

Monitoring von Großbauwerken an der Schnittstelle zwischen Geodäsie, Bauingenieurwesen und Maschinenbau am Beispiel des Schiffshebewerkes Lüneburg

Christian Hesse, Ingo Neumann, Janetta Wodniok und Gerd Lippmann

Zusammenfassung

Der vorliegende Fachartikel behandelt das ganzheitliche Monitoring von Großbauwerken am Beispiel des Schiffshebewerkes in Lüneburg, bei dem sowohl klassische geodätische als auch hochpräzise Messverfahren aus dem Maschinenbau zum Einsatz kommen.

So wurden in diesem Fall gleichzeitig die dem Massivbau zuzuordnenden Bauwerksteile mit Hilfe von Extensometern, Inclinometern und Präzisionslotungen bestimmt und gleichzeitig mit speziellen und automatisierten Messsystemen sowie Lasertrackermessungen die Veränderungen in den Antrieben des Hebewerkes untersucht.

Neben der messtechnischen Erfassung spielte die vollständige Modellierung des Deformationsverhaltens von Massivbau und maschinenbautechnischen Bereichen der Anlage eine zentrale Rolle. Hierdurch wurde die Reaktion des Bauwerks auf externe Einflüsse beschrieben und die noch für Verformungen zur Verfügung stehenden tolerierbaren Reserven in den Antrieben des Troges ermittelt.

Summary

This article is about a comprehensive approach on structural monitoring of large buildings using the example of the ship-lift facility (SHW) in Lüneburg. In this project traditional geodetic surveying technologies as well as highly precise techniques known from mechanical engineering have been used. In case of the SHW Lüneburg the solid building part was surveyed by extensometers, inclinometers, precise plumbing and automated measuring systems in parallel. In addition to this, laser trackers have been used to measure changes regarding the drives.

Besides the measurement the comprehensive modelling of the deformation behavior of the solid building and the mechanical parts of the facility was a major scope of the project. The deformations of the whole building were afterwards being described based on this model. Additionally, the remaining tolerances were derived for the drives of the liftable tray.

Schlüsselwörter: Monitoring, Großbauwerk, Deformationsmodell, Schiffshebewerk

1 Das Schiffshebewerk Lüneburg (SHW)

Das Schiffshebewerk (SHW) Lüneburg gehört zu den beiden Abstiegsbauwerken des Elbe-Seitenkanals, der den Mittellandkanal westlich von Wolfsburg mit der Elbe bei



Abb. 1: Schiffshebewerk Lüneburg

Lauenburg verbindet. Das sogenannte Doppelsenkrechthebewerk mit zwei unabhängig voneinander arbeitenden Trögen wurde im Jahr 1974 als damals weltgrößtes Hebewerk mit einer nutzbaren Kammerlänge von 100 m Länge und 12 m Breite gebaut. Es überwindet im Rahmen des etwa dreiminütigen Hebevorganges einen Höhenunterschied von bis zu 38 m (Abb. 1).

Jeder der beiden Tröge besitzt im gefüllten Zustand ein Gewicht von etwa 5.800 t, die über Umlenkrollen in den Turmköpfen mit Gegengewichten im Gleichgewichtszustand gehalten werden. Die Ansprüche an das statische System aus Trog und Gegengewichten sind so fein definiert, dass selbst die unterschiedlichen Seillängen durch trogseitige Gegengewichtsketten lastmäßig ausgeglichen werden.

Durch die geografische Lage und die schwierige Schiffbarkeit der Elbe zwischen Magdeburg und Hamburg hat der Elbe-Seitenkanal seit der Wiedervereinigung erheblich an Bedeutung gewonnen. Mittlerweile werden auf dieser Wasserstraße 9 Mio. Gütertonnen mit zunehmender Tendenz bewegt, die zu einem Schleusungsbedarf von bis zu 90 Schiffseinheiten pro Tag führen. Insbesondere vor dem Hintergrund der zunehmenden Länge von Großmotorschiffen mit 110 m sowie vermehrt eingesetzten Schubverbänden, wurde der Bau einer Schleuse mit einer Nutzlänge zwischen 190 m und 225 m neben dem Standort des Schiffshebewerkes in den vordringlichen Bedarf des Bundesverkehrswegeplans aufgenommen.

Zur Vorbereitung dieser Baumaßnahme wurde im Rahmen des hier beschriebenen Monitoringprojekts das Normalverhalten des Schiffshebewerkes, insbesondere des Westtroges, messtechnisch erfasst. Die Messungen sollen

als Grundlage für die Erstellung eines umfangreichen Deformationsmodells dienen. Auf Grundlage dieses Modells sollen externe, durch den Bau der Schleuse hervorgerufene Deformationen, vom Normalverhalten des Hebewerkes getrennt werden, um Frühindikatoren für Gegenmaßnahmen aufstellen zu können.

Zudem sollten die vorhandenen Verformungsreserven unter verschiedenen äußeren Bedingungen aufbauend

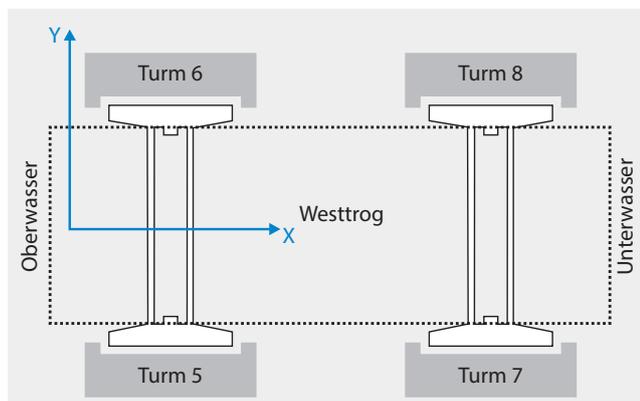


Abb. 2: Turmbauwerke, Trog und Trägerrahmen des westlichen Hebewerkes im Grundriss

auf den erfassten geometrischen Bauwerkszuständen bestimmt, bzw. mit Hilfe des Modells berechnet werden.

Als mögliche Einflussgrößen kommen grundsätzlich sowohl meteorologische als auch lastinduzierte Einflüsse durch den Betrieb des Hebewerkes oder durch den späteren Bau der Schleuse infrage.

Der Trog als beweglicher Teil des Hebewerkes ist statisch betrachtet auf zwei sogenannten Trägerrahmen zwischen den Türmen 5 und 6 sowie 7 und 8 gleitend gelagert (Abb. 2), an denen wiederum die Seile und die damit verbundenen Gegengewichte befestigt sind. Somit wird nicht der Trog selbst, sondern die darunter befindlichen Trägerrahmen während der Berg- und Talfahrt verfahren. Die hierfür notwendigen vier Antriebe in den Türmen sind durch ein Gleichlaufgetriebe miteinander synchronisiert, um Schäden durch ungleichmäßige Geschwindigkeit während der Hubvorgänge zu vermeiden.

Die Antriebe verfügen über vertikale Zahnstangen, die sowohl der Spurführung in X- und Y-Richtung als auch der Kraftübertragung beim Hubvorgang selbst dienen. Die ebenfalls vorhandenen Spindeln mit einem Durchmesser von 408 mm haben die Aufgabe, den Trog im Falle einer Havarie durch Klammerung in seiner Position zu halten. Hierzu besitzen die Antriebe sogenannte Drehriegel, die mit einem zur Spindel passenden Negativgewinde während jedes Hubvorganges synchron mitdrehen.

Ausgehend von diesen Rahmenbedingungen wird ersichtlich, dass für ein durchgreifendes Monitoring sowohl der Massivbau auf der einen Seite als auch der Maschinenbauteil auf der anderen Seite im Rahmen eines Monitorings zwingend betrachtet werden muss.

