

Schwingungsanalyse an Kabelkranen

Wirtschaftliche Lasten-Förderung

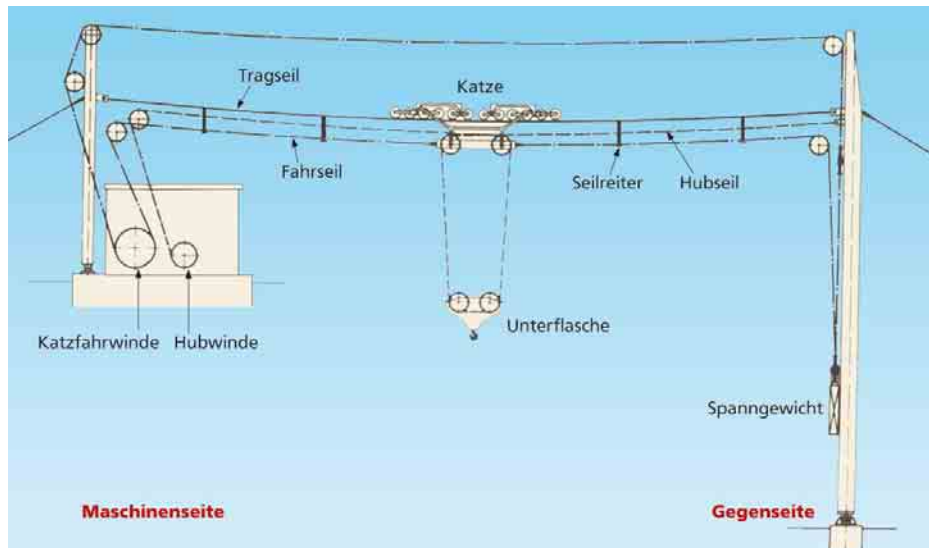
Durch eine messtechnische Erfassung und Untersuchung der an mechanischen und elektrotechnischen Komponenten fördertechnischer Maschinen in der Praxis auftretenden Beschleunigungen kann eine Aussage über die entstehenden Bauteilbelastungen getroffen werden. Zur Analyse und Optimierung des beim Einsatz von Kabelkranen entstehenden Schwingungsverhaltens wurden vom Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart im Auftrag der ThyssenKrupp Fördertechnik GmbH (TKF) Beschleunigungsmessungen an mehreren Kabelkranen durchgeführt.

- Christian Vorwerk
- Karl-Heinz Wehking

Materialtransport mit Kabelkranen

Als Kombination aus Seilbahn und Kran dienen Kabelkrane zum horizontalen und vertikalen Materialtransport über große Entfernungen auch bei schwierigsten Geländebedingungen. Ihr Haupteinsatzgebiet erstreckt sich auf den Staudamm- und Brückenbau, da alternative Transportverfahren hier wegen der häufig enormen horizontalen und vertikalen Distanzen und des unwegsamen Geländes nicht mit der Leistungsfähigkeit von Kabelkranen konkurrieren können.

Ein Kabelkran besteht aus einer Maschinenseite und einem Gegenwagen, die durch ein Tragseil miteinander verbunden sind (Bild 1) und deckt je nach Ausführung als Einzel- oder Mehrfachsystem einen dem Baufortschritt einer Baustelle angepassten Arbeitsraum ab. Bei radial fahrbaren Kabelkranen wird der Gegenwagen auf einer



1 Funktionsweise eines Kabelkrans

(Bild: TKF)

zur Maschinenseite sphärisch gekrümmten Bahn verfahren, wobei zur Überwindung der Fahrbahnneigung im Normalfall triebstockbetriebene Kletterfahrwerke eingesetzt werden. Bei einer feststehenden Maschinenseite stellt der Arbeitsbereich des Krans dann einen Kreisabschnitt dar.

Hauptkomponenten eines Kabelkrans

Zur vertikalen Bewegung der an der Unterflasche angehängten Last dient die Hubwinde auf der Maschinenseite des Krans (Bild 2). Die Krankatze mit Unterflasche wird durch das als geschlossene Seilschleife ausgeführte Katzfahrseil auf dem Tragseil horizontal verfahren. Das Hubseil wird auf der Maschinenseite von einer Hubtrommel auf- bzw. abgespult, führt durch die Katze zur Unterflasche und ist auf der Gegenseite fest verankert. Der Durchhang der Arbeitsseile wird begrenzt, indem Katzfahr- und Hubseil durch den Einsatz von sog. Seil-

reitern am Tragseil geführt werden, die das Hub- und Katzfahrseil beim Durchfahren der Katze kurzzeitig freigeben müssen (Bild 3).

