

WINDLASTUNTERSUCHUNGEN AM MODELL EINES CONTAINER - KRANES

Dr.-Ing. B. Leitl
Universität Hamburg
Meteorologisches Institut
Bundesstraße 55
D-20146 Hamburg

Dr. D. E. Neff, Prof. Dr. R. N. Meroney
Colorado State University
Fluid Dynamics and Diffusion Laboratory
Engineering Research Center
Fort Collins, Colorado, 80523 - 1372

ZUSAMMENFASSUNG. Im Rahmen einer Auftragsuntersuchung wurden am Fluid Dynamics and Diffusion Laboratory der Colorado State University Windlastuntersuchungen am Modell eines Container-Kranes durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung der vom natürlichen Wind am Kran verursachten, zeitgemittelten Windkräfte und Momente sowie eine Abschätzung der zu erwartenden Spitzenlastwerte für verschiedene Betriebszustände des Kranes. Der vorliegende Beitrag beschreibt die versuchstechnische Umsetzung der Meßaufgabe, wobei auf den Bau des aerodynamischen Modells und die erforderlichen Kraftmeßeinrichtungen eingegangen wird. Die im Windkanal modellierte Windgrenzschicht wird beschrieben und mit entsprechenden Vorgabewerten aus der Natur verglichen. Es werden Besonderheiten der Versuchsdurchführung und typische Meßergebnisse zusammengefaßt dargestellt.

1 Einführung

Für moderne Container-Krananlagen können Bauhöhen von 70 m und höher als typisch gelten. Das statische und dynamische Lastverhalten derartiger Strukturen wird insbesondere geprägt durch die Masseverteilung am Kran mit meist schwerer Ausrüstung am Kranausleger (Laufwagen, Maschinenhaus mit Hebevorrichtung), schlanke Tragrahmen und geringe Strukturdämpfung. Charakteristische Werte für die kleinste Eigenfrequenz liegen in der Größenordnung von 0.1 Hz und weniger. Infolge der kleinen Eigenfrequenzen und der in der Regel windexponierten Aufstellung der Krane im Hafenbereich sind statische und dynamische Windlasten ein wesentlicher Faktor im Zuge des Entwurfs und der konstruktiven Auslegung von Container-Kranen. Als Eingangsgrößen für die Auslegung des Kransystems müssen Lastannahmen sowohl für die zeitgemittelten Windlasten, als auch für die Amplitude und die Frequenz von Spitzenlastwerten getroffen werden. Neben der theoretischen Abschätzung kritischer Lastfälle (~ Definition einer kritischen Windrichtung) auf der Grundlage von Einzellastannahmen für die wesentlichen Strukturelemente eines Kranes haben sich Windkanalversuche am starren, aerodynamischen Modell bewährt. Als besonders vorteilhaft erweist sich dabei, daß im Rahmen von Windkanalversuchen relativ einfach verschiedenste Anströmsituationen für den vollen Anströmwinkelbereich hinsichtlich Lastverhalten untersucht werden können. So können die bezüglich Windlast kritischen Betriebskonfigurationen und entsprechende Spitzenlastwerte genauer spezifiziert und die Auslegung an diesen Werten orientiert werden.

Im vorliegenden Fall sollten die zur Auslegung erforderlichen Windlasten für einen großen Container-Kran mit neuartiger Ausleger-Struktur bestimmt werden. Den Windkanalversuchen waren sowohl theoretische Lastabschätzungen auf der Grundlage von Erfahrungen mit konventionellen Container-Kranen sowie Windkanalversuche mit verschiedenen, ähnlichen Entwürfen vorausgegangen, die jedoch keine eindeutigen Aussagen lieferten.

Die im Folgenden vorgestellten Messungen wurden im "Meteorological Wind Tunnel" (MWT)

an der Colorado State University (CSU), Fort Collins, Colorado durchgeführt (vergl. Abbildung 1, aus [1]). Der für die Modellierung atmosphärischer Grenzschichtströmungen konzipierte Windkanal verfügt über eine 29 m lange Anlauf- und Meßstrecke mit einem freien Meßstreckenquerschnitt von 1.83 m x 2.0 m, die zur Simulation verschiedener Windprofile bzw. Anströmverhältnisse unter anderem mit Wirbelgeneratoren und Bodenrauhigkeiten versehen werden kann. In der Meßstrecke des Windkanals sind Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 0.1 m/s bis 38 m/s stufenlos einstellbar.

