

# Entwicklung eines integralen Detektionssystems für Steinschlag und Felssturzprozesse IDSF

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung 2011  
(VIF2011)

Oktober 2012



## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Renngasse 5  
A - 1010 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
A - 1020 Wien

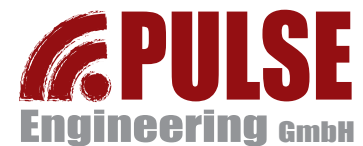


Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs  
Aktiengesellschaft  
Rotenturmstraße 5-9  
A - 1010 Wien



### Für den Inhalt verantwortlich:

Pulse Engineering GmbH  
Kajetan Schellmannngasse 8  
2352 Gumpoldskirchen



### Programmmanagemen:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Bereich Thematische Programme  
Sensengasse 1  
A – 1090 Wien



# Entwicklung eines integralen Detektionssystems für Steinschlag und Felssturzprozesse IDSF

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2011)

**AutorInnen:**

**DI Ulrich KÖNIG**

**DI DI Dr Arnold Kogelnig**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

Pulse Engineering GmbH

## Inhaltsverzeichnis

1	Abstrakt.....	5
2	Einleitung .....	6
3	Grundlagen Kabelsensoren .....	7
3.1	Koaxialkabel .....	7
3.2	Lichtwellenleiter-Glasfaserkabel.....	10
3.3	Magnetfeldsensorkabel .....	14
4	Grundlagen Seismische Sensoren .....	16
4.1	Grundlagen Seismik .....	16
4.2	Seismische Signale von Naturgefahren .....	17
4.3	Seismische Sensoren.....	17
4.4	Aufbau und Funktion des Schotteroberbaus .....	19
4.5	Bestehende seismische Lösungen.....	21
5	Ergebnisse .....	23
5.1	Koaxialkabel .....	23
5.2	Seismische Sensoren.....	35
5.3	Testgebiete.....	45
6	Zusammenfassung .....	48
7	Referenzen .....	50

## 1 ABSTRAKT

Alpine Massenbewegungen wie Steinschlag oder Felsstürze stellen einerseits durch die Ablagerung direkt auf und andererseits durch die Zerstörung von Verkehrsinfrastruktur eine große Gefahrenquelle im Alpenraum dar. Durch Anprall von Fahrzeugen kann erheblicher Sach- und/oder Personenschaden entstehen, welcher durch kontinuierliche Überwachung des Verkehrsweges verhindert werden könnten. Daher war das Ziel dieser Machbarkeitsstudie die Evaluierung der Überwachung von Verkehrsinfrastruktur mittels punktuell (seismische Sensoren) und/oder linienförmig (Kabelsensoren, Hektometer bis Kilometer) angeordneter Sensoren.

## 2 EINLEITUNG

Da die permanente Sicherung vor Naturgefahren von Straße und Eisenbahn sowohl aus technischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen an ihre Grenzen stößt, gewinnt die ergänzende oder alternative Detektion immer mehr Bedeutung.

Im Gebirgsland Österreich gefährden Steinschläge, Murgänge, Lawinen und ähnliche Prozesse die Verkehrsinfrastruktur. Wenngleich dieser Bericht sich im Folgenden auf Steinschlag und Eisenbahninfrastruktur (ÖBB) bezieht, kann die vorgeschlagene Methodik aber einfach und nachvollziehbar auf Straßeninfrastruktur und andere Naturgefahren adaptiert werden.

Die Hauptprobleme die durch Naturgefahren auf Verkehrsinfrastruktur entstehen sind i) die Anprallsituation, wenn eine Ablagerung stattgefunden hat und ii) die Beschädigung der Infrastruktur (z.B. an Gleisen durch Steinschlag) was in Folge dann Unfälle verursacht. Daher lag der Fokus dieses Projektes in der verlässlichen Prozessdetektion im direkten Einwirkungsbereich (Gefahrenentstehung), um festzustellen, ob es zu einer Ablagerung oder Zerstörung der Infrastruktur gekommen ist. Es sollte nicht generell Prozessaktivität in der Sturzbahn detektiert werden, sondern nur gezielt jene Ereignisse, welche zu einer Ablagerung auf oder Zerstörung der Bahntrasse führen.

Diese gezielte und verlässliche Detektion soll mit Hilfe von Sensoren, welche punktuell (Geophone) und linienförmig (Kabelsensoren) entlang der Bahntrasse angeordnet sind, durchgeführt werden. Bei den Kabelsensoren sind drei verschiedene Systeme zu unterscheiden: i.) Glasfaserkabel ii.) Koaxialkabel und iii.) Magnetfeldsensorkabel.

Im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurde die oben beschriebenen Sensoren aufgrund von Literaturrecherchen, Experten-Interviews und Erfahrungswerten der Autoren evaluiert, teilweise in der Praxis (Geophone) und teilweise im Labor (Koaxialkabel) getestet, um einen möglichst vollständigen Ergebnisbericht abzuliefern.

Im Folgenden werden kurz die technisch-physikalischen Grundlagen der verschiedenen Kabelsensoren erklärt und ihre Anwendbarkeit für das Projekt diskutiert (Kapitel 3). Kapitel 4 befasst sich mit den Grundlagen der Seismik und seismischen Sensoren. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse aus den Laborversuchen (Koaxialkabel), Feldversuchen (Geophone) und mögliche Testgebiete dargestellt und erläutert. Die Zusammenfassung in Kapitel 6 ermöglicht einen Überblick über die Ergebnisse und eine Diskussion für die zukünftige Anwendbarkeit.

### 3 GRUNDLAGEN KABELSENSOREN

Wie bereits in der Einleitung erwähnt können Kabelsensoren grundsätzlich in drei verschiedene Systeme unterteilt werden: Koaxialkabel, Glasfaserkabel und Magnetfeldsensorkabel. Kabelsensoren werden gegenwärtig hauptsächlich für die Überwachung und Kontrolle von militärischen Anlagen, wie auch für sensible zivile Einrichtungen („Perimeterschutz“) eingesetzt. Zusätzlich finden sie Anwendung in der Geotechnik zur Überwachung und Monitoring von Hanginstabilitäten.

In Bezug auf Naturgefahren betrieb die Kanadische Bahn 2002 Versuche für ein Überwachungssystem auf Basis von elektromagnetischen Kabeln zur Detektion von Ablagerungen und Destruktion entlang gefährdeter Trassenabschnitte (Brackett, P. 2002).

Kabelsensoren können unter anderem Erschütterungen und Vibrationen an jeder beliebigen Stelle des bis zu mehrere hundert Meter langen Systems detektieren. Die Analyse und Integrierung von Umweltgeräuschen bzw. die Minimierung der dadurch beeinflussten Fehlalarmquote ist dabei noch ein entscheidender Faktor.

Die Grundidee des Projektes IDSF war es diese Produkte aus dem Perimeterschutz in ein Detektionssystem vor Naturgefahren zu integrieren, um in Kombination mit den Geophonen die geforderte Redundanz im Gesamtsystem zu gewährleisten. Das vorliegende Dokument soll nun darstellen, ob für den konkreten Anwendungsfall eines der Kabelsensor Systeme, in Kombination mit Geophonen geeignet ist. Hierfür erscheint es den Autoren wichtig zuerst die theoretischen Grundlagen der einzelnen Systeme (Glasfaserkabel, Koaxialkabel, Elektromagnetische Kabel) darzustellen.

#### 3.1 Koaxialkabel

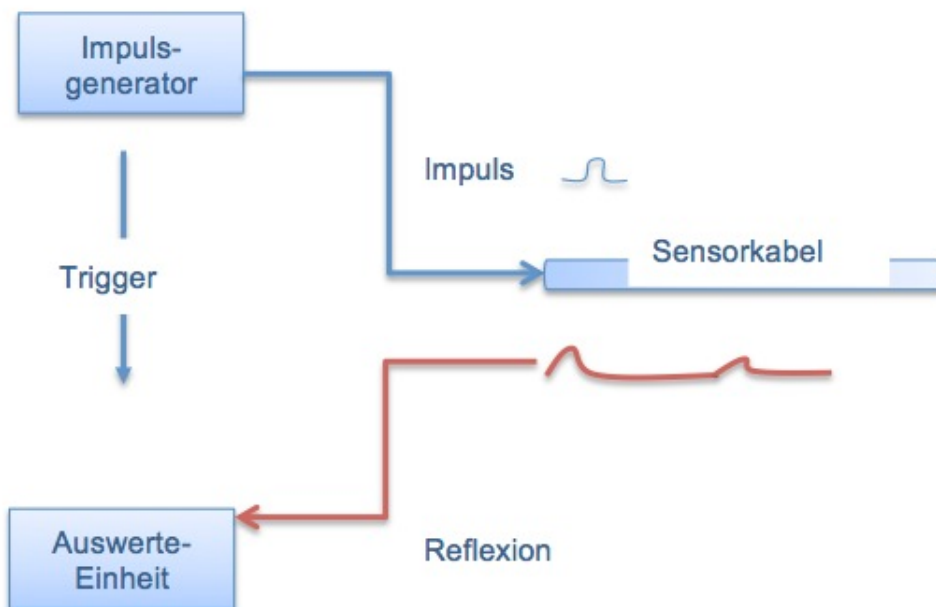
Koaxialkabel sind zweipolige Kabel mit konzentrischem Aufbau (Abb. 1). Sie bestehen aus einem Innenleiter, der in konstantem Abstand von einem hohlzylindrischen Außenleiter umgeben ist. Der Zwischenraum besteht aus einem Isolator oder Dielektrikum. Das Dielektrikum kann anteilig oder vollständig aus Luft bestehen (siehe Luftleitung). Meist ist der Außenleiter durch einen isolierenden, korrosionsfesten und wasserdichten Mantel nach außen hin geschützt.

Das Koaxialkabel kann bei hohen Frequenzen als Wellenleiter aufgefasst werden, die Oberflächen des metallischen Innen- und Außenleiters dienen als Berandung zur Führung einer elektromagnetischen Welle. Zur Ermittlung und Analyse von Lauflängen und Reflexionscharakteristika von elektromagnetischen Wellen wird die Zeitbereichsreflektometrie (engl. Time Domain Reflectometry, kurz TDR) angewandt.



**Abbildung 1: Aufbau eines Standard Koaxialkabels.**

Das Prinzip der Zeitbereichsreflektometrie hat seine Wurzeln in der Fehlerortung bei Überseekabeln und ist heute Basis vieler unterschiedlicher Messinstrumente. Bei der TDR wird ein Impuls in ein Kabel eingespeist (Abb. 2). Der Impuls breitet sich entlang des Kabels aus und wird entweder am Kabelende oder bei Störstellen des Kabels reflektiert. Zur Auswertung wird das gesendete Signal mit dessen Reflexion verglichen. Bei der TDR kann – wenn die elektrischen Eigenschaften des Kabels bekannt sind – die Entfernung zu der Störungsstelle ermittelt werden. Außerdem kann man anhand der Amplitude und Form der reflektierten Impulse Hinweise über die Art der Störung erhalten.



**Abbildung 2: Der grundsätzliche Aufbau (wie schematisch dargestellt) besteht aus einem Impulsgenerator, dem Sensorkabel sowie der Auswerteeinheit.**

Im Bereich der Naturwissenschaften ist der Stand der Technik der Koaxial-Messverfahren beispielsweise in der Geotechnik mit Deformationsmessungen mit Time Domain Reflectometry (TDR) zur Messung von Bodenfeuchte, Bodenwasserlevel, Hangbewegungen oder Bauwerksüberwachung (O'Conner et al. 1999, Singer et al. 2007, 2010, 2011).



Ein Beispiel in Bezug auf Naturgefahren ist Komazaki et al. (1999), der in Japan Koaxialkabel mit mehreren hundert Meter Länge für die Detektion von Steinschlag testete, in Kombination mit einer Datenübertragung über das Mobilfunknetz. Dabei lies er in einem Versuch einen Stahl-Ball in der Nähe des Koaxialkabels fallen, mit dem Ergebnis, dass der Aufschlag klar detektiert werden konnte und sich von den Umgebungsgeräuschen unterschied. Auch die Datenübertragung über das Mobilfunknetz funktionierte gut.

Wie bereits oberhalb erwähnt, gilt das TDR Messprinzip grundsätzlich als vielversprechend für die Messung von elektrischen Leitern. Durch Umformung von mechanischer zu elektrischen Veränderungen ist TDR gut geeignet für die Anwendung entlang langer und linienförmiger Messbereiche.

Für das TDR-Messprinzip sprechen (in Anlehnung an Kane und Becker 2000):

- TDR Messungen sind gut geeignet für linienförmige Messungen über längere Strecken.
- Störungen sind mit hoher Genauigkeit verortbar
- Koaxialkabel sind günstiger als Lichtwellenleiter oder punktuelle und entlang des Messbereichs platzierte Messinstrumente wie z.B. Geophone.
- Messwertaufnahme erfolgt kontinuierlich, die Auswertung ist leicht automatisierbar und die Ergebnisse sind in nahezu Echtzeit verfügbar.
- Das Messsystem ist einfach und rasch zu installieren.
- Es ist nur eine kurze Einschulung von Monteuren notwendig.

Zudem wurde das Messprinzip für die Deformationsmessung in den letzten Jahren erheblich verbessert. So berichten Singer et al. (2011), dass „... durch die Analyse der von einer Kabeldeformation verursachten Signale (...) Informationen über den Betrag und die Art der Deformation gewonnen werden (können).“

Nachteilig ist die niedrige Empfindlichkeit von Standard-Koaxialkabel gegenüber mechanischen Einflüssen. Die Kosten eines solchen Systems betragen ca. EUR 8.000,- bis 10.000,- (vgl. Kane und Beck, 2000). Hinsichtlich der maximalen Länge des Kabels hat Singer (2010) hochqualitative Koaxialkabel für Zuleitung und Messkabel untersucht und rät die Gesamtlänge von 100 Metern nicht zu überschreiten.

Auf Basis dieser Grundlagen erschien die Detektion mit Koaxialkabel sehr vielversprechend, daher beauftragte die Pulse Engineering GmbH, die Firma Adaptivia GmbH (Stutterheimstr 16-18, 1150 Wien) um in Kooperation eine Kurzstudie zur Anwendbarkeit eines Koaxialsensors für die Detektion von Steinschlag zu erarbeiten. Ziel des Projektes war die Erstellung eines „Proof-of-Concepts“ für einen Koaxial-Kabelsensor basierend auf dem TDR-

Prinzip und erste praktische Versuche im Labor. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Kapitel 5.1 zu finden.

### **3.2 Lichtwellenleiter-Glasfaserkabel**

Lichtwellenleiter (LWL) sind aus Lichtleitern bestehende Kabel zur Übertragung von Licht. Zur Verwendung kommen meist Fasern aus Quarzglas oder Kunststoff (polymere optische Faser). Sie werden häufig auch als Glasfaserkabel bezeichnet, wobei es sich typischerweise um einen Verbund aus mehreren optischen Fasern handelt, inklusive einer integrierten mechanischen Verstärkung zum Schutz und zur Stabilisierung der einzelnen Fasern.

Physikalisch gesehen handelt es sich bei Lichtwellenleitern um dielektrische Wellenleiter. Sie besitzen einen konzentrischen Schichtenaufbau, wobei sich im Zentrum der lichtführende Kern befindet, welcher umgeben ist von einem Mantel mit einem etwas niedrigeren Brechungsindex, sowie von weiteren Schutzschichten aus Kunststoff.

LWL kommen vor allem in der Nachrichtentechnik als Übertragungsmedium für leitungsgebundene Kommunikationssysteme zum Einsatz. Aber auch im Streckennetz der ÖBB sind LWL als Telekommunikationskabel fast flächendeckend verbaut. LWL werden auch vielfältig in anderen Bereichen eingesetzt, wie zum Beispiel in der Messtechnik.

Hier dienen LWL als faseroptische Sensoren, bei denen die Messgröße nicht wie typischer Weise durch eine elektrische Größe repräsentiert bzw. übertragen wird, sondern durch eine optische, zur Messwerterfassung in schwer zugänglichen Bereichen wie Staudämmen oder unter extremen Bedingungen. Man unterscheidet zwei Klassen von faseroptischen Sensoren:

#### *- extrinsisch*

Hier dient die Glasfaser nur als Überträger der vom Sensor erfassten Messgröße, die jener als optisches Signal zur Verfügung stellen muss. Beispiele sind Glasfaser-Pyrometer, faseroptische Temperatursonden oder optische Mikrophone (Glasfaser-Schallwandler).

