

Bauwerksmonitoring mit optischen Saiten

Peter Zwicky
Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG
Forchstrasse 395, CH-8032 Zürich
peter.zwicky@bhz.ch, Tel. ++41-44-3871122

Basler & Hofmann

- 1. Einführung**
- 2. Das System OSMOS**
- 3. Projektbeispiel Reussbrücke Wassen**
- 4. Projektbeispiel Bahnhof Bern: Die Welle**

1. Einführung

Für das Erhalten und Bewirtschaften der Bauwerke und Infrastrukturanlagen ist die effiziente Überwachung von zentraler Bedeutung. Mit „Bauwerksmonitoring“ bezeichnen wir hier die instrumentierte Überwachung kritischer und repräsentativer Bauteile. Mit den heute verfügbaren Sensoren und Messsystemen können die Bauwerke permanent und bei Bedarf ferngesteuert überwacht werden.

Typische Motivationen für das Monitoring eines Bauwerks sind beispielsweise:

- Kontrolliertes Verlängern der Lebensdauer
- Optimieren der Unterhaltsprogramme
- Erhöhte Einwirkungen, erhöhte Anforderungen
- Moderne Normen: Optimieren mit Beobachtungsmethode
- Berechnungsmodelle validieren, „stille Reserven“ nutzen
- Frühes Erkennen von verändertem Tragverhalten.

Die erfolgreiche und zukunftssträchtige Entwicklung der Sensortechnik mit optischen Saiten (Faseroptik) bietet gegenüber herkömmlichen Instrumentierungen zunehmend neue Vorteile, die auch im Bauwesen genutzt werden. Die Messsysteme bewähren sich als robust und baustellentauglich. Sie werden zunehmend mit wirtschaftlichem Nutzen eingesetzt und haben ein bedeutendes Entwicklungspotenzial.

2. Das System OSMOS

Das System OSMOS (Optical Strand Monitoring System) wird seit rund 15 Jahren in Frankreich und Deutschland entwickelt. Bis heute sind weltweit mehrere Hundert Bauwerke mit diesem System instrumentiert. Das System kommt dort zum Einsatz, wo es darauf ankommt genaueste, hochauflösende Informationen in Echtzeit zu erhalten um so noch rechtzeitig Massnahmen ergreifen zu können. Die Hauptvorteile des Systems lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Hochauflösende Sensoren (im 1000-stel Millimeter Bereich genau)
- Dauerhafte & unempfindliche Sensoren (Glasfaserkabel)
- Dynamische Abtastraten (100 Hz)
- Information in Echtzeit verfügbar
- Information von überall her abrufbar
- Gesamtübersicht übersichtlich im Internet präsentiert
- Sofortige Alarmierung bei Grenzwertüberschreitung
- Speicherung aller Detailinformationen.

Das System eignet sich auf Grund der relativ hohen Aufwendungen für Systemkomponenten im Vergleich zu konventionellen geodätischen Messungen insbesondere für den gezielten Einsatz in Spezialgebieten, wo es auf Grund seiner Systemeigenschaften entweder einen signifikanten Sicherheitsvorteil und/oder einen Kostenvorteil gegenüber konventionellen Systemen schafft.

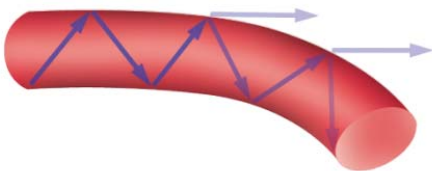
Mit OSMOS ist es möglich, kritische Einflüsse am Bauwerk zu messen bevor man diese mit konventionellen Messmethoden überhaupt nachweisen kann. Dies liegt daran, dass Primäreffekte, wie Spannungen, direkt gemessen werden und man auf diese Weise nicht auf das Auftreten der Sekundäreffekten, wie Setzungen,

warten muss. Deshalb können Gegenmaßnahmen ergriffen werden bevor Schäden (z.B. Risse durch Setzungen) überhaupt auftauchen.

Messprinzip und Monitoringsystem

Das Messsystem OSMOS besteht aus einer Vielzahl verschiedener Sensoren und aus einer Datenerfassungs- und -Übertragungseinheit (Monitoringstation). Das Messverfahren basiert auf der Änderung der optischen Dämpfung von Licht innerhalb von Glasfasern (siehe Bild 1, links).

Dadurch können Dehnungsänderungen mit sehr hoher Genauigkeit gemessen werden. Wegen des starken Einflusses von Temperaturänderungen auf die Verformungen erfolgt parallel dazu immer auch eine Temperaturmessung.



Prinzip der Optischen Saite

Bei Krümmung der Faser geht das Licht an den Krümmungsstellen durch Abstrahlung teilweise verloren. Diese Verluste sind mit Hilfe einer Licht-Dämpfungsmessung exakt erfassbar. Der Sensoreffekt beruht auf der Korrelation der Dämpfungsänderung bzw. Lichtintensität mit der Längenänderung der Optischen Saite.



