



**DLR-IB-FA-BS-2016-225**

**Optimale Auslegung von ein- und  
zwei Freiheitsgrad Biegeaktoren**

**Studienarbeit**

Ozan Tamer  
Björn Timo Kletz



**DLR**

**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**





Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

DLR-IB-FA-BS-2016-225

## Optimale Auslegung von ein- und zwei Freiheitsgrad Biegeaktoren

### Zugänglichkeit:

Stufe 1

Braunschweig, *Oktober, 2016*

Der Bericht umfasst: 96 Seiten

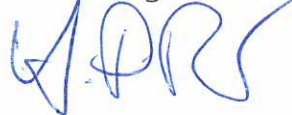
Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Abteilungsleiter:

Prof. Dr.-Ing. H. P. Monner



Autoren:

O. Tamer



Betreuer:

B. T. Kletz



DLR

Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt



# Inhaltsverzeichnis

Originalaufgabenstellung .....	I
Eidesstattliche Erklärung.....	II
Danksagungen .....	III
Zusammenfassung .....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	1
Abbildungsverzeichnis .....	3
Tabellenverzeichnis.....	5
Verwendete Formelzeichen.....	6
1.Einleitung .....	7
2. Grundlagen .....	8
3. Konstruktion der Prüfeinrichtung.....	10
3.1. Entwurf für 1FHG-Systems .....	10
3.2. Entwurf für 2FHG-Systems .....	11
4. Berechnung.....	12
4.1. Die neutrale Phase für nicht symetrisches System.....	12
4.2.Sandwichtheorie für Balken .....	14
4.3. Die analytische Lösung für ein Freiheitsgradsystem .....	16
4.4. Die analytische Lösung für zwei Freiheitsgradsystem.....	21
5. Simulation .....	28
6. Versuchsdurchführung .....	33
6.1 1FHG-System.....	34
6.2 2FHG-System.....	35
7. Die Ergebnisse.....	37
7.1 Blockierkräfte.....	39

7.2 Auslenkungen.....	47
7.3 2FHG-System Versuchstand .....	59
8. Zusammenfassung .....	63
Quellenverzeichnis .....	64
Anhang .....	65

Abbildung 1 Definition der Achsenrichtungen und Polarisierung P. [PI-Ceramics] .....	8
Abbildung 2. Der Entwurf für 1-FHG-System.....	10
Abbildung 3. Der Entwurf für 2-FHG-System.....	11
Abbildung 4. Darstellung des neutralen Faser [Sinapius 13].....	12
Abbildung 5. Definition der Sandwichstruktur [1] .....	14
Abbildung 6. Modelle für Berechnung.....	16
Abbildung 7. Gebiete für Schnittdiagramm .....	17
Abbildung 8. Berechnung der Größe für Balken nach Länge und Dicke .....	20
Abbildung 9. Modell für 2FHG-System .....	21
Abbildung 10. Schnittdiagramm für erstes Gebiet.....	22
Abbildung 11. Schnittdiagramm für zweites Gebiet.....	23
Abbildung 12. Schnittdiagramm für drittes Gebiet.....	24
Abbildung 13. Schnittdiagramm für viertes Gebiet .....	25
Abbildung 14. Schnittdiagramm für fünftes Gebiet.....	26
Abbildung 15. Darstellung des Koordinatensystems eines Flächenaktors in der Simulation..	30
Abbildung 16. Ausdehnung des Flächenaktors unter Anregung.....	30
Abbildung 17. Ausdehnung des Flächenaktors unter Anregung mit Faktorrechnung .....	31
Abbildung 19. Darstellung des Flächenaktors gepatchten Balkens.....	31
Abbildung 18. Auslenkungssimulation des Balkens mit Flächenaktor unter Anregung .....	32
Abbildung 20. Kraftsensor KD24s.....	33
Abbildung 21. Versuchstand, 1. Signalgenerator, 2. Verstärker, 3. Kraftsensor, .....	34
Abbildung 22. Darstellung für die Position des Kraftsensors .....	35
Abbildung 23. Der Versuchstand, 1. Balken, 2. Kraftsensor, 3. Masse ,.....	35
Abbildung 24. Der Versuchstand, 1. Lasersensor, 2. Kraftsensor, 3. Masse .....	36
Abbildung 25. Analytische Ergebnisse für Balken unter Anregung von zwei unterschiedlichen Aktoren (Blau: P-876.A12, Rot: P-876.A15).....	37
Abbildung 26. Messpunkte des Balkens .....	38
Abbildung 27. Kraftwerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter +400V.....	39
Abbildung 29. Kraftwerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter +400V.....	40
Abbildung 30. Kraftwerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter +400V.....	40
Abbildung 31. Kraftwerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter - 100V.....	41
Abbildung 32. Kraftwerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter - 100V.....	42
Abbildung 33. Kraftwerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter - 100V.....	42
Abbildung 34 Kraftwerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter +1000V.....	43
Abbildung 35. Kraftwerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter +1000V.....	44

Abbildung 36. Kraftwerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter +1000V.....	44
Abbildung 37. Kraftwerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter -250V.....	45
Abbildung 38. Kraftwerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter -250V.....	46
Abbildung 39. Kraftwerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter -250V.....	46
Abbildung 40. Auslenkungswerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter +400V.....	48
Abbildung 41. Auslenkungswerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter +400V.....	48
Abbildung 42. Auslenkungswerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter +400V.....	49
Abbildung 43. Auslenkungswerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter -100V. ....	51
Abbildung 44. Auslenkungswerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter -100V. ....	51
Abbildung 45. Auslenkungswerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter -100V. ....	52
Abbildung 47. Auslenkungswerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter +1000V.....	54
Abbildung 46. Auslenkungswerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter +1000V.....	54
Abbildung 48. Auslenkungswerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter +1000V.....	55
Abbildung 49. Auslenkungswerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter -250V. ....	57
Abbildung 50. Auslenkungswerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter -250V. ....	57
Abbildung 51. Auslenkungswerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter -250V. ....	58
Abbildung 52. Bewegungen der Masse unter unter Anregung der unterschiedlichen Anregungen .....	59



Tabelle 1. 1 FHG P A12 +400V, der Kraftsensor ist oben. ....	39
Tabelle 2. 1 FHG P A12 -100V, der Kraftsensor ist unten. ....	41
Tabelle 3. 1 FHG P A15 +1000, der Kraftsensor ist oben. ....	43
Tabelle 4. 1 FHG P A15 -250V, der Kraftsensor ist unten. ....	45
Tabelle 5. 1 FHG P A12 +400V, der Kraftsensor ist oben. ....	47
Tabelle 6. 1 FHG P A12 -100V, der Kraftsensor ist unten. ....	50
Tabelle 7. 1 FHG P A15 +1000V, der Kraftsensor ist oben. ....	53
Tabelle 8. 1 FHG P A15 -250V, der Kraftsensor ist unten. ....	56
Tabelle 9. P A15, 1 mm Balken, vier Fälle .....	60
Tabelle 10. P A15, 0,5 mm Balken, vier Fälle .....	61
Tabelle 11. P A12, 0,3 mm Balken, vier Fälle .....	62

## Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$E_a$	$N/m^2$	E-Modul des Aktuators
$E_s$	$N/m^2$	E-Modul des Balkens
$h_a$	$m$	Dicke des Aktuators
$h_s$	$m$	Dicke des Balkens
$h^*$	$m$	Abstand von der Oberfläche des Balkens bis zur neutralen Achse
$EI$	$Nm^2$	Biegesteifigkeit
$\varepsilon$	-	Dehnung
$\sigma$	$N/m^2$	Spannung
$M$	$Nm$	Moment
$P_A$	$N$	Aktuatorkraft
$z_a$	$m$	Abstand Aktuatorkraft zur Spannungsnulllinie des Balkens
$l$	$m$	Länge
$w$	$m$	Balkenauslenkung
$b$	$m$	Breite

## 1. Einleitung

In dieser Studienarbeit geht es um die Feststellung der Blockierkraft und die Auslenkung eines Balkens, auf dem ein piezoelektrischer Flächenwandler appliziert ist. Die Arbeit besteht aus drei Teilen.

In dem ersten Teil wird eine Prüfeinrichtung entwickelt. Mit dieser Konstruktion beabsichtigt man, eine Blockierkraft zu dem von dem Aktuator angeregten Balken aufzubringen und zu messen. So kann der Balken zur Anfangsposition zurückgedrückt werden und mit dem Kraftsensor am Hebelarm kann gemessen werden, wie viel Kraft man dafür braucht.

Im zweiten Teil beschäftigt man sich mit einem System, das ein Freiheitsgrad (FHG) hat. In diesem Fall benutzt man einen Balken, der auf einer Seite fest eingespannt und auf der anderen Seite frei ist. Um den Balken anzuregen benutzt man zwei unterschiedliche Piezoaktuatoren. Bei unterschiedlichen Längen misst man die Auslenkung und die Blockierkraft.

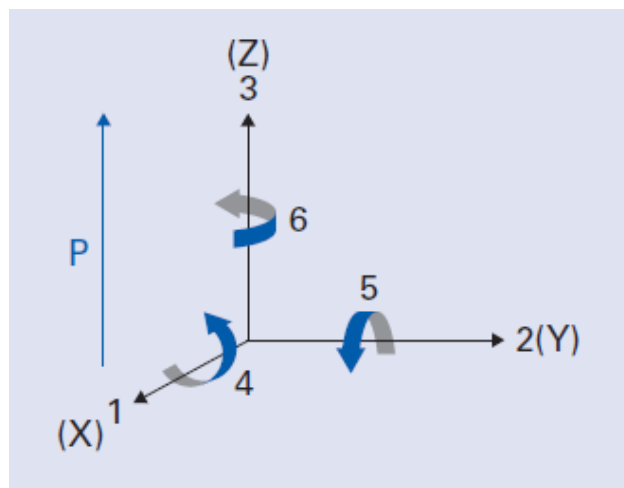
In dem dritten Teil der Arbeit handelt es sich um ein System, das zwei Freiheitsgraden besitzt. Dabei benutzt man zwei eingespannte Balken, die in der Mitte mit einer Masse aus Stahl verbunden sind. An der Masse misst man die unterschiedlichen Auslenkungen und die Blockierkräfte, die man braucht, um das System zum Ausgangszustand bringen zu können.

Ziel der Arbeit ist es die optimale Balkendicke für die gegebenen piezoelektrischen Flächenwandler P-876.A12 und P-876.A15 der Firma Pi-Ceramics zu finden, um 1. maximale Auslenkung, 2. maximale Kraft, 3. maximale Arbeit an bestimmten Stellen des Balkens abrufen zu können.

## 2. Grundlagen

Piezoelektrizität beschreibt die Eigenschaft eines Materials unter einer elektrischen Spannung mechanischen Druck aufzubauen. Mit diesem Material kann man eine elektrische Spannung durch Druck bekommen genauso wie man mit Hilfe elektrischer Spannung einen Druck bekommen.

Die Entstehung der elektrischen Spannung unter mechanischer Verformung wird als Sensoreffekt (direkter piezoelektrischer Effekt) beschrieben. Man nennt die Eigenschaft als Aktuatoreffekt (inverser piezoelektrischer Effekt), wenn sich das Material aufgrund einer anliegenden elektrischen Spannung verformt.



**Abbildung 1** Definition der Achsenrichtungen und Polarisation P. [PI-Ceramics]

Die mathematische Darstellung des elektromechanischen Verhaltens ist wie unten

$$D_i = d_{i\lambda} \sigma_\lambda + \varepsilon_{ik}^\sigma E_i \text{ (Sensoreffekt)} \quad (2.1)$$

Der erste Index an der Elastizitätskonstanten  $s$  bezeichnet die Dehnungsrichtung und der zweite Index bezeichnet die Spannungsrichtung. Die Richtungsindizes sind in Abbildung dargestellt.

Der erste Index an der piezoelektrischen Konstanten  $d$  bezeichnet die Richtung des angelegten elektrischen Feldes und der zweite Index bezeichnet die Richtung der erzeugten Dehnung.

$$\varepsilon_\lambda = s_{\lambda\mu}^E \sigma_\mu + d_{i\lambda} E_i \text{ (Aktuatoreffekt)} \quad (2.2)$$

$$\lambda, \mu = 1 \dots 6 ; i, k = 1 \dots 3$$

Der erste Index an der Elastizitätskonstanten  $\varepsilon$  bezeichnet die Richtung der Ladungsverschiebung und der zweite Index bezeichnet die Richtung des elektrischen Feldes.

Der erste Index an der piezoelektrischen Konstanten  $d$  bezeichnet die Richtung der erzeugten Ladungsverschiebung, der zweite Index bezeichnet die Richtung der angelegten mechanischen Spannung. [Sinapius2013]

$\varepsilon$  : Dehnung [-]

$s$  : Nachgiebigkeitskonstante [ $\text{m}^2/\text{N}$ ]

$\sigma$  : Mechanische Spannung [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]

$d$  : Piezoelektrische Ladungskonstante [ $\text{m}/\text{V}$ ]

$E$  : Elektrische Feldstärke [ $\text{V}/\text{m}$ ]

$D$  : Elektrische Verschiebungsdichte [ $\text{C}/\text{m}^2$ ]

$\varepsilon_{ik}^\sigma$  : Dielektrizitätskonstante [ $\text{F}/\text{N}$ ]

### 3. Konstruktion der Prüfeinrichtung

Der erste Schritt der Arbeit ist, einen Prüfstand für die Versuche zu konstruieren. So kann man die simulierten und berechneten Größen mit den tatsächlich auftretenden Größen vergleichen.

#### 3.1. Entwurf für 1FHG-Systems

Das Bedürfnis nach einer Prüfeinrichtung für 1FHG-System entsteht, damit die Berechnungs- und Simulationsergebnisse mit gemessenen Größen verglichen werden können. Dank dieser Einrichtung wird es möglich, die Bewegung des Balkens unter Anregung der Flächenpiezoaktuatoren von oben und unten zu überprüfen. Eine andere Funktion der Struktur ist, dass man bei unterschiedlichen Längen Kraft und Auslenkung messen kann.

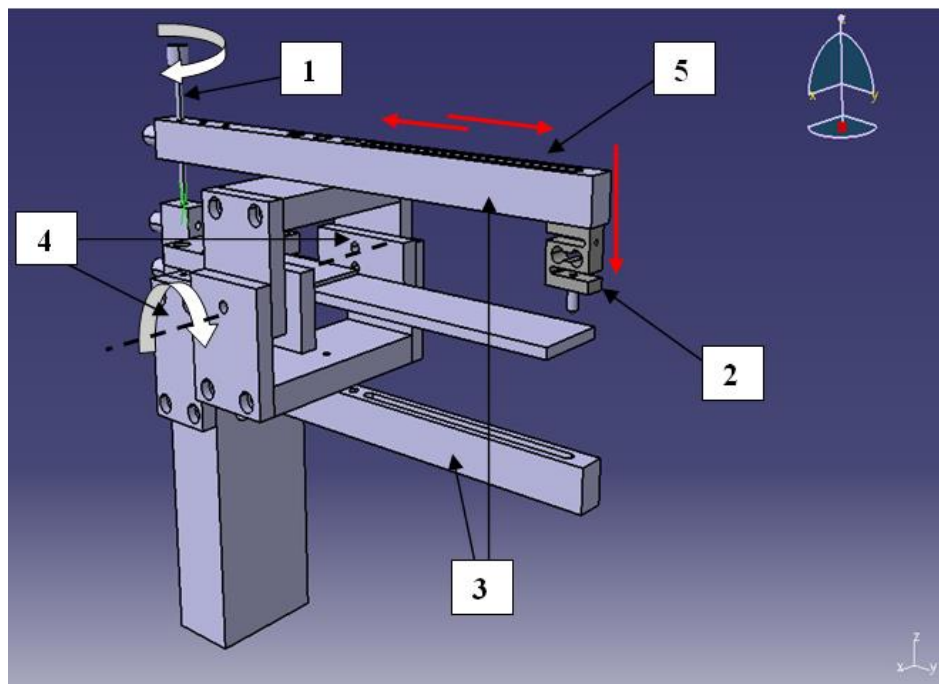


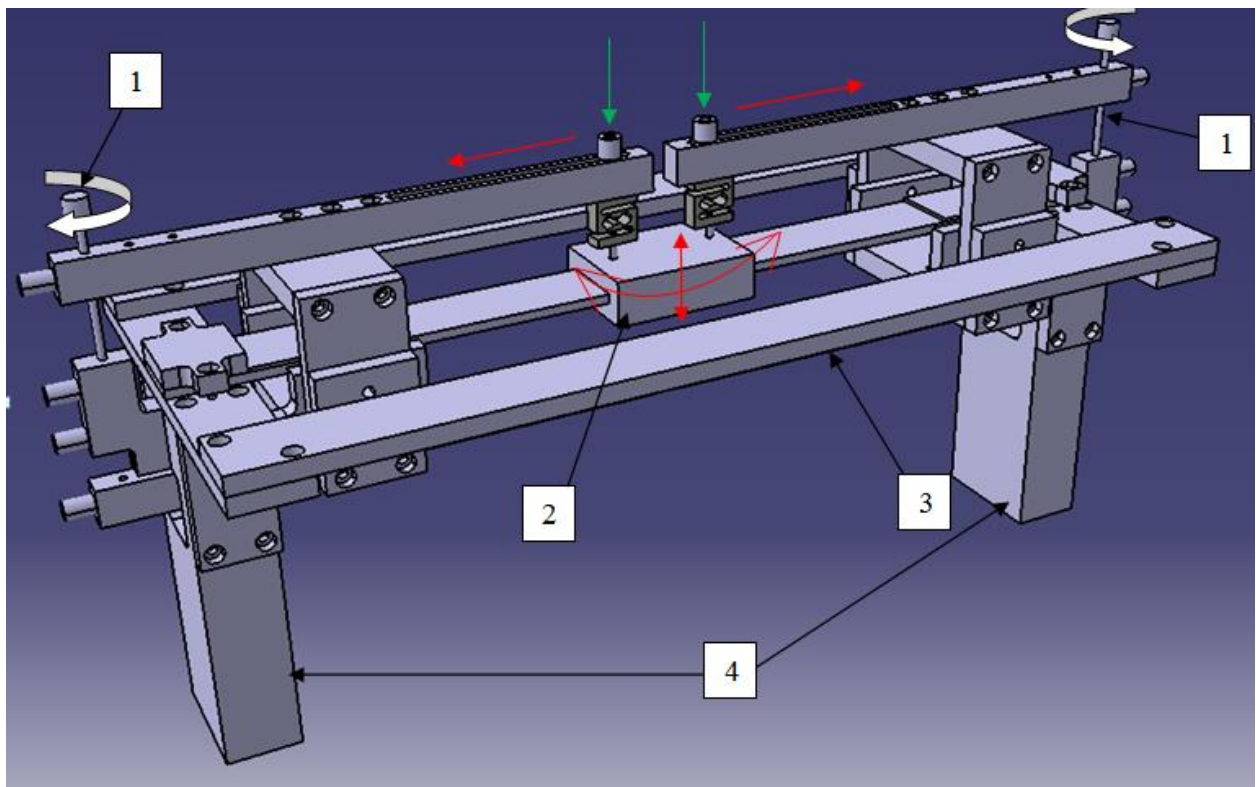
Abbildung 2. Der Entwurf für 1-FHG-System

In der Abbildung sieht man den Entwurf, der für ein FHG entwickelt wurde. Mit Nummer 3 stellt man die Hebelarme dar, auf denen der Kraftsensor (Nummer 2) geschraubt ist. Mit der Drehung der Schraube (Nummer 1) bewegt sich der Sensor in vertikaler Richtung. Auf dem Balken ist der Piezoaktor geklebt. Unter der Anregung des Aktuators biegt der Balken. Die Drehachsen der Teilen (Nummer 4), auf denen die Hebelarme montiert sind, treffen zusammen, wo Aktuator geklebter Balken ist. Auf den

Hebelarmen befinden sich Langlöcher. Die Absicht der Langlöcher ist, dass man den Kraftsensor links oder rechts bewegen kann, damit bei unterschiedlichen Längen die Blockierkraft gemessen werden kann. Nicht dargestellt ist ein Lasertriangulator, der die Auslenkung des Balkens misst.

### 3.1. Entwurf für 2FHG-System

Mit der Prüfeinrichtung für 2FHG-System wird bezweckt, dass Auslenkung und Kraft unter Anregung der Flächenpiezoaktuatoren gemessen werden. Außerdem entsteht hier eine Drehbewegung an der Masse, die die Balken mit Schrauben verbindet. Die Drehbewegung entsteht, wenn die Aktuatoren gegenphasig angesteuert werden. Die Langlöcher am Hebelarm bietet die Möglichkeit, Messergebnisse an unterschiedlichen Punkten zu bestimmen.



**Abbildung 3.** Der Entwurf für 2-FHG-System

In dieser Abbildung verbindet eine aus Stahl bestehende Masse (Nummer 2) die Balken. Mit Hilfe des Rahmens (Nummer 3) bleibt der Abstand zwischen den Ständern (Nummer 4) konstant, was hilfreich für die Montage ist. Außerdem werden die Auf- und Abbau der Balken mit Masse einfacher. Auch in dieser Version braucht man bewegliche Kraftsensoren, damit man an unterschiedlichen Punkten den Hub und die

Kraft messen kann. Mit den Schrauben (Nummer 1) lässt sich die Position der Sensoren in vertikal einstellen. Nicht dargestellt ist ein Lasertriangulator, der die Auslenkung des Balkens misst.

## 4. Berechnung

Die Aufgabe wurde zuerst als analytisch untersucht. In der Arbeit hat man ein nicht symmetrisches System, so ist die Momentnulllinie nicht in der Mitte des Balkens. Da der Flächenaktuator auf dem Balken geklebt ist, ändert sich die Biegesteifigkeit des Teils, wo es den Aktuator gibt. Aus diesen Gründen muss man einige Größe bestimmen, damit man das Problem analytisch gelöst werden kann.

### 4.1. Die neutrale Phase für nicht symmetrisches System

Hier beschäftigt man sich mit einem System, das nur von einer Seite angeregt wird. Das verursacht, dass die Biegelinie des Balkens von der Mittelachse verschiebt. Aus diesem Grund muss der Hebelarm für Moment bestimmt werden. In der Abbildung sieht man Balken mit Flächenpiezoaktuator. Das Ziel ist die Berechnung der Abstand ( $h^*$ ) von der Oberfläche des Balkens bis zur Nulllinie.

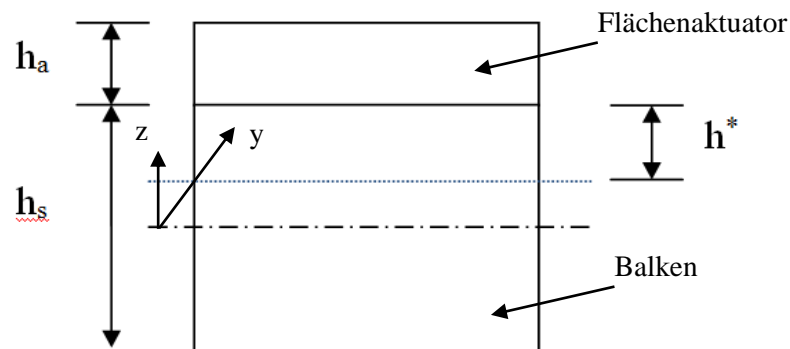


Abbildung 4. Darstellung des neutralen Faser [Sinapius 13]



Die Erklärungen für die Formelzeichen in der Abbildung 9. sind unten definiert.

$h_a$ : Dicke des Aktuators

$h^*$ : Dicke des Balkens

$h_s$ : Dicke des Balkens

Das Biegemoment

$$M_y = \int_z z \sigma_s dA + \int_z z \sigma_a dA \quad (3.1)$$

$dA = b \cdot dz$  (Die Breiten des Balkens und Flächenaktuators sind gleich)

$\sigma = E\varepsilon$  (Die Dehnungen sind gleich)

Das System hat nur einen Piezoaktuator, der auf der einen Seite des Balkens geklebt ist.

Deshalb liegt die Drehachse nicht in der Mitte.

Die Gleichung für die neutrale Faser.

$$\int_{-h^*-h_a}^{-h^*} z E_a b dz + \int_{-h^*}^{h_s-h^*} z E_s b dz = 0 \quad (3.2)$$

$$\alpha_Y = \frac{E_a}{E_s}$$

$E_a$ : E-Modul des Aktuators

$\sigma$ : Spannung

$E_s$ : E-Modul des Balkens

$\varepsilon$ : Dehnung

$$\alpha_Y \int_{-h^*-h_a}^{-h^*} z b dz + \int_{-h^*}^{h_s-h^*} z b dz = 0 = \frac{1}{2} \alpha_Y (h^{*2} - (h^* + h_a)^2) + \frac{1}{2} ((h_s - h^*)^2 - (h^*)^2) \quad (3.3)$$

$$h^* = \frac{h_s^2 - \alpha_Y h_a^2}{2\alpha_Y h_a + 2h_s}$$

Der Abstand für das Moment, das von dem Aktuator erzeugt wird.

$$z_a = h_a + h^*$$

## 4.2. Sandwichtheorie für Balken

Der Piezoaktuator geklebte Balken hat eine unterschiedliche Biegesteifigkeit im Vergleich zu dem reinen Balken. Um das berechnen zu können, braucht man die Sandwichtheorie.

Die axiale Dehnung wird angenommen, dass sie sich über den Querschnitt variiert[Zenkert1995].

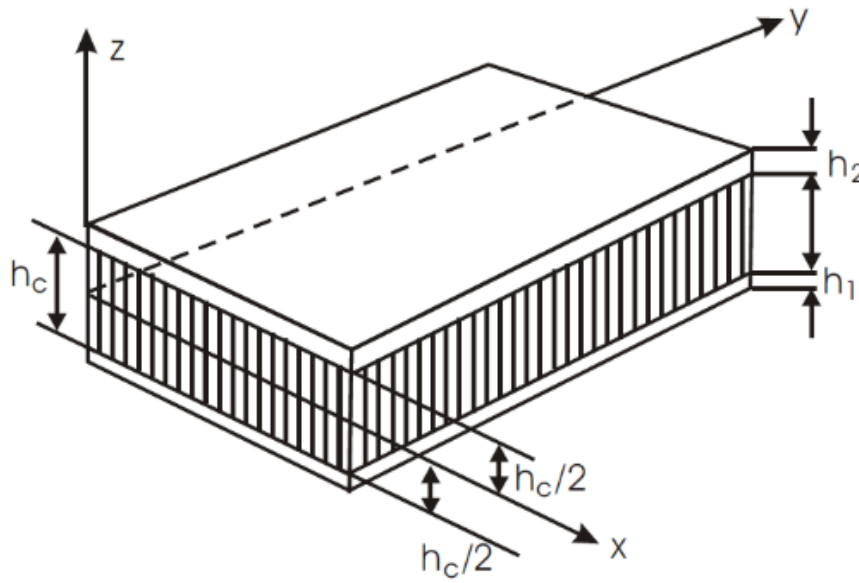


Abbildung 5. Definition der Sandwichstruktur [1]

$$\varepsilon_{xx}(x, z) = -z \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.4)$$

Die axiale Spannung wird wie unten geschrieben

$$\sigma_{xx}(x, z) = -z E(z) \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.5)$$

$E(z)$  ist der E-Modul, die eine Funktion nach der Position entlang der Dicke des Balkens ist. Das Biegemoment wird wie unten geschrieben

$$M_x(x) = b \int z \sigma_{zz} dz = -(b \int z^2 E(z) dz) \frac{d^2 w}{dx^2} = -EI \frac{d^2 w}{dx^2} = -D \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.6)$$

$EI$  ist die Biegesteifigkeit des Kompozitteils. (I: Trägheitsmoment)

$$EI = E^f b \int_{-h}^{-h-f} z^2 dz + E^c b \int_{-h}^h z^2 dz + E^f b \int_h^{h+f} z^2 dz$$

Da das Model nicht symmetrisch ist, ist die Formulierung wie unten.

$$(EI)_{gesamt} = b \int E z^2 dz = b_s \int_{-(2h-h^*)}^{h^*} E_s z^2 dz + b_a \int_{h^*}^{h^*+h_a} E_a z^2 dz$$

$$(EI)_{gesamt} = \frac{1}{3} b_s E_s (h^{*3} + (2h - h^*)^3) + \frac{1}{3} b_a E_a ((h_a + h^*)^3 - h^{*3})$$

**E<sub>s</sub>** : E-Modul der Struktur

**E<sub>a</sub>** : E-Modul des Piezoaktuators

**b<sub>s</sub>** : Breite der Struktur

**b<sub>a</sub>** : Breite des Piezoaktuators

**h<sub>s</sub>** : Höhe der Struktur

**h<sub>a</sub>** : Höhe des Piezoaktuators

### 4.3. Die analytische Lösung für ein Freiheitsgradsystem

Bevor man sich mit dem Versuch beschäftigt, braucht man ein analytisches Modell für 1 FHG-System. Mit Hilfe der Gleichungen kann man die Auslenkung und die nützliche Blockierkraft zum Ruhestand des Aufbaus simulieren. Die berechneten Werte werden danach mit den Versuchsergebnissen verglichen.

