

# **Klein, aber kalibriert: Vergleich unterschiedlicher Verfahren zur photogrammetrischen Kalibrierung einer extrem miniaturisierten CMOS-Kamera für Messtechnik-Anwendungen**

**Besborodow, Andrej; Faber, Christian**  
Hochschule Landshut

## **Kurzfassung**

Ziel einer geometrischen Kamerakalibrierung ist es, eine möglichst genaue Aussage über den Zusammenhang zwischen den 3D-Koordinaten der beobachteten Szene (Sichtstrahlen) und den zugehörigen 2D-Bildkoordinaten (Pixeln) zu erhalten. Eine solche Kalibrierung ist Grundvoraussetzung für die quantitative Auswertung in der optischen 3D-Messtechnik. Dies ist speziell für miniaturisierte Kameras von besonderer Bedeutung, da diese in der Regel eine sehr große Verzeichnung aufweisen. Andererseits stellt die Miniaturisierung aber auch besondere Anforderungen an den Kalibrierprozess.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden zwei unterschiedliche Kalibrierverfahren für den Einsatz zur Kalibrierung einer miniaturisierten Kamera quantitativ miteinander verglichen und bewertet. Zur Bewertung wurde nicht nur die Genauigkeit der Verfahren betrachtet (Restfehler der jeweiligen Rückprojektionen), sondern auch deren Anwenderfreundlichkeit und Praxistauglichkeit.

## **1. Einleitung**

Nach der VDI/VDE Roadmap Fertigungsmesstechnik 2020 liegen die Herausforderungen und Trends der Fertigungsmesstechnik der nächsten Jahre vor allem in einer gesteigerten Flexibilität und Miniaturisierung der verwendeten Sensoren [1]. Dies betrifft auch Sensorkomponenten wie z.B. Kameras. Die messtechnische Verwendung derart miniaturisierter Kameras für optische 3D-Sensoren ist jedoch nur dann sinnvoll möglich, wenn die einzelnen Parameter zu deren geometrischen Beschreibung hinreichend gut bestimmt werden können, da durch die Miniaturisierung das Verhalten der Kamera in der Regel stark von dem eines idealisierten Modells abweicht. Die möglichst genaue Bestimmung der Geometrie- und Verzeichnungsparameter wird mit dem Vorgang einer Kamerakalibrierung erreicht. Im Folgenden werden am Beispiel der NanEye2D-Kamera von ams zwei unterschiedliche Modelle der photogrammetrischen Kamerakalibrierung gegenübergestellt und quantitativ verglichen.

## 2. Kamera NanEye2D von ams

Die NanEye2D Kamera gehört zu den kleinsten derzeit auf dem Markt verfügbaren Kameras. Die extrem miniaturisierte Bauweise mit 1,0mm x 1,0mm x 1,7mm geht mit einer sehr kurzen Brennweite bzw. sehr weitwinkligen Optik (Bildwinkel 120°) einher. Die Kamera hat einen CMOS Chip mit 250 x 250 Pixeln und eine Pixelgröße von 3µm [9].

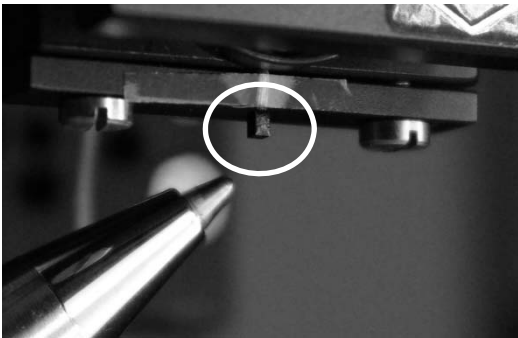


Abb. 1: NanEye2D Kamera (umkreist) im Vergleich zu einer Kugelschreiberspitze.