Während der Massivbau überwiegend aus den vier Hebewerkstürmen des Westtroges sowie dem unterhalb

der Geländeoberfläche befindliche Betontrog besteht und mit Hilfe konventioneller geodätischer Messmittel überwacht werden kann, waren im Hinblick auf den Maschinenbauteil spezielle Messsysteme zur Überwachung von Antrieben samt Drehriegeln, Spindeln, Zahnstangen und den nachgerüsteten Troghaltevorrichtungen zu entwickeln.

Als zentraler Punkt der nachfolgenden Auswertung dieser Messungen war aufgrund der interdependenten Eigenschaften eine modelltechnische Verknüpfung der Übertragungsfunktionen aller Bauwerkselemente vorgesehen (vgl. Abschnitt 4).

Diese durchaus anspruchsvolle und vielschichtige Monitoringaufgabe wurde Ende 2014 europaweit ausgeschrieben. Im Rahmen der Ausschreibung war insbesondere auf die notwendige gesamtheitliche Kompetenz im Bereich der ingenieurgeodätischen Messtechnik, der Vermessung im Maschinen- und Anlagenbau sowie der anschließenden mathematisch statistischen Auswertung hingewiesen worden. Ende 2015 wurde nach Abschluss des Vergabeverfahrens der Auftrag für das vorliegende Monitoringprojekt an das Vermessungsbüro Dr. Hesse und Partner Ingenieure (dhp:i) aus Hamburg sowie das Geodätische Institut der Leibniz Universität Hannover vergeben. Beide Partner können auf eine langjährige Erfahrung in diesen Teilgebieten zurückblicken.

2 Beschreibung der Messaufgabe

2.1 Monitoringaufgabe

Das vorliegende Monitoringprojekt bezog sich wie in Abschnitt 1 erwähnt auf alle Bauwerksteile des westlichen Hebewerkes sowie die beiden angrenzenden Türme des östlichen Hebewerkes, wobei sowohl absolute Größen in Form von Koordinaten als auch relative Beziehungen wie beispielsweise die Abstände zwischen benachbarten Türmen bestimmt werden sollten.

Die Ergebnisse sollten nicht nur einen temporären Zustand des Normalverhaltens dokumentieren, sondern auch als Frühindikator für später auftretende Abweichungen von eben diesem Verhalten dienen. Zu diesem Zweck sollten innerhalb des Projekts auch verschiedene – unter anderem durch Temperatureinfluss induzierte – Bauwerkszustände miteinander verglichen werden.

Zusätzlich zu dem auf externen Einflüssen basierendem Übertragungsverhalten besteht beim Schiffshebewerk die Möglichkeit, verschiedene Betriebszustände, beispielsweise durch das notwendige Anpressen des gleitend gelagerten Troges an Ober- und Unterwasser, die sogenannte »Hartanlage« des Troges, oder die Positionierung des Troges in beliebigen Hubhöhen, generisch zu erzeugen. Da diese Zustände während des regulären Betriebes des Hebewerkes wiederkehrend auftreten und ihre geometrische Unveränderlichkeit über die Zeit die Betriebssicher-

heit der Anlage wesentlich bestimmt, wurde das Monitoring konzeptionell auf diese Zustände ausgerichtet.

Zur Ermittlung der Größenordnung der Verformungen, die aus diesen Belastungsänderungen resultieren, wurden vom Auftraggeber im Vorfeld umfangreiche strukturelle mechanische Berechnungen durchgeführt. Diese dienen als Grundlage für das aufzustellende Messprogramm sowie für die Definition der Toleranzniveaus.

2.2 Elemente der Monitoringaufgabe

Zur messtechnischen Abbildung der geforderten Objektivgenauigkeiten wurde ein neues Präzisionsnetz mit mehr als 20 Punkten für das westliche Hebewerk eingerichtet.

Aufbauend auf den vorgenannten Rahmenbedingungen war die Messaufgabe im vorliegenden Fall dreigeteilt:

1. Einrichtung eines hochpräzisen Ingenieurnetzes, welches sowohl ingenieurgeodätischen als auch maschinenbautechnischen Belangen gerecht wird und für eine dauerhafte Überwachung geeignet ist.
2. Bestimmung des Normalverhaltens des westlichen Hebewerkes in Abhängigkeit von kurz- und langperiodischen externen Effekten.
3. Monitoring der Verformungen der südlichen Türme durch induzierte Last bei Anlegen des Troges an das Oberwasser in der »Sondermessung Hartanlage«.

Bei der Konzeption des Messprogrammes stand die Ermittlung der zu erfassenden Einflussgrößen und der daraus resultierenden Deformationen mit im Vordergrund. Deshalb sollte der gesamte geometrische Zustand des Hebewerkes nicht nur in einer Winter- und einer Sommerkampagne erfasst werden, sondern innerhalb dieser Kampagnen zudem in vier Epochen über einen Zeitraum von 24 Stunden, um Einflüsse im Tagesgang zu ermitteln.

Innerhalb einer Epoche wurde der Trog in jeweils Berg- und Talfahrt auf 15 Ebenen positioniert. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um über die gesamte Hubhöhe eine Aussage über die noch zur Verfügung stehenden Arbeitsbereiche der Antriebe treffen zu können. Auf diese Weise wurden zusätzlich zur Messung in der Hartanlage für jede der beiden Messkampagnen insgesamt 120 Last- und Geometriezustände des Hebewerkes hergestellt und deformationstechnisch bestimmt.

Bauwerksseitig waren unter anderem folgende geometrische Größen in allen Epochen zu überwachen:

Elemente des Massivbaus:

- Abstand der auf einer Ost-West-Achse liegenden und über Verbindungsgänge verknüpften Türme
- Horizontalposition der Türme in 15 vertikal gestaffelten Ebenen
- Aufweitung aller 16 Raumfugen zwischen den Türmen und der Stahlbeton-Trogwanne

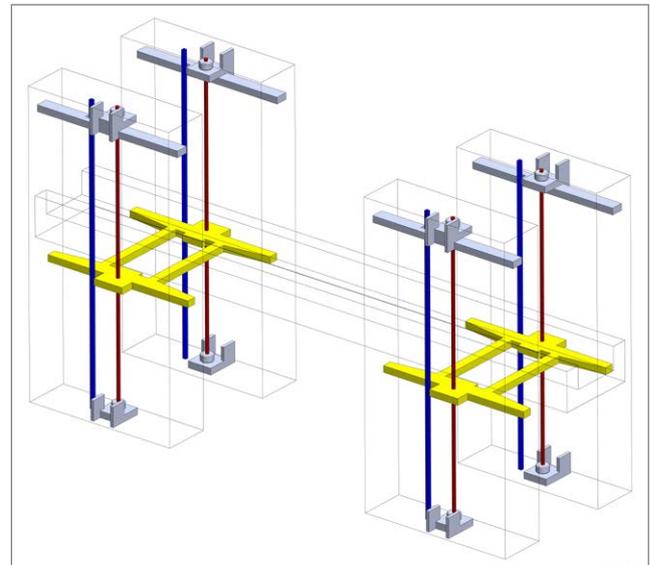


Abb. 3: Antriebe und Elemente des Maschinenbaus

Elemente des Maschinenbaus (Abb. 3):

- Horizontalposition der Trägerrahmen und der darauf befindlichen Antriebe
- Verfügbare Arbeitsbereiche der Längs- und Querführung sowie der Drehriegel

Durch die kraftschlüssige Verbindung von Antrieben, also auch Trägerrahmen auf der einen und den Turmbauwerken mit daran befestigten Zahnstangen auf der anderen Seite, können durch geschickte Auswahl der Sensorik sowie der Messpositionen nicht nur geometrische Einzelgrößen erfasst werden, sondern auch vollständig geschlossene Maßketten berechnet werden.