Hier bei dem analytischen Modell benutzt man Euler-Bernoulli Balkentheorie.

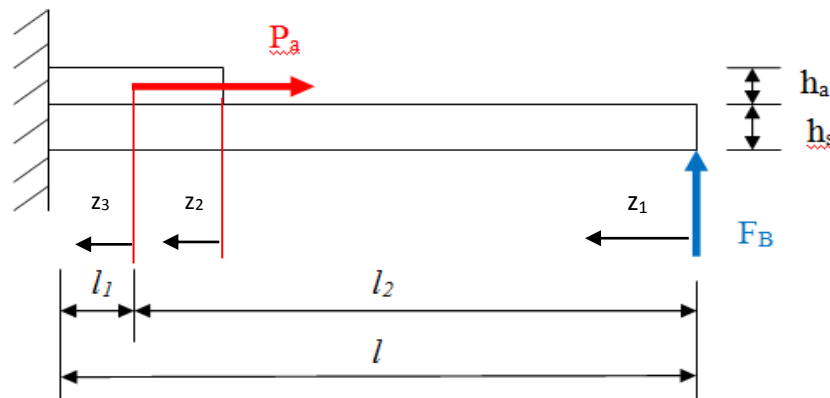


Abbildung 6. Modelle für Berechnung

Die Erklärungen für die Formelzeichen in der Abbildung 9. sind unten definiert.

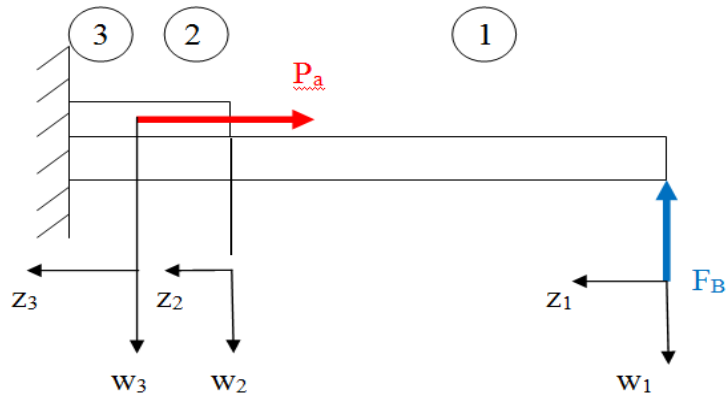
**$P_a$ :** Die Aktuatorkraft

**$h_s$ :** Die Balkendicke

**$F_B$ :** Die Blockierkraft

**$l_a$ :** Die Länge des Aktuators ( $2 \times l_1$ )

**$h_a$ :** Die Aktuatordicke



**Abbildung 7.** Gebiete für Schnittdiagramm

In der Abbildung sind die Schnitte als 1,2 und 3 (unterschiedliche Gebiete) dargestellt.

1  $\rightarrow (EI)_1$ : Biegesteifigkeit des ersten Gebiets

2,3  $\rightarrow (EI)_2 = (EI)_3$ : Biegesteifigkeit des zweiten und dritten Gebiets

In den zweiten und dritten Teilen sind die Biegesteifigkeiten gleich.

### 1 - Das erste Gebiet für Schnittdiagramm

$$0 < z_1 < (l_2 - l_1) \quad (4.1)$$

$$(EI)_1 w_1''(z_1) = -M_{b1} = -F_B z_1 \quad (4.2)$$

$$(EI)_1 w_1'(z_1) = -\frac{1}{2} F_B z_1^2 + C_1 \quad (4.3)$$

$$(EI)_1 w_1(z_1) = -\frac{1}{6} F_B z_1^3 + C_1 z_1 + C_2 \quad (4.4)$$

### 2 - Das zweite Gebiet für Schnittdiagramm

$$0 < z_2 < l_1 \quad (4.5)$$

$$(EI)_2 w_2''(z_2) = -M_{b2} = -F_B (l_2 - l_1 + z_2) \quad (4.6)$$

$$(EI)_2 w_2'(z_2) = -F_B z_2 (l_2 - l_1) - \frac{1}{2} F_B z_2^2 + C_3 \quad (4.7)$$

$$(EI)_2 w_2(z_2) = -\frac{1}{2} F_B z_2^2 (l_2 - l_1) - \frac{1}{6} F_B z_2^3 + C_3 z_2 + C_4 \quad (4.8)$$

### 3 - Das dritte Gebiet für Schnittdiagramm

$$0 < z_3 < l_1 \quad (4.9)$$

$$(EI)_3 w_3''(z_3) = -M_{b3} = -F_B(l_2 + z_3) + M_A \quad (4.10)$$

$$(EI)_3 w_3'(z_3) = -F_B l_2 z_3 - \frac{1}{2} F_B z_3^2 + P_A z_A z_1 + C_5 \quad (4.11)$$

$$(EI)_3 w_3(z_3) = -\frac{1}{2} F_B l_2 z_3^2 - \frac{1}{6} F_B z_3^3 + \frac{1}{2} P_A z_A z_3^2 + C_5 z_3 + C_6 \quad (4.12)$$

Die Randbedingungen für die Gleichungen

$$w_1(z_1 = l_2 - l_1) = w_2(z_2 = 0), w_1'(z_1 = l_2 - l_1) = w_2'(z_2 = 0)$$

$$w_2(z_2 = l_1) = w_3(z_3 = 0), w_2'(z_2 = l_1) = w_3'(z_3 = 0)$$

$$w_3(z_3 = l_1) = 0, w_3'(z_3 = l_1) = 0$$

Wenn man in der ersten Gleichung die Blockierkraft null halten würde, dann hätte man eine Auslenkung, die als  $w_1$  dargestellt wird.

$$w_1(z_1 = 0) = \frac{P_A z_A}{(EI)_2} \left( \frac{3}{2} l_1^2 + l_1(l_2 - l_1) \right) \quad (4.13)$$

Wenn man in der ersten Gleichung die Auslenkung null halten würde, dann hätte man eine Blockierkraft, die als  $F_B$  dargestellt wird.

$$F_B(w_1 = 0) = \frac{P_A z_A \left( \frac{3}{2} \frac{l_1^2}{(EI)_2} + l_1 \frac{(l_2 - l_1)}{(EI)_2} \right)}{\left( \frac{4}{6} \frac{l_1^3}{(EI)_2} + 2l_2 \frac{l_1^2}{(EI)_2} - \frac{1}{6} \frac{(l_2 - l_1)^3}{(EI)_1} + \left( l_1 l_2 \frac{(l_2 - l_1)}{(EI)_2} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{(l_2 - l_1)^3}{(EI)_1} \right)} \quad (4.14)$$

Als Aktuatorkraft, die den Balken einwirkt wurde die Blockierkraft aus der Kataloge nicht benutzt. Stattdessen wurde die Kraft nach Spannung berechnet. Die Berechnung ist wie unten.

$$F = kx;$$

$$k = \frac{EA}{l_0} = \frac{23,3 \cdot 0,5 \cdot 35}{61} = 6,8 \text{ N}/\mu\text{m}$$

$$F_{400} = RK \cdot S \cdot l_0 \cdot k = 1,3 \cdot 400 \cdot 61 \cdot 6,8$$

$$F_{400} = 215 \text{ N}$$

**F:** Aktuatorkraft

**E:** E-Modul

**A:** Schnittoberfläche des Aktuators

**l<sub>0</sub>:** Länge des Aktuators

**RK:** Relativ laterale Kontraktion

**S:** Spannung des Aktuators

**k:** Steifigkeit des Aktuators

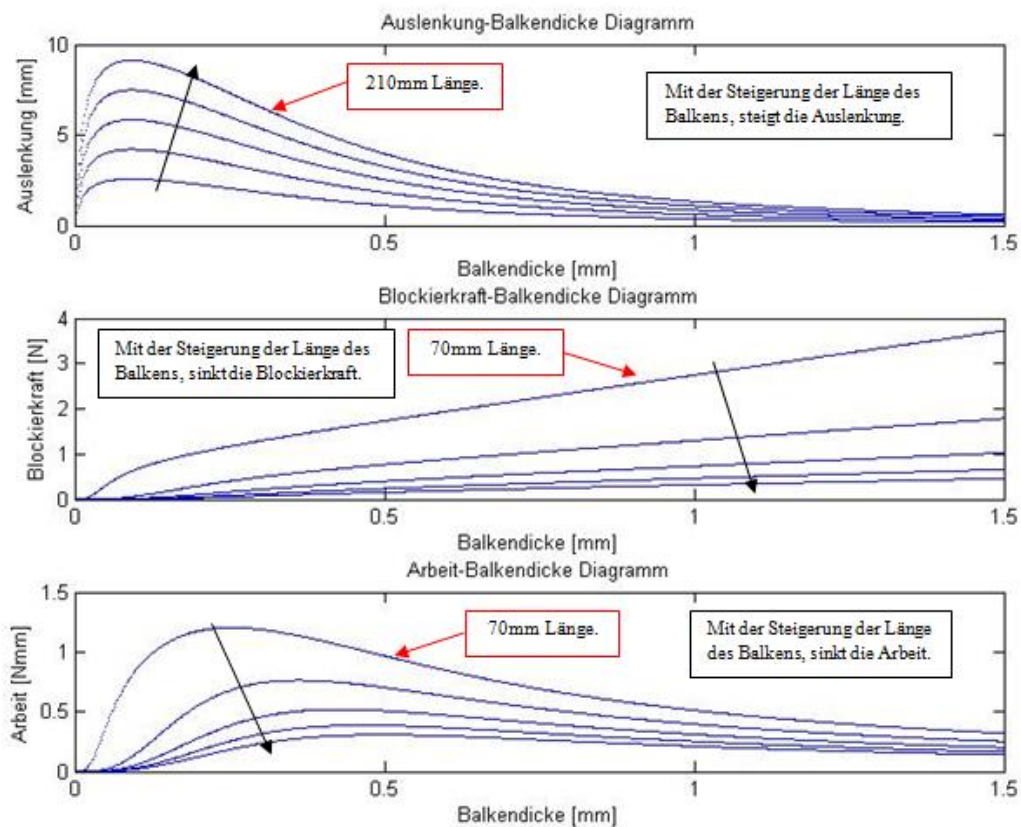
Während der Berechnung der Auslenkung, der Blockierkraft und der Arbeit in der Abhängigkeit von der Balkendicke benutzt man Matlab.

Für jeden Aktuator wurden zwei Programme in Matlab geschrieben. In den beiden Programmen sind E-Modul der Materialien (Aktuator und Balken), Dicke des Aktuators und die Breiten der Balken feste Werten.

Beim ersten Programm wurden die Länge (von 70mm bis 210mm) und die Dicke des Balkens (von 0 bis 1,5mm) als Variabel definiert. So hat man die Möglichkeit der Änderung der gesuchten Größen in Abhängigkeit der gegebene Variable darzustellen.

Dieses Programm berechnet die Auslenkung, die nutzbare Blockierkraft und die Arbeit in Abhängigkeit der Balkenlänge, -dicke und -breite. Auf diese Weise kann man für einen beliebigen Punkt auf dem Balken die genannten Größen berechnen.

Das zweite Programm ist zu benutzen, wenn man die Größe für eine bestimmte Länge und Dicke erfahren möchte. Dieses Programm fragt von Benutzer die gewünschte Länge, Breite und Dicke des Balkens ab.



**Abbildung 8.** Berechnung der Größe für Balken nach Länge und Dicke

In der Abbildung sieht man die Ergebnisse des Programms für den Aktuator

P-876.A12. Die Balkendicke wurde als Variabel von 0 bis 1,5 mm definiert. Die Länge des Balkens ändert sich von 70 mm bis 210 mm. Da die Steifigkeit des Materials wegen der steigenden Länge sinkt, steigt die Auslenkung des Balkens proportional mit dem Hebelarm.

Wenn die Länge steigt, wird der Hebelarm der Blockierkraft auch mehr. So braucht man weniger Kraft, um System in die Ausgangslage drücken zu können.



#### 4.4. Die analytische Lösung für zwei Freiheitsgradsystem

In dem zweiten Teil der Arbeit wird ein System untersucht, das zwei Freiheitsgraden hat. Nach der Anregung der Piezoaktuatoren bewegt sich die Masse in zwei unterschiedlichen Fällen. In dem ersten Fall macht sie eine Bewegung in vertikaler Richtung. Im zweiten Fall sieht man in der Mitte eine Drehbewegung.

Da die analytische Rechnung für das zwei FHG-System schwer zu lösen ist, wird hier nur eine mögliche Herangehensweise aufgezeigt, um das System zu lösen.

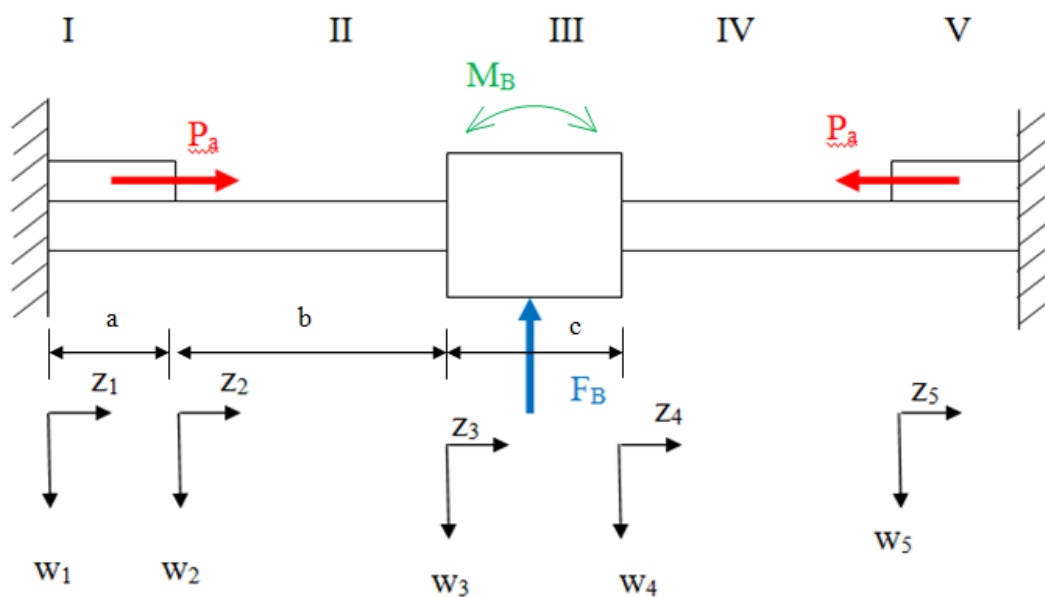


Abbildung 9. Modell für 2FHG-System

In der Abbildung. 9 stellt man mit römischen Zahlen die Gebiete für Schnittdiagramm dar. Die Erklärungen für die Formelzeichen in der Abbildung 9. sind unten definiert.

$P_a$ : Aktuatorkraft

$a$ : Länge des Aktuators

$F_B$ : Blockierkraft

$a+b$ : Länge des Balkens

$M_B$ : Moment

$c$ : Länge der Masse

I, V  $\rightarrow (EI)_1$  : Biegesteifigkeit des ersten Gebiets

II, IV  $\rightarrow (EI)_2$  : Biegesteifigkeit des zweiten und vierten Gebiets

III  $\rightarrow (EI)_3$  : Biegesteifigkeit des dritten Gebiets

I - Das erste Gebiet  $0 \leq z_1 \leq 2a$

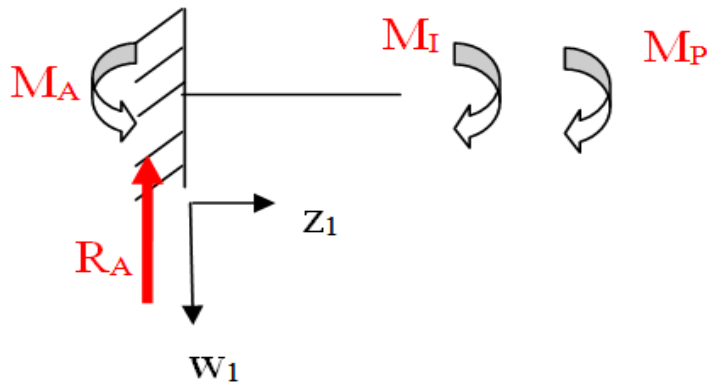


Abbildung 10. Schnittdiagramm für erstes Gebiet

$$-M_I + M_A - R_A x = 0 \quad (4.15)$$

$$-M_I - M_P(x - a)^0 - R_A z_1 + M_A = 0 \quad (4.16)$$

$$M_I = -R_A z_1 - M_P(z_1 - a)^0 + M_A \quad (4.17)$$

$$(EI)_1 w_1'' = -M_I = R_A z_1 + M_P(z_1 - a)^0 - M_A \quad (4.18)$$

$$(EI)_1 w_1' = \frac{1}{2} R_A z_1^2 + M_P(z_1 - a)^1 - M_A z_1 + C_1 \quad (4.19)$$

$$(EI)_1 w_1 = \frac{1}{6} R_A z_1^3 + \frac{1}{2} M_P(z_1 - a)^2 - \frac{1}{2} M_A z_1^2 + C_1 z_1 + C_2 \quad (4.20)$$

II - Das zweite Gebiet  $2a \leq z_2 \leq 2a+b$

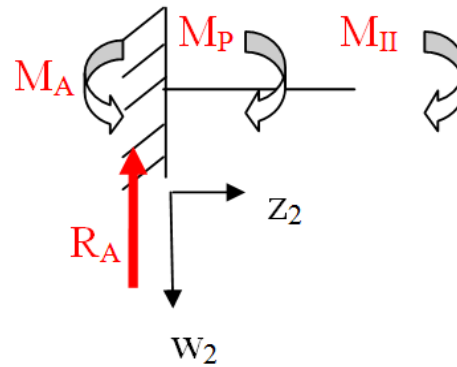


Abbildung 11. Schnittdiagramm für zweites Gebiet

$$M_A - R_A z_2 - M_P - M_{II} = 0 \quad (4.21)$$

$$M_{II} = M_A - R_A z_2 - M_P \quad (4.22)$$

$$(EI)_2 w_2'' = -M_{II} = R_A z_2 + M_P - M_A \quad (4.23)$$

$$(EI)_2 w_2' = \frac{1}{2} R_A z_2^2 + M_P z_2 - M_A z_2 + C_3 \quad (4.24)$$

$$(EI)_2 w_2 = \frac{1}{6} R_A z_2^3 + \frac{1}{2} M_P z_2^2 - \frac{1}{2} M_A z_2^2 + C_3 z_2 + C_4 \quad (4.25)$$

III - Das dritte Gebiet  $2a+b \leq z_3 \leq 2a+b+c$

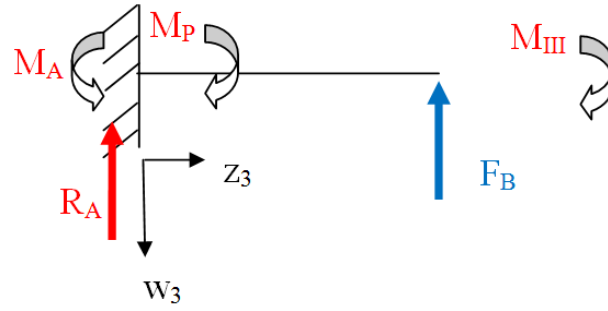


Abbildung 12. Schnittdiagramm für drittes Gebiet

$$M_{III} = -R_A z_3 - M_P - F_B \left( z_3 - \left( 2a + b + \frac{c}{2} \right) \right) + M_A \quad (4.26)$$

$$(EI)_3 w_3'' = -M_{III} = R_A z_3 + M_P - M_A + F_B \left( z_3 - \left( 2a + b + \frac{c}{2} \right) \right) \quad (4.27)$$

$$(EI)_3 w_3' = \frac{1}{2} R_A z_3^2 + M_P z_3 - M_A z_3 + \frac{F_B}{2} \left( z_3 - \left( 2a + b + \frac{c}{2} \right) \right)^2 + C_5 \quad (4.28)$$

$$(EI)_3 w_3 = \frac{1}{6} R_A z_3^3 + \frac{1}{2} M_P z_3^2 - \frac{1}{2} M_A z_3^2 + \frac{F_B}{3} \left( z_3 - \left( 2a + b + \frac{c}{2} \right) \right)^3 + C_5 z_3 + C_6 \quad (4.29)$$

IV - Das vierte Gebiet  $(2a+b+c) \leq z_4 \leq (2a+b+c+b)$

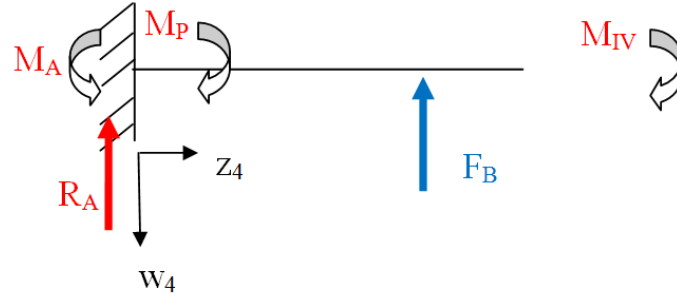


Abbildung 13. Schnittdiagramm für viertes Gebiet

$$M_{IV} = M_A - M_P - R_A z_4 - F_B \left( z_4 - \left( 2a + b + \frac{c}{2} \right) \right)^1 \quad (4.30)$$

$$(EI)_4 w_4'' = -M_{IV} = R_A z_4 + M_P - M_A - F_B \left( z_4 - \left( 2a + b + \frac{c}{2} \right) \right)^1 \quad (4.31)$$

$$(EI)_4 w_4' = \frac{1}{2} R_A z_4^2 + M_P z_4 - M_A z_4 - \frac{F_B}{2} \left( z_4 - \left( 2a + b + \frac{c}{2} \right) \right)^2 + C_7 \quad (4.32)$$

$$(EI)_4 w_4 = \frac{1}{6} R_A z_4^3 + \frac{1}{2} M_P z_4^2 - \frac{1}{2} M_A z_4^2 - \frac{F_B}{3} \left( z_4 - \left( 2a + b + \frac{c}{2} \right) \right)^3 + C_7 z_4 + C_8 \quad (4.33)$$

V - Das fünfte Gebiet  $(2a+2b+c) \leq z_5 \leq (2a+2b+c+2a)$

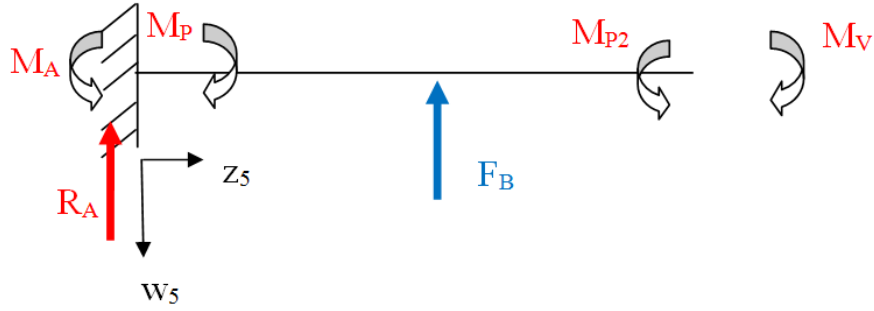


Abbildung 14. Schnittdiagramm für fünftes Gebiet

$$M_V = M_A - M_P - R_A z_5 - F_B \left( z_5 - \left( 2a + b + \frac{c}{2} \right) \right)^1 + M_{P2} (z_5 - (2a + 2b + c))^0 \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned} (EI)_5 w_5'' &= -M_{IV} \\ &= R_A z_5 + M_P - M_A - F_B \left( z_5 - \left( 2a + b + \frac{c}{2} \right) \right)^1 \\ &\quad + M_{P2} (z_5 - (2a + 2b + c))^1 \end{aligned} \quad (4.35)$$

$$(EI)_5 w_5' = \frac{1}{2} R_A z_5^2 + M_P z_5 - M_A z_5 - \frac{F_B}{2} \left( z_5 - \left( 2a + b + \frac{c}{2} \right) \right)^2 + \frac{M_{P2}}{2} (z_5 - (2a + 2b + c))^2 + C_8 \quad (4.36)$$

$$(EI)_5 w_5 = \frac{1}{6} R_A z_5^3 + \frac{1}{2} M_P z_5^2 - \frac{1}{2} M_A z_5^2 - \frac{F_B}{3} \left( z_5 - \left( 2a + b + \frac{c}{2} \right) \right)^3 + \frac{M_{P2}}{3} (z_5 - (2a + 2b + c))^3 + C_8 z_5 + C_9 \quad (4.37)$$

Die Randbedingungen für die Gleichungen

$$w_1(x_1 = 0) = 0, w_1'(x_1 = 0) = 0$$

$$w_1(x_1 = 2a) = w_2(x_2 = 0), w_1'(x_1 = 2a) = w_2'(x_2 = 0)$$

$$w_2(x_2 = 2a) = w_3(x_3 = 2a + b), w_2'(x_2 = 2a) = w_3'(x_3 = 2a + b)$$

$$w_2(x_2 = 2a) = w_3(x_3 = 2a + b), w_2'(x_2 = 2a) = w_3'(x_3 = 2a + b)$$

$$w_3(x_3 = 2a + b) = w_4(x_4 = 2a + b + c) , w_3'(x_3 = 2a + b) = w_4'(x_4 = 2a + b + c)$$

Diese Bedingung ist gültig, wenn die Piezokräfte gegenseitig einwirken würden. Ansonsten entsteht ein Biegewinkel zwischen beide Ecken der Masse.

$$w_4(x_4 = 2a + 2b + c) = w_5(x_5 = 2a + 2b + c)$$

$$w_4'(x_4 = 2a + 2b + c) = w_5'(x_5 = 2a + 2b + c)$$

$$w_5(x_5 = 2a + 2b + c) = 0 , w_5'(x_5 = 2a + 2b + c) = 0$$

Die Vorgehensweise zur analytischen Lösung der zwei FHG-Systems ist sehr kompliziert, weil die Berechnung der Integrationskonstanten aufwendig ist. Deshalb wird das 2FHG nur durch Simulation gelöst.

## 5. Simulation

Die Berechnung der Auslenkung erfolgte durch analytische Methoden. Wegen der Komplexität der Gleichungen brauchen Simulationsprogramme, damit man die Ergebnisse des Systems unter Anregung des Flächenaktuators korrekt berechnen kann. In diesem Abschnitt wird erklärt, wie die Simulation der Aufgaben in ANSYS-Workbench (WB) durchgeführt wird.

Zuerst braucht man hier, die Materialeigenschaften des Flächenaktuators zu definieren. Die Permittivität und die anisotropische Steifigkeitsmatrix sind zu definieren.

Der E-Modul in Längsrichtung des Flächenaktuators ist für P-876.A.12 23,3 GPa und für P-876.A.15 34,7 GPa. Die Querkontraktionszahl der Aktuatoren ist 0,3. Die Werte für die anderen Richtungen sind nicht in der Kataloge angegeben. Deshalb benutzt man diesen Wert auch für die anderen Richtungen.

Während man die mechanischen Eigenschaften des Materials ANSYS-WB definiert, braucht man die Elastizitätsmatrix zu schreiben. Diese Matrix ist die Inverse der Steifigkeitsmatrix

$$[D']^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Der Zusammenhang zwischen E-Modul und G-Modul ist wie unten.

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (5.2)$$

Damit man die Daten in ANSYS eintragen kann, braucht man die Positionsnummer der Werte in der Matrix. Da die Matrix symmetrisch ist, schreibt man nur die rechte Seite des Diagonals. Die nötigen Positionsnummern sind in der nächsten Seite angegeben.



$$[D']^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 \\ & & 12 & 13 & 14 & 15 \\ & & & 16 & 17 & 18 \\ & & & & 19 & 20 \\ & & & & & 21 \end{bmatrix}$$

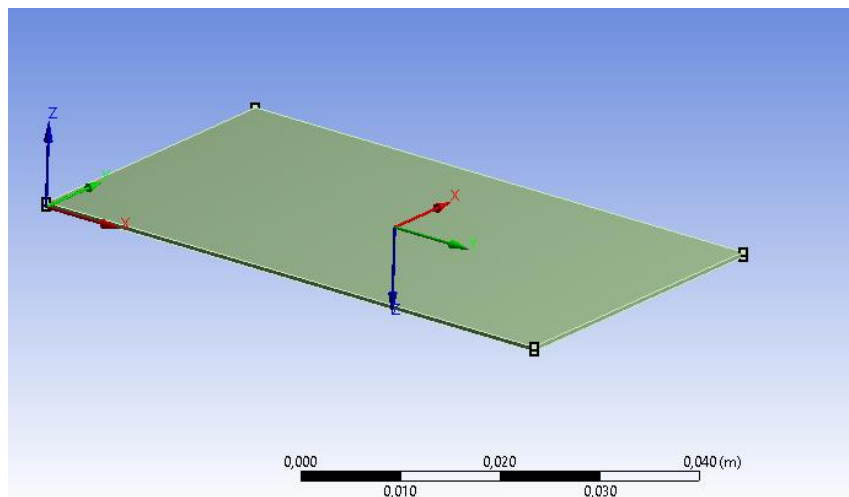
Außerdem müssen die piezoelektrischen Ladungskonstanten im Programm definiert sein. Das gibt man auch als Matrixform.

$$[d']^T = \begin{bmatrix} 0 & d_{31} & 0 \\ 0 & d_{33} & 0 \\ 0 & d_{31} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{15} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Die Positionsnummer der Matrix ist wie unten.

