



Graz University of Technology

Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung

Masterarbeit

Anforderungen an das Brückenmonitoring und zugehöriger Sensoren in Österreich

Michael Markus Viktor Petschacher, BSc | 11706161

Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dr.-Ing. Markus Krüger

Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung

TU Graz

Graz, 27.05.2024

Danksagung

Vom ganzen Herzen möchte ich mich bei meinen Eltern, Herrn DI Dr. Markus Petschacher und Frau Natalia Petschacher, bedanken. Mein Vater hat mir das Studium ermöglicht und stand mir stets mit Rat bei persönlichen als auch bei fachbezogenen Themen zur Seite. Ohne ihn wäre ich heute nicht da, wo ich bin, und dafür bin ich sehr dankbar. Meine Mutter hat mich emotional immer unterstützt und in den letzten Jahren auf mich geachtet, wenn ich es selbst nicht tat. Ein ebenso großer Dank gilt meiner Großmutter, Frau Monika Petschacher, die immer ein offenes Ohr für mich hat und jede Freude mit mir teilt.

Ich bedanke mich auch bei meinem Betreuer, Univ.-Prof. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dr.-Ing. Markus Krüger, welcher mir die Möglichkeit gegeben hat, mich in einem sehr interessanten Fachgebiet zu entfalten. Die Chancen, die sich durch ihn eröffnen, werde ich nicht vergessen.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei all meinen Freunden und meiner Freundin. Über die letzten Jahre haben sie jeden Erfolg mit mir gefeiert und jedes Versagen mit mir getragen. Ohne diese Unterstützung hätte ich mein Studium vermutlich nicht abgeschlossen.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinem Bruder Matthias Malle bedanken. Seine gute Laune und sein Elan haben mir in den letzten Jahren gezeigt, dass nicht jeder Misserfolg zu Herzen genommen werden soll.

Vielen Dank.

Kurzfassung

In dieser Masterarbeit wird das Monitoring von Brückenbauwerken in Österreich untersucht. Es existiert lediglich eine Richtlinie, die Anforderungen zu diesem Thema regelt. Dennoch ist dieses Themengebiet zukunftsweisend und maßgebend für die Erhaltung der Infrastruktur. Grundlage dieser Arbeit ist die RVS 13-03-01 Monitoring von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken der österreichischen Forschungsgesellschaft für Straße, Schiene und Verkehr. Zu Beginn wird auf die Arten und Ziele des Monitorings eingegangen. Danach werden die Arten des Monitorings kategorisiert und ihre Anforderungen definiert. Hierbei wird vor allem auf die Problematik der Vielfalt von Brückenbauwerken eingegangen. Nach der Anforderung an das Monitoring wird die Anforderung an die Sensorik betrachtet. Sensorarten laut österreichischer Richtlinie werden genauer erläutert und mit Kennwerten bezüglich ihrer Eigenschaften versehen. Zuletzt werden noch Sensorsysteme im Allgemeinen und die weiteren Schritte der Datenauswertung angeschnitten, da diese Themen ein wichtiger Bestandteil des Monitorings sind. Eine genauere Betrachtung von Sensorsystemen und Datenauswertung würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit übersteigen.

Abstract

In this master's thesis, the monitoring of bridge structures in Austria is examined. There exists only one guideline that regulates the requirements for this topic. Nevertheless, this subject area is forward-looking and crucial for the maintenance of infrastructure. The basis of this work is the RVS 13-03-01 Monitoring of Bridges and Other Engineering Structures by the Austrian Research Association for Road, Rail, and Transport. Initially, the types and objectives of monitoring are addressed. Then, the types of monitoring are categorized and their requirements defined. In this context, the focus is particularly on the issue of the diversity of bridge structures. Following the requirements for monitoring, the requirements for sensor technology are considered. Sensor types according to the Austrian guideline are explained in more detail and provided with key values regarding their properties. Finally, sensor systems in general and the subsequent steps of data evaluation are briefly discussed, as these topics are an important part of monitoring. However, a more detailed examination of sensor systems and data evaluation would exceed the scope of this thesis.

Inhalt

1	Einleitung.....	6
2	Ziele des Bauwerksmonitoring	7
2.1	Ziele des Monitorings im Bestand bzw. in der Betriebsphase	7
2.2	Ziele des Monitorings im Neubau	8
2.3	Structural Health Monitoring (SHM).....	8
3	Arten des Monitorings.....	8
4	Anforderungen an die Arten des Monitorings	10
4.1	Allgemeine Anforderungen zum Monitoring von Stahlbetonbrücken	10
4.2	Begriffsdefinition für die Anforderungen an das Monitoring.....	17
4.3	Rissmonitoring	18
4.4	Lagermonitoring.....	21
4.5	Monitoring von Fahrbahnübergängen.....	27
4.6	Monitoring von Ankern und externen Spanngliedern.....	29
4.7	Monitoring von Verformungen und Verschiebungen.....	32
4.8	Monitoring von Dehnungen.....	35
4.9	Monitoring von Schiefstellungen	37
4.10	Monitoring von Verdrehungen	38
4.11	Monitoring von Setzungen.....	39
4.12	Seilkraftmonitoring	42
4.13	Schwingungsmonitoring und Ermittlung von Eigenfrequenzen	43
4.14	Ermüdungsmonitoring über Dehnungen.....	44
4.15	Weigh in Motion (WIM)	46
4.16	Zusammenfassende Anforderungen an das Monitoring	50
5	Sensoren und Sensortypen.....	52
5.1	Kriterien zur Sensorwahl.....	52
5.2	Sensortypen nach RVS 13.03.01 2022	56
6	Zuordnung der Sensorarten zu den Monitoringsarten	89
6.1	Lokales Monitoring	89
6.2	Globales Monitoring von Deformationen.....	93
6.3	Globales Schwingungsbasierendes Monitoring.....	96
6.4	Weigh in Motion	97
7	Sensorsysteme.....	98
7.1	Datenübermittlung bei drahtlosen Systemen	99

7.2	Analyse der Sensordaten	100
8	Zusammenfassung.....	102
9	Ausblick.....	102
10	Literaturverzeichnis.....	104
11	Abbildungsverzeichnis.....	109
12	Tabellenverzeichnis.....	110
Anhang A		112
Anhang B		113
Anhang C		116
Anhang D		117

1 Einleitung

In dieser Arbeit wird das Brückenmonitoring in Österreich und deren Anforderungen inklusive zugehöriger Sensorik behandelt. Grundlage dessen sind die Richtlinien und Verordnungen für den Straßenbau (kurz RVS) für den österreichischen Raum. Vor allem [1] wird hier genau betrachtet. Hierbei handelt es sich um ein 36-seitiges Dokument, welches im Rahmen dieser Arbeit erweitert und genauer ausgeführt werden soll. Das Hauptaugenmerk wird auf die Kapitel *Sensortypen* und *mögliche Anwendungsfälle* der Richtlinie gelegt.

Da die Thematik um das Überwachen von Tragwerken eine sehr umfangreiche und auch fachübergreifende ist, wird sich primär auf die Anwendung bei Straßenbrücken aus Stahlbeton fokussiert. Spannbeton-, Verbund- und Stahlbauwerke sowie Eisenbahnbrücken werden nur indirekt erwähnt. Holzbauten werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Behandelt wird zunächst die Begriffsdefinition zum Monitoring. Diese werden aus [1] übernommen und erweitert. Weiterhin werden die Überschriften aus [1] für *mögliche Anwendungsfälle* übernommen und genauer erläutert. Ziel dieses Kapitels ist die Ermittlung von anwendungsspezifischen Werten, aus welchen Messbereiche, Genauigkeiten, Abtastraten sowie andere Anforderungen bestimmt werden können. Da Brückentragwerke individuelle Verhaltensweisen aufbringen, sind diese primär als Anhaltswerte zu betrachten.

Anschließend werden die eingesetzten Sensorarten laut [1] behandelt und in ihren Eigenschaften angegeben. Am Ende der Arbeit werden diese Sensorarten und Monitoringarten gegenübergestellt.

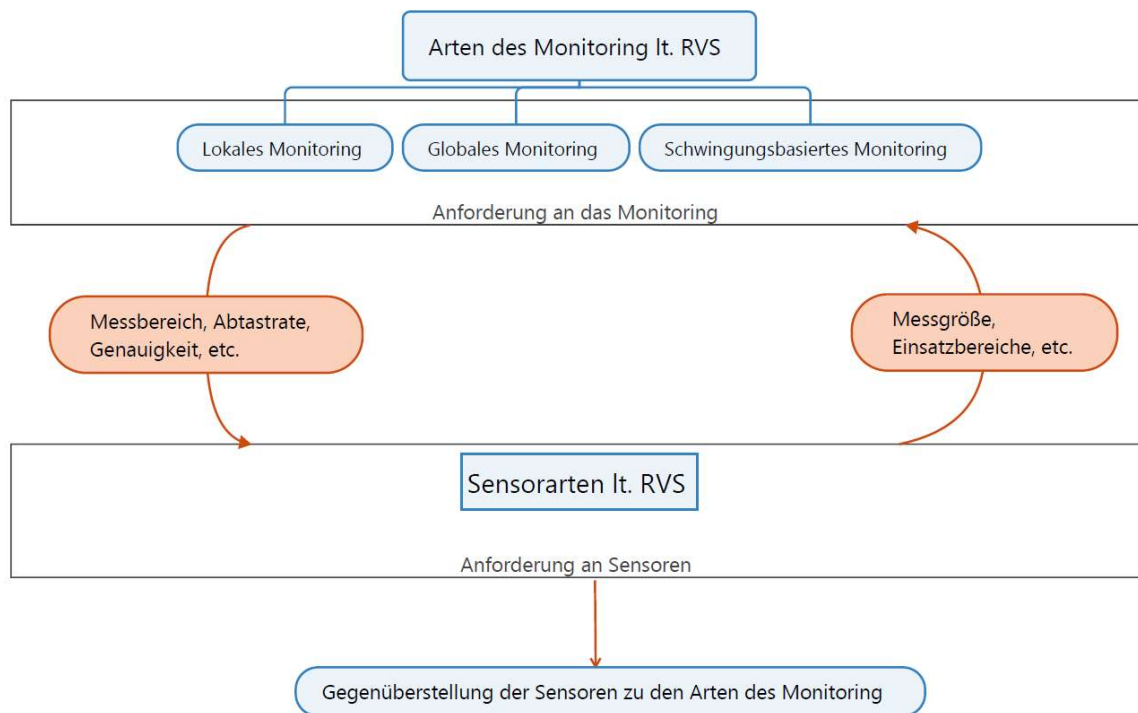


Abbildung 1 Schema zum Aufbau der Arbeit

Letztendlich wird noch ein Exkurs in den Aufbau von Sensorsystemen und der Weiterverarbeitung von Messwerten unternommen.

2 Ziele des Bauwerksmonitoring

Beim Bauwerksmonitoring spricht man von einer zerstörungsfreien, messwertgebundenen, automatisierten Untersuchung oder Überwachung.

Eine Zielsetzung ist aufgrund der großen Vielfalt von Ingenieurbauwerken schwer zu verallgemeinern. Wichtig ist eine individuelle Beurteilung und Aufgabenstellung für das Bauwerk, auf deren Basis das richtige Monitoringsystem, die Frequenz nötiger Daten und auch die Dauer der Untersuchung gewählt werden kann. Trotz dieser Tatsache lassen sich gewisse Ziele verallgemeinern und wie folgt definieren [1]:

- Bewertung des Erhaltungszustands der Konstruktion
- Beurteilung der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit (z.B. in Bezug auf Ermüdung)
- Einschätzung von Risiken (z.B. bei Baumaßnahmen zur Sicherstellung des sicheren Betriebes)
- Überwachung von visuell nicht inspizierbaren Bereichen
- Erfassung des realen Verhaltens von Bauwerken auch unter außergewöhnlichen Belastungen sowie Probelastungen
- Messwertgestützte Maßnahmenbeurteilung (z.B. im Zusammenhang mit Sicherheitsmanagementplänen)
- Durchführung von Lebenszyklusbetrachtungen
- Möglichkeit zur präventiven Instandhaltung durch Bauteilüberwachung

Diese sowie möglicherweise weitere oben nicht genannte Ziele sind vor Beginn eines Monitorings klar zu definieren. Anhand einer klaren Zielsetzung lässt sich die Wahl des richtigen Systems zur Überwachung des gefragten Bauwerkes kosteneffizienter und erfolgreicher umsetzen. Zusammenfassend kann man sagen, dass Monitoring das Ziel hat, Kennwerte und Informationen über ein Bauwerk zu beschaffen und so auch präventiv Kosten zu senken.

2.1 Ziele des Monitorings im Bestand bzw. in der Betriebsphase

Das Monitoring im Bestand ist in den meisten Fällen eine Sondermaßnahme nach einer bereits durchgeführten Bauwerksinspektion. Außerdem dient es als Überwachung der Betriebsphase. Ziele hierbei sind beispielsweise folgende:

- Erkennen kritischer Zustände im Bereich der Gebrauchstauglichkeit, der Dauerhaftigkeit und/oder der Tragfähigkeit.
- Bewertung der (Rest-) Lebensdauer
- Fehlstellenüberwachung und Überwachung möglicher Zustandsverschlechterungen
- Bereitstellung von statischen/dynamischen Werten für weitere Berechnungen
- Unterstützung für einen Maßnahmenentwurf bei Sanierungsaufgaben

Hier gilt der Grundsatz: Die Aufgabenstellung definiert die Zielsetzung des Monitorings. Sei es als Antwort auf eine Zustandseinschätzung auf Basis einer Bauwerksprüfung, der Schadensprävention oder schlicht zur Datenbeschaffung über ein Bauwerk. Bei permanentem Monitoring eines kritischen Bauwerkes kann das Messsystem gleichzeitig als Frühwarnsystem mit integriertem Alarmplan dienen.

2.2 Ziele des Monitorings im Neubau

Beim Monitoring im Neubau unterscheidet man in zwei grundlegende Bereiche: Monitoring der Bauphase mit temporärem oder mit permanentem Messsystem. Bei einem temporären Monitoring werden der Bauverlauf und die Bauabschnitte überwacht, wo nach Ende der Bauphase das Messsystem demontiert wird. Bei permanentem Monitoring ist es angedacht, dass die Sensorik nach Fertigstellung vorhanden bleibt und weitere Messungen in der Betriebsphase durchführt. Für weiteres gelten dieselben Grundsätze der Zielfindung wie beim Monitoring im Bestand (siehe Kapitel 2.1).

Ein Monitoring in der Bauphase lässt die Überwachung von Bauabschnitten und die Dokumentation verschiedener Belastungszustände zu. Es wird eingesetzt, um in der Bauausführung die Einhaltung technischer Spezifikationen und Standards sicherzustellen. Hierbei ist der Entschluss der Überwachung in der Planungsphase zu treffen und die Integration gewählter Systeme in der Planung zu berücksichtigen.

Bei dauerhaft angebrachten Sensorsystemen ist zu beachten, dass die Lebensdauer der Sensorik in der Regel deutlich geringer ist als die des Bauwerkes. Der Vorteil der Integration von messwertgebundenen Systemen im Neubau ist, dass Messungen mit Beginn der Belastung möglich sind. Das bedeutet, dass das reale Tragverhalten des betrachteten Bauteils beobachtet wird und somit dieses mit dem geplanten Verhalten verglichen werden kann. Weiterhin kann für den gewählten Messpunkt eine komplette Lasthistorie erstellt werden.

2.3 Structural Health Monitoring (SHM)

Als Synonym für das Bauwerksmonitoring wird oft der Begriff *Structural Health Monitoring* verwendet. Dieser wird von der „International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (ISHMII)“ wie folgt definiert:

„Structural Health Monitoring (SHM) ist eine Art von System, das auf Abruf Informationen über wesentliche Veränderungen oder Schäden in einer Struktur liefert.“[2]

3 Arten des Monitorings

In [1] wird in folgende vier Arten des Monitorings unterschieden:

- Globales Monitoring
- Lokales Monitoring
- Statisches Monitoring
- Dynamisches Monitoring

Weitere gängige Unterteilungen sind noch:

- Ereignisbasiertes Monitoring
- Monitoring von Einwirkungen
- Monitoring von Widerständen
- Direkte Messung
- Indirekte Messung

Diese angeführten Begriffe werden folgend in Tabelle 1 beschrieben:

Tabelle 1 Begriffe zu den Arten des Bauwerksmonitorings

Bezeichnung	Beschreibung
<u>Globales Monitoring</u>	Hiermit werden mit einer messtechnischen Erfassung Rückschlüsse auf das Gesamtverhalten des Bauwerkes gewonnen. Fokus liegt auf tragenden Elementen (Pfeiler, Hauptträger, etc.).
<u>Lokales Monitoring</u>	Dies bezieht sich rein auf das Verhalten einzelner Bauteile oder auch einzelner Fehlstellen, wie zum Beispiel Querträger, Lager, aber auch einzelne Risse, Verschiebungen und andere.
<u>Statisches Monitoring</u>	Bei Messintervallen von weniger als eine Messung pro Minute ($1/60 \text{ Hz} = 0,01667 \text{ Hz}$) spricht man von einem statischen Monitoring. Angewendet wird es bei zeitlich langsam stattfindenden Veränderungen am Bauwerk [1].
<u>Dynamisches Monitoring</u>	Bei dynamischem Monitoring werden zeitlich stark veränderliche Messgrößen erfasst, welche in der Regel eine Messrate von über $1/60 \text{ Hz}$ benötigen. Diese kann auch hochfrequente Messungen mit Messraten von mehreren KHz beinhalten.
<u>Ereignisbasiertes Monitoring</u>	Ereignisbasiertes Monitoring beschreibt das kurzfristige, meist dynamische Monitoring von einzelnen plötzlich auftretenden Ereignissen. Diese werden über eine Anregung eines Sensors aktiviert und veranlassen die Messvorrichtung, die Messung zu vollziehen.
<u>Monitoring von Einwirkungen</u>	Beim Monitoring von Einwirkungen versteht man die Messung der (dynamischen) Belastungen auf ein Bauwerk. Dies umfasst sowohl Umwelteinwirkungen wie beispielsweise Temperatur, Erdbeben oder Windbelastungen als auch Nutz- und Verkehrslasten.
<u>Monitoring von Widerständen</u>	Beim Monitoring von Widerständen werden für den Widerstand verantwortliche Materialkennwerte gemessen. Dies sind zum Beispiel Steifigkeit, Verbundwirkung, Verformung oder auch Eigenfrequenzen.
<u>Direkte Messung</u>	Wenn die Messgröße eines Sensors mit der gefragten übereinstimmt, spricht man von einer direkten Messung.
<u>Indirekte Messung</u>	Indirekte Messungen ergeben sich, wenn die zu ermittelnde Messgröße nicht mit der physikalischen Messgröße des gewählten Sensors übereinstimmt, jedoch auf Basis der gemessenen Werte ermittelt werden kann.

4 Anforderungen an die Arten des Monitorings

Unter Anforderungen an das Monitoring wird verstanden, welche Einflüsse, Bereiche, Messgrößen und /-raten, Genauigkeiten und mögliche andere Bedingungen notwendig sind, um eine Monitoringaufgabe erfüllen zu können. Diese sollen die Randbedingungen definieren, nach welchen ein geeignetes Sensorsystem ausgewählt werden kann.

Die Auflistung möglicher Anwendungsfälle aus [1] wird hier genauer betrachtet und erweitert. Die Überschriften werden folgend gewählt:

- Lokales Monitoring
 - Rissmonitoring
 - Lagermonitoring
 - Monitoring von Fahrbahnübergängen
 - Monitoring von Ankern und externen Spanngliedern
- Globales Monitoring
 - Monitoring von Deformationen
 - Monitoring von Verformung oder Verschiebung
 - Monitoring von Dehnungen
 - Monitoring von Schiefstellungen
 - Monitoring von Verdrehungen
 - Monitoring von Setzungen
 - Schwingungsbasiertes Monitoring
 - Seilkraftmonitoring
 - Schwingungsmonitoring
 - Ermüdungsmonitoring
 - Weigh in Motion

In Kapitel 4.1 werden zunächst die allgemeinen Anforderungen an das Monitoring von Stahlbetonbrücken diskutiert. In den darauffolgenden Kapiteln werden dann einige spezifische Anwendungsfälle im Detail betrachtet. Kapitel 4.16 fasst die Ergebnisse kurz zusammen und gibt allgemeine Bedingungen an ein Brückenmonitoring an.

4.1 Allgemeine Anforderungen zum Monitoring von Stahlbetonbrücken

Beim Monitoring von Stahlbetonbrücken sind zwei Fragestellungen zu unterscheiden. Die eine Fragestellung betrifft die Gebrauchstauglichkeit, die andere die Tragfähigkeit bzw. Tragwerkssicherheit. Im Folgenden wird der Fokus auf die Gebrauchstauglichkeit gelegt. Folgende Aspekte sind hinsichtlich des Nachweises der Gebrauchstauglichkeit im Rahmen der statischen Bemessung in der Regel laut [3] zu überprüfen:

- Begrenzung der maximal zulässigen Beton- und Stahlspannung
- Nachweisführung bezüglich Rissbreiten und der Rissbreitenbeschränkung
- Begrenzung der Verformung (vorwiegend Durchbiegung im Oberbau)
- Nachweis zur Empfindlichkeit gegenüber Schwingungen und schwingungsbasierter Ermüdung

Aber auch materialbezogene Dauerhaftigkeitsaspekte spielen im Rahmen der Gebrauchstauglichkeit eine Rolle. Zu den Wichtigsten gehören zum Beispiel:

- Widerstand gegenüber carbonatisierungs- und chloridinduzierter Korrosion
- Korrosionsrisiko von Stahlbauteilen

Um die Ansätze zu den Anwendungsfällen im Brückenmonitoring nachvollziehen zu können, werden folgend die Aspekte zur Gebrauchstauglichkeit näher erläutert.

4.1.1 Begrenzung der Beton- und Stahlspannungen im Gebrauchszustand

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Stahlbetonbauteilen sind Beton- und Stahlspannungen zu begrenzen. Dies beinhaltet, dass maximal zulässige Festigkeiten der Materialien nicht ausgeschöpft werden, sondern um Sicherheitsbeiwerte sowohl materialseitig als auch einwirkungsseitig reduziert werden. Dadurch ergeben sich reduzierte maximal zulässige Spannungen für Stahl und Beton wie folgt [3]:

1. Ausschluss von nicht-linearem Kriechen beim Beton: Hierbei wird gemäß [4] Kapitel 7.2 angenommen, dass das Kriechen bei einer Belastung von weniger als 45% der Druckfestigkeit sich über die Zeit linear verhält und somit nicht-lineares Kriechen ausgeschlossen werden darf.

$$\sigma_{c,perm} \leq 0,45 * f_{ck} \quad (1)$$

2. Ausschluss von Längsrissen im Beton: Die Spannung des Betons ist laut [4] Kapitel 7.2 zu beschränken, um ein Auftreten von Längsrissen zu verhindern. Besonders wichtig ist die Spannungsbegrenzung, wenn keine anderen Maßnahmen wie z.B. eine erhöhte Betondeckung in der Druckzone oder eine Umschnürung der Druckzone durch Querkraftbewehrung getroffen wurde.

$$\sigma_{c,rare} \leq 0,60 * f_{ck} \quad (2)$$

3. Ausschluss von dauerhaft geöffneten Rissen: Hierbei wird laut [4] Kapitel 7.2 die Stahlspannung auf einen Wert kleiner als den der Fließgrenze beschränkt. Dies soll nicht elastische Dehnungen in der Bewehrung und somit nicht akzeptable Rissöffnungen und Verformungen verhindern.

$$\sigma_{s,rare} \leq 0,80 * f_{yk} \quad (3)$$

Mit:

$\sigma_{c,perm}$... Betonspannung beim permanenten Lastfall (Wiederkehrperiode: 1 Tag)

$\sigma_{c,rare}$... Betonspannung beim seltenen Lastfall (Wiederkehrperiode: 50 Jahre)

$\sigma_{s,rare}$... Stahlspannung beim seltenen Lastfall (Wiederkehrperiode: 50 Jahre)

f_{ck} ... Druckfestigkeit des Betons

f_{yk} ... Fließgrenze des Betonstahls

Zugehörig werden anschließend die Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton und Bewehrungsstahl gezeigt. Für Beton ist diese aus [5] Kapitel 3.1.5 Bild 3.2 entnommen. Diese Spannung-Dehnungs-Beziehung wird für nicht-lineare Verfahren und Verformungsberechnungen herangezogen.

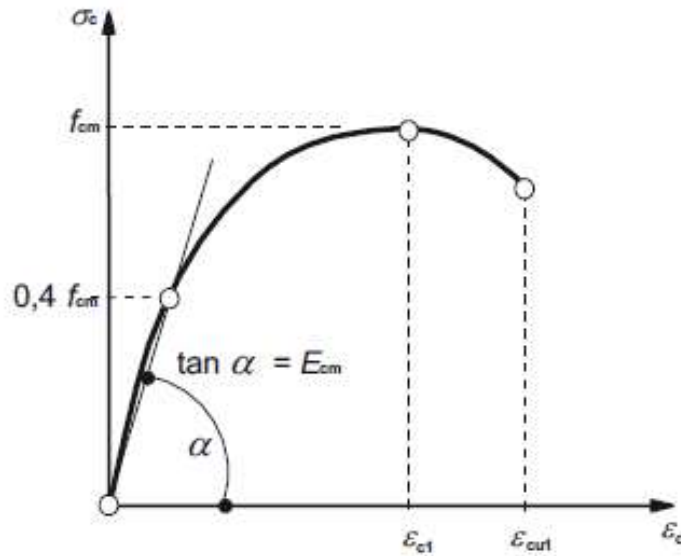


Abbildung 2 Beton Spannungs-Dehnungs-Linie für Schnittgrößenermittlung mit nicht-linearen Verfahren und für die Verformungsberechnung [5]

Die in Abbildung 2 gezeigte Arbeitslinie wird lt. [5] mit folgender Formel beschrieben:

$$\frac{\sigma_e}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \quad (4)$$

Mit:

σ_e ... vorhandene Betonspannung

f_{cm} ... mittlere Betondruckfestigkeit

$\eta = \epsilon_c / \epsilon_{c1}$

ϵ_{c1} ... Stauchung bei Höchstwert der Betondruckspannung (siehe Anhang A)

$k = 1,05 \cdot E_{cm} \cdot |\epsilon_{c1}| / f_{cm}$

Die Formel (4) gilt für den Bereich $0 < |\epsilon_c| < |\epsilon_{cu1}|$, wobei ϵ_{cu1} der rechnerischen Bruchdehnung entspricht (siehe Anhang A). Mittels des Zusammenhanges der Formel (4) und des Anhang A lässt sich eine Tabelle erstellen, welche die zugelassenen Dehnungen aus Punkt 1 und 2 für jede Betongüte zeigt. Hierzu wird Formel (4) zuerst auf η umgestellt:

$$\eta = \frac{f_{cm}k - k\sigma_e + 2\sigma_e \pm \sqrt{(f_{cm} - \sigma_e)(f_{cm}k^2 - k^2\sigma_e + 4k\sigma_e - 4\sigma_e)}}{2f_{cm}} \quad (5)$$

Durch Einsetzen des Ausdrucks $\eta = \epsilon_c / \epsilon_{c1}$ ergibt sich die Formel für die nichtlineare Ermittlung von Dehnungen abhängig von der Betondruckspannung.

$$\epsilon_c = \epsilon_{c1} \cdot \frac{f_{cm}k - k\sigma_e + 2\sigma_e \pm \sqrt{(f_{cm} - \sigma_e)(f_{cm}k^2 - k^2\sigma_e + 4k\sigma_e - 4\sigma_e)}}{2f_{cm}} \quad (6)$$

Abbildung 2 bezieht sich auf die mittlere Betondruckfestigkeit. Da in der Bemessung die Begrenzungen der Betonspannungen sich auf die 5% Quantile beziehen wird, um möglichst realitätsnahe Dehnungen errechnen zu können, für σ_e die Formel (1) und (2) (Seite 11) eingesetzt. So

bekommt man die zugelassenen Grenzspannungen bezogen auf das mittlere Verhalten des Materials und somit auch die zugehörigen Dehnungen, welche in Tabelle 2 gezeigt werden.

Tabelle 2 Zulässige Betondehnungen in Abhängigkeit der Spannungsbegrenzungen lt. Gebrauchstauglichkeitsanforderungen

Betongüte	f_{ck} [N/mm ²]	f_{cm} [N/mm ²]	ϵ_{c1} [‰]	$0,45 \cdot f_{ck}$ [N/mm ²]	$\epsilon_{c,0,45}$ [‰]	$0,60 \cdot f_{ck}$ [N/mm ²]	$\epsilon_{c,0,60}$ [‰]
C12/15	12	20	1,80	5,40	0,213	7,20	0,296
C16/20	16	24	1,90	7,20	0,265	9,60	0,370
C20/25	20	28	2,00	9,00	0,320	12,00	0,447
C25/30	25	33	2,10	11,25	0,384	15,00	0,535
C30/37	30	38	2,20	13,50	0,432	18,00	0,603
C35/45	35	43	2,25	15,75	0,484	21,00	0,673
C40/50	40	48	2,30	18,00	0,533	24,00	0,737
C45/55	45	53	2,40	20,25	0,580	27,00	0,802
C50/60	50	58	2,45	22,50	0,623	30,00	0,858
C55/67	55	63	2,50	24,75	0,663	33,00	0,911
C60/75	60	68	2,60	27,00	0,703	36,00	0,967
C70/85	70	78	2,70	31,50	0,774	42,00	1,059
C80/95	80	88	2,80	36,00	0,853	48,00	1,163
C90/105	90	98	2,80	40,50	0,906	54,00	1,228

Für Bewehrungsstahl ist die Arbeitslinie für warmgewalzten (a) und kaltgewalzten (b) Stahl zu unterscheiden. Diese werden in Abbildung 3 gezeigt und sind aus [5], Kapitel 3.2.4 Bild 3.7 entnommen.

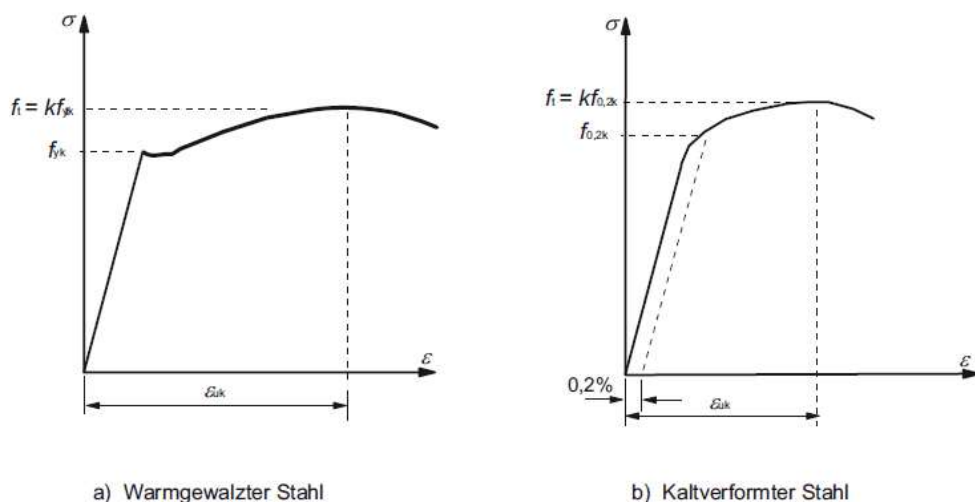


Abbildung 3 Spannungs-Dehnungs-Diagramm für typischen Betonstahl [5]

Die maximal zulässige Dehnung aus Punkt 3 fällt hier in den linearen Bereich. So lässt sich diese mit der angegebenen Fließgrenze und dem E-Modul errechnen.

Tabelle 3 Zulässige Betonstahldehnungen in Abhängigkeit der Spannungsbegrenzungen lt. Gebrauchstauglichkeitsanforderungen

Bezeichnung	f_{yk} [N/mm ²]	E_{sm} [N/mm ²]	ϵ_{yk} [‰]	$0,8 \cdot f_{yk}$ [N/mm ²]	$\epsilon_{s,0,80}$ [‰]
BSt 500 A/B	500	200000	2,50	400	2,00
BSt 550 A/B	550		2,75	440	2,20
BSt 600 A	600		3,00	480	2,40

In Tabelle 3 wurden die zulässigen Dehnungen mittels des linearen Zusammenhangs von $\sigma = E \cdot \varepsilon$ berechnet, wobei σ hier die begrenzte Spannung mit $0,8 \cdot f_{yk}$ und E der E-Modul des Bewehrungsstahls ist.

4.1.2 Rissbreiten und Rissbreitenbeschränkung bei Stahl- und Spannbetonbauwerken

Risse in Stahlbetonbauteilen treten auf, wenn die maximal aufnehmbare Zugbruchdehnung des Betons überschritten wird. Allgemein werden Stahlbetonbauteile für den Zustand II, d.h. den gerissenen Zustand bemessen. Bauteile aus Spannbeton werden hingegen in der Regel für den Zustand I, den ungerissenen Zustand bemessen. Aus Gründen der Dauerhaftigkeit, aber auch aufgrund der Anforderung an eine Ankündigung eines Bauteilversagens, wird in der Praxis die maximal zulässige rechnerische Rissbreite beschränkt, wobei auch für Spannbetonbauteile eine Rissbildung nicht grundsätzlich ausgeschlossen wird. Anhaltswerte für maximal zulässige Rissbreiten in Abhängigkeit von der Bauweise und den Expositionsklassen sind in [6] Kapitel 9.2.1 aufgeführt (siehe Tabelle 4). Typische zulässige Rissbreiten liegen hiernach im Bereich von 0,2 bis 0,3 mm.

Tabelle 4 Werte für maximale Rissbreite lt. ÖNORM B 1992-2-1:2015 [6]

Zeile	Expositions- klasse	Bauteile aus Stahlbeton und Bauteile aus Spannbeton mit Spanngliedern ohne Verbund		Bauteile aus Spannbeton mit Spanngliedern mit nachträglichem Verbund		Bauteile aus Spannbeton mit Spanngliedern im sofort- tigen Verbund ^a	
		w_{\max} mm	Dekom- pressions- nachweis	w_{\max} mm	Dekom- pressions- nachweis	w_{\max} mm	Dekom- pressions- nachweis
1	XC1	0,3 ^b unter quasi- ständiger EK ^c	nicht erforder- lich	0,2 unter häufiger EK ^c	unter quasi- ständiger EK ^c	0,2 unter häu- figer EK ^c	unter quasi- ständiger EK ^c
2	XC2, XC3 ^d , XC4 ^d , XD1, XF1, XF2, XF3	0,3 unter quasi- ständiger EK ^c		0,2 unter häufiger EK ^c	unter quasi- ständiger EK ^c	0,2 unter cha- rakteristischer EK ^c	unter häufi- ger EK ^c
3	XA1, XA2, XD2	0,3 unter quasi- ständiger EK ^c		0,2 unter cha- rakteris- tischer EK ^c	unter häufi- ger EK ^c	0,2 unter cha- rakteristischer EK ^c	unter häufi- ger EK ^c
4	XA3, XD3, XF4	0,3 unter häufiger EK ^c		0,2 unter cha- rakteris- tischer EK ^c	unter häufi- ger EK ^c	–	unter cha- rakteris- tischer EK ^c
ANMERKUNG Zeile 1 gilt für nicht der Witterung ausgesetzte Brücken und ähnliche Tragwerke. Zeile 2 gilt für allgemeine Brücken mit Abdichtung und Belag oder Teile von Brücken im Sprühnebelbereich. Zeile 3 gilt für Sonderfälle. Zeile 4 gilt z. B. für direkt befahrene Brücken ohne Abdichtung und Belag.							
^a Für Eisenbahnbrücken nicht zulässig.							
^b Bei der Expositions-kategorie XC1 hat die Rissbreite keinen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit. Der angegebene Grenzwert zur Beschränkung der Rissbreite wird zur Wahrung eines akzeptablen Erscheinungsbildes gesetzt.							
^c Charakteristische, häufige, quasi-ständige EK sind Einwirkungskombinationen nach ÖNORM EN 1990, wobei folgende Änderungen zu berücksichtigen sind: – Stützenverschiebungen sind als veränderliche Einwirkung anzusetzen, die Kombinationsbeiwerte sind gleich jenen der Temperaturänderungen anzunehmen. – Für Straßenbrücken ist $\psi_2 = 0,3$ für alle vertikalen Einwirkungen aus Lastmodell 1 gemäß ÖNORM EN 1991-2. – Für Eisenbahnbrücken ist ψ_2 gemäß ÖNORM B 1990-2 zu bestimmen. – Unter der quasiständigen EK darf der Einfluss der Temperaturgradienten vernachlässigt werden.							
^d Bei Anforderungen an die Dichtheit des Bauwerkes sind geringere Rissbreiten einzuhalten.							

4.1.3 Begrenzung der Vertikalverformung bzw. Durchbiegung von Brückenüberbauten

Verformungen spielen beim Brückenbau vorwiegend beim Brückenüberbau eine Rolle. Hier gilt es, die maximalen Durchbiegungen aufgrund der Eigen- und Verkehrslast auf ein akzeptables Maß zu beschränken. Die maximal zulässige Durchbiegung ist dabei wesentlich von der Bauwerksnutzung abhängig.

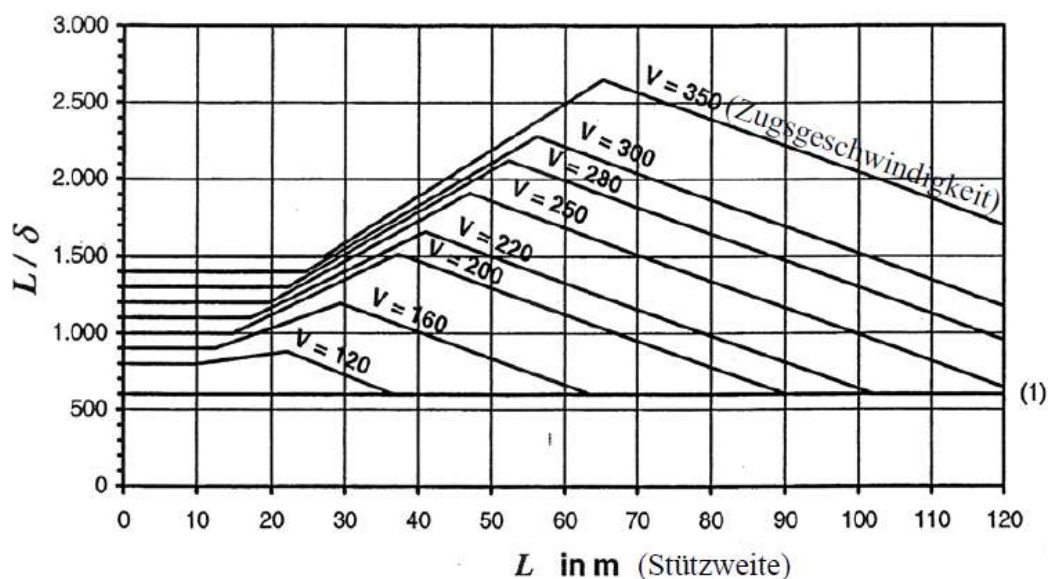
Für Eisenbahnbrücken werden gegenüber Straßenbrücken geringere maximale Durchbiegungen gefordert [3]. Maximal zulässige Durchbiegungen liegen hiernach bei maximal $L/600$ (L =Stützweite),

wobei die maximal zulässige Durchbiegung insbesondere von der Stützweite, aber auch von der Zuggeschwindigkeit bestimmt wird und daher oftmals deutlich geringer angesetzt wird (siehe Abbildung 4). Für Straßenbrücken gelten in der Regel geringere Anforderungen. Im [5] werden keine festen Angaben zur zulässigen Verformung von Straßenbrücken angegeben. In [7] wird die Durchbiegung allerdings mit einem maximalen Wert von $L/410$ beschränkt (siehe Tabelle 5), um den Fahrkomfort gewährleisten zu können.

Bei der Bemessung ist zu beachten, dass neben der elastischen Verformung aus dem Eigengewicht und der Verkehrslast weitere Einflüsse z.B. aus Kriechen, Schwinden und Temperatur berücksichtigt werden müssen.

Tabelle 5 Beschränkung der Verformung für den Reisekomfort bei Stahlbeton-Straßenbrücken [7]

Stützweite L [m]	Bundesautobahnen	Bundes- und Landesstraßen	Kreis- und Gemeindestraßen
$L < 16$	$L/410$	$L/410$	$L/410$
$16 < L < 25$	$L/410$	$L/410$	$L/410$
$25 < L < 40$	$L/480$	$L/410$	$L/410$
$40 < L < 55$	$L/480$	$L/410$	$L/410$
$L > 55$	$L/540$	$L/410$	$L/410$



Zusatzregeln: - Diagramm gilt für Einfeldträgerkette mit 3 oder mehr Feldern
 - 0,9- fache Werte bei Durchlaufträger mit 3 oder mehr Feldern
 - 0,7- fache Werte bei sonstigen Balkentragwerken

Allgemein gilt: $\delta < L / 600$ (eingleisiges TW) , $\delta < L / 800$ (mehrgleisiges TW)

Abbildung 4 Beschränkung der Verformung für den Reisekomfort bei Eisenbahnbrücken [8]

4.1.4 Nachweisführung bezüglich Schwingung und schwingungsbasierter Ermüdung

Eigenfrequenz

Schwingungen sind im Brückenbau besonders genau zu betrachten. Hierbei sind zwei Aspekte maßgebend. Der erste Punkt gilt der Eigenfrequenz der Brücke, welche in der Bemessung genau zu ermitteln ist. Grund hierfür ist, dass eine dynamische Belastung und die Eigenfrequenz nicht in Resonanz treten dürfen, da es sonst zu unangenehmen Schwingungen, aber auch erheblichen Schäden an der Baustruktur kommen kann. Der zweite Punkt ist Schwingung in Form von Spannungsschwankungen. Anzumerken ist, dass obwohl Schwingungsempfindlichkeit und

schwingungsbasierte Ermüdung hier zusammengefasst betrachtet werden, die Ermüdung Teil der Nachweise zur Standsicherheit des Tragwerkes ist, während die Schwingungsanfälligkeit hauptsächlich in der Gebrauchstauglichkeit betrachtet wird.

Für die Ermittlung der Eigenfrequenz der Brücke sind Steifigkeit, Dämpfung und Masse die definierenden Faktoren. In Abbildung 5 ist eine Studie zu den Grundfrequenzen von 224 Straßenbrücken in Abhängigkeit ihrer größten Spannweite gezeigt. Daraus lässt sich schließen, dass für die erste Eigenfrequenz oder Grundfrequenz Werte von 1 bis ungefähr 9 Hz zu erwarten sind.

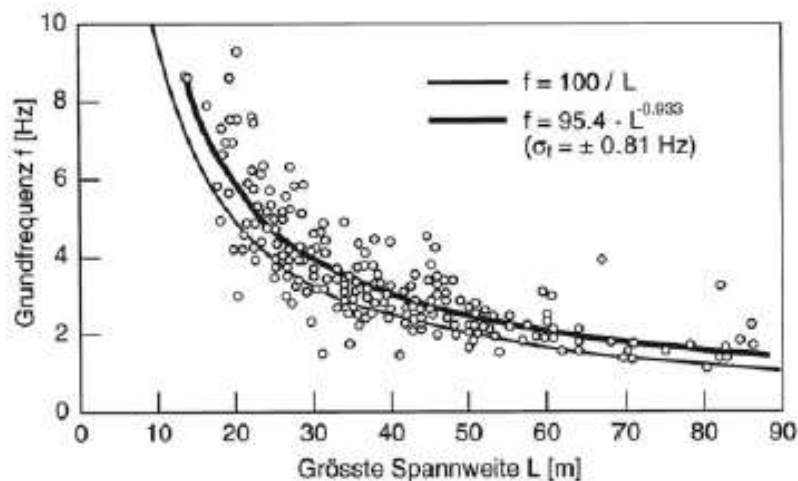


Abbildung 5 Grundfrequenz von Straßenbrücken im Bezug auf die größte Spannweite [9]

Ermüdung

Für die Bemessung hinsichtlich der Ermüdung können mehrere Ansätze getroffen werden. Üblich ist die Anwendung von Wöhlerlinien oder auch S-L-Kurven (Spannung-Lebensdauer-Kurve) (gezeigt für Stahl in Abbildung 6). Diese geben die Ermüdungsfestigkeit für bestimmte Materialien in Anzahl der Lastwechsel und der erwarteten Spannungsänderungen wieder. Anhand dieser materialspezifischen Kurven wird dann meist die Schädigungshypothese angewandt. Diese besagt, dass es bei jedem Belastungszyklus zu einer minimalen Schädigung kommt, welche sich schrittweise linear akkumuliert und somit zum Materialversagen führen kann. Die bekannteste Methode hierzu ist die *Palmgren-Miners-Regel*. Diese definiert, dass das Versagen bei einer Summe der Schädigungsanteile von eins eintritt, wie in Formel (7) gezeigt. Hierbei ist n_i die Anzahl der tatsächlichen Lastwechsel und N_i die Anzahl von Zyklen, bei welcher das Versagen des Materials eintritt.

$$\sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) = 1 \quad (7)$$

Für das Monitoring für Brücken bedeutet dies, dass mit dem Messen von Spannungszyklen, und/oder der Erfassung des Verkehrs, Daten generiert werden können, mit welchen man den Schädigungsgrad oder Ermüdungsgrad nachrechnen kann. Dies geschieht in der Regel vor allem an Stahlbauteilen bei ermüdungsgefährdeten Bereichen oder an der Bewehrung. Näheres hierzu ist in Kapitel 4.14 nachzulesen.

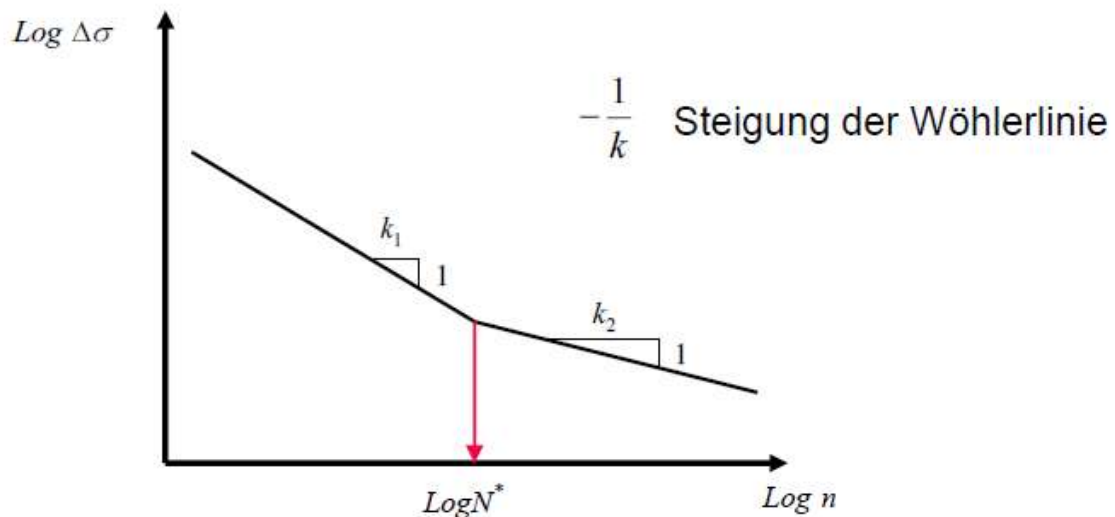


Abbildung 6 Wöhlerlinie für Betonstahl und Spannstahl [3]

4.2 Begriffsdefinition für die Anforderungen an das Monitoring

Bevor die Anwendungsfälle aus [1] genauer betrachtet werden, sollten die Begriffe Messbereich, Messrate und Genauigkeit näher erläutert werden.

