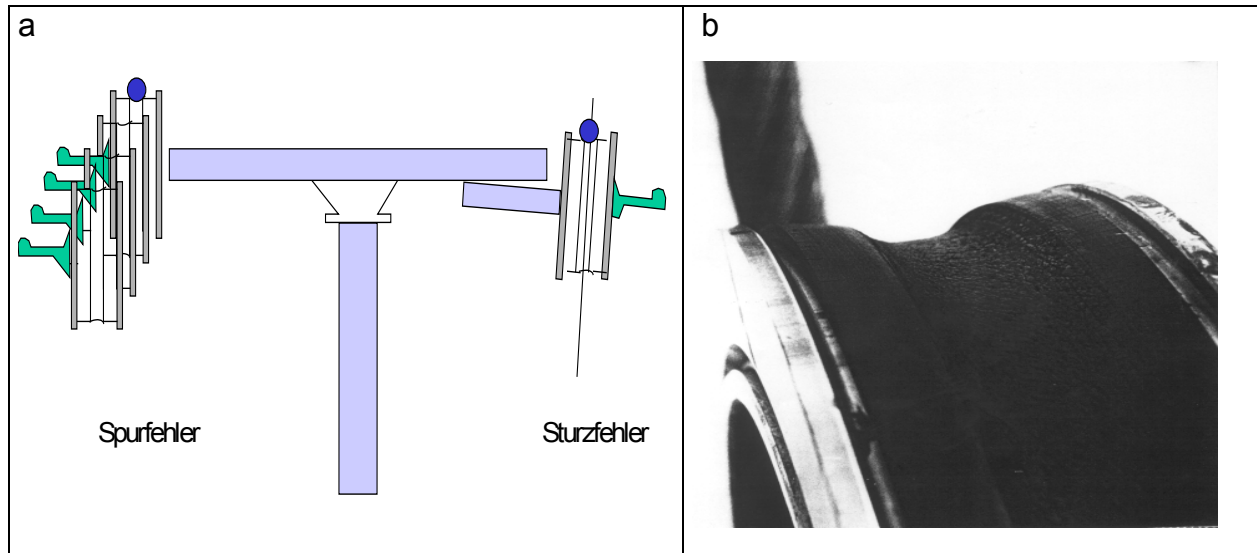


Abbildung 50: a) Spur und Sturzfehler, b) schlechte Qualität des Rollenfutters gefährdet die Seilsicherheit, Originalbilder aus der Literaturquelle [45]

Die gewonnenen Erkenntnisse über diese Kurvenverläufe und deren Fehlerursachen können wiederum bei der Fehlererkennung sehr hilfreich sein.

Ein anderer Kurvenverlauf ergibt sich bei einer seitlichen Seilbewegung durch Seitenwind. Durch Seitenwind kann das Seil, durch seitliche Kräfte, aus seiner stabilen Lage (Rillenmitte) gebracht werden.

Handelt es sich dabei um einen Seitenwind mit einer konstanten Geschwindigkeit, dann kann über die vom Visualisierungsprogramm gezeichnete Kurve erkannt werden, ob es sich um einen konstanten Wind gehandelt hat.

Bei starkem Seitenwind bewegt sich das Seil von der Rille zum Bord aufgrund des starken Druckes kontinuierlich bis zum Rollenbord.

Bei einem Führungsfehler hingegen kann sich das Seil auch zwischen der Rille und der Bordscheibe befinden (das wäre beispielsweise der Fall, wenn die Rollenbatterie schief in der Linie steht, dann sucht sich das Seil die Lage aus, in der es besser in der Linie läuft).

9.3.1 Vorteile der Seilbahnvisualisierung

- Seilbahnbetreiber erhält die Möglichkeit, sich einen Überblick über die Seilbahn in der Betriebsstation zu schaffen;
- Erkennen von Seilführungsfehlern und seitlichen Seilabweichungen durch Seitenwind (durch Seillagekontrolle);
- Erkennen von Seilklemmen und Spleißstellen → Zustandskontrolle;
- Das System soll die Kabinenanzahl beim Festklemmen registrieren und diese immer bei jeder Stütze wieder abfragen und kontrollieren²². Eine verlorene Kabine wird daher erkannt (bzw. zwischen welchen zwei Stützen sich die defekte Klemme geöffnet hat).
- Durch das Registrieren des Abstandes zwischen zwei Klemmen (beim Festklemmen) wird die Verrutschungsgefahr (defekte/lockere Klemme oder Auftreten eines Fehlers beim Festklemmungsprozess) von Seilklemmen erkannt;
- Abnutzung des Rillenfutter bzw. der Rillenkante wird frühzeitig erkannt;
- Erkennung einer beschädigten Rolle;
- Fehlverhalten von Fahrgästen kann großteils erkannt werden (z.B. schaukeln);