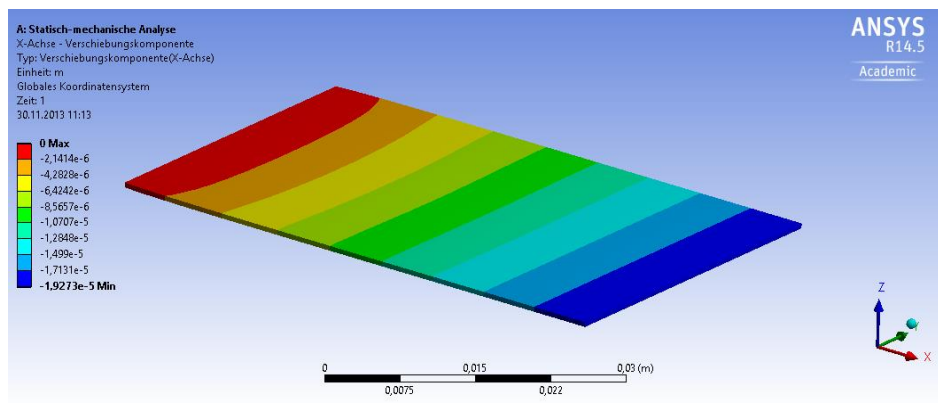
$$[d']^T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \\ 10 & 11 & 12 \\ 13 & 14 & 15 \\ 16 & 17 & 18 \end{bmatrix}$$

Die Zeichnungen wurden in einem anderen Programm (Catia) gemacht. Danach wurde die Zeichnung als -stp Format gespeichert, damit man in ANSYS das Model bearbeiten kann. Für die Simulation ist es sehr wichtig, dass man das Koordinatensystem des Flächenaktuators nach der Richtung der Polarisierung definiert. In dieser Aufgabe ist y die Polarisationsrichtung. Deshalb sieht man in der Abbildung 15, dass die y-Richtung des Aktuators in x-Richtung des globalen Koordinatensystems orientiert. [Heinrichs2013]



**Abbildung 15.** Darstellung des Koordinatensystems eines Flächenaktuators in der Simulation

Bevor man mit dem Piezoaktuator geklebten Balken arbeitet, simuliert man als erstes den Flächenaktuator allein. Das Ergebnis der Ausdehnung wurde bekommen und mit einem Faktor multipliziert, damit man den Auslenkungswert der Kataloge erreichen kann.



**Abbildung 16.** Ausdehnung des Flächenaktuators unter Anregung

In der Abbildung 16 ist es zu sehen, dass die Auslenkung des Aktuators (P-876.A.12 ) 19,27  $\mu\text{m}$  unter 400V Spannung.

Der Ausdehnungswert aus der Kataloge

$$A = S \cdot RK \cdot L$$

**S** : Spannung [V],

**MK**: Min. laterale Kontraktion [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]

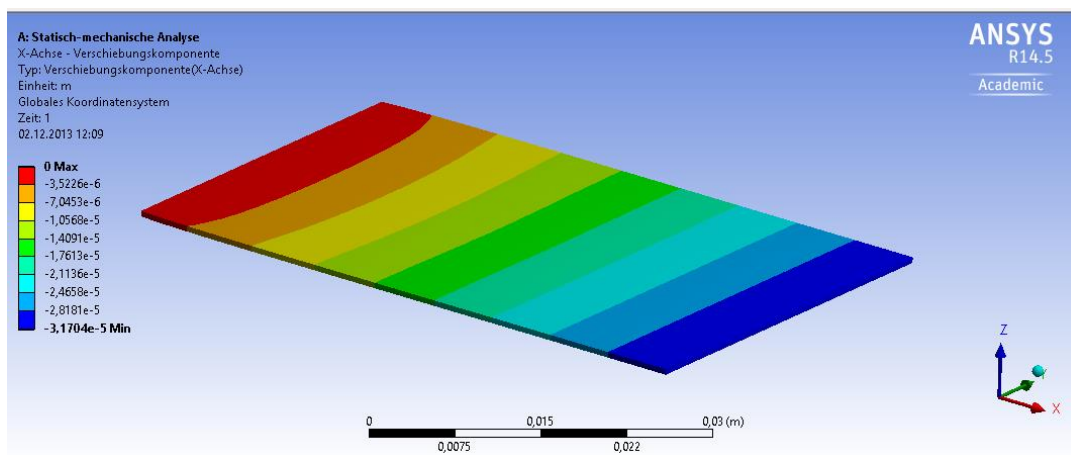
**L**: Länge [m]

Aus den Werten aus dem Katalog kann man den Freihub der Aktoren berechnen:

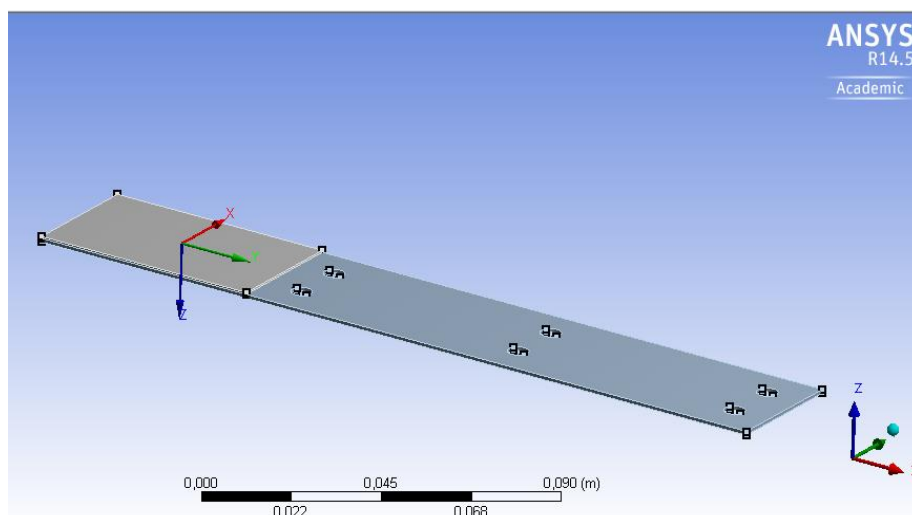
$$A = 400 \cdot 1,3 \cdot 61 / 1000$$

$$A = 31,72 \text{ } \mu\text{m}$$

Aus dieser Berechnung findet man den Faktor als 1,6. Wenn man den Spannungswert mit diesem Faktor multipliziert und das in Programm einträgt, ist das Ergebnis wie in der Abbildung 17 und entspricht damit den Vorgaben aus der Kataloge.

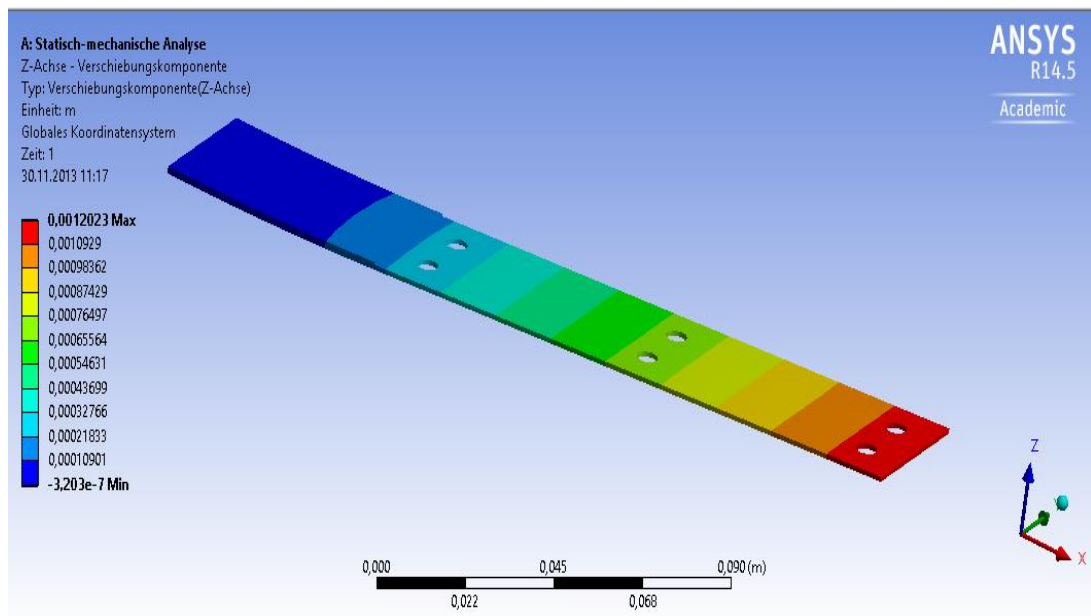


**Abbildung 17.** Ausdehnung des Flächenaktuators unter Anregung mit Faktorrechnung



**Abbildung 18.** Darstellung des Flächenaktuator gepatchten Balkens

Die Simulationen wurden nach zwei unterschiedlichen Spannungen durchgeführt. Eine ist ohne Faktor und die andere ist mit Faktor. Danach werden die Ergebnisse mit den Größen verglichen, die in den Versuchen bestimmt werden.



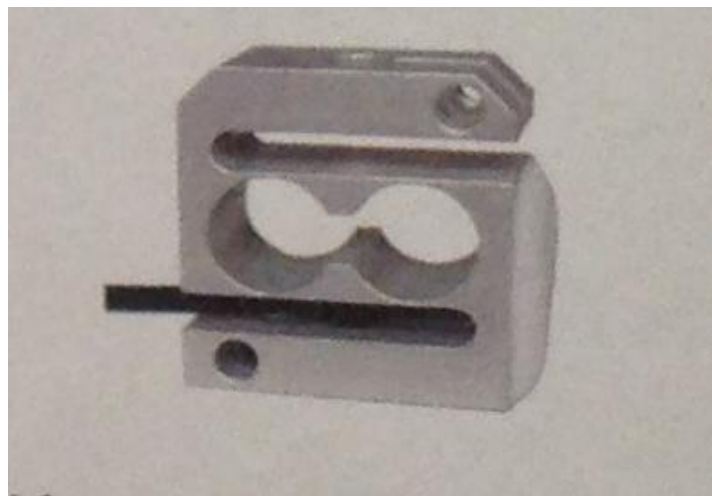
**Abbildung 19.** Auslenkungssimulation des Balkens mit Flächenaktuator unter Anregung

In der Abbildung 19 wird der Balken mit dem Flächenaktuator dargestellt. An der linken Seite ist der Balken fest eingespannt. Das Koordinatensystem des Aktuators ist besonders definiert. Danach sieht man in der Abbildung 18 den simulierten Zustand für Balken. Die Auslenkungen der Balken wurden notiert und als tabellarisch und graphisch im Kapitel Ergebnisse gezeigt.

## 6. Versuchsdurchführung

Der experimentelle Teil der Arbeit besteht aus zwei Teilen. In dem ersten Teil untersucht man die Größen des 1FHG-Systems. Um die Blockierkraft messen zu können, benutzt man den Sensor KD24s von der Firma ME-Systeme.

Der Kraftsensor KD24s (Abbildung 20) ist ein S förmiger Sensor, der für die Prüfaufgaben in der Werkstoffprüfung geeignet ist. Die Einleitung- und Ausleitung der Kraft ist Zentral im Gerät. Der Sensor, der in den Versuchen verwendet wurde, kann bis max. 20 N messen. Der Kennwert des Sensors ist 0,5 mV/V mit der Genauigkeit von 0,1 %.



**Abbildung 20.** Kraftsensor KD24s

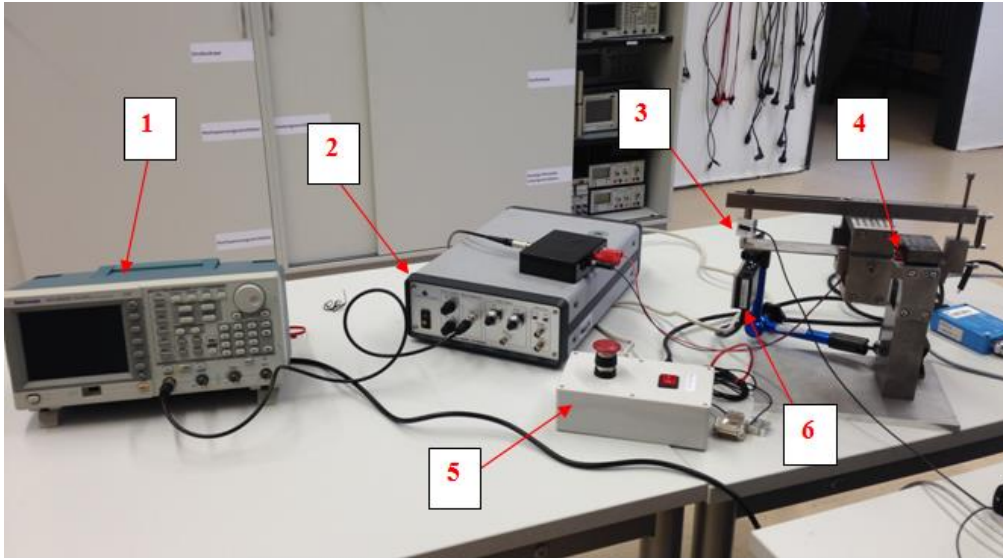
Damit die Auslenkungen bestimmt werden, wurde der Lasersensor von der Firma MEL-Sensor. Die Empfindlichkeit des Sensors ist  $\pm 5$  mm bei  $\pm 10$  V.

Da man das Signal vom Signalgenerator verstärken muss, braucht man einen Verstärker. Bei den Versuchen wurde der Verstärker des Produkts von der Firma Smart Material benutzt.

Bei den Experimenten benutzt man für den Aktuatortyp P-876.A.12 0.1mm, 0.3, 0.5mm und 1mm Balken mit 210mm Länge. Für den Aktuatortyp P-876.A.15 wurden 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.5mm und 1mm Balken mit Länge 210mm benutzt. Warum diese Balkendicken verwendet wurden, steht im Kapitel 7.

## 6.1. 1FHG-System

Die Versuche beginnen mit dem 1FHG-System. Im Labor wurde der Prüfstand zuerst zusammengebaut und dann mit den Mess- und Signalgeräten verbunden.

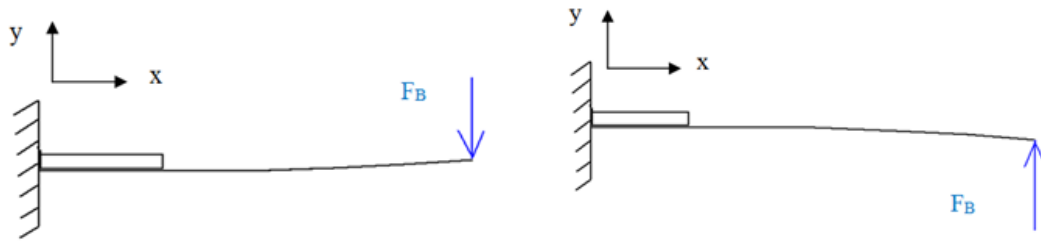


**Abbildung 21.** Versuchstand, 1. Signalgenerator, 2. Verstärker, 3. Kraftsensor, 4. Piezoaktuator, 5. Not-Aus Box, 6. Lasersensor

In der Abbildung 21 sieht man den Aufbau für das 1FHG System. Von dem Signalgenerator bekommt man einen DC Signal. Danach wird das Signal durch das Verstärker 200-mal verstärkt und zum Aktuator geschickt. Der Triangulatorsensor arbeitet zwischen  $\pm 10$  V und  $\pm 5$  mm. Die Empfindlichkeit des Sensors ist  $0,5 \text{ mm/V}$ . Da die erwarteten Auslenkungen nicht mehr als 5 mm, ist dieser Sensor geeignet für die Versuche.

Im Ruhestand misst man die erste Position des Balkens. Danach mit der Einwirkung der Spannung bekommt man eine Auslenkung. Dieser Wert wird auch notiert. Dann mit der Schraube am Ende des Hebelarms, drückt man den Kraftsensor, bis der Balken zur ersten Position kommt. So kann man die nötige Blockierkraft messen.

In den Experimenten wurden P-876.A.12 und P-876.A.15 Piezoaktuatoren benutzt. Die Arbeitsspannung für P-876.A.12 ist zwischen -100V bis +400 V. Die Arbeitsspannung für P-876.A.15 ist zwischen -250V bis +1000 V. Wegen des Verstärkers wurden  $1/200$  der Katalogwerte benutzt. Mit der positiven Spannung ist die Auslenkung in +y und mit der negativen Spannung ist die Auslenkung in -y Richtung.

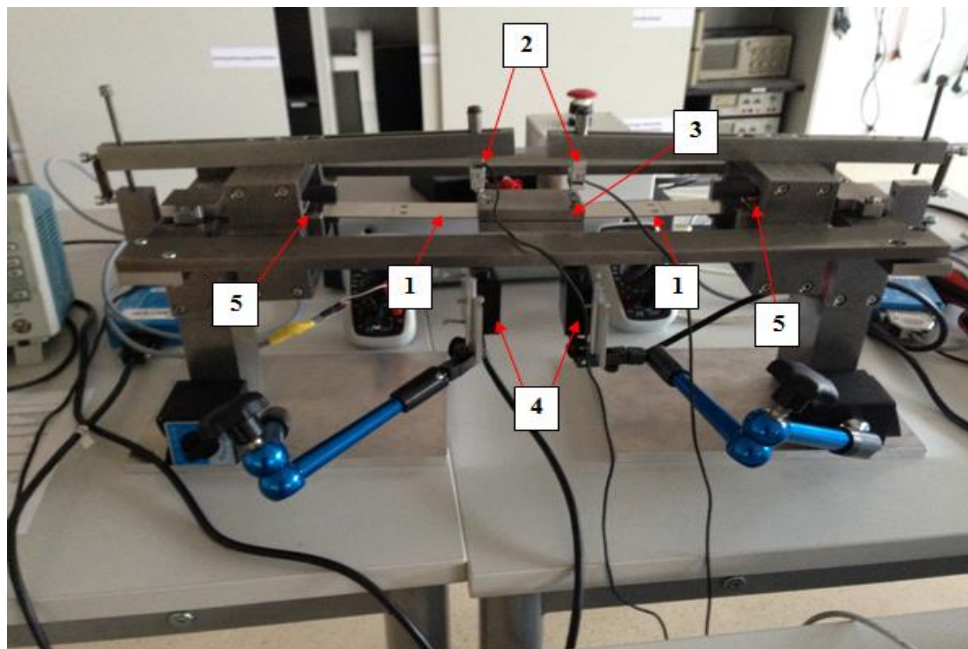


**Abbildung 22.** Darstellung für die Position des Kraftsensors

Aus diesen Gründen muss man den Kraftsensor und Wegsensor umbauen, damit man die gebrauchte Blockierkraft und die Auslenkung des Balkens in den Randfällen des Aktuators genauer festlegen kann.

## 6.2. 2FHG-System

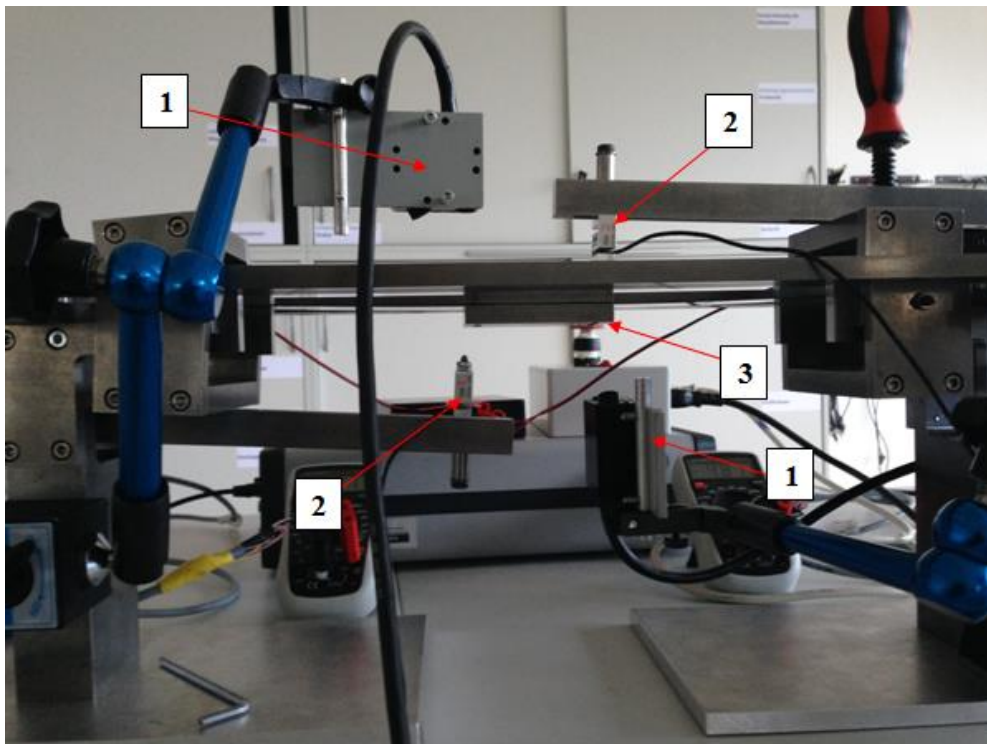
Der nächste Schritt des Experiments ist, die Simulationswerte mit 2FHG-System zu vergleichen. Dafür muss der Prüfstand umgebaut werden.



**Abbildung 23.** Der Versuchstand, 1. Balken, 2. Kraftsensor, 3. Masse ,  
4. Lasersensor, 5. Piezoaktuator



In der Abbildung 24 sieht man den Aufbau des Versuchstands für zwei FHG-System. In diesem Fall der Struktur regt man das System einmal mit der positiven Spannung und einmal mit der negativen Spannung. Die Spannungswerte wurden von der Kataloge gelesen. Zum Beispiel für den Aktuatortyp P-876.A12 ist die Spannungsskala -100V bis +400V und für den Aktuatortyp P-876.A15 ist die Skala -250V bis +1000V.



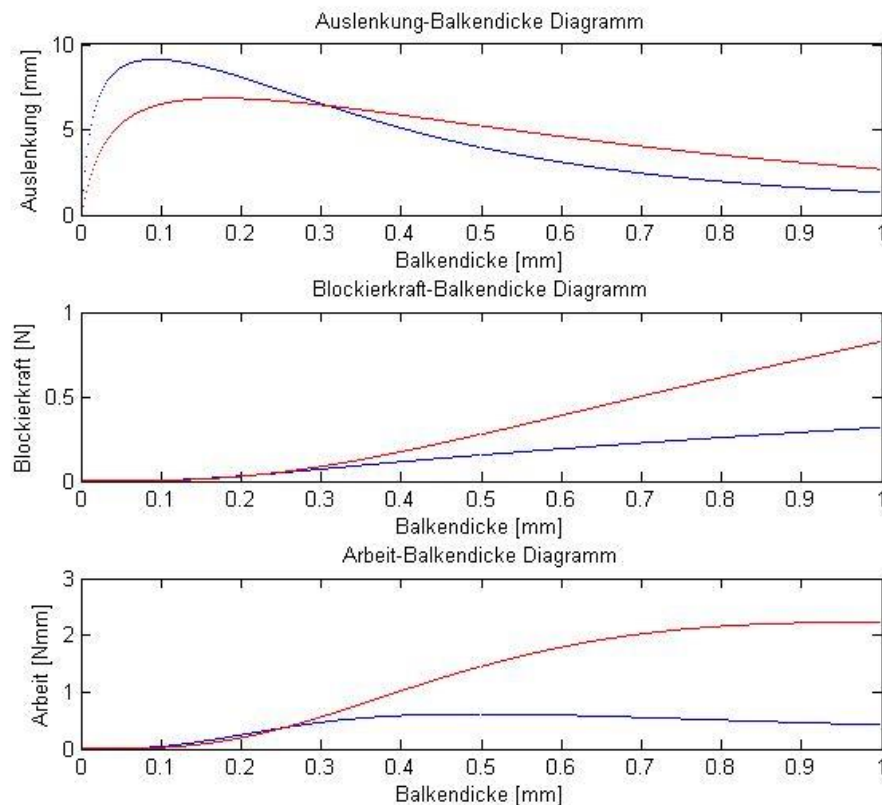
**Abbildung 24.** Der Versuchstand, 1. Lasersensor, 2. Kraftsensor, 3. Masse

In diesem Fall des Aufbaus wird ein Balken normal wie in früherem Zustand und der zweite umgekehrt geschraubt. Die beiden Balken wurden mit gleicher Spannung angesteuert. Aber wegen der Positionen der Balken macht die Masse in der Mitte eine Drehbewegung. Eine Seite der Masse geht oben und die andere Seite unten. Damit man die Masse zum ersten Zustand bringen kann, muss ein Kraftsensor unten und der zweite oben gelagert sein. Mit den gemessenen Kraftwerten kann Drehmoment berechnet werden.



## 7. Ergebnisse

Zur Lösung der Aufgabe wurden unterschiedliche Methoden wie z.B. analytisches Model oder Simulation durch ANSYS-WB verwendet. In diesem Kapitel der Arbeit wurden die Ergebnisse der benutzten Methoden mit den Versuchsergebnissen verglichen.



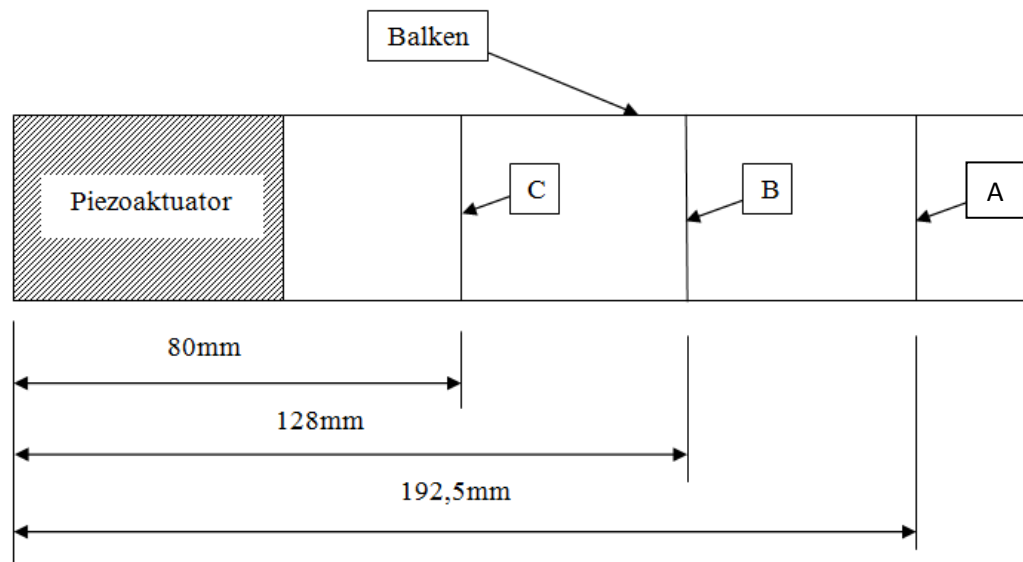
**Abbildung 25.** Analytische Ergebnisse für Balken unter Anregung von zwei unterschiedlichen Aktuatoren (Blau: P-876.A12, Rot: P-876.A15)

In der Abbildung 25 sieht man die Verhältnisse der Balken (210mm Länge und 35mm Breite) unter Anregung zwei unterschiedlichen Piezoaktuatoren.

**P-876.A12:** Die höchsten Auslenkungen bekommt man in der Umgebung von 0,1 mm. Damit man die Ergebnisse besser vergleichen kann, wählt man 0,05mm; 0,1mm; 0,3mm für die Versuche. Die Blockierkraft fängt ab 0,3 mm Balkendicke an, zu steigen. Deshalb wurde 0,5mm und 1mm Balken auch verwendet. Da die Steifigkeit des 0,05mm Balkens ganz gering ist, wurde er in den Versuchen nicht benutzt.