Als Ergebnis des Monitoringprogramms können hierdurch sowohl die gemessenen Verformungen an einzelnen Bauteilen, als auch die aufgrund der vorliegenden Maschinenbauzeichnungen verbleibenden und für einen reibungslosen Betrieb tolerierbaren Verformungen in unterschiedlichen Lastsituationen modelltheoretisch ermittelt werden.

2.3 Anforderungen an Toleranzen und Messgenauigkeiten

Die vom Auftraggeber festgelegten Genauigkeiten für die deformationsmäßig zu bestimmenden Bauwerksteile zielen wie bereits erwähnt auf eine möglichst präzise Bestimmung des Normalverhaltens, um Deformationen, die möglicherweise während des Baus der Schleuse auftreten würden, kausal zuordnen zu können.

Da im vorliegenden Projekt sowohl geodätische als auch maschinenbautechnische Fragestellungen tangiert wurden, waren die von Seiten des Maschinenbaus definierten Toleranzvorgaben beispielsweise zur Beschreibung der verfügbaren Arbeitsbereiche der Antriebe in Relation zu den entsprechenden Standardabweichungen zu setzen.

Tab. 1: Genauigkeiten der zu bestimmenden Messgrößen

Geometrisches Element	Standardabw.	Bezug	Sensor
Abstand der Türme (Ost-West)	$\pm 0,2$ mm	relativ	Invar-Extensometer
Turmposition über 15 Ebenen	$\pm 0,1$ mm/m	relativ	Inklinometer
Fugenaufweitung	$\pm 0,1$ mm	relativ	Fissurometer
Position der Trägerrahmen	$\pm 1:100.000$	Absolut	Präzisionslote
Position der Zahnstangen	$\pm 1,0 / \pm 0,2$ mm	Absolut / relativ	Extensometer
Position der Spindeln	$\pm 1,0 / \pm 0,2$ mm	Absolut / relativ	Extensometer
Arbeitsbereich der Antriebe	$\pm 1,0 / \pm 0,2$ mm	Absolut / relativ	Extensometer
Lufttemperatur/Temperaturmessketten	$\pm 0,1$ °C	Absolut	Thermometer
Meteodaten	Keine Angabe	Absolut	Wetterstation/Serienbilder

Entsprechende Umrechnungen können bei angestrebtem Konfidenzniveau und definiertem Anteil der Vermessungs- an der Gesamttoleranz deterministisch vorgenommen werden. Hierzu sei auf die Festlegungen der DIN 18710 Teil 1 (2010) sowie des DVW-Merkblattes »Standardabweichung vs. Toleranz« verwiesen (Kuhlmann et al. 2016).

Tab. 1 zeigt die vorgegebenen Genauigkeiten der zu bestimmenden Größen im Sinne von Standardabweichungen.

Eine vollständige Messkampagne musste innerhalb von 24 Stunden durchgeführt werden, um durch den Tagesgang hervorgerufene Effekte vollständig zu erfassen. Deshalb wurden für jede Epoche sechs Stunden Messdauer eingeplant, von denen zwei Stunden für die Inklinometermessungen zu Beginn und die weiteren vier Stunden für das eigentliche Monitoring reserviert waren. Um in den vier Epochen pro Messkampagne alle Messebenen in Berg- und Talfahrt anfahren zu können, ergab sich für jede Ebene ein Zeitraum von lediglich vier Minuten für die Messung, bedingt durch die notwendigen vier Minuten für das Verfahren des Troges (Abb. 4).

Die gesamten Messungen pro Messkampagne wurden in einem Zweischichtsystem durchgeführt. Eine Schicht war für zwei 120-minütige Inklinometermessungen sowie eine vierstündige Monitoring-session oder eine Inklinometermessung und zwei Monitoring-sessions verantwortlich.

Im Vorgriff auf Abschnitt 3 sei an dieser Stelle bemerkt, dass die vom Auftraggeber geforderten Abtastintervalle von einer Messung pro Messebene sowie für kontinuierlich messende Sensoren von zehn Minuten durch den sehr hohen Automationsgrad deutlich übertroffen wurden. Die überwiegende Zahl der Sensoren wurde mit Taktraten von zehn Sekunden betrieben, die manuellen Messverfahren mit einem Vollsatz pro Messebene.

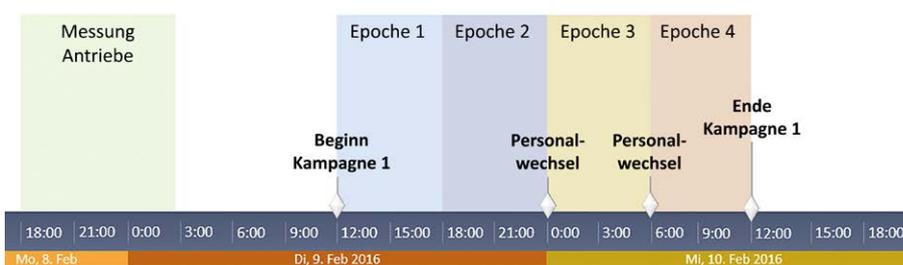


Abb. 4: Zeitablaufplan der Messungen

2.4 QS-Konzept

Zur Sicherung der Qualität der Messergebnisse wurde ein QS-Konzept aufgestellt, welches zwei Komponenten besaß. Zum einen wurden ISO 9001-konforme Prozess- und Arbeitsanweisungen erstellt und die gesamten Datenflüsse einschließlich der Prüfung der Ergebnisse mit Hilfe von Ablaufdiagrammen definiert.

Zum anderen wurde die Wahl und Anordnung der Sensoren so geplant, dass die Mehrzahl der zu überwachenden geometrischen Elemente redundant, also durch rechnerische Verknüpfung auf mehreren Wegen bestimmt werden konnte (vgl. auch Abschnitt 4).

Im Baubüro vor Ort wurden alle automatisch messenden Systeme in Echtzeit über Online-Datenverbindungen visualisiert und überwacht (Abb. 5). Auf diese Weise



Abb. 5: Überwachung der automatischen Systeme im Baubüro

sollte sichergestellt werden, dass unerwartete Ereignisse ohne Zeitverzögerung entdeckt und behoben werden konnten.

3 Monitoring des SHW Lüneburg in zwei Kampagnen

3.1 Netzmessung

Die Netzmessung sollte in konventioneller geodätischer Weise mit Hilfe von Polarelementen ausgeglichen und ihre Qualität durch die bekannten Maße der Netzausgleichung nachgewiesen werden, weshalb für die Vermessung des Festpunktfeldes sowie der Lot-Pfeilerpunkte ein Tachymeter vom Typ Leica TS30 zum Einsatz kam.

Für die Vermessung der Spindeln und Zahnstangen wurden aus Gründen der Praktikabilität Lasertracker mit T-Probe verwendet, welche den Vorteil bieten, auch verdeckte Punkte wie die Hinterseiten von Spindel und Zahnstange ohne Umbau der Geräteposition messen zu können. Zudem kann mit entsprechender Software eine Auswertung der Bestimmungselemente (Achsen und Ebenen) samt Qualitätskontrolle noch vor Ort erfolgen.

Für die dauerhafte Vermarkung des Festpunktfeldes wurden zur Sicherstellung der geforderten Genauigkeiten die von Lasertrackern bekannten Dreipunktaufnahmen, auch als Drift-Nester bekannt, verwendet und mit Schutzkappen vor Verschmutzung und Zerstörung gesichert.

