

# Detektion von Naturereignissen mit verteilt akustischer Sensorik

Lisa STRASSER und Werner LIENHART

TU Graz, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme · lisa.strasser@tugraz.at

## Zusammenfassung

Naturereignisse wie Felsstürze, Hangrutschungen, Erdbeben oder Lawinen bergen direkte oder indirekte Gefahren für Bevölkerung sowie kritische Infrastruktur. Aktuelle Entwicklungen in der verteilt akustischen Sensorik (engl. Distributed Acoustic Sensing – DAS) ermöglichen die lückenlose Erfassung dynamischer Vorgänge unter Verwendung von Lichtwellenleitern. In diesem Beitrag wird die Funktionsweise von DAS erläutert und anhand von Feldversuchen gezeigt, dass Ereignisse wie Steinschläge über Distanzen von mehr als 20 km zuverlässig detektiert und lokalisiert werden können. Zusätzlich können die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit abgeleitet werden. Ein großer Vorteil der Technologie ist, dass vorhandene Kommunikationsleitungen benutzt werden können und daher in vielen Fällen eine Installation von Messfasern nicht notwendig ist.

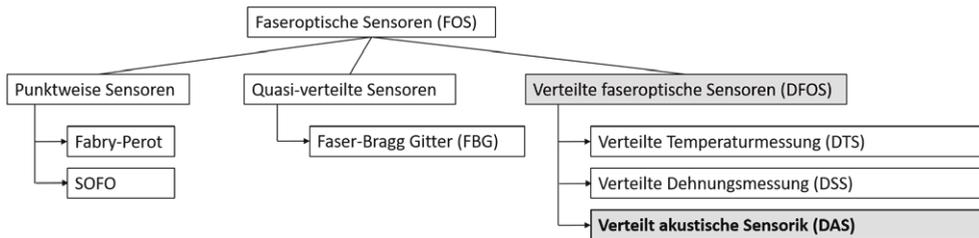
## 1 Einleitung

Um Infrastruktur sowie Bevölkerung vor potenziell gefährlichen Naturereignissen zu schützen, ist die Detektion und Überwachung von Problemzonen erforderlich. Derzeit erfolgt die Detektion solcher Ereignisse mit punktuellen Messverfahren, wie z. B. Beschleunigungssensoren, Neigungssensorknoten, Geophonen, GNSS Empfängern oder Totalstationen. Mit diesen Verfahren können nur bereits bekannte Problemzonen und auch diese nur lückenhaft und kleinräumig überwacht werden. Die Faseroptik eröffnet hier völlig neue Möglichkeiten, da sie einerseits eine lückenlose Überwachung über weite Distanzen ermöglicht und andererseits zur Messung kein Zugang in möglicherweise gefährdete Gebiete erforderlich ist.

## 2 Faseroptische Messsysteme

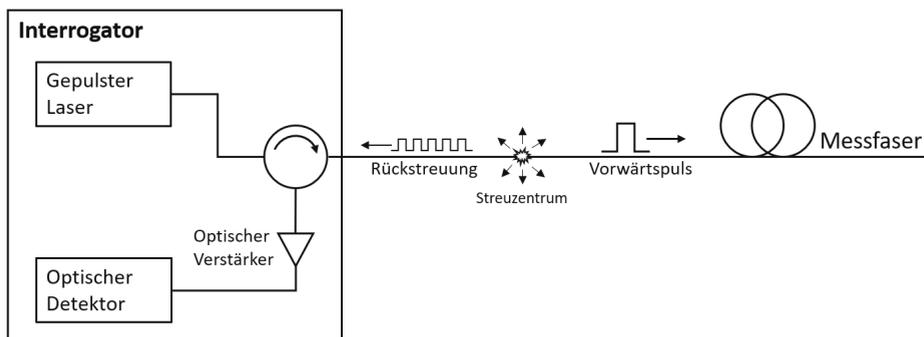
Lichtwellenleiter bzw. Glasfasern finden heutzutage nicht nur in der Telekommunikation (z. B. Internet) Anwendung, sondern werden auch in der Messtechnik eingesetzt. Faseroptische Messsysteme bieten viele Vorteile gegenüber herkömmlichen Sensoren. Neben der hohen Sensitivität sind die Fasern sehr resistent gegenüber unterschiedlichen Umwelteinflüssen, wie z. B. hohen Temperaturen oder elektromagnetischer Strahlung. Außerdem benötigen Lichtwellenleiter keine eigene Stromversorgung, was besonders in schwer zugänglichen Bereichen einen entscheidenden Vorteil bringt (DÖRING et al. 2016).

