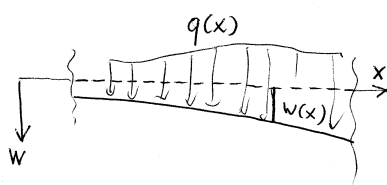


**I. Balkendifferentialgleichung 4. Ordnung**



Verlauf der neutralen Faser eines gebogenen Balkens ("Biegelinie") berechnet sich entweder aus der Gleichung

$$EI_z w''(x) = -M_z(x) \quad (1)$$

- wenn das Biegemoment als Funktion der Koordinate im voraus bestimmt werden kann (d.h. für statisch bestimmte Systeme) oder aus der *Balkendifferentialgleichung 4. Ordnung*

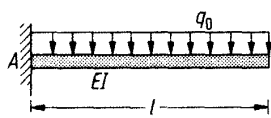
$$(EI_z w''(x))'' = q(x). \quad (2)$$

Diese Gleichung kann auch an statisch unbestimmte Systeme angewandt werden. Die vier Integrationskonstanten müssen aus vier Randbedingungen bestimmt werden.

**II. Beispiele**

Wir untersuchen drei gleiche Balken konstanter Biegesteifigkeit  $EI$  unter konstanter Streckenlast  $q_0$  bei unterschiedlicher Lagerung.

**B1.** Dieser Kragbalken ist statisch bestimmt.



Man könnte zunächst den Momentenverlauf berechnen und dann Gleichung (1) anwenden.

In den meisten Fällen ist es aber einfacher, die Gleichung (2) zu benutzen:

$$EIw^{IV} = q_0.$$

Ihre vierfache Integration ergibt:

$$EIw''' = -Q = q_0 x + C_1,$$

$$EIw'' = -M = \frac{1}{2} q_0 x^2 + C_1 x + C_2,$$

$$EIw' = \frac{1}{6} q_0 x^3 + \frac{1}{2} C_1 x^2 + C_2 x + C_3,$$

$$EIw = \frac{1}{24} q_0 x^4 + \frac{1}{6} C_1 x^3 + \frac{1}{2} C_2 x^2 + C_3 x + C_4.$$

Die Randbedingungen lauten:  $w(0) = 0,$

$$w'(0) = 0, \quad M(l) = -EIw''(l) = 0,$$

$$Q(l) = -EIw'''(l) = 0.$$

Aus den ersten beiden folgt  $C_3 = 0, C_4 = 0.$

Die letzten zwei Randbedingungen lauten

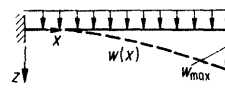
$$q_0 l + C_1 = 0,$$

$$\frac{1}{2} q_0 l^2 + C_1 l + C_2 = 0.$$

Daraus folgt  $C_1 = -q_0 l, C_2 = \frac{1}{2} q_0 l^2.$

Die Biegelinie ist somit

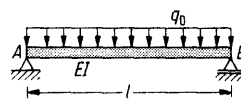
$$w(x) = \frac{q_0 x^2}{EI} \left( \frac{1}{24} x^2 - \frac{1}{6} l x + \frac{1}{4} l^2 \right).$$



Die maximale Absenkung wird im Endpunkt erreicht und ist gleich

$$w(l) = \frac{q_0 l^2}{EI} \left( \frac{1}{24} l^2 - \frac{1}{6} l^2 + \frac{1}{4} l^2 \right) = \frac{1}{8} \frac{q_0 l^4}{EI}.$$

**B2.** Auch dieser Balken ist statisch bestimmt gelagert. Dennoch ist es auch in diesem Fall einfacher, die Gleichung (2) zu benutzen. Da



die Streckenlast dieselbe ist, wie im Beispiel 1, ist auch die allgemeine Lösung dieselbe. Der einzige Unterschied liegt in den Randbedingungen:

$w(0) = 0, w(l) = 0, M(0) = 0 \Rightarrow w''(0) = 0,$

$$M(l) = 0 \Rightarrow w''(l) = 0.$$

$$EIw(0) = C_4 = 0, \quad EIw''(0) = C_2 = 0,$$

$$EIw(l) = \frac{1}{24} q_0 l^4 + \frac{1}{6} C_1 l^3 + C_3 l = 0,$$

$$EIw''(l) = \frac{1}{2} q_0 l^2 + C_1 l = 0,$$

$$C_1 = -\frac{1}{2} q_0 l, \quad C_3 = \frac{1}{24} q_0 l^3.$$

Die Biegelinie ist

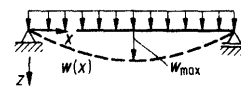
$$w(x) = \frac{1}{EI} \left( \frac{1}{24} q_0 x^4 - \frac{1}{12} q_0 l x^3 + \frac{1}{24} q_0 l^3 x \right)$$

$$= \frac{q_0}{24EI} (x^4 - 2lx^3 + l^3 x)$$

Die maximale Durchbiegung wird in der Mitte

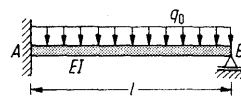
$x = l/2$  erreicht und ist

gleich



$$w(l/2) = \frac{q_0}{24EI} \left( \frac{1}{16} l^4 - \frac{1}{4} l^4 + \frac{1}{2} l^4 \right) = \frac{5}{384}$$

**B3.** Der unten abgebildete Balken ist statisch unbestimmt gelagert. Schnittlasten (unter anderem das Biegemoment) können daher nicht



alleine aus den Gleichgewichtsbedingungen berechnet werden. Die Benutzung von Gleichung (2) ist in diesem Fall

der einzig mögliche Weg zur Berechnung der Durchbiegung. Wir nehmen an, daß der Balken in Abwesenheit der Streckenlast spannungsfrei gelagert war.

Da die Streckenlast dieselbe ist, wie im Beispiel 1, ist auch die allgemeine Lösung dieselbe. Der einzige Unterschied liegt wieder in den Randbedingungen:

$$w(0) = 0, \quad w'(0) = 0, \quad w(l) = 0,$$

$$M(l) = -EIw''(l) = 0.$$

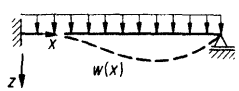
$$EIw(0) = C_4 = 0, \quad EIw'(0) = C_3 = 0,$$

$$EIw(l) = \frac{l^2}{2} \left( \frac{1}{12} q_0 l^2 + \frac{1}{3} C_1 l + C_2 \right) = 0,$$

$$EIw''(l) = \frac{1}{2} q_0 l^2 + C_1 l + C_2 = 0.$$

Aus den letzten beiden Gleichungen folgt

$$C_1 = -\frac{5}{8}q_0l, \quad C_2 = \frac{1}{8}q_0l^2.$$



Für die Biegelinie ergibt sich somit

$$w(x) = \frac{q_0}{EI} \left( \frac{1}{24}x^4 - \frac{5}{48}lx^3 + \frac{1}{16}l^2x^2 \right).$$

Zusammen mit der Biegelinie haben wir auch die Verläufe von  $w'(x)$ , dem Biegemoment

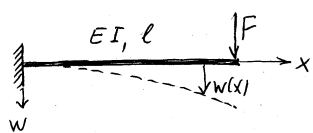
$$M(x) = -\frac{1}{8}q_0(4x^2 - 5lx + l^2)$$

und der Querkraft  $Q(x) = -\frac{1}{8}q_0(8x - 5l)$  bestimmt. Daraus lassen sich die Lagerreaktionen ablesen:

$$A = Q(0) = \frac{5}{8}q_0l, \quad B = -Q(l) = \frac{3}{8}q_0l,$$

$$M^{(A)} = M(0) = -\frac{1}{8}q_0l^2.$$

**B4.** Wir lösen jetzt noch einmal die Aufgabe, die wir schon einmal durch Integration der Balkengleichung zweiter Ordnung gelöst haben.



Gegeben sei ein links fest eingespannter Balken. An

seinem rechten Ende greift eine Kraft  $F$  an. Zu bestimmen ist die Biegelinie und den Neigungswinkel im Angriffspunkt der Kraft.

Lösung: Auch in diesem Fall ist die oben erhaltene allgemeine Lösung korrekt, nur mit

$$q_0 = 0: EIw^{IV} = 0,$$

$$EIw''' = -Q = C_1,$$

$$EIw'' = -M = C_1x + C_2,$$

$$EIw' = \frac{1}{2}C_1x^2 + C_2x + C_3,$$

$$EIw = \frac{1}{6}C_1x^3 + \frac{1}{2}C_2x^2 + C_3x + C_4.$$

Die Randbedingungen sind fast wie im ersten Beispiel:  $w(0) = 0, w'(0) = 0,$

$M(l) = -EIw''(l) = 0$ ; nur für die Querkraft am rechten Ende gilt jetzt  $Q(l) = -EIw'''(l) = F$ .