Die Verknüpfung der beiden Sensortypen Tachymeter und Lasertracker erfolgte im Fall der Pfeilerpunkte durch spezielle Adapter, die den Vorteil besitzen, sogenannte Corner-Cube-Reflektoren (CCR) aufzunehmen, und somit für Lasertracker- und Tachymetermessungen gleichzeitig verwendbar sind und zum anderen auch die Einbeziehung von Pfeilerpunkten ermöglichen, auf denen DreifüÙe für die Lotungsmessungen zu montieren waren. Abb. 6 zeigt den Adapter auf einem der Pfeilerpunkte im Trog.

Das Netz (Abb. 7) wurde als freies Netz ausgeglichen und zwangsfrei auf die ebenfalls bestimmten Punkte eines vorhandenen Netzes transformiert, um eine annähernde Achsparallelität von altem und neuem Netz gewährleisten zu können. Durch ebendiese Orientierung des Netzes liegt die X-Achse in Längsrichtung der Tröge vor,



Abb. 6: CCR-Adapter zur Verknüpfung von Lasertracker- und Tachymetermessungen

was die Interpretierbarkeit der Messergebnisse deutlich verbessert.

3.2 Präzisionslotungen zu Stützrahmen und Turmköpfen

Für die Bestimmung der horizontalen Lage von Turmköpfen und Trägerrahmen kamen optische Präzisionslote mit einer Genauigkeit von 1:100.000 zum Einsatz, für die Turmköpfe sogar von 1:200.000.



Abb. 8: Lotungsmessungen mit optischem (vorne) und Laserlot (hinten)

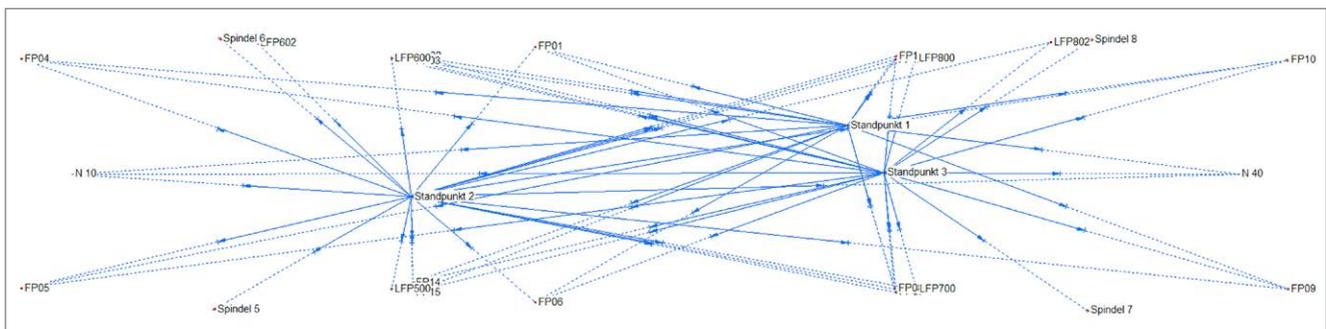


Abb. 7: Präzisionsnetz im Westtrog

Je Turm wurde ein Pfeilerpunkt für die Messung zu den Trägerrahmen aufgebaut und der zu überwachende Punkt am Flügel des Trägerrahmens durch eine beleuchtete Zieltafel signalisiert, deren Skalierung auf einen variablen Entfernungsbereich zwischen 5 und 50 m optimiert war. Die Messung zu den Turmköpfen erfolgte lediglich an den Türmen 6 und 8, aufgrund der Extensometermessungen konnte die Y-Querkomponente der Lotungsmessung jedoch auch auf die beiden anderen Türme übertragen werden. Abb. 8 zeigt die Messungen an Turm 6.

Zusätzlich zum Einsatz des optischen Präzisionslotes wurde am Turm 6 ein von der Papenburger Meyer Werft entwickeltes Laserlot mit automatisch registrierender Zielerfassungseinheit und hoher Abtastrate verwendet, um hochfrequente Bewegungen des Turmkopfes aufzeichnen zu können.

Die optischen Lotungsmessungen wurden sämtlich mit der Durchschlagmethode im Vollsatz gemessen, um systematische Effekte und Ziellinienabweichungen zu eliminieren.

Abb. 9 zeigt die Ergebnisse der Lotungsmessung zum Stützrahmen an Turm 5 während der Epoche 2. Während der Stützrahmen in X-Richtung eine nahezu identische Spur zurücklegt, sind in Y-Richtung, also quer zur Trogachse, von 14 m bis 30 m Hubhöhe Abweichungen in einer Größenordnung zwischen Berg- und Talfahrt zu erkennen, die oberhalb der Messgenauigkeit der Lote liegen, also nicht auf Messabweichungen zurückzuführen sind.

3.3 Inklinometermessungen

Zur Ermittlung von Lageänderungen in der X- und Y-Achse der Türme 5, 6, 7 und 8 wurden Inklinometermessungen über ihre gesamte Höhe (ca. 50 m) durchgeführt. Die geforderten Zielgrößen sollten den Verformungsverlauf

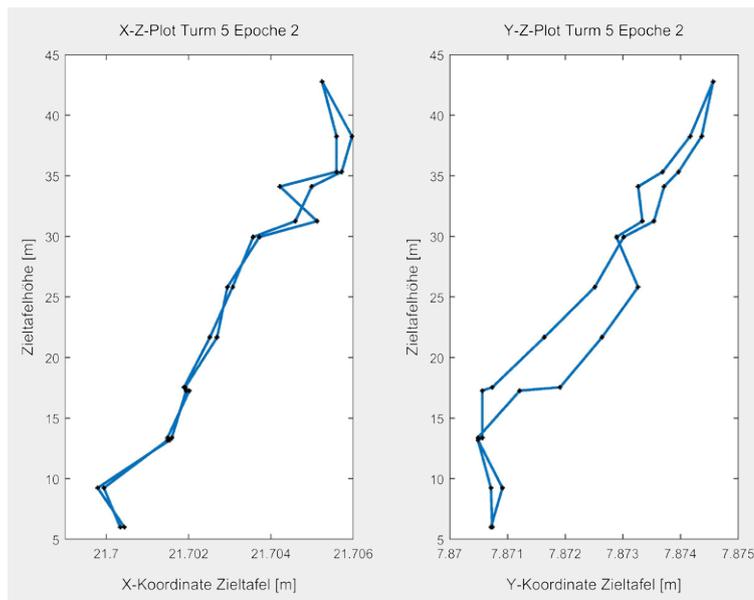


Abb. 9: Gelotete Stützrahmenpositionen in X- und Y-Richtung an Turm 5

(Kurve) in der X- und Y-Achse über die Bauwerkshöhe beschreiben. Vorgesehen war, dass in der Bauzeit der neuen Schleuse allein die Inklinometermessungen die notwendigen Verformungen des Massivbaus liefern.

Bei jeder Messung wurden die vier dauerhaft installierten Messrohre gleichzeitig mit einer Neigungssonde in der X- und Y-Achse des Messrohres durchfahren. Am Ende der 24-Stunden-Messkampagne wurde eine zusätzliche Epoche gemessen.

