

## Schwingende Balkone

Marcel Birchmeier, ZIEGLER CONSULTANTS, Zürich, CH

### 1 Einleitung

Balkone gehören zum festen Bestandteil einer modernen Wohnung. Um diesen zusätzlichen Wohnraum gut nutzen zu können, werden die Balkone nicht nur möglichst lang, sondern auch weit auskragend ausgeführt. Trotz den hohen statischen Anforderungen sollten die Balkone dennoch elegant aussehen, das heisst sie sollten möglichst schlank und stützenfrei sein. Solche Konstruktionen sind aber per se schwingungsanfällig. Erschwerend kommt hinzu, dass aufgrund architektonischer Details und bauphysikalischen Anforderungen kaum Platz für einen aus schwingungstechnischer Sicht ausreichender Anschluss des Balkons an das Gebäude vorhanden ist.



**Bild 1.1** Beispiele für auskragende Balkone (Bild links: [www.a4d.ch](http://www.a4d.ch), Bild rechts: [www.poolarch.ch](http://www.poolarch.ch))

Heute werden üblicherweise vorgefertigte Kragplattenanschlüsse (KPA) verwendet. Diese Anschlüsse bestehen aus Zug- und Druckbewehrung, Schubelemente und einer Wärmedämmung. Sie werden in die Schalung eingelegt und auf der Baustelle einbetoniert. Gegenüber der Stahlbetonplatte des Balkons und der Stahlbetondecke des Gebäudes weisen Kragplattenanschlüsse eine wesentlich geringere Steifigkeit auf. Die grosse Auskragung der Balkone und die geringe Steifigkeit der Anschlüsse wirken sich oftmals negativ auf das Schwingverhalten aus und können somit die Gebrauchstauglichkeit in Frage stellen.

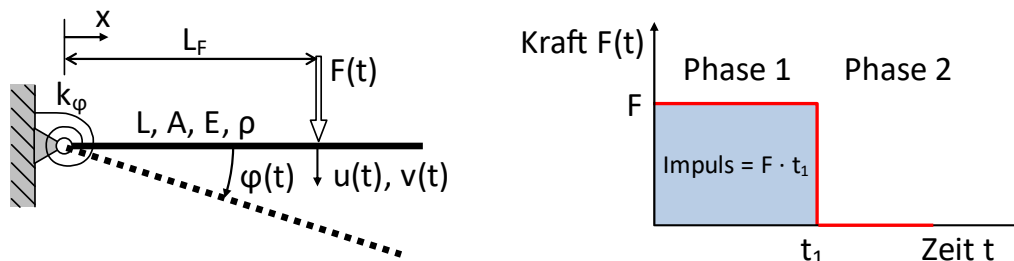
Bei der Bemessung von Balkonen sind daher nicht nur die Tragsicherheit und die Anforderungen an die Deformationen zu prüfen, sondern es ist auch abzuklären, ob Personeninduzierte Schwingungen nicht zu stark werden können. Dazu sind zwei Phänomene zu betrachten. Erstens kann es durch regelmässiges Gehen oder Hüpfen im Takt zu einem Resonanzphänomen kommen, d.h. immer grösser werdende Amplituden durch Anregung der Struktur in ihrer Resonanzfrequenz. Diesem Phänomen wird damit entgegengewirkt, dass die Eigenfrequenz oberhalb des hierfür kritischen Frequenzbereichs liegt. Die obere Grenze die-

ses Bereichs definiert sich durch die dritte Harmonische der Anregungsfrequenz, da höhere Harmonische kaum noch Energieanteile enthalten und daher vernachlässigt werden können. Dass Personen über längere Strecken über einen Balkon gehen oder rennen ist eher unrealistisch. Hingegen kann das Szenario Rennen oder Hüpfen an Ort, z.B. bei Gymnastikübungen oder bei gesellschaftlichen Anlässen durchaus eintreten. Daher sollte die Eigenfrequenz grösser als 7 bis 8 Hz sein. Das zweite Phänomen betrifft die Impulsanregung. Vor allem leichte Balkonkonstruktionen können durch einen Impuls, z.B. wenn sich eine Person schwingvoll auf einen Stuhl setzt, zu störenden Schwingungen angeregt werden. Problematisch wird es zusätzlich, wenn nicht nur der Balkon mit der sich setzenden Person zu schwingen beginnt, sondern auch gleich noch die vertikal benachbarten Balkone.