## 3. Kamerakalibrierung

Eine Vielzahl von Kalibrierverfahren wurde bereits entwickelt. Einige dieser Kalibrierverfahren wurden von Remondino [7] verglichen und bewertet. Die meisten Verfahren zur Kamerakalibrierung benutzen als Grundlage das Lochkameramodell bzw. das erweiterte Lochkameramodell. Die hier verwendeten Kalibriersoftwarepakete *Australis* von Photometrix und *Camera Calibrator* von Matlab basieren beide auf dem erweiterten Lochkameramodell und dem Prinzip der Selbstkalibrierung. Als Eingangsdaten werden in beiden Fällen Aufnahmen einer planaren Kalibrierplatte mit für die jeweilige Software unterschiedlichen Mustern in verschiedenen Winkellagen benutzt.

### 3.1. Einfaches Lochkameramodell

Beim einfachen Lochkameramodell beschränkt sich die geometrische Beschreibung für jedes Kamerapixel auf die sogenannten Hauptstrahlen, welche durch die Mitte der Eintrittspupille, das sogenannte „Kamera- oder Projektionszentrum“, verlaufen. Damit können durch dieses Modell nur Geometrieigenschaften (Abbildungsmaßstab, Perspektive), nicht aber Schärfeeigenschaften (Aberrationen, Tiefenschärfe) abgebildet werden. Ist die Lage der Eintrittspupille unabhängig vom Objektstand, so entspricht jeder Hauptstrahl einem sogenannten „Sichtstrahl“, d.h. der Menge derjenigen 3D-Punkte im Raum, die auf das jeweils betrachtete Kamerapixel abgebildet werden (siehe Abb. 2). Der Punkt, in dem die optische Achse auf die Bild- bzw. Chipebene trifft, wird als „Hauptpunkt“ bezeichnet. Der Abstand zwischen Hauptpunkt und Kamerazentrum ist die sogenannte „Kamerakonstante“  $c$ .

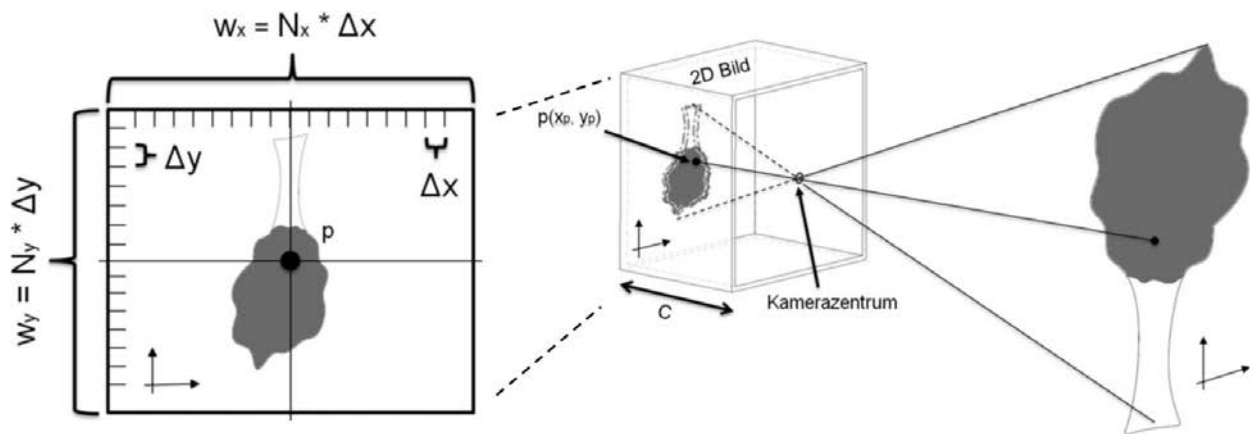


Abb. 2: Skizze des einfachen Lochkameramodells

Damit umfasst das einfache Lochkameramodell folgende („innere“) Parameter:

- Kamerakonstante  $c$
- Hauptpunkt  $p(x_p, y_p)$
- Pixelgröße  $\Delta x, \Delta y$
- Chipgröße  $w_x, w_y$  (oder alternativ Pixelanzahl  $N_x, N_y$ )

### 3.2. Erweitertes Lochkameramodell

Das am häufigsten verwendete Modell zur Kamerakalibrierung ist das sogenannte *erweiterte Lochkameramodell*, das sich durch zusätzliche Parameter zur Beschreibung der Verzerrung vom einfachen Lochkameramodell unterscheidet. Dieses Modell setzt voraus, dass der Hauptpunkt das Zentrum der Verzerrung ist und – wie beim einfachen Lochkameramodell – alle Sichtstrahlen durch das optische Zentrum verlaufen [4]. Die hier verwendeten photogrammetrischen Kalibriermodelle basieren alle auf dem erweiterten Lochkameramodell.