Um Lageänderungen über die gesamten Turmhöhen während der 24-Stunden-Messkampagne feststellen zu können, wurde ein Epochenvergleich durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden von den Messdaten der Folgeepochen zwei bis fünf (E2–E5) die akkumulierten Messdaten der Nullepoche (E1) subtrahiert. Die Abweichungen lagen insgesamt innerhalb der zu erwartenden Streuung von Inklinometermessungen mit wenigen mm über die gesamte Turmhöhe von ca. 50 m. In Abb. 10 sind die Abweichungen exemplarisch für die X- und Y-Achse des Turmes 5 zwischen den Epochen dargestellt. Die in den

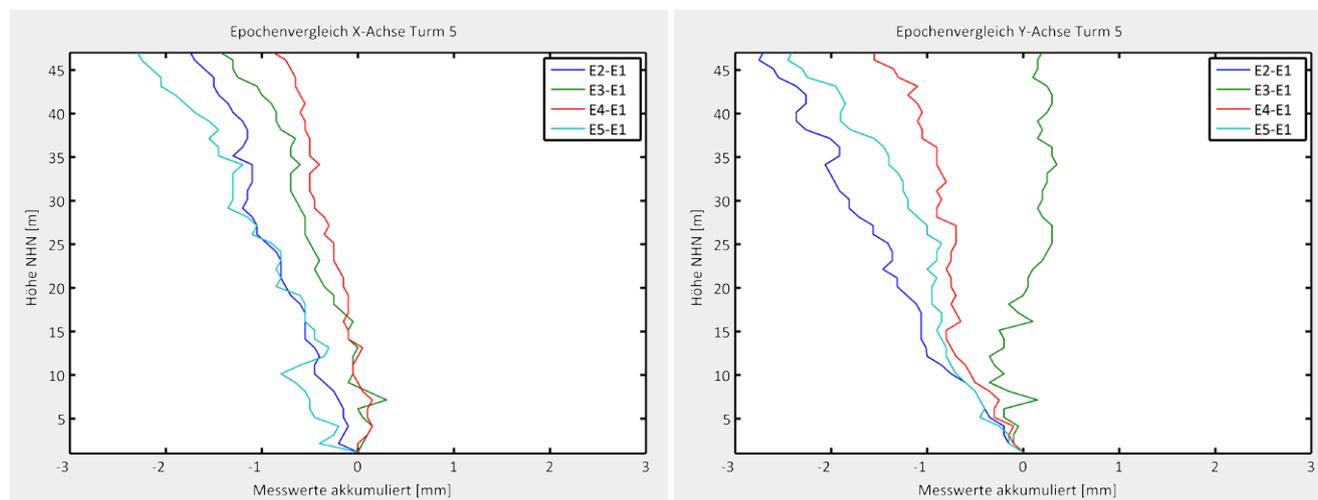


Abb. 10: Epochenvergleich des Turmes 5 für die X-Achse (links) und die Y-Achse (rechts) der Inklinometermessungen

Abbildungen dargestellten Veränderungen von maximal 2,5 mm wurden im Rahmen der ersten Messkampagne ermittelt und stellen keine signifikanten Turmbewegungen dar, sondern sind vielmehr durch die Messunsicherheit des Messverfahrens begründet.

3.4 Extensometer und Fugenaufweitungen

Sowohl für das Monitoring der Abstände zwischen den Türmen als auch für die Überwachung der Aufweitung der Raumfugen zwischen Turmbauwerk und Trogwanne kamen speziell entwickelte Messsysteme zum Einsatz.

Die Messstrecken wurden mit Invardraht-Extensometern bestückt, die für eine Horizontalmontage geeignet sind und durch Verzicht auf Umlenkrollen auch sehr kleine Deformationen ohne systematische Effekte messen können. Extensometer dieser Art wurden von dhp:i bereits unter extremen Bedingungen auf Tunnelbaustellen über mehrere Jahre getestet und konnten somit auch in der Winterkampagne auf den Dächern eingesetzt werden. Sie ermöglichen eine Messfrequenz von bis zu 1 Hz und wurden online an das von dhp:i entwickelte Monitoring System angebunden.

Zur kampagnenübergreifenden Referenzierung zwischen Winter und Sommer wurden auf beiden Seiten der Extensometerstrecken Drift-Nester installiert, um die Absolutdistanz mit einem Lasertracker (Leica AT960) messen zu können.

Die Raumfugen am Betontrog waren gemäß Messkonzept sowohl in X- als auch in Y-Richtung zu überwachen. Dies geschah mit einem digitalen 3D-Fugenmesssystem an allen acht Raumfugen. Auch hier bestand die Möglichkeit, die absolute Aufweitung am installierten Adapter mittels Messschieber zu bestimmen und einen Vergleich zwischen Winter- und Sommerkampagne herzustellen. Eine Darstellung des installierten Präzisionsextensometers ist in Abb. 11 zu sehen.

Aufgrund der bautechnischen Zuordnung dieser Sensoren zu Teilen des Massivbaus wurden sowohl an den Extensometer- als auch den Raumfugenmessstellen während der vier Epochen weitgehend temperaturinduzierte Deformationen mit einer gewissen Phasenverschiebung gemessen.

Abb. 12 zeigt den Vergleich zwischen der gemessenen Aufweitung des Verbindungsganges in Y-Richtung, entsprechend einer Abstandsänderung zwischen den Türmen 7 und 8, und der aus der Betontemperaturmessung



Abb. 11: Invarextensometer im nördlichen Verbindungsgang des Westtroges

rückwärts gerechneten Soll-Aufweitung. Die Messwerte entsprechen nahezu den rechnerisch ermittelten Ausdehnungen, verbleibende Differenzen in der Amplitude sind vermutlich auf eine nicht vollständige Erwärmung/Abkühlung des Betonkerns zurückzuführen.

Des Weiteren konnte im Rahmen des Monitorings nachgewiesen werden, dass die vermutete direkte Kopplung der Hebewerke über den Verbindungsgang zwischen den benachbarten Türmen des westlichen und östlichen Hebewerkes nicht besteht.

3.5 Meteo- und Temperatursensoren

Wie jedes Bauwerk unterliegt auch das Schiffshebewerk dem Einfluss der Lufttemperatur wie auch der direkten Sonneneinstrahlung. Bedingt durch die an den Türmen sowie an der Trogwanne vorhandenen Wandstärken wurden hier mehrere Temperaturmessketten durch Kernbohrungen in die Außenwände eingebracht.

Die Temperatursensoren besaßen mit einer Standardabweichung von 0,05 °C eine außerordentlich hohe Ge-

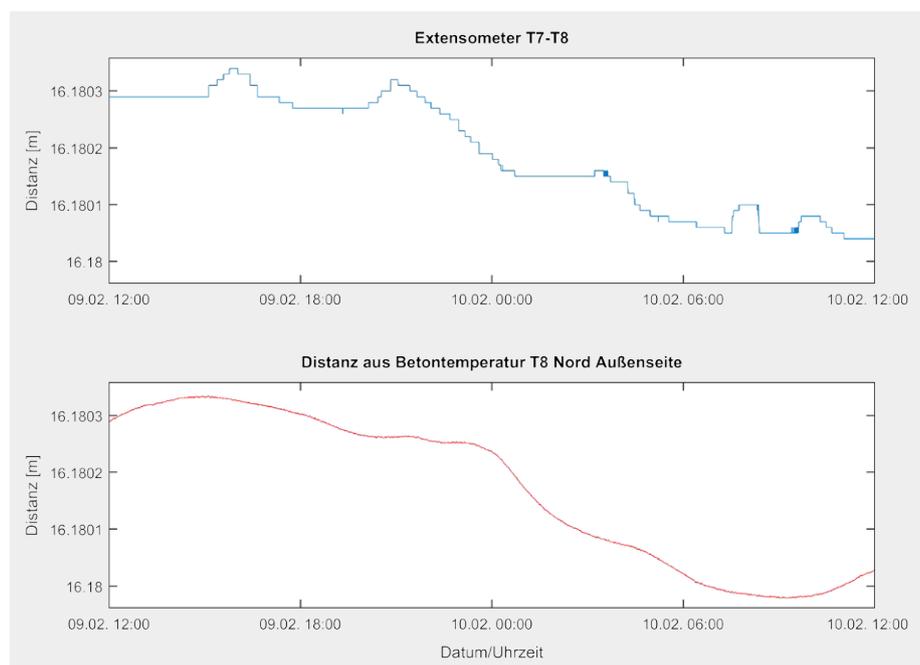


Abb. 12: Extensometermessungen im Verbindungsgang zwischen Turm 7 und 8

naugigkeit, um das Übertragungsverhalten des Bauwerks aufgrund der großen Ausdehnung in allen Dimensionen möglichst gut abbilden zu können.

