

Abb. 1.1: Bezugssystem und Messgrößen zum Nachweis von Deformationen

Die Auswertung und Interpretation von Messungsergebnissen ist in zweifacher Hinsicht zu sehen. Aufgabe des Vermessungsingenieurs ist es, zunächst, meist mit geeigneten Tests der mathematischen Statistik, zu prüfen, ob die erhaltenen Messwerte als Deformationsgrößen mit einer vorzugebenden Wahrscheinlichkeit tatsächlich Deformationen darstellen oder ob sie Messunsicherheiten der Sensoren und des Verfahrens (z. B. unbekannte atmosphärische Einflüsse) bzw. Unzulänglichkeiten der Vermarkung zuzuschreiben sind. In Netzen wird dazu eine entsprechende Stütz- und Festpunktanalyse durchgeführt (Heunecke et al. 2013). Hier schließt die Interpretation des für das Bauwerk verantwortlichen Ingenieurs (Bauingenieur, Baugrundspezialist, Tragwerkplaner, Talsperrenmeister und andere Sachverständige), der an einer Klärung der Wechselbeziehung Ursache – Wirkung interessiert ist. Nachdem einleitend die Notwendigkeit von Bauwerksüberwachungsmessungen nachgewiesen wurde, sollen im folgenden Kapitel einige wichtige Merkmale der Deformationen dargestellt werden. Damit soll auch das Verständnis und das Interesse für die ganzheitliche Betrachtung des Bauwerks in Kapitel 2 gefördert werden.

1.2.2 Ursachen von Deformationen

Bei der Planung von Bauwerksüberwachungsmessungen (DIN 18710-4) sind mit dem Messprogramm, der Festlegung von Stütz- und Objektpunkten, der Messtechnik und der Messgenauigkeit folgende Fragen zu klären:

- *Wo*, in welchen Bereichen von Bauwerk und Baugrund müssen Messpunkte angebracht werden?
- *Wie*, mit welcher erforderlichen Genauigkeit und mit welchen Instrumenten und Verfahren können die Deformationen erfasst werden?
- *Wann* sind die Messungen durchzuführen?

Im Grundlagenband werden in Kapitel „Vermarkung von Fest- und Messungspunkten“ die Kräfte und Einflüsse genannt, welche Punktbewegungen bewirken. In Anlehnung an diese Ausführungen kann man drei Ursachen für das Auftreten von Deformationen unterscheiden:

- tektonisch und seismisch bedingte Prozesse,
- Veränderungen im Gründungsbereich eines Bauwerks und der von ihm beeinflussten Umgebung, dazu gehören u. a. statische Druckveränderungen oder hydrologische Vorgänge und
- Vorgänge im Bauwerk, die zu Eigendeformationen führen.

Hiervon lassen sich die das Bauwerk beeinflussenden Kräfte ableiten:

- äußere Kräfte am Bauwerk,
- innere Kräfte am Bauwerk,
- Kräfte im Gründungsbereich des Bauwerks und
- Reaktionskräfte im Baugrund.

Die inneren und äußeren Kräfte verursachen Starrkörperbewegungen (Verschiebung, Setzung oder Hebung, Senkung) oder Verformungen (Biegung, Verzerrung) die im Ergebnis zu

- plastischen oder irreversiblen,
- elastischen oder reversiblen

Deformationen führen. Typische Beispiele für plastische Deformationen sind Bauwerkssetzungen und für elastische Deformationen das Pendeln einer Stauwandkrone und die elliptischen Bewegungen der oberen Bereiche hoher Türme.

Abbildung 1.2 kann folgendermaßen beschrieben werden: Infolge des zunehmenden Eigengewichts einer Stauwand beim Bau und beim ersten Anstau (vertikale Komponente des Wasserdrucks) verläuft die Setzung von Punkt 0 nach 1. Eine Absenkung des Wasserspiegels im Stausee, d. h. eine Verminderung der Gesamtlast, kann eine Hebung der Stauwand bewirken. Die Setzungskurve setzt sich von Punkt 1 nach 2 fort. Die Abschnitte von 0 nach 2 und 2 nach 3 auf der Ordinatenachse entsprechen dem plastischen bzw. elastischen Setzungsanteil.