#### *- intrinsisch:*

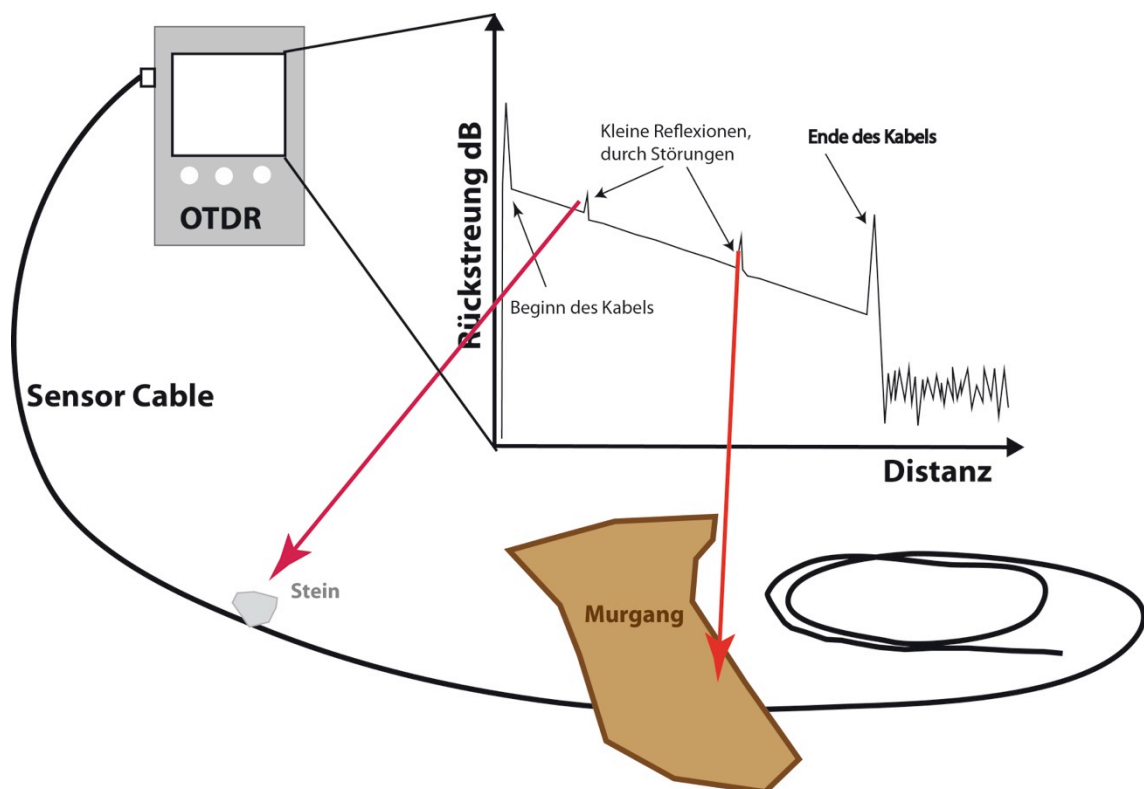
Hier dient die Glasfaser direkt als Messaufnehmer und ist somit zugleich Sensor als auch Leitung. Beispiele sind faseroptische Drucksensoren, faseroptische Temperaturmessungen.

#### **3.2.1 Optische Zeitbereichsreflektometrie**

Die optische Zeitbereichsreflektometrie (engl. Optical-Time-Domain-Reflectometry, OTDR) ist ähnlich der TDR, ein Verfahren zur Analyse von Lauflängen und Reflexionscharakteristika von elektromagnetischen Wellen und Signalen im Wellenbereich des Lichts. Das Messprinzip beruht darauf, dass kurze Pulse gesendet werden, die das Sensorkabel durchlaufen. Dieser Lichtimpuls wird innerhalb des Lichtwellenleiters durch die Rückstreuung

(engl. Backscattering), aber besonders an Kabelbrüchen, an Spleißen, Bewegungen, bei Vibrationen reflektiert und gelangt zurück zum OTDR-Messgerät, wo er gemessen und ausgewertet wird. Aus der Laufzeit des reflektierten Lichtimpulses kann unmittelbar auf den Fehlerort geschlossen werden. Aus dem Dämpfungsverlauf des Impulses können Rückschlüsse über die Fehlerart gezogen werden. OTDR eignet sich für die Fehlerortung und -analyse, mit einer Genauigkeit hin zu wenigen Zentimetern. Wegen dieser messtechnischen Eigenschaft wird das Prinzip als „distributed sensing“ oder auch „linearer Sensor“ genannt.

Jede der oben erwähnten Beeinträchtigungen wirkt sich in einer eigenen typischen Reflexionscharakteristik aus und kann daher in der OTDR-Messung direkt erkannt und analysiert werden (Abb. 3).



**Abbildung 3: Prinzip-Skizze der optische Zeitbereichsreflektometrie (engl. Optical-Time-Domain-Reflectometry, OTDR).**

Die Energie des Lichtimpulses und dessen Pulsbreite bestimmen das zeitliche und das regelmäßige Auflösungsvermögen. Lichtimpulse mit größeren Pulsbreiten haben gegenüber solchen mit schmalen Pulsbreiten ein geringeres zeitliches Auflösungsvermögen, dafür aber eine bessere Pegelauflösung. Für eine Lichtimpulsbreite von einer Mikrosekunde kann eine ortsbezogene Auflösung von 100m angesetzt werden. Man erreicht also mit einer Pulsbreite von 1ns (Nanosekunde) eine Auflösung von 10cm, mit einer Pulsbreite von 100ns eine

solche von 10m und mit einer Pulsbreite von 10 Mikrosekunden eine Auflösung von 1km. Die Pegelauflösung wird durch die höhere Energie von breiteren Impulsen jeweils um etwa 5dB pro Dekade verbessert: Das heißt ein Lichtimpuls von 100ns hat eine um 5dB bessere Pegelauflösung gegenüber einem Impuls mit einer Breite von 10ns.

Handelt es sich um eine homogene Faser, so zeichnet sich diese durch eine konstante Rückstreuung aus. Je nach Fasertyp - Monomodefaser oder Multimodefaser - ist diese Rückstreuung geringer oder größer und ein direktes Maß für die Dämpfung über eine bestimmte Entfernung. In der OTDR-Darstellung, bei der in der Vertikalen der Pegel (Rückstrahlung/Dämpfung) aufgetragen ist und die Horizontale die Entfernungsachse darstellt, wird eine fallende Linie dargestellt (Abb. 3). Wobei das Verhältnis von Vertikalteilen ( $\Delta\text{dB}$ ) zu dem entsprechenden Horizontalteil ( $\Delta\text{m}$ ) der Dämpfung der Faser entspricht.

Am Faserende, das geglättet oder gebrochen sein kann, wird der Lichtstrahl im ersten Fall reflektiert, im zweiten Fall gelangt er ohne Reflexionen in das Medium Luft. Das geglättete Faserende zeigt eine positive Spitze gefolgt von Rauschen (Abb. 3). Bei dem gebrochenen Faserende tritt keine Reflexion auf, das Ende wird durch den Dämpfungssprung gefolgt vom Rauschen angezeigt.

Zhang und Bao (2008) entwickelten das OTDR Prinzip weiter um auch hochfrequente dynamische Messungen durchführen zu können und Vibration mit Frequenzen von bis zu 5kHz zu detektieren. Mit der sogenannte „Polarization-OTDR“ Methode konnten sie erfolgreich in einem 1km Glasfaserkabel dynamische Ereignisse mit einer räumliche Auflösung von 10m detektiert.

Eine weitere Entwicklung der Fast Fourier (FFT) Spektralanalyse ermöglichte es Zhang und Bao (2008) mehrere gleichzeitig stattfindende Ereignisse mit verschiedenen oder sogar mit gleichen Frequenzen zu unterscheiden und zu lokalisieren. Die Analyse von Ereignis, Amplitude (Energie), Frequenzgehalt und Lage entlang des Kabels ermöglicht die Detektion und Lokalisation mehrerer gleichzeitiger Ereignisse und liefern damit einen ganz wesentliche Erkenntnis für die Anwendung in einem viele km langen Sensorsystem.

Juarez und Taylor (2005, 2007) testeten die Anwendung eines kommerziell eingesetzten Telekommunikation-Glasfaserkabels zur Detektion von Schwingungen. Im Feldversuch konnten auf einer Kabelstrecke von insgesamt 19km, die durch Personen und Fahrzeuge auf der Straße nebenan verursachten Vibrationen, auf einer getesteten Teilstrecke von 8.5km detektiert werden.

Eine weiterer konkreter Hinweis für die Anwendung auf Eisenbahninfrastruktur findet sich in Lanticq et al. (2009), der im Ebersviller Bahntunnel (Frankreich) im Rahmen eines Testes zur Detektion von Setzungen gute Ergebnisse mit Glasfaserkabel erzielen konnte.

Kessel (2012) beschreibt einen ersten Test von Glasfaserkabel für die Detektion von Steinschlag auf Bahninfrastruktur in England. Die ersten Resultate waren vielversprechend, derzeit ist geplant das System einem Dauertest in der Praxis zu unterziehen.

### **3.2.2 Zusammenfassung und Schlussfolgerung**

Die LWL Technologie verfügt über ein gewaltiges Potential speziell für die Anwendung auf Eisenbahninfrastruktur.

Besonders die Tatsache, dass der hochauflösende Sensor zugleich auch Übertragungsmedium ist und dadurch auch keine Energieversorgung auf der Sensorstrecke bis zu einer Länge von 40 km erforderlich wird, ist sehr vielversprechend.

Der Einsatz im IDSF System muss aber auf Grund der Nichterfüllung mehrere durch die AG vorgegebener Projektziele/Projektrahmenbedingungen leider verwehrt bleiben. Diese wären:

- finanzieller Projektrahmen der 2. Stufe von max 250.000,-
- Einsatzbereitschaft innerhalb weniger Stunden im ÖBB Streckennetz

Zu Punkt 1. muss gesagt werden, dass nach Auskunft der relevanten Systemhersteller ein kompletter Einsatz dieser Technologie mit einer Größenordnung von 250.000€ bis 400.000€ für die Auswerte und Analyseeinheit zu beziffern wäre. Dieser finanzielle Rahmen ist noch ohne das eigentliche Sensorkabel genannt worden und somit nur als Grundausstattung zu verstehen.

Dieser Betrag bedeutet weiter, dass bei kurzen Streckenlängen ein astronomischer Laufmeter Preis zu veranschlagen wäre, was wiederum im Widerspruch zu den Projektvorgaben zu sehen ist.

Um aber diesem soeben angeführten enormen sicherheitstechnischen Potential speziell für lange Sensorstrecken/Bahnstrecken Rechnung zu tragen wurde der AG schon im Zuge der Erstellung der Machbarkeitsstudie auf diese Technologie aufmerksam gemacht.

Bezugnehmend auf das angebotene Gesamtkonzept (Integriertes Detektionssystem Steinschlag Felssturz) bestätigt sich hiermit der Lösungsansatz mit Kabelsensoren sehr anschaulich auch wenn der kombinierte Einsatz beider Technologien Geophone und Kabelsensoren nicht mit dem finanziellen Rahmen der zweiten Stufe umzusetzen sein wird.

### 3.2.3 Fiber Bragg-Grating Sensors (FBG)

Faseroptische „Dehnungsmessstreifen“, die sogenannten Faser-Bragg-Gitter-Sensoren (Fiber-Bragg-Grating=FBG) erfassen je nach Konfiguration Dehnungsänderungen infolge statischer oder dynamischer mechanischer Belastungen oder Temperaturänderungen.

Die FBG-Sensoren sind spezielle Strukturen in Standardglasfasern, die in Abhängigkeit von der Längsdehnung des FBG als selektive Wellenlängenfilter auf eingekoppeltes Breitbandlicht wirken. Durch eine spezielle Beschichtung, das sogenannte „Coating“, erhält die Glasfaser robuste Eigenschaften, so dass sie für den Einsatz in rauer Umgebung besonders gut geeignet ist.

Die Messbasis eines jeden FBG beträgt ca. 1 cm. Es können in einer Faser mehrere FBG hintereinander als Messkette oder in einer Dehnungsrosette angeordnet werden. Die Sensoren sind in speziellen Trägermaterialien bzw. Sensorstrukturen vorkonfektioniert und können so auf das Messobjekt aufgeklebt, angeschweißt oder in eine Struktur (z.B. Beton, Geogitter, Bodenmaterial) eingebettet werden. Der nicht-sensitive Bereich der Zuleitung kann mehrere 100m bis einige km betragen. Es wird pro Messkanal nur eine Zuleitungsfaser benötigt. Das Messsystem besteht aus den FBG-Sensoren, dem Auswertegerät (Interrogator), den Anschlusskomponenten (Stecker, Spleißdose, Zuleitungskabel) sowie einem Steuer- und Auswerte-PC.

Eine konkrete Anwendung für diese Sensoren auf Eisenbahninfrastruktur findet sich bei dem Pilotprojekt Brückenmonitoring Gr Haslau im Waldviertel (ÖBB). Hier werden mit Hilfe der FBG-Sensoren Rissbreiten im Beton überwacht. Für eine punktuelle Anwendung wie an einer Brücke scheinen sich die Sensoren sehr geeignet.

Für den Einsatz zur linienhaften Detektion von Naturgefahren entlang einer mehreren km langen Bahninfrastruktur ist diese Technologie aber noch nicht geeignet.

### 3.3 Magnetfeldsensorkabel

Das Prinzip dieser Technologie ist, dass ein sich dem Kabelsensor näherndes Objekt, die elektromagnetische Eigenschaft des Kabels verändert. Dieser Umstand führt zu einer Änderung der Phase des Signales.

Die Kanadische Bahn entwickelte einen Prototypen, unter dem Titel „Electromagnetic field disturbance Rockfall detection system“, der sehr kleine Änderungen im elektromagnetischen Feld entlang eines Leiterpaares, Sensorkabelpaares misst (Brackett P., 2002). Diese Änderungen können verursacht sein durch Steinschlag, Rutschungen genauso wie Bahnverkehr, Wildtier und sich ändernde Umweltbedingungen.

Aufgrund des am Markt nicht erhältlichen Sensorkabels und auch aufgrund des eher unüblichen Messverfahrens wird diese Magnetfeldsensorkabellösung der Vollständigkeit halber angeführt, aber nicht weiter nachgegangen.

Weiters erscheint auch die Fehleranfälligkeit dieses Messprinzips hoch und daher als ungünstig im Vergleich mit anderen Kabel bzw.- Messverfahren.

## 4 GRUNDLAGEN SEISMISCHE SENSOREN

Die Grundidee dieses Projektes war die Installation von seismischen Sensoren (z.B. Geophonen) unmittelbar im oder am Bereich der Eisenbahninfrastruktur. Im Folgenden wird eine kurze Einführung in die theoretischen Grundlagen der Seismik gegeben.

### 4.1 Grundlagen Seismik

In der Physik ist eine Welle eine Änderung des Ausgangszustandes, die durch Raum und Zeit wandert. Seismische Wellen sind elastische Wellen mit Energie, die sich durch den Boden ausbreiten. Sowohl natürliche als auch künstliche Quellen können seismische Wellen produzieren. Die Physik hinter der seismischen Wellenausbreitung ist seit dem frühen 19ten Jahrhundert bekannt. Die Gesetze der Mechanik zeigen das Festkörper auf Impulse in Form von linearen elastischen Wellen reagieren (z.B. Stein and Wylesession, 2003). Ähnlich zu Schallwellen, ist die Geschwindigkeit mit der sich seismische Wellen ausbreiten abhängig vom Medium in dem sie sich befinden. Daher gibt es eine Verbindung zwischen der Laufzeit einer Wellen, der Quelle, dem Sensor und dem Material in dem sich die Welle ausgebreitet hat. Generell kann man sagen, dass die Geschwindigkeit von Wellen in Festkörpern ( $10^3\text{m/s}$ ) um einen Zehnerpotenz höher ist als in Gasen ( $10^2\text{m/s}$ ) (Thorne und Wallace, 1995).

Seismische Wellen, welche sich im Boden ausbreiten, können in vier verschiedenen Typen unterteilt werden. Raumwellen (P steht für Primärwellen und S für Sekundärwellen) und Oberflächenwellen (Love Wellen und Rayleigh Wellen). Primärwellen sind Longitudinal Wellen oder Druckwellen im Gegensatz zu Sekundärwellen die Transversalwelle sind, dass heißt sie schwingen quer zur Ausbreitungsrichtung. Primärwellen sind schneller als Sekundärwellen und sind daher das erste Signal das man von einer Quelle in einem elastischen Festkörper erkennt (Thorne und Wallace, 1995).

Rayleigh und Love Wellen entstehen aus der Interaktion von Raumwellen mit der Erdoberfläche. Rayleigh Wellen bestehen aus longitudinaler und transversaler Partikel Bewegung und Love Wellen sind Transversalwellen. Durch ihre hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit treffen Raumwellen von Erdbeben früher ein, doch die Partikel Bewegung von Oberflächenwellen ist viel größer und besitzen daher eine größte Zerstörungskraft.

Sich ausbreitende seismische Wellen verlieren Energie vor allem durch geometrische Divergenz und die Dämpfung durch den Boden (Aki and Richards, 1980).

Bei seismischen Sensoren ist vor allem die Distanz zwischen Sensor und Massenbewegung und die Charakteristik des Bodens ausschlaggebend für das Signal. Deshalb sollten bei



seismischen Studien immer schon vorab eine seismische Charakteristik des Monitoring Bereichs durchgeführt werden.