Neben diesen Sensoren wurden zudem die Lufttemperatur in mehreren Höhen sowie die Wassertemperatur im Trog selbst 50 cm über dem Trogboden gemessen.

Für die Messung der Sonneneinstrahlung wurden von Sonnenaufgang bis -untergang Serienbilder aus südlicher Richtung im Abstand von zehn Minuten gemacht. Mit gleichem Intervall wurden meteorologische Daten wie Luftfeuchte, Windstärke und -richtung, Niederschlag, Strahlungsintensität und Luftdruck erfasst.

Aufgrund einer längeren Betriebspause des Westtroges musste die Sommerkampagne bereits Mitte Mai durchgeführt werden, was angesichts der vergleichsweise warmen Temperaturen im Februar zu einem unerwartet geringen Temperaturgradienten zwischen Winter- und Sommermessung führte.

3.6 Antriebe

Die Messungen an den Antrieben waren aus mehreren Gründen anspruchsvoll. Zum einen waren die an den Antrieben zu montierenden Sensoren als einzige während des Monitorings auf einer bewegten Plattform befestigt. Hierdurch unterlagen sie zum Teil starken Vibrationen beim Verfahren des Troges oder waren an oder neben beweglichen Bauteilen wie der Ritzelschwinge und damit in unmittelbarer Nähe zu Hydraulikschläuchen positioniert, deren Lage sich während der Fahrt veränderte.

Zum anderen waren die räumlichen Gegebenheiten an den Antrieben sehr beengt und die vorhandenen Montagemöglichkeiten zur Messung von Deformationen in der geforderten Koordinatenrichtung äußerst eingeschränkt. Die Abb. 13 und 14 zeigen die Situation vor Ort.

Eine weitere wesentliche Herausforderung bestand darin, dass die eigentlich geforderten Größen wie die Lage der Spindel, der Zahnstange oder die verbleibenden Arbeitsbereiche nur indirekt gemessen werden konnten, da der Zugang zum innerhalb des Drehriegels gelegenen Negativgewinde sowie der Zahnstange nicht möglich war.

Aus diesem Grund wurden die vorhandenen Maschinenbauzeichnungen für die Ableitung der gesuchten Größen mit herangezogen und die zugänglichen Maße wie der Umring der zum Drehriegel gehörigen Abstützmutter mit Hilfe eines Lasertrackers und T-Probe bestimmt. Über diese geometrischen Elemente wurden die kampagnenübergreifenden Relativpositionen der Bauteile bestimmt und die während der Messung auftretenden Differenzen mit Hilfe von Präzisionsmessuhren erfasst.

Zur Bestimmung der Achslagen von Spindel und Drehriegel wurden die Außenseiten dieser Bauteile mit Lasertracker und T-Probe vermessen. Angesichts der für diese Messungen notwendigen Tasterlänge der T-Probe und der geforderten Genauigkeit von 0,5 mm bewegte

sich die Messaufgabe spätestens an diesem Punkt an der messtechnischen Grenze.

Wie alle anderen automatisch registrierenden Messuhren auch, wurden die Sensoren an den Antrieben mit einer Frequenz von 0,1 Hz betrieben und mit Hilfe mobiler Datenverbindungen sowie außerhalb des Stahlkaskos montierter Antennen an den dhp:i-eigenen Monitoring-Server angebunden.



Abb. 13: Messungen an den Längsführungsrollen



Abb. 14: Messungen an den Drehriegeln

Insbesondere an diesen Messstellen zeigte sich der enorme Vorteil der hohen Genauigkeit und zeitlichen Auflösung, die deutlich über die vom Auftraggeber geforderte Größenordnung hinausging. So wurden beispielsweise Hubbewegungen der Troghaltevorrichtungen, mit denen der Trog in Stillstandzeiten an die Spindel geklammert wird, sehr präzise aufgezeichnet. Diese Bewegungen hatten zum Teil eine größere Amplitude als die während der Stillstandzeiten erfassten Werte und somit auch eine größere Auswirkung auf die Geometrie der Antriebe und den zur Verfügung stehenden Arbeitsbereich. Abb. 15 zeigt diese Bewegungen zusammen mit den Abtastzeitpunkten (rote Marker), an denen der Trog auf den Messebenen angehalten wurde.

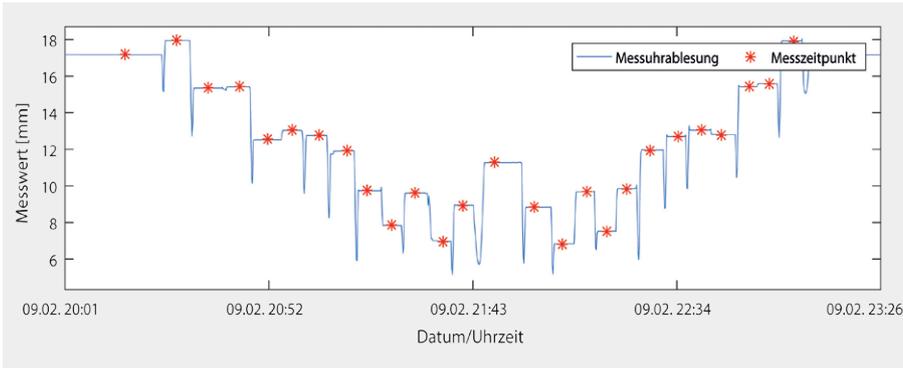


Abb. 15: Bewegungen in den Antrieben über je 15 Höhenniveaus in Berg- und Tal-fahrt