**P-876.A15:** Die höchsten Auslenkungen bekommt man in der Umgebung von 0,2 mm. Damit man die Ergebnisse besser vergleichen kann, wählt man 0,1mm; 0,2mm; 0,3mm; für

die Versuche. Die Blockierkraft fängt ab 0,3 mm Balkendicke an, zu steigen. Deshalb wurde 0,5mm und 1mm Balken auch verwendet.



**Abbildung 26.** Messpunkte des Balkens

Bei 1 FHG-System wurden die Auslenkungen und die Kräfte an drei unterschiedlichen Punkten gemessen. Die Abstände der Punkte bis zum Einspannungspunkt sind wie in der Abbildung dargestellt. Laut höchsten positiven und niedrigsten negativen Werts der Spannung wurden die Sensoren unten oder oben positioniert.

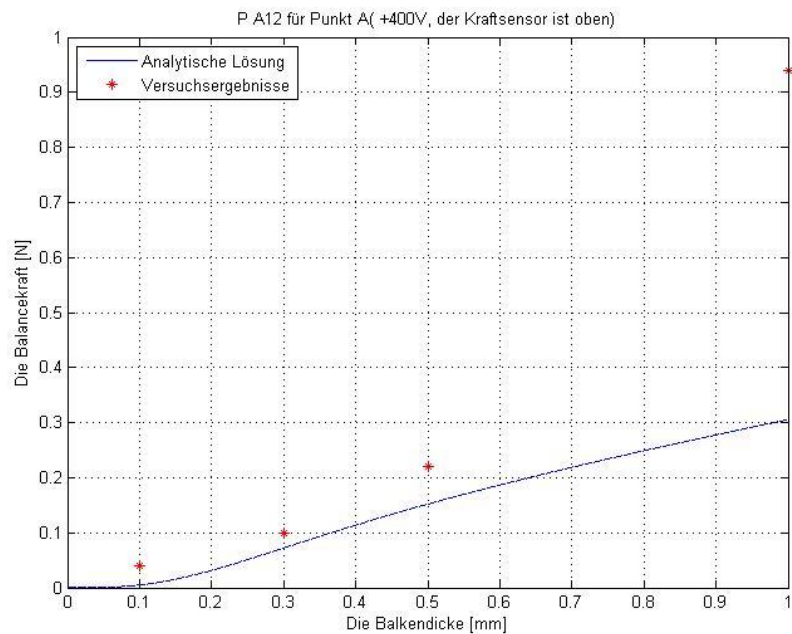
## 7.1. Blockierkräfte

In der Tabelle 1 sieht man die Ergebnisse (Kraft) für drei Punkte am Balken, der vom Aktuator P-876.A12 mit +400V angeregt wird. In diesem Fall misst man die Kraft von oben und der Lasersensor liegt unter dem Balken.

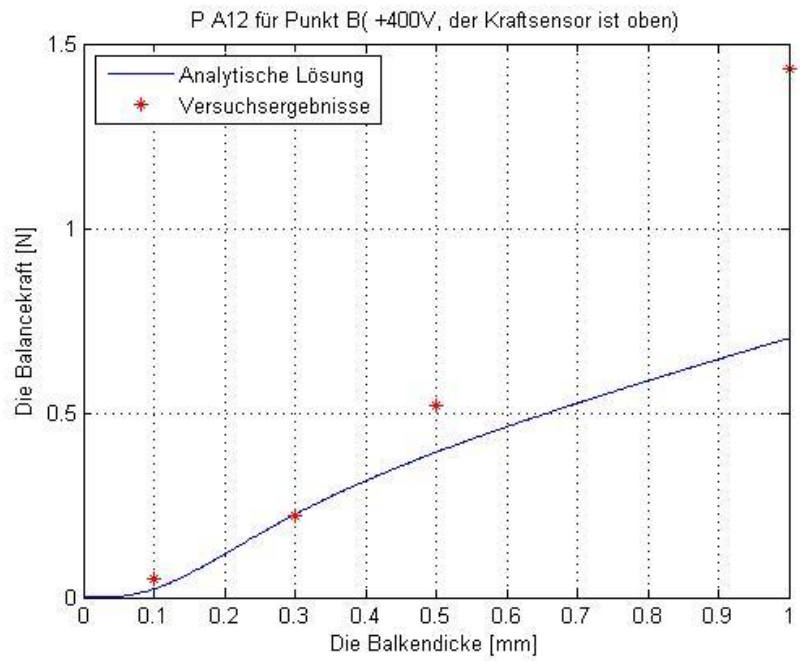
In der Abbildungen 28, 29 und 30 sind die gemessenen Werte für die Punkte A, B und C mit analytischen Ergebnissen verglichen.

	Punkt A		Punkt B		Punkt C	
Balkendicke [mm]	Analytische Methode [N]	Messergebnisse [N]	Analytische Methode [N]	Messergebnisse [N]	Analytische Methode [N]	Messergebnisse [N]
1.0	0.3057	0.94	0.7026	1.43	1.7329	1.59
0.5	0.1521	0.22	0.3935	0.52	1.0829	1.14
0.3	0.0723	0.10	0.2252	0.22	0.7849	0.51
0.1	0.0052	0.04	0.0232	0.05	0.2750	0.17

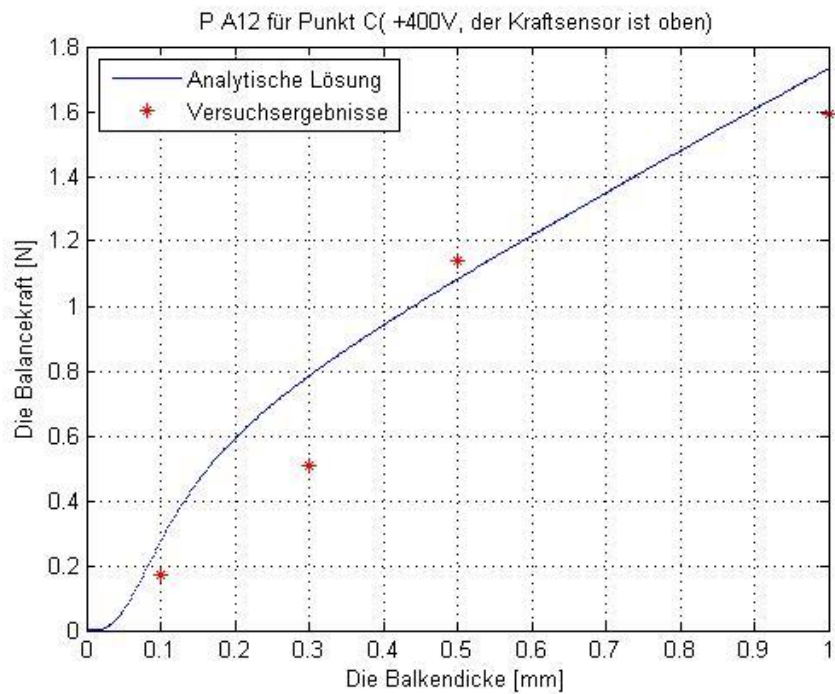
**Tabelle 1.** 1 FHG P A12 +400V, der Kraftsensor ist oben.



**Abbildung 27.** Kraftwerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter +400V.



**Abbildung 28.** Kraftwerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter +400V.



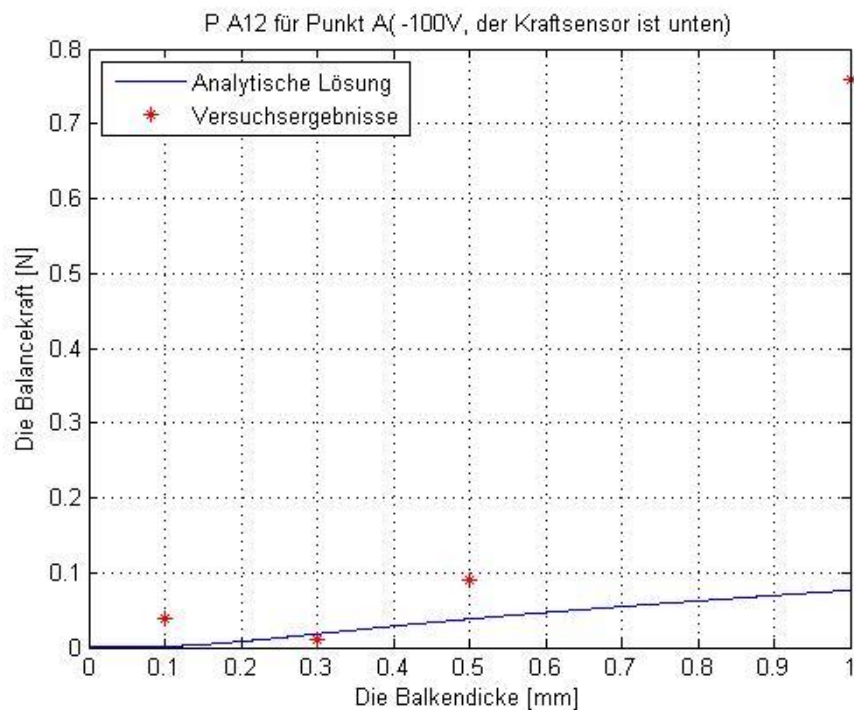
**Abbildung 29.** Kraftwerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter +400V.

	Punkt A		Punkt B		Punkt C	
Balkendicke [mm]	Analytische Methode [N]	Messergebnisse [N]	Analytische Methode [N]	Messergebnisse [N]	Analytische Methode [N]	Messergebnisse [N]
1.0	0.0764	0.76	0.1757	0.86	0.4332	1.12
0.5	0.0380	0.09	0.0984	0.16	0.2707	0.35
0.3	0.0181	0.01	0.0563	0.04	0.1962	0.18
0.1	0.0013	0.038	0.0058	0.017	0.0687	0.02

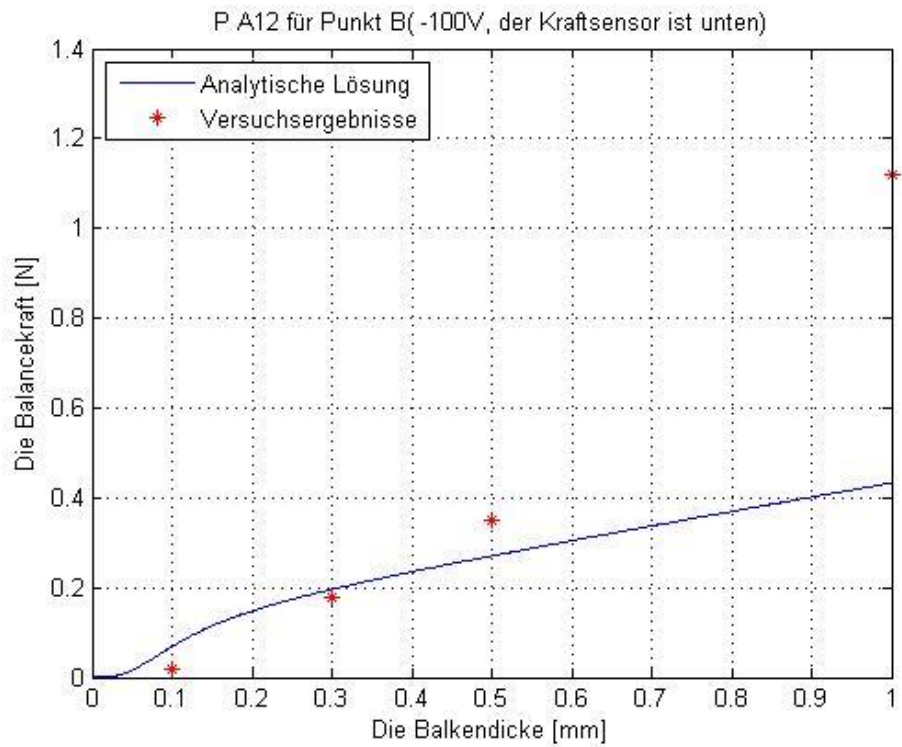
**Tabelle 2.** 1 FHG P A12 -100V, der Kraftsensor ist unten.

In der Tabelle 2 sieht man die Ergebnisse (Kraft) für drei Punkte am Balken, der vom Aktuator P-876.A12 mit -100V angeregt wird. In diesem Fall misst man die Kraft von unten und der Lasersensor liegt über dem Balken.

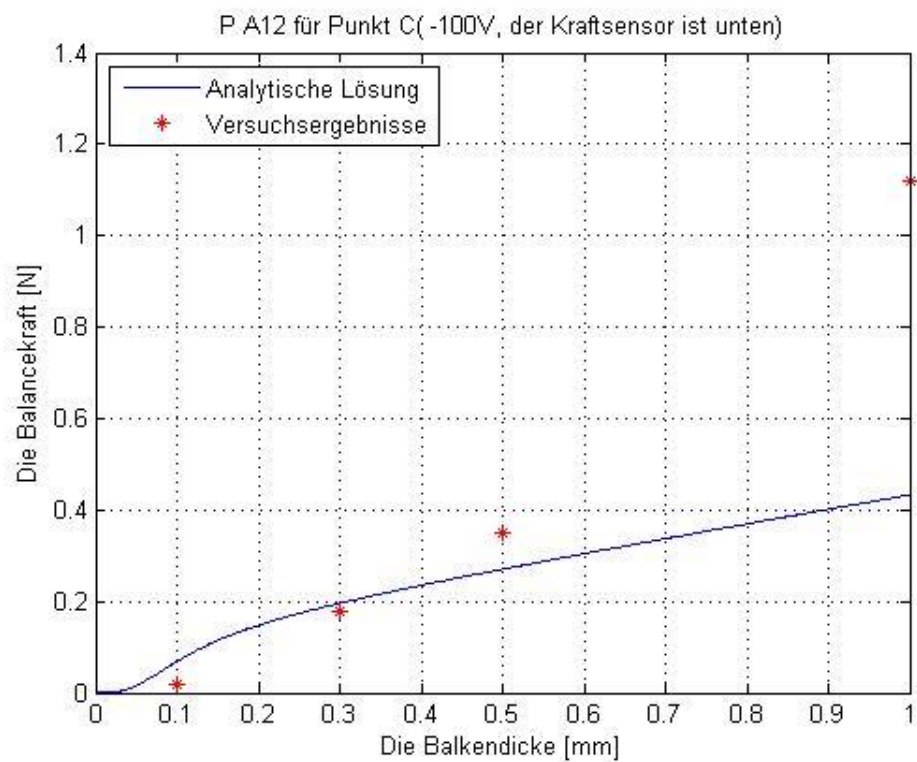
In der Abbildungen 31, 32 und 33 sind die gemessenen Werte für die Punkte A, B und C mit analytischen Ergebnissen verglichen.



**Abbildung 30.** Kraftwerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter -100V.



**Abbildung 31.** Kraftwerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter -100V.



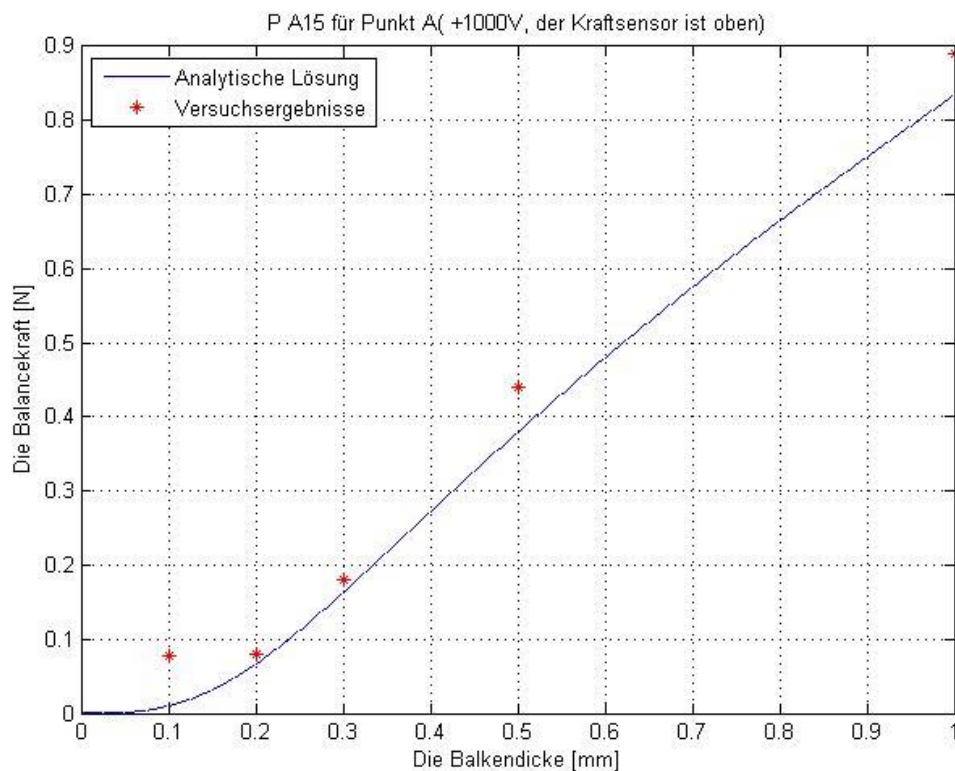
**Abbildung 32.** Kraftwerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter -100V.

In der Tabelle 3 sieht man die Ergebnisse (Kraft) für drei Punkte am Balken, der vom Aktuator P-876.A15 mit +1000V angeregt wird. In diesem Fall misst man die Kraft von oben und der Lasersensor liegt unter dem Balken.

In der Abbildungen 34, 35 und 36 sind die gemessenen Werte für die Punkte A, B und C mit analytischen Ergebnissen verglichen.

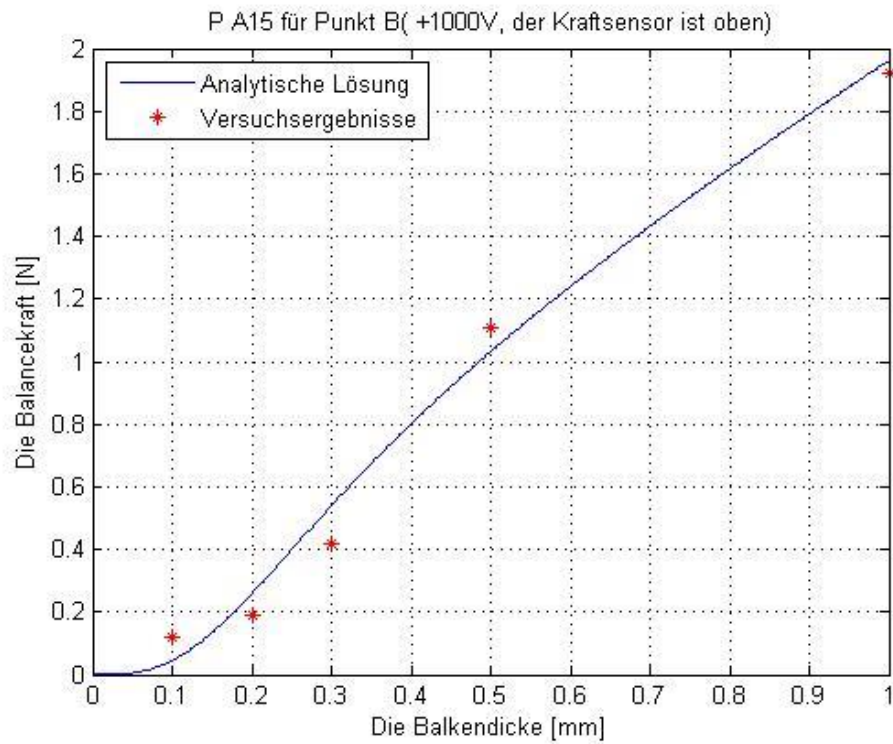
	Punkt A		Punkt B		Punkt C	
Balkendicke [mm]	Analytische Methode [N]	Messergebnisse [N]	Analytische Methode [N]	Messergebnisse [N]	Analytische Methode [N]	Messergebnisse [N]
1.0	0.8069	0.89	2.0636	1.92	5.6114	3.8
0.5	0.2822	0.44	0.9195	1.11	3.4603	3.66
0.3	0.0907	0.18	0.3618	0.42	2.2688	1.21
0.2	0.0306	0.08	0.1351	0.19	1.4011	0.84
0.1	0.0038	0.077	0.0179	0.117	0.3488	0.13

**Tabelle 3.** 1 FHG P A15 +1000, der Kraftsensor ist oben.

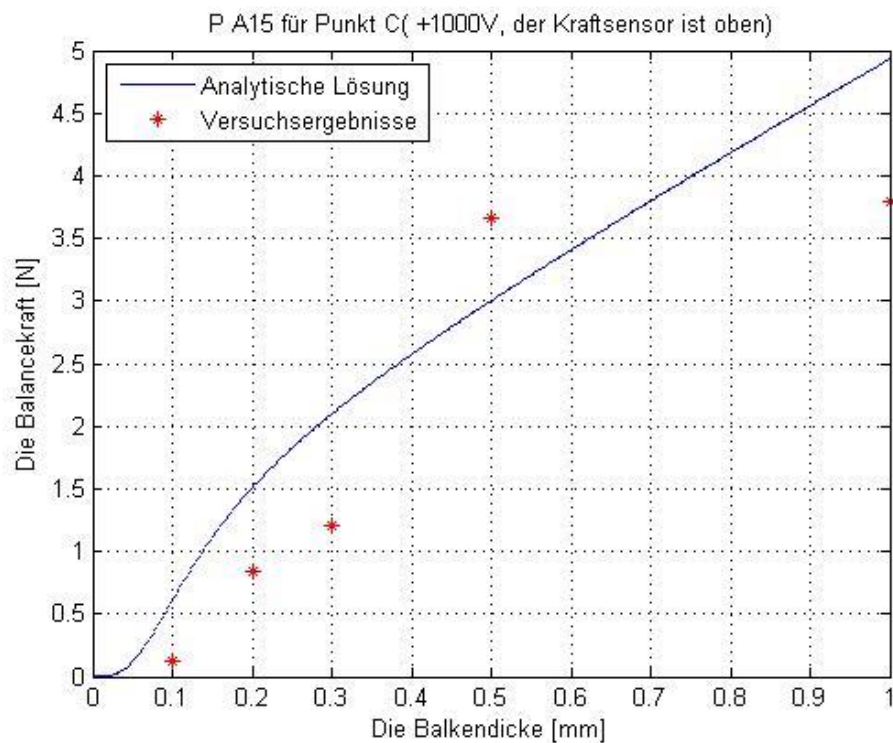


**Abbildung 33** Kraftwerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter +1000V.





**Abbildung 34.** Kraftwerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter +1000V.



**Abbildung 35.** Kraftwerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter +1000V.

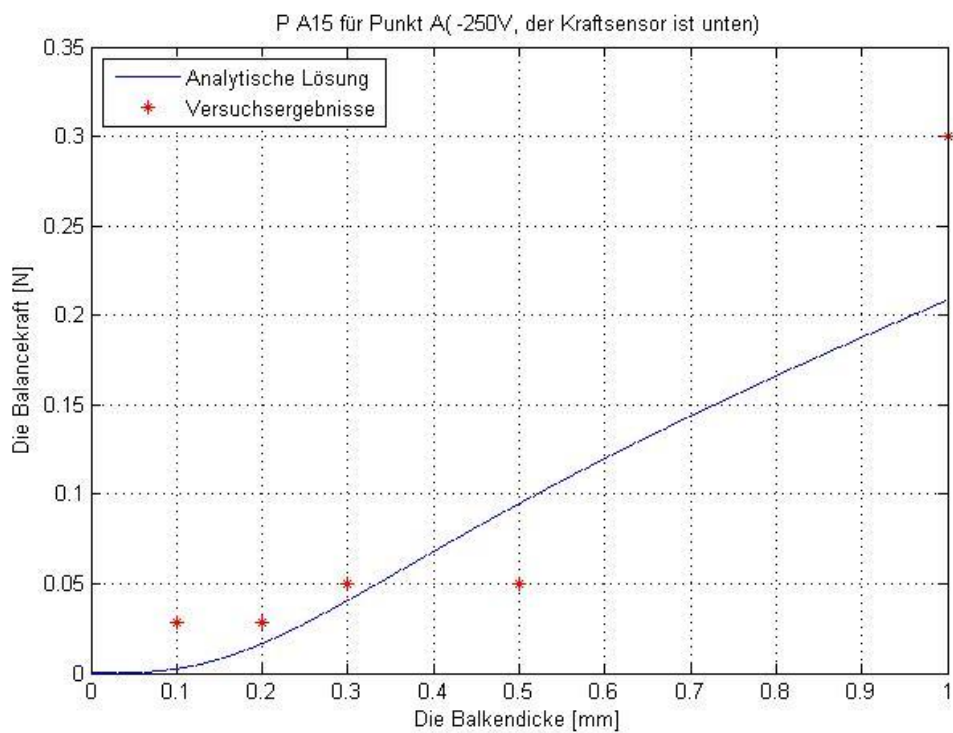


In der Tabelle 4 sieht man die Ergebnisse (Kraft) für drei Punkte am Balken, der vom Aktuator P-876.A15 mit -250V angeregt wird. In diesem Fall misst man die Kraft von unten und der Lasersensor liegt über dem Balken.

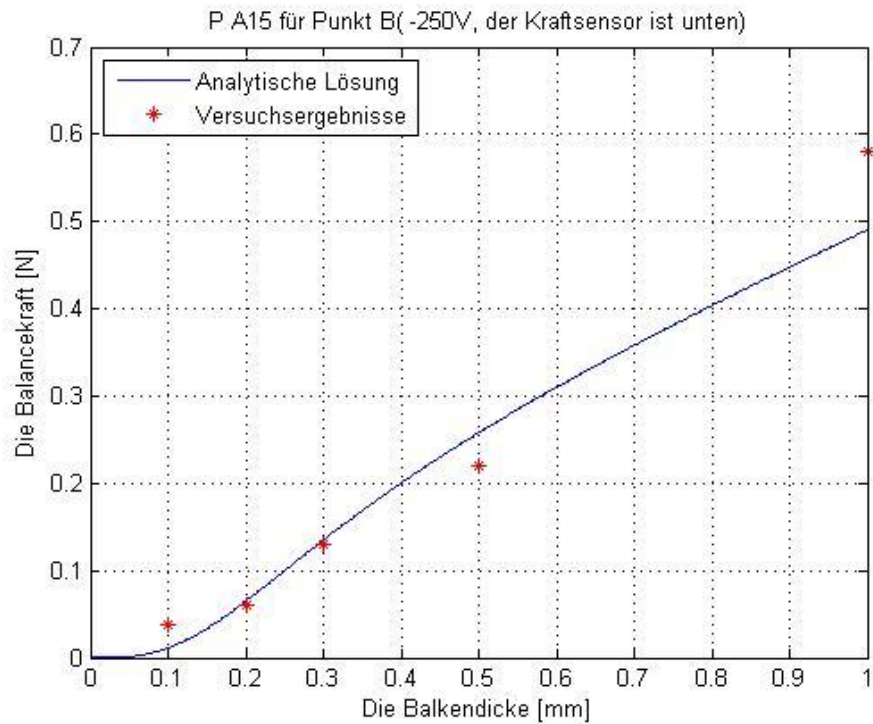
In der Abbildungen 37, 38 und 39 sind die gemessenen Werte für die Punkte A, B und C mit analytischen Ergebnissen verglichen.

	Punkt A		Punkt B		Punkt C	
Balkendicke [mm]	Analytische Methode [N]	Messergebnisse [N]	Analytische Methode [N]	Messergebnisse [N]	Analytische Methode [N]	Messergebnisse [N]
1.0	0.2017	0.3	0.5159	0.58	1.4028	1.43
0.5	0.0706	0.05	0.2299	0.22	0.8651	0.69
0.3	0.0227	0.05	0.0904	0.13	0.5672	0.45
0.2	0.0076	0.028	0.0338	0.06	0.3503	0.2
0.1	0.001	0.028	0.0045	0.038	0.0872	0.066

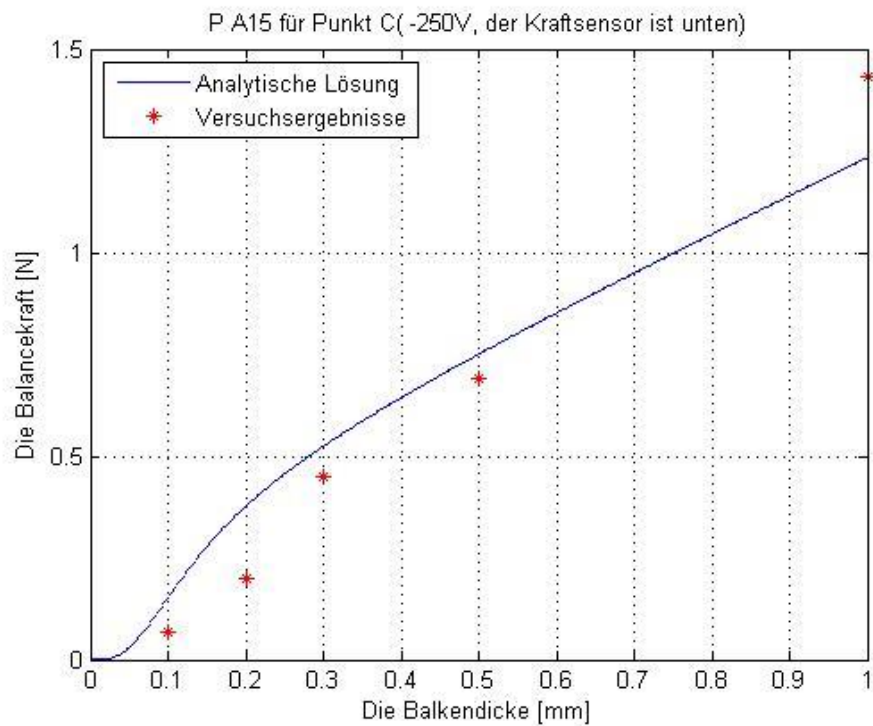
**Tabelle 4.** 1 FHG P A15 -250V, der Kraftsensor ist unten.



**Abbildung 36.** Kraftwerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter -250V.



**Abbildung 37.** Kraftwerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter -250V.



**Abbildung 38.** Kraftwerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter -250V.

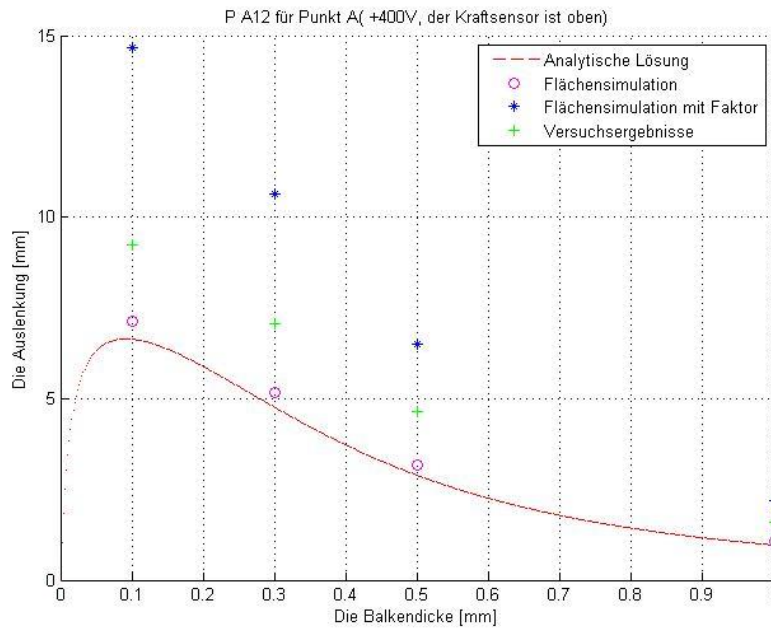
## 7.2. Auslenkungen

	<b>Punkt A</b>			
<b>Balkendicke</b>	<b>Analyse [mm]</b>	<b>Flächenaktuatorsimulation [mm]</b>	<b>Flächenaktuatorsimulation mit Faktor [mm]</b>	<b>Versuchsergebnisse [mm]</b>
1 mm	1.208	1.068	2.198	1.585
0.5 mm	3.608	3.155	6.491	4.630
0.3 mm	5.952	5.176	10.649	7.065
0.1 mm	8.296	7.13	14.669	9.220
	<b>Punkt B</b>			
<b>Balkendicke</b>	<b>Analyse [mm]</b>	<b>Flächenaktuatorsimulation [mm]</b>	<b>Flächenaktuatorsimulation mit Faktor [mm]</b>	<b>Versuchsergebnisse [mm]</b>
1 mm	0.768	0.668	1.099	0.970
0.5 mm	2.295	1.971	3.245	2.715
0.3 mm	3.786	3.235	6.655	4.435
0.1 mm	5.277	4.456	9.167	6.295
	<b>Punkt C</b>			
<b>Balkendicke</b>	<b>Analyse [mm]</b>	<b>Flächenaktuatorsimulation [mm]</b>	<b>Flächenaktuatorsimulation mit Faktor [mm]</b>	<b>Versuchsergebnisse [mm]</b>
1 mm	0.441	0.401	0.549	0.385
0.5 mm	1.318	1.183	2.433	1.320
0.3 mm	2.174	1.941	3.992	2.565
0.1 mm	3.031	2.673	5.499	3.31

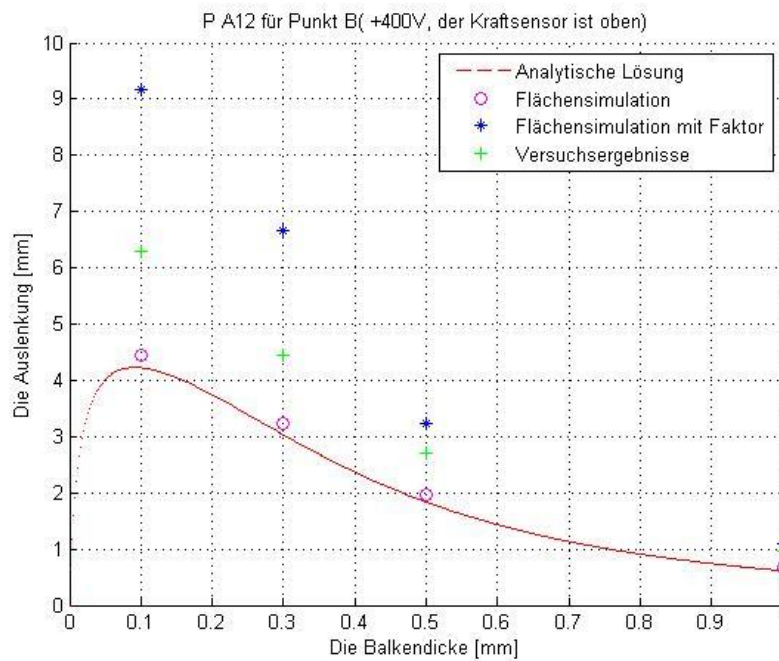
**Tabelle 5.** 1 FHG P A12 +400V, der Kraftsensor ist oben.

In der Tabelle 5 sieht man die Ergebnisse (Auslenkungen) für drei Punkte am Balken, der vom Aktuator P-876.A12 mit +400V angeregt wird. In diesem Fall misst man die Kraft von oben und der Lasersensor liegt unter dem Balken.

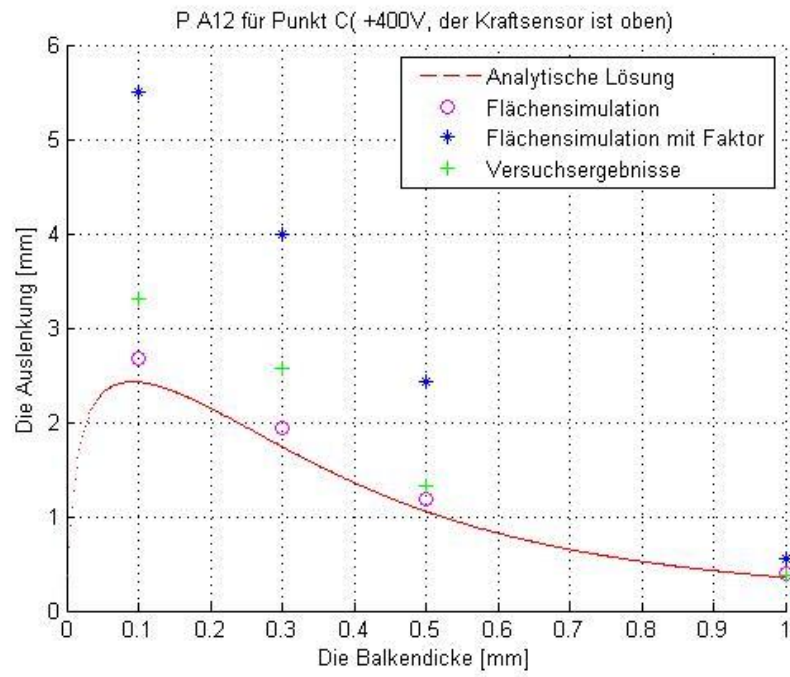
In der Abbildungen 40, 41 und 42 sind die gemessenen Werte für die Punkte A, B und C mit analytischen Ergebnissen verglichen.



**Abbildung 39.** Auslenkungswerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter +400V.



**Abbildung 40.** Auslenkungswerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter +400V.



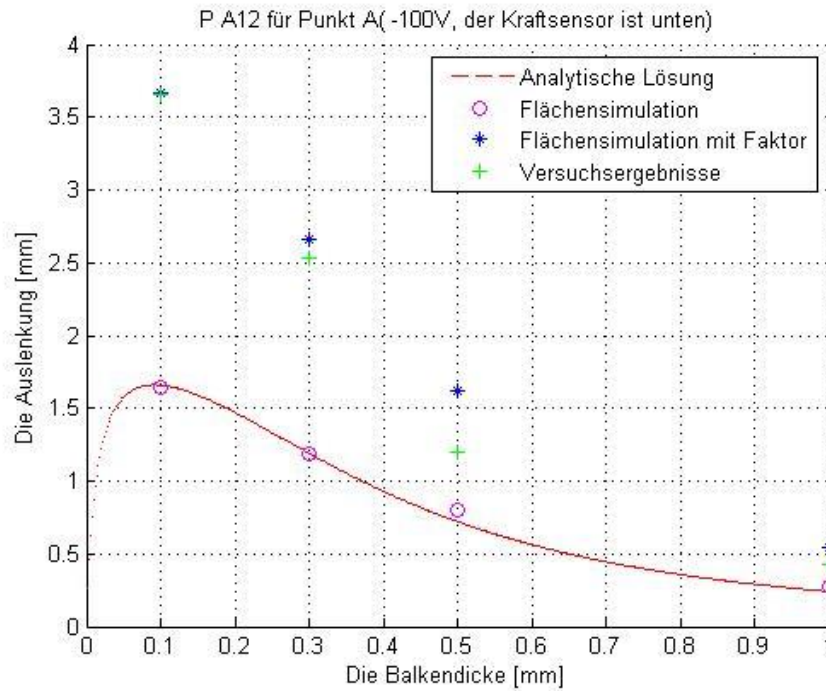
**Abbildung 41.** Auslenkungswerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter +400V.

	Punkt A			
Balkendicke	Analyse [mm]	Flächenaktuatorsimulation [mm]	Flächenaktuatorsimulation mit Faktor [mm]	Versuchsergebnisse [mm]
1 mm	0.2416	0.273	0.549	0.43
0.5 mm	0.7217	0.806	1.623	1.195
0.3 mm	1.1904	1.191	2.662	2.53
0.1 mm	1.6592	1.641	3.667	3.65
	Punkt B			
Balkendicke	Analyse [mm]	Flächenaktuatorsimulation [mm]	Flächenaktuatorsimulation mit Faktor [mm]	Versuchsergebnisse [mm]
1 mm	0.1537	0.164	0.343	0.285
0.5 mm	0.4591	0.483	1.014	0.74
0.3 mm	0.7572	0.662	1.664	1.4
0.1 mm	1.0554	0.911	2.292	1.87
	Punkt C			
Balkendicke	Analyse [mm]	Flächenaktuatorsimulation [mm]	Flächenaktuatorsimulation mit Faktor [mm]	Versuchsergebnisse [mm]
1 mm	0.088	0.109	0.206	0.175
0.5 mm	0.263	0.323	0.608	0.4
0.3 mm	0.537	0.397	0.998	0.6
0.1 mm	0.606	0.546	1.375	1.05

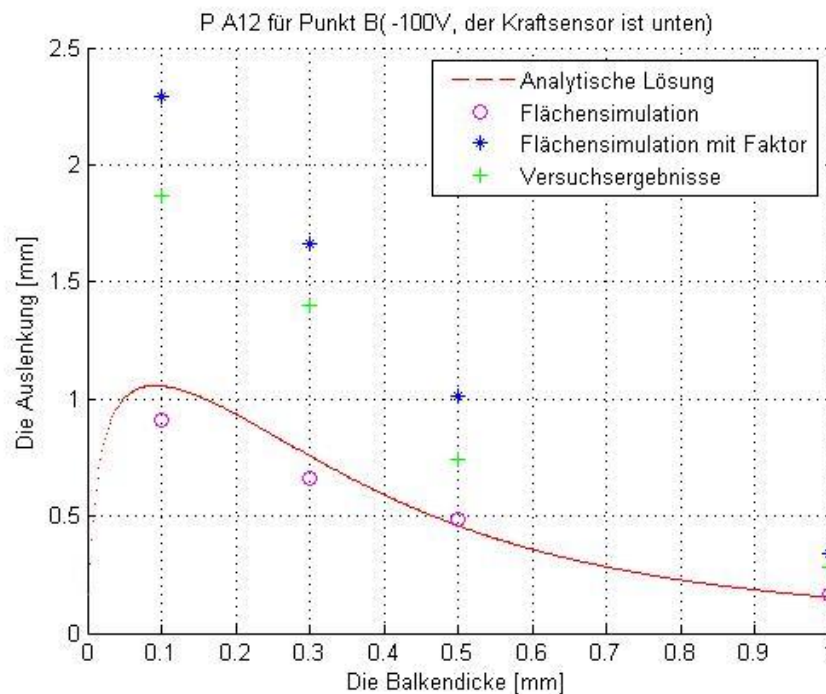
**Tabelle 6.** 1 FHG P A12 -100V, der Kraftsensor ist unten.

In der Tabelle 6 sieht man die Ergebnisse (Auslenkungen) für drei Punkte am Balken, der vom Aktuator P-876.A12 mit -100V angeregt wird. In diesem Fall misst man die Kraft von unten und der Lasersensor liegt über dem Balken.

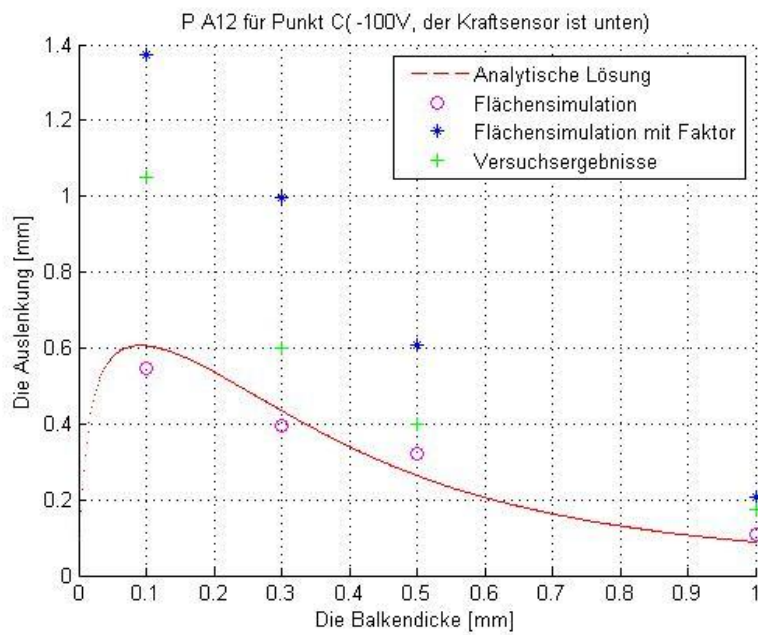
In der Abbildungen 43, 44 und 45 sind die gemessenen Werte für die Punkte A, B und C mit analytischen Ergebnissen verglichen.



**Abbildung 42.** Auslenkungswerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter -100V.



**Abbildung 43.** Auslenkungswerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter -100V.



**Abbildung 44.** Auslenkungswerten bei P A12 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter -100V.

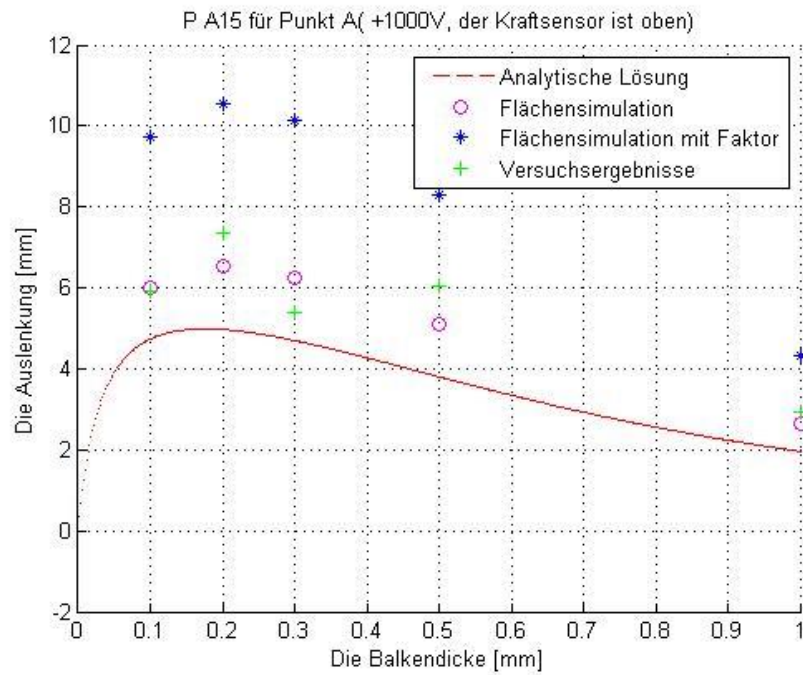


	<b>Punkt A</b>			
<b>Balkendicke</b>	<b>Analyse [mm]</b>	<b>Flächenaktuatorsimulation [mm]</b>	<b>Flächenaktuatorsimulation mit Faktor [mm]</b>	<b>Versuchsergebnisse [mm]</b>
1 mm	2.449	2.664	4.316	2.95
0.5 mm	4.754	5.114	8.286	6.05
0.3 mm	5.873	6.246	10.122	5.405
0.2 mm	6.214	6.521	10.567	7.345
0.1 mm	5.919	5.997	9.717	5.91
	<b>Punkt B</b>			
<b>Balkendicke</b>	<b>Analyse [mm]</b>	<b>Flächenaktuatorsimulation [mm]</b>	<b>Flächenaktuatorsimulation mit Faktor [mm]</b>	<b>Versuchsergebnisse [mm]</b>
1 mm	1.558	1.665	2.697	1.865
0.5 mm	3.024	3.195	5.178	3.775
0.3 mm	3.736	3.904	6.325	3.92
0.2 mm	3.953	3.259	6.604	5.01
0.1 mm	3.766	3.375	6.073	4.26
	<b>Punkt C</b>			
<b>Balkendicke</b>	<b>Analyse [mm]</b>	<b>Flächenaktuatorsimulation [mm]</b>	<b>Flächenaktuatorsimulation mit Faktor [mm]</b>	<b>Versuchsergebnisse [mm]</b>
1 mm	0.895	0.998	1.617	1.035
0.5 mm	1.737	1.916	3.106	2.35
0.3 mm	2.145	2.342	3.795	2.07
0.2 mm	2.270	1.629	3.962	3.455
0.1 mm	2.162	2.248	3.643	2.985

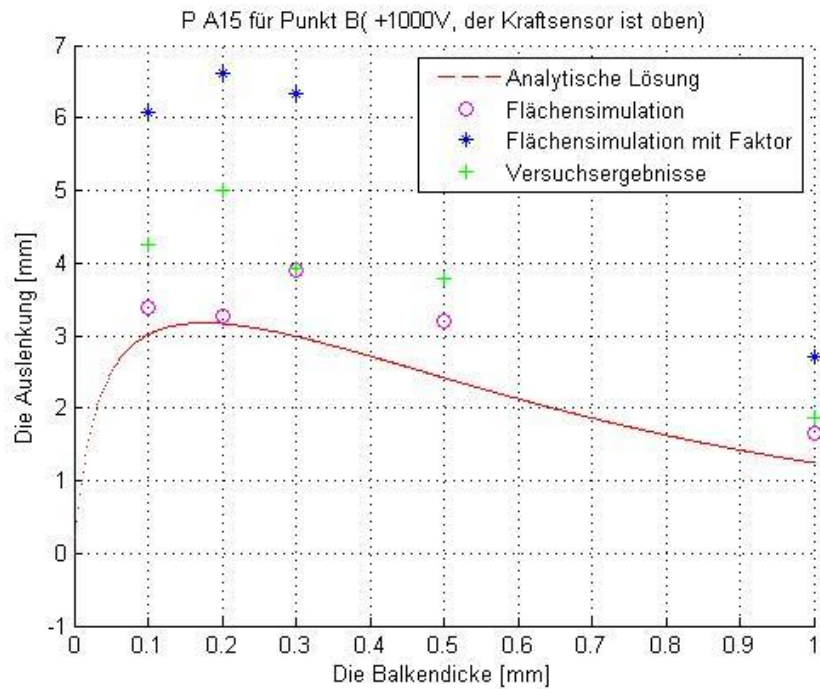
**Tabelle 7.** 1 FHG P A15 +1000V, der Kraftsensor ist oben.

In der Tabelle sieht man die Ergebnisse (Auslenkungen) für drei Punkte am Balken, der vom Aktuator P-876.A15 mit +1000V angeregt wird. In diesem Fall misst man die Kraft von oben und der Lasersensor liegt unter dem Balken.

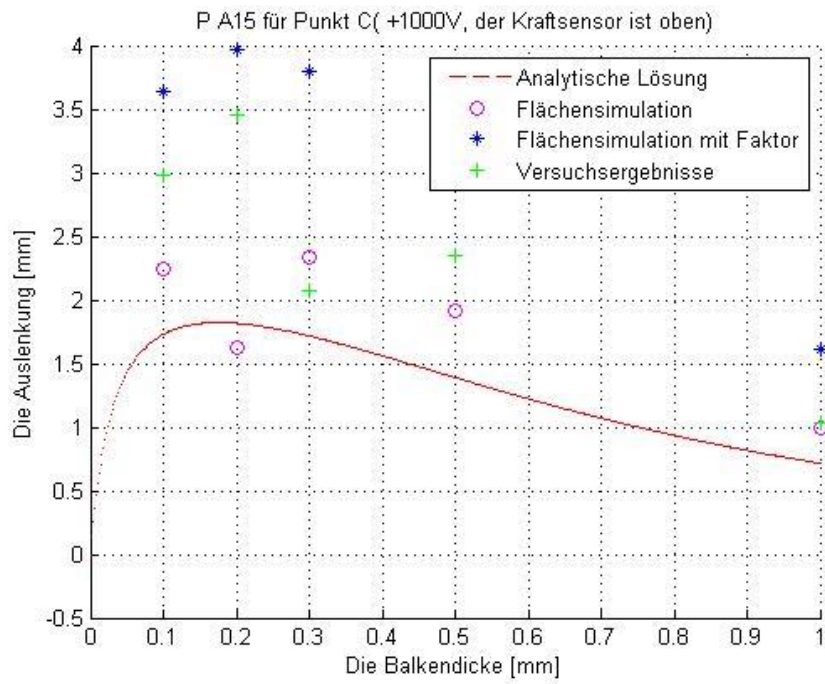
In der Abbildungen 46, 47 und 48 sind die gemessenen Werte für die Punkte A, B und mit analytischen Ergebnissen verglichen.



**Abbildung 46.** Auslenkungswerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter +1000V.



**Abbildung 45.** Auslenkungswerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter +1000V.



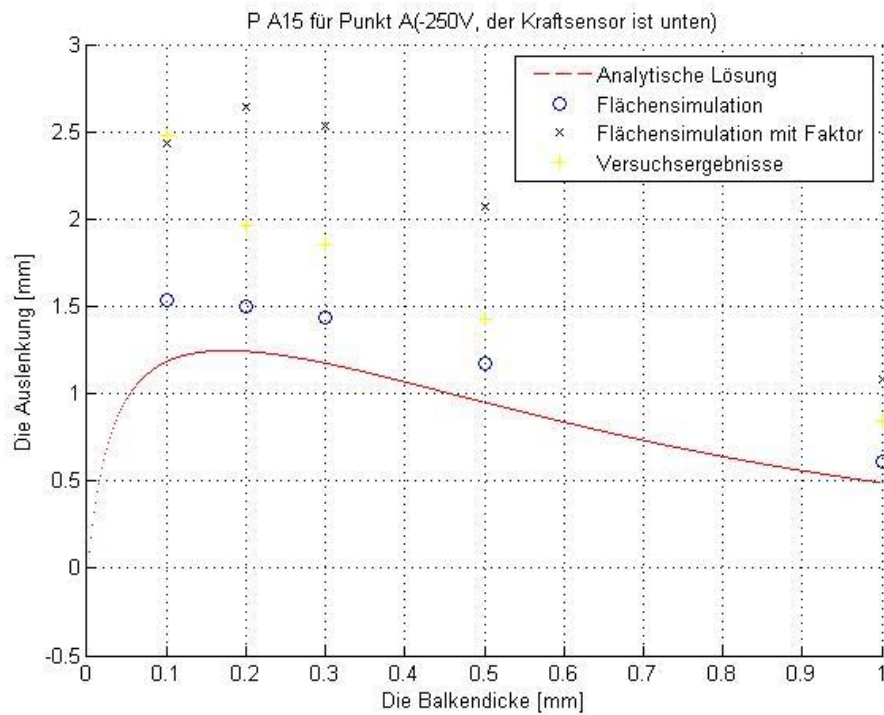
**Abbildung 47.** Auslenkungswerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter +1000V.

	Punkt A			
Balkendicke	Analyse [mm]	Flächenaktuatorsimulation [mm]	Flächenaktuatorsimulation mit Faktor [mm]	Versuchsergebnisse [mm]
1 mm	0.4900	0.613	1.079	0.85
0.5 mm	0.9508	1.176	2.072	1.43
0.3 mm	1.1745	1.437	2.531	1.85
0.2 mm	1.2429	1.5	2.642	1.965
0.1 mm	1.1840	1.533	2.429	2.475
	Punkt B			
Balkendicke	Analyse [mm]	Flächenaktuatorsimulation [mm]	Flächenaktuatorsimulation mit Faktor [mm]	Versuchsergebnisse [mm]
1 mm	0.3117	0.340	0.674	0.565
0.5 mm	0.6048	0.653	1.295	0.995
0.3 mm	0.7471	0.798	1.582	0.99
0.2 mm	0.7906	0.834	1.651	1.14
0.1 mm	0.7531	0.919	1.518	1.61
	Punkt C			
Balkendicke	Analyse [mm]	Flächenaktuatorsimulation [mm]	Flächenaktuatorsimulation mit Faktor [mm]	Versuchsergebnisse [mm]
1 mm	0.1790	0.204	0.404	0.335
0.5 mm	0.3473	0.392	0.776	0.49
0.3 mm	0.4291	0.478	0.948	1.06
0.2 mm	0.4540	0.5	0.99	0.615
0.1 mm	0.4325	0.613	0.911	0.066

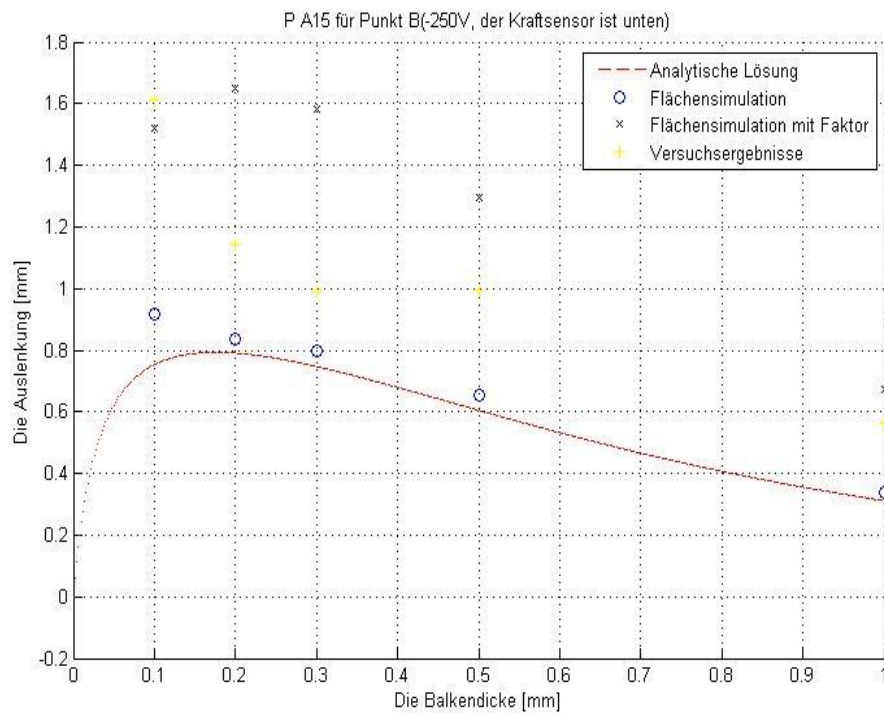
**Tabelle 8.** 1 FHG P A15 -250V, der Kraftsensor ist unten.

In der Tabelle sieht man die Ergebnisse (Auslenkungen) für drei Punkte am Balken, der vom Aktuator P-876.A15 mit -250V angeregt wird. In diesem Fall misst man die Kraft von unten und der Lasersensor liegt über dem Balken.

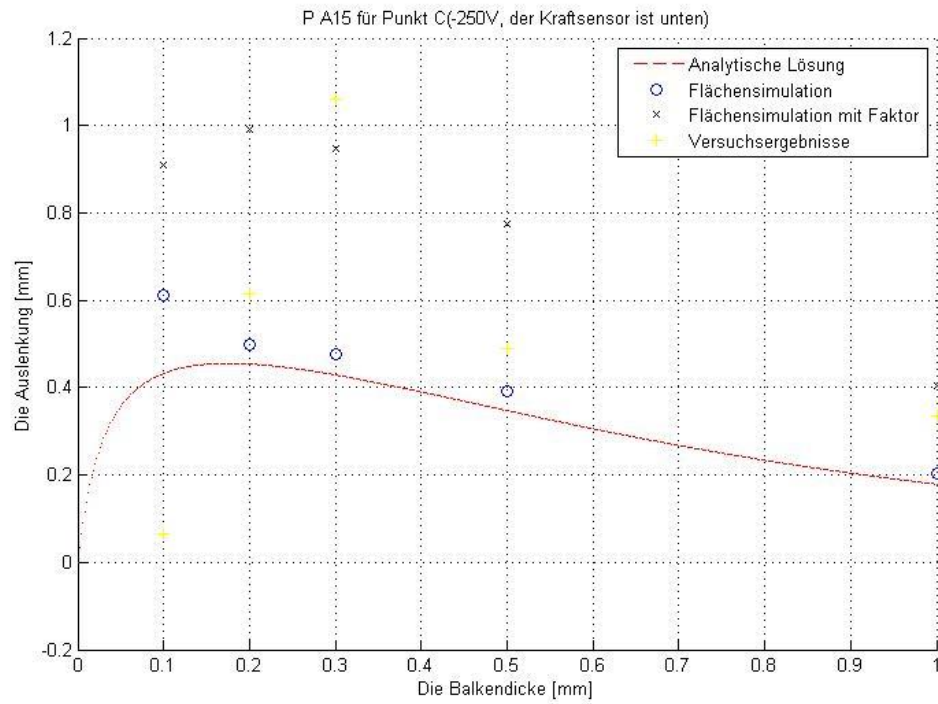
In der Abbildungen 49, 50 und 51 sind die gemessenen Werte für die Punkte A, B und mit analytischen Ergebnissen verglichen.



**Abbildung 48.** Auslenkungswerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt A unter -250V.



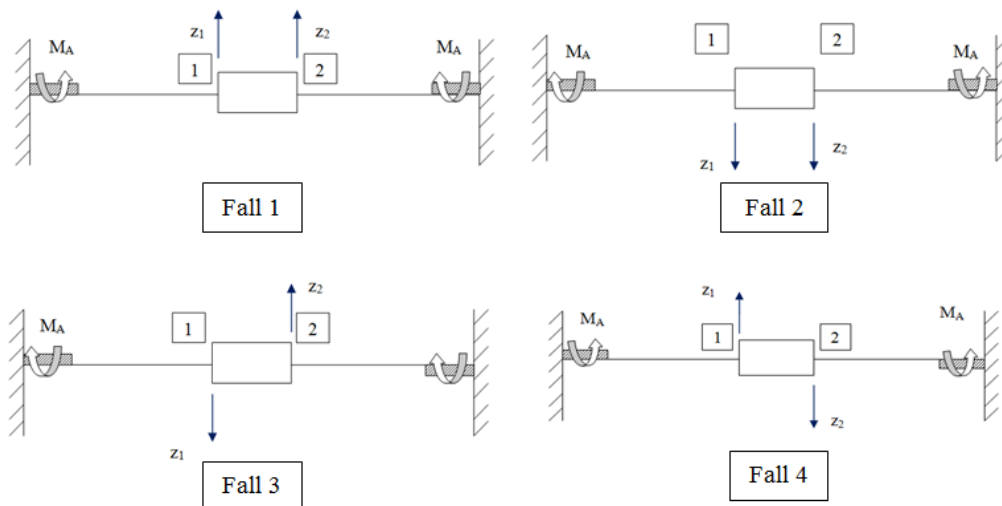
**Abbildung 49.** Auslenkungswerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt B unter -250V.



**Abbildung 50.** Auslenkungswerten bei P A15 für unterschiedliche Balkendicke bei Punkt C unter - 250V.

### 7.3. 2FHG-System Versuchstand

Für zwei Freiheitsgradsysteme kann man die andere Bewegung der Masse unter unterschiedlichen Anregungen bekommen. Zum Beispiel regt man einen Aktuator mit +400V und den anderen mit -400V an.



**Abbildung 51.** Bewegungen der Masse unter Anregung der unterschiedlichen Anregungen

Die vorliegende Darstellung zeigt die Anregungsvarianten, die während den Versuchen überprüft wurden. Die in der Abbildung benutzten Formelzeichen sind wie unten.

**$M_A$ :** Vom Aktuator erzeugte Moment

**$z_1$ :** Auslenkung des Punktes 1

**$z_2$ :** Auslenkung des Punktes 2

An den mit 1 und 2 gekennzeichneten Stellen, die in der Abbildung 52 dargestellt sind, wurden die Auslenkungen mit den Lasersensor gemessen.

	Kraft [N] Messergebnisse		Moment [Nm]	Auslenkung [mm]				Winkel (°)	
	Punkt 1	Punkt 2		Simulation		Messergebnisse		Simulation	Messergebnisse
				Punkt 1	Punkt 2	Punkt 1	Punkt 2		
P A15 - 1 mm Balken (+1000V) (Fall 1)	3.37	2.24	0.0452	1.33	1.33	1.43	1.39	0	0.029
P A15 - 1 mm Balken (-250V) (Fall 2)	0.446	1.57	0.0442	0.332	0.332	0.305	0.31	0	0.0036
P A15 - 1 mm Balken (-250V oben und unten) (Fall 3)	0.856	0.607	-0.0585	-0.0679	0.0678	-0.12	0.015	0.09	0.02
P A15 - 1 mm Balken (+1000V oben und unten) (Fall 4)	3.676	3.412	0.2835	0.272	-0.271	0.42	-0.41	0.39	0.59

**Tabelle 9.** P A15, 1 mm Balken, vier Fälle



	Kraft [N]		Moment [Nm]	Auslenkung [mm]				Winkel (°)	
	Messergebnisse			Simulation		Messergebnisse		Simulation	Messergebnisse
	Punkt 1	Punkt 2		Punkt 1	Punkt 2	Punkt 1	Punkt 2		
P A15 - 0.5 mm Balken (+1000V) (Fall 1)	2.49	1.74	0.03	2.799	2.793	0.615	0.445	0.0043	0.1218
P A15 - 0.5 mm Balken (-250V) (Fall 2)	0.633	0.379	-0.0102	0.695	0.696	0.095	0.075	0.0007	0.0143
P A15 - 0.5 mm Balken (-250V oben und unten) (Fall 3)	0.587	0.297	-0.0354	-0.171	0.174	-0.085	0.035	0.244	0.121
P A15 - 0.5 mm Balken (+1000V oben und unten) (Fall 4)	1.49	1.39	0.1152	0.682	-0.689	1.205	-0.125	0.98	0.179

**Tabelle 10.** P A15, 0,5 mm Balken, vier Fälle

	Kraft [N] Messergebnisse		Moment [Nm]	Auslenkung [mm]				Winkel (°)	
	Punkt 1	Punkt 2		Simulation		Messergebnisse		Simulation	Messergebnisse
				Punkt 1	Punkt 2	Punkt 1	Punkt 2		
P A12- 0.3 mm Balken (+400V) (Fall 1)	1.033	1.056	-0.0009	2.943	2.943	0.15	0.15	0	0
P A12 - 0.3 mm Balken (-100V) (Fall 2)	0.141	0.205	0.0026	0.735	0.735	0.025	0.02	0	0.0322
P A12 - 0.3 mm Balken (-100V oben und unten) (Fall 3)	0.37	0.01	-0.0152	-0.156	0.195	-0.05	0.01	0.223	0.071
P A12 - 0.3 mm Balken (+400V oben und unten) (Fall 4)	0.986	0.115	0.044	0.624	-0.778	0.2	-0.11	0.893	0.286

**Tabelle 11.** P A12, 0,3 mm Balken, vier Fälle

An dieser Stelle werden keine Diagramme dargestellt, da es wenige Ergebnisse gibt, die man vergleichen kann.

## 8. Zusammenfassung

Ziel der Arbeit ist, eine optimale Balkendicke für ein und zwei Freiheitsgradsystem zu finden, das von unterschiedlichen Flächenaktuatoren angeregt wird. Außerdem untersucht man die einwirkende Kraft, die das System zurück zur Anfangsposition bringt.

Für die Bearbeitung der Aufgaben wurde die Konstruktion des Versuchstands entwickelt. In der Konstruktion kann man die Kraft und die Auslenkung messen.

Die Ergebnisse wurden von der Berechnung, Simulation und Versuchen bekommen. Danach wurden sie per Tabellen und Abbildungen verglichen.

Schlussfolgerung kann man aus den Ergebnissen für Auslenkung sehen, dass die Simulationswerten größte Ähnlichkeit mit den Versuchsergebnissen. Die anderen Methoden, die während der Arbeit verwendet wurde, geben nicht so nahe Ergebnisse. Außerdem kann man bei der Berechnung der Blockierkraft nur analytische Methode und die Versuchsergebnisse haben. Die Ergebnisse für diese Größe sind auch ähnlich.

## Quellenverzeichnis

### Literatur:

- [Heinrichs2013] A. Heinrichs, Entwicklung einer 3-DOF-Primäranregung zur MDOF-Schwingungsisolierung, Mai 2013
- [PI-Ceramics] PI Ceramic GmbH, Piezokeramische Materialien und Bauelemente, (Auflage und Verlag nicht angegeben), 2011
- [Sinapius2013] Prof. Dr. Ing. M. Sinapius, Adatronik Skript, 2013
- [Sinapius 13] Prof. Dr. Ing. M. Sinapius, Aktive Vibrationskontrolle Skript, 2013
- [Zenkert1995] Zenkert, D., 1995, An Introduction to Sandwich Construction, Engineering Materials Advisory Services Ltd, UK.

### Internet:

- [1] [http://eec.mst.edu/media/extendedlearning/eec/documents/birmansamples/samplechapters/AE-ME484\\_Fall\\_2010\\_chapter\\_7.pdf](http://eec.mst.edu/media/extendedlearning/eec/documents/birmansamples/samplechapters/AE-ME484_Fall_2010_chapter_7.pdf)

## Anhang

### Programmskript für Matlab

```
% Die Berechnung für den Aktuator P-876.A.12
% In diesem Programm benutzt man kein Variabel
% In der Berechnung wird Sandwich Theorie benutzt, um die gesamte
Biegesteifigkeit des Balkenteils mit Flächenaktuator zu berechnen.

clear all;clc;

Ya=23300; % [N/mm^2] E-Modul Aktuator
Ys=2.1e5; % [N/mm^2] E-Modul des
Balkens
ha=.5; % [mm] Aktuatordicke
ba=35; % Breite der Aktuator
bs=input('Die Breite des Balkens = '); % Breite der Struktur
hs=input('Die Dicke des Balkens = '); % Balkendicke
l=input('Die Balkenlänge = ');
la=61/2; % Aktuatorlänge
if l<2*la
    disp('Die Balkenlänge muss grösser als 61 mm')
    l=input('Die Balkenlänge = ');
end
l2=l-la;
l1=la;
alphaY=Ya/Ys;
YS=Ys;

Pa=265; % Die Balancekraft des Aktuators

IS=(bs*hs^3)/12;
hneu=(hs^2-alphaY*ha^2)/(2*alphaY*ha+2*hs); % Der Abstand von der
Oberfläche des Balkens bis zum neutraler Phase
za=ha/2+hneu
YSIS=Ys*IS
YkIk=(1/3)*bs*Ys*(hneu^3+(hs-hneu)^3)+(1/3)*ba*Ya*((ha+hneu)^3-hneu^3) % Die
Berechnung der E*I des Compositenteils (Aktuator und Struktur)
w=(Pa*za/(YkIk))*(3*l1^2/2+l1*(l2-l1)) % Die Auslenkung am Ende des
Balkens
pay=Pa*za*(1.5*(l1^2)/(YkIk)+l1*(l2-l1)/(YkIk));
payda=((4/6)*l1^3/(YkIk)+2*l2*l1^2/(YkIk)-(1/6)*(l2-
l1)^3/(YS*IS))+l2*l1*(l2-l1)/(YkIk)+l1*l2*(l2-l1)/(YkIk)+.5*(l2-
l1)^3/(YS*IS));
FB=pay/payda
Ar=FB*w/2
```

```

% Die Berechnung für den Aktuator P-876.A.12
% In diesem Programm wird die Breite des Balkens als Variabel gewählt.
% In der Berechnung wird Sandwich Theorie benutzt, um die gesamte
Biegesteifigkeit des Balkenteils mit Flächenaktuator zu berechnen.

clear all;clc; close all
Ya=23300; % [N/mm^2] E-Modul Aktuator
Ys=2.1e5; % [N/mm^2] E-Modul des Balkens
ha=.5; % [mm] Aktuatordicke
ba=35; % Breite der Aktuator
bsanfang=35; % Anfangsbreite der Struktur
bssw=5; % Schrittweite für die Steigerung der Breite
bsende=50; % Endwert für die Breite der Struktur
l=210; % Länge des Balkens
la=61/2;
l2=l-la;
l1=la; % Abstand von der Mitte des Aktuators bis zur
Einspannung
alphaY=Ya/Ys;
hsend=2; % Dicke des Balkens
hssw=0.01; % Schrittweite für die Steigung des Balkens
YS=Ys;

% Die Breite des Balkens wird variabel (von 35 bis 50)
% genommen.
for bs=bsanfang:bssw:bsende

    for hs=0:hssw:hsend
        %Pa=Ya*eps*ba*ha;
        Pa=265;
        Is=(bs*hs^3)/12; % Flächenträgheitsmoment der
Struktur
        Ia=(ba*ha^3)/12; % Flächenträgheitsmoment des
Aktuators
        Aa=ba*ha; % Fläche des Aktuators
        As=bs*hs; % Fläche der Struktur
        Gy=(As*hs/2+Aa*(hs+ha/2))/(As+Aa);
        ds=Gy-hs/2; % Der Abstand der Struktur zum
neuen Schwerpunkt
        da=(2*hs+ha)/2-Gy; % Der Abstand des Aktuators
zum neuen Schwerpunkt
        IK=Is+As*ds^2+Ia+Aa*da.^2;
        IS=(bs*hs^3)/12;
        hneu=(hs^2-alphaY*ha^2)/(2*alphaY*ha+2*hs); %Der Abstand von
der Oberfläche des Balkens bis zum neutraler Phase
        za=ha/2+hneu;
        YkIk=(1/3)*bs*Ys*(hneu^3+(hs-hneu)^3)+(1/3)*ba*Ya*((ha+hneu)^3-
hneu^3); % Die Berechnung der E*I des Compositenteils (Aktuator
und Struktur)
        w=(Pa*za/(YkIk))*(3*l1^2/2+l1*(l2-l1)); % Die Auslenkung am
Ende des Balkens
        subplot(3,1,1),plot(hs,w)
        hold on
        title('Auslenkung-Balkendicke Diagramm')
        pay=Pa*za*(1.5*(l1^2)/(YkIk)+l1*(l2-l1)/(YkIk));
        payda=((4/6)*l1^3/(YkIk)+2*l2*l1^2/(YkIk)-(1/6)*(l2-
l1)^3/(YS*IS)+l2*l1*(l2-l1)/(YkIk)+l1*l2*(l2-l1)/(YkIk)+.5*(l2-
l1)^3/(YS*IS));
    end
end

```

```

        FB=pay/payda;
        subplot(3,1,2),plot(hs,FB)
        hold on
        title('Blockierkraft-Balkendicke Diagramm')
        Ar=FB*w/2;
        subplot(3,1,3),plot(hs,Ar)
        hold on
        title('Arbeit-Balkendicke Diagramm')
    end
end

```

```

% Die Berechnung für den Aktuator P-876.A.15
% In diesem Programm benutzt man kein Variabel
% In der Berechnung wird Sandwich Theorie benutzt, um die gesamte
Biegesteifigkeit des Balkenteils mit Flächenaktuator zu berechnen.

clear all;clc;
Ya=34700; % [N/mm^2] E-Modul Aktuator
Ys=2.1e5; % [N/mm^2] E-Modul des
Balkens
ha=.8; % [mm] Aktuatordicke
ba=35; % Breite der Aktuator
bs=input('Die Breite des Balkens = '); % Breite der Struktur
hs=input('Die Dicke des Balkens = '); % Balkendicke
l=input('Die Balkenlänge = ');
la=61/2; % Aktuatorlänge
if l<2*la
    disp('Die Balkenlänge muss grösser als 61 mm')
    l=input('Die Balkenlänge = ');
end
l2=l-la;
l1=la;
alphaY=Ya/Ys;
YS=Ys;

Pa=775;
Is=(bs*hs^3)/12; % Flächenträgheitsmoment der Struktur
Ia=(ba*ha^3)/12; % Flächenträgheitsmoment des Aktuators
Aa=ba*ha; % Fläche des Aktuators
As=bs*hs; % Fläche der Struktur
Gy=(As*hs/2+Aa*(hs+ha/2))/(As+Aa);
ds=Gy-hs/2; % Abstand der Struktur zum neuen
Schwerpunkt
da=(2*hs+ha)/2-Gy; % Abstand des Aktuators zum neuen
Schwerpunkt
IS=(bs*hs^3)/12;
hneu=(hs^2-alphaY*ha^2)/(2*alphaY*ha+2*hs); % Abstand von der
Oberfläche des Balkens bis zum neutraler Phase
za=ha/2+hneu;
YkIk=(1/3)*bs*Ys*(hneu^3+(hs-hneu)^3)+(1/3)*ba*Ya*((ha+hneu)^3-hneu^3); %
Die Berechnung der E*I des Compositenteils (Aktuator und Struktur)
w=(Pa*za/(YkIk))*(3*l1^2/2+l1*(l2-l1)) % Die Auslenkung am Ende des
Balkens
pay=Pa*za*(1.5*(l1^2)/(YkIk)+l1*(l2-l1)/(YkIk));
payda=((4/6)*l1^3/(YkIk)+2*l2*l1^2/(YkIk)-(1/6)*(l2-
l1)^3/(YS*IS)+l2*l1*(l2-l1)/(YkIk)+l1*l2*(l2-l1)/(YkIk)+.5*(l2-
l1)^3/(YS*IS));
FB=pay/payda
Ar=FB*w/2

```



```

% Die Berechnung für den Aktuator P-876.A.15
% In diesem Programm wird die Breite des Balkens als Variabel gewählt.
% In der Berechnung wird Sandwich Theorie benutzt, um die gesamte
Biegesteifigkeit des Balkenteils mit Flächenaktuator zu berechnen.

clear all;clc; close all
Ya=34700; % [N/mm^2] E-Modul Aktuator
Ys=2.1e5; % [N/mm^2] E-Modul des Balkens
ha=.8; % [mm] Aktuatordicke
ba=35; % Breite der Aktuator
bsanfang=35; % Anfangsbreite der Struktur
bssw=5; % Schrittweite für die Steigerung der Breite
bsende=50; % Endwert für die Breite der Struktur
l=210; % Länge des Balkens
la=61/2;
l2=l-la;
l1=la; % Abstand von der Mitte des Aktuators bis zur
Einspannung
alphaY=Ya/Ys;
hsend=2; % Dicke des Balkens
hssw=0.01; % Schrittweite für die Steigung des Balkens
YS=Ys;
% Die Breite des Balkens wird variabel (von 35 bis 50)
% genommen.
for bs=bsanfang:bssw:bsende

    for hs=0:hssw:hsend
        Pa=775;
        Is=(bs*hs^3)/12; % Flächenträgheitsmoment der
Struktur
        Ia=(ba*ha^3)/12; % Flächenträgheitsmoment des
Aktuators
        Aa=ba*ha; % Fläche des Aktuators
        As=bs*hs; % Fläche der Struktur
        Gy=(As*hs/2+Aa*(hs+ha/2))/(As+Aa);
        ds=Gy-hs/2; % Der Abstand der Struktur zum
neuen Schwerpunkt
        da=(2*hs+ha)/2-Gy; % Der Abstand des Aktuators
zum neuen Schwerpunkt
        IK=Is+As*ds^2+Ia+Aa*da.^2;
        IS=(bs*hs^3)/12;
        hneu=(hs^2-alphaY*ha^2)/(2*alphaY*ha+2*hs); %Der Abstand von
der Oberfläche des Balkens bis zum neutraler Phase
        za=ha/2+hneu;
        YkIk=(1/3)*bs*Ys*(hneu^3+(hs-hneu)^3)+(1/3)*ba*Ya*((ha+hneu)^3-
hneu^3); % Die Berechnung der E*I des Compositenteils (Aktuator
und Struktur)
        w=(Pa*za/(YkIk))*(3*l1^2/2+l1*(l2-l1)); % Die Auslenkung am
Ende des Balkens
        subplot(3,1,1),plot(hs,w,'r')
        hold on
        title('Auslenkung-Balkendicke Diagramm')
        pay=Pa*za*(1.5*(l1^2)/(YkIk)+l1*(l2-l1)/(YkIk));
        payda=((4/6)*l1^3/(YkIk)+2*l2*l1^2/(YkIk)-(1/6)*(l2-
l1)^3/(YS*IS)+l2*l1*(l2-l1)/(YkIk)+l1*l2*(l2-l1)/(YkIk)+.5*(l2-
l1)^3/(YS*IS));
        FB=pay/payda;
        subplot(3,1,2),plot(hs,FB,'r')

```

```

        hold on
        title('Blockierkraft-Balkendicke Diagramm')
        Ar=FB*w/2;
        subplot(3,1,3),plot(hs,Ar,'r')
        hold on
        title('Arbeit-Balkendicke Diagramm')
    end
end

```

## ***Programmskript für ANSYS***

### **!Die Werte für den ersten Piezoaktuator ohne Faktorwert für 1 FHG**

```
save,pre_mod,db
/prep7
/com,      Units SI! (m, kg, s, N ...)
/COM,
/COM,      MATERTIAL PROPERTIES FOR THE FINITE ELEMENT SOLUTION:
/COM,      CONSTITUTIVE MATRICES FOR PZT-4 (POLAR AXIS ALONG Y)
/COM,
/COM, [c11 c13 c12 0 0 0] [0 e31 0] [ep11 0 0]
/COM, [c13 c33 c13 0 0 0] [0 e33 0] [0 ep33 0]
/COM, [c12 c13 c11 0 0 0] [0 e31 0] [0 0 ep11]
/COM, [0 0 0 c44 0 0] [e15 0 0]
/COM, [0 0 0 0 c44 0] [0 0 e15]
/COM, [0 0 0 0 0 c66] [0 0 0]
/COM,

MP,PERX,10,1650          ! PERMITTIVITY AT CONSTANT STRAIN
MP,PERY,10,1750
MP,PERZ,10,1650

TB,ANEL,10,,1           ! ANISOTROPIC ELASTIC STIFFNESS
TBDA,1,4.22e-11,-1.27e-11,-1.27e-11 ! c11,c13,c12
TBDA,7,4.22e-11,-1.27e-11          ! c33,c13
TBDA,12,4.22e-11                  ! c11
TBDA,16,1.097e-10                 ! c44
TBDA,19,1.097e-10                 ! c44
TBDA,21,1.097e-10                 ! c66

TB,PIEZ,10,,1             ! PIEZOELECTRIC STRESS COEFFICIENTS
TBDA,3,-180e-12           ! e31
TBDA,6,400e-12            ! e33
TBDA,9,-180e-12           ! e31
TBDA,14,550e-12           ! e15
TBDA,16,550e-12           ! e15
mp,dens,10,7800           !Density

et,10,226,1001
cmsel,s,Piezoelement
emodif,all,type,10
emodif,all,mat,10
emodif,all,esys,17
alls
```

```
cmsel,s,Elektrode1  
d,all,volt,0  
cmsel,s,Elektrode2  
d,all,volt,400  
alls  
/solu
```

! Solution

```
resume,pre_mod,db  
/post1  
set,last,last
```

**! Die Werte für den zweiten Piezoaktuator ohne Faktorwert für 1 FHG**

```
save,pre_mod,db
/prep7
/com,      Units SI! (m, kg, s, N ...)
/COM,
/COM,      MATERTIAL PROPERTIES FOR THE FINITE ELEMENT SOLUTION:
/COM,      CONSTITUTIVE MATRICES FOR PZT-4 (POLAR AXIS ALONG Y)
/COM,
/COM, [c11 c13 c12 0 0 0]      [ 0 e31 0]      [ep11 0 0 ]
/COM, [c13 c33 c13 0 0 0]      [ 0 e33 0]      [ 0 ep33 0 ]
/COM, [c12 c13 c11 0 0 0]      [ 0 e31 0]      [ 0 0 ep11]
/COM, [ 0 0 0 c44 0 0]      [e15 0 0]
/COM, [ 0 0 0 0 c44 0]      [ 0 0 e15]
/COM, [ 0 0 0 0 0 c66]      [ 0 0 0]
/COM,
```

```
MP,PERX,10,1650      ! PERMITTIVITY AT CONSTANT STRAIN
MP,PERY,10,1750
MP,PERZ,10,1650
```

```
TB,ANEL,10,,1      ! ANISOTROPIC ELASTIC STIFFNESS
TBDA,1,0.2882e-10,-0.0865e-10,-0.0865e-10      ! c11,c13,c12
TBDA,7,0.2882e-10,-0.0865e-10      ! c33,c13
TBDA,12,0.2882e-10      ! c11
TBDA,16,0.7493e-10      ! c44
TBDA,19,0.7493e-10      ! c44
TBDA,21,0.7493e-10      ! c66
```

```
TB,PIEZ,10,,1      ! PIEZOELECTRIC STRESS COEFFICIENTS
TBDA,3,-180e-12      ! e31
TBDA,6,400e-12      ! e33
TBDA,9,-180e-12      ! e31
TBDA,14,550e-12      ! e15
TBDA,16,550e-12      ! e15
mp,dens,10,7800      !Density
```

```
et,10,226,1001
cmsel,s,Piezoelement
emodif,all,type,10
emodif,all,mat,10
emodif,all,esys,17
alls
cmsel,s,Elektrode1
```

```
d,all,volt,0  
cmisel,s,Elektrode2  
d,all,volt,1000  
alls  
/solu
```

```
! Solution
```

```
resume,pre_mod,db  
/post1  
set,last,last
```

**! Die Werte für den ersten Piezoaktuator ohne Faktorwert für 2 FHG**

```
save,pre_mod,db
/prep7
/com,      Units SI! (m, kg, s, N ...)
/COM,
/COM,      MATERTIAL PROPERTIES FOR THE FINITE ELEMENT SOLUTION:
/COM,      CONSTITUTIVE MATRICES FOR PZT-4 (POLAR AXIS ALONG Y)
/COM,
/COM, [c11 c13 c12 0 0 0]    [ 0 e31 0]    [ep11 0 0 ]
/COM, [c13 c33 c13 0 0 0]    [ 0 e33 0]    [ 0 ep33 0 ]
/COM, [c12 c13 c11 0 0 0]    [ 0 e31 0]    [ 0 0 ep11]
/COM, [ 0 0 0 c44 0 0]    [e15 0 0]
/COM, [ 0 0 0 0 c44 0]    [ 0 0 e15]
/COM, [ 0 0 0 0 0 c66]    [ 0 0 0]
/COM,
```

```
MP,PERX,10,1650          ! PERMITTIVITY AT CONSTANT STRAIN
MP,PERY,10,1750
MP,PERZ,10,1650
```

```
TB,ANEL,10,,,1          ! ANISOTROPIC ELASTIC STIFFNESS
TBDA,1,4.22e-11,-1.27e-11,-1.27e-11    ! c11,c13,c12
TBDA,7,4.22e-11,-1.27e-11    ! c33,c13
TBDA,12,4.22e-11          ! c11
TBDA,16,1.097e-10         ! c44
TBDA,19,1.097e-10         ! c44
TBDA,21,1.097e-10         ! c66
```

```
TB,PIEZ,10,,,1          ! PIEZOELECTRIC STRESS COEFFICIENTS
TBDA,3,-180e-12          ! e31
TBDA,6,400e-12           ! e33
TBDA,9,-180e-12          ! e31
TBDA,14,550e-12          ! e15
TBDA,16,550e-12          ! e15
mp,dens,10,7800          !Density
```

```
/COM, Piezoelement 1
```

```
et,10,226,1001
cmsel,s,Piezoelement1
emodif,all,type,10
emodif,all,mat,10
emodif,all,esys,12
alls
```