Höchste Staumauer der Welt

Die nach Fertigstellung mit 292 m höchste Bogenstaumauer der Welt wird zurzeit in der südchinesischen Provinz Yunnan errichtet, um den Mekong (Lancangjiang) in einem Speicherraum von 15 km³ bei einer geplanten Stauseelänge von etwa 175 km aufzustauen (Bild 4). Das Wasserkraftwerk der Talsperre soll eine elektrische Leistung von 4,2 GW erzeugen. Die zur Errichtung des Staudamms insgesamt etwa benötigten 8,4 Mill. m³ Beton werden von einer Übergabestelle auf Höhe der Mauerkrone bis zur (mit dem Baufortschritt variierenden) Einbaustelle mit fünf parallel fahrbaren Kabelkranen der ThyssenKrupp Fördertechnik GmbH transportiert (Bild 5). Auf den Tragseilen der auf zwei unterschiedli-



2 Hubwerksantrieb mit Trommel



3 Seilreiter mit Trag- und Arbeitsseilen



4 Staudammbau am Lancangjiang in Xiaowan (China)

beim Talsperrenbau

chen Ebenen eingesetzten Krane mit einer durchschnittlichen Spannweite von 1200 m werden Katzfahrgeschwindigkeiten von bis zu 6 m/s erreicht.

Der in einem auf der Baustelle befindlichen Betonwerk hergestellte Beton wird direkt vom LKW in den zum Beladungsvorgang auf einem Podest abgesetzten Transportkübel abgekippt (Bild 6). Anschließend wird der Kübel durch den zur Steigerung der Durchsatzleistung möglichst gleichzeitigen Antrieb von Katz- und Hubwerksmotor zum Einbauort verfahren. Um eine Hubgeschwindigkeit von bis zu 3 m/s bei einer Last der gefüllten Betonkübel von 30 t zu ermöglichen, werden für die Hubwerksantriebe leistungsstarke Gleichstrommotoren mit einer Nennleistung von 950 kW bei Drehzahlen von bis zu 1310 min⁻¹ im Feldstellbereich eingesetzt. Die Drehmomentübertragung zur Hubwerkstrommel erfolgt über eine Klauenkupplung und ein mehrstufiges Stirnradgetriebe. Die während eines Hubvorgangs entstehenden Motor- und Lastschwingungen werden außer von der Lagerung des Motors im Kabelkran und der Seilsteifigkeit auch maßgeblich von



5 Parallel fahrbare Kabelkrane

den Antriebskomponenten beeinflusst. Um die Auslegung und Dimensionierung dieser Krankomponenten optimal an die geforderten Kranlasten und Hubgeschwindigkeiten anpassen zu können, wurde vom IFT eine experimentelle Schwingungsanalyse im Feldversuch durchgeführt.

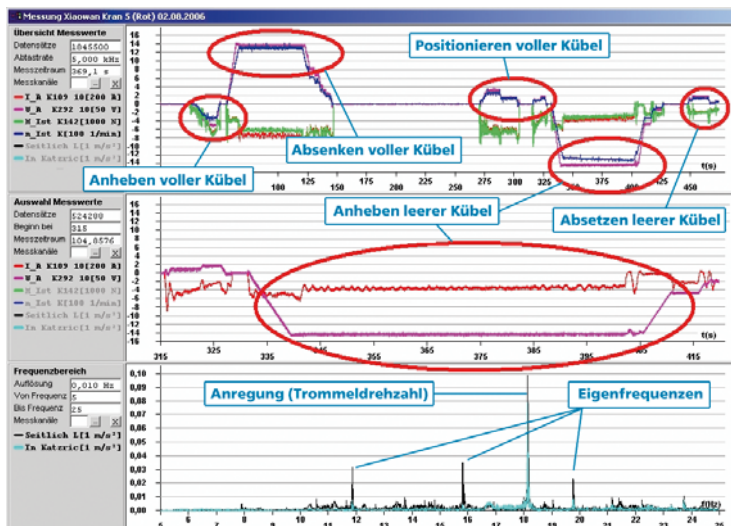
Schwingungsbelastungen erfassen

Um die im normalen Förderbetrieb (Betontransport zur Einbaustelle am Staudamm) auftretenden Bauteilbelastun-



6 Beladung der Transportkübel mit Beton (Fassungsvermögen 30 t)

gen beurteilen zu können, wurden bei mehreren Kranen Beschleunigungsamplituden an unterschiedlichen Positionen des Hubwerksantriebs gemessen. Dabei wurden Signale am Hubwerksmotor und an der Motorlagerung mit kapazitiven Sensoren aufgenommen, um Horizontal-, Vertikal- und Torsionsschwingungen in einem Messbereich von ± 2 g aufzuzeichnen. Um die entstehenden Schwingungen den unterschiedlichen Phasen eines Transportvorgangs zuordnen zu können, wurden Ankerspannung und -strom, das



7 Messdaten im Zeit- und Frequenzbereich

(Bilder 2 bis 7: IFT)

Praxiseinsatz an den Antriebskomponenten gemessenen Schwingungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Kranhersteller verschiedene Optimierungsmaßnahmen entwickelt, die eine weitere Erhöhung der Lebensdauer von Kabelkränen durch eine Reduzierung der entstehenden Bauteilbelastungen versprechen.