$$EIw(0) = C_4 = 0, \quad EIw'(0) = C_3 = 0,$$

$$EIw''(l) = C_1l + C_2 = 0,$$

$$EIw'''(l) = -Q = C_1 = -F.$$

Daraus folgt  $C_2 = Fl$ . Für die Biegelinie ergibt sich

$$w(x) = \frac{F}{EI} \left( -\frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{2}lx^2 \right)$$

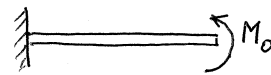
und für den Neigungswinkel (eigentlich Tangens des Neigungswinkels)  $w'(x) = \frac{F}{EI} \left( -\frac{1}{2}x^2 + lx \right)$ . Die

Absenkung des Angriffspunktes der Kraft ist

gleich  $w(l) = \frac{Fl^3}{3EI}$ . Für den Neigungswinkel des

rechten Endes ergibt sich  $\theta(l) \approx w'(l) = \frac{1}{2} \frac{Fl}{EI} l^2$ .

**B5. Biegelinie unter Einwirkung eines Momentes:**



Die allgemeine Lösung lautet

$$EIw''' = -Q = C_1,$$

$$EIw'' = -M = C_1x + C_2,$$

$$EIw' = \frac{1}{2}C_1x^2 + C_2x + C_3,$$

$$EIw = \frac{1}{6}C_1x^3 + \frac{1}{2}C_2x^2 + C_3x + C_4.$$

Die Randbedingungen lauten:  $w(0) = 0,$

$$w'(0) = 0, \quad M(l) = -EIw''(l) = M_0;$$

$$Q(l) = -EIw'''(l) = 0. \text{ Daraus folgt:}$$

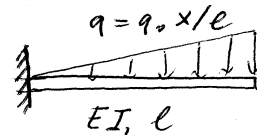
$$EIw(0) = C_4 = 0, \quad EIw'(0) = C_3 = 0,$$

$$EIw''(l) = C_1l + C_2 = -M_0,$$

$$EIw'''(l) = -Q = C_1 = 0.$$

Biegelinie ist eine Parabel:  $w(x) = -\frac{1}{2} \frac{M_0}{EI} x^2$ .

**Beispiel 6.** Auf einen links fest eingespannten



Balken wirkt eine linear steigende Streckenlast. Zu bestimmen ist die Biegelinie.

Lösung: Die Balkendifferentialgleichung vierter Ordnung lautet  $EIw^{IV} = q_0x/l$ .

Ihre vierfache Integration ergibt:

$$EIw''' = -Q = \frac{1}{2}q_0x^2/l + C_1,$$

$$EIw'' = -M = \frac{1}{6}q_0x^3/l + C_1x + C_2,$$

$$EIw' = \frac{1}{24}q_0x^4/l + \frac{1}{2}C_1x^2 + C_2x + C_3,$$

$$EIw = \frac{1}{120}q_0x^5/l + \frac{1}{6}C_1x^3 + \frac{1}{2}C_2x^2 + C_3x + C_4.$$

Die Randbedingungen lauten:  $w(0) = 0,$

$$w'(0) = 0, \quad M(l) = -EIw''(l) = 0,$$

$$Q(l) = -EIw'''(l) = 0.$$

Aus den ersten beiden folgt  $C_3 = 0$  und  $C_4 = 0$ .

Die letzten zwei Randbedingungen lauten

$$EIw'''(l) = \frac{1}{2}q_0l + C_1 = 0,$$

$$EIw''(l) = \frac{1}{6}q_0l^2 + C_1l + C_2 = 0.$$

Daraus folgt  $C_1 = -\frac{1}{2}q_0l$  und  $C_2 = \frac{1}{3}q_0l^2$ .

$$w(x) = \frac{1}{EI} \left( \frac{1}{120}q_0x^5/l - \frac{1}{12}q_0lx^3 + \frac{1}{6}q_0l^2x^2 \right).$$

**B7.**

Die allgemeine Lösung:

$$w' = \frac{1}{2}C_1x^2 + C_2x + C_3$$

$$w = \frac{1}{6}C_1x^3 + \frac{1}{2}C_2x^2 + C_3x + C_4.$$

Randbedingungen  $w(0) = 0, w'(0) = 0,$

$$w(l) = -h, \quad w'(l) = 0.$$

$$w(x) = h \left( 2(x/l)^3 - 3(x/l)^2 \right).$$