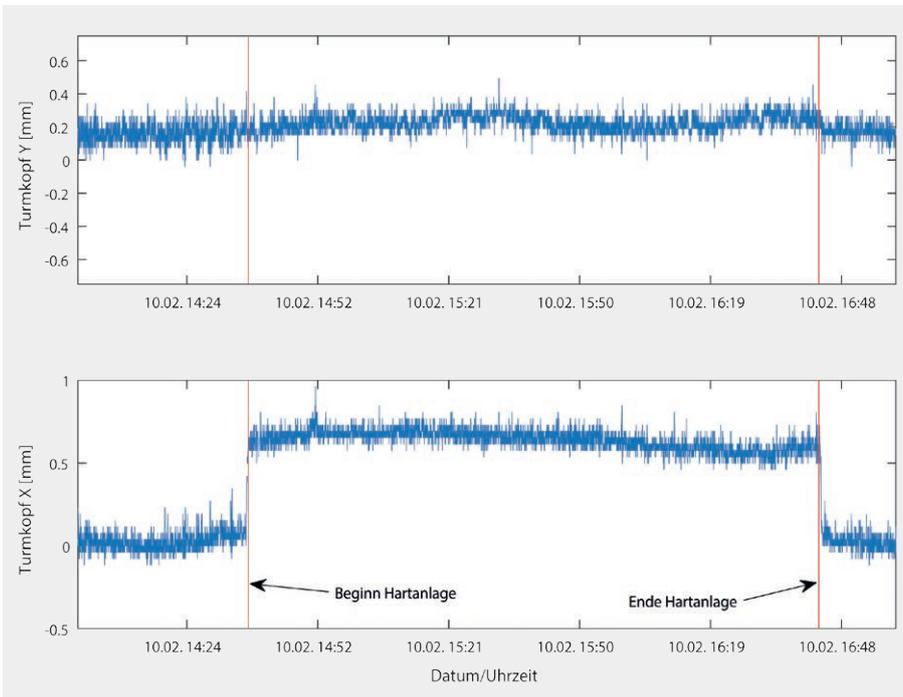


Abb. 16: Messungen des Laserlotes während des Lastfalls »Hartanlage des Troges«

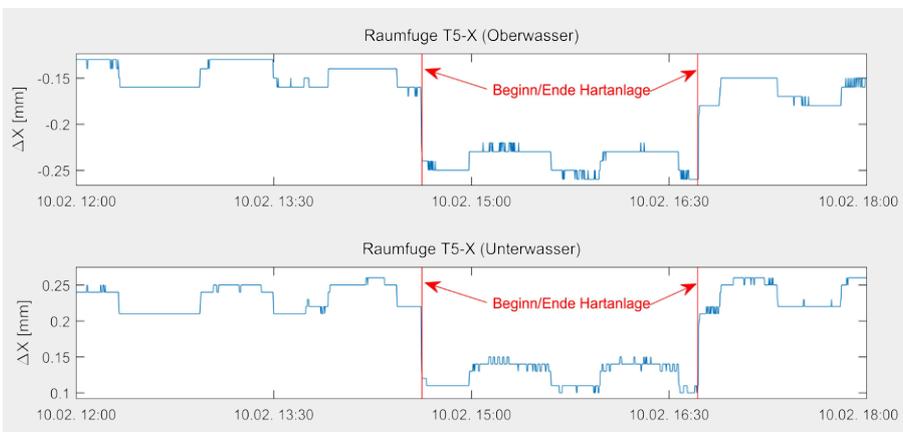


Abb. 17: Raumfugmessungen während des Lastfalls »Hartanlage des Troges«

3.7 »Hartanlage« des Troges

Für den Lastfall Hartanlage des Troges am Oberwasser waren ausschließlich die südlich gelegenen Türme 5 und 6 von Interesse, da sich der Trog zur Herstellung einer kraftschlüssigen und gleichzeitig wasserdichten Verbindung zum Oberwasser an den Köpfen dieser Türme »abdrückt«. Somit wurden für das Monitoring dieses Lastfalles nur die entsprechenden Raumfugmesssysteme, die Extensometerstrecke 5-6, die Inklinometer 5 und 6, die beiden Lotungsmessungen zu den südlichen Stützrahmen sowie zum Turmkopf 6 betrieben bzw. ausgeführt.

Für die hochfrequente Erfassung der Verformungen während des Anlegevorganges kam das bereits erwähnte Laserlot der Meyer-Werft mit einer Abtastrate von 1 Hz zum Einsatz. Die optischen Lote wurden im Takt von fünf Minuten gemessen.

Im Rahmen des Monitorings vor Ort zeigte sich bereits, dass die vorab vom Auftraggeber ermittelten Deformationen auf Grundlage strukturmechanischer Berechnungen bei Weitem nicht erreicht wurden, die Turmbauwerke also deutlich steifer sind als bautechnisch prognostiziert. So lagen die erfassten Deformationen für die hier relevante X-Komponente lediglich in einer Größenordnung von 0,6 mm, was selbst durch die eingesetzten Präzisionslote (1:200.000) kaum nachgewiesen werden konnte.

Abb. 16 zeigt die vom Laserlot aufgezeichneten Bewegungen des Turmkopfes während eines extern induzierten Lastfalls. Die roten Linien signalisieren Beginn und Ende des Lastfalls. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Turmkopf eine horizontale Bewegung in X-Richtung von etwa 0,6 mm vollzieht, wohingegen die Y-Komponente weitgehend stabil bleibt.

Die Größenordnung der mit dem Laserlot bestimmten Verformung in 45 m Höhe koinzidiert sehr gut mit den Messungen des Raumfugenmesssystems auf 9 m Höhe, wenn statt einer Biegung der Türme eine Starrkörperbewegung unterstellt wird (Abb. 17).

4 Gesamtheitliche Modellbildung

Im Rahmen der Gesamtauswertung der 24-Stunden-Messkampagne wurde eine gemeinsame Auswertung aller zu verknüpfenden Messergebnisse für die Auswertung und Beurteilung der Zielgrößen durchgeführt. Dies schließt eine konsistente Beschreibung und Beurteilung der Wechselwirkung zwischen Einflussgrößen und Bauwerksdeformationen mit ein.

Die Gesamtauswertung verfolgte das Ziel, alle Messverfahren in einem gemeinsamen 3D-Ausgleichsansatz zu behandeln und zu interpretieren. Die Aufstellung der im Folgenden geschilderten Gesamtauswertung ist gleichzeitig auch Grundlage einer Qualitätsanalyse, da eine strenge statistische Beurteilung der einzelnen Mess- und Zielgrößen im Gesamtmodell erfolgt.

Als Grundlage dient das gemessene 3D-Festpunktfeld im Bereich des Betontroges. Hierzu gehören die gemessenen Netzpunkte des tachymetrischen Netzes und die darin eingebundenen folgenden 3D-Punkte:

- 4 Lotstandpunkte für die Messung des Troges,
- 2 Lotstandpunkte für die Messung der Turmköpfe,
- eingemessene Spindel- und Zahnstangenstöße für alle vier Türme in unterster Ebene.

Für die oben genannten Größen liegen absolute 3D-Koordinaten sowie deren Genauigkeiten, die aus der Netzausgleichung der Tachymetermessungen gewonnen wurden, vor. Sie können daher als stochastische Anschlusspunkte des 3D-Auswertemodells des Schiffshebewerkes verwendet werden. Im geodätischen Sinne wird hiermit auch über das geodätische Datum des Netzes verfügt (kein Datumsdefekt; Netz mit stochastischen Anschlusspunkten).

In der weiteren Vorgehensweise sollten die restlichen Messungen in den Koordinatenkomponenten (teilweise durch gegenseitige Verknüpfung) zum Aufbau eines 3D-Netzes zusammengesetzt werden. Die Höhe der jeweiligen Messungen ergibt sich hierbei aus den kalibrierten Z-Werten für die 15 Messebenen (ggf. korrigiert durch den Höhenunterschied des mit dem jeweiligen Messverfahren ange-

zielten Bezugspunktes) sowie teilweise durch absolute Höhenangaben.

Für jede dieser 15 Messebenen lieferten die vier Lotungsmessungen zu den Stützrahmen im Zusammenspiel mit den eingemessenen Lotungspunkten einen absoluten Lagebezug (X und Y). Die Lotungsmessungen zu den Turmköpfen stellten einen absoluten Lagebezug (X und Y) auf dem Niveau ca. 5 m unterhalb der Konvergenzmessstrecken in den Quergängen dar.

Für die 3D-Gesamtauswertung wurden zusätzlich die Inklinometermessungen, die Extensometermessungen, die Abstandsmessungen zwischen Zahnstange und Stützrahmen, die Abstandsmessungen zwischen Spindeln und Stützrahmen sowie die Abstandsmessungen zwischen den Längsführungsrollen und dem Stützrahmen eingeführt. Sie stellten relative Streckenbeobachtungen in X- bzw. Y-Richtung dar.

Alle Messverfahren wurden in das gültige Bauwerkskoordinatensystem überführt und in ihre X- und Y-Komponenten aufgespalten, sodass eine gegenseitige Beeinflussung der Messungen im Rahmen der erforderlichen Genauigkeit weitestgehend ausgeschlossen werden konnte.