## 4.2 Seismische Signale von Naturgefahren

Die Quelle der seismischen Signale von alpinen Massenbewegungen wurden in verschiedenen Studien bereits erforscht (Arattano, 1999; Biescas et al., 2003; Brodsky et al., 2003; Suriñach et al., 2005; Vilajosana et al., 2007). Brodsky et al. (2003) zeigte, dass die seismischen Signale von Hangrutschungen, durch die Scherung und das Eigengewicht auf der Rutschfläche produziert werden. Arattano 1999 monitorierte Muren und schlussfolgerte dass die turbulente Front des Murstoßes aus groben Steinen bestehend, die Quelle der seismischen Signale ist. Die Hauptursache der seismischen Signale von Lawinen sind der dichte Fließteil innerhalb der Lawinen der mit dem Boden oder Schneedecke interagiert oder Änderung in der Neigung der Lawinenbahn (Suriñach et al., 2000; Biescas et al., 2003; Vilajosana et al., 2007; Schneider et al., 2010 für große Stein-Eislawinen).

Für wissenschaftliche Studien wurden Seismometer in der Nähe des Ablagerungsbereich installiert um den Aufprall der Steine und die dadurch induzierten Schwingungen im Boden zu messen und zu analysieren (z.B.: Norris 1994; Deparis et al. 2008).

Vilajosana et al. 2008 analysiert seismische Signals von Steinschlag und schlussfolgerte i.) das Steinschlag signifikante seismische Signale in der Zeitreihe als auch im Frequenzbereich produziert die von anderen seismischen Quellen wie Erdbeben, Explosionen etc. unterschieden werden können ii.) das zwei seismische Sensoren ausreichen um den Aufprall zu lokalisieren iii.) das Potential von seismischen Sensoren für die Detektion von Steinschlag, die Lokalisierung und die Bestimmung der Größe bzw. Energie des Ereignisses sehr groß ist.

## 4.3 Seismische Sensoren

Seismische Sensoren können in ein-dimensionale Geophone und ein- bis drei-dimensionale Seismometer unterteilt werden. Die Eigenfrequenz und die Sensitivität der Sensoren sind die Schlüsselparameter bei der Wahl des Sensors. Es ist sehr wichtig, dass die Eigenfrequenz des Sensors in Abhängigkeit von den Frequenzen die vom Prozess verursacht werden gewählt wird.

Zusätzlich müssen bei seismischen Sensoren auch noch die Distanz Quelle-Sensor in Hinblick auf die erwarteten Amplituden und die Frequenzen des Signals berücksichtigt werden. Es ist allgemein bekannt, dass wenn man näher beim Prozess monitort höhere Frequenzen und Amplituden erhält als wenn man weiter (km) entfernt ist.



**Abbildung 4: Überblick über derzeit am Markt erhältliche seismische Sensoren. Geophon Sensor SM6 (Bildmitte) wurde für diese Studie eingesetzt.**

Geophone wurden schon sehr häufig eingesetzt um alpine Massenbewegungen zu Monitoren (Arattano, 1999; Kishimura and Izumi, 1997), aber sie nehmen nur die vertikale Komponente der Bewegung auf. Das Wellenfeld einer Massenbewegung ist 3D, daher werden die horizontalen Komponenten (N-S und O-W) nicht aufgenommen und als Resultat wird nicht die komplette seismische Energie aufgezeichnet.

3D Seismometer zeichnen alle 3 Komponenten des Wellenfeldes auf und haben im Allgemeinen eine höhere Sensitivität als Geophone, sind aber auch signifikant teurer.

Der Monitoringpunkt von seismischen Sensoren muss sorgfältig ausgewählt werden, um Umgebungsgeräusche durch Wind (z.B. durch die Wurzeln der Bäume in den Boden induziert), Regentropfen, Autos oder andere Störquellen auszuschließen.

Für den Zweck dieses Projektes wurden die Sensoren an verschiedenen Stellen am Gleis, am Schweller, im Bahnschotter und im Boden in der Umgebung befestigt. Abbildung 4 zeigt eine Auswahl von seismischen Sensoren die derzeit am Markt erhältlich sind und den Sensor SM6 der für diese Studie eingesetzt wurde. Das Model Sensor SM6 (Eigenfrequenz 4Hz, Sensitivität 28.8V/m/s) wurde ausgewählt, weil es ein qualitativ gutes und günstiges Produkt ist, obwohl der Frequenzbereich und die Sensitivität bei anderen seismischen Sensoren weitaus besser ist (z.B. Mark L4-3D, Eigenfrequenz 1Hz, Sensitivität 277V/m/s).

Alternativ wäre es auch möglich Beschleunigungssensoren einzusetzen, die im Gegensatz zu seismischen Sensoren (Geschwindigkeit m/s), die Beschleunigung messen ( $m/s^2$ ). Die Grundidee war es, in einer ersten Annäherung auszuprobieren, wie gut die Detektion von Steinschlag mit dem Sensor SM6 funktioniert und bei Bedarf auf sensiblere Sensoren zurückzugreifen.



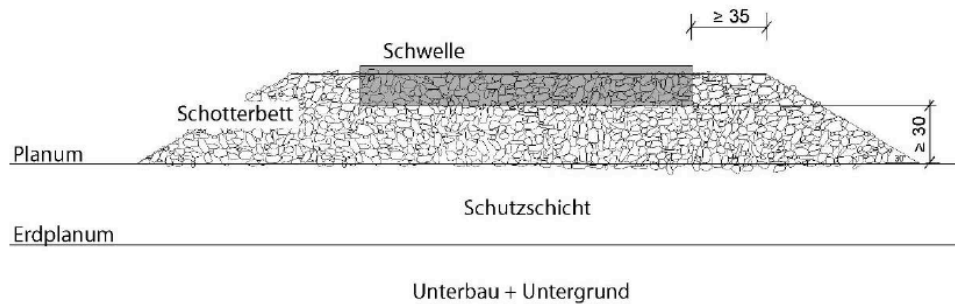
**Abbildung 5: Übersicht über die Befestigung der Geophone am Gleis, am Schweller und in der Umgebung.**

#### **4.4 Aufbau und Funktion des Schotteroberbaus**

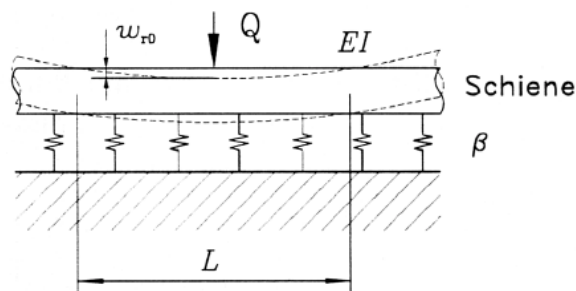
Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben ist die Art der Installation der Sensoren als auch die Charakteristik des Bodens ausschlaggebend. Im Falle dieser Studie ist der Boden der Aufbau der Schienenanlage welche im Folgenden schemenhaft erklärt wird.

Wie in Abbildung 6 dargestellt besteht der Oberbau aus einer Anordnung von Schutzschichten, der Schotterschicht und dem eingeschotterten Gleisrost („Schweller“). Die Bettungsdicke wird zwischen Schwellenunterkante und Planum angegeben. Üblich ist eine Höhe von 30 cm und bei Neubaustrecken von 35 cm bis 40 cm. Bei einer Erhöhung der Schotterschicht vergrößert sich die Elastizität des Oberbaus und – zumindest bei einer quasistatischen Betrachtung – wird mit einer Erhöhung die Lastverteilung auf das Planum und über die Schiene verbessert. Maximale, aber auch minimale Schotterpressungen, werden reduziert. Demgegenüber sind in der höheren Schotterschicht, wegen deren besonderer Verlagerungsempfindlichkeit, tendenziell auch größere Setzungen möglich. (Baeßler, M. 2008).

Die Lasten der überrollenden Schienenfahrzeuge müssen über die Schienen und Schwellen auf den Schotter übertragen und sicher in den Untergrund abgeleitet werden. Das Schotterbett übernimmt dabei eine lastverteilende und dämpfende Funktion, indem es die Schiene elastisch einfedert, so dass die vertikale Radlast auf mehrere Schwellen verteilt wird und damit die Beanspruchung der einzelnen Schwellen und des darunterliegenden Schotters verringert wird. Zusätzlich gibt es noch eine elastische Zwischenlage (Gummimischung), zwischen Schiene und Schweller die stark vibrationsdämpfende Eigenschaften hat.



**Abbildung 6: Der Aufbau von Schotterfahrwegen auf Erdkörper (Baeßler, M. 2008)**



**Abbildung 7: Schiene auf elastischer Bettung Konzept nach Winkler (1867) aus (Holtzendorff, K. 2002)**

Für die Versuchsdurchführung mit den Geophonen am Schweller oder an der Schiene montiert, kann man näherungsweise das in Abbildung 7 dargestellte Konzept nach Winkler verwenden.

Wie bereits erklärt wurden der Schotteroberbau und die Schienenkonstruktion so entwickelt das Lasten und Vibrationen die durch den Zug entstehen möglichst gut gedämpft bzw. verteilt werden, dadurch werden aber auch seismische Signale bzw. Schwingungen im Gleiskörper gut gedämpft. Das heißt bei einer Montage der Geophone auf den Schienen oder Schwellern sollten zumindest die elastischen Zwischenlagen zwischen Schiene/Schweller und der Gleisschotter berücksichtigt werden. Dies deshalb weil gerade diese schwingungsdämpfenden und damit signaldämpfenden Elemente bei der richtigen Situierung der Sensoren auf der Messstrecke die entscheidende Aussage über einen relevanten bzw. einen nicht relevanten Ereignis auf dem Gleisrost ermöglichen könnten.

Da in der Praxis alle oben erwähnten Systemkomponenten variabel sind, unterliegt das Modell und auch die daraus abgeleitete Anwendung auf dem Streckennetz der ÖBB natürlich einer gewissen Schwankung, bzw. bedarf es in weiterer Folge einer gewissen System Kalibrierung.

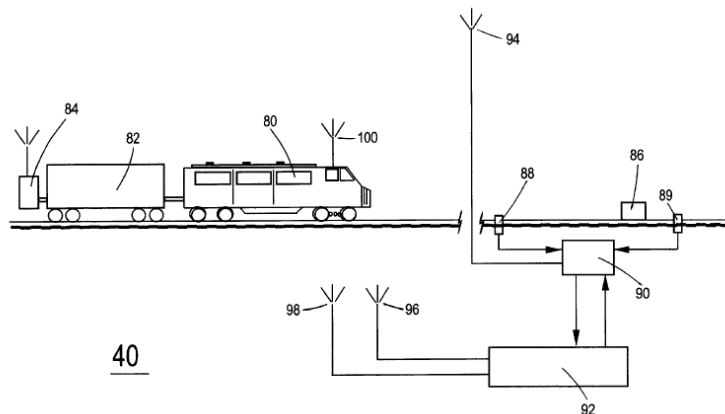
## 4.5 Bestehende seismische Lösungen

### 4.5.1 Railway Hazard Acousting Sensing, Locating, And Alarm System

Das Warnsystem (United States Patent: Patent No US 6,216,985 B1, Apr.17.2001) hat akustischen Sensoren auf eine Eisenbahnschiene gekoppelt um physikalische Ereignisse über Schall oder Schwingungen zu erfassen (Abb. 8).

Die detektierten akustischen Signale werden von einem Schallerkennungssystem analysiert. Wenn eine verdächtige Bewegung identifiziert wird oder eine nicht erkannte hochenergetische akustische Signatur erkannt wird, wird ein Alarm erzeugt.

Wenn mehr als ein akustischer Sensor das gleiche Ereignis erkennt, kann die exakte Position ermittelt werden. Alle physischen Ereignisse, die erkannt werden, können in einer Datei gespeichert werden. Diese können zu Ort, Zeit und vermuteten Ereignis für Abfrage und Analyse später katalogisiert werden.



**Abbildung 8: Prinzip Skizze, wesentliches Merkmal dieser Lösung ist die rein schienengebundene Sensorpositionierung**

Dies bedeutet, dass gegenständliches Detektionssystem rein schienenbasiert aufgebaut ist. Positiv in diesem Zusammenhang ist der einfach strukturierte Systemaufbau, nachteilig die offenbar nicht ausreichende Differenzierung von relevanten bzw. nicht relevanten Ereignissen.

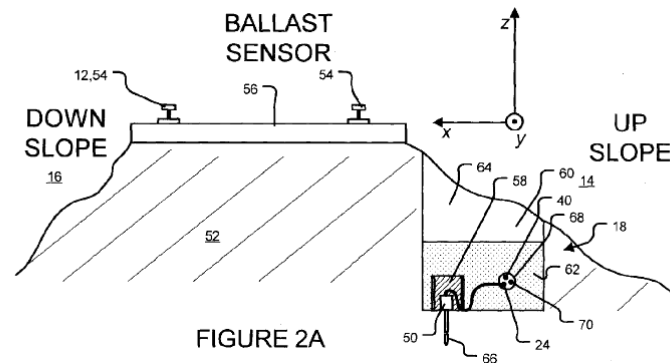
### 4.5.2 Weir Jones Group: System And Method For Detecting Rock Fall

Die seismische Lösung der Wire Jones Group (Patent application number: 20110313671) ist eine Weiterentwicklung der oben angeführten Lösung

Es kann von einer sehr gut durchdachten, technologischen Lösung gesprochen werden. Dabei wird eine Vielzahl an hochauflösenden Sensoren („Ballast Sensor“, Abb. 9) entlang des Schienenkörpers montiert und mit Kabel verbunden. Die hohe Vulnerabilität der Kabel

und die komplexe Signalanalyse haben letztendlich zu einem sehr aufwändigen System geführt.

Der Lösungsansatz generell scheint gelungen und kann als Stand der Technik angeführt werden.



**Abbildung 9: Prinzip Skizze System Wire Jones, es werden so genannte „Ballast Sensoren“ mit Kabel verbunden in einer linearen Anordnung entlang der Gleise installiert.**

## 5 ERGEBNISSE

Um die Ergebnisse dieses Projektes nicht rein aus einer Literaturstudie zu beziehen wurden auch Laborversuche (Koaxialkabel) und Feldtests (seismische Sensoren) durchgeführt. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine realistische Einschätzung des Potentials der beiden Technologien.

### 5.1 Koaxialkabel

Ziel war es, wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, die Erstellung eines „Proof-of-Concepts“, d.h. eine grobe Evaluierung, auch mit Hilfe von Labortests, ob mit Koaxialkabeln basierend auf dem TDR-Prinzip Steinschlag detektiert werden kann. Dieses Kapitel basiert auf den Endbericht der Firma Adaptivia GmbH, welche die Versuche im Auftrag und in Kooperation mit der Firma Pulse Engineering GmbH durchgeführt hat.

#### 5.1.1 Methode

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde ein experimenteller Ansatz gewählt, der sich auf die prototypische Realisierung eines Impulsgenerators und die Tests mit Standard-Koaxialkabel fokussiert. Nicht-funktionale Anforderungen sind möglichst einfache Versuchsaufbauten und geringe Kosten. Damit sind folgende konkrete Aufgaben verbunden:

- 1) Erstellung Grobkonzept
- 2) Design und Herstellung eines Impulsgenerators
- 3) Tests von Standard-Koaxialkabel auf mechanische Einflüsse
- 4) Experiment mit sensiblem Kabel

#### 5.1.2 Sensorkabel

Für den prototypischen Aufbau dient als Ausgangspunkt die Literatur zur Deformationsmessung (siehe z.B. Singer, 2010), wobei kommerziell erhältliche, hoch qualitative Koaxialkabel zum Einsatz kommen.

Zusätzlich soll entgegen dem Grundprinzip der kommerziell erhältlichen Kabel, welche möglichst unempfindlich gegen mechanische Einflüsse konstruiert werden, ein auf mechanische Einflüsse empfindlicheres Kabel, getestet werden, um zu sehen ob Erschütterungen/Schwingungen grundsätzlich detektiert und verortet werden können.

### 5.1.3 Auswerteeinheit

Die Auswerteeinheit hat die Aufgabe

- 1) die o.g. Reflexionen, welche durch das offene Kabelende oder durch Störungen hervorgerufen werden zu digitalisieren und mit dem abgegebenen Impuls zu vergleichen,
- 2) die Position der Störung zu ermitteln und
- 3) Informationen über die Intensität und Art der aufgetretenen Störung zu machen.

Zur Digitalisierung ist ein synchronisiertes Abtastungsverfahren vorgesehen. Da sich der Impuls mit Lichtgeschwindigkeit (300.000km/s) reduziert um den sog. Verkürzungsfaktor des Kabels ausbreitet und reflektiert wird, ist die Abtastung in Echtzeit schwierig. Hierzu sind teure Laboroszilloskope notwendig. Die synchronisierte Abtastung ist hingegen eine Methode, bei der das Signal basierend auf eine Reihe von getriggerten Signalfanken nachgebildet wird. Diese werden jeweils einmalig erfasst. Die Methode der synchronisierten Abtastung (engl. Equivalent Time Sampling, kurz ETS) bringt eine höhere effektive Abtastrate. ETS ist jedoch nur anwendbar bei sich wiederholenden Signalen (siehe auch Interleaved Sampling, häufig verwendete Implementierung der ETS).