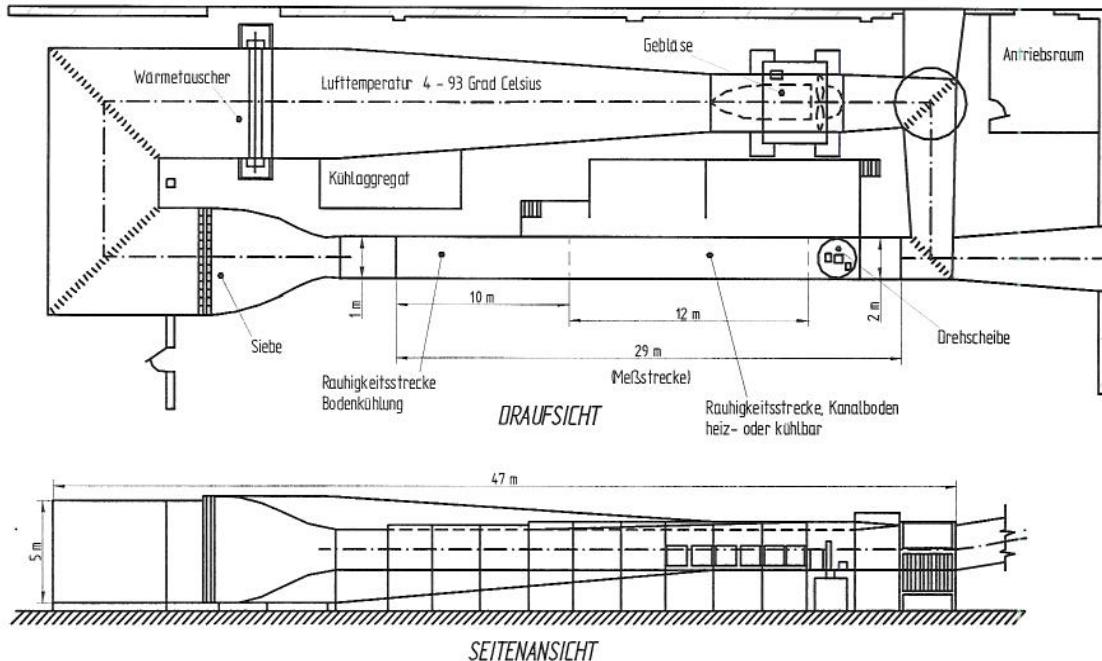


Abbildung 1: "Meteorological Wind Tunnel" - MWT der Colorado State University.

2 Versuchstechnische Realisierung

2.1 MODELL UND GRENZSCHICHT

Unter Berücksichtigung des freien Meßstreckenquerschnittes und der Hauptmaße des Container-Kranes wurde der Modellmaßstab auf 1:150 festgelegt. Da lediglich die statischen, mittleren Windlasten sowie turbulenzinduzierte Spitzenlastwerte, nicht aber die dynamische Reaktion des Kranes selbst Gegenstand der Untersuchung waren, wurde ein starres, aerodynamisches Modell gefertigt. Der Modell-Grundkörper wurde aus gefrästen Aluminiumteilen aufgebaut, die im Sinne starrer Verbindungen verschweißt wurden. Eine Übersichtszeichnung des Kranmodells zeigt Abbildung 2.

Drei Einzelkomponenten des Kranes weisen im Entwurf des Originals Kreisquerschnitte aus und waren mit Blick auf die korrekte Reproduktion des Lastanteiles im Bezug auf die unterschiedlichen Widerstandsbeiwerte bei unterschiedlichen Reynoldszahlen der Umströmung zu korrigieren. Für die Seitenstreben und die Hauptstrebe auf der Landseite des Kranes wurde entsprechend dem C_w -Wert Verhältnis von Modell zu Original der Modell-Durchmesser auf 1/3

reduziert (vergl. [2]). Der Querschnitt der Tragstrebe zur Unterstützung des Auslegers auf der Wasserseite des Kranes wurde im Sinne verbesserter Steifigkeit des Modell-Auslegers geringfügig vergrößert, wobei der Einfluß der Vergrößerung des Querschnittes auf das Gesamtwindlastverhalten als vernachlässigbar nachgewiesen werden konnte. Alle Details, die im Rahmen einer konservativen Lastabschätzung einen Summenanteil von 0.5% an der prognostizierten Gesamtlast nicht überschritten, wurden nicht modelliert (frei umströmte Kabel, Hydraulik-Leitungen etc.).