Ziel dieses Beitrags ist einerseits auf die baulastdynamische Problematik aufmerksam zu machen und andererseits eine einfache Berechnungsmethode vorzustellen, mit der es möglich ist, auch ohne komplexen Computermodelle Problemfälle im Voraus zu erkennen. Als Erstes wird das analytische Modell hergeleitet, dann die Vorgehensweise bei der Modellierung mit der Finite-Elemente Methode (FE) beschrieben, um anschliessend anhand von drei Beispielen die Resultate des analytischen und des FE-Modells mit Messresultaten zu vergleichen.

## 2 Analytisches Modell

Ein Kragplattenanschluss hat im Vergleich zur Stahlbetonplatte eine klar geringere Steifigkeit. Für die dynamische Betrachtung kann daher vereinfachend von einer starren Balkonplatte ausgegangen werden, die mit einer Rotationsfeder gelenkig mit dem Gebäude verbunden ist (siehe Bild 2.1).



**Bild 2.1** Analytisches Modell und Rechteck-Impuls

Dieses vereinfachte Modell entspricht einem Ein-Massen-Schwinger. Die Bewegungsgleichung kann mit dem Drallsatz hergeleitet werden und lautet

$$\ddot{\varphi}(t) + \frac{k_{\varphi}}{I_c} \varphi(t) = \frac{F(t) \cdot L_F}{I_c} \quad (1)$$

- mit
- $k_{\varphi}$ : Rotationssteifigkeit der Feder [N·m/rad]
  - $I_c = M \cdot L^2/3$ : polares Massenträgheitsmoment bezüglich  $x = 0$  [ $m^2 \cdot kg$ ]
  - $L$ : Länge des Stabes [m]
  - $M = L \cdot A \cdot \rho$ : Masse [kg]
  - $A$ : Querschnittsfläche [ $m^2$ ]
  - $F$ : Anregungskraft [N]
  - $L_F$ : Distanz Gebäude – Ort der Anregung [m]

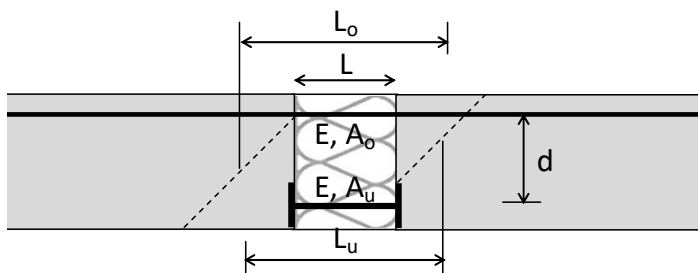
Die Eigenfrequenz dieses Systems (in Hz) beträgt bekanntlich

$$f = \frac{1}{2\pi} \omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_\varphi}{I_c}} \quad (2)$$

mit  $\omega$ : Kreisfrequenz [rad/s]

Aus dieser Gleichung sieht man, dass je steifer die Feder, desto höher die Eigenfrequenz und je länger und schwerer der Stab, desto tiefer die Eigenfrequenz. Bereits hier kann man sagen, dass ein Balkon möglichst steif ausgeführt werden sollte, damit der Eigenfrequenz über dem kritischen Bereich bei harmonischer Anregung durch Personen zu liegen kommt. Da oftmals eine steifere Ausführung mit einer grösseren Plattenstärke einhergeht, ist zu prüfen, ob mit der geplanten Massnahme die Eigenfrequenz tatsächlich erhöht wird.

Bei Kragplattenanschlüssen stellt sich die Frage, welche Steifigkeit eingesetzt werden soll. Bild 2.2 zeigt einen Querschnitt durch einen typischen Kragplattenanschluss mit den Zugstäben oben und den Druckplatten unten. Es gibt auch Kragplattenanschlüsse mit identischer Zug- und Druckbewehrung, damit sie auf der Baustelle nicht verkehrtherum eingebaut werden können. Die Schubelemente werden für die folgenden Ausführungen vernachlässigt.