9.4 Seilbahnmonitoringzentrale (Online Kontrolle)

Mit Hilfe einer offenen Kommunikationsstelle²³ kann jede Seilbahn, überall und zu jedem Zeitpunkt, über ein Netz mit der Seilbahnmonitoringzentrale²⁴ verbunden werden (siehe Abbildung 51). Die Zentrale liefert Daten (online Daten) / Protokolle (registrierte Daten) an die Anlagendokumentation (Dokumentationsmanagement). Diese Protokolle können für die Wartung, Instandhaltung und auch für neue Entwicklungen immer wieder herangezogen werden.

²² Ähnlich wie ein Achsenzähler im Eisenbahnwesen.

²³ Moderne Seilbahnsteuereinheiten haben bereits Kommunikationsschnittstellen für die Verbindung mit einem Webserver

²⁴ Die Seilbahnmonitoringzentrale muss sich nicht direkt im Gebäude der Herstellerfirma befinden, sondern kann auch dort sein, wo es technisch und wirtschaftlich für die Firma effizient ist.

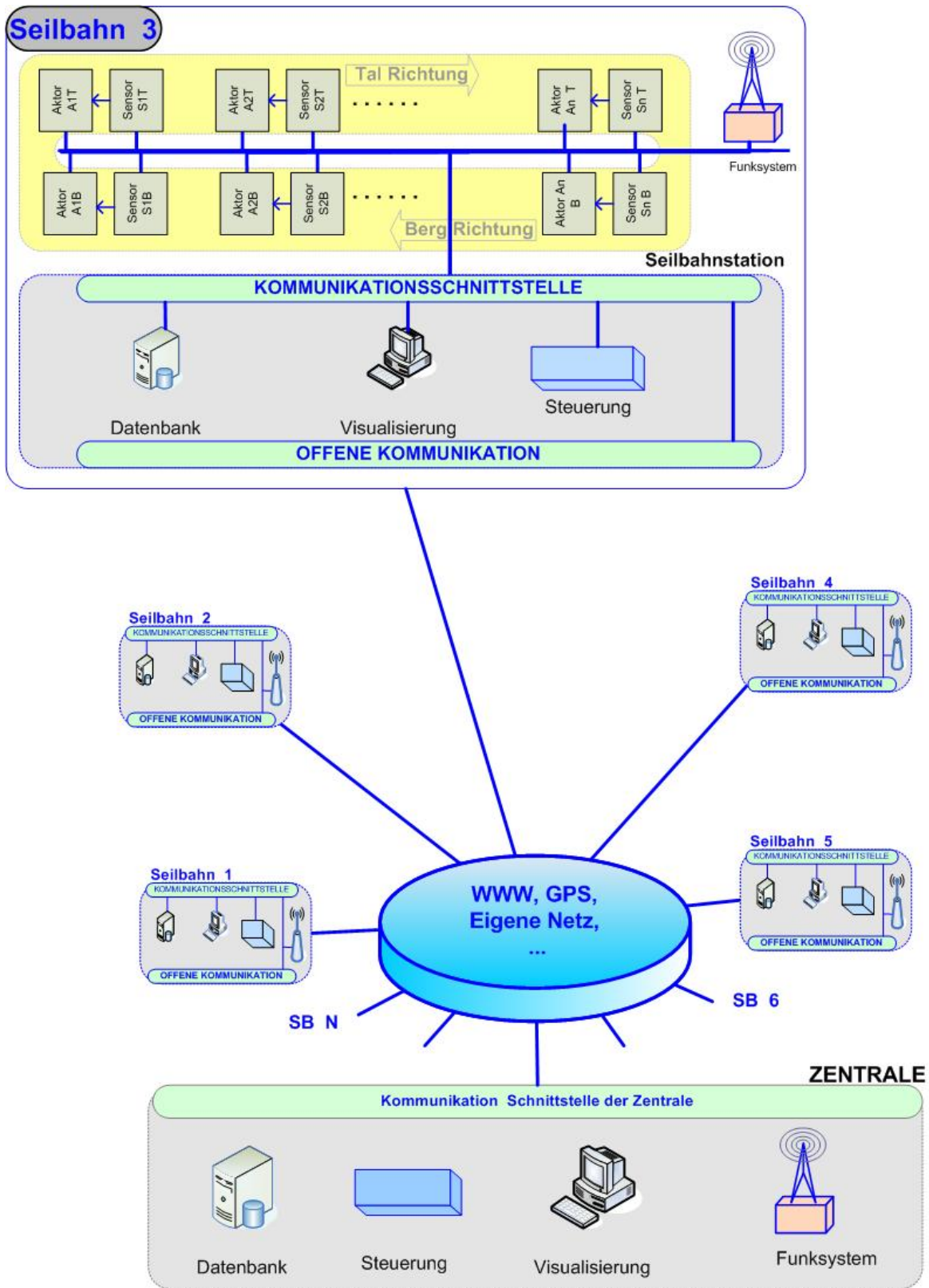


Abbildung 51: Verbindung der Seilbahnen mit der Seilbahnmonitoringzentrale

9.4.1 Vorteile der Seilbahnmonitoringzentrale

- Herstellerfirma/ Seilbahnbetreiber erhält einen Überblick über die Seilbahnen
- Der zuständige Mitarbeiter der Herstellerfirma/ Seilbahnbetreiber kann durch Datenanalyse und online- Betrachtung den Verlauf bzw. die momentane Seillage beobachten, sodass Wartung und Instandhaltung verbessert werden können. Es werden damit Zeit und Ressourcen gespart.
- Die gewonnenen Informationen können für die Entwicklung neuer Anlagen herangezogen werden.

9.5 Detektion entgleisungskritischer Seitenwindböen

Wie im Kapitel 3 „Seilschwingungen durch Seitenwind“ und Kapitel 4 „Grenzlagen“ gezeigt wurde, liegt ein hohes Seilentgleisungsrisiko vor, wenn die Windböe mit der gleichen Schwingungsfrequenz wie die Eigenfrequenz des Seiles schwingt. Es ist daher sinnvoll ein Programmmodul, zur Erkennung von Windböenschwingungen, die mit der gleichen Frequenz schwingen, wie die eigene Frequenz des Seiles, zu entwickeln.