Resümee und Ausblick

Die Transportleistung von Kranen wird wesentlich von den eingesetzten Antriebs- und Steuerungskonzepten bestimmt. Zur Analyse und Weiterentwicklung bestehender Antriebssysteme werden in zunehmendem Maße Schwingungsuntersuchungen und Simulationsmodelle herangezogen. Im Auftrag der ThyssenKrupp Fördertechnik GmbH in St. Ingbert-Rohrbach führte das Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart eine experimentelle Schwingungsanalyse an Hubwerksantrieben von Kabelkränen als Grundlage einer aussagekräftigen Datenbasis für die Auslegung zukünftiger Antriebssysteme durch. Die entstehenden Bauteilbelastungen können somit bereits in der Planungsphase einer Neukonstruktion durch eine geeignete Abstimmung der verwendeten Antriebskomponenten minimiert und die Lebensdauer der Komponenten deutlich verlängert werden. □

abgegebene Drehmoment und die Ist-drehzahl des Hubwerksmotors und weiterhin die Versorgungsspannung zur Erfassung einer möglichen Stromrichterüberlastung erfasst.

Die Messdaten wurden mit einem Notebook gestützten mobilen Messsystem digitalisiert, das eine gleichzeitige Erfassung von acht analogen 16-Bit-Eingangssignalen bei einer Summenabtastrate von 150 kHz ermöglicht. Um die im Vergleich zur mechanischen Anregung relativ hochfrequenten Oberschwingungen der gleichgerichteten dreiphasigen Netzspannung auswerten zu können, wurde trotz der entstehenden Datenmenge eine Abtastrate von 5 kHz gewählt. Im Rahmen einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) lassen sich somit Schwingungsanteile bis zu einer Frequenz von 2,5 kHz analysieren. Signalanteile mit höheren Frequenzen wurden ausgefiltert.

Analyse der Messergebnisse

Zur Auswertung diente ein im IFT entwickeltes Softwarepaket, das neben einer transparenten Darstellung der Messergebnisse im Zeit- und Frequenzbereich auch eine automatische Kompensation der hinterlegten Amplituden- und Phasengänge der Beschleunigungssensoren ermöglicht (Bild 7). Die Schwingbeschleunigungen und -geschwindigkeiten werden neben der Anregung durch die mit unterschiedlichen Drehzahlen rotierenden Massen auch von den Lastbewegungen, der Spannungsrestwelligkeit

am Ausgang des Stromrichters und der Motorsteuerung beeinflusst. Das Lastkollektiv wird deshalb außer von den dynamischen Anfahr- und Bremsvorgängen vor allem auch von den „stationären“ Bewegungen (Heben bzw. Absenken der Last mit konstanter Geschwindigkeit) in einem relativ großen Frequenzbereich bestimmt.

Die Analyse der Messergebnisse für einen vollständigen Transportvorgang (von der Befüllung des Betonkübels an der Übergabestelle bis zum Rücktransport des leeren Kübels) wurde bei verschiedenen Hubgeschwindigkeiten durchgeführt. Durch eine Fourier-Analyse können die bei diesen maßgeblichen Transportvorgängen in den einzelnen Frequenzbereichen entstehenden Schwingungsanteile separiert und die daraus resultierenden Bauteilbelastungen bewertet werden.

Bei der Dimensionierung der Antriebskomponenten müssen zunächst die (z. T. auch im Bereich der Schwingungsanregungen vorhandenen) Eigenfrequenzen aller Komponenten aufeinander abgestimmt werden. Die Abstimmung geschieht durch eine geeignete Auswahl der Zukaufteile (z. B. Kupplung) mit einer bestimmten Eigenfrequenz und eine gezielte Beeinflussung der Eigenfrequenzen des Stahlbaus. Anschließend wird die Steuerung der Antriebe an die gewählte Auslegung angepasst (Festlegung der Brems- und Beschleunigungsrampen, Geschwindigkeitsstufen, Zeitkonstanten, Bandfilter usw.). Durch die systematische Analyse der im

Dipl.-Ing. Christian Vorwerk
ist Oberingenieur am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Wehking
ist Leiter des Instituts für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart