

Zuoz – Wiederherstellung des Kulturläutens durch eine elektronisch gesteuerte Gegenpendelanlage

Thomas Muff, Muff Kirchturmtechnik AG, Triengen, CH

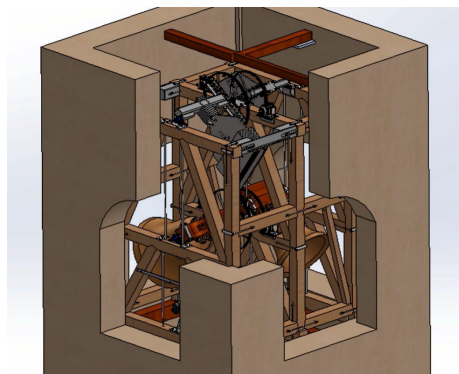
Abstract

Die evangelisch-reformierte Kirche St. Luzi in Zuoz verfügt über einen rund 60 Meter hohen historischen Kirchturm, dessen dynamisches Verhalten durch das Glockengeläut seit Jahrzehnten erheblich beeinflusst wird. Frühere Massnahmen zur Reduktion der Turmschwingungen führten zwar zu einer Verringerung der dynamischen Belastungen, beeinträchtigten jedoch das traditionelle Engadiner Kulturläuten sowie die klangliche Charakteristik des Geläuts. Ziel des Projekts war daher die Wiederherstellung des ursprünglichen Klangbildes bei gleichzeitiger Sicherstellung der strukturellen Integrität des denkmalgeschützten Bauwerks.

Im Rahmen umfangreicher Messkampagnen wurden die dynamischen Eigenschaften des Turms untersucht. Die Ergebnisse zeigten ein ausgeprägt nichtlineares Tragwerksverhalten mit amplitudenabhängiger Eigenfrequenzverschiebung, verursacht durch die Wechselwirkung von historischem Mauerwerk und Baugrund. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde eine neuartige, elektronisch gesteuerte Gegenpendelanlage entwickelt, welche die von den Glocken erzeugten Horizontalkräfte durch synchronisierte Gegenpendel kompensiert. Die Glocken fungieren dabei als Master-System, während die Gegenpendel elektronisch in Echtzeit nachgeführt werden.

Ergänzend wurde eine neue Generation von Ankerklöppeln entwickelt, um die ursprüngliche Läutcharakteristik wiederherzustellen und gleichzeitig die mechanische Beanspruchung der historischen Glocken zu reduzieren. Durch die Kombination beider Innovationen konnten die Turmschwingungen deutlich reduziert, die Schallabstrahlung um rund 12 dB(A) gesenkt sowie das traditionelle Kulturläuten mit den ursprünglichen Schlagzahlen erfolgreich rekonstruiert werden.

Die Standsicherheit des Bauwerks wurde mittels kalibriertem Finite-Elemente-Modell nachgewiesen. Die ermittelten dynamischen Zusatzspannungen liegen deutlich unterhalb kritischer Werte, sodass keine Gefährdung der Tragstruktur besteht. Das Projekt zeigt exemplarisch, wie moderne Baudynamik, Regelungstechnik und Glockentechnik erfolgreich mit den Anforderungen des Denkmalschutzes verbunden werden können. Die weltweit erste elektronisch synchronisierte Gegenpendelanlage in einem historischen Glockenturm eröffnet dabei neue Perspektiven für den nachhaltigen Erhalt schwingungsanfälliger Kulturdenkmäler.



Weltneuheit live erleben

LINK: <https://muffag.link/zuoz-video> entdecken Sie im Video, wie diese innovative Entwicklung neue Massstäbe setzt.

Zuoz – Wiederherstellung des Kulturläutens durch eine elektronisch gesteuerte Gegenpendelanlage

Reduktion der Turmschwingungen bei der Kirche St. Luzi in Zuoz

Symposium 2026 – Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessung
26. Juni 2026 | Empa Dübendorf
Fachreferent: Thomas Muff

1. Einleitung

Die evangelisch-reformierte Kirche St. Luzi in Zuoz zählt zu den bedeutendsten historischen Sakralbauten des Engadins. Der rund 60 Meter hohe Kirchturm stammt in seinen Grundzügen aus dem Jahr 1139 und steht unter kantonalem Denkmalschutz.