Für den prototypischen Aufbau ist es daher notwendig, dass

1. der Impulsgenerator einen Trigger-Ausgang zur Verfügung stellt
2. die Impulse in einem definierten Intervall wiederholt werden

Das Verhältnis von der Amplitude der reflektierten Welle ( $V_R$ ) zur Amplitude des gesendeten bzw. inzidierten Signals ( $V_I$ ) wird als Reflektionskoeffizient ( $\rho$ ) bezeichnet.

$$\rho = \frac{V_R}{V_I} \quad (1)$$

Wird ein Impuls in einen elektrischen Leiter eingebracht, breitet sich dieser solange ohne Interferenzen aus, solange dieser auf keine Unterbrechungen trifft. Unterbrechungen oder Störungen verändern die Impedanz des Leiters und bewirken, dass das Signal zurück zur Quelle reflektiert wird. Der Betrag des reflektierten Signals ist eine Funktion der Veränderung der Impedanz ( $Z$ ) innerhalb des elektrischen Leiters:

$$\rho = \frac{Z_R - Z_I}{Z_R + Z_I} \quad (2)$$



Zur Verortung der Störung kann die Laufzeit des Signals bzw. die Laufzeitdifferenz zwischen abgegebenen Impuls und reflektiertem Signal herangezogen werden. Bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit (Verkürzungsfaktor) kann somit auf die Störungsstelle geschlossen werden.

Neben Amplitude und Laufzeit des Signals können induktive, kapazitive und resistive Eigenschaften der Reflektion mit Hilfe der TDR ausgewertet werden.

Für den prototypischen Aufbau interessant sind zunächst die Wellenform des abgegebenen Impulses und der Reflexion sowie die Veränderung der Amplitude der Reflexion. Diese Eigenschaften sollen Aufschluss darüber geben inwieweit Veränderungen der elektrischen Eigenschaften des „Kabelsensors“ hervorgerufen durch mechanische Einflüsse (Quetschung, Veränderung Distanz von Innen- und Aussenleiter etc.) detektiert werden können.

Schließlich ist anzumerken, dass aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus anstelle einer dedizierten Auswerteeinheit ein gängiges Oszilloskop verwendet wird. Die Entwicklung einer Digitalisierungs- und Auswerteeinheit inkl. Kalibrationsverfahren ist nicht Gegenstand dieser Studie und geht über den Projektrahmen hinaus.

#### 5.1.4 Impulsgenerator

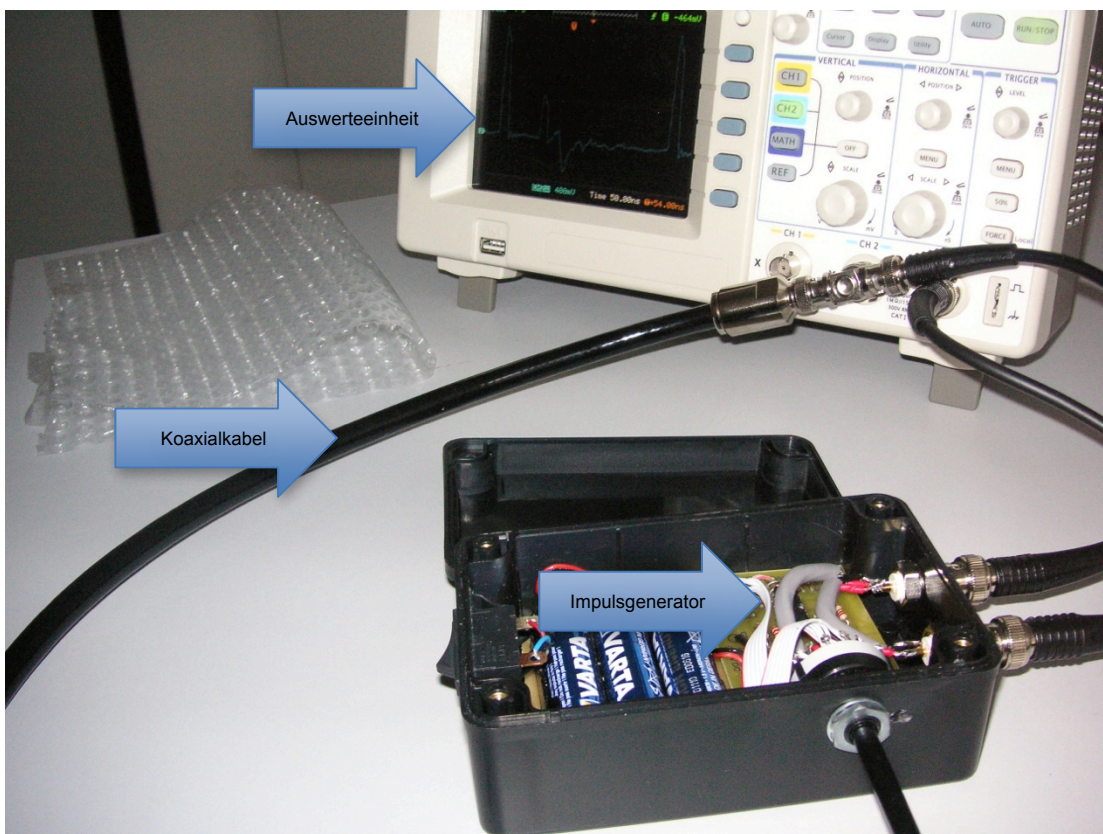


Abbildung 10: Impulsgenerator im Vordergrund

Schwerpunkt der Vorstudie bildet die prototypische Realisierung eines Impulsgenerators. Neben den im Punkt „Auswerteeinheit“ skizzierten Anforderungen sollte der Impulsgenerator so konstruiert werden, dass unterschiedliche Pulslängen generiert werden können.

Abbildung 10 zeigt den prototypischen Aufbau des Impulsgenerators. Der Impulsgenerator erzeugt Impulse mit einer einstellbaren Dauer. Die Dauer oder Länge des Pulses reicht von 10 Nanosekunden (ns) bis 5 Mikrosekunden.

Anzumerken ist, dass die zugrunde liegende Frequenz bei 10ns bei 50MHz, der sog. „blinde Punkt“ bei 4 m liegt und die theoretisch maximale Reichweite ca. 500m beträgt. Zum Vergleich, wird die Impulslänge beispielsweise auf 1µs erhöht, liegt die theoretische Reichweite bei 5km.

Die Impulslänge ist mittels des Drehknopfes einstellbar. Der Impulsgenerator besitzt einen Trigger-Ausgang (verbunden mit dem Trigger-Eingang des Oszilloskops) und einen Impulsausgang, der in ein T-Stück, welches direkt am Oszilloskop angebracht ist, den Impuls einspeist.

### 5.1.5 Versuchsbeschreibung

Zur Untersuchung der Funktion und Machbarkeit von Kabelsensoren wurden drei Versuche aufgebaut:

#### 5.1.6 Versuch 1: Funktionstest

Ziel: Test der Funktion des TDR-Aufbaus

Experiment	Beschreibung	Erwartetes Ergebnis
1A)	Offenes Kabelende	Vollreflektion am Kabelende
1B)	Kurzschluss am Kabelende	Invertierte Reflektion
1C)	Verkürzung des Kabels	Geringere Laufzeitdifferenz
1D)	100 Ohm am Kabelende	Abschwächen der Reflektion
1E)	Kapazität/Induktivität	Veränderung der Wellenform

Anm.: Bei diesem Versuch wird ein Standard-Koaxialkabel verwendet.

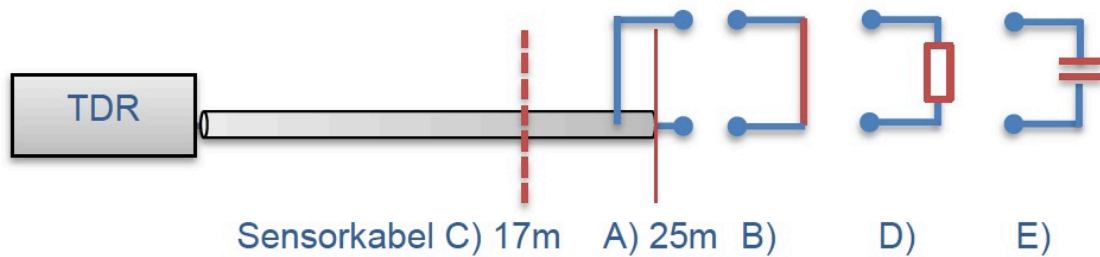


Abbildung 11: Skizze des Versuchsaufbaus

### 5.1.7 Versuch 2: Hochqualitatives Kabel

Ziel: Test mit Ecoflex-10 Koaxialkabel

Experiment	Beschreibung	Erwartetes Ergebnis
2A)	Wie 1A,B,C,D,E, jedoch mit hochqualitativem Kabel und höherer Frequenz (Pulslänge), Biegen und Quetschung des Kabels (Deformation)	Veränderung des Reflektionskoeffizienten

### 5.1.8 Versuch 3: Kabelsensor

Ziel: Test mit sensiblen Kabel

Experiment	Beschreibung	Erwartetes Ergebnis
3A)	Verlängerung des Ecoflex-10 Kabels mit einem „sensiblen“ Kabel	Höhere Laufzeitdifferenz, Veränderung Impedanz / Teilreflektion
3B)	Wie 3A, jedoch mit 50 Ohm terminiert	Invertierte Reflektion am Kabelende
3C)	Wie 3B, jedoch Variation der Distanz zwischen den zwei Leitern	Veränderung Reflektionskoeffizient / Impedanz an dem Punkt wo Kabel verändert wird.

Der dritte Versuch zielt darauf ab ein möglichst sensibles (gegenüber mechanischen Einflüssen empfindliches) Kabel zu wählen. Die Wahl fiel auf ein Zweileiter Kupferkabel (im Handel als Audio-Kabel erhältlich) mit jeweils 2,5 mm Stärke in transparentem Kunststoff.



**Abbildung 12: Veränderung der Distanz zwischen zwei Leitern.**

Die Veränderung der Distanz zwischen den zwei Leitern wird im Versuch durch kontrollierte Einrichtung der Distanz an einer bestimmten Kabellänge durchgeführt. Erschütterungen bzw. Schwingungen werden durch einen möglichst realitätsnahen Weg simuliert.

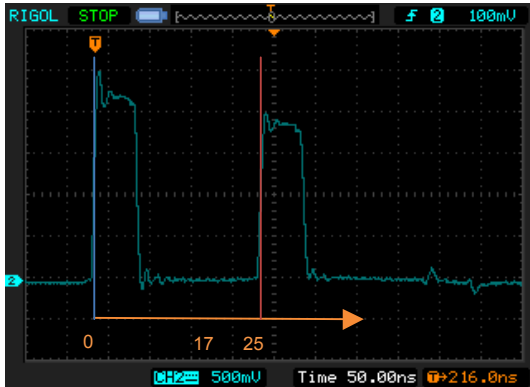


**Abbildung 13 "Sensorkabel" 2x2,5mm Cu**

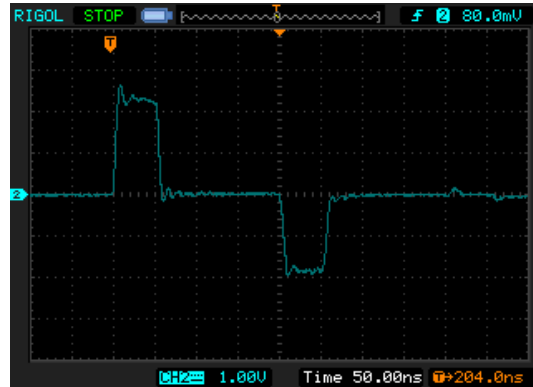
## 5.1.9 Ergebnisse

### 5.1.10 Ergebnis 1: Funktionstest mit Standardkoaxialkabel

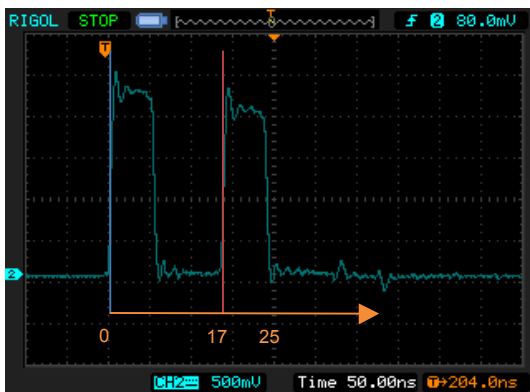
Für den Funktionstest wurden vier typische Impuls- und Reflektionen aufgenommen.



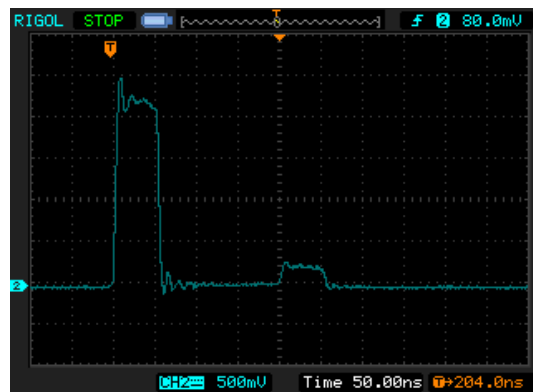
A) 25 Meter, 50 ns, Offen



B) 25 Meter, 50 ns, kurzgeschlossen

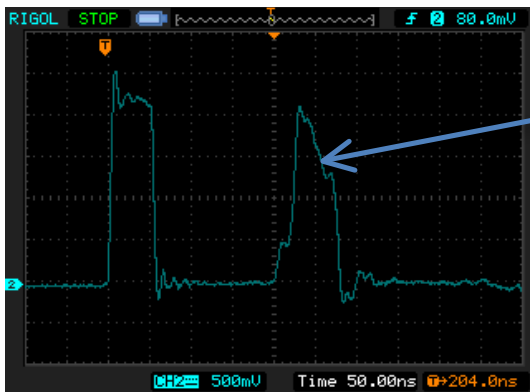


C) 17 Meter, 50ns, Offen



D) 25 Meter, 50ns, 100  $\Omega$  terminiert

Im Bild A erkennbar ist der Impuls, beginnend bei ca. 75ns mit einer Dauer von 50ns. Ca. 150ns später reflektiert das Signal am Ende des offenen Kabels (Totalreflektion). Der Theorie entsprechend wird der Impuls invertiert, wenn das Kabelende kurzgeschlossen wird (Bild B). Bild C zeigt eine Verkürzung des Kabels auf 17m Länge, die Reflektion am offenen Kabel ist 50ns früher eingetreten. Schließlich zeigt Bild D) die Terminierung des offenen Kabels mit 100Ohm.



Variable  
Kapazität.

D) 25 Meter, 50 ns, Ringelektroden

#### Zwischenergebnis:

Impedanz-, Kapazitäts- und Induktivitätsänderungen am offenen Kabelende sind gut erkennbar. D.h. der grundsätzliche Aufbau und das Prinzip der TDR funktionieren. Wenn das Kabel unterbrochen, beschädigt etc. wird, zeigt sich eine deutlich kürzere Laufzeitdifferenz und eine Veränderung der Reflektions-Wellenform. Bei dem "Standard-Koaxialkabel" sind jedoch mechanische Einwirkungen wie z.B. Quetschungen und Verformungen nicht erkennbar.

#### **5.1.11 Ergebnis 2: Hoch-qualitatives Koaxialkabel**

Bei diesem Versuch war das Ziel den Stand der Technik herzustellen und darüber hinaus die Frequenz der Abtastung zu erhöhen. Verwendet wurde dabei das hoch-qualitative Koaxialkabel Ecoflex 10 (vgl. Singer, 2010).



**Abbildung 14 Ecoflex-10 Kabel**

#### Zwischenergebnis 2:

Der Vorteil dieses Kabels gegenüber dem Standardkoaxialkabel sind die sehr guten Dämpfungseigenschaften. Biegung oder Quetschungen ergaben keine Änderungen der Wellenform.

### 5.1.12 Ergebnis 3: Kabelsensor

Wie oben beschrieben wurde an das hochwertige Koaxialkabel mit einer Gesamtlänge von 17 Metern, das „Sensorkabel“ mit einer Länge von 5 Metern angelötet und bei Meter 21 aufgetrennt.