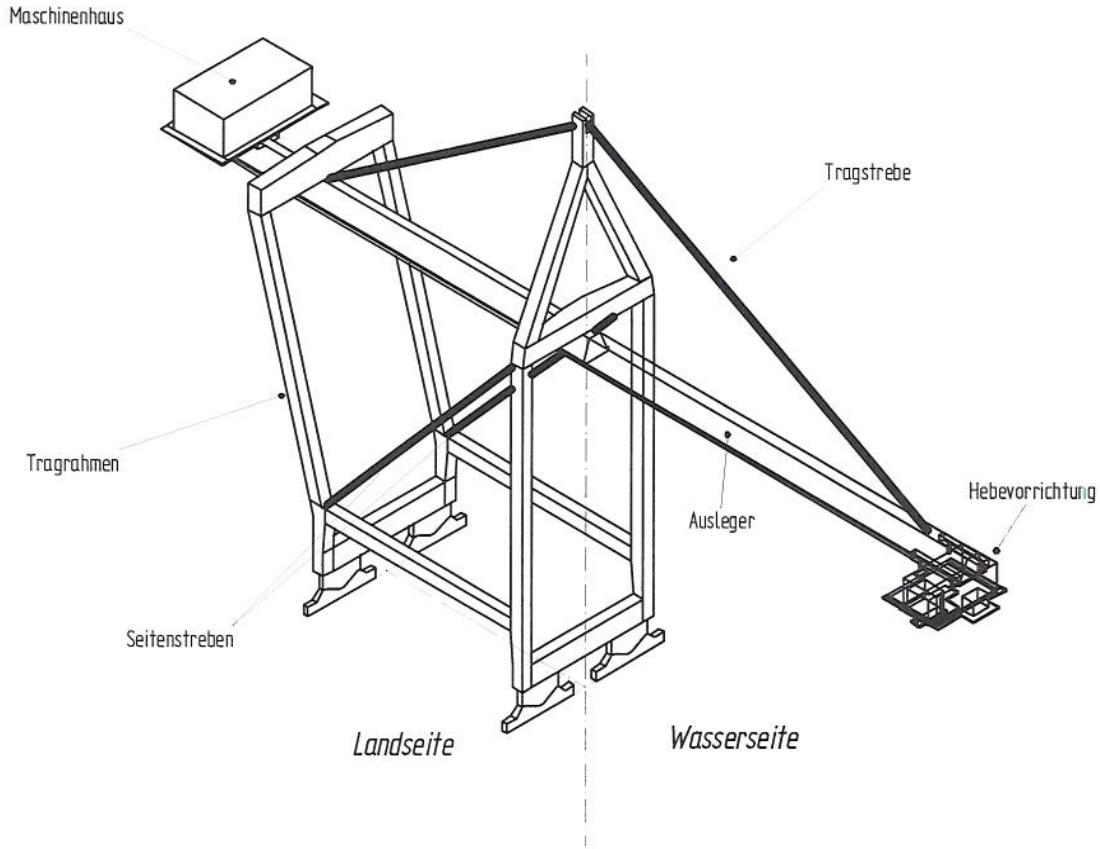


Abbildung 2: Hauptkomponenten des Kranmodells (schematisch).

Um die Übertragbarkeit der Modellergebnisse auf die Großausführung zu gewährleisten, müssen die Anströmverhältnisse im Windkanal strömungsmechanisch ähnlich nachgebildet werden. Im Einzelnen ist nachzuweisen, daß das zeitgemittelte vertikale Windprofil, die vertikale Verteilung des Turbulenzgrades sowie die spektrale Verteilung der Turbulenzenergie maßstäblich nachgebildet wird. **Abbildung 3** faßt die Ergebnisse von Strömungsmessungen mit Hitzdrahtanemometer zusammen. Die zur Evaluierung der im Windkanal modellierten Grenzschicht durchgeführten Messungen zeigen sehr gute Übereinstimmung mit Vorgabewerten aus der Natur. Entsprechend dem geplanten Aufstellungsort des Kranes und den Vorgaben des Auftraggebers war eine Grenzschicht gemäß ASCE 7-95, Exposure D zu modellieren [3], die der Anströmung über See mit mindestens 5 km freiem Vorlauf entspricht.

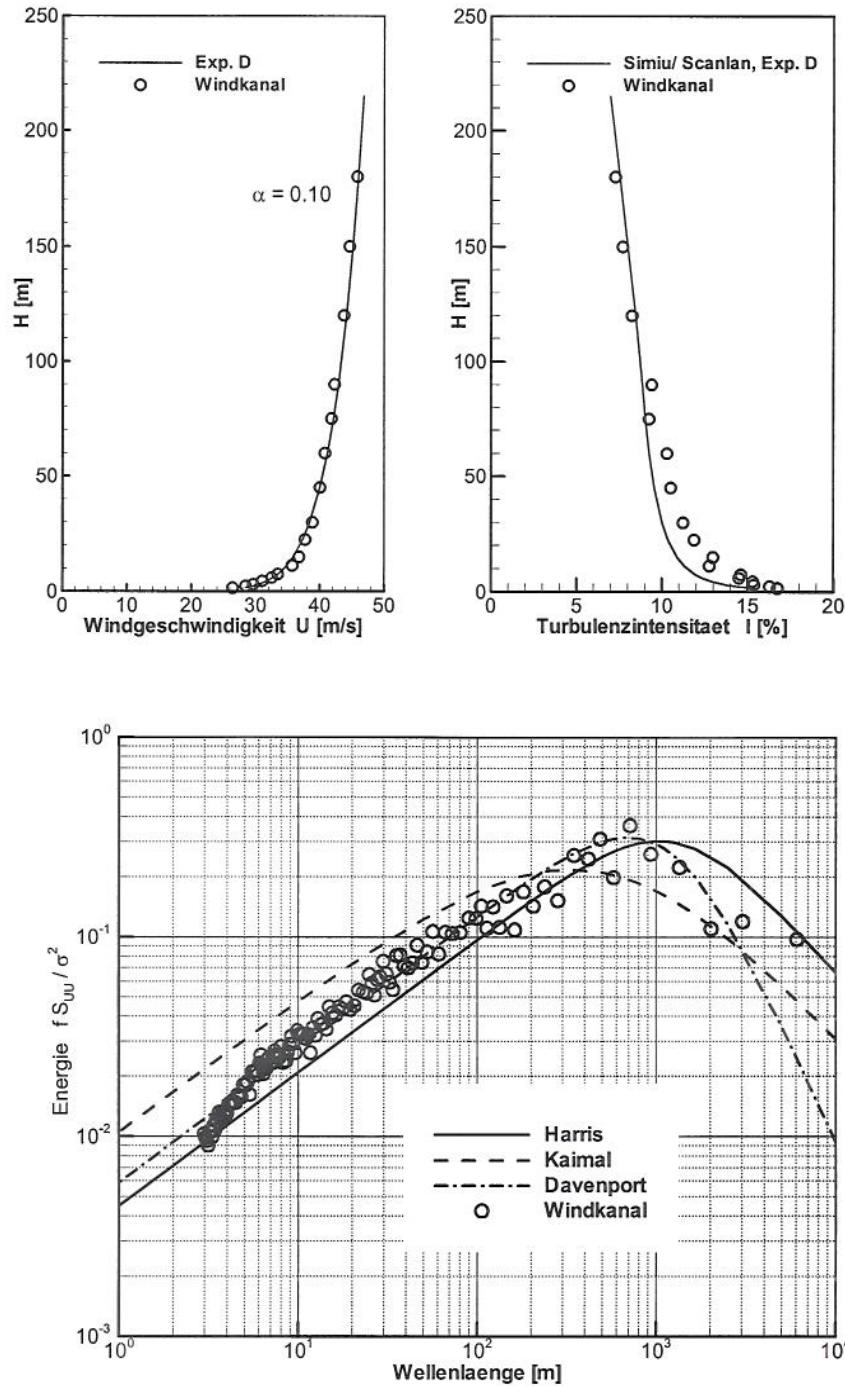


Abbildung 3: Im Windkanal modellierte Grenzschicht.