Bild 1: OSMOS-Messprinzip (links) und optische Sensoren (rechts): optische Saiten und optische Extensometer, sowie Monitoring-Station (unteres Bild)

Optische Sensoren

Sämtliche OSMOS-Sensoren (siehe Beispiele in Bild 1, rechts oben) basieren auf dem Prinzip der Licht-Dämpfungsmessung. Der Basissensor ist die optische Saite. Anhand einer optischen Saite wird die relative Verschiebung der beiden Verankerungspunkte in axialer Richtung der Saite gemessen. Die Messgenauigkeit liegt dabei im μm -Bereich ($\pm 1 \mu\text{m}$). Eine Weiterentwicklung der optischen Saite ist das optische Extensometer zur Messung von Verschiebungen. Die Lebensdauer der Sensoren ist mehr als 20 Jahre.

Fremdsensoren

Ergänzend zu den optischen Sensoren und den Temperatursensoren kann nahezu jede Art von Sensor in das Messsystem integriert werden (Beschleunigungssensoren, Inklinometer, Windsensoren, elektrische Druckmessdosen, etc.).

Zugriff auf die Messergebnisse übers Internet

Die Messergebnisse werden vor Ort in der Monitoringstation zwischengespeichert und über eine Telefonleitung oder über das Internet an den Datenbankserver von OSMOS übertragen. Diese Daten können dann von jedem ans Internet angeschlossenen Computer heruntergeladen und ausgewertet werden. Anhand dieses Verfahrens kann das langfristige Verhalten des Bauwerks überwacht werden.

Alarmierung bei übermässigen Veränderungen

Im Falle von plötzlichen, unerwarteten Verformungsänderungen in der überwachten Tragstruktur ist die Monitoringstation zudem in der Lage, Alarme über sämtliche gängigen Kommunikationskanäle zu versenden. Zudem sind an der Monitoringstation Relais vorhanden, über welche Alarmierungsvorrichtungen (Drehlichter, Alarmhorn, Lichtsignale, etc.) direkt ausgelöst werden können.

Das Prinzip der Überwachung mit OSMOS ist in Bild 2 dargestellt.

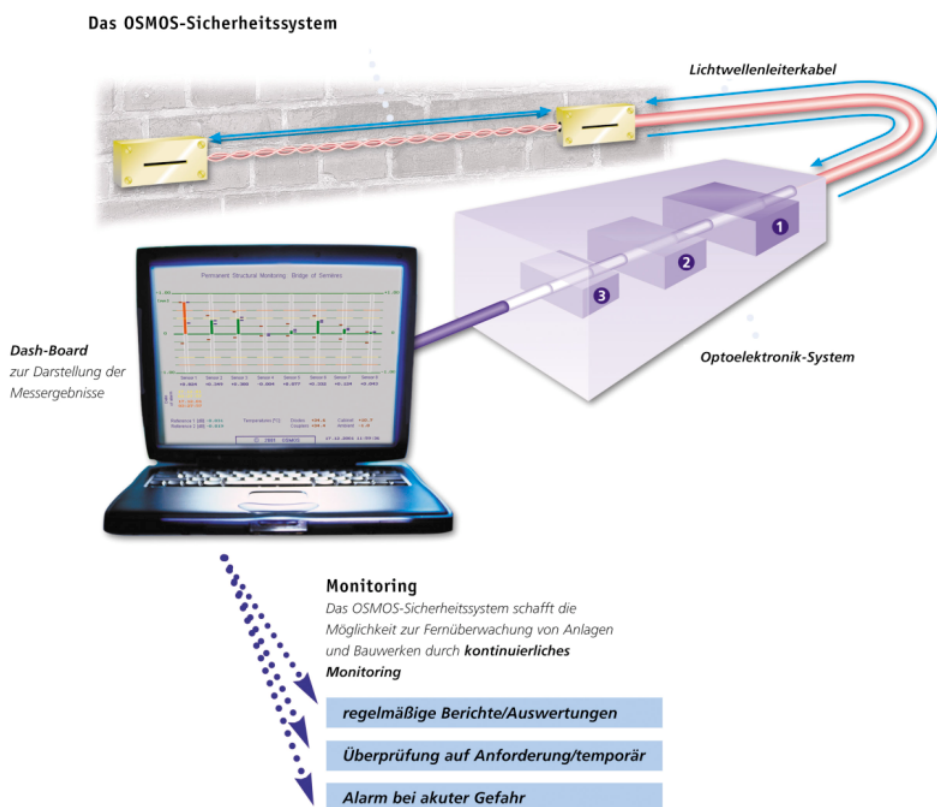


Bild 2: Prinzip der Überwachung mit OSMOS

3. Projektbeispiel Reussbrücke Wassen

Als Pilotprojekt und erste praktische Erfahrung hat Basler & Hofmann in Zusammenarbeit mit dem Tiefbauamt des Kantons Uri die Reussbrücke Wassen mit einem Fernüberwachungssystem ausgerüstet. Die Messungen geben Auskunft über das Schwerverkehrsaufkommen der stark befahrenen Autobahn A2 und über das dynamische Verhalten der Brücke.