Aufgrund seiner schlanken Bauweise und der dynamischen Belastungen aus dem Glockengeläut entwickelte der Turm über Jahrzehnte hinweg erhebliche Schwingungen, welche die Tragstruktur beanspruchten. Bereits frühere Sanierungsmaßnahmen führten zwar zu einer Reduktion der Turmschwingungen, beeinträchtigten jedoch das traditionelle Engadiner Kulturläuten und die Klangqualität des Geläuts.

Das Ziel des Projektes bestand deshalb darin, die Turmschwingungen nachhaltig zu reduzieren, die strukturelle Sicherheit des Bauwerks nachzuweisen und gleichzeitig das ursprüngliche Kulturläuten wiederherzustellen.



Zuoz mit Kirche St. Luzi - Foto marcweiler

Die Lösung führte zur Entwicklung einer weltweit einzigartigen, elektronisch gesteuerten Gegenpendelanlage. In Kombination mit einer neu entwickelten Ankerklöppelgeneration konnten die dynamischen Belastungen des Turmes deutlich reduziert und gleichzeitig die traditionellen klanglichen Eigenschaften des Geläuts wiederhergestellt werden.

Das Projekt stellt damit ein Beispiel für die erfolgreiche Verbindung von Baudynamik, Denkmalpflege, Glocken- und moderner Regelungstechnik dar. Die folgenden Ausführungen zeichnen den Weg von der Analyse des nichtlinearen Tragwerksverhaltens bis zur Umsetzung einer innovativen Lösung nach, die den langfristigen Erhalt dieses bedeutenden Kulturguts sicherstellt.

2. Ausgangslage

Der Turm besitzt eine Grundfläche von lediglich etwa 5 × 5 Meter bei einer Höhe von rund 60 Meter. Im Glockenstuhl hängen vier Glocken mit Einzelgewichten bis zu 1'100 Kilogramm. Bereits im Jahr 2003 wurden aussergewöhnlich starke Turmschwingungen festgestellt. Daraufhin erfolgten erste dynamische Untersuchungen.

Zwischen 2008 und 2009 wurden verschiedene Massnahmen zur Reduktion der Turmschwingungen umgesetzt:

- Verlangsamung des Schwungsystems nach ambrosianischem Prinzip
- Kröpfung der Joche der beiden grössten Glocken
- Beschwerung der dritten Glocke mittels zusätzlicher Gewichtsplatten
- Einbau von Fallklöppeln zur Reduktion der Anschlagdynamik
- Reduktion der Schlagzahlen zur Verschiebung der Anregungsfrequenzen
- Umbau der beiden Fallklöppel auf Gegengewichtsklöppel mit dem Ziel, das traditionelle Engadiner Kulturläuten klanglich besser nachzubilden

Dadurch konnten die Turmschwingungen zwar reduziert werden. Gleichzeitig veränderten sich jedoch die Läutedynamik, die Schlagfolge und die Klangentfaltung des Geläuts erheblich. Das traditionelle Engadiner Kulturläuten konnte in seiner ursprünglichen Form nicht mehr wiedergegeben werden. Aus diesem Grund wünschten sich sowohl die Kirchgemeinde als auch die Bevölkerung die Rückkehr zum ursprünglichen Klangbild und zu den historischen Schlagzahlen.

3. Dynamische Untersuchungen

Im Jahr 2024 wurden umfangreiche dynamische Messungen durchgeführt, um das Schwingungsverhalten des Turmes unter unterschiedlichen Belastungszuständen zu analysieren.

Besonders interessant war die Beobachtung, dass sich die Eigenfrequenz des Turmes unter Windbelastung veränderte:

- Windstille: Eigenfrequenz etwa 1.43 Hz
- Mässiger Wind: Eigenfrequenz etwa 1.40 Hz

Eine solche Verschiebung der Eigenfrequenz ist ein deutliches Indiz für ein nichtlineares Tragwerksverhalten. Die Steifigkeit des Systems verändert sich dabei in Abhängigkeit von der Belastung und der Schwingungsamplitude.

Anschliessend wurden gezielte Versuche mit den Glocken durchgeführt. Mithilfe der modernen Glockensteuerung konnten die Läutwinkel der Glocken stufenweise von kleinen bis zu sehr grossen Ausschlägen verändert werden. Dadurch wurde die Anregungsfrequenz systematisch variiert und die Reaktion des Turmes über einen breiten Betriebsbereich untersucht.

Ziel dieser Messungen war es, das Resonanzverhalten des Turmes zu erfassen und die Zusammenhänge zwischen Glockenschwingung, Anregungsfrequenz und Turmbewegung besser zu verstehen. Die gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die Entwicklung der später realisierten Gegenpendelanlage.

4. Nichtlineares Verhalten des Turmes

Die wichtigste Erkenntnis der Messkampagne war, dass sich der Kirchturm von Zuoz nicht wie ein lineares Schwingungssystem verhält, sondern ein ausgeprägtes nichtlineares Verhalten zeigt.

Bei einem linearen System würde man eine klassische Resonanzspitze erwarten. Die Messungen zeigten jedoch, dass mit zunehmender Schwingungsamplitude die Steifigkeit des Systems abnimmt. Dadurch verschiebt sich die Eigenfrequenz des Turmes und die Schwingungsamplituden können trotz sinkender Anregungsfrequenz weiter anwachsen.

Es konnten zwei charakteristische Zustände beobachtet werden:

Normalzustand:

Die Schwingungsamplituden nehmen mit steigender Anregungsfrequenz zu und springen ab einer bestimmten Frequenz auf ein höheres Niveau.

Resonanzpfad:

Bei grossen Schwingungsamplituden folgt der Turm einem zweiten Schwingungsast mit deutlich höheren Auslenkungen. Erst bei einer kritischen Frequenz wird dieser Zustand instabil und die Schwingungen brechen zusammen.

Ursachen für dieses Verhalten sind die nachgiebige Foundation im Baugrund sowie das nichtlineare Verformungsverhalten des historischen Mauerwerks. Beide Effekte führen zu einer Abnahme der Gesamtsteifigkeit bei zunehmender Belastung.

Diese Erkenntnis war entscheidend für die weitere Projektbearbeitung und zeigte, dass eine reine Anpassung der Schlagzahlen keine nachhaltige Lösung darstellen würde. Stattdessen musste ein neuer Ansatz zur Reduktion der Turmschwingungen entwickelt werden.

5. Warum die bisherigen Massnahmen nicht ausreichen

Die durchgeführten Messungen zeigten, dass eine Rückkehr zu den ursprünglichen Schlagzahlen insbesondere bei den Glocken 1 und 2 zu deutlich höheren Turmschwingungen führen würde. Gleichzeitig wurde erkannt, dass die bisher umgesetzten Massnahmen zwar die Schwingungen reduzierten, jedoch das traditionelle Engadiner Kulturläuten und die Klangqualität erheblich beeinträchtigten.

Eine zusätzliche Versteifung des Turmes kam nicht infrage. Aufgrund des nichtlinearen Verhaltens des Gesamtsystems hätten nicht nur Eingriffe am Mauerwerk, sondern auch umfangreiche Massnahmen im Bereich der Foundation und des Baugrundes umgesetzt werden müssen. Solche Eingriffe wären technisch aufwendig, wirtschaftlich kaum vertretbar und aus denkmalpflegerischer Sicht problematisch gewesen.

Gesucht war deshalb eine Lösung, die:

- die Turmschwingungen wirksam reduziert
- die ursprünglichen Schlagzahlen und das traditionelle Kulturläuten wieder ermöglichen
- die historische Bausubstanz schont und
- ohne wesentliche bauliche Eingriffe auskommt

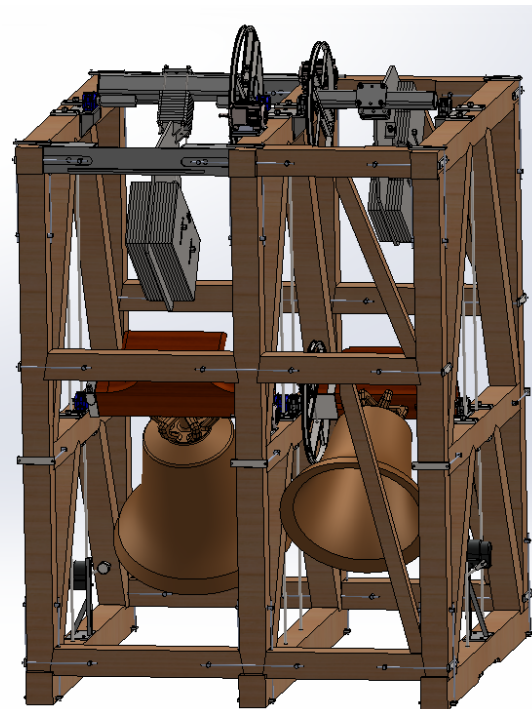
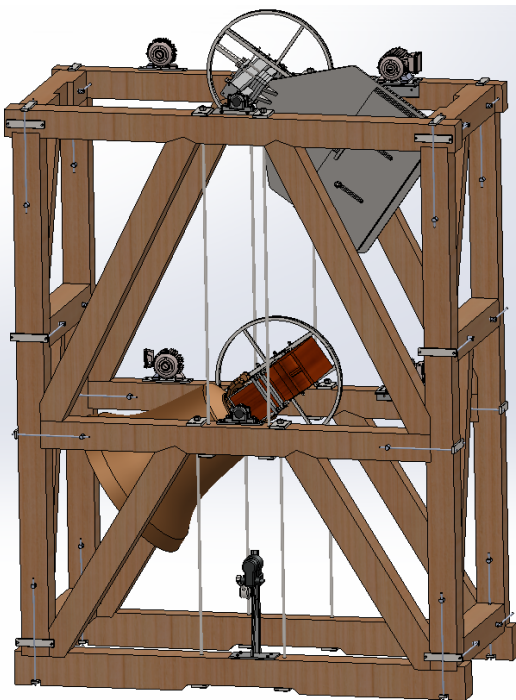
Diese Anforderungen führten schliesslich zur Entwicklung der elektronisch gesteuerten Gegenpendelanlage.

6. Die Lösung: Elektronisch gesteuerte Gegenpendelanlage

Die von der Muff Kirchturmtechnik AG entwickelte Lösung basiert auf zwei speziell ausgelegten Gegenpendeln für die Glocken 1 und 2. Ziel war es, die durch das Läuten erzeugten Horizontalkräfte zu kompensieren, ohne dabei die ursprünglichen Schlagzahlen oder das traditionelle Kulturläuten zu verändern.

Das Funktionsprinzip beruht auf gegenphasig schwingenden Pendelmassen. Die Gegenpendel erzeugen dabei Kräfte, welche den von den Glocken verursachten Horizontalkräften entgegenwirken. Dadurch werden die auf den Turm übertragenen dynamischen Belastungen deutlich reduziert.

Die eigentliche Innovation liegt in der Ansteuerung der Gegenpendel. Im Gegensatz zu herkömmlichen Systemen erfolgt keine mechanische Kopplung zwischen Glocke und Gegenpendel. Stattdessen werden die Gegenpendel elektronisch synchronisiert:



Glocke = Master / Gegenpendel = Slave

Die Glocken geben die Bewegungen und Schlagzahlen vor, während die Gegenpendel elektronisch in Echtzeit nachgeführt werden. Dadurch entsteht keine mechanische Kopplung zwischen Glocke und Gegenpendel.

Eine weitere Herausforderung bestand darin, die Gegenpendel trotz der beschränkten Platzverhältnisse im neuen Glockenstuhl unterzubringen. Hierfür mussten die Massen und Trägheitsmomente der Pendel exakt auf die jeweiligen Glocken abgestimmt werden, damit die erzeugten Gegenkräfte den dynamischen Belastungen möglichst genau entsprechen.

Die entwickelte Gegenpendelanlage ist unseres Wissens die erste elektronisch synchronisierte Gegenpendelanlage in einem historischen Glockenturm weltweit. Damit wurde das zentrale Projektziel erreicht: der Erhalt des traditionellen Kulturläutens bei gleichzeitiger Schonung der historischen Bausubstanz.

7. Zusätzliche Optimierung durch neue Klöppelgeneration

Parallel zur Gegenpendelanlage wurde das Läutsystem durch neu entwickelte Ankerklöppel optimiert. Ziel war es, die ursprüngliche Läutcharakteristik wiederherzustellen und gleichzeitig die Glocken langfristig zu schonen.

Die Anforderungen an die neue Klöppellösung waren:

- Reduktion der Schallabstrahlung
- Schonung der historischen Glocken
- Verbesserung der Klangcharakteristik
- Wiederherstellung des traditionellen Engadiner Kulturläutens

Die im Jahr 2025 installierten Ankerklöppel ermöglichten eine Rückführung des Systemschwerpunktes auf die ursprünglichen Verhältnisse. Gleichzeitig konnten das historische Holzjoch sowie die bestehenden Bandbeschläge erhalten und weiterverwendet werden.