### 3.3. Resektion

Mithilfe der sogenannten Resektion („räumlicher Rückwärtsschnitt“) können für ein bekanntes Objekt dessen Lage und Orientierung im Raum relativ zur Kamera – bzw. gleichbedeutend Lage und Orientierung der Kamera relativ zu diesem Objekt, d.h. die sogenannten äußeren Parameter, in Form der 6 Festkörper-Freiheitsgrade ermittelt werden. Dies setzt aber ein hinsichtlich der inneren Parameter bereits kalibriertes System voraus.

### 3.4. Bündelblockausgleich

Der Bündelblockausgleich wird zur Optimierung des Sichtstrahlenbündels einer 3D-Szene (bestehend aus mehreren Perspektiven) benutzt. Durch diese Optimierung können sowohl die äußeren und inneren Kameraparameter als auch die Punkte der 3D-Szene selbst – ausgehend von sinnvollen Startwerten – um ein

Vielfaches verbessert werden. Diese Verbesserung führt zu einer Verminderung des Rückprojektionsfehlers [11].

#### 4. Australis von Photometrix

Die photogrammetrische Kalibriersoftware Australis von Photometrix verwendet das Kameramodell nach Fraser [2], basierend auf dem in der Photogrammetrie verbreiteten „Zehn-Parameter-Modell“.

Folgende Parameter werden dabei berechnet [10]:

- Interne Kameraorientierung:  $c, x_p, y_p$
- Radiale Verzeichnung:  $k_1, k_2, k_3$
- Tangentiale Verzeichnung:  $p_1, p_2$
- Nicht-orthogonale Effekte in der Bildebene:  $b_1, b_2$

Diese zehn Parameter beschreiben die innere Kamerageometrie und deren Abweichungen zum reinen geometrischen Strahlensatz des einfachen Lochkameramodells. Die interne Kameraorientierung beschreibt wie im einfachen Lochkameramodell das optische Zentrum und den Hauptpunkt. Die Parameter der radialen und tangentialen Verzeichnung bestimmen die Korrekturfunktionen. Parameter der nicht orthogonalen Effekte in der Bildebene (Scherparameter) spielen in digitalen Kameras keine Rolle mehr und werden deshalb auf 0 gesetzt.

Die Korrektur der rückprojizierten Bildkoordinaten nach dem einfachen Lochkameramodell  $(x_{meas}, y_{meas})$  in die korrigierten Bildkoordinaten  $(x_{corr}, y_{corr})$  nach Berücksichtigung der Verzeichnung wird über den folgenden Verzeichnungsansatz durchgeführt:

$$x = x_{meas} - x_p$$

$$y = y_{meas} - y_p$$

$x$  und  $y$  sind nun bezüglich des Hauptpunktes ausgerichtet.

$$r^2 = x^2 + y^2$$

$$dr = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7$$

$$x_{corr} = x_{meas} - x_p + x \frac{dr}{r} + p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2xy + b_1x + b_2y$$

$$y_{corr} = y_{meas} - y_p + y \frac{dr}{r} + p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1xy$$

Zur Transformation der Pixelkoordinaten in metrische Bildkoordinaten siehe Handbuch Australis Appendix B [6].

## 5. Camera Calibrator von Matlab

Der Kalibrieralgorithmus der Computer Vision System Toolbox benutzt das vorgeschlagene Kameramodell von Jean-Yves Bouguet [8] und Zhang [3].