Dieses Programmmodul vergleicht kontinuierlich die Windböenschwingungsfrequenz (aus der momentanen Windgeschwindigkeit²⁵) mit der Eigenfrequenz²⁶ des Seiles.

Stimmen die zwei Frequenzen überein, dann muss das Programm die nötigen vorprogrammierten Maßnahmen durchführen (z.B. den Seilbahnbetrieb stilllegen, in der Datenbank diesen Vorfall registrieren, die nötigen Meldungen an die Meldeeinrichtung senden und visualisieren).

²⁵ Jede Seilbahn hat eine Messstation für die Windgeschwindigkeit. Werden diese Werte in einer Datenbank registriert, so können diese für die Berechnung der Dauer der Windböenschwingung bzw. Frequenz verwendet werden.

²⁶ Ist ein bereits errechneter und gespeicherter Wert; für die Berechnung der Eigenfrequenz des Seiles (Kapitel 3)

10 Sicherheitsmassnahmen

Bei allen in Betracht zu ziehenden Störfällen der Einrichtung gilt die Forderung, dass das System automatisch

- die Normallage (angezogener Fangschuh = Endlage) beim Normalbetrieb sichert,
- im Entgleisungsfall das Ausschwenken des Schuhs in die Fanglage auslöst und
- den Antrieb der Bahn abschaltet.

Insbesondere, soll dass das System autonom folgende Störfälle erkennt und an die Meldeeinrichtung weiterleitet:

- Defekte oder zerstörte Sensoren
- Defekte der elektrischen Bestandteile (Magnet, Leiter)
- Defekte der elektronischen Teile
- Schnittstellenfehlfunktionen oder –defekte
- Kommunikationsstörungen
- Fehler von Steuerungskomponenten
- Laufzeitfehler in der Software werden protokolliert und gemeldet; daraus folgt: Fehler können behoben werden;
- Defekte der zugehörigen elektrischen und elektronischen Teile und der Antriebsstation
- Blitzeinschlag (es müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden, um das System bzw. Systemkomponenten vor den Folgen eines Blitzschlages zu schützen).

