

## **Erschütterungsprognose und Erschütterungsmessung im Tunnelbau**

Dipl.-Ing. G. A. Schmücker

Sprengtechnischer Dienst  
WESTSPRENG GmbH  
Sprengstoffe + Sprengtechnik  
Kalkwerkstr. 75 – 77  
D-57413 Finnentrop

---

### Einleitung und Problemstellung

In Europa sind in den letzten Jahren wieder verstärkte Neubauaktivitäten im Bereich der Verkehrstunnel zu verzeichnen. Dieses betrifft unter anderem sowohl Projekte in Deutschland als auch Großprojekte in der Schweiz und Österreich. Von diesen wird noch immer ein erheblicher Anteil in Spritzbetonbauweise mit Bohr- und Sprengarbeit nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT) aufgeföhren.

Tunnelprojekte unterschiedlicher Größenordnungen werden auch sehr oft im Innenstadtbereich durchgeführt, wodurch sich besondere Problemstellungen und Spannungsverhältnisse ergeben. Diese Spannungsverhältnisse werden zum einen durch innere Faktoren wie z. B. Projekt-Rahmenbedingungen, Mitarbeiter, Organisation sowie die gewählte Technologie und zum anderen durch äußere Faktoren geprägt. Immer häufiger wird die Projektdurchführung durch Vorschriften und Gesetzgebung, Umweltbelange, öffentliche Meinung und die Politik in erheblichen Maße mitbestimmt.

Dieses Spannungsverhältnis ist besonders für Sprengvortriebe im Innenstadtbereich sehr hoch, so daß oftmals der routinemäßige Einsatz der Technik im Vergleich zur Öffentlichkeitsarbeit im allgemeinen Sinne in den Hintergrund tritt.

Neben Immissionsbelastungen wie Lärm, Staub und hoffentlich sicher vermeidbarer Steinflug bei Sprengungen in den Portalbereichen führen Sprengerschütterungen zu vielzähligen Anwohnerbeschwerden, so daß oftmals der Einsatz spezieller Sprengtechnik zur Reduzierung der Immissionsbelastungen erforderlich wird. Berücksichtigt man, daß ca. 15 % der gesamten Energiemenge, die bei der Detonation von Sprengstoff zur Verfügung steht (Bild 1), in Form von Sprengerschütterungen frei wird und die Empfindungsstärken von Menschen (ohne Berücksichtigung von ungünstigen örtlichen und geologischen Bedingungen) dann wird die Problematik bei Entfernungen von einigen Metern zu Gebäuden deutlich.

Spürbar	0,1 bis 0,5 mm/s
Bemerkbar	0,5 bis 1,0 mm/s
Unangenehm	1,0 bis 2,0 mm/s
Störend	2,0 bis 3,0 mm/s
Beanstandbar	3,0 bis 5,0 mm/s