Mit den gegebenen Beobachtungen innerhalb des 3D-Netzes wurde zunächst für jede Epoche einer Messkampagne eine 3D-Gesamtausgleichung mit den jeweils gültigen Einflussgrößen (Temperaturen des Troges, der Quergänge und der Türme) durchgeführt, um die Ist-Situation aller Zielgrößen im gültigen Bauwerkskoordinatensystem absolut zu bestimmen. Die Ergebnisse stellten somit eine Momentaufnahme des Bauwerkszustandes dar, die sich bei den aktuell gemessenen Einflussgrößen auf das Bauwerksverhalten eingestellt hatte.

Diese Einzelepochenausgleichungen wurden schließlich zu einem mittleren Zustand des Bauwerks vereinigt (Gesamtauswertung der Messkampagne). Abweichungen der einzelnen Epochen zum mittleren Zustand beschreiben das Verhalten des Bauwerks über die 24-Stunden-Messkampagne.

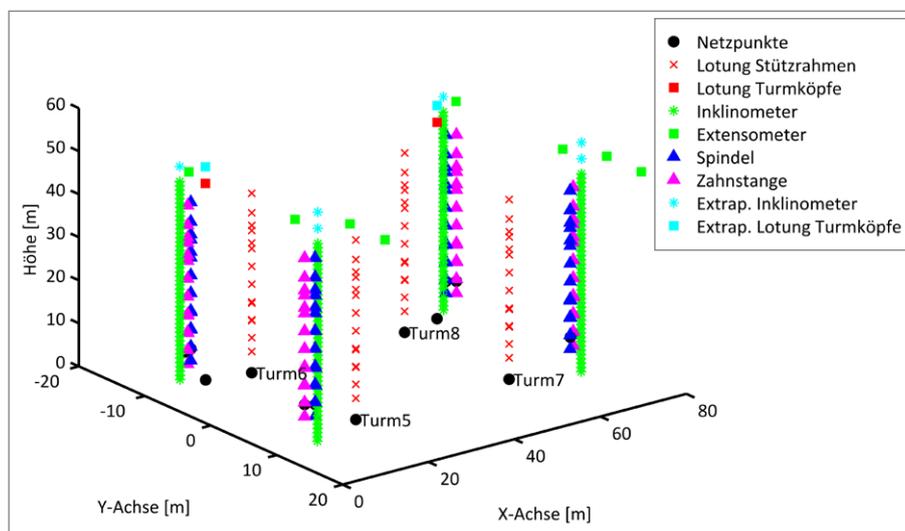


Abb. 18: Übersicht über die Punkte des Netzes aus der 3D-Gesamtausgleichung

Neben den direkt beobachteten bzw. den angemessenen Punkten des Netzes sind teilweise für die Verknüpfung der Messungen weitere Hilfspunkte notwendig, die anhand der vorhandenen Messungen extrapoliert werden. Abb. 18 zeigt eine 3D-Ansicht der eingeführten Koordinaten des Netzes.

Zusätzlich waren Offsetgrößen in X- und Y-Richtung für alle Messuren zu bestimmen. Sie konnten aus den eingemessenen Koordinaten der Zahnstange und Spindel aus dem untersten Niveau berechnet werden. Eine Kontrolle erfolgte durch die vier Epochen einer Messkampagne, wobei sich die Offsets nur durch Temperatureffekte verändern durften.

Die ermittelten Abweichungen zwischen dem mittleren Bauwerkszustand und den einzelnen Epochen der ersten Messkampagne lagen mit Ausnahme der Inklinometermessungen zumeist deutlich unterhalb eines Millimeters, was zum einen als nicht signifikant bewertet werden kann und zum anderen mit der geringen Variation der Einflussgrößen (insbesondere Temperatur) während der ersten Messkampagne erklärt werden muss. Die Auswertung der zweiten Messkampagne läuft derzeit und wird nach Abschluss des Projekts zusammen mit der ganzheitlichen Interpretation der Daten erneut publiziert werden.

5 Fazit

Im Rahmen eines umfangreichen Monitoringprogramms wurde das Schiffshebewerk in Lüneburg im Hinblick auf sein geometrisches Normalverhalten in zwei identischen Messkampagnen im Winter und Frühsommer 2016 untersucht. Hierzu wurde jede der beiden 24 Stunden dauernden Kampagnen in vier Epochen unterteilt, um neben langperiodischen jahreszeitlichen Verformungen auch Veränderungen im Tagesgang zu dokumentieren.

Das Hebewerk wird sowohl von meteorologischen Einflüssen, in erster Linie durch Temperaturänderungen, aber auch von betriebsbedingten Laständerungen beeinflusst. Hierzu gehören die Hebevorgänge mit Berg- und Talfahrt sowie das Anlegen des Troges an Ober- und Unterwasser, bei dem der Trog für eine kraftschlüssige Verbindung mit dem Elbe-Seiten-Kanal erhebliche Krafteinleitungen in die südlichen Türme vornimmt. Auch diesen Effekten wurde im vorliegenden Monitoring Rechnung getragen.

Für eine umfassende Ermittlung der auftretenden Deformationen waren nicht nur konventionelle geodätische Sensoren wie Präzisionslote, Inklinometer, Extensometer und Fissurometer, sondern auch aus dem Maschinenbau bekannte Sensoren wie Lasertracker mit 6-DOF-Tastern im Einsatz.

Die durch den Auftraggeber geforderte Messgenauigkeit lag bei diesem Projekt nahezu vollständig im oberen Bereich der mit Standardsensoren möglichen Bandbreite und erforderte ein hohes Maß an zeitlicher Synchronität bei der Erfassung der Messwerte. Nur hierdurch konnte

sichergestellt werden, dass die beabsichtigten Einflussgrößen trennscharf von sonstigen Effekten erfasst werden konnten, wie am Beispiel der Antriebe gezeigt werden konnte.

Die Kenntnis und korrekte Bewertung von ingenieur-geodätischen Fragestellungen sowie maschinenbautechnischem Wissen war Grundlage für eine erfolgreiche Durchführung aller Messungen.

Für die Auswertung der Ergebnisse wurde ein durchgreifendes Deformationsmodell entwickelt, mit dessen Hilfe nicht nur das Übertragungsverhalten des Bauwerks bezogen auf einzelne Elemente modelliert wurde, sondern auch die noch schadlos tolerierbaren Reserven hinsichtlich der Antriebe berechnet werden können. Auf dieser Grundlage lassen sich im Falle eines späteren Baus der Schleuse Lüneburg in unmittelbarer Nachbarschaft zum Schiffshebewerk das Normalverhalten des Bauwerks von den fremdinduzierten Verformungen durch Bautätigkeit rechtzeitig trennen und rechtzeitig Gegenmaßnahmen einleiten. Dies wird auch Schwerpunkt einer zweiten Publikation zu diesem Themenbereich sein.

Literatur

- DIN 18710 Teil 1: Ingenieurvermessung – Allgemeine Anforderungen. Norm, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, September 2010.
- Kuhlmann, H., Hesse, C., Holst, C.: DVW-Merkblatt 9-2016 – Standardabweichung vs. Toleranz, 2016, www.dvw.de (unveröffentlicht).

Anschrift der Autoren

Dr.-Ing. Christian Hesse
Dr. Hesse und Partner Ingenieure
Veritaskai 6, 21079 Hamburg
ch@dhipi.com

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann
Geodätisches Institut, Leibniz Universität Hannover
Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
neumann@gih.uni-hannover.de

Janetta Wodniok, M.Sc.
Geodätisches Institut, Leibniz Universität Hannover
Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
wodniok@gih.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Gerd Lippmann
Neubauamt für den Ausbau des Mittellandkanals in Hannover
Nikolaistraße 14/15, 30159 Hannover
gerd.lippmann@wsv.bund.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.