**Bild 2.2** Schematischer Querschnitt durch Kragplattenanschluss

Geht man von einer ebenen Verformung aus und nutzt sowohl das Gleichgewicht der Kräfte und Momente wie auch die kinematischen Relationen und die Stoffgleichungen kann die äquivalente Rotationssteifigkeit  $k_\varphi$  berechnet werden zu

$$k_\varphi = \frac{k_o \cdot k_u}{k_o + k_u} d^2 \quad (3)$$

mit  $k_o = EA_o/L_o$ : Zugsteifigkeit [N/m]  
 $k_u = EA_u/L_u$ : Drucksteifigkeit [N/m]  
 $d$ : statische Höhe [m]  
 $E$ : Elastizitätsmodul der Zug- und Druckelemente [N/m<sup>2</sup>]  
 $A_{o/u}$ : Querschnittsfläche der Zug- bzw. Druckelemente [m<sup>2</sup>]  
 $L_{o/u}$ : effektive Länge oben bzw. unten [m]

Es kann davon ausgegangen werden, dass nicht bereits ab dem Rand der Betonplatte der volle Betonquerschnitt zur Biegesteifigkeit beiträgt, sondern erst ab einer gewissen Tiefe. Zur Bestimmung der unbekanntenen effektiven Länge der Zügelemente wird daher angenommen, dass die Spannungen in den Zugstäben über eine Länge entsprechend dem 30-fachen eines Stabdurchmessers auf den Beton übertragen werden, was der Einbindelänge im Fließzustand ent-

spricht. Für die Berechnung der Zugsteifigkeit wird davon nur die Hälfte mitberücksichtigt. Gleiches gilt für die Druckplatten, wobei wegen der grossen Auflagefläche nur die Hälfte des 2-fachen der Plattenabmessung miteinbezogen wird. Die auf diese Weise berechnete Rotationssteifigkeit eines typischen Kragplattenanschlusses beträgt im Vergleich zur Steifigkeit des anschliessenden Balkons nur einige Prozent.

Neben der Eigenfrequenz muss auch die impulsartige Anregung betrachtet werden. Für einen Ein-Massen-Schwinger und einen Rechteck-Impuls kann dies analytisch gelöst werden. Ein Rechteck-Impuls (siehe Bild 2.1) kann in zwei Phasen unterteilt werden: In Phase 1 mit der Dauer  $t_1$  wirkt die volle konstante Last  $F$  und in der darauffolgenden Phase 2 wirkt keine Last. Für die Phase 1 setzt sich die allgemeine Lösung der Gleichung 1 aus der homogenen Lösung  $\varphi_h = a \cdot \sin(\omega t) + b \cdot \cos(\omega t)$  und der partikulären Lösung  $\varphi_p = F \cdot L_F / k_\varphi$  zusammen. Die partikuläre Lösung entspricht gerade der statischen Auslenkung infolge der konstanten Last  $F$ . Mit den Anfangsbedingungen  $\varphi(0) = \dot{\varphi}(0) = 0$  ergibt sich die allgemeine Lösung für  $\varphi(t)$  für die Phase 1 zu

$$\varphi_1(t) = \frac{F \cdot L_F}{k_\varphi} (1 - \cos(\omega t)) \quad (4)$$

Der Vorgang in Phase 1 entspricht im Prinzip einem freien Ausschwingen aus einer Anfangsauslenkung  $-F \cdot L / k_\varphi$  um die statische Auslenkung infolge der Last  $F$ .

Die Phase 2 entspricht einer freien Schwingung um die Ruhelage ohne Last  $F$ , d.h. um  $\varphi = 0$ , und mit den Anfangsbedingungen, die durch die Bewegung am Ende der Phase 1 bestimmt werden. Die Bewegungsgleichung für  $\varphi(t)$  für Phase 2 lautet somit

$$\varphi_2(t) = \frac{\dot{\varphi}_1(t_1)}{\omega} \sin(\omega t) + \varphi_1(t_1) \cos(\omega t) \quad (5)$$

Die maximale Amplitude von  $\varphi(t)$  hängt nun primär von der Dauer  $t_1$  des Impulses im Vergleich zur Periode  $T$  des Ein-Massen-Schwingers ab. Dauert der Stoss länger als  $T/2$ , so tritt das Maximum während der Phase 1 auf und der dynamische Verstärkungsfaktor beträgt 2. Dies lässt sich leicht veranschaulichen, wenn man wie oben erwähnt die Phase 1 als eine freie Schwingung um die statische Auslenkung inkl. Last  $F$  mit Anfangsauslenkung betrachtet. Für kürzere Stossbelastungen tritt das Maximum für  $\varphi(t)$  in Phase 2 auf und beträgt

$$\varphi_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\dot{\varphi}_1(t_1)}{\omega}\right)^2 + (\varphi_1(t_1))^2} \quad (6)$$