Messbereich

Der Messbereich gibt den Bereich der Messungen an. Dieser kann in Form von Ober- und Untergrenzen, über einen Wertebereich um eine Nulllage oder einen prozentualen Bereich um eine Nulllage dargestellt werden. Hierzu wird versucht, einen solchen für die Anwendungsfälle zu definieren. Die Messbereiche selbst werden anhand der Ansprüche an die Gebrauchstauglichkeit von Betonbrücken gewählt.

Messrate

Die Messrate gibt das erforderliche Messintervall in Bezug auf die Zeit an. Diese ist über die erwarteten zu messenden Veränderungen zu bestimmen. Beispielsweise verlangen zeitlich kurzfristige Veränderungen wie bei einer dynamischen Last eine hohe Messrate, während sie bei zeitlich langfristigen Veränderungen sehr gering bzw. statisch sein können.

Um eine erforderliche Messrate angeben zu können, wird sich hier auf folgende Definition geeinigt:

- Statische Messrate: $\leq 0,01667$ Hz (1 Messung/Minute) (siehe Kapitel 3)
- Dynamische Messrate: $> 0,01667$ Hz bis ≤ 100 Hz
- Hochdynamische Messrate: > 100 Hz

Bei statischen Messungen wird in Bezug auf Temperatur oft vom Tages- oder Jahresgang geredet. Es wird empfohlen, dass für die Erfassung eines Tagesganges mindestens eine Messung pro Stunde und für den Jahresgang eine Messung am Tag durchgeführt wird.

Diese Definitionen sollen als grobe Einteilung dienen, da tatsächliche Anforderungen an Messraten stark variieren können. Über die erforderliche Messrate hinaus muss im weiteren Sinne die Abtastrate des Sensors gewählt werden. Diese wird durch das Abtasttheorem (Shannon Theorem [10]) definiert, welches besagt, dass die gewählte Frequenz der Abtastfunktion mehr als doppelt so hoch sein soll wie die höchste erwartete Frequenz des zu messenden Signals.

Genauigkeit

Genauigkeit ist in der Messtechnik über die Abweichung des gemessenen Werts vom realen Wert bestimmt. Erforderliche Genauigkeiten werden hier als ein Bruchteil des Messbereiches gewählt. Dies soll eine weitere Verwendung der gemessenen Werte ermöglichen, ohne dass diese an Aussagekraft verlieren. Zur Genauigkeit kommen auch Messabweichungen und Messfehler dazu. Diese werden in Kapitel 5 genauer erläutert.

Die Auflösung eines Sensors ist gleichzeitig mit der Genauigkeit zu betrachten. Aspekte zur Auflösung von Sensoren werden ab Kapitel 5 behandelt. Für dieses Kapitel wird davon ausgegangen, dass die Auflösung so zu wählen ist, dass die empfohlene Genauigkeit eingehalten werden kann.

4.3 Rissmonitoring

Beim Rissmonitoring spricht man von der Überwachung eines oder mehrerer Risse an einem Bauwerk. Diese haben einen maßgebenden Einfluss auf Stahlbetonbauwerke. Risse sind im Zugbereich zu erwarten, da sonst die eingelegte Bewehrung keine Zugkräfte aufnehmen würde. Allerdings haben zu große Rissbreiten einen negativen Effekt auf die Lebensdauer der Brücke. Weiterhin verformen sich gerissene Bereiche eines Trägers mehr, da die Steifigkeit in diesen Bereichen abnimmt. Beim Rissmonitoring wird hauptsächlich der ausgewählte Riss in seinem Verhalten durch Einflüsse wie Last und Temperatur beobachtet. Besonders wichtig ist die Überprüfung der potenziellen Zunahme der Rissbreite. Eine weitere Form des Rissmonitorings bezieht sich auf die Detektion von neu auftretenden Rissen am Bauwerk.

Ziele des Monitorings lassen sich folgend definieren:

- Erfassen der Rissbreitenaktivität bezüglich Last- und Temperatureinwirkung
- Erfassen neu auftretender Risse
- Erfassung des Rissbildes eines Bauwerkes (globales Monitoring)

4.3.1 Anforderungen an das Rissmonitoring

Um die Anforderungen im Rissmonitoring genauer beschreiben zu können, ist der Fokus auf die rechnerische Ermittlung von Rissbreiten zu setzen. Hierbei ist die Unterscheidung zwischen dem Einzelriss oder Erstriss und dem abgeschlossenen Rissbild zu treffen. Rechnerisch wird der je größere Wert mit den in Tabelle 4 auf Seite 14 vorgegebenen Rissbreiten beschränkt. Somit kann man davon ausgehen, dass ein Riss bis zu einer Rissbreite von 0,3 mm keine besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Sollte ein Riss über 0,3 mm am Bauwerk erkannt werden, ist die Entscheidung über ein mögliches Monitoring individuell zu treffen.

In Gleichung (8) und (9) sind die Formeln zur Ermittlung der bereits erwähnten Rissbreiten angegeben. Wichtig ist hierbei folgende Erkenntnis: Nach Errichtung eines Bauwerkes ist laut diesen Formeln allein die Stahlspannung verantwortlich für die Rissbreite.

$$w_{k,Einzelr} = \frac{\sigma_s \cdot d_s}{3.6 \cdot f_{ctm}(t)} \left[(1 - k_t) \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \right] = \frac{\sigma_s^2}{E_s} \cdot (1 - k_t) \cdot \frac{d_s}{3.6 \cdot f_{ctm}(t)} \quad (8)$$

$$w_{k,abg,RB} = \frac{d_s}{3.6 \cdot \rho_{s,eff}} \left[\frac{\sigma_s}{E_s} - k_t \cdot \frac{f_{ctm}(t)}{E_s \cdot \rho_{s,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{s,eff}) \right] \quad (9)$$

$W_{k,Einzelnr.}$... Rissbreite bei Erstriss

f_{ctm} ... mittlere Zugfestigkeit Beton

$W_{k,abg.RB.}$... Rissbreite bei abgeschlossenem Rissbild

k_t ... Völligkeitsbeiwert

σ_s ... Stahlspannung

E_s ... E-Modul Stahl

d_s ... Durchmesser Bewehrung

α_e ... Verhältnis der E-Module

$\rho_{s,eff}$... effektiver Bewehrungsgrad

Beide Formeln sind aufgeteilt in einen Anteil über die Schlupflänge der Bewehrung zum Beton (rot) und der Dehnungsdifferent von Stahl zu Beton (blau).

Folgend ist eine Beispielrechnung anhand der Formeln in Gleichung (8) und (9) angeführt. Für diese wurde sich der Material- und Querschnittsparameter eines Plattenbalkens der Laxenburger Brücke in Feld 10 bedient, an welchem aktuell ein Rissmonitoring mittels Wegaufnehmer durchgeführt wird [11]. Einige Parameter sind hier geschätzt, wie zum Beispiel der durchschnittliche Bewehrungsdurchmesser im Steg. Dieser ist aus den vorhandenen Plänen nicht erkennbar gewesen. So handelt es sich hier nicht um eine exakte Nachrechnung, sondern lediglich um eine Annäherung zur Veranschaulichung der veränderten rechnerischen Rissbreite in Abhängigkeit der Stahlspannung.

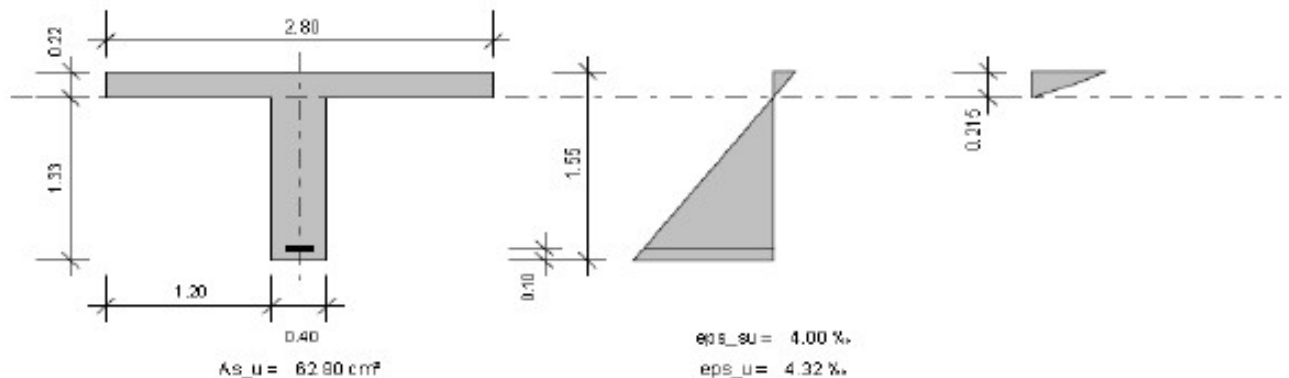


Abbildung 7 Ausschnitt aus der Nachrechnung der Laxenburger Brücke

Abbildung 7 zeigt die Geometrie des Plattenbalkens. Diese gilt als Basis für die folgenden Tabellen.

Tabelle 6 Parameter zur Rissbreitenberechnung des Plattenbalkens der Laxenburger Brücke

Parameter	Einheit	Beschreibung
Betonklasse	B225 (~C16/20)	Betonfestigkeitsklasse, $f_{ctm} = 1,9 \text{ MPa}$
Bewehrung	BSt 500	Typ der Bewehrung
A_{su}	$62,8 \text{ cm}^2$	Querschnittsfläche der Bewehrung
A_c	$1,145 \text{ m}^2$	Betonquerschnittsfläche
x_{II}	$0,215 \text{ m}$	Effektive Höhe des Druckbereichs
d_1	$0,1 \text{ m}$	Abstand der Bewehrung von der Betonoberfläche
$h_{c,eff}$	$0,25 \text{ m}$	Effektive Höhe des Betonbauteils
$A_{c,eff}$	$0,1 \text{ m}^2$	Effektiver Betonquerschnitt
$\rho_{s,eff}$	$0,00548472$	Effektiver Bewehrungsgrad
d_s	$\sim 20 \text{ mm}$	Durchmesser der Bewehrungsstäbe
E_s	200000 MPa	Elastizitätsmodul der Bewehrung
E_c	29000 MPa	Elastizitätsmodul des Betons
σ_s	-	Stahlspannung
$W_{k,Einzelnr.}$	-	Rissbreite beim Einzelriss
$W_{k,abg.RB.}$	-	Rissbreite beim abgeschlossenen Rissbild

Tabelle 7 Rissbreiten bei unterschiedlichen Stahlspannungen an der Laxenburger Brücke

σ_s (N/mm ²)	$w_{k,\text{Einzelr.}}$ (mm)	$w_{k,\text{abg.RB.}}$ (mm)
100	0,0877	-
150	0,1974	0,0314
200	0,3509	0,2846
250	0,5482	0,5378
300	0,7895	0,791
350	1,0746	1,0443
400	1,4035	1,2975
450	1,7763	1,5507
500	2,193	1,804
550	2,6535	2,0572

Tabelle 7 zeigt die rechnerische Rissbreitenänderung in Abhängigkeit von der Stahlspannung. Der grün markierte Bereich bei 400 N/mm², zeigt hierbei die Stahlspannungsbegrenzung aus Kapitel 4.1.1 Tabelle 3 für den Betonstahl Bst. 500. Laut diesen Kriterien ist so anhand der Stahlspannung eine Rissbreite von 1,4 mm nicht zu überschreiten, da ansonsten die Bewehrung in den plastischen Bereich fallen kann. Abbildung 8 zeigt Tabelle 7 in Form einer Grafik. Auch hier ist die Stahlspannungsbegrenzung in Grün markiert.

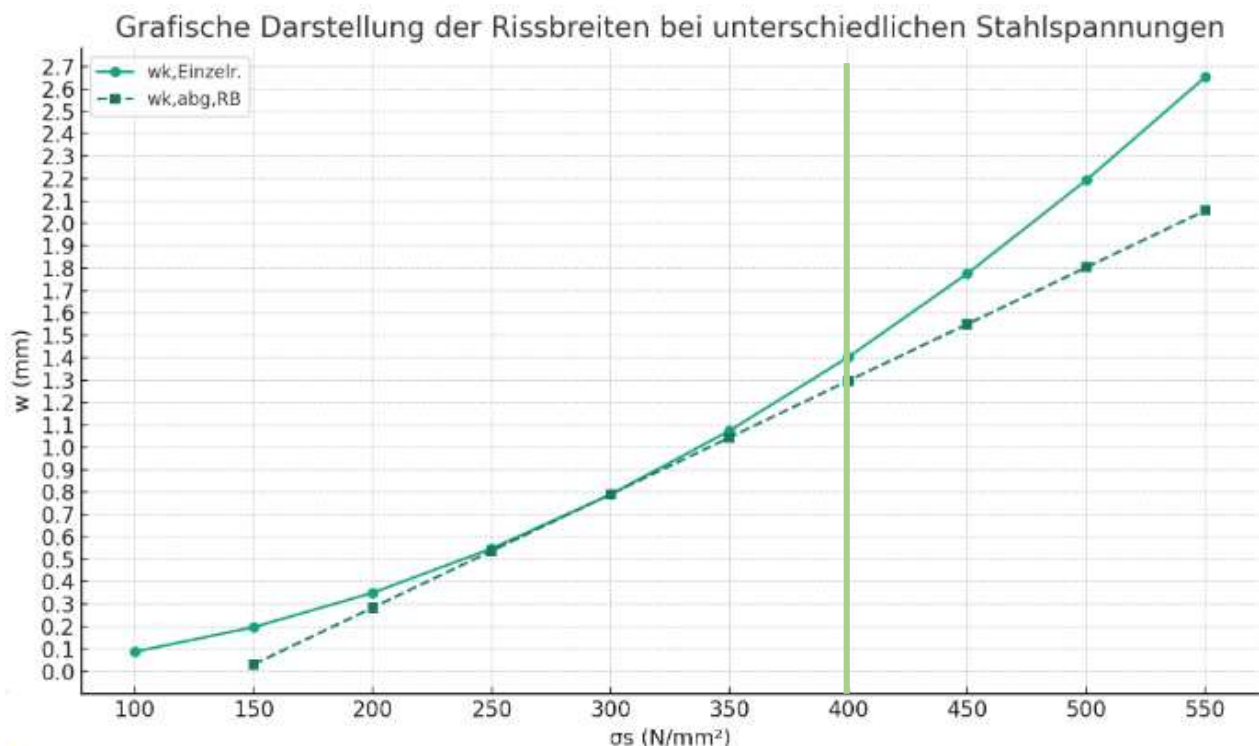


Abbildung 8 Grafische Darstellung der Rissbreiten bei unterschiedlichen Stahlspannungen der Laxenburger Brücke

Gut erkennbar ist, dass bei einem abgeschlossenen Rissbild die Stahlspannung einen linearen Einfluss hat. Weiterhin ist anzumerken, dass Abbildung 8 nicht den tatsächlichen Rissbildungsverlauf darstellt. Der Erstriss erfolgt mit Überschreitung der Zugfestigkeit des Betons und wird so lange breiter, bis sich ein weiterer Riss bildet. Dies wiederholt sich so lange, bis keine Dehnungskompatibilität zwischen Beton und Stahl im Zugbereich mehr vorhanden ist. Erkenntnis

dieser Veranschaulichung soll sein, dass die Stahlspannung bei einer Rissbeobachtung immer berücksichtigt werden muss.

Um einen Messbereich bestimmen zu können, sind zwei Fragen zu beantworten. Welche Rissbreite ist bereits bei Anbringen des Sensors vorhanden? Welche Rissbreitenänderung ist zu erwarten?

Die vorhandene Rissbreite ist mit einem Risslineal oder anderen optischen Hilfsmitteln zu ermitteln. Diese kann je nach Ausprägung auch in den Zentimeterbereich gehen, was jedoch ein Sonderfall sein würde. Die Änderung der Rissbreite ist bis zum Bereich des Fließens der Bewehrung üblicherweise im Millimeterbereich oder darunter. Somit wird ein Messbereich für Stahlbetonbauwerke von ± 1 mm vorgeschlagen, um extreme Rissbreitenänderungen auch abzudecken. Grundsätzlich wäre es jedoch sinnvoll, einen Messbereich in Abhängigkeit der Stahlspannung mit der rechnerischen Rissbreite bei 80 % der Fließspannung des Bewehrungsstahls zu wählen.

Die nötige Genauigkeit der Messung ist über die Änderung der Stahlspannung ermittelbar. Je kleiner die Stahlspannungsänderung, desto kleiner die Rissbreitenänderung. Vorgeschlagen wird eine Genauigkeit von mindestens 0,05 mm bei einer Auflösung von mindestens 0,02 mm. So können geringe Änderungen in Rissbreite und somit auch in der Stahlspannung bereits erfasst werden.

Für die notwendige Abtastrate ist der Belastungsfall in Betracht zu ziehen. Sollte eine Rissbreitenänderung über zeitliche Faktoren überwacht werden, ist eine statische Abtastrate ausreichend. Rissbreitenänderungen durch dynamische Last verlangen ein dynamisches Monitoring, welches in [12] Tab.8 mit höher als 100 Hz empfohlen wird.

Tabelle 8 Anforderungen an das Rissmonitoring

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Empfohlene Messgenauigkeit
Verformung:	Temperatur	Weg [mm]	± 1 mm	statisch (Jahresgang)	$\leq 0,05$ mm
	Verkehrslast	Weg [mm]	± 1 mm	dynamisch (>100 Hz)	$\leq 0,05$ mm

4.4 Lagermonitoring

Ein Lagermonitoring dient zur Beobachtung von Verdrehungen, Verschiebungen und Verformungen durch Belastung oder über die Zeit. Außerdem dient es der Überwachung der vorgeschriebenen Lagerwege. Durch die Vielfalt an verschiedenen Lagerungssystemen für Brückenbauwerke, den Lagerarten und Lagermaterialien werden hier nur einige wichtige Anforderungen an die Lagermessung behandelt.

Brückenlager gelten als Verschleißteile. Das bedeutet, dass nicht erwartet wird, dass die Lebensdauer des Lagers ident mit der Lebensdauer der Brücke ist. So wird üblicherweise ein Lagertausch im Laufe der Nutzungsdauer des Bauwerkes notwendig (Richtwert 30 Jahre). Die Überwachung des Verhaltens eines Lagers kann hilfreich sein, um den richtigen Zeitpunkt des Auswechselns zu bestimmen und somit Folgeschäden am Tragwerk zu vermeiden. Außerdem ist ein Monitoring hilfreich, um die Funktion des Lagers sicherzustellen. Die primären Aufgaben eines Brückenlagers sind, die temperaturbedingte Verformung des Tragwerkes zu ermöglichen und gleichzeitig die Einleitung der Kräfte des Oberbaus in den Unterbau zu gewährleisten. Es ist in Erwägung zu ziehen, bei einem

Lagertausch ein sogenanntes Smart-Lager (siehe Kapitel 6.1.2) einzubauen, welches selbst mit Sensoren bereits ausgestattet ist.

Ziele des Monitorings lassen sich folgend definieren:

- Erfassung der horizontalen Lagerverschiebung
- Erfassung der Lagerverdrehung
- Erfassung der Lagerkräfte
- Annäherung an die Restlebensdauer des Lagers
- Überprüfung der Längsverschiebewege in Referenz zu den errechneten Werten

4.4.1 Anforderungen an das Lagermonitoring

Symbol x y	Kurz- zei- chen	Lagertyp und -funktion	Lagerart	Relativbewegung						Schnittgrößen		
				Verschiebungen v in Richtung			Verschiebungen α um die Achse			Kräfte		
				x	y	z	x	y	z	horizont.	vert.	
	V2	Verformungs- lager	Elastomerlager (EL)	v	v		v	v	v	•	•	•
	V1		EL mit Festhaltekonstruktion (FK) für eine Achse		nein	ge- ring				•	•	•
	V		EL mit FK für zwei Achsen	nein	nein					•	•	•
	VG1	Verformungs- gleitlager	EL mit einachsig bewegl. Gleit- teil und FK für die andere Achse	guv	nein		v	v	v	•	•	•
	VG2		EL mit zweiachsig beweglichem Gleitteil		guv	ge- ring						•
	VGE1		EL mit einachsig beweglichem Gleitteil		v						•	•
	P	Punktkipp- lager	Stählernes Punktkipplager	nein	nein	nein	r	r	r	•	•	•
	P		Topflager	nein	nein		v	v	guv	•	•	•
	P1		Topflager mit einachsig beweglichem Gleitteil	g		nein					•	•
	P2		Topflager mit zweiachsig beweglichem Gleitteil		g							•
	P		Kalottenlager mit FK außerhalb der Kalotte	nein	nein		g	g	g	•	•	•
	P1		Kalottenlager mit einachsig be- wegl. Gleitteil (äußere Führung)	g		nein					•	•
	P2		Kalottenlager mit zweiachsig beweglichem Gleitteil		g							•
	L	Linienkipplager	Stählernes Linienkipplager	nein	nein	nein	nein		ge- ring	•	•	•
	L1		Stählernes Rollen-, Stelzenlager	r	nein	nein	nein		ge- ring		•	•
	H	Horizontal- kraftlager	Festpunkt- oder Horizontal- kraftlager zweiachsig fest	nein	nein	g	gov	gov	gov	•	•	
	H1		Einachsig festes Führungslager	r					nein		•	

DIN 4141

g = gleitend ; v = verformend ; r = rollend
guv = g + v ; gov = g oder v

Abbildung 9 Überblick Lagerarten [8]

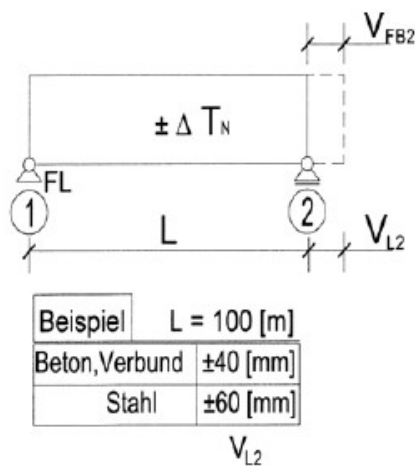
Die Abbildung 9 zeigt die möglichen Lagerarten auf. Anhand dieser erkennt man, welche Verformungen bzw. Bewegungen möglich sind und dementsprechend welche Art von Monitoring sinnvoll ist.

Relativbewegungen

In Vertikalrichtung (z-Richtung) in der Regel nicht bestimmbar.

In Querrichtung des Oberbaus (y-Richtung) ist diese abhängig von der Tragwerksbreite und betragsmäßig deutlich kleiner als in x-Richtung. Sie folgt aber den gleichen Prinzipien. Im Rahmen dieser Arbeit wird sie nicht näher erläutert.

Die Dehnung in Längsrichtung des Oberbaus (x-Richtung) ist betragsmäßig die größte bei Brückenbauten. Diese stellt sich aus Temperaturlast und beim Betonbau zusätzlich aus Kriechen und Schwinden ein. Folgend werden die Berechnungsgrundlagen für diese Verformungen erläutert. Diese Auszüge stammen aus [8].



$$V_{L2} = V_{FB2} = \alpha_T \cdot L \cdot \Delta T_N$$

$$\begin{aligned} &\uparrow \text{Beton: } 1,0 \cdot 10^{-5} \\ &\text{Stahl: } 1,2 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

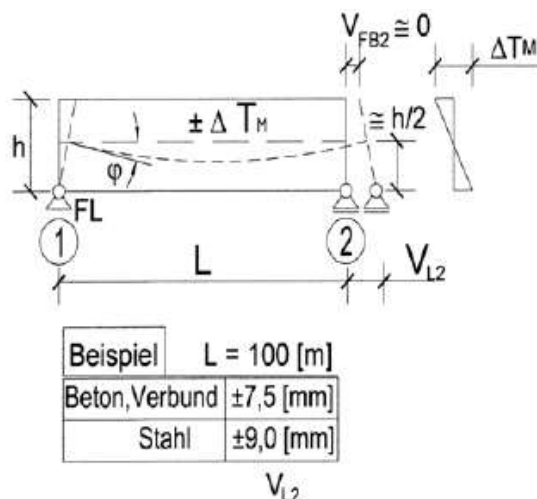
$$\Delta T_{N,k} \approx \pm(30+10) = \pm 40 \text{ [}^\circ\text{C]} - \text{Beton, Verbund}$$

$$\Delta T_{N,k} \approx \pm(40+10) = \pm 50 \text{ [}^\circ\text{C]} - \text{Stahl}$$

↖
Streuung

$$T_0 = 10 \text{ [}^\circ\text{C]} \text{ (Montagetemperatur)}$$

Abbildung 10 Längsverschiebewege infolge der jahreszeitlichen Temperaturänderung [8]



$$\varphi = \frac{L}{2} \cdot \alpha_T \cdot \frac{\Delta T_M}{h}$$

$$V_{L2} \approx h \cdot \varphi = \frac{L}{2} \cdot \alpha_T \cdot \Delta T_M$$

$$\Delta T_{M,k} \approx 15 \text{ [}^\circ\text{C]} \text{ (Montagetemperatur)}$$

Abbildung 11 Längsverschiebewege aus ungleichmäßiger Temperatureinwirkung [8]

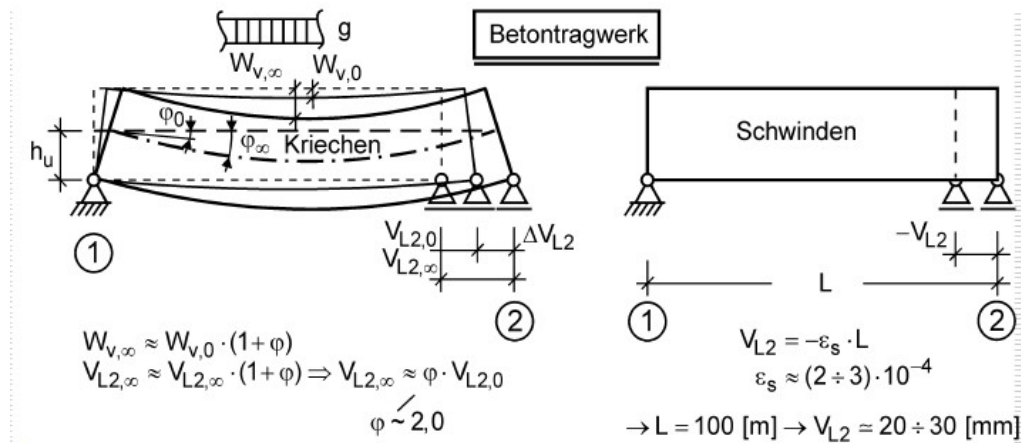


Abbildung 12 Längsverschiebewege aus Kriechen und Schwinden [8]

Anhand dieser Wege lässt sich ein Messbereich für das Monitoring der Längsverschiebung ermitteln. Bei mehrfach gestützten Bauwerken ist die maßgebende Einflusslänge für den Verschiebeweg zu definieren. Dieser geht immer vom Ruhepunkt der Brücke aus. Übersichtsmaßig kann man sich aber auch an folgenden Richtwerten orientieren [8]:

- Stahltragwerk, Verbundtragwerk: + 0,5 / - 0,5 [mm pro m Stützweite]
- Stahlbetontragwerk: + 0,3 / - 0,6 [mm pro m Stützweite] Anm.: Zunahme Verkürzung wegen Kriechen und Schwinden
- Spannbetontragwerk: + 0,3 / - 1,2 [mm pro m Stützweite] Anm.: Zunahme Verkürzung wegen Kriechen und Schwinden

Für eine genaue Ermittlung der Dehnung einer Stahlbetonbrücke ist sich folgender Formel zu bedienen:

$$\epsilon_{\text{ges}} = \epsilon_{\text{el}} + \epsilon_k + \epsilon_s + \epsilon_T \quad (10)$$

$$\epsilon_{\text{el}} = \frac{\sigma_{\text{el}}}{E_c} \quad (11)$$

$$\epsilon_k = \varphi * \epsilon_{\text{el}} \quad (12)$$

$$\epsilon_s \approx (2 \div 3) \text{ ‰} \quad (13)$$

$$\epsilon_T = \alpha_T * \Delta T_N \quad (14)$$

ϵ_{ges} ... gesamte Dehnung

σ_{el} ... elastische Spannung

ϵ_{el} ... elastische Dehnung aus Belastung

E_c ... E-Modul Beton

ϵ_k ... Kriechdehnung

φ ... Kriechzahl Beton (zwischen 1,5 und 4,0)

ϵ_s ... Schwinddehnung

α_T ... Temperaturbeiwert Beton ($\sim 1 \cdot 10^{-5}$)

ϵ_T ... Temperaturdehnung

ΔT_N ... erwartete Temperaturdifferenz

Die angegebenen Formeln (10) bis (14) werden als tatsächlicher Dehnweg auch in Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 12 angegeben. Hierbei ist für die Formeln noch zusätzlich die Einflusslänge und der Anteil elastischer Dehnung aus der Verformung durch Last zu berücksichtigen. Die materialspezifischen Parameter sind je nach Betongüte genau zu ermitteln. Für die erwartete Temperaturdifferenz ist der Jahreszyklus zu betrachten.

Da der Lagerweg brückenabhängig ist, wird für einen Messbereich der Richtwert aus [8] herangezogen (siehe Seite 24). Dieser ergibt einen geschätzten Dehnweg von 0,9 mm/m Einflusslänge im Jahresgang. Der Messbereich ist somit längenabhängig und muss für jede Brücke einzeln bestimmt werden. Die Genauigkeit der Messung sollte hierbei mit 0,1 mm/m Einflusslänge gewählt werden. Diese kann jedoch je nach Tragwerkslänge und Anforderung an die Messung auch höher angesetzt werden.

Verdrehung

Die Lagerverdrehung am Endquerträger ist in der Regel ident mit der Verdrehung des Überbaus über dem jeweiligen Messbereich. Sie setzt sich zusammen aus der Biegung durch Last, der Verdrehung durch Temperatur und der Verdrehung aus Kriechen. Einflussfaktoren auf der Widerstandsseite sind hierbei die Biegesteifigkeit, der Temperaturkoeffizient, der Kriechbeiwert, die Geometrie und die Feldlänge.

Eine Möglichkeit für eine Ermittlung der maximalen Verdrehung bei einem Auflager ist über die maximale zugelassene Verformung im Zustand der Gebrauchstauglichkeit. Hierbei wird auf Tabelle 5 und Abbildung 4 in Kapitel 4.1.3 verwiesen. Diese zeigt die zulässigen Verformungen für Straßen- und Eisenbahnbrücken für den Reisekomfort.

Unter Annahme, dass die Verformung für einen Einfeldträger parabelförmig verläuft, ist die maximale Auslenkung im Lagerbereich somit durch Beschränkung der Verformung ermittelbar. Dies soll einen Messbereich definieren. Für Durchlaufträger ist die Verdrehung an den Endauflagern geringer und somit auch der Messbereich kleiner anzusetzen.

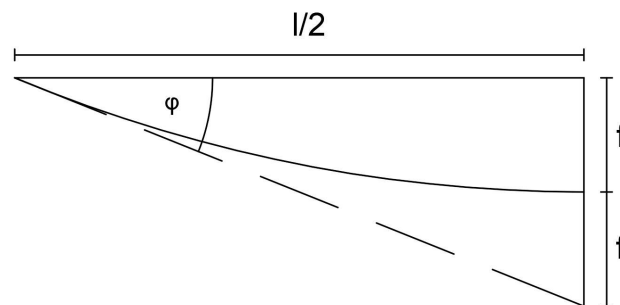


Abbildung 13 Beziehung der Parabel zu Neigung am Eckpunkt

$$\varphi = \tan\left(\frac{2 * f}{\frac{l}{2}}\right) = \tan\left(\frac{4 * f}{l}\right); \tan(\varphi) = \varphi \text{ weil } \varphi \ll ; \varphi = \frac{4 * f}{l} \quad (15)$$

Die in (15) gezeigte Formel beschreibt den Zusammenhang des Winkels am Lager eines Einfeldträgers mit einer Verformung, die durch einen Bruchteil der Länge beschrieben wird. Die Formel kann folglich noch erweitert werden. Hierfür wird der Verformungsfaktor f mit L/D ersetzt, um das Endergebnis zu vereinfachen. D ist hierbei die Verformungsbeschränkung in Bezug auf die Länge (z.B.: L/300).

$$\varphi = \frac{4 * f}{l} \text{ mit } f = \frac{l}{D} \rightarrow \varphi = \frac{4}{D} \quad (16)$$

Die Verdrehung ergibt somit 4/D. Folgend wird in Tabelle 9 eine Übersicht absoluter Lagerverdrehungen bei unterschiedlichen maximalen Verformungen angezeigt.

Tabelle 9 Werte für die Lagerverdrehung nach Oberbauverformung für Einfeldträger

	L/250	L/410	L/480	L/540	L/600	L/800	L/1000	L/1500
φ [mrad]	16,00	9,76	8,33	7,41	6,67	5,00	4,00	2,67
φ [grad°]	0,92	0,56	0,48	0,42	0,38	0,29	0,23	0,15

Diese Verdrehungen aus Tabelle 9 sind absolute Werte in Bezug auf eine horizontale Nullebene. Jedoch sollen auch kleine Verdrehungen durch Verkehr auch berücksichtigt werden. In [3] ist der Erfahrungswert angegeben worden, dass in der Regel ca. 60% der Schnittkräfte überschlägig aus dem Eigengewicht kommen. Vereinfacht wird somit angenommen, dass auch ca. 60 % der erlaubten Verdrehung sich über das Eigengewicht einstellt. Hierzu wird in Tabelle 10 gezeigt, welche Verdrehungsanteile aus Last ungefähr möglich sind. Es werden 50%, 60% und 70% als Eigengewichtsanteil angenommen, um massive als auch leichte Bauwerke darzustellen.

Tabelle 10 Anteile für Lagerverdrehung durch Verkehrslast je nach Einfluss des Eigengewichts

Verdrehung aus Last bei 50% Eigenlast								
	L/250	L/410	L/480	L/540	L/600	L/800	L/1000	L/1500
φ [mrad]	8,00	4,88	4,17	3,70	3,33	2,50	2,00	1,33
φ [grad°]	0,46	0,28	0,24	0,21	0,19	0,14	0,11	0,08

Verdrehung aus Last bei 60% Eigenlast								
	L/250	L/410	L/480	L/540	L/600	L/800	L/1000	L/1500
φ [mrad]	6,40	3,90	3,33	2,96	2,67	2,00	1,60	1,07
φ [grad°]	0,37	0,22	0,19	0,17	0,15	0,11	0,09	0,06

Verdrehung aus Last bei 70% Eigenlast								
	L/250	L/410	L/480	L/540	L/600	L/800	L/1000	L/1500
φ [mrad]	4,80	2,93	2,50	2,22	2,00	1,50	1,20	0,80
φ [grad°]	0,28	0,17	0,14	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05

Der Anteil des Eigengewichtes variiert je nach Größe der Konstruktion und wird mit zunehmender Spannweite in der Regel immer größer.

Diese getroffenen Annahmen sollen einen Überblick über mögliche Verdrehungen bei Stahlbetonbrücken liefern. Für genauere Betrachtung kommt noch hinzu, dass bei mehrfeldrigen, als Durchlaufträger konzipierte Brücken die Verdrehungen bei gleichbleibender maximaler Durchbiegung an den Endlagern geringer sind. Weiterhin ist die Verdrehung über Stützen vernachlässigbar klein. Auch die Unterscheidung von gerissenen und ungerissenen Bereichen ist bei einer exakten Ermittlung zu berücksichtigen, da diese einen hohen Einfluss auf die Verformung des Überbaus und somit auch auf die Verdrehung haben. Vom Überbau unabhängige Verformungen wie das Setzen einer Stütze oder starke Verformungen im Widerlager können ebenso die Verdrehung der Lager beeinflussen.

Die Ermittlung absoluter Verdrehung ist nur mittels geodätischer Methoden möglich. Für die Grenzwerte für ein Monitoring der Verdrehungen auf Basis des Verkehrs wird hier eine maximale

Durchbiegung von $L/410$ angenommen. Der Eigenlastanteil wird mit 60% gewählt und somit die mögliche Auslenkung aus höchster Belastung mit 3,9 mrad bzw. $0,22^\circ$ gewählt. Je nach Bauart der Brücke kann der Messbereich allerdings auch geringer ausfallen. Für eine empfohlene Genauigkeit bei Verdrehungen wird in [12] Tab.8 ein Wert von $0,01^\circ$ vorgeschlagen, welcher ungefähr 0,175 mrad entspricht.

Lagerkraft

Messwertgebundene Überwachung ist bislang hauptsächlich nur für vertikale Belastungen verfügbar. Horizontale Kräfte werden hier vernachlässigt.

Die Messung der Lagerkraft ist rein lastabhängig. Jedes Lager hat eine maximale Auflast. Diese ist zugleich bei Überwachung die Obergrenze des Messbereichs, wenn das Monitoring bereits mit Einbau des Lagers startet und somit, wie bei einem Smart-Lager, fest verbaut ist. Bei Kraftmessungen bestehender Lager können nur relative Messungen vollzogen werden. Dies führt dazu, dass hier kein klarer Messbereich definierbar ist. Für eine Genauigkeit wird ein Wert von weniger als 1 kN vorgeschlagen, um auch kleine Kraftänderungen aufnehmen zu können.

Tabelle 11 Anforderungen an das Lagermonitoring

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Empfohlene Messgenauigkeit
Verschiebung:	Temperatur	Weg [mm]	$\pm 0,9 \text{ mm/m}$ Einflusslänge	statisch (Jahresgang)	$\leq 0,1 \text{ mm}$
Verdrehung:	Verkehrslast	Verdrehung [mrad/°]	$\pm 3,9 \text{ mrad}$	dynamisch	$\leq 0,175 \text{ mrad}$
Kraft:	Verkehrslast	Kraft [kN] Spannung [N/mm ²]	Lagerabhängig	dynamisch	$\leq 1 \text{ kN}$

4.5 Monitoring von Fahrbahnübergängen

Fahrbahnübergangskonstruktionen (kurz FÜK) sind wie Brückenlager als Verschleißteile zu betrachten. Auch hier ist von einer kürzeren Lebensdauer (überschlagsmäßig 30 Jahre) auszugehen. Moderne FÜK können bereits bei Einbau mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattet sein. Diese Smart-FÜK sind beim Austausch in Betracht zu ziehen.

Fahrbahnübergangskonstruktionen bilden den Übergang von Oberbau zum Widerlager und zugehöriger Schleppplatte auf der Brückenoberfläche aus. Weiterhin können bei besonders langen Tragwerken auch weitere FÜK über mehrere Pfeiler eingebaut sein. Ihr Zweck ist es, temperaturbedingte Dehnungen aufzunehmen und gleichzeitig eine sichere Überfahrt zu gewährleisten. Gängige Konstruktionsweisen sind die Ausführungen als Lamellenübergang oder Fingerübergang.

Ziele des Monitorings lassen sich folgend definieren:

- Erfassung der horizontalen Verschiebung in Längs- und Querrichtung an der FÜK
- Erfassen der Bewegungen infolge Lagerverdrehung
- Erfassen der Vertikalbewegungen infolge Setzung und Bauwerksverformung
- Erfassen des Ermüdungsverhaltens
- Kontrolle des zulässigen Dehnweges

4.5.1 Anforderungen an das Monitoring von Fahrbahnübergängen

Bei Fahrbahnübergängen stellt sich die Lage dieser für ein Monitoring als problematisch heraus. Sensorsysteme können grundsätzlich nicht auf der Oberseite montiert werden, da sie mit dem Verkehr kollidieren können. Somit können Sensoren grundsätzlich nur unter der FÜK im Bereich zwischen Herdwand und Endquerträger montiert werden. Dort können Verdrehungen und Dehnungen gemessen werden. Ermüdungsbasiertes Monitoring sollte auf der Unterseite der Finger oder Lamellen selbst angebracht werden.

Relativbewegungen

Hierbei gelten dieselben Grundsätze, wie sie in Kapitel 4.4.1 zum Lagermonitoring erläutert wurden. Der Dehnweg ist abhängig von der Art der Lagerung und der zugehörigen Einflusslänge. So ist beispielsweise bei einer mehrfeldrigen Brücke, welche horizontal frei gelagert ist und somit „schwimmt“, der temperaturbedingte Ruhepunkt in der Mitte der Brücke. Dies führt zu einer Einflusslänge von der halben Länge des Oberbaus für beide Fahrbahnübergänge an den Widerlagern, sollte keine weitere Trennung des Oberbaus vorhanden sein. Anhand dieser Längen wird der Dehnweg bestimmt und ergibt so auch den Messbereich. So wird der Wert aus Tabelle 11 für den Messbereich bei Stahlbetonbrücken übernommen.

Hinzu kommt, dass es auch zu einer Höhendifferenz in der FÜK kommen kann, welche durch Setzung oder starke Verformung des Oberbaues auftreten kann. Diese Fälle werden in Kapitel 4.7.1 und Kapitel 4.11.1 behandelt.

Verdrehungen

Verdrehungen auf der tragwerksseitigen FÜK laufen statisch gesehen gleich wie die Verdrehungen an der oberen Lagerplatte ab. So lassen sich ermittelte Messwerte der Verdrehung am Lager auf die FÜK ableiten, wie auch umgekehrt. Es wird hier auf Kapitel 4.4.1 verwiesen, in dem der Ansatz für mögliche Messbereiche und Genauigkeiten erläutert wird.

Ermüdung

Da Fahrbahnübergangskonstruktionen dem Verkehr direkt ausgesetzt sind, sind diese besonders ermüdungsgefährdet. Bei Monitoring im Bezug auf Ermüdung wird darauf abgezielt, die Akkumulation von Schäden durch wiederholte Belastung zu erfassen. So können bei der FÜK beispielsweise Beschleunigungssensoren, Dehnmessstreifen oder auch akustische Emissionsdetektoren zum Einsatz kommen, um Materialermüdungen frühzeitig zu erkennen. Die Anforderungen an das Monitoring von Ermüdungen werden in Kapitel 4.14.1 noch im Detail behandelt. Dort sind auch genauere Angaben zu Anforderungen an Ermüdungen zu finden.

Weiterer zu erwähnender Sonderfall ist das Versagen einzelner Schrauben bei Fingerkonstruktionen. Grund für dieses Versagen ist neben Kraftänderungen, Verlust der Vorspannkraft und Kraftumlagerung auch die Materialermüdung. Hierzu wird auf [13] verwiesen. Hier wurden

Schrauben mit Dehnmessstreifen ausgestattet. Mithilfe dieser Messschrauben wurden die tatsächlichen Dehnungen, die Vorspannkraft und aber auch die Lastwechselzahl messbar.

Tabelle 12 Anforderungen an das Monitoring von Fahrbahnübergängen

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Empfohlene Messgenauigkeit
Verschiebung:	Temperatur	Weg [mm]	$\pm 0,9 \text{ mm/m}$ Einflusslänge	statisch (Jahresgang)	$\leq 0,1 \text{ mm}$
Verdrehung:	Verkehrslast	Verdrehung [mrad/°]	$\pm 3,9 \text{ mrad}$	dynamisch	$\leq 0,175 \text{ mrad}$
Ermüdung:	Verkehrslast	Beschleunigung [m/s ²] Dehnung [‰ oder $\mu\text{m/m}$]	Abhängig von Art und Dimension der FÜK	dynamisch	-.

4.6 Monitoring von Ankern und externen Spanngliedern

Spannglieder und Anker werden hauptsächlich aus Spannstahl hergestellt. Diese spielen eine kritische Rolle bei Spannbetonbrücken sowie bei der Integrität der Unterbauten von Spann- und Stahlbetonbrücken. Spannstähle werden in Litzen, Drähte oder Stäbe ausgeführt. In Abbildung 14 werden derzeit häufig eingesetzte Spannstähle gezeigt. Diese werden mit *St* bezeichnet, wobei die erste folgende Zahl die Fließspannung für die 0,1 % Dehngengrenze bestimmt. Dies bedeutet, dass bei Erreichen von der Fließspannung 0,1 % Dehnung dauerhaft einstellt. Die zweite Zahl gibt die Zugfestigkeit des Spannstahls an.

Litzen:

- St 1570/1770
- St 1660/1860

Drähte:

- St 1470/1670
- St 1570/1770

Stäbe:

- St 950/1050

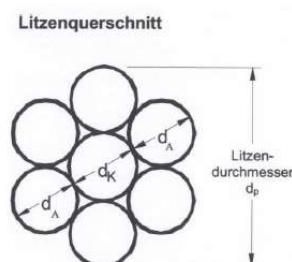


Abbildung 14 Beispiel häufig eingesetzter Spannstähle in Europa [14]

Beim Monitoring von Ankern und Spanngliedern wird häufig die vorliegende Kraft im zu beobachtenden Anker oder Spannglied gemessen. Dies geschieht in der Regel direkt bei einer Kraftmessung oder indirekt über die Ermittlung der Dehnung des Spanngliedes. Die Prinzipien des Seilkraftmonitorings in Kapitel 4.12 finden teilweise auch hier Anwendung, da auch über die Ermittlung der Eigenfrequenz der Spannglieder auf die wirkende Kraft geschlossen werden kann.

Ziele des Monitorings lassen sich folgend definieren:

- Erfassung der tatsächlichen Spannkraft im Anker oder Spannglied
- Erstellung eines Alarmplans bei bevorstehender plastischer Verformung oder Versagen

4.6.1 Anforderungen an das Monitoring von Anker und externen Spanngliedern

Spannkraft

Grundsätzlich ist zwischen zwei Anforderungen zu unterscheiden. Die erste ist die Ermittlung der absoluten Spannkraft. Die zweite ist die Überwachung der Spannkraftänderungen unter möglichen Belastungen. Für den ersten Anwendungsfall ist der Zeitpunkt der Sensorinstallation maßgebend. Sollte die Spannkraft über Dehnung bestimmt werden, muss der Dehnsensor vor Beginn der Belastung des Spanngliedes oder Ankers angebracht werden. Dasselbe gilt für Kraftsensoren oder Ankerlastplatten. Einzig über die Ermittlung der Eigenfrequenz mittels schwingungsbasiertem Monitoring lässt sich die absolut wirkende Kraft eines Stabes oder Seiles nachträglich bestimmen. Für den zweiten Anwendungsfall ist der Anteil zusätzlich veränderlicher Kräfte zu ermitteln. So kann auch hier wieder davon ausgegangen werden, dass ungefähr 60 % der auftretenden Schnittkräfte im Betonbrückenbau aus dem Eigengewicht kommen [3].

Folgend wird die Arbeitslinie des Spannstahles St1570/1770 gezeigt. Dies soll das Spannstahlverhalten stellvertretend zeigen. In der Regel ist das Dehnpotenzial für andere Stähle ähnlich und somit von diesem ableitbar.