2.2 KRAFT- UND MOMENTEN-MESSEINRICHTUNGEN

Zur meßtechnischen Erfassung der am Kran auftretenden Windlasten wurden zwei separate Meßsysteme genutzt. Für die Messung der beiden Horizontalkomponenten der Windkraft wurde eine 2-Komponenten-Meßeinrichtung auf der Basis von mit Dehnmeßstreifen bestückten Biegebalken konzipiert und aufgebaut, die im Meßbereich optimal an die am Modell zu erwartenden Windkräfte angepaßt wurde. **Abbildung 4** zeigt einen Ausschnitt aus der Zusammenbauzeichnung des 2-Komponenten-Systems. Das Meßsystem wurde aus zwei

separaten Meßebenen für je eine Kraftkomponente aufgebaut, die durch geeignete Querschnittsgestaltung der Biegebalken das Messen von zwei senkrecht zueinander ausgerichteten Einzelkomponenten F_x und F_y ohne meßtechnisch nachweisbares Übersprechen der Einzelkanäle ermöglichen. Pro Meßebene bzw. Kraftkomponente wurden vier mit Dehnmeßstreifen bestückte Biegebalken eingesetzt, deren Meßsignale einzeln erfaßt und im Meßrechner nach Überprüfung der Konformität zu einem mittleren Kraftmeßwert pro Komponente zusammengefaßt wurden. Die Biegebalken waren einzeln leicht wechselbar, so daß der Meßbereich der Kraftmeßeinrichtung auch während der Meßkampagne leicht an unterschiedliche Lastfälle angepaßt werden konnte. Zur Vermeidung von Resonanzschwingungen mit signifikanter Amplitude im interessierenden Frequenzbereich und einer daraus resultierenden, gegebenenfalls fehlerhaften Bestimmung der Standardabweichung bzw. Streuung des Meßsignals wurde in die Meßeinrichtung ein Flüssigkeitsdämpfer eingebaut, für den experimentell eine obere Grenzfrequenz von etwa 100 Hertz bestimmt wurde. Als Kalibriergenauigkeit wurden maximale Fehler von 1.57% für F_x und 0.45% für F_y bestimmt. Die im Rahmen der Messungen erreichte Reproduziergenauigkeit der Meßergebnisse lag bei $\pm 1\%$ für die Komponente F_x und $\pm 2\%$ für F_y .

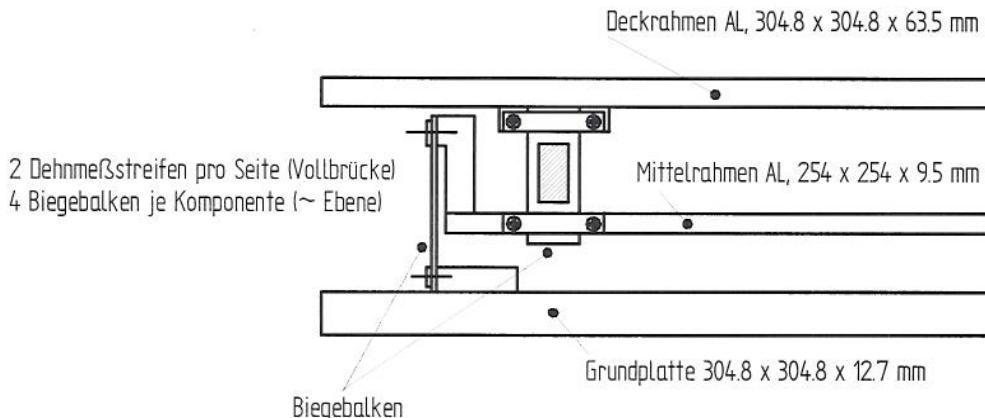


Abbildung 4: 2-Komponenten-Kraftmeßeinrichtung zur Bestimmung von F_x und F_y (schematisch).

Die für die Momenten-Messungen (M_x , M_y , M_z) verwendete Meßeinrichtung ist in **Abbildung 5** dargestellt. Das ursprünglich für dynamische Untersuchungen an Bauwerksmodellen konzipierte System ist mit Halbleiter-Dehnmeßstreifen (SPB3-20-35) ausgerüstet und weist ein maximales Übersprechen der Kanäle von 0.4%, 1.5% und 0.5% für M_x , M_y und M_z aus. Im Sinne genauer Meßergebnisse wurde das Übersprechverhalten der Meßeinrichtung während der Kalibrierung erfaßt und im Zuge der Berechnung von Meßwerten aus den Einzelsignalen kompensiert. Die Kalibrierung erfolgte für Einzelkomponenten und kombinierte Lastfälle und wurde während der Messungen mehrfach wiederholt, um Fehler durch Drift der Meßaufnehmer zu minimieren. Ein Vergleich der Kalibrierdaten für die erste und letzte Kalibrierung des Systems zeigte sehr kleine Abweichungen von 0.35% für M_x , 0.65% für M_y und 1.69% für M_z . Als Reproduziergenauigkeit wurde durch Wiederholungsmessungen für ausgewählte Lastfälle eine maximale Streuung der Ergebnisse von $\pm 2\%$ für M_x und M_y sowie $\pm 6\%$ für M_z bestimmt.