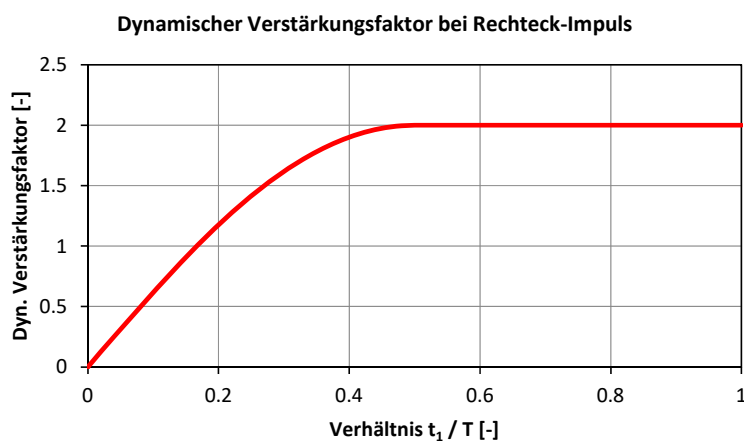
Nach Umformungen und mit  $\omega = 2\pi/T$  erhält man

$$\varphi_{\max} = 2 \frac{F \cdot L_F}{k_\varphi} \sin\left(\frac{\pi \cdot t_1}{T}\right) \quad (7)$$

Der dynamische Verstärkungsfaktor  $D = \varphi_{\max}/\varphi_{\text{stat}}$  für  $t_1 \leq T/2$  beträgt somit

$$D = 2 \sin\left(\frac{\pi \cdot t_1}{T}\right) \quad (8)$$

Bild 2.3 zeigt den Verstärkungsfaktor als Funktion des Verhältnisses zwischen Impuls-Dauer und Periode des Ein-Massen-Schwingers. Daraus lässt sich rasch ablesen, welche Auslenkung ein Stoss verursachen wird. Es ist zu beachten, dass die Dämpfung bei der Herleitung des Verstärkungsfaktors vernachlässigt wurde. Dies ist allerdings kein wesentlicher Mangel, da einerseits die Dämpfung eines Balkens mit Kragplattenanschluss sehr klein ist und andererseits die maximale Auslenkung nach sehr kurzer Zeit erreicht wird, bevor durch Dämpfung viel Energie absorbiert werden kann.



**Bild 2.3** Verstärkungsfaktor D für Rechteck-Impuls

Die maximale vertikale Verschiebung bei  $x = L_F$  ergibt sich nun zu

$$u_{\max} = \frac{F \cdot L_F^2}{k_\varphi} D \quad (9)$$

Mit  $v = \omega \cdot u$  kann die maximale vertikale Schwinggeschwindigkeit (in m/s) bei  $x = L_F$  angegeben werden zu

$$v_{\max} = \omega \frac{F \cdot L_F^2}{k_\varphi} D \quad (10)$$

Sowohl die Eigenfrequenz  $\omega$  wie auch der dynamische Verstärkungsfaktor D sind von der Rotationssteifigkeit  $k_\varphi$  abhängig. Ersetzt man nun bei D das  $\pi/T$  durch  $\omega/2$  und  $\omega$  durch  $\sqrt{k_\varphi/I_c}$  und nimmt man an, dass  $T \gg t_1$  ist und somit  $\sin(\pi t_1/T) \approx (\pi t_1/T)$  gilt, dann erhält man für die maximale Schwinggeschwindigkeit (in m/s)

$$v_{\max} = 3 \frac{F \cdot L_F^2}{L^2 \cdot M} t_1 \quad (11)$$

Hiermit lässt sich zeigen, dass eine steifere Ausführung des Kragplattenanschlusses keinen Einfluss auf die maximale Schwinggeschwindigkeit hat. Vielmehr müsste man die Masse des Balkons erhöhen.