10.1 Kommunikationssicherheit

Das Kommunikationssystem soll für die Datenübertragung folgende Eigenschaften besitzen:

- Zuverlässigkeit
- hohe Datensicherheit

- hohe Verfügbarkeit
- schnelle Datenübertragung (Echtzeit)
- Erweiterbarkeit (neue Systemkomponenten)

10.2 Sichere Maßnahmen zur Vermeidung eines Fehlalarms

Um die Funktionssicherheit des Entgleisungsschutzsystems zu erhöhen und einen Fehlalarm zu verhindern, sind folgende Maßnahmen zu treffen:

- Messeinsatz verschiedener Arten von Sensoren, um die Nachteile einer Sensorenart durch die Vorteile einer anderen Sensorenart zu kompensieren.
- Aus den Meldungen mehrerer gleichartiger Sensoren den Mittelwert bilden; Messungen an verschiedenen Stellen und anschließende Vergleichswertbildung
- Die neu gemessenen Werte werden immer mit den in der Datenbank gespeicherten Werten verglichen; Im Falle eines Fehlalarms werden die aktuellen Messwerte in der Datenbank festgehalten, um durch einen Vergleich einen neuerlichen Fehlalarm aufgrund derselben Ausgangssituation zu vermeiden.
- Berücksichtigung von Einflüssen, die auf die Genauigkeit der Sensoren negativ wirken können.

Aus diesem Grund sollen die Sensoren hohe Anforderungen (diese Kriterien werden im nächsten Punkt näher erklärt) aufweisen.

10.3 Wichtige Kriterien betreffend der gewählten Sensoren

Um die Seilentgleisung zu detektieren, werden, wie im Abschnitt „5.6 Signalerfassung“ ausgeführt, Sensoren eingesetzt. Diese reagieren empfindlich auf eine physikalische Größe (Abstand) und geben entsprechende Signale weiter. Einige wichtige Kriterien für den technischen Einsatz von Sensoren bei Seilbahnen

sind:

- Genauigkeit
- Robustheit gegen mechanische Einflüsse z.B. Erschütterungen
- Robustheit gegen raue Umweltbedingungen, wie Feuchtigkeit, Schnee, ..
- Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Ausgangssignale
- Reaktionsgeschwindigkeit
- Ansprechempfindlichkeit
- Auflösungsvermögen
- EMV- Einflüsse (Elektromagnetische- Beeinflussung und Abstrahlung)
- Hohe Lebensdauer

Zusätzlich sollen die Sensoren noch folgende Vorgaben erfüllen:

- Beibehaltung der vorgesehenen, bewährten berührungslosen Messung
- Versorgungsspannung: 10V bis 24V
- Schaltabstand: >30 mm
- Temperaturschwankungen: Temperaturbereich: - 40 °C bis 85°C.
- Schaltfrequenz: >100Hz
- Keine Beeinflussung der Messung durch Fremdkörper (Schnee, Eis, Staub u.- dgl.) zwischen Sensor und Seil

Beim Montieren der Sensoren auf der Stütze soll darauf geachtet werden dass:

- keine gegenseitige Beeinflussung benachbarter Sensoren stattfindet
- der Sensor so platziert wird, dass sich das zu erfassende Seil innerhalb des Bereichs des gesicherten Schaltabstands befindet, also . Die meisten Nährungssensoren haben eine zusätzliche Setup-LED, die dem Betriebsleiter signalisiert, dass sich das Seil in diesem Bereich befindet.
- Die dem Sensor stehende Seilfläche A_{Seil} (=Seildurchmesser d^2) soll größer oder gleich der aktiven Fläche A des Sensors sein (im Falle $d^2 > A \rightarrow$ Erhöhung des Schaltabstandes).
- Die aktive Fläche A des Sensors soll unbedingt gegenüber der Seilfläche A_{Seil} stehen (Flächenüberdeckung).

10.4 Risiko eines Blitzschlages und Schutzmaßnahmen

(bezogen auf das Entgleisungsschutzsystem)

Bei einem auf das System einwirkendem Blitzschlag können hauptsächlich die Sensoren beschädigt werden. Es können folgende Fälle auftreten:

10.4.1 Blitz schlägt direkt in einen Sensor ein

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Blitz in einen der Sensoren einschlägt, ist, da der Sensor eine sehr kleine Auffangfläche hat, sehr gering,²⁷. Der Sensor kann vor einem direkten Blitzschlag durch eine Haube aus elektrisch gut leitfähigen Blech geschützt werden.