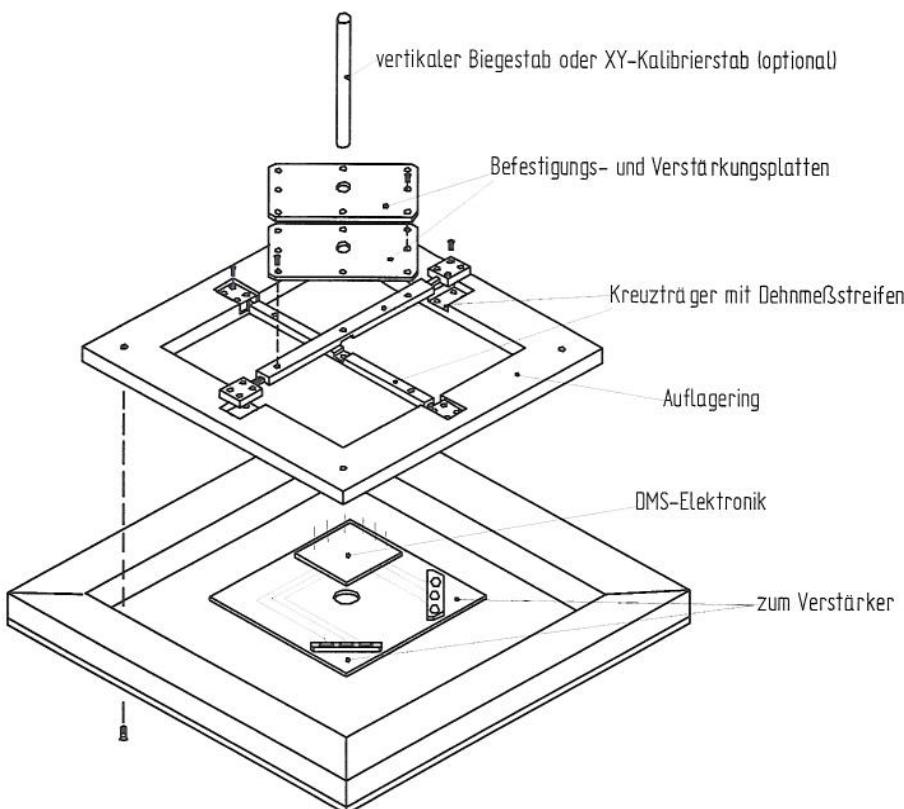


Abbildung 5: Momenten - Waage zur Messung der Momente M_x , M_y und M_z (schematisch).

3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Vom Auftraggeber wurden 5 Betriebskonfigurationen und ein Vergleichsfall vorgegeben (vergl. **Tabelle 1**), für die Meßergebnisse in einem Anströmwinkelbereich von $\alpha = 0^\circ \dots 180^\circ$ in 10° -Schritten geliefert wurden (siehe **Abbildung 6**). In Vorversuchen wurde zunächst die mindestens zu realisierende Anströmgeschwindigkeit bzw. Reynoldszahl bestimmt, ab der die Umströmung der Modellkomponenten transkritisches Verhalten zeigt und dimensionslose Kraft- und Momentenbeiwerte einen konstanten Wert ausweisen. Wie **Abbildung 7** zeigt, ergibt sich für Strömungsgeschwindigkeiten U_{REF} größer etwa 15 m/s keine Reynoldszahl-Abhängigkeit der dimensionslosen Momentenbeiwerte.

Testfall	Konfiguration
A	nur Tragrahmen, kein Ausleger
B	Tragrahmen mit landseitigem Ausleger, Hebevorrichtung Mitte Landseite
C	Tragrahmen mit Ausleger aufgeklappt, Hebevorrichtung Mitte Landseite
D	Tragrahmen mit Ausleger horizontal, Hebevorrichtung Mitte Landseite
E	Tragrahmen mit Ausleger horizontal, Hebevorrichtung am Maschinenhaus
F	Tragrahmen mit Ausleger horizontal, Hebevorrichtung maximal ausgefahren

Tabelle 1: Untersuchte Kran-Konfigurationen.

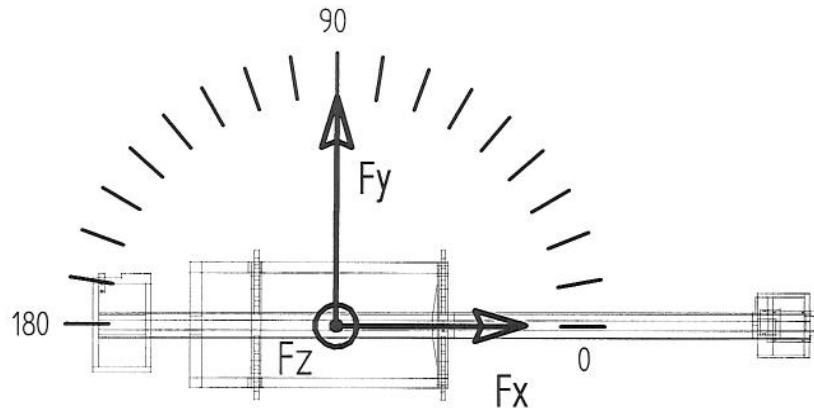


Abbildung 6: Untersuchter Anströmwinkelbereich und kranfestes Koordinatensystem.