Um die maximale Schwinggeschwindigkeit mit Gleichung 10 oder 11 zu bestimmen muss eine Last  $F$  angenommen werden. Als sehr hilfreich zur Beurteilung von impulsartig angeregten Schwingungen verursacht durch Personen hat sich der „Heel-Drop“ erwiesen. Ein „Heel-Drop“ einer Person mit 70 kg lässt sich in erster Näherung als Rechteck-Impuls mit einer Kraft von 3.5 kN während der Dauer von 0.01 s beschreiben, wobei Dauer und Kraft anhand einer geeigneten Versuchseinrichtung experimentell bestimmt worden sind.

Die Gleichung 11 eignet sich gut, um mit wenig Aufwand abzuschätzen, ob bei einem auskragenden Balkon die Schwingungen bei Impulsanregungen problematisch sind und weitergehende Untersuchungen zum Beispiel mit einem Finite-Elemente Modell erfordern.

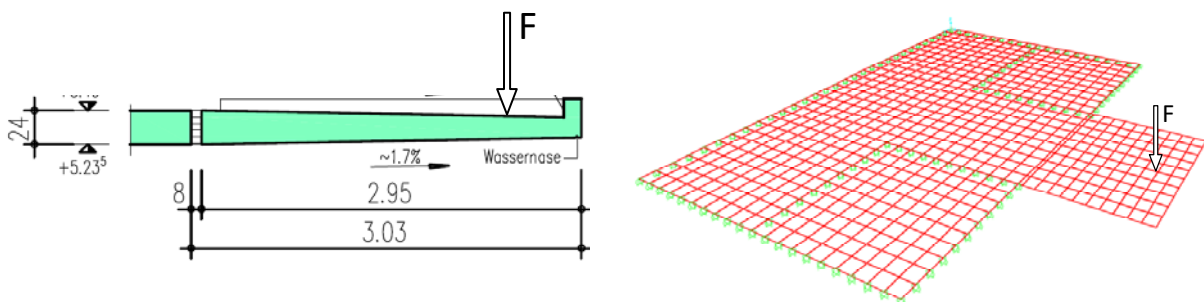
### 3 Finite-Elemente Modell

Für die FE-Berechnung wurde das FE-Programm SAP 2000-17 verwendet. Die Kragplattenanschlüsse wurden – gleich wie der Beton – als Schalenelement modelliert. Zur Berücksichtigung der reduzierten Biegesteifigkeit der Kragplattenanschlüsse wurde deren E-Modul so gewählt, dass die auf die Spaltbreite  $d$  bezogene Biegesteifigkeit  $E \cdot I / L_{KPA}$  der Biegesteifigkeit des Kragplattenanschlusses entspricht. Für den Beton wurde ein E-Modul von  $4.2 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$  verwendet.

Einerseits wurde mit dem FE-Programm eine Modalanalyse durchgeführt um die Eigenfrequenzen zu bestimmen, andererseits wurde der Schwingungsverlauf bei einer impulsartigen Anregung berechnet. Hierzu wurde eine Belastungsfunktion definiert, die dem bereits beim analytischen Modell verwendeten Rechteck-Impuls eines „Heel-Drops“ entspricht.

### 4 Beispiele

Das erste Beispiel behandelt einen 3 m auskragenden Balkon mit einer Anschlussstärke von 24 cm. Bild 4.1 zeigt einen Querschnitt des Balkons und das entsprechende FE-Modell. In Tabelle 4.1 ist die Biegesteifigkeit des Kragplattenanschlusses gemäss Gleichung 3 und gemäss Lieferanten-Angaben zusammengestellt. Ersteres wird für das analytische Modell verwendet, das Andere für die FE-Berechnung. Ebenfalls ist der Faktor zwischen Kragplattenanschluss und Beton angegeben.