Auch hier wird das Zehn-Parameter-Modell verwendet, allerdings mit dem Unterschied, dass die nichtorthogonalen Effekte von vornherein nicht berücksichtigt werden. Folgende Parameter werden berechnet:

- Interne Kameraorientierung:  $f_c$ ,  $c_c$ ,  $\alpha_c$
- Verzeichnung:  $k_c1$ ,  $k_c2$ ,  $k_c3$ ,  $k_c4$ ,  $k_c5$

Die Korrektur der Bildkoordinaten wird von Jean-Yves Bouguet [8] mit folgendem Algorithmus durchgeführt. Das sich hierdurch ergebende Kameramodell hat eine sehr große Ähnlichkeit zum Modell von Heikkila und Silven [6]:

$$x_n = \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

$$x_d = \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \end{bmatrix} = (1 + k_c(1)r^2 + k_c(2)r^4 + k_c(5)r^6)x_n$$

$$d_x = \begin{bmatrix} 2k_c(3)xy + k_c(4)(r^2 + 2x^2) \\ k_c(3)(r^2 + 2y^2) + 2k_c(4)xy \end{bmatrix}$$

$$x_p = f_c(1)(x_d(1) + \alpha_c x_d(2)) + c_c(1)$$

$$y_p = f_c(2) x_d(2) + c_c(2)$$

Jean-Yves Bouguet	Clive Fraser
$f_c(1)$ und $f_c(2)$	$c$
$c_c(1)$	$x_p$
$c_c(2)$	$y_p$
$\alpha_c$	
$k_c(1)$	$k_1$
$k_c(2)$	$k_2$
$k_c(3)$	$p_2$
$k_c(4)$	$p_1$
$k_c(5)$	$k_3$

Tab. 1: Die Tabelle zeigt die Abhängigkeit zwischen den zwei Notations-Schemata von Jean-Yves Bouguet und Clive Fraser. Die Parameter von C. Fraser haben alle [mm] als Einheit. Dagegen sind die Parameter von J.-Y. Bouguet in Pixeln angegeben, mit Ausnahme von  $f_c(1)$  und  $f_c(2)$ , die auch bei ihm in [mm] angegeben werden.

## 6. Kalibrierplatten

Die Kalibrierplatten wurden mit der PCB Design Software „Target“ entworfen und mit einem Fotoplotter auf einem Film mit einer Auflösung von 16000dpi hergestellt.

Durch die sehr hohe Auflösung konnte das Muster der Kalibrierobjekte (Schachbrett bzw. Punktraster) sehr genau gedruckt werden. Dies ist wichtig, da die Ecken des Schachbretts bzw. die Mittelpunkte der Kreise für die Kalibrierung benutzt werden.

Die Abstände zwischen den Punkterastern einerseits und den Schachbrettfeldern andererseits wurden gleich gewählt, um einen möglichst genauen Vergleich durchführen zu können.

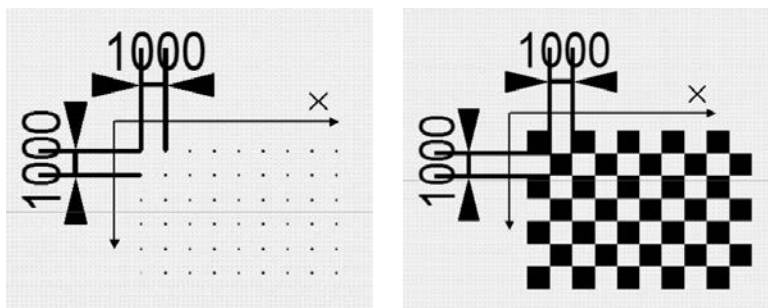


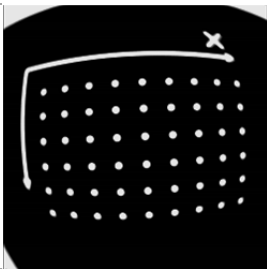
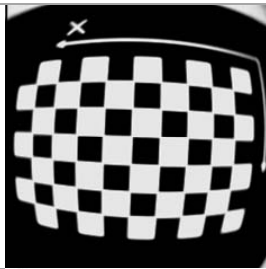
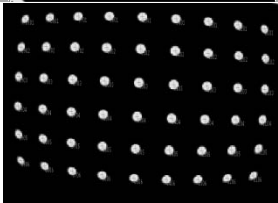