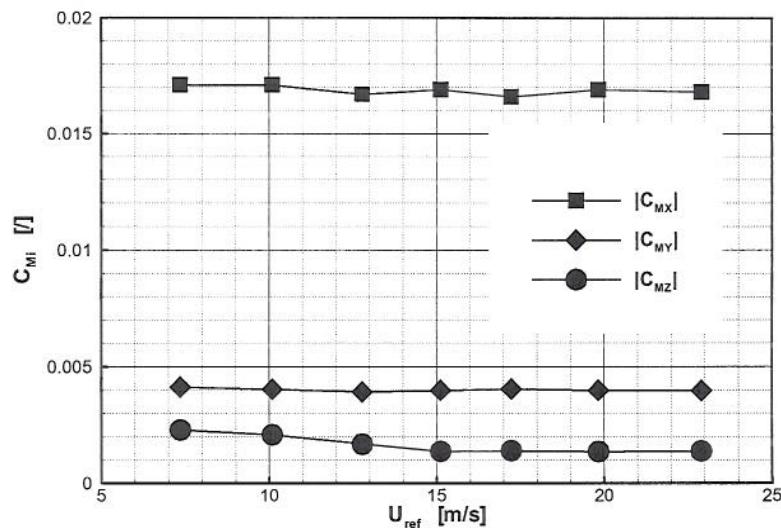


Abbildung 7: Gemessene Momentenbeiwerte für unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten (Re-Test).

Während der Messungen wurde kontinuierlich die mittlere Windgeschwindigkeit U_{REF} in 30 cm Höhe (45 m im Original, Unterkante Ausleger) unmittelbar vor dem Modell gemessen und den entsprechenden Kraft- und Momenten-Meßwerten zugeordnet. Pro Meßpunkt wurden 5 Zeitserien ausreichender Länge für die 5 Meßgrößen F_x , F_y , M_x , M_y und M_z erfaßt, die off-line nach jeder Messung analysiert wurden.

Obwohl das Modell des Container-Kranes so starr wie möglich gefertigt wurde, zeigte die in Vorversuchen durchgeführte, experimentelle Analyse der Eigenfrequenzen des Modellkörpers einen Resonanzpunkt bei etwa 21 Hz, verursacht durch Schwingungen des Auslegers am Modellkran. Um die kleinste Eigenfrequenz deutlich zu erhöhen, hätte ein sehr viel kleinerer Modellmaßstab gewählt werden müssen. Ein kleinerer Modellmaßstab hätte jedoch gleichzeitig kleinere Absolutwerte der gemessenen Windkräfte und in Folge eine geringere Meßgenauigkeit

in den Mittelwerten der Meßgrößen bedeutet. Da die Bestimmung der mittleren Kräfte und Momente am Kran Schwerpunkt des Projektes war, wurde dem großen Modellmaßstab und der guten meßtechnischen Auflösung der zeitgemittelten Kraft- und Momentenbeiwerte zunächst Priorität eingeräumt. Die Frequenzanalyse der gemessenen Zeitreihen zeigte jedoch, daß im Frequenzbereich um 21 Hz noch signifikante Lastanteile gemessen wurden. Aus diesem Grunde wurde jede Zeitreihe im Frequenzbereich analysiert und der Resonanz-Spitzenwert im Energiedichtespektrum entfernt. Die aus den korrigierten Energiedichtespektren berechneten Standardabweichungen (siehe [4]) der Meßgrößen wurden im Weiteren zur Kennzeichnung der Windlastschwankungen (RMS bzw. Standardabweichung) verwendet.

Die gemessenen, mittleren Kräfte und Momente für die 6 Testfälle, umgerechnet auf die Absolutwerte der Großausführung (Auslegungsfall mit $U_H = 40 \text{ m/s}$ in einer Höhe von $H = 45 \text{ m}$), sind in **Abbildung 8** zusammengefaßt. Als kritischer Lastfall erscheint die Konfiguration mit aufgeklapptem Kranausleger, für die zum Teil tendenziell abweichende Windlastverteilungen und erwartungsgemäß, mit Ausnahme des Torsionsmomentes M_Z , auch die größten, mittleren Lastwerte gemessen wurden. Die verschiedenen Positionen der Hebevorrichtung am Ausleger zeigen deutliche Wirkung im gemessenen Torsionsmoment M_Z . Für alle weiteren Mittelwerte der Meßgrößen wurde eine nur geringe Abhängigkeit von der Position der Hebevorrichtung festgestellt. Die vom Auftraggeber mit der Wahl der Testkonfigurationen beabsichtigte Unterscheidung von Einzellastanteilen der Hebevorrichtung bzw. des Auslegers im Vergleich zur Gesamtlast wird für relevante Windrichtungen deutlich.