Tabelle 1: Wahrnehmungsstärken des Menschen auf Erschütterungen

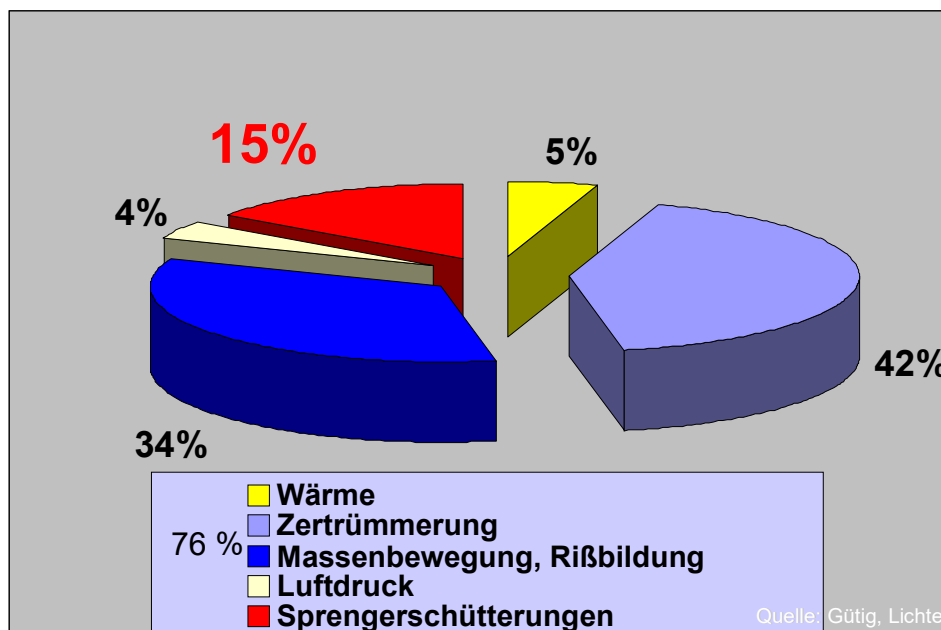


Bild 1: Energieaufteilung bei Sprengungen

Die Einhaltung von Anhaltswerten der DIN 4150 „Einwirkungen auf Gebäude“ ist Grundlage für die anzuwendende Sprengtechnik und erfordert bei der Bauausführung eine ausführliche Dokumentation der Sprengtechnik und der Erschütterungen aus Gründen der Beweisführung. Mit modernen Meßsystemen, wie dem MR2002 CE, sind sowohl die Meß- als auch die Analysemethoden präzise und ökonomisch durchführbar, ein deutlicher Trend zur Fernabfrage der Meßstationen ist erkennbar.

### Erschütterungsprognose

Vor Aufnahme der Sprengarbeiten bei einem Tunnelprojekt müssen im Regelfall die zu erwartenden Sprengerschütterungen gutachterlich prognostiziert werden um anschließend die Sprengtechnik festlegen zu können.

Für die Immissionsprognose werden verschiedene Berechnungsformeln zu Grunde gelegt, die hauptsächlich die Lademenge je Zündzeitstufe (Sprengstoff) und die Entfernung zwischen Emissions- und Immissionsort zu Grunde legen. Darüber hinaus beinhalten nahezu alle gebräuchlichen Formeln einen u. a. die geologischen Gegebenheiten umschreibenden Gebirgsbeiwert, der später durch Messungen in der Praxis zu konkretisieren ist.

Hier seien drei Prognoseformeln exemplarisch aufgeführt.

Prof. Koch: 
$$V_i = K \cdot \frac{\sqrt{L}}{R}$$
 L: Lademenge je Zündzeitstufe

BGR Sediment: 
$$V_i = K \cdot L^{0,6} \cdot R^{-1,5}$$
 R: Entfernung

BGR Kristallin: 
$$V_i = K \cdot L^{0,8} \cdot R^{-1,3}$$
 K: Gebirgsbeiwert

Anhand von Lademengen-Abstands-Beziehungen kann die höchstmögliche Lademenge je Zündzeitstufe festgelegt werden, mit der die vorgeschriebenen Anhaltswerte sicher einzuhalten sind. Mit Hilfe von Schwinggeschwindigkeits-Abstandsbeziehungen können die theoretisch zu erwartenden Immissionen in verschiedenen Entfernungen prognostiziert werden.

Allerdings zeigt die Erfahrung, daß die Gebirgsbeiwerte in der Praxis aus vielerlei Gründen starken Schwankungen unterliegen. Im Bild 2 sind Gebirgsbeiwerte eines Tunnelvortriebes im Tonstein aufgeführt (Abstände zur Meßstelle in einem Wohngebäude direkt über Tunnelachse < 15 m). Der Gebirgsbeiwert (K) für die BGR Sedimentformel beträgt standardmäßig 969 und der nach Prof. Koch 100. Die Schwankungsbreite ist sehr deutlich.

Die Auswirkungen höherer Gebirgsbeiwerte geht aus Bild 3 hervor (hier für einen größeren Entfernungsbereich). Für Tunnelbaustellen können hohe Gebirgsbeiwerte im Nahbereich zum Teil zu sehr geringen Lademengen je Zündzeitstufe (z. B. < 0,5 kg) führen, wodurch die sprengtechnische Umsetzung in Frage gestellt sein kann.

In vielen Projektausschreibungen und Auftragsformulierungen wird vom Auftragnehmer die Einhaltung der DIN 4150 (oder der geltenden Erschütterungsrichtlinie) verlangt. Dieses betrifft überwiegend den Teil 3 (Einwirkungen auf Gebäude) zunehmend aber auch den Teil 2 (Einwirkungen auf Menschen in Gebäude).