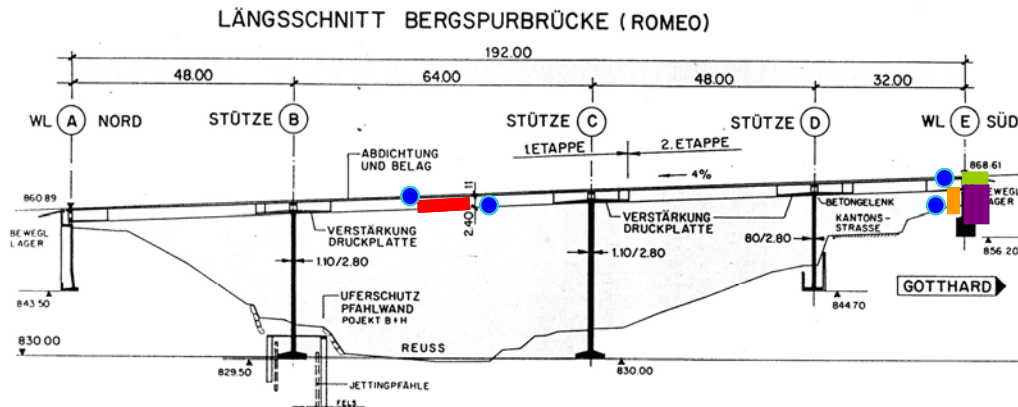


Bild 3: Die Reussbrücke der A2 im Kanton Uri

Gedämpftes Licht als Messgrösse

Die Autobahnbrücke bei Wassen, die 1972 erbaut wurde, überspannt die Reuss sowie die Kantonsstrasse auf einer Länge von 192 m. Sie besteht aus zwei schwimmend gelagerten, parallelen Spannbeton-Hohlkastenträgern. Für das Monitoring wurde einer der beiden Brückenträger mit vier optischen Sensoren ausgestattet (Bild 4). Im Hauptfeld der Brücke ist eine 5 m lange optische Saite angebracht. Sie misst Dehnungen im Hauptfeld und ermöglicht so Rückschlüsse auf Spannungen in der Brückenbewehrung. Am südlichen Widerlager erfassen zwei optische Extensometer die Einsenkung der Lager, wenn grosse Lasten darüber rollen. Ein Taststift überträgt die Bewegung ins Innere des Sensors, wo sie in ein optisches Signal umgewandelt wird. Ein Extensometer für grössere Längenänderungen von bis zu 12 cm misst Veränderungen in der Fugenöffnung unter dem Fahrbahnübergang. Um Zusammenhänge zwischen den Bauwerksveränderun-

gen und der Temperatur zu erfassen, wurden zudem vier Temperatursensoren in der Nähe der optischen Sensoren angebracht.



- 1 Optische Saite
- 2 Extensometer vertikal
- 1 Extensometer horizontal, längs
- 4 Temperatursensoren
- 1 Messschrank mit Monitoring Station



Bild 4: Anordnung der Sensoren in der Bergspur, Fahrtrichtung Süd
Fotos: Extensometer und Messschrank

Online-Monitoring vom Büro aus

Sämtliche Sensoren an der Reussbrücke sind vernetzt: Die optischen Signale werden in einer Monitoring-Station in digitale Daten umgewandelt und auf einem Server gespeichert. Von dort aus können sie von jedem Ort mit Internetanschluss mit einem PC abgerufen und als Grafik angezeigt werden.

Eine „Waage“ unter fließendem Verkehr

Sobald ein Lastwagen auf die Brücke fährt, wird das Gewicht des Fahrzeugs Achse für Achse vom Widerlager auf das Bauwerk übertragen. Die Einsenkung der Lager ist direkt mit der Achslast korreliert. Nach Installation der Sensoren wurden einige Kalibrierfahrten durchgeführt, um den baulichen Besonderheiten der Brücke gerecht zu werden. Die Messungen zeigen, dass bei der Reussbrücke eine Lagereinsenkung von 1 µm circa 1 Tonne Gewicht entspricht. Dementsprechend messen die Extensometer an den Widerlagern die Tonnage eines Lastwagens auf 1 Tonne genau – eine Waage unter fließendem Verkehr. Bild 5 zeigt eine typische Messung einer Kalibrierfahrt auf der Reussbrücke mit einem vierachsigen, 33.5 t schweren LW. Der LW erreicht zunächst die Feldmitte, was zu einer Dehnung im Hauptfeld führt, die von der optischen Saite erfasst