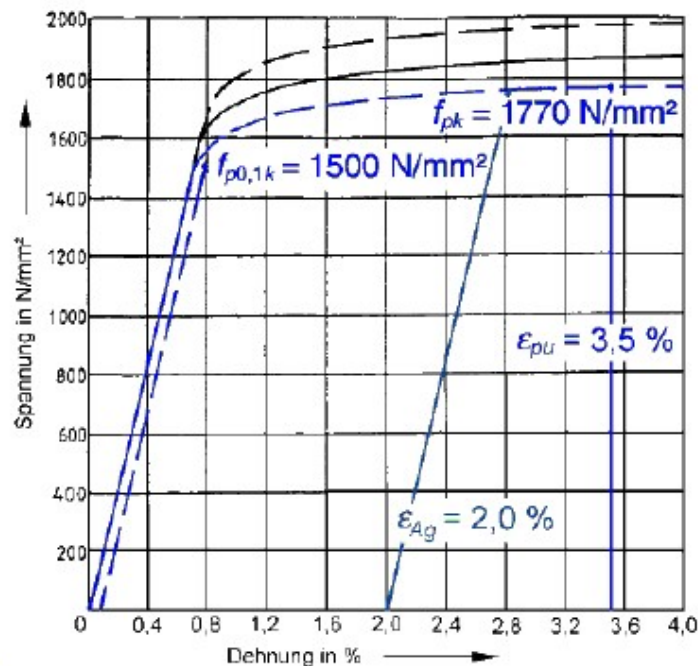


Abbildung 15 Arbeitslinie des Spannstahls St1570/1770 [14]

Die gezeigte Arbeitslinie zeigt ein plastisches Verhalten ab einer Dehnung von ca. 0,8%. Bis zu dieser Dehnung lässt sich die Spannung im Stahl über den linearen Zusammenhang mit dem E-Modul bestimmen.

$$\sigma \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] = E \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] * \epsilon [\text{‰}] \quad (17)$$

Mit:

σ ... Spannung

E ... E-Modul

ϵ ... Dehnung

Über diese Spannung lässt sich die Spannkraft abhängig der Fläche mit folgender Formel ermitteln.

$$F[N] = \sigma \left[\frac{N}{m^2} \right] * A[m^2] \quad (18)$$

Mit:

F ... Kraft

σ ... Spannung

A ... Querschnitt/Fläche

Für den nicht-linearen Zustand müssen bekannte Arbeitslinien oder nicht-lineare Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Spannkraft genutzt werden.

Um einen Messbereich für die Überwachung von Spannstahl zu definieren, wird sich der Anforderung aus Kapitel 4.1.1 zur Beschränkung der Stahlspannung bedient. Diese besagt, dass für die Einhaltung der Anforderung der Gebrauchstauglichkeit Stahl nicht über 80 % der Fließspannung ausgenutzt werden soll. Dies wäre unter Annahme, dass Spannstahl bei ungefähr 0,8 % Dehnung zu fließen beginnt, eine maximal erwartete Dehnung von 0,64 % oder 6,4 ‰. Für einen Messbereich infolge der direkten Kraftmessung ist dieser abhängig von der erwarteten Fließspannung. Das wären beispielsweise für den St 1570/1770 ein Messbereich von 0 N/mm² bis 1256 N/mm² bei absoluter Messung.

Für eine empfohlene Genauigkeit wird der Wert von [13] Tabelle 3 übernommen. Dieser gibt für Dehnungsmessungen 0,1 (0,0001 ‰) bis 1 µm/m (0,001 ‰) Genauigkeit für Lasten infolge Temperatur und Verkehr an.

Für eine Kraftmessung wird hier eine Spannung für die Genauigkeit angegeben, da diese flächenunabhängig ist. Diese Spannung wird mittels des E-Moduls von Spannstahl, ca. 195.000 N/mm², und der vorhin angegebenen Genauigkeit für Dehnungsmessungen hergeleitet. So ergibt sich eine empfohlene Messgenauigkeit der Spannung von gerundet 0,2 N/mm². In den meisten Fällen wird allerdings vermutlich eine höhere Messgenauigkeit auch zulässig sein.

Bruchdetektion

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit für ein Monitoring von Spanngliedern oder Anker ist die Erkennung von Spanndraht- oder Spannstahlbrüchen mittels einer Schallemissionsanalyse. Diese soll hier kurz vorgestellt werden.

Körperschallsensoren können verwendet werden, um elastische Spannungswellen zu erfassen. Diese treten bei plötzlicher Spannungsänderung auf. Solch eine plötzliche Spannungsänderung tritt auch beim Riss des Spanngliedes auf. Diese Art des Monitorings eignet sich somit sehr gut zur Schadenserkenkung von nicht einsehbaren Spanndrähten. Allerdings ist es nicht möglich, bereits gerissene Spanndrähte mit diesen Sensoren zu erkennen, sondern nur den Bruch selbst zu erfassen. Hierzu sind Erfahrungen in [15] ab Seite 242 nachzulesen. Die dort eingesetzten Sensoren haben den Körperschall von 25 bis 80 kHz hochdynamisch (bis zum zweistelligen MHz-Bereich) erfasst.

Tabelle 13 Anforderungen an das Monitoring von Ankern und externen Spanngliedern

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Empfohlene Messgenauigkeit
Spannkraft¹:	Last	Dehnung [‰ oder $\mu\text{m}/\text{m}$]	0 ‰ bis 6,4 ‰ bei Absolutmessung $\pm 2,56$ ‰ bei Relativmessung	statisch oder dynamisch	$\leq 0,001$ ‰ $\leq 1\mu\text{m}/\text{m}$
	Last	Kraft [kN] Spannung [N/mm ²]	Abhängig von Arbeitslinie (ca. bis 1500 N/mm ² bei Absolutmessung ca. ± 600 N/mm ² bei Relativmessung)	dynamisch oder hochdynamisch	$\leq 0,2$ N/mm ²
Bruchdetektion	Last	Körperschall [kHz]	-	hochdynamisch	-

4.7 Monitoring von Verformungen und Verschiebungen

Bei einem Verformungs- und Verschiebungsmonitoring dienen die Messwerte zur Beurteilung des Gesamtverhaltens des Bauwerkes. Somit sind besonders die tragenden Elemente des Überbaues und des Unterbaues zu betrachten. Verformungen und Verschiebungen haben eine Vielzahl an Einflüssen. Die allgemeinen Verformungsursachen sind zum Beispiel Last (dynamisch sowie statisch), Temperatur, Kriechen, Schwinden und Setzungen am Bauwerk. Diese treten in der Regel an jedem Stahlbetonbauwerk auf. Außergewöhnliche Einflüsse sollten jedoch auch berücksichtigt werden. Diese können unter anderem das Unterspülen des Brückenfundamentes sein, Hangrutschungen, Anpralllasten und Erdbeben, um einige Beispiele zu nennen.

Verformung setzen sich zusammen aus Biegung, Dehnung und Verdrehung. Sie können in jede Raumrichtung auftreten und haben unterschiedliche Ursachen und Auswirkungen auf die Integrität des Bauwerkes. Im Brückenbau ist es üblich, dass beim Bau der Brücke eine Überhöhung eingeplant ist, um der Gesamtverformung eines Feldes entgegenzuwirken und den Fahrkomfort sowie die Ästhetik zu gewährleisten.

Es wird sich in diesem Kapitel hauptsächlich auf Verformung in Form von Durchbiegung fokussiert. Dehnung und Verdrehung werden in Kapitel 4.8 und Kapitel 4.10 noch genauer bearbeitet. Da die Messtechnik zur Verschiebung und Verformung grundsätzlich ähnlich ist, werden hier beide Themen zusammengefasst [15].

¹ Für Relativmessungen wurden 40% des absoluten Messbereiches angesetzt werden. Empfohlene Genauigkeit ist für beide Fälle angegeben.

Ziele des Monitorings lassen sich folgend definieren:

- Ermittlung der Verformung unter Last und/oder Temperatur
- Ermittlung von Langzeitverformung
- Überprüfung der tatsächlichen Steifigkeit
- Kontrolle der zulässigen Verformungen, Verschiebungen und Setzungen
- Ermittlung der tatsächlichen Verformung unter Sonderbelastung

4.7.1 Anforderungen an das Monitoring von Verformungen und Verschiebungen

Verformungen

Die Verformung infolge Durchbiegung eines Bauteiles stellt sich in Abhängigkeit der Steifigkeit des Baustoffes, der äußeren Belastung, die Spannweite und über das vorhandene statische System ein. Bei Stahlbetonbauwerken ist die Unterscheidung zwischen ungerissenen Zustand und gerissenem Zustand zu beachten. Gerissene Bereiche weisen durch die geringere Steifigkeit (überschlagsmäßig 60 % Steifigkeitsverlust) eine höhere Durchbiegung auf.

Die Durchbiegung kann wenige Millimeter bis mehrere Zentimeter betragen. In besonderen Fällen kann sie auch deutlich höher sein. Ein Beispiel für langfristige Verformung im hohen Ausmaß ist die Talüberführung Schottwien (TÜ Schottwien). Hierbei kam es im Mittelfeld zu einer Überbauverformung von über 300 Millimeter in einem Zeitraum von ca. 30 Jahren [3]. Abbildung 16, entnommen aus der Vorlesung zu Betonbrücken, zeigt die Verformungszunahme der TÜ Schottwien über die Jahre. Es stellt sich die Frage, ob eine weitere lineare Zunahme zu erwarten ist.

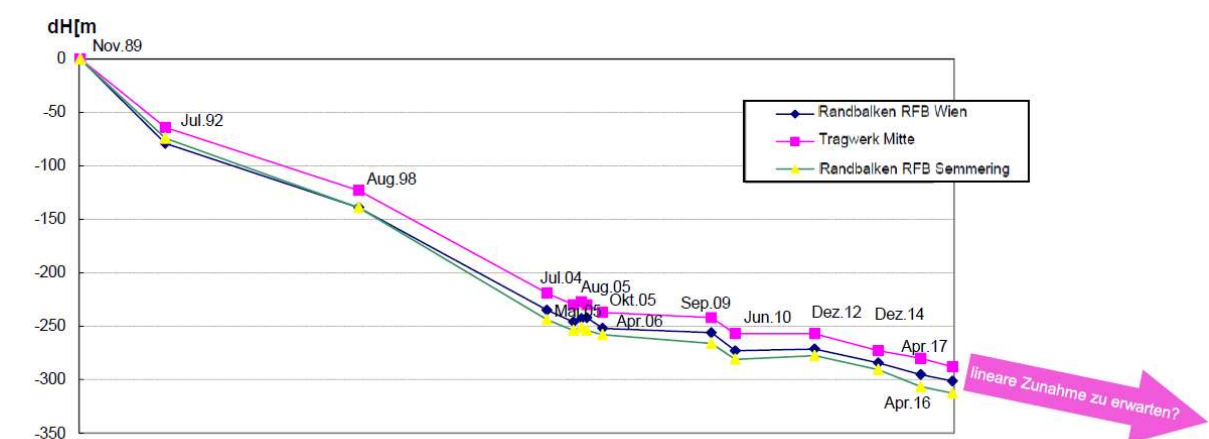


Abbildung 16 Langjährige Verformung der TÜ Schottwien [3]

Im Rahmen des Projektes ConDef, welches von 2017 bis 2021 lief, wurde mithilfe eines Verformungsmonitorings die Ursache der Verformung ermittelt und die gemessenen Durchbiegungen mit einem FEM-Modell verglichen. Für dieses Monitoring kamen Faser-Bragg-Gitter für die Ermittlung der Dehnungen (weiteres zu Faser-Bragg-Gitter in Kapitel 5.2.11), Druckschlauchwaagen zur Messung des Längsprofils der Durchbiegungsänderungen (mehr zu Druckschlauchwaagen in Kapitel 5.2.4), Temperatursensoren für die Bauwerkstemperatur (sogenannte Bauwerkstemperaturfühler) und Lufttemperatursensoren zum Einsatz. Ergebnis dieses Projektes ist, dass die Verformungszunahme auf eine Kombination von Schwinden und Kriechen mit punktuelltem Erreichen der Zugfestigkeit infolge Last und Eigenspannungen aus differenziellem Schwinden zurückzuführen ist [16].

Ein weiteres Beispiel für eine massive Verformung ist die Koror-Babeldaob Bridge (1977, 241 m), welche über 20 Jahre eine Verformung von über 1,61 m erfahren hat, vor ihrem Einsturz [3]. Dies

zeigt, dass auch wenn die meisten Tragwerke Durchbiegungen im Zentimeterbereich erfahren, auch massive Verformungen bis in den Meterbereich vor Versagen des Tragwerkes möglich sind. Sensoren für das Monitoring einer Durchbiegung können daher im Bauwesen große Messbereiche bei reduzierter Auflösung aufweisen.

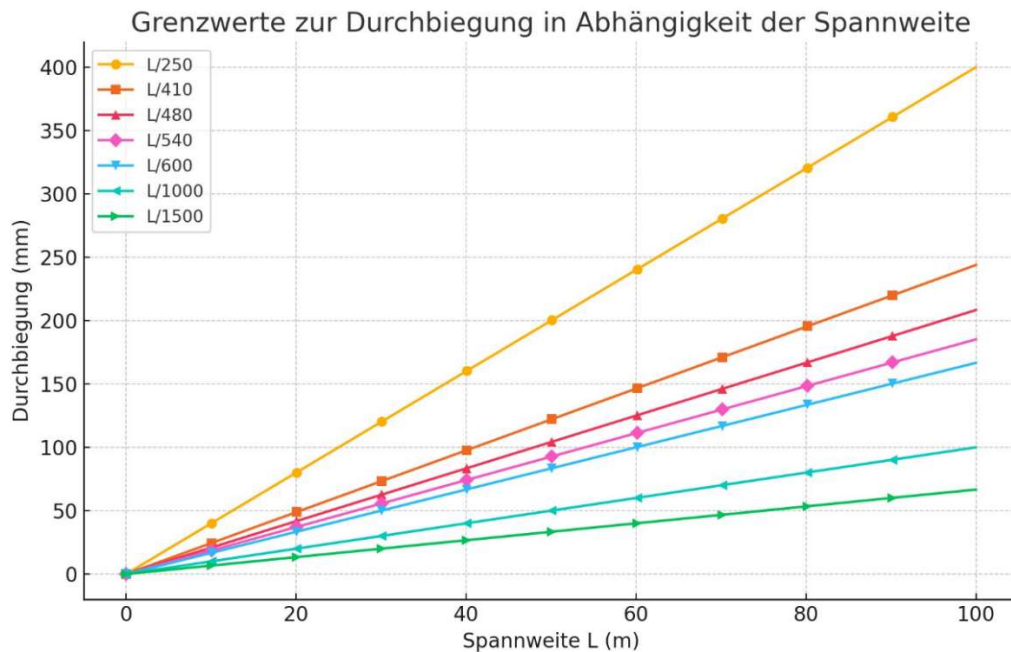


Abbildung 17 Durchbiegungen in Abhängigkeit von möglichen Spannweiten und ihren L/X Verhältnissen

Abbildung 17 zeigt die zugelassenen Durchbiegungen (siehe Kapitel 4.1.3) in Abhängigkeit der Spannweite oder Stützweite an. Diese soll eine Hilfestellung zur Bestimmung des Messbereiches sein. Wenn die Verformung aufgrund der Verkehrslast zu ermitteln ist, ist der Messbereich kleiner. Empfohlen wird 40 % der zugelassenen Gesamtverformung. Für eine empfohlene Genauigkeit wird sich an [12] Tab.8 orientiert, wo 0,01 bis 1 mm vorgeschlagen werden.

Verformungsmessungen müssen im Hinblick auf die verwendeten Messmethoden genau betrachtet werden. Absolute Messungen, die die gesamte Durchbiegung in der Struktur erfassen, sind in der Regel nur durch geodätische Methoden wie die Verwendung einer Totalstation möglich. Methoden, die Neigungen oder relative Distanzen messen, wie zum Beispiel Inklinometer, Wegaufnehmer oder Laser-Distanzsensoren, setzen voraus, dass sie bereits vor einer Belastung installiert sind oder dass die Durchbiegung aus Eigengewicht vorab ermittelt wurde, um valide Schlussfolgerungen über die gesamte Verformungslinie ziehen zu können. Ansonsten messen diese ausschließlich lastabhängige Durchbiegungen. Weiters verlangt die Sensorik, soweit diese die Verformung direkt misst, einen in Ruhe bleibenden Bezugspunkt. Ausnahme hierzu wäre die Ermittlung der Durchbiegung über indirekte Verfahren. Dies könnte ein Rückschluss über die Neigung des Oberbaues sein oder über die Dehnung einzelner Bereiche, womit eine Biegelinie errechnet werden kann.

Verschiebungen

Verschiebungen können Verformungen verursachen. Dies geschieht in Form von planmäßigen oder unplanmäßigen Verformungen oder Verschiebungen, zum Beispiel durch Setzung oder Schädigung. Besonders kritisch haben sich in der Vergangenheit Verformungen an Koppelfugen gezeigt. In der Praxis hat sich das Überwachen von Rissbreiten als eine der wichtigsten Arten der

Verschiebungsüberwachungen herausgestellt. Hierbei kommen mechanische, optische und magnetische Sensoren in Einsatz. Wichtig hierbei ist der in Ruhe liegende Referenzpunkt, welcher die Messung ermöglicht [17].

Das Monitoring von Verschiebungen und Verformungen unterliegt nahezu selbiger Anforderung. Es werden Bewegungen des Bauwerkes aufgenommen, welche durch Last, Temperatur oder plötzlich eintreffenden Einflüssen hervorgerufen werden. Kontinuierliche Temperaturmessungen der Umgebung und im Optimalfall auch vom Tragwerk sind notwendig, um die Messergebnisse zu validieren. Die Genauigkeiten von Verschiebungen können je nach Anspruch bis in den Mikrometerbereich gehen. Messbereiche variieren stark, gehen aber in der Regel nicht über den zweistelligen Zentimeterbereich hinaus [17]. Es wird wie bei Verformung eine Genauigkeit von kleiner als 1 mm vorgeschlagen. Dieser Wert kann aber auch deutlich unterschritten werden.

Tabelle 14 Anforderung an das Monitoring von Verformung und Verschiebung

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Empfohlene Messgenauigkeit
Verformung/ Verschiebung:	Langzeitverformung	Weg [mm]	Siehe Abbildung 17 [cm]	statisch oder dynamisch	<<1 mm
	Verkehrslast	Weg [mm]	Siehe Abbildung 17 [cm]	dynamisch oder hochdynamisch	<<1 mm

4.8 Monitoring von Dehnungen

Beim Monitoring von Dehnungen werden Längenänderungen des Bauwerkes oder einzelner Bereiche aufgenommen. Diese entsteht zufolge von Temperaturänderungen, Belastung in Längsachse, Belastung durch einwirkende Momente, Kriechen und Schwinden. Eine messtechnische Dauerüberwachung von Dehnungen kann Auskunft über das lastabhängige Verhalten von Bauwerken geben. Weiters können indirekt Material- und Bauteilveränderungen evaluiert werden.

Ziele des Monitorings lassen sich folgend definieren:

- Erfassung der Dehnungen aus äußeren Einflüssen (Last, Temperatur, etc.)
- Erfassung der Dehnungen aus materialspezifischen Verhalten (Kriechen, Schwinden)
- Erfassung des Spannungszustandes und Änderungen dieses

4.8.1 Anforderungen an das Monitoring von Dehnungen

Im Bauingenieurwesen wird für die Modellierung von Tragwerken in der Regel der Bernoullibalken oder die Bernoullitheorie angewandt. Dies beinhaltet, dass über die gesamte Länge des Tragwerkes in einer Achse bei Verformung der Querschnitt zueinander eben bleibt. Für Betonbauwerke lassen sich somit sechs verschiedene Dehnungsebenen durch Belastung mit Moment und mit oder ohne Normalkraft beschreiben. Diese werden in Abbildung 18 gezeigt:

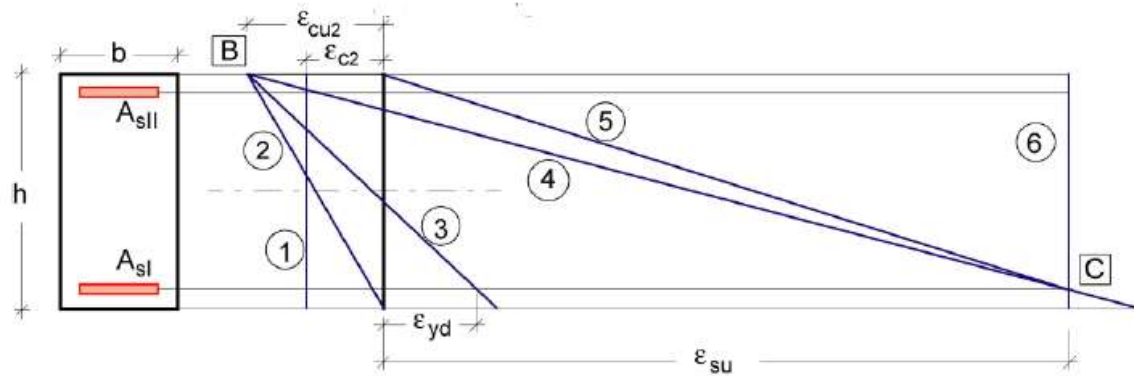


Abbildung 18 Dehnungsebenen im Stahlbetonbau

1. Reiner Druck
2. Dekompression (Druck-Moment Interaktion)
3. Zug- und Druckzone bis zum Fließen der Bewehrung (SLS)
4. Zug und Druckzone bis zum Bewehrungsbruch (ULS)
5. Exzentrischer Zug (Zug-Moment Interaktion)
6. Zentrischer Zug

AsI ...	Zugbewehrung
AsII ...	Druckbewehrung
ϵ_{yd} ...	Fließdehnung Bewehrung
ϵ_{yd} ...	Bruchdehnung Bewehrung
ϵ_{c2} ...	Dehnung bei Erreichen der Betonfestigkeit
ϵ_{cu2} ...	Bruchstauchung Beton

Ein Monitoring von Dehnungen verlangt hochauflösende und genaue Sensoren, um von diesen gemessenen Dehnungen auch auf Spannungen schließen zu können. Häufig eingesetzte Sensortypen sind Dehnmessstreifen und faseroptische Sensoren, insbesondere Faser-Bragg-Gitter. Diese können im Mikrometerbereich Dehnungen messen. Um die in Abbildung 18 gezeigten Dehnungsmessungen erfassen zu können, ist die Sensorplatzierung zu beachten. Wenn ein Bauteil nur rein auf Druck (Zustand 1) oder Zug (Zustand 2) zentrisch belastet wird, ist ein einzelner Sensor ausreichend, um auf die Dehnungen schließen zu können. Wenn die Belastungszustände 2 bis 5 eintreten, anders gesagt auch ein Moment auftritt, ist es notwendig, mindestens zwei Sensoren, einen auf Zug- und einen auf Druckseite, zu platzieren, um auf die Dehnungsebene schließen zu können.

Die Bruchstauchung für Normalbeton liegt laut [5] bei 3,5 ‰. Bei hochfestem Beton sinkt diese auf bis zu 2,6 ‰. Die Zugdehnung bis zum Riss oder Zugversagen des Betons ist direkt von der Betongüte abhängig. Sie befindet sich jedoch in der Regel unter 0,1 ‰.

Messbereiche werden anhand von Kapitel 4.1.1 bestimmt. In diesem Kapitel wird das Niveau der auszunutzenden Spannung auf 45 % der Bruchspannung im permanenten Lastfall und 60% im seltenen beschränkt. Orientiert wird sich an die 45 % Begrenzung. In Tabelle 2 (Seite 13) sind die zugehörigen Dehnungen angeführt.

Hochduktiler Betonstahl versagt bei einer Zugdehnung von ca 50 ‰, während normalduktiler Betonstahl schon bei ca 25‰ versagt. In Kapitel 4.1.1 Tabelle 3 (Seite 13) sind die zugehörigen Fließdehnungen zu herkömmlichen Betonstahlklassen angegeben. Zusätzlich werden die maximal zugelassenen Dehnungen zur Begrenzung der Stahlspannungen dort gezeigt. Diese befinden sich bei unter 2,5‰ und gelten als Richtwert für den Messbereich bei Dehnungsmessungen an Bewehrungsstahl.

Dehnungen an Bewehrung zu messen ist jedoch praktisch kaum umsetzbar. Es müsste ein Sensor direkt an der Bewehrung beim Neubau platziert werden oder die Bewehrung freigelegt werden, um Sensoren platzieren zu können. Bei ungerissenen Bereichen, wo die Dehnungskompatibilität

zwischen Beton und Stahl vorhanden ist, kann eine Messung der Betondeckung Rückschlüsse auf die Stahldehnung liefern. Diese Dehnungen befinden sich dann im Bereich der Betonzugdehnung.

Eine weitere grundlegende Frage ist: Handelt es sich bei der Dehnungsmessung um eine relative oder absolute Dehnung?

Eine Brücke unter Eigengewicht löst eine Verformung aus und somit Dehnungen am Querschnitt. Wenn man die Messungen bereits mit dem Zeitpunkt der Ausschalung startet, erfasst vorhandener Sensor die Dehnung aus absoluter Verformung. Bei Sensoren, welche nachträglich angebracht werden, ist die Messung nur auf neu auftretende Dehnungen bezogen. Der Messbereich verringert sich hierbei auf ca. 40% des absoluten Messbereiches. Dies ist eine reine Schätzung auf Basis der getroffenen Annahme, dass 60 % der Schnittkräfte aus dem Eigengewicht kommen. Es soll den Messbereich auf ein angemessenes Maß reduzieren.

Für eine empfohlene Genauigkeit wird der Wert von [13] Tabelle 3 übernommen. Dieser gibt für Dehnungsmessungen 0,1 (0,0001 ‰) bis 1 µm/m (0,001 ‰) Genauigkeit für Lasten infolge Temperatur und Verkehr an.

Tabelle 15 Anforderung an das Monitoring von Dehnungen

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich ²	Messfrequenz ³	Empfohlene Messgenauigkeit
Dehnung Beton Zug	Spannung	Dehnung [‰, µm/m]	0 ‰ bis < 0,1 ‰	statisch oder dynamisch	≤0,001 ‰ ≤1µm/m
Dehnung Beton Druck	Spannung	Dehnung [‰, µm/m]	Siehe Tabelle 2 (ca. 0 ‰ bis 1,2 ‰)	statisch oder dynamisch	≤0,001 ‰ ≤1µm/m
Dehnung Betonstahl	Spannung	Dehnung [‰, µm/m]	Siehe Tabelle 3 (ca. 0 ‰ bis 2,5 ‰)	statisch oder dynamisch	≤0,001 ‰ ≤1µm/m

4.9 Monitoring von Schiefstellungen

Neigungen und Schiefstellungen können auf Basis von statischen Bedingungen sowie durch äußere Einwirkungen vorkommen. Somit werden Neigungsmessungen für die Ermittlung von Steifigkeiten, Lagerungsbedingungen oder auch Verformungen angewendet. Bei Annahme gleichbleibender Beanspruchung kann ein Neigungsmonitoring auch für die Detektion eines auftretenden Schadens am Bauteil verwendet werden.

Ziele des Monitorings lassen sich folgend definieren:

- Erfassung von Schiefstellungen aus Last oder Temperatur
- Erfassung von möglichen Schädigungen oder Fehlfunktionen der Lagerung

² Für relative Messungen zugrunde Verkehr ist der Messbereich um ca. 60 % zu reduzieren und errechneter Wert als Wertbereich um eine Nullebene zu sehen.

³ Bei Messung der Dehnung aus Verkehr dynamisch, bei Messung der Dehnung infolge Temperatur ist statisch ausreichend.

4.9.1 Anforderungen an das Monitoring von Schiefstellungen

Ein Neigungssensor kann sowohl absolute als auch relative Neigungen bestimmen. Maßgebend für eine aufschlussreiche Neigungsmessung ist die Messmethode. Während geodätische Methoden wie mittels Tachymeter eine Schiefstellung absolut ermitteln können, sind Neigungssensoren in der Regel nur zur Messung von relativen Schiefstellungen einsetzbar, da sie eine bereits eingestellte Neigung eines Bauwerkes nicht gut wahrnehmen können. Schiefstellungen werden bei Brückenbauwerken häufig an Widerlagern und Stützen gemessen. Weitere Anwendungen finden Neigungsmessungen unter anderem bei Stützmauern bzw. -wänden.

Neigungsänderungen an Pfeilern hängen stark von der Bauart und Lagerausführung ab. Ein Pfeiler als Pendelstütze wird im Jahresgang der Temperatur sich je nach Dehnung des Überbaus einstellen. Hierzu sind statische Messungen ausreichend. Ist der Pfeiler monolithisch angeschlossen und am Pfeilerfuß fest verankert, erfährt das Bauteil durch Dehnung des Überbaues eine Krümmung. Auf diese kann man mittels Neigungssensor am Pfeilerkopf und vorhandener Steifigkeit schließen.

Bei Widerlagern stellen sich Schiefstellung durch Setzung oder Last ein. Sollte es sich um eine integrale Bauweise handeln, können auch die Zwangskräfte aus Temperatur zu einer Auslenkung führen.

Typische Schiefstellungen für Pfeiler und Widerlager sind schwer zusammenfassbar. Aus dem Eurocode sind keine absoluten Werte für zulässige Auslenkungen ersichtlich. In [13] Tabelle 3 wird ein Messbereich von $\pm 10^\circ$ (174,53 mrad) angegeben bei einer empfohlenen Messgenauigkeit von mindestens $0,01^\circ$ (0,175 mrad). Bei einer Schiefstellung von 10° handelt es sich allerdings schon um einen Extremzustand. Die Abtastrate ist in der Regel vorwiegend statisch zu wählen. Sollten kleinste Neigungsänderungen durch Verkehr erfasst werden, ist eine Abtastrate von größer als 100 Hz empfohlen. Messbereiche werden in einem sehr kleinen Ausmaß sein. Diese sind von vielen Faktoren abhängig und werden hier mit kleiner als $\pm 1^\circ$ angenommen. Genauigkeiten müssen je nach Höhe des Bauteiles angepasst werden. Messung der Neigung anhand der Auslenkung ist abhängig von der Bauteilhöhe.

Tabelle 16 Anforderungen an das Monitoring von Schiefstellungen

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Empfohlene Messgenauigkeit
Schiefstellung:	Temperatur / Langzeitverhalten	Verdrehung [mrad/°]	$<\pm 10^\circ$	statisch	$\leq 0,01^\circ$
	Verkehrslast	Verdrehung [mrad/°]	$<\pm 1^\circ$	dynamisch oder hochdynamisch	$\leq 0,001^\circ$

4.10 Monitoring von Verdrehungen

Das Monitoring von Verdrehungen beinhaltet den zugehörigen Neigungswinkel bei einer Biegelinie. Dieser ist in Bereichen der Widerlager und nahe der Pfeiler am höchsten vorausgesetzt es handelt sich nicht um eine vollintegrale Bauweise und das Verdrehungen statisch zugelassen werden.

Ziele des Monitorings lassen sich folgend definieren:

- Erfassung von Verdrehung an ausgewählten Querschnitten infolge Temperatur oder Last
- Erfassen des Langzeitverhaltens gemäß der Verdrehung und von Verformungen
- Erfassen der tatsächlichen Steifigkeit

4.10.1 Anforderungen an das Monitoring von Verdrehungen

Maßgebend für ein Monitoring von Verdrehungen ist der richtige Messpunkt. Um eine Tangente der Biegelinie ermitteln zu können, ist der Punkt der höchsten Verdrehung zu wählen. So ist die Verdrehung in der Feldmitte unter Gleichlast gleich Null. Für Richtwerte möglicher Verdrehungen für einen Messbereich wird auf Kapitel 4.4.1 verwiesen. Hier sind die Verdrehungen für den Lagerbereich bereits aufgelistet. Alle anderen Verdrehungen sind in ihren Messbereichen geringer.

Verdrehungsmessungen können unter anderem zur Ermittlung einer Biegelinie verwendet werden. Hierbei kann man zwei Neigungsmessungen an einem Überbau vornehmen. Diese gelten dann als Randbedingung einer Biegelinie und so kann diese indirekt bestimmt werden.

Sollte ein Monitoring der Verdrehungen für den Rückschluss auf die Biegesteifigkeit gewählt werden, sind die Anforderung auf den Messort und den Messbereich anders zu wählen. Hierbei wird über die Verdrehung auf die Krümmung geschlossen. Durch hohe Rissbildung kommt es zu einer Steifigkeitsänderung und somit zu einer höheren Krümmung. Dies führt zu einer höheren Verdrehung, welche erfasst werden kann. Die Genauigkeiten müssen hierbei umso höher sein bei kleinerem Messbereich [17]. Die Firma PEC-Petschacher Consulting bietet Krümmungsmonitoring zur Ermittlung der Steifigkeiten des Bauteiles an. Nähere Informationen hierzu sind unter [18] zu finden.

Tabelle 17 Anforderung an das Monitoring von Verdrehungen

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Empfohlene Messgenauigkeit
Verdrehung⁴:	Temperatur	Verdrehung [mrad/°]	$\leq \pm 3,9$ mrad	statisch	$\leq 0,175$ mrad
	Verkehrslast	Verdrehung [mrad/°]		dynamisch oder hochdynamisch	$\leq 0,175$ mrad

4.11 Monitoring von Setzungen

Setzungen werden im Widerlager- und Pfeilerbereich gemessen. Diese hängen von den Eigenschaften des Bodens, der Gründungsart und der vorherrschenden Belastung ab. Die Höhe des Grundwasserspiegels hat direkten Einfluss auf die Beschaffenheit des Erdreichs und somit auch auf Setzungen. Weitere Einflüsse auf das Setzungsverhalten sind beispielsweise Frost, die Dauer der Belastung und das potenzielle Freilegen des Erdreiches durch Bauprojekte nahe des Brückenbauwerks.

⁴ Siehe Tabelle 9 und Tabelle 10

Setzungen haben direkte Einflüsse auf die Verformung und Verschiebung des Tragwerkes. Hierbei ist zwischen gleichmäßigen und ungleichmäßigen Setzungen zu unterscheiden. Bei Brückenbauwerken mit einer hohen Spannweite sind ungleichmäßige Setzungen wahrscheinlicher als gleichmäßige. Vor allem im Bereich des Widerlagers können starke Setzungen zu einem Sprung in der Fahrbahnübergangskonstruktion führen. Dies hat direkten Einfluss auf das Fahrverhalten und die Langlebigkeit von Fahrzeugen.

Ziele des Monitorings lassen sich folgend definieren:

- Erfassung von Setzungen infolge Last und umweltbedingten Events
- Erfassung von Langzeitsetzungen
- Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten infolge Setzungen

4.11.1 Anforderungen an das Monitoring von Setzungen

Setzungen stellen sich je nach Bodeneigenschaften über einen langen Zeitraum ein. Bei bindigem Boden für gewöhnlich über einen längeren Zeitraum als bei nicht bindigem Boden. Die Setzungen selbst können sich je nach Lagerung einstellen. Tiefgründungen senken sich in der Regel geringer als Flachgründungen. So sollten vor Planung eines Monitorings in Bezug auf Setzungen möglichst Informationen zur Gründungsart und der Bodenbeschaffenheit eingeholt werden. Diese haben erheblichen Einfluss auf den zu wählenden Messbereich.

In Abbildung 19 werden alte Setzgrenzwerte für die Gradientenabweichung aus der *DDR* definiert. Hierbei ist Δs die Setzung und a die Bezugslänge, beispielsweise von einem Pfeiler zum nächsten. Diese werden in Abbildung 20 noch als Graph dargestellt.

Brücken im Zuge von	$\Delta s/a$
Wirtschaftswegen	0,020
Straßen mit $V_E < 80 \text{ km/h}$	0,005
Straßen mit $V_E > 80 \text{ km/h}$	0,002
Autobahnen	
Nebengleisen der Eisenbahnen	0,005
Hauptgleisen der Eisenbahnen	0,002

Abbildung 19 Richtwerte zur funktionell bedingten Begrenzung der Gradientenabweichung[19]

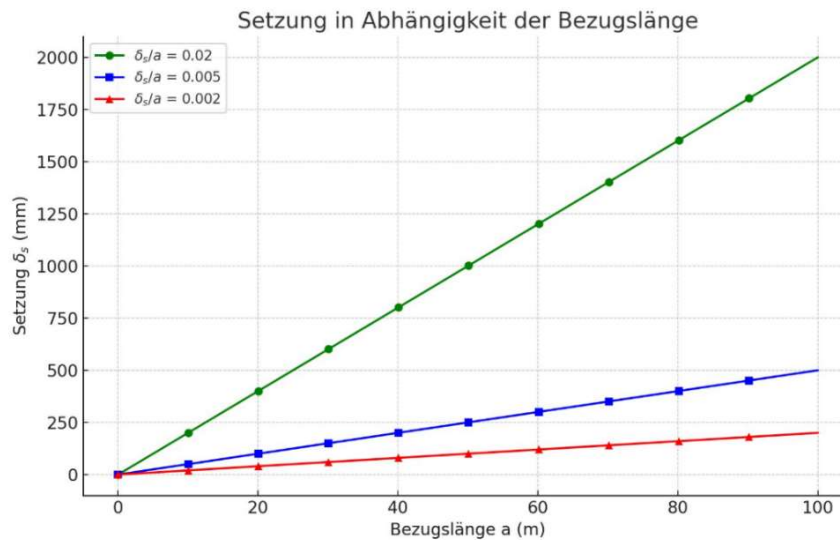


Abbildung 20 Setzung in Abhängigkeit der Bezugslänge

Diese Werte sind nicht mehr Stand der Technik, jedoch brauchbare Schätzwerte für einen Messbereich. Maßgebend ist hier vor allem das Verhältnis von $\Delta s/a = 0,002$ oder 2 ‰ der Bezugslänge. Diese lässt eine Setzung von 0,2 m bei einer Feldlänge von 100 m bei Autobahnbrücken zu. Diese wird als Messbereich herangezogen, wobei anzumerken ist, dass vereinzelt auch deutlich höhere Setzungen eintreffen können. Für eine empfohlene Genauigkeit wird ein Wert von kleiner als 1 mm angenommen.

Da Setzungen nach Inbetriebnahme der Brücke sich nur langsam einstellen, ist ein statisches Monitoring vollkommen ausreichend. Einzig bei fundamentnahen Erdarbeiten und plötzlichen Grundwassersenkungen kann ein dynamisches ereignisbasiertes Monitoring von Nöten sein.

Weiterhin ist die Messmethode noch zu berücksichtigen. Eine Setzungsüberwachung verlangt einen ruhenden Bezugspunkt. So kommen hier vorwiegend geodätische Messmethoden wie das Tachymeter, das Nivelliergerät, die Schlauchwaage oder GNSS-Systeme zum Einsatz. Ebenso kann über die Verformungs- und Verschiebungsmessung des Überbaus sowie über das Monitoring der Fahrbahnübergänge auf Setzungen geschlossen werden.

Ein Monitoring in Bezug auf Setzungen in Kombination mit einem Frühwarnsystem kann für unerwartete Ereignisse zum Vorteil sein. Abrupte ungleichmäßige Senkungen können das Tragwerk stark schädigen. Sollte es zu einer unerwartet hohen Senkung des Fahrbahnüberganges kommen, kann es auch zu Verkehrsbehinderung oder sogar Unfällen kommen.

Tabelle 18 Anforderungen an das Monitoring von Setzungen

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Empfohlene Messgenauigkeit
Setzungen:	Langzeitsetzung	Weg [mm]	0 mm bis 200 mm	statisch	≤1 mm
	Plötzliche Events	Weg [mm]		ereignisbasiert, dynamisch oder hochdynamisch	≤1 mm

4.12 Seilkraftmonitoring

Die Seilkraft kann über mehrere Methoden bestimmt werden. Eine häufig verwendete Methode ist die Bestimmung der vorherrschenden Kraft über die vorhandenen Eigenfrequenzen.

Ziele des Monitorings lassen sich folgend definieren:

- Ermittlung der Seilkraft
- Ermittlung der Biegesteifigkeit
- Ermittlung der Gesamtdämpfung

4.12.1 Anforderungen an das Seilkraftmonitoring

Beim Monitoring von Seilkräften ist es notwendig, die Eigenfrequenz und deren Veränderung zu erfassen. Die Voraussetzung ist, dass das Messsystem hochfrequente Abtastraten bei hohen Genauigkeiten ermöglicht.

Messungen werden indirekt über die Schwinggeschwindigkeit oder Schwingbeschleunigung ermittelt oder direkt über das Abklingen einer erzwungenen Anregung. Weiterhin kann auch die Auslenkung im zeitlichen Bezug erfasst werden. Einflussgrößen sind die Länge des Seils, die vorhandene Stahlspannung und die Art des Seiles bzw. der Konstruktion.

Auslenkungen sind bei langen Seilen auch im Dezimeterbereich möglich. In Einzelfällen sind sie auch bis zu einem Meter beobachtet worden [9].

Die Seilkraft lässt sich bei bekanntem geometrischem Parameter über die Eigenfrequenz bestimmen. Daten der Geschwindigkeitssensoren und Beschleunigungssensoren werden hierfür mittels einer Fourier-Transformation oder einer Fast-Fourier-Transformation in den Frequenzbereich überführt. Dominante Frequenzspitzen repräsentieren hierbei die Eigenfrequenzen des Seils.

Idealisierte und gerade Seile können über folgenden Zusammenhang bestimmt werden [20]:

$$f_{ks} = \frac{k}{2L} * \sqrt{\frac{H}{\mu}} \quad (19)$$

Mit:

f_{ks} ... Eigenfrequenz

k ... Ordnung der Eigenfrequenz (1,2, ... ,k)

L ... Länge

μ ... Masse des Litzenbündelseiles [kg/m]

H ... wirksame Seilkraft

Schrägseile werden im allgemeinen dynamischen Verhalten jedoch über Zugkraft und Biegesteifigkeit beschrieben. So kann folgende Formel als Näherungslösung herangezogen werden [20]:

$$f_{ks} = \frac{k}{2L} * \sqrt{\frac{H}{\mu}} * \left(1 + 2 * \sqrt{\frac{EI}{N * L^2}} + \left(4 + \frac{k^2 * \pi^2}{2} \right) * \frac{EI}{N * L^2} \right) \quad (20)$$

Mit:

k ... Ordnung der Eigenfrequenz

L ... Seillänge [m]

N ... wirksame Seilkraft [N]

EI ... Biegesteifigkeit des Seiles

In der Regel werden Beschleunigungssensoren eingesetzt. Messbereiche eines Beschleunigungssensors variieren in Abhängigkeit der erwarteten Seilkraft und der gegebenen Steifigkeit des Seils. Diese Sensoren nehmen die Beschleunigung der Auslenkung hochfrequent auf und ermitteln somit die Eigenfrequenz. Unter Berücksichtigung des Shannon Theorems ist die Messrate höher als die doppelte Eigenfrequenz zu wählen, um Aliasingeffekte zu verhindern. In [13] Tabelle 3 wird bei Beschleunigungs- und Schwingungsmessungen mindestens die 10-fache Eigenfrequenz als Messrate empfohlen. Dort wird auch ein Messbereich von bis zu 50 m/s² angegeben mit einer Genauigkeit von 0,01 bis 0,1 m/s².

Tabelle 19 Anforderungen an das Seilkraftmonitoring

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Empfohlene Messgenauigkeit
Seilkraft:	Verkehrslast	Beschleunigung [m/s ²]	0 m/s ² bis 50 m/s ²	dynamisch oder hochdynamisch	≤0,1 m/s ²

4.13 Schwingungsmonitoring und Ermittlung von Eigenfrequenzen

Schwingungsmonitoring kann für eine Vielzahl von Ermittlungen diverser Einflüsse und Schäden verwendet werden. Schwingungsmesssensoren können an jedem Bauteil angebracht werden. Verwendet wird dieses Monitoring primär zur Gesamtbeurteilung des Tragwerkes, es kann aber auch für einzelne lokale Messungen verwendet werden. In diesem Kapitel wird sich hauptsächlich auf die vertikale Eigenfrequenz bezogen. Die Erfassung der primären Eigenfrequenz und der Änderung dieser kann Rückschlüsse auf Ermüdungserscheinungen liefern.

Ziele des Monitorings lassen sich folgend definieren:

- Ermittlung der Eigenfrequenz des Gesamtbauwerkes sowie einzelner Bauteile
- Bestimmung der Bauwerkssteifigkeit
- Lokalisierung kritischer oder gefährdeter Stellen am Gesamtbauwerk oder an einzelnen Elementen
- Ermittlung des verbliebenen Tragwerkswiderstandes

4.13.1 Anforderungen an das Schwingungsmonitoring

Das Monitoring von Schwingungen ist stark von der spezifischen Aufgabenstellung abhängig. Besonders bei Fußgängerbrücken wird auf die Eigenfrequenz geachtet, da die Erregung durch Fußgänger ähnlich der Eigenfrequenz des Tragwerks sein kann und zu einer Resonanz führen kann, welche zum Ausschlagen bis hin zum Versagen des Bauwerks gehen kann.

Abbildung 5 auf Seite 16 zeigt die üblichen Eigenfrequenzen abhängig von der größten Feldlänge von mehreren Straßenbrücken. Anhand dieser Grafik lässt sich darauf schließen, dass die Grundfrequenz zwischen 1 Hz und 10 Hz liegt. Für Fußgängerbrücken ist die Grundfrequenz meist zwischen 1 und 5 Hz [9].

Ermittelt wird beim Schwingungsmonitoring die Eigenfrequenz des Bauteils, deren Dämpfung und auch die Schwingungsmoden. Zeitlicher oder plötzliche Veränderung dieser erfassten Werte kann auf Schädigung hinweisen. Übliche Hinweise sind der Abfall der Eigenfrequenz oder ein Anstieg der Dämpfung des Bauteils über einen längeren Zeitraum, was auf eine Verringerung der Steifigkeit hindeutet.

Zur Aufnahme von Schwingungen werden in erster Linie Beschleunigungssensoren gewählt. Bei diesen ist auf die Platzierung an den richtigen Stellen zu achten. Hierbei wird unterschieden in Einzelmessungen (SPOT-Messungen) und flächenmäßigen Messungen am gesamten Bauwerk mittels Sensor-Raster [1]. Um aufschlussreiche Ergebnisse zu erhalten, ist darauf zu achten, dass die Beschleunigung an Punkten mit möglichst hoher Auslenkung gemessen wird. Weiters ist die Abtastrate mit mindestens mehr als dem Doppelten der erwarteten Eigenfrequenz zu wählen, um das Shannon-Theorem einzuhalten. In [13] Tabelle 3 wird bei Beschleunigungs- und Schwingungsmessungen mindestens die 10-fache Eigenfrequenz als Messrate empfohlen. Für eine empfohlene Genauigkeit wird sich an [13] Tabelle 3 orientiert, welche für Beschleunigungsmessung eine Genauigkeit von weniger als 0,1 m/s² vorschlägt.

Tabelle 20 Anforderungen an das Schwingungsmonitoring

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Empfohlene Messgenauigkeit
Eigenfrequenz:	Materialermüdung /-schädigung	Beschleunigung [m/s ²] Frequenz [Hz]	0 m/s ² bis 50 m/s ² ~1 Hz bis ~10 Hz	dynamisch oder hochdynamisch	≤0,1 m/s ²

4.14 Ermüdungsmonitoring über Dehnungen

Ermüdungsmonitoring ist ein Langzeitmonitoring. Es dient zur Ermittlung der Restlebensdauer eines Bauwerkes. Ziel ist es, Spannungsschwingbreiten in Form von Dehnungen zu erfassen und so auf die Lastwechselzahl zu schließen.