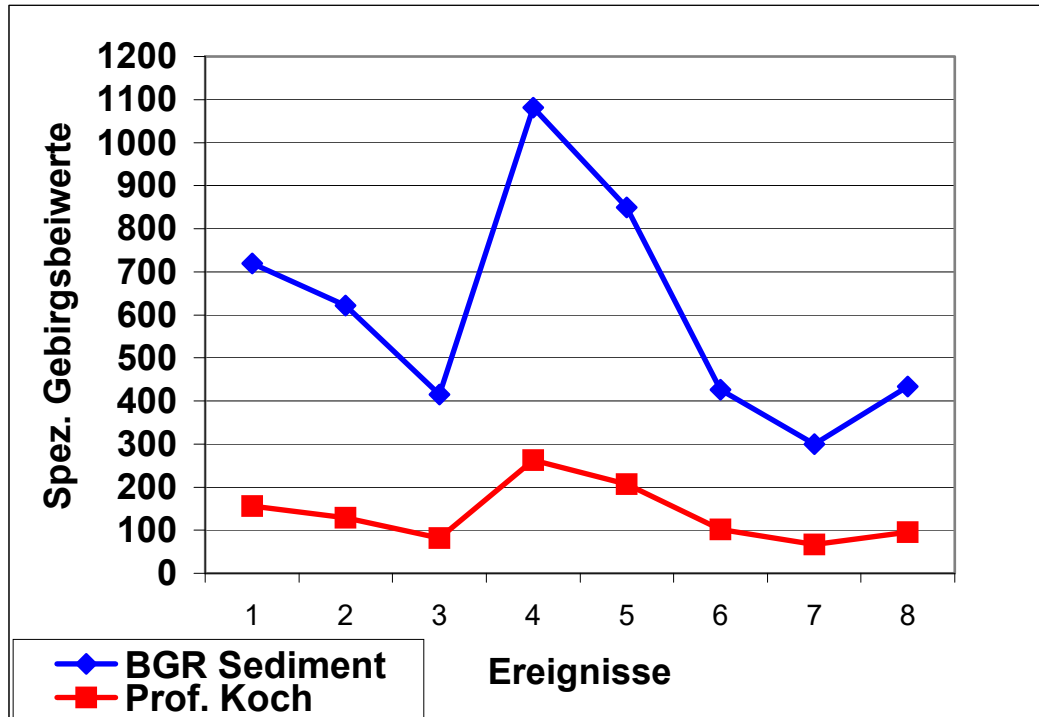


Bild 2: Berechnete Gebirgsbeiwerte im Anfangsbereich eines Innenstadttunnels (< 15 m Entfernung zur Tunnelachse/-firste)