**Bild 4.1** Querschnitt und FE-Modell

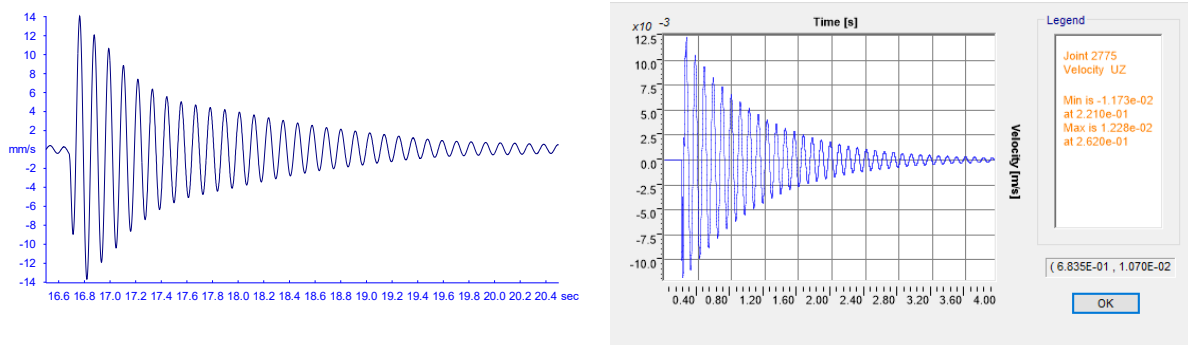


**Tabelle 4.1** Biegesteifigkeit bezogen auf 1 m

	Steifigkeit [kN·m/(rad·m <sup>4</sup> )]	Faktor KPA/Beton <sup>(*)</sup> [-]
Berechnet mit Gl. 3	15'500	0.026
Lieferanten-Angabe	37'400	0.062

(\*) berechnet mit  $E_{\text{Beton}} = 4.2 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$

Die Berechnung mit dem analytischen Modell ergibt eine Eigenfrequenz von 9.6 Hz, die FE-Berechnung mit den Herstellerangaben 9.3 Hz (siehe Tabelle 4.2). Die Messung ergab eine Eigenfrequenz von 8.8 Hz. Es zeigt sich, dass sowohl mit dem analytischen Modell wie auch mit dem FE-Modell (mit Herstellerangaben) plausible Resultate erzielt werden. Bild 4.2 zeigt den gemessenen und den mit dem FE-Modell berechneten Schwingungsverlauf bei Anregung mit einem „Heel-Drop“. Die gemessene maximale Schwinggeschwindigkeit beträgt 13.7 mm/s (Mittelwert über 5 „Heel-Drops“), mit dem FE-Modell (mit Herstellerangaben) erhält man 12.3 mm/s. Das analytische Modell ergibt eine maximale Schwinggeschwindigkeit von 12.6 mm/s, was sehr gut mit der Messung übereinstimmt. In Tabelle 4.2 sind alle Resultate zusammengefasst, zusätzlich sind Resultate eines baugleichen Balkons mit einer Anschlussstärke von 26 cm angegeben. Auch hier stimmen die Resultate des analytischen Modells und der Messung gut überein.



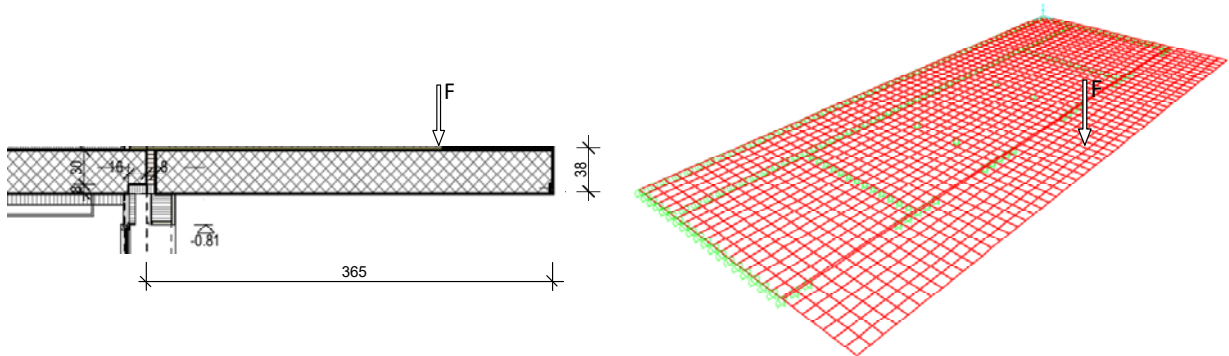
**Bild 4.2** Gemessener (links) und berechneter (rechts) Schwingungsverlauf bei Anregung mit „Heel-Drop“

**Tabelle 4.2** Eigenfrequenzen und maximale Schwinggeschwindigkeiten bei „Heel-Drop“

	Balkon 24 cm		Balkon 26 cm	
	1. Eigenfrequenz [Hz]	V <sub>max</sub> [mm/s]	1. Eigenfrequenz [Hz]	V <sub>max</sub> [mm/s]
Analytisches Modell	9.6	12.6	10.5	11.9
FE-Modell	9.3	12.3	-	-
Messung	8.8	13.7	9.3	12.9

