

The background of the slide is an aerial photograph of a city, likely Hong Kong, featuring a prominent tall skyscraper with a blue glass facade. The city is densely packed with buildings, and a body of water is visible in the background with several boats.

# Megastädte

## Überlegungen hinsichtlich Gebäudeschwingungen bei der Planung von Aufzügen für extrem hohe Gebäude

Autoren:

Jaakko Kalliomäki, Dipl.-Ing., KONE Corporation

Jarkko Saloranta, Dipl.-Ing., KONE Corporation / Upwind

# Autoren



## Jaakko Kalliomaki

10 Jahre Erfahrung mit Hochhaus-Aufzugstechnik.  
Spezialisiert auf System Planung, Fördertechnik und Gebäudeschwingungen.

- **Bildung**
- 2003 Dipl.-Ing. in Maschinenbau, Helsinki University of Technology, Finnland
- **Arbeitserfahrung**
- 2003 – 2005 *Mechanical Designer*, ABB Oy (Drives and Power Electronics), Finnland
- 2005 – 2007 *Designer*, Delta Energy System (Finnland) Oy
- 2007 – 2014 (*Senior*) *Chief Design Engineer*, KONE Corporation, Finnland
- 2014 weiter *Global Platform Manager (High Rise Platforms)*, KONE Corporation, Finnland



## Jarkko Saloranta

Mehr als 10 Jahre Erfahrung in der Windtechnik.  
Spezialisiert auf numerische Modelle, Fördersysteme Simulationen und Gebäudeschwingungen.

- **Bildung**
- 2006 Dipl.-Ing. in Luftfahrtwissenschaft und Technologie, Helsinki University of Technology, Finnland
- **Arbeitserfahrung**
- 2006 – 2008 *PhD Student/Researcher* Helsinki University of Technology, Finnland
- 2008 – 2010 *Design Engineer* (numerische Modelle) KONE Corporation, Finnland
- 2010 – 2013 *Technical Specialist*, WinWinD Oy
- 2013 weiter *Entrepreneur/ Technical Specialist*, UpWind (Zugewiesen an KONE Corporation)



Darum geht es bei  
einer  
Schwingungsanalyse





# Schwingungsanalyse



## Schwingungsanalyse

- Die Gebäudeschwingungsanalyse bezieht sich auf eine **vom Erbauer** durchgeführte Analyse des Gebäudeverhaltens unter Windbedingungen.
- Sie umfasst zahlreiche Aspekte, die sich erheblich auf die Funktion des Aufzugssystems in einem Gebäude auswirken.
- Sie kann empirisch (auf Windkanal basierend) und theoretisch (auf Berechnungen basierend) sein.

## Frequenz-/Resonanzanalyse

- Aufgrund der Beschaffenheit von Aufzugssystemen ändert sich die Spannung in den Aufzugseilen als Funktion der Fahrkorbposition im Aufzugschacht. Daher können nach einem bestimmten Fahrweg - abhängig von den Eigenschaften des Gebäudes und des Aufzugs - Bereiche, in denen Resonanzen vorhanden sind, nicht vermieden werden.
- Mit der vom **Aufzughersteller** durchgeführten Frequenz-/Resonanzanalyse wird versucht, Lage und Ausmaß des Problems zu ermitteln.



# Gebäudedefrequenz

- Die Gebäudedefrequenz wird nicht anhand von Windkanaltests ermittelt, sondern vom Statiker bereitgestellt, der Vereinfachungen der Gebäudekonstruktion vornehmen muss, die zu Abweichungen bei den Gebäudedefrequenzen führen (normalerweise 0...- 20 %).
- Die Gebäudedefrequenzen können auch berechnet werden. Eine gängige Näherung ist die 46/H –Näherung, wobei H die Gebäudehöhe ist.
- Auf der Grundlage tatsächlicher Messungen sind die durch Näherungen ermittelten Frequenzen nicht weniger genau und die berechneten Frequenzen tendieren dazu, niedriger zu sein als die 46/H –Näherung. [1].
- In Japan ist eine 67/H –Näherung auf Grundlage von Feldmessungen [2] eingeführt worden.
- Auch wenn Unwägbarkeiten bleiben, so ist die Frequenzanalyse ein wichtiger Teil bei der Konstruktion von Aufzügen. Sie verschafft einen allgemeinen Überblick von Lage und Ausmaß der Resonanzbereiche.

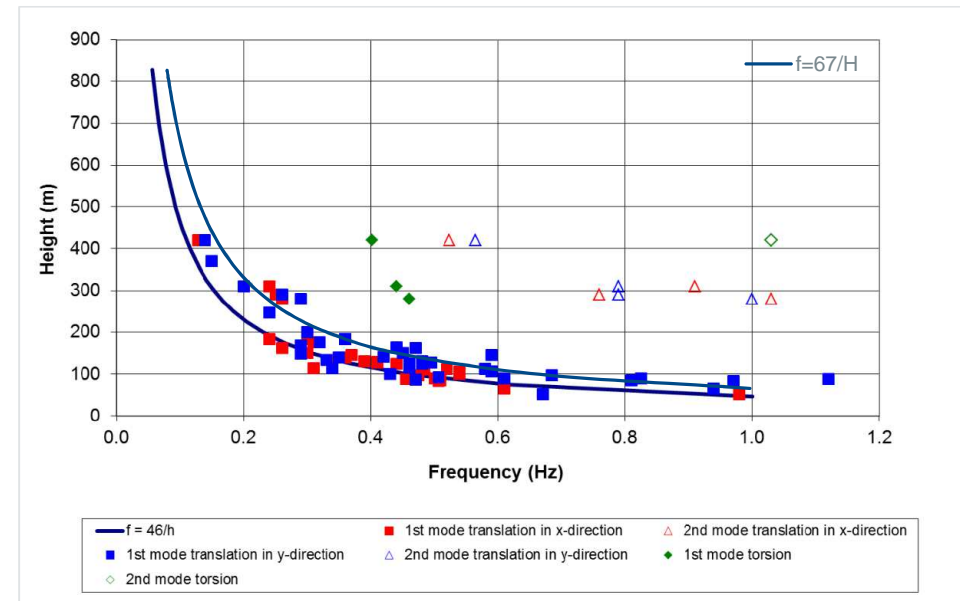


Abbildung 1. Gemessene Gebäudedefrequenzen [1] mit vom Autor darüber gelegter 67/H-Kurve.

# Windreaktion

- In Längswindrichtung wird das Gebäude nicht zum Schwingen in einer bestimmten Frequenz angeregt. Die Amplitude kann signifikant sein, jedoch sind die Auswirkungen auf das Aufzugssystem aufgrund des Fehlens von Resonanz moderat.
- Die Reaktion auf Querwind wird oft durch Wirbelablösung dominiert, die eine konstante Anregungskraft mit einer bestimmten Frequenz erzeugt. Wenn diese Frequenz nahe an der natürlichen Gebäudefrequenz liegt, beginnt das Gebäude mitzuschwingen. Wenn zu diesem Zeitpunkt auch im Aufzugssystem Resonanz vorhanden ist, Energie sammelt sich schnell in den Aufzugseilen, was zu großen Seilschwankungsamplituden führt.
- In der Entwicklungsphase eines Gebäudes können Lösungen gefunden werden, mit denen die durch die Wirbelablösung bewirkte Anregung reduziert und von der natürlichen Gebäudefrequenz bei höheren Windgeschwindigkeiten abgesetzt werden kann. Zu den Methoden gehören die Verjüngung der Gebäudeform, Aussparungen, Änderung der Eckenform und eine sich mit der Höhe ändernde Form oder die Änderung der dynamischen Merkmale des Gebäudes (einschließlich Masse, Steifigkeit, Eigenschwingungsformen und Dämpfung) [1,4].
- Falls dies nicht erfolgreich umgesetzt werden kann, muss mit Problemen auf der Gebäudeseite gerechnet werden

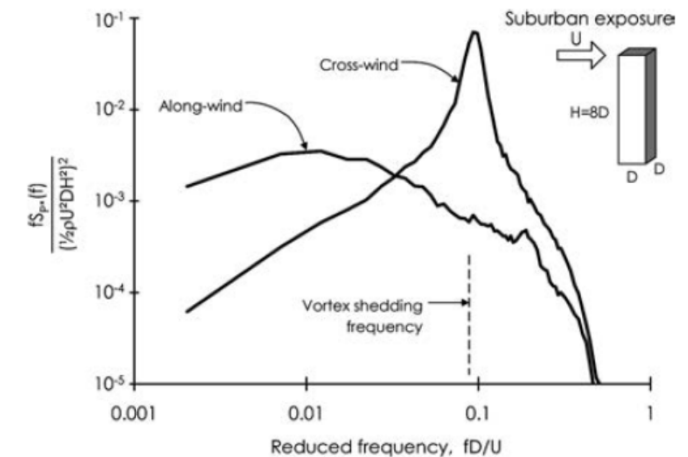


Abbildung 2. Aerodynamische Lastspektren [3].

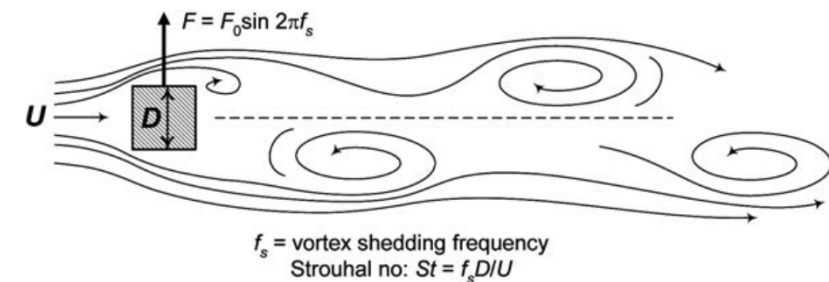


Abbildung 3. Wirbelablösung [3].

# Wind-Klimamodell

- Typische Wind-Klimamodelle basieren hauptsächlich auf Daten, die oberhalb der Bodenhöhe (ca. 10 m) gemessen werden.
- Die Windbelastung in größeren Höhen basiert eher auf Modellen als auf gemessenen Daten. Bei einem typischen Grenzschichtmodell wird angenommen, dass die Windgeschwindigkeit als eine Funktion der Höhe zunimmt. Dies funktioniert, wenn der Wind konstant aus der gleichen Richtung kommt, aber beispielsweise nicht bei Gewitterfallböen.
- Abhängig vom verwendeten Modell können die Anregungen und die Wiederholungsperioden bei intensiveren Gebäudebewegungen erheblich abweichen.
- Örtliche Behörden können außerdem Auflagen erteilen, die unter Umständen nicht mit den besten verfügbaren Winddaten übereinstimmen. Dies kann zu ungenau berechneten Windbelastungen oder der Erstellung von zwei parallelen Berechnungen führen - eine für die Behörden und eine andere, die auf der besten Schätzung basiert.





Scale	[km]	Time (Life Span)				
Marcoscale Global	4000 - 40 000				Westerlies Trade winds Long waves	
Marcoscale Synoptic	1000 - 4000			Cyclones Hurricanes		
Mesoscale	1 - 1000		Sea/Mountain Breeze Tornados Thunderstorms			
Microscale	< 1	Wind gust Building corner eddies				
		Seconds to minutes	Minutes to hours	Days to weeks	Weeks to seasons	

Abbildung 4. Kaskadierende Skalen in der Meteorologie [5,6].

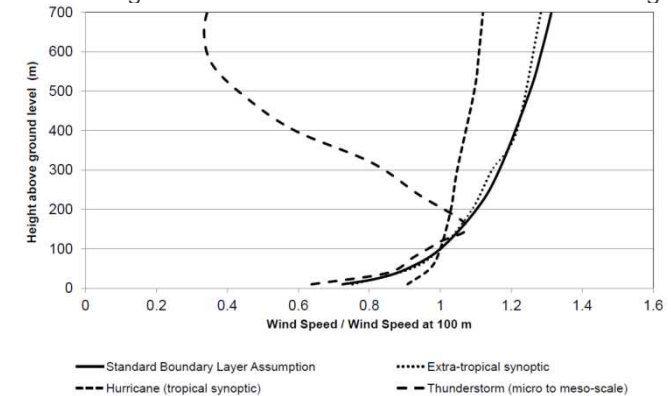


Abbildung 5. Windgeschwindigkeitsprofile nach Sturmtyp [5].

# Kriterien für den Komfort von Gebäudenutzern, Gebäudeauslenkungen und Amplituden



- Bei der Planung von hohen Gebäuden spielen Kriterien für den Komfort von Gebäudenutzern in den oberen Stockwerken eine zentrale Rolle.
- Bisher wurde der Komfort von Gebäudenutzern anhand von in Intervallen von 5 und 10 Jahren auftretenden Beeinträchtigungen gemessen.
- Der aktuelle Trend geht in Richtung des Wiederauftretens innerhalb eines Jahres, weil dadurch die Komfortbeeinträchtigung aufgrund eines regelmäßig auftretenden Ereignisses besser angegangen werden kann. Menschen neigen dazu, kurzfristig und unregelmäßig auftretende Beeinträchtigungen zu tolerieren, nicht jedoch regelmäßige Beeinträchtigungen. [4].
- Es gibt verschiedene Kriterien für Gebäudebewegungen (d.h. ISO6897-1984, ISO10137-2007, NBCC 1995, AS1170.2, CTBUH usw.).
- Diese Kriterien unterscheiden sich hinsichtlich der untersuchten Periode des Wiederauftretens und der bewerteten Vibration (effektiv im Vergleich zu Spitzenwert) sowie darin, ob die Vibrationsfrequenz berücksichtigt wird und ob die Kriterien von der Nutzung abhängen (Bürogebäude, Wohngebäude, Hotel).
- Für die Aufzugstechnik, macht die Fülle von Kriterien es schwierig zu wissen, unter welchen Bedingungen und bis zu welcher Gebäudehöhe der Aufzugsbetrieb garantiert werden muss.
- Bei extremem Wetter wird davon ausgegangen, dass Aufzüge geparkt werden, und daher haben die niedrigeren Schwellenamplituden viel mehr Einfluss auf die gängige Auslegung und den Betrieb von Aufzügen (z.B. auf jährlicher Ebene).
- Die Beschleunigungen für die Komfortanalyse sind entweder Berechnungen auf Grundlage von Aerodynamik-Datenbanken (oder Gebäudecodes) oder Windkanaltests. Windkanaltests zeigen besser die Auswirkung der Architektur benachbarter Gebäude sowie des lokalen Windklimas, es bleiben jedoch weiterhin Unsicherheiten insbesondere in Bezug auf das Wind-Klimamodell und die strukturellen Eigenschaften des Gebäudes.
- Während der Planungsphase eines Aufzugs sind die Einzelheiten, wie die Windreaktion des Gebäudes ermittelt wurde, oft nicht verfügbar.
- Die Aufzugsplanung muss auf den Anregungsstufen und den Wiederholungsperioden basieren, die im Windanalysebericht enthalten sind, auch wenn bekannt ist, dass er nicht alle Aspekte berücksichtigt, die für die Aufzugsplanung relevant sind.
- Die vom Erbauer bereitgestellten Daten sind ein wichtiger Parameter, der dazu beiträgt, die Schwere des Schwingungsproblems zu skalieren.



# Belästigungsfaktor

- Die mit starken Winden und Gebäudebewegungen verknüpfte Wiederholungsperiode ermöglicht keinen umfassenden Überblick ihrer Auswirkungen auf den Aufzugsbetrieb.
- In einem typischen Bürogebäude ist davon auszugehen, dass durchschnittlich 10 Stunden an 250 Tagen pro Jahr aktiv gearbeitet wird, was ungefähr 30 % der Gesamtzeit sind. Außerhalb dieses Zeitrahmens stellen Unterbrechungen des Aufzugsbetriebs eine weniger gravierende Störung dar.
- Darüber hinaus sind während der Arbeitszeiten morgendlicher Aufwärts-, Mittag- und abendlicher Abwärts-Spitzenverkehr am kritischsten anzusehen. Eine Reduktion der Aufzugsgeschwindigkeit während dieser Zeiten wird vom Nutzer als unangenehm empfunden. Die Zeiten mit Spitzenauslastung stellen nur etwa 6% der Gesamtzeit dar. Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit einer kurzzeitigen Geschwindigkeitssenkung (in der Regel < 15 min) im Zusammenhang mit Windbedingungen, wie zum Beispiel bei Gewittern (siehe Abbildung 6), nur in einem sehr unwahrscheinlichen Fall eine erhebliche Belästigung für den Nutzer bewirkt.
- In Wohngebäuden, Hotels, Krankenhäusern und anderen Gebäuden mit 24-stündigem Aufzugsbetrieb, die in Gebieten mit länger anhaltenden Windböen stehen (siehe Abbildung 7), kann eine vergleichbare Wiederholungsperiode als sehr viel störender empfunden werden.

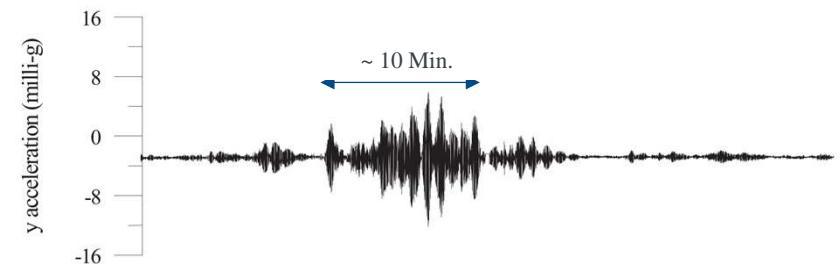


Abbildung 6. Zeitverlauf der Beschleunigung während eines Gewitters [7].

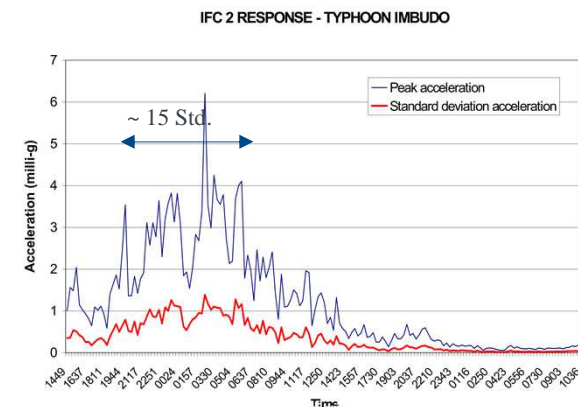


Abbildung 7. Gebäudereaktion während eines Taifuns [8]

# Resonanzberechnung





- In wissenschaftlichen Publikationen sind zahlreiche Aufsätze über Aufzugsseil-Schwingungssimulationen/-studien erschienen, die in drei Hauptansätze untergliedert werden können:
  - Analytische Methode
  - Finite-Elemente-Methode (FEM)
  - Finite-Differenz-Methode (FD)
- Die FEM wird sehr oft in Studien zu vibrierenden Strukturen verwendet und kann im Hochbau als Norm betrachtet werden, allerdings führt sie oft zu komplexen Simulationen.
- Bei FD-basierten Methoden werden die Ableitungen der geltenden Seilschwingungsgleichungen direkt genährt und es können einfache Zeitschritttechniken verwendet werden.
- Die drei verschiedenen Ansätze werden kurz beschrieben und ein Vergleich der Ergebnisse der Modelle wird vorgestellt.

# Schwingungsmodelle

## Analytisches Modell

- Das Modell wurde in einem Artikel des Magazins "Elevator World" [9] vorgestellt. Die modale Superposition und die Lagrange-Methode werden verwendet, um die dynamische Gleichung für vibrierende Seile abzuleiten und die entstandene Gleichung wird analytisch gelöst
- Eine der kritischen Vereinfachungen ist die Annahme, dass die Spannung im Seil konstant ist (der Wert ist die Spannung im Seil auf halber Länge).
- Die durch dieses Modell gewonnenen Ergebnisse werden als ungenau betrachtet. Dies zeigt sich eindeutig durch den Vergleich mit anderen Modellen.
- Es wäre möglich, die Genauigkeit der berechneten Resonanzen dieses Modells durch Änderung der Seilspannung zu erhöhen, wenn die natürlichen Frequenzen des Seils berechnet werden.
- Ein signifikanter Nachteil dieses Modells ist die Tatsache, dass die Form des vibrierenden Seils und die maximale Amplitude als Momentaufnahme festgehalten werden, sodass sich ausbreitende Wellen oder anwachsende Schwingungen mit diesem Verfahren nicht analysiert werden können.

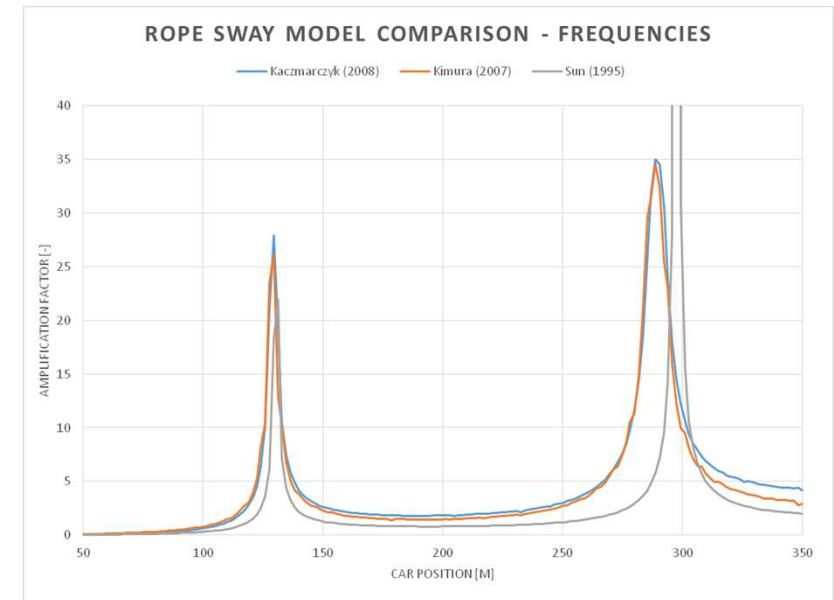


Abbildung 8. Ein Beispiel für mit diesen Tools ermittelte Ergebnisse zusammen mit Eingangsparametern:

Weg = 350 [m]

Schwingungsfrequenz des Gebäudes = 0,200 [Hz]

Ausgleichsseilgewicht pro Längeneinheit = 2,06 [kg/m]

Anzahl der Ausgleichsseile = 4

Ausgleichsseilspannungs-Gewichtsmasse = 3500 [kg]



# Schwingungsmodelle

## FEM-basiertes Modell

- Dieses Modell wird in einem Aufsatz von Stefan Kaczmarczyk [10] ausführlich erläutert. Dieses Modell ist beschränkt auf den Fall, in dem nur das obere Ende des Seils seitlich angeregt wird, d.h. eine typische Situation für Ausgleichsseile.
- Für Simulationen von stationären Fahrkörben sind die Ergebnisse von FEM- und FD-basierten Modellen praktisch identisch.

## Finites-Differenz-Modell

- Dieses Modell ist im "Japanese Journal of Environment and Engineering" [11] vorgestellt worden.
- Das Modell basiert auf der gedämpften Wellengleichung zweiter Ordnung.
- Ein eindeutiger Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die Auswirkungen von Seilen, die gegen Hindernisse oder Dämpfer prallen, leicht simuliert werden können. Die Berechnung ist außerdem relativ schnell für eine einfache Analyse.
- Die Nachteile dieses Ansatzes hängen mit numerischen Aspekten zusammen, die eventuell Instabilitäten oder Oszillationen bewirken können.
- Die Vorteile dieses Modelles sind, dass es Tragseil und Unterseile für stationäre und sich bewegendes Fahrkörbe simulieren kann.
- Routinen, die zum Beispiel die zusätzliche Spannung im Seil aufgrund von Verlagerungen berücksichtigen, können bei diesem Modell ebenfalls implementiert werden.

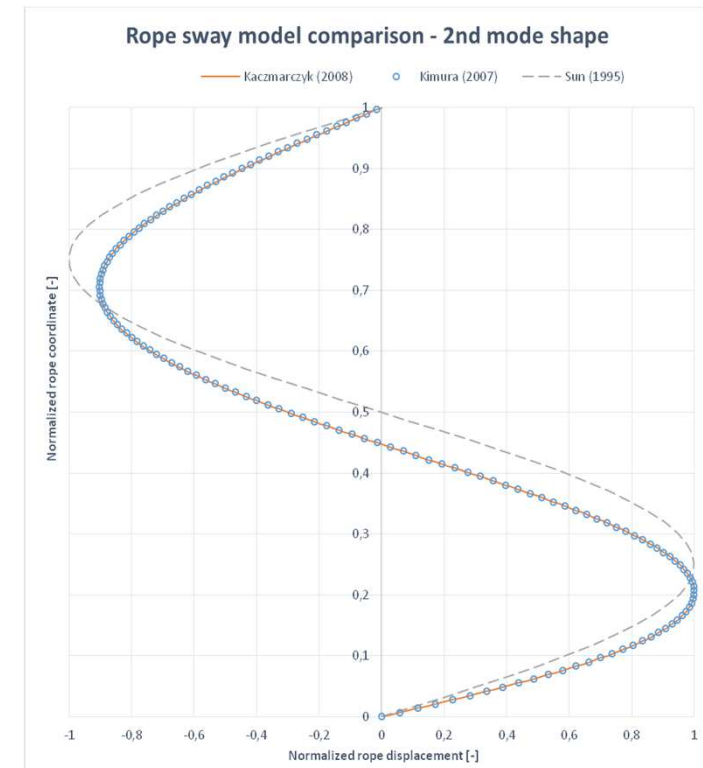


Abbildung 8. Schwingungsmodellvergleich, 2-Schwingungsform





Dedicated to People Flow™



- [1] Denoon, R., Scott, D., & Strobel, K. (2012). Challenging Paradigms in the Wind Engineering Design of Tall Buildings. CTBUH. Shanghai. Quelle: <http://www.ctbuh.org/LinkClick.aspx?fileticket=XvYDmYzaDkw%3d&tabid=3967&language=en-US>
- [2] Kwok, K., Tse, K., & Campbell, S. (2011). Field Measurements of Dynamic Properties of High-Rise Buildings. Advances in Structural Engineering Vol. 14, No. 6 , 1107 - 1128.
- [3] Dragovich, D., & Boggs, J. (2006). The Nature of Wind Loads and Dynamic Response.
- [4] Burton, M., Kwok, K., & Abdelrazaq, A. (2015). Wind-Induced Motion of Tall Buildings: Designing for Occupant Comfort. Internation Journal of High-Rise Buildings, Vol 4, No 1, March, 1-8.
- [5] Galsworthy, J., Phillips, D., Irwin, P., & Xie, J. (2012). Design of Asian Supertall Buildings for Wind. CTBUH. Shanghai. Quelle: <http://www.ctbuh.org/LinkClick.aspx?fileticket=jM5oKP%2bzRj8%3d&tabid=3967&language=en-US>
- [6] Horstmeyer, S. (2004). Scales of Atmospheric Motion. Quelle (18.9.2017) <http://www.shorstmeyer.com/msj/geo165/scales.html>
- [7] Denoon, R. (2015). Wind Engineering Challenges in the UAE. Quelle: The Institution of Structural Engineers: [https://www.istructe.org/downloads/near-you/uae/dubai-istructe-feb-2015\\_roy-denoon.pdf](https://www.istructe.org/downloads/near-you/uae/dubai-istructe-feb-2015_roy-denoon.pdf)
- [8] Denoon, R. (2014). Wind Engineering Beyond the Code. Quelle: Structural Engineers Association of Ohio: [http://seao.org/downloads/NCSEA\\_Conf\\_Info/2014\\_ncsea\\_slides\\_roy\\_denoon.pdf](http://seao.org/downloads/NCSEA_Conf_Info/2014_ncsea_slides_roy_denoon.pdf)
- [9] Sun, L. (1995). Building sway and elevator rope vibration. Elevator World, March, 133-135.
- [10] Kaczmarczyk, S. (2008). Dynamic Response of Elevator Ropes in Buildings under Wind Loading. Symposium on the Mechanics of Slender Structures (MoSS). Thessaloniki, Griechenland.
- [11] Kimura, H., Ito, H., & Nakagawa, T. (2007). Vibration Analysis of Elevator Rope – Forced Vibration of Rope with Time-Varying Length. Journal of Environment and Engineering. Vol. 2, No 1, 87-96.