Ziele des Monitorings lassen sich folgend definieren:

- Ermittlung des Belastungskollektivs
- Ermittlung der Schädigung je Messzeitraum
- Ermittlung der rechnerischen Lebensdauer kritischer oder maßgebender Bauteile
- Ermittlung von Werten für die Ermüdungsanalyse

4.14.1 Anforderungen an das Ermüdungsmonitoring

Beim Monitoring von Ermüdungen ist die Betrachtung des Bewehrungsstahls oder des Spannstahls unterschiedlich zu der Betrachtung des Betons. Auf das Ermüden von Beton hat die mittlere Spannung einen großen Einfluss. Bei Stahl hat die mittlere Spannung keinen Einfluss. Einzig

Spannungsspitzen werden in der Ermüdung betrachtet. Hierzu werden Wöhlerlinien verwendet, welche das mögliche Versagen des Baustoffes nach einer endlichen Anzahl an Lastwechsel beschreiben.

Auch wenn für die Bemessung die Ermüdung des Betons betrachtet wird, ist es nicht üblich, diese als maßgebenden Wert im Betonbrückenbau zu betrachten. Ermüdungsversagen am Beton selbst wird nicht gemessen, sondern an der Bewehrung oder anderen Stahlbauteilen. Die allgemeine Wöhlerlinie für Stahl ist in Abbildung 6 bei Kapitel 4.1.4 zu sehen.

Wichtiger Bestandteil der Ermüdung ist die Schädigungshypothese. Abbildung 21 beschreibt das Konzept durch Schädigung eines Lastkollektivs, entnommen aus [3].

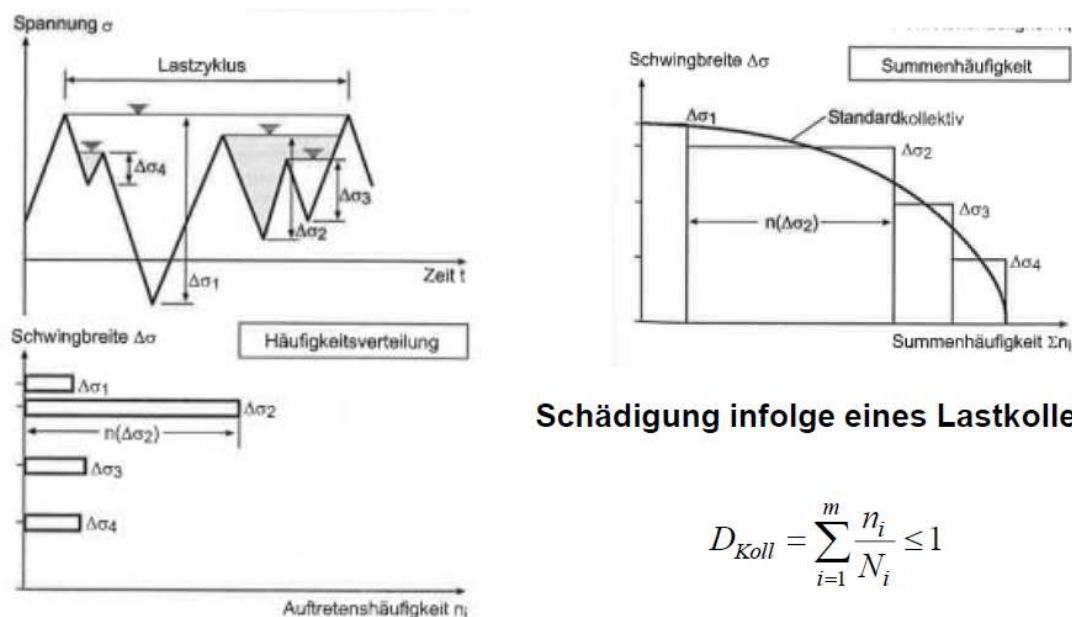


Abbildung 21 Konzept der Schädigungshypothese [3]

Die Grafik links oben beschreibt einen theoretischen Spannungszykluszyklus wirkend auf einen Baustoff. Aus diesem sind die Spannungsunterschiede $\Delta\sigma_i$ auch als Schwingbreite zu entnehmen. Diese werden in der Grafik links unten in ihrer Auftretenshäufigkeit geordnet, mit $\Delta\sigma_1$ als der höchsten Spannungsunterschied oder Schwingbreite. Die Grafik rechts oben zeigt diese Schwingbreiten in ihrer Summenhäufigkeit. Die Formel rechts unten, auch in Formel (7) auf Seite 16 angegeben, zeigt das Palmgren-Miners Theorem. Diese gibt die Summenhäufigkeit verschiedener Spannungsunterschiede im Verhältnis zum jeweiligen Ermüdungswiderstand des Materials an. Solange dieses Verhältnis unter dem Wert Eins bleibt, tritt kein Versagen ein. Weiters gibt dieses Verhältnis den Grad der aktuellen Schädigung des Materials in Prozent an.

Die Aufgabe des Monitorings von Ermüdungen ist die Erkennung dieser Spannungsschwankungen. Diese müssen in ihrem Wert und ihrer Häufigkeit aufgenommen werden. Dies geschieht meist in Form von hochauflösenden Dehnungsmessungen mittels Dehnmessstreifen oder faseroptischer Sensoren. Diese nehmen die zugehörigen Dehnungen des Materials auf und ermöglichen über den E-Modul des Materials oder bekannten Arbeitslinien die Ermittlung der Schwingbreite der Spannung. Weiterhin ermöglicht es gleichzeitig eine Zählung der Spannungszyklen. Verarbeitung aufgenommener Daten ermöglichen mittels des Konzepts aus Abbildung 21 Rückschlüsse auf eine Restlebensdauer zu liefern.

Für das Monitoring von Ermüdungen ist einzig die dynamische Last maßgebend, da Spannungen aus Eigengewicht in der Regel nicht schwanken. Diese maßgebende Last ist im Straßenbrückenbau vor allem die Verkehrslast. Hierzu muss der angebrachte Sensor eine hohe Lastwechselzahl erfassen können. In Abbildung 22 aus [21] wird die erwartete Anzahl an Lastkraftwagen je Fahrstreifen auf mehreren Straßenarten angegeben.

Verkehrskategorien		N_{obs} je Jahr und je LKW-Fahrstreifen
1	Straßen und Autobahnen mit zwei oder mehr Fahrstreifen je Fahrtrichtung mit hohem LKW-Anteil	$2,0 \times 10^6$
2	Straßen und Autobahnen mit mittlerem LKW-Anteil	$0,5 \times 10^6$
3	Hauptstraßen mit geringem LKW-Anteil	$0,125 \times 10^6$
4	Örtliche Straße mit geringem LKW-Anteil	$0,05 \times 10^6$

Abbildung 22 Anzahl erwarteter Lastkraftwagen je Jahr für einen LKW-Fahrstreifen [21]

So ist in dieser Abbildung zu sehen, dass ein Sensor, eingesetzt für ein Ermüdungsmonitoring auf Autobahnbrücken pro LKW-Fahrstreifen 2 Millionen größere Spannungsdifferenzen im Jahr aufnehmen muss. Inwiefern dieser LKW maßgebende Spannungsspitzen auslöst, ist abhängig vom Tragwerk zu beurteilen. Dieses Monitoring kann die Anzahl der LKW-Überfahrten jedoch auch überprüfen und eine Verkehrszählung vollziehen.

Für die Messbereiche und empfohlenen Genauigkeiten wird auf das Kapitel Monitoring von Dehnungen verwiesen. Dort sind die Anforderungen für Dehnungsmessungen an Beton und Stahl bereits erläutert und finden in diesem Kapitel dieselbe Anwendung. Einzig die Messrate ist bei Ermüdung in jedem Fall dynamisch oder hochdynamisch zu wählen. Da Ermüdungsmessungen prinzipiell nur am Stahl durchgeführt werden, werden die Messbereiche für Beton hier nicht angegeben.

Tabelle 21 Anforderung an das Ermüdungsmonitoring

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich ⁵	Messfrequenz	Empfohlene Messgenauigkeit
Ermüdung Betonstahl	Spannung	Dehnung [‰, µm/m]	Siehe Tabelle 3 (maximal $\pm 2,5$ ‰)	dynamisch oder hochdynamisch	$\leq 0,001$ ‰ $\leq 1 \mu\text{m/m}$

4.15 Weigh in Motion (WIM)

Weigh in Motion (WIM) bedeutet Wiegen in der Bewegung. Ein WIM System soll den Verkehr während der Fahrt aufnehmen und somit ein Monitoring der Einwirkungen ermöglichen. Eine

⁵ Für relative Messungen zugrunde Verkehr ist der Messbereich um ca. 60 % zu reduzieren.

Sonderform von WIM ist das BWIM (Bridge Weigh in Motion). Hierbei wird das Brückentragwerk selbst zu einer Waage umfunktioniert und dient als Messanlage. Der Fokus auf den Widerstand des Tragwerkes rückt hier in den Hintergrund.

Ziele des Monitorings lassen sich folgend definieren:

- Ermittlung von Achslasten, Achsabständen und Gesamtgewichten von Fahrzeugen
- Ermittlung der langzeitigen Bauwerksreaktion auf diese Belastung
- Kontrolle der Einhaltung von Lastbeschränkungen
- Zufahrtsteuerung von Brückenbauwerken

4.15.1 Anforderungen an Weigh in Motion

Weigh in Motion Systeme werden in erster Linie verwendet, um die Verkehrscharakteristik zu erfassen. Besonders der Schwerlastverkehr und der Sondertransport setzen ein Brückentragwerk starker Belastung aus. So handelt es sich in diesem Fall in erster Linie um ein Monitoring von Einwirkungen. Maßgebende Einflussfaktoren sind der Achsabstand von Fahrzeugen und die Achslast und weiterer Folge die Radlast dieser.

WIM-Systeme

WIM - Systeme werden in die Fahrbahn eingebracht. Sie messen direkt bei Überfahrt die Belastung einzelner Rad- oder Achslasten. WIM – Systeme verlangen den Einbau von einzelnen Sensoren, Sensorraster oder Biegebalken in den Fahrbahnaufbau, was diesen im Einbau beschädigt. Somit handelt es sich um ein invasives Verfahren, mit Ausnahme, dass der Einbau bei Tragwerkserrichtung inkludiert wird. So ermöglicht WIM eine Echtzeitaufnahme des Verkehrsflusses und der Verkehrsbelastung.

Eingebaute Sensoren reagieren entweder auf Druck oder Verformung der aufgebrachten Verkehrslast. Häufig eingesetzte Sensoren hierbei sind faseroptische Sensoren, piezoelektrische Sensoren, induktive Sensoren oder Dehnmessstreifen [17].

Um einen Messbereich zu definieren, muss man den erwarteten Lastverkehr in Betracht ziehen. Hierzu sind in Abbildung 23 Klassifizierungen der häufigen Lastkraftwagen gezeigt und in Abbildung 24 Klassifizierungen zu Sonderfahrzeugen. Daraus geht hervor, dass die höchste erwartete Achslast bei 240 kN liegt. Einfach ausgedrückt kann man annehmen, dass die höchstmögliche Last auf einen einzelnen Sensor bei 120 kN liegt, die Hälfte der höchsten erwarteten Achslast.

Es wird eine Genauigkeit von weniger als 1 kN vorgeschlagen bei einer hohen Messrate, die es ermöglicht, Verkehrsbelastung auch bei hohen Geschwindigkeiten zu erfassen.

Weiters wird von den Kraftsensoren eine hohe Messzahl erwartet. Wie in Abbildung 22 auf Seite 46 zu sehen ist, werden auf Autobahnbrücken 2 Millionen LKW-Überfahrten pro LKW-Fahrstreifen und Jahr erwartet. Zusätzlich nehmen die in der Fahrbahn eingelassenen Sensoren zwangsläufig auch den PKW-Verkehr auf. So muss die Zuverlässigkeit, dass der Sensor diese Belastung aushalten kann, gewährleistet werden.



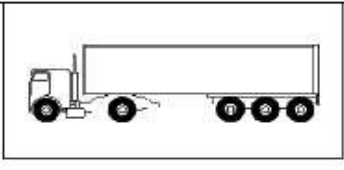
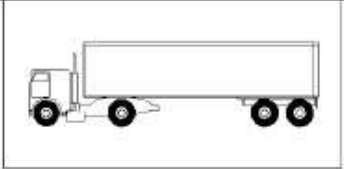
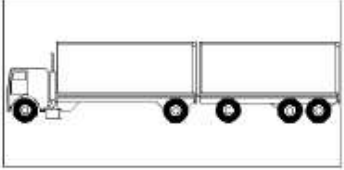
1	2	3	4
Ansicht der Lastkraftwagen	Achs- abstand (m)	Häufige Achslast (kN)	Reifenart (siehe Tabelle 4.8)
	4,5	90 190	A B
	4,20 1,30	80 140 140	A B B
	3,20 5,20 1,30 1,30	90 180 120 120 120	A B C C C
	3,40 6,00 1,80	90 190 140 140	A B B B
	4,80 3,60 4,40 1,30	90 180 120 110 110	A B C C C

Abbildung 23 Gruppe von "häufigen" Lastkraftwagen lt. EC1 [22]

Gesamtgewicht	Aufbau	Bezeichnung
600 kN	4 Achsen mit 150 kN	600/150
900 kN	6 Achsen mit 150 kN	900/150
1200 kN	8 Achsen mit 150 kN oder 6 Achsen mit 200 kN	1200/150 1200/200
1500 kN	10 Achsen mit 150 kN oder 7 Achsen mit 200 kN + 1 Achse mit 100 kN	1500/150 1500/200
1800 kN	12 Achsen mit 150 kN oder 9 Achsen mit 200 kN	1800/150 1800/200
2400 kN	12 Achsen mit 200 kN oder 10 Achsen mit 240 kN oder 6 Achsen mit 200 kN (Abstand 12m) + 6 Achsen mit 200 kN	2400/200 2400/240 2400/200/200
3000 kN	15 Achsen mit 200 kN oder 12 Achsen mit 240 kN + 1 Achse mit 120 kN oder 8 Achsen mit 200 kN (Abstand 12 m) + 7 Achsen mit 200 kN	3000/200 3000/240 3000/200/200
3600 kN	18 Achsen mit 200 kN oder 15 Achsen mit 240 kN oder 9 Achsen mit 200 kN (Abstand 12 m) + 9 Achsen mit 200 kN	3600/200 3600/240 3600/200/200

Abbildung 24 Klassen für Sonderfahrzeuge lt. EC2 [22]

BWIM-Systeme

BWIM – Systeme unterscheiden sich in einem wichtigen Faktor von WIM – Systemen. Während die Anforderung an die Erfassung der Verkehrslast und des Verkehrsflusses dieselbe ist, wird ein BWIM – System nicht in die Fahrbahn eingelassen, sondern auf der Unterseite des Überbaues installiert. Dies bedeutet, dass der Eingriff in die Bausubstanz deutlich geringer ist.

Hierbei wird die Belastung in Form von Dehnungen der unteren Faser erfasst. Es gelten die gleichen Messbereiche und Genauigkeiten, wie sie in Kapitel 4.8 Tabelle 15 für den Messbereich und die Genauigkeit angegeben wurde.

Ein Beispiel für BWIM Systeme ist das iBWIM System von [18]. Hierbei werden mehrere Dehnaufnehmer in Form von Dehnmessstreifen auf der Unterseite ausgewählter Fahrstreifen am Oberbau installiert. Angebracht werden diese mittels Schlagdübel im Betonbau oder leistungsstarken Magneten bei Stahlbrücken. Für die Kalibrierung wird ein vorher gewogener LKW mehrmals über das Tragwerk gefahren. Dieser dient zur Erkennung der Dehnung unter einer bekannten Last. Dieses System erlaubt die Aufnahme von Achslasten, Überfahrtsgeschwindigkeiten und der Achszahl.

Tabelle 22 Anforderungen an WIM-Systeme

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Empfohlene Messgenauigkeit
WIM - Systeme					
Verkehr	Verkehrslast	Kraft [kN]	0 kN bis 240 kN Achslast Siehe Abbildung 23 und Abbildung 24	dynamisch oder hochdynamisch	≤ 1 kN
BWIM Systeme					
Dehnung Beton Zug	Verkehrslast	Dehnung [‰, µm/m]	$< \pm 0,1$ ‰	dynamisch oder hochdynamisch	$\leq 0,001$ ‰ $\leq 1 \mu\text{m/m}$
Dehnung Betonstahl	Verkehrslast	Dehnung [‰, µm/m]	Siehe Tabelle 3 ($\pm < 2,5$ ‰)	dynamisch oder hochdynamisch	$\leq 0,001$ ‰ $\leq 1 \mu\text{m/m}$

4.16 Zusammenfassende Anforderungen an das Monitoring

In diesem Kapitel werden noch einige Punkte behandelt, welche universell für alle Monitoringaufgaben an Brückentragwerken gelten. Temperatur, Witterung und andere Umweltbedingungen sind besonders genau zu betrachten, da diese Faktoren starken Einfluss auf Sensoren und deren Messergebnisse haben können. Weiters ist die Langlebigkeit von Sensoren zu gewährleisten, genauso wie die Zugänglichkeit für Installation und Wartung. Zuletzt werden auch die Tabellen von Kapitel 4.3 bis Kapitel 4.15 zusammengefasst und in einer Tabelle dargestellt.

Witterung und Umwelteinflüsse

Brücken sind der Witterung und dem Wetter schutzlos ausgeliefert. So sind auch Sensoren Faktoren wie Schnee, Regen, Wind, Feuchtigkeit und Sonneneinstrahlung potenziell ausgesetzt. Hier wird in drei unterschiedliche Bereiche unterschieden:

1. Installation auf dem Tragwerk: Sensoren auf dem Überbau, insbesondere in Fahrbahnnähe sind Regen und anderen Wetterbedingungen direkt ausgesetzt. Zudem sind diese durch die Verkehrsnähe auch möglicher Beschädigung aus dem Verkehr ausgesetzt.
2. Installation auf der Unterseite des Tragwerks: Sollte das Sensorsystem auf der Unterseite des Oberbaus installiert sein oder auf Pfeiler oder Widerlager, ist der Einfluss aus Regen geringer. Erhöhte Luftfeuchtigkeit ist jedoch immer noch gegeben. Wind und andere Einflüsse sind trotzdem weiterhin maßgebende Faktoren. Von Sonneneinstrahlung sind Sensoren je nach Lage möglicherweise auch geschützt.
3. Installation im Tragwerk: Sensoren sind, wenn sie in einem Hohlkasten, im Lagerbereich zwischen Herdwand und Endquerträger oder aber auch in Hüllrohren sowie auch direkt im Material verbaut sind, weitestgehend von Regen und Wind geschützt. Hierbei äußert sich nur noch die Temperatur und Luftfeuchtigkeit als maßgebender Umwelteinfluss.

4. Installation außerhalb des Tragwerkes: Monitoringsysteme, welche nicht direkt am Tragwerk, sondern außerhalb montiert sind, sind ebenso meist komplett der Witterung ausgesetzt. Dies betrifft beispielsweise Nivelliergeräte oder Tachymeter sowie optische oder lasergestützte Sensorik. Diese Sensorik ist mit baulichen Maßnahmen vor Witterung zu schützen.

Temperatur

Die Tages- und Jahresschwankung der Temperatur hat direkten Einfluss auf Sensoren. In Österreich wird in der Bemessung von einem Temperaturspektrum von ca. -20°C bis ca. + 40°C im Jahresgang ausgegangen. Dies ergibt eine Temperaturschwankung von insgesamt 60°C. Sensoren müssen diese Temperaturdifferenz aushalten können. Temperaturbedingte Drifts oder Messabweichungen sind mittels Kalibrierung und fortlaufenden Temperaturmessungen zu berücksichtigen.

Wartung

Brückentragwerke werden mit einer rechnerischen Lebensdauer von ca. 100 Jahren bemessen. Messsysteme haben für gewöhnlich eine deutlich kürzere Lebensdauer. So muss im Laufe eines langfristigen Monitorings Wartungen in der Planung berücksichtigt werden. Diese können von dem Austausch einzelner Sensorelemente bis zum Austausch des gesamten Systems reichen. Um diese zu ermöglichen, ist die Zugänglichkeit zum System zu betrachten. Bei hohen Tragwerken ist bei Bedarf ein Brückeninspektionsgerät (kurz BIG) oder ein Steiger zu verwenden. Diese können aber unter Umständen verkehrsbehindernd sein. Fest verbaute Systeme, welche unter Umständen auch in das Baumaterial integriert sein können, stellen in der Wartung eine hohe Herausforderung dar. Das Vertrauen, dass der gewählte Sensor wie gewünscht funktioniert und eine lange Lebenszeit hat, muss gegeben sein. Sollte es trotz allem zu einer nötigen Wartung kommen, muss unter Umständen das Material beschädigt werden.

Lebensdauer

Wie bereits im vorherigen Punkt Wartung erwähnt, ist die Lebensdauer eines Monitoringsystems deutlich kürzer als die des Bauwerks. So muss passend zu den Monitoringaufgaben die kalkulierte Lebensdauer der Systeme gewählt werden. Sollte ein temporäres Monitoring durchgeführt werden, fällt diese Problematik meist weg. Bei permanentem Monitoring ist die Wartung mit zu berücksichtigen. Ein drahtloses Monitoring agiert meist mit interner Stromversorgung über eine Batterie, welche regelmäßig getauscht werden muss. Viele Monitoringsysteme bedienen sich selbstüberprüfender Sensoren, welche Auskunft über ihren Funktionszustand geben (z.B.: Spannungsmessung an der Batterie).

Sicherheit und Vandalismus

In die Planung des Monitorings muss die risikofreie Installation des Systems integriert werden. Brückentragwerke können vor allem bei hoher Bauhöhe ein hohes Risiko bei Bauarbeiten mit sich führen. Vorteil ist allerdings, dass Systeme, welche sich in großer Höhe befinden, meist mehr vor Vandalismus geschützt sind. Bei Systemen, die leicht zugänglich sind, muss die mutwillige Beschädigung dritter Personen bedacht werden und mittels Gegenmaßnahmen entgegengewirkt werden (z.B.: Stabiles Gehäuse um das System, Videoüberwachung, Kabelführung möglichst sichtgeschützt umsetzen, etc.)

Zusammenfassung der Tabellen

Eine Zusammenfassung der Tabellen von Kapitel 4.3 bis Kapitel 4.15 mit ihren Anforderungen an deren Monitoringaufgaben ist in Anhang B vorzufinden.

5 Sensoren und Sensortypen

In diesem Kapitel werden die Sensortypen aus [1] mit ihren Ausführungen und Eigenschaften behandelt. Die Wahl des eingesetzten Sensors hängt von der Aufgabenstellung des Monitorings ab. Zuvor werden allgemeine Punkte zur Sensorauswahl in ihren Aufgaben zum Brückenmonitoring erläutert. Diese nachfolgenden Kriterien gelten größtenteils für alle Sensortypen. Wichtige Kriterien zur Auswahl des Sensors sind:

- Messgröße
- Messbereich
- Abtastrate
- Präzision/Genauigkeit/Auflösung
- Kalibrierung
- Robustheit
- Sensorraster-/layout
- Stromversorgung
- Langzeitverhalten
- Lebensdauer

5.1 Kriterien zur Sensorwahl

Messgröße

Die Messgröße ist die physikalische Größe, die ein Sensor erfasst. Diese ist definiert über die Messzahl und zugehöriger Einheit [1]. Eine Übersicht hierzu ist aus [1] in Anhang C vorzufinden. Dort werden physikalische Messgrößen den gängigen Sensortypen, welche folgend noch behandelt werden, zugeordnet und bewertet. Diese Bewertung unterscheidet sich in gute, bedingte oder keine Eignung.

Messbereich

Siehe Kapitel 4.2 Seite 17 Unterpunkt Messbereich.

Abtastrate

Die Abtastrate beschreibt die Häufigkeit, mit welcher Sensoren Messwerte erfassen und aufzeichnen können. Diese hängt vor allem von der Datenakquisitionseinheit ab. Sie wird in Messungen pro Sekunde (Einheit Hz) bestimmt. Abtastraten sind nach dem Shannon-Theorem mit mehr als dem doppelten der erwarteten zu messenden Funktion zu wählen, um Aliasing-Effekte zu vermeiden [10].

Auflösung/Genauigkeit/Präzision

Die Auflösung ist über die kleinste Messwertänderung definiert, welche ein Sensor wahrnehmen kann. Diese ist oft über den Datentyp des Messwertes bei dem Auslesegerät beschränkt. Die Auflösung soll in den folgenden Anforderungen immer höher als die empfohlene Genauigkeit gewählt werden, um potenzielle Abweichungen und Fehler ausgleichen zu können. Weiters ist, sollte die Auflösung geringer als die Genauigkeit ausfallen, die Genauigkeit durch die Auflösung des Sensors begrenzt.

Die Präzision beschreibt die Konsistenz der Messergebnisse bei unveränderten Bedingungen. Sie zeigt, wie nahe die Messergebnisse bei gleichen Verhältnissen beieinanderliegen.

Die Genauigkeit gibt die Abweichung des tatsächlichen Wertes an. Sie unterliegt einigen Effekten, welche die Genauigkeit beeinträchtigen können, wie zum Beispiel:

- Nullpunktfehler
- Spannefehler
- Nichtlinearität
- Hysterese
- Nichtwiederholbarkeit
- Temperaturfehler

Besonders der Temperaturfehler hat im Brückenmonitoring durch den Einfluss des Temperatur-Jahresganges einen besonderen Einfluss.

Grundsatz ist: Eine hochpräzise Messung kann äußerst ungenau sein!

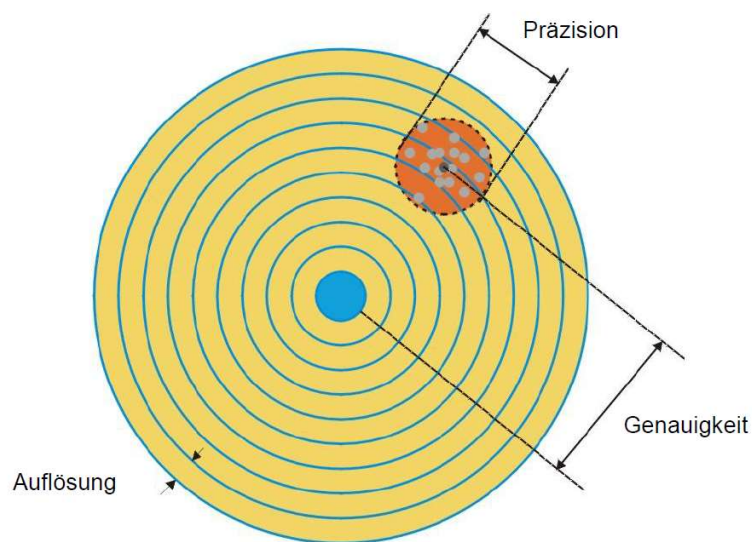


Abbildung 25 Darstellung von Präzision, Genauigkeit und Auflösung [23]

Kalibrierung

Eine Kalibrierung dient dazu festzustellen, wie hoch der maximale Messfehler (bzw. statistisch die Messunsicherheit) und damit die erzielbare Genauigkeit in der Praxis ist.

Die meisten Sensoren werden unter Laborbedingungen kalibriert. Diese Ergebnisse werden meist für die Eigenschaften des Sensors in ihren jeweiligen Produktblättern angegeben. Für die Anwendung im Brückenmonitoring können diese angegebenen Kennwerte jedoch stark abweichen. Die raue Umgebung durch Witterung, Temperatur und anderen Einflüssen werden oft nicht ausreichend berücksichtigt.

Im Institut für Ingenieurgeodäsie und Messtechnik der TU Graz wurden mehrere Neigungssensoren im Rahmen des Projektes *PREMainSHM* von sechs verschiedenen Typen und fünf Herstellern auf ihr Langzeitverhalten und ihr Verhalten in Bezug auf Temperatursprünge analysiert [24]. Hierfür wurden Temperaturwechsel in der Klimakammer durchgeführt, um ihr Verhalten auf die Umgebungstemperatur zu überprüfen. Das Ergebnis dieser Studie war, dass die erreichbaren Genauigkeiten im erweiterten Temperaturbereich um ein Vielfaches niedriger sind als erwartet. Dies ist beispielsweise an einem Sensor in Abbildung 26 dargestellt, wo die tatsächliche Messgenauigkeit im erweiterten Temperaturbereich um den Faktor 250 höher ist als die angegebene Auflösung. Für

die meisten Sensoren kann dieser Temperaturabhängigkeit mittels Kalibrierung gut entgegengewirkt werden.

Typische Temperaturabhängigkeit bei -10°C bis 40°C: -0.025° bis 0.025°

Tilt Sensor Specifications

Parameter	Value
Resolution	0.0001° (0.00175 mm/m)
Repeatability	±0.0005° (±0.0087 mm/m)
Range	±90°

Abbildung 26 Auszug aus der Präsentation zu PREMainSHM Meeting am 05.12.2023 [24]

Robustheit

Die Lebensdauer eines Sensors kann durch Witterung, mechanische Belastung, Temperatur und Vandalismus stark verkürzt werden. Jeder Sensor hat unterschiedliche Reaktionen auf diese Einflüsse.

Ein guter Indikator für Sensoren ist die IP-Schutzklasse, welche in [25] definiert ist. Sie kategorisiert den Schutz gegen Berührung, Fremdkörper und Wasser bei elektrotechnischen Bauteilen.

Bestandteil	Ziffern oder Buchstaben	Bedeutung für den Schutz des Betriebsmittels	Bedeutung für den Schutz von Personen	Bezug
Code-Buchstaben	IP	–	–	–
Erste Kennziffer	0 1 2 3 4 5 6	Gegen Eindringen von festen Fremdkörpern (nicht geschützt) ≥ 50 mm Durchmesser ≥ 12,5 mm Durchmesser ≥ 2,5 mm Durchmesser ≥ 1,0 mm Durchmesser staubgeschützt staubdicht	Gegen Zugang zu gefährlichen Teilen mit (nicht geschützt) Handrücken Finger Werkzeug Draht Draht Draht	Abschnitt 5
Zweite Kennziffer	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	Gegen Eindringen von Wasser mit schädlichen Wirkungen (nicht geschützt) senkrecht Tropfen Tropfen (15° Neigung) Sprühwasser Spritzwasser Strahlwasser starkes Strahlwasser zeitweiliges Untertauchen dauerndes Untertauchen Hochdruck und hohe Strahlwassertemperatur	–	Abschnitt 6
Zusätzlicher Buchstabe (fakultativ)	A B C D	–	Gegen Zugang zu gefährlichen Teilen mit Handrücken Finger Werkzeug Draht	Abschnitt 7
Ergänzender Buchstabe (fakultativ)	H M S W	Ergänzende Information speziell für: Hochspannungsgeräte Bewegung während Wasserprüfung Stillstand während Wasserprüfung Wetterbedingungen	–	Abschnitt 8

Abbildung 27 IP-Schutzklassen ÖVE/ÖNORM EN 60529 [25]

Je nach Anforderung ist die gefragte Schutzklasse zu wählen. Eine Schutzklasse von mindestens IP 63 ist jedoch in den meisten Fällen vorauszusetzen.

Sensorraster /-layout

Sensorplatzierung ist gezielt zu wählen, um aufschlussreiche Messergebnisse zu bekommen. Hinzu kommt, dass alle Sensoren mit der Datenakquisitionseinheit und einer eventuell notwendigen Stromversorgung in Verbindung stehen müssen. Kabelführung, Stromversorgung und alle weiteren Einbauten sind im Vorhinein zu planen.

Für das Anbringen und den Betrieb der Sensoren oder des Sensors sind auch mehrere Bedingungen zu beachten:

- Zugänglichkeit zu den für das Monitoring maßgebenden Bereichen
- Handhabung und Montage
- Witterungsumstände
- Sicherheit vor Vandalismus
- Verfügbare Stromanschlüsse oder alternative Energieversorgung (z.B. Solarpanel)
- Wartung und möglicher Tausch defekter Sensoren

Stromversorgung

Hier ist die Unterscheidung von kabelgebundenen und kabellosen Systemen zu beachten.

Bei kabellosen Sensoren erfolgt die Energieversorgung am Sensor selbst mittels Batterie. Hierbei ist der Grundsatz: Doppelte Abtastrate führt zum doppelten Energieverbrauch und somit zu halber Lebensdauer der Batterie. Daher sind hochfrequente Messungen eher ungeeignet für die kabellose Überwachung. Der Austausch der Batterien muss somit mithilfe einer Wartungsplanung berücksichtigt werden. Es empfiehlt sich, den Spannungszustand der Batterie selbst im Sensor zu überwachen, um auf plötzliche Spannungsabfälle rechtzeitig reagieren zu können.

Kabelgebundene Sensoren erhalten ihre Energieversorgung über ihren Anschluss. Die Energieversorgung selbst ist je nach Umstand zu wählen. Sollte ein Netzanschluss an der Brücke vorhanden sein, kann dieser verwendet werden. Bei Fehlen eines Netzanschlusses kann auf Kleinwindkraftanlagen oder Solarpaneele zurückgegriffen werden [26]. Hierbei ist das Zwischenspeichern der Energie notwendig, um bei Solarenergie die Nacht zu überbrücken oder bei Windkraftanlagen einen Stillstand auszugleichen. Sollte eine Beleuchtung am Bauwerk montiert sein kann auch diese als Stromlieferant dienen. Dabei ist zu beachten, dass oft tagsüber, wenn die Beleuchtung nicht gebraucht wird, auch kein Strom fließt.

Auf eine durchgehende Stromversorgung vom Sensor ist zu achten, wobei nicht jeder Sensor Stromversorgung benötigt. Sensoren wie FOS benötigen in der Regel die Energieversorgung nur am Auslesegerät.

Langzeitverhalten

Bei Langzeitmessungen kann die Genauigkeit von Sensoren nachlassen. Bekannte Effekte sind systematische Messfehler (Bias) oder kontinuierlich veränderliche Abweichungen (Drift). Regelmäßige Prüfungen auf Langzeitfehler sind somit notwendig, um die Sensoren dementsprechend kalibrieren zu können.

Im Institut für Geodäsie und Messtechnik der Technischen Universität Graz werden regelmäßig Langzeituntersuchungen zu verschiedenen Sensoren durchgeführt. Im Rahmen des Arbeitsmeetings zum PreMainSHM Projekt wurden Neigungssensoren zu ihrem Langzeitverhalten in der Klimakammer

getestet (wie in Punkt Kalibrierung erwähnt). Das Ergebnis hierzu war, dass jeder der getesteten Sensoren in der Klimakammer einen stärkeren oder schwächeren Drift mit sich zogen. Teilweise war das Verhalten der Sensoren auch nicht vorhersehbar.

Lebensdauer

Sensoren haben eine kürzere Lebensdauer als Bauwerke. Während eine Brücke rechnerisch auf ca. 100 Jahre bemessen ist, kann kein Sensor diese Anforderung jemals erfüllen. Jede Komponente kann innerhalb des Sensorsystems in dieser Zeit ausfallen. Diese Erkenntnis ist besonders wichtig, wenn ein permanentes Monitoring im Neubau eingeplant wird. Die zeitliche Auslegung der Messaufnahme ist zu definieren, um dem Lebensdauerproblem entgegenzuwirken. Weiters kann bei Ausfall eines Sensors der Fall auftreten, dass er innerhalb der Einsatzzeit nicht mehr kommerziell erhältlich ist (End of Life/EoL).

Die Einsatzdauer eines Sensors kann über die Zeit oder der Anzahl möglicher Lastwechsel oder Belastungen definiert werden. Zum Beispiel gibt der *GTM-Kraftsensor der Serie K* von [27] eine Lebensdauer von über 100 Millionen Lastwechsel an. Über die Zeit kann man sich mit dem Kennwert des MTTF (Mean Time to Failure) behelfen. Dieser gibt die statistische Durchschnittszeit bis zum Versagen bei technischen Produkten an. Dieser ist allerdings schwer zu bestimmen, da äußere unerwartete Einflüsse selten berücksichtigt werden können [28].

Unter Lebensdauer kann man auch die zeitliche Begrenzung der Stromversorgung sehen. Eine Batterie beim drahtlosen Monitoring hat je nach Belastung eine begrenzte Zeit, bis sie einen Austausch verlangt. Wird dieser nicht rechtzeitig wahrgenommen, fällt der Sensor bis zum Austausch dieser aus. Somit ist auch dies als Nutzlebenszeit zu sehen und es müssen Vorbeugemaßnahmen dazu zeitgerecht gesetzt werden.

5.2 Sensortypen nach RVS 13.03.01 2022

Für dieses Kapitel wurde ein besonderes Augenmerk auf [1] gelegt. Grund hierzu ist, dass bei der Sensorbeschreibung einige Parameter zu den Sensorarten fehlen oder nicht diskutiert werden. Folgend wird jeder Sensortyp beschrieben und mit Kennwerten versehen. Teilweise werden Beispiele von kommerziellen Produkten herangezogen, welche repräsentativ wirken sollen. Anschließend wird noch auf Sensorarten eingegangen, welche nicht in der Richtlinie vorkommen. Insbesondere betrifft das die chemischen Sensoren. Diese werden kurz in Form eines Exkurses vorgestellt, in die Anforderungskategorisierung jedoch nicht mit einbezogen.

Auf folgende Fragestellungen wird der Fokus gesetzt:

- Für welche Messraten können diese Sensoren eingesetzt werden?
- Welche Aussagen können über Genauigkeit, Auflösung und Messbereich getroffen werden?
- Gibt es Angaben zur Dauerhaftigkeit dieser Sensoren?
- Wie verhalten sich diese Sensoren in der realen Umgebung?
- Welche Ausführungsarten gibt es zu den jeweiligen Arten und wie unterscheiden sich diese?

Nach genauerer Betrachtung der Sensorarten wird noch auf die Anforderung an Sensoren selbst im Monitoring eingegangen.

5.2.1 GNSS-Sensor

GNSS (globale Navigationssatellitensysteme) Sensoren sind Empfänger, welche auf Basis von Satellitensystemen ihre eigene Position bestimmen können. Benötigt werden für eine

Standortbestimmung in der Ebene mindestens drei, im Raum mindestens vier Satelliten. Die Genauigkeit dieser Sensoren hängt stark von der Qualität des Empfängers sowie von den Umgebungsbedingungen ab. Messgrößen können durch Reflexion, Brechung, Beugung (Signalstärkeänderung) und oder Abschattung (Dämpfung) verfälscht werden.

Im Rahmen des Brückenmonitorings können GNSS-Sensoren zur Bestimmung der Lageänderung einzelner Bauteile als auch des gesamten Tragwerkes verwendet werden. Prinzipiell ist die Eignung des Sensors bei Lageänderung in der Ebene besser als in der Höhe [29].

Die Frequenz gemessener Daten variiert nach Bedarf. Da die Genauigkeit der Messergebnisse stark von der Umgebung abhängt, ist ein GNSS-Sensor nur bedingt für hochpräzise Messungen sowie für Messungen in geschlossenen Bereichen (z.B. Brückenhohlkästen) geeignet.

5.2.1.1 Technische Eigenschaften

GNSS-Systeme haben je nach Lage und Messmethode unterschiedliche Messgenauigkeiten. Hierbei wird nur die GNSS-Vermessung (hauptsächlich bekannt als Differenzielles GPS oder DGPS) beachtet. Herkömmliche Methoden, welche zum Beispiel bei einem Smartphone oder bei der Autonavigation verwendet werden, haben eine deutlich geringere Genauigkeit (ein bis mehrere Meter). Abbildung 28 gibt die unterschiedlichen Messmethoden von GNSS-Systemen an.

GPS Vermessung: Messmethoden	
Statisch: $\leq (5 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm})$	<ul style="list-style-type: none"> - Netzmessung - lange Beobachtungsdauer (mehrere Stunden)
Rapid Static: $(5-10 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm})$	<ul style="list-style-type: none"> - Netzmessung und Einzelpunkteinschaltung - kürzere Beobachtungsdauer (15 - 30 Minuten) - bei schlechter Satellitengeometrie kein Ergebnis
Stop & Go: $(10 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm})$	<ul style="list-style-type: none"> - Detailaufnahme (Einzelpunkte) - Initialisierung auf einem bekannten Punkt um Mehrdeutigkeiten zu lösen - Neuinitialisierung bei Unterbrechung des Satellitenempfangs - mehrere Epochen pro Punkt (Gerät gibt ein Zeichen sobald Lösung möglich ist) - bei schlechter Satellitengeometrie kein Ergebnis
Kinematisch: $(10-20 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm})$	<ul style="list-style-type: none"> - keine diskreten Einzelpunkte sondern Liniendiskretisierung - Initialisierung auf einem bekannten Punkt um Mehrdeutigkeiten zu lösen - Neuinitialisierung bei Unterbrechung des Satellitenempfangs - eine Epoche pro Punkt - bei schlechter Satellitengeometrie kein Ergebnis
RTK: $(10-20 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm})$	<ul style="list-style-type: none"> - Maschinensteuerung, Absteckung - wie kinematische Methode, aber Daten per Funk von Referenz an Rover übertragen und dort wird sofort die Lösung ermittelt (Ambiguity Resolution On the Fly, AROF) - Reichweite hängt von der Sendeleistung der Funkmodems ab (in Ö < 5 km) - bei schlechter Satellitengeometrie kein Ergebnis

Abbildung 28 Messmethoden mit GPS/GNSS [23]

Erkennbar ist, dass die Genauigkeit bei statischen Vermessungsmethoden, welche vorwiegend beim Monitoring von Brücken und anderen Bauwerken zum Einsatz kommen, mit kleiner gleich 5 mm möglich ist. Somit sind GNSS-Sensoren für Lageveränderungen im Millimeterbereich brauchbar.

Eine wichtige Limitation ist die Mehrwegeausbreitung oder der Mehrwegeeffekt. Hierbei werden die Signale vom Satelliten zum Empfänger an Objekten reflektiert und führen so zu Fehlern im Bereich von 1-10 m oder im Extremfall sogar zu mehreren 100 m [23].

Mehrwegeeffekte treten vor allem in urbanen Gebieten (Häuserschluchten) auf, oder wenn der Empfänger keine direkte Sicht zu den notwendigen Satelliten hat. Somit ist ein GNSS-Sensor auf einer

Brückenunterseite nicht zu empfehlen. Er bietet sich eher auf Oberseiten von Brücken, Stützwänden, Staumauern und anderen Richtung Himmel offene Messstellen an.

Für ein statisches Monitoring ist GPS und vor allem DGPS in Anbetracht der Limitationen durch Mehrwegeausbreitung und der passend ausgewählten Messmethode geeignet. In [30] ist auf eine mögliche dynamische Anwendung im Bereich einer möglichen Eigenfrequenzmessung recherchiert worden. Hierzu wird auf eine Abtastrate von mindestens 0,33 Hz verwiesen [31]. Erkannt worden sind aber auch Messraten von bis zu 2 Hz. Eine tatsächliche Abtastrate ist stark von der Qualität moderner Empfänger und der Berücksichtigung der Messmethode und möglicher Fehlerquellen abhängig. Jedoch bieten sich diese Werte als eine richtungsweisende Bandbreite an.

Ein gutes Beispiel für die Aufnahme von Bewegungen einer Brücke wird in [32] dargestellt. Hier wurde die Genauigkeit von GPS mittels Pseudoliten (Pseudo Satelliten) von Zentimetern in den Millimeterbereich verbessert. Abtastrate bei diesem Fallbeispiel betrug 1 Hz. Die Anwendung von Pseudoliten löst das Problem des Einflusses der Satellitenkonstellation bei der GPS-Vermessung.

Tabelle 23 Eigenschaften von GNSS-Sensoren

	Messart	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Genauigkeit	Auflösung
GNSS-Sensor:	Statische Vermessung - DGPS	Lagebestimmung /-veränderung [m]	-	statisch bis niedrig dynamisch <2 Hz	<5 mm	-

5.2.1.2 Einsatzmöglichkeiten

GNSS-Sensorik eignet sich für ein Monitoring von Deformationen unter sich langsam einstellenden Einflüssen. Diese sind beispielsweise Temperatur, Langzeitverformung oder Setzung. Für ein Erfassen von Deformationen infolge Verkehrs ist diese Sensorik durch die Limitation der Messrate eher ungeeignet. Weiters ist auf die vielen erwähnten Umwelteinflüsse zu achten. Die Verbindung zu Satelliten oder Pseudoliten muss stets gewährleistet werden.

Es wird für folgende Monitoringaufgaben empfohlen:

- Monitoring von Verformungen infolge Langzeitverformung
- Monitoring von Dehnung des Tragwerks infolge Temperatur (Lagerweg und FÜK-Spalt)
- Monitoring von Setzungen

5.2.2 Extensometer

Ein Extensometer (oder auch Dehnaufnehmer oder Extensiometer) ist ein hoch-präziser Sensor, welcher zum Messen von Dehnungen verwendet wird. Der Begriff Extensometer beschreibt eine Vielzahl an Sensoren mit unterschiedlichsten Funktionen und Einsatzmöglichkeiten. In ihrem Einsatz werden diese unterschieden in Kontakt-, Kontaktlose-, Laser- und Videoextensometer. In ihrer Funktion wird unterschieden in magnetische-, elektrische und mechanische Extensometer.

In [1] Kapitel 12.1.3 wird zwischen Stangen- und Drahtextensometer unterschieden. Diese finden ihre Hauptanwendungen im Brückenbau, Tunnelbau und der Geotechnik. Andere Arten von Extensometer werden hauptsächlich in Labortätigkeiten angewendet. So werden in diesem Kapitel in erster Linie Stangen- und Drahtextensometer behandelt.

5.2.2.1 Technische Eigenschaften

Bohrlochextensometer ist ein Überbegriff für Stangen-, Draht- und Sondenextensometer. In [33] werden ihre jeweiligen Anwendungen in der Geotechnik beschrieben, und in Abbildung 29 werden diese schematisch dargestellt.

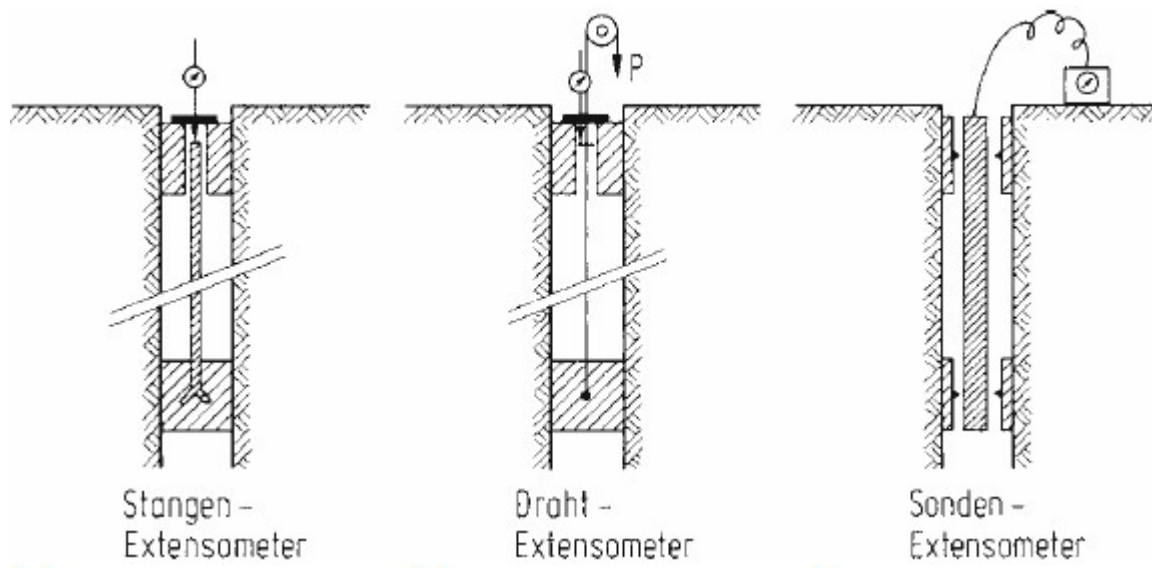


Abbildung 29 Schema der Bohrlochextensometer [33]

Ihre Anwendungen finden im Brückenmonitoring vor allem in der Überwachung von Setzungen, Stützbauten, Hangsicherungen und anderen Verankerungsmaßnahmen statt. Hierzu wird vor allem die relative Verschiebung einzelner oder mehrerer Bodenschichten beobachtet.