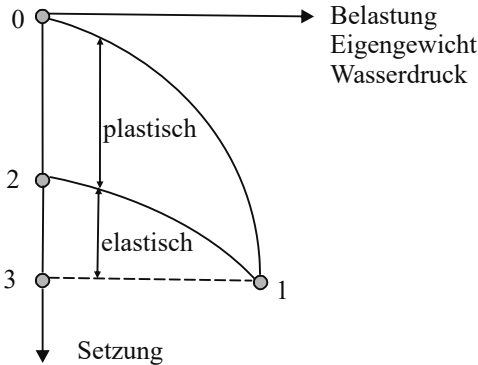


Abb. 1.2: Elastisches und plastisches Setzungsverhalten

1.2.2.1 Äußere Kräfte am Bauwerk

Es werden statische und dynamische Belastungen und Entlastungen bzw. äußere Einwirkungen infolge

- des Eigengewichts des Bauwerks einschließlich der Nutzlasten,
- des Wasserdrucks (horizontal und vertikal), der hauptsächlich vom Oberwasserstand abhängt, und des Sohlenwasserdrucks bei Stauanlagen,
- von Wind vornehmlich bei Turmbauwerken,
- von Verkehrslasten (Lastbeobachtung) im Straßen- und Schienenverkehr (Brücken, Tunnel), die die Tragfähigkeit eines Bauwerks beeinflussen,

hervorgerufen. Bei stark schwankenden äußeren Bedingungen (z. B. Wind, Verkehr) haben aktuelle *Beanspruchungsüberprüfungen* eine hohe Bedeutung, da sich daraus Wartungsintervalle und die Betriebs-Restlebensdauer ableiten lassen.

In Tabelle 1.1 sind die nach dem Wirken äußerer Kräfte zu erwartenden Deformationen zusammengestellt. Die physikalisch definierten Bauwerksbewegungen beziehen sich dabei am Beispiel Stauanlagen auf das Koordinatensystem in Abbildung 1.3.

Kraft	Wirkung auf Bauwerk und seinen Gründungsbereich	Physikalische Definition der Deformationen
Eigengewicht	Gleichmäßige Setzung Ungleichmäßige Setzung (Kippung oder Neigung) Verschiebung in Hanglage	Translation in z-Richtung Rotation α und β Translation in x- und y-Richtung
Wasserdruck (horizontale Komponente)	Verschiebung Kippung	Translation in x- und y-Richtung Rotation β
Wasserdruck (vertikale Komponente)	Kippung infolge Baugrunddeformation	Rotation β

Kraft	Wirkung auf Bauwerk und seinen Gründungsbereich	Physikalische Definition der Deformationen
Sohlenwasserdruck (Auftrieb)	Hebung Kippung	Translation in z-Richtung Rotation um β
Wind (Turmbauwerke)	Vor allem Querschwingungen senkrecht zur Windrichtung, aber auch Schwingungen in Windrichtung	Schwingungen (Transversal- und Longitudinalschwingungen)
Dynamische Verkehrslasten	Gleichmäßige und ungleichmäßige Setzung Verschiebung Kippung Schwingungen	Translation in z-Richtung Translation in y- oder x-Richtung (Hangneigung) Rotation α und β Schwingungen
Temperaturdifferenzen	Räumliche Eigenverformungen	Deformationen in x-, y- und z-Richtung
Reaktionskräfte im Baugrund	Setzung Kippung Verschiebung Eigendeformation	Translation in z-Richtung Rotation um alle 3 Achsen möglich Translation in x- und y-Richtung Deformationen in x-, y- und z-Richtung

Tabelle 1.1: Ursachen und Wirkungen von Kräften an Bauwerk und Baugrund

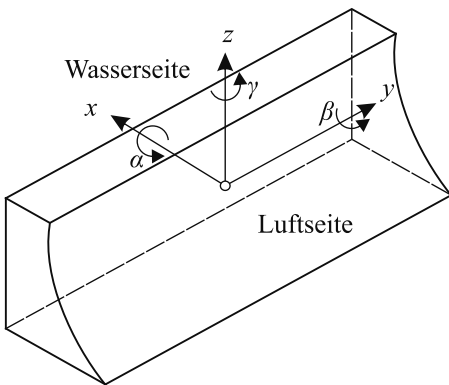


Abb. 1.3: Koordinatensystem und Deformationen an Stauanlagen

Windlasten

Neben dem Gründungsverhalten, durch das Neigungen hervorgerufen werden können, ist der Wind für hohe Türme eine Belastung (Tab. 1.2). Er wird zwar nur im Ausnahmefall die Sicherheit eines solchen Bauwerks ernsthaft gefährden, kann aber durch selbst erregte Schwingungen des Antennenteils eines Funk- und Fernmeldeturms die Sendeleistung beeinträchtigen. Außerdem sind Konstruktionen zu überwachen, die durch Windeinwirkung zu Schwingungen angeregt werden können. Hierzu zählen u. a. hohe Masten, Türme, Schornsteine, Krane und Krananlagen (Kap. 3) und weit gespannte Brücken (Kap. 4).