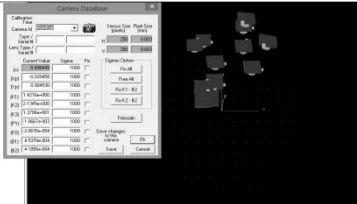
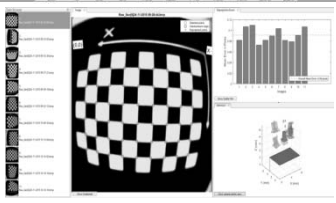
Abb. 3: Zwei Kalibrierplatten mit Punkteraster für Australis (linkes Bild) und Schachbrettmuster für Matlab (rechtes Bild). Beide Kalibrierplatten haben einen Pitch-Abstand zwischen den Punkten von 1mm (1000µm).

## 7. Quantitative Auswertung

Zur quantitativen Auswertung gehört ein möglichst objektiver Vergleich der beiden Kalibrierprogramme. Im ersten Schritt wird zunächst mit beiden Programmen eine Kalibrierung mit möglichst vergleichbaren Bildaufnahmen der jeweils geforderten Kalibrierplatte (Australis: Punkteraster; Matlab: Schachbrett) durchgeführt. Im zweiten Schritt werden für eine bessere Vergleichbarkeit nur die Markenkoordinaten einer Kalibrierplatte (Schachbrett) verwendet, um eine Kalibrierung mit beiden Programmen basierend auf exakt gleichen Eingangsdaten durchzuführen.

### 7.1. Gesamtvergleich der Kalibrierprogramme mit unterschiedlichem Bildmaterial

Der Gesamtvergleich beider Programme stellt die beiden oben vorgestellten Algorithmen unter Verwendung der jeweils eigenen Bildverarbeitung zur Punkt-Lokalisierung (Australis: Kreise, Matlab: Schachbrett) gegenüber.

Gesamtvergleich	Australis	Matlab
Bildaufnahme:		
Markenlokalisierung durch Bildverarbeitung:		
Kalibrierung mit dem jeweiligen Algorithmus:		
RMS-Rückprojektionsfehler:	0,08 $\mu$ m	0,27 $\mu$ m

Tab. 2: Vergleich der beiden Kalibrierprogramme mit der jeweils eigenen Bildverarbeitung zur Punkt-Lokalisierung.

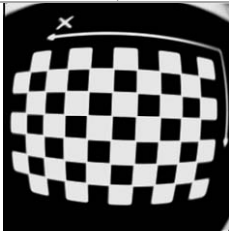

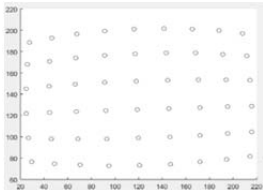
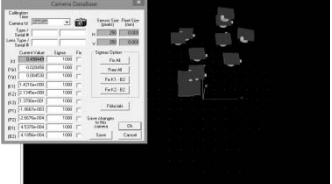
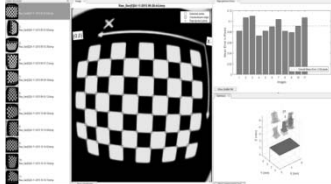
## 7.2. Vergleich der Kalibrierprogramme mit gleichem Bildmaterial

Um einen Vergleich mit exakt gleichen Eingangsdaten durchzuführen, wurden nur die Bildaufnahmen vom Schachbrettmuster verwendet. Die Markenlokalisierung wurde mit der Bildverarbeitung von Matlab durchgeführt und anschließend als sogenanntes „Image Coordinate File“ (icf-File) exportiert. Ein Image Coordinate File ist eine Tabelle aller Markenpositionen in Bildkoordinaten.