9. Symposium von Ziegler Consultants, 9. Juni 2006 an der EMPA-Dübendorf

wird. Vor dem Verlassen des Bauwerks werden die letzten beiden Widerlager komprimiert und Achse für Achse wieder entlastet. Auswertungen über einen Zeitraum von zwei Monaten zeigen die Verteilung der Gewichtsklassen auf der Brücke (Bild 6): Wie erwartet fallen die meisten Lastwagen in die Gewichtsklassen bis 40 Tonnen (entspricht einer Auslenkung von 0.04 mm). Zahlreiche Fahrzeuge sind jedoch auch deutlich schwerer – und damit zu schwer nach Schweizer Strassenverkehrsvorschriften. Die dynamische „Waage“ erweist sich damit auch als geeignetes Instrument für die Verkehrsüberwachung. Denkbar wäre z. B., die Sensoren am Widerlager mit einer Videokamera zu koppeln, so dass die Verkehrspolizei auffällige Fahrzeuge an einem späteren Kontrollposten gezielt überprüfen kann.

Messung des dynamischen Verhaltens

Wird ein Bauwerk nur von Zeit zu Zeit „vermessen“, so bilden die einzelnen Messwerte das tatsächliche Bauwerksverhalten nicht adäquat ab. Eine zeitweilige Überlastung der Struktur wird zum Beispiel nicht erfasst, wenn sie ausserhalb des Messzeitraums auftritt. Sie kann aber beträchtliche Auswirkungen auf das weitere Bauwerksverhalten haben. Anders bei einem kontinuierlichen Monitoring-System wie es an der Reussbrücke installiert wurde. Der 5 m lange Sensor in der Mitte des Hauptfeldes erfasst Dehnungen im Bauwerk. Aus den Messwerten können Rückschlüsse auf Spannungen in der Bewehrung gezogen und Tragwerksschäden bereits frühzeitig erkannt werden. Unterhaltsarbeiten können so zu einem günstigen Zeitpunkt in Angriff genommen werden.

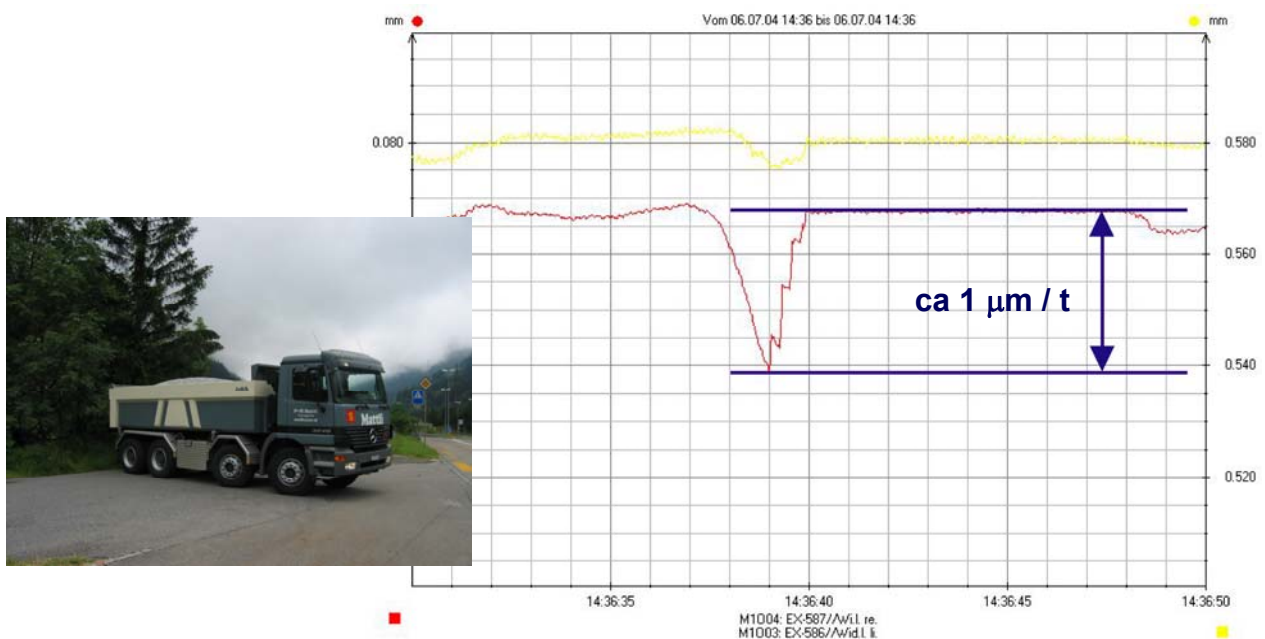


Bild 5: Kalibrierfahrten

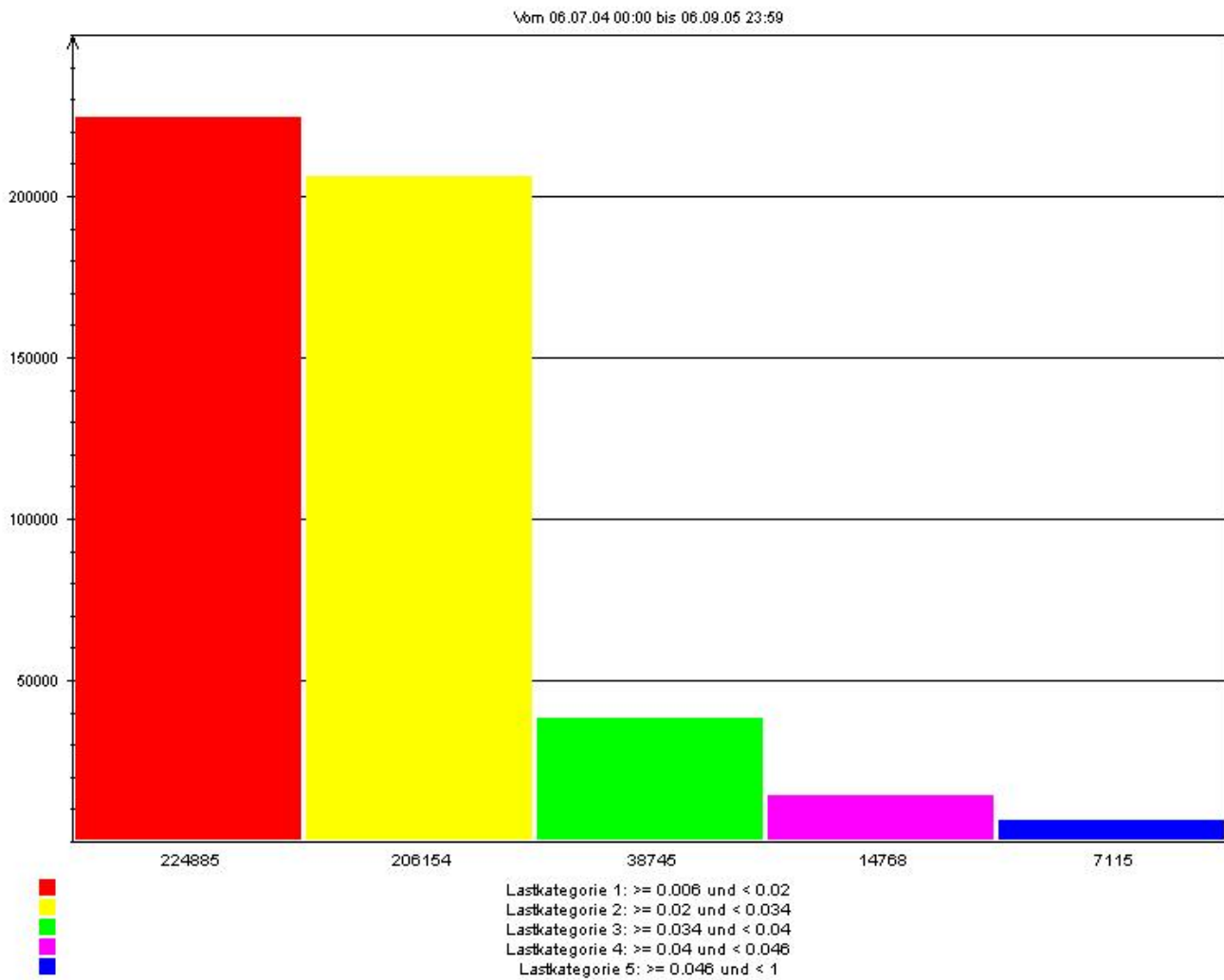


Bild 6: Statistische Auswertung: Weigh in Motion System WIMS
Anzahl Fahrzeuge im Beobachtungszeitraum;
Einteilung in Lastkategorien gemäss der gemessenen Auslenkung in mm

4. Projektbeispiel Bahnhof Bern: Die Welle

Im Zusammenhang mit der erheblichen Angebotserweiterung, welche mit dem Fahrplanwechsel vom 12. Dezember 2004 erfolgte, wurde im Bahnhof Bern eine neue Gleisüberführung erstellt (Bild 7). Diese Überführung ist mit fünf Glasdächern überdeckt. Die Lage dieser Dächer ist stark windexponiert. Aufgrund der komplexen strömungsmechanischen und geometrischen Verhältnisse konnten jedoch keine aus Sicht des Prüfenieurs befriedigenden Nachweise des Schwingungsverhaltens bei extremen Windverhältnissen geführt werden.

Die Schweizerischen Bundesbahnen haben Basler & Hofmann beauftragt, das grösste der fünf Glasdächer mit dem Messsystem OSMOS auszurüsten und dessen Verhalten bei starken Windeinwirkungen messtechnisch zu erfassen.

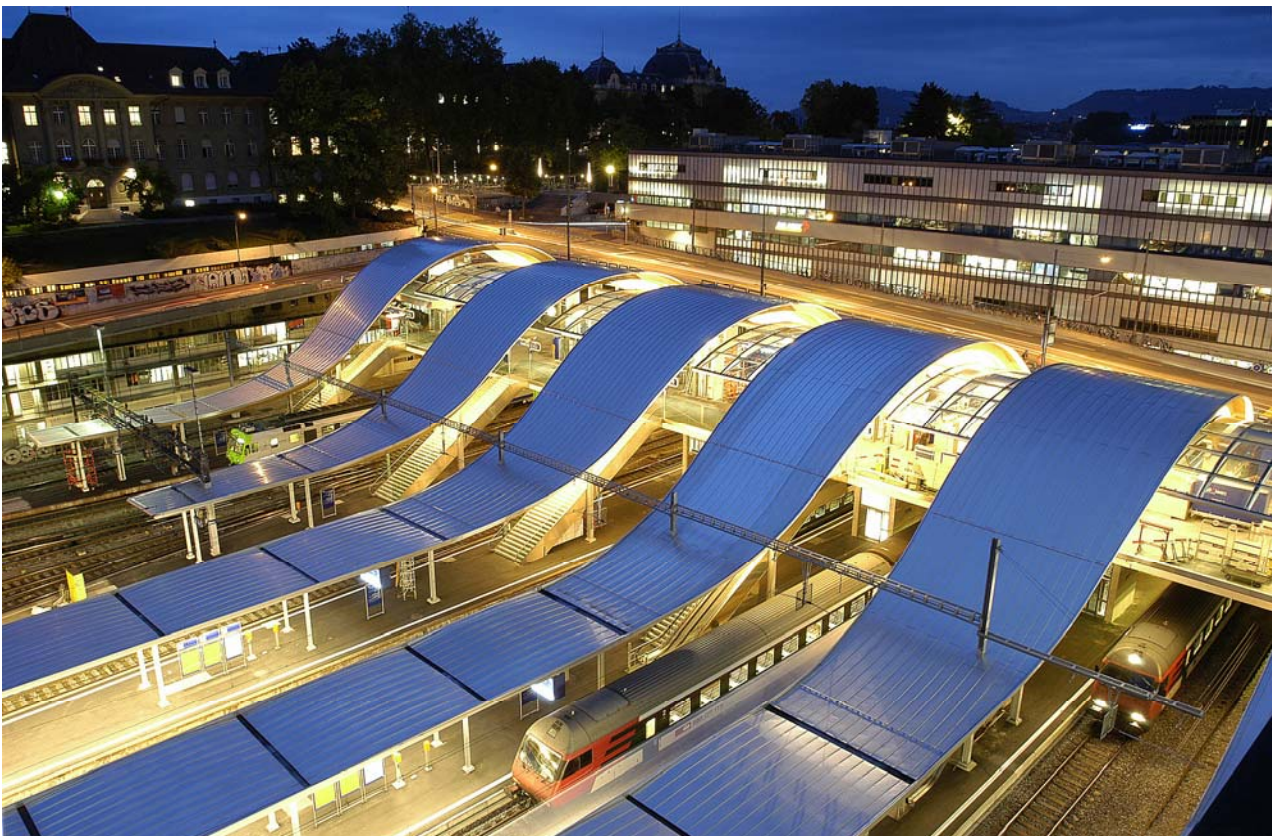


Bild 7: Welle von Bern, die Glaskuppeldächer werden mit OSMOS-Monitoring überwacht

Messinstallation

Das Messsystem besteht aus verschiedenen optischen und konventionellen Sensoren und aus einer Datenerfassungs- und -Übertragungseinheit (Monitoringstation).

Die statischen und dynamischen Messungen (Langzeit- und Kurzzeitverhalten) werden vor Ort in der Monitoringstation zwischengespeichert und über eine Telefonleitung an den Datenbankserver übertragen. Diese Daten können dann von jedem ans Internet angeschlossenen Computer passwortgeschützt heruntergeladen und ausgewertet werden. Anhand dieses Verfahrens wird das langfristige Verhalten des Bauwerks überwacht.