Das zweite Beispiel behandelt einen 3.65 m auskragenden Balkon mit einer Anschlussstärke von 38 cm. Speziell ist hier die Abmessung des Balkons in Längsrichtung mit 29 m. Bild 4.3 zeigt einen Querschnitt des Balkons und das entsprechende FE-Modell. In Tabelle 4.3 ist die

Biegesteifigkeit des Kragplattenanschlusses gemäss Gleichung 3 und gemäss Lieferanten-Angaben zusammengestellt. Ersteres wird wiederum für das analytische Modell verwendet, das andere für die FE-Berechnung.



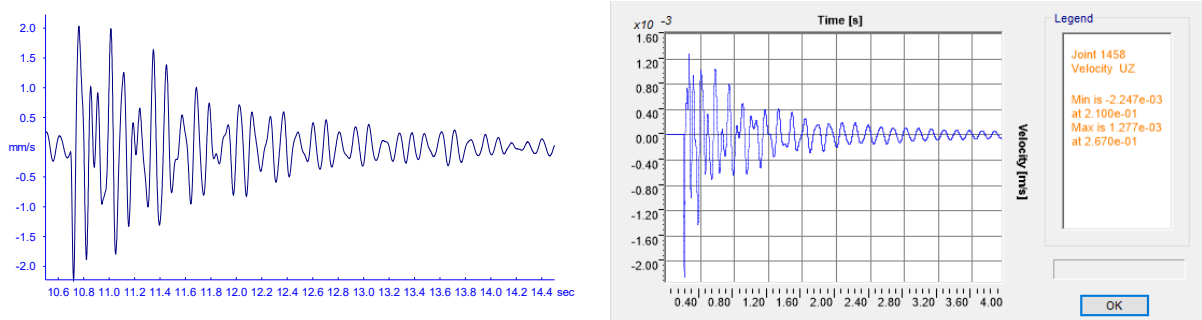
**Bild 4.3** Querschnitt und FE-Modell

**Tabelle 4.3** Biegesteifigkeit

	Steifigkeit [kN·m/(rad·m <sup>2</sup> )]	Faktor KPA/Beton <sup>(*)</sup> [-]
Berechnet mit Gl. 3	40'400	0.017
Lieferanten-Angabe	95'000	0.040
	78'000	0.032
	42'000	0.017

(\*) berechnet mit  $E_{\text{Beton}} = 4.2 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$

Die Berechnung mit dem analytischen Modell ergibt eine Eigenfrequenz von 8.3 Hz, die FE-Berechnung mit den Herstellerangaben ebenfalls 8.3 Hz (siehe Tabelle 4.4). Die Messung ergab eine Eigenfrequenz von 8.8 Hz. Auch hier bestätigen die Messergebnisse die Berechnungsmethoden. Bild 4.4 zeigt den gemessenen und den mit dem FE-Modell berechneten Schwingungsverlauf bei Anregung mit einem „Heel-Drop“. Die gemessene maximale Schwinggeschwindigkeit beträgt 2.2 mm/s, mit dem FE-Modell (mit Herstellerangaben) erhält man 2.2 mm/s. Für das analytische Modell wurde angenommen, dass nur etwa ein Viertel der gesamten Balkonmasse durch einen „Heel-Drop“ angeregt wird. Damit ergibt sich eine maximale Schwinggeschwindigkeit von 2.3 mm/s, was sehr gut mit der Messung übereinstimmt. In Tabelle 4.4 sind alle Resultate zusammengefasst.



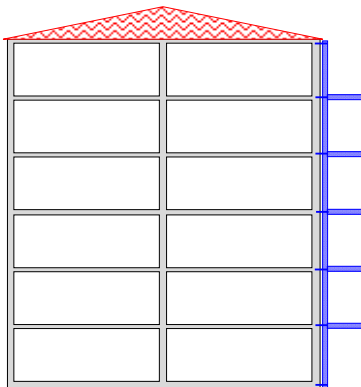
**Bild 4.4** Gemessener (links) und berechneter (rechts) Schwingungsverlauf bei Anregung mit „Heel-Drop“