Der minimale RMS<sup>1</sup>-Rückprojektionsfehler der Single Calibration App von Matlab ergab somit einen Wert von 0,27 $\mu$ m (entsprechend 0,09 Pixeln). Der RMS-Rückprojektionsfehler der Australis Software von Photometrix ergab bei Verwendung der eigenen Australis-Bildverarbeitung zur Markenlokalisierung einen deutlich besseren Wert von 0,08 $\mu$ m (entsprechend 0,027 Pixeln). Verwendet man allerdings die gleichen Bild- bzw. Markenkoordinaten wie beim Matlab-Algorithmus, so ergibt sich ein nur noch wenig verbesserter Wert von 0,23 $\mu$ m (entsprechend 0,08 Pixeln). Diese etwas höhere Genauigkeit bzw. der etwas kleinere Rückprojektionsfehler der Australis Software bei gleichen Eingangsdaten kommt höchstwahrscheinlich durch den zusätzlichen Schritt des Bündelblockausgleichs. Man

<sup>1</sup> RMS: Quadratisches Mittel

sieht, dass der Hauptanteil des Genauigkeitsunterschieds der Komplettpakete eindeutig durch die unterschiedlichen Bildverarbeitungsansätze begründet ist.

Gesamtvergleich	Australis	Matlab
<b>Bildaufnahme:</b>		
<b>Identische Markenpositionen</b>		
<b>Kalibrierung mit dem jeweiligen Algorithmus:</b>		
<b>RMS-Rückprojektionsfehler:</b>	0,23µm	0,27µm

Tab. 3: Vergleich der beiden Kalibrierprogramme mit gleicher Bildverarbeitung

### 8. Fazit

Der zeitliche Aufwand der Kalibrierung ist mit Australis um ein Vielfaches höher, da die Lokalisierung der einzelnen Marken und die Orientierung der Kalibrierplatte für jedes Bild einzeln manuell durchgeführt werden muss. Zudem benötigt Australis sinnvolle Startwerte für die Parameter, was sich als mögliche Fehlerquelle erweisen kann. Dagegen erfolgt sowohl die Lokalisierung der Marken als auch die Bestimmung der Orientierung der Kalibrierplatte in Matlab vollkommen automatisch für alle Bilder. Hierfür wird jedoch vorausgesetzt, dass bei allen Aufnahmen jeweils die ganze Platte vollständig im Bild zu sehen ist. Da dies aber nicht bei allen Anwendungen möglich ist, wird gegebenenfalls nur ein Teilbereich des Chips kalibriert. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Matlab-Software benutzerfreundlicher und weniger anfällig für Bedienfehler ist – wenn auch ein wenig auf Kosten der Genauigkeit.

### Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung im Rahmen der Förderlinie FHProfUnt beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (Projekt: IMi-Sens, Förderkennzeichen: 03FH048PB4).



## Literatur

- [1] Imkamp, D.; et. al.: tm – technisches Messen, vol. 79, 2012, pp. 433-439.
- [2] Fraser, Clive S.: Digital camera self-calibration. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 52(4), 1997, pp. 149-159.
- [3] Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, No. 11, 2000, pp. 1330-1334.
- [4] Knauer, Markus C.: Absolute Phasenmessende Deflektometrie. Naturwissenschaftliche Fakultät, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 05/2006.
- [5] Photometrix: User Manual Australis Vision 6.01.2004. (Online) <http://www.photometrix.com.au.21>.
- [6] Heikkila, J.; Silven, O.: A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997.
- [7] Digital Camera Calibration Methods: Considerations and Comparisons, Fabio Remondino\*, Clive Fraser\*\*, \*Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich, Switzerland, \*\*Department of Geomatics, University of Melbourne, Australia, 09/2006.
- [8] Bouguet, J. Y.: Camera Calibration Toolbox for Matlab. Computational Vision at the California Institute of Technology. (Online) [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/) (letzter Zugriff 14.01.2016).
- [9] NanEye Stereo Module, Awaiba, Version 4.1. (Online) <http://www.awaiba.com/download/NanEyeModule> (letzter Zugriff 16.06.2015).
- [10] Image coordinate correction function in Australis. (Online) <http://www.photometrix.com.au/downloads/australis/Image%20Correction%20Model.pdf> (letzter Zugriff 06.01.2016).
- [11] Kraus, Karl: Photogrammetrie. Band 1, 7. Auflage, Verlag Walter de Gruyter, Berlin 2004.

## Kontakt

Andrej Besborodow, M.Eng.  
Hochschule für angewandte Wissenschaften Landshut  
Am Lurzenhof 1  
84036 Landshut  
E-Mail: [andrej.besborodow@haw-landshut.de](mailto:andrej.besborodow@haw-landshut.de)