Faseroptische Sensoren werden in punktweise, quasi-verteilte und verteilte Sensoren unterteilt. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der unterschiedlichen faseroptischen Messsysteme.



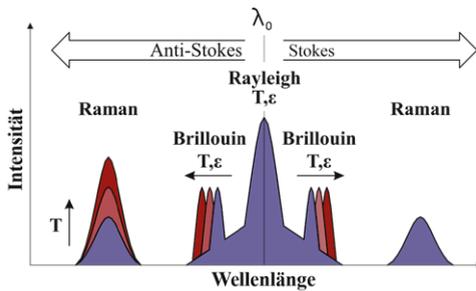
**Abb. 1:** Übersicht faseroptischer Sensoren

Verteilt faseroptische Sensoren verwenden im Gegensatz zu punktuellen Sensoren die gesamte Faser als sensitives Element (DÖRING et al. 2016). Dadurch kann eine lückenlose und hochgenaue Überwachung der Temperatur (engl. Distributed Temperature Sensing – DTS), der Dehnung (engl. Distributed Strain Sensing – DSS) oder der Akustik bzw. Vibration über mehrere Kilometer hinweg gewährleistet werden, was entscheidende Vorteile gegenüber punktuellen Messungen bietet. Ein verteilt faseroptisches Messsystem besteht neben einer Messfaser aus einer Auswerteeinheit, welche üblicherweise sowohl eine Lichtquelle in Form eines Lasers als auch einen Detektor enthält, um das rückgestreute Signal zu erfassen. Die Auswerteeinheit (auch Interrogator genannt) sendet Licht aus, empfängt das rückgestreute Licht und konvertiert es in ein elektrisches Signal zur weiteren Datenverarbeitung. Abbildung 2 zeigt schematisch das Grundprinzip eines einseitig messenden verteilt faseroptischen Messsystems.



**Abb. 2:** Schematischer Aufbau eines verteilt faseroptischen Messsystems

Alle verteilt faseroptischen Messsysteme machen sich die natürliche Rückstreuung des Lichts zunutze, wobei unterschiedliche Arten der Rückstreuung unterschieden werden (siehe Abb. 3). Die Rayleigh Rückstreuung verfügt über die mit Abstand größte Intensität und wird für die verteilt akustische Sensorik verwendet. Außerdem ist die Rayleigh Rückstreuung im Gegensatz zur Raman und Brillouin Rückstreuung linear in Bezug auf die Wellenlänge bzw. Frequenz. Da die Rayleigh Rückstreuung in allen Standard Glasfasern vorkommt, können für DAS alle üblichen Single-Mode (SM) Fasern zur Messung verwendet werden.



**Abb. 3:** Rückstreuungseffekte in Lichtwellenleitern (nicht maßstäblich) (MONSBERGER & LIENHART 2021)

Da die Raman Rückstreuung eine Wellenlängenänderung gegenüber dem eingesandten Licht darstellt, welche abhängig von der Temperaturänderung ist, wird diese für verteilte Temperaturmessungen verwendet. Analog dazu ist die Brillouin Rückstreuung sowohl von Temperatur- als auch Dehnungsänderung abhängig und liegt somit der verteilten Dehnungsmessung zugrunde (DÖRING et al. 2016). Anwendungen aller drei Rückstreuungseffekte im Bereich der Deformationsmessungen können z. B. LIENHART et al. (2021) entnommen werden. In diesem Beitrag wird genauer auf die verteilte akustische Sensorik eingegangen, welche hochdynamische Messungen von Vibrationen und akustischen Signalen über Strecken von bis zu 40 km ermöglicht.