Bewegung und Verformung	Ursache
Eigenschwingungen	Dynamische Anregung (Wind, Verkehr, Betrieb)
Biegeverhalten im Tagesgang	Statische Belastung (Temperatur, Wind, Eis, Verkehr)
Biegeverhalten im Jahresgang	Temperatur, Grundwasserstand
Schiefstellung	Setzungen, Dauerbelastung, Materialverschleiß

Tabelle 1.2: Bewegung von Türmen (Auszug aus Grabowski et al. 1999)

An einem turmartigen Bauwerk treten nicht nur Schwingungen in Windrichtung, sondern vor allem senkrecht dazu auf. Letztere werden durch die *Karmann*'sche Wirbelbildung verursacht (Abb. 1.4). An runden Querschnitten kann die zyklische Folge von Wirbeln erhebliche Schwingungsamplituden hervorrufen. Befindet sich ein starr eingespannter Kreiszyylinder in einer gleichförmigen Strömung, so lösen sich hinter ihm wechselseitig und nacheinander Wirbel ab. Dabei übt jeder Wirbel quer zur Windrichtung einen Druck auf den Turm (Zylinder) aus, der 7-mal so groß ist wie der in Strömungsrichtung wirkende Druck. Die Querschwingungsamplitude ist etwa 5-mal größer als die Längsschwingungsamplitude. Diese plastisch auftretenden Querkräfte veranlassen den Turm infolge seiner Elastizität zu den Querschwingungen. Von solchen Wirbelbildungen kann man sich selbst überzeugen, wenn man die stromabwärts von einem Brückenpfeiler sich ablösenden Wasserwirbel beobachtet.

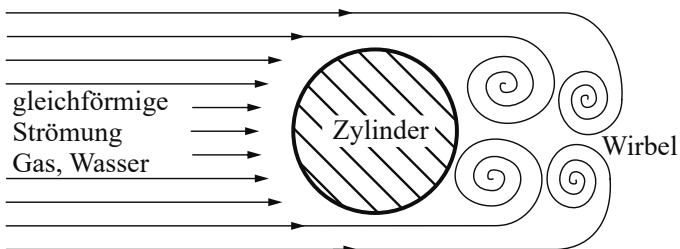


Abb. 1.4: Karmann'sche Wirbelbildung als Querschwingung am Turmbauwerk

Temperatureinfluss

Als Hauptursache für die tageszeitliche Bewegung hoher Bauwerke muss der durch einseitige Erwärmung hervorgerufene Temperaturgradient zwischen sich gegenüberliegenden Turmseiten angesehen werden. Hierdurch erfährt die jeweils der Sonne zugewandte Seite infolge Temperaturanstiegs eine Ausdehnung, welche eine Neigung des Turms zu der der Sonne abgewandten Seite zur Folge hat. Dieser sogenannte Tagesgang wird von Bewegungen durch Wind überlagert.

Turmbewegungen

Für die geodätische Überwachung von Türmen gibt es standardisierte Messprogramme, die aus

- Richtungsmessungen mit Theodolit bzw. Tachymeter,
- Neigungsmessungen mit Libellen (Klinometer) und Lotungsmessungen,
- Schlauchwaage und Präzisionsnivellement

bestehen. In den letzten zehn Jahren wurden diese analogen Messtechniken durch automatisierte, digitale Sensorik ersetzt, sodass heute

- mit automatisierten Totalstationen, GNSS-Messungen und elektronischen Libellen das Schwingungsverhalten des Turmbauwerks nachgewiesen werden und
- automatisierte Schlauchwaagen und Digitalnivelliere zur Feststellung von Setzungen des Fundaments und zur Bestimmung von Verformungen des Baugrunds

eingesetzt werden.

Beispiele für satellitengestützte Verfahren und tachymetrische Messungen in Kombination mit Neigungsmessungen (Rotlevel, Talyvel, Nivel 20) sind der Fernmeldeturm in Hannover (Grabowski et al. 1999) und der Funk- und Fernmeldeturm Dresden (Abb. 1.5). Das Biegeverhalten in Abhängigkeit von Wind und Temperatur und die Korrelation mit Eigenschwingungen können mit einer Modellierung nach der Methode mit finiten Elementen nachgewiesen und prädiziert werden (Heunecke 1999).



Abb. 1.5: Reflektor und GNSS-Antenne zur Turmüberwachung