10.4.2 Direkter Blitzeinschlag in das Seil

Wenn ein Blitz in das Seil direkt einschlägt, wird der gesamte Blitzstrom in das Seil eingespeist. Der Blitzstrom $i(t)$ teilt sich in die beiden Ströme $i_1(t)$ und $i_2(t)$ und brennt das Rollenfutter durch, um über die Stützen zur Erde zu fließen.

Durch den zeitlich veränderlichen Strom im Seil, wird ein zeitlich veränderliches Magnetfeld um das Seil aufgebaut. In der Spule des induktiven Näherungssensors werden daher Spannungen induziert, die die Sensoren beschädigen können.

Durch geeignete Sensormontage könnte versucht werden, dieses Risiko zu minimieren.

10.4.3 Blitz schlägt in der Nähe eines Sensors ein

In diesem Fall hängt der Einfluss der elektromagnetischen Felder auf die Sensoren von deren Abstand zum Blitzkanal ab. Der Blitzkanal wird als stromdurchflossener Leiter betrachtet [33].

Die Berechnung der magnetischen Feldstärke $H(r)$ und Flussdichte $B(r)$ erfolgt mit

²⁷ Eine Berechnung nach der Literaturquellen [33] und [34] ergibt für den Sensor folgende Einschlagswahrscheinlichkeit :
Alle $6,3 \cdot 10^6$ Jahre ist mit einem direkten Einschlag zu rechnen.

$$H(r) = \frac{B(r)}{\mu_0} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad .$$

GI- 56

Schlägt ein Blitz mit einer Stromstärke von 100 kA in der Nähe eines Sensors ein, dann ergeben sich Flussdichten und Feldstärken entsprechend Abb. 48 (mit $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ und Blitzstrom $I_{\text{Blitz}} = 100 \text{ kA}$).

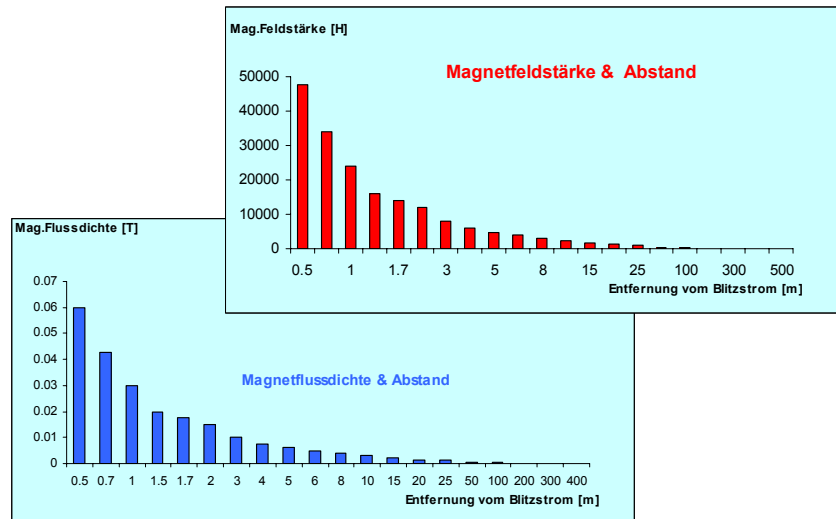


Abbildung 52: Berechnung der magnetischen Feldstärke und Flussdichte für verschiedene Abstände zwischen Blitzkanal und Sensor

Eine magnetische Abschirmung wäre eine Abhilfe .

Ein weiches magnetisches Rohr (oder Ring um den Sensor), das senkrecht im transversalen Magnetfeld (das von blitzstromdurchflossenen Seil oder Blitzkanal erzeugt wurde) angeordnet ist, bietet dem magnetischen Fluss in seiner Umgebung wegen der großen Permeabilität seines Materials einen günstigen Weg. Der Fluss wird daher bevorzugt im Eisen geführt und am Sensor vorbeigeleitet. Im hohlen Inneren des Rohres ist der Fluss annähernd gleich Null, solange sich das Material nicht magnetisch sättigt.

11 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Mess- und Testergebnisse der Fangeinrichtung und Simulationen des Seitenwindes haben gezeigt, dass die Zeit, die die entwickelte Fangeinrichtung vom Moment der Erkennung der Entgleisung bis zum Erreichen der Fangposition benötigt, wesentlich kürzer ist als die Entgleisungszeit des Seiles.

Ferner wurde bei den Simulationen von Entgleisungsfällen davon ausgegangen, dass diese durch Seitenwind verursacht werden.