Tabelle 24, übernommen aus [33], gibt die erzielbaren Genauigkeiten von Bohrlochextensometern in Relation zu ihren Messbereichen und ihrer Messstrecke an.

Tabelle 24 Erzielbare Genauigkeit von Bohrlochextensometern [33]

Extensometertyp		Stangen- und Drahtextensometer			
		Sondenextensometer			
Messauflösung	0,001 mm	0,0025 mm	0,025 mm	0,25 mm	2,5 mm
Messgenauigkeit	0,001–0,01 mm	0,0025–0,01 mm	0,025–0,10 mm	0,25–1,0 mm	2,5–10 mm
Messbereich	±10 mm	25 mm	25 mm	50 mm	±250 mm
Verschiebungsmaß mit Nachstellmaßnahmen	20 mm (±20 mm)	50 mm	150 mm	300 mm	1000 mm
Länge der Messstrecke	≤ 1 m	≤ 10 m	≤ 30 m	≤ 100 m	> 100 m
Anwendungsbeispiele	Auflockerungszonen, Quellhebungen Bewegungen infolge Ausbruchphasen	In-situ-Versuche (z. B. Lastplatten- oder Scherver-suche) Auflockerungszonen	Tunnel, Einschnitte, Fundamentsetzungen	Große Kavernen, Tunnel in Fels geringerer Festigkeit, Hangbewegungen	Lange Messstrecken bei großen Hängen, Hangrutschungen

Folgend werden Stangen und Drahtextensometer in ihrer Funktion noch genauer erläutert, da diese in [1] explizit erwähnt werden.

Stangenextensometer

Mit einem Stangenextensometer werden axiale Deformationen entlang eines Bohrloches gemessen. Sie können in der Ausführung als 1-fach Extensometer oder Mehrfachextensometer in Einsatz sein. Mehrfachextensometer sind in der Lage, mehrere Relativverschiebungen von unterschiedlichen Schichten in einem Bohrloch zu erfassen.

Es wird ein Gestänge ins Bohrloch eingebracht, welches aus mindestens einem Anker, einem Messgestänge, einem Extensometerkopf (auch Messkopf) und einer Ableseeinheit oder Datenakquisitionseinheit besteht. Anhand der Verschiebung des Ankers entlang des Gestänges werden Relativverschiebungen gemessen. Zu beachten ist hierbei das Material des Gestänges, welches sich unter Temperatureinfluss dehnen oder stauchen kann. Hierbei ist es wichtig, dass kontinuierlich Temperaturen gemessen werden, um dieses Verhalten zu kompensieren.

Folgend wird in Tabelle 25 der Stangenextensometer von Geodata [34] in seinen unterschiedlichen Ausführungen vorgestellt. Dieser wird für verschiedene Messbereiche und mit drei Ablesemöglichkeiten angeboten: in Form einer Messuhr, eines VW (Vibrating Wire) und NTC (Negative Temperature Coefficient) Wegaufnehmers und eines 4-20 mA Wegaufnehmers (Potentiometer). Die Funktionsweise von einem Wegaufnehmer wird in Kapitel 5.2.8 genauer behandelt.

Tabelle 25 Stangenextensometer von Geodata

Ablesemöglichkeit	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Genauigkeit	Auflösung	Betriebstemperatur
Stangenextensometer von Geodata [34]						
VW und NTC	[mm]	0 - 12,5 mm	-	0,1 % FS = 0,0125 mm	0,025 % FS = 0,003125 mm	-20°C bis +80°C
	[mm]	0 - 50 mm	-	0,1 % FS = 0,05 mm	0,025 % FS = 0,0125 mm	-20°C bis +80°C
	[mm]	0 - 100 mm	-	0,1 % FS = 0,1 mm	0,025 % FS = 0,025 mm	-20°C bis +80°C
Potentiometer	[mm]	0 - 50 mm	-	0,2 % FS = 0,1 mm	0,02 % FS = 0,01 mm	-20°C bis +80°C
Messuhr	[mm]	0 - 50 mm	-	0,04 mm	0,01 mm	0°C bis +50°C

Erkennbar ist, dass für eine Setzungsüberwachung alle Ausführungen infrage kommen, mit Ausnahme der Ausführung mittels Messuhr. Diese ist in Wintermonaten aufgrund der begrenzten Betriebstemperatur nicht empfehlenswert. Mögliche Abtastraten sind abhängig von dem verwendeten Ablesegerät. Da bei Setzungsüberwachung jedoch vor allem statische Abtastraten

verlangt werden, ist davon auszugehen, dass die Auslesegeräte diesen Zweck erfüllen können. Angaben zu einer Schutzklasse werden von Geodata nicht gemacht.

Drahtextensometer

Drahtextensometer erfassen Bewegungen und relative Verschiebung zweier entfernter Punkte. Sie werden wie in Abbildung 29 in Bohrlöchern verwendet, kann aber auch oberflächlich an zwei weit entfernten Punkten angebracht werden. Anwendung findet dieser Sensor bei Überwachung von Verschiebungen und Verformungen. In [35] wird gezeigt, dass Anwendungen an Koppelfugen oder auch an Widerlagern von alten Bogenbrücken möglich sind.

Die Bestandteile vom Drahtextensometer von Sisgeo [35] sind ein federgespannter wasserdichter Sensor in einem Stahlgehäuse, eine Montageplatte und ein Kevlarseil, welches die Messpunkte verbindet. Auch hier wird für die Ablesemöglichkeit ein VW und NTC Wegaufnehmer sowie ein Potentiometer angegeben. Weiters wird ein USB-Datenlogger angeboten, welcher Messwerte bis zu einer Menge von über 51000 Werten speichert. Dieser Datenlogger ist batteriebetrieben und hat eine Lebensdauer von 4 Jahren. Diese und weitere Eigenschaften werden anschließend in Tabelle 26 gezeigt.

Tabelle 26 Drahtextensometer von Sisgeo

Ablesemöglichkeit	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Genauigkeit	Auflösung	Betriebstemperatur
Drahtextensometer von Sisgeo [35]						
VW und NTC	[mm]	0 - 50 mm	-	0,5 % FS = 0,25 mm	-	-20°C bis +80°C
Potentiometer	[mm]	0 - 50 mm	-	0,3 % FS = 0,15 mm	-	-20°C bis +80°C
USB- Potentiometer	[mm]	0 - 80 mm	<0,1 Hz	0,08 mm	0,003 mm	-10°C bis +60°C

Die Drahtextensometer mittels VW und NTC sowie Potentiometer werden mit der Schutzklasse IP 68 gekennzeichnet. Abtastrate und Auflösung ist hierbei abhängig vom jeweiligen Auslesegerät. Die USB-Variante gibt eine Schutzklasse von IP 65 an. Beim USB-Datenlogger ist die Untergrenze der Betriebstemperatur von -10°C zu berücksichtigen, welche bei starken Kälteeinbrüchen zu Problemen führen kann.

5.2.2.2 Einsatzmöglichkeiten

Bohrlochstensometer eignen sich vor allem für geotechnische Untersuchungen. Im Brückenmonitoring sind sie in erster Linie für eine Setzungsüberwachung oder Überwachung von Verschiebungen von Widerlagern oder Schutzbauten geeignet (z.B.: Stützbauten, Hangsicherungen, etc.). Drahtextensometer sind gesondert zu betrachten, da diese auch als Wegaufnehmer verwendet werden können. Die Messgenauigkeiten variieren in Abhängigkeit des Messbereiches, sind in der

Regel aber kleiner als 0,1 mm. Je nach Ablesegerät sind statische als auch dynamische Messungen möglich.

Es wird für folgende Monitoringaufgaben empfohlen:

- Monitoring von Setzungen
- Monitoring von Verschiebungen (vor allem Drahtextensometer)

5.2.3 Tachymeter/Totalstation

Der Tachymeter kann im Rahmen des Bauwerksmonitorings in einer Vielzahl an Möglichkeiten eingesetzt werden. Stationär aufgebaute Totalstationen vollziehen dauerhaft, periodisch, automatisch und/oder manuell Messungen.

Vorteil von Überwachungen mit Tachymetern ist das berührungslose Verfahren. Für Verformungen an Tunneloberflächen oder Brückenoberbauten bedarf es meist eines direkten Kontaktes mit dem zu messenden Bereich. Einzig zum Anbringen von Reflektoren/Reflexfolien (falls notwendig) müsste ein Zugang möglich gemacht werden.

Ausgabewerte von Totalstationen sind Distanz, Winkel in horizontale und vertikale Richtung und bei den meisten modernen Geräten auch Bilder.

5.2.3.1 Technische Eigenschaften

Als Beispiel für Genauigkeiten wird der Leica TPS1200 als Referenz genommen. Für die Richtungsmessung wird bei einer Grobmessung eine Winkelauflösung von 0,3 gon und bei der Feinmessung von 0,3 mgon angegeben.

Für die Entfernungsmessung mittels elektronischer Distanzmessung ist die Genauigkeit abhängig, ob die Zielfläche mit einem Reflektor ausgestattet ist oder nicht. Diese hat Einfluss auf die mögliche Distanz zum Messpunkt, welche wiederum Einfluss auf die Genauigkeit hat. Je nach Distanz und Reflexion ist die Genauigkeit bei 2 mm + 2 ppm bis 5 mm + 2 ppm, wobei die ppm (parts per million) auf die gemessene Distanz bezogen sind. Hierzu ist die Entfernung des Theodolits zum Messpunkt ausschlaggebend. Der Leica TPS1200 kann Distanzen je nach Art des Reflektors bis zu mehreren Kilometern erfassen. Zum Beispiel bei einem Standardprisma ist bei optimalen Wetterbedingungen eine Distanz von 3,5 km Messentfernung möglich. Bei schlechten Bedingungen wie Nebel, Hitzeflimmern oder zu starkem Sonnenlicht verringert sich die Messdistanz wiederum auf 1,8 km. Die kürzeste Messdistanz beträgt bei diesem Modell allgemein 1,5 m. Die Anzeigeauflösung liegt bei 0,1 mm [23].

Weiters kann die Genauigkeit der Distanzmessung auch noch deutlich erhöht werden. Dies ist abhängig vom eingesetzten Distanzmessgerät an den Theodoliten. Eigenschaften zu elektrooptischen Distanzmessgeräten werden in Kapitel 5.2.7 behandelt. Vorweggenommen werden kann aber, dass hohe Genauigkeiten bis zu 0,2 mm + 1 ppm möglich sind.

Für die automatische dauerhafte Untersuchung von Messstellen ist der Trackingmodus von modernen Totalstationen von Vorteil. Dieser verfolgt einen eingestellten Reflektor dauerhaft in seiner Bewegung. Dieser gibt im Datenblatt eine Messzeit von 0,15 s an. Für Standard- oder Schnellmodus beläuft er sich auf 1,5 s und 0,8 s. Somit ist eine Totalstation mit einer theoretischen Abtastrate von kleiner 4 Hz annehmbar. Genaue Angaben werden in den Datenblättern nicht

gefunden. Allerdings lässt es darauf schließen, dass diese vor allem im niederfrequenten Messbereich einsetzbar sind, beispielsweise für die Langzeitverformung oder Bewegung von Bauwerken.

Genauere Angaben zu den technischen Details des Leica TPS1200 und zur aktuellen Serie von Leica, der Leica TS16 Totalstation sind unter [36] und [37] zu finden.

Besonderes Merkmal ist auf den Schutz äußerer Einflüsse bei Totalstationen zu legen. Diese sind in der Anschaffung sehr teuer und auch leicht als diese zu erkennen. Sowohl der Schutz vor Umwelteinflüssen als auch vor Vandalismus und Diebstahl spielt hierbei eine Rolle. Abhilfe zu beiden bieten bauliche Maßnahmen. Ein Glaszylinder oder undurchsichtiger Zylinder mit Bohrungen in Richtung der Messpunkte, um Sicht herzustellen, lösen beide Probleme. Außerdem ist ein Theodolit vorzugsweise in einer schwer ohne Hilfsmittel erreichbaren Höhe zu installieren und unter Umständen so zu verstecken, dass er nicht erkennbar ist. Weiteres verlangt ein Theodolit einen stabilen und festen Untergrund, welcher die Messung nicht über eigene Deformation verfälschen kann. Der Leica TPS1200 gibt eine Betriebstemperatur von -20°C bis +50°C an. Die Schutzklasse ist bei IP 54. Für ein dauerhaftes Monitoring ist mittels baulicher Maßnahmen auch die Erhöhung der Schutzklasse möglich.

Folgend werden in Tabelle 27 noch die technischen Eigenschaften vom Leica TPS1200 und Leica TS16 kurz zusammengefasst. Diese gelten als Richtwert für die Eigenschaften des Monitorings mittels Theodolits.

Tabelle 27 Eigenschaften von Totalstationen

	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Genauigkeit	Auflösung	Betriebstemperatur
Leica TPS1200 [36]	Richtung [gon]	0 - 400 gon	je nach Modus < 4 Hz	0,3 mgon	0,1 mgon	-20°C bis +50°C
	Distanz [m]	1,5 - 5400 m		2 mm + 2 ppm	0,1 mm	
Leica TS16 [37]	Richtung [gon]	0 - 400 gon	je nach Modus < 1 Hz	0,3 mgon	keine Angaben	-20°C bis +50°C
	Distanz [m]	0,9 - 3500 m		2 mm + 2 ppm		

5.2.3.2 Einsatzmöglichkeiten

Die Totalstation ist einer der wenigen Messinstrumente, welcher es erlaubt, absolute Messungen zu vollziehen. Dies bedeutet, dass im Gegenzug zu anderer Sensorik ein Tachymeter die aufgenommenen Werte global referenzieren kann und somit beispielsweise die Biegelinie eines Oberbaus durch Ermittlung mehrerer einzelner Punkte absolut erfasst.

So eignet sich die Totalstation für die Aufnahme aller Deformationen, welche im Millimeterbereich liegen und statisch aufgenommen werden können. Da hochfrequente Messungen nicht möglich sind, ist der Einfluss aus Verkehr nur bedingt bis gar nicht aufnehmbar. Deformationen aus statischem Einfluss sind leicht erfassbar.

Einsatzarten sind vor allem im langfristigen periodischen Monitoring sinnvoll. Weiters dient eine Aufnahme einer Brücke mittels Totalstation zur Beschaffung des Istzustandes. Wenn Deformationen mittels Sensorik kontinuierlich überwacht werden sollen, empfiehlt es sich vorher das Objekt geodätisch zu vermessen.

Es wird für folgende Monitoringaufgaben empfohlen:

- Monitoring von Setzungen.
- Monitoring von Verformungen und Verschiebungen
- Monitoring von Dehnungen durch Temperaturjahresgang.

5.2.4 Schlauchwaage/Nivelliergerät

Mit einer Schlauchwaage oder einem Nivelliergerät lässt sich die Höhendifferenz zweier Punkte in Bezug auf die gleiche horizontale Ebene bestimmen. Moderne automatisierte Schlauchwaagen können bereits geringe Höhenunterschiede messen und übermitteln. Sie funktionieren über das Prinzip der kommunizierenden Röhren. Bei Druckschlauchwaagen wird die Druckdifferenz der Messpunkte der Waage aufgenommen und in eine Wegdifferenz umgewandelt. Schlauchwaagen eignen sich sehr gut, um vorhandene als auch sich verändernde Höhenunterschiede von weit entfernten Punkten zu messen.

Nivelliergeräte werden, anders als Schlauchwaagen, nicht am Objekt direkt installiert. Das Nivelliergerät wird abseits des Tragwerks aufgestellt und braucht einen Sichtkontakt zu den Messstellen. Einzig Messlatten an den Messpunkten müssen angebracht werden. Für automatisierte Erfassung von Höhenunterschieden eignet sich der Laser-, oder der Digitalnivellier. Nivelliergeräte werden in ihrem Einsatz gleich wie Totalstationen verwendet, mit der Ausnahme, dass nur Höhen und Höhendifferenzen aufgenommen werden können. Sie verlangen ebenso einen stabilen Aufstellpunkt und bei Aufnahme einer absoluten Höhe einen Referenzpunkt. Die meisten Totalstationen sind in der Lage, die Aufgaben des Nivelliergerätes zu übernehmen.

5.2.4.1 Technische Eigenschaften

Schlauchwaage

Eine Schlauchwaage (auch bekannt als LLS: Liquid Levelling System) wird in klassischer Ausführung mit der Übertragung des Wasserstandes von einem Punkt zum nächsten durch das Prinzip kommunizierender Röhren oder als Druckschlauchwaage verwendet. Bei Druckschlauchwaagen wird der hydrostatische Druck bei Niveauänderungen gemessen und ausgewertet. Dieses System lässt kleine Höhenänderungen erkennen und ist gängig im Brückenmonitoring, um Setzungen oder andere vertikale Verformungen/Verschiebungen zu messen.

Die Eigenschaften bei elektronischen Schlauchwaagen sind vorwiegend abhängig von dem hydrostatischen Sensor. Bei [38] werden einige dieser angeboten. Hierzu wird folgend das Schlauchsystem mit dem Beinamen *Ultra Accuracy* vorgestellt. Tabelle 28 zeigt hierzu die angegebenen Daten des Datenblatts. Hinzu kommt eine angegebene Schutzart von IP 65. Eigenschaften zur Messfrequenz und der Auflösung der Sensorik ist in Abhängigkeit des Datenakquisitionsgerätes. Erwartbar sind statische bis zu niedrig dynamischen Auswertungsmöglichkeiten.

Tabelle 28 Technische Eigenschaften der Druckschlauchwaage von Position Control

Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Genauigkeit		Auflösung	Betriebs-temperatur
			Nullpunktfehler	Nichtlinearität		
PC-HSD4-UA-Ultra Accuracy						
Höhendifferenz[mm]	0 - 200 mm	-	<0,04 % FS = 0,08 mm	0,02 % FS = 0,04 mm	-	-20°C bis +80°C
Höhendifferenz[mm]	0 - 500 mm	-	<0,04 % FS = 0,2 mm	0,02 % FS = 0,1 mm	-	-20°C bis +80°C
Höhendifferenz[mm]	0 - 1000 mm	-	<0,04 % FS = 0,4 mm	0,02 % FS = 0,2 mm	-	-20°C bis +80°C

Weitere kommerziell angebotene Geräte geben Genauigkeiten von 0,3 mm [39] oder auch 0,1 mm bei Distanzen von bis zu 250 m [40] an. Referenzprojekte von [39] sind auf ihrer Webseite aufrufbar. Dort sind mehrere Einsätze der Druckschlauchwaage im Bauwerksmonitoring aufgelistet.

Die Vienna Consulting Engineers ZT GmbH liefert ein vorbildliches Beispiel im Einsatz von Schlauchwaagen im Brückenmonitoring. Diese haben an der Grazer Murbrücke der A2 Süd Autobahn (Objekt G46) mittels Schlauchwaagen ein Monitoring zur Tragwerksverformung mit parallelem Temperaturmonitoring durchgeführt. Hierbei ist laut Aufgabenstellung eine Mindestgenauigkeit von 0,3 cm zu erreichen. Die gewählte Abtastrate für alle eingesetzten Sensoren wurden auf 1 Hz eingestellt. Näheres zu diesem Monitoring ist in [41] nachlesbar.

Nivelliergerät

Nivelliergeräte sind selten im Einsatz, da die Überwachung einzelner Höhenunterschiede mit diesem Gerät äußerst kostspielig ausfallen kann, vor allem aber, weil Tachymeter ihre Funktion vollständig übernehmen können. So ist die Kontrolle von Höhen und Höhenänderungen meist sinnvoller mit Totalstationen durchzuführen, da diese zusätzlich noch mehr Bewegungen im Raum aufnehmen können. Nivelliergeräte werden hauptsächlich in der Bauphase und zur Kontrolle einzelner Höhen verwendet. Vollautomatisches Monitoring ist hierbei eher unüblich, sondern einzelne von Fachpersonal durchgeführte Kontrollen in regelmäßigen Abständen. Somit kann man hier nicht von einem Monitoring im herkömmlichen Sinne reden, sondern eher von messwertgebundenen Inspektionen oder Überwachungen, da diese Geräte selten autark verwendet werden.

Folgend werden die Digitalnivelliere von Leica [42] kurz vorgestellt, um eine Übersicht der Eigenschaften zu gewährleisten. Informationen über eine automatisierte Nutzung werden hierbei nicht zur Verfügung gestellt.

Tabelle 29 Eigenschaften der Leica Digitalnivelliere

Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Genauigkeit	Auflösung	Betriebstemperatur
Leica LS10 [42]					
Höhendifferenz[mm]	0 - 1800 mm	-	0,3 mm (Invar-Messlatte)	-	-20°C bis +50°C
Leica LS15 [42]					
Höhendifferenz[mm]	0 - 1800 mm	-	0,3 mm (Invar-Messlatte)	-	-20°C bis +50°C

Zusätzlich ist zur Tabelle 29 anzumerken, dass der LS15 über eine Weitwinkel-Kamera verfügt, was beide Modelle voneinander unterscheidet. Beide Nivelliergeräte verfügen über einen internen Speicher, welcher bis zu 30.000 Messungen aufnehmen kann. Schutzklasse beider Geräte ist IP 55. Messwerte können bis zu einer Reichweite von 110 m, jedoch bei einem Mindestabstand von 0,6 m, erfasst werden. Weiters können sie Entfernungen mit einer Genauigkeit von 15 mm bei 30 m Distanz erfassen. Die Messgenauigkeit der Höhe ist abhängig von der eingesetzten Messlatte. Standard-Nivellierlatten ermöglichen eine Messgenauigkeit von 1 mm, während die Invar-Nivellierlatte höhere Genauigkeiten erzielt.

5.2.4.2 Einsatzmöglichkeiten

In ihren Einsatzmöglichkeiten sind Schlauchwaagen und Nivelliergeräte zu unterscheiden. Schlauchwaagen können für jede vertikale Deformation im Millimeterbereich oder höher am Tragwerk selbst angewendet werden, mit der Voraussetzung, dass einer der Messpunkte sich in relativer Ruhe zu den jeweilig anderen befindet. Gleichmäßige Deformationen werden vom Schlauchwaagensystem nicht erkannt.

Nivelliergeräte eignen sich grundsätzlich nur zur Höhenaufnahme. Um Höhenveränderungen wahrnehmen zu können, muss der Aufstellplatz richtig gewählt werden und so wie bei der Schlauchwaage sich in Ruhe befinden. Verwendet wird das Nivelliergerät hauptsächlich zur Setzungserkennung.

Es wird für folgende Monitoringaufgaben empfohlen:

- Monitoring von Setzungen (Nivelliergerät und Schlauchwaage)
- Monitoring von Verformungen in vertikale Richtung (hauptsächlich Schlauchwaage)

5.2.5 Druckaufnehmer

Ein Druckaufnehmer ist ein Instrument, das aus einem druckempfindlichen Element zur Bestimmung des tatsächlich auf den Sensor wirkenden Drucks (unter Verwendung verschiedener Funktionsprinzipien) und einigen Komponenten besteht, die diese Information in ein Ausgangssignal wandeln. Übliche Einheiten sind Pascal (Pa), Bar (bar), N/mm² oder psi (pounds per square inch) [43].

Es gibt viele verschiedene Technologien für Druckaufnehmer, beispielsweise:

- Dehnmessstreifenbasierte Druckaufnehmer
- Kapazitive Druckaufnehmer
- Piezoelektrische Druckaufnehmer
- Optische Druckaufnehmer

Auch in der Art und Weise der Messung wird unterschieden. Häufig in Anwendung sind Absolutdruckaufnehmer, Relativdruckaufnehmer (sealed gauge) und Differenzendruckaufnehmer.

5.2.5.1 Technische Eigenschaften

Druckaufnehmer und Kraftsensoren verfolgen dasselbe Konzept in zwei Arten. Bei Drucksensoren wird eine Spannung aufgenommen, abhängig von der gemessenen Fläche [44]. Kraftsensoren nehmen die wirkende Kraft unabhängig von der einwirkenden Fläche auf. Die Sensorprinzipien sind meist dieselben und lassen sich untereinander austauschbar anwenden. Folgend werden die gängigsten Arten von Druckaufnehmern in ihrer Funktion erläutert.

Zu erwähnen ist, dass die meisten Druckaufnehmer im Bereich der Automobilindustrie, der Medizintechnik und in der Industrieautomatisierung ihre Anwendung finden und für die Messung von Drücken aus Gas oder Flüssigkeiten konzipiert werden. Für Anwendungen im Brückenmonitoring sind somit verhältnismäßig wenig Angebote im kommerziellen Bereich anzufinden, da hier meist Kraftaufnehmer verwendet werden und auch unter diesen Namen erhältlich sind. Kraftsensoren werden in Kapitel 5.2.6 behandelt, sind aber inhaltlich nur kaum vom Druckaufnehmer abweichend. Folgend wird aus diesem Grund auf die Erstellung von Tabellen wie in den vorherigen Kapiteln verzichtet.

Dehnmessstreifenbasierte Druckaufnehmer

In dieser Ausführung werden an einem bekannten Werkstoff Dehnmessstreifen angebracht. Bei aufgebrachter Spannung kommt es so zu einer Deformation, welche mittels des Dehnmessstreifens ermittelt wird. Über die bekannten Materialparameter lassen sich so zugeführte Spannungen messen. In [43] wird angegeben, dass DMS-basierte Druckaufnehmer mit bis zu 15000 bar aufnehmbaren Druck erhältlich sind.

Die Druckaufnehmer von HBM Hottinger Brüel & Kjær [45] weisen Messbereiche von 0 bar bis 3000 bar auf (Modellreihe P3). Sie geben eine firmeninterne Genauigkeitsklasse an und basieren auf dem Dehnmessstreifen-Prinzip. Vorgeschlagen werden sie für Flüssigkeits- und Gasdruck. Dies führt zur Frage, ob dieser Sensor im Monitoring von Brücken tatsächlich Einsatz finden kann. Jedoch sind beispielsweise in Kombination mit Ankerlastplatten oder zur Messung möglicher hydraulischer Anbauten Anwendungen denkbar.

Die Eigenschaften von Dehnmessstreifen werden in Kapitel 5.2.10 erläutert und in diesem Kapitel nicht weiter behandelt.

Kapazitiver Druckaufnehmer

Kapazitive Druckaufnehmer bestehen aus mehreren elektrisch leitenden Platten, welche zwischen ihnen ein Dielektrikum haben. Wenn sich der Abstand der Platten durch aufgebrachte Spannung oder Kraft zueinander ändert, ändert sich so auch die elektrische Kapazität, welche messbar ist. Diese Sensoren können eine sehr geringe Leistungsaufnahme haben, da Strom nur fließt, wenn ein Signal durch die Schaltung zur Messung der Kapazität geleitet wird. Dies macht kapazitive Drucksensoren ideal für Anwendungen mit geringem Stromverbrauch [17].

Vorgestellt wird der kapazitive Drucksensor von iNet Sensor [46], welcher Messbereiche von 0 bis 100 bar abdeckt. Die Genauigkeit liegt bei kleiner als 0,5 % Full Scale. Mit einer Schutzart von IP 65 und einer Einsatztemperatur von -40 bis + 85 °C ist ein Einsatz im Brückenmonitoring denkbar.

Piezelektrische Druckaufnehmer

Piezoelemente (meist Kristalle oder spezielle Keramiken) sind in der Lage, bei aufgebrachter Spannung eine elektrische Ladung zu akkumulieren. Diese elektrischen Ladungen werden gemessen und führen zum Messergebnis. Mit diesen Sensoren lassen sich allerdings nur Spannungsänderungen ermitteln [17]. In [43] wird angegeben, dass piezoresistive Druckaufnehmer mit bis zu 1000 bar aufnehmbarem Druck auf Grund der Werkstoffbegrenzung erhältlich sind.

Althen Sensors Controls [47] bietet eine Vielzahl an Drucksensoren an. Die Reihe MPM280 ermöglicht eine Druckerkenung von bis zu 100 MPa (1000 bar). Jedoch ist die Betriebstemperatur auf 25 ± 1 °C beschränkt und somit für Außeneinsätze nicht geeignet.

Optische Druckaufnehmer

Bei optischen Druckaufnehmern gibt es zwei häufige Ausführungen. Die erste wird mit einem Faser-Bragg-Gitter umgesetzt, welches auf eine Membran verklebt wird. Dieses verformt sich bei aufgebrachter Spannung, welches am Gitter eine Dehnung auslöst. Details zum Faser-Bragg-Gitter sind im Kapitel 5.2.11 nachlesbar. Die zweite Methode ist mittels eines Fabry-Pérot-Drucksensors, bei dem die Verformung der Membran zu einem Interferenzmuster führt, welches ausgelesen werden kann [17]. Beide Sensorarten werden im Kapitel 5.2.11 bei den faseroptischen Sensoren näher vorgestellt und hier nicht weiter behandelt.

5.2.5.2 Einsatzmöglichkeiten

Druckaufnehmer können punktförmig als auch flächenförmig eingesetzt werden. Ebenso wird bei flächenmäßigem Einbau der Sensor auch einbetoniert, um auf wirkende Spannungen schließen zu können [1]. Ansonsten kann ein Druckaufnehmer bei Anbauten verwendet werden, bei Ankerplatten für die Messung von Spannkabeln oder Ankern oder zur Erfassung von Lagerkräften. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass Kraftaufnehmer dieselben Aufgaben übernehmen können und, wie bereits erwähnt, Druckaufnehmer im kommerziellen Bereich hauptsächlich für Gase und Flüssigkeiten verwendet wird.

Es wird für folgende Monitoringaufgaben empfohlen:

- Monitoring von Ankern und Spanngliedern
- Monitoring von Verkehrslasten (WIM)
- Monitoring von Spannungen im Material
- Lagermonitoring

5.2.6 Kraftaufnehmer

Ein Kraftaufnehmer ist auch bekannt als Kraftmessdose, Kraftsensor, Messdose oder Load Cell. Gemessen wird die auf den Sensor wirkende Kraft. Diese kann eine Zug- oder auch Druckkraft sein. Bei der Kraftmessung ist es wichtig, dass die Ausrichtung des Sensors mit der zu messenden Kraft Richtung übereinstimmt, da dieser Kraft nur in eine axiale Richtung messen kann. Eine Kombination mehrerer Kraftsensoren in verschiedenen Achsen führt zur Aufnahme von wirkenden Kräften in mehreren Raumrichtungen. Hier spricht man von einem Mehrkomponentensystem [28].

Wie in Kapitel 5.2.5 bereits erwähnt, sind Druck- und Kraftaufnehmer sehr ähnlich zu betrachten und unterliegen demselben Messkonzept. So gelten die Ausführungsarten für Druckaufnehmer ebenso für Kraftaufnehmer. Die meisten Druckaufnehmer sind jedoch für Flüssigkeiten und Gase konzipiert.

Die gängigsten Ausführungen von Kraftmessdosen sind mittels Dehnmessstreifen (widerstandsbasierend) oder mittels piezoelektrischen Messelementen. Zweiteres fungiert gleichzeitig als Sensorelement und als Übertragungselement der einwirkenden Kraft. Ein nachgeschalteter Ladungsverstärker wandelt dieses in ein auswertbares Prozesssignal um [48]. Jedoch schließen auch kapazitive und optische Sensoren (Druckaufnehmer) auf die wirkende Kraft.

5.2.6.1 Technische Eigenschaften

Allgemeine Problematik ist der Einfluss von ungewollten Kräften auf einen Kraftaufnehmer. Dies kann zum Beispiel infolge von veränderten Lastzuständen oder ungewollter Exzentrizität auftreten. Daraus können ungewollt Biegemomente und Querkräfte entstehen, welche einen negativen Einfluss auf das Messergebnis haben können. Diese Thematik wird in [49] behandelt. Dort wird auf folgende Punkte verwiesen, welche diesen Problemen entgegenwirken können:

- Verwendung von genügend steifen und ebenen Kraftein- und Kraftausleitstellen
- Richtige Abschätzung möglicher Querkräfte und Biegemomente zur Auswahl des richtigen Sensors
- Bei nicht erwünschten Kräften dafür zu sorgen, dass die Wirkungslinie normal zur Messrichtung ist, um additive Komponenten zu verhindern

Ein Mehrkomponentensystem kann Abhilfe verschaffen, indem unerwünschte und unerwartete Kräfte gemessen und bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Dehnmessstreifenbasierte Kraftaufnehmer

Die Sensorart wird bereits in Kapitel 5.2.5.1 beschrieben. Es wird anhand der Deformation eines Werkstoffes auf die wirkende Spannung und somit auf die wirkende Kraft geschlossen. Diese Art ist auch als Federkörper-Kraftaufnehmer bekannt und hat eine Vielzahl an Bauformen, wie zum Beispiel als Biegebalken, Ringtorsionsfeder, S-förmige Federkörper, Dehnzylinder und andere [50]. Dehnmessstreifen werden in Kapitel 5.2.10 erläutert.

Als Beispiel für einen DMS-Kraftaufnehmer wird in Tabelle 30 der TYP 4579 von Kistler gezeigt.

Tabelle 30 DMS-Kraftsensor von Kistler

Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Genauigkeit	Auflösung	Betriebstemperatur
Kistler DMS-Kraftsensor Typ 4579 [48]					
Kraft [kN]	0 - 20 kN	-	0,2 % FS 0,04 kN	-	15 - 50°C
Kraft [kN]	0 - 500 kN	-	0,5 % FS 2,5 kN	-	15 - 50°C

Diese Sensoren werden auch zwischen den angegebenen Messbereichen verkauft. Die Genauigkeit von 0,5 % FS gilt für alle Kraftaufnehmer mit einem Messbereich von über 20 kN bei dieser Produktreihe. Auch wenn der Betriebstemperaturbereich über 0°C liegt, wird ein Gebrauchstemperaturbereich von -20°C bis +50 °C angegeben. In diesen Temperaturen verlangt es einer Nachbearbeitung der Messwerte. Die Schutzklasse wird mit IP 67 angegeben. Die Einsatzart wird für statische als auch dynamische Lasten angegeben. Die tatsächliche Abtastrate, genauso wie die Auflösung, ist abhängig vom Auslesegerät und wird im Datenblatt zu diesem Sensor nicht angegeben. Die Kistler Gruppe bietet jedoch auch noch sehr viel mehr verschiedene Kraftsensoren an. Darunter sind Mehrkomponentensysteme, piezoelektrische Sensoren, Messbereiche bis in den Meganeutron Bereich als auch Scherkraftsensoren.

Piezoelektrische Kraftaufnehmer

Das Messprinzip ist dasselbe wie in Kapitel 5.2.5.1 für Druckaufnehmer. Über das elektrische Signal des Piezo-Elements lässt sich die aufgebrachte Kraft ermitteln. Piezoelektrische Sensoren eignen sich für die Erfassung von Kraftänderungen.

Beispielsweise wird auch hier ein Sensortyp von [48] in Tabelle 31 vorgestellt.

Tabelle 31 Piezoelektrischer Kraftsensor von Kistler

Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Genauigkeit	Auflösung	Betriebstemperatur
Kistler Press Force Sensor Typ 9323A...9393A [48]					
Kraft [kN]	0 - 5 kN	-	~0,5 % FS 0,025 kN	-	-40 - 80°C
Kraft [kN]	0 - 700 kN	-	~0,5 % FS 3,5 kN	-	-40 - 120°C

Auch bei diesem Sensortyp sind mehrere Messbereiche zwischen den angegeben möglich. Es wird eine Schutzklasse von IP 65 und IP 67 angegeben, abhängig vom Kabelanschluss und der Anbringung an dem zu messenden Material. Auch hier ist die Auflösung als auch die Messfrequenz vom Auslesegerät abhängig. Angegeben wird allerdings das dynamische Kraftveränderungen aufnehmenbar sind, was darauf schließen lässt, dass dieser Sensor für dynamische Messraten geeignet ist.

5.2.6.2 Einsatzmöglichkeiten

Auch wenn es mehrere Ausführungen von Kraftaufnehmern gibt und auch andere Messmethoden auf eine wirkende Kraft schließen können, wird meist von DMS- oder piezoelektrischen Prinzipien geredet, wenn der Ausdruck Kraftaufnehmer fällt. Die Frage stellt sich, welche Messart wo zu verwenden ist? In [45] wird diese Frage aufgearbeitet. Dort wird beschrieben, dass DMS-basierte Kraftsensoren weitestgehend driftfrei sind und deshalb für Monitoringaufgaben besonders gut geeignet sind. Piezoelektrische Sensoren weisen prinzipbedingt einen Drift auf. Dieser Drift ist unabhängig der gemessenen Kraft und somit ungünstig, besonders für kleinere gemessene Kräfte. Vorteil ist, dass piezoelektrische Kraftsensoren eine sehr geringe Verformung unter Last aufweisen. Daraus ergibt sich eine hohe Resonanzfrequenz, was diese Art von Sensor für dynamische

Messaufgaben gut eignet. Vor allem wird angegeben, dass die kompakte Bauweise von piezoelektrischen Sensoren für Bestandsobjekte praktisch ist. Dafür ist jedoch bei der erreichbaren Präzision ein Kompromiss einzugehen.

Einsatz im Brückenmonitoring ist für beide Sensorarten vielfältig. Es wird für folgende Monitoringaufgaben empfohlen:

- Monitoring von Ankern und Spanngliedern
- Monitoring von Verkehrslasten (WIM)
- Monitoring von Seilkräften
- Monitoring von Lagerkräften

5.2.7 Entfernungsmesser (optisch)

Mit optischer Entfernungsmessung ist vor allem die elektrooptische Distanzmessung gemeint. Diese erfolgt meist mittels elektronischer Distanzmessung (EDM) über die Laufzeitmessung von Laserlicht. Diese Art der Distanzmessung wird auch von den meisten Totalstationen angewandt. Weitere optische Entfernungsmessverfahren sind die Lasertriangulation und das Laserinterferometer [1]. Die letzten zwei werden hier allerdings nicht behandelt.

5.2.7.1 Technische Eigenschaften

Bei der Laufzeitmessung wird die Zeit, die ein Signal von einem Sender zum Ziel und zurück zum Empfänger braucht, gemessen. Über diese Zeit wird bei bekannter Geschwindigkeit des Signals die Strecke berechnet. Die fundamentale Beziehung für die Ermittlung der Distanz bezüglich der elektronischen Laufzeitmessung ist folgende Formel [23]:

$$D = c * t * \frac{1}{2} \text{ mit } c = \frac{c_0}{n} \quad (21)$$

Mit:

D ... Distanz

c ... tatsächliche Lichtgeschwindigkeit im Medium Luft

t ... Zeit, die der Impuls vom Sender zum Empfänger braucht

c₀ ... Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (~299 792 459 m/s)

n ... Brechungsindex der Luft (~1 + 300 * 10⁻⁶)

Abbildung 30 zeigt das in Formel (21) beschriebene Prinzip. Der Beiwert k₀ beschreibt hierbei die Nullpunktkorrektur.

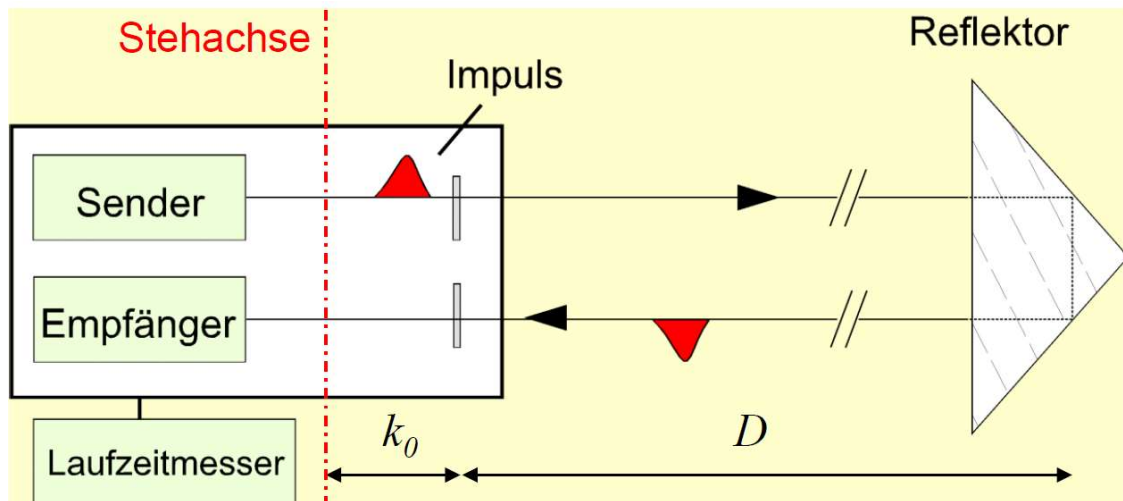


Abbildung 30 Prinzip der Laufzeitmessung für die elektrooptische Distanzmessung [23]

Weiters ist auch die Phasenmodulation oder Phasenmessung zu erwähnen. Hierbei wird die Amplitude eines vorwärtslaufenden Signals mit einer festen Frequenz moduliert. Die Distanz kann über den Vergleich der Phase des reflektierten und weiterhin ausgehenden Signals ermittelt werden. Die Phasenverschiebung des amplitudenmodulierten Signals ist hierbei direkt proportional zur Distanz zum Messpunkt [51].

Diese Darstellungen sollen das grundlegende Prinzip der elektrooptischen Distanzmessung beschreiben und die Übersicht einer solchen Messung zeigen. Bei Totalstationen ist meist diese Sensorart für die Distanzermittlung verbaut. So gelten für diese Sensortypen dieselben Randbedingungen, wie für eine Totalstation. Dies bedeutet, dass Sicht und Wetter einen Einfluss auf die Qualität der Messung haben.

Die Genauigkeiten und möglichen Reichweiten für EDM Geräte werden in [23] folgend definiert:

Genauigkeit

- Niedrig: $s = 5.0 \text{ mm} + 5 \text{ ppm} \times D$ (Distanz zum Messpunkt)
- Mittel: $s = 3.0 \text{ mm} + 3 \text{ ppm} \times D$ (Distanz zum Messpunkt)
- Hoch: $s = 0.2 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \times D$ (Distanz zum Messpunkt)

Reichweiten

- Reflektorlos: einige 100 m bis 2 km
- Reflexfolie: ca. 200 m
- Prisma: ca. 3 km

Es werden folgend noch ein Sensor aus dem kommerziellen Bereich von der Firma Dimetix vorgestellt.

Tabelle 32 Laserdistanzsensor von Dimetix

Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Genauigkeit	Auflösung	Betriebstemperatur
Dimetix DPE-10-500[52]					
Distanz [m]	0,5 - 500 m	bis 250 Hz	~1 mm	-	-40°C bis +60°C

Neben den in Tabelle 32 gezeigten Sensor werden von Dimetix noch viele andere Laserdistanzsensoren angeboten. Die Schutzklasse aller Sensoren liegt bei IP 65. Weiters liegen die Messbereiche und Genauigkeiten der anderen Sensoren auch im Bereich des vorgestellten Sensors. Die Genauigkeiten hängen allerdings von der Zielfläche ab und verlieren an Genauigkeit, wenn kein Reflektor verwendet wird. Die Auflösung hängt hier vom Datenakquisitionsgerät ab.

5.2.7.2 Einsatzmöglichkeiten

Optische Entfernungsmesser eignen sich zur Erfassung von Distanzen und Veränderungen dieser Entfernungen entlang der Messachse. Somit eignen sich diese Sensoren zur Erfassung von Deformationen. Der Sensor selbst braucht einen stationären Ruhepunkt, damit die Messung nicht verfälscht wird.

Es wird für folgende Monitoringaufgaben empfohlen:

- Monitoring von Lagerwegen
- Monitoring von Verformungen und Verschiebungen
- Monitoring von Schiefstellungen

Weiters sind Beispiele im Einsatz von Dimetix Laserdistanzsensoren im Structural Health Monitoring in [53] und in [54] nachschlagbar. Hierbei werden in [53] die Bewegungen von Strukturen und Gebäuden nahe einer Baugrube mittels Distanzsensoren überwacht. In [54] wird eine Verformungsmonitoring mit mehreren Laser-Sensoren in drei Raumachsen (x, y und z) an einer Brücke durchgeführt.

5.2.8 Wegaufnehmer

Wegaufnehmer messen die Distanz zweier definierter Messpunkte und erfassen die Veränderung dieser Distanz. Es gibt viele Sensorarten, welche den Überbegriff Wegaufnehmer tragen. In diesem Kapitel werden einige davon in ihrer Funktionsweise behandelt. In [1] werden folgende Wegaufnehmer angegeben:

- Potentiometer
- Induktive Wegaufnehmer (LVDT – Linear Variable Differential Transformer)
- Kapazitive Wegaufnehmer
- Optische Wegaufnehmer

Weitere gängige Arten sind:

- Wegaufnehmer mit Dehnmessstreifen
- Ultraschall Wegaufnehmer
- Radarwegaufnehmer
- Magnetinduktive Wegaufnehmer

5.2.8.1 Technische Eigenschaften

Potentiometer

Bei einem Potentiometer als Wegaufnehmer verändert sich der elektrische Widerstand mit dem Verschiebeweg im Sensor [17]. Durch Messung dieser Widerstandsänderung kann auf eine Wegänderung geschlossen werden. Laut [17] ist es neben dem induktiven Wegaufnehmer der am häufigsten auftretende Wegsensor im Bauwesen. Es wird erwähnt, dass es bei diesem Sensor oft zu Abnützungserscheinungen und Hystereseeffekten kommen kann. Für die Aufnahme der Messwerte bedarf es einer Versorgungsspannung, über welche die Widerstandsänderung ermittelt wird.

Folgend wird eine Linearpotentiometer-Serie von WayCon vorgestellt:

Tabelle 33 Linearpotentiometer von WayCon

Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Wiederholgenauigkeit	Linearität	Auflösung	Betriebstemperatur
WayCon Serie LRW [55]						
Weg [mm]	0 – 50 mm	-	0,01 mm	0,05 % = 0,0025 mm	-	-30°C bis +100°C
Weg [mm]	0 - 900 mm	-	0,01 mm	0,05 % = 0,45 mm	-	-30°C bis +100°C

Die Sensoren der Reihe LRW von WayCon weisen eine Schutzklasse von IP 60 bis IP 67 auf. Messbereiche variieren zwischen den zwei angegebenen Sensoren aus Tabelle 33. Die Abtastrate und die Auflösung sind abhängig vom gewählten Datenakquisitionsgerät.