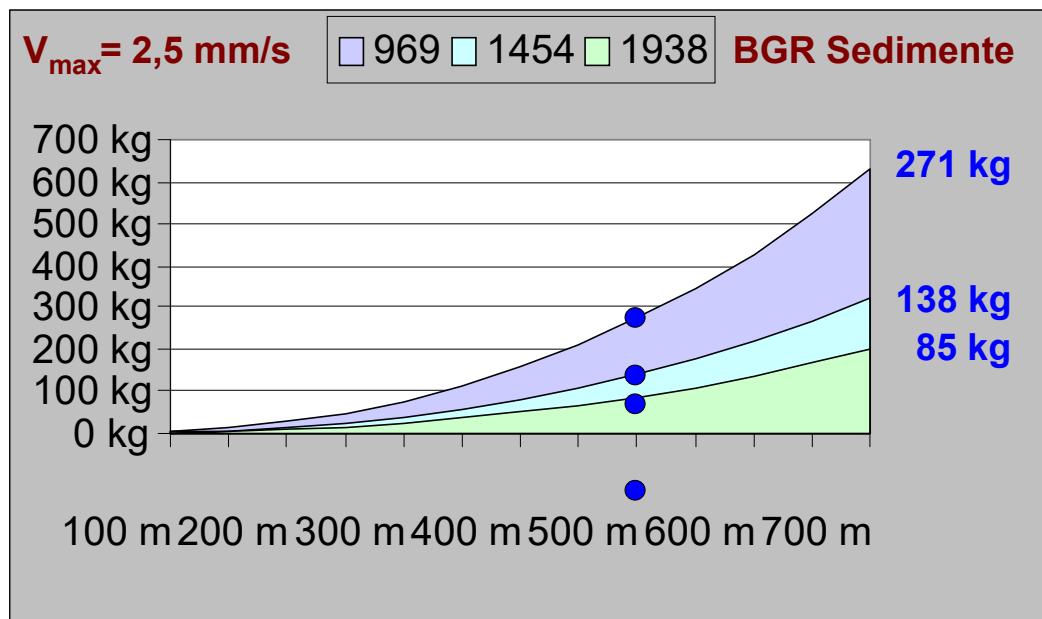


Bild 3: Abnahme der zulässigen Lademengen je Zündzeitstufe mit steigendem Gebirgsbeiwert (K)

Für Baustellen gelten jedoch Sonderregelungen, wonach ein Immissionswert (IW) von 8 (Bild 4) möglich ist.

Einordnungen nach Tabelle 2 Erschütterungsrichtlinie	IW	Schwinggeschwindigkeit (mm/s)	
		Fundament	O. Vollgeschoß
• Zeile 4: „Wohngebiet“	3,0	1,6	8,1
• Zeile 3: „Mischgebiet“	5,0	2,7	13,5
• <b>Sonderregelung 5.5.1:</b>	<b>6,0</b>	<b>3,2</b>	<b>16,2</b>
• <b>Sonderregelung 5.5.1*:</b> <b>Bis zu 10 Mal im Jahr + Anwendung bei Baumaßnahmen</b>	<b>8,0</b>	<b>4,0</b>	<b>20,0</b>
<b>Berechnungsgrundlagen:</b>	<b>f = 10 Hz, c<sub>F</sub> = 0,6, Ü = 5</b>		

Bild 4: Unterschiedliche Immissionswerte entsprechend der Anwendungen bzw. Einordnung in Gebiete der BauNVO

Demnach sind am Fundament von Wohngebäuden nur noch 4,0 mm/s (frequenzunabhängig) zulässig, sofern ein Überhöhungsfaktor (Fundament-Deckenmitte des obersten Vollgeschosses) von ca. 5 zu Grunde gelegt wird. Im Vergleich zum Teil 3 der DIN 4150 (frequenzabhängig) kann dieses eine erhebliche Einschränkung für den Sprengbetrieb bedeuten.

Allerdings wird von gutachterlicher Seite versucht, diesen Teil 2 nicht zwingend anzuwenden, da Einschränkungen in der Sprengtechnik (oder sogar Verbot) unter Umständen nur eine Verlagerung der Emissionsquellen bedeutet und die Bauzeit zum Teil erheblich verlängern kann. Auch dieses kann nicht gewollt sein.

### Sprengtechnik zur Erschütterungsreduzierung

Die Lademenge je Zündzeitstufe ist ein Faktor für die Höhe der Immissionsbelastung durch Sprengerschütterungen, aber halt nur einer, der oftmals überbewertet wird.

Mindestens genauso wichtig sind unter anderem:

- Der Verspannungsgrad im Gebirge.
- Die Übertragungsverhältnisse im Untergrund.
- Das Zündzeitintervall (Gleichmäßigkeit und Zündzeitabstände).
- Der spezifische Sprengstoffaufwand.

Die Lademenge je Zündzeitstufe wird oftmals als einziges Kriterium zu Rate gezogen, weil sie „sehr gut greifbar und anschaulich ist“. Es hat sich aber seit vielen Jahren gezeigt, daß die o. g. Einflüsse mindestens genauso wichtig sind.

Durch den Einsatz moderner Zündverfahren im Tunnelbau, wie den nichtelektrischen (inkl. Nonel-Hybrid-Verfahren) und elektronischen Zündern, kann heute sowohl einer Verringerung der Lademenge je Zündzeitstufe als auch den Faktoren Zündintervall und Verspannungsgrad im Gebirge geeignet Rechnung getragen werden. (Bild 5)

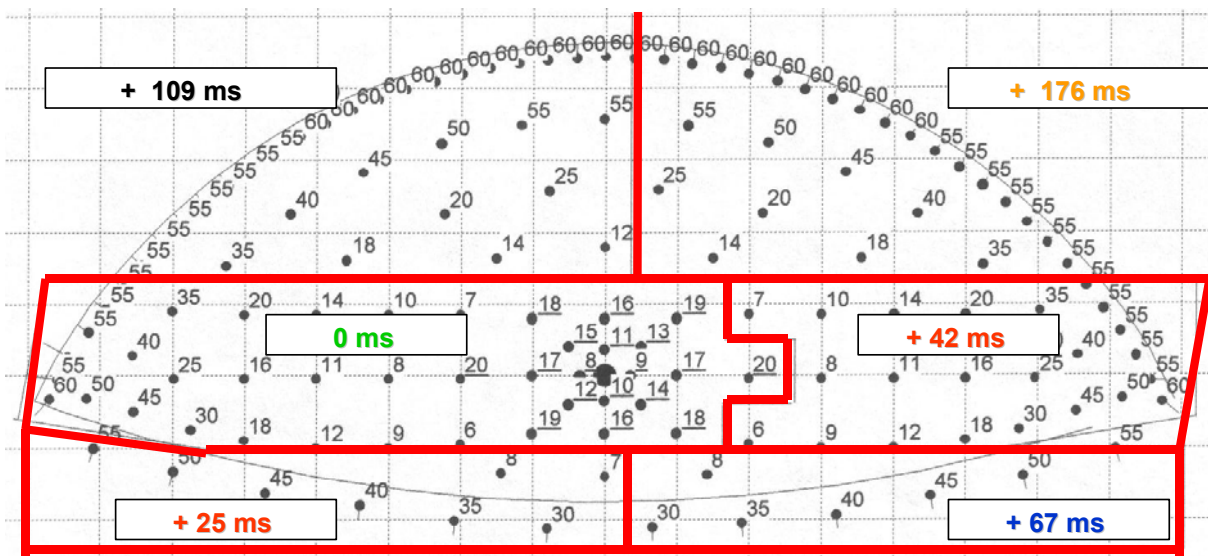


Bild 5: Reduzierung von Sprengerschütterungen durch moderne Sprengtechnik. Nonel-Hybrid-System und Einbruch auf Großbohrloch.

Unter „Hybrid-System“ versteht man außer den nichtelektrischen Kurz- und Langzeitzündern die zusätzliche Verwendung von Bündelzündern, statt ausschließlich mit 0 ms zusätzlich mit Zeitverzögerungen (Snapline SL 25, SL 42, SL 67, SL 109 und SL 176). Beim kombinierten Einsatz der Systeme Nonel MS und Nonel LP können so auf einfache Art und Weise verschiedene Bündel an sich gleicher Zeitstufen von Langzeitzündern „zwischenverzögert“ werden (Bild 5). Durch diese Technik werden zum Beispiel einem Langzeitzünder Nonel LP 6 mit nominal 600 ms in einem Bündel mit einer Snapline SL 109 die Zündzeit 709 ms zugeordnet. Auf diese Weise lassen sich mit Hilfe eines präzisen Sprengschemas eine Fülle von weiteren Zündzeiten „künstlich“ erzeugen. Diese Technik ist mittlerweile nicht nur im Ausland, sondern auch bei drei Tunnelvortrieben in Deutschland mit Erfolg zur Reduzierung von Sprengerschütterungsimmissionen eingesetzt worden, ohne z. B. Abschlagslängen reduzieren oder Ulmenstollen einführen zu müssen.