Eine wesentlich stärkere Abhängigkeit der Versuchsergebnisse vom jeweiligen Testfall konnte für die gemessenen Standardabweichungen bzw. RMS-Werte der Meßgrößen festgestellt werden (**Abbildung 9**). Die Konfiguration mit aufgeklapptem Ausleger erweist sich auch bei der Auswertung der RMS-Werte als kritischer Lastfall mit zum Teil ausgeprägter Windrichtungsabhängigkeit der Ergebnisse. Deutlicher als bei der Darstellung der zeitgemittelten Größen kann der Lastanteil der Hebevorrichtung insbesondere für den RMS-Wert der Horizontalwindkraft F_Y unterschieden werden. Die größten Lastschwankungen für M_X , M_Z und F_Y ergeben sich für Anströmrichtungen senkrecht zum Kranausleger. Entsprechend können für M_Y und F_X maximale RMS-Werte für Windrichtungen annähernd parallel zum Ausleger des Kranes.

4 Formelzeichen und Abkürzungen

C_w	Strömungswiderstandsbeiwert eines umströmten Körpers (aus [2])
C_m	Momentenbeiwert (aus [2])
F_x, F_y	mittlere Windkraft am Kran in X- und Y-Richtung des Modellkoordinatensystems
M_x, M_y	Kippmomente um die Horizontalachsen des Modellkoordinatensystems
M_z	Torsionsmoment um die Vertikalachse des Modellkoordinatensystems
α	Anströmwinkel (Windrichtung)
I	Turbulenzintensität (siehe auch [6])
U_{ref}	Referenz- bzw. Bezugswindgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung
U_h	Strömungsgeschwindigkeit in der Höhe H in Hauptströmungsrichtung
H	Höhe über Grund
RMS	root-mean-squared (siehe auch [4])

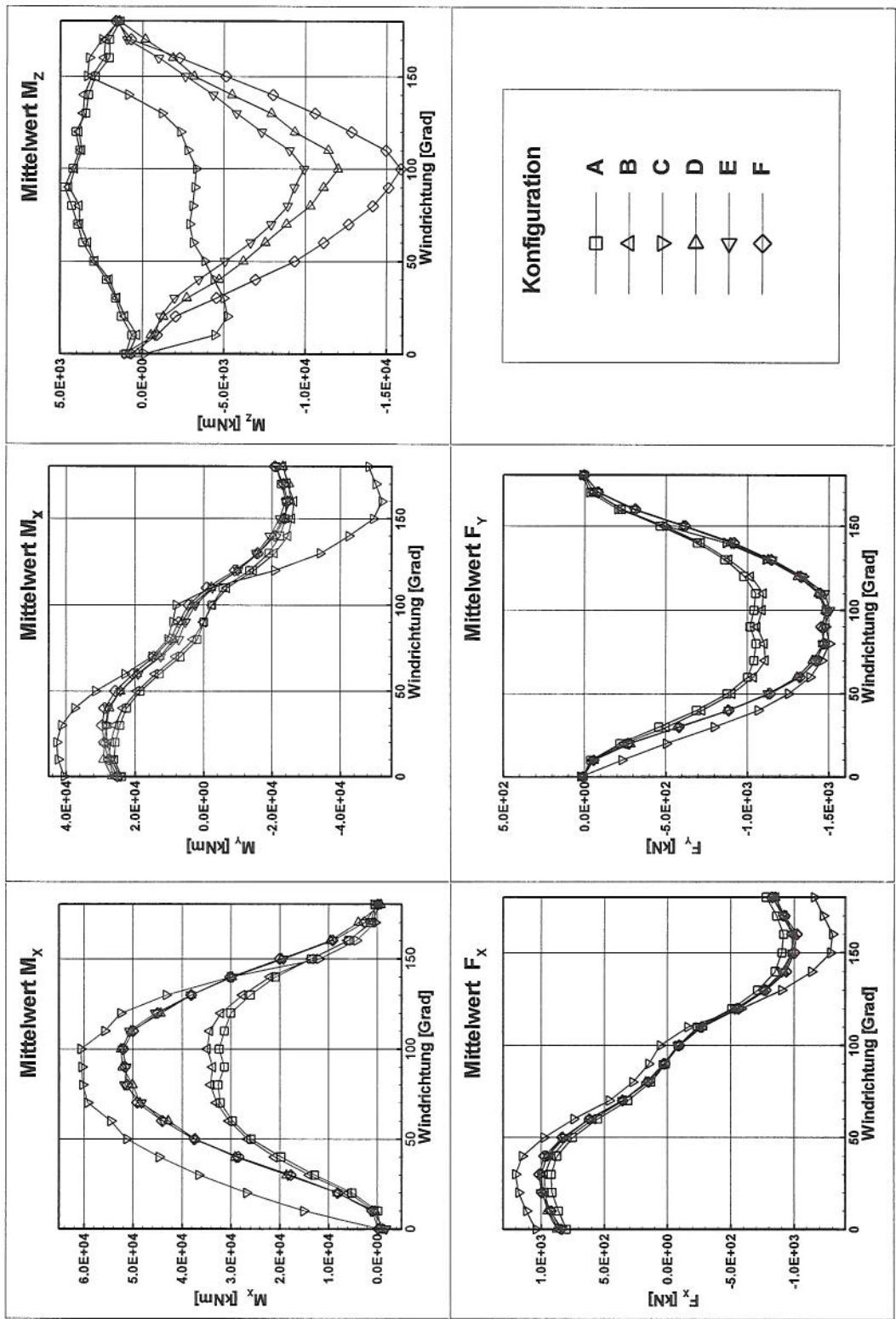


Abbildung 8: Mittelwerte der gemessenen Windlasten, umgerechnet auf die Verhältnisse im Original ($U_H = 40 \text{ m/s}$, $H = 45 \text{ m}$).