9. Symposium von Ziegler Consultants, 9. Juni 2006 an der EMPA-Dübendorf

Wegen der speziellen Eigenschaften der Struktur (Hauptträger als kombinierter Torsions- und Biegeträger) mussten die horizontalen und vertikalen Biegeschwingungen, aber auch die Torsionsschwingungen erfasst werden. Um all diese Phänomene messtechnisch zu registrieren, wurden die folgenden zwölf Sensoren installiert (Bild 8):

- 1 Optische Saite Sekundärträger West, Länge der Messbasis 2 m
- 2 Optische Saite Sekundärträger Ost, Länge der Messbasis 2 m
- 3 Optische Saite Hauptträger Seite, Länge der Messbasis 1.5 m
- 4 Optische Saite Hauptträger unten Länge der Messbasis 1.5 m
- 5 Windgeschwindigkeitssensor
- 6 Windrichtungssensor
- 7 Beschleunigungssensor Südwest (ACC_SW)
- 8 Beschleunigungssensor Nordost (ACC_NE)
- 9 Neigungssensor Hauptträger
- 10 Beschleunigungssensor Südost (ACC_SE)
- 11 Beschleunigungssensor Nordwest (ACC_NW)
- 12 Temperatursensor Hauptträger

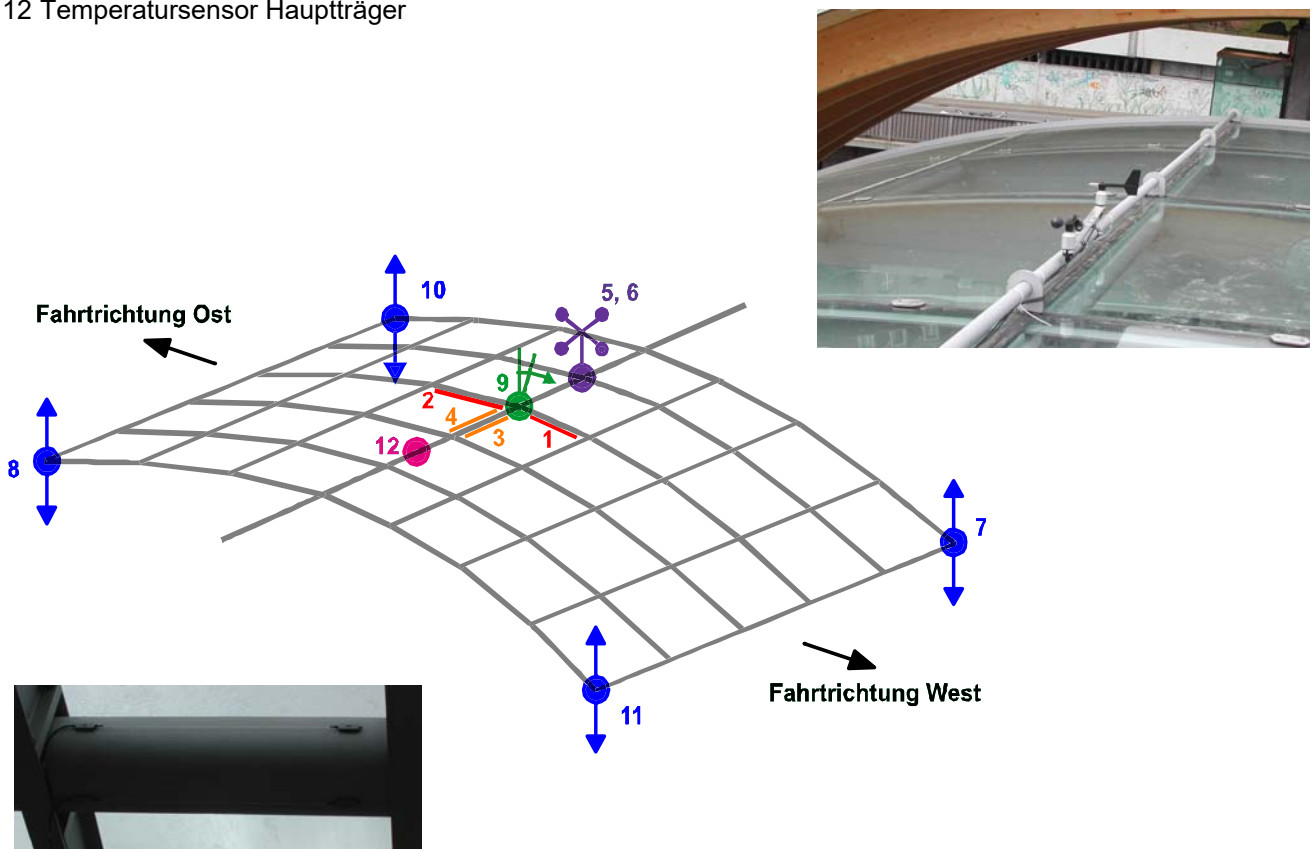


Bild 8: Sensortypen und -anordnung

Fotos: Windgeschwindigkeitssensor und optische Saite am Hauptträger

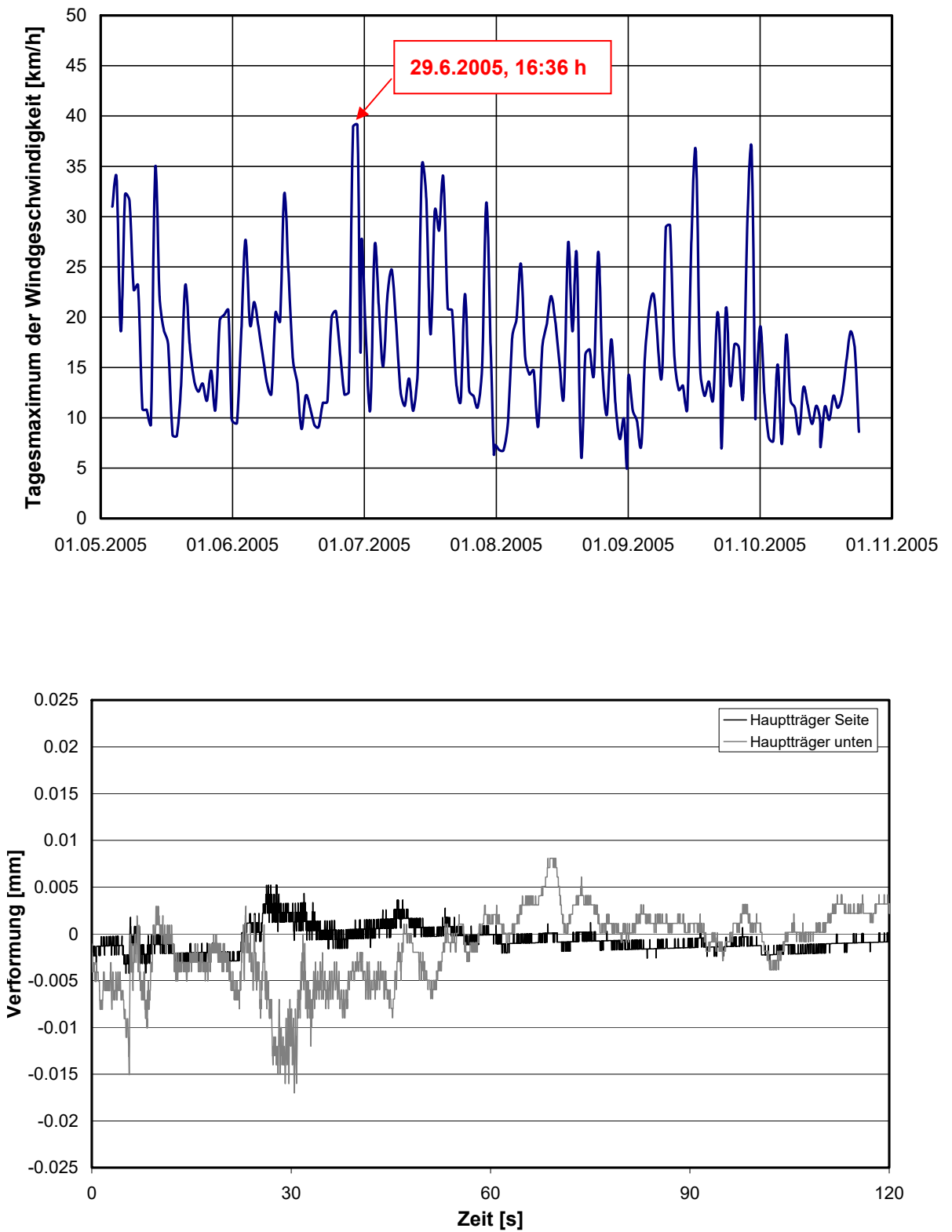