### 3 Distributed Acoustic Sensing

#### 3.1 Messprinzip

Die verteilte akustische Sensorik kann vereinfacht gesagt wie eine Aneinanderreihung von tausenden Mikrofonen entlang der Messfaser verstanden werden. Durch das Einbringen von Laserpulsen in die Glasfaser können auftretende Vibrationen oder akustische Signale entlang der Faser erfasst werden. Gemessen werden können Signale im akustischen Bereich bzw. Vibrationen entlang der Faser, wobei die eigentliche Messgröße die dynamische Dehnung bzw. die Dehnungsrate (engl. Strain Rate) der Faser darstellt. Mithilfe einer Messeinheit werden hochfrequent Laserimpulse in die Messfaser gesandt. An natürlich auftretenden Verunreinigungen innerhalb der Faser wird ein Teil des Laserimpulses in Form der Rayleigh Rückstreuung zur Auswerteinheit zurückgesandt. Treten entlang der Faser Vibrationen oder akustische Signale auf, ändert sich an dieser Stelle das Rückstreuverhalten und das Ereignis kann detektiert werden (PARKER et al. 2014). Durch die Messung der Zeitdifferenz zwischen eingesandtem Laserpuls und ankommender Rückstreuung können solche Ereignisse auf einige Meter genau bestimmt werden. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung ist in erster Linie von der physikalischen Länge des eingesandten Lichtimpulses abhängig. Je nach Faserlänge beträgt diese typischerweise zwischen 1 m und 10 m. Der vergleichsweise schlechten örtlichen Auflösung steht eine hohe zeitliche Auflösung gegenüber. Je nach Faserlänge kann mit einer Messrate von mehreren kHz gemessen werden. Begrenzt wird die Messrate dadurch, dass sich zu jeder Zeit nur ein Laserimpuls in der Faser befinden darf, da sonst Überlagerungen der Messsignale entstehen würden. Bei einer Faserlänge von 40 km kann beispielsweise mit einer Abtastrate von bis zu 2.5 kHz gemessen werden. Die hohe Messrate stellt einen entscheidenden Vorteil gegenüber anderen verteilten Messsystemen (DTS, DSS) dar.

### 3.2 Einsatzgebiete

Da mit DAS sehr lange Strecken mit nur einer Auswerteeinheit lückenlos gemessen werden können, eignet sich dieses Messsystem besonders für die dynamische Überwachung von langen, linearen Strukturen. Dazu zählen beispielsweise Bahnstrecken, Pipelines bzw. allgemein Versorgungsleitungen, sowie die Überwachung von Staatsgrenzen (OWEN et al. 2012). Eine weitere Anwendung findet sich im Bereich Oil & Gas, wo sowohl Bohrlöcher überwacht als auch mögliche Öl-/Gasquellen im Untergrund detektiert werden können (JOHANNESSEN et al. 2012). Immer mehr an Bedeutung gewinnt in den letzten Jahren die Anwendung von DAS in der Seismologie, wo durch die hohe Sensitivität der Glasfasern Erdbeben detektiert werden können. Im Gegensatz zu anderen verteilten faseroptischen Messungen erfordern DAS-Messungen keine speziellen Sensorkabel. Es können freie Fasern (sog. Dark Fibres) von Telekommunikationsleitungen zur Messung verwendet werden. Einen großen Vorteil stellt dabei die weltweite hohe Verfügbarkeit von bereits verlegten Lichtwellenleitern dar, unter anderem durch den voranschreitenden Glasfaserausbau in Österreich. Weitere Anwendungen sind im Bereich der Bauwerksüberwachung oder in Smart Cities denkbar.

### 3.3 Datenerfassung, Auswertung und Interpretation

Da mit DAS sehr unterschiedliche Faserlängen im Bereich von einigen Metern bis hin zu 40 km gemessen werden können, müssen die Messeinstellungen an jede Messstrecke individuell angepasst werden. Mit zunehmender Faserlänge müssen Pulslänge und Intensität erhöht werden, um auch am Ende der Messfaser noch sinnvolle Signale zu erhalten. Diese Einstellungen haben auch bedeutenden Einfluss auf das Signal-Rausch-Verhalten. Wie bereits erwähnt, verringert sich mit größerer Messdistanz die maximale Messrate  $f_R$ , da sich zu jeder Zeit nur ein Messpuls in der Faser befinden darf (PARKER et al. 2014). Die maximale Messrate lässt sich aus dem Zusammenhang von Lichtgeschwindigkeit  $c$ , Brechungsindex  $N_g$  und Faserlänge  $L$  berechnen:

$$f_R < \frac{c}{2N_g L} \quad (1)$$

Davon hängt in weiterer Folge auch die maximal erfassbare Frequenz des Messsignals ab, welche mit der Nyquist-Frequenz

$$f_{Nyq} = \frac{f_R}{2} \quad (2)$$

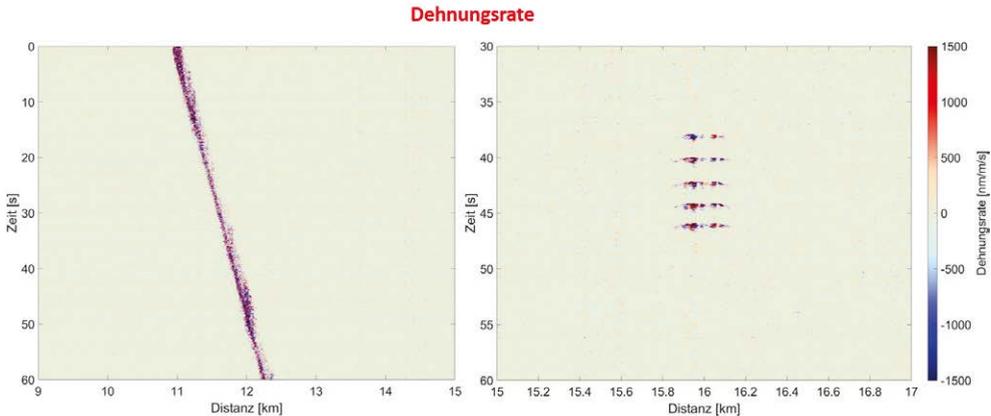
begrenzt ist. Durch die Pulslänge werden Gauge Length  $L_G$  und in weiterer Folge die erreichbare Ortsauflösung beeinflusst, da die Gauge Length nicht kürzer als die physikalische Pulslänge sein kann. Die Gauge Length stellt die Integrationslänge zwischen zwei Rückstreupositionen  $z$  in der Faser zum Zeitpunkt  $t$  dar und folglich die auftretende Dehnung  $\varepsilon_f$  zwischen diesen Punkten, welche sich mit

$$\varepsilon_f(z, t) = \frac{\int_{z-L_G/2}^{z+L_G/2} \varepsilon_z(z, t)}{L_G} \quad (3)$$

berechnen lässt (HARTOG 2017).

Eine große Herausforderung stellt die immense Datenmenge dar (mehrere 100 MB/Minute), welche durch DAS-Messungen entsteht. Diese erhöht sich mit zunehmender Messrate sowie kürzerer Gauge Length und entsteht dadurch, dass sowohl die Orts- als auch die Zeitinformation von Interesse sind. Daraus entsteht eine 2-dimensionale Matrix, welche für jeden

Messort eine Zeitreihe an Daten enthält. Um die gesamten Messdaten über den Orts- und Zeitbereich darzustellen, kann ein Wasserfallplot erstellt werden (Abb. 4). Dabei stellt die X-Achse den Ortsbereich und die Y-Achse den Zeitbereich dar. Die dritte Dimension zeigt die eigentliche Messgröße, nämlich die Dehnungsrate. Im ersten Beispiel (linke Grafik) ist ein starkes Signal zu sehen, welches sich linear im Orts- und Zeitbereich bewegt. Gemessen wurde hier ein sich bewegendes Objekt, wobei über die Ortsänderung mit der Zeit auch Geschwindigkeit sowie Bewegungsrichtung bestimmt werden können. In diesem Fall bewegt sich ein Objekt mit einer Geschwindigkeit von ca. 80 km/h vom Instrument weg. Im Gegensatz dazu wird im zweiten Beispiel (rechte Grafik) ein Signal betrachtet, welches über mehrere Sekunden gleichbleibend an einem Ort stattfindet.



**Abb. 4:** Darstellung der DAS-Daten anhand eines Wasserfallplots: bewegtes Objekt mit konstanter Geschwindigkeit (links), wiederkehrendes Signal an einem Ort (rechts)

In weiterer Folge können die Daten durch Anwendung einer Fourier-Transformation (FT) in den Frequenzbereich übergeführt werden. Da bei DAS-Messungen vor allem hochdynamische Dehnungsänderungen von Interesse sind, wurde hier eine Kurzzeit Fourier-Transformation (engl. Short Term FT – STFT) mit einer Blocklänge von 0.2 s durchgeführt (Abb. 5). Dabei kann die zeitliche Änderung des Frequenz- und Amplitudenspektrums an einem Ort betrachtet werden. Für das erste Beispiel (linke Grafik) wird die STFT bei Position 12.000 m gezeigt. Das fahrende Objekt erzeugt ein starkes Signal im Frequenzband bis ca. 150 Hz. Betrachtet man das zweite Beispiel im Frequenzbereich (rechte Grafik), sieht man über mehrere Sekunden Signale im Bereich von ca. 20 bis 70 Hz. Durch die kurze Blocklänge können die einzelnen Ereignisse auch im Frequenzbereich deutlich voneinander unterschieden werden.

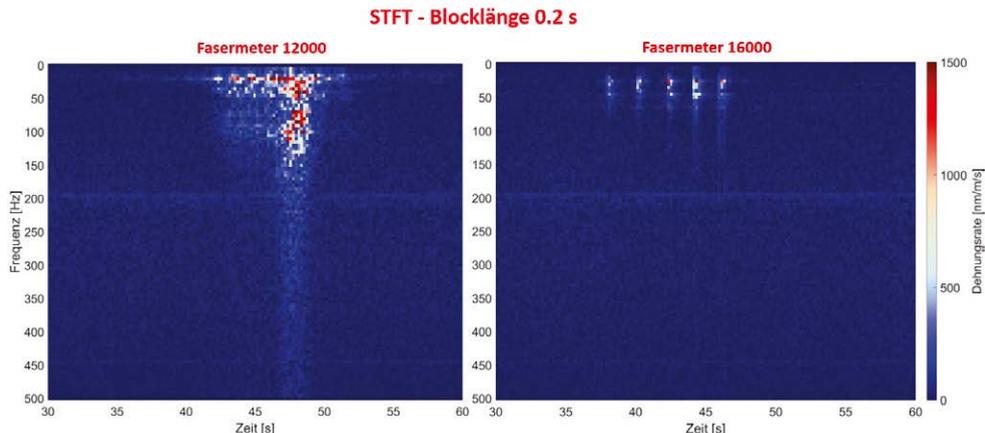


Abb. 5: Berechnung der Kurzzeit-Fourier-Transformation für die Signale aus Abbildung 4

### 4 Anwendungsbeispiel Steinschlag

Anhand eines Feldversuchs wird gezeigt, dass Steinschläge in der Nähe einer Glasfaser detektiert werden können. Dazu wurde ein Stein an mehreren Positionen aus einer Höhe von einigen Metern fallen gelassen. In der Nähe befindet sich ein Lichtwellenleiter, welcher im Erdreich in einer Tiefe zwischen 1-2 Metern vergraben ist. Dabei handelt es sich um eine Standard Single-Mode Kommunikationsfaser. Der gesamte Lichtwellenleiter umfasst eine Länge von ca. 25 km, wobei dieser in einer Schleife verläuft und die Steinschläge somit an zwei Faserpositionen detektiert werden können. Abbildung 6 stellt eine schematische Skizze sowie die Durchführung der Feldversuche dar.