/COM, Piezoelement 2

et,10,226,1001  
cmsel,s,Piezoelement2  
emodif,all,type,10  
emodif,all,mat,10  
emodif,all,esys,13  
alls

/COM, Elektrode 1

cmsel,s,Elektrode1\_1  
d,all,volt,0  
cmsel,s,Elektrode1\_2  
d,all,volt,400  
alls  
/solu

/COM, Elektrode 2

cmsel,s,Elektrode2\_1  
d,all,volt,0  
cmsel,s,Elektrode2\_2  
d,all,volt,400  
alls  
/solu

! Solution

resume,pre\_mod,db  
/post1  
set,last,last



## ! Die Werte für den zweiten Piezoaktuator ohne Faktorwert für 2 FHG

```

save,pre_mod,db
/prep7
/com,      Units SI! (m, kg, s, N ...)
/COM,
/COM,      MATERTIAL PROPERTIES FOR THE FINITE ELEMENT SOLUTION:
/COM,      CONSTITUTIVE MATRICES FOR PZT-4 (POLAR AXIS ALONG Y)
/COM,
/COM, [c11 c13 c12 0 0 0]    [ 0 e31 0]    [ep11 0 0 ]
/COM, [c13 c33 c13 0 0 0]    [ 0 e33 0]    [ 0 ep33 0 ]
/COM, [c12 c13 c11 0 0 0]    [ 0 e31 0]    [ 0 0 ep11]
/COM, [ 0 0 0 c44 0 0]      [e15 0 0]
/COM, [ 0 0 0 0 c44 0]      [ 0 0 e15]
/COM, [ 0 0 0 0 0 c66]      [ 0 0 0]
/COM,

```

```

MP,PERX,10,1650          ! PERMITTIVITY AT CONSTANT STRAIN
MP,PERY,10,1750
MP,PERZ,10,1650

```

```

TB,ANEL,10,,1           ! ANISOTROPIC ELASTIC STIFFNESS
TBDA,1,0.2882e-10,-0.0865e-10,-0.0865e-10    ! c11,c13,c12
TBDA,7,0.2882e-10,-0.0865e-10                ! c33,c13
TBDA,12,0.2882e-10                          ! c11
TBDA,16,0.7493e-10                          ! c44
TBDA,19,0.7493e-10                          ! c44
TBDA,21,0.7493e-10                          ! c66

```

```

TB,PIEZ,10,,1           ! PIEZOELECTRIC STRESS COEFFICIENTS
TBDA,3,-180e-12          ! e31
TBDA,6,400e-12           ! e33
TBDA,9,-180e-12          ! e31
TBDA,14,550e-12          ! e15
TBDA,16,550e-12          ! e15
mp,dens,10,7800          !Density

```

```

/COM, Piezoelement 1

```

```

et,10,226,1001
cmsel,s,Piezoelement1
emodif,all,type,10
emodif,all,mat,10
emodif,all,esys,12
alls

```

/COM, Piezoelement 2

```
et,10,226,1001
cmsel,s,Piezoelement2
emodif,all,type,10
emodif,all,mat,10
emodif,all,esys,13
alls
```

/COM, Elektrode 1

```
cmsel,s,Elektrode1_1
d,all,volt,0
cmsel,s,Elektrode1_2
d,all,volt,1000
alls
/solu
```

/COM, Elektrode 1

```
cmsel,s,Elektrode2_1
d,all,volt,0
cmsel,s,Elektrode2_2
d,all,volt,1000
alls
/solu
```

! Solution

```
resume,pre_mod,db
post1
set,last,last
```

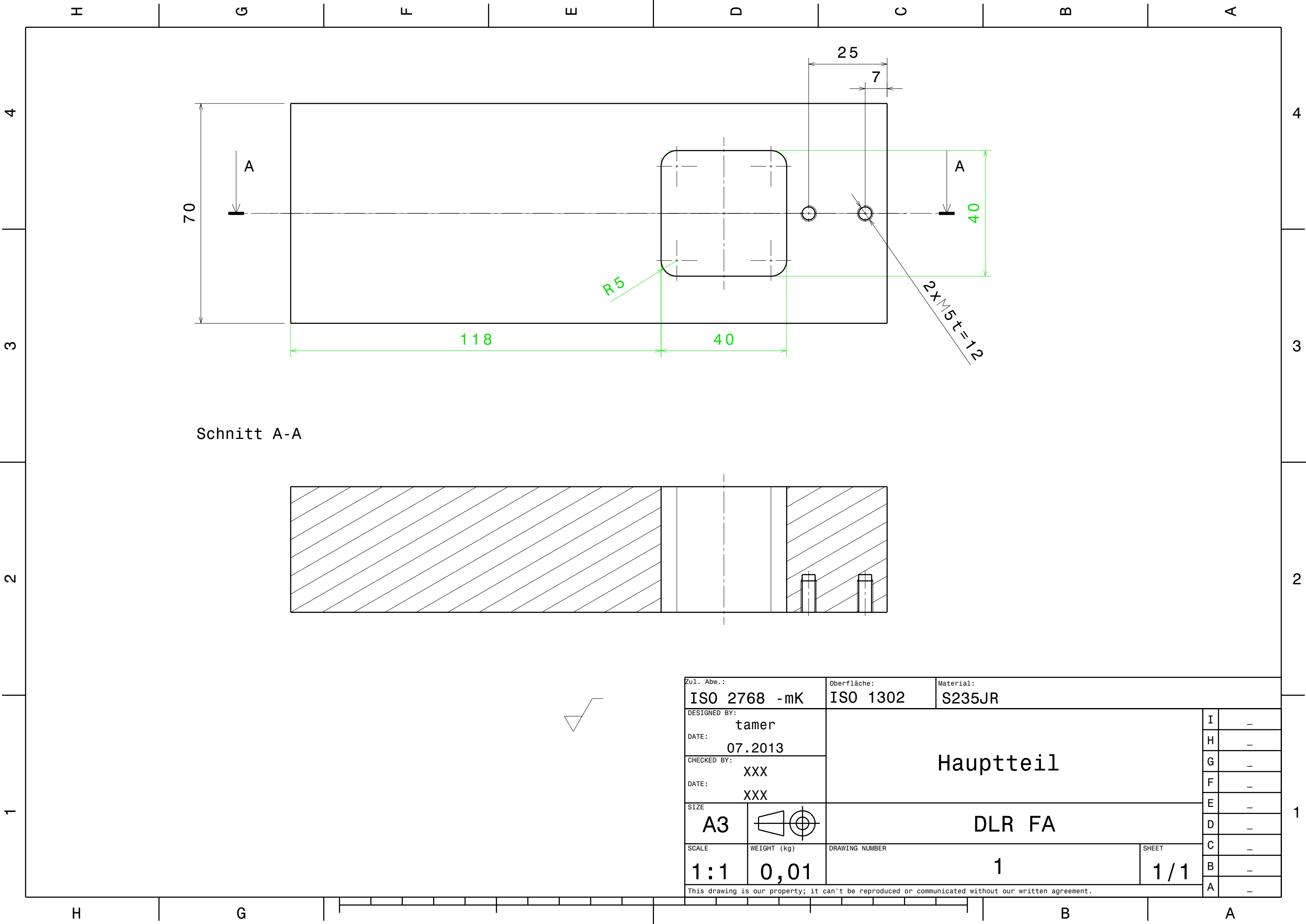
Die Katalogwerte für die Piezoaktuatoren

# Werkstoffdaten

## STANDARMATERIALIEN

„Weich“							
		Einheit	PIC151	PIC255	PIC155	PIC153	PIC152
<b>Physikalische und dielektrische Eigenschaften</b>							
Dichte	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	7,80	7,80	7,80	7,60	7,70
Curie-Temperatur	$T_c$	°C	250	350	345	185	340
Relative Permittivitätszahl in Polungsrichtung ↓ zur Polung	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$		2400	1750	1450	4200	1350
	$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$		1980	1650	1400		
Dielektrischer Verlustfaktor	$\tan \delta$	10 <sup>-3</sup>	20	20	20	30	15
<b>Elektromechanische Eigenschaften</b>							
Kopplungsfaktor	$k_p$		0,62	0,62	0,62	0,62	0,48
	$k_t$		0,53	0,47	0,48		
	$k_{31}$		0,38	0,35	0,35		
	$k_{33}$		0,69	0,69	0,69		0,58
	$k_{15}$			0,66			
Piezoelektrische Ladungskonstante	$d_{31}$		-210	-180	-165		
	$d_{33}$	10 <sup>-12</sup> C/N	500	400	360	600	300
	$d_{15}$			550			
Piezoelektrische Spannungskonstante	$g_{31}$		-11,5	-11,3	-12,9		
	$g_{33}$	10 <sup>-3</sup> Vm/N	22	25	27	16	25
<b>Akustomechanische Eigenschaften</b>							
Frequenzkonstante	$N_p$		1950	2000	1960	1960	2250
der Serienresonanzfrequenz	$N_t$		1500	1420	1500		
	$N_s$		1750		1780		
	$N_l$	Hz · m	1950	2000	1990	1960	1920
Elastische Nachgiebigkeitskonstante	$S_{11}^F$	10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /N	15,0	16,1	15,6		
	$S_{33}^F$		19,0	20,7	19,7		
Elastische Steifigkeitskonstante	$C_{33}^D$	10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup>	10,0		11,1		
Mechanischer Gütefaktor	$Q_m$		100	80	80	50	100
<b>Temperaturstabilität</b>							
Temperaturkoeffizient von $\epsilon_{33}^T$ (im Bereich -20 °C bis +125 °C)	$TK \epsilon_{33}$	10 <sup>-3</sup> /K	6	4	6	5	2
<b>Zeitstabilität</b> (relative Änderung des Parameters pro Zeitdekade in %)							
Relative Dielektrizitätszahl	$C_\epsilon$	%		-1,0	-2,0		
Kopplungsfaktor	$C_K$			-1,0	-2,0		

## Technische Zeichnungen







4

3

2

1

H

G

F

E

D

C

B

A

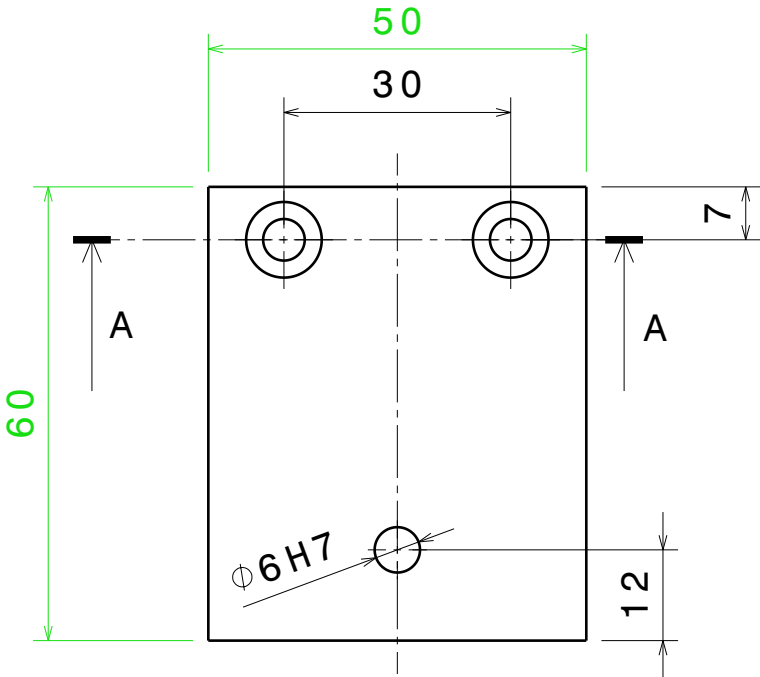
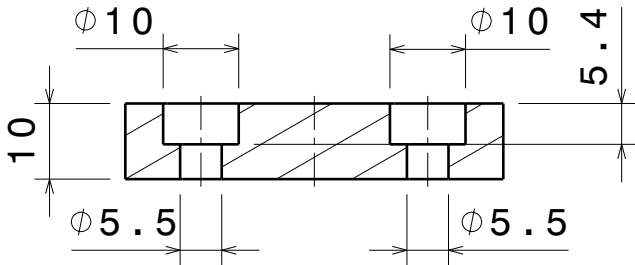
4

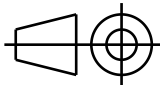
3

2

1

Schnitt A-A



Zul. Abw.: ISO 2768 -mK		Oberfläche: ISO 1302		Material: S235JR		
DESIGNED BY: tamer DATE: 07.2013		Seitenteil			I	—
CHECKED BY: XXX DATE: XXX					H	—
					G	—
					F	—
SIZE A3		DLR FA			E	—
					D	—
					C	—
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) 0,01	DRAWING NUMBER 4			B	—
					A	—
SHEET 1 / 1						
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.						

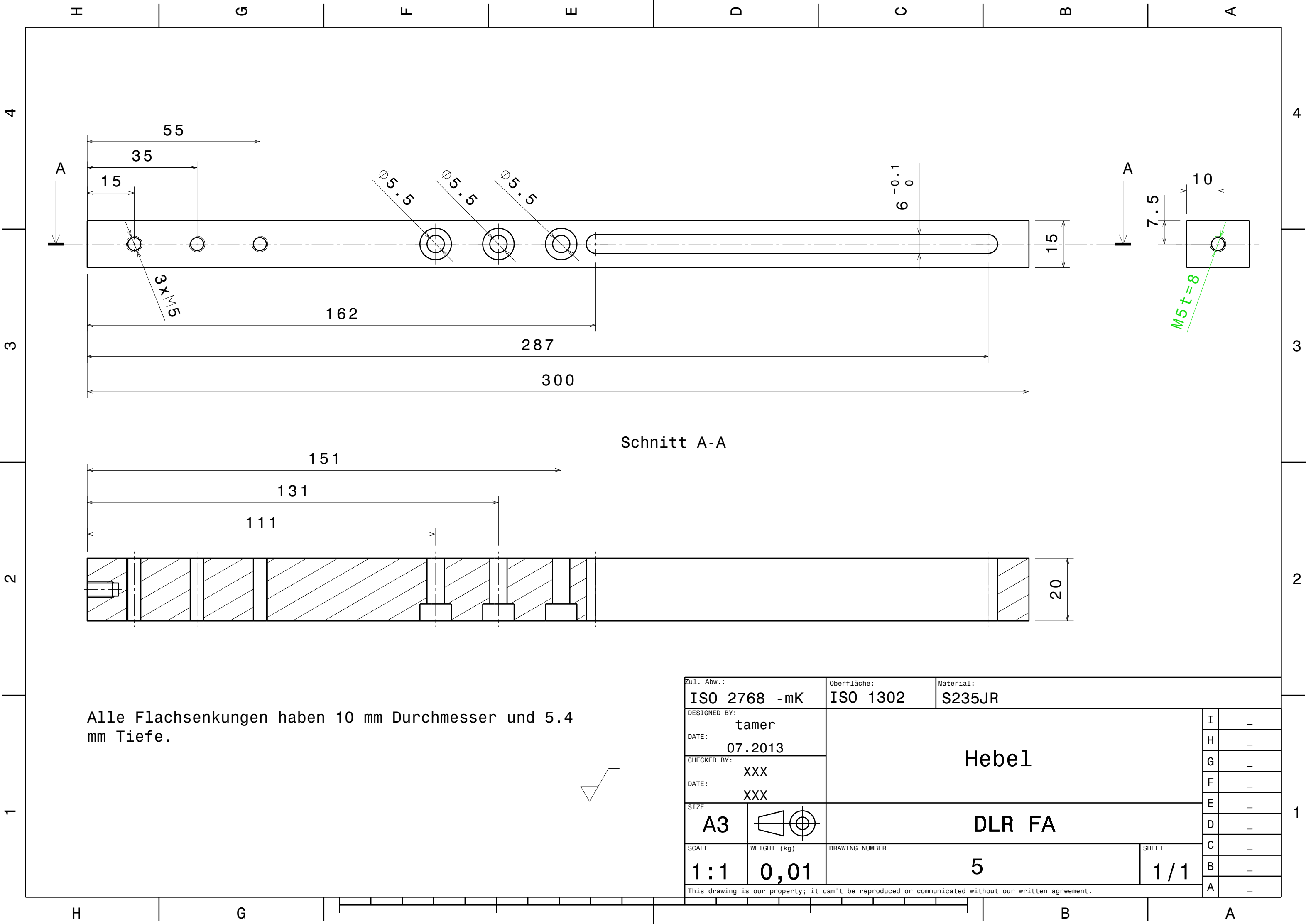
H

G

B

A





4

3

2

1

H

G

F

E

D

C

B

A

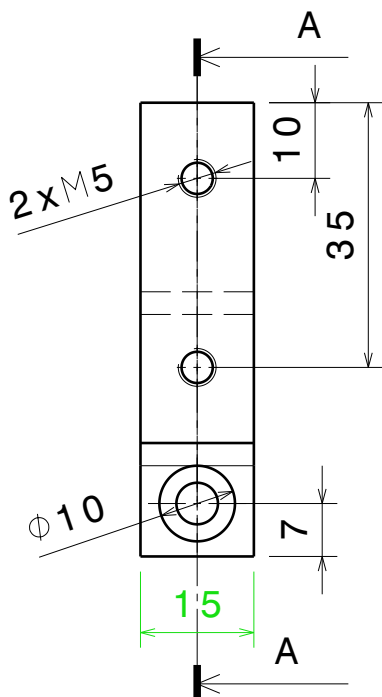
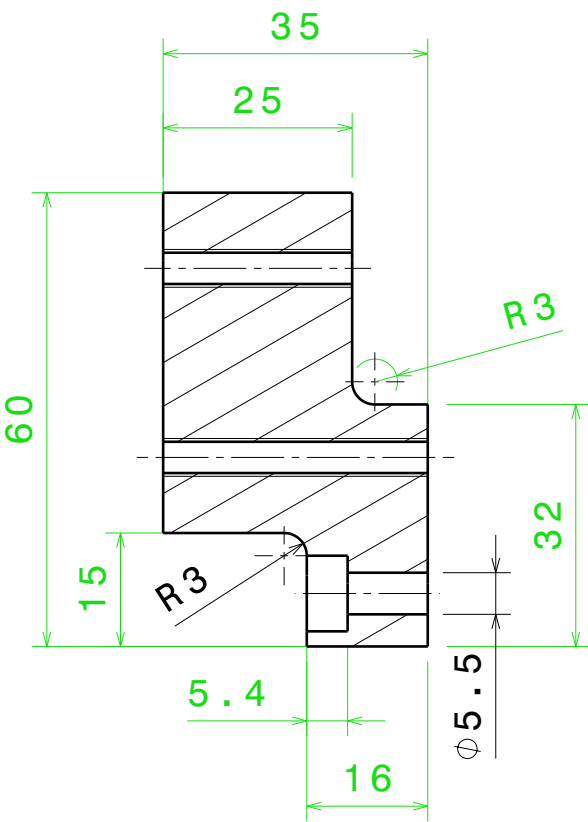
4

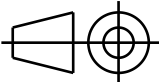
3

2

1

Schnitt A-A



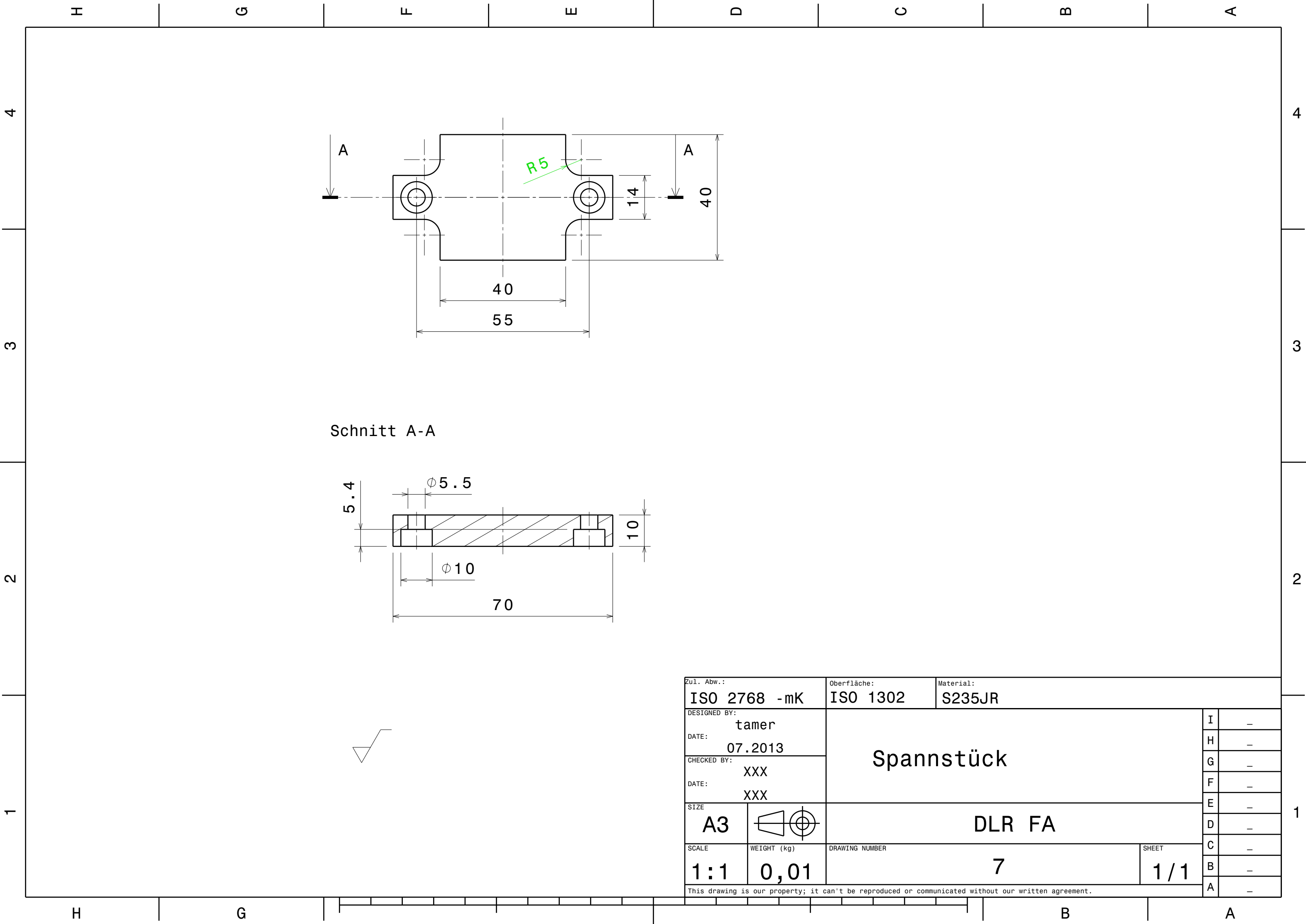
Zul. Abw.:		Oberfläche:		Material:			
ISO 2768 -mK		ISO 1302		S235JR			
DESIGNED BY: tamer		Hinterer Teil				I	—
DATE: 07.2013						H	—
CHECKED BY: XXX						G	—
DATE: XXX		DLR FA				F	—
SIZE A3						E	—
						D	—
SCALE 1:1		WEIGHT (kg) 0,01		DRAWING NUMBER 6		C	—
						B	—
				SHEET 1 / 1		A	—
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.							