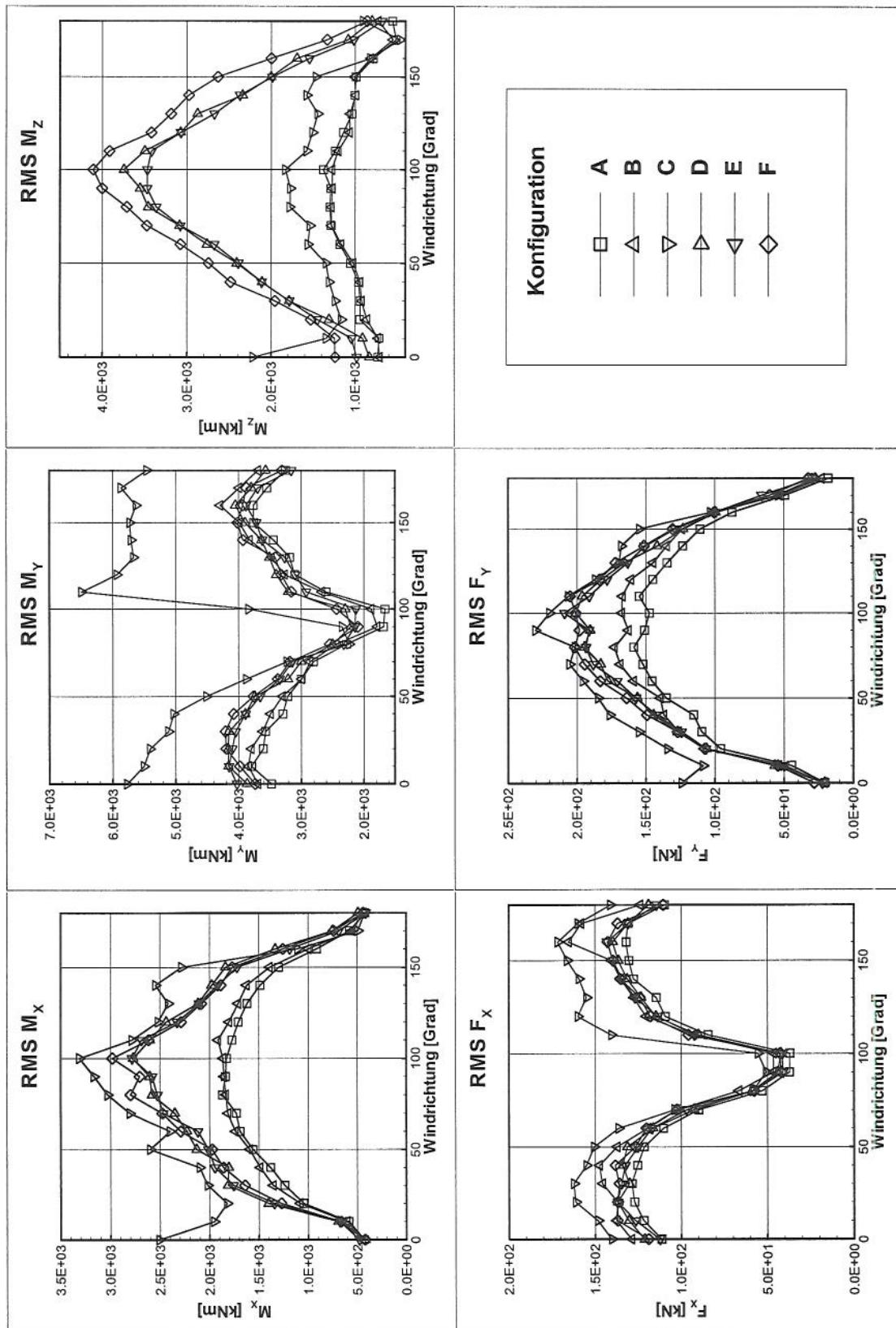


Abbildung 9: RMS der gemessenen Windlasten, umgerechnet auf die Verhältnisse im Original ($U_h = 40 \text{ m/s}$, $H = 45 \text{ m}$).

5 Literatur

- [1] Fluid Dynamics and Diffusion Laboratory - Research Facilities and Instrumentation, compiled by A.E. Lee, Colorado State University, College of Engineering, Fluid Dynamics and Diffusion Laboratory, Fort Collins, Colorado
- [2] Hoerner, S.F.(1965): "Fluid-Dynamic Drag", Dr.-Ing. S.F. Hoerner, 148 Busteed Drive, Midland Park, New Jersey, 07432
- [3] American Society of Civil Engineers and American National Standards Institute: "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", ANSI/ASCE 7-95, 1995
- [4] Bendat, J.S.; Piersol, A.G., 1971: "Random Data: Analysis and Measurement Procedures", John Wiley and Sons, New York, 407p.
- [5] Neff, D.E.; Leitl, B., 1996: "Wind Tunnel Study of Container Crane", Abschlußbericht, Colorado State University, Fluid Dynamics and Diffusion Laboratory, Dept. Of Civil Engineering, Fort Collins, Colorado, Juni 1996, unveröffentlicht
- [6] Simiu, F.; Scanlan, R.H., 1978: "Wind Effects on Structures: An Introduction to Wind Engineering", John Wiley and Sons, New York, 458pp.