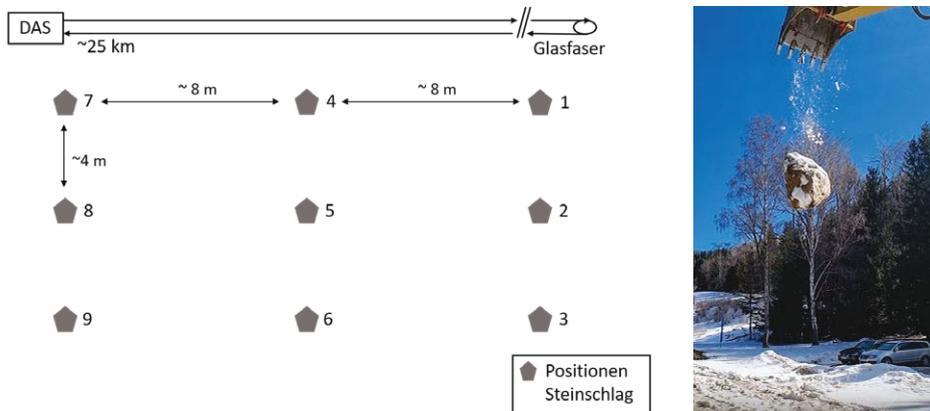
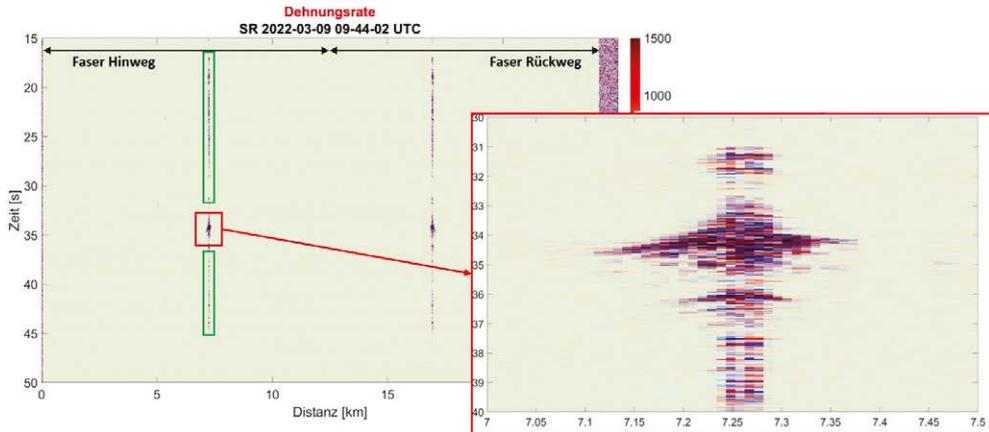


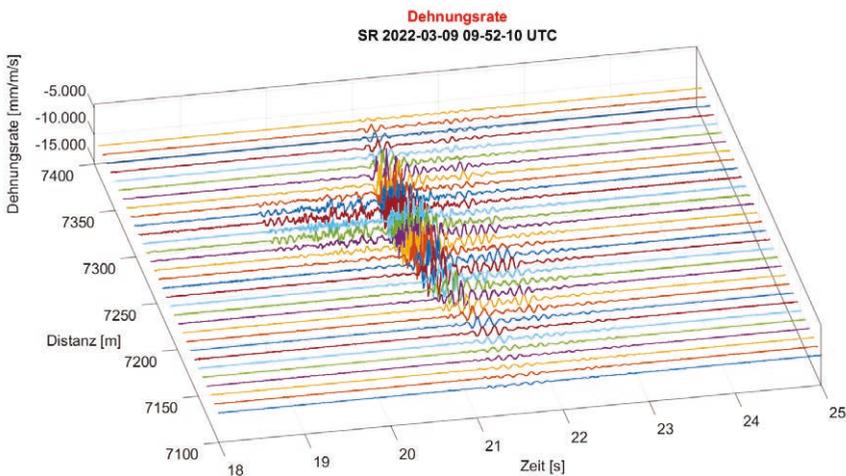
Abb. 6: Schematische Skizze des Feldversuchs (links), Durchführung der Steinschlagversuche (rechts)

Abbildung 7 zeigt die Rohdaten eines Steinschlagsignals in Form eines Wasserfallplots. Dabei ist zu sehen, dass das Signal sowohl am Hin- als auch am Rückweg der Schleife (nach 7.2 km resp. 16.9 km) deutlich zu erkennen ist. Zusätzlich kann der Steinschlag deutlich von anderen auftretenden Signalen unterschieden werden, wie z. B. der Bewegung eines Baggers, welche zeitlich vor und nach dem Steinschlag zu erkennen ist.