Bild 9: Ausgewählte Messresultate
Tagesmaxima der Windgeschwindigkeiten, Verformungen im Hauptträger bei starkem Wind

Ausgewählte Messresultate und Folgerungen

Bild 9 zeigt den Verlauf der Tagesmaxima der mittleren Windgeschwindigkeiten (Mittelwerte in Messtakten von jeweils 100 s) während eines halben Jahres und die Verformungen in den Randfasern des Hauptträgers bei einem starken Wind.

Die böenartigen Windspitzen bewirken jeweils kurze Ausschläge sowohl bei den Deformationen als auch bei den Beschleunigungen. Diese Ausschläge sind nach einigen Sekunden bis wenigen zehn Sekunden abgeklungen. Gefährliche Resonanzerscheinungen wurden bisher nicht beobachtet.

Die höchste Beanspruchung tritt wie erwartet aufgrund der Torsionsbeanspruchung an den Einspannstellen des Hauptträgers auf. Die aus den Messungen berechneten Spannungsamplituden liegen weit unter der rechnerisch zulässigen Ausnützung.

Die Erfahrungen mit dem Messsystem an der Glaskuppel der "Welle" im Bahnhof Bern sind aus messtechnischer Sicht gut. Die eingesetzten Sensoren liefern aussagekräftige und plausible Resultate zu den massgebenden Beanspruchungen.