Die wesentlichen Massnahmen umfassten:

- traditionelle gerade Glockenaufhängung
- Wiederverwendung des historischen Holzjochs und der Bandbeschläge
- Einbau neu entwickelter Ankerklöppel mit spezieller Schlüsselweite
- Rückführung zum traditionellen Kulturläuten mit sanftem Klöppelanschlag
- nachhaltige Schonung des Klangkörpers Glocke

Durch die optimierte Klöppelgeometrie und das verbesserte Anschlagverhalten konnte die Lautstärke um rund 12 dB(A) reduziert werden, ohne den Charakter des ursprünglichen Geläuts zu verändern.

Der von der Muff AG entwickelte und beim Patentamt angemeldete Ankerklöppel wird mittels präziser Wasserstrahltechnik gefertigt. Seine speziell entwickelte Geometrie, die spezielle Schlüsselweite sowie die gezielte Schwerpunktlage ermöglichen einen kontrollierten Klöppelanschlag und eine optimale Abstimmung auf die jeweilige Glocke. Dadurch werden die mechanischen Belastungen reduziert und gleichzeitig die klanglichen Eigenschaften des Geläuts verbessert.

Vergleich der Installationen in Zuoz vor und nach der Sanierung



Alte Installation mit verändertem **Systemschwerpunkt**
Drehpunkt **Glocke**, Drehpunkt **Klöppel**

Klangentfaltung vor der Rückführung

LINK: <https://muffag.link/zuoz-vorher> hören Sie den Unterschied



Rückführung des Systemsschwerpunktes auf die
ursprünglichen Verhältnisse

Die Weltneuheit im Hörvergleich

LINK: <https://muffag.link/zuoz-nachher> hören Sie den Unterschied

Ankerklöppel mit Aufhängesystem und Klöppelabsturzicherung



8. Beurteilung der Standsicherheit

Zur Beurteilung von Kirchturmschwingungen wird häufig die DIN 4178 herangezogen. Für historische Türme nennt diese einen Richtwert von 3 mm/s Schwinggeschwindigkeit an der Turmspitze. Die Einhaltung dieses Wertes gilt als vereinfachter Nachweis, dass keine weiterführenden dynamischen Untersuchungen erforderlich sind.

Die Messungen in Zuoz zeigten jedoch, dass eine Beurteilung allein anhand der Schwinggeschwindigkeit nicht ausreicht. Faktoren wie die Turmgeometrie, die Foundation, der Baugrund sowie das tatsächliche Tragverhalten des Mauerwerks werden dabei nur unzureichend berücksichtigt.

Aus diesem Grund wurde für den Kirchturm von Zuoz ein Finite-Elemente-Modell erstellt und mit den gemessenen Schwingungsdaten kalibriert. Ziel war es, die tatsächlich auftretenden Spannungen im Mauerwerk zu bestimmen.

Die Berechnungen ergaben:

- Wechsellastspannung infolge des Glockenläutens: ca. 0.05 N/mm²
- Statische Druckspannung aus dem Eigengewicht des Turmes: ca. 0.5 N/mm²

Die dynamische Zusatzbeanspruchung beträgt somit lediglich rund zehn Prozent der vorhandenen Druckspannung. Der Turm bleibt auch während des Läutens jederzeit unter Druckbeanspruchung, wodurch keine kritischen Zugspannungen oder relevanten Ermüdungserscheinungen zu erwarten sind.

Die Untersuchungen zeigten daher, dass trotz der messbaren Turmschwingungen keine Gefährdung der Tragstruktur besteht. Gleichzeitig wurde nachgewiesen, dass die installierte Gegenpendelanlage die dynamischen Belastungen zusätzlich reduziert und damit einen nachhaltigen Beitrag zum langfristigen Erhalt des historischen Bauwerks leistet.

9. Ergebnisse

Mit der Umsetzung der elektronisch gesteuerten Gegenpendelanlage und der neuen Ankerklöppelgeneration konnten die definierten Projektziele erfolgreich erreicht werden.

Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Wiederherstellung des traditionellen Engadiner Kulturläutens mit den ursprünglichen Schlagzahlen
- Deutliche Reduktion der auf den Turm wirkenden dynamischen Horizontalkräfte
- Nachweis der strukturellen Sicherheit durch Messungen und Finite-Elemente-Berechnungen
- Reduktion der Schallabstrahlung um rund 12 dB(A)
- Verbesserung der Klangcharakteristik und der Läutdynamik
- Nachhaltige Schonung der historischen Glocken und der Turmstruktur
- Durchwegs positive Rückmeldungen der Kirchgemeinde und der Bevölkerung

Das Projekt zeigt eindrücklich, dass moderne Ingenieurmethoden und innovative Glockentechnik einen wichtigen Beitrag zum Erhalt historischer Bauwerke leisten können. Durch die Kombination von Baudynamik, Regelungstechnik und traditioneller Glockenkultur gelang es, die Anforderungen des Denkmalschutzes, der Bauwerkssicherheit und der klanglichen Authentizität gleichermassen zu erfüllen.

10. Schlussfolgerung

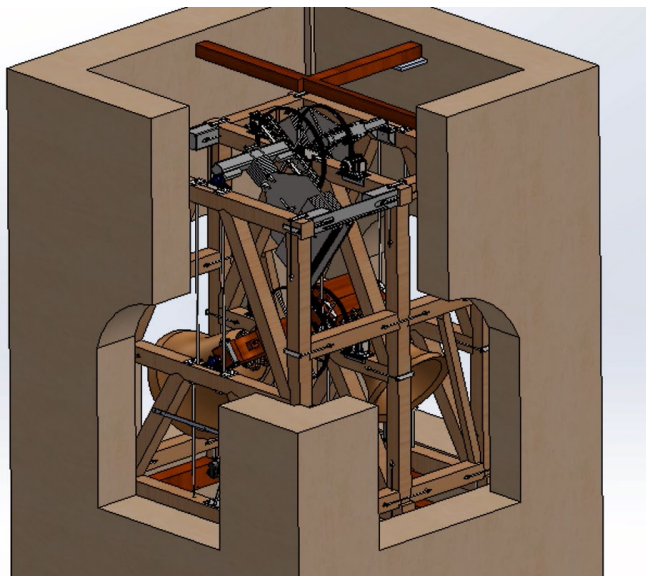
Das Projekt Zuoz zeigt eindrücklich, dass historische Kirchtürme nicht immer mit vereinfachten linearen Modellen beschrieben und beurteilt werden können. Die durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass das dynamische Verhalten des Turmes massgeblich durch nichtlineare Effekte im Baugrund und im historischen Mauerwerk beeinflusst wird.

Eine zentrale Erkenntnis des Projektes ist, dass Massnahmen zur Reduktion von Turmschwingungen nicht isoliert betrachtet werden dürfen. Lösungen, die in einem linearen Modell zielführend erscheinen, können in einem nichtlinearen System unerwartete Auswirkungen auf die Schwingungsamplituden, die Läutedynamik und die Klangqualität haben.

Erst die Kombination aus detaillierten Messungen, fundierter Tragwerksanalyse und innovativer Glockentechnik ermöglichte die Entwicklung einer nachhaltigen Gesamtlösung.

Mit der elektronisch gesteuerten Gegenpendelanlage und der neuen Ankerklöppelgeneration gelang es, das traditionelle Engadiner Kulturläuten wiederherzustellen, die dynamischen Belastungen des Turmes deutlich zu reduzieren und gleichzeitig die historische Bausubstanz langfristig zu schonen.

Das Projekt Zuoz zeigt beispielhaft, wie sich Denkmalschutz, Bauwerkserhalt, Baudynamik, Glockentechnik und moderne Regelungstechnik erfolgreich miteinander verbinden lassen. Die weltweit erste elektronisch synchronisierte Gegenpendelanlage in einem historischen Glockenturm eröffnet neue Möglichkeiten für zukünftige Sanierungsprojekte und setzt neue Massstäbe im Umgang mit schwingungsanfälligen historischen Kirchtürmen.



Weltneuheit live erleben

LINK: <https://muffag.link/zuoz-video> entdecken Sie im Video, wie diese innovative Entwicklung neue Massstäbe setzt.

Der Autor dankt Dr. Daniel Gsell (Ziegler Consultants AG) für die Durchführung der dynamischen Untersuchungen sowie für die fachliche Unterstützung bei der Interpretation der Messergebnisse.

Muff Kirchturmtechnik AG

Am Klangweg 2+4
CH-6234 Triengen
www.muffag.ch
041 933 15 20

Thomas Muff
muff.thomas@muffag.ch