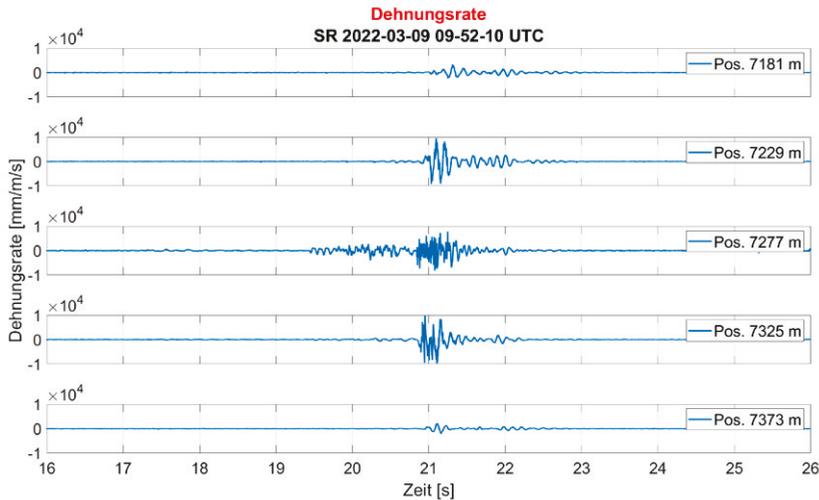
**Abb. 7:** Wasserfallplot mit Fahrzeugbewegung (grün) und Steinschlag (rot)

Das Merkmal eines Steinschlags ist die weite örtliche Ausbreitung des Signals, was in Abbildung 8 verdeutlicht wird. Das Herunterfallen des Steins verursacht ein derart starkes Signal, dass es über einen Bereich von 300 m deutlich erkennbar ist. Grundsätzlich würde sich daraus auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals ableiten lassen, da das Signal bei weiter entfernten Kanälen deutlich verzögert ankommt.



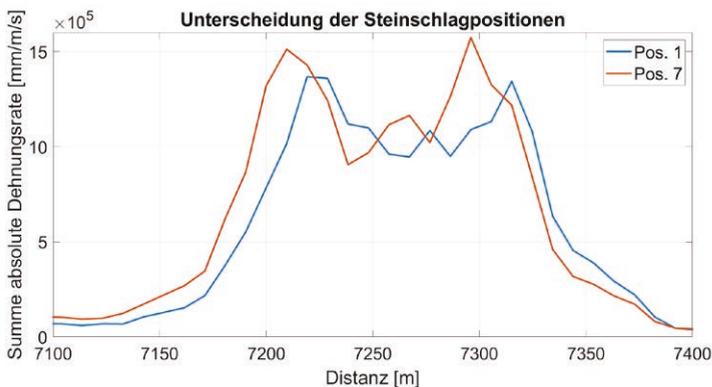
**Abb. 8:** 3D-Darstellung eines Steinschlagsignals

Die verzögerte Detektion ist auch in Abbildung 9 nochmal deutlicher dargestellt. Sichtbar sind 5 Messpositionen entlang der Faser im Abstand von rund 50 m. Einerseits ist die zeitliche Verzögerung erkennbar, andererseits auch die deutliche Abnahme der Signalstärke mit der Distanz.



**Abb. 9:** Detektion des Steinschlags an unterschiedlichen Positionen entlang der Glasfaser

Vergleicht man zwei Steinschläge an unterschiedlichen Positionen, so können die Positionen deutlich voneinander unterschieden werden. Abbildung 10 zeigt die Summe der Dehnungsrate über den Zeitraum des Steinschlags auf Position 1 und Position 7. Trotz der weiten örtlichen Ausbreitung ist eine deutliche Verschiebung der zentralen Position um ca. 10 bis 20 m erkennbar, welche der realen Entfernung der beiden Einschlagspositionen von 16 m (siehe Abb. 6) annähernd entspricht.



**Abb. 10:** Unterscheidung von zwei Steinschlägen an unterschiedlichen Positionen