Induktive Wegaufnehmer (LVDTs)

Bei dieser Sensorart wird eine Stange in einer Hülse mit integrierter Spule verschoben. Durch die Wegänderung der Stange ändert sich auch die Induktivität der integrierten Spule, welche messbar ist [17].

Folgend wird eine LVDT-Serie von WayCon vorgestellt:

Tabelle 34 LVDTs von WayCon

Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Linearität/Genauigkeit	Auflösung	Betriebstemperatur
WayCon Serie LV [55]					
Weg [mm]	0 - 2 mm	-	<0,2 % = 0,0025 mm	0,8 µm	-40°C bis +120°C
Weg [mm]	0 - 25 mm	-	<0,2 % = 0,45 mm	1 µm	-40°C bis +120°C

Die Schutzklasse der Serie LV, gezeigt an zwei Beispielen in Tabelle 34 liegt bei IP 65 bis IP 67. Auch hier sind zwischen den beiden gezeigten Messbereichen weiter erhältlich. Die Auflösung wird hier direkt angegeben und liegt im Mikrometerbereich. Je nach Datenakquisition sind auch hochdynamische Messungen möglich. Die Bewegungsfrequenz des Sensors selbst ist jedoch auf 100 Hz oder auch auf 25 Hz je nach Messbereich beschränkt.

Kapazitive Wegaufnehmer

Kapazitive Wegsensoren verfolgen dasselbe Messprinzip von kapazitiven Drucksensoren, aufgeführt in Kapitel 5.2.5.1. Elektrisch leitende Platten werden mit einem Dielektrikum verbunden. Wenn sich der Abstand der Platten zueinander ändert, ändert sich auch die elektrische Kapazität, welche messbar ist. Sie weisen eine besonders hohe Temperaturresistenz auf und sind für Messungen mit geringem Messbereich gedacht [55].

Folgend wird die KS-Serie von WayCon vorgestellt.

Tabelle 35 Kapazitive Wegaufnehmer von WayCon

Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Linearität/- Genauigkeit	Auflösung (dynamisch)	Betriebs- temperatur
WayCon Serie KS [55]					
Weg [mm]	0 - 0,05 mm	500 Hz	~0,2 % = 0,0001 mm	0,02 % = 0,00001 mm	-50°C bis +200°C
Weg [mm]	0 - 10 mm	500 Hz	~0,2 % = 0,02 mm	0,02 % = 0,002 mm	-50°C bis +200°C

Zwischen den in Tabelle 35 angegebenen Messbereichen sind noch weitere Messbereiche zu erwerben. Die Schutzklasse wird mit IP 68 angegeben. Diese Sensoren ermitteln berührungslos die Wegänderung vom Sensor zu elektrisch leitenden Objekten. Die Einsatzmöglichkeiten im Brückenmonitoring sind somit beschränkt, aber nicht undenkbar.

Optische Wegaufnehmer

Optische Wegaufnehmer sind ein gewählter Ersatzbegriff für die Wegaufnehmer, welche Messungen mittels Impulsänderung oder Laufzeitmessung durchführen. Diese werden in Kapitel 5.2.7 Entfernungsmesser (optisch) behandelt. Sie werden hier nur aufgeführt, da diese auch als Wegaufnehmer bezeichnet werden können.

Wegaufnehmer mit Dehnmessstreifen

Wegaufnehmer mit Dehnmessstreifen sind Sensoren, bei denen der zurückgelegte Weg über die Widerstandsänderung eines Dehnmessstreifens ermittelt wird. Ein Vorteil dieser Bauart ist, dass sie vollständig gekapselt ausgeführt werden und somit sehr robust ausgeführt werden [17]. Die Eigenschaften von Dehnmessstreifen werden in Kapitel 5.2.10 behandelt und hier nicht genauer aufgeführt.

Ultraschall-/ Radar-/ Magnetinduktiver Wegaufnehmer

Diese Arten von Wegaufnehmer werden in [17] als sonstige Wegaufnehmer vorgestellt. Sie sind vor allem für sehr dynamische Bewegungen geeignet und ermöglichen eine einseitig kontaktlose Messung. In der Bauwerksüberwachung sind diese bisher jedoch noch nicht etabliert und werden somit nicht näher behandelt.

5.2.8.2 Einsatzmöglichkeiten

Wegaufnehmer lassen das Messen von jeder einachsigen Bewegung oder Verschiebung zu. Vor allem induktive Wegsensoren und Potentiometer finden im Bauwerksmonitoring Anwendung. Ihre Einsatzmöglichkeiten sind abhängig vom Messbereich und der Auflösung/ der Genauigkeit. Die Wegaufnehmer aus Tabelle 34 eignen sich zum Beispiel zur Rissüberwachung, während die aus Tabelle 33 zum Beispiel auch Lagerwege aufnehmen können.

Es wird für folgende Monitoringaufgaben empfohlen:

- Monitoring von Verschiebungen
- Rissmonitoring
- Monitoring von Lagerwegen
- Monitoring von Fahrbahnübergängen
- Monitoring von Dehnungen

5.2.9 Inklinometer/Neigungssensor

Neigungssensoren, auch Inklinometer genannt, können je nach Bauart absolute Neigungen oder Neigungsänderungen erfassen. Im Inneren des Sensors wird die Verdrehung einer Messachse zu einer Bezugsachse bestimmt. Wenn diese Bezugsachse auf die Schwerkraftsrichtung ausgerichtet ist, werden absolute Messwerte erfasst. Die Bezugsachse wird über ein Pendelsystem, ein seismisches System oder ein Flüssigkeitssystem hergestellt. Je nach Messmethode wird die Neigung oder Verdrehung mit der Ausschlagmethode oder der Rückführmethode ermittelt. Die Messsysteme sind optisch, resistiv, kapazitiv, induktiv oder magnetisch [17].

In [56] werden Neigungssensoren in Schwingsaitenneigungsmesser, Elektronischer Neigungsmesser und Servo-Neigungsmesser eingeteilt. Weiters wird angegeben, dass mittels SOFO-Sensoren auch Neigungsmessungen durchgeführt werden können. SOFO-Sensoren sind im Prinzip faseroptische Sensoren und werden so in Kapitel 5.2.11 behandelt.

Weitere Literatur zur Geschichte der Neigungsmesstechnik, mehreren Prinzipien von Neigungssensoren und eine Produktübersicht der Wyler AG findet man in [57].

5.2.9.1 Technische Eigenschaften

Die Messergebnisse können in unterschiedliche Einheiten angegeben werden. Hierzu kann man zwischen Neigung (Grad [°], Neugrad [gon], Radiant [rad]) und Auslenkung [Millimeter pro Meter [mm/m], Mikrometer pro Meter [$\mu\text{m}/\text{m}$]) unterscheiden. Hierbei gilt für sehr kleine Winkel der Zusammenhang, dass ein Mikrometer pro Meter [$\mu\text{m}/\text{m}$] einem Mikroradian [μrad] entspricht [57].

Schwingsaitenneigungsmesser

Diese Art von Neigungssensor beinhaltet ein Gehäuse, indem die Spannung einer Schwingensaite durch die Neigung eines Pendels verändert wird. Diese Art von Sensor eignet sich jedoch nicht für die Aufnahme von dynamisch auftretenden Neigungsänderungen (wie zum Beispiel infolge Verkehrs), sondern für sich zeitlich langsam einstellenden Neigungsänderungen (zum Beispiel in Folge der Temperatur).

In [58] wird hierzu ein Sensor vorgestellt, welcher hier beispielsweise in Tabelle 36 gezeigt wird.

Tabelle 36 Schwingsaitenneigungssensor von Geokon

Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Genauigkeit	Auflösung	Betriebstemperatur
Geokon 6350 vibrating wire tiltmeter [59]					
Neigung [°]	0 - 10°	-	0,1 % FS = 0,01°	0,05 mm/m = 0,00286°	-20°C bis +80°C

Die Messfrequenz ist hier vom Datenakquisitionsgerät abhängig, wird aber im statischen Bereich zu wählen sein, da der Sensor selbst nicht für dynamische Neigungsänderungen geeignet ist. Zur Schutzklasse wird zu diesem Sensor keine angegeben, allerdings Angaben zur Schockfestigkeit und Dichtigkeit. Diese liegt bei einer Schockfestigkeit von bis zu 50 g und einer Wasserdichtigkeit von einem Wasserdruck bis zu 3 MPa.

Elektronischer Neigungsmesser

In [56] wird bei dieser Sensorart auf jene bezogen, welche auf dem Wasserwaagenprinzip basieren. Diese bestehen aus einem Hohlkörper, welcher mit einem Elektrolyt und einer Gasblase gefüllt ist. An der Oberseite des Hohlkörpers werden Elektroden angebracht. Diese erzeugen eine elektrische Spannung. Bei Neigung des Sensors verändert sich die Lage des Gasblase relativ zu den Elektroden. So tauchen die Elektroden unterschiedlich tief in die Elektrolyte ein und erzeugen so unterschiedliche Spannungen. Diese sind messbar und lassen auf die Neigung des Sensors schließen. Diese Sensoren eignen sich gut für statische Messungen einer Langzeitverdrehung [58].

In [58] wird hierzu auch ein Sensor vorgestellt, welcher auch hier in Tabelle 37 gezeigt wird.

Tabelle 37 Elektronischer Neigungsmesser von Uniaxial Tiltmeter

Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Genauigkeit	Auflösung	Betriebstemperatur
Model 801-S Standard version [60]					
Neigung [°]	0 - 3°	-	<2 % Linearität = 0,06°	0,0006°	-40°C bis +100°C

Der vorgestellte Sensor hat unter anderem noch zwei weitere Versionen derselben Reihe: Einen mit höher Genauigkeit und geringeren Messbereich (0 bis 0,5°) und einen für größere Messbereiche (0° bis 50°). Für die Genauigkeit wird hier nur die Linearität und eine Temperaturabhängigkeit angegeben, welche bei weniger al 0,02% (0,0006°) pro Grad Celsius liegt. Die Messfrequenz ist abhängig vom Auslesegerät, ist aber durch die Randbedingungen der Sensorart nur im statischen Bereich sinnvoll.

Servo-Neigungssensor

Die Funktion des Servo-Neigungssensors ist folgende: Ein Pendel im Gehäuse lenkt aufgrund einer äußeren Neigung aus und wird mithilfe eines Servosystems wieder in die Ursprungslage zurückgebracht. Anhand dieser erforderlichen Spannung kann man auf die Auslenkung des Pendels und somit auch auf die vorhandene Neigung geschlossen werden. Servo-Neigungssensoren ermöglichen eine dynamische Aufnahme von Neigungsänderungen und können unter anderem auch für Schwingungsmessungen verwendet werden [56].

In [58] wird für diese Sensorart beispielsweise der in Tabelle 38 gezeigte Sensor gezeigt.

Tabelle 38 Servo-Neigungssensor von Jewel

Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Genauigkeit	Auflösung	Betriebstemperatur
Jewel LCF-100-14.5 [61]					
Neigung [°]	0 - 14,5°	-	-	<0,00005°	-40°C bis +80°C

Zur Genauigkeit dieses Sensors wird kein zusammengefasster Wert angegeben, sondern eine Reihe von Genauigkeitsabweichungen. Diese sind zum Beispiel eine Nicht-Linearität von 0,02 % FS (0,0029°) und eine Temperaturabhängigkeit von 100 ppm pro Grad Celsius. Die Wiederholbarkeit wird in [58] mit weniger als 0,003° angegeben. Angaben zur Schutzklasse oder einer Wasserresistenz sind im Datenblatt nicht ersichtlich.

5.2.9.2 Einsatzmöglichkeiten

Neigungssensoren werden für alle Monitoringsarten verwendet, bei denen ein Winkel als Messgröße verlangt wird. Schwingsaitenneigungsmesser und elektrische Neigungssensoren mit Wasserwaagenprinzip eignen sich vor allem für sich langfristig einstellende Neigungen wie zum Beispiel infolge Temperatur, Kriechen oder Schwinden. Weiters ist es möglich über mehrere Neigungsmessungen am Oberbau auf eine Biegelinie zu schließen. Servo-Neigungssensoren eignen sich für dynamische Messungen. So können Neigungsänderungen durch Verkehr aufgenommen werden.

Es wird für folgende Monitoringaufgaben empfohlen:

- Lagermonitoring infolge Lagerverdrehung
- Monitoring von Fahrbahnübergängen infolge Verdrehung
- Monitoring von Neigungen/Schiefstellungen
- Monitoring von Verdrehungen

5.2.10 Dehnmessstreifen (DMS)

Dehnmessstreifen sind Messeinrichtungen, welche dehnende und stauchende Verformungen erfassen können. Durch Querschnitts- und Längenänderung des Messstreifens ändert sich der elektrische Widerstand in diesem. Somit sind über diese Widerstandsänderung bereits sehr geringe Verformungen messbar.

DMS sind in der Lage hochfrequente Sensorabtastungen durchzuführen und finden ein breites Anwendungsgebiet in der Sensortechnik und somit auch im Brückenmonitoring.

Diese Sensorart ist sehr umfangreich und wird in verschiedensten Ausführungen betrieben. So ist zum Beispiel eine Rosettenform, eine spezielle Bauart der DMS, in der Lage Messungen in unterschiedlichsten Richtungen mit wenig Aufwand zu betreiben.

Es empfiehlt sich bei einer Dauerüberwachung mittels DMS eine Fachperson oder Person mit Erfahrung im Bereich der DMS-Messtechnik zu Rat zu ziehen [17].

5.2.10.1 Technische Eigenschaften

Die Genauigkeit von DMS ist abhängig von der Messung des Widerstandes und die Änderung dieser bei Dehnung des Messstreifens. Diese Eigenschaften werden bei DMS durch den sogenannten *k-Faktor* beschrieben. Abbildung 31 zeigt diesen *k-Faktor* einiger häufig verwendeter Materialien.

Werkstoff (Legierungsbestandteile in %)	<i>k</i> -Faktor; 20 °C
Konstantan „Advance“ (60 Cu, 40 Ni)	≈ 2,15
Konstantan „Eureka“ (56 Cu, 44 Ni)	≈ 2,0
Isoelastic (36 Ni, 8 Cr, 3,5 Mn, 0,5 Mo, 52 Fe)	≈ 3,6
Nimonic 90 (46 Ni, 21 Cr, 21 Co, 5 Fe u. a.)	≈ 1,8
Karma 331 (74 Ni, 20 Cr, 3 Fe, 3 Al)	≈ 2,3
Nichrome (80 Ni, 20 Cr)	≈ 2,1... 2,5
Platin-Wolfram (92 Pt, 8 W)	≈ 4,0

Abbildung 31 *k*-Faktoren gebräuchlicher metallischer Messgitterwerkstoffe [62]

Weiters haben auch die Querdehnzahl und die Art der Brückenschaltung Einfluss auf die Widerstandsveränderung und somit die Messgenauigkeit von DMS. Diese Brückenschaltung ist

bekannt als Wheatstonesche Brückenschaltung. Hierbei wird in 3 maßgebende Arten unterschieden: Viertelbrücke, Halbbrücke und Vollbrücke [62].

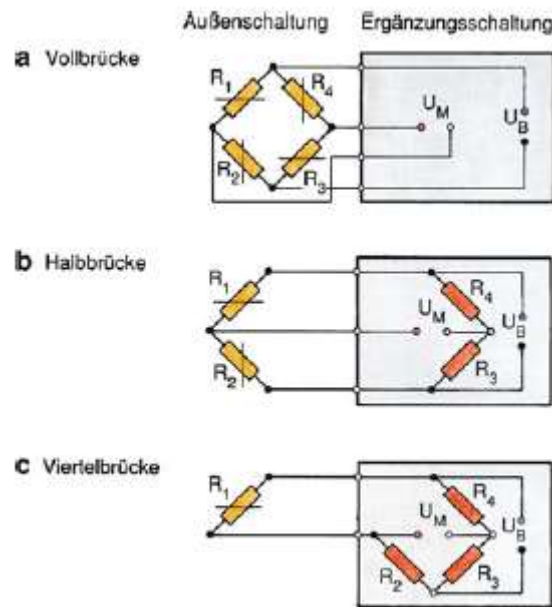


Abbildung 32 Brückenschaltung Schema DMS [62]

In [28] werden Richtwerte für Genauigkeiten bei diversen Brückenschaltungen angegeben für einen k-Faktor von 2:

- Viertelbrücke: $2000\mu\text{m/m}$ entsprechen 1 mV/V
- Halbbrücke: $1000\mu\text{m/m}$ entsprechen 1 mV/V
- Vollbrücke: $500\mu\text{m/m}$ entsprechen 1 mV/V
- Halbbrücke mit einmal Längs- und einmal Querdehnung: $1539\mu\text{m/m}$ entsprechen 1 mV/V
- Vollbrücke mit zweimal Längs- und zweimal Querdehnung: $769\mu\text{m/m}$ entsprechen 1 mV/V

Tatsächliche Genauigkeiten hängen von der maximalen Speisespannung, mit welcher ein DMS betrieben werden kann, und von dem angeschlossenen Messsystem ab. Hierzu sind alle möglichen Hintergründe in [62] nachzulesen. Die meisten ermöglichen jedoch Messungen im Mikrometerbereich und auch weniger.

Die Werte der maximalen Dehnung sind abhängig von der Dehnbarkeit des Messgitterwerkstoffes sowie von dem Verbund des Sensors mit dem zu messenden Objekt. Üblicherweise liegt die Dehnbarkeit bei Raumtemperatur im Bereich von $1.000\mu\text{m/m}$ (Halbleiter DMS) bis $50.000\mu\text{m/m}$ (Folien DMS) [63]. Störfaktoren für die Messung sind Temperatur, Kriechen, Querempfindlichkeit bei mehrachsiger Verformung und Feuchtigkeit. Besonders vor Feuchtigkeit sind die Sensoren zu schützen, da auch bereits erhöhte Luftfeuchtigkeit die Messergebnisse verfälschen kann. Vor und Nachteile von DMS werden in Abbildung 33 gezeigt.

DMS Vorteile bzw. Nachteile

Vorteile:

- Hohe Messgenauigkeit - Auflösung von mehreren μm
- Sehr viele DMS Formen für unterschiedliche Einsatzbereiche konzipiert.
- Lange Lebensdauer
- Geringe Masse
- Erfassung von Vibrationen selbst im hochfrequenten Bereich bis 50 kHz.
- Einfache Temperaturkompensation
- Messungen sind bis zu 800°C möglich
- Für statische und dynamische Anwendungen geeignet.
- Verformungen können kontinuierlich gemessen werden
- einfache Datenübertragung

Nachteile:

- Klebeverbindungen
- Hohe Anfälligkeit gegen Feuchtigkeit
- Die Spannungsmessung erfolgt häufig durch invasive Messmethoden, d.h. es kommt zu Eingriffen in die Stabilität des Messobjektes.
- Verformungen werden direkt am Messobjekt gemessen. Durch Risse kann es daher zur Zerstörung des DMS kommen.

Abbildung 33 Vor- und Nachteile von DMS [10]

Wie schon in mehrere anderen Kapitel erwähnt, werden Dehnmessstreifen nicht nur ausschließlich für Dehnungserfassung verwendet. Sie finden Einsatz bei beispielsweise Kraft- und Drucksensoren oder auch bei Wegaufnehmern.

[47] bietet beispielsweise eine Vielzahl an DMS-Sensoren an, unter anderem wasserfeste, temperaturresistente und speziell für Messungen an Beton ausgerichtete DMS.

Tabelle 39 zeigt grob die Eigenschaften von Dehnmessstreifen. Dies ist lediglich eine Annäherung, da Dehnmessstreifen je nach Anspruch konzipiert werden können.

Tabelle 39 Eigenschaften von Dehnmessstreifen

Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Genauigkeit	Auflösung	Betriebstemperatur
Dehnmessstreifen					
Dehnung [$\mu\text{m}/\text{m}$]	je nach Messtreifen (bis ~50000 $\mu\text{m}/\text{m}$)	~50 kHz	wenige μm oder weniger	-	bis zu 800°C

5.2.10.2 Einsatzmöglichkeiten

Dehnmessstreifen haben ein breites Feld an Einsatzmöglichkeiten. Wie bereits erwähnt, kann durch die präzise Ermittlung von Dehnungen und Stauchungen an Materialien auf viele einfließende Größen geschlossen werden. Auch Eigenfrequenzen können mit diesen Sensoren ermittelt werden [1].

Es wird für folgende Monitoringaufgaben empfohlen:

- Monitoring von lokalen Dehnungen, Verformungen und Verschiebungen
- Monitoring von Kräften und Spannungen bei bekannten Materialparametern
- Monitoring von Eigenfrequenzen
- Monitoring von Verkehr über Dehnungen (BWIM)

5.2.11 Faseroptischer Sensor

Faseroptische Sensoren (FOS) sind Messaufnehmer für optische Messverfahren auf Grundlage von Lichtwellenleitern. Messgrößen werden optisch repräsentiert. Man unterscheidet zwischen zwei Klassen von faseroptischen Sensoren: intrinsischen Sensoren und extrinsischen Sensoren.

Bei intrinsischen Sensoren dient die Glasfaser direkt als Messaufnehmer und ist somit Sensor und Leitung zugleich. Bei extrinsischen Sensoren dient die Glasfaser nur als Überträger der vom Sensor erfassten Messgröße. Bei faseroptischen Systemen können neben Dehnung auch Verformung, Temperatur, Betonfeuchtigkeit, pH-Wert-Bestimmung und Chloridsensoren implementiert werden [26].

5.2.11.1 Technische Eigenschaften

In [17] werden mehrere faseroptische Sensoren beschrieben und hier mit ihren angegebenen Eigenschaften je nach Einsatzart kurz erläutert. Weitere Kenndaten sind in [26] und in deren vermerkten Quellen angegeben. Auf die Erstellung zusammenfassender Tabellen wird hier durch die Vielfalt verzichtet. Die jeweiligen Eigenschaften sind aus dem Fließtext zu entnehmen.

Faseroptische FBG Sensoren

FBG steht für Faser-Bragg-Gitter und ist bei optischen Messsystemen das verbreitetste System. Diese werden in optische Fasern eingeschrieben. Durch sie wird bei eingestrahlttem Licht nur die sogenannte Bragg-Wellenlänge reflektiert, welche wiederum proportional mit dem Gitterabstand zusammenhängt. Kommt es zur Dehnung oder Stauchung, verändert sich der Gitterabstand und somit die Brechzahl im FBG und dadurch resultierend die reflektierte Wellenlänge. Weitere Eigenschaften werden in [64] beschrieben.

Üblicherweise werden Messlängen von 0,5 cm bis 5 cm angeboten. Eine weitere Form, die LGFBG (werden weiter unten noch näher beschrieben), können Messlängen von mehreren Metern aufweisen. Typische Signalauflösung liegt bei 1 $\mu\text{m}/\text{m}$, mit der Möglichkeit, durch geeignete Dehnungsverstärkung deutlich höhere Auflösungen zu erzielen (0,1 $\mu\text{m}/\text{m}$). Diese Sensoren können auch zur Messung von Beschleunigungen eingesetzt werden. Auch Temperaturmessungen mit einer Auflösung von kleiner 0,1°C werden mit FBG-Sensoren ermöglicht. Abtastraten gehen laut [65] bis zu 5 kHz [17].

Faseroptische LGFBG Sensoren

Weitspannende faseroptische Dehnungssensoren (Long Gauge FBG) ermöglichen die effektive großflächige Erkennung und Aufzeichnung neuer Risse in Bauwerken durch integrale Überwachung von Dehnungen über längere Strecken. Jedoch verlangen diese Kenntnis über die ungefähre Lage und Ausrichtung potenziell entstehender Risse. Die Nutzung solcher Sensoren bietet direkte Einblicke in den Zustand und mögliche Rissbreitenänderungen, allerdings mit Einschränkungen bei der Ortsauflösung. Die Messgenauigkeiten liegen im Bereich der typischen FBG-Sensoren [17].

Abtastraten sind durch die Anwendung von Faser-Bragg-Gittern im selben Bereich wie bei den FBG-Sensoren anzunehmen.

Verteilte faseroptische Sensoren

Diese sind auch bekannt als DFOS (Distributed Fiber Optic Sensors). Sie können Dehnungsänderungen auf der gesamten Sensorlänge erfassen. Zur Berechnung von Dehnungen können unterschiedliche Komponenten des Lichts analysiert werden, indem Änderungen zum unbelasteten Zustand („Fingerprint“) ausgewertet werden. In der Regel können auch Temperaturänderungen aufgenommen werden. Verteilte FOS können in zwei Hauptverfahren aufgeteilt werden. Zu einem in das OTDR-Verfahren (Optical Time Domain Reflectometry), welches Messlängen im mittleren zweistelligen Kilometerbereich ermöglicht. Die Ortsauflösung ist jedoch auf ungefähr 1 m begrenzt. Somit fallen hochauflösende Dehnungsmessungen aus für dieses System. Eingesetzt wird es vor allem in Tunnelbauwerken, Wasserkanälen und Pipelines[17].

Zweites Hauptverfahren ist das OFDR-Verfahren (Optical Frequency Domain Reflectometry). Die Messstrecke ist typischerweise auf 70 m beschränkt, jedoch auf bis zu 2 km erweiterbar. Die Ortsauflösung liegt bei 1 mm bis 10 mm und die Dehnungsauflösung liegt bei ungefähr 1 $\mu\text{m}/\text{m}$. Zusätzlich eignet sich dieses Verfahren besonders für die Rissüberwachung, da mit diesem System eine hohe Ortsauflösung mit gleichzeitig hoher Dehnungsauflösung ermöglicht wird. Im Einsatz bezüglich der Temperaturänderung liegt die Genauigkeit bei ca. 1°C. Bei Messlängen von bis zu 100m, wo typischerweise ein OFDR-Verfahren angewendet wird, sind Auflösungen von 0,1°C möglich. Mit verteilten faseroptischen Sensoren sind an Ingenieurbauwerken in Abhängigkeit der Messstrecke nur vergleichsweise langsame Messungen möglich[17].

Interferometer

Faseroptische Interferometer wie das Interferometer nutzen Reflexionen an Mehrschichtsystemen für die Dehnungsmessung, wobei Resonatoren das Lichtsignal reflektieren und ein charakteristisches Wellenmuster erzeugen. Andere Typen wie das Michelson- und Mach-Zehnder-Interferometer beschreiben relative Längenänderungen durch die Überlagerung von Wellen. Diese Sensoren ermöglichen je nach Bauart Punktmessungen oder Linienmessungen, bieten aber insbesondere hohe Messfrequenzen im Vergleich zu anderen Sensoren. Die genaue Frequenz und Dehnungsauflösung hängen von der spezifischen Sensorausführung und Anwendung ab. Jedoch werden diese auch zur faseroptischen Beschleunigungsmessung verwendet [17].

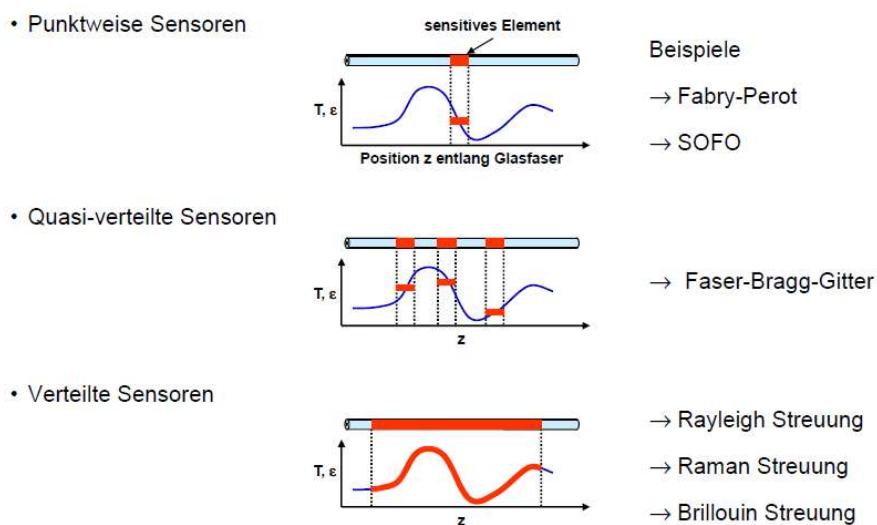


Abbildung 34 Punktweise, verteilte und kontinuierliche Sensoren [10]

Zusammengefasst lassen faseroptische Sensoren eine Vielfalt an Messungen zu, bei unterschiedlichen Einsatzlängen und Genauigkeiten. Sie werden jedoch meist als teure Messverfahren beschrieben.

Weitere Eigenschaften von FOS sind, dass sie elektromagnetisch immun sind, große Leitungslängen ermöglichen und dass die FOS selbst keine Spannungsversorgung benötigen.

Beispielsweise werden hier noch die faseroptischen Sensoren von [47] erwähnt. Diese bieten eine Vielzahl an FOS an für unterschiedliche Anwendungen. Unterteilt werden dort diese in:

- Faseroptische Dehnungssensoren
- Faseroptische Drucksensoren
- Faseroptische Wegsensoren
- Faseroptische Temperatursensoren
- Faseroptische Extensometer
- Faseroptische Wägezellen

5.2.11.2 Einsatzmöglichkeiten

Faseroptische Sensoren haben ein sehr breites Anwendungsgebiet. Es kann eine Vielzahl von Faktoren gemessen werden. Hier werden nur ein paar der möglichen Einsatzarten angegeben.

Es wird für folgende Monitoringaufgaben empfohlen:

- Monitoring von lokalen Dehnungen, Verformungen und Verschiebungen
- Monitoring von Kräften und Spannungen bei bekannten Materialparametern
- Monitoring von Eigenfrequenzen
- Monitoring von Rissbreiten
- Erfassung von Rissbildern

5.2.12 Beschleunigungssensor

Beschleunigungssensoren messen die namensgebende Beschleunigung des Sensors. Dies erfolgt meist, indem auf eine Testmasse wirkende Trägheitskraft bestimmt wird. Bei den Arten der Sensoren wird vor allem zwischen piezoelektrischen Beschleunigungssensoren und Mikro-Elektro-Mechanischen Sensoren (MEMS) unterschieden. Weitere Beschleunigungssensoren funktionieren über Dehnmessstreifen, Magnetische Induktion und Ferraris Sensoren. Beschleunigungssensoren eignen sich primär für ein dynamisches Monitoring durch ihre hochfrequente Abtastrate [66].

Beschleunigungssensoren werden meist verwendet, um Frequenzanalysen an Bauwerken durchzuführen. Dies beinhaltet die Erfassung der Eigenfrequenz des Bauwerkes oder Bauteiles sowie das Verhalten auf statische, besonders aber dynamische Belastungen.

Faseroptische Sensoren können als Beschleunigungssensoren eingesetzt werden. Insbesondere Interferometer und Faser-Bragg-Gitter Sensoren. Diese sowie auch Beschleunigungssensoren mittels DMS wurden bereits in Kapitel 5.2.11 und Kapitel 5.2.10 erörtert. Eine weitere Form von Beschleunigungsmessung ist über Servo-Beschleunigungssensoren. Diese sind funktionsgleich zu Servo-Neigungssensoren [56], welche in Kapitel 5.2.9 behandelt worden sind. Somit wird hier der Fokus primär auf Piezo-Sensoren und MEMS- Sensoren gerichtet.

5.2.12.1 Technische Eigenschaften

Die meisten Beschleunigungssensoren können über ein Masse-Feder-System beschrieben werden, wie in Abbildung 35 gezeigt.

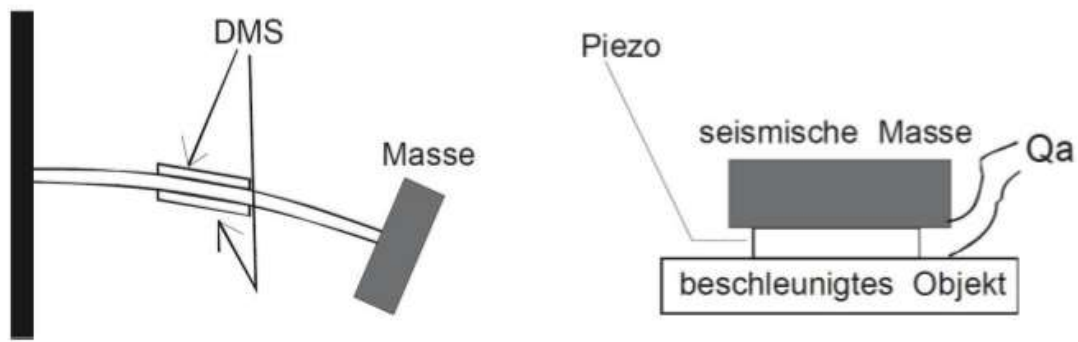


Abbildung 35 Beschreibung eines Beschleunigungssensor mittels Masse-Feder-System [26]

Piezelektrische Sensoren

Bei piezelektrischen Sensoren wird die Spannung genutzt, welche Piezoelemente erzeugen, wenn sie einer Kraft ausgesetzt werden. Je stärker die wirkende Beschleunigung, desto größer ist die gemessene Spannung [17]. Somit ist ein Vorteil, dass keine externe Energieversorgung zur Einspeisung des Sensors nötig ist. Weiterhin stehen sie für ihre Robustheit gegenüber Temperaturen sowie ihrer Eigenschaft, in einem vergleichsweise großen Frequenzbereich Messungen durchführen zu können. Zudem besitzen sie eine relativ gute Empfindlichkeit [56]. Nachteil ist die Störempfindlichkeit. Die Übertragung zum Ladungsverstärker benötigt störarme und kurze Kabel.

Kapazitive Sensoren und MEMS

Kapazitive Beschleunigungssensoren beinhalten einen Differenzialkondensator, dessen Kapazität sich infolge einwirkender Schwingungen ändert. Sie können auch bei sehr niedrigen Frequenzen eingesetzt werden [56]. MEMS-Sensoren zeichnen sich vor allem in ihrer kleinen Ausführung (im Millimeter Bereich) und somit ihren energiesparenden Eigenschaften aus. Sie basieren auf demselben Konzept wie kapazitive Sensoren.

Beschleunigungssensoren haben im Vergleich zu Geschwindigkeitssensoren den Vorteil, dass sie auch sehr niedrige Frequenzen messen können, da die Frequenzganglinie bis auf null Hertz geht. Allerdings ist ein Beschleunigungssensor nicht so empfindlich auf niedere Frequenzen wie der Geschwindigkeitssensor [67].

Laut [56] wird empfohlen, dass die Messbereiche bei mittelgroßen Spannweiten eines Tragwerkes einen Frequenzeinsatzbereich von 3 bis 50 Hz und die messbare Beschleunigung bei $\pm 3 \text{ g}$ (mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, Erdbeschleunigung) liegen soll. Bei langen Spannweiten liegt der Frequenzeinsatzbereich bei 0 bis 10 Hz und die messbare Beschleunigung bei $\pm 0,05 \text{ g}$. Anhand dieser Bereiche soll die Auswahl des Sensors gewählt werden.

[47] bietet Beschleunigungssensoren mit Messbereichen von $\pm 0,25 \text{ g}$ bis zu $\pm 70.000 \text{ g}$ an, bei Frequenzbereichen bis 25 kHz. Genauigkeiten werden dort mit kleiner $1\mu\text{g}$ angegeben. Somit würden sich ihre Sensoren eher für mittelweite Spannweiten eignen.

Auf eine Übersichtstabelle wird in diesem Kapitel verzichtet, da die Vielfalt der Beschleunigungssensoren schwer zusammenfassbar ist. Allerdings kann man davon ausgehen, dass nahezu für jede Anforderung ein geeigneter Beschleunigungssensor kommerziell erhältlich ist.

5.2.12.2 Einsatzmöglichkeiten

Beschleunigungssensoren werden primär zur Ermittlung von Eigenfrequenz und Änderung dieser verwendet.

Es wird für folgende Monitoringaufgaben empfohlen:

- Monitoring von Schwingungen und Eigenfrequenzen
- Monitoring von Seilkräften
- Erfassung von plötzlich auftretenden Schädigungen

5.2.13 Schwinggeschwindigkeitssensor

Schwinggeschwindigkeitssensoren sind Sensoren, die die zeitliche Änderung eines Weges messen. Ihr Messwert ist ein direktes Maß für den Energieerhalt einer Schwingung. Das Quadrat der Schwinggeschwindigkeit ist proportional zur Schwingungsenergie. Es handelt sich meist um elektrodynamische Sensoren. Die Funktionsweise dieser ist, dass die Bewegung einer beweglichen Spule rund um einen fixierten magnetischen Kern eine der Schwinggeschwindigkeit proportionales Spannungssignal erzeugt. Mit diesen Sensoren sind Auflösungen auch in sehr niedrigen Frequenzen möglich [1].

5.2.13.1 Technische Eigenschaften

Klassische elektrodynamische Sensoren

Diese wurden oben bereits in ihrer Funktion beschrieben. Ihre Anwendungsgrenzen werden in [56] auf 5 bis 15 Hz beschränkt. Bei Verstärkung der Aufnehmerkennlinie kann diese Grenze auf ca. 1 Hz herabgesetzt werden.

Laser-Doppler-Vibrometer

Diese werden als weiterer häufig eingesetzter Schwinggeschwindigkeitssensor in [56] angegeben. Sie basieren auf der geschwindigkeitsabhängigen Änderung der Frequenz und der Wellenlänge von Lichtwellen, wenn sie auf ein sich bewegendes Objekt treffen und von diesem reflektiert werden. Herkömmliche Laser-Doppler-Vibrometer erfassen diese Bewegung nur an einem Punkt eines Objektes. So müssen diese für die Erfassung mehrerer Punkte manuell neu ausgerichtet werden. Sie sind meist kostenintensiv, erreichen jedoch eine äußerst hohe Genauigkeit und können aus Entfernung von über 100 m zum Messobjekt eingesetzt werden.

Beschleunigungssensoren können indirekt die Schwinggeschwindigkeit ermitteln. Dies geschieht durch Integration der Beschleunigungen über die gemessene Zeit. Hierbei kann es bei numerischer Integration jedoch zu einer unerwünschten Verstärkung des Rauschens im niederfrequenten Bereich in den Signalen kommen [56].

In [67] wird ein Schwinggeschwindigkeitssensor von SYSCOM vorgestellt. Dabei handelt es sich um den MS2003+. Der Amplitudenbereich wird von 0,000004 mm/s bis 115 mm/s definiert mit einem Frequenzbereich von 1 Hz bis 315 Hz. Da bei diesem System ab unter 0,1 Hz nahezu keine Relativverschiebung im Sensor vorkommt, gilt dieser Bereich als Untergrenze zur Messung der Schwingung. Dies ist auf die meisten Schwinggeschwindigkeitssensoren übertragbar.

Auch in diesem Kapitel wird auf eine zusammenfassende Tabelle verzichtet, Geschwindigkeitssensoren im Vergleich zu anderen Sensoren im Brückenmonitoring eher seltener eingesetzt werden.

5.2.13.2 Einsatzmöglichkeiten

Schwinggeschwindigkeitssensoren haben grundsätzlich das gleiche Anwendungsgebiet wie Beschleunigungssensoren. Sie werden in der Frequenzanalyse verwendet.

Es wird für folgende Monitoringaufgaben empfohlen:

- Monitoring von Schwingungen und Eigenfrequenzen
- Monitoring von Seilkräften
- Erfassung von plötzlich auftretenden Schädigungen

5.2.14 Exkurs Temperatursensor

Bei der Überwachung von Tragwerken werden fast immer Luft- und/oder Bauwerkstemperatur gemessen. Die Bauteiltemperatur speziell hat einen maßgebenden Einfluss auf Dehnungen und somit im Bereich der Verformungsmessungen eine entscheidende Rolle. Methoden der Temperaturmessung sind folgende [68]:

- **Thermoelemente:** Diese bestehen aus zwei parallel verlaufenden Drähten verschiedener elektrischer Leiteigenschaften, die am Ende miteinander verbunden sind. Zwischen den beiden freien Enden der Drähte ist ein Spannungsmesser angebracht. Bei Temperaturdifferenzen zwischen den verbundenen und freien Enden entsteht Spannung, die durch den Spannungsmesser erfasst wird. Thermoelemente werden häufig eingesetzt aufgrund ihrer Robustheit, Einfachheit und Kostengünstigkeit. Weiterer Vorteil ist, dass keine externe Stromquelle nötig ist. Allerdings weisen sie eine vergleichsweise schlechtere Sensitivität auf und sind anfällig gegenüber Rauschen.
- **Thermistoren:** Thermistoren sind Widerstände, die ihren Widerstandswert aufgrund von Temperatureinflüssen ändern. Bei diesen wird zwischen Heißeleitern und Kalteleitern unterschieden. Thermistoren werden als kostengünstig, stabil, präzise und reaktionsschnell beschrieben. Allerdings benötigen sie eine externe Stromquelle und haben eine nicht-lineare Kennlinie.
- **Widerstandsthermometer:** Die Funktionsweise der Widerstandsthermometer basiert analog zu den Thermistoren. Der Unterschied ist, dass häufig Edelmetalle als Widerstand zum Einsatz kommen. Die Kennlinie dieser ist, anders als bei den Thermistoren, linear. Nachteile sind eine lange Reaktionszeit, hohe Kosten und die Notwendigkeit einer externen Stromquelle.

Weiters können auch andere Sensoren wie zum Beispiel faseroptische Sensoren zum Messen einer Bauteiltemperatur verwendet werden.

5.2.15 Exkurs Feuchtigkeitssensor

Feuchtigkeitsverteilungen im Bereich der Betonrandzone können mit einer sogenannten Multiringelektrode gemessen werden. Multiringelektroden bestehen aus mehreren übereinander angeordneten Edelstahlringen, welche mit einem Kunststoff voneinander getrennt sind. Der Sensor hat eine zylindrische Form und muss in den zu messenden Betonbauteil eingebracht werden (nachträglich oder auch beim Bau). Die Edelstahlringe messen die jeweiligen Elektrolytwiderstände im Inneren des Bauteils, die auf die Bauwerksfeuchte schließen lassen [68].

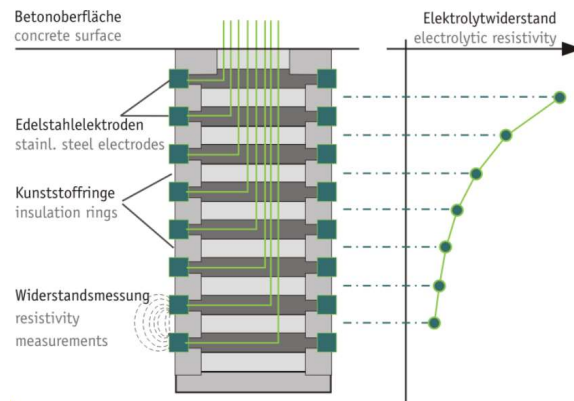


Abbildung 36 Aufbau einer Multiringelektrode [69]

5.2.16 Exkurs Anodenleiter

Ein Anodenleiter wird häufig für die Messung von Korrosion verwendet. Eine Anodenleiter besteht aus mehreren Elektroden (Anoden), die in der Betondeckung eines Bauteils eingebaut werden. Zusätzlich wird eine Edelmetallkathode eingebaut. Die Anode beginnt beim Erreichen der Depassivierung zu korrodieren. Die Korrosionsaktivität kann somit über den bestehenden Stromfluss an der jeweiligen Anode und der Kathode gemessen werden, die auch mit sogenannten Bohrkernanoden nachträglich in ein bestehendes Bauwerk eingebracht werden können [69].

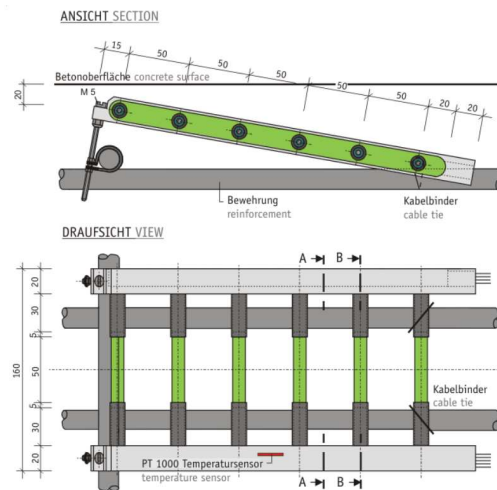


Abbildung 37 Aufbau einer Anodenleiter [69]

5.2.17 Exkurs Korrosionsopfersensor

Der Sensor besteht aus einem Material, das anfällig für Korrosion ist und sich im Verlauf des Prozesses opfert. Dieses Opfermaterial hat normalerweise eine höhere Korrosionsanfälligkeit als das eigentliche Strukturmaterial, sodass es bevorzugt korrodiert.

Durch die Überwachung des Materialverlusts am Korrosionsopfersensor kann auf den Grad der Korrosion in der Umgebung geschlossen werden. Dieser Verlust wird normalerweise als Gewichtsverlust des Sensors oder als Dicke des korrodierten Materials gemessen [70].

Übliche Ausführung sind in Form eines Platinensensors oder eines Drahtsensors.

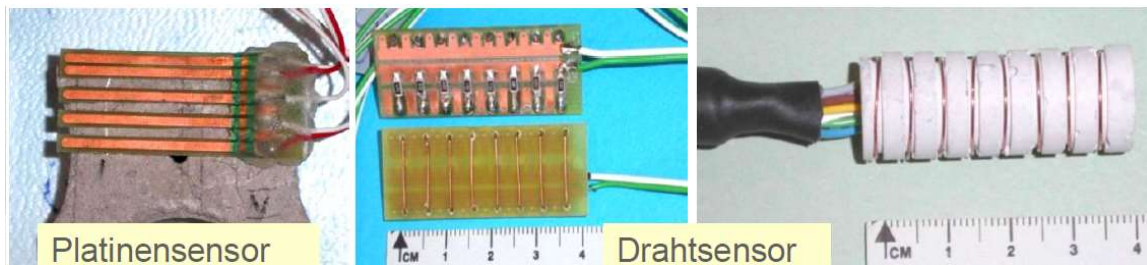


Abbildung 38 Korrosionsopfersensor Schema [70]

6 Zuordnung der Sensorarten zu den Monitoringsarten

Die aus dem Kapitel 4 aufgelisteten Arten des Monitorings lt. [1] werden hier den Sensortypen aus [1] zugeordnet. Dazu sind Tabellen in Anhang D vorzufinden, welche die genannten Monitoringarten und Sensortypen gegenüberstellen und bewerten. Wenn eine Messung mit dem Sensortyp möglich ist, wird dieser in der Tabelle mit einem + (Plus) gekennzeichnet. Ist der Sensortyp für diese Anforderung ungeeignet oder kann die gefragte Messgröße nicht ermittelt werden, wird dieser mit einem – (Minus) gekennzeichnet. Die Bewertung erfolgt über die Zuordnung von Sensoren zu Monitoringarten aus [1] und [17]. Geeignete Sensoren werden in diesem Kapitel in ihrem jeweiligen Einsatz kurz erklärt.

Vorweg wird noch darauf hingewiesen, dass die meisten Monitoringaufgaben eine simultan laufende Temperaturmessung verlangen. Dies ist notwendig um Effekte aus Temperatur am Tragwerk, als auch am Sensor selbst berücksichtigen zu können. Je nach Anforderung kann die Luft und/oder die Tragwerkstemperatur gemessen werden.

6.1 Lokales Monitoring

6.1.1 Rissmonitoring

Anzufinden in Anhang D Tabelle 41 auf Seite 117.

Wegaufnehmer

Der Sensor wird mit einem bekannten Abstand auf beiden Seiten des Risses montiert. Es eignen sich alle vorgestellten Arten der Wegaufnehmer aus Kapitel 5.2.8. Besonders induktive und kapazitive Wegaufnehmer weisen eine hohe Genauigkeit und Auflösung auf. Diese eignen sich zur Überwachung sehr kleiner Rissbreitenveränderungen. Sie bieten auch die Möglichkeit, dynamische als auch statische Messraten umzusetzen. So sind Wegaufnehmer in der Lage, Rissbreitenänderungen aus Temperatur und aus Verkehr aufzunehmen. Optische Wegaufnehmer und DMS-Wegaufnehmer werden gesondert in den nächsten Absätzen behandelt.

Dehnmessstreifen

Rissbreitenänderungen können mittels DMS besonders gut erfasst werden. Durch ihre hohe Abtastrate ist eine hoch dynamische Messung möglich. Für ein Rissmonitoring werden Dehnmessstreifen vor allem in Form von Wegaufnehmern eingesetzt. Ein reines Anbringen eines Dehnmessstreifens über den Riss ist nicht zu empfehlen, da dieser reißen kann. Jedoch kann man mit einer Hilfskonstruktion, wie zum Beispiel eines Federstahls in Form eines Hufeisens mit einem angebrachten DMS über den Riss anbringen. So kann indirekt über die Dehnung der Hilfskonstruktion die Rissbreitenänderung ermittelt werden. Eine exakte Kalibrierung ist hierbei notwendig [18].

Schwinggeschwindigkeitssensoren

Schwinggeschwindigkeitssensoren kommen hier in Form von Schwingsaitensensoren zum Einsatz. Die Schwingfrequenz eines Schwingsaitensensors wird an einer gespannten Seite gemessen. Bei einem auftretenden Riss kommt es zu einer Schwingfrequenzdifferenz. Ein Erkennen neu auftretender Risse ist somit umsetzbar. Jedoch ist die Rissbreite nicht erkennbar und die Lage des Risses am Bauteil nur bedingt nachvollziehbar. Diese Art des Rissmonitoring wird hauptsächlich in Tunnelbauwerken verwendet [71].

Faseroptische Sensoren

Punktuelle und quasiverteilte Verfahren bei FOS sind in der Lage geringe Längenänderungen und somit Rissbreitenänderungen sehr genau aufzunehmen. Bei Verteilten Systemen wie LGFBG oder DFOS ist auch eine automatische Rissdetektion über die Bauteillänge möglich. Somit können verteilte Systeme nicht nur Rissbreiten und deren Veränderungen aufnehmen, sondern auch neu entstehende Risse lokalisieren und Auskunft über das vorhandene Rissbild liefern.

Sonstige Sensoren

Scantronik Rissfox Mini (DEU) [72]:

Der Rissfox Mini ist umfassendes Monitoringpaket. Gemessen wird die Rissbreitenänderung mittels eines Wegaufnehmers. Hinzu kommen simultane Messungen der Lufttemperatur und der Luftfeuchte. Der Riss wird bis zu 100-mal die Sekunde abgetastet und Extremwerte hierzu werden registriert. Der integrierte Datenlogger kann 16.000 oder 64.000 Messwerte speichern. Dieser ist getrennt vom Wegaufnehmer am Bauteil zu befestigen, um Verspannungen zu vermeiden. Der Messbereich liegt bei 10 mm, kann aber auf 75 mm erweitert werden. Die Auflösung geht bis zu 2,5 µm. Je nach Messrhythmus kann die Messdauer bei einer Batterie bis zu 667 Tagen betragen.

6.1.2 Lagermonitoring

Anzufinden in Anhang D Tabelle 42 auf Seite 118.

Wegaufnehmer

Die Erfassung des Längs- und Querverschiebeweges kann über Wegaufnehmer bestimmt werden. Vor allem Potentiometer eignen sich für ein Monitoring des Lagerweges in Längsrichtung durch ihre hohen Messbereiche. Optische und DMS-Wegaufnehmer sind durch die meist höheren Messbereiche nicht geeignet. Da Lagerwege sich hauptsächlich über Temperatur einstellen und vor allem der Winter und Sommerzustand maßgebend sind, sind statische Messungen im Regelfall ausreichend.

Inklinometer

Mit Schwingsaitenneigungssensoren und elektronischen Neigungsmessern kann man die Verdrehungen der Lagerplatten und des Lagers ermitteln. Diese eignen sich jedoch nur für statische Messraten. Sollte eine Verdrehung infolge dynamischer Last gefragt sein, eignet sich der Servo-Neigungssensor.

Druckaufnehmer

Mit Druckaufnehmer kann die auf das Lager wirkende Last bestimmt werden. Je nach Bedarf kann die über die ermittelten Spannungen auch die Lagerpressung bestimmt werden. Druckaufnehmer eignen sich für eine Überprüfung der vorher ermittelten Belastungsmodelle einer Brücke als auch zur Überprüfung der zulässig wirkenden Kraft auf ein Lager. Kapazitive, piezoelektrische und optische Druckaufnehmer eignen sich gleichermaßen für diese Monitoringanforderung. Bedacht werden muss

die erwartete Lagerkraft, welche den Messbereich bestimmt. Bei dynamischer Messung ist auch ein Rückschluss auf den Verkehrsfluss möglich.

Kraftaufnehmer

Kraftaufnehmer eignen sich für dieselben Anforderungen wie Druckaufnehmer.

Dehnmessstreifen

Dehnmessstreifen kommen hier in Form von Kraftaufnehmer oder Druckaufnehmer zum Einsatz.

Entfernungsmessgerät (optisch)

Dieser Sensor kann nur eingesetzt werden, wenn die bauliche Geometrie es zulässt. Ein Laserdistanzsensor kann zum Beispiel an der Herdwand angebracht werden, da sich diese in Relation zum Lager in Ruhe befindet. Wenn der Messpunkt die obere Lagerplatte ist, sind Wege in Längsrichtung erfassbar. Dasselbe gilt für eine Befestigung an der Flügelwand für Bewegungen in Querrichtung. Hierbei muss der Sichtkontakt und der Platz gewährleistet werden.

Sonstige Sensoren

Hebag Lagermonitoring (CHE) [73]

Das Monitoringsystem von Hebag bietet die Überwachung von Lagerkräften und der Verschiebung mit vielen anderen Überwachungsmöglichkeiten an. Ein Alarmsystem wird mit angeboten. Stromversorgung läuft über Netz, Solarenergie oder Batterie. Weiter Angaben werden nur auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

Maurer Lagermonitoring (EU) [74]

Maurer bietet eigens konstruierte intelligente Kalottenlager an. Diese messen sowohl die Lagerkraft als auch Verdrehung und Verschiebung. Beispielsweise sind diese beim Autobahnkreuz Nürnberg im Einsatz. Dort messen diese beispielsweise neben den zuvor genannten Werten auch den fließenden Verkehr mit 10 % Genauigkeit [75].

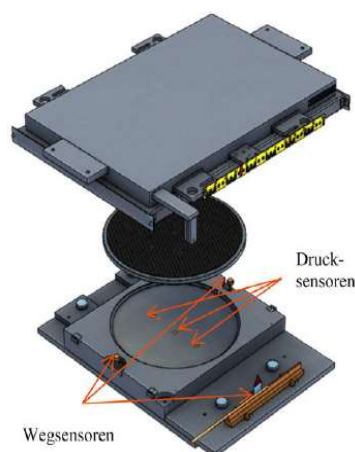


Abbildung 39 Expositionsansicht des Kalottenlagers [75]

Mageba ROBO-SMART IoT für Bauwerkslager (CHE) [76]

Mageba bietet die Nachrüstung eigens hergestellter Lager mit dem ROBO-SMART an. Diese messen Verformung/Verschiebung, Verdrehung, Schichtstärke, Lagerkraft und Temperatur. Übermittelt werden die Daten über die LoRa-Technologie. Mageba bietet das ganze Paket als Dienstleistung an.

6.1.3 Monitoring von Fahrbahnübergängen

Anzufinden in Anhang D Tabelle 43 auf Seite 119.

Wegaufnehmer

Wegaufnehmer dienen zur Überwachung der Längs- und Querverschiebung sowie der vertikalen Verschiebung der FÜK. Gemessen werden der FÜK-Spalt und die Höhendifferenzen. Wegaufnehmer können nur in eine Achse Längenänderungen aufnehmen. So müssen für mehrere Raumrichtungen auch mehrere Sensoren eingesetzt werden. Auch hier eignen sich Potentiometer besonders gut aufgrund ihrer hohen Messbereiche. Je auch Messbereich sind auch LVDTs geeignet. DMS-Wegaufnehmer sind hier eher ungeeignet.

Entfernungsmessgerät (optisch)

Optische Entfernungsmessgeräte können die Längsverschiebung des Tragwerkes zur oder von der Herdwand überwachen. Dieser Weg ist ident zum Lagerweg.

Inklinometer

Neigungsmessungen bieten sich am Übergang selbst an. Dies ermöglicht die Überwachung einer möglichen Verzerrung der Übergangshälften zueinander. Die Inklinometer können auch am Endquerträger angebracht werden, auf welcher die FÜK befestigt ist. Die erfasste Verdrehung am Endquerträger ist geometrisch normal zur Verdrehung an der FÜK selbst.

Beschleunigungssensor

Der Beschleunigungssensor misst indirekt das Ermüdungsverhalten der FÜK. Über die Veränderung der Eigenfrequenz kann auf Mikroschädigung geschlossen werden. Weiteres kann es diverse plötzlich auftretende Zustandsänderungen erkennen (z.B.: Reißen eines Befestigungsbolzens).

GNSS-Sensoren

GNSS-Sensoren können auf der Brückenoberfläche im Bereich des Randbalkens montiert werden, wo sie Verschiebewege aufzeichnen können. Da GNSS-Systeme, vor allem mit Pseudoliten, auch im Millimeterbereich messen können, kann somit auch der Längsverschiebeweg aufgezeichnet werden.

Sonstige Sensoren

Maurer FÜK Monitoring (EU)[74]

Ähnlich wie bei dem intelligenten Kalottenlager bietet Maurer auch zu ihren selbst hergestellten Fahrbahnübergängen Versionen mit integriertem Monitoring an. In [75] wird eine Schwenktraversendehnfuge mit integrierten Sensoren eingesetzt. Diese überwacht Achslasten, Geschwindigkeiten der überquerenden Fahrzeuge, Achsabstände, Fahrzeuggewicht und Fahrzeugtyp. Weiters überwachen die Sensoren den Zustand der FÜK selbst. Die zeitliche Auflösung ist bei diesem Fall kleiner als eine Millisekunde. Dieses System eignet sich optimal für ein Monitoring von Einwirkungen.

Mageba ROBO Smart für Fahrbahnübergänge (CHE)[76]

Das Bauwerküberwachungssystem von Mageba lässt sich bei jedem von ihnen hergestellten Fahrbahnübergang ausgerüstet werden. Es beinhaltet die Überwachung von unter anderem Bewegung, Vibrationen und Rotationen. Angeboten wird ein Alarmplansystem bei Überschreitung von vorher definierten Grenzwerten. Die Genauigkeit beträgt laut Broschüre bis zu 0,01 mm laut und

Abtastraten sind zwischen 1 Wert pro Stunde und 100 Hz möglich. Für die Vibrationsmessung ist die Obergrenze bei 25 kHz Abtastrate mittels Beschleunigungssensor.

6.1.4 Monitoring von Ankern und externen Spanngliedern

Anzufinden in Anhang D Tabelle 44 auf Seite 120.

Dehnmessstreifen (DMS)

Dehnmessstreifen können mit sehr hoher Genauigkeit Dehnungen am Spannstahl wahrnehmen. Diese müssen am Spannglied direkt befestigt werden. Hierzu verlangt es, dass das zu messende Spannglied zugänglich ist, um den Messstreifen anbringen zu können.

Faseroptische Sensoren

FOS können am Spannglied befestigt die Dehnungen genau ermitteln. Da man davon ausgeht, dass die Dehnung an einem Spannglied unter Normalkraft überall gleich ist, können punktweise Sensoren verwendet werden. Sollte die Bauart es zulassen, können mit faseroptischen Sensoren auch mehrere Anker und Spannglieder mittels quasi-verteilten Systemen simultan überwacht werden.

Kraftaufnehmer

Kraftmessdosens, welche direkt am Spannglied angebracht werden, können direkte Messungen der wirkenden Kraft vornehmen.

Druckaufnehmer in Form von elektronischen Ankerlastplatten

Ankerlastplatten sind Lastplatten, welche im Anker fertig verbaut werden. Sie liegen zwischen der Unterlagsplatte und der Lastverteilerplatte. Diese ist mit einer hydraulischen Flüssigkeit gefüllt, wessen Druck direkt proportional zur Ankerlast steht. Mittels Manometer (direktes Ablesen) oder elektronischem Druckaufnehmer (automatische Datenerfassung) kann die Ankerlast abgelesen werden [77].

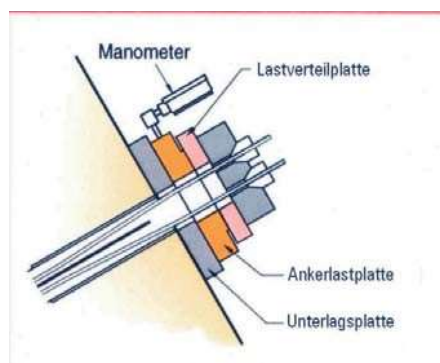


Abbildung 40 Schematische Darstellung einer Ankerlastplatte von geodata.com

6.2 Globales Monitoring von Deformationen

6.2.1 Monitoring von Verformungen und Verschiebungen

Anzufinden in Anhang D Tabelle 43 auf Seite 119.

Wegaufnehmer

Wegaufnehmer in Form von induktive Wegaufnehmern (LVDT), Potentiometer und Wegaufnehmer mit DMS eignen sich für eine Aufnahme der Verzerrung, Verschiebung und Verformung. Weiteres

verlangen Wegaufnehmer einen unverschieblichen Referenzpunkt. Somit liegt die Eignung eher in der Messung von relativer Verschiebung. Verformung in Form von Biegung kann man mit hochauflösenden Wegaufnehmern mit einer Dehnungsmessung der Unterseite umsetzen. Hierbei misst man aber lediglich einer Dehnänderung. So bedarf es einer Aufnahme der Biegelinie im Vorhinein.

Schlauchwaage

Die Schlauchwaage kann nur Veränderungen der Höhe aufnehmen. Sie eignen sich beispielsweise für eine Messung der Durchbiegung im Verhältnis zum Widerlager. Bei höheren erwarteten Höhenunterschieden ist eine Druckschlauchwaage zu wählen.

Entfernungsmesser (optisch)

Laserdistanzsensoren sind eine Alternative zur Totalstation. Sie werden auf einen fixen Referenzpunkt platziert und können mit einer absoluten Genauigkeit von etwa 1 mm auf Distanzen von mehr als 100 m die Verformung eines Einzelpunktes in einer Achse überwachen. Jedoch sind diese fehleranfällig in Bezug auf Sonneneinstrahlung, Niederschlag und Nebel.

Tachymeter/Totalstation

Bei einem Tachymeter sind alle möglichen Arten von Verformung und Verschiebung aufnehmbar. Auch hier sind die Umwelteinflüsse maßgebend für die Qualität der Messungen. Das Stationieren einer Totalstation wird auch als kostenintensiv beschrieben. Vorkehrungen zum Schutz gegen Diebstahl, Vandalismus und Witterung sind zu treffen.

GNSS-Sensor

Verformungen im Millimeterbereich können mit GNSS-Sensoren in Kombination mit Pseudoliten erfasst werden. Hierzu ist ein Beispiel in solch einer Anwendung in [32] angegeben.

6.2.2 Monitoring von Dehnungen

Anzufinden in Anhang D Tabelle 46 auf Seite 122.

Dehnmessstreifen

DMS eignen sich nur für die punktuelle Aufnahme der Dehnung. Ein Vorteil bei Messung mit diesen ist die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten. DMS können individuell je nach Aufgabenstellung angepasst werden. Jedoch haben DMS und deren Anschlusskabel eine hohe Anfälligkeit auf Beschädigung durch äußere Einflüsse. Insbesondere von Wasser und Feuchtigkeit müssen diese geschützt werden. Über die hohe Genauigkeit und Abtastrate der DMS können auch dynamische Einwirkungen erfasst werden.

Faseroptische Sensoren

Je nach Ausführungs- und Messprinzip der FOS können Dehnungen über gesamte Bauwerkslänge aufgenommen werden. Besonders über das OFDR-Verfahren lassen sich kleinste Dehnänderungen auf eine Ortsauflösung von 1-10 mm erfassen. Darüber hinaus sind faseroptische Sensoren gut gegen äußere Einflüsse resistent.

Schwingsaitensensoren in Form von Beschleunigungs- oder Schwinggeschwindigkeitssensoren

Über Schwingsaitensensoren lassen sich ebenfalls Dehnungen ermitteln. Sie profitieren von ihrer Robustheit. Eine Einbindung in den Frischbeton bei Bauteilerrichtung ist möglich, ohne dabei die Verbundwirkung des Betons zu beeinträchtigen. Auch nachträglich ist die Befestigung mittels Kleben

oder Schweißen möglich. Jedoch ist es ihnen nicht möglich, schnellveränderliche Prozesse aufzunehmen, die über 1 Hz hinausgehen. Dehnungsänderungen werden mit der Veränderung der Eigenschwingfrequenz des Sensors ermittelt [17].

Wegaufnehmer

Dehnänderungen zwischen zwei Referenzpunkten können über Wegaufnehmer aufgenommen werden. Hierbei eignen sich vor allem Wegaufnehmer mit kontaktloser Messaufnahme wie induktive Wegaufnehmer [17].

6.2.3 Monitoring von Schiefstellungen

Anzufinden in Anhang D Tabelle 47 auf Seite 123.

Inklinometer

Inklinometer eignen sich am besten für direkte Neigungsmessungen. Die Anforderung an die Genauigkeit und Auflösung hängt vom Messbereich des zu messenden Bauteils ab. Im Falle eines Pfeilers definiert sich dieser über die Pfeilerhöhe. Hierbei eignen sich von allen vorgestellten Neigungssensoren lediglich Servo-Neigungssensoren für die Aufnahme von dynamisch veränderlichen Schiefstellungen.

Totalstation

Fest stationierte Totalstationen können über zwei definierte Punkte die Neigung zueinander bestimmen. Im Falle eines Pfeilers wäre die Auslenkung des Pfeilerkopfes im Verhältnis zum Pfeilerfuß der Rückschluss auf die Schiefstellung.

6.2.4 Monitoring von Verdrehungen

Anzufinden in Anhang D Tabelle 48 auf Seite 124.

Inklinometer

Die Verdrehung kann über die Neigung an zu betrachtenden Punkt ermittelt werden. Es ist hierbei wichtig, dass bei Relativmessungen nur die Neigungsänderung ermittelt wird. Absolutmessungen sind hierbei von Nöten, um über die Verdrehung auf eine Biegelinie schließen zu können.

Wegaufnehmer

Bei einer sehr hohen Genauigkeit kann mittels Wegaufnehmer auf Verzerrung geschlossen werden und somit auf Verdrehung. Verdrehungsänderungen können mittels Wegaufnehmer auch gemessen werden, vorausgesetzt, dass ein ruhender Bezugspunkt vorhanden ist, von dem die Messung ausgeht (z.B. Widerlager).

6.2.5 Monitoring von Setzungen

Anzufinden in Anhang D Tabelle 49 auf Seite 125.

Schlauchwaage/Nivellier

Schlauchwaagen an Pfeiler oder Widerlager befestigt, können Setzungen erfassen. Wichtig hierbei ist, dass ein ruhender Bezugspunkt in der Nähe vorhanden ist.

Nivelliergeräte übertragen einen Bezugspunkt horizontal zum nächsten. Mit einem Digitalnivellier kann anhand der Messlatte und einer automatisierten Aufnahme eine Setzung gemessen werden. Hier ist wie bei einer Totalstation auf äußere Einflüsse wie auch Vandalismus zu achten.

Totalstation

Bei einem Tachymeter sind alle möglichen Arten von Verformung und Verschiebung aufnehmbar. Auch hier sind die Umwelteinflüsse maßgebend auf die Qualität der Messungen. Das Stationieren einer Totalstation wird auch als kostenintensiv beschrieben. Vorkehrungen zum Schutz gegen Diebstahl, Vandalismus und Witterung sind zu treffen.

Wegaufnehmer

Wegaufnehmer sind geeignet, direkte Messungen im Fundamentbereich durchzuführen. Auch hierbei benötigt es einen sich in Ruhe befindenden Referenzpunkt.

GNSS-Sensor

Mittels GNSS lassen sich Wegänderungen wahrnehmen. Üblicherweise ist die Genauigkeit in vertikaler Richtung geringer als in horizontaler. Zusätzlich ist bei Messungen im Bereich des Unterbaues das Sichtfeld in Richtung Himmel eingeschränkt, was zu Reflexionen und somit zu Messabweichungen führen kann. Ein Monitoring mittels GNSS für das Erkennen von Messungen bietet sich somit nur mit dem Einsatz von Pseudoliten an. Die Genauigkeiten liegen hier im Millimeterbereich.

Entfernungsmessgerät (optisch)

Mit Laserdistanzsensoren oder ähnlichen optischen Entfernungsmessern lassen sich Setzungen über ihren zurückgelegten Weg erfassen. Hierbei ist die Einsatzart ähnlich der der Totalstation. Für gewöhnlich bieten sich optische Entfernungsmesser als günstigere Variante der Setzungsmessung im Vergleich zu den Theodoliten an.

6.3 Globales Schwingungsbasierendes Monitoring

6.3.1 Seilkraftmonitoring

Schwinggeschwindigkeitssensor

Über die Schwinggeschwindigkeit lassen sich die Eigenfrequenzen ermitteln. Die Wahl der Messstelle ist hier zu beachten. Ausgewertet wird das Ausschlagverhalten, die Dämpfung und die Eigenfrequenz. Über diese lässt sich die Seilkraft ermitteln. Für die Ermittlung der Dämpfung wird eine Auslenkung erzwungen und ausklingen gelassen.

Beschleunigungssensor

Die Vorgehensweise ist ident zur Schwinggeschwindigkeit mit dem Unterschied, dass Beschleunigungen gemessen werden. Der Messpunkt ist nahe der Verankerung des Seiles zu wählen [1].

6.3.2 Schwingungsmonitoring

Beschleunigungssensor

Mit dem Beschleunigungssensor werden wirkende Beschleunigungen auf das Bauwerk gemessen. Mit diesen kann die Eigenfrequenz ermittelt werden, als auch einzelne Belastungen sowie Belastungsänderungen. Unterschieden wird in Messungen an Einzelpunkten (SPOT-Messungen) oder über ein Sensorraster.

Schwinggeschwindigkeitssensor

Die Schwingung des Bauteiles wird direkt gemessen. Aus dieser ist die Schwingenergie, der Erhalt dieser und die Eigenfrequenz ermittelbar. Das Anwendungsspektrum ist ident zum Beschleunigungssensor.

Faseroptische Sensoren

Faser-Bragg-Gitter oder Interferometer können für die faseroptische Beschleunigungsmessung verwendet werden. Über diese lässt sich wiederum die Eigenfrequenz ermitteln. Zudem lassen die Dehnungsänderungen Rückschlüsse über das Schwingungsverhalten liefern.

6.3.3 Ermüdungsmonitoring

Dehnmessstreifen

DMS eignen sich für ein ausgezeichnet Ermüdungsmonitoring. Dehnungszyklen werden an ausgewählten ermüdungsgefährdeten Punkten ermittelt und in Spannungszyklen umgerechnet. So lässt sich Spannungsspiel und Lastwechselzahl genau ermitteln.

Faseroptische Sensoren

Hier eignen sich vor allem Faser-Bragg-Gitter und Interferometer. Mit diesen lassen sich auch Dehnungszyklen ermitteln, welche Rückschluss auf das Spannungsspiel geben. Ein großer Vorteil ist die Möglichkeit auf Langstreckenüberwachung und auch die Anwendung von verteilter Sensorik.

6.4 Weigh in Motion

Kraftaufnehmer

Kraftmessdosen werden direkt in die Verkehrslinie eingebracht. Durch das Messen der Achslasten und der Achsabstände können Verkehrscharakteristika und Belastung ermittelt werden.

Dehnmessstreifen

Dehnmessstreifen können bei ausreichender Genauigkeit die Brücke zur Waage umfunktionieren (BWIM). Hierbei kann über bekannte Probelastung das Dehnverhalten am Überbau ermittelt werden. Von diesen bekannten Messwerten lassen sich bei weiterer Dehnung Verkehrslasten ableiten [18].

7 Sensorsysteme

Im folgenden Kapitel werden Sensorsysteme und deren Komponenten vorgestellt und kurz behandelt. Grundsätzlich kann in zwei verschiedene Arten von Sensornetzen unterschieden werden:

- Drahtgebundene Sensornetze
- Drahtlose Sensornetze

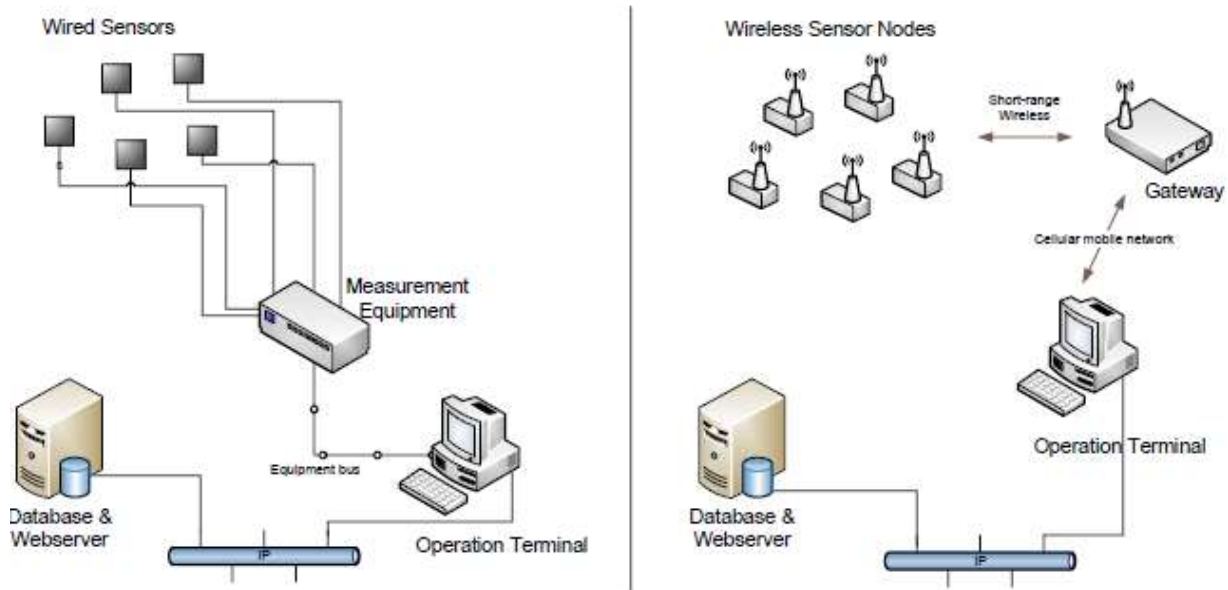


Abbildung 41 Komponenten von drahtgebundenen und drahtlosen Sensornetzen[70]

Beide Arten bringen unterschiedliche Vor- und Nachteile mit sich:

Drahtgebundene Systeme	Drahtlose Systeme
<ul style="list-style-type: none"> - Kabelverlegung oft kompliziert und teuer - Signalstöranfälligkeit bei großen Kabellängen + Lange Lebensdauer bei Netzbetrieb 	<ul style="list-style-type: none"> + Einfache Installation + Eigene Stromquelle + Digitale Datenübertragung (geringe Störanfälligkeit der eigentlichen Sensordaten) + Niedrigere Kosten pro Messstelle + Einfache Austauschbarkeit
<ul style="list-style-type: none"> - Höhere Kosten pro Messstelle 	

Der größte Vorteil der drahtlosen Systeme gegenüber der drahtgebundenen ist die geringe Kabelwirtschaft. Brückenbauwerke mit hoher Spannweite führen bei kabelgebundenen Systemen zu sehr großen Planungs- und Materialaufwand. Die Stromversorgung bei Netzbetrieb stellt sich je nach Lage des Tragwerkes als eine weitere Herausforderung heraus. Konträr dazu muss man bei drahtlosen Systemen auf die Lebensdauer der Batterien oder Akkus achten. Diese sind zeitgemäß zu tauschen. Weiteres hat die Abtastrate und Übertragungsrate des Sensors einen höheren Einfluss auf die Lebensdauer der Batterie. Somit ist man bei hoch dynamischen Messungen mit der Stromversorgung beschränkt. So sind drahtlosen Netzwerken, obwohl sie die Zukunft des Monitorings mit definieren werden, einigen Restriktionen unterlegen.

7.1 Datenübermittlung bei drahtlosen Systemen

7.1.1 Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)

LoRaWAN ist eine moderne drahtlose Kommunikationstechnologie, welche für das Internet der Dinge entwickelt wurde. LoRaWAN definiert das Standard-Kommunikationsprotokoll und die Systemarchitektur für das Netzwerk, während „LoRa“ die physikalische Schicht beschreibt, welche die „long range“ Kommunikationsverbindung ermöglicht [78].

LoRa ist eine Form einer sogenannten LPWAN-Funktechnologie (Low Power Wide Area Network).

Die Funkreichweite der Signalübertragung kann bis zu mehr als 10 Kilometern betragen und Geschwindigkeiten der Datenrate zwischen 0,3 kbit/s und 27 kbit/s erreichen. Da LoRa-Netzwerke als Funktechnologie gelten, dessen Netzwerkmodule von langlebiger Batterielaufzeit abhängig sind, ist die Datenmenge, die übertragen werden kann, vergleichsweise gering. Gleichzeitig können batteriebetriebene LoRa-Module mitunter jahrelang im Einsatz sein und kontinuierlich Datenpakete senden. In Europa werden die Radiofrequenzen von 433,05 – 434,79 MHz und 863 – 870 MHz genutzt [79].

Wichtig zu erwähnen ist in der Auseinandersetzung mit LoRa natürlich auch die zugehörige LoRa-Allianz. Diese gemeinnützige Organisation hat es sich zum Ziel gesetzt, die Verbreitung und Nutzung von LoRaWAN-Technologien gezielt zu fördern. Namenhafte Mitglieder sind unter anderem Semtech, IBM, Cisco, KPN und Swisscom [79].

LoRaWAN ist somit eine passende Anwendung für drahtloses Monitoring und ist auch im Projekt der Laxenburger Brücke in Anwendung.

Zu beachten ist, dass über die Einigung der LoRa-Allianz, eine Einigung über die Rate der Datenübertragung einzuhalten ist, um das Netz nicht zu überlasten. Somit ist die Anwendung nur bei statischem Monitoring möglich, da hochfrequente Messungen nicht über dieses Netz übermittelt werden können.

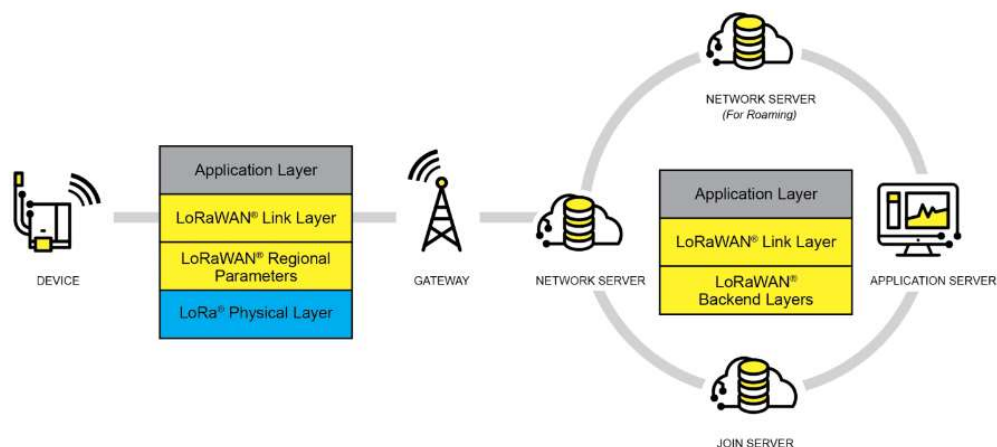


Abbildung 42 LoRaWAN Netzwerk Architektur [80]

7.1.2 Narrowband Internet of Things (NB-IoT)

Es handelt sich dabei um einen drahtlosen Kommunikationsstandard, der speziell für das Internet der Dinge (IoT) entwickelt wurde. Im Gegensatz zu herkömmlichen Mobilfunkstandards bietet NB-IoT eine schmalbandige Kommunikation, die auf niedrigen Datenraten und energiesparendem Betrieb

ausgelegt ist. Im Bereich des Monitorings ist dieser somit in gewissen Bereichen anwendbar. Eine Checkliste für diese Anwendbarkeit ist vom Mobilfunkanbieter *Magenta* bereitgestellt [81]:

- Niedrige Datenraten
- Keine häufige Datenübertragung
- Hohe Anzahl an Geräten
- Latenz ist unkritisch
- Kein Aufwecken von außen erforderlich
- Niedriger Energieverbrauch/lange Batterielaufzeit
- Tiefe Gebäudedurchdringung
- Kostenkritischer Anwendungsfall

Es handelt sich bei NarrowBand IoT um eine LPWAN-Technologie (Low Power Wide Area). Eine weitere Bezeichnung für NB-IoT ist LTECat-NB1 [82].

7.1.3 Long Term Evolution Machine Type Communication (LTE-M)

LTE-M ist eine Weiterentwicklung von NB-IoT. Es verbindet die Vorteile von diesem und einem herkömmlichen LTE-Netz. So verfügt LTE-M über eine höhere Datenrate von bis zu 1 Mbit/s und kann damit eine Vielzahl von Daten in kürzerer Zeit als NB-IoT übermitteln [83]. Die Bandbreite erschließt sich über einen 1,08 MHz breiten Träger (6 Kanäle mit je 180 kHz Breite).

7.2 Analyse der Sensordaten

Die Datenanalyse oder Datenauswertung beschreibt den Prozess der Gewinnung wertvoller Informationen aus Rohdaten. Im Fall jedes Monitorings ist die Aufbereitung und Analyse der gewonnenen Daten ein unbedingter Bestandteil.

Ein robustes Brückenmonitoring erfordert neben der Erhebung verschiedener Erfassungsdaten eine Analyse, Reduktion und Weiterleitung der daraus abgeleiteten Informationen. Im Vergleich zu anderen Messeinrichtung unterliegen die Sensoren und die daraus ermittelten Werte starken umweltbedingten und auch mechanischen Beanspruchungen. Die rauen Bedingungen im Freien führen dazu, dass die relevante Information in den Messsignalen durch Störsignale verschiedenster Art überlagert wird. Störungen wie beispielsweise Brummen, Rauschen, Messaussetzer, Sensordefekte oder mangelnde EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit) schränken die Funktionsweise und Lebensdauer der Sensoren stark ein. Für die zuverlässige Überwachung von Bauwerken ist es somit notwendig, neben dem eigentlichen Bauwerk auch das gesamte Sensorsystem mittels eines „Intelligenten Sensordatenüberwachungs- und Analysesystems“ (kurz: Sensor-Überwachungssystem) durchgängig zu überprüfen. [84]

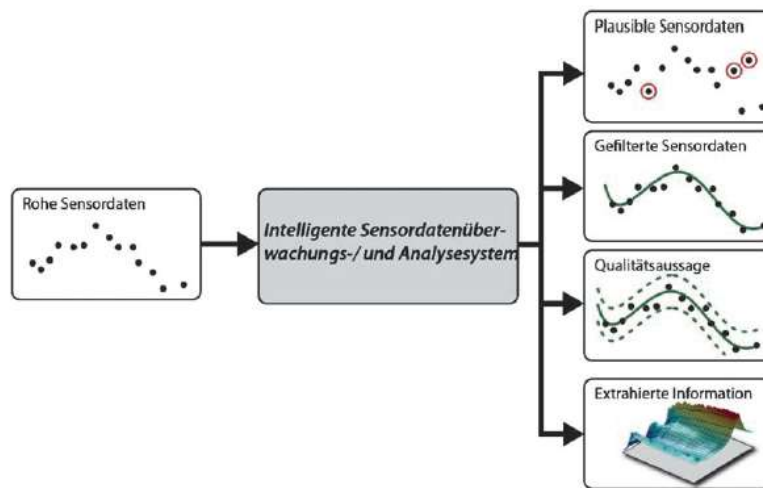


Abbildung 43 Konzeptbild aus Bast Heft B 114 [84]

- **Plausibilisierung von Sensordaten:** Aufgrund der genannten umweltbedingten Einflüsse ist eine Plausibilisierung gleich zu Beginn der Messkette von Vorteil. Somit kann man das Auftreten offensichtlich fehlerhafter Messwerte (z.B.: Messausreißer) früh genug erkennen und somit Missinterpretationen entgegensteuern.
- **Fusion von Sensordaten:** Sensordatenfusion bedeutet das informative Zusammenführen von Daten verschiedener Sensoren. Zwischen vielen Messwerten am Bauwerk besteht eine große Abhängigkeit wie zum Beispiel Dehnung und Temperatur. Für eine bautechnisch relevante Aussage sind beide Messgrößen im Zusammenhang zu betrachten und somit zu fusionieren. Weiters ist die Unterdrückung von potenziellen Störeinflüssen (beispielsweise Rauschen) notwendig. Somit kommt man zu einer Ermittlung bauwerksbezogener Zustandsparameter.
- **Interpolation der Sensordaten:** Für die meisten Anwendungen des Brückenmonitoring stehen keine Sensorsysteme zur Verfügung, welche räumlich verteilte Prozesse wie die Temperaturverteilung oder den gesamten Tragwerks-Krümmungsverlauf erfassen können. Meist begnügt man sich mit diskreten Zeit- und Ortspunkten. Diese Messwerte müssen mittels zeitlicher und örtlicher Interpolation in Beziehung gesetzt werden, um falsche Vorhersagen wegen zeitdiskreten Messintervallen und örtlicher Ungenauigkeiten zu Verhindern.
- **Ableitung höherwertiger Informationen:** Höherwertige Monitoringinformationen können aus der Sensordatenauswertung bereitgestellt werden. Diese können neben den plausibilisierten Mess- und Prüfdaten zu weiteren Erkenntnissen aus dem Brückenmodell liefern. Mit diesen sind Änderungen sowie auch Verhalten und Verläufe einzelner Parameter quantifizierbar.

8 Zusammenfassung

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ist Brückenmonitoring ein sehr umfangreiches Thema. Die Vielfalt der Tragwerke macht eine globale Einschätzung möglicher Messbereiche schwierig. Der Ansatz, normative Beschränkungen von Verformungen und Spannungen als Richtwert für Verhaltensweise von Brücken zu wählen, wurde in dieser Arbeit gewählt und ausgearbeitet. Die daraus resultierenden Werte sind eine grobe Einschätzung möglicher Messbereiche. Hierbei ist zu beachten, dass diese bei realen Monitoringaufgaben stark abweichen können. So ist eine genaue Betrachtung der zu überprüfenden Brücke unumgänglich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für ein dynamisches Monitoring infolge Verkehrs oft die Annahme getroffen, dass überschlagsmäßig 60% der wirkenden Kräfte bei Stahlbetonbrücken aus dem Eigengewicht resultieren. Hierbei handelt es sich um einen Erfahrungswert. Dieser Anteil wurde für diverse Verformungen oft übernommen. Hierzu ist anzumerken, dass dies ein Erfahrungswert aus der Bemessung ist und vom realen Anteil stark abweichen kann. Jedoch hilft es, mögliche Messbereiche hiermit einzuschränken und einen vorstellbaren Rahmen an Zahlenwerten zu liefern.

Die Sensorarten aus [1] sind in ihren Eigenschaften beschrieben worden. Erkenntnis ist, dass viele davon sich gegenseitig einschließen. Beispielsweise ist ein Dehnmessstreifen als Sensorart angegeben, wird jedoch genauso in Druckaufnehmer, Kraftaufnehmer und Wegaufnehmer verbaut. Kommerzielle Produkte sind für jede angegebene Sensorart in hoher Vielfalt und für verschiedene Einsatzbereiche erwerbbar. Angaben zum Einsatz in rauer Umgebung, wie ein Brückenmonitoring sie aufweist, werden jedoch oft nicht wirklich zur Verfügung gestellt. Weiters weicht die Genauigkeit oft von der tatsächlichen ab, da bei der Kalibrierung diese Umstände nicht berücksichtigt werden. So ist zu hinterfragen, ob kommerzielle Produkte tatsächlich Anwendung finden können. Wenn man sich jedoch nur an die Datenblätter haltet, sollte für jede Aufgabe ein Sensor erhältlich sein.

Die Gegenüberstellung der Sensorarten zu den Monitoringaufgaben hat ähnliche Ergebnisse, wie sie in [1] angegeben sind. Hierzu wurden kurze Erklärungen für ihren Einsatz angegeben. Welche Sensorarten tatsächlich in Einsatz kommen können, hängt wieder vom jeweiligen Tragwerk und dem gewünschten Sensorsystem ab.

Zusammenfassend hat diese Arbeit den Zweck, den Inhalt aus [1] zu erweitern, da die gelieferten Informationen dort eher bescheiden ausfallen. Vor allem fehlt es an Kennwerten zu den jeweiligen Anwendungen. Weiters sind Sensortypen nicht ausführlich genug für ihren Einsatz beschrieben, besonders da sie der Witterung ausgesetzt sind. [17] ist hierbei ein positives Beispiel, welches bei Monitoringaufgaben eine breite Übersicht bietet.

9 Ausblick

Structural Health Monitoring ist ein Thema, welches sich im Moment zu einem wichtigen Bestandteil des Bauwesens entwickelt. In Zukunft wird es nicht mehr wegzudenken sein. Diese Arbeit befasst sich nur mit einem kleinen Bruchteil dieser Thematik. Die Überwachung von chemischen Einflüssen wurde hier mit einem Exkurs erwähnt, ist für Stahlbetonbauwerke für die Gewährleistung der Lebensdauer ein maßgebender Aspekt. Weiters ist der Aufbau der Sensorsysteme und die Art der Datenübertragung (angeschnitten in Kapitel 7) ein ebenso wichtiger Faktor zur erfolgreichen Durchführung eines Monitorings.

Weiters stellt sich eine maßgebende Frage: Was macht man mit den aufgenommenen Daten wirklich? Eine Ableitung von höherwertigen Informationen der aufgenommenen Messdaten ist maßgebend. Das reine Messen macht ein Monitoring nicht sinnvoll, ausgenommen es geht

ausschließlich um die Informationsbeschaffung. Für eine Ableitung dieser höherwertigen Daten bedarf es einer fachkundigen Beurteilung. Die Integration in probabilistische Modelle des Tragwerks oder die Nachrechnung mit konservativen deterministischen Ansätzen entscheidet oft erst den generierten Mehrwert.

Monitoring ist ein fachübergreifendes Thema. Es verlangt Kenntnisse im Bauingenieurwesen, der Elektrotechnik, der Messtechnik, der Datenverarbeitung und je nach Anforderung auch weiterer Fachgebiete. Dies stellt sich oft als kompliziert, aber auch als teuer heraus, da sowohl Sensorik als auch die Fachbetreuung der Systeme kostspielig sein können. Der Mehrwert kann jedoch sowohl in der Tragwerkssicherheit als auch in der Kosteneinsparung bezüglich Tragwerkserhaltung sehr hoch sein.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, „RVS 13-03-01 Monitoring von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken“, Wien, Nov. 2022.
- [2] „International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (ISHMII)“. Zugriffen: 24. Jänner 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://ishmii.org/shm-glossary/>
- [3] D. Schlicke, „Vorlesung Betonbrücken TU-Graz“, 2023.
- [4] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 1992-2:2012 Eurocode 2 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton-und Spannbetontragwerken*. 2012.
- [5] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 1992-1-1:2018 Eurocode 2 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton-und Spannbetontragwerken*. 2015.
- [6] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM B 1992-2:2014 Eurocode 2 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton-und Spannbetontragwerken Teil 2: Betonbrücken-Bemessungs- und Konstruktionsregeln*. 2014.
- [7] M. Fuchs, „Beschränkung der Durchbiegung von Straßenbrücken im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit unter besonderer Berücksichtigung der Biegeschlankheit von Stahlbetonbrücken aus Normalbeton“, in *Massivbau in ganzer Breite: Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof.Dr.-Ing. Konrad Zilch*, R. Niedermeier, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, S. 95–100. doi: 10.1007/3-540-26827-8_13.
- [8] H. Unterweger, „Vorlesung zu Brückenbau Grundlagen TU Graz“, 2014.
- [9] Gerhard. Mehlhorn und Francesco. Aigner, *Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten*. Springer, 2007.
- [10] W. Lienhart und S. Miah, „Messtechnik für Bauingenieure: Unterlagen zur Vorlesung“, Graz, 2022. Zugriffen: 27. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tugraz.at/institute/igms/home>
- [11] M. Krüger und H. Pongratz, „Installation Monitoring Laxenburger Brücke“, 2023.
- [12] M. Schnellenbach-Held, M. Peeters, G. Miedzinski, Bundesanstalt für Straßenwesen, und Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für Neue Wissenschaft, *Heft B 110Intelligente Brücke - Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton*. 2015.
- [13] F. Binder, J. Ableitinger, K. Decker, und S. Dallinger, *In-situ Dehnungsmessungen von Schrauben an einem Fahrbahnübergang zur Ermittlung der Vorspann- und Betriebskräfte*. 2017.
- [14] D. Schlicke, „Vorlesung Spannbetonbau TU-Graz“, 2023.
- [15] B. Novák u. a., *Erfahrungssammlung Monitoring für Brückenbauwerke – Dokumentation 2021*. in Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe B: Brücken- und Ingenieurbau - 197. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/2901>

- [16] D. Schlicke u. a., „ConDef - Ganzheitliche Betrachtung des Verformungsverhaltens von Freivorbaubridgen aus Spannbeton Ergebnisbericht“, 2021. Zugriffen: 19. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://projekte.ffg.at/projekt/2738389>
- [17] *Merklblatt B 09 DGZfP-Fachausschuss für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen Unterausschuss Dauerüberwachung von Bauwerken*. 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.dgzfp.de
- [18] M. Petschacher, „PEC Petschacher Consulting ZT-GmbH und PSP Petschacher Software und Projektentwicklung“. Zugriffen: 1. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: www.petschacher.at
- [19] „Bauwerksgründungen Brücken im Verkehrsbau TGL 11463/02 Gruppe 710 DK 624.151“, Deutsche Demokratische Republik, 1967. Zugriffen: 27. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://katalog.ub.uni-weimar.de/tgl/TGL_11463-01_09-1964.pdf
- [20] C. Gläser, W. Brand, E. Kuhn, und T. MacK, „Prüfung, Überwachung und Wartung von Litzenbündelseilen: Am Beispiel der Elbebrücke Schönebeck“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 109, Nr. 7, S. 463–472, 2014, doi: 10.1002/best.201400012.
- [21] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 1990-A1:2013 Eurocode 0 - Grundlagen der Tragwerksplanung Änderung 1: Anwendung bei Brücken (konsolidierte Fassung)*. 2013.
- [22] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 1991-2:2012 Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*. 1991.
- [23] W. Lienhart, „Vorlesung Vermessungswesen Foliensatz“, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.igms.tugraz.at>
- [24] W. Lienhart, „PreMainSHM Arbeitstreffen - Präsentation von IGMS“, Graz, Dez. 2023.
- [25] Österreichisches Normungsinstitut, *ÖVE/ÖNORM EN 60529 - Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)*. 2014.
- [26] Huisinga Hauke, Mohrmann Michael, und Hofmann L, „FE 15.0547 / 2011 / LRB Intelligente Bauwerke - Konzepte und Verfügbarmachung intelligenter Energieversorgung am Bauwerk die energieautarke Brücke“, 2014.
- [27] „GTM Testing and Metrology GmbH Kraftmessdosen“. Zugriffen: 3. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gtm-gmbh.com/produkte/kraftaufnehmer?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAw6yuBhDrARIsACf94RXTKM6c53iK5uVYSLvnV-j6NvPHNCBzhZvjlfVulyrMMx0jHBAhNL4aAvDVEALw_wcB
- [28] „ME-Messsysteme“. Zugriffen: 9. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.me-systeme.de/de/technik-zuerst/dehnungsmessstreifen/dms-brueckenschaltung>
- [29] Glabsch Jessica, „Konzeption und Realisierung kosteneffizienter GNSS Monitoring-Systeme für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen“, Juni 2017. Zugriffen: 27. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://athene-forschung.unibw.de/doc/123564/123564.pdf>
- [30] U. Retze, „Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau: Beispielhafte Untersuchung zum Einsatz von Monitoringmethoden an einer Brücke“, München, 2011.

- [31] K. Protopsalti u. a., „Session 1-Surveying in Construction Accuracy of Simple GPS Kinematic Techniques: Evidence from Experiments, and Implications for the Study of Large Flexible Engineering Structures Accuracy of Simple GPS Kinematic Techniques: Evidence from Experiments, and Implications for the Study of Large Flexible Engineering Structures“, 2004. Zugriffen: 27. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fig.net/nottingham/proc/ts_01_3_protopsalti_etal.pdf
- [32] J. Barnes u. a., „THE MONITORING OF BRIDGE MOVEMENTS USING GPS AND PSEUDOLITES“, 2003. Zugriffen: 27. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/251439031_The_monitoring_of_bridge_movements_using_GPS_and_pseudolites
- [33] A. Paul und E. Gartung, „Empfehlung Nr. 15: Verschiebungsmessungen längs der Bohrlochachse – Extensometermessungen“, Nr. ISBN: 3433033501, Weinheim, Germany: Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2022, S. 219. doi: 10.1002/9783433610909.ch16.
- [34] „Datenblatt Stangenextensometer von Geodata“. Zugriffen: 29. Jänner 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.geodata.com/wp-content/uploads/2023/12/Stangenextensometer_20231213-1.pdf
- [35] „Datenblatt Wire-Deformeters Extensometers & Jointmeters von SISGEO“. Zugriffen: 20. Jänner 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://sisgeo.com/wp-content/uploads/Prodotti/Crackmeters%20and%20Joint%20meters/Wire%20Deformeters/EN/datasheet/D300F_EN_03_wire_deformeters.pdf
- [36] „LEICA TPS1200 Serie Technische Daten“. Zugriffen: 20. Jänner 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.grad-gon.info/download/manuals/TPS_1200/de/TPS%201200_Technische%20Daten.pdf
- [37] „Leica TS16 Datenblatt“, Jän. 2024. Zugriffen: 20. Jänner 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://leica-geosystems.com/de-at/products/gnss-systems/systems/leica-smartstation>
- [38] „Position Control - Schlauchwaagensysteme“. Zugriffen: 20. Jänner 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.position-control.de/produkte/schlauchwaage-liquid-levelling-system/#:~:text=Mit%20der%20Schlauchwaage%20lässt%20sich,wichtigen%20Bestandteil%20des%20Monitorings%20dar.>
- [39] „Geo-Instruments: Druckschlauchwaage“. Zugriffen: 20. Jänner 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.geo-instruments.de/leistungsspektrum/messtechniken/druckschlauchwaage>
- [40] „Kühn Geoconsulting GmbH: Elektronische Schlauchwaage“. Zugriffen: 20. Jänner 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://geoconsulting.de/elektronische-schlauchwaage/>
- [41] „Murbruecke G46 Monitoring Bericht 34“, Zugriffen: 2. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://imsafe.wikixl.nl/index.php/Murbrücke_Feldkirchen_\(case_study\)](https://imsafe.wikixl.nl/index.php/Murbrücke_Feldkirchen_(case_study))
- [42] „Leica LS Digitalnivelliere Datenblatt“. Zugriffen: 9. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://leica-geosystems.com/de-at/products/levels/digital-levels/leica-ls15-and-ls10>
- [43] „Druckaufnehmer und Drucksensor definiert“. Zugriffen: 24. Jänner 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hbm.com/de/7646/was-ist-ein-druckaufnehmer/>

- [44] „Acal BFi Germany GmbH“. Zugegriffen: 12. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.acalbfi.com/de/technologien/sensoren/drucksensor-und-kraftsensoren#:~:text=Der%20große%20Unterschied%20besteht%20darin,eine%20größere%20OFläche%20ausgeübt%20wird.>
- [45] „HBK Hottinger Brüel & Kjær“. Zugegriffen: 3. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hbm.com/de/0249/kraftsensoren-kraftaufnehmer-und-kraftmessdosen/?product_type_no=Kraftsensoren,%20Kraftaufnehmer%20und%20Kraftmessdosen
- [46] „iNet Sensor PK-25 Datenblatt“. Zugegriffen: 4. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.inet-sensor.shop/wp-content/uploads/2019/11/PK-25_Produktdokumentation.pdf
- [47] „Althen Sensors & Controls“. Zugegriffen: 10. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.althensensors.com/de/sensoren/dehnungsmessstreifen-und-zubehoer/>
- [48] „Kistler Gruppe Kraftmessdose“. Zugegriffen: 2. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kistler.com/DE/de/kraftmessdose/C00000122>
- [49] A. Wülfing, „Kraftaufnehmer mit robustem Verhalten gegenüber Querkräften und Biegemomenten“, *Elektrotechnik und Informationstechnik*, Bd. 118, Nr. ISSN: 0932-383X, S. 182, 2001, doi: 10.1007/BF03159526.
- [50] „Kraftaufnehmer Wikipedia“. Zugegriffen: 9. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kraftaufnehmer>
- [51] S. Gächter und M. Tschirky, „Berührungslose Distanzmessung - ein Technologieüberblick“, 1996.
- [52] „Prospekt DIMTEX Laser Distance Sensors“. Zugegriffen: 20. Jänner 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://laser-view.com/wp-content/uploads/2019/09/Dimetix-Prospekt_EN_klein_V3.pdf
- [53] „Structural Health Monitoring of Building Near Excavation Site from Laser-View Technologies“. Zugegriffen: 31. Jänner 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://laser-view.com/wp-content/uploads/2021/01/Dimetix-Structural-Health-Excavation.pdf>
- [54] „Structural Health Monitoring of Bridge Movement from Laser-View Technologies“. Zugegriffen: 20. Jänner 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://laser-view.com/wp-content/uploads/2020/12/Dimetix-Structural-Health-Bridge-Movement.pdf>
- [55] „WayCon Induktive Sensoren, Linearpotentiometer und kapazitive Wegaufnehmer“. Zugegriffen: 20. Jänner 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.waycon.de/produkte/induktive-sensoren-lvdt/>
- [56] M. Schnellenbach-Held, B. Karczewski, O. Kühn, und Bundesanstalt für Straßenwesen, *Intelligente Brücke - Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke*.
- [57] H. Hinnen, M. Gassner, M. Jaray, und ernst Müller, „Kompendium - Die Geheimnisse der Neigungsmesstechnik WYLER AG, Neigungsmesssysteme“, Wintherthur, Schweiz, 2013.
- [58] A. E. Aktan, F. N. Catbas, K. A. Grimmelsman, und M. Pervizpour, „Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges“, 2003.

- [59] „Geokon 6350 Tiltmeter (VW)“. Zugegriffen: 5. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.geokon.com/6350>
- [60] „INSTRUCTION MANUAL UNIAXIAL TILTMETER Model TUFF TILT 801“, 2002. Zugegriffen: 15. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: www.telemac.com
- [61] „Jewel Instruments LCF-100 Datasheet“, Zugegriffen: 18. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://jewelinstruments.com/wp-content/uploads/LCF-100.pdf>
- [62] S. Keil, *Dehnungsmessstreifen 2. Auflage*.
- [63] „Dehnungsmessstreifen Wikipedia“. Zugegriffen: 24. Jänner 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Dehnungsmessstreifen#Maximale_Frequenz
- [64] H. Döring, W. Habel, W. Lienhart, und W. Schwarz, „Faseroptische Messverfahren“, in *Handbuch der Geodäsie: 6 Bände*, W. Freeden und R. Rummel, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 1–48. doi: 10.1007/978-3-662-46900-2_22-1.
- [65] D. Tosi, „Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors“, *Sensors*, Bd. 17, Nr. 10, S. 2368, Okt. 2017, doi: 10.3390/s17102368.
- [66] „Beschleunigungssensor Wikipedia“. Zugegriffen: 24. Jänner 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Beschleunigungssensor>
- [67] „Ziegler Consultants AG: Erschütterungsmessung im Bauwesen Theorie und Praxis“. Zugegriffen: 13. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://zcag.ch/wp-content/uploads/2019/01/zc_5_es-messung.pdf
- [68] M. Schnellenbach-Held, B. Karczewski, O. Kühn, und Bundesanstalt für Straßenwesen, *Intelligente Brücke - Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke*. 2014.
- [69] „Sensortec GmbH“. Zugegriffen: 17. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.sensortec.de/sensoren-sensors/multiring-elektrode-multiring-electrode.html>
- [70] M. Krüger, „Vorlesung Bauwerksdiagnostik, Bauschadensanalyse, Monitoring“, 2022.
- [71] M. Winkler, W. Lienhart, Kwapisz Maciej, Vorwagner Alois, und Prammer Dominik, „Rissmonitoring und Bewertungsmodell von unbewehrten Tunnelinnenschalen RIBET Deliverable D 3 Riss-Monitoring“, 2017.
- [72] „Scanntronik Mugrauer GmbH“. Zugegriffen: 2. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.scanntronik.de/Produkt_Rissfox_Mini_deu.php
- [73] „Hebag Lagermonitoring“. Zugegriffen: 2. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hebag-ag.ch/produkte/monitoring/>
- [74] „MAURER Monitoringsysteme“, Zugegriffen: 3. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.maurer.eu/produkte/monitoring/#:~:text=MAURER%20Monitoring%20Systeme%20sind%20maßgeschneiderte,MAURER%20Monitoring%20Systemen%20ausgestattet%20werden.>
- [75] Dr.-I. D. Rill, C. Butz, und M. Tahedi, „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn - Digitale Bauwerkskomponenten: Instrumentierte Lager und Fahrbahnübergänge“, 2021.

- [76] „Mageba - ROBO-SMART“. Zugriffen: 3. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mageba-group.com/cz/de/1026/Hochbau/Bauwerkslager/ROBO-SMART-IoT-Bauwerkslager/Detail.htm>
- [77] „Ankerlastplatten Funktionsprinzip“. Zugriffen: 24. Jänner 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.geodata.com/produkte/ankerlastplatten/>
- [78] A. Gauselmann, S. Grau, M. Kuhaupt, und M. Salzmann, „LoRa Park Zeitz - Der Schaugarten für sensorbasierte Anwendungen im Schlosspark Moritzburg“. Zugriffen: 27. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lorapark-zeitz.de/wp-content/uploads/2022/04/DZZ_Fallstudie_LoRaPark_01.04.2022-1.pdf
- [79] „LoRa-Wan“. Zugriffen: 27. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lora-wan.de/lora/>
- [80] „LoRa-Alliance“. Zugriffen: 27. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://loralliance.org/about-lorawan/>
- [81] „Magenta - Narrowband - IoT“. Zugriffen: 27. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.magenta.at/business/iot/netz/nb-narrowband>
- [82] „Was ist NarrowBand IoT?“, Zugriffen: 10. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ip-insider.de/was-ist-narrowband-iot-a-681057/>
- [83] „NB-IoT vs. LTE-M“, Zugriffen: 10. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://1nce.com/de-de/ressourcen/news/blog/nbiot-vs-ltem>
- [84] F. Swapo, Klumpp Vesa, und Beutler Frederik, „Intelligente Bauwerke-Anforderungen an die Aufbereitung von Messgrößen und ihrer Darstellungsform Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen“, Bergisch Gladbach, Juni 2015. [Online]. Verfügbar unter: <http://bast.opus.hbz-nrw.de>

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schema zum Aufbau der Arbeit	6
Abbildung 2 Beton Spannungs-Dehnungs-Linie für Schnittgrößenermittlung mit nicht-linearen Verfahren und für die Verformungsberechnung [5]	12
Abbildung 3 Spannungs-Dehnungs-Diagramm für typischen Betonstahl [5].....	13
Abbildung 4 Beschränkung der Verformung für den Reisekomfort bei Eisenbahnbrücken [8].....	15
Abbildung 5 Grundfrequenz von Straßenbrücken im Bezug auf die größte Spannweite [9].....	16
Abbildung 6 Wöhlerlinie für Betonstahl und Spannstahl [3]	17
Abbildung 7 Ausschnitt aus der Nachrechnung der Laxenburger Brücke.....	19
Abbildung 8 Grafische Darstellung der Rissbreiten bei unterschiedlichen Stahlspannungen der Laxenburger Brücke.....	20
Abbildung 9 Überblick Lagerarten [8]	22
Abbildung 10 Längsverschiebewege infolge der jahreszeitlichen Temperaturänderung [8]	23
Abbildung 11 Längsverschiebewege aus ungleichmäßiger Temperatureinwirkung [8]	23
Abbildung 12 Längsverschiebewege aus Kriechen und Schwinden [8].....	24
Abbildung 13 Beziehung der Parabel zu Neigung am Eckpunkt.....	25
Abbildung 14 Beispiel häufig eingesetzter Spannstähle in Europa [14].....	29
Abbildung 15 Arbeitslinie des Spannstahls St1570/1770 [14]	30

Abbildung 16 Langjährige Verformung der Tü Schottwien [3]	33
Abbildung 17 Durchbiegungen in Abhängigkeit von möglichen Spannweiten und ihren L/X Verhältnissen	34
Abbildung 18 Dehnungsebenen im Stahlbetonbau	36
Abbildung 19 Richtwerte zur funktionell bedingten Begrenzung der Gradientenabweichung[19]	40
Abbildung 20 Setzung in Abhängigkeit der Bezugslänge	41
Abbildung 21 Konzept der Schädigungshypothese [3].....	45
Abbildung 22 Anzahl erwarteter Lastkraftwagen je Jahr für einen LKW-Fahrstreifen [21]	46
Abbildung 23 Gruppe von "häufigen" Lastkraftwagen lt. EC1 [22]	48
Abbildung 24 Klassen für Sonderfahrzeuge lt. EC2 [22]	49
Abbildung 25 Darstellung von Präzision, Genauigkeit und Auflösung [23]	53
Abbildung 26 Auszug aus der Präsentation zu PREMainSHM Meeting am 05.12.2023 [24]	54
Abbildung 27 IP-Schutzklassen ÖVE/ÖNORM EN 60529 [25]	54
Abbildung 28 Messmethoden mit GPS/GNSS [23]	57
Abbildung 29 Schema der Bohrlochextensometer [33]	59
Abbildung 30 Prinzip der Laufzeitmessung für die elektrooptische Distanzmessung [23]	72
Abbildung 31 k-Faktoren gebräuchlicher metallischer Messgitterwerkstoffe [62]	79
Abbildung 32 Brückenschaltung Schema DMS [62]	80
Abbildung 33 Vor- und Nachteile von DMS [10]	81
Abbildung 34 Punktweise, verteilte und kontinuierliche Sensoren [10]	83
Abbildung 35 Beschreibung eines Beschleunigungssensor mittels Masse-Feder-System [26]	85
Abbildung 36 Aufbau einer Multiringelektrode [69]	88
Abbildung 37 Aufbau einer Anodenleiter [69]	88
Abbildung 38 Korrosionsopfersensor Schema [70]	89
Abbildung 39 Expositionsansicht des Kalottenlagers [75]	91
Abbildung 40 Schematische Darstellung einer Ankerlastplatte von geodata.com	93
Abbildung 41 Komponenten von drahtgebundenen und drahtlosen Sensornetzen[70]	98
Abbildung 42 LoRaWAN Netzwerk Architektur [79]	99
Abbildung 43 Konzeptbild aus Bast Heft B 114 [82]	101
Abbildung 44 Zuordnung physikalischer Messgrößen zu gängigen Sensortypen [1]	116

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Begriffe zu den Arten des Bauwerksmonitorings	9
Tabelle 2 Zulässige Betondehnungen in Abhängigkeit der Spannungsbegrenzungen lt. Gebrauchstauglichkeitsanforderungen	13
Tabelle 3 Zulässige Betonstahldehnungen in Abhängigkeit der Spannungsbegrenzungen lt. Gebrauchstauglichkeitsanforderungen	13
Tabelle 4 Werte für maximale Rissbreite lt. ÖNORM B 1992-2-1:2015 [6]	14
Tabelle 5 Beschränkung der Verformung für den Reisekomfort bei Stahlbeton-Straßenbrücken [7]..	15
Tabelle 6 Parameter zur Rissbreitenberechnung des Plattenbalkens der Laxenburger Brücke	19
Tabelle 7 Rissbreiten bei unterschiedlichen Stahlspannungen an der Laxenburger Brücke	20
Tabelle 8 Anforderungen an das Rissmonitoring	21
Tabelle 9 Werte für die Lagerverdrehung nach Oberbauverformung für Einfeldträger	26
Tabelle 10 Anteile für Lagerverdrehung durch Verkehrslast je nach Einfluss des Eigengewichts	26
Tabelle 11 Anforderungen an das Lagermonitoring	27
Tabelle 12 Anforderungen an das Monitoring von Fahrbahnübergängen	29
Tabelle 13 Anforderungen an das Monitoring von Ankern und externen Spanngliedern	32

Tabelle 14 Anforderung an das Monitoring von Verformung und Verschiebung.....	35
Tabelle 15 Anforderung an das Monitoring von Dehnungen.....	37
Tabelle 16 Anforderungen an das Monitoring von Schiefstellungen.....	38
Tabelle 17 Anforderung an das Monitoring von Verdrehungen	39
Tabelle 18 Anforderungen an das Monitoring von Setzungen	41
Tabelle 19 Anforderungen an das Seilkraftmonitoring	43
Tabelle 20 Anforderungen an das Schwingungsmonitoring	44
Tabelle 21 Anforderung an das Ermüdungsmonitoring	46
Tabelle 22 Anforderungen an WIM-Systeme	50
Tabelle 23 Eigenschaften von GNSS-Sensoren	58
Tabelle 24 Erzielbare Genauigkeit von Bohrlochextensometern [33]	59
Tabelle 25 Stangenextensometer von Geodata	60
Tabelle 26 Drahtextensometer von Sisgeo	61
Tabelle 27 Eigenschaften von Totalstationen	63
Tabelle 28 Technische Eigenschaften der Druckschlauchwaage von Position Control.....	65
Tabelle 29 Eigenschaften der Leica Digitalnivelliere	66
Tabelle 30 DMS-Kraftsensor von Kistler	69
Tabelle 31 Piezoelektrischer Kraftsensor von Kistler	70
Tabelle 32 Laserdistanzsensor von Dimetix	73
Tabelle 33 Linearpotentiometer von WayCon	74
Tabelle 34 LVDTs von WayCon	75
Tabelle 35 Kapazitive Wegaufnehmer von WayCon	75
Tabelle 36 Schwingensaitenneigungssensor von Geokon.....	77
Tabelle 37 Elektronischer Neigungsmesser von Uniaxial Tiltmeter	78
Tabelle 38 Servo-Neigungssensor von Jewel.....	78
Tabelle 39 Eigenschaften von Dehnmessstreifen	81
Tabelle 40 Spannungs- und Formänderungseigenschaften für Beton nach EN1992-1-1 [5]	112
Tabelle 41 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Rissmonitoring.....	117
Tabelle 42 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Lagermonitoring.....	118
Tabelle 43 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Fahrbahnübergängen	119
Tabelle 44 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Ankern und externen Spanngliedern.....	120
Tabelle 45 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Verschiebungen und Verformungen	121
Tabelle 46 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Dehnungen	122
Tabelle 47 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Schiefstellungen	123
Tabelle 48 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Verdrehungen	124
Tabelle 49 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Setzungen.....	125
Tabelle 50 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Schwingungsbasierten Monitoring	126
Tabelle 51 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Weigh in Motion.....	127

Anhang A

Tabelle 40 Spannungs- und Formänderungseigenschaften für Beton nach EN1992-1-1 [5]

Betonfestigkeitsklassen															Analytische Beziehung
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0,05} = 0,7 \times f_{ctm}$ 5%-Quantil
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0,95} = 1,3 \times f_{ctm}$ 95%-Quantil
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22 [(f_{cm})/10]^{0,3}$ (f_{cm} in MPa)
ε_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	Siehe Bild 3.2 $\varepsilon_{c1}^0 / \rho = 0,7 f_{cm}^{0,31}$ $\geq 2,8$ (ACI)
ε_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	Siehe Bild 3.2 für $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{cu1}^0 / \rho = 2,8 + 27 [(98 - f_{cm})/100]^4$
ε_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	Siehe Bild 3.3 für $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{c2}^0 / \rho = 2,0 + 0,085 (f_{ck} - 50)^{0,53}$
ε_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	Siehe Bild 3.3 für $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{cu2}^0 / \rho = 2,6 + 35 [(90 - f_{ck})/100]^4$
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	für $f_{ck} \geq 50$ MPa $n = 1,4 + 23,4 [(90 - f_{ck})/100]^4$
ε_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	Siehe Bild 3.4 für $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{c3}^0 / \rho = 1,75 + 0,55 [(f_{ck} - 50)/40]$
ε_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	Siehe Bild 3.4 für $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{cu3}^0 / \rho = 2,6 + 35 [(90 - f_{ck})/100]^4$

Anhang B

	Einflussgröße	Messgröße	Messbereich	Messfrequenz	Empfohlene Messgenauigkeit
Rissmonitoring					
Verformung:	Temperatur	Weg [mm]	±1 mm	statisch (Jahresgang)	≤0,05m m
	Verkehrslast	Weg [mm]	±1 mm	dynamisch (>100 Hz)	≤0,05m m
Lagermonitoring					
Verschiebung:	Temperatur	Weg [mm]	± 0,9 mm/ m Einflusslängen	statisch (Jahresgang)	≤0,1mm
Verdrehung:	Verkehrslast	Verdrehung [mrad/°]	± bis 3,9 mrad	dynamisch	≤0,175 mrad
Kraft:	Verkehrslast	Kraft [kN] Spannung [N/mm²]	Lager- abhängig	dynamisch	≤1 kN
Monitoring von Fahrbahnübergängen					
Verschiebung:	Temperatur	Weg [mm]	± 0,9 mm/ m Einflusslängen	statisch (Jahresgang)	≤0,1 mm
Verdrehung:	Verkehrslast	Verdrehung [mrad/°]	± 3,9 mrad	dynamisch	≤0,175 mrad
Ermüdung:	Verkehrslast	Beschleunigung [m/s²] Dehnung [‰ oder µm/m]	Abhängig von Art und Dimension der FÜK	dynamisch	k.A.
Monitoring von Ankern und Spanngliedern					
Spannkraft	Last	Dehnung [‰ oder µm/m]	0 ‰ bis 6,4 ‰ bei Absolut- messung ± 2,56 ‰ bei Relativ- messung	statisch oder dynamisch	≤0,001 ‰
					≤1µm/ m
	Last	Kraft [kN] Spannung [N/mm²]	0 ‰ bis 6,4 ‰ bei Absolut- messung ± 2,56 ‰ bei Relativ- messung	Dynamisch oder hochdynamisch	≤0,2 N/mm²
Bruchdetektion	Last	Körperschall [kHz]	-	Hoch- dynamisch	-

Monitoring von Verformungen/Verschiebungen					
Verformung/ -	Langzeit- verformung	Weg [mm]]	Siehe Abbildung 19 [cm]	statisch oder dynamisch	<<1 mm
	Verkehrslast	Weg [mm]	Siehe Abbildung 19 [cm]	Dynamisch oder hochdynamis ch	<<1 mm
Monitoring von Dehnungen					
Dehnung Beton Zug	Spannung	Dehnung [‰,µm/m]	0 ‰ bis < 0,1 ‰	statisch oder dynamisch	≤0,001 ‰
					≤1µm/ m
Dehnung Beton Druck	Spannung	Dehnung [‰,µm/m]	Siehe Tabelle 1 (ca 0 ‰ bis 1,2 ‰)	Statisch oder dynamisch	≤0,001 ‰
					≤1µm/ m
Dehnung Betonstahl	Spannung	Dehnung [‰,µm/m]	Siehe Tabelle 2 (ca 0 ‰ bis 2,5 ‰)	Statisch oder dynamisch	≤0,001 ‰
					≤1µm/ m
Monitoring von Schiefstellungen					
Schiefstellung:	Temperatur / Langzeit- verhalten	Verdrehung [mrad/°]	<±10°	statisch	≤0,01°
	Verkehrslast	Verdrehung [mrad/°]	<±1°	Dynamisch oder hoch- dynamisch	≤0,001°
Monitoring von Verdrehungen					
Verdrehung:	Temperatur	Verdrehung [mrad/°]	≤ ±3,9 mrad	statisch	≤0,175 mrad
	Verkehrslast	Verdrehung [mrad/°]		dynamisch oder hoch- dynamisch	≤0,175 mrad
Monitoring von Setzungen					
Setzungen:	Langzeitsetzung	Weg [mm]	0 mm bis 200 mm	statisch	≤1 mm
	Plötzliche Events	Weg [mm]		Eventbasiert dynamisch oder hoch- dynamisch	≤1 mm
Seilkraftmonitoring					
Seilkraft:	Verkehrslast	Beschleunigung [m/s²]	0 m/s² bis 50 m/s²	dynamisch oder hoch- dynamisch	≤0,1 m/s²

Schwingungsmonitoring und Ermittlung von Eigenfrequenzen					
Eigenfrequenz:	Materialermüdung	Beschleunigung [m/s²]	0 m/s² bis 50 m/s²	dynamisch oder hochdynamisch	≤0,1 m/s²
	/-schädigung	Frequenz [Hz]	~1 Hz bis ~10 Hz		
Ermüdungsmonitoring über Dehnungen					
Ermüdung Beton Zug	Spannung	Dehnung [‰,µm/m]	0 ‰ bis < 0,1 ‰	dynamisch oder hochdynamisch	≤0,001 ‰
					≤1µm/m
Ermüdung Beton Druck	Spannung	Dehnung [‰,µm/m]	Siehe Tabelle 1	dynamisch oder hochdynamisch	≤0,001 ‰
			(ca 0 ‰ bis 1,2 ‰)		≤1µm/m
Ermüdung Betonstahl	Spannung	Dehnung [‰,µm/m]	Siehe Tabelle 2	dynamisch oder hochdynamisch	≤0,001 ‰
			(ca 0 ‰ bis 2,5 ‰)		≤1µm/m
Weigh in Motion					
<u>WIM - Systeme</u>					
Verkehr	Verkehrslast	Kraft [kN]	0 kN bis 240 kN Achslast	dynamisch oder hochdynamisch	≤ 1 kN
			Siehe Abbildung 25 und Abbildung 26		
<u>BWIM Systeme</u>					
Dehnung Beton Zug	Verkehrslast	Dehnung [‰,µm/m]	0 ‰ bis < 0,1 ‰	dynamisch oder hochdynamisch	≤0,001 ‰
					≤1µm/m
Dehnung Betonstahl	Verkehrslast	Dehnung [‰,µm/m]	Siehe Tabelle 2	dynamisch oder hochdynamisch	≤0,001 ‰
			(ca 0 ‰ bis 2,5 ‰)		≤1µm/m

Anhang C

Physikalische Messgröße	Sensortyp													
	niederfrequente (statische) Sensorabtastung							hochfrequente (dynamische) Sensorabtastung						
	Temperatur	GNSS Sensor	Extensometer	Tachymeter (Totalstation)	Schlauchwaage / Nivelliergerät	Druckaufnehmer	Kraftaufnehmer	Entfernungsmessgerät (optisch)	Wegaufnehmer	Inklinometer	Dehnungsmessstreifen	Faser-optischer Sensor	Beschleunigungssensor	Schwinggeschwindigkeitssensor
Verformung/Verschiebung (vertikal) [mm]		x	xx	xx	xx	-	-	xx	xx		xx lokal	xx	-	-
Verformung/Verschiebung (horizontal) [mm]		xx	xx	xx		-	-	xx	xx		xx lokal	xx	-	-
Schiefstellung/Verdrehung [°]		x	x	xx	x	-	-	x	x	xx	-	-	x Sensor-abhängig	x Sensor-abhängig
Setzung [mm]		x	xx	xx	xx	x	x	x	x	x	-	x	-	-
Dehnung [%]		-	-	-	-	-	-	-	x	-	xx	xx	-	-
Kraft [N]		-	-	-	-	x	xx	-	-	-	xx	xx	x Seilkräfte	x Seilkräfte
Druck [N/m²]		-	-	-	-	xx	x	-	-	-	-	-	-	-
Beschleunigung [m/s²]		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	xx	x
Schwinggeschwindigkeit [m/s]		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	xx
Eigenfrequenz [Hz]		-	-	-	-	-	-	x	x	-	x	x	xx	xx
Dämpfung [%]		-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-	xx	xx

Legende:
 xx - Sensor sehr gut geeignet
 x - Sensor bedingt geeignet
 - Sensor nicht geeignet

Abbildung 44 Zuordnung physikalischer Messgrößen zu gängigen Sensortypen [1]

Anhang D

Tabelle 41 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Rissmonitoring

		Rissmonitoring		
		aus Temperatur	aus Verkehrslast	Risserkennung
GNSS-Sensor		-	-	-
Extensometer	Drahtextensometer	-	-	-
	Stangenextensometer	-	-	-
Tachymeter/Totalstation		-	-	-
Schlauchwaage		-	-	-
Nivelliergerät		-	-	-
Druckaufnehmer	DMS-Druckaufnehmer	-	-	-
	Kapazitiver Druckaufnehmer	-	-	-
	Piezoelektrischer Druckaufnehmer	-	-	-
	Optischer Druckaufnehmer	-	-	-
Kraftaufnehmer	DMS-Kraftaufnehmer	-	-	-
	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	-	-	-
Entfernungsmesser (optisch)		-	-	-
Wegaufnehmer	Potentiometer	+	+	-
	Induktiver Wegaufnehmer	+	+	-
	Kapazitiver Wegaufnehmer	+	+	-
	optischer Wegaufnehmer	+	+	-
	DMS-Wegaufnehmer	+	+	-
Inklinometer/ Neigungssensor	Schwingsaitenneigungssensor	-	-	-
	Elektronischer Neigungsmesser	-	-	-
	Servo-Neigungssensor	-	-	-
Dehnmessstreifen		-	-	-
Faseroptischer Sensor	FBG	+	+	-
	LGFBG	+	+	+
	DFOS	+	+	+
	Interferometer	+	+	-
Beschleunigungssensor	Piezoelektrisch	-	-	-
	Kapazitiv und MEMS	-	-	-
Schwing- geschwindigkeitssensor	elektrodynamisch	-	-	+
	Laser-Doppler-Vibrometer	-	-	-

Tabelle 42 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Lagermonitoring

		Lagermonitoring		
		Verschiebung	Verdrehung	Kraft
GNSS-Sensor		-	-	-
Extensometer	Drahtextensometer	-	-	-
	Stangenextensometer	-	-	-
Tachymeter/Totalstation		-	-	-
Schlauchwaage		-	-	-
Nivelliergerät		-	-	-
Druckaufnehmer	DMS-Druckaufnehmer	-	-	+
	Kapazitiver Druckaufnehmer	-	-	+
	Piezoelektrischer Druckaufnehmer	-	-	+
	Optischer Druckaufnehmer	-	-	+
Kraftaufnehmer	DMS-Kraftaufnehmer	-	-	+
	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	-	-	+
Entfernungsmesser (optisch)		+	-	-
Wegaufnehmer	Potentiometer	+	-	-
	Induktiver Wegaufnehmer	+	-	-
	Kapazitiver Wegaufnehmer	+	-	-
	optischer Wegaufnehmer	+	-	-
	DMS-Wegaufnehmer	-	-	-
Inklinometer/ Neigungssensor	Schwingsaitenneigungssensor	-	+	-
	Elektronischer Neigungsmesser	-	+	-
	Servo-Neigungssensor	-	+	-
Dehnmessstreifen		-	-	+
Faseroptischer Sensor	FBG	-	-	-
	LGFBG	-	-	-
	DFOS	-	-	-
	Interferometer	-	-	-
Beschleunigungssensor	Piezoelektrisch	-	-	-
	Kapazitiv und MEMS	-	-	-
Schwing- geschwindigkeitssensor	elektrodynamisch	-	-	-
	Laser-Doppler-Vibrometer	-	-	-

Tabelle 43 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Fahrbahnübergängen

		Fahrbahnübergänge		
		Verschiebung	Verdrehung	Ermüdung
GNSS-Sensor		+	-	-
Extensometer	Drahtextensometer	-	-	-
	Stangenextensometer	-	-	-
Tachymeter/Totalstation		-	-	-
Schlauchwaage		-	-	-
Nivelliergerät		-	-	-
Druckaufnehmer	DMS-Druckaufnehmer	-	-	-
	Kapazitiver Druckaufnehmer	-	-	-
	Piezoelektrischer Druckaufnehmer	-	-	-
	Optischer Druckaufnehmer	-	-	-
Kraftaufnehmer	DMS-Kraftaufnehmer	-	-	-
	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	-	-	-
Entfernungsmesser (optisch)		+	-	-
Wegaufnehmer	Potentiometer	+	-	-
	Induktiver Wegaufnehmer	+	-	-
	Kapazitiver Wegaufnehmer	+	-	-
	optischer Wegaufnehmer	+	-	-
	DMS-Wegaufnehmer	-	-	-
Inklinometer/ Neigungssensor	Schwingsaitenneigungssensor	-	+	-
	Elektronischer Neigungsmesser	-	+	-
	Servo-Neigungssensor	-	+	-
Dehnmessstreifen		-	-	-
Faseroptischer Sensor	FBG	-	-	-
	LGFBG	-	-	-
	DFOS	-	-	-
	Interferometer	-	-	-
Beschleunigungssensor	Piezoelektrisch	-	-	+
	Kapazitiv und MEMS	-	-	+
Schwing- geschwindigkeitssensor	elektrodynamisch	-	-	+
	Laser-Doppler-Vibrometer	-	-	-

Tabelle 44 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Ankern und externen Spanngliedern

		Anker und externe Spannglieder	
		Spannkraft	Bruchdetektion
GNSS-Sensor		-	-
Extensometer	Drahtextensometer	-	-
	Stangenextensometer	-	-
Tachymeter/Totalstation		-	-
Schlauchwaage		-	-
Nivelliergerät		-	-
Druckaufnehmer	DMS-Druckaufnehmer	-	-
	Kapazitiver Druckaufnehmer	-	-
	Piezoelektrischer Druckaufnehmer	-	-
	Optischer Druckaufnehmer	-	-
Kraftaufnehmer	DMS-Kraftaufnehmer	-	-
	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	-	-
Entfernungsmesser (optisch)		-	-
Wegaufnehmer	Potentiometer	-	-
	Induktiver Wegaufnehmer	-	-
	Kapazitiver Wegaufnehmer	-	-
	optischer Wegaufnehmer	-	-
	DMS-Wegaufnehmer	+	-
Inklinometer/ Neigungssensor	Schwingsaitenneigungssensor	-	-
	Elektronischer Neigungsmesser	-	-
	Servo-Neigungssensor	-	-
Dehnmessstreifen		+	-
Faseroptischer Sensor	FBG	+	-
	LGFBG	+	-
	DFOS	+	-
	Interferometer	+	-
Beschleunigungssensor	Piezoelektrisch	-	-
	Kapazitiv und MEMS	-	-
Schwing- geschwindigkeitssensor	elektrodynamisch	-	+
	Laser-Doppler-Vibrometer	-	+

Tabelle 45 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Verschiebungen und Verformungen

		Verformung/Verschiebung	
		Langzeit- verformung	aus Verkehrslast
GNSS-Sensor		+	-
Extensometer	Drahtextensometer	-	-
	Stangenextensometer	-	-
Tachymeter/Totalstation		+	+
Schlauchwaage		+	+
Nivelliergerät			-
Druckaufnehmer	DMS-Druckaufnehmer	-	-
	Kapazitiver Druckaufnehmer	-	-
	Piezoelektrischer Druckaufnehmer	-	-
	Optischer Druckaufnehmer	-	-
Kraftaufnehmer	DMS-Kraftaufnehmer	-	-
	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	-	-
Entfernungsmesser (optisch)		+	+
Wegaufnehmer	Potentiometer	+	+
	Induktiver Wegaufnehmer	+	+
	Kapazitiver Wegaufnehmer	+	+
	optischer Wegaufnehmer	+	+
	DMS-Wegaufnehmer	+	+
Inklinometer/ Neigungssensor	Schwingsaitenneigungssensor	-	-
	Elektronischer Neigungsmesser	-	-
	Servo-Neigungssensor	-	-
Dehnmessstreifen		-	-
Faseroptischer Sensor	FBG	-	-
	LGFBG	-	-
	DFOS	-	-
	Interferometer	-	-
Beschleunigungssensor	Piezoelektrisch	-	-
	Kapazitiv und MEMS	-	-
Schwing- geschwindigkeitssensor	elektrodynamisch	-	-
	Laser-Doppler-Vibrometer	-	-

Tabelle 46 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Dehnungen

		Dehnung		
		Beton Zug	Beton Druck	Betonstahl
GNSS-Sensor		-	-	-
Extensometer	Drahtextensometer	-	-	-
	Stangenextensometer	-	-	-
Tachymeter/Totalstation		-	-	-
Schlauchwaage		-	-	-
Nivelliergerät		-	-	-
Druckaufnehmer	DMS-Druckaufnehmer	-	-	-
	Kapazitiver Druckaufnehmer	-	-	-
	Piezoelektrischer Druckaufnehmer	-	-	-
	Optischer Druckaufnehmer	-	-	-
Kraftaufnehmer	DMS-Kraftaufnehmer	-	-	-
	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	-	-	-
Entfernungsmesser (optisch)		-	-	-
Wegaufnehmer	Potentiometer	-	-	-
	Induktiver Wegaufnehmer	+	+	+
	Kapazitiver Wegaufnehmer	-	-	-
	optischer Wegaufnehmer	-	-	-
	DMS-Wegaufnehmer	+	+	+
Inklinometer/ Neigungssensor	Schwingsaitenneigungssensor	-	-	-
	Elektronischer Neigungsmesser	-	-	-
	Servo-Neigungssensor	-	-	-
Dehnmessstreifen		+	+	+
Faseroptischer Sensor	FBG	+	+	+
	LGFBG	+	+	+
	DFOS	+	+	+
	Interferometer	+	+	+
Beschleunigungssensor	Piezoelektrisch	-	-	-
	Kapazitiv und MEMS	-	-	-
Schwing- geschwindigkeitssensor	elektrodynamisch	+	+	+
	Laser-Doppler-Vibrometer	-	-	-

Tabelle 47 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Schiefstellungen

		Schiefstellung	
		Langzeit- verhalten	aus Verkehrslast
GNSS-Sensor		-	-
Extensometer	Drahtextensometer	-	-
	Stangenextensometer	-	-
Tachymeter/Totalstation		+	-
Schlauchwaage		-	-
Nivelliergerät		-	-
Druckaufnehmer	DMS-Druckaufnehmer	-	-
	Kapazitiver Druckaufnehmer	-	-
	Piezoelektrischer Druckaufnehmer	-	-
	Optischer Druckaufnehmer	-	-
Kraftaufnehmer	DMS-Kraftaufnehmer	-	-
	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	-	-
Entfernungsmesser (optisch)		-	-
Wegaufnehmer	Potentiometer	-	-
	Induktiver Wegaufnehmer	-	-
	Kapazitiver Wegaufnehmer	-	-
	optischer Wegaufnehmer	-	-
	DMS-Wegaufnehmer	-	-
Inklinometer/ Neigungssensor	Schwingsaitenneigungssensor	+	-
	Elektronischer Neigungsmesser	+	-
	Servo-Neigungssensor	+	+
Dehnmessstreifen		-	-
Faseroptischer Sensor	FBG	-	-
	LGFBG	-	-
	DFOS	-	-
	Interferometer	-	-
Beschleunigungssensor	Piezoelektrisch	-	-
	Kapazitiv und MEMS	-	-
Schwing- geschwindigkeitssensor	elektrodynamisch	-	-
	Laser-Doppler-Vibrometer	-	-

Tabelle 48 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Verdrehungen

		Verdrehung	
		aus Temperatur	aus Verkehrslast
GNSS-Sensor		-	-
Extensometer	Drahtextensometer	-	-
	Stangenextensometer	-	-
Tachymeter/Totalstation		-	-
Schlauchwaage		-	-
Nivelliergerät		-	-
Druckaufnehmer	DMS-Druckaufnehmer	-	-
	Kapazitiver Druckaufnehmer	-	-
	Piezoelektrischer Druckaufnehmer	-	-
	Optischer Druckaufnehmer	-	-
Kraftaufnehmer	DMS-Kraftaufnehmer	-	-
	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	-	-
Entfernungsmesser (optisch)		-	-
Wegaufnehmer	Potentiometer	-	-
	Induktiver Wegaufnehmer	-	-
	Kapazitiver Wegaufnehmer	-	-
	optischer Wegaufnehmer	-	-
	DMS-Wegaufnehmer	-	-
Inklinometer/ Neigungssensor	Schwingsaitenneigungssensor	+	-
	Elektronischer Neigungsmesser	+	-
	Servo-Neigungssensor	+	+
Dehnmessstreifen		-	-
Faseroptischer Sensor	FBG	-	-
	LGFBG	-	-
	DFOS	-	-
	Interferometer	-	-
Beschleunigungssensor	Piezoelektrisch	-	-
	Kapazitiv und MEMS	-	-
Schwing- geschwindigkeitssensor	elektrodynamisch	-	-
	Laser-Doppler-Vibrometer	-	-

Tabelle 49 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Monitoring von Setzungen

		Setzung	
		Langzeit- setzung	Plötzliche Events
GNSS-Sensor		+	+
Extensometer	Drahtextensometer	+	+
	Stangenextensometer	+	+
Tachymeter/Totalstation		+	+
Schlauchwaage		+	+
Nivelliergerät		+	+
Druckaufnehmer	DMS-Druckaufnehmer	-	-
	Kapazitiver Druckaufnehmer	-	-
	Piezoelektrischer Druckaufnehmer	-	-
	Optischer Druckaufnehmer	-	-
Kraftaufnehmer	DMS-Kraftaufnehmer	-	-
	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	-	-
Entfernungsmesser (optisch)		+	+
Wegaufnehmer	Potentiometer	+	+
	Induktiver Wegaufnehmer	+	+
	Kapazitiver Wegaufnehmer	+	+
	optischer Wegaufnehmer	+	+
	DMS-Wegaufnehmer	+	+
Inklinometer/ Neigungssensor	Schwingsaitenneigungssensor	-	-
	Elektronischer Neigungsmesser	-	-
	Servo-Neigungssensor	-	-
Dehnmessstreifen		-	-
Faseroptischer Sensor	FBG	-	-
	LGFBG	-	-
	DFOS	-	-
	Interferometer	-	-
Beschleunigungssensor	Piezoelektrisch	-	-
	Kapazitiv und MEMS	-	-
Schwing- geschwindigkeitssensor	elektrodynamisch	-	-
	Laser-Doppler-Vibrometer	-	-

Tabelle 50 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Schwingungsbasierten Monitoring

		Seilkraft	Schwingung und Eigenfrequenz	Ermüdung
GNSS-Sensor		-	-	-
Extensometer	Drahtextensometer	-	-	-
	Stangenextensometer	-	-	-
Tachymeter/Totalstation		-	-	-
Schlauchwaage		-	-	-
Nivelliergerät		-	-	-
Druckaufnehmer	DMS-Druckaufnehmer	-	-	-
	Kapazitiver Druckaufnehmer	-	-	-
	Piezoelektrischer Druckaufnehmer	-	-	-
	Optischer Druckaufnehmer	-	-	-
Kraftaufnehmer	DMS-Kraftaufnehmer	-	-	-
	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	-	-	-
Entfernungsmesser (optisch)		-	-	-
Wegaufnehmer	Potentiometer	-	-	-
	Induktiver Wegaufnehmer	-	-	-
	Kapazitiver Wegaufnehmer	-	-	-
	optischer Wegaufnehmer	-	-	-
	DMS-Wegaufnehmer	-	-	-
Inklinometer/ Neigungssensor	Schwingsaitenneigungssensor	-	-	-
	Elektronischer Neigungsmesser	-	-	-
	Servo-Neigungssensor	+	+	-
Dehnmessstreifen		+	-	+
Faseroptischer Sensor	FBG	-	-	+
	LGFBG	-	-	+
	DFOS	-	-	+
	Interferometer	+	+	+
Beschleunigungssensor	Piezoelektrisch	+	+	-
	Kapazitiv und MEMS	+	+	-
Schwing- geschwindigkeitssensor	elektrodynamisch	+	+	-
	Laser-Doppler-Vibrometer	+	+	-

Tabelle 51 Bewertung der einsetzbaren Sensoren zum Weigh in Motion

		WIM	BWIM
GNSS-Sensor		-	-
Extensometer	Drahtextensometer	-	-
	Stangenextensometer	-	-
Tachymeter/Totalstation		-	-
Schlauchwaage		-	-
Nivelliergerät		-	-
Druckaufnehmer	DMS-Druckaufnehmer	+	-
	Kapazitiver Druckaufnehmer	+	-
	Piezoelektrischer Druckaufnehmer	+	-
	Optischer Druckaufnehmer	+	-
Kraftaufnehmer	DMS-Kraftaufnehmer	+	-
	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer	+	-
Entfernungsmesser (optisch)		-	-
Wegaufnehmer	Potentiometer	-	-
	Induktiver Wegaufnehmer	-	-
	Kapazitiver Wegaufnehmer	-	-
	optischer Wegaufnehmer	-	-
	DMS-Wegaufnehmer	-	-
Inklinometer/ Neigungssensor	Schwingsaitenneigungssensor	-	-
	Elektronischer Neigungsmesser	-	-
	Servo-Neigungssensor	-	-
Dehnmessstreifen		-	+
Faseroptischer Sensor	FBG	-	+
	LGFBG	-	+
	DFOS	-	+
	Interferometer	-	+
Beschleunigungssensor	Piezoelektrisch	-	-
	Kapazitiv und MEMS	-	-
Schwing-geschwindigkeitssensor	elektrodynamisch	-	-
	Laser-Doppler-Vibrometer	-	-