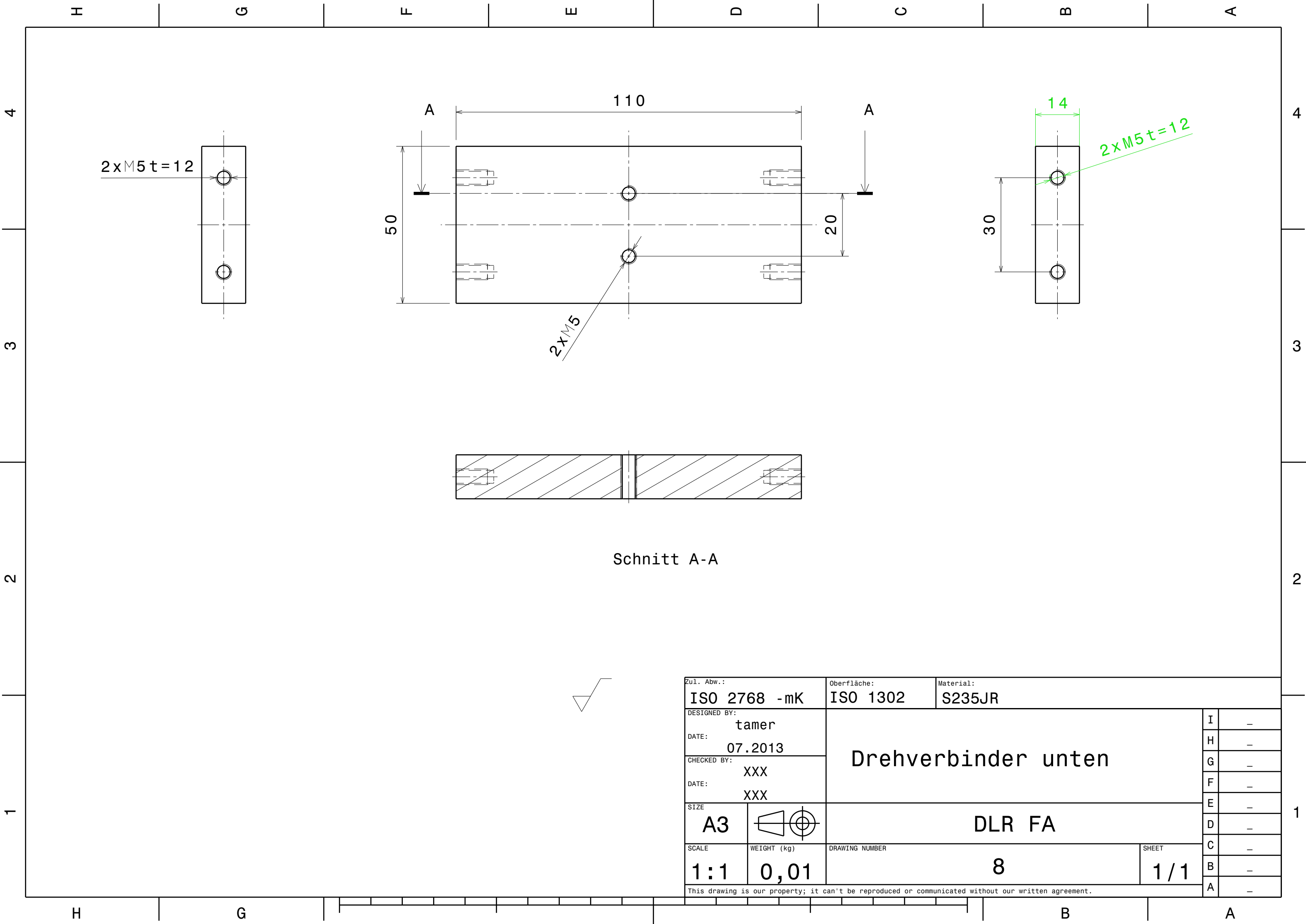
H

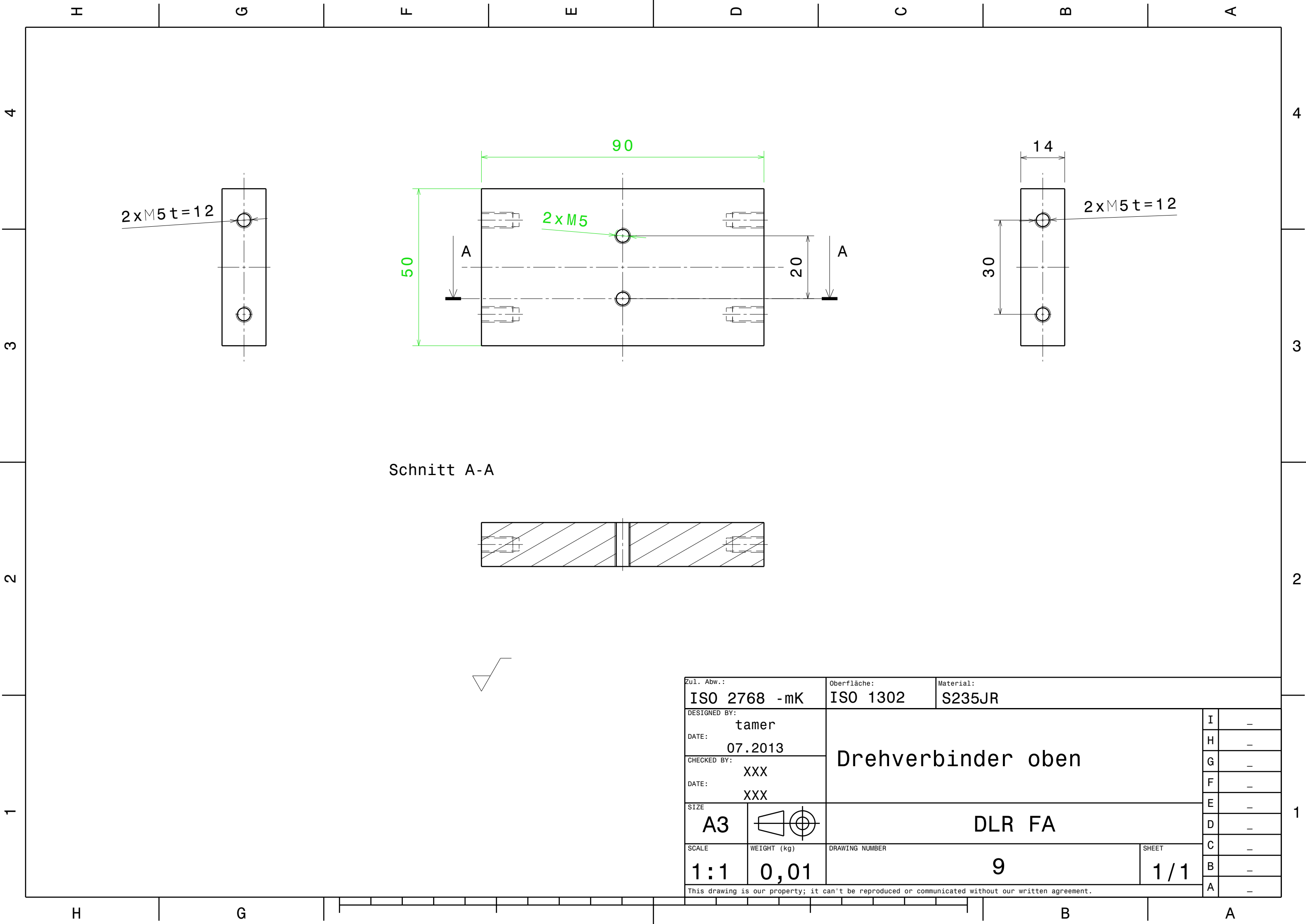
G

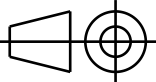
B

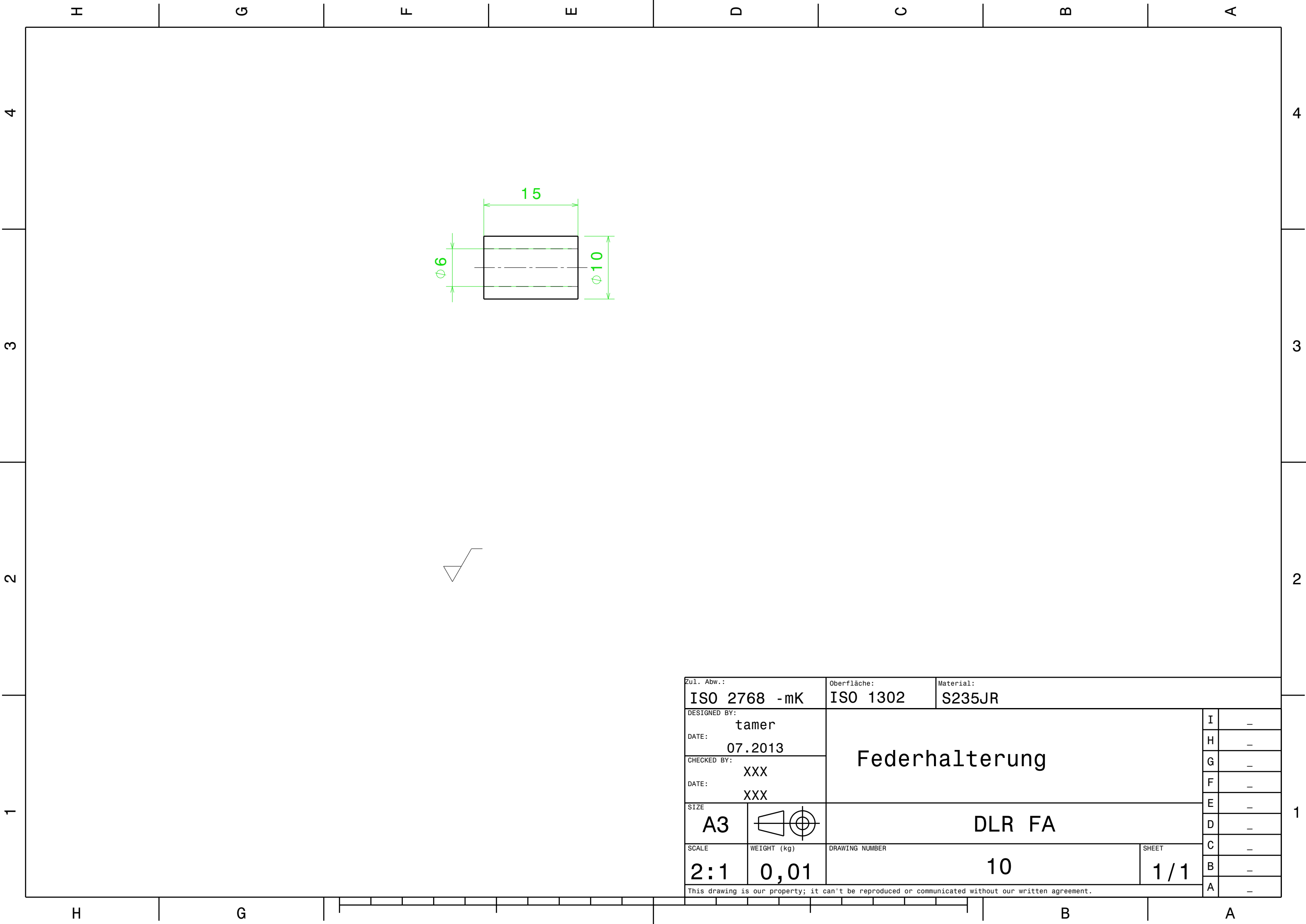
A

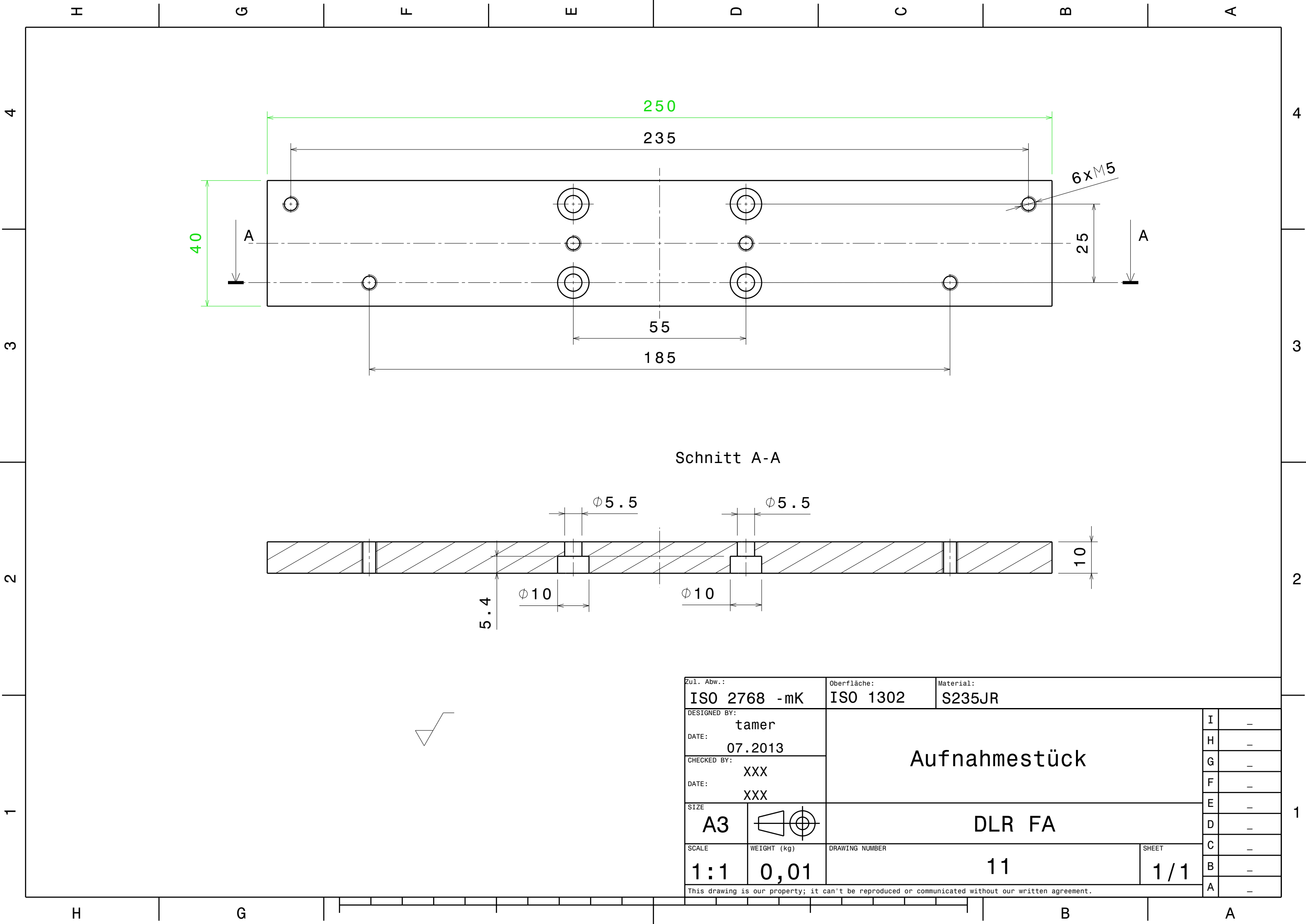


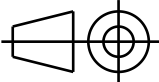


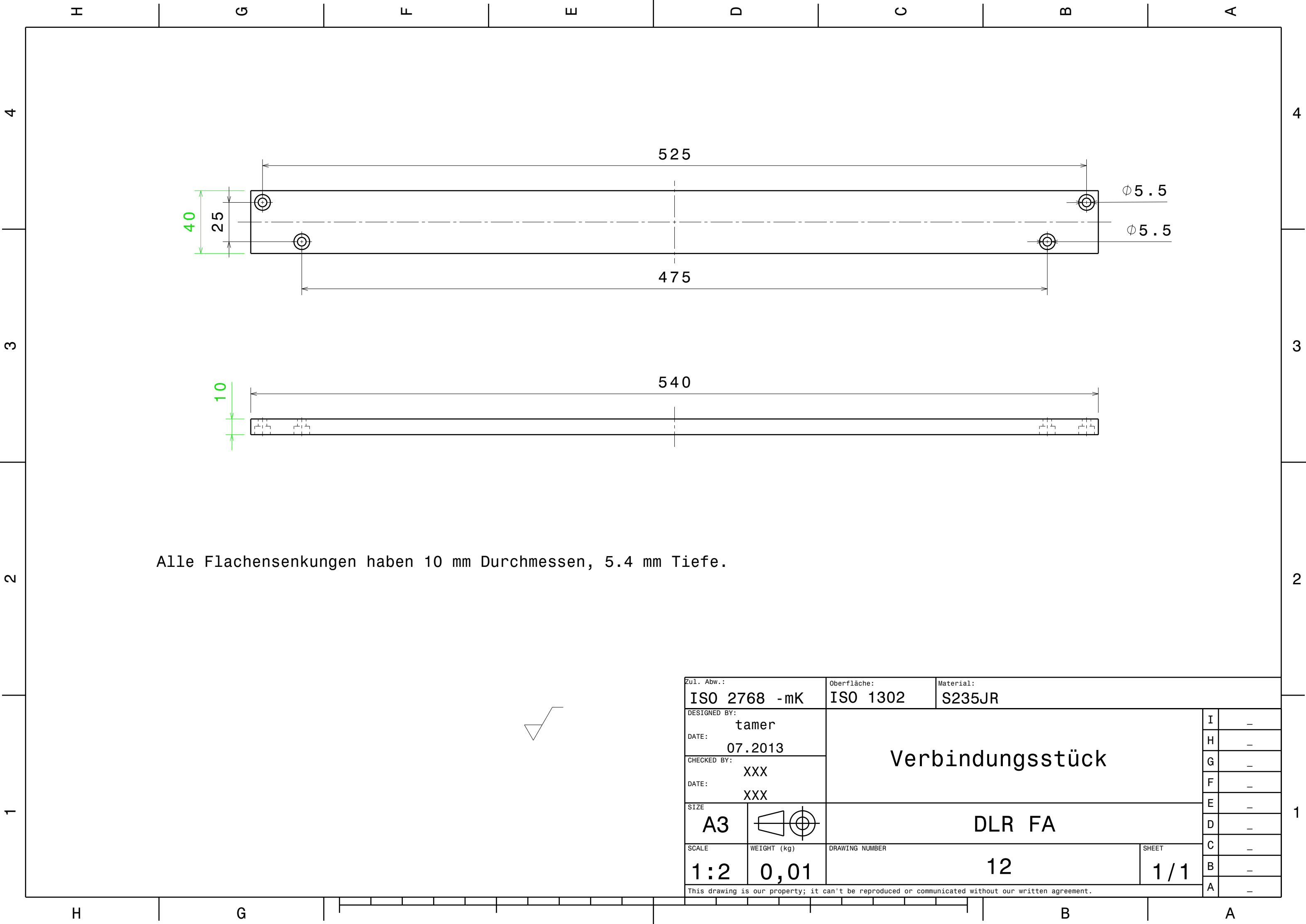


Zul. Abw.:		Oberfläche:		Material:			
ISO 2768 -mK		ISO 1302		S235JR			
DESIGNED BY: tamer		Drehverbinder oben				I	—
DATE: 07.2013						H	—
CHECKED BY: XXX						G	—
DATE: XXX						F	—
SIZE A3		DLR FA				E	—
						D	—
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) 0,01	DRAWING NUMBER 9			SHEET 1 / 1	C	—
						B	—
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.						A	—

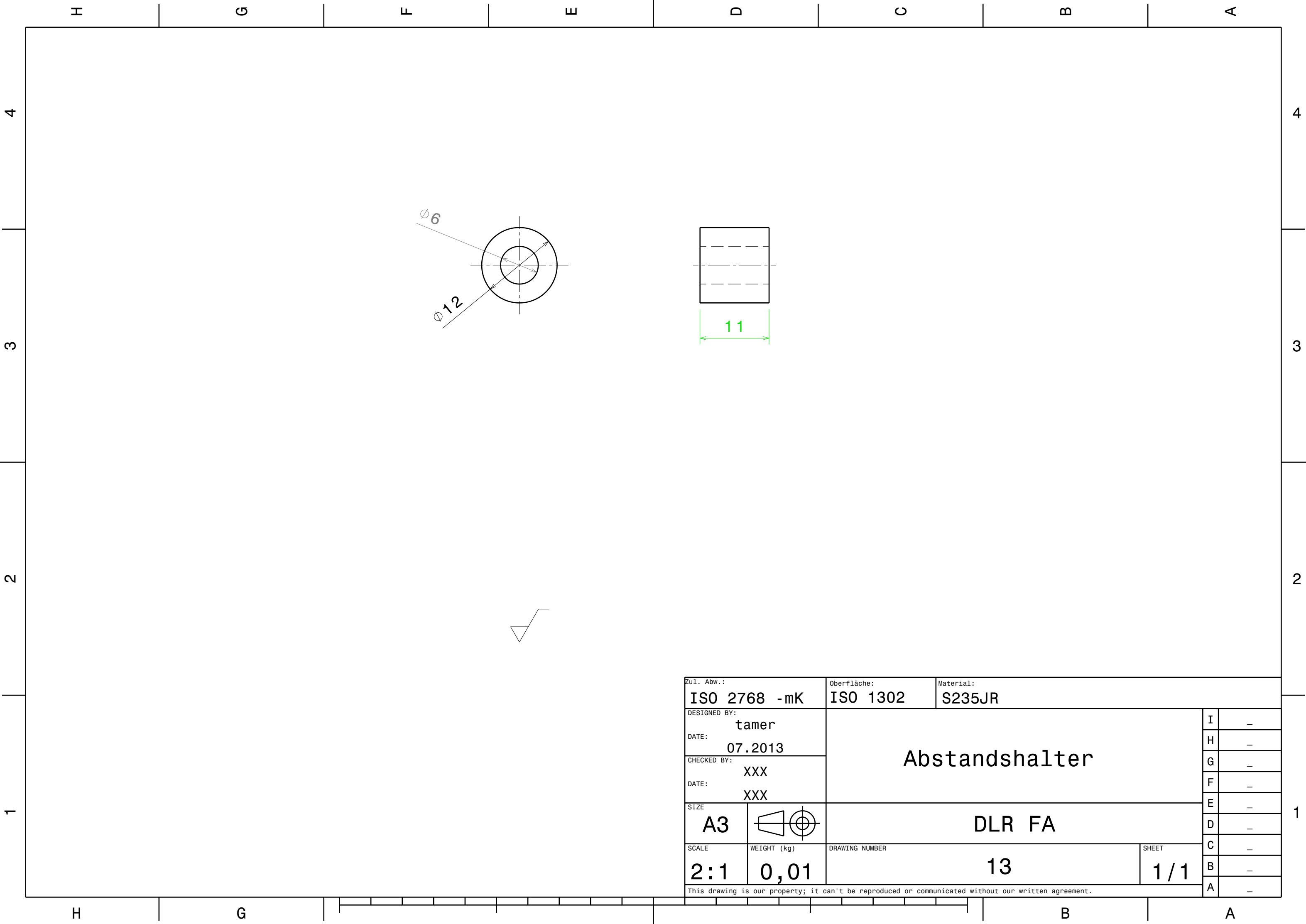




Zul. Abw.:		Oberfläche:		Material:			
ISO 2768 -mK		ISO 1302		S235JR			
DESIGNED BY: tamer		Aufnahmestück				I	—
DATE: 07.2013						H	—
CHECKED BY: XXX						G	—
DATE: XXX						F	—
SIZE A3		DLR FA				E	—
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) 0,01	DRAWING NUMBER 11				D	—
						C	—
						B	—
						A	—
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.							







4

3

2

1

H

G

F

E

D

C

B

A

4

3

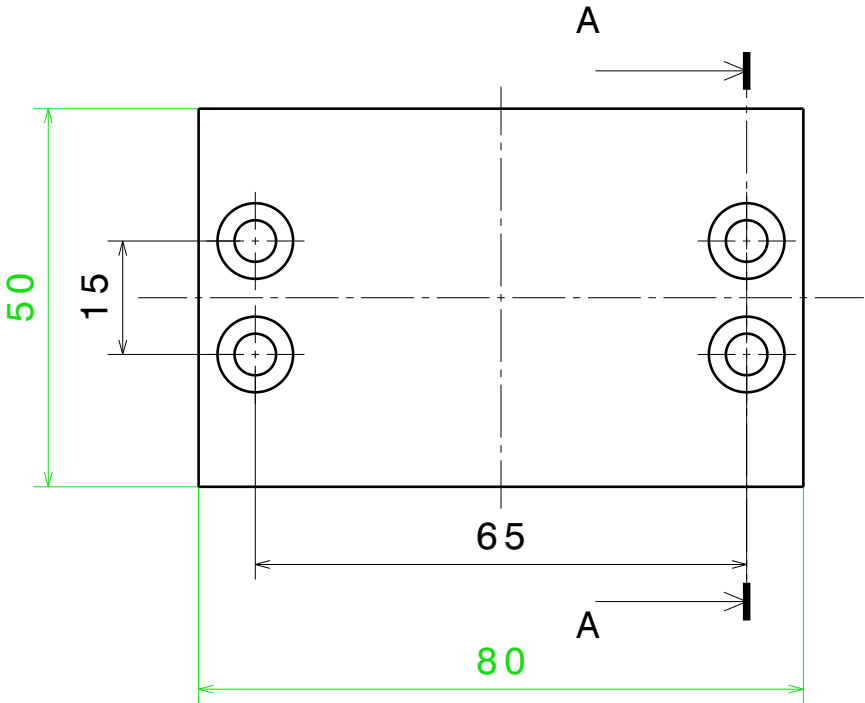
2

1

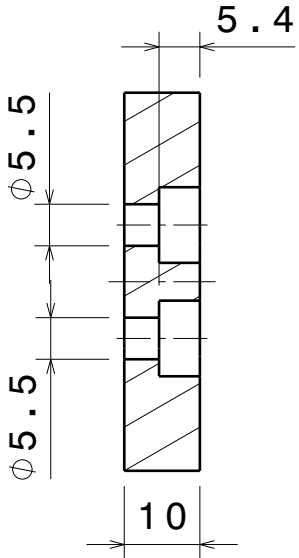
B

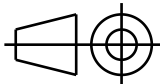
A

Alle Flachsenkungen haben 10 mm Durchmesser,  
5.4 mm Tiefe.



Schnitt A-A



Zul. Abw.: ISO 2768 -mK		Oberfläche: ISO 1302		Material: S235JR		
DESIGNED BY: tamer DATE: 07.2013		Balkenmasse			I	—
CHECKED BY: XXX DATE: XXX					H	—
					G	—
					F	—
SIZE A3		DLR FA			E	—
					D	—
					C	—
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) 0,01	DRAWING NUMBER 14			B	—
					A	—
SHEET 1 / 1						
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.						

4

3

2

1

H

G

F

E

D

C

B

A

4

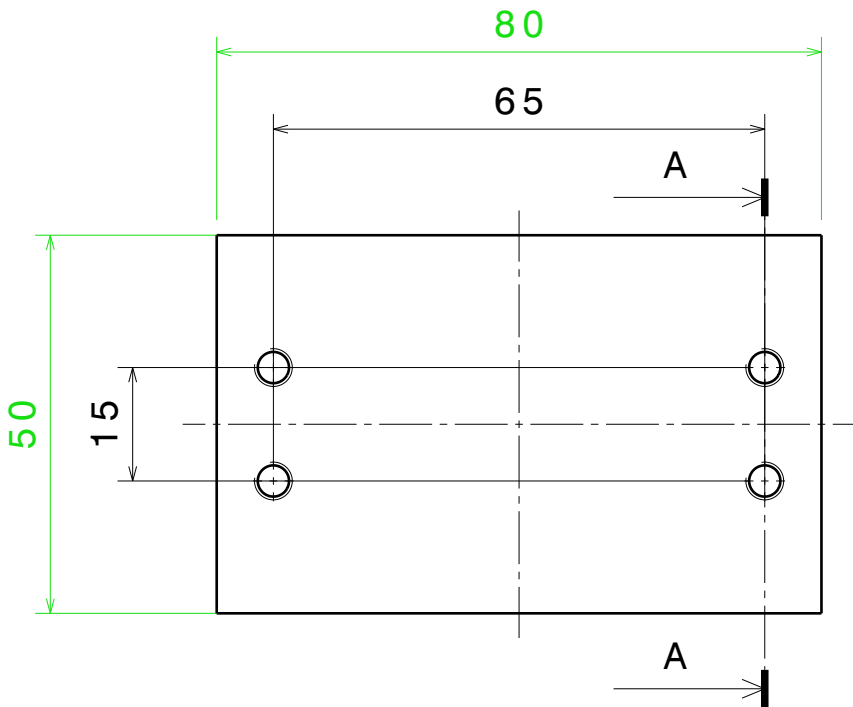
3

2

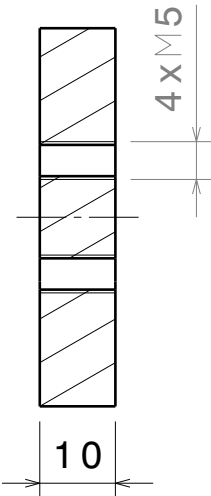
1

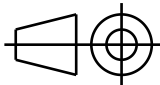
B

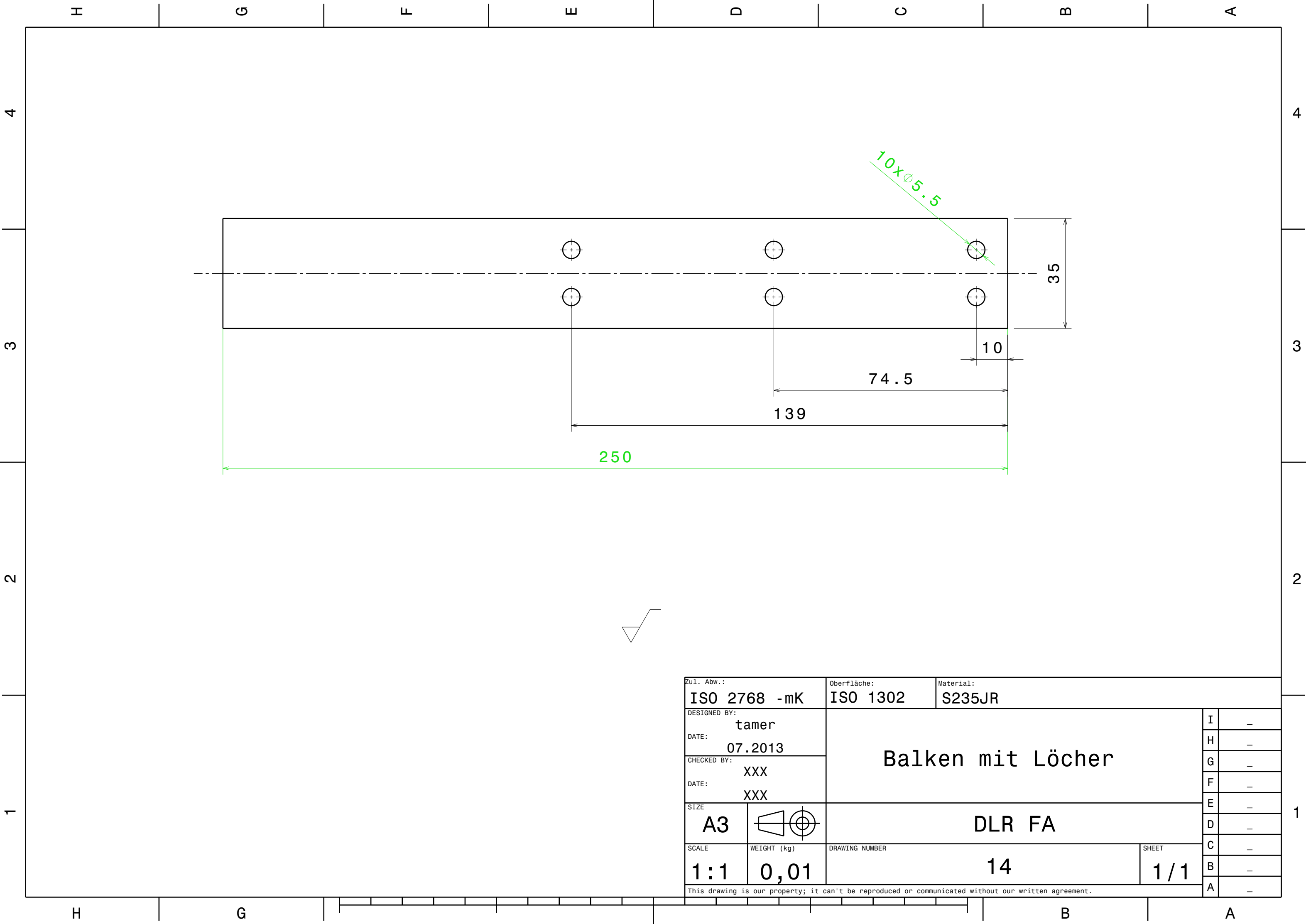
A

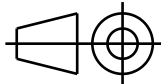


Schnitt A-A



Zul. Abw.:		Oberfläche:		Material:			
ISO 2768 -mK		ISO 1302		S235JR			
DESIGNED BY: tamer		Masse unten				I	—
DATE: 07.2013						H	—
CHECKED BY: XXX						G	—
DATE: XXX						F	—
SIZE A3		DLR FA				E	—
						D	—
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) 0,01	DRAWING NUMBER 15			SHEET 1 / 1	C	—
						B	—
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.						A	—



Zul. Abw.:		Oberfläche:		Material:			
ISO 2768 -mK		ISO 1302		S235JR			
DESIGNED BY: tamer		Balken mit Löcher				I	—
DATE: 07.2013						H	—
CHECKED BY: XXX						G	—
DATE: XXX		DLR FA				F	—
SIZE A3						E	—
		DRAWING NUMBER 14				D	—
SCALE 1:1						C	—
WEIGHT (kg) 0,01		SHEET 1 / 1				B	—
						A	—
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.							