Die Zeit, die das Seil benötigt, um von der Normallage bis über den Rollenbord zu springen und bis es zu einer Entgleisung kommt, beträgt ca. 1,2 Sekunden für den entwickelten Prototyp. Hingegen beträgt der zeitliche Ablauf, ab dem Zeitpunkt an dem die seitliche Abweichung der Seillage über den definierten Sicherheitspunkt hinausgeht, bis sich die Fangeinrichtung in der ausgefahrenen Fangposition befindet, 0,27 Sekunden. Aufgrund der Gegenüberstellung der Entgleisungszeit und der Reaktionszeit des Seilentgleisungsschutzsystems ist damit die Verlässlichkeit des neuen Systems bewiesen.

Es wurde für die Energieoptimierung ein mathematisches Modell entwickelt, das bei der Berechnung der Minimierung der Energie herangezogen wurde.

Infolge der Optimierung der Energie wurde der Leistungsverbrauch für den entwickelten Prototyp, von 149W auf 2,6 - 4,6W pro Fangeinrichtung für eine große Anlage verringert.

Damit ist es möglich mit einfachen Energiequellen z.B. mit einer 12 V bzw. 24 V Batterie die Sicherstellung der Energieversorgung des Systems zu gewährleisten.

Dieses Modell kann auch für die Optimierung der Fangschuhreaktionszeit herangezogen werden, da eine Veränderung der Modellparameter (z.B. Federkraft, Masse des Fangarms, Länge des Hubweges) eine Veränderung der Fangschuhreaktionszeit zufolge hat.

Das entwickelte Entgleisungsschutzsystem ist sowohl für neu zu errichtende Anlagen, als auch für die Nachrüstung bestehender Bahnen geeignet.

12 Literaturverzeichnis

- [01] Nejez, J.: Der Einfluss des Seitenwindes auf die Wahl der Spurweite von Seilschwebbahnen. Dissertation TU Wien, 1976
- [02] Nölle, H.: Berichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 4. Folge – Heft 24, Karlsruhe 1991
- [03] Engel, E.: Entgleisungsgefahr bei Einseil – Umlaufbahnen. Arbeiten des Institutes für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen an der TU Wien, Heft 13, 1987
- [04] Vollmer, M.: Stochastische Schwingungen an ausgedehnten Seilfeldern und ihre Anwendung zu Spurweitenberechnungen von Seilbahnen. Dissertation ETH Zürich, 1999
- [05] Czitary, E.: Theoretische Untersuchungen über Seilschwingungen unter Windeinfluss. Kolloquium über Seilschwingungen bei Seilbahnen, Zürich, 1972
- [06] Engel, E. Löscher, R.; Seilauslenkung durch böigen Seitenwind.
Arbeiten des Institutes für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen an der TU Wien, Heft 31, 2003
- [07] Piskoty, G.: Entgleisungssicherheit von Förderseilen an Rollenbatterien. Dissertation, ETH Zürich, 1995
- [08] Engel, E.: Die Entgleisungsgefahr bei Einseil – Umlaufbahnen Teil 1.
Arbeiten des Institutes für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen an der TU Wien Heft 10, 1985
- [09] Engel, E.: Die Entgleisungsgefahr bei Einseil – Umlaufbahnen Teil2. Arbeiten des Institutes für Eisenbahnwesen der TU Wien, Heft 12, 1986

- [10] Engel, E. Ostermann ,N.: Beweglicher Seilfangschuh. Patent AT411 983 B vom 26.03.2003
- [11] Nejez, J.: Der Einfluss des Seitenwindes auf die Wahl der Spurweite von Pendel-Seilschwebbahnen. Arbeiten des Institutes für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen an der TU Wien Heft 5, 1976
- [12] Engel, E. Ostermann ,N.: Selbsttätige Überwachung der Lage der Förderseile. Patent AT 388146B, 1988
- [13] Österreichisches Patent der Fa. K. Doppelmayr & Sohn/Wolfurt, Nr. 226772 (ang. 1961).
- [14] Französisches Patent des J. Pomagalski, Nr. 1.401.393 (ang. 1964).
- [15] Österreichisches Patent des J. Nejez, Nr. 373.832 (ang. 1981).
- [16] US-Patent des W.F. Bennett, Nr. 3302588 (erteilt 1967)
- [17] PCT- Offenlegungsschrift des J. Kunczynsky, WO-A1-87/01665 (ang. 1985).
- [18] Engel. E, N. Ostermann.:„Automatische Lageüberwachung der Förderseile“. Osterr. Ptent Nr. AT 388 146B, 1988
- [19] Engel. E, Ostermann. N..: Automatische Lageüberwachung der Förderseile. Arbeiten des Institutes für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen an der TU Wien, Heft 14, 1988
- [20] C. Mann.: Die Umweltprüfung für eine Automatische Lageüberwachung der Förderseile. Arbeiten des Institutes für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen an der TU Wien, Heft 16, 1989
- [21] E. Engel.: „Zugseil-Rollenbatterien gegen Drallstau“. Österr. Patent angemeldet 1998.