**Auswertung 2.Sprengung Nonel  
 am 25.04.2001, 18.12 Uhr**

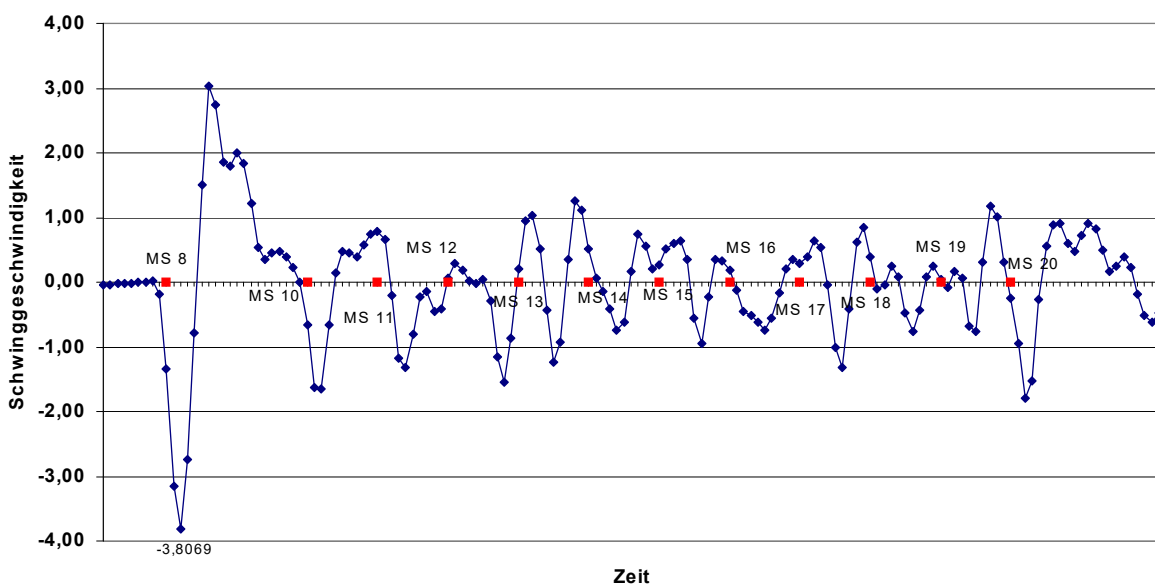


Bild 6: Überlagerung der Zündzeiten mit dem Schwingungssignal

Die Überprüfung des Erfolgs kann sehr einfach mit Hilfe des Aufzeichnungssignals vom MR2002 erfolgen, indem man die nominalen Zündzeiten in den gemessenen Schwingungsverlauf einsetzt. (Bild 6) Durch diese Analysemethode lassen sich Unstimmigkeiten im Sprengbild bzw. in der Sprengtechnik feststellen, die anschließend zu beheben sind.

### Problematik von Nahfeldmessungen

Verschiedentlich wurde bei Erschütterungen im Nächstbereich (< 15 m) an den Sensoren MS2003 eine auffällige Instabilität der Nulllinie (Offset) festgestellt, wodurch Registrierungen verfälscht werden. (Bild 7)