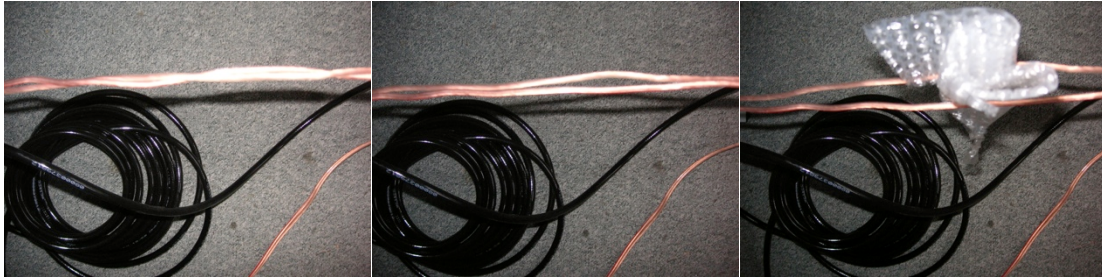


Abbildung 15 Sensibles Kabel Versuch 3C.1) 2 mm, 3C.2) 10 mm, 3C.3) 20 mm

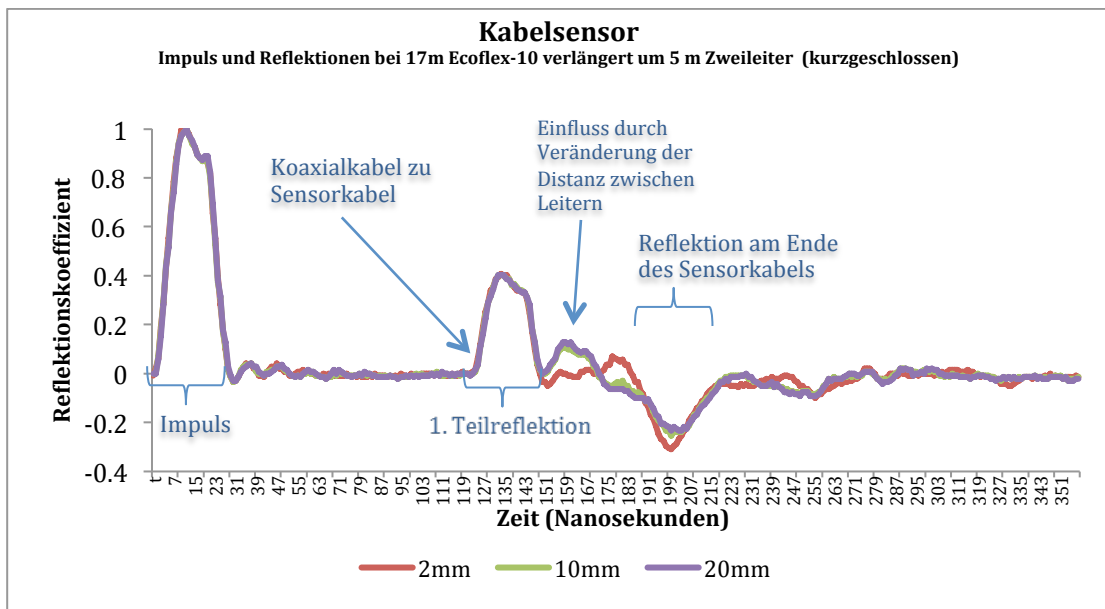
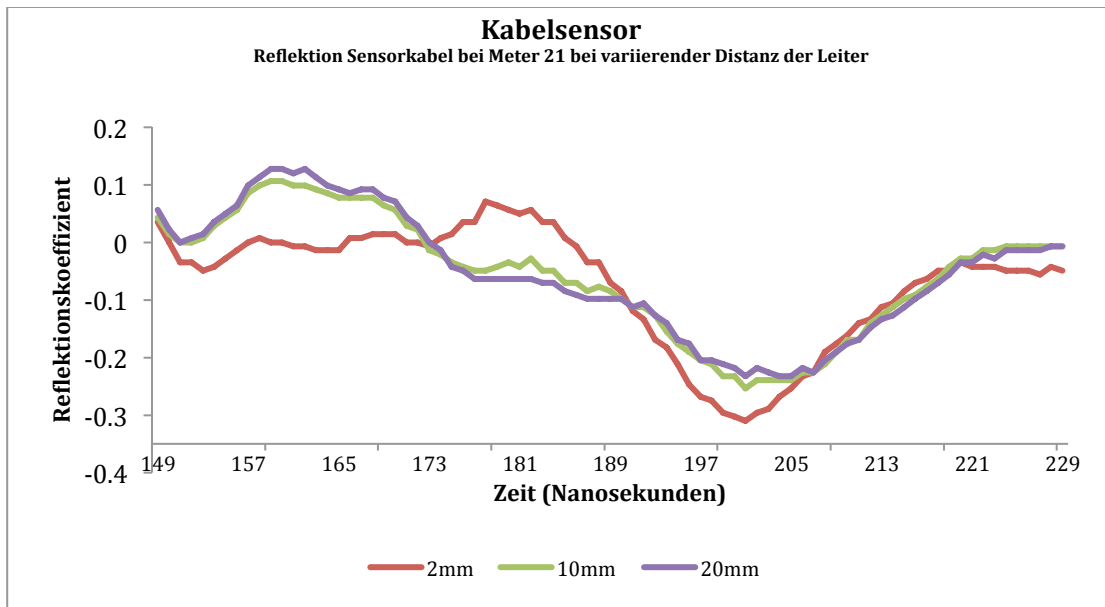


Abbildung 16 Gesamter Verlauf von Impuls bis zum Ende des Sensorkabels



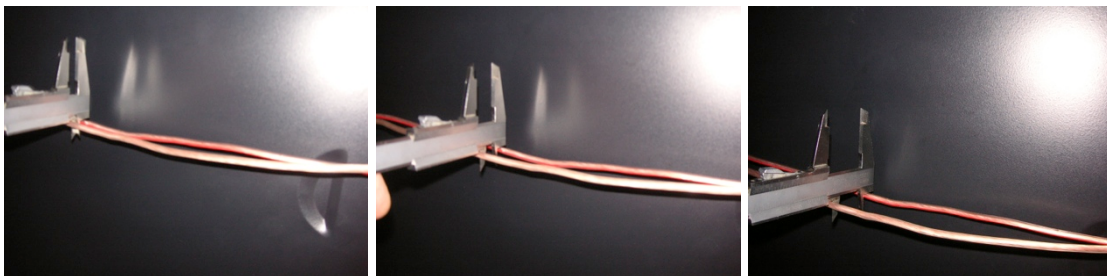
**Abbildung 17 Vergrößerung Reflektionskoeffizient Sensorkabel**

Abb. 17 stellt einen Impuls mit einer Länge von 10 ns Impuls dar, der sich auf dem Koaxialkabel ausbreitet und bei Meter 17 beim Übergang zum Sensorkabel reflektiert (1. Teilreflektion) wird. Dies weist auf eine Fehlanpassung hin.

Entlang des Sensorkabels kommt es bei Meter 21 zu einer zusätzlichen Veränderung des Reflektionskoeffizienten. Wie oben beschrieben wurde hier der Abstand zwischen den Leitern des Sensorkabels verändert.

Je weiter die Kabeladern voneinander entfernt, desto höher ist der Reflektionskoeffizient. Die Veränderung ist mit ca. 300mV auch gut auswertbar.

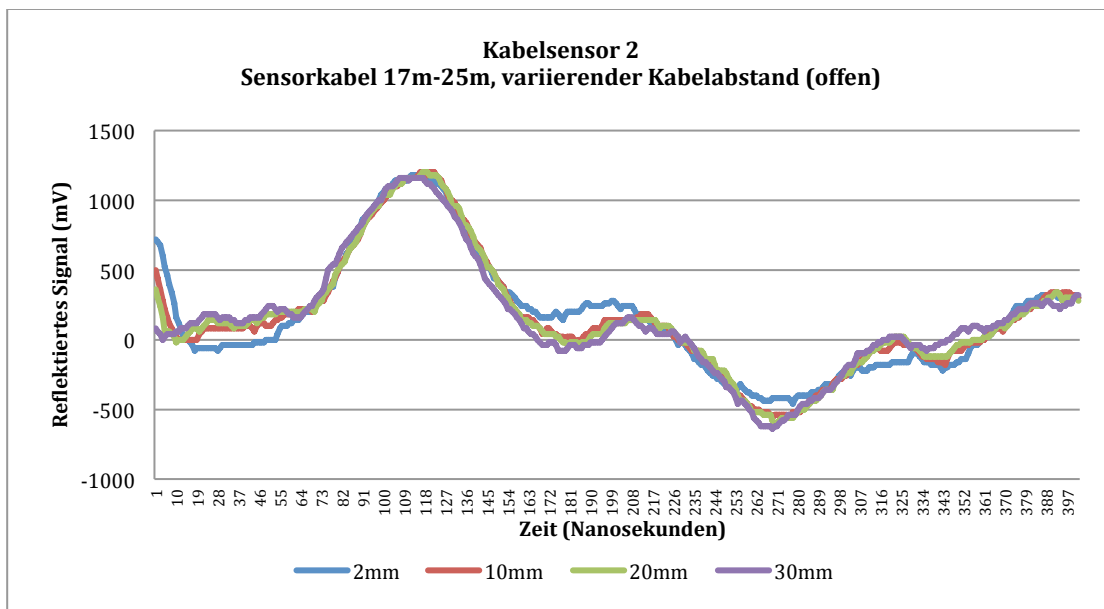
Variation von Versuchsaufbau 3 vor metallischer Oberfläche:



**Abbildung 18 Kabelsensor Aufbau 2 10mm, 20mm, 30mm**

Ein weiterer Versuch wurde durchgeführt. Wie in Abb. 18 ersichtlich wurden das Sensorkabel vor einer metallischen Oberfläche gespannt und wie oben die Distanz zwischen den Leitern variiert.





**Abbildung 19 Reflektion Kabelsensor Aufbau 2 bei variierendem Kabelabstand**

Die Abb. 19 zeigt das reflektierte Signal im Bereich ca. 17 bis 25 m des Sensorkabels. Auch hier variiert mit zunehmendem Abstand der Leiter zueinander die Reflektion. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass das Sensorkabel nicht mit 50 Ohm terminiert wurde. D.h. je höher der Abstand desto geringer ist der Reflektionskoeffizient. Die Metalloberfläche stört geringfügig.

### Ergebniszusammenfassung Versuch 3:

Bei der Versuchsreihe 3 (Versuchsaufbau 3) wurde die grundsätzliche Machbarkeit eines Kabelsensors evaluiert. Festzuhalten ist, dass ein Zweileiterkabel genutzt werden kann, um die Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Einflüssen zu überprüfen. Zudem konnte demonstriert werden, dass trotz fehlender Impedanzanpassung, relativ länger Impulsanstiegsflanke und suboptimalen Sensorkabel eine mechanische Veränderung im Kabelsensor selbst eindeutig feststellbar ist.

Das Ergebnis der letzten Versuchsreihe kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Veränderung des Abstands der Adern eines Zweileiter-Kabels ist gut feststellbar.
- Schwingungen (Weg/Distanz: 2mm bis 10 cm, Frequenz ca. 10 Hz) sind gut erkennbar.
- Störende Einflüsse durch Fehlanpassung / Übergang von Zuleitung zu „Sensorkabel“ deutlich sichtbar.
- Experiment liefert Daten, die leitungstheoretische überprüfbar sind.
- Die Sensitivität kann durch Material mit höherer Leitfähigkeit z.B. Kupferrohr erhöht werden, dielektrische Effekte treten jedoch verstärkt auf.

- Metallische Oberflächen verändern die Sensitivität geringfügig.

### 5.1.13 Zusammenfassung

Ausgehend von der Fragestellung „Können sog. Kabelsensoren (Koaxialkabel) für die Detektion von Steinschlägen im Bereich von Hekto- bis maximal Kilometern grundsätzlich angewendet werden?“ wurde ein Konzept für ein TDR entwickelt, ein Impulsgenerator prototypisch hergestellt und insgesamt drei Versuchsaufbauten realisiert. Als Ergebnis kann zusammengefasst werden:

- 1) Das TDR-Messprinzip ist grundsätzlich anwendbar, eine oder mehrere Störungen des Kabels in Folge von mechanischen Einflüssen zu detektieren und zu verorten.
- 2) Die Erkennung und Verortung von Erschütterungen bzw. Schwingungen konnte mit Hilfe eines sehr einfachen Versuchsaufbaus (Versuch 3) demonstriert werden.
- 3) Die Reichweite kann entweder durch eine Verstärkung des Impulses oder mehrere Abschnitte mit zusätzlicher Impulsgenerator/Auswerteeinheit erreicht werden.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit kann abgeschätzt werden, dass die Gesamtkosten der Überwachung von langen, linienförmigen Bereichen mit dem untersuchten Prinzip deutlich günstiger ausfallen würden als konventionelle, punktuelle Systeme.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass der Prototyp nicht auf Schienentrassen oder im Freien getestet wurde. Während Impulsgenerator/Auswerteeinheit ähnlich wie in Abbildung 10 ersichtlich in ein IP67 Gehäuse eingebracht werden können, ist beim Sensorkabel selbst besonders auf Umwelteinflüsse (z.B. Regen, Hagel, mechanische Einwirkungen) zu achten. Obwohl die Ergebnisse aus den Laborversuchen sehr motivierend sind, steckt die praktische Anwendung dieser Technologie derzeit noch in den Kinderschuhen. Für eine Anwendung zur Steinschlagdetektion müssten aus heutiger Sicht zumindest noch folgende Punkte weiterentwickelt werden:

- 1) Der Impulsgenerator sollte dahingehend verbessert werden, dass die Impulsanstiegszeit (derzeit ca. 10ns) reduziert wird ( $< 1$  ns).
- 2) Der grundsätzliche Aufbau der Auswerteeinheit wurde konzipiert. Für die sequentielle Abtastung, der Berechnung des Reflektionskoeffizienten, der Störquellenortung sowie automatisierten Erkennung von definierten Ereignissen sind Algorithmen zu entwickeln und auf einem geeigneten Mikroprozessor zu implementieren. Ausgehend von den signalverarbeitungs- und softwaretechnischen Anforderungen ist eine Hardware zu entwickeln. Alternativ dazu können ev. kommerziell verfügbare Systeme evaluiert und angepasst werden.

- 3) Hinsichtlich des Sensorkabels konnten zwei Möglichkeiten aufgezeigt werden. Für den speziellen Anwendungsfall der Steinschlagdetektion an Schienen ist zu überprüfen / zu recherchieren und zu testen, ob nicht ein bereits entwickeltes Kabel zur Anwendung kommen kann. Hierbei kann der oben genannte Aufbau verwendet werden. Die zweite Möglichkeit besteht darin, das Kabel selbst zu entwickeln. Dabei sind insbesondere die elektrischen / elektromagnetischen Eigenschaften zu berücksichtigen wie z.B. die Signaldämpfung.
- 4) Integration in das Fernmeldesystem der ÖBB, um über detektierte Ereignisse zu informieren.

Dabei ist ein Schlüsselparamester sicher Punkt 3 das Sensorkabel. Sollte kein am Markt erhältliches Kabel geeignet sein, ist der Aufwand für die Entwicklung eines Sensorkabels stark abhängig vom Ausgangspunkt der Forschung und Entwicklung und der Definition der gewünschten Genauigkeit des Sensors. Hinweise liefern u.a. Chen et al. (2006) die eine Projektlaufzeit von zwei Jahren bis zur Fertigstellung eines testfähigen Sensorkabels angeben. Die Dauer für die Kommerzialisierung bzw. Serienfertigung kann bei dieser Herangehensweise mit zumindest einem Jahr geschätzt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden das Koaxialkabel zwar eine durchaus vielversprechende Technologie für die Detektion von Naturgefahren sein könnten, der Stand der Technik momentan aber noch im Bereich der Grundlagenforschung ist, und eine Weiterentwicklung bis zur Marktreife sicher den Rahmen dieses Projektes sprengen würde.

## 5.2 Seismische Sensoren

Auf Basis von kabellosen, energieautarken Mini-Datenloggern, sollten Geophone (Sensor SM6) entlang der Eisenbahn Trasse installiert werden. Um diese Projektidee zu verifizieren bzw. zu konkretisieren wurden verschiedene Feld-Versuche auf Eisenbahninfrastruktur durchgeführt mit dem Ziel:

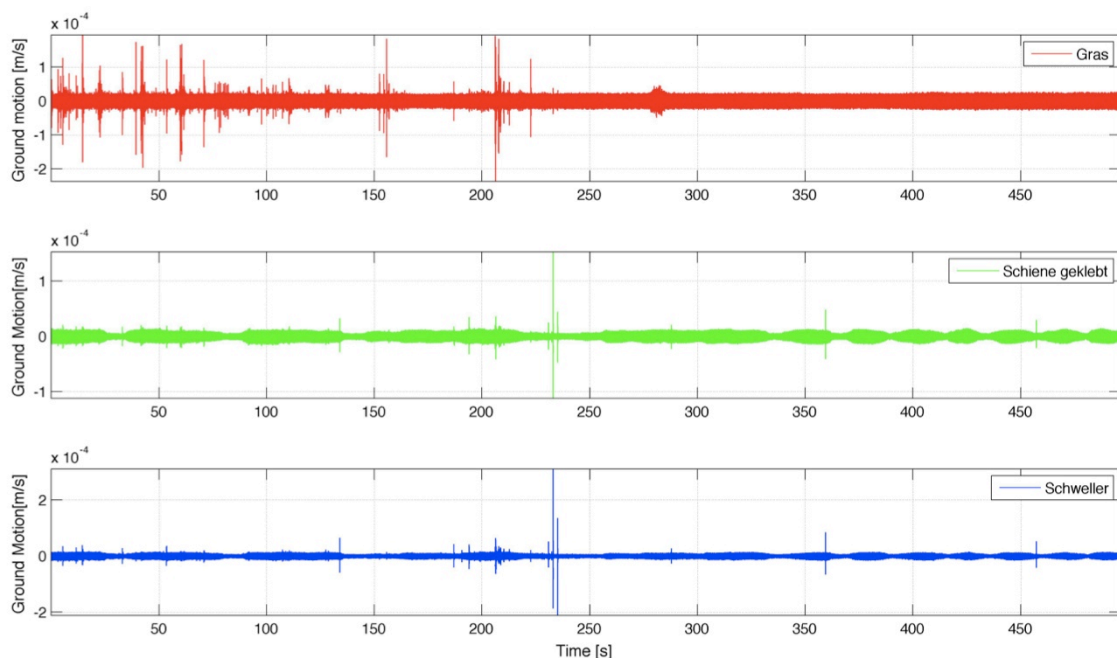
- Die optimale Position für Detektion von Steinschlag der Geophone auf dem Gleis, Schweller, Gleisschotter oder Umgebung zu finden.
- Die optimale Installation/Montage der Sensoren auf dem jeweiligen Untergrund zu identifizieren. Dadurch wird die Signalqualität signifikant beeinflusst.
- Die minimale Stein Größe (Gewicht/Energie) festzustellen, die mit einem vertretbaren technischen Aufwand detektiert werden kann.
- Die minimalen Abstände zu bestimmen, in welcher die Geophone in einer linearen Anwendung installiert werden müssen.

Bei allen Versuchen wurde mit einem Sensor SM6 Geophone (Eigenfrequenz 4Hz, Sensitivität 28.8 V/m/s) durch Kabel mit einem Worldsensing Spidernano Datenlogger mit einer Messfrequenz von 250Hz gearbeitet (siehe auch Abb. 5). Im Folgenden wird die Sensor Position neben dem Bahndamm als „Gras“ bezeichnet, dabei handelt es sich um einen gewachsenen Boden aus Lockergestein.

### 5.2.1 Versuch 1 Noise Level

Es wurden mehrere Versuche durchgeführt um das „Noise Level“, also die Stör- oder Umgebungsgeräusche zu analysieren. Dabei wurden die Geophone auch in verschiedenen Anordnungen installiert.

Als erstes wurden die Geophone verteilt auf Schiene (angeklebt), Schweller (angeklebt) und Gras/Boden neben dem Bahndamm installiert (Abb. 5). Zu dieser Zeit fanden auf der Versuchsstrecke, ÖBB Hieflau-Eisenerz, km 3.450, Jägerkogel, gerade Bauarbeiten für Steinschlagschutznetze statt. Daher gab es zahlreiche Störquellen wie Generator, Kompressor, Bohren, Hämmern, etc., Abbildung 20 zeigt die seismischen Daten.



**Abbildung 20: Umgebungsgeräusche Versuch 1, Geo1 (oben) war im Gras neben der Bahn, Geo2 (Mitte) war auf die Schiene geklebt und Geo3 (unten) war auf den Schweller geklebt. Siehe auch Fotos in Abb.5. ÖBB Strecke Hieflau–Eisenerz, km 3.450, Jägerkogel, zu dieser Zeit war eine Baustelle zur Installation von Steinschlag Netzen vor Ort, d.h. die Umgebungsgeräusche waren sehr hoch (Kompressor, etc...).**

Die maximalen Amplituden sind im Bereich von  $10^{-4}$ m/s in allen drei Sensoren. In der obersten Zeitreihe in Abb. 20, welche zu dem Geophon im Gras neben dem Bahndamm gehört, sieht man viele einzelne Ausschläge welche vor allem der Baustellen Aktivität

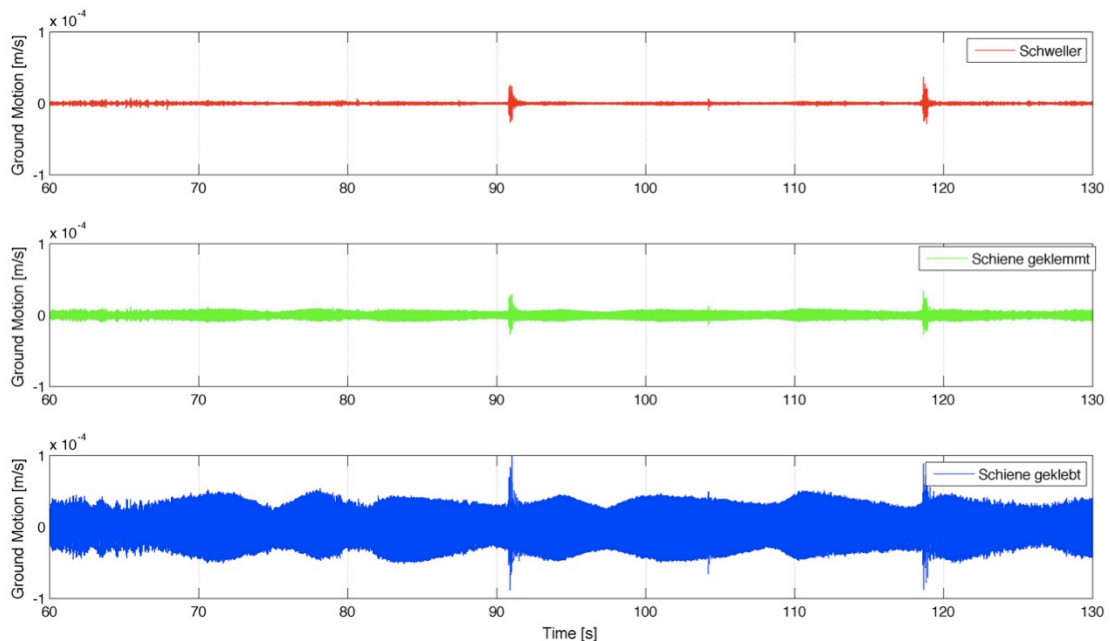
zugeordnet werden können. In den Geophonen die auf der Schiene und dem Schweller montiert sind gibt es weniger Ausschläge, dies ist wahrscheinlich auf die dämpfenden Eigenschaften des Schienenkörpers zurückzuführen (siehe auch Kapitel 4.4).

Abbildung 21 zeigt die zweite Versuchsanordnung zur Bestimmung der Stör- oder Umgebungsgeräusche. Hier wurde ein Geophon auf den Schweller geklebt, ein Geophon mit einer Schienenklemme auf die Schienen geklemmt und ein Geophon auf die Schiene geklebt. Mit diesem Versuch sollte auch festgestellt werden, was die beste Art der Montage des Geophons auf der Schiene ist.



**Abbildung 21: Übersicht über die verschiedenen Montagepunkte. Geophon 1 ist auf dem Schweller geklebt, Geophon 2 ist auf die Schiene geklemmt mit einer Schienenklemme und Geophon 3 ist auf die Schiene geklebt, Daten siehe Abb. 22, ÖBB Strecke Hieflau-Eisenerz, km 3.450, Jägerkogel.**

Die seismischen Daten in Abbildung 22 zeigen ganz klar das der Geräuschpegel in der untersten Zeitreihe (Geo3, auf Schiene geklebt) am höchsten ist. Daraus kann man schließen, dass durch kleben die beste Signalübertragung zwischen Schiene und Geophon stattfindet. Dies würde einerseits bedeuten, dass man einen Stein Treffer auf dem Gleis gut detektieren kann, aber auch andererseits, sollte der Treffer auf die Schweller oder dazwischen stattfinden, man mit erhöhten Geräuschpegel auf den Schienen rechnen muss.



**Abbildung 22: Umgebungsgeräusche Versuch 2, Geo1 (oben) war am Schweller geklebt, Geo2 (Mitte) war auf die Schiene geklemmt mit einer Schienenklemme und Geo3 (unten) war auf die Schiene geklebt. Siehe auch Fotos in Abb. 21. ÖBB Strecke Hieflau-Eisenerz, km 3.450, Jägerkogel. Zu dieser Zeit war eine Baustelle zur Installation von Steinschlag Netzen vor Ort, d.h. die Umgebungsgeräusche waren sehr hoch (Kompressor, etc...).**

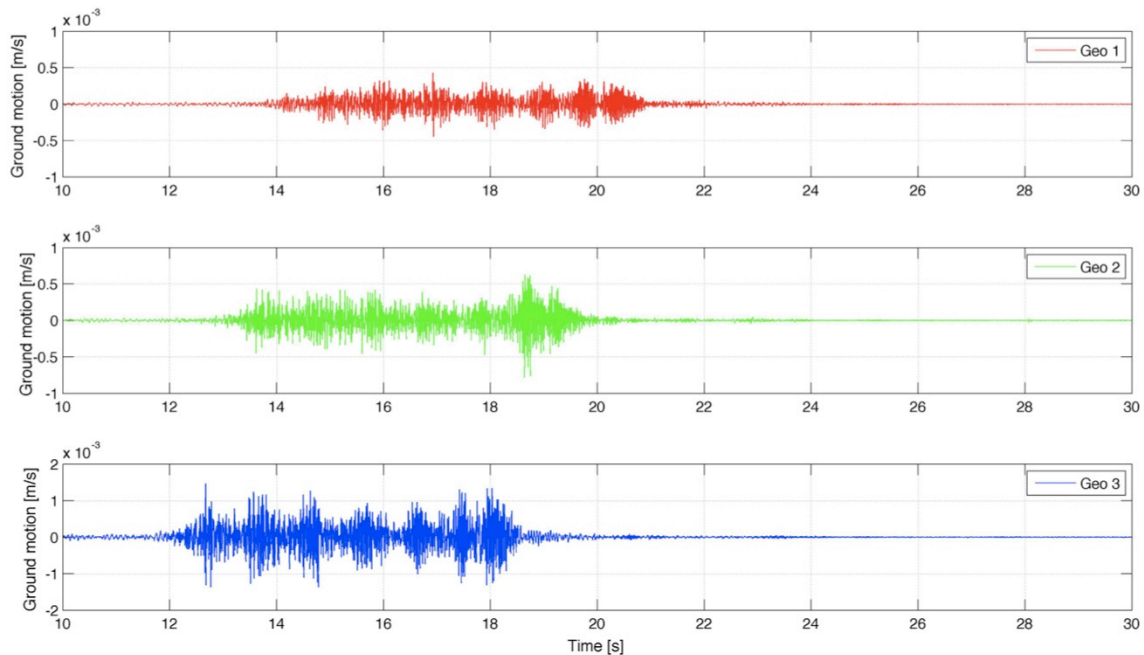
### 5.2.2 Versuch 2, Züge

Es wurden mehrere Versuche durchgeführt um Signale von Zügen aufzunehmen, dabei wurde drei Geophone in einer linearen Anordnung im Boden neben dem Bahndamm installiert. Der Abstand zwischen den Geophonen betrug 30m und der Abstand zur Gleisachse 7m.

In Abbildung 23 wird beispielhaft das seismische Signal eines Güterzuges dargestellt. Die maximale Amplituden befinden sich im Bereich von  $10^{-3}$ m/s. Dies ist auf die Installation der Geophone im Boden, nicht auf dem Schienenkörper zurückzuführen. Es ist zu erwarten, dass bei einer Installation der Geophone auf den Schienen oder auf dem Schweller die maximale Amplitude um eine vielfaches höher ist. Sehr schön kann auch das vorbeifahren des Zuges an den verschiedenen Geophonen gesehen werden. Geophon 3 wird bei Sekunde 12 passiert, Geophone 2 bei Sekunde 13 und Geophone 1 bei Sekunde 14. Das ganze Signal des Zuges dauert circa 7s (z.B. Geo3 von 12s-19s). Besonders bei Geophone 3 (Abb. 23, unten) können 7 verschiedene Signalpakete (Dauer ca. 1s) ausgemacht werden, die wahrscheinlich durch die Waggonen des Zuges verursacht wurden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch eine lineare Anordnung von Geophonen und ein passieren des Zuges an allen Geophonen, sollte es technisch machbar

sein, das seismische Signal von Zügen klar von einem zu erwartenden Signal von Steinschlag zu unterscheiden.



**Abbildung 23: Lineare Installation von Geophonen (Abstand 30m) und Signal von Güterzug. Zug passiert Geo3 bei 12s, Geo2 bei 13s und Geo1 bei 14s. ÖBB Strecke Hieflau-Eisenerz, km 3.450, Jägerkogel.**

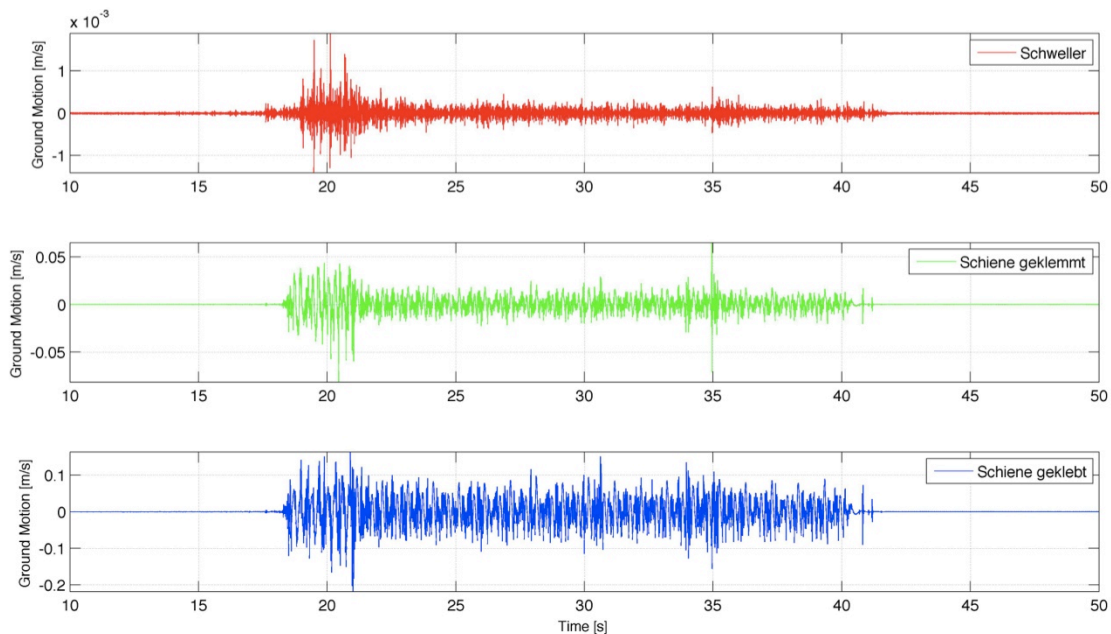
In einem zweiten Versuch wurde ein Geophon auf die Schiene geklebt, ein Geophon mit einer Schienenklemme an die Schiene befestigt und ein Geophon auf den Schweller geklebt (Abb. 21). Dadurch sollten wieder unterschiedliche Montagepositionen getestet werden und gleichzeitig die maximale Amplitude von Zug-Signalen bei Montage der Geophone am Gleiskörper festgestellt werden.

Abbildung 24 zeigt deutlich, dass die Signale des Zuges mit dem Geophon auf dem Schweller geklebt die kleinsten Amplituden haben ( $10^{-3}$ m/s, Abb. 24 oben). Das ist wahrscheinlich auf das Dämpfungselement (Gummi) zwischen Schiene und Schweller zurückzuführen das bereits in Kapitel 4.4 erwähnt wurde.

Die Montage mittels Schienenklemmung auf der Schiene (Abb. 24 Mitte), erzeugt weit höhere Amplituden (0.05m/s) und am besten ist das Signal (0.15m/s) bei dem Geophon das auf die Schiene geklebt wurde (Abb. 24 unten). Dies steht im Einklang mit unseren vorherigen Ergebnissen, wo auch die Klebung auf Schiene die besten Resultate lieferte (Abb. 22).

Im Gegensatz zu den Zug-Signalen aus Abbildung 23 sind hier (Abb. 24) keine einzelnen Signalpakete ersichtlich. Aus diesem Versuch kann man schließen, dass für Signale deren

Ursprung auf der Schiene ist, wie ein Zug oder ein Stein der die Schiene direkt trifft, eine Montage der Geophone direkt auf der Schiene die beste Lösung ist.



**Abbildung 24: Seismische Daten von einem Güterzug. Die verschiedenen Montagepunkte der Geophone sind in Abb. 21 dargestellt. ÖBB Strecke Hieflau-Eisenerz, km 3.450, Jägerkogel. Bitte beachten sie die unterschiedlichen Skalen der Amplituden bei den einzelnen Zeitreihen.**

Wobei die geklebte Lösung Signale liefert, die um eine Zehnerpotenz höher sind und daher eindeutig der Schienenklemme vorzuziehen ist. Eine Herausforderung für einen Einsatz in der Praxis ist sicher die dauerhafte Verbindung (Klebstoff, Schweißen, etc.) von Geophon zu Schiene, die für eine gute Signalübertragung sehr wichtig ist.

### 5.2.3 Versuch 3, Steinschlag

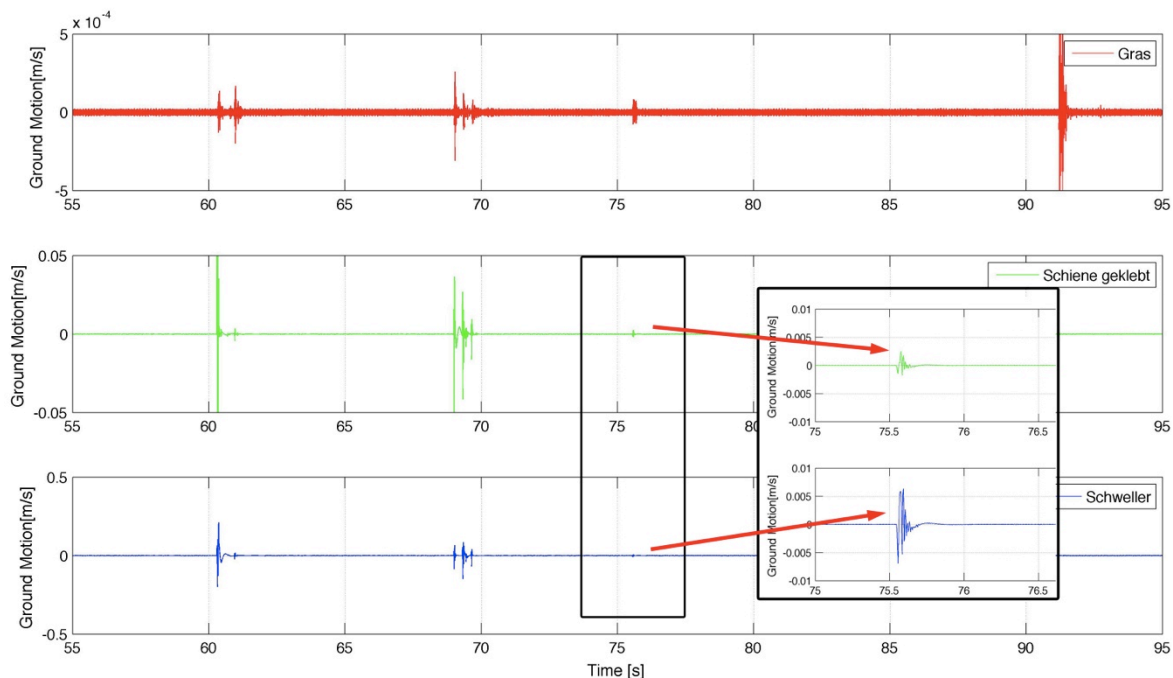
Um eine mögliche Positionierung der Geophone entlang der Schiene zu evaluieren wurden vier-stufige Versuche mit einem Steinfall aus 2m Höhe durchgeführt. Da der Stein ca. 13 kg wiegt, kann man bei einer Höhe von 2m eine Fallgeschwindigkeit von 6,26m/s errechnen. Daraus ergibt sich eine Energie von 255J oder 0.255kJ. Bei den vier-stufigen Versuchen wurde der Stein erstens auf die Schiene, zweitens auf den Schweller, drittens zwischen die Schweller und viertens in das Gras neben den Bahndamm (Abstand von der Bahnachse ca. 7m) fallen gelassen. Es wurde immer der gleiche Stein aus der gleichen Höhe (2m) fallen gelassen um möglichst repetitive Versuche zu erzeugen.

Die Geophone wurden in einem Messquerschnitt in folgender Anordnung installiert, weil diese nach den Versuchen aus Kapitel 5.2.2 am geeignetsten erschien (siehe auch Abb. 5): Geophon 1 war im Gras neben dem Bahndamm installiert, Geophon 2 wurde auf die Schiene



geklebt, weil durch diese Befestigung die besten Ergebnisse erwartet wurden und Geophon 3 wurde auf den Schweller geklebt. Ausgehend von diesem Messquerschnitt wurden die oben beschriebenen vier-stufigen Versuche im Abstand von 0m, 10m, 20m und 30m durchgeführt.

Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse von dem vier stufigen Versuch direkt am Messquerschnitt (Abstand 0m). Bei Sekunde 61 wurde der Stein aus 2m auf die Schiene fallen gelassen, es ist klar ersichtlich in einem hohen Ausschlag im Geophon an den Schienen (Abb. 25, Mitte, 0.05m/s) und in einem noch höheren Ausschlag in dem Geophon am Schweller (Abb. 25, unten, 0.5m/s). Warum der Peak am Schweller höher ist als auf der Schiene konnte vorerst nicht geklärt werden. Bei dem Geophon im Gras neben den Bahndamm ist die maximale Amplitude viel kleiner im Bereich  $10^{-4}$ m/s. Bei Sekunde 68 wurde der Stein auf den Schweller fallen gelassen, der größte Peak ist auf dem Schweller (Abb. 25, unten, 0.15m/s), gefolgt vom Geophon an den Schienen (Abb. 25, Mitte, 0.04m/s). Wieder ist das Signal auch schwach bei dem Geophon neben dem Bahndamm im Gras sichtbar (Abb. 25, oben,  $10^{-4}$ m/s).

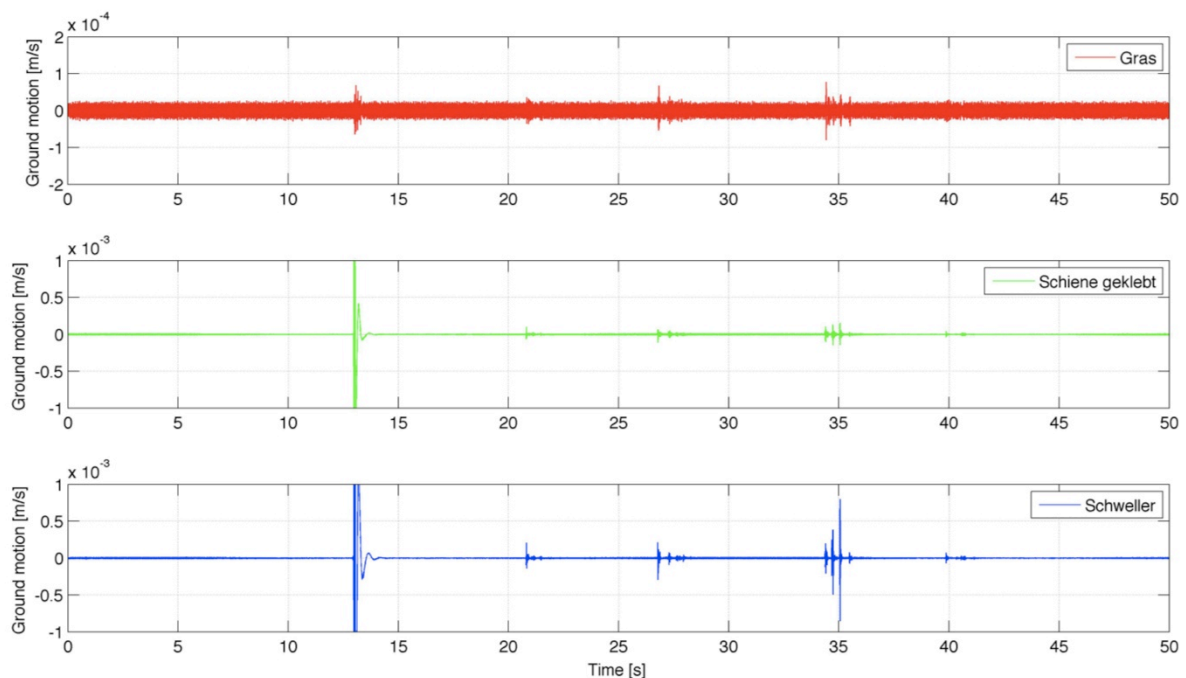


**Abbildung 25: Steinwurf aus 2m Höhe, der Abstand zum Messquerschnitt war 0m. Bei Sekunde 61 wurde der Stein auf die Schiene geworfen, bei Sekunde 68 wurde der Stein auf die Schweller geworfen, bei Sekunde 75 wurde der Stein zwischen die Schweller geworfen und bei Sekunde 92 wurde der Stein in Gras neben die Bahn geworfen. ÖBB Strecke Hieflau-Eisenerz, km 3.450, Jägerkogel. Bitte beachten sie die unterschiedlichen Skalen der Amplituden bei den einzelnen Zeitreihen.**

In der dritten Stufe, bei Sekunde 76, wurde der Stein zwischen die Schweller fallen gelassen. Hier sind die Signale/Peaks schon deutlich kleiner. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass

der Stein so klein ist, dass er vollständig zwischen die Schweller passt, d.h. keine Berührung oder Impulsübertragung auf die Schweller stattfindet. Der Gleisschotter scheint viel von der Energie, dem Signal abzdämpfen, wie bereits in Kapitel 4.4 erwähnt. Es ist anzunehmen, dass das Signal besser wäre, wenn der Stein größer ist, sodass er die Schweller zumindest berührt. In der Standard Darstellung kann das Signal in den Geophonen am Schweller und an der Schiene nicht mehr identifiziert werden. Vergrößert man diesen Bereich so sieht man klar, dass die Peaks vorhanden sind, jedoch mit kleineren Amplituden (0.003m/s auf der Schiene und 0.007m/s auf dem Schweller). Auch im Geophon neben dem Bahndamm kann das Signal noch identifiziert werden, wieder im Bereich  $10^{-4}$ m/s.

Die vierte Stufe des Versuches ist der Aufprall des Steines auf dem Gras, neben dem Bahndamm bei Sekunde 92. Das ist durch einen klaren Peak im Geophon im Gras ersichtlich, in den übrigen zwei Geophonen, auf der Schiene und am Schweller, kann dieses Signal kaum mehr identifiziert werden, auch bei vergrößerter Darstellung.

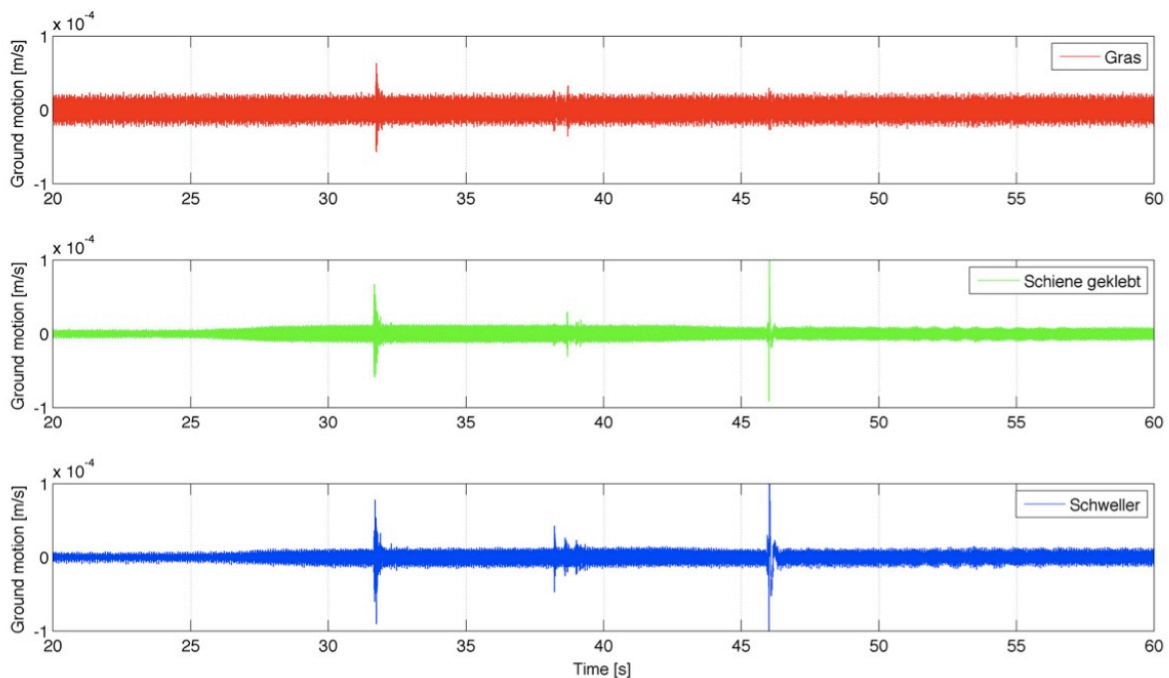


**Abbildung 26: Steinwurf aus 2m Höhe, der Abstand zum Messquerschnitt war 10m. Bei Sekunde 13 wurde der Stein auf die Schiene geworfen, bei Sekunde 21 wurde der Stein auf die Schweller geworfen, bei Sekunde 27 wurde der Stein zwischen die Schweller geworfen und bei Sekunde 35 wurde der Stein in Gras neben die Bahn geworfen. ÖBB Strecke Hieflau-Eisenerz, km 3.450, Jägerkogel. Bitte beachten sie die unterschiedlichen Skalen der Amplituden bei den einzelnen Zeitreihen.**

Abbildung 26 zeigt den vier-stufigen Versuchsablauf in 10m Entfernung zum Messquerschnitt. Auf den ersten Blick kann gesagt werden das die maximalen

Amplitudenwerte in allen 3 Sensoren (Zehnerpotenzen, auf der Schiene und Schweller) kleiner sind als beim vorherigen Versuch mit 0m Abstand.

Das stärkste seismische Signal ergibt der Aufprall des Steines auf die Schiene. Es ist zu beachten, dass aus Gründen der Darstellung der nachfolgenden kleineren Peaks, nicht die maximalen Werte bei Sekunde 13 dargestellt werden. Bei Geophon 3, am Schweller installiert, beträgt die maximale Amplitude durch den Stein Treffer am Gleis bei Sekunde 13 verursacht 0.1m/s und bei Geophon 2, auf der Schiene installiert 0.05m/s, also deutlich mehr. Wieder ist die Amplitude am Schweller höher als am Gleis, obwohl der Stein auf das Gleis auftrifft. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre die Verbindung Geophon Gleis, bzw. Geophon Schweller, es könnte sein das die Montage am Gleis nicht so kohäsiv ist wie am Schweller. Für eine genaue Bestimmung müssten weitere Versuche durchgeführt werden.



**Abbildung 27: Steinwurf aus 2m Höhe, der Abstand zum Messquerschnitt war 20m. Bei Sekunde 32 wurde der Stein auf die Schiene fallen gelassen, bei Sekunde 38 wurde der Stein auf die Schweller fallen gelassen, bei Sekunde 46 wurde der Stein zwischen die Schweller fallen gelassen und ca. 8 Sekunden später wurde der Stein in Gras neben die Bahn geworfen. ÖBB Strecke Hieflau-Eisenerz, km 3.450, Jägerkogel.**

Die folgenden zwei Versuche, Stein auf Schweller bei Sekunde 21, bzw. Steine zwischen Schweller bei Sekunde 27 hinterlassen nur sehr kleine Peaks in allen drei Sensoren, die kaum mehr vom Hintergrundrauschen zu unterscheiden sind. Interessant ist das der vierte Versuch bei Sekunde 35, Stein fällt aus 2m auf das Gras neben den Bahndamm, einen relativ gesehen hohen Ausschlag ( $1 \cdot 10^{-3} \text{m/s}$ ) in Geophon 3, am Schweller montiert gibt. Dieses Verhalten konnte in den übrigen Versuchen nicht bestätigt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Aufprall des Steines auf die Schiene, 10m vom Messquerschnitt entfernt, noch gut detektierbare Peaks bei den Geophonen am Schweller und Schiene erzeugt, 0.1m/s bzw. 0.05m/s. Die übrigen Szenarien, Treffer auf Schweller, zwischen Schweller produzieren kaum mehr signifikante Signale, bzw. Signale die nur mehr sehr schwer mit einem einfachen, automatischen Algorithmus detektiert werden können. Zusätzlich steigt die Wahrscheinlichkeit für Fehlalarme.

Abbildung 27 zeigt den bereits bekannten vier-stufigen Versuchsablauf in 20m Entfernung zum Messquerschnitt. Um überhaupt Signale erkennen zu können ist die Amplituden Skala bereits auf einem sehr kleinem Niveau ( $10^{-4}$ m/s). Die Signale haben bei 20m Entfernung eine ähnliche Amplitude wie die in Abb. 20 und 22 dargestellten Hintergrundgeräusche. Bei den Geophonen auf der Schiene und am Schweller erzeugen der Aufprall des Steines auf die Schiene (Sekunde 32) und zwischen die Schweller (Sekunde 46) die größten Peaks (bis zu  $1 \cdot 10^{-4}$ m/s). Der Aufprall auf den Schweller (Sekunde 38), kann in allen drei Geophone kaum mehr identifiziert werden. Wohingegen der Aufprall auf das Gras neben dem Bahndamm, ungefähr bei Sekunde 54 überhaupt nicht mehr identifizierbar ist. Die maximalen Amplituden der verschiedenen Szenarien, bei einer Entfernung von 20m zwischen den Geophonen, ist nicht mehr für Detektionszwecke verwendbar. Es ist auch klar ersichtlich, dass mit zunehmender Entfernung die maximalen Amplituden in den drei verschiedenen positionierten Geophonen immer homogener werden.

Es wurden noch weitere Versuche im Abstand von 30m durchgeführt, die maximalen Amplituden wurden aber immer kleiner ( $10^{-5}$ m/s), auch bei einem direkten Treffer auf die Schiene und kaum noch vom Umgebungsrauschen unterscheidbar. Daher wurde hier auf eine graphische Darstellung verzichtet.

#### **5.2.4 Zusammenfassung Geophone**

Grundidee war es mit Hilfe einer linearen Installation von Geophonen entlang der Eisenbahninfrastruktur sogenannte „relevante Treffer“ d.h. auf das Gleis oder auf die Schweller zu identifizieren.

Es wurden verschiedene Positionen der Geophone entlang der Gleise und daneben und verschiedene Montagemöglichkeiten, geklebt und mit Schienenklemme getestet. Dabei kristallisierte sich heraus, dass eine Installation am Gleis oder am Schweller zu bevorzugen ist. Wie aus den Daten in Abbildung 25 und 26 zu entnehmen ist, scheint momentan eine Installation am Schweller die besten Ergebnisse zu liefern.

Für unsere Versuche wurde ein Stein mit 13kg aus 2m Höhe fallengelassen, sozusagen als minimales, detektierbares Ereignis (Energie 255J). Es konnte beobachtet werden, dass mit

den verwendeten Sensoren (Sensor SM6) die Signalstärke mit zunehmender Entfernung vom Aufprallpunkt drastisch abnimmt (Abb. 26 und 27) und schon bei ca. 10m wahrscheinlich die Grenze der automatischen Detektierbarkeit erreicht ist. Aus heutiger Sicht wäre es eine Möglichkeit die Geophone alle 10m auf den Schwellern zu installieren, sodass die maximale Distanz zu einem möglichen Aufprallpunkt 5m wäre. Sicherlich wäre es notwendig zu untersuchen, ob mit anderen sensitiveren Sensoren besser Ergebnisse, d.h. größere Abstände erreicht werden können.

Alternative gäbe auch die Möglichkeit die Energie des kleinsten, detektierbaren Ereignisses nach oben zu schrauben, durch höhere Fallhöhen, mehr Masse und/oder höhere Geschwindigkeiten. Man könnte austesten, ob sich dadurch die Abstände der Geophone signifikant vergrößern lassen.

Sehr wichtig ist sicherlich die Art der dauerhaften Befestigung (Hitze, Kälte, Vibrationen) der Geophone am Schweller oder auf der Schiene. Versuche haben gezeigt, dass auf der Schiene eine Verbindung mit Klebstoff, besser funktioniert als eine Verbindung mit „Schienenklemme“. Hier könnte man noch nach alternativen Möglichkeiten suchen.

Ein Kernpunkt der Projektidee war die kabellose Datenübertragung mit Hilfe von energieautarken Mini-Datenloggern. Diese sollten eine einfache Installation der Geophone entlang des Schienenkörpers ermöglichen. Aufgrund von Diskussionen mit der ursprünglich angedachten Herstellerfirma Worldsensing ([www.worldsensing.com](http://www.worldsensing.com)) ist aber die technologische Entwicklung der Mini Datenlogger ([www.loadensing.com](http://www.loadensing.com)) wider erwarten noch nicht abgeschlossen. Die Mini Datenlogger sind seit einem Jahr im Test Einsatz in den Pyrenäen wo dynamische Messungen mit Geophonen durchgeführt werden. Leider traten in den letzten Monaten vermehrt technische Probleme auf, die von Hersteller noch nicht gelöst werden konnten. Ursprünglich war es geplant, dass die Datenlogger permanent messen, Daten aber erst übertragen werden wenn ein bestimmter Schwellenwert überstiegen wird. So sollte ein geringer Energieverbrauch garantiert werden.

Eine mögliche Alternative wäre die Verkabelung aller Geophone. Der technische Aufwand für die Installation und auch die Vulnerabilität des Systems wären größer.

### **5.3 Testgebiete**

Ein Teilziel der Machbarkeitsstudie war es auch geeignete Testgebiete zu finden. Das Testgebiet sollte einerseits eine realistische, natürliche Situation mit Eisenbahn darstellen, andererseits sollte es gewisse Anforderungen für die Entwicklung eines Prototypen erfüllen.



**Abbildung 28: ÖBB Streckenabschnitt Hieflau-Eisenerz, km 3.450, Jägerkogel im Gesäuse, eines der möglichen Testgebiete. Gefährdung hauptsächlich durch Steinschlag/Felssturz Prozesse.**

Dazu gehören: leicht und in kurzer Zeit (< 3h) mit dem Auto erreichbar, gute Mobilfunkabdeckung, Erreichbarkeit das ganze Jahr über, etc.

Aufgrund der Nähe zu Wien, der leichten Erreichbarkeit und der akuten Steinschlagproblematik wurden die Feldversuche mit den Geophonen auf der ÖBB Strecke Hieflau-Eisenerz, km 3.450, Jägerkogel im Gesäuse durchgeführt (Abb. 28). Des Weiteren wurden im Zuge des Projektes noch weitere mögliche Abschnitte der ÖBB Strecke im Gesäuse gefunden (z.B. Abb. 29).

Während der Durchführung im Sommer 2012 wurden vom Auftraggeber ÖBB (Dr. Michael Brauner) zwei Testgebiete für die zweiten Stufe des Projektes festgelegt. Eine Abschnitt in Tirol auf der Strecke Innsbruck-Scharnitz und ein Abschnitt im Gesäuse, der mit dem von uns vorgeschlagenen und bereits für die Feldversuche verwendeten Gebiet übereinstimmt. In Folge dessen wurde auch der zweite Streckenabschnitt in Tirol besichtigt um vorab mit den Gegebenheiten vor Ort vertraut zu sein. Auch hier ist eine gute Erreichbarkeit mit dem Auto gegeben, wobei aber hier die primäre Art der Gefährdung aus Ablagerungen durch fluviale Prozesse und nicht durch Steinschlag besteht (Abb. 30).



**Abbildung 29:** Im Laufe der Machbarkeitsstudie wurden zahlreiche mögliche Abschnitte für ein Testgebiet im Gesäuse gefunden.



**Abbildung 30:** ÖBB Strecke Innsbruck-Scharnitz, ein weiteres mögliches Testgebiet. Gefährdung hauptsächlich durch Ablagerungen aus fluviatilen Prozessen.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieses Projektes war es eine Machbarkeitsstudie durchzuführen und die Eignung einer Kombination von einem linearen Messprinzip mit verschiedenen Kabelsensoren (Koaxial, Glasfaser und Magnetfeldsensorkabel) und punktuellen Messungen mit Geophonen für die Detektion von Steinschlag direkt auf der Eisenbahninfrastruktur zu evaluieren.

Die technischen Grundlagen zu den Kabelsensoren wurden in Kapitel 3 dargestellt, wobei vor allem die Glasfaserkabel (Kapitel 3.2) sehr großes Potential für die Detektion von Steinschlag hätten. Besonders die Tatsache, dass das Sensorkabel zugleich auch Übertragungsmedium ist und dadurch keine Energieversorgung auf der bis zu 40 km langen Sensorstrecke erforderlich wird ist sehr vielversprechend. Leider ist diese Technologie zur Zeit noch sehr teuer (>250,000€) und daher eine Realisierung im Rahmen dieses Projektes nicht möglich.

In Kooperation mit der Firma Adaptivia wurden mit verschiedenen Koaxialkabeln Tests im Labor durchgeführt. Es zeigte sich das im Prinzip Koaxialkabel eine durchaus vielversprechende Technologie für die Detektion von Naturgefahren sein können. Ein Schlüsselparameter ist aber die Sensitivität des Kabels. Herkömmliche Kabel werden möglichst unempfindlich gegen äußere Einflüsse hergestellt, für unseren Einsatzzweck müsste das Kabel aber möglichst empfindlich auf äußere Einflüsse, wie z.B. Vibrationen durch Steinschlag erzeugt, sein. Da, wie sich nach ersten Tests gezeigt hat, am Markt erhältliche Produkte wahrscheinlich nicht geeignet sind, müsste eine neues „sensitives“ Kabel entwickelt werden. Der zeitliche, technische und somit auch finanzielle Aufwand für diese Entwicklung lässt sich derzeit nur schwer abschätzen, es kann aber gesagt werden, das die Rahmenbedingungen dieses Projektes dafür nicht ausreichen.

Magnetfeldsensorkabel wurden in einem Pilotprojekt der kanadischen Bahn für Steinschlagdetektion verwendet. Aufgrund des am Markt nicht erhältlichen Sensorkabels und auch aufgrund des eher unüblichen Messverfahrens wird diese volumetrischen Kabellösung der Vollständigkeit halber angeführt, aber nicht weiter nachgegangen.

Zusammenfassend kann gesagt werden das Kabelsensoren eine interessante Alternative zu bestehenden Monitoring-Systemen wären, aber aufgrund von verschiedenen Problemen wie hohe Kosten (Glasfaserkabel) und Stand der Technik (Koaxialkabel) im Rahmen dieses Projektes nicht weiterverfolgt werden können. In Folge dessen kann auch die Grundidee dieses Projektes eine Kombination („integrales Detektionssystem“) von linearen und punktuellen Sensoren zu verwenden nicht realisiert werden.



Im Bezug auf punktuelle Messungen mit Hilfe von Geophonen konnte gezeigt werden, dass eine Montage der Sensoren auf der Schiene oder dem Schweller sinnvoll ist, um einen „relevanten“ Steinschlag Treffer am Gleiskörper zu identifizieren. Bei Feldversuchen stellte sich heraus, dass der minimale Abstand zwischen den Messquerschnitten derzeit noch relativ gering ist (10m), um Steinschlag Ereignisse verlässlich zu detektieren. Prinzipiell konnte die Machbarkeit aber sehr gut mit Messdaten dargestellt werden und sollte weiterverfolgt werden. Folgende Herausforderungen bestehen:

1. geringer Abstand der Querschnitte (10m), daher zu viele Geophone (Kosten, Fehleranfälligkeit des Systems) notwendig
2. große Datenmengen, Synchronisation (insb. entlang Schienenachse) notwendig (Algorithmus fehlt)
3. die Datenübertragung in Echtzeit mittels energieautarken Mini-Datenlogger, mit Nahbereichsfunk derzeit nicht machbar

In einer zweiten Phase des Projektes könnte daher einerseits auf der Sensorseite weitergearbeitet werden, in dem andere hoch-sensible Sensoren getestet werden, um die Distanz zwischen den Messquerschnitten zu erhöhen und damit Punkt 1 zu lösen. Andererseits müsste an der Datenübertragung gearbeitet werden. Das würde einerseits eine Optimierung der anfallenden Datenmengen, als auch eine optionale Übertragung mit Kabel erfordern. Das Ziel der zweiten Phase kann daher nur eine Optimierung des bestehenden Messsystems aufbauend auf den Erkenntnissen der ersten Phase sein, sowie eine Herstellung eines Prototypen welcher im Vergleich. zum Stand der Technik (Weir Jones Group, Kapitel 4.5) einfacher, günstiger und weniger fehleranfällig ist.

## 7 REFERENZEN

- Aki, K. and Richards, P. (1980): Quantitative Seismology, A Series of Books in Geology, 1, W.H. Freeman and Company, New York, USA
- Arattano, M. (1999): On the use of seismic detectors as monitoring and warning systems for debris flows, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 197–213
- Baeßler, M. (2008): Lageveränderungen des Schottergleises durch zyklische und dynamische Beanspruchungen, Dissertation, TU Berlin
- Biescas, B., Dufour, F., Furdada, G., Khazaradze, G. and Suriñach, E. (2003): Frequency content evolution of snow avalanche seismic signals, *Surveys in Geophysics*, 24, 447–464
- Brackett, P. (2002): Railway Rockfall Electromagnetic Field Disturbance Sensing System Development and Test Results, Transportation Development Centre, Transport Canada publication, 17 pages
- Brodsky, E., Gordeev, E. and Kanamori, H. (2003): Landslide basal friction as measured by seismic waves, *Geophysical Research Letters*, 30(24), 2236, doi:10.1029/2003GL018485
- Deparis, J., Jongmans, D., Cotton, F., Baillet, L., Thouvenot, F. and Hantz D. (2008): Analysis of Rock-Fall and Rock-Fall Avalanche Seismograms in the French Alps, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 98, No. 4, pp. 1781–1796, August 2008, doi: 10.1785/0120070082
- Festl, J., Singer, J. und Thuro, K. (2009): Kalibrierung von TDR Deformationsmessungen für Hangbewegungen, 17. Tagung für Ingenieurgeologie, Hr. Zittau 2009, pp 1-3.
- Holtzendorff, K. (2002): Untersuchung des Setzungsverhaltens von Bahnschotter und der Hohllagenentwicklung auf Schotterfahrbahnen, Dissertation, TU Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme.
- Juarez, J. and Taylor H. (2007): Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeter, *Applied Optics*, Vol. 46(11), pp. 1968-1971.
- Juarez, J. and Taylor H. (2005): Polarization discrimination in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer intrusion-sensor system, *Optics Letters*, Vol. 30(24), pp. 3284-3286.
- Kane und Beck (2000): William F. Kane und Timothy J. Beck: „Instrumentation practice for slope monitoring“, In: *Engineering Geology Practice in Northern California*, 2000
- Kishimura, K. and Izumi, K. (1997): Seismic signals induced by snow avalanche flow, *Natural Hazards*, 15, pp 89-100.
- Kessel, C. (2012): Telecommunicating Today, *The rail engineer*, Issue 89, pp50-52, march 2012.
- Komazakia, M., Hiramab, K., Ujihirab, M., Suzukib, S., Saekib, H. and Kawamurab, Y. (1999): A field test of a rock fall detection system using cable sensor and mobile multimedia network, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 13, (4).

Lanticq, V., Bourgeois, E., Magnien, P., Dieleman, L., Vincelas, G., Sang, A. and Delepine-Lesoille, S. (2009): Soil-embedded optical fiber sensing cable interrogated by Brillouin optical time-domain reflectometry (B-OTDR) and optical frequency-domain reflectometry (OFDR) for embedded cavity detection and sinkhole warning system, *Measurement Science Technology*, 20, pp 034018, doi:10.1088/0957-0233/20/3/034018

Melvin, C. and Harman, R. (2009): Triboelectric, ranging, or dual use security sensor cable and method of manufacturing the same. Patent No. US7479878, Date of Patent: Jan. 20, 2009

Norris, R. (1994): Seismicity of Rockfalls and Avalanches at Three Cascade Range Volcanoes: Implications for Seismic Detection of Hazardous Mass Movements, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 6, pp. 1925-1939, December 1994

O'Conner, K. and Dowding, C. (2006), *Geo Measurements by pulsing TDR Cables and Probes*, CRC Press, 424 pages.

Schneider, D., Bartelt, P., Caplan-Auerbach, J., Christen, M., Huggel, C. and McArdell, B. (2010): Insights into rock-ice avalanche dynamics by combined analysis of seismic recordings and a numerical avalanche model, *Journal of Geophysical Research*, 115, doi:10.1029/2010JF001734

Singer, J., Festl, J. and Kurosch, T. (2008): Computergestützte Auswertung von Time Domain Reflectometry Messdaten zur Überwachung von Hangbewegungen, *Geomonitoring, FE-Modellierung, Sturzprozesse und Massenbewegungen. Beiträge zur COG-Fachtagung Salzburg 2008, Wichmann 2009, Abb.,Lit.S.19-34, ISBN 978-3-87907-476-1*

Singer, J. (2010): Development of a Continuous Monitoring System for Instable Slopes Using Time Domain Reflectometry.“ Dissertation, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, TU München, 2010

Singer, J., Thuro, K., Sambeth, U. und Stump, R. (2011): Deformationsmessungen mit Time Domain Reflectometry (TDR) zur Hangbewegungs- und Bauwerksüberwachung – Möglichkeiten und Grenzen. - In: 8. Österreichische Geotechniktagung Wien, 3.-4.2.2011, 10 S.

Stein, S. and Wylesession, M. (2003): *An Introduction to seismology, earthquakes and earth structure*, Blackwell Publishing

Sun, S., Pommerenke, D., Drewniak, J. Chen, G., Xue, L. Brower, M. und Koledintseva, M. (2009): A Novel TDR-Based Coaxial Cable Sensor for Crack/Strain Sensing in Reinforced Concrete Structures In: *IEEE T. Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, Nr. 8 (2009) , p. 2714-2725.

Suriñach, E., Sabot, F., Furdada G. and Vilaplana, J. (2000): Study of seismic signals of artificially released snow avalanches for monitoring purposes, *Physics and Chemistry of the Earth*, 25(9), 721–727

Suriñach, E., Vilajosana, I., Khazaradze, G., Biescas, B., Furdada, G. and Vilaplana, J. (2005): Seismic detection and characterization of landslides and other mass movements, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 791–798

Thorne, L. and Wallace, T. (1995): Modern Global Seismology, Academic Press, San Diego, USA

Vilajosana, I., Khazaradze, G., Suriñach, E., Lied, E. and Kristensen, K. (2007): Snow avalanche speed determination using seismic methods, Cold Regions Science and Technology, 49, 2–10

Vilajosana, I., Suriñach, E., Abellán, A., Khazaradze, G., Garcia, D. and Llosa, J. (2008): Rockfall induced seismic signals: case study in Montserrat, Catalonia, Natural Hazards and Earth System Sciences, 8(4), 805–812

Winkler, E. (1867): Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit. Prag, Verlag H. Dominicus.

Zhang Z. and Bao X. (2008): Distributed optical fiber vibration sensor based on spectrum analysis of Polarization-OTDR system, Optics Express, Vol. 16, No. 14, pp. 10240-10247