- [22] E. Engel.: „Mechanischer Seilentgleisungsschutz“. Österr. Patent AT 403 147 B
- [23] Sensortechnik aktuell, Trends, Produkte und Entscheidungs-hilfen, Oldenbourg Verlag, München , Wien Ausgaben 2003 und 2004
- [24] E.schiessle.: Sensortechnik und Messwertaufnahme, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1992
- [25] Tvtko Barbarić.: Produktuntersuchungen für Längenmessungen im Eisenbahnwesen, Institut für Elektronik TU- Graz, DA- 431, 1999
- [26] Fr. Kuhnke.: <http://www.kuhnke.de>
http://www.kuhnke.com/kuh/docman/images/873916H_Huma_Info_RM_URM.pdf

Literatur zum Themen „Energie Optimierung“ und „Blitzschutz“

- [27] Prechtl, A.: Vorlesungen über die Grundlagen der Elektrotechnik Band 1
Springer-Verlag Wien New York, 1994
- [28] Prechtl, A.: Vorlesungen über die Grundlagen der Elektrotechnik Band 2
Springer-Verlag Wien New York, 1994
- [29] Prechtl, A.: Skriptum zu Vorlesung Elektrodynamik an der Technischen
Universität Wien, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, 2004
- [30] Bartz, W.: Elektromagnetische Wandler und Sensoren.Grundlagen,
feldnumerische Berechnungen und Anwendungen. Export Verlag, 1989
- [31] Scherf, H.: Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme. Oldenbourg
Verlag München Wien, 2003
- [32] Hofmann, H.: Das elektromagnetische Feld, Theorie und grundlegende
Anwendungen. 3. Auflage Springer-Verlag, Wien New York, 1986.

- [33] Hadrian, W.: Unterlagen zu VO Blitzschutz, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft TU Wien, Okt. 2004
- [34] Das Österreichische Blitzortungssystem **ALDIS** (Austrian Lightning Detection & Information System) <http://www.aldis.at>

Weitere Literatur

- [35] Walter, M.: Winderregte Leiterseilschwingungen an einem Hochspannungsfreileitungssystem und deren Auswirkungen auf den Tragmast, Dissertation TU Wien, 1987
- [36] Löscher, R.: Pumpschwingungen bei Einseilumlaufbahnen, Dissertation TU – Wien. 1997.
- [37] Czitary, E.: Seilschwebbahnen. Zweite Auflage, Springer – Verlag. 1962
- [38] Beha, R.: Bewegungsverhalten und Kraftwirkungen des Zugseiles und der Fahrzeuge von Zweiseilbahnen zur Berechnung der Dynamik des Gesamtsystems, Dissertation Universität Stuttgart, 1994
- [39] Strohrmann. G.: Automatisierung verfahrenstechnischer Prozesse, Oldenbourg, München, 2002
- [40] Scherff, B. Haese,E. Wenzek, H.R.: Feldbus Systeme in der Praxis, Springer, Berlin Heidelberg, 1999
- [41] Riegelmayr, W.: Verkabelungskonzepte, Grundlagen und Praxis. Vogel Buchverlag Würzburg, 1995
- [42] Kahlert, J.: Simulation technischer Systeme. Vieweg, Wiesbaden, 2004
- [43] "Steuerungstechnik" mit Schaltungssimulator CD-ROM, Bundesfachlehranstalt für Elektrotechnik e.V, .Oldenburg

- [44] Hofmann, H.: Das elektromagnetische Feld. Springer-Verlag, Wien New York, 1986.
- [45] Zbil, H.U.: Technische Grenzen der Seilführung bei Einseilbahnen, OITAF – Seminar, Bozen, 12.10.2001
- [46] Oplatka, G, M.Volmer.: Der Zentralseilfänger. Internationale Seilbahn-Rundschau 5/2000.
- [47] Wagner. F, Moll. D, Winter. S.: TechnischeUnterstützung der visuellen Seilkontrolle O.I.T.A.F. – Seminar 03. Oktober 2003 in Bozen
- [48] Oplatka, G, Jeger, St.: Der Seilfangring. Internationale Seilbahn-Rundschau 1/1992.

13 Anhang

Firmenadressen:

<p>Kuhnke GmbH Luetjenburger Str. 101 23714 Malente Germany Phone (+49) 4523 / 402-404 Fax (+49) 4523 / 402-476 Internet: http://www.kuhnke.at</p>	<p>Pilz Ges.m.b.H. Modecenterstr. 14 1030 Wien Österreich Tel. +43 (1) 798 62 63-0 Fax +43 (1) 798 62 64 E-Mail: pilz@pilz.at http://www.pilz.at</p>
<p>Contrinex AG Route Andre Piller 50 CH-1762 Givisiez Tel. +4126 460 46 46 www.contrinex.ch</p>	<p>ifm electronic gmbh Teichstraße 4 D 45127 Essen E-mail: info@ifm-electronic.com http://www.ifm-electronic.com</p>
<p>AMOS Sensoren & Meßtechnik C2, 21 68159 Mannheim Tel : + 49 - (0) 621 - 86 25 25 0 Fax : + 49 - (0) 621 - 86 25 25 5 http://www.amos-sensoren.de</p>	<p>Banner Engineering Corp. 9714 Tenth Avenue North Minneapolis, Minnesota 55441 (763) 544-3164 , Toll Free 1-800-809-7043 http://www.bannerengineering.com/</p>
<p>Intermadox GmbH Josef-Moser-Gasse 1 A-1170 Vienna Tel: 431-48 615870, Fax: 431-48 6158723 http://www.intermadox.at</p>	<p>RGE GmbH A-2544 Leobersdorf, Mühlgasse 8 Telefon: 02256 / 65 954 - 0 Fax: 02256 / 65 954 - 44 email: office@rge.at</p>
<p>SensoPart Industriesensorik GmbH Am Wiedenbach 1, D-79695 Wieden Tel. +49 (0) 76 73-8 21-0 Fax. +49 (0) 76 73-8 21-30 www.sensopart.de</p>	<p>Xensor Corporation 4000 Bridge Street - PO Box 188 Drexel Hill, PA 19026, USA 610-284-2508 - Fax 610-259-8379 www.xensor.com</p>
<p>Balluff GmbH Schurwaldstraße 9, D-73765 Neuhausen a.d.F. Phone +49 (0) 7158 173-0, Fax +49 (0) 7158 5010 www.balluff.de</p>	<p>Konzept Energietechnik GmbH Röntgenstrasse 1, D- 23701 Eutin Telefon: +49(0) 4521 80 07-0 Telefax: +49(0) 4521 80 07-11 http://www.konzept-energietechnik.de/</p>
<p>Lambda GmbH Karl-Bold-Strasse 40, D-77855 Achern</p>	<p>SPARK ENERGY S.p.a. Via Olivi, 66 - 31054 Possagno (TV), ITALY</p>

<p>Tel. +49 / 7841 / 666 0, Fax +49 / 7841 / 5000 info.germany@lambda-europe.com http://www.lambda-austria.com</p>	<p>Tel +39 / 0423 / 92.03 - Fax +39 / 0423 / 92.04.20 e-mail : sparkenergy@sparkenergy.it http://www.sparkenergy.it/</p>
<p>ICAR S.p.A. Via Isonzo, 10 - 20052 MONZA (Milano) Italia Tel. +39 039 83.951 Fax +39 039 83.32.27 http://www.icar.it/</p>	<p>Eaton Power Quality GmbH Karl- Bold- Str. 40, D-77855 Achern Tel.: 07841 / 604 – 0, Fax: 07841 / 604 - 5000 E-Mail: infogermany@eaton.com http://www.powerware.com/Deutschland/</p>

http://www.doppelmayr.com/	http://www.leitner-lifts.com/
www.matsushita.at	http://www.betasensorik.de
http://www.euchner.de/	www.pepperl-fuchs.com
http://www.wenglor.de/	http://www.honeywell.de
http://www.woelfel.de/	
http://www.keyence.de/	http://members.aon.at/telco
http://www.leuze.de/	http://produkte.schmersal.de
http://www.sick.de	http://www.schneider-electric.de
www.thomatronik.de	http://www.bernstein.at
http://www.fraba.de/	www.reedag.ch