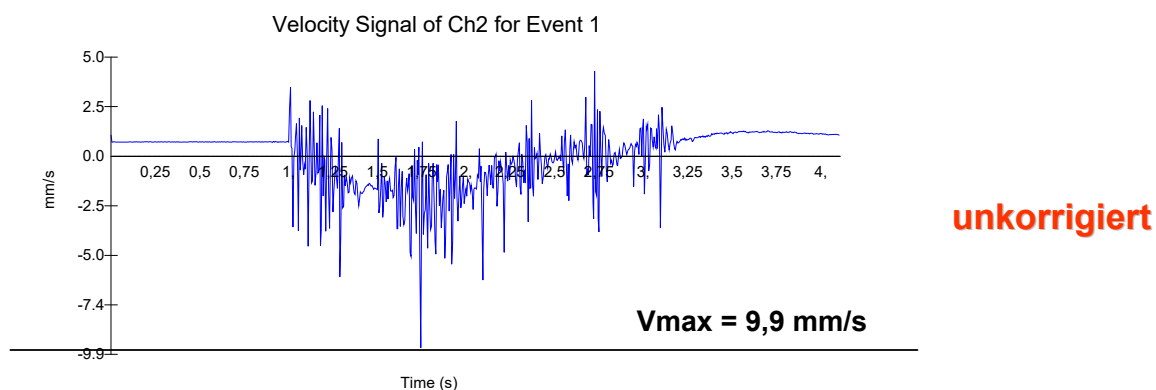


Bild 7: Beispiel für ein im Offsetbereich fehlerhaftes Aufzeichnungsfile

Ursache hierfür ist durch die wiederholte impulsartige, einseitige Anregung (Abfolge der Zündzeitstufen bei der Sprengung) durch die die Elektronik im Sensor übersteuert wird. Die Elektronik des Sensors besteht unter anderem aus einem passiven Filter und einer Verstärkerschaltung, die es erlauben, das Signal des Sensors soweit zu linearisieren, daß auch unterhalb der Eigenfrequenz des Sensors (4,5 Hz) eine lineare Frequenzantwort bis ca. 1 Hz – wie von der DIN 45669 für einen Sensor der Klasse 1 gefordert – sichergestellt wird. Die Übersteuerung der Linearisierungselektronik bewirkt, daß sich die Nulllinie (DC-Offset) niederfrequent verändert ohne daß das Nutzsignal eine Veränderung erfährt. Am Ende der Registrierung bewegt sich der DC-Offset wieder zurück in Normlage (Entladung der Kondensatoren der Linearisierungselektronik) und zeigt einen typischen Signalverlauf.

Treten derartige Symptome auf, wird die Verwendung eines 5 Hz (Butterworth-Hochpassfilter 2. Ordnung) empfohlen. Bild 8 zeigt das korrigierte Schwingungsereignis.

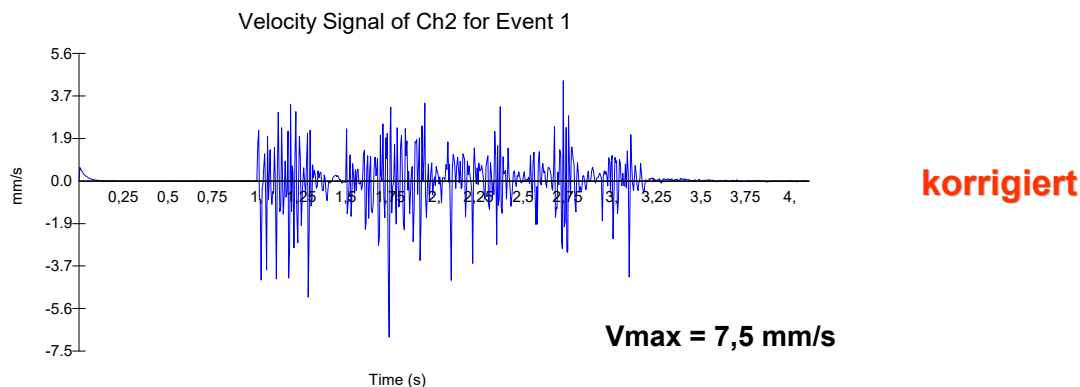


Bild 8: Signalfilterung durch Butterworth-Hochpassfilter 2. Ordnung (Cut-Off-Frequenz von 5 Hz)

Ebenso werden bei Messungen im geringen Abstand zur Sprengstelle oftmals überhöhte und unrealistische Schwinggeschwindigkeiten festgestellt, die ihre Ursache in erhöhten Beschleunigungswerten haben können. Die DIN 45669 empfiehlt bei Werten  $> 3 \text{ m/s}^2$  die geeignete Ankopplung der Sensoren an den Untergrund. Die Erfahrung hat gezeigt, daß durch eine Sensorankopplung die Meßwerte deutlich realistischer sind.

### **Schlußfolgerungen**

Die technischen und organisatorischen Anforderungen an den Tunnelbau im innerstädtischen Bereich wachsen ständig.

Sprengerschütterungen lassen sich nicht vermeiden, sondern mit Hilfe von geeigneter Meßtechnik, Analyseverfahren und Sprengtechnik reduzieren. Das Bartec MR2002 CE ist sowohl ein hervorragendes Meßsystem für Sprengerschütterungen als auch eine geeignete Basis für tieferegehende Sprenganalysen. Auf eine sorgfältige Datenerfassung und Dokumentation inkl. Sprengdaten ist zu achten.

Immissionsprognosen sind bei Benutzung herkömmlicher Gebirgsbeiwerte mit Sicherheiten zu versehen, um deren Schwankungsbreiten zu berücksichtigen.

Die Lademenge je Zündzeitstufe sollte nicht als ausschließliches Beurteilungskriterium für die Sprengtechnik im Tunnelbau gelten.