**Tabelle 4.4** Eigenfrequenzen und maximale Schwinggeschwindigkeiten bei „Heel-Drop“

	1. Eigenfrequenz [Hz]	$v_{\max}$ [mm/s]
Analytisches Modell	8.3	2.3
FE-Modell	8.3	2.2
Messung	8.8	2.2

Beim dritten Beispiel handelt es sich um auskragende Balkone in Stahlbauweise. Die Balkonplatten werden durch zwei vertikale Stahlträger gehalten, die ihrerseits jeweils auf der Höhe der Geschossdecken mit dem Haus verbunden sind (siehe Bild 4.5). Mit der Annahme, dass sich bei dynamischer Belastung vor allem die Vertikalträger verformen und nicht die Balkonplatte, kann das analytische Modell zur Bestimmung der maximalen Schwinggeschwindigkeit angewendet werden. Dieses ergibt für die Anregung mit einem „Heel-Drop“ 73 mm/s. Die Messung ergab Werte über 50 mm/s, was klar als nicht gebrauchstauglich einzustufen ist. Dies zeigt, dass Gleichung 11 für eine erste Abschätzung der maximalen Schwinggeschwindigkeit verursacht durch eine impulsartige Anregung angewendet werden kann.


**Bild 4.5** Schematischer Querschnitt

## 5 Schlussfolgerung

Anhand eines einfachen analytischen Modells eines auskragenden Stahlbeton-Balkons mit Kragplattenanschluss lassen sich sowohl die Eigenfrequenz als auch die maximale Schwinggeschwindigkeit bei impulsartiger Anregung bestimmen. Die gute Übereinstimmung mit der FE-Berechnung und vor allem mit den tatsächlich gemessenen Werten bestätigt diese Methode. Allerdings sollte die Handrechnung nur für eine erste Abschätzung benutzt werden um zu erkennen, ob weitere Untersuchungen erforderlich sind, da es sich bei diesem Modell doch um eine sehr starke Vereinfachung handelt. Auch ist immer zu prüfen, ob das vereinfachte Modell überhaupt auf die vorhandene Situation angewendet werden darf. Falls Stützen oder Anschlüsse über Eck vorhanden sind, darf die Vereinfachung nicht gemacht werden. Allerdings sind solche Balkone oftmals unproblematisch bezüglich Schwingungen.

Zur Beurteilung der Eigenfrequenz bei harmonischer Anregung durch Personen kann die dritte Harmonische der Anregungsfrequenz herangezogen werden. Da Rennen oder Hüpfen an Ort eine für Balkone durchaus realistische Belastung darstellt, sollte die Eigenfrequenz grös-

ser 7 bis 8 Hz sein. Zur Beurteilung der maximalen Schwingungsamplituden existieren keine Richtwerte. Erfahrungsgemäss sind maximale Schwinggeschwindigkeiten bei einem „Heel-Drop“ von bis zu 10 mm/s kein Problem und werden nicht als störend empfunden. Auch auf einer normalen Geschossdecke in Stahlbeton werden bei einem „Heeldrop“ gut und gerne 2 mm/s erreicht.

Problematischer wird es, wenn vertikal benachbarte Balkone ebenfalls in Schwingung geraten. Die oftmals identische Ausführung von übereinanderliegenden Balkonen bedeutet, dass die Balkone in der Frequenz optimal aufeinander abgestimmt sind und somit Schwingungen leicht übertragen werden. Für Personen auf einem benachbarten Balkon ist die Ursache der Schwingung jedoch nicht erkenntlich, entsprechend werden bereits geringere Schwingungen als störend empfunden. Allerdings ist man auf einem Balkon toleranter als in geschlossenen Räumen. Eine maximale Schwinggeschwindigkeit von 3 mm/s verursacht durch einen „Heel-Drop“ auf einem benachbarten Balkon dürften aber auch hier als störend empfunden werden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass mit einer einfachen Handrechnung Problemfälle bei auskragenden Balkonen mit Kragplattenanschluss erkannt werden können. Eine FE-Berechnung mit realistischen Rotationssteifigkeiten für die Kragplattenanschlüsse ergibt ebenfalls plausible Resultate. Dabei sind immer zwei Aspekte zu betrachten: Die harmonische Anregung, bei der die Eigenfrequenz des Balkons die entscheidende Grösse darstellt und die impulsartige Anregung, bei der die daraus resultierende maximale Schwinggeschwindigkeit